

## 关于宇宙锂丰度问题

熊大闰

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

本文对宇宙锂的丰度作了一简要评介。星族 I 的太阳型恒星大气锂的丰度随恒星质量的减小和年龄的增大而迅速降低。恒星大气锂的衰减主要是发生在恒星进入主序后的阶段。似乎有迹象表明, 恒星大气锂的衰减速率随恒星的年龄增大而减小。与星族 I 恒星相反, 贫金属的星族 II 的 F 和早型 G 型矮星大气锂丰度弥散很小, 且其丰度比年轻的星族 I 恒星和星际介质锂的丰度约低一个量级。标准的大爆炸宇宙模型预期较低的原始宇宙锂丰度, 它大致同极端贫金属星族 II F 型矮星的大气锂丰度相合, 但理论预期的重子密度却远小于从星系和星系团大尺度结构和动力学所推求的宇宙密度。

## 一、引 言

锂有两种稳定的同位素  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^7\text{Li}$ 。他们分别从温度  $2.0 \times 10^6$  和  $2.5 \times 10^6 \text{K}$  开始, 因同质子的核反应而毁坏。对于晚型星, 对流将恒星表层的物质带入高温的内部。当对流区足够深, 恒星大气锂就会因内外物质的对流混合而逐渐衰减。因此恒星大气锂的丰度提供了一种追踪恒星各个演化阶段对流区演化的重要线索, 从而成为检验恒星对流与演化理论的一个很敏感的限制条件。

锂等轻元素 ( $A < 12$ ) 的原始元素核合成是宇宙学的一个重要组成部分。 ${}^7\text{Li}$  等轻元素的丰度提供追踪宇宙早期历史的一重要线索, 是鉴别各种宇宙论模型的最重要的观测诊断。本文第二到第四节分别对  ${}^7\text{Li}$  丰度的宇宙学含义、恒星大气锂的衰减及有关初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  丰度的问题作一简短的评介, 在第五节则对当前关于宇宙锂丰度的研究作一简短小结。

二、 ${}^7\text{Li}$  丰度的宇宙学含义

现在流行的大爆炸宇宙学模型主要是根据如下两个观测事实:

- (1) 宇宙红移的哈勃定律;
- (2) 2.7K 宇宙微波背景辐射。

D、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$  和  ${}^7\text{Li}$  等轻元素的原始核合成是大爆炸宇宙模型的自然结果。介绍原始核合成及其同观测比较的评述文章很多, 本文只能简要地介绍一下其主要结果。欲尽其详的读者可参见 Boesgaard 和 Steigmen<sup>[1]</sup> 以及 Audouze<sup>[2]</sup> 所写的专门性评述性文章。

现在有好多种不同的大爆炸宇宙论模型，其中最简单的一种称为标准的(Standard)大爆炸宇宙模型。标准的大爆炸宇宙模型的一个最基本假定是宇宙均匀各向同性。在标准宇宙论模型下，宇宙的结构只依赖于当前的宇宙密度 $\rho$ ：当 $\rho < \rho_c$ ，宇宙是开放的，即宇宙将无限膨胀下去；当 $\rho = \rho_c$ ，宇宙是平直的，即对应于所谓 Einstein-de Sitter 宇宙；当 $\rho > \rho_c$ ，宇宙是闭合的。其中 $\rho_c$ 是所谓临界宇宙密度：

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 1.9 \times 10^{-29} \left( \frac{H}{100} \right)^2 \text{ g/cm}^3$$

上式中，哈勃常数 $H$ 表为  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

大爆炸宇宙论模型的另一个基本假定是宇宙早期经历了一个非常高温 ( $T \gtrsim 10^{13} \text{K}$ ) 的时期。当温度  $T \approx 10^{12} \text{K}$ ，质子、中子、电子和中微子之间达到统计平衡。当温度降至  $T \approx 10^{10} \text{K}$ ，

弱相互作用变得不足以维持中子与质子之间的统计平衡，中子衰变为质子。当温度进一步降低到  $10^9 - 10^8 \text{K}$  时，中子与质子的反应速率变得快于 D 的光致蜕变速率，中子和质子反应形成 D。继 D 形成之后，通过  $D(p, \gamma)^3\text{He}$ ， $D(D, n)^3\text{He}$ ， $^3\text{H}(p, \gamma)^4\text{He}$ ， $^3\text{He}(D, p)^4\text{He}$ ， $^3\text{H}$ ， $(^3\text{H}, 2p)^4\text{He}$ ， $^4\text{He}(^3\text{He}, \gamma)^7\text{Li}$ ， $^4\text{He}(^3\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$ ， $\text{Be}(e^-, \nu_e)^7\text{Li}$  等核反应依次形成  $^3\text{He}$ ， $^4\text{He}$  和  $^7\text{Li}$  等原子量  $A = 3 - 11$  的各种同位素。

标准的大爆炸原始核合成理论已由很多不同的研究者讨论过了<sup>[3-9]</sup>。图 1 绘出了 Yang 等人<sup>[9]</sup>理论计算得到的 D、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  和  $^7\text{Li}$  的初始核合成形成的元素丰度同当今宇宙重子密度  $\rho_b$  (或与之等价的宇宙重子与光子数密度之比  $\eta = n_b/n_\gamma$ ) 的依赖关系。由于核反应速率随重子的密度增大而增大，因此原始宇宙核合成形成的  $^4\text{He}$  丰度随重子密度增大单调增大；D 和  $^3\text{He}$  丰度随重子密度增大而单调减小。而  $^7\text{Li}$  的变化呈一马鞍型。这是因为对于低的核密度 ( $\eta \lesssim 3 \times 10^{-10}$ )， $^7\text{Li}$  主要是由  $^4\text{He}(^3\text{H}, \gamma)^7\text{Li}$  产生，由  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$  反应而遭破坏。后一反应随核密度增大而增大，这导致低密度时， $^7\text{Li}$  丰度随密度增大而减小；当核密度  $\eta \gtrsim 3 \times 10^{-10}$ ， $^7\text{Li}$  主要是通过  $^4\text{He}(^3\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$ ， $^7\text{Be}(e^-, \nu_e)^7\text{Li}$  而产生。这个反应随核密度增大而增大的速度快于  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$  衰减的速度，这导致在高密区  $^7\text{Li}$

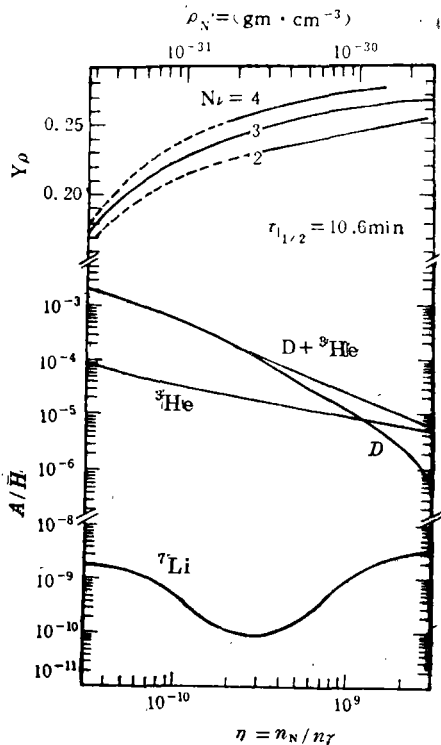


图 1 标准大爆炸宇宙学模型所预期的初始 D、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$  和  $^7\text{Li}$  丰度随重子密度的变化。横坐标为当今宇宙重子密度  $\rho_b$  或与之等价的宇宙重子与光子数密度之比  $\eta$ 。其中 D、 $^3\text{He}$  和  $^7\text{Li}$  的丰度是表成该同位素与氢原子的数密度之比  $A/H$ ；而  $^4\text{He}$  的丰度  $Y_p$  是按重量计的相对含量。 $^4\text{He}$  的三条曲线分别表示中微子家族品种数  $N_\nu$  分别等于 2、3 和 4 的初始  $^4\text{He}$  丰度随宇宙重子变化的情况<sup>[9]</sup>

的丰度随重子密度增大而增大。在  $\eta \approx 3 \times 10^{-10}$ ， $^7\text{Li}$  丰度有一极小值。

另一个常用的宇宙重子密度参数  $\Omega_B$  定义为当今宇宙重子密度  $\rho_B$  与临界宇宙密度  $\rho_C$  之比：

$$\Omega_B = \frac{\rho_B}{\rho_C} \approx 3.5 \times 10^7 \eta \left( \frac{100}{H} \right)^2 \left( \frac{T}{2.7} \right)^3$$

不同作者进行的标准大爆炸宇宙核合成的研究得到基本上大致相同的结论，现概括如下：

(1) 如果初始宇宙  ${}^4\text{He}$  的丰度  $Y_P \lesssim 0.24$ ，则中微子家族的品种不可能超过 3<sup>[8]</sup>；即除掉电子中微子  $\nu_e$ 、 $\mu$  介子中微子  $\nu_\mu$  和  $\tau_{\text{os}}$  中微子  $\nu_\tau$  外，不可能再有其他类型的中微子；假若  $Y_P$  仅有  $\approx 0.23$ ，则中微子家族仅可能有两种品种，即仅有  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$  能被认为是真实的基本粒子，而  $\nu_\tau$  仅能看成是  $\nu_e$  和  $\nu_\mu$  的一种复合体。图 1 中  ${}^4\text{He}$  的 3 条理论曲线，分别代表中微子家族品种数  $N_\nu$  分别为 2, 3 和 4 的初始宇宙  ${}^4\text{He}$  丰度  $Y_P$  随宇宙重子密度变化的情况，每增加一种新的中微子品种， $Y_P$  约增大 1.4%<sup>[9]</sup>。

(2) 除非考虑银河系化学演化，标准大爆炸宇宙元素合成理论所预期的 D,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  和  ${}^7\text{Li}$  的丰度不可能同当前所观测到的宇宙元素丰度相合。

Delbourgo-Salvader 等人<sup>[10]</sup>根据一种简单的银河演化模型，计算了银河系 D,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  的丰度随时间的演化，得到一组相合解。该模型预期的以上四种轻同位素的初始宇宙丰度(按重量计)分别为  $3 \times 10^{-5} \leq X(\text{D}) \leq 3 \times 10^{-4}$ ;  $3 \times 10^{-5} \leq X({}^3\text{He}) \leq 6 \times 10^{-5}$ ;  $0.235 \leq Y_P \leq 0.255$ ;  $5 \times 10^{-10} \leq X({}^7\text{Li}) \leq 2 \times 10^{-9}$ 。此时对应的宇宙重子密度  $\eta = (1.2-4.5) \times 10^{-10}$ 。哈勃常数  $H$  在  $50-100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  之间，这意味着宇宙重子参数  $\Omega_B$  在  $0.04-0.06$  之间。其他的研究者所估计的数值大同小异，宇宙重子密度参数  $\eta$  的中值大致都接近于 3。 ${}^7\text{Li}$  的初始宇宙丰度接近图 1 曲线的最低点，即标准的大爆炸宇宙模型预期一较低的初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度。

根据河外星系和星系团推求的宇宙动力学密度  $\Omega \approx 0.1-0.3$ 。因此，标准的大爆炸宇宙模型所预期的宇宙重子密度远小于由宇宙大尺度结构所推求的动力学密度。因此现在出现了好些非标准的大爆炸宇宙模型。他们大致可分为两大类：其中一类要求宇宙中存在大量其他非重子型物质，例如某种仍属假想的夸克<sup>[11]</sup>、重的不稳定的中微子以及像超对称理论所预言的引力微子和光微子等<sup>[12,13]</sup>；另一类非标准的大爆炸宇宙模型是基于宇宙的非均匀性，这种非均匀性是由夸克-强子相变时产生的。有兴趣读者可参考文献[2]和[4]。现在流行的非均匀宇宙模型一般预期一个非常高的初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度(约比标准大爆炸宇宙模型所预期的丰度高 1-2 个量级)。初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度对鉴别各种宇宙模型有着特别重要的意义。

## 二、恒星大气锂的衰减

Herbig(1965)观测了距太阳 20pc 之内 84 个 F-G 型主序星大气锂的丰度，发现锂丰度同光谱型存在紧密的关系。大约从 G0( $B-V \approx 0.6$ )开始，大气锂的丰度向晚型星方向急剧减小<sup>[16]</sup>。Wallerstein、Herbig 和 Conti 观测毕星团主序星锂的丰度，也发现它具有上述类似的行为<sup>[16]</sup>。Bodenheimer(1965)将这种晚型星大气锂的衰减解释为发生在主序前

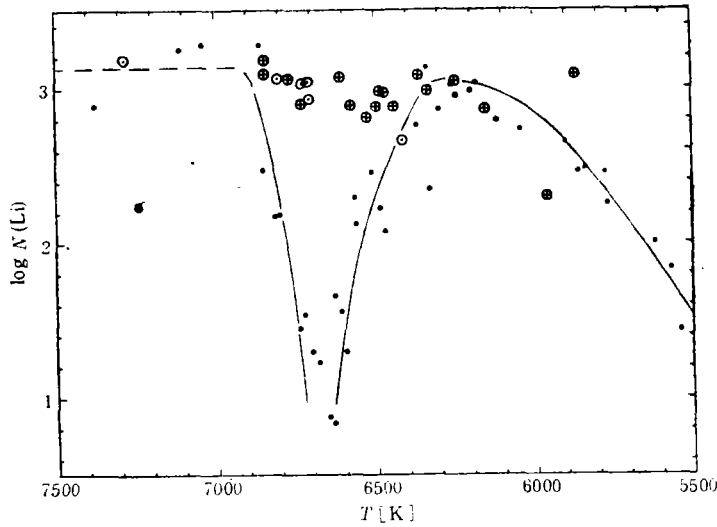


图2 昴星团(小圆圈加十字)、 $\alpha$ Per(小圆圈加点)以及毕星团(实点)恒星大气锂丰度随有效温度变化。注意对中等年龄的毕星团的F型星( $6300\text{K} \leq T_{\text{eff}} \leq 6800\text{K}$ )锂丰度呈现明显的降低;而年轻的昴星团和 $\alpha$ Per星团则未表现明显下降<sup>[16]</sup>

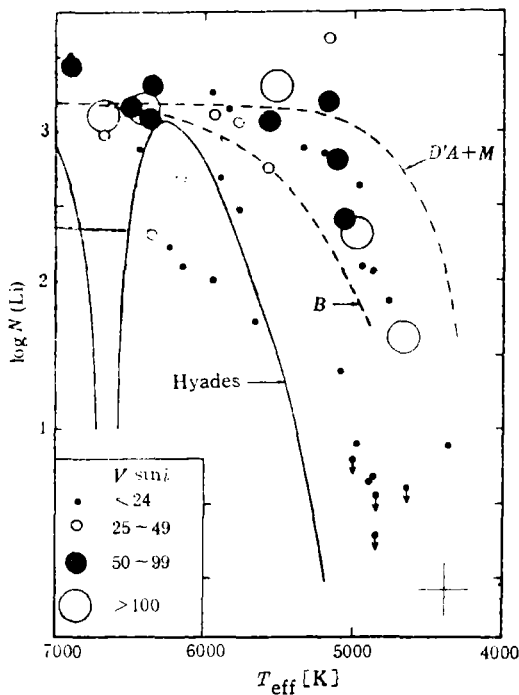


图3 年轻的 $\alpha$ Per星团大气锂丰度的弥散。横坐标为恒星的有效温度,纵坐标为大气锂丰度(氢的丰度取为 $\log N(\text{H})=12$ )。图中圆圈的大小标示恒星自转速度<sup>[19]</sup>

的重力收缩阶段<sup>[17]</sup>。可是后来的观测发现,恒星大气锂的丰度同恒星的年龄有密切关系。对于像昴星团( $7 \times 10^7 \text{yr}$ )和英仙 $\alpha$ ( $2 \times 10^7 \text{yr}$ )这样年轻的银河星团,有效温度高于 $5500\text{K}$ 的恒星,其锂的丰度都基本正常。这充分说明至少对于光谱型早于G5型的恒星,大气锂的衰减主要发生在恒星进入主序之后,而不是在主序前的引力收缩阶段。

近十年来,由于大口径望远镜和高量子效率探测器(如Reticon和CCD)的投入使用,使得有可能以更高的分辨率和信噪比观测暗弱恒星的光谱,恒星大气锂丰度的观测得到了长足的进展。现已对许多不同年龄的银河疏散星团的恒星锂丰度进行了观测研究:如像 $\alpha$ Per( $\sim 2 \times 10^7 \text{yr}$ )<sup>[18,19]</sup>、Pleiades( $\sim 7 \times 10^5 \text{yr}$ )<sup>[18,20,21,22]</sup>、Hyades( $\sim 7 \times 10^8 \text{yr}$ )<sup>[23a,b,24,25,34]</sup>、Uma( $\sim 3 \times 10^8 \text{yr}$ )<sup>[26]</sup>、Cama( $\sim 5 \times 10^8 \text{yr}$ )<sup>[27,34]</sup>、Praesepe( $\sim 7 \times 10^8 \text{yr}$ )<sup>[25]</sup>、NGC752( $\sim 1.6 \times 10^9 \text{yr}$ )<sup>[28,29]</sup>、NGC7789( $\sim 1.6 \times 10^9 \text{yr}$ )<sup>[30]</sup>、M67( $\sim 4.5 \times 10^9 \text{yr}$ )<sup>[29,31,32]</sup>和NGC188( $\sim 5-10 \times 10^9 \text{yr}$ )<sup>[33]</sup>等。观测表明,恒星大气锂的丰度明显依赖于恒星的光谱型和年龄:对于相同质量和年龄的星,大致有相同的大气锂丰度;对于光谱晚于G

型的恒星, 大气锂的丰度向晚型星方向减小。对于相同质量的恒星, 恒星大气锂丰度随星的年龄衰减。

比较毕星团和昴星团恒星大气锂的丰度, 得到  $1M_{\odot}$  质量恒星大气锂衰减  $e$  倍的时标仅约  $1.6 \times 10^8 \text{yr}$ <sup>[34]</sup>。而 Duncan 根据从昴星团到太阳所估计的  $1M_{\odot}$  质量恒星大气锂衰减  $e$  倍的时标却长达  $9.8 \times 10^8 \text{yr}$ 。这似乎表明, 恒星大气锂的衰减速率依赖于恒星的年龄。大气锂的衰减主要是发生在恒星进入主序后的最初  $\sim 10$  亿年, 老年恒星, 大气锂丰度衰减速率迅速减小。

Duncan 和 Jones<sup>[20]</sup> 首先注意到昴星团中, 同一光谱型恒星大气锂丰度存在很大的弥散 ( $\sim 1 \text{dex}$ )。尔后的观测证实了这种锂丰度的弥散<sup>[21, 22]</sup>。另一个年轻的星团  $\alpha$  Per 发现锂丰度有更大的弥散 ( $\sim 1.7 \text{dex}$ )<sup>[18, 19]</sup>。锂丰度明显同恒星自转速度有关: 对同一光谱型的恒星, 快自转的恒星较慢自转恒星有更丰富的锂含量<sup>[19]</sup>。Balachandran 等人认为可能存在两种理论解释: (1) 锂的衰减是发生在快速自转减慢的时期; (2) 星团中恒星形成持续了一段有限的时期, 快速自转的恒星比慢自转的恒星更为年轻, 因此经受较小的大气锂的衰减。图 3 绘出了  $\alpha$  Per 星团大气锂丰度随有效温度的变化, 图中大小不同的圆圈(点)表示不同的恒星自转速度。与年轻的星团不同, 对老于毕星团的银河星团, 恒星大气锂丰度并没有表现明显的弥散<sup>[35]</sup>。

Boesgaard 首先发现中老年的中型 F 型星 ( $6300\text{K} \lesssim T \lesssim 6800\text{K}$ ) 大气锂丰度较其冷 ( $T \leq 6200\text{K}$ ) 和热 ( $T \geq 6900\text{K}$ ) 两端的星要低, 形成一个漏斗状, 最低点约在  $T_{\odot} \approx 6650\text{K}$ <sup>[23a, b]</sup>。尔后在其他中老年星团亦观测到此现象<sup>[25-28]</sup>。这现象后被称之为 Boesgaard 漏斗 (funnel)。图 2 中毕星团呈现明显的 Boesgaard 漏斗; 而年轻的昴星团和  $\alpha$  Per 星团相应温度的恒星却未显示明显的锂的衰减。这说明 F 型大气锂的衰减主要是发生在昴星团 ( $\sim 7 \times 10^7 \text{yr}$ ) 和毕星团 ( $\sim 7 \times 10^8 \text{yr}$ ) 之间这段时期。Michaud<sup>[36]</sup> 用辐射和重力分离的联合作用解释了 F 型星大气锂的衰减。对于温度  $T_{\odot} > 6800\text{K}$  的早型 F 型星, 辐射压足以支持锂反抗重力分离。随着温度降低, 辐射压减小, 辐射压变得不足以抵抗重力分离, 所以中型的 F 型星大气锂因重力分离而随时间逐渐(指数)衰减。当温度进一步降低, 对流区迅速加深。对流产生有效地混合, 因此对流区是一化学均匀的大储存池。重力分离只能发生在对流区之下的辐射平衡区。对流区加深意味着储存池的容量变大, 另一方面, 随对流区加深, 内部辐射平衡区密封加大, 重力弥散系数随密度加大而降低。这两者联合作用, 使重力分离的时标长于晚型 F 型星的寿命。因此重力分离机制变得失效。这似乎很好说明 Boesgaard 漏斗现象。然而此理论预期的锂的丰度比毕星团观测的极小值高 1—2 量级, 早型 F 型星锂也应表现过丰, 这些同观测都不相合。

很明显, 太阳型恒星及晚型 K、M 型星大气锂的衰减机制同 F 型星不可能是同一种机制。曾提出过各种机制来解释晚型星大气锂的衰减, 大致可分为如下几类:

### (1) 质量损失机制

Weymann 和 Sears<sup>[37]</sup> 提出, 由于星风质量损失, 恒星不断抛弃其富锂的外层物质, 而原来更高温(因而贫锂)的内部物质补充到外层对流区中来。这样恒星光层的锂不断被稀化而逐渐衰减。Hobbs 和 Iben<sup>[38]</sup> 更精细地从演化计算估计了所要求的质量损失率随恒星质量和

年龄的变化。这种机制要求质量损失率随恒星的质量和年龄的增大迅速降低。质量损失率随年龄增大而降低是比较容易理解的,因为随着年龄的增大,恒星自转、磁场以及色球和大气活动都将迅速降低。质量损失率同这些因素可能存在紧密的关系。

### (2) 对流过冲(convective overshooting)

太阳局部对流不稳定区底部温度约为  $2 \times 10^6 \text{K}$ ,  ${}^7\text{Li}$  因核反应而毁坏约从温度  $2.5 \times 10^6 \text{K}$  开始。因此若不存在对流过冲,则不可能仅用对流来解释太阳型恒星大气锂的衰减。只要对流区足够深,对流过冲将把恒星外层的物质带入热的内部,锂在高温( $T \geq 2.5 \times 10^6 \text{K}$ )的内部因核反应而毁坏,大气锂丰度就不断衰减。Straus 等人<sup>[39,40]</sup>研究过对流过冲效应而引起的恒星大气锂的衰减。假若不考虑其他因素,不太可能仅仅用对流过冲来解释晚型星大气锂的衰减。首先,锂的核反应速率很敏感地依赖于温度,它约与温度 20 次方成正比。对流过冲产生的恒星大气锂的衰减必引起晚型星大气锂丰度随恒星表面温度降低而急剧地减小,而在某一光谱型恒星处剧烈地截断。而观测上晚型星大气锂衰减随光谱型却表现为相对平缓的变化。第二, ${}^6\text{Li}$  核反应温度( $\sim 2.0 \times 10^6 \text{K}$ )比  ${}^7\text{Li}$  核反应的温度要低得多,因而它将要衰减得快得多。若  ${}^7\text{Li}$  因对流过冲而发生了衰减,则  ${}^6\text{Li}$  将会耗尽得观测不到。可是太阳大气  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li} \approx 25$ <sup>[41]</sup>同原始太阳星云化石——陨石以及年轻星族 I 恒星  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li} \approx 12.5$  并无量级上的差别。最近,熊大闰根据他的非局部对流理论数值计算表明,似乎太阳对流区底部应存在  $10^3$ — $10^4 \text{G}$  中等强度的磁场<sup>[42]</sup>。Parker<sup>[42]</sup>从太阳活动区磁流循环及发电机理论,Dziembowski<sup>[44]</sup>从太阳 5 分钟振荡频率分裂的分析,得到类似的结论。因此,若考虑自转和磁场,并不排斥对流过冲在晚型星大气锂衰减中起某种重要作用。

### (3) 湍流弥散机制

湍流弥散的概念最早是由 Schatzman<sup>[45]</sup>提出来的。他假定湍流弥散系数  $D_T$  可表为

$$D_T = \nu R_*^*$$

其中  $\nu$  是分子(或辐射)粘滞系数,而  $R_*^*$  是所谓临界雷诺数。 $R_*^*$  是作为一个可调整参数引入的,他并没有将  $R_*^*$ (或  $D_T$ )同某种产生湍流的具体机制联系起来,因此原始的 Schatzman 理论纯属一种参数性的理论。为了解释不同元素的表面丰度,往往需要取不同的  $R_*^*$ 。尔后,Baglin 等人将这种湍流弥散归因于恒星内部(因较差自转或对流)剪切运动造成的湍流,从而引进所谓剪切湍流弥散系数<sup>[46]</sup>。根据以上剪切湍流弥散的思想,Zahn<sup>[47a,b]</sup>将湍流弥散系数同恒星自转和内部结构联系起来,将  $D_T$  表成自转角速度和某些内部结构参数的函数。Zahn 的理论曾被用来解释毕星团 F 和 G 型星大气锂的衰减<sup>[48]</sup>。

## 四、初始的宇宙 ${}^7\text{Li}$ 丰度

如我们在第二节所述, ${}^7\text{Li}$  的初始宇宙丰度对探索宇宙早期的物理条件和检验各种宇宙模型有着极其重要的意义,因此它引起人们的广泛兴趣。银河系的化学演化使得测定  ${}^7\text{Li}$  的初始宇宙丰度大大复杂化了。在银河系存在的漫长年代中,发生在恒星内部的核反应不断产生和消耗  ${}^7\text{Li}$ ,而部分改变了原始化学成份的恒星物质又通过星风或新星和超新星爆发返回星际介质。高能宇宙线粒子打在星际介质重的原子核上产生碎裂反应,形成轻的元素。这些

都大大改变宇宙原始的化学组成，我们观测到的当今  ${}^7\text{Li}$  的丰度已远非宇宙早期核合成的原始面貌了。推求初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  丰度的困难即在于怎样正确估计发生在恒星和星系中的化学演化。表 1 列出了各种天体中锂和铍的丰度(按原子数)。

表 1 观测的 Li 和 Be 的丰度(H取为 1)

	太阳大气	太阳系天体 (太阳除外)	星际介质	星族 I 年轻星	星族 II 恒星
${}^7\text{Li}$	$10^{-11}$	$2 \times 10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-10}$
${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$	0.04	0.08	0.007-0.04	0.08	
${}^9\text{Be}$	$1.4 \times 10^{-11}$	$1.4 \times 10^{-11}$	$7 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-12}$

从表 1 可见，各类天体中  ${}^7\text{Li}$  的丰度变化很大。年轻的星族 I 恒星、星际介质和太阳系天体有较为一致的较高的  ${}^7\text{Li}$  丰度( $\sim 10^{-9}$ )。这说明在太阳系形成以来的约 45 亿年中，银河系  ${}^7\text{Li}$  的丰度没有明显变化。太阳大气  ${}^7\text{Li}$  的丰度约比原始太阳星云“化石” ${}^7\text{Li}$  的丰度低 100 倍，这是因为太阳大气  ${}^7\text{Li}$  已经受了严重的衰减。与星族 I 恒星相反，温和的 ( $6000\text{K} < T_e < 6800\text{K}$ ) 星族 II 恒星有较为均匀的大气 Li(主要是  ${}^7\text{Li}$ ) 丰度。图 4 为 37 颗贫金属矮星 Li 丰度随有效温度的变化，而图 5 显示所有温度  $T_e > 5500\text{K}$  矮星 Li 丰度随金属丰度的变化。从图 5 可见，极端贫金属的星族 II 矮星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$ ) 大气 Li 的丰度确有小得多

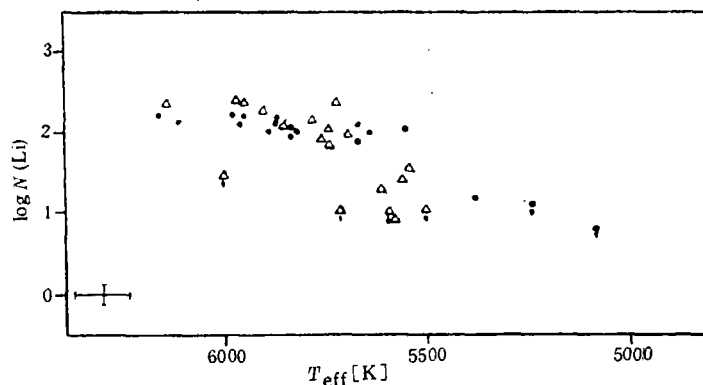


图 4 贫金属矮星 Li 丰度随有效温度  $T_{\text{eff}}$  的变化。实圆点代表极端贫金属星 ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$ )，而三角形为中等金属贫星 ( $-0.6 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq -1.4$ )<sup>[51]</sup>

的弥散。随着金属丰度增大，Li 丰度弥散增大。这种大的弥散主要是因为图 5 中包含有不同温度和年龄的恒星，他们经受了不同程度 Li 的衰减。极端金属贫的星族 II 矮星 Li 丰度弥散小，或者是因为星族 II 恒星因金属丰度低，不透明度小，对流区将较同类光谱型的星族 I 恒星要浅。因此极端金属贫的星族 II 恒星大气 Li 衰减可能很小。当然，也可能存在另一种可能性，若恒星大气 Li 的衰减速率急剧随年龄减小，也可以导致极端金属贫星族 II 恒星具有大致相同的大气 Li 的衰减。这同样可造成金属贫的星族 II 恒星大气 Li 丰度弥散小的表象。

究竟哪种天体 Li 的丰度代表初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度呢？这个问题至今并未获得解决。一派

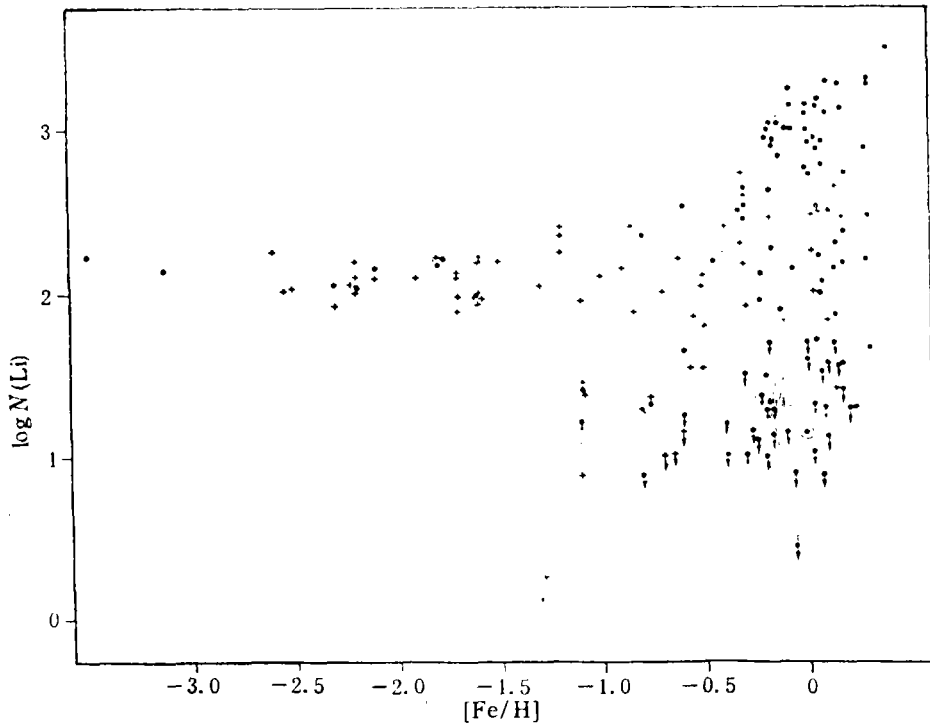


图 5 Li 丰度对金属丰度的依赖关系。实圆点为  $T_e > 6000\text{K}$  的星，+ 字代表  $6000\text{K} < T_e < 5500\text{K}$  的星， $\odot$  为太阳。log N(Li) 和 [Fe/H] 的误差棒估计为  $0.1-0.2\text{dex}^{[51]}$

人认为年老恒星大气 Li 的衰减是相当可观的，因此初始宇宙 Li 的丰度应该是大的。它应接近年轻星族 I 恒星和星际介质  ${}^7\text{Li}$  的丰度，即初始的  ${}^7\text{Li}/\text{H} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ 。非均匀宇宙模型支持高的初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  丰度。可是现今大部分人仍相信极端贫金属的星族 II 恒星代表初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度，其理由如下：

(1) 极端贫金属的星族 II 恒星是银河系最早期形成的天体，因此它是由未经(或很小经)银河系化学演化的物质组成，其大气代表了宇宙原始的化学组成。

(2) 不像星族 I 的恒星，贫金属的星族 II 恒星大气 Li 的丰度弥散极小，约仅有 2 倍左右<sup>[50,51]</sup>。这被认为是表明贫金属星族 II 恒星大气 Li 未经受严重衰减的一个证明。

(3) 星族 II 恒星大气 Li 的丰度接近标准大爆炸宇宙元素合成理论所预期的理论值。

根据极端贫金属星族 II 晚型 F 型恒星大气 Li 丰度的观测，Rebolo 等人认为它们的渐近大气 Li 的丰度  $1.6 \times 10^{-10}$  可以作为初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  丰度的很好的近似值。粗略估计其大气  ${}^7\text{Li}$  的衰减后，Rebolo 提出初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  丰度为  ${}^7\text{Li}/\text{H} = (2.0 \pm 0.5) \times 10^{-10}$ 。[52]

很自然，上述三条理由的任何一条并不是十分坚实的。一个根本问题在于我们无法精确估计星族 II 恒星大气锂的衰减。从图 4 也清楚显示，随着恒星有效温度的降低，星族 II 恒星大气锂的丰度有减小的倾向。这说明极端金属贫的星族 II 恒星，同样存在不可忽略的大气锂的衰减。除此而外，假若初始宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度确是接近于星族 II 恒星低的锂丰度，那么自然产生另一个新的问题：宇宙  ${}^7\text{Li}$  的丰度又是怎样从初始的低值升高到当前年轻星族 I 恒星和星际介质这样的高值的呢？有几种可能的候选对象曾被提出来和研究过，现简单介绍如下：



## (1) 高能宇宙线同星际介质的相互作用。

我们现在已掌握有丰富的宇宙线粒子的能谱以及它们同重元素核碰撞形成轻元素的碎裂截面的数据,使得有可能定量计算高能宇宙线同星际介质作用形成各种轻元素的数量。研究表明,除  ${}^7\text{Li}$  外,其他所有的星际介质中的轻元素( ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{10}\text{Be}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ )丰度均可用宇宙线同星际介质相互作用来解释,即它们都是宇宙线形成的次级粒子。而宇宙线同星际介质相互作用形成的  ${}^7\text{Li}$  约比观测到的丰度小一个数量级,因此不可能用它来解释  ${}^7\text{Li}$  的丰度。读者可参阅 Audouze 和 Reeves 写的评述性文章<sup>[53]</sup>或参考文献[2]。

(2) 超新星<sup>[54,55]</sup>或新星爆发<sup>[56,57]</sup>生成  ${}^7\text{Li}$ 。Vigroux 和 Arnould<sup>[57]</sup>曾表示,若银河系每年爆发 25 个新星,每次爆发抛射  $10^{-4}M_{\odot}$  质量物质,并且爆发前  ${}^3\text{He}$  的丰度为太阳的丰度的 10 倍,则足以解释当前  ${}^7\text{Li}$  的丰度。

(3) 渐近巨星支(AGB)的红巨星,氦燃烧壳经历着周期的不稳定性。当温度达到  $3 \times 10^7\text{K}$ ,通过  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  产生  ${}^7\text{Be}$ 。当对流区足够深,燃烧壳内生成的  ${}^7\text{Be}$  将被带到恒星表面来, ${}^7\text{Be}$  吸收一个电子  ${}^7\text{Be}(e, \nu){}^7\text{Li}$  衰变成  ${}^7\text{Li}$ <sup>[68]</sup>。在某些银河系的 S 型和 C 型红巨星中观测到强的 Li 线<sup>[59-61]</sup>。Smith 和 Lambert 在大小麦哲伦星云的某些 AGB 红巨星中发现非常强的 Li 线。这被认为是 AGB 红巨星中产生  ${}^7\text{Li}$  的一种观测证据。

(4) 在大多数大质量的 T Tau 型星中, Li 常表现过丰<sup>[64,65]</sup>,因此有人认为在 T Tau 型星中也产生  ${}^7\text{Li}$ 。

锂的电离电势很低,仅  $5.392\text{eV}$ ,恒星大气中锂大都处在一次电离态。一次电离锂的共振线在远紫外( $\lambda = 199\text{\AA}$ ),因此绝大多数锂丰度的观测仅是根据中性锂  $\lambda 6707$  共振双线得到的。锂丰度敏感地依赖于恒星的模型大气(有效温度、重力及对局部热动平衡的偏离)。而红巨星和 T Tau 型星大气又比较复杂,有效温度并不容易定准。此外, T Tau 型星有可能存在吸积盘。因此红巨星和 T Tau 型星大气锂丰度的测定是不十分可靠的。例如对于同样一批 SC 型红巨星, Kipper 和 Wallerstein<sup>[66]</sup>测定的大气锂丰度就系统比 Boesgaard<sup>[60]</sup>的值要小约一个数量级。又如 Duncan<sup>[67]</sup>根据锂的  $\lambda 6103$  推算 T Tau 型星 BP Tau 锂的丰度就要比由  $\lambda 6707$  推求的丰度小 2 倍,他的结论是没有充分的证据说明此星的锂丰度显著超过典型星族 I 恒星的锂丰度。

上述银河系不断有新的  ${}^7\text{Li}$  产生的另一困难在于如何说明自太阳系形成约 45 亿年以来,为什么银河  ${}^7\text{Li}$  的丰度并没有明显变化的观测事实。假若 NGC188 确像 Hobbs 和 Pilachowski 估计的那样老,那么银河系甚至在距今约 100 亿年的时期内,  ${}^7\text{Li}$  丰度都没有明显的变化<sup>[33]</sup>。

## 五、小 结

最近十余年来,宇宙锂的研究已获得很大的进展,但关于宇宙锂,仍存在很多不够清楚和不甚理解的地方。现我们就有关宇宙锂的问题作一简短小结。

## (1) 我们已了解了那些?

(i) 恒星大气锂丰度密切依赖于恒星的年龄。中老年的中间 F 型星( $6300\text{K} \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 6800$

K)大气锂丰度表现严重不足(Boesgaard 漏斗)。对于光谱型晚于 G0 型的恒星, 向着晚型星方向(相同年龄), 大气锂丰度减小。对相同质量的恒星, 大气锂丰度随年龄增大而减小。对于 F 和 G 型星, 大气锂的衰减主要是发生在恒星进入主序之后。似乎有迹象表明, 恒星大气锂的衰减速率随年龄增大而减小。

(ii) 贫金属的星族 II ( $[Fe/H] \lesssim 1.0$ ) 恒星, 大气锂丰度弥散非常小。温和的 ( $6000K \lesssim T_e \lesssim 6300K$ ) 贫金属星族 II 恒星大气锂丰度的渐近值  $\log N(Li) \approx 2.0$ , 约比年轻星族 I 恒星大气锂的丰度小 1 个数量级。

(iii) 年轻星族 I 恒星、星际介质及太阳系天体(除太阳外)有大致相近的锂丰度  $\log N(Li) \approx 3.0$ , 这说明至少在太阳系形成的 45 亿年来, 银河系锂的丰度没有明显变化。

(iv) 标准大爆炸宇宙模型预期较低的初始宇宙锂丰度, 大致与贫金属星族 II 恒星大气锂丰度相近。但理论预期的重子密度却远小于从星系和星系团大尺度结构和动力学所推求的密度。

## (2) 哪些我们暂时还不完全了解?

(i) 我们还不十分理解恒星大气锂的衰减机制。

(ii) 现在还不能确定究竟初始宇宙  ${}^7Li$  的丰度是接近于贫金属星族 II 恒星的低丰度呢还是星族 II 恒星大气锂已经受了严重衰减, 初始宇宙  ${}^7Li$  具有更高的丰度?

(iii) 我们还不了解年轻银河疏散星团恒星大气锂丰度呈现很大弥散的原因, 它究竟是由于恒星大气锂的衰减速率密切依赖于恒星自转呢? 还是由于星团中不同自转速度的恒星代表形成的年代不同。

(iv) 我们还不确切了解恒星大气锂的衰减速率如何依赖恒星的年龄和质量。

(v) T Tau 型星大气锂是否确实过丰? 新星和渐近巨星支红巨星在银河锂丰度的演化中究竟起何作用?

## (3) 今后的工作

在上一节末, 我们已大致简单解释了测定恒星大气锂丰度的困难所在。由于锂的丰度 ( $Li/H \lesssim 10^{-9}$ ) 和电离电势 ( $5.392eV$ ) 极低, 致使绝大多数锂丰度的测定都是仅仅根据中性锂的  $\lambda 6707 \text{ \AA}$  共振双线 ( ${}^7Li$  的波长分别为  $6707.833$  和  $6707.932 \text{ \AA}$ ;  ${}^6Li$  为  $6707.933$  和  $6708.121 \text{ \AA}$ )。对于太阳, 此条谱线的等值宽度仅约  $3m \text{ \AA}$ 。仅仅对少数锂丰富的恒星, 才观测另一次强的  $\lambda 6404 \text{ \AA}$  吸收线。在距  $Li \lambda 6707 \text{ \AA}$  共振线不到  $0.5 \text{ \AA}$  有一条中性铁的吸收线 ( $\lambda 6707.441 \text{ \AA}$ )。因此锂丰度的测定需要高色散高信噪比的光谱, 对测定  ${}^6Li$  和  ${}^7Li$  两同位数比更是如此。

恒星大气锂绝大多数都处于一次电离态, 这致使锂的丰度敏感地依赖于所使用的大气模型。因此, 研究观测资料的理论分析处理方法同样是十分重要与急迫的。

我们已观测了一批亮的不同年龄的银河疏散星团恒星大气锂的丰度, 然而观测的精度和研究的详细情况是极不相同的。特别是对年龄同毕星团 ( $7 \times 10^8 \text{ yr}$ ) 的星团到最老的银河星团研究得还很不够。更详细地观测各种年龄的中老年银河疏散星团恒星大气锂的丰度, 将有助于我们彻底弄清恒星大气锂的衰减如何依赖恒星的年龄和质量。

对于研究得比较好的毕星团, 观测的星还不够暗。进一步观测毕星团更暗成员星大气锂

的丰度, 将有助于我们查明, 中年的毕星团低部主序星大气锂丰度是否存在大的弥散。

双星系统两个子星大气锂的测定, 将有助于我们了解双星系统的演化过程。

### 参 考 文 献

- [1] Boesgaard, A. M. and Steigman, G., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 23 (1985), 319.
- [2] Audouze, J., in *Nucleosynthesis and Chemical Evolution*, eds. by J. Audouze, C. Chiosi and S. E. Woosley, p. 429, Geneva Observatory, Geneva, (1986).
- [3] Peebles, P. E. J., *Phys. Rev. Letters*, 16 (1966), 410.
- [4] Wagoner, R. V., Fowler, W. A. and Hoyle, F., *Ap. J.*, 148 (1967), 3.
- [5] Wagoner, R. V., *Ap. J.*, 179 (1973), 343.
- [6] Walker, T. P., Steigman, G., Schramm, D. N. and Olive, K. A., *Ap. J.*, 376 (1991), 51.
- [7] Yang, J., Schramm, D. N., Steigman, G. and Rood, R. T., *Ap. J.*, 227 (1979), 697.
- [8] Olive, K. A., Schramm, D. N., Steigman, G., Turner, M. S. and Yang, J., *Ap. J.*, 246 (1981), 557.
- [9] Yang, J., Turner, M. S., Steigman, G., Schramm, D. N. and Olive, K. A., *Ap. J.*, 281 (1984), 493.
- [10] Delbourgo-Salvador, P., Gry, C., Malinie, G. and Audouze, J., *Astron. Astrophys.*, 150 (1985), 53.
- [11] Schaeffer, R., Delbourgo-Salvador, P. and Audouze, J., *Nature*, 317 (1985), 8036.
- [12] Audouze, J., Lindley, D. and Silk, J., *Ap. J. Lett.*, 293 (1985), L53.
- [13] Salati, P., Delbourgo-Salvador, P. and Audouze, J., *Astron. Astrophys.*, 173 (1987), 1.
- [14] *The Early Universe*, ed. by E. W. Kolb and M. S. Turner, Addison-Wesley Publ. Com., Redwood City, (1990).
- [15] Herbig, G. H., *Ap. J.*, 141 (1965), 588.
- [16] Wallerstein, G., Herbig, G. H. and Conti, P. S., *Ap. J.*, 141 (1965), 610.
- [17] Bodenheimer, P., *Ap. J.*, 142 (1965), 451.
- [18] Boesgaard, A. M., Budge, K. G. and Ramsay, M. E., *Ap. J.*, 327 (1988), 389.
- [19] Balachandran, S., Lambert, D. and Stauffer, J., *Ap. J.*, 333 (1988), 287.
- [20] Duncan, D. K. and Jones, B-F., *Ap. J.*, 271 (1983), 863.
- [21] Pilachowski, C. A., Booth, J. and Hobbs, L. M., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 99 (1987), 1288.
- [22] Butler, R. P., Cohen, R. D., Duncan, D. K. and Marcy, G. W., *Ap. J., Lett.*, 319 (1987), L19.
- [23] a: Boesgaard, A. M. and Tripicco, M. J., *Ap. J. Lett.*, 302 (1986), L49.  
b: Boesgaard, A. M. and Tripicco, M. J., *Ap. J.*, 303 (1986), 724.
- [24] Boesgaard, A. M., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 99 (1987), 1087.
- [25] Boesgaard, A. M. and Budge, K. G., *Ap. J.*, 332 (1988), 410.
- [26] Boesgaard, A. M., Budge, K. G. and Burck, E. E., *Ap. J.*, 325 (1988), 749.
- [27] Boesgaard, A. M., *Ap. J.*, 321 (1987), 987.
- [28] Hoops, L. M. and Pilachowski, C. A., *Ap. J. Lett.*, 309 (1986), L17.
- [29] Pilachowski, C. A. and Hobbs, L. M., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 100 (1988), 336.
- [30] Pilachowski, C. A., *Ap. J.*, 300 (1986), 289.
- [31] Spit, F., Spit, M., Peterson, R. C. and Chafee, F. H. Jr., *Astron. Astrophys.*, 171 (1987), L8.
- [32] Carcia Lopez, R. J., Rebolo, R. and Beckman, J. E., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 100 (1988), 1489.
- [33] Hoops, L. M. and Pilachowski, C. A., *Ap. J.*, 334 (1988), 734.
- [34] Soderblom, D. R., Oey, M. S., Johnson, D. R. H. and Stone, R. P. S., *A. J.*, 99 (1990), 595.
- [35] Cayrel, R., Cayrel de Strobel, G., Campbell, B. and Dappen, W., *Ap. J.*, 283 (1984), 205.
- [36] Michaud, G., *Ap. J.*, 302 (1986), 650.
- [37] Weymann, R. and Sears, R. L., *Ap. J.*, 142 (1965), 174.
- [38] Hobbs, L. M., Iben, I. Jr. and Pilachowski, C. A., *Ap. J.*, 347 (1989), 817.
- [39] Straus, J. M., Blake, J. B. and Schramm, D. N., *Ap. J.*, 204 (1976), 481.
- [40] Kiziloglu, N. and Eryurt-Ezer, D., *Astron. Astrophys.*, 146 (1985), 384.
- [41] Traub, W. A. and Roesler, F. L., *Ap. J.*, 163 (1971), 829.
- [42] 熊大闰, 天文学报, 32 (1991), 333.
- [43] Parker, E. N., in *The Internal Solar Angular Velocity*, ed. by B. R. by Durney and S. Sofia, p. 289, D. Reidel Publ. Com., (1987).
- [44] Dziembowski, W. A. and Goode, I. R., *Ap. J.*, 347 (1989), 540.
- [45] Schatzman, E., *Astron. Astrophys.*, 56 (1977), 211.

- [46] Baglin, A., Morel, P. J. and Schatzman, E., *Astron. Astrophys.*, 149 (1985), 309.
- [47] a: Zahn, J-P, in *The Internal Solar Angular Velocity*, ed. by B. R. Durney and S. Sofia, p. 201, D. Redel Publ. Com., (1987).  
b: in *Astrophysical Processes in Upper Main-Sequence stars*, ed. by A. Maeder and B. Hanck, p. 253, Geneva Observatory, Geneva, (1983).
- [48] Vauclair, S., *Ap. J.*, 335 (1988), 971.
- [49] Vauclair, S., in *Dark Matter*, ed. by J. Audouze and Tran Van, p. 269, Editions Frontieres, (1988).
- [50] Rebolo, R., Beckman, J. and Moloro, P., *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), L17.
- [51] Rebolo, R., Moloro, P. and Beckman, J., *Astron. Astrophys.*, 192 (1988), 192.
- [52] Reeves, H., Richer, J., Sato, K. and Terasawa, N., in *The Quest for the Fundamental Constants in Cosmology*, ed. by J. Audouze and J. Tran Van, p. 75, Editions Frontieres, (1989).
- [53] Audouze, J. and Reeves, H., in *Essays in Nucl. Astrophys.*, ed. by C. A. Barnes, D. D. Clayton and D. N. Schramm, p. 355, Cambridge Press, (1982).
- [54] Norgaard, H. and Arnould, M., *Astron. Astrophys.*, 40 (1975), 331.
- [55] Norgaard, H. and Fricke, K. J., *Astron. Astrophys.*, 49 (1976), 337.
- [56] Starrfield, S., Truran, J. W., Sparks, W. M. and Arnould, M., *Ap. J.*, 222 (1978), 600.
- [57] Vigroux, L. and Arnould, M., in *Les Elements et Leurs Isotopes dans l'Univers*, p. 47, Liege: Presses Universitaires, (1979).
- [58] Cameron, A. C. W. and Fowler, W. A., *Ap. J.*, 164 (1971), 111.
- [59] Torres-Peimbert, S. and Wallerstein, G., *Ap. J.*, 146 (1966), 724.
- [60] Boesgaard, A. M., *Ap. J.*, 161 (1970), 1001.
- [61] Catchpole, R. M. and Feast, M. W., *M. N. R. A. S.*, 175 (1976), 501.
- [62] Smith, V. V. and Lambert, D. L., *Ap. J. Lett.*, 345 (1989), L75.
- [63] Smith, V. V. and Lambert, D. L., *Ap. J. Lett.*, 361 (1990), L69.
- [64] Magazzu, A. and Rebolo, R., *Mem. Soc. Astron. It.*, 60 (1989), 105.
- [65] Strom, K. M., Wilkin, F. P. and Strom, S. E., *A. J.*, 98 (1989), 1444.
- [66] Kipper, T. and Wallerstein, G., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 102 (1990), 574.
- [67] Duncan, D. K., *Ap. J.*, 373 (1991), 250.

(责任编辑 刘金铭)

## The Cosmological and Stellar Lithium Abundance Problem

Xiong Darun

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

This paper reviews the lithium abundance problem in astrophysics. The observations show that the lithium abundance of the solar-type stars decreases sharply with decreasing of their mass and increasing of their age. The Li depletion for the solar-type stars is set chiefly in the MS, not before. It seems that the rate of Li depletion decreases with increasing of the age of stars. In contrast with Pup I stars the Li abundances of Pup II F- and early G-type dwarfs show a very small dispersion and they are about an order of magnitude smaller than the value of the young Pup I stars. The standard Big Bang nucleosynthesis predicts a low primordial Li abundance, which is consistent approximately with the observations of the warmer Pup II dwarfs.