

晚型星的锂丰度与活动性

赵刚 赵永恒

(中国科学院北京天文台 北京 100080)

刘学富

(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要

具有类太阳活动恒星的化学元素丰度观测与分析,对于研究星系的化学演化规律和恒星核合成过程都具有十分重要的意义。本文从观测和理论模型两个方面详细地评述了近年来国内外对类太阳活动恒星,特别是RS CVn型星的锂丰度反常与活动性及自转速度关系的研究进展情况。

1 引 言

恒星化学演化的现代理论主要解决两个问题。第一个问题是解释我们所观测到的大多数恒星化学成分接近于太阳化学元素丰度这一事实。第二个问题是试图理解大约占恒星总数百分之一的恒星化学元素丰度与太阳不一致的反常现象。

目前,人们对第一个问题的解释是:所有现存的氢和绝大多数氦形成于宇宙大爆炸过程中,而其他较轻元素首先由第一代大质量恒星通过s-过程合成,并通过AGB和超新星爆发返回到星际介质。同时,通过超新星的r-过程核合成形成重核元素,而星际气体的充分混合使得恒星化学元素成分比较均匀一致。第二个问题涉及的是特殊化学成分恒星(CP stars),其类型有多种。而造成这些元素丰度差别的解释机制也各不相同。在恒星演化过程中,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,即在早期宇宙演化形成,锂的丰度研究可以提供有关银河系早期演化及恒星的结构和演化高温过程的信息。因而恒星锂丰度的研究及其与演化年龄、自转速度、有效温度和恒星的活动性等的关系,成为人们研究的重要课题。本文主要评述晚型恒星锂丰度的主要观测研究进展,并且讨论了反常化学元素丰度的形成机制,锂的衰竭问题,特别是色球活动性较强的恒星锂丰度反常与活动性的关联。

1994年1月10日收到,

1994年3月26日收到修改稿

2 观测研究

近年来, 人们对于晚型星的化学成分特别是锂丰度与其活动性存在着的关联性, 给予了很大的关注。许多研究者利用观测获得的高分辨、大色散和高信噪比的光谱分析, 研究了大量类太阳恒星及活动性强的色球活动星包括 RS CVn 型双星及密近双星等的锂丰度及其活动性的关系。Leuschin^[1] 发现密近双星的氮 (N) 丰度比正常恒星高 6 倍, 碳 (C) 丰度比正常恒星低 2 倍, 而氦 (He) 丰度是正常恒星的 1.5 倍。关于锂丰度的观测研究主要有以下几个方面:

2.1 类太阳恒星

1981 年 Duncan^[2] 测定了 100 颗 F5-G5 型光谱的矮星和亚巨星的 Ca II K 线发射流量 (表征色球活动水平) 和锂丰度, 发现虽然对于年老的恒星两者都统计性地减小, 但它们的相关性并不太好, 很多类太阳恒星具有较高的锂丰度和较低的色球活动发射流量。这些结果引起了许多人开展进一步的研究工作。Pallavicini 等人 (1987)^[3] 对南天的 27 颗矮星和亚巨星, 光谱型为 F、G 和 K 的色球活动恒星进行了观测研究, 发现这些恒星具有异常高的锂丰度, 其值接近于星族 I 恒星的锂丰度初始值。他们最初提出这种高锂丰度是由于这类恒星表面存在巨大恒星黑子, 从而降低了锂电离度所产生的结果。

目视双星 ζ UMa 的锂丰度特性是一个谜, 它是由子星 A (一个不活动的星) 和子星 B (是一个活动性较强的分光双星) 组成, 两个子星的光谱型都是 G0V, 然而其子星 A 的锂丰度比活动的子星 B 的高。Pallavicini 等人 (1987)^[3] 认为, 它们属于老系统, 子星 A 是年老星具有高的锂丰度和低的色球发射, 而子星 B 是双星受潮汐迫使自转的影响。还有不同的看法, 到目前为止, 尚无定论。

2.2 色球活动星和相关天体

色球活动星主要包括 RS CVn 型双星和 BY Dra 型双星, 这类星频繁发生剧烈的色球活动。一般说来, 这类双星的冷子星活动性更强些。1992 年 Pallavicini 等人^[4] 又观测了南天的 65 颗 RS CVn 型星, 发现其中约三分之二样品星的 K 型子星具有高的锂丰度。详细的分析表明, 无法确定用哪一种单一机制解释在许多 K 型色球活动星中观测到的高锂丰度值, 很可能是来自几种不同过程的贡献, 而恒星黑子造成的锂线增强只是其中的一种。后来, Pallavicini 等人^[5] 的进一步分析表明, 恒星黑子是否对锂线强度有如此大的影响值得怀疑。1992 年, 刘学富等人^[6] 从 57 颗 RS CVn 型双星的高分辨率、高信噪比光谱观测结果, 计算分析了 76 颗子星的锂丰度值。统计分析结果表明, 恒星大气中的锂丰度随着有效温度的降低有明显的减少趋势, 然而锂丰度随 $v \sin i$ 的增大虽有减少的趋势, 但弥散很大。他们的统计分析还表明, 这 76 颗 RS CVn 型子星的锂丰度和活动性的强弱无明显关系。需要指出的是, 在他们的样本中, 7 个可检测两个子星锂丰度的双星系统中, 冷子星活动性较强, 其锂丰度皆低于它的活动性差些的热伴星, 而相反的情况没有观测到。

Fekel 等人^[7] 观测到许多色球活动的 K 型巨星和亚巨星比正常星的锂衰竭少。他们提出一个可能的建议, 即显示中等或强锂线的色球活动星, 可能是由具有浅对流层的晚

A 型或早 F 型星演化而来。这些恒星在主序阶段缺少足够的时间使锂元素明显耗尽。这一解释引起了人们的注意, 但对比观测结果似乎并不完全令人满意。因为只有质量足够大的恒星, 如质量大于 $1.5M_{\odot}$, 才可能有如此薄的光球对流层以阻止主序阶段的锂衰竭。而对于小质量恒星, 具有年龄大于 10^8 年的星团, 观测结果显示锂衰竭是存在的。更小质量的恒星, 由于对流层的增加, 锂衰竭比较显著。到目前为止, RS CVn 型星的质量并未很好地确定下来, 在许多情况下, 我们只有它们的质量下限或质量函数。估计它们的质量很可能存在于 $1-2M_{\odot}$ 范围内。由于在大多数活动星中都观测到了超额锂丰度这一事实, 很难解释所有这些恒星质量都落在允许质量之上。而少数几颗没有可测定锂线的恒星具有小于 $1.5M_{\odot}$ 质量。有些研究者认为这类天体可能是年轻的, 特别是场矮星 (field star)。但有些巨星和双星也是属于年轻星族。对于典型的 FKCom (高光度恒星), Phillips 和 Lestrade^[8] 提出这一恒星是年轻天体保留了星族 I 的高初始锂丰度。Fekel^[9] 也提出具有高自转速度的活动性恒星可能是年轻天体, 特别是由大质量主序星演化而来的恒星, 保持着前身星的大部分角动量。可是, Fekel 和 Marschall^[10] 观测到一个具有星族 II 运动特征的活动恒星。Fekel 和 Balachandran^[11] 注意到这一相反结果, 并反对这种保持主序星角动量的假设。

Randich 和 Pallavicini^[12] 的观测结果表明多数色球活动样品星的锂丰度不是很特别, 但是比起同光谱型恒星的锂丰度仍然大些, 其中五颗星有异常高的锂丰度值, 甚至超过星族 I 恒星的锂初始丰度值 (亦即 $\log N(\text{Li}) \geq 3.1-3.2$), 以 K 型恒星为例, 其大多数的锂丰度的范围在 $\log N(\text{Li}) \geq 0-2$, 而只有少数恒星其锂线很弱或缺少锂线。

在 Pallavicini 等人^[4] 的工作中, 色球活动星的一个显著特点是其自转与同类光谱型宁静恒星存在着系统差别。事实上, 所有活动性较强的恒星, 自转速度都超过通常观测的 K 型星。这并不令人感到惊奇。因为所有观测对象是基于表面活动变化迅速或活动剧烈而被选择的。如果活动性起源于磁场, 可以预期表面活动性与自转之间一定存在着某种关联。首先, 观测到的恒星自转与锂丰度的关系可以被简单地解释为年龄效应。活动性较强的快速自转恒星是年轻的, 它没有足够的时间耗尽表面的锂元素。因而它们的锂丰度与经典理论相一致。然而, 有证据表明色球活动星, 特别是 RS CVn 型星, 具有至少 10^9 年的主序后演化恒星。在色球活动星中, 可能有少数的是年轻恒星, 但大多数并非如此。同时, 我们也知道对于密近双星自转与年龄并无因果关系。RS CVn 型星自转速度快, 并不是因为在主序阶段由星风和磁场使它变慢的时间不够长, 而是因为潮汐作用有效地阻止了自转周期向轨道周期的转移。

2.3 晕族矮星

Molaro^[13] 讨论了 29 颗具有 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$ 和 $T_{\text{eff}} > 5500\text{K}$ 的晕族矮星, 获得其平均的锂丰度值 $\log N(\text{Li}) = 2.08 \pm 0.10$, 其中 0.10 的弥散可以完全归于确定丰度本身的误差。与此相反, 一些金属丰度不甚低的恒星 ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$) 显示了较大和本质的弥散。这点与金属依赖锂衰竭过程相一致, 也与贫金属缺少这种衰竭过程相一致。观测的唯一例外是贫金属星 CS22876-32 星, 其锂线太弱以至不能测定。

2.4 星族 I 红巨星

Gratton^[14] 评述了这类恒星的锂丰度, 指出大多数红巨星具有低的或探测不到的锂

丰度。只有少数红巨星 (< 5%) 是富锂的, 其值最高可达到 $\log N(\text{Li}) \sim 4$ 。这类星可分为活动恒星、超巨星、S- 和 C- 星、弱 G- 带星和少数正常 K 巨星。在一些观测的超巨星中, 锂的丰度似乎具有原始锂丰度值。而后面三类巨星的 CNO 丰度和 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位素表明, 它们存在着深度的混合, 原始锂丰度已衰竭掉。

2.5 高超额富锂星

属于晚型光谱型已演化的具有中等质量的 AGB 星。在观测上只发现几颗, 它们的锂丰度比太阳高 10^4 倍。Faraggiana 等人^[15] 发现这类星中的 WX Cyg 和 WZ Cas 两颗星的 Li 6708Å 线的等值宽度随时间而变化, 目前还不能确定其变化是由于测定的不准确性还是真实存在。

综上所述, 我们可列表 1, 给出观测得到的晚型星的锂丰度情况。

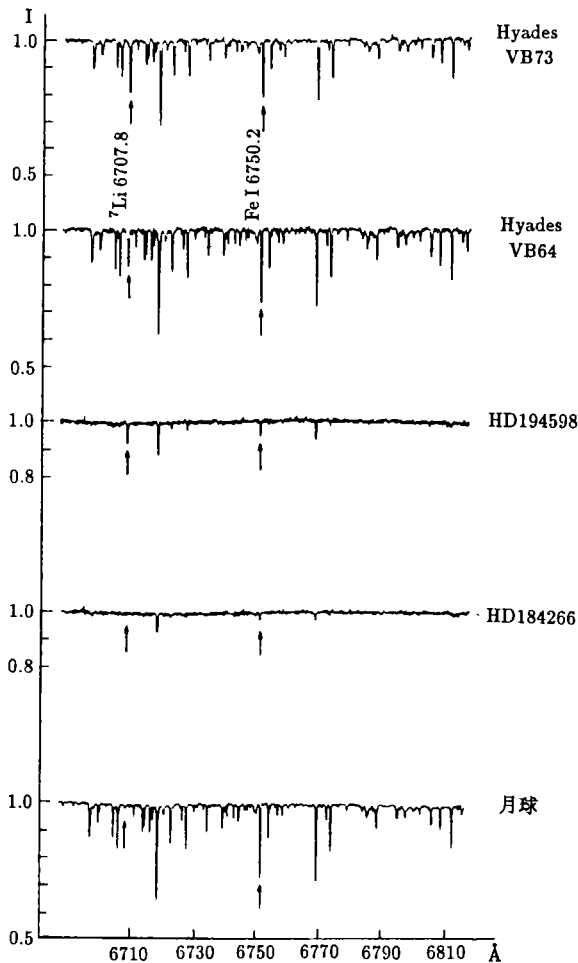


图 1 毕星团的两个成员星和两个晕族的类太阳星在 Li 6708Å 附近的 Reticon 光谱 (月球为比较天体)。请注意它们的 Li 线强弱不等^[35]

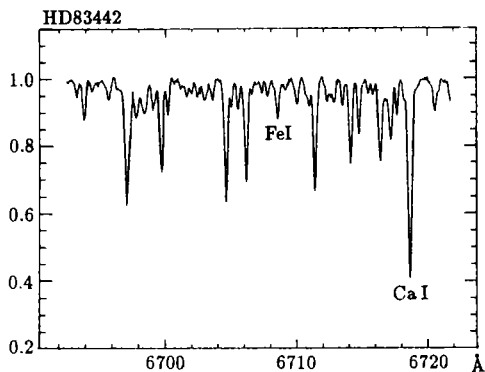


图2 RS CVn型星 HD 83442 在 Li 线 6708Å 附近的光谱

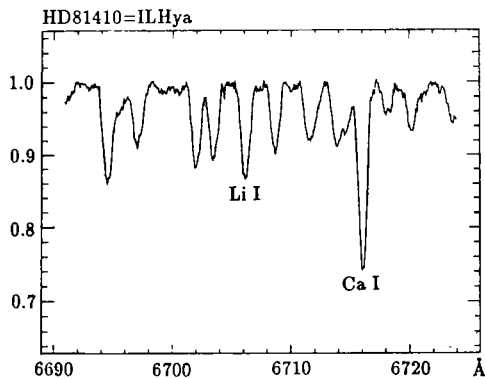


图3 RS CVn型双星 IL Hya 在 Li 线 6708 Å 附近的光谱 (注意: Li 线强)

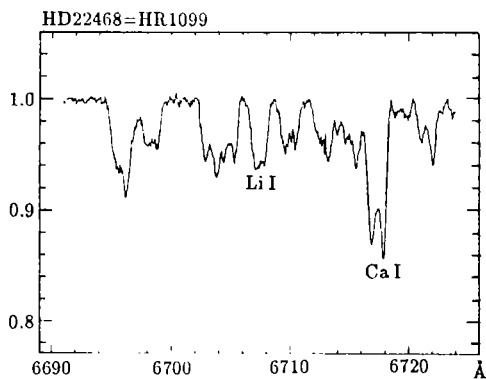


图4 RS CVn型分光双星 HR 1099 在 Li 6708Å 附近的双线光谱 (Li 线清楚可见)

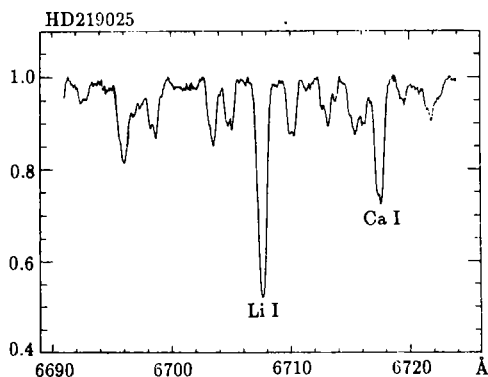


图5 HD 219025 在 Li 线 6708Å 附近的光谱, 注意到它的 Li 线特别强^[12]

表1 观测得到的晚型星锂丰度

晚型星类别	锂的丰度值 $\log N(\text{Li})$	文献
太阳	1.16	[16]
类太阳星	~ 2.0	[2,3]
色球活动星	0.5—3.45	[4-6]
RS CVn 型双星中较冷的 K 型子星	0—2. (多数样品星) > 3.2 (少数)	
晕族矮星 (统计 29 颗星)	$\sim 2.08 \pm 0.1$	[13]
星族 I 红巨星	~ 0 (多数样品星) ~ 4.0 (少数)	[14]
高超额富锂星 (如 WX Cyg, WZ Cas)	~ 5.0	[15]

3 理论进展

锂元素与大多数其他元素相反, 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同氢、氦一起产生的。对锂丰度的精确测定, 可以对宇宙大爆炸模型给出一定的限制, 并为恒星结构和化学演化提供一些重要的依据^[17-19]。由于锂元素在相当低的温度(约 $2.5 \times 10^6 \text{K}$) 发生核反应, 而大多数恒星内部温度均高于此值。锂元素基本被限制在恒星表面浅层。另外, 由于恒星外部壳层和内部的物质输送过程(对流, 引力尘降 (settling), 湍流扩散, 子午圈环流等), 从而改变锂的元素含量, 造成与形成该星时不同的锂丰度值。事实上, 观测发现主序星表面锂丰度存在很大的弥散, 已证明了这些结论。

3.1 锂的衰竭机制

关于晚型星锂的衰竭机制问题一直是理论研究的重要课题, 它与恒星的演化年龄、大气结构、自转、质量损失和有效温度及金属丰度等有着复杂的联系。如果恒星的表面活动是具有磁流本质, 则恒星的自转与恒星活动关系最为密切, 从而研究锂的衰竭与自转的关联是至关重要的。

Boesgaard^[20] 曾预料自转更快的恒星, 由于增强表面锂向恒星深层环流而增加锂衰竭。然而, Pinsonneault 等人^[21] 通过理论模型计算表明, 自转与锂衰竭存在着反关联。在这个意义上说, 损失角动量越多的恒星, 自转变慢, 它所遭受的锂衰竭与同类光谱型自转变慢较小的恒星相比, 锂衰竭更甚。Pinsonneault 等人的结论是基于太阳自转演化模型的详细计算。他们证明, 太阳的表面层 ($r \geq 0.6R_{\odot}$ 外) 可能比内部更有效地被制动。由此在径向方向引起较差自转和角动量的转移, 导致目前观测到在太阳中锂衰竭的现象。据目前研究, 太阳的锂丰度为 $\log N(\text{Li})=1.16$ (参考标准 $\log N(\text{H})=12.0$), 比星族 I 恒星原始锂丰度低两个量级。

按照 Pinsonneault 等人的模型, 我们可以推测, 在潮汐作用下 RS CVn 型星中缺少有效的制动, 以阻止较强的径向较差自转。因而, 快速自转恒星比具有类似光谱型并损失大部分角动量的正常恒星的锂元素更容易得以保存。锂衰竭的量并不依赖于每秒钟自转速度变化量有多大, 即不依赖角动量的损失量。目前观测到的自转快速恒星, 由于其既可能是年轻的或是因为潮汐的作用, 从而抑止了角动量的损失。这两种恒星都应具有和原始锂丰度差不多的数值。需要指出的是, Pinsonneault 等人的结论依赖于恒星内部磁场作用可忽略这一假设。这点对太阳而言的确成立, 但不清楚对磁活动较强恒星是否亦是如此。不幸的是, 很难利用 Pinsonneault 等人^[4] 的模型直接检验锂丰度与自转的关联。任何初始角动量的弥散都可能影响关联的准确性。Pallavicini 等人^[4] 的色球活动星样本所包含的天体不仅初始角动量不同, 而且质量、年龄和金属丰度均不相同, 因而情况似乎更复杂。

如上所述, 恒星的自转对于锂衰竭具有更重要的作用。可是, 有些观测结果却与预期的相反。Saar 等人^[22] 发现在有效温度 $T_{\text{eff}}=4500\text{K}$ 的老盘 (old disk) 双星中锂线相当强。运动学表明该星是年轻的, 远红外光谱显示恒星的黑子覆盖较强。在进一步的系统

观测中发现了恒星耀发现象。这种冷星中出现强锂线的真正原因尚无法弄清。到底谱线因黑子而增强？锂丰度的确很高？锂衰竭是为磁场所抑制？也许此类恒星已从主序演化出来，并同老盘活动双星 BD-0⁰ 4234 有某些类似之处^[23]。双星 HD 89499 却有不同表现：Ardeberg 和 Lindgren^[24] 发现这颗冷星具有非常低的金属丰度和有效温度 ($T_{\text{eff}} = 5300 \text{ K}$)。Spite^[25] 确定该星锂丰度约为 1.5 dex。这一双星轨道似乎是圆形的，且是活动性双星^[26]。可是它的锂丰度却与同样温度的晕族星锂丰度相同。不同的自转速度并不改变锂的丰度。自转对于锂线的影响至今仍然是一个难题。Fekel 和 Balachandran^[11] 提出一个非常重要的建议，即锂的产生与恒星的“挖掘” (dredge up) 相联系。在恒星深层，核心和壳层之间的角动量转移使壳层快速旋转。

Pallavicini 等人^[27] 认为色球活动星的超额锂丰度不可能只是年龄效应。因为它存在于许多 RS CVn 型双星和其他已演化恒星中。由于少数几颗处于不同位相恒星的观测并不存在锂线的自转调制特征，故锂丰度的超额也不只是由于较大冷黑子增强锂线强度。他们认为，对于主序前星的薄对流层同演化过程中潮汐作用抑制快速自转减慢和角动量损失相结合，可能是定量地解释色球活动星具有较低锂衰竭的有效方法。可是，目前由于他们的样本中的不均匀性，可能还包含有年轻的快速自转的单星，使得解决各种相关效应变得十分不易。

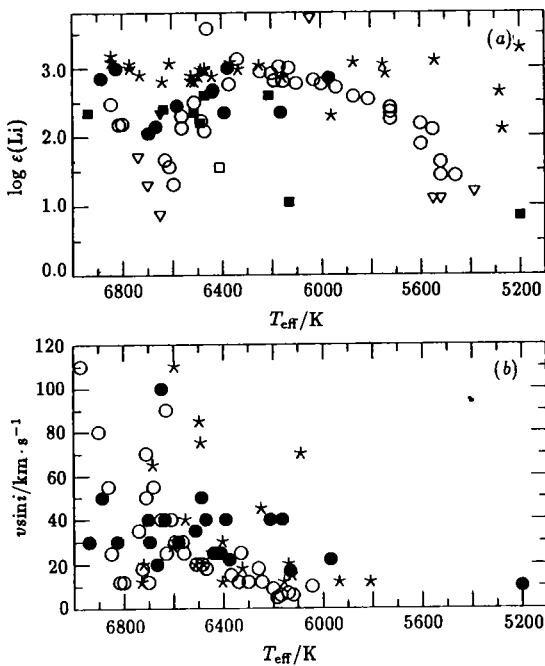


图 6 在昴星团 (星符号)、NGC 6475 (实心符号) 和毕星团 (空心符号) 中成员星的锂丰度和有效温度 (a); 锂丰度和自转速度 (b) 的关系。三角符号表示上限, (c) 图中的真正方形表示在 NGC6475 星团中其视向速度未确定的星^[28]

3.2 锂丰度的下跌 (dip)

这是指在星团中其成员星的锂丰度与有效温度 T_{eff} 的关系图中，在一定的有效温度 T_{eff} 间隔之间锂丰度突然下降，呈现出明显地下凹现象^[28]。这一现象由 Boesgaard 和 Tripicco^[29] 首先在毕星团中发现。观测表明，所有与毕星团相近年龄的星团和老年星团都存在锂丰度的下跌现象。但是不存在于年轻的星团之中，如昴星团 (演化龄是 0.07 Gyr) 和英仙座 α 星团 (0.05 G yr) 内的星没有这种现象。这表明锂丰度衰竭出现在主序星。而最年轻的 NGC6475 星团 (0.2 G yr) 在 6200K 处检测到锂丰度的下跌。在毕星团、后发星团、大熊星团和 NGC6475 星团中，其下跌出现在同一有效温度范围之内。而 NGC752 星团中的下跌出现在比它们冷 90K 处，这种偏差可能是由于红化计算错误或是由于金属丰度的差异。IC4651 星团 (比 NGC 752 星团稍老些) 的下落范围在 6350K 和

6559K 之间, 老星团 M67 (5 G yr) 的下跌稍宽些, 其相应的下跌星是经历了锂衰竭的亚巨星和巨星。依据演化的场星研究, 发现一个重要的现象, 这就是对所有不同金属丰度恒星的锂丰度下跌都发生在同一有效温度处。

Boesgaard^[30] 解释了毕星团的锂丰度的下跌, 依据它与自转 $v \sin i$ 的中断处有一致关系, 假设下跌是自转混合的响应。另外, Michaud^[31] 用引力尘降 (settling) 假设, Schramm 等^[32] 用质量损失机制, 还有用两者相结合的理论来解释。Michaud 和 Richer^[33] 认为有三种过程对主序星的锂丰度起着重要作用。其中非自转恒星中利用引力尘降可以很自然地解释锂丰度的下跌。在自转恒星中子午环流起主要作用。而有效温度在 $T_{\text{eff}} < 6000\text{K}$ 的主序星, 其锂丰度受湍流影响较大。Schatzman^[34] 详细分析了毕星团的成员星锂丰度衰竭可能并非由于自转引起的湍流效应, 提出内部波可能是造成角动量转移把锂运输到燃烧层的原因。目前还没有一个可行的机制, 可以解释在年轻星团中晚 F 型星的锂丰度衰竭如此之大。

为了正确理解晚型星的锂丰度和活动性关系, 锂丰度衰竭的机制和星团成员星中出现的锂丰度下跌现象, 还有待于进一步的研究工作。首先需要观测更多更均匀的样本。重点为已有确定质量和演化状态的典型的类太阳星、色球活动星和不同年龄的星团成员星。需要在样本中非常仔细地确定非常年轻恒星和可能的主序前星及其运动学特点和表面活动性。沿这些思路进行深入研究, 相信最终会为我们对晚型星特别是色球活动星的锂丰度提供一些基本的理解。

参 考 文 献

- [1] Leuschin V V. *Astron. Zh.*, 1988, 65: 988
- [2] Duncan D K. *Ap. J.*, 1981, 248: 651
- [3] Pallavicini R et al. *Astron. Astrophys.*, 1987, 174: 116
- [4] Pallavicini R et al. *Astron. Astrophys.*, 1992, 253: 185
- [5] Pallavicini R et al. *Astron. Astrophys.*, 1992, 267: 145
- [6] Liu X F et al. *Acta Astronomica Sinica*, 1992, 33: 316
- [7] Fekel F C et al. *A. J.*, 1987, 94: 726
- [8] Phillips R B, Lestrade J F. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1990, 22: 832
- [9] Fekel F C. *ESA SP-281*, 1988, 1: 331
- [10] Fekel F C, Marschall L A. *A. J.*, 1991, 102: 1439
- [11] Fekel F C, Balachandran S. 1987, Preprint
- [12] Randich S, Pallavicini R. *Memorie Della Società Astronomica Italiana*, 1991, 62: 75
- [13] Molaro P. *Memorie Della Società Astronomica Italiana*, 1991, 62: 17
- [14] Gratton R G. *Memorie Della Società Astronomica Italiana*, 1991, 62: 53
- [15] Faraggiana R et al. *Memorie Della Società Astronomica Italiana*, 1991, 62: 189
- [16] Anders E and Grevesse N. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 197
- [17] Malaney R A, Fowler W A. *Ap. J.*, 1988, 333: 14
- [18] Malaney R A, Fowler W A. *Ap. J. Lett.*, 1989, 345: L5
- [19] Audouze J, Silk J. *Ap. J. Lett.*, 1989, 342: L5

- [20] Boesgaard A M. In: Wallerstein G ed. Cool Star, Stellar System and the Sun, provo, ASP, 1990: 318
- [21] Pinsonneault M H et al. Ap. J., 1990, 338: 424
- [22] Saar S H et al. Astron. Astrophys., 1990, 235: 291
- [23] Spite M et al. Astron. Astrophys., 1984, 141: 56
- [24] Ardeberg A, Lidgren H. Astron. Astrophys., 1991, 244: 310
- [25] Spite M, Spite F. In: Prantzos N et al eds. Origin and evolution of the Elements, Paris, 1992, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993: 201
- [26] Pasquini L et al. Astron. Astrophys, 1991, 249: L23
- [27] Pallavicini R et al. ESO messenger, 1987, (62): 51
- [28] Balachandran S. Memorie Della Società Astronomica Italiana, 1991, 62: 33
- [29] Boesgaard A M, Tripicco M J. Ap.J. Lett., 1986, 302: 149
- [30] Boesgaard A M. Publ. Astron. Soc. Pac., 1987, 99: 1067
- [31] Michaud G. Ap. J., 1986, 302: 650
- [32] Schramm D N. Ap. J., 1990, 359: L55
- [33] Michaud G. and Richer J. Memorie Della Società Astronomica Italiana, 1991, 62: 151
- [34] Schatzman E. Memorie Della Società Astronomica Italiana, 1991, 62: 111
- [35] de Strobo G C. In: Hayes D S, Pasinetti L E, DAVIS Philip A G eds. Calibration of fundamental stellar quantities, Proc. of the IAU symp. No.111, Italy, 1984, [s.l.]: [s.n.], 1985: 137

(责任编辑 舒似竹)

Li Abundance and Activity in the Late-type Stars

Zhao Gang Zhao Yongheng

(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Liu Xuefu

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

The observations and analysis of Sun-like active stars are very important for studying the chemical evolution of galaxy and stellar nucleosynthesis. In this paper, the research progress of Li abundance, activity and rotation in Sun-like active stars, especially, in RS CVn type stars is reviewed from both the observational and theoretical sides.