

恒星锂丰度研究进展

邱红梅^{1,2} 赵刚¹ 刘学富² 李宗伟²

(1. 中国科学院北京天文台 北京 100012)

(2. 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要

锂是少数几种在大爆炸中生成的元素之一,研究锂丰度对于探讨各种元素核合成理论以及星系的早期化学演化规律都具有十分重要的意义。阐述了近期有关恒星(类太阳星、晕族恒星和主序前星)及星团锂丰度的新近观测结果。介绍了在锂的核合成理论研究方面非局部热动平衡效应的影响及锂在恒星演化中的衰竭机制等理论的研究进展和存在的问题。盘族恒星相对年轻,拥有较高的锂丰度,但弥散很大;晕族恒星年老,锂丰度相对盘族恒星偏低,但弥散较小。晕星中锂丰度的 Spite 平台仍需进一步的验证。超新星爆发时中微子核合成和大质量 AGB 星是恒星中产生锂的两种最可能的渠道。恒星质量损失、对流超射、微观扩散和自转等都能导致锂的衰竭,但无论哪一种机制都只能解释部分的观测现象。

关键词 恒星: 锂丰度 — 恒星: 锂衰竭

分类号: P156

1 引 言

锂是重要的轻元素之一。在不同天体物理条件下锂丰度的测量对于研究恒星内部的核物理过程,探讨银河系的化学演化以及宇宙学等具有十分重要的意义。在恒星演化的过程中,锂等轻元素在相当低的温度下(约 $2.5 \times 10^6 \text{K}$)即可发生核反应。在冷星的延伸对流区或类太阳星对流区发生混合时都可能导致锂的损耗。因此锂丰度一直是人们研究的重要课题。

宇宙中的锂是怎样产生的?其初始丰度是多少?它又是怎样演化的?这些问题目前尚无一致的看法。在大爆炸中产生的锂经过多种过程不断地补充或损耗,要得到锂的初始丰度必须对恒星演化导致的锂衰竭以及星系演化过程中的锂的产生及损耗程度进行细致的研究。

2 观测研究

除 O、B 型星以外,各种光谱型和光度型的恒星都能通过分析其共振双重线(LiI 670.8nm)得到锂丰度。继 1965 年 Herbig^[1]首次对它进行研究以后,许多研究者又利用观测获得的高

分辨率、高信噪比光谱，得到了许多场星及星团中恒星的锂丰度。

2.1 类太阳恒星

太阳是人们研究得较清楚的恒星之一，它拥有较低的锂丰度 ($\log N(\text{Li}) \approx 1.16$ ，假定氢的丰度为 $\log N(\text{H}) = 12.0$)，而其中锂亏损的根本原因尚无很好的解释。研究一些与太阳性质接近的类太阳恒星的锂丰度有可能提供导致锂亏损的有关信息而显得很重要。

1965 年 Herbig^[1] 首次对 100 颗 F5~G8 型矮星进行了全面研究，指出大于一个太阳质量的恒星有类似陨石的锂丰度，而低于一个太阳质量的恒星，却有不同程度的锂亏损。同时他还发现 CaII 的 H、K 线发射流量与锂丰度之间存在一定的相关性。随着现代探测器的出现与发展，许多作者在此基础上又对许多类似样本星进行了研究^[2~4]，他们再次肯定了这种相关性的存在，但其相关性不是太好。而且这种在 F 型恒星中存在的相关性对 M 型恒星并不成立^[5]。但由于恒星的光谱型越晚其锂丰度的不确定性越大，因此仍不能排除 M 型恒星中这种相关性存在的可能。

Boesgaard^[79] 专门对 75 颗 F0~F5 型矮星进行了研究，发现 1/3 的恒星具有较高的锂丰度 ($\log N(\text{Li}) \approx 3.01$)，其它 2/3 的恒星则有不同程度的亏损。同时她指出这些 F 型恒星的锂丰度与金属丰度之间没有明显的相关性，所有富锂的恒星都具有较大的自转速度和与太阳近似一致的金属丰度 ($-0.2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$)。许多作者试图用恒星自转来解释这一点，即认为在这些 F 型恒星中存在自转制动效应，较差自转引起的混合导致这些恒星中的锂发生不同程度的衰竭，而晚 F 型恒星锂丰度的弥散则来源于恒星自转速度的初始差异^[6]。

2.2 晕族恒星

晕族恒星是年老的贫金属恒星，它们形成于银河系演化的早期，是决定初始锂丰度的最佳候选体。在标准大爆炸核合成模型中，初始锂丰度是唯一的自由参数 η (重子数与光子数之比) 的函数。对初始锂丰度的确定可以检验非标准宇宙模型的有效性。

首次对这类恒星锂丰度的观测是 Spite 夫妇^[7] 完成的。他们发现有效温度在 5700~6500K 范围内的恒星锂丰度与有效温度和金属丰度无关，称其为 Spite 平台，并认为此平台值代表了在大爆炸核合成中产生的初始锂丰度。由于晕星中的锂丰度对宇宙学研究很重要从而成为人们研究的热点。

随着观测数据的日渐增多，发现平台范围内的恒星也显示出一定的锂丰度弥散^[8~10]。如对三颗有效温度高于 5900K 的极端贫金属矮星的分析表明，其锂丰度低于平台值 1.0 甚至更多^[8]。为了减少丰度分析中模型的影响和温度定标带来的误差，Deliyannis 等人^[11] 用观测的等值宽度和 uvby β 测光得到的色指数直接分析，也证明晕星中的锂丰度存在着本质弥散。对于 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$ 的恒星，其锂丰度与 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 存在着弱相关^[12,13]；而对金属丰度相对较富的晕星，有更大的丰度弥散且显示出一个上包络线 (图 1)。这种上包络线的存在可能是

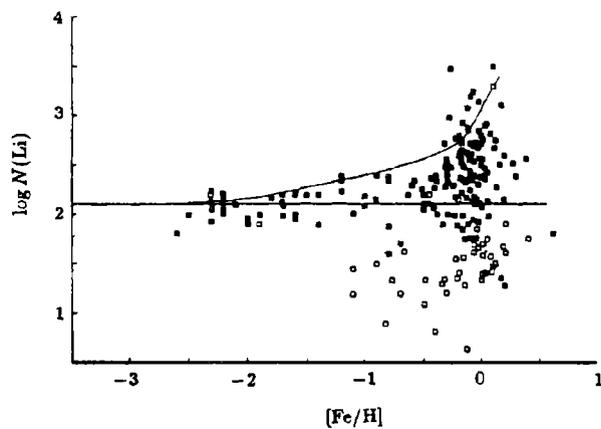


图 1 锂丰度与金属丰度的关系^[14]

弥散点为观测数据点，实线为模型计算结果

随着观测数据的日渐增多，发现平台范围内的恒星也显示出一定的锂丰度弥散^[8~10]。如对三颗有效温度高于 5900K 的极端贫金属矮星的分析表明，其锂丰度低于平台值 1.0 甚至更多^[8]。为了减少丰度分析中模型的影响和温度定标带来的误差，Deliyannis 等人^[11] 用观测的等值宽度和 uvby β 测光得到的色指数直接分析，也证明晕星中的锂丰度存在着本质弥散。对于 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$ 的恒星，其锂丰度与 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 存在着弱相关^[12,13]；而对金属丰度相对较富的晕星，有更大的丰度弥散且显示出一个上包络线 (图 1)。这种上包络线的存在可能是

由于不断进行的星系过程即恒星通过宇宙线散裂和吸积星际介质而使锂增加，而单个恒星的衰竭程度不一样导致了弥散的出现^[15]。另一方面，在 $\log N(\text{Li})-T_{\text{eff}}$ 的关系图中，也存在

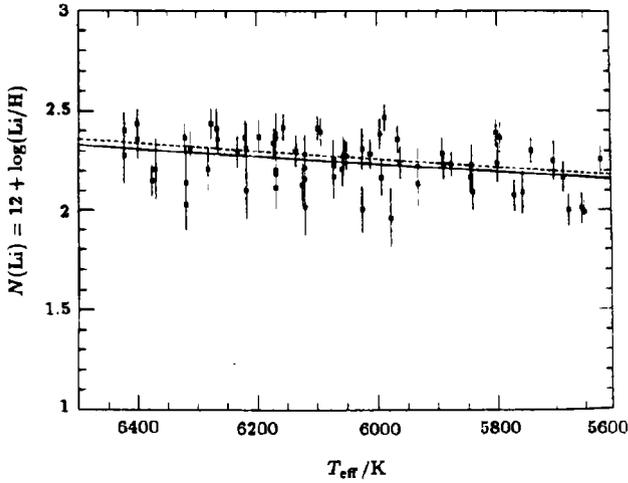


图 2 Spite 平台锂丰度与有效温度的关系^[12]

虚线为最小绝对偏差拟合结果，实线为最小二乘法拟合结果

一个正的斜率^[12,16]。锂丰度随着有效温度的增加而增加似乎暗示着稍冷的平台恒星中的锂也经历了不同程度的衰竭，它在一定程度上反映了非局部热动平衡效应与系统误差的联合作用，而不是锂丰度对温度的物理依赖(图 2)。

晕星中 Spite 平台是否真的存在？其锂丰度的弥散是否单纯由丰度分析的误差所致？这一直是人们讨论的焦点。有效温度的确定所带来的误差是锂丰度的主要误差源之一。因此如何精确地确定有效温度对锂丰度的分析至关重要。Molaro 等人^[17]利用从巴尔末线轮廓得到的有效温度值再次讨论了 24 颗恒

星的锂丰度平台值，确认了平台的存在。而后 Spite 等人^[18]采用了从激发平衡、巴尔末线轮廓及色指数等三种方式得到的温度也没有发现任何锂丰度随有效温度的变化趋势。另外利用红外流量定标得到的温度也说明了这一点^[19]。这似乎表明当利用统一均匀的温度定标研究小样本恒星时，平台的存在是确定无疑的。由此看来，晕星平台附近的弥散完全可由有效温度和等值宽度的误差来解释^[18]，即使存在本质弥散，也是很小的。

与盘族场星两个量级的弥散相比，晕星中极小的弥散似乎表明这一平台值与锂的初始丰度有关。最近 Vauclair 等人^[20]通过理论模型的计算表明，晕星中存在一个与温度及金属丰度独立的锂丰度的最大值，该值与平台值十分接近，将其与观测结果比较给出的初始锂丰度为 2.35 ± 0.10 ，相应于宇宙重子密度 $0.018 < \Omega_b < 0.075$ (取 $H = 50$)。

在恒星演化过程中可能同时存在着两种因素：恒星核反应过程使锂衰竭，而星系过程又使锂丰度增加。这就意味着目前观测到的晕星平均锂丰度并非银河系初始锂丰度值^[21]。同时观测上的证据不再支持 Spite 平台的原始解释，大爆炸中产生的锂与恒星平台锂丰度的平均值不相等。随着观测数据的日渐增多，对晕族矮星中锂丰度的解释也变得越来越复杂：虽然晕星中大部分的锂可用宇宙起源来解释，但来自银河系核合成的贡献仍不可忽略。因为在标准大爆炸核合成中不能产生足以被探测到的 ${}^6\text{Li}$ ，在 HD84937 和 HD201891 探测到的 ${}^6\text{Li}$ 丰度表明银河系中有核合成，即所谓的银河系“污染”。

2.3 星团研究

银河系星团的光度、年龄、质量等较其它场星容易由观测和计算得到，这些对于研究主序乃至主序前恒星的锂衰竭机制都能提供重要的线索。它们可能给出在一种与场星完全不同的演化过程中形成的锂丰度，并可检测具有相同质量、年龄和化学组成的恒星锂丰度的差异。测量具有不同金属丰度和不同年龄的球状星团中恒星的锂丰度对于量度初始锂丰度具有重要

作用, 同时也能检验在银河系中是否存在使锂增加的机制。

毕星团是人们研究得最多的星团之一。其锂丰度与有效温度之间有固定的关系, 弥散较小, 并且 F 型恒星锂丰度在一定的温度范围中存在明显的下跌 (dip)^[22] (即在图 3 中, 锂丰度在 6300~6900K 的温度范围内突然下降, 呈现出明显的下凹现象)。同样的现象也发生在场星和年龄大于 10^8 yr 的星团中。究竟锂丰度下跌是怎样产生的? Deliyannis 等人^[24] 专门对此进行了研究。他们发现: 在 24 颗样本

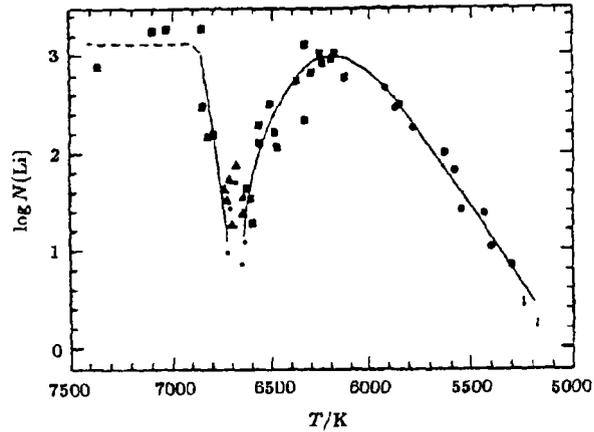


图 3 毕星团中 F 和 G 矮星的锂丰度与有效温度的关系^[23]

星中, 锂和铍存在明显的相关性, 而且锂衰竭较铍更快。这种相关性表明锂和铍的衰竭是 F 型恒星的必经过程, 它强有力地支持了自转混合等慢混合过程, 而对质量损失和扩散机制提出了质疑。对 F 型恒星中的硼^[25] 以及疏散星团 M67 中转向点恒星锂的观测结果^[26] 也与这些结论一致。

与毕星团相比, 昴星团中恒星的锂丰度则显示出更大的弥散。对 8 个年龄在 0.05~8 Gyr 范围内的疏散星团的统计发现: 在 5950~6350K 的温度范围内, 锂丰度与年龄存在固定的关系, 按 $t^{-0.3}$ 指数衰减^[23]。同时随着星团年龄的增加, 锂丰度弥散减少。然而即使在年轻的英仙座 α 星团 (0.05 Gyr) 中也包含反常的低锂丰度恒星, 这表明锂衰竭既发生在主序阶段, 也可能发生在主序前阶段; 另外我们也可发现英仙座 α 星团及昴星团恒星的锂丰度随温度有近似相同的变化趋势, 这似乎说明这些恒星中锂的衰竭主要由主序前演化过程决定, 否则必须考虑其年龄效应。粗略地说, 星团中锂丰度的弥散与自转和色球活动有关, 自转越快, 活动性越强, 同时拥有更丰富的锂^[27]。对年龄介于昴星团和毕星团之间的 M34 星团, 锂的衰竭及自转也处于中间状态。虽然这些锂丰度的弥散与观测的不确定性及其化学成分的不均匀性有关, 但主要还是归因于恒星演化过程中自转变化过程的差异。

大部分观测给出疏散星团的最大锂丰度值为 3.1~3.3, 接近陨石值 3.3。然而对于球状星团的恒星则给出与晕族场星近似相同^[28] 或略高的锂丰度^[29], 存在 0.3 dex 的弥散^[30]。这可能是由于单个恒星的初始角动量和自转减慢速率的不同, 导致衰竭程度的差异。

对于猎户座 Ic 星团, 存在着更高的锂丰度 3.6 ± 0.1 。该星团在 $T_{\text{eff}} \geq 5500$ K 时, 有类似于其它星团的锂丰度弥散, 而且自转速度最小的恒星拥有最低的锂丰度。对此 King^[31] 给出了一种可能的解释: 即认为在部分猎户座 Ic 恒星中发生了自转制动效应。而快速自转的猎户座 Ic 成员星在非局部热动平衡条件下平均的锂丰度与太阳系陨石的锂丰度值非常接近^[32]。如果猎户星际气体代表本星系的气体, 很明显在过去的 5 Gyr 中, 银河系中的锂并未增加。

由这些观测可以给出这样的图像: 对于 $M \geq 1.4 M_{\odot}$ 的恒星, 往往拥有盘族的初始锂丰度 3.3; 对 $0.9 M_{\odot} \leq M \leq 1.25 M_{\odot}$ 范围内的恒星, 表现出不同程度的主序前衰竭, 锂丰度有较小的弥散; 而当 $M \leq 0.9 M_{\odot}$ 时, 弥散可达 1.0 dex; 当质量继续减小时, 弥散可达 2.0 dex。

2.4 主序前恒星

对金牛座 T 型星中锂的研究可以提供许多当前星际物质的丰度信息。大多数金牛座 T 型星有比晚型主序星更强的锂线。但由于其恒星参数有很大的不确定性,许多金牛座 T 型星非光球连续谱发射的遮蔽作用使谱线变弱,因此要准确地得到其锂丰度很困难。

继 Bonsack 和 Greenstein^[33] 首次讨论金牛座 T 型星的锂丰度以后,许多作者也相继进行了测量^[34,35]。但由于光谱掩食、吸积盘的存在以及非局部热动平衡效应的影响,不同作者往往给出不同的结果。在经过适当的改正以后, Magazzu 等人^[36] 得出了接近陨石值的金牛座 T 型星锂丰度。如果说晕族矮星反映了恒星形成时的星际物质丰度,那么对年轻星团及金牛座 T 型星的观测则表明了星系演化的过程中,锂丰度至少有 1.0dex 的增加。然而,许多富锂的活动星可能是主序后而非主序前恒星,它们的锂是否已衰竭以及怎样衰竭仍没有得到很好解决。

另外对于主序前双星,其形成和演化并没有改变它们相对的锂丰度,成员星的锂丰度差值小于 1.0dex。除了个别有较高的锂丰度以外,大部分星的平均值非常接近于当前的宇宙锂丰度的平均值 ($\log N(\text{Li}) \sim 3.0$)^[37]。

3 理论研究进展

根据标准大爆炸核合成理论,锂元素与其它大多数元素相反,并非由恒星核合成的标准方式产生,而是在宇宙极早期大爆炸时产生的。由于锂在极低的温度下就能发生核反应,锂元素基本被限制在恒星表面浅层。同时由于恒星外部壳层和内部的物质输运过程(对流、湍流扩散、自转混合等)改变了恒星表面锂的元素含量,造成与该星形成时不同的锂丰度值。

3.1 非局部热动平衡效应

目前对锂丰度的测量主要利用锂的共振双重线 670.8nm。由于锂具有较低的一次电离电势,恒星中往往只有一小部分锂是中性的,共振线的形成主要集中在光球层上那些冷的、低密度区域^[38]。在大多数恒星中,这些线产生区域都是光学薄的,需考虑非局部热动平衡效应的影响^[39]。在不同电离状态下的非局部热动平衡效应对丰度的影响主要取决于恒星的有效温度、表面重力及金属丰度^[40]。

Magazzu 等人^[36] 发现非局部热动平衡效应对弱线和强线轮廓会产生不同的影响。对弱的共振线,锂的过饱和和电离(overionization)起重要作用,因此由非局部热动平衡计算得到的轮廓比局部热动平衡弱;而在饱和线中,锂线(670.8nm)在形成区的源函数大于普朗克函数,因此相对局部热动平衡而言,非局部热动平衡效应可使谱线核心增强。这样使得在 K~M 型矮星中,从较强的锂线得到的非局部热动平衡丰度系统地偏低。Carlsson 等人^[40] 肯定了这一结论。他们详细讨论了在各种类型的大气模型中非局部热动平衡效应对锂线形成的影响,认为对富锂星及冷的贫锂星,非局部热动平衡效应的影响很明显。在一般情况下,影响锂丰度的各种不确定因素导致的综合误差大约在 0.1dex 左右,因此当非局部热动平衡的改正超过该值时,就必须详细地分析非局部热动平衡效应对丰度的影响。

太阳的非局部热动平衡锂丰度比局部热动平衡值低 0.05dex^[38]。同时许多作者对理论模型的计算表明,非局部热动平衡效应对晕族矮星锂丰度的影响也是很小的^[40~42]。对锂丰度为 0.0~3.3 的类太阳恒星,非局部热动平衡效应的影响小于 0.1dex^[43]。然而对冷巨星和超巨星,非局部热动平衡效应对丰度的影响增加。如对一颗典型的 K3 型超巨星,局部热动平衡

条件下的锂丰度值要比非局部热动平衡值低 $0.3\sim 0.4\text{dex}^{[44]}$ 。

3.2 银河系中锂的产生

如果认为晕族恒星锂丰度平台代表了锂的初始丰度值(含一部分宇宙线导致的核分裂的贡献),那么在恒星或星系演化过程中,银河系中的锂一定在不断增加,使之从晕星值 2.1 增加到陨石值 3.3。对盘族及太阳系锂丰度的观测表明,至多有 $10\%\sim 20\%$ 的锂来自于宇宙线导致的核分裂,那么另一部分则有一个恒星起源。

Burbidge 等人^[45]曾指出,锂等轻元素可由能量大于 100MeV 的 C、N、O、Fe 等富元素核分裂产生。Reeves 等人^[46]也认为高能星系宇宙线能将 C、N、O 核分裂成轻元素。后来这一理论又被 Meneguzzi 等人^[47]进一步扩展,但是他们的模型不能产生足够的 ${}^7\text{Li}$,并且得到的锂同位素比与观测不一致。根据 Lambert^[48]的估计,宇宙线导致的核分裂可以生成可观测量数的 ${}^6\text{Li}$ 及其它轻核。

在氢燃烧区域,由 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 反应生成的 ${}^7\text{Be}$ 被转移到低温区,在那里通过 K 效应俘获电子形成 ${}^7\text{Li}$ 。这种观点首先由 Cameron^[49,50]提出,Smith^[51,52]对 AGB 星的观测也支持了这种理论。对流区底部区域产生的 ${}^7\text{Be}$ 可以被转移到 AGB 星的表面,在那里通过电子俘获形成 ${}^7\text{Li}^{[53]}$ 。这种机制可使银河系中的 ${}^7\text{Li}$ 增加相当数量。除了 AGB 星以外, D'Antona^[14]还在其模型中包含了新星系统,他们认为新星是生成 ${}^7\text{Li}$ 的另一种渠道。如果锂线在 X 射线新星爆发中产生,那么它可能给出较高的锂丰度^[54]。最近 Romano^[55]也指出新星爆发能解释大多数富金属恒星中较高的锂丰度。

另外,根据 II 型超新星模型^[56,57], ${}^7\text{Li}$ 也可由中微子过程产生。即当一颗大质量恒星塌缩形成中子星时,会产生大的中微子流,这些中微子激发重元素,从而导致 ${}^7\text{Li}$ 的生成。超新星爆发时中微子核合成和大质量 AGB 星 ($5\sim 8M_{\odot}$) 被认为是恒星中锂形成的两种最可能的渠道。

标准大爆炸核合成模型成功地预言了各种轻元素 (${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^7\text{Li}$) 的丰度。在标准大爆炸核合成模型中,为使 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 有与观测一致的初始丰度,要求 ${}^7\text{Li}$ 丰度为 $1.9\sim 2.3\text{dex}^{[58\sim 60]}$ 。最近几年,又对标准模型提出了各种各样的修改意见,出现了不均匀模型,也即假定核合成以前存在密度的不均匀性^[61]。一般而言,不均匀大爆炸核合成模型能产生更多的锂。

3.3 锂的衰竭机制

锂的衰竭机制一直是理论研究的重要课题之一。目前关于恒星表面锂丰度的衰竭机制有很多,充分理解这些机制对于准确地估计初始锂丰度具有非常重要的意义;目前主要存在两种类型的恒星模型,即标准模型和非标准模型,它们能再现观测的某些性质,但得出的结论却有很大差异。

3.3.1 标准模型

标准恒星演化模型忽略了散射、自转混合、质量损失及磁场等方面的影响。由这种模型计算得到的锂丰度存在一个不随恒星而变的最大值,它可能与观测所得的锂丰度有关^[20]。Deliyannis 等人^[62]详细讨论了这种模型。他们认为,恒星在主序前及主序早期阶段,对流区的部分锂被核反应破坏;当接近主序转向点时,扩散作用增加,使锂进入可燃烧区域;在早期主序后阶段,恒星中未消耗的锂将暂时地通过挖掘过程进入恒星表面,使表面锂增加;而当恒星演化到亚巨星和早巨星分支时,对流区进一步加深,表面锂再次衰竭。究竟哪些机制

起重要作用, 将随恒星的不同而异。它与恒星的质量、年龄及化学组成等有着复杂的关系。这种模型很好地拟合了 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.3$ 的晕族恒星的观测数据, 然而却与盘族观测数据 (如: F 型恒星中锂的下跌、铍的衰竭, 疏散星团中锂的衰竭与弥散等) 相矛盾, 这些不一致促使了非标准大爆炸核合成模型的出现及进一步发展。

3.3.2 各种非标准模型

(1) 质量损失: Weymann 和 Sears^[63] 第一次用主序星质量损失来解释较低的太阳锂丰度, 而后又有许多研究者用它来解释其它低质量恒星的锂衰竭^[64~66]。Vauclair 等人^[67] 曾建议用星风驱动来解释锂的衰竭。他们认为当质量损失率达到 $10^{-13} \sim 10^{-12} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 就能使锂产生不同程度的衰竭。质量损失越大, 锂衰竭越甚。根据这种模型推断, 3Gyr 的年龄差异就能导致 0.25dex 的锂丰度弥散, 这显然与观测相矛盾。而对晕族亚巨星^[68] 和盘族恒星 (特别是冷的毕星团成员星) 来说, 也不能单纯地用质量损失来解释其观测的结果。

(2) 对流超射: 实验表明, 对流超射是湍流的最主要特征。利用包含对流超射的恒星模型能再现晚型恒星的锂丰度随质量和年龄的平稳变化^[69]。Vauclair 等人^[70] 考虑超射随深度的变化, 很好地解释了太阳中锂的衰竭以及正常的铍丰度。然而, 计算表明这种模型在具有薄对流包层的 F 型恒星中是失效的。Ventura 等人^[71] 在考虑对流时加进了磁场的影响, 他们认为即使是较低的磁场都足以抑制主序前阶段锂的衰竭。由于磁场强度的大小与自转有关, 根据恒星的不同自转变化情况就能解释年轻疏散星团中锂丰度的弥散。

(3) 微观扩散: 微观扩散是向上的辐射压力和向下的引力共同作用的结果^[6]。当 $T_{\text{eff}} \geq 6900\text{K}$ 时, 锂在辐射压的作用下向上运动; 在较冷的恒星中锂则在引力的作用下下沉^[72]。由此引起的元素分离形成了恒星中锂的下跌。这种扩散模型中有两个可调参数: 混合长与压力标高之比和质量损失率, 通过调节质量损失率的大小能降低 Spite 平台的蓝端由于辐射加速引起的超丰。引力下沉的时标随着对流区的加深而增加^[73]。然而由这种模型算出的毕星团锂下跌区域的宽度比观测的窄^[27], 它所预言的毕星团 F 型恒星中碳、氧和硼的过贫^[72] 也没有得到观测的认可^[74]。考虑自转混合和扩散的联合作用, 能解释 $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -2.3$ 的恒星锂丰度, 但与极端贫金属星的观测结果却相去甚远^[10]。

(4) 自转: 部分类太阳恒星自转速度与锂丰度弥散随年龄的变化趋势相似, 这似乎表明两者之间存在着某种联系。然而, 人们并没有发现任何直接对应的关系存在, 也许有另一种更直接的方式影响着锂的衰竭。一种可能是由于恒星在演化过程中, 自转速率不断变化, 锂的衰竭与恒星的整个自转变化过程有关, 而不是与某一年龄的自转速率的大小有关。另一种可能则是存在某些与自转有关的混合机制。那么这些机制究竟包括哪些? 目前尚没有一致的看法。Pinsonneault 等人^[68] 认为晕星中由于自转引起的剪切运动使物质在对流区以下混合, 从而保持了平台的存在。

Charbonneau 和 Michaud^[75] 曾用 Tassoul 等人^[76] 的子午环流模型来讨论, 他们认为子午环流能抑制锂的进一步扩散, 然而他们忽略了角动量转移和湍流效应的影响。根据 Zahn^[77] 的计算, 星风驱动的子午环流在大质量恒星中是一种有效的衰竭方式。Talon 等人^[78] 给出了各种机制的全面描述, 他们考虑了不同质量的恒星在角动量转移的过程中, 剪切湍动和子午环流的作用, 同时也包含了元素的分离和自转混合效应, 很好地解释了 B 型星中碳、氮的反常及毕星团中锂的快速下跌, 然而却无法解释下跌区红端的缓慢回升。

4 总结与展望

在观测方面, 无论哪种类型的恒星, 对其锂丰度的分析都还有待于进一步的研究。如对于类太阳恒星, 锂丰度与其它参数(包括金属丰度、自转、色球发射流量等)之间的相关性是否存在? 贫金属恒星中 Spite 平台值是否随有效温度而变化? 是否存在内禀弥散? 以及能否在更多的恒星中探测到 ${}^6\text{Li}$ 等。这些问题的解决在很大程度上取决于对更多更均匀样本星的观测。当然, 对锂丰度的精确测量是一个迫切而又相当困难的课题, 除了要求高分辨率的观测数据以外, 对原子参数(如碰撞截面、振子强度等)和大气模型(考虑对流、不均匀性等)的可靠性等也提出了更高的要求。

在锂衰竭的各种机制中, 大部分研究者认为主要是由于恒星的自转(包括恒星内部的角动量转移等)。恒星由于外包层的不断减慢引起自转混合, 即使对温度高于 7000K 的恒星也不例外。只是在这些热星中, 对流层较浅, 较差自转很弱, 恒星对与自转有关的其它混合机制相对敏感。但我们必须注意到无论哪一种锂衰竭机制都只能解释部分的观测现象。随着观测数据的日渐丰富, 对各种理论模型也提出了不同程度的限制, 但到目前为止, 我们仍不能排除不同类型的恒星存在统一锂衰竭机制的可能性。

所有理论都需要准确的观测数据来验证, 因此对大样本的恒星进行高分辨光谱分析, 消除和减小一切可能存在的误差是很重要的。如此才能准确给出各种星团中类太阳恒星锂丰度的弥散、各种大小锂丰度出现的几率以及 Spite 平台恒星锂丰度的内禀弥散和随有效温度的变化趋势等。这些问题的解决有助于我们对各种锂增丰和衰竭机制的理解, 进而检验各种宇宙模型的有效性。

参 考 文 献

- 1 Herbig G H. *Ap. J.*, 1965, 141: 588
- 2 Duncan D K. *Ap. J.*, 1981, 248: 651
- 3 Pallavicini R et al. *Astron. Astrophys.*, 1987, 174: 116
- 4 Pasquini L et al. *Astron. Astrophys.*, 1994, 287: 191
- 5 Zboril M et al. *M.N.R.A.S.*, 1997, 284: 685
- 6 Balachandran S. *Ap. J.*, 1990, 354: 310
- 7 Spite F, Spite M. *Astron. Astrophys.*, 1982, 112: 209
- 8 Thorburn J A. *Ap. J. Lett.*, 1992, 399: L83
- 9 Pinsonneault M H et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1992, 78: 179
- 10 Chaboyer B, Demarque P. *Ap. J.*, 1994, 433: 510
- 11 Deliyannis C P, Pinsonneault M H, Duncan D K. *Ap. J.*, 1993, 414: 740
- 12 Thorburn J A. *Ap. J.*, 1994, 421: 318
- 13 Norris J E et al. *Ap. J.*, 1994, 423: 386
- 14 D'Antona F et al. *Astron. Astrophys.*, 1991, 248: 62
- 15 Rebolo R, Molaro P, Beckman J E. *Astron. Astrophys.*, 1988, 192: 192
- 16 Spite F, Spite M. *Astron. Astrophys. Lett.*, 1993, 279: L9
- 17 Molaro P et al. *Astron. Astrophys. Lett.*, 1995, 295: L47
- 18 Spite M et al. *Astron. Astrophys.*, 1996, 307: 172
- 19 Bonifacio F, Molaro P. *M.N.R.A.S.*, 1997, 285: 847
- 20 Vauclair S, Charbonnel C. *Ap. J.*, 1998, 502: 372
- 21 Ryan S G et al. *Ap. J.*, 1996, 458: 543

- 22 Boesgaard A M, Tripicco M J. *Ap. J. Lett.*, 1986, 302: L49
- 23 Boesgaard A M. *Ap. J. Lett.*, 1991, 370: L95
- 24 Deliyannis C P et al. *Ap. J. Lett.*, 1998, 498: L147
- 25 Boesgaard A M et al. *Ap. J.*, 1998, 492: 727
- 26 Deliyannis C P et al. *Astrophys. Space. Sci. Libr.*, 1997, 212: 201
- 27 Richer J, Michaud G. *Ap. J.*, 1993, 416: 312
- 28 Molaro P et al. *Astron. Astrophys. Lett.*, 1994, 281: L77
- 29 Pasquini L et al. *Astron. Astrophys.*, 1996, 307: 761
- 30 Boesgaard A M et al. *Ap. J.*, 1998, 493: 206
- 31 King J R. *A. J.*, 1993, 105: 1087
- 32 Cunha K et al. *Ap. J.*, 1995, 452: 634
- 33 Bonsack W, Greenstein T. *Ap. J.*, 1959, 130: 843
- 34 Zappala R R. *Ap. J.*, 1972, 172: 57
- 35 Basri G et al. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 625
- 36 Magazzu A et al. *Ap. J.*, 1992, 392: 159
- 37 Lee C W et al. *A. J.*, 1994, 108: 1445
- 38 Muller E A et al. *Solar Phys.*, 1975, 41: 53
- 39 Mihalas D, Athay R G. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1973, 11: 187
- 40 Carlsson M et al. *Astron. Astrophys.*, 1994, 288: 860
- 41 Steenbock W, Holweger H. *Astron. Astrophys.*, 1984, 130: 319
- 42 Pavlenko Ya V, Magazzu A. *Astron. Astrophys.*, 1996, 311: 961
- 43 Uitenbroek H. *Ap. J.*, 1998, 498: 427
- 44 Luck R E. *Ap. J.*, 1977, 218: 752
- 45 Burbidge E M et al. *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- 46 Reeves H et al. *Nature*, 1970, 226: 727
- 47 Meneguzzi M J et al. *Astron. Astrophys.*, 1971, 15: 337
- 48 Lambert D L. *Astron. Astrophys.*, 1995, 301: 478
- 49 Cameron A G W. *Ap. J.*, 1955, 121: 144
- 50 Cameron A G W, Fowler W A. *Ap. J.*, 1971, 164: 111
- 51 Smith V V, Lambert D L. *Ap. J. Lett.*, 1989, 345: L75
- 52 Smith V V, Lambert D L. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1990, 72: 387
- 53 Sackmann I J et al. *Ap. J. Lett.*, 1992, 392: L71
- 54 Suleimanov V, Rebolo R. *Astron. Astrophys.*, 1998, 330: 999
- 55 Donatella Romano, in the Proceedings of the Workshop, "LiBeB, Cosmic Rays and Gamma-Ray Line Astronomy", Paris, 1998
- 56 Woosley S E et al. *Ap. J.*, 1990, 356: 272
- 57 Timmes F X et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 98: 617
- 58 Krauss L M, Romanelli P. *Ap. J.*, 1990, 358: 47
- 59 Walker T P et al. *Ap. J.*, 1991, 376: 51
- 60 Smith M S. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1993, 85: 219
- 61 Witten E. *Phys. Rev. D*, 1984, 30: 272
- 62 Deliyannis C P et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1990, 73: 21
- 63 Weymann R, Sears R L. *Ap. J.*, 1965, 142: 174
- 64 Hobbs L M et al. *Ap. J.*, 1989, 347: 817
- 65 Boothroyd A I et al. *Ap. J.*, 1991, 377: 318
- 66 Schramm D N et al. *Ap. J. Lett.*, 1990, 359: L55
- 67 Vauclair S, Charbonnel C. *Astron. Astrophys.*, 1995, 295: 715
- 68 Pinsonneault M H et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1990, 74: 501
- 69 Straus J M et al. *Ap. J.*, 1976, 204: 481
- 70 Vauclair S et al. *Ap. J.*, 1978, 223: 567

- 71 Ventura Paolo *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 331: 1011
72 Michaud G. *Ap. J.*, 1986, 302: 650
73 Michaud G. In: Cherry M L, Lande K, Fowler W A eds. *Solar Neutrinos and Neutrino Astronomy*, New York: American Institute of Physics., 1985. 75
74 Garcia Lopez R J *et al.* *Ap. J.*, 1993, 412: 173
75 Charbonneau P, Michaud G. *Ap. J.*, 1988, 334: 746
76 Tassoul J-L, Tassoul M. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1982, 49: 317
77 Zahn J-P. *Astron. Astrophys.*, 1992, 265: 115
78 Talon S, Charbonnel C. *Astron. Astrophys.*, 1998, 335: 959
79 Boesgaard A M, Tripicco M J. *Ap. J.*, 1986, 303: 724

New Progress in the Study of Stellar Lithium Abundance

Qiu Hongmei^{1,2} Zhao Gang¹ Liu Xuefu² Li Zongwei²

(1. *Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(2. *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Abstract

Lithium is one of the few nuclei which are synthesized during the Big Bang, the abundances of which are of importance for our understanding of many problems, ranging from primordial nucleosynthesis, to the chemical evolution of our Galaxy. We summarized the recent observational results of lithium abundance in solar-like stars, halo stars, pre-main sequence stars and stars in cluster. We also presents here Non-LTE effects on analysing lithium abundance and some lithium depletion mechanisms. Disk stars are relatively young and have a high lithium abundance with a large scatter, while the old halo stars have relatively low lithium abundance with a small dispersion. Whether Spite plateau is real or not is still in discussion. Both supernovae and massive AGB are the main sources of lithium production in stars. The available depletion mechanisms, such as mass loss, convective overshooting, microscopic diffusion and rotational mixing, can only explain part of the observations.

Key words stars: lithium abundance—stars: lithium depletion