

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.04.03

银河系演化早期的锂丰度研究进展

崔子嘉^{1,2}, 朱宗宏¹, 赵刚²

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 中国科学院 光学天文重点实验室 (国家天文台), 北京 100012)

摘要: 贫金属星一般指形成于宇宙早期的年老恒星, 近几年观测发现的几颗极贫金属星, 推测其年龄与银河系年龄相近。通过研究它们的锂丰度可以为银河系及早期恒星的形成与演化研究提供观测限制。对金属丰度较低, 且 $T_{\text{eff}} > 5700 \text{ K}$ 的主序星进行研究发现, 其锂丰度与金属丰度和有效温度无关, 这种现象被称为“锂丰度平台”。随着样本数的增加, 一些研究发现锂丰度与金属丰度和有效温度之间有一定的相关性。对贫金属星的样本分析结果显示, 锂丰度平台在贫金属端的恒定性被破坏, 具体表现为锂丰度随金属丰度的降低而急剧下降, 并且伴随更大的弥散。对此有两种的解释: (1) 不同的研究手段或分析方法给出不同的锂丰度值, 使得样本呈现出锂平台被破坏的现象; (2) 有相应的物理机制使得样本中的锂被消耗。诞生于宇宙早期的贫金属星, 其锂丰度接近于宇宙早期的锂丰度值, 而原初锂丰度与宇宙学模型参数中的重子数密度有关, 因此可以用贫金属星的锂丰度值来限制宇宙学模型参数。

关键词: 宇宙学; 元素丰度; 贫金属星; 锂

中图分类号: P159.3 **文献标识码:** A

1 引 言

根据标准宇宙大爆炸模型的预言, D、 ^3He 、 ^4He 和 ^7Li 等元素是宇宙大爆炸后最初形成的几种轻核元素^[1,2]。由于早期宇宙的金属丰度比现阶段要低, 形成于宇宙早期阶段的恒星也缺乏金属元素。在宇宙演化过程中, 恒星内部核合成不断生成一些更重的元素, 这些元素在宇宙中所占比例逐渐增大。研究宇宙早期形成的年老恒星表面锂丰度有助于了解宇宙早期的演化历史。依据星族概念的划分, 大爆炸之后由原初气体形成的第一代恒星被称为星族 III 恒星, 其表面锂丰度可以代表原初锂丰度。但恒星形成模型的模拟结果表明, 星族 III 恒星是寿命十分短暂的超大质量恒星; 因此, 目前的观测结果中仍未发现此类恒星的存在就不足为奇了。贫金属且年老的星族 II 恒星诞生于宇宙早期阶段, 相较于年轻的星族 I 恒星, 其表面锂丰度接近于原初锂丰度, 更具有研究价值。同时, 由于原初锂丰度和重子数与光子数相对

收稿日期: 2013-06-22; 修回日期: 2013-09-16

资助项目: 国家自然科学基金 (11233004)

比值 η 直接相关, 可以通过贫金属星表面锂丰度来检验各种不同的宇宙学模型, 利用观测数据对模型给出限制。

对贫金属星的观测能够得到宇宙较早时期的许多信息, 甚至可以追溯到大爆炸开始时期。这些信息对我们研究银河系, 乃至宇宙的演化和化学增丰过程都十分重要。由于贫金属星大多数为晕星, 在太阳邻近区域中数量较少, 可以采用恒星运动学方法将它们从盘星中挑选出来, 即基于银晕与银盘旋转方式的不同和大部分晕星自行速度相对较高的现象, 可以初步判断目标源是否为晕星^[3]; 另一种方法是拍摄低分辨率光谱, 通过检测在 3933.6 Å 处 Ca II K 线相对于附近氢线的强度, 或者估计恒星的颜色来初步确定目标源是否为贫金属星, 再利用中分辨率光谱对候选体做进一步的观测证认^[4]。对除 O、B 型星之外的恒星, 可以通过分析中性锂的 6707 Å 共振双重线得到锂丰度, 由于恒星的锂丰度普遍较弱, 且锂线附近存在其他吸收线, 故锂丰度的测定需要高色散、高信噪比的光谱, 这使得早期对锂丰度的研究受到较大的限制。随着观测仪器的发展与技术的进步, 人们能够拍摄到高分辨率和高信噪比的光谱, 发现了更多贫金属星, 因此近 10 年贫金属星锂丰度的研究发展较快。

本文第 2 章介绍锂丰度平台和斜率及其在贫金属端的破坏现象, 给出现阶段研究工作的进展情况; 第 3 章讨论了贫金属星的锂丰度在宇宙学研究中的应用; 第 4 章简要说明年老贫金属星的观测意义, 介绍 2 颗极贫金属星 HE1327-2326 和 SDSS J102915+172927, 并讨论两者的锂丰度情况; 第 5 章进行简要的总结。

2 贫金属星锂丰度平台的讨论

锂丰度平台的提出引发了对贫金属星锂丰度的关注与研究, 从发现贫金属星的锂丰度趋于恒定值开始, 一直到后来发现平台的一致性出现破坏, 针对以上现象人们都提出了相应的理论并试图进行解释。其中研究较多的两方面即为锂丰度平台的斜率问题和锂平台在贫金属端的破坏现象。

2.1 锂丰度平台

过去几十年里人们测定了大量贫金属且年老的星族 II 恒星的锂丰度。在 20 世纪 80 年代, Spite 夫妇最早通过研究银河系晕中的主序星金属丰度, 确定有效温度在 5700~6250 K 之间的贫金属星锂丰度保持在 2.05 左右, 称之为 Spite Plateau, 即锂丰度平台^[5]。在随后的几十年内, 对银河系内贫金属星的大量观测结果证实了这一平台的存在^[6-9], 并且更加精确地测定了锂平台的平均值为 2.25 ± 0.01 ^[10]。

早期的一些研究发现锂平台有稍许弥散, 有进一步的研究证实了锂平台弥散的存在并讨论过其物理含义^[11,12]。Thorburn^[12] 认为这种弥散不是由某种物理机制所导致的内在弥散, 而是由观测误差引起的现象。之后 Ryan 等人^[13]通过分析 3 颗被多次测量的样本星, 认为锂平台的弥散不是观测误差所致, 并指出样本中混入了双星或样本的演化历史不同等因素也会产生弥散现象。Melendez 等人^[8]使用改进的红外流量法 (infrared flux method, 简称 IRFM) 确定有效温度, 得到的锂丰度平台弥散很小, 认为这种现象是由于有效温度的误差较小所致。之后

的研究得到的锂平台弥散值均较小, 范围为 0.03~0.05 dex^[14]。2007 年, Bonifacio 等人^[7]重新测量了锂丰度平台值, 认为可以将平台的弥散归结为观测误差的影响结果。将其观测的 11 个目标源分为两个子样本后发现, $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$ 的样本平台弥散值为 0.11 dex, $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -3.0$ 的样本平台弥散值为 0.05 dex。对此现象作者给出的解释是金属丰度较低的样本星是处于主序末端的拐点星, 这些拐点星可能存在一些输运过程, 会对其表面大气锂丰度产生影响。综上所述, 锂平台的弥散主要是观测误差所致, 而处于低金属丰度处的较大弥散应与锂平台在贫金属端的破坏现象有关, 下文会进一步说明。

2.2 锂丰度平台的斜率

1982 年 Spite 夫妇^[15]首先提出锂丰度平台的存在, 同时发现这些样本的锂丰度虽然有稍许弥散, 但与有效温度和金属丰度基本无关, 这与其他元素丰度普遍随金属丰度下降而减小的情况有所不同。对更多的贫金属星样本分析后发现, 锂平台对金属丰度和有效温度均存在一定的斜率, 这表明贫金属星的锂丰度同金属丰度和有效温度有一定的相关性。

2.2.1 锂平台与金属丰度的斜率

Ryan 等人^[13]通过研究有效温度相近的晕矮星, 发现在锂丰度平台上锂丰度随金属丰度变化的斜率取值为 0.1~0.2, 并提出贫金属晕矮星的锂丰度和金属丰度之间存在相关性, 之后一些工作也支持这一斜率的存在^[14, 16, 17]。图 1 显示了贫金属星样本的金属丰度和锂丰度之间的关系, 从图中可以看出随金属丰度下降, 锂丰度有明显的下降趋势。1997 年, Bonifacio 和 Molaro^[18]使用 IRFM 方法来确定样本的有效温度, 他们得到的研究结果并没有显示出这个斜率; 在其他一些研究结果中也没有上述斜率出现^[6, 19]。

Ryan 等人^[17]指出, Bonifacio 和 Molaro^[18]的研究中未得出锂平台的斜率, 是因为他们对温度的误差估计有误以及相应数据选择不当等问题所导致; 并提出锂丰度同金属丰度之间的相关性与特定的有效温度确定方法无关, 而是存在某种物理机制导致这种下降趋势。他们认为此斜率可能与银河系早期的锂增丰过程有关^[20]。2007 年, Bonifacio 等人^[7]认为有效温度的确定方法会影响斜率的存在。他们使用不同的方法确定样本的有效温度来分析对锂平台斜率的影响。如图 2 所示, 基于 $\text{H}\alpha$ 线确定有效温度的方法所得到的数据能够显示出斜率的存在; 而使用 V-K 确定有效温度得到的数据则没有显示出斜率, 但依据不同的红化改正得到的样本锂丰度值也有很大的差别。尽管已经发现用不同方法确定有效温度会影响斜率的出现, 但对斜率是客观存在还是分析方法导致的偏差这一问题, 现在依然没有一致的结论; 其他如表面重力等物理参数的确定方法是否对斜率也有类似的影响, 这类工作目前并不多见。

2.2.2 锂平台与有效温度的斜率

与锂丰度同金属丰度的关系类似, 增大样本数量之后有研究发现, 在锂平台范围内其锂丰度和有效温度也并非毫无关联, 而是随有效温度的上升呈现增加的趋势, 如图 3 所示。1991 年, Deliyannis 等人^[21]使用标准恒星模型研究了贫金属晕星化学元素的组成与锂丰度减小的关系, 发现在双星中, 低金属丰度晕星比丰度较高的伴星损耗更多的锂, 且锂衰竭的差异随有效温度的降低而增大。1994 年, Thorburn^[12]研究了 90 颗晕矮星和贫金属拐点星, 验证了样本星锂丰度随有效温度升高有轻微的增大现象。1999 年, Ryan 等人^[17]也指出贫金

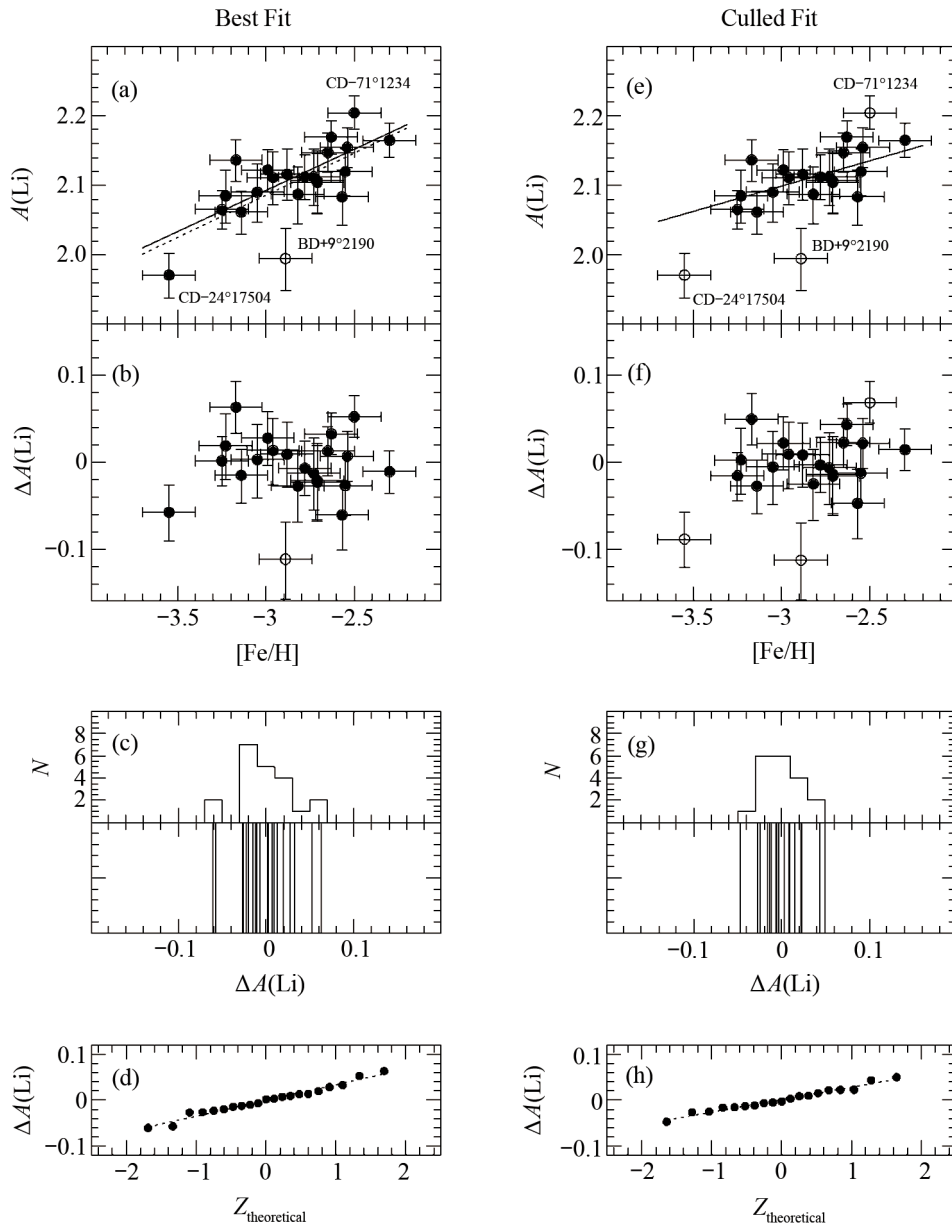


图1 贫金属星样本锂丰度与金属丰度斜率拟合^[17]

(a) 对所有样本单变量的 OLS 拟合(虚线)和排除了 BD +9°2190 的单变量 RWLS 拟合(实线); (b) 锂丰度相对于最佳拟合的残差; (c) 残差分布直方图和条纹图; (d) 正态概率图表明残差分布正常; (e) 排除了 BD +9°2190、CD -24°17504 和 CD -71°1234 的单变量 RWLS 拟合; (f—h) 同 (b—d)。

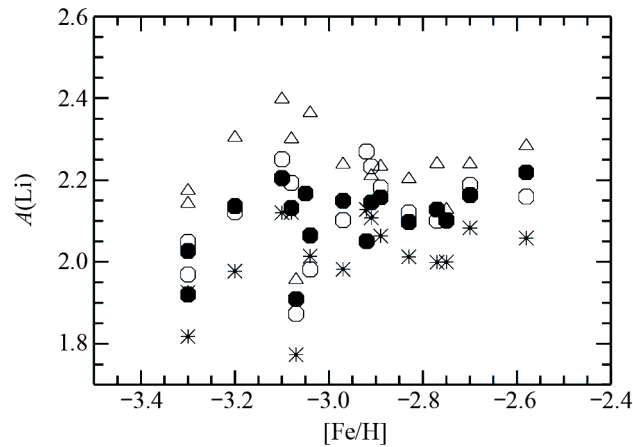


图2 不同方法确定有效温度对贫金属星锂平台斜率的影响^[7]

实心圆: $H\alpha$ 线方法; 空心圆: V-K 方法, 红化改正依据 1998 年 Schlegel 等人的工作结果^[22]; 空心三角形: V-K 方法, 红化改正依据 2000 年 Bonifacio 等人的工作结果^[23]; 星号: B-V 方法, 红化改正依据 1998 年 Schlegel 等人的工作结果^[22]。

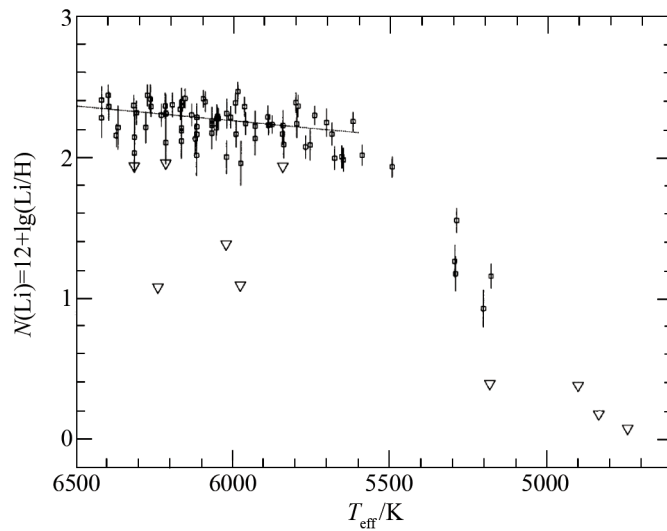
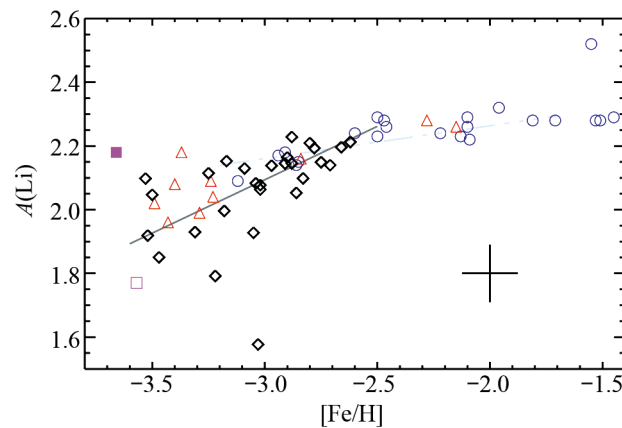
属场星的锂丰度与有效温度之间存在斜率关系, Richard 和 Michaud 等人^[24] 认为此斜率的存在可能是受到了原子扩散的影响。2012 年, Caffau 等人^[25] 指出银河系宇宙线产生的 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 对星际介质造成的污染是导致此斜率出现的原因之一。Bonifacio 等人^[7] 研究了 17 颗贫金属矮星样本, 发现锂丰度与有效温度之间的斜率并不明显, 但是加入之前研究中的一些样本后, 分析结果显示出较为明显的斜率, 说明锂丰度同有效温度之间斜率的显现需要一定的样本数量。Sbordone 等人^[26] 对选取的贫金属样本星的锂丰度研究后发现, 使用不同的方法确定有效温度仍然能够得到此斜率, 但若去掉 $T_{\text{eff}} < 6250 \text{ K}$ 的样本星后则无法显示斜率的存在。他们指出, 这种斜率消失的情况可能是由于样本数较少所致; 但另一方面, 这也许表明在较冷的恒星中对流会造成更多的锂损耗, 从而说明 $A(\text{Li}) - T_{\text{eff}}$ 的斜率与恒星自身的物理机制有关, 是客观存在的。

2.3 锂平台在贫金属端的破坏现象

对晕中更加贫金属的矮星作进一步观测分析, 结果显示: 在贫金属端 ($[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$) 恒星锂丰度随着金属丰度的减小而降低, 锂平台的恒定性被破坏^[14]; 另外锂丰度平台上的贫金属星之间的弥散十分小^[7, 14, 17], 而当 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 时, 更多的分析数据表明样本锂丰度的弥散有加剧的现象。迄今为止, 很多对贫金属星的观测研究都显示了锂丰度平台在贫金属端的下跌及弥散现象^[13, 14, 16], 如图 4 所示。虽然有些研究由于样本数较少没有观测到明显的下降现象, 但是也证实了在贫金属端的恒星锂丰度普遍低于富金属端的锂丰度^[27]。

现阶段对锂丰度平台在贫金属端的破坏现象进行的研究较少, 一方面是由于贫金属星的搜寻比较困难, 没有足够多的样本支撑金属丰度方面的研究; 另一方面是仍然没有一个很好的物理模型能够解释贫金属星中锂元素丰度下降的现象。

2007 年, Bonifacio 等人^[7] 的研究样本中包含有 8 颗 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3.0$ 的贫金属星, 分析结果显示出这些星的锂丰度明显比金属丰度较高的恒星低。在对锂丰度随金属丰度和有效温度

图3 锂丰度与有效温度的斜率^[12]图4 锂丰度平台在贫金属端的破坏现象^[26]

Asplund^[14]、Aoki^[27]、Sbordone^[26]等工作中样本锂丰度值和金属丰度的关系图，能够清楚地看出在贫金属末端锂丰度平台下降加剧，并且伴随着极大的弥散现象。

的变化趋势和弥散做出仔细的研究后，认为在锂丰度平台上的弥散可以归结为观测误差所致；而在低金属丰度处的弥散扩大可能是由于样本处于拐点的缘故，即恒星从矮星到亚巨星的这一转折阶段可能会产生一些输运过程，使得光球层的锂丰度减少。2010年，Sbordone等人^[26]使用欧洲南方天文台甚大望远镜(VLT)上的紫外阶梯光栅光谱仪(UVES)获得了28颗金属丰度在 $-3.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 之间的晕族矮星的锂丰度，对锂丰度与有效温度、表面重力和金属丰度之间的相关性进行分析。他们认为贫金属星形成时的初始锂丰度即为锂平台值，之后由于某种机制导致锂损耗，而这种机制在恒星 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 时变得较为活跃，导致贫金属星的锂损耗更快，从而出现锂平台值的下降及弥散现象。2010年，Meléndez等人^[28]通

过研究 $-3.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$ 的贫金属星, 得出在不同的金属丰度范围内其锂元素丰度与质量有关的结论。他们还发现将较冷的贫金属星从样本中除去后, 在 $-3.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 处显示出低于锂平台丰度的另一个锂平台。图 5 给出不同温度范围内样本的锂丰度值, 其中最下面图中显示出锂平台的断裂现象。因此可以认为在金属丰度极低处, 更高温度的恒星应当有低于锂平台的锂丰度。由图中也可看出在 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.5$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -2.5$ 两个金属丰度各自的范围内, 锂丰度和金属丰度之间没有关系; 只有当这两个范围的恒星混在一起的时候, 锂丰度下降的现象才能体现出来, 即不能认为锂丰度的单调减小仅仅与金属丰度有关。2012 年, Bonifacio 等人^[29] 从斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, 简称 SDSS) 数据中选出一部分极贫金属星候选体, 并使用 VLT 望远镜上的 UVES 获得它们的高分辨率光谱。对这些样本进行金属丰度分析, 确定了之前在较亮且近的极贫金属星样本中得到的锂丰度下降趋势, 在这些较暗且遥远的样本中也有所体现; 同时发现有两个极贫金属星仍在锂丰度平台上, 表明除了金属丰度外, 锂丰度下降应该还与恒星其他的物理参数有关。作者认为在贫金属星中更易发现低锂丰度的恒星, 处在锂丰度下降中的恒星并没有局限在一个特殊的有效温度范围内。

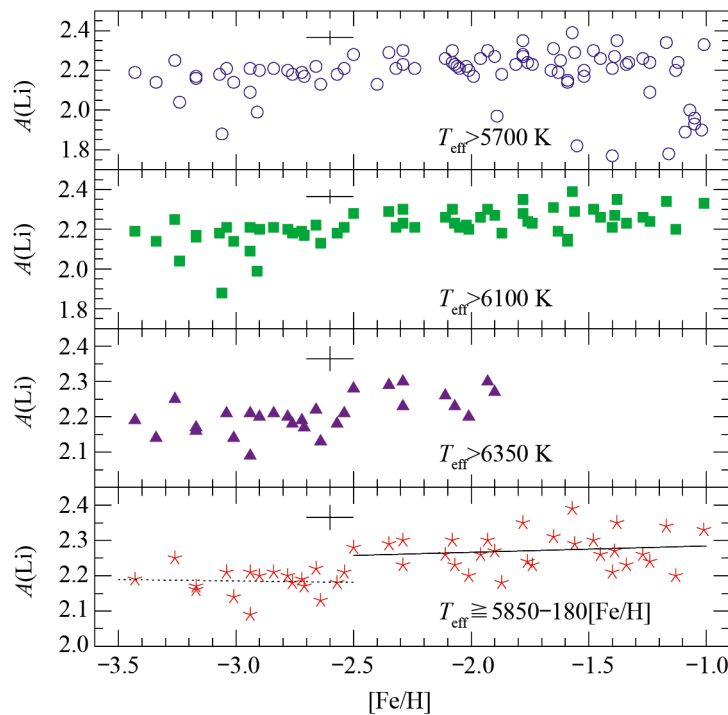


图 5 不同有效温度范围内贫金属星样本的锂丰度值表现^[28]

由上到下依次为 $T_{\text{eff}} > 5700 \text{ K}$ 、 $T_{\text{eff}} > 6100 \text{ K}$ 和 $T_{\text{eff}} > 6350 \text{ K}$ 的贫金属星样本锂丰度值, 最下面的图中满足相应有效温度条件内的样本显示出锂丰度平台的断裂。

2.3.1 分析方法对确定锂丰度的影响

使用不同的分析方法或者采样有偏差等因素有可能会导出出现锂平台的破坏现象。因此需要用多种分析方法来处理观测数据,并且尽量排除各种可能存在的偏差来确定此现象是否客观存在。

2009年,Aoki等人^[27]使用昴星团望远镜(Subaru Telescope)上的高色散光谱仪(high dispersion spectrograph,简称HDS)观测,获得了11颗处于拐点上的贫金属星光谱。他们通过与以前文章的分析结果进行比较,发现表面重力和宏观湍流速度的变化对锂丰度值的影响不大,但锂丰度值对确定的有效温度值和采用的大气模型较为敏感。同时指出,这种影响是系统性的,若使用相同的方法确定有效温度和相似的大气模型,对锂丰度的下降或弥散的讨论没有实质性的影响。2010年,Sbordone等人^[26]使用4种不同方法测定样本的有效温度,得出锂丰度下降及其弥散加剧与选择的有效温度确定方法无关,这与Molaro^[30]得到的结论一致。图6显示了4种有效温度确定方法对样本锂丰度值的影响:图6(a)显示在不同有效温度确定方法下锂平台贫金属端均有破坏现象;图6(b)中锂丰度残差弥散也随金属丰度的下降而有逐渐增大的趋势。文中提到了两种可能对结果产生影响的偏差:(1)样本中存在着未检验出的双星系统。由于伴星会减少主星谱线的等值宽度,会导致对金属丰度及锂丰度值的低估。(2)3D非局部热动平衡(non-local thermodynamic equilibrium,简称NLTE)对铁的电离平衡的影响。因为使用Fe I和Fe II线的电离平衡来确定表面重力时,对Fe线的3D改正会导致结果出现一些修正。1994年,Carlsson等人^[31]讨论了冷星锂丰度的NLTE影响,指出存在许多不确定性因素会影响恒星元素丰度的确定。这些不确定性因素通常会导致噪声水平在0.1 dex左右,如果超过了这一数值就必须考虑NLTE改正。在这篇文章中,作者通过限制经典模型来研究相关的NLTE机制,认为贫锂的冷星NLTE改正较大,会对观测样本的锂丰度与有效温度之间的斜率有所影响,并给出了相同样本的局部热动平衡(local thermodynamic equilibrium,简称LTE)锂丰度值和NLTE锂丰度值,如图7所示。从图中可以看出,NLTE分析结果给出的锂丰度与有效温度之间的斜率更小。之后一些工作也指出NLTE会使Fe I线变弱,令金属丰度值下降^[25,32],这种影响在贫金属星中较为明显^[33]。Boesgaard等人得到的NLTE对锂丰度修正值在-0.04~+0.11之间,对热星为负修正,对冷星为正修正^[16]。这些修正会影响到锂丰度值的最终确定,甚至令样本的锂丰度偏离原来的平台值。但是2006年Korn等人^[34]在研究中发现,他们所选取的样本3D和NLTE改正的综合效应很小,故在讨论样本的锂丰度时仍然使用了LTE丰度值。

2.3.2 恒星自身的锂损耗机制

锂元素是一种比较容易损耗的元素,在恒星内部温度超过 2.5×10^6 K时锂会发生核反应而分解。随着恒星在主序晚期的演化,对流层加深会将恒星表面的锂带入到温度较高的恒星内部,当内部温度达到 2.5×10^6 K时锂开始发生核反应,使得观测到的恒星表面呈现出锂丰度缺乏的现象。这一过程可以用来解释处于主序演化后期的贫金属星锂丰度较低的现象。对于温度较低的冷星而言,它们的对流层较深,因此会有锂缺乏的情况。但是对处于拐点且温度稍高的贫金属矮星而言,大气下方的对流层并不深,因此这类矮星不能用上述这种挖掘机制来解释它们的锂缺乏现象^[35]。

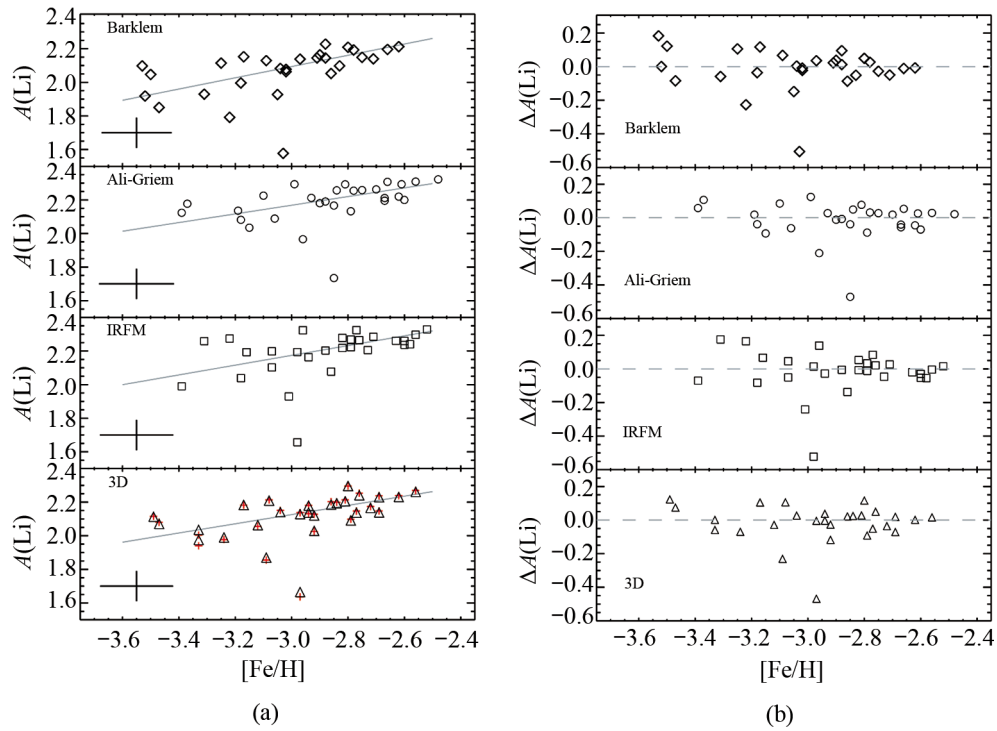


图 6 4 种有效温度确定方法对样本锂丰度值结果的影响^[26]

两幅图的有效温度确定方法由上到下依次为 BA,ALI,IRFM 和 3D。(a) 不同方法下得到的样本锂丰度值和金属丰度关系图, 实线为各自的最佳拟合; (b) 不同方法下最佳拟合的残差。

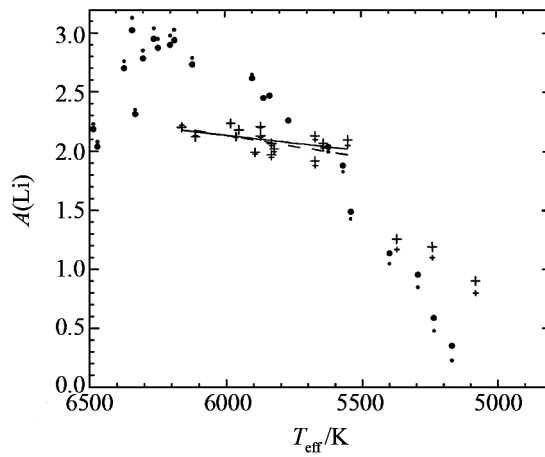


图 7 同一样本的 LTE 锂丰度和 NLTE 锂丰度与有效温度的斜率^[31]

样本取自毕星团, 加号表示对应的样本星 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$; 每个样本星的对应值出现两次, 较大圆点表示 NLTE 丰度值, 较小圆点表示 LTE 丰度值。对 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$ 样本星的锂丰度与有效温度相关性拟合, 实线和虚线分别表示 NLTE 值与 LTE 值的拟合结果。

1982 年, Spite 夫妇^[15]提出, 类太阳晕矮星的锂损耗一般都可归结为对流层加深所产生的结果, 但其他机制也会使锂损耗加剧, 如对流过冲或湍流扩散机制。同时作者认为主序前阶段的锂损耗对年老的星族 II 恒星是微不足道的, 但长期由星风引起的质量损失可能会导致它们外层锂丰度降低, 相应的锂损耗量应与质量或温度有关。

1992 年, Pinsonneault^[36]给出一个改进的自转模型, 在此模型中讨论了导致锂丰度下降的几种因素。他认为类太阳丰度恒星同贫金属星模型的结构和演化不同, 它们的锂元素消耗模式也有所不同, 进而提出了自转混合的锂损耗机制。这种由角动量损失引发的混合机制会将贫锂物质从恒星内部运送到表面, 而将富锂物质从外层运送到恒星内部并通过核反应燃烧掉。因此, 对那些经历过角动量损失的低质量恒星而言, 自转混合是导致表面锂丰度下降的一种有效机制。基于此种解释, 热晕星模型中自转混合机制造成了大部分锂损耗, 这主要发生在主序阶段早期; 之后 50 亿年中大部分热晕星几乎没有额外的锂损耗, 而较冷晕星模型随年龄增加仍会有锂损耗现象。

双星之间由于可能存在物质交换, 因而观测到的表面锂丰度会与恒星初始丰度值有较大的差距。当矮星开始吸积伴星表面物质时, 其表面物质与吸积的贫锂物质混合会令矮星表面锂丰度低于原本的丰度值。早期也有很多关于蓝离散星锂缺失现象的研究。1994 年, Glaspey 等人^[37]对一些晕星和厚盘星的分析表明锂丰度下降是蓝离散星的普遍特征。2001 年, Ryan 等人^[38]给出低锂丰度的恒星可能是双星或蓝离散星的解释, 即它们外层的对流混合机制使得锂元素在较高温度下转化为其他元素。Ryan 通过分析其样本中 3 颗出现谱线增宽的贫锂恒星的自转, 认为锂丰度下降可能是由于它们是蓝离散星, 并给出 3 种解释: (1) 样本星表面物质与吸积物质混合; (2) 在物质转移前双星均已出现锂损耗; (3) 观测到的样本星表面已被吸积物质覆盖, 观测数据所反映的是被吸积伴星的表面组成, 而后者在吸积发生前已经经历了锂损耗^[39]。之后 Boesgaard 等人^[40]发现这些样本星也存在锂丰度下降的现象, 支持了这一说法。2005 年, Bruce 等人^[41]通过研究 5 颗贫金属蓝离散星候选体的锂丰度, 认为用锂丰度值作为判别蓝离散星的依据在某种程度上是可行的。

最初, 对有效温度在 5700~6250 K 之间和金属丰度在 $-2.4 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.4$ 间的贫金属矮星进行研究, 发现锂丰度平台的存在; 随着观测技术的提高, 对更多的贫金属晕星分析结果显示, 锂丰度平台的值并非总是恒定的, 尤其是在贫金属端这种平台现象并不存在。这些现象可能是由于某些尚不明确的物理机制或者观测与数据处理中的误差所致, 更深入的分析需要更多的样本观测数据。

3 贫金属星锂丰度在宇宙学中的应用

贫金属星能够在某种程度上反映宇宙早期信息, 对年老贫金属星样本的分析可以用来研究大爆炸核合成之后的化学增丰过程。锂元素作为宇宙大爆炸核合成所产生的 3 种元素之一, 其初始锂丰度与宇宙学模型参数有关。因此研究早期贫金属星锂丰度可以为宇宙学模型参数提供观测上的限制。

3.1 原初锂丰度

最初认为锂平台所代表的锂丰度值即为形成恒星原初物质的锂丰度值, 而由于锂平台上的恒星年龄较大, 据此推断锂平台值为银河系的初始锂丰度值^[15]。后来普遍认为这种明显一致的锂丰度值是大爆炸核合成的直接产物, 即原初锂丰度。然而进一步的深入研究表明, 贫金属晕星表面大气中观测到的 ${}^7\text{Li}$ 丰度值比由标准大爆炸核合成理论所预测的原初锂丰度值要低。

沿视线方向对类星体的观测表明, 星系际云中的 ${}^2\text{H}$ 丰度 $({}^2\text{H}/\text{H})_{\text{p}} \approx 3 \times 10^{-5}$ ^[42, 43]。普遍认为此值与原初 ${}^2\text{H}$ 丰度十分接近, 是大爆炸核合成的结果。而依据标准大爆炸核合成理论, 得到此 ${}^2\text{H}$ 丰度值所需的原初锂丰度值比从贫金属晕星上观测到的锂丰度平台值要高。威尔金森微波各向异性探测器 (Wilkinson microwave anisotropy probe, 简称 WMAP) 测得的宇宙微波背景各向异性也支持了这一差别的存在。利用 WMAP 观测数据得到的重子密度和大爆炸核合成理论, 得到相应的原初锂丰度值 $A_{\text{Li}} = 2.72^{+0.05}_{-0.06}$ ^[44]。图 8 展示了锂丰度平台与原初锂丰度之间的差距。由图所示, 两者之间存在一个空白地带, 被称为“锂丰度禁带”, 目前没有观测到恒星位于此禁带。

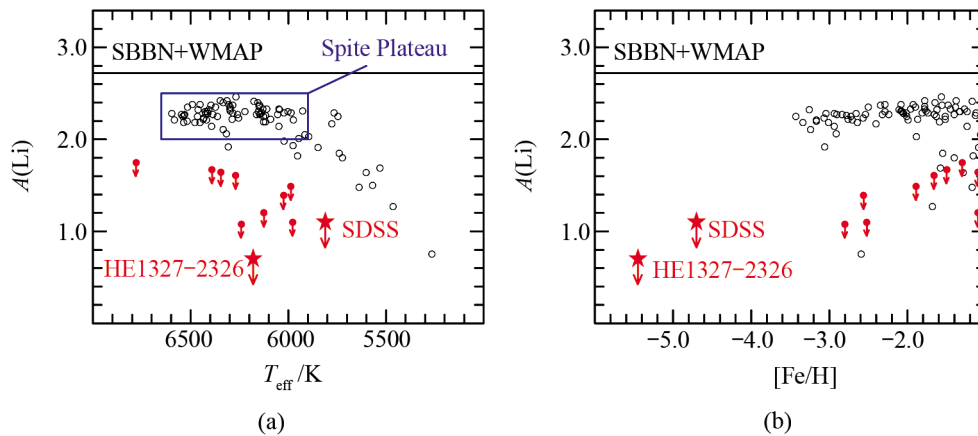


图 8 锂丰度平台与原初锂丰度^[3]

(a) 锂丰度值与有效温度的关系图; (b) 锂丰度值与金属丰度的关系图。从两幅图中可以看出, 在一定有效温度和金属丰度内样本锂丰度值趋于一致。上方的水平线是由标准宇宙大爆炸模型给出的原初锂丰度, 能够明显看出来两者之间的差异。

解释两者之间存在差别的研究大体上可分为 5 类: (1) 计算过程中未注意到的或是低估了的系统误差导致锂丰度值与真实值偏离, 产生了这种偏差^[45]。(2) 研究样本中的部分锂已经出现损耗, 需要进一步探讨恒星内部的化学演化过程。Lind 等人研究了重力沉降和弱湍流的综合影响导致恒星内部锂损耗, 这些过程会使得恒星自身的锂丰度相较于原初值有所下降^[10]。(3) 在这些年老恒星诞生前, 银河系中部分锂已经出现损耗^[46]。(4) 大爆炸核合成理论计算中用到的核截面值存在系统不确定性, 从而导致出现偏差^[47-49]。(5) 认为标准大爆炸核合成理论不能精确预测原初元素丰度。基于此种假设, 有些工作研究非标准大爆炸核合成理论试图解释这种差别^[50-52]。现在普遍认为观测的主序拐点处的贫金属星锂丰度值并不是原初锂丰

度值,两者之间的差距表明,要么宇宙演化过程中存在一个锂丰度下降的过程,要么是计算出现偏差,对此尚无一致的结论。

除了上述几种主流观点外,有些工作开始改进恒星演化模型,尝试使其符合现阶段观测的数据结果。2006年,Korn等人^[34]研究NGC 6397中处于不同演化阶段的18颗样本星,发现样本星锂丰度与考虑扩散机制的恒星演化模型符合较好。利用这种扩散模型给出的原初锂丰度高于锂丰度平台值,从而与标准大爆炸核合成理论预测值相近。

3.2 贫金属星锂丰度对宇宙学模型的限制

宇宙中化学元素的产生主要有两种途径:大爆炸核合成阶段的元素产生过程和恒星内部的核反应过程。在宇宙早期,仅靠质子和 α 粒子碰撞很难产生比 ${}^7\text{Li}$ 更重的核,因此研究原初锂丰度对探索宇宙早期的物理条件和检验各种宇宙模型十分重要。在星系演化过程中,超新星爆发和宇宙线辐射会使星际介质的锂丰度逐渐增加,因此较晚形成的年轻恒星表面锂丰度不能反映银河系初始锂丰度;较为年老的贫金属晕星,其锂丰度更接近于银河系的初始锂丰度值。如果考虑到银河系的年龄,理论上可以用形成于银河系早期的贫金属晕星锂丰度值来初步讨论宇宙早期的演化历史。

标准大爆炸核合成中唯一的自由参量是重子数与光子数的相对比值, $\eta = n_b/n_r$,其定义如下:

$$\eta = 10^{10}(n_b/n_r)_0 = (273.9 \pm 0.3)\Omega_b h^2,$$

通过 η 可以推得重子数密度 Ω_b 。原初锂丰度的值依赖于 η ,因此可以用晚型星的锂丰度值来初步限制 Ω_b 的值。Smith等人^[53]曾经给出大爆炸核合成的标准模型,包括对模型给出的预测和不确定性的整体讨论。相应计算的前提条件是认为大部分贫金属热晕星的表面锂丰度可以表征原初锂丰度的值,这需要假设晕星在主序和主序前阶段几乎无锂损耗。1994年,Thorburn^[12]根据其获得的贫金属晕星锂丰度平均值,给出重子数与光子数之比的范围为 $1.5 \times 10^{-10} \leq \eta \leq 7 \times 10^{-10}$ 。用推得的 η 值来限制宇宙学参数 Ω_b ,得到 $\Omega_b \leq 0.16$ 。2002年,Bonifacio等人^[6]基于NGC 6397中12颗贫金属星的观测数据得到锂平台值为 $A(\text{Li}) = 2.34$ 。取此值为原初锂丰度近似值,推得 $n_b/n_r = 4.3 \times 10^{-10}$,进而得到 $\Omega_b h^2 = 0.016 \pm 0.004$ 。此结果与其他工作中得到的D丰度和 ${}^3\text{He}$ 丰度符合得很好^[54,55]。依据最近释放的Planck数据,Alain等人^[56]推算出的原初锂丰度值为 $4.89_{-0.39}^{+0.41} \times 10^{-10}$,但是此值仍高于观测到的银河系晕星锂丰度,如图9所示。

4 贫金属星锂丰度对恒星与星系演化理论的影响

银河系形成于金属丰度较低的宇宙早期阶段,在随后演化过程中其金属丰度逐渐增加。受恒星内部核合成和外部星际介质污染影响,星系中的恒星在演化过程中锂丰度逐渐偏离其形成时的初始丰度,并通过超新星爆发进一步污染周围的星际介质,故较晚形成的年轻恒星锂丰度不能代表星系的初始锂丰度。目前观测到的年老贫金属星形成于银河系早期阶段,通过研究这些贫金属星样本的表面锂丰度,能够了解星系形成早期的锂丰度情况,有助于检验

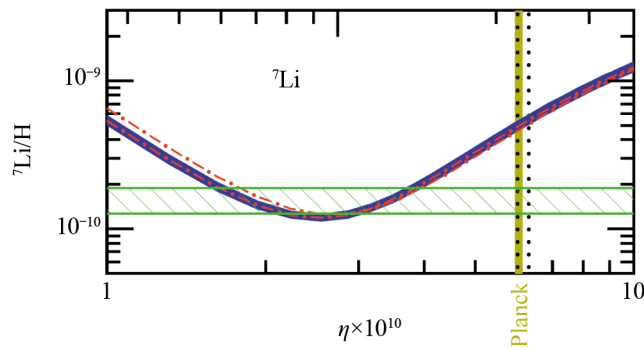


图9 由观测数据和标准大爆炸核合成得到的原初锂丰度的比较^[56]

实线是预测的锂丰度同 η 值之间的关系, 黑色竖虚线和黄色竖实线分别是 WMAP 和 Planck 得到的 η 值, 绿色水平线区域代表观测的锂丰度值。

和改进恒星与星系形成理论。

4.1 古老贫金属星的观测意义

研究银河系化学演化可以为观测到的恒星金属丰度提供合理的解释, 特别是对银河系中最古老恒星金属丰度的研究, 使得星系形成的第一代恒星受到较多的关注。银河系中第一代大质量恒星, 即星族 III 形成于极贫金属的原初气体, 在其演化和消亡过程中污染了星际介质; 故星族 III 大质量恒星演化终结时的化学组成可以在下一代恒星的表面大气中被观测到, 即形成于被污染的星际介质且存活至今、最古老且最贫金属的星族 II 恒星。因此, 古老的贫金属星族 II 恒星具有较高的观测意义。

目前观测到的年老贫金属星质量较小, 光度较低, 受观测仪器参数的限制只能观测到较近的晕星, 故现阶段能够观测到的极贫金属星样本数量十分有限。有些巡天项目致力于寻找暗弱矮星系, 例如全景巡天望远镜和快速反应系统巡天 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)、大口径全天巡视望远镜巡天 (Large Synoptic Survey Telescope)。有望在这些巡天项目发现的星系中寻找更多的贫金属星。除此之外, 郭守敬望远镜 (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) 也能够提供一批北半球的贫金属星候选体; 全天天体测量干涉仪 (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 将给出银河系内 10 亿颗星的高精度观测数据, 从而获得更多遥远的暗弱贫金属星样本^[3]。样本数量的增加有助于更好地研究年老贫金属星的金属丰度变化趋势, 从而加深对银河系起源、结构和演化等问题的理解。

4.2 两颗极贫金属星的锂丰度

近年来发现了几颗金属丰度极低的贫金属星, 讨论较多的是 HE1327-2326 和 SDSS J102915+172927。从图 10 (a) 中可以看到两者位于锂平台贫金属末端, 并且锂丰度也大大低于锂平台值。目前给出的两者的金属丰度分别为 $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ID,LTE}} = -5.4$ ^[57] 和 -4.7 ^[58]。由于具有如此低的金属丰度, 普遍认为它们的丰度模式反映了第一代恒星化学元素的核合成情况。从图 10 (b) 中可以看出, SDSS J102915+172927 的碳丰度也远低于其他贫锂星。与碳丰度较高

的 HE1327–2326 不同, SDSS J102915+172927 几乎完全由氢和氦组成, 其他重元素所占比例相当低。依据现今较流行的恒星形成模型, 如此低的碳氧丰度在其形成的最初阶段无法冷却过热的气体使其坍缩成原恒星。而 Caffau 等人^[58]发现的 SDSS J102915+172927 表明, 在某些情况下碳丰度和氧丰度低于恒星形成模型标准值的气体云也可以形成低质量恒星。

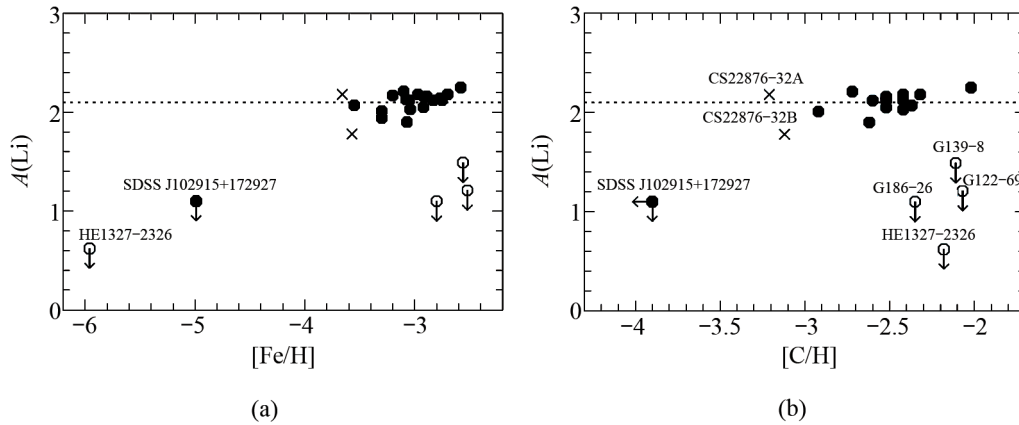


图 10 两颗极贫金属星的锂丰度值^[58]

(a) 为贫金属星锂丰度同金属丰度的关系图; (b) 为贫金属星锂丰度同碳丰度的关系图。

另外, 两者的有效温度分别为 $T_{\text{eff}} = 6180 \text{ K}$ 和 $T_{\text{eff}} = 5810 \text{ K}$, 均在锂丰度平台的温度范围内, 但无论是亚巨星 HE1327–2326 还是矮星 SDSS J102915+172927 都没有像预测的那样在锂丰度平台上有近似 $A(\text{Li}) = 2.3$ 的锂丰度值。实际上在两者的大气中都没有探测到锂元素的存在, 其各自锂丰度的上限分别为 $A(\text{Li}) < 0.7$ ^[57] 和 $A(\text{Li}) < 1.1$ ^[58], 是迄今为止在 $[\text{Fe}/\text{H}] < -4.5$ 的范围内未探测到锂元素的两颗极贫金属星。

Spite 夫妇^[5]曾经提出, 在前主序阶段原恒星的收缩过程中可能会破坏一部分锂元素。2012 年, Caffau 等人^[25]在研究 SDSS J201915+172927 时指出, 如果金属丰度低于一个特定值, 则这种低质量的恒星只能形成于较大星云的坍缩碎片^[59, 60]; 极可能的情况就是在主序前阶段恒星形成了很快的湍流和自转速度, 因而气体中最初的锂元素被破坏, 从而无法在这类矮星中观测到锂元素的存在。但 Aoki 等人^[32]在研究 HE1327–2326 时并未发现宏观湍流或自转所造成的谱线明显展宽。2006 年, Piau 等人^[46]给出了一个恒星形成模型来解释 HE1327–2326 无法观测到锂元素的现象, 并推断星族 III 对早期宇宙中的重子物质有所影响, 认为这种极贫金属星形成于富含碳、氮、氧元素的星族 III 遗迹。Prantzos^[61]随后指出, 按照此模型, 形成星族 III 的星际介质应具有一定的金属丰度, 但观测到的极贫金属星丰度均小于此丰度值。另一方面也有人认为可能是与双星有关的一些机制破坏了锂元素, Campbell 等人^[62]给出了一个双星模型来解释 HE1327–2326 的极端贫金属丰度, 但是从 HE1327–2326 的径向速度变化可知, 其并非是密近双星^[3]。如果锂元素没有受到损耗, 而是在恒星形成时期就缺乏锂元素, 说明早期宇宙有一段时间锂丰度较低, 这将对宇宙演化理论提出挑战。如果能找到更多极贫金属星并进行观测研究, 可能会找到相关线索。

5 总结与展望

对贫金属星的研究在最近几十年逐渐增多, 尤其是在第一颗 $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.0$ 的贫金属星于 1981 年被发现后, 对于这种极贫金属星的研究工作迅速增多。随着锂丰度平台的发现, 对贫金属星锂丰度的研究也逐渐增多。相较于之前认为锂丰度平台即为原初锂丰度的想法, 现阶段更加侧重于讨论两者之间差别产生的原因, 同时也关注如何用观测到的贫金属星锂丰度值来限制和约束大爆炸理论参数。然而, 无论是对计算中的误差进行讨论还是研究恒星形成和演化中可能存在的锂损耗机制, 或者是大爆炸核合成理论自身的原因, 目前对此缺少一个合理的物理解释。

随着对更多的贫金属星进行观测, 发现锂丰度平台并不总是趋于恒定的, 而是随着金属丰度和有效温度的降低而呈现出不同的斜率。使用不同方法确定样本的有效温度, 得到的结果也不同, 这会导致 $A(\text{Li}) - [\text{Fe}/\text{H}]$ 斜率值有所变化。锂丰度平台与有效温度之间的相关性, 则可能是由于较冷的矮星对流层较大导致出现更多的锂损耗的缘故。除了锂丰度平台的斜率变化外, 同时也发现在贫金属端平台出现破坏的现象, 表现为随金属丰度的降低而急剧下降, 并伴随有弥散扩大的趋势。因为极贫金属星的样本数较少, 关于这方面的研究不是很多。有研究认为这种破坏现象可能与恒星自身的某种锂损耗机制有关, 也有工作指出不同的温度确定方法对此现象的形成没有太大影响。目前并没有一个普遍认可的解释。

除了可用于对恒星演化过程研究之外, 贫金属晕星表面锂丰度还可以用于对宇宙学模型参数的初步限制。由于所研究的样本星一般从银河系晕中选取, 相对于宇宙学所研究的高红移星系等天体, 对低红移贫金属晕星的研究为讨论宇宙增丰历史提供了独特的视角。

对贫金属星的搜寻和观测工作进展缓慢, 主要由于仪器的限制。最近发现的两颗极端贫金属星金属丰度均在 -5.0 左右, 被认为可以反映第一代恒星的相关化学信息。目前对这两颗恒星的研究较多, 并且发现两者的表面探测不到锂元素的存在, 主流解释为恒星形成期锂元素可能已经被破坏。其他一些研究认为双星之间的物质交换也会对表面锂丰度产生影响, 但目前为止没有观测到两者是双星的证据。

今后需要更多金属丰度在 -3.0 以下的贫金属星样本来进一步研究贫金属星锂丰度平台, 而随着金属丰度的降低, 目标星等更加暗弱, 使得搜寻工作十分困难。可以预期, 随着观测仪器的改进和观测技术的提升, 人们将发现更多暗弱的贫金属星, 从而为这方面的深入研究提供更多的观测数据。

参考文献:

- [1] Yao W M, Amsler C, Asner D, et al. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2006, 33: 220
- [2] Olive K A, Steigman G, Walker T P. *Phys. Rep.*, 2000, 333: 389
- [3] Frebel A, Norris J E. *Planets, Stars and Stellar Systems.* 2012, 5: 1
- [4] Beers T C, Christlieb N. *ARA&A*, 2005, 43: 531
- [5] Spite M, Spite F. *Nature*, 1982a, 297: 483
- [6] Bonifacio P, Pasquini L, Bragaglia A, et al. *A&A*, 2002, 390: 91

- [7] Bonifacio P, Molaro P. *A&A*, 2007, 462: 851
- [8] Melendez J, Ramirez I. *ApJ*, 2004, 615: L33
- [9] Spite F, Spite M. *A&A*, 1993, 279: L9
- [10] Lind K, Primas F, Charbonnel C, et al. *A&A*, 2009, 503: 545
- [11] Deliyannis C P, Pinsonneault M H, Duncan D. *ApJ*, 1993, 414: 740
- [12] Thorburn J A. *ApJ*, 1994, 421: 318
- [13] Ryan S G, Beers T C, Deliyannis C P, et al. *ApJ*, 1996, 458: 543
- [14] Asplund M, Lambert D L, Nissen P E, et al. *ApJ*, 2006, 644: 229
- [15] Spite F, Spite M. *A&A*, 1982, 115: 357
- [16] Boesgaard A M, Stephens A, Deliyannis C P. *ApJ*, 2005, 633: 398
- [17] Ryan S G, Norris J E, Beers T C. *ApJ*, 1999, 523: 654
- [18] Bonifacio P, Molaro P. *MNRAS*, 1997, 285: 847
- [19] Spite M, Francois P, Nissen P E, et al. *A&A*, 1996, 307: 172
- [20] Ryan S G, Beers T C, Olive K A, et al. *ApJ*, 2000, 530: L57
- [21] Deliyannis C P, Demarque P. *ApJ*, 1991, 370: 657
- [22] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [23] Bonifacio P, Caffau E, Molaro P. *A&AS*, 2000, 145: 473
- [24] Richard O, Michaud G, Richer J. *ApJ*, 2005, 619: 538
- [25] Caffau E, Bonifacio P, Francois P, et al. *A&A*, 2012, 542: A51
- [26] Sbordone L, Bonifacio P, Caffau E, et al. *A&A*, 2010, 522: A26
- [27] Aoki W, Barklem P S, Beers T C, et al. *ApJ*, 2009, 698: 1803
- [28] Meléndez J, Casagrande L, Ramirez I, et al. *A&A*, 2010, 515: L3
- [29] Bonifacio P, Sbordone L, Caffau E, et al. *A&A*, 2012, 542: A87
- [30] Molaro P. *ASP*, 2008, 390: 472
- [31] Carlsson M, Rutten F J, Bruls J H M J, et al. *A&A*, 1994, 288: 860
- [32] Aoki W, Frebel A, Christlieb N, et al. *ApJ*, 2006, 639: 897
- [33] Asplund M, Nordlund A, Trampedach R, et al. *A&A*, 1999, 346: L17
- [34] Korn A K, Grundahl F, Richard O, et al. *Nature*, 2006, 442: 657
- [35] Iocco F. *Memorie della*, 2012, 22: 19
- [36] Pinsonneault M H, Deliyannis C P, Demarque P. *ApJS*, 1992, 78: 179
- [37] Glaspey J W, Pritchett C J, Stetson P B. *AJ*, 1994, 108: 271
- [38] Ryan S G, Beers T C, Kajino T, et al. *ApJ*, 2001, 547: 231
- [39] Ryan S G, Gregory S G, Kolb U, et al. *ApJ*, 2002, 571: 501
- [40] Boesgaard A M. *ApJ*, 2007, 667: 1196
- [41] Bruce W C, David W L, John B L. *ApJ*, 2005, 129: 466
- [42] Burles S. *Planet and Space Science*. 2002, 50: 1245
- [43] O'Meara J M, David T, David K, et al. *ApJ*, 2001, 552: 718
- [44] Cyburt R H, Fields B D, Olive K A. *JCAP*, 2008, 11: 12
- [45] Hosford A, Ryan S G. *A&A*, 2009, 493: 601
- [46] Piau L, Beers T C, Balsara K S, et al. *ApJ*, 2006, 653: 300
- [47] Angulo C, Casarejos E, Couderc M, et al. *ApJ*, 2005, 630: L105
- [48] Coc A, Vangioni F E, Descouvemont P, et al. *ApJ*, 2004, 600: 544
- [49] Cyburt R H, Fields B D, Olive K A. *Phys. Rev. D*, 2004, 69: 123519
- [50] Coc A, Olive K A, Uzan J P, et al. *Phys. Rev. D*, 2009, 79: 103512
- [51] Jedamzik K, Pospelov M. *New J. Phys.* 2009, 11: 105028
- [52] Kohri K, Santoso Y. *Phys. Rev. D*, 2009, 79: 043514
- [53] Smith M S, Kawano L H, Lawrence H, et al. *ApJS*, 1993a, 85: 219
- [54] D'Odorico S, Dessauges Z M, Molaro P. *A&A*, 2001, 368: L21
- [55] Bania T M, Rood R T, Balser D S. *Nature*, 2002, 415: 54

- [56] Alain C, Jean P U, Elisabeth V. <http://arxiv.org/pdf/1307.6955v1.pdf>, 2013
- [57] Frebel A, Collet R, Eriksson K, et al. *ApJ*, 2008, 684: 588
- [58] Caffau E, Bonifacio P, Francois P, et al. *Nature*, 2011, 477: 67
- [59] Clark P C, Glover S C O, Smith R J, et al. *ApJ*, 2013, 768: 34
- [60] Greif T H, Springel V, White S D M, et al. *ApJ*, 2011, 737: 75
- [61] Prantzos N. *Space Science Rev.* 2007, 130: 27
- [62] Campbell S W, Lugaro M, Karakas A I. *A&A*, 2010, 522: L6

New Progress of Lithium Abundance in the Early Galactic Evolution

CUI Zi-jia^{1,2}, ZHU Zong-hong¹, ZHAO Gang²

(1. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Metal-poor stars are long-lived objects which were formed in the early Universe. These stars are crucial to our understanding of the early evolution of the Galaxy. It has been noticed that the Li abundance of metal-poor, near main-sequence turn-off stars seems independent of the metallicity and effective temperature in the temperature range $T_{\text{eff}} = 5700 \sim 6250$ K, which is called Spite Plateau. Based on larger sample of metal-poor stars, trends of Li abundance with T_{eff} and $[\text{Fe}/\text{H}]$ have been found. There is no final conclusion of the cause of the slope. Analysis of Li abundances of the metal-poor halo stars shows that the Spite Plateau does not exist anymore at the lowest metallicities; instead, the Li abundance decreases sharply at lower metallicities, and shows increased scatter. Two explanations are proposed: (1) the uncertainties of the Li abundance were dominated by the uncertainty of the stellar atmospheric parameters; (2) Li could have been destroyed in some metal-poor stars. The mean abundance of the Spite Plateau lies below the value that has been predicted from the results of WMAP, interpreted in terms of the predictions of SBBN. The detailed understanding of the physics responsible for the difference between them is still lacking. Because metal-poor stars were born in early universe, their Li abundance is close to the primordial value which is a key prediction of models of big bang nucleosynthesis. Thus Li abundance in metal-poor stars can be used to constrain parameters of cosmological models. In recent years, several newly found ultra metal-poor stars have been suggested that they are as old as the Milky Way. Two of them have been discussed frequently because their chemical composition is highly peculiar. Li abundance cannot be detected in the atmosphere of these two stars and one of them shows no strong enhancement in carbon and nitrogen, and has a global metallicity more than four orders of magnitude lower than the solar one. Analyzing the chemical abundance of these old stars can provide more information on the formation and evolution of the Milky Way and the first generation of stars.

Key words: the Universe; abundances; metal-poor stars; Li