

富锂巨星研究概述*

闫宏亮^{1,2†} 施建荣^{1,2‡}

(1 中国科学院国家天文台光学重点实验室 北京 100101)

(2 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 锂(Li)元素最初诞生于大爆炸核合成,是最重要的轻元素之一.但锂元素丰度在很多类天体中均表现出观测与理论不符的现象,这一问题困扰了天体物理学家数十年.富锂巨星就是这样的一类天体,它们大气中的Li丰度超过了标准恒星演化模型的理论值.虽然富锂巨星早在约四十年前就被发现,但其起源依然是未解之谜.随着以郭守敬望远镜(LAMOST)巡天等为代表的大型光谱巡天项目的开展、以开普勒(*Kepler*)卫星为代表的星震学观测数据的产出以及数据驱动类方法和技术的飞速发展,针对富锂巨星的研究取得了一系列重要的突破.在此将回顾富锂巨星近四十年来的研究进展,并总结对于富锂巨星最新的认知.

关键词 恒星: 丰度, 恒星: 化学特殊, 恒星: 演化, 恒星: 小质量, 巡天, 锂

中图分类号: P144; **文献标识码:** A

1 引言

研究元素如何形成与演化,是当代天体物理学中一个基本的问题.锂(Li)元素最初是大爆炸核合成(Big Bang Nucleosynthesis, BBN)中所诞生的4种稳定核素之一^[1-2],但在很多种类天体中,其丰度的观测值与理论预言值不符^[3-5].例如,Spite等人发现银河系中贫金属晕族恒星中的锂丰度(A_{Li}^*)稳定在2.1 dex左右^[3],显著低于BBN的预言值.这至今仍然是当代观测天体物理和核天体物理最热门的课题之一.再例如,虽然贫金属星中的Li丰度相对BBN预言是不足的,但目前星际介质中的Li却有一半左右来源不明.理论只能明确另外一半的来源(来自于BBN和宇宙线散裂星际原子),Tajitsu等人通过观测证明新星(Nova)是星际Li元

素的贡献源之一^[4],将星际介质中Li元素来源问题向前推进了重要一步.

Li元素在恒星中的行为也同样复杂.和相对稳定的重元素相比,Li会随着恒星的演化经历一系列变化,造成这一现象的一个重要原因是Li十分容易被消耗.当温度超过 $\sim 2.5 \times 10^6$ K时, ^7Li 即会通过俘获质子发生 $^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow ^8\text{Be} \rightarrow 2^4\text{He}$ 反应而被分解^[6].因此Li无法保存于恒星内部,只能留存在恒星表层大气中.很多恒星在主序阶段就表现出Li衰竭.而当恒星离开主序后,内部出现第1次挖掘过程(First Dredge Up, FDU).大气表层的Li通过对流被带入恒星内部,因其无法承受高温而被分解掉,造成恒星表面的Li丰度出现急速下降,这是标准恒星演化模型给出的

2021-05-11收到原稿, 2021-06-30收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12022304、12090040、12090044、11973052、11973042、11833006、U1931102),国家重点研发计划(2019YFA0405502),中国科学院青年创新促进会(2019060)资助

[†]hlyan@nao.cas.cn

[‡]sjr@nao.cas.cn

* $A_{\text{Li}} = \lg[n_{\text{Li}}/n_{\text{H}}] + 12$, 其中 n_{Li} 与 n_{H} 分别为恒星大气中Li与H的粒子数密度

预言^[7-8]. 很多观测与之符合得很好^[9-12]. 一颗初始丰度与星际介质Li丰度($A_{\text{Li}} \simeq 3.3 \text{ dex}^{[13]}$)相近的恒星在演化到巨星阶段后, 其大气中Li丰度一般都不会高于 $1.5 \text{ dex}^{[14-15]}$. 但是, 观测发现少数巨星中的Li丰度会超过 1.5 dex , 这些恒星被称为富锂巨星(从更精确的角度来说, 针对不同光谱型的恒星, 富锂标准应有所变化^[16], 但 1.5 dex 这一标准因简单和习惯性等原因仍然被广泛使用). 其中有些甚至超过了太阳形成时星际介质的值(3.3 dex), 被称为超富锂巨星.

富锂巨星的存在对标准恒星演化模型提出了严峻的挑战. 它说明必定还有额外的机制可以使得Li元素在恒星中进行增丰. 找到这一机制并理解它, 对Li元素的形成以及恒星演化理论的完善具有重要意义, 但也是一项相当有挑战性的工作. 近40 yr以来, 针对富锂巨星的研究工作已经取得了一系列进展. 本文将简要概述富锂巨星的研究历史、现状和展望, 从富锂巨星的搜寻、富锂巨星的观测性质、富锂巨星的起源理论发展以及富锂巨星研究的新趋势与展望等方面做具体展开.

2 富锂巨星的搜寻

第1颗富锂巨星是由Wallerstein和Snedden在1982年研究富钡的银河系场星时偶然发现的^[5]. 他们发现HD 112127这颗K型星在 6707.8 \AA 和 6103.6 \AA 处均有很强的吸收线(如图1所示), 这是两条Li I线所在的位置. 最终他们发现这颗K巨星的Li丰度高达 $\sim 3.2 \text{ dex}$. 这个发现令人感到不可思议, 并引起了天文界搜寻富锂巨星的广泛兴趣. 其中最早的一批以Brown等人的工作为代表^[9], 他们分析了644颗G、K巨星中的Li丰度. 首先他们确认了绝大部分巨星中的Li丰度与标准恒星演化模型^[7]所预言的一致, 即低于 1.5 dex . 同时他们也发现了10颗富锂巨星, 提出富锂巨星占普通巨星的比例约为1%–2%, 这说明富锂巨星是异常稀少的. 与之同时代的工作也证明了这一点. 限于上世纪80–90年代相对有限的观测资源, 即使将演化到更晚期的渐近巨星支(AGB)恒星也包含在内, 富锂巨星的发现过程依然十分缓慢^[17-28].

想要研究富锂巨星的性质和起源, 必须继续扩充富锂巨星数量有限的样本. 进入

20世纪以来, 天文学家搜寻富锂巨星的热情越来越高. 随着小规模光谱巡天型观测的发展, 不断有新的富锂巨星被发现. 此时也能粗略窥探富锂巨星的空间分布十分广泛, 无论是在银盘^[e.g., 29]、银晕^[e.g., 30-31]、核球^[e.g., 32]、球状星团^[e.g., 33]、疏散星团^[e.g., 34]还是银河系的矮星系中都有所发现^[35]. 由于富锂巨星十分稀少, 因此一些针对富锂巨星的搜寻工作聚焦于某类具有固定特征的天体, 以期待提高富锂巨星搜寻的成功率, 例如Drake等人在快自转的恒星中搜寻富锂巨星等^[36]. 2010年后, 大型光谱巡天项目在富锂巨星的搜寻方面逐渐发挥了威力, 其搜寻的规模也从上世纪80–90年代最多数百颗扩充到数千颗, 这些努力有效扩充了富锂巨星的样本规模. 其中, Martell等人在斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)所观测的约8500颗巨星样本中发现了23颗富锂巨星^[30], 是当时一次性发现富锂巨星较多的工作之一; 而Ruchti等人则利用视向速度实验(Radial Velocity Experiment, RAVE)巡天项目所观测的700颗巨星的中分辨率($R \sim 7500$)光谱, 发现了6颗新的富锂巨星^[37]; Adamów等人利用行星搜寻项目观测了约350颗巨星, 并发现了9颗富锂巨星^[31, 38]; Kumar等人集中观测了约2000颗巨星并从中发现了18颗富锂巨星^[39-40]; Casey等人利用盖亚-欧南台(Gaia-ESO)巡天中约2000颗巨星的高、中分辨率光谱发现了约20颗富锂巨星^[41], 这一数字后来被Smiljanic等人扩充到约40颗^[42]; Deepak等人利用基于HERMES (High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph)的银河系考古(Galactic Archaeology with HERMES, GALAH)巡天所给出的Li丰度, 发现了300余颗富锂巨星^[43], 这是一批分布在南天的富锂巨星样本. 以这些工作为代表, 富锂巨星样本逐渐增大. 在此期间, 一些基于零散观测的富锂巨星搜寻和发现工作也依然在继续^[12, 16, 44-60], 其中一些在后续研究中被证实具有极其重要的启示作用, 例如Aguirre等人首次利用星震学发现了一颗富锂的红团簇星^[55], 这对后续富锂巨星演化阶段的研究起到了重要的引领作用^[e.g., 61].

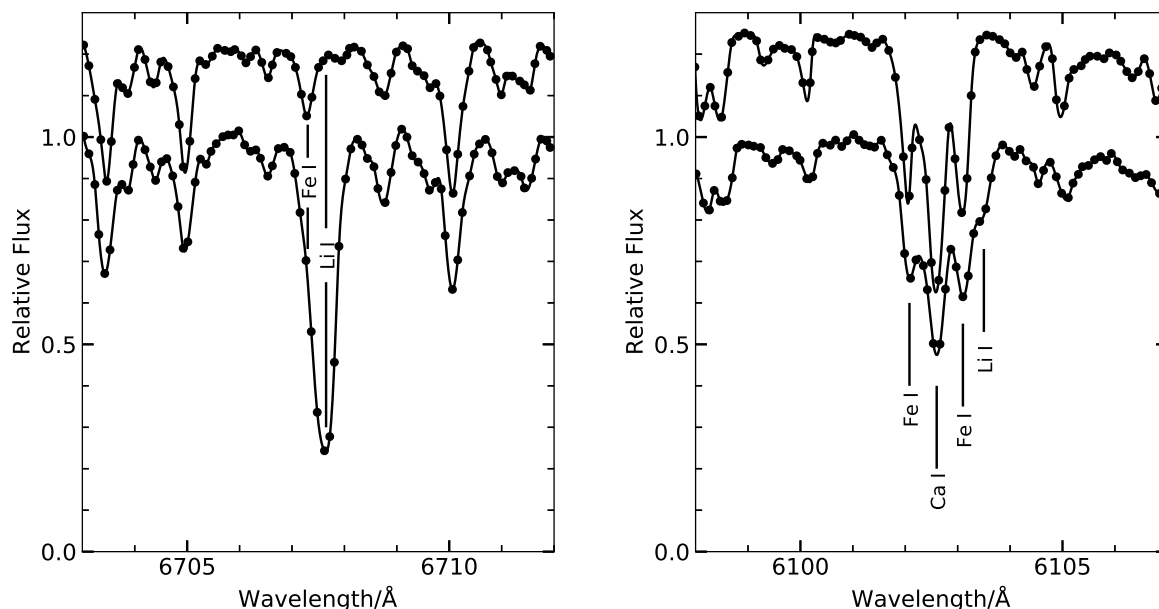


图 1 首颗富锂巨星HD 112127与普通巨星 μ Leo的高分辨率光谱对比. 其中位于下方的光谱来自HD 112127, 位于上方的光谱来自 μ Leo (μ Leo光谱的相对流量被提高了0.25以和HD 112127区分开来). 在HD 112127光谱中, 6707.8 Å (左图)和6103.6 Å (右图)处各自有一条明显的吸收线. 图片根据Wallerstein等^[5]中的数据重新绘制而来.

Fig. 1 Comparison between the high-resolution spectra of the first Li-rich giant HD 112127 and the Li-normal giant μ Leo. In each panel, spectrum of HD 112127 is shown at the bottom, and spectrum of μ Leo on the top (the relative flux of μ Leo was shifted by 0.25 for a clear comparison with HD 112127). Strong absorptions at 6707.8 Å (left panel) and 6103.6 Å (right panel) can be seen from the spectrum of HD 112127. The figure is plotted according to the original one from Wallerstein et al.^[5].

在富锂巨星的搜寻过程中, 郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)^[62-63]发挥了决定性的作用. 凭借其出色的光谱获取效率, LAMOST已经积累了千万量级的恒星光谱, 成为搜寻富锂巨星这类稀有天体的理想数据库. 由于LAMOST一期巡天的光谱分辨率仅有1800左右, 从中搜寻富锂巨星具有一定的难度. 这是因为相关工作都基于Li I位于6707.8 Å处的共振线, 而此线在 ~ 1800 分辨率的光谱下较弱且有一定的混合, 特别是对于Li丰度在1.5 dex左右的恒星. 基于低分辨率光谱搜寻富锂巨星的技术方法主要有利用半经验的线强比^[64]、模板匹配^[65]和机器学习^[66]等方法. 图2展示了富锂巨星的发现数量随时间的变化关系, 富锂巨星样本在LAMOST的数据帮助下步入了快速扩充的时代. Casey等人在LAMOST第2次释放数据

(Data Release 2, DR2)中发现了约2000颗富锂巨星^[67], 这一工作中所发现的主要是锂丰度较高的富锂/超富锂巨星, 而Li丰度在1.5–2.4 dex这一区间的恒星数量反而随着Li丰度的降低而逐渐减少, 这与普遍的预期不一致. 同年, Gao等人在LAMOST DR7数据中挑选出81万颗信噪比较高的巨星, 并利用模板自动匹配和人眼后期检查相结合的方法, 发现了10535颗富锂巨星^[65], 其中约8000颗是首次发现. 这是迄今为止发现富锂巨星数量最多的工作. 不但如此, Gao等人所发现的富锂巨星随着Li丰度的分布更加合理^[65], 即Li丰度越低的恒星数量越多. 最近, Wheeler等人尝试利用非监督机器学习方法在LAMOST DR5中搜寻富锂巨星, 最终挑选出了8000余颗^[66], 尽管这些恒星很可能与Gao等^[65]的发现大量重复, 但可以预见这种新方法在未来具有较大的应用价值.

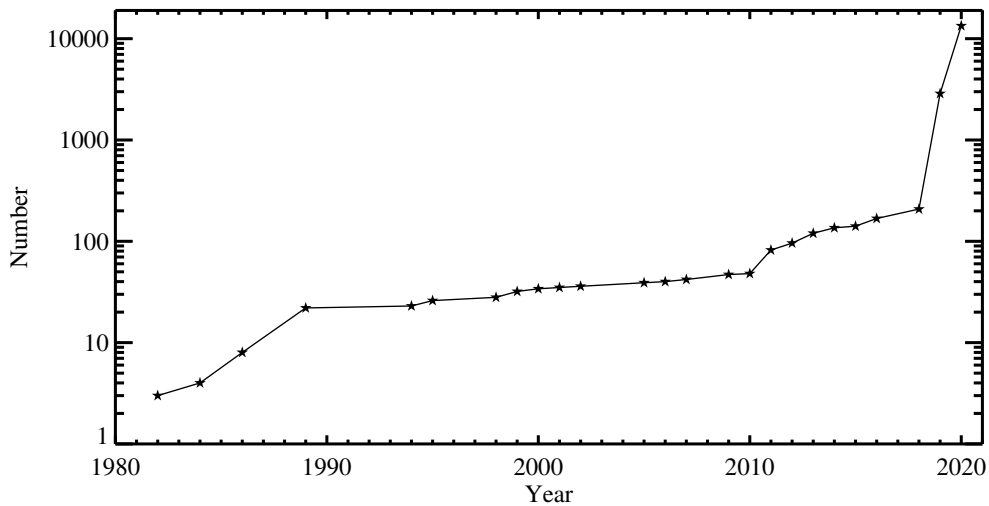


图 2 已知富锂巨星的总数随时间逐渐增加. 其中纵轴为对数坐标. 五角星表示截止某年已知的富锂巨星的总数.

Fig. 2 The total amount of known Li-rich giants by different years. The vertical axis is in logarithmic scale. The pentagrams indicate the total amount of known Li-rich giants till a certain year.

值得一提的是, 基于LAMOST数据以及高分辨率光谱的后随观测, Yan等人发现了目前Li丰度最高的巨星TYC 429-2097-1, 其在非局部热动平衡下的Li丰度高达4.51 dex^[68], 超出星际空间中的Li丰度一个量级以上. 通过高分辨率光谱, Yan等^[68]对其性质和起源进行了详细研究. 除此之外, 一系列工作^[69-71]对数十颗基于LAMOST数据所发现的富锂巨星进行了高分辨率光谱的后随观测, 并对这些恒星的性质进行了详细分析. 近年来, LAMOST使用其所搭载的一台试验性高分辨率光谱仪进行了测试观测, 其光谱分辨率可达 $R \sim 30000$. 最近, Zhou等人首次通过LAMOST高分辨率光谱证认了两颗新的富锂巨星^[72].

近年来大型光谱巡天项目的开展以及数据驱动技术方法的进步, 极大地促进了富锂巨星的搜寻与发现. 到目前为止, 人类已经发现的富锂巨星数量约11000颗, 其中约95%由LAMOST的数据所发现. 样本的扩充为最终解开富锂巨星的起源之谜起到了关键的作用.

3 富锂巨星的观测性质

对富锂巨星进行搜寻的根本目的, 是通过具有

代表性的大样本来研究富锂巨星的性质, 进而解开Li元素在巨星中是如何增丰的这一谜题. 对富锂巨星观测性质的研究从富锂巨星被发现以来就没有停止过.

3.1 富锂巨星的比例

早期的研究即发现富锂巨星十分稀少^[9], 约为1%–2%左右, 这一结果被后来的多种大规模观测所证实^[12, 29, 32, 40, 48], 特别是一些光谱巡天观测. 例如Gaia-ESO、RAVE和GALAH分别给出富锂巨星占巨星的比例为0.3%、0.8%、2%和0.6%. 尽管这些比例严格来说并不能算完全一致, 但这主要是不同样本各自的选择效应(例如样本大小、Li丰度的计算方法)所造成的. 当样本足够大后, 得到的比例将更加可靠. 例如LAMOST数据中所发现的富锂巨星比例为1.29%^[65], 与Brown等人的统计结果基本一致^[9]. 富锂巨星比例这一问题不仅反映的是一个样本的统计信息, 它可能还暗示了Li增丰机制本身的时标. 一个广泛的共识是富锂现象应该是恒星演化过程中出现的一个短暂现象[e.g., 67–68], 而非“永恒”. 因此富锂巨星的比例本身可以反映这一时标的长短, 进而甚至可能直接对各种Li增丰理论进行检验. 但需要强调的是, 这一思想需要建立在

对富锂巨星的演化阶段能够进行细分的基础之上, 因为最新的研究提供了清晰的证据^[61], 证明了富锂巨星可以处于不同的演化阶段. 值得注意的是, 各演化阶段的富锂巨星在与自身相同演化阶段的恒星中所占的比例是不同的. 例如红团簇星的富锂比例远高于红巨星中的富锂比例^[61]. 将富锂比例对应到时的另外一个问题, 是富锂现象本身是否能够“平等”地发生在所有巨星中, 抑或是富锂本身需要某些特定的条件来触发^[e.g., 67, 73–74]. 最近的一项研究表明, 至少就小质量恒星而言, 锂增丰过程可能普遍存在^[75].

3.2 富锂巨星的空间分布

关于富锂巨星的空间分布, 目前尚无证据表明它们具有某种规律性. 之前的研究在银河系的不同区域均发现了富锂巨星, 包括银盘^[29]、银晕^[30–31]、核球^[32]、球状星团^[33]、疏散星团^[34]、矮星系^[35]等. 这暗示Li增丰可能只与恒星自身的演化相关(或恒星系统范围内的演化).

3.3 富锂巨星的恒星大气参数分布

富锂巨星与恒星大气基本参数(有效温度 T_{eff} 、表面重力 $\lg g$ 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$)的关系难以用有关或无关进行简单的判断, 这是因为恒星大气参数本身与很多特征有紧密的相关性(例如演化阶段). 如果排除这些因素, 目前尚没有明确证据证明富锂巨星中的Li丰度与恒星大气参数存在直接关系. 图3展示了LAMOST数据中的富锂巨星随大气基本参数的分布(图(a)–(c))以及Li丰度随大气参数的变化(图(d)–(f)). 就目前的观测证据来看, 虽然Li丰度比较敏感于有效温度, 但富锂巨星中的锂丰度与有效温度没有表现出明显的相关性^[65, 76] (图3 (a)、(d)). 对于表面重力, 尽管可以明确看到富锂巨星聚集于一个相对较小的表面重力范围内^[65], 但这主要是由富锂巨星的演化阶段所造成的间接相关^[61] (图3 (b)、(e)). 最后, 对于金属丰度, 基于大样本的分析提供了一定的证据, 证明富锂巨星大多数是富金属的^[65, 67] (图3 (c)、(f)), 但这些恒星中的Li丰度与金属丰度似乎没有明确的相关性. 研究富锂巨

星中的Li丰度相对恒星大气参数的分布, 是为了确定富锂巨星中的Li增丰是否和恒星自身的基本物理特征有关. 就目前的证据来看, 很难认为是某类大气参数特殊(特别是某个温度范围)的恒星产生了Li增丰, 与富锂巨星分布或其Li丰度相关的恒星大气参数更多地是由于演化阶段这一因素所引起的间接相关.

3.4 富锂巨星的元素丰度

从天体物理所关心的主要元素丰度来看, 富锂巨星仅在Li丰度方面存在异常. 很多针对单个或少量富锂巨星的详细分析显示富锂巨星中其他元素丰度与恒星大气参数近似的普通巨星没有显著差异^[e.g., 71], 如图4所示, 这些结论也被后来的大样本研究所证实^[77]. 如果这些认知是正确的, 那么说明富锂巨星中的Li增丰是一个相对“纯净”的过程, 而不会引起其他主要元素丰度的变化, 这有助于初步排除一些Li增丰理论. 例如假设Li元素来自于II型超新星的抛射物质, 那么其很可能还会伴随有 α 元素的增丰^[78]. 我们需要提醒读者注意的是, 这里所谈论的元素丰度差异, 仅限于最狭义的丰度差异, 不包含恒星演化所带来的元素丰度变化. 例如随着挖掘过程的进行, 恒星表面的 ^{12}C 与 ^{13}C 、C与N (以及C的同位素与N的同位素比)及演化到晚期的AGB星中Ba元素的增丰都属于恒星演化自身所带来的变化. 尽管有些富锂巨星的确被发现存在某些C同位素比的异常^[39, 71], 但这些更有可能是演化阶段所造成的. 不同演化阶段的富锂巨星之间(以及富锂巨星与普通巨星之间)如果在这些丰度上有所差异—在观测给出新的证据之前—很难说是由Li增丰事件所引起的.

3.5 富锂巨星的自转

一般来说, 随着恒星的演化, 在巨星阶段其自转速度(由于自转轴方向未知, 这里适用投影自转速度 $v \sin i$ 的大小来评估自转速度的大小, 下同. 其中 v 表示恒星真实的自转速度, 而 i 为恒星自转轴与视线方向的夹角)会显著降低($2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右)^[79], 但少量巨星仍然拥有较快的自转速度($> 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). 富锂巨星可能与快速

自转有相关性[e.g., 36, 80], 但这种关系的强弱和是否普适尚不明确[81]. 考虑到很多Li增丰机制建立在快速对流的基础之上, 而快自转(包括源自自身的快速自转或源自双星作用而引起的快速自转等)有利于形成快速的大尺度对流, 因此认为富锂巨星与快速自转存在某种联系是一个合理的假设. Drake等人基于此思想, 在快速自

转的巨星中搜寻富锂巨星, 并发现其样本中约50%的恒星表现出了富锂[36]. 在后来所发现的很多富锂/超富锂巨星中, 一些的确属于快速自转的恒星[e.g., 30, 67–68], 例如Yan等人发现的Li丰度最高巨星, 其自转速度约为 $11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [68].

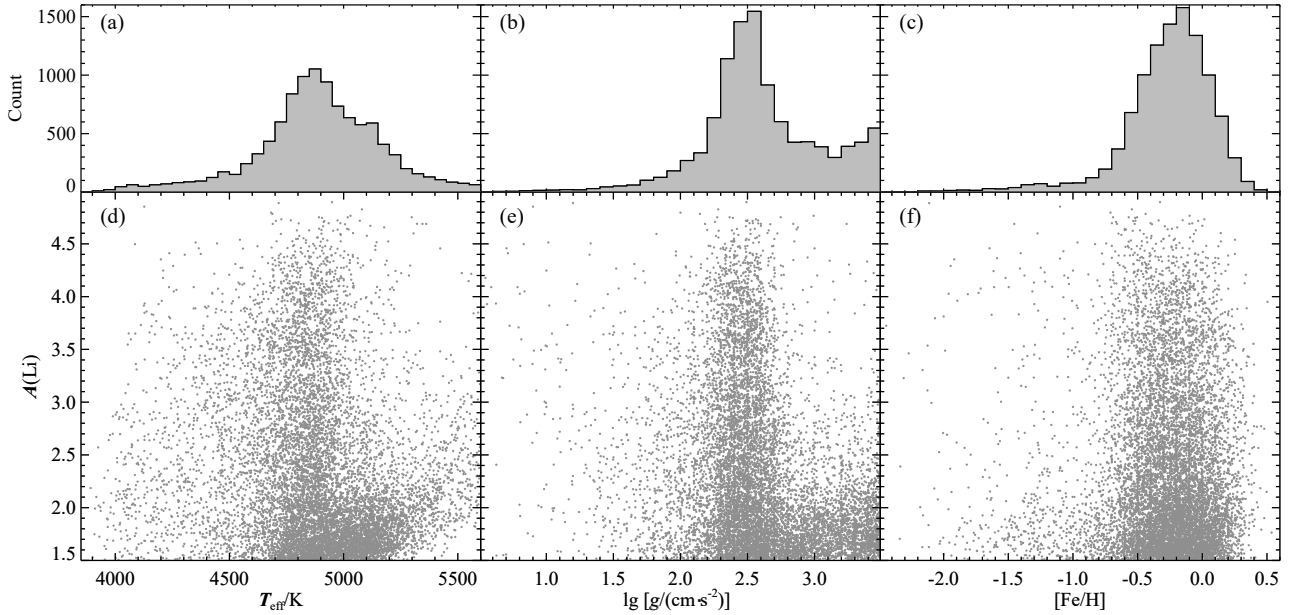


图 3 LAMOST数据中的富锂巨星随恒星大气参数的分布以及Li丰度随大气参数的变化. 从(a)到(c), 分别是富锂巨星随有效温度、表面重力和金属丰度(定义为 $[\text{Fe}/\text{H}] \equiv \lg(n_{\text{Fe}^*}/n_{\text{H}^*}) - \lg(n_{\text{Fe}\odot}/n_{\text{H}\odot})$, 其中 $n_{\text{Fe}^*}/n_{\text{H}^*}$ 为恒星中铁与氢的粒子数密度之比, 而 $n_{\text{Fe}\odot}/n_{\text{H}\odot}$ 为太阳中铁与氢的粒子数密度之比)的分布. 从(d)到(f), 分别是Li丰度随有效温度、表面重力和金属丰度的变化关系. 数据来自Gao等[65].

Fig. 3 Distribution and Li abundance of Li-rich giants as functions of atmospheric parameters in LAMOST data. Panels (a) to (c) show the distribution of Li-rich giants as functions of effective temperatures, surface gravities, and metallicities (defined as $[\text{Fe}/\text{H}] \equiv \lg(n_{\text{Fe}^*}/n_{\text{H}^*}) - \lg(n_{\text{Fe}\odot}/n_{\text{H}\odot})$, where $n_{\text{Fe}^*}/n_{\text{H}^*}$ represents the number density ratio of iron and hydrogen in the star, while $n_{\text{Fe}\odot}/n_{\text{H}\odot}$ represents the same ratio in the Sun), respectively. Panels (d) to (f) show the Li abundances as functions of these three parameters in the same order. Data are from Gao et al.[65].

富锂巨星与快速自转是否存在必然联系尚需要更大样本和更明确的证据(肯定的或否定的)来证明, 但这并不容易. 相对于其他参数, 精确到 $\text{几 km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的自转速度测量相对来说更困难一些, 这是因为在光谱中, 自转速度的测量往往基于谱线的致宽, 但在较低分辨率的情况下, 仪器轮廓才是主导谱线致宽的主要因素, 而非自转速度. 例如在LAMOST的 $R \sim 1800$ 光谱中, 对自转

速度的探测极限约为 $120 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [67]. 因此尽管诸如LAMOST等光谱巡天观测了大样本富锂巨星的光谱, 但很难精确统计快速自转的富锂巨星的比例. 这一局限性有望随着分辨率的提高而逐渐减弱, 例如在GALAH分辨率 ~ 28000 光谱的帮助下, 系统地研究快自转与富锂的相关性是可能的. 另一方面, 在如Kepler[82]等卫星的帮助下, 通过监测恒星黑子随恒星转动而引起的光变, 也可以精确地测量

恒星的自转周期^[83]. 这种方法当然依赖于一定周期的高质量光变监测, 难以对所有富锂巨星适用, 但的确可以在一定范围内检查富锂与快自转的关系. 例如最近杜明昊等人基于类似方法分析了富锂巨星与自转的关系, 同样发现富锂巨星中的快自转现

象显著高于普通巨星^[84]. 富锂巨星与快自转关系中另外一个需要注意的困难点是, 快速自转也可能是一个短时标现象, 这和Li增丰类似, 但和Li增丰未必发生于同一时间点上.

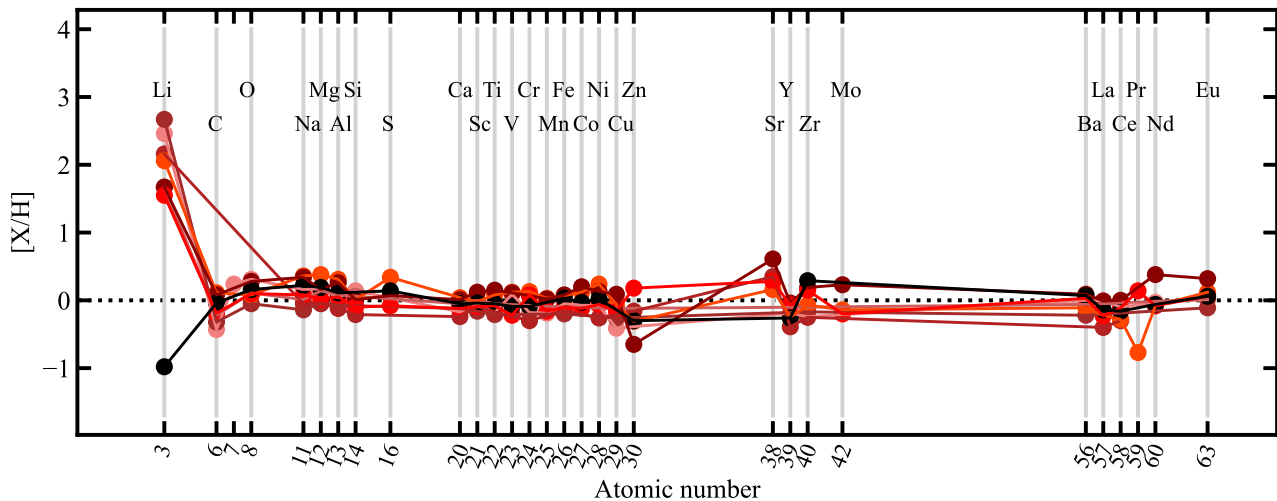


图 4 6颗富锂巨星中的一些重要元素丰度与普通巨星的对比. 其中纵轴的 $[X/H]$ 为某一元素 X 的丰度, 定义与 $[Fe/H]$ 类似. 相应的元素以原子序数的方式显示在横轴, 并标记在图中. 图中的富锂巨星来自于文献[41, 69, 72], 以不同程度的红色表示. 一颗普通巨星(Gaia-ESO ID: 17562024-4134502)作为对比星, 以黑色表示.

Fig. 4 Comparison of the abundances for some important elements between 6 Li-rich giants and one Li-normal giants. The $[X/H]$ in the vertical axis represents the abundance of a certain element X , whose definition is similar to $[Fe/H]$. The corresponding elements available for X are shown by atomic numbers in the horizontal axis, and also indicated in the figure. The Li-rich giants from Refs. [41, 69, 72] are indicated with red, and the Li-normal giant (Gaia-ESO ID: 17562024-4134502) is marked with black as comparison.

3.6 富锂巨星的红外超现象

富锂巨星一度被认为存在红外流量的超出(IR-excess)^[e.g., 85–86]. 富锂巨星中的Li增丰可能来自于吞噬伴星, 在撕裂过程中可能使得恒星外围被一层冷的星周物质所包围, 在这种条件下, 红外超就会是一种合理的假设. 红外超现象曾经在一部分富锂巨星中观测到^[69, 86], 但后续对于大样本富锂巨星的分析并没有显示出富锂巨星存在系统性的红外超证据^[e.g., 71]. 此外, 一些新形成的恒星和普通AGB星也可能由于星周存在冷的物质而产生红外超现象^[87], 这更进一步加大了验证富锂巨星与红外超是否存在必然联系的难度.

3.7 富锂巨星的演化阶段

通过前面的叙述不难看出, 演化阶段是研究富锂巨星中Li增丰机制最重要的信息, 这是因为很多与富锂巨星相关联的其他参数(例如表面重力、元素丰度、自转速度、红外超)也与演化阶段相关. 事实上, 富锂巨星演化阶段的确定一直以来都是这一领域最核心的问题, 很多Li增丰理论也正是基于富锂巨星所在的演化阶段所提出的. 在早期研究中, 富锂巨星的样本数量还比较少, 难以系统地确定它们的演化阶段. 随着样本逐渐扩充, 对演化阶段的研究变得越来越重要. 例如Charbonnel等人在2000年通过将以往所发现的富锂巨星整合到理论恒星演化轨迹上^[14], 发

现它们呈现出两处明显的聚集, 其中一处位于演化轨迹的AGB阶段, 另外一处位于RGB (Red Giant Branch)阶段. 她们认为这些小质量的、处于RGB阶段的富锂巨星可能全部来自于RGB的光度驼峰处(RGB-bump), 因为RGB-bump处的恒星内部刚刚摧毁了由第1次挖掘过程所建立的平均分子量不连续带(或 μ -barrier), 使得对流可以持续深入到内层并带出用于形成 ${}^7\text{Li}$ 的 ${}^7\text{Be}$ 等物质(见下节). 这一观点被后续很多工作所支持[e.g., 40–42]. 造成这一认知的因素除了很多富锂巨星在演化轨迹上的确落在RGB-bump附近外, 另一个原因是RGB-bump独特的物理状态更有利于额外对流(extra-mixing)的产生, 使得很多基于对流的Li增丰理论可以成立[73–74, 88–90]. 富锂巨星处在RGB-bump阶段这一说法也有很多反对的声音, 其中Martell等人利用SDSS的数据研究了富锂巨星的演化阶段, 认为它们广泛分布于整个RGB阶段, 而非仅局限于RGB-bump[30]. 这一结果对于那些不依赖于特定演化阶段的Li增丰理论更加有利, 例如吞噬或吸积所造成的Li增丰. 更准确地说, 这些理论潜在要求富锂巨星不能聚集于某个特定的阶段, 因为没有理由认为吞噬和吸积等外部因素只能在恒星自身演化的某个特定节点生效. 富锂巨星在整个RGB上均有分布的观点也受到了很多研究的支持[16, 29, 32], 其中Mena等人还利用细致的理论演化轨迹在RGB的各子阶段层面对富锂巨星进行了细分和统计[34].

除了以上两种声音外, Aguirre等人给出了小质量富锂巨星所处的第3种演化阶段: 氦核心燃烧的红团簇(RC)星阶段[55]. 他们利用星震学数据对一颗富锂巨星KIC 5000307进行了演化阶段的区分. 基于Bedding等人的理论[91], 他们发现这颗恒星g模式的周期间隔(Period spacing)为 $\sim 320\text{s}$, 属于典型的RC恒星. 在当时普遍认为富锂巨星是RGB恒星的环境下, 这颗RC恒星更多地被当做了富锂巨星中的一个特例, 但这一工作带有较强启发性. 首先, 它证认了富锂巨星有一个全新的演化阶段, 这对Li增丰理论是一个挑战; 其次, 它使用的方法可以在更大的样本中推广, 获

得更具有统计意义的结果; 最后, 它引起了广泛的思考, 因为RC与RGB-bump在赫罗图上的位置十分接近, 一些学者就曾讨论过被认为是RGB-bump的富锂巨星是RC的可能性[e.g., 40, 68]. 在首颗RC富锂巨星被发现后不久, Carlberg等[58]和Jofré等[59]也分别通过星震学证认了一颗富锂的RC恒星和一颗富锂的RGB恒星. 特别是近年来, 越来越多处于RC阶段的富锂巨星被证认[43, 61, 67, 70–72, 92–93], 一个普遍的怀疑被一再提起—小质量富锂巨星可能主要是RC而非RGB. 尽管很多工作可以佐证这一怀疑(部分得益于数据驱动和机器学习等分析技术的发展[94–95]), 但它们或者不是基于直接的星震学测量[43, 67, 71–72, 92], 或者是样本太少并伴随一定的选择效应[70, 93]. Yan等[61]利用LAMOST所发现的富锂巨星样本[65], 对有Kepler卫星观测的共同源[96–98]采用了直接的星震学分析, 在目前最大的样本中, 提供了基于星震学的证据, 证明了大多数小质量富锂巨星处在RC阶段. 图5基于他们的数据展示了富锂巨星的演化阶段与Li丰度分布, 其中红色柱状图代表由星震学关系所确定的RC恒星, 而灰色则代表RGB恒星. 从图中可以看出大多数小质量富锂巨星处在RC阶段, 而不是以往所认为的RGB或RGB-bump阶段. 同时, 他们还发现RC富锂巨星中的Li丰度显著高于RGB富锂巨星, RGB富锂巨星数量随着Li丰度的增加呈现了指数递减[61] (图5), 它们甚至可能在2.6 dex处存在一个Li丰度上限, 这说明RGB富锂巨星可能只是更富锂的前身星Li衰竭后的自然结果, 而可能的前身星也已经被其他工作所发现[99]. 近年来的一系列工作终结了小质量富锂巨星演化阶段的争论, 从各个角度均给出了一致的结果, 这意味着富锂巨星中关于Li增丰的传统理论不再适用, 但RC阶段Li如何产生却更加难以回答.

4 富锂巨星的起源理论发展

研究富锂巨星的各种观测性质、精确确定它们的演化阶段的根本目的, 是为了解答富锂巨星中Li元素是如何产生的, 即Li的增丰机制. 本节将对一些主流的Li增丰理论进行概述. 需要注意的是,

随着近两年对富锂巨星的搜寻和性质研究取得了突破性进展,下文所提到的部分理论可能已经失效,但为了完整再现富锂巨星的研究过程和发展逻辑,还是会一并列出。

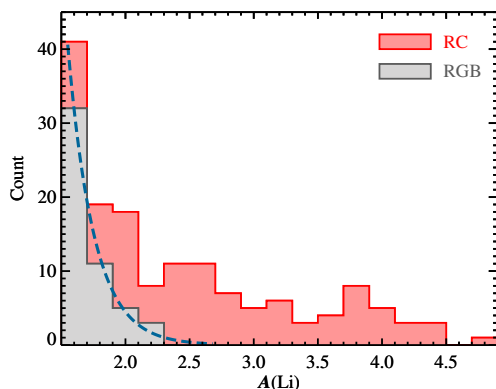


图5 富锂巨星的演化阶段与Li丰度分布. 由星震学关系确定的RC星以红色表示, RGB星以灰色表示. 其中RC星的Li丰度范围远远大于RGB恒星. RC的平均Li丰度更高, 而RGB则随着Li丰度上升数量急速递减, 可能存在一个丰度上限. 图中的虚线是对这一趋势的拟合, 从中可以推断95%以上的RGB富锂巨星Li丰度不高于2.6 dex. 数据来自Yan等^[61].

Fig. 5 Distribution of the evolutionary stage and Li abundance in Li-rich giants. The RC stars derived from astroseismology are indicated with red, and the RGB stars are indicated with grey. The Li abundance of RC stars covers a much wider range than that of RGB stars, and is also higher on average. The number of RGB stars decreases sharply with increasing Li abundance, indicating a possible upper-limit for Li abundance. An exponential fit to the trend shows that 95% of RGB stars have Li abundance lower than 2.6 dex. Data are from Yan et al.^[61].

富锂巨星中的Li元素增丰理论数量较多, 但按照Li元素的来源总体上可以分为3大类. 第1类是Li元素通过恒星内部产生, 不需要借助其他外部机制的帮助(后文称“内部增丰”); 第2类是直接从外部的富锂天体(例如伴星等)获取(后文称“外部增丰”); 第3类则是虽然需要借助外部天体, 但它们的作用仅仅是用于触发恒星内部的自增丰机制(例如伴星的潮汐锁定引发自转加速进而触发了能够增丰Li元素的强对流等, 后文称“内外部结合增丰”). 当然, 富锂巨星也可能是由这些机制的多种共同作用而产生的^[100].

无论是内部增丰、还是内外部结合增丰,

其核心物理过程是由Cameron和Fowler提出的基于 ^3He 生成 ^7Be 再生成 ^7Li 的反应^[101], 也被称为CF机制. 在恒星内部的氢壳层燃烧区域, 会产生大量的 ^3He , 它们可以经过 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ 生成 ^7Be , 之后俘获电子发生反应 $^7\text{Be}(e^-, \nu)^7\text{Li}$ 而生成 ^7Li . 然而后者在高温环境下难以实现, 需要对流将 ^7Be 迅速带到恒星表面, 否则即使产生 ^7Li , 也会在恒星内部的高温下被分解. 对于质量在4-7倍太阳质量的AGB而言, 由FDU所产生的平均分子量不连续带在氦核燃烧开始后消失, 对流层的底部可以深入到发生 $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ 反应的热壳层, 并将这里产生的 ^7Be 快速转运到外层较冷的区域. 这种被称为热底燃烧(Hot Bottom Burning, HBB)^[102]的机制可以使得 ^7Be 在恒星表面俘获电子变成 ^7Li , 从而导致恒星表面的Li丰度增加. 由于AGB中的对流可以深入至富 ^3He 的反应区且速度快到足以转运 ^7Be 至低温区域, 因此HBB是AGB富锂巨星一种可能的解释. 但是对于小质量富锂巨星而言情况则有很大不同. 传统上曾一度认为小质量富锂巨星主要处于RGB阶段, 而RGB恒星的对流层和内部可以产生 ^7Be 的高温区域之间, 还有辐射区的阻挡, 普通对流无法穿越, 因此需要引入一个额外对流(extra-mixing)来帮助其完成 ^7Be 的转运, 这一过程被称为冷底过程(Cool Bottom Process, CBP)^[103].

很多小质量富锂巨星中的Li增丰理论基本上都采用了这一框架, 更多的差别在于如何让恒星内部产生一个速度足够快的额外对流. 在内部增丰机制中, 触发额外对流的理论包括热盐不稳定(thermohaline instability)引起的额外对流^[14, 88]、快速自转引起的额外对流^[74, 104]、磁场引起的额外对流和不对称对流^[68, 73]等. 而对于内外部结合增丰机制而言, 其核心观点主要是通过外部作用触发主星的CF机制, 包括伴星的潮汐锁定、吞噬行星(导致角动量转移或伴星冲击主星)和双恒星并合等^[67, 89, 105-106]. 这里特别需要强调的是, 对于传统的内部增丰机制而言, 另外一个要求则是富锂巨星必须处于RGB-bump阶段, 因为只有在此时FDU造成的平均分子量不连续带才能被打破, 对流才能接触到高温层进而带走 ^7Be . 但

最近的观测已经证明,小质量富锂巨星主要处于RC阶段,而不是RGB,因此基于CBP的内部增丰机制也就难以适用,反而是不要演化阶段的内外结合机制依然可以在某种程度上解释处于RC阶段的富锂巨星.但正是由于很多内外部结合机制既可以发生于RGB也可以发生于RC^[67],反而使得它们难以解释为何RC阶段的富锂比例以及Li丰度均显著高于RGB阶段^[61].当然,虽然很多内外部结合增丰机制目前还无法提供RC富锂巨星起源的完美解答,但它们不失为一个可能的探索方向.例如,Zhang等人提出氦核白矮星(HeWD)和红巨星并合产生RC富锂巨星的理论,并计算了并合后的演化过程,其结果与很多RC富锂巨星的观测性质吻合得很好^[106].并且这一机制只会产生RC富锂巨星,不产生RGB富锂巨星,因此能够解释两种富锂巨星在数量和Li丰度方面的差异,特别是考虑到RGB富锂巨星可能只是更富锂的前身星自然衰竭的结果^[61, 99].

外部增丰机制提供了除CF机制外另一种Li增丰途径.它一般聚焦于吞噬或吸积过程,认为恒星表面被环境中的Li所污染.一种假设认为在恒星演化到红巨星阶段,随着体积的膨胀,吞噬了位于临近轨道的行星或褐矮星,将其中的Li保存到大气中,成为Li丰的天体^[107-109].当然,吞噬往往有许多伴生现象,例如它会造成获取额外角动量而引起自转加速^[105]、元素丰度异常^[78]、红外波段流量升高(红外超)等^[85-86, 110-111],而这些性质也的确被发现存在于很多富锂巨星中.但外部增丰机制面临着一些难以回答的问题,首先是吞噬概率问题,Mena等^[34]研究了富锂巨星吞噬近邻轨道行星(如果确实存在)的概率,发现这些行星必须非常接近母星才有可能被吞噬(0.4 au以内).其次是Li丰度上限问题,Aguilera-Gómez等人模拟计算了主星吞噬不同质量的伴星时所能获取的Li丰度上限,发现最高只能获得2.2 dex左右的锂丰度^[109],这一上限显然无法解释观测到的大量超富锂巨星是如何形成的.再次,富锂巨星在除Li之外的元素丰度方面没有表现出明显异常,这一现象也难以用吸积超新星遗迹物质^[78]、AGB抛射物^[102]等来解释.同时,星际介质的Li丰度仅有3.3 dex^[13],吸积这些物质依

然无法解释超富锂巨星的存在.目前,从保守的角度总结来说,富锂巨星无法仅依靠外部增丰机制来获取足够的Li元素.

5 富锂巨星研究的新趋势与展望

对于富锂巨星的观测和理论研究在相当长的一段时期内都建立在富锂巨星主要是RGB这一前提下,但得益于星震学和数据技术的发展,最新的研究已经清晰地证明了约80%的小质量富锂巨星是RC星^[61, 67].观测上,Yan等人还发现处于RC阶段的富锂巨星平均Li丰度要高于RGB阶段的富锂巨星^[61],RC富锂巨星的Li丰度覆盖~1.5-4.8 dex这一范围,表明之前研究的所有小质量超富锂巨星很可能都处于RC阶段.RGB富锂巨星不仅只占小质量富锂巨星的20%,且它们的数量随着Li丰度的增加急剧减少^[61].这表明RGB富锂巨星中的Li丰度可能存在一个上限,有理由怀疑RGB富锂巨星甚至没有经历过Li增丰,而仅仅是因为其前身星Li丰度较高或Li衰竭速度较慢而已.另外,通过星震学区分RGB和RC之后,Yan等人发现RC与RGB富锂巨星的质量分布、氮(N)丰度分布均不相同^[61],且RGB富锂巨星的质量分布与普通RGB存在显著差异,RC富锂巨星中的N丰度分布与普通RC恒星也存在显著差异,这些新的发现都为未来研究RC富锂巨星中的Li增丰机制提供了重要参考.Kumar等人通过将大样本恒星的Li丰度与演化模型相比较,提出所有恒星(并非仅富锂巨星)都在RC阶段经历了Li增丰,而这可能是氦闪所造成的^[75].Singh等人发现锂丰度较高的恒星多为刚刚进入RC阶段的恒星,并据此进一步推断氦闪可能是造成这一剧烈Li增丰的原因^[112].但Zhang等人基于星震学框架下的质量半径关系,发现Li丰度较高的RC星在整个RC阶段上均有分布,并非全是刚刚开始氦核心燃烧的年轻RC星^[113].她们同时也提出氦闪后恒星中的Li丰度的确有所增加,并定量给出了平均增幅约为~0.7 dex左右.

以上观测上的最新进展推动了新理论的诞生以填补RC中Li增丰机制的空白.Zhang等人提出RC富锂巨星可能来自于RGB与氦核白矮星(HeWD)的并合^[106],并定量模拟了并合后的Li丰

度, 与观测基本吻合^[61]; Schwab^[114]则提出RC中的富锂现象是由于氦闪引起了一种新的额外对流, 并定量给出了在这一机制下Li丰度的增丰程度, 但只能增加至 ~ 0.7 dex左右, 无法解释RC富锂巨星的起源. 值得注意的是, 这一理论计算与Zhang等人在刚开始氦核心燃烧的年轻RC恒星中所观测到的丰度一致^[113]. Casey等人提出RC富锂巨星产生于与其伴星的潮汐同步^[67], 这一过程加速了主星的自转速度, 并触发了额外对流引起了Li增丰, 但这一机制在RGB中也可以发生, 而RGB富锂巨星却显著少于RC富锂巨星、且Li丰度也低得多. Mori等人则提出RC阶段的锂增丰源于恒星内中微子的逃逸所造成的能量损失^[115], 这一能量损失将显著改变恒星内部的结构, 使之与标准模型产生差异, 但根据此模型所计算的RC恒星中的Li丰度普遍在 ~ 0.3 dex附近, 同样无法解释RC富锂巨星的起源.

近期完成的工作表明, 无论在观测还是理论方面, 未来富锂巨星研究的一个显著趋势是朝着高精度方向前进. 观测上, 新技术的发展已经使富锂巨星演化阶段的确定变得更加准确, 同时也更加细化. 很多工作不仅仅是分析演化阶段, 更多的是分析不同演化阶段的子阶段, 并对其性质进行剖析. 数据的不断积累, 特别是多维度数据(例如Kepler^[82]、TESS^[116] (Transiting Exoplanet Survey Satellite)的时域光变数据)的丰富, 也可以在未来继续扩充样本的规模并提高分析的精度. 而理论研究方面, 很多旧的理论被新的观测数据所排除, 而新的理论提出与发展尚需要一定的时间. 但能够确定的是, 随着观测结果的细致化, 新的理论也拥有更多可验证的节点, 并通过与观测相互检验加速迭代发展.

6 结论

富锂巨星是一类特殊的天体, 它们大气中的锂元素含量超过标准恒星演化模型理论值的成百上千倍. 富锂巨星发现于1982年, 至今已经39 yr的历史, 但其起源依然是未解之谜. 得益于星震学的发展和观测能力的提高, 人类对于富锂巨星的认识在近年来迅速发展. 目前已经有超过1万颗富锂

巨星被发现, 其中95%来自于LAMOST数据. 我们现在已知的Li丰度最高的巨星是TYC 429-2097-1, 它的Li丰度高达4.51 dex. 我们知道富锂巨星的分布似乎与空间位置无关, 且除了Li元素之外, 富锂巨星中其他元素的丰度没有表现出明显异常. 有些富锂巨星的确拥有较高的自转速度, 其中的关联还需要更多的研究进行确认; 富锂巨星中有少量存在红外超现象, 但这不是一个普适的规律. 大质量的富锂巨星一般是AGB星, 而小质量的富锂巨星中约80%是RC星, 而RGB只有20%左右, 这是一个全新的结果, 与以往认知显著不同. 不仅如此, RC与RGB中的富锂巨星在质量和N丰度方面的表现也不尽相同. 从细分状态下看, 最近的研究在RC富锂巨星中发现了许多新的规律, 其中一些还存在争议. 全新的观测结果催生了Li增丰理论的迅猛发展, 虽然目前尚无理论可以完美地解释RC富锂巨星中的Li增丰机制, 但未来更多高精度的观测和理论研究将会对这一问题提供更多的限制.

致谢 我们感谢国家天文台“星云人才计划”的支持. 我们感谢高琦博士、周渝涛博士协助提供了本文部分统计数据 and 图表. 我们感谢LAMOST数据的支持. LAMOST望远镜是由国家发展和改革委员会资助, 由中国科学院承建的国家重大科学工程项目. LAMOST望远镜由中国科学院国家天文台负责运行和管理.

参考文献

- [1] Coc A, Goriely S, Xu Y, et al. ApJ, 2012, 744: 158
- [2] Cyburt R H, Fields B D, Olive K A, et al. RvMP, 2016, 88: 015004
- [3] Spite M, Spite F. Nature, 1982, 297: 483
- [4] Tajitsu A, Sadakane K, Naito H, et al. Nature, 2015, 518: 381
- [5] Wallerstein G, Sneden C. ApJ, 1982, 255: 577
- [6] Gratton R, Sneden C, Carretta E. ARA&A, 2004, 42: 385
- [7] Iben I Jr. ApJ, 1967, 147: 624
- [8] Iben I Jr. ApJ, 1967, 147: 650
- [9] Brown J A, Sneden C, Lambert D L, et al. ApJS, 1989, 71: 293
- [10] Pilachowski C A, Sneden C, Booth J. ApJ, 1993, 407: 699

- [11] Lind K, Primas F, Charbonnel C, et al. *A&A*, 2009, 503: 545
- [12] Liu Y J, Tan K F, Wang L, et al. *ApJ*, 2014, 785: 94
- [13] Asplund M, Grevesse N, Sauval A J, et al. *ARA&A*, 2009, 47: 481
- [14] Charbonnel C, Balachandran S C. *A&A*, 2000, 359: 563
- [15] Palmerini S, Cristallo S, Busso M, et al. *ApJ*, 2011, 741: 26
- [16] Kirby E N, Guhathakurta P, Zhang A J, et al. *ApJ*, 2016, 819: 135
- [17] Luck R E. *PASP*, 1982, 94: 811
- [18] Hanni L. *SvAL*, 1984, 10: 51
- [19] Pilachowski C. *ApJ*, 1986, 300: 289
- [20] Gratton R G, D'Antona F. *A&A*, 1989, 215: 66
- [21] McWilliam A, Rich R M. *ApJS*, 1994, 91: 749
- [22] de La Reza R, da Silva L. *ApJ*, 1995, 439: 917
- [23] Navascués D B Y, De Castro E, Fernández-Figueroa M J, et al. *A&A*, 1998, 337: 739
- [24] Carney B W, Fry A M, Gonzalez G. *AJ*, 1998, 116: 2984
- [25] Jasniewicz G, Parthasarathy M, de Laverny P, et al. *A&A*, 1999, 342: 831
- [26] Smith V V, Shetrone M D, Keane M J. *ApJ*, 1999, 516: L73
- [27] Hill V, Pasquini L. *A&A*, 1999, 348: L21
- [28] Balachandran S C, Fekel F C, Henry G W, et al. *ApJ*, 2000, 542: 978
- [29] Monaco L, Villanova S, Bidin C M, et al. *A&A*, 2011, 529: A90
- [30] Martell S L, Shetrone M D. *MNRAS*, 2013, 430: 611
- [31] Adamów M, Niedzielski A, Villaver E, et al. *A&A*, 2014, 569: A55
- [32] Lebzelter T, Uttenthaler S, Busso M, et al. *A&A*, 2012, 538: A36
- [33] Pilachowski C A, Sneden C, Kraft R P, et al. *AJ*, 2000, 119: 2895
- [34] Mena E D, Tsantaki M, Sousa S G, et al. *A&A*, 2016, 587: A66
- [35] Monaco L, Bonifacio P. *MmSAI*, 2008, 79: 524
- [36] Drake N A, de la Reza R, da Silva L, et al. *AJ*, 2002, 123: 2703
- [37] Ruchti G R, Fulbright J P, Wyse R F G, et al. *ApJ*, 2011, 743: 107
- [38] Adamów M, Niedzielski A, Villaver E, et al. *A&A*, 2015, 581: A94
- [39] Kumar Y B, Reddy B E. *ApJ*, 2009, 703: L46
- [40] Kumar Y B, Reddy B E, Lambert D L. *ApJ*, 2011, 730: L12
- [41] Casey A R, Ruchti G, Masseron T, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 3336
- [42] Smiljanic R, Franciosini E, Bragaglia A, et al. *A&A*, 2018, 617: A4
- [43] Deepak, Reddy B E. *MNRAS*, 2019, 484: 2000
- [44] Reyniers M, Van Winckel H. *A&A*, 2001, 365: 465
- [45] Reddy B E, Lambert D L. *AJ*, 2005, 129: 2831
- [46] Martins B L C, LÉbre A, de Laverny P, et al. *A&A*, 2006, 451: 993
- [47] Luck R E, Heiter U. *AJ*, 2007, 133: 2464
- [48] Gonzalez O A, Zoccali M, Monaco L, et al. *A&A*, 2009, 508: 289
- [49] LÉbre A, Palacios A, do Nascimento J D, et al. *A&A*, 2009, 504: 1011
- [50] Carlberg J K, Smith V V, Cunha K, et al. *ApJ*, 2010, 723: L103
- [51] Alcalá J M, Biazzo K, Covino E, et al. *A&A*, 2011, 531: L12
- [52] Kirby E N, Fu X T, Guhathakurta P, et al. *ApJ*, 2012, 752: L16
- [53] Anthony-Twarog B J, Deliyannis C P, Rich E, et al. *ApJ*, 2013, 767: L19
- [54] Monaco L, Boffin H M J, Bonifacio P, et al. *A&A*, 2014, 564: L6
- [55] Aguirre V S, Ruchti G R, Hekker S, et al. *ApJ*, 2014, 784: L16
- [56] Strassmeier K G, Carroll T A, Weber M, et al. *A&A*, 2015, 574: A31
- [57] D'Orazi V, Gratton R G, Angelou G C, et al. *ApJ*, 2015, 801: L32
- [58] Carlberg J K, Smith V V, Cunha K, et al. *ApJ*, 2015, 802: 7
- [59] Jofré E, Petrucci R, García L, et al. *A&A*, 2015, 584: L3
- [60] Reddy A B S, Lambert D L. *A&A*, 2016, 589: A57
- [61] Yan H L, Zhou Y T, Zhang X F, et al. *NatAs*, 2021, 5: 86
- [62] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. *RAA*, 2012, 12: 1197
- [63] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. *RAA*, 2012, 12: 723
- [64] Kumar Y B, Reddy B E, Zhao G. *JApA*, 2018, 39: 25
- [65] Gao Q, Shi J R, Yan H L, et al. *ApJS*, 2019, 245: 33
- [66] Wheeler A J, Hogg D W, Ness M. *ApJ*, 2021, 908: 247
- [67] Casey A R, Ho A Y Q, Ness M, et al. *ApJ*, 2019, 880: 125
- [68] Yan H L, Shi J R, Zhou Y T, et al. *NatAs*, 2018, 2: 790
- [69] Zhou Y T, Shi J R, Yan H L, et al. *A&A*, 2018, 615: A74
- [70] Kumar Y B, Singh R, Reddy B E, et al. *ApJ*, 2018, 858: L22
- [71] Zhou Y T, Yan H L, Shi J R, et al. *ApJ*, 2019, 877: 104
- [72] Zhou Z M, Shi J R, Yan H L, et al. *RAA*, 2021, 21: 20
- [73] Denissenkov P A, Pinsonneault M, MacGregor K B. *ApJ*, 2009, 696: 1823
- [74] Charbonnel C, Lagarde N. *A&A*, 2010, 522: A10

- [75] Kumar Y B, Reddy B E, Campbell S W, et al. *NatAs*, 2020, 4: 1059
- [76] 符晓婷, 邓李才, Kirby E N, 等. *天文学进展*, 2012, 30: 453
- [77] Deepak, Lambert D L, Reddy B E. *MNRAS*, 2020, 494: 1348
- [78] Woosley S E, Weaver T A. *ApJS*, 1995, 101: 181
- [79] De Medeiros J R, Da Rocha C, Mayor M. *A&A*, 1996, 314: 499
- [80] Jorissen A, Van Winckel H, Siess L, et al. *A&A*, 2020, 639: A7
- [81] De Medeiros J R, Melo C H F, Mayor M. *A&A*, 1996, 309: 465
- [82] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. *Science*, 2010, 327: 977
- [83] Ceillier T, Tayar J, Mathur S, et al. *A&A*, 2017, 605: A111
- [84] 杜明昊, 毕少兰, 施建荣, 等. *天文学报*, 2020, 61: 52
- [85] de la Reza R, Drake N A, da Silva L, et al. *ApJ*, 1997, 482: L77
- [86] Rebull L M, Carlberg J K, Gibbs J C, et al. *AJ*, 2015, 150: 123
- [87] Cotten T H, Song I. *ApJS*, 2016, 225: 15
- [88] Charbonnel C, Zahn J P. *A&A*, 2007, 467: L15
- [89] Denissenkov P A, Herwig F. *ApJ*, 2004, 612: 1081
- [90] Denissenkov P A. *ApJ*, 2012, 753: L3
- [91] Bedding T R, Mosser B, Huber D, et al. *Nature*, 2011, 471: 608
- [92] Singh R, Reddy B E, Kumar Y B. *MNRAS*, 2019, 482: 3822
- [93] Singh R, Reddy B E, Kumar Y B, et al. *ApJ*, 2019, 878: L21
- [94] Ting Y S, Hawkins K, Rix H W. *ApJ*, 2018, 858: L7
- [95] Huang Y, Liu X W, Yuan H B, et al. *MNRAS*, 2015, 449: 162
- [96] De Cat P, Fu J N, Ren A B, et al. *ApJS*, 2015, 220: 19
- [97] Zong W K, Fu J N, De Cat P, et al. *ApJS*, 2018, 238: 30
- [98] Fu J N, De Cat P, Zong W K, et al. *RAA*, 2020, 20: 167
- [99] Li H N, Aoki W, Matsuno T, et al. *ApJ*, 2018, 852: L31
- [100] Martell S L, Simpson J D, Balasubramaniam A G, et al. *MNRAS*, 2021, 505: 5340
- [101] Cameron A G W, Fowler W A. *ApJ*, 1971, 164: 111
- [102] Sackmann I J, Boothroyd A I. *ApJ*, 1992, 392: L71
- [103] Sackmann I J, Boothroyd A I. *ApJ*, 1999, 510: 217
- [104] Charbonnel C, Lagarde N, Jasniewicz G, et al. *A&A*, 2020, 633: A34
- [105] Carlberg J K, Majewski S R, Arras P. *ApJ*, 2009, 700: 832
- [106] Zhang X F, Jeffery C S, Li Y G, et al. *ApJ*, 2020, 889: 33
- [107] Alexander J B. *Observatory*, 1967, 87: 238
- [108] Siess L, Livio M. *MNRAS*, 1999, 308: 1133
- [109] Aguilera-Gómez C, Chanamé J, Pinsonneault M H, et al. *ApJ*, 2016, 833: L24
- [110] Gregorio-Hetem J, Castilho B V, Barbuy B. *A&A*, 1993, 268: L25
- [111] Kumar Y B, Reddy B E, Muthumariappan C, et al. *A&A*, 2015, 577: A10
- [112] Singh R, Reddy B E, Campbell S W, et al. *ApJ*, 2021, 913: L4
- [113] Zhang J H, Shi J R, Yan H L, et al. *ApJ*, 2021, 919: L3
- [114] Schwab J. *ApJ*, 2020, 901: L18
- [115] Mori K, Kusakabe M, Balantekin A B, et al. *MNRAS*, 2021, 503, 2746
- [116] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. *JATIS*, 2015, 1, 014003

A Review to the Studies of Lithium-Rich Giants

YAN Hong-liang^{1,2} SHI Jian-rong^{1,2}

(1 Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Lithium (Li) is one of the most important light elements that was primordially synthesized in the Big Bang Nucleosynthesis (BBN). It is also an element that confused astrophysicists for decades, as its observed abundance often contradicts with the theoretical prediction in many different types of celestial objects. Li-rich giant stars are such objects. Their atmospheres contain anomaly high Li abundance than that expected by standard stellar evolution model. Although the first Li-rich giant star was discovered

almost 40 years ago, their origin is still being debated. With the launch of massive spectroscopic survey program such as the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope (LAMOST) survey, the extending of available asteroseismology data from space satellites such as *Kepler*, and the developments of data-driven techniques, breakthroughs have been archived in the field of Li-rich studies. In this paper, we review the progress that was made during the past four decades, and present our up-to-date understanding to Li-rich giant stars.

Key words stars: abundance, stars: chemically peculiar, stars: evolution, stars: low-mass, survey, Lithium

中国天文学会第八届“黄授书奖”获奖人闫宏亮

简要介绍: 闫宏亮, 男, 38岁, 中国科学院国家天文台副研究员, 国家优秀青年基金获得者, 研究领域为恒星元素丰度、银河系的化学演化.

获奖理由: 恒星表面锂元素丰度的异常, 是恒星内部热核反应与物质输运过程相互交叉的结果, 是近年来天体物理研究中的一个重要热点问题. 闫宏亮利用我国LAMOST望远镜和美国APF望远镜数据, 发现了一颗迄今为止锂丰度最高的巨星, 其表面锂丰度是普通巨星的3000倍, 突破了传统锂增丰理论所给出的丰度上限. 他与团队将光谱学与星震学研究结果相结合, 发现富锂巨星绝大部分是红团簇星, 而非通常所认为的红巨星, 并发现红团簇星的锂丰度高于红巨星. 利用LAMOST望远镜, 他和团队还发现了超过1万颗富锂巨星, 是以往所有发现数目总和的4倍. 这些成果得到国际同行的高度关注与广泛引用.