

发现人类已知锂丰度最高的巨星

——极富锂巨星中锂元素的诞生之谜

闫宏亮^{1,2} 施建荣^{1,2,†}

(1 中国科学院国家天文台 重点光学实验室 北京 100101)

(2 中国科学院大学 天文与空间科学学院 北京 100049)

2018-09-30收到

† email: sjr@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20181205

距离现在138亿年前,宇宙在一次“大爆炸”中诞生了,与其几乎同时诞生的,还有锂(Li)这种轻元素^[1]。在天体物理环境中,Li是一种十分容易被消耗的元素,因为它在温度超过200万开尔文时,就很容易通过俘获质子发生反应而被分解成氦。这样“低”的温度在大部分恒星内部都是非常容易达到的,因此Li元素一旦进入到恒星内部,就很难存活。和人类一样,恒星在自己的生命周期中,会经历一系列变化,从主序星阶段演化到红巨星阶段的过程如同人类从中壮年步入老年。不同的是,恒星在这个变化过程中,会在内部出现大尺度的对流,大量恒星内部的物质会被翻到恒星表面,而表面的物质则会深入到恒星内部。在天体物理中,这个过程被形象地称为第一次挖掘过程。经历过挖掘过程的恒星会把表面大量的Li元素带入到恒星内部,Li元素由于

无法承受内部的高温而遭到分解,恒星表面的Li就这样被逐步稀释。随着第一次挖掘过程的结束,恒星正式从主序星演化成了红巨星,但它表面的Li丰度却出现了1—2个数量级的递减。这是标准恒星演化模型的经典预言之一^[2]。

然而令人惊奇的是,约1%的红巨星表面仍然存在着大量的Li元素^[3],这些奇特的巨星与标准恒星演化模型的预言直接冲突,说明Li在恒星中的演化可能并不像最初预计的那样简单,这类特殊的天体被称为富锂巨星。第一颗富锂巨星由Wallerstein和Snedden于1982年偶然发现^[4]。这个发现令人感到不可思议,于是出现了一批系统地搜寻富锂巨星的工作。富锂巨星不仅数量十分稀少,且分布广泛,无论是在银盘、银晕、核球、球状星团、疏散星团还是银河系的矮星系中都有所发现。近年来,随着天文大数据时代的到来,对富锂巨星的研究也不断升温,越来越多的天文项目(例如SDSS、Kepler、PTPS等)参与到了富锂巨星的搜寻与研究中。

富锂巨星的存在对标准恒星模型理论提出了严峻的挑战,它说明必定存在某种机制可以让巨星表面的Li元素“增丰”。大体上来说,关于Li的增丰机制猜想可以分为两种:一种是从恒星内部寻求增丰途径;另一种是从恒星所处的外部环境寻找增丰途径(或者由于外部环境因素而引起的内部增丰)。每一大类机制又有多种假说,不同理论之间一直存在较大的差异和争论。事实上,解决富锂巨星增丰机制之谜的关键有二:一是能够找到具有代表性的富锂巨星作为研究样本;二是能够对富锂巨星所处的演化阶段进行精确测定。



图1 LAMOST望远镜全称大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜,是我国自主创新设计、同时兼备大视场和大口径的光学天文望远镜。焦面上共有4000根光纤,可同时接收最多4000个天体的光谱,为目前世界上光谱获取效率最高的望远镜

由于Li元素易被消耗的特性，导致即使是富锂巨星，其Li超丰的时标也不过在百万年左右^[5]，这样的时标和恒星的一生相比，只是短暂的瞬间，对富锂巨星——特别是对Li增丰初期的富锂巨星——演化状态的确定将对揭开Li增丰机制之谜起到决定性的作用，因为恒星在很多不同的演化状态下，都会有独特的物理过程与之相对应。

尽管富锂巨星的数目十分稀少，但利用郭守敬望远镜(LAMOST)海量光谱的收集能力，我们可以在数以百万计的恒星光谱中对富锂巨星进行搜寻。LAMOST是目前世界上光谱获取率最高的望远镜(图1)。其在5年的巡天过程中获取了超过900万条光谱，构建成了目前世界上最大的恒星光谱库。我们通过LAMOST光谱搜寻富锂巨星，再使用大中型望远镜对其中特别的目标进行跟踪观测，获得高分辨率光谱数据。通过这些数据，我们不但可以精确测量恒星中的Li丰度，同时也可以获得诸如演化阶段、丰度分布模式、视向速度、自转速度等信息，通过多种信息综合判断富锂巨星的Li增丰机制。

在LAMOST的恒星光谱中，我们发现了一颗极为罕见的富锂巨星(图2)，它在6707.8 Å处的Li线强度可以和Hα线相比拟，这说明这颗恒星具有极高的Li丰度。接着，我们利用美国自动行星搜寻者(APF)望远镜对这个目标进行了高分辨率光谱的跟踪观测，其光谱的典型分辨率为80000 ($\lambda/\Delta\lambda$)，6707.8 Å的Li I线

处附近的信噪比超过100(图3)。通过高分辨率光谱，我们可以确定这颗恒星非局部热动平衡下的Li丰度。在光谱的波长覆盖范围内，共有3条Li

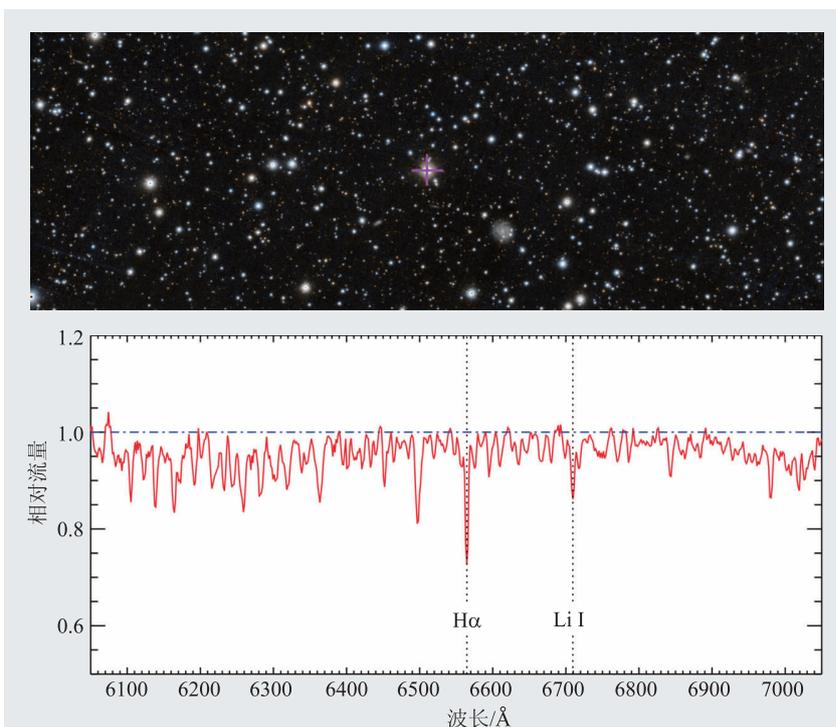


图2 TYC429-2097-1的光学图像和由LAMOST观测的光谱。其中可以看到Li线的强度已可与氢元素的Hα线相比拟。光学图像来自SIMBAD数据库(<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>)，光谱改编自文献[12]

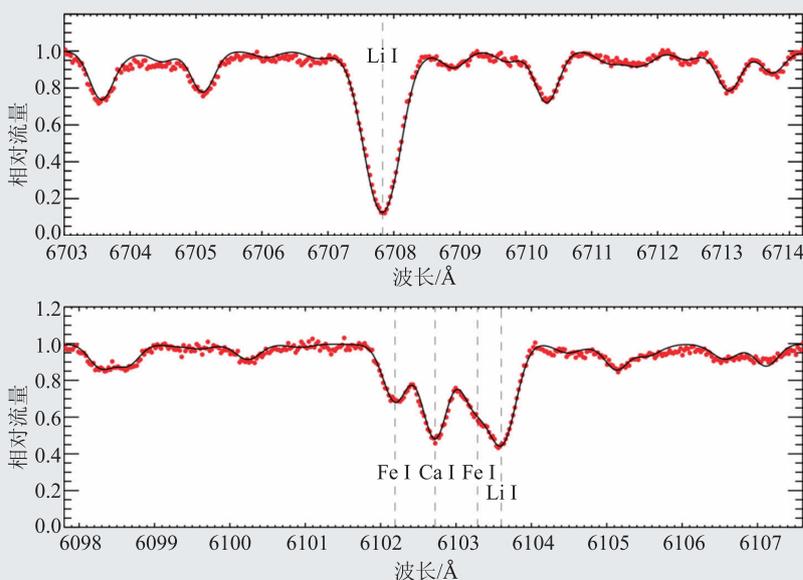


图3 TYC429-2097-1的高分辨率光谱。数据来自美国自动行星搜寻者(APF)望远镜。图中红色圆点表示观测光谱，黑色实线给出的是最佳拟合。光谱中的两条Li线均进行了标记，同时也对和Li有混合的谱线进行了标记。图片改编自文献[12]

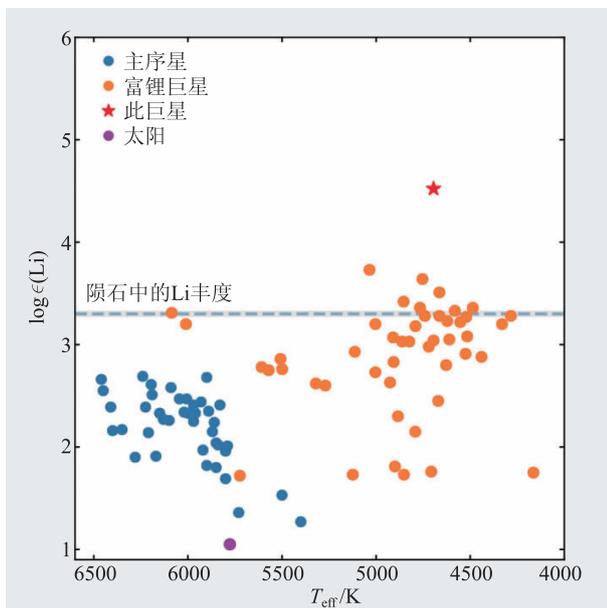


图4 TYC429-2097-1与其他恒星的Li丰度随着有效温度的分布。其中红色五角星表示TYC429-2097-1；橙色圆点表示其他工作中发现的富锂巨星(仅包含部分已知富锂巨星)；蓝色圆点表示主序星；紫色圆点表示太阳。图中蓝色虚线表示陨石中的Li丰度，这个值也代表星际空间中Li丰度的典型值。可以看到TYC429-2097-1的Li丰度远高于其他富锂巨星

线可见，且3条Li线得出的丰度具有很强的一致性。最终，我们确认这颗恒星的Li丰度为 $A_{\text{Li}}=4.51$ ，其中 $A_{\text{Li}}=\log(N_{\text{Li}}/N_{\text{H}})+12$ ， N_{Li} 和 N_{H} 分别是Li与H元素的数密度。这颗巨星的Li元素含量是普通巨星的3000倍左右(普通巨星按照 $A_{\text{Li}}=1.0$ 来计算)，是目前人类已知的Li丰度最高的巨星。这颗恒星的发现不单只是刷新了富锂巨星中Li丰度的记录(图4)，更重要的是，它为研究富锂巨星提供了一个绝佳的样本——如此高的Li丰度表明这颗恒星很可能正处于Li增丰的“巅峰”时期，由于Li增丰的时标本身就很短暂，能够捕捉到短暂时标开始的瞬间就显得更为珍贵，它极大地缩小了Li增丰可能的演化范围，让我们能够对Li的增丰机制给出更强的限制。

为了确定这颗名为TYC429-2097-1的恒星中Li的增丰机制，我们和中国原子能科学研究院、北京师范大学、深圳大学、内蒙古民族大学的学者们合作，对其展开了深入研究。

我们首先排除了这颗恒星通过外部增丰Li元

素的可能性。通常来说，外部增丰机制一般聚焦于吞噬或吸积过程，认为恒星表面被周围环境中的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^[6]。除了吞噬假说之外，吸积也被认为是环境造成Li增丰的原因之一。吸积的对象可以是II型超新星遗迹、Li超丰的AGB伴星或星际介质。但无论通过吞噬或吸积所产生的富锂巨星，其Li丰度都存在某种上限。吞噬的行星如果质量太小，不足以对整个恒星表面产生明显的Li增丰；但如果质量太大，行星会在被消化前下沉到恒星内部，此时即使有大量的Li元素也会被分解。一些工作通过模拟计算出吞噬行星的增丰上限约为2.2左右^[7]。与此同时，吸积也有类似的问题，虽然吸积过程不需要消化，但被吸积的物质本身的Li丰度也不是无限大，例如星际介质的Li丰度约为3.3。其次，无论是吞噬还是吸积，都会伴随有其他元素丰度的变化，因为物质的污染不会仅限于某种特定的元素。最后，吞噬的过程可能还会引起一些伴生现象，例如恒星红外流量升高(红外超)^[8, 9]。因为在行星或褐矮星被吞噬的过程中，可能会被主星撕裂、蒸发或者部分物质从主星被抛射出来，这些物质最终会形成尘埃环或包层围绕在恒星周围，导致其红外辐射更强。但是，这颗星发现的富锂巨星和以上特征相比都不吻合。首先这颗星的Li丰度为4.51，远大于吞噬和吸积所能提供的Li丰度。其次，我们还对恒星内的C、N丰度以及 α 元素丰度进行了测量，并没有发现任何显著异常。最后，这颗恒星没有表现出任何红外超的现象。通过以上几点，这颗星通过外部环境污染直接获得Li元素的可能基本可以排除。

接着，我们对这颗恒星的演化阶段进行了精确确定。首先使用了最大似然概率的方法来确定恒星的演化阶段，通过高分辨率光谱给出的恒星参数信息(有效温度、表面重力、金属丰度等)和误差范围，我们计算恒星与一系列密集的理论演化轨迹所吻合的最佳位置，据此得到了演化阶段

和恒星光度。为了保证结果的可靠性,我们又通过 Gaia 视差对恒星光度和表面重力进行了独立检验,两种方法给出的光度信息十分接近,相差仅有 0.05 dex,通过 Gaia 得到的表面重力与通过高分辨率光谱得到的表面重力相吻合。最终我们确定这颗恒星是一颗质量为 1.43 太阳质量、正处于光度驼峰阶段(RGB-bump)的恒星。RGB-bump 是恒星演化的一个特殊阶段,此时恒星中不断向外扩张的氢(H)壳层的燃烧区域使得由第一次挖掘过程所形成的平均分子量不连续带被破坏,没有了阻碍的恒星对流层几乎可以深入到 H 壳层燃烧的边缘。这使得物质从恒星内部被带到表面成为了可能。

内部增丰的核心物理过程是由 Cameron 和 Fowler 提出的基于 ${}^7\text{Be}$ 转运 ${}^7\text{Li}$ 的过程^[10],称为 CF 机制。在恒星内部的氢壳层燃烧区域,会产生大量的 ${}^3\text{He}$,它们可以经过 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 生成 ${}^7\text{Be}$,之后俘获电子发生核反应 ${}^7\text{Be}(e^-, \nu){}^7\text{Li}$ 生成 ${}^7\text{Li}$,然而后者的反应时标非常短,需要对流层在 ${}^7\text{Be}$ 转变之前就将其迅速带到恒星表面,否则产生的 ${}^7\text{Li}$ 将会在恒星内部的高温下立刻分解^[11]。这种机制在理论上的确可以让 Li 丰度增丰,但需要在恒星中有一种“快速通道”,使得富含 ${}^7\text{Be}$ 的物质能够极快地上升到恒星表面, ${}^7\text{Be}$ 在低温的恒星表面转变成 Li。过去的研究发现通过这种方式能够达到的 Li 丰度在 4.0 以下,且需要将额外对流——用来运送 ${}^7\text{Be}$ 的“快速通道”——效率提高 1 个量级。现有的理论显然无法解释这颗恒星高达 4.5 的 Li 丰度,为此我们对这颗恒星进行了内部增丰模拟。我们使用了来自中国原子能科学研究院最新的核反应数据,并开创性地运用了不对称对流假设,即在额外对流的过程中,在保证质量守恒的前提下,物质上升的速度比下降的速度要快。这种情况就如同恒星存在两种管道,一种管道较粗,另一种较细,在物质流量相同的情况下,较细的管道流速要远大于较粗的管道。我们

发现,在以上的初始条件下,物质交换效率在 $5.2 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$ 时,即可通过 CF 机制将 Li 丰度增丰至 4.506,更重要的是,在理论上通过这种方式增丰的 Li 丰度还有更高的潜力,说明不对称对流很可能是内部 Li 增丰的重要因素。不过,目前理论界对于额外对流的成因尚未形成统一的观点。这种对流极有可能是由于热盐不稳定性(thermohaline instability)引起的,也有可能是磁浮力所引起的,甚至是多种集中共同作用。据此我们推测, Li 丰度超高的富锂巨星可能并非普遍存在,而是受制于恒星内部环境,这也从侧面说明为何丰度在 4.0 以上的富锂巨星没有被大量发现。

富锂巨星 TYC429-2097-1 的发现及其理论解释的研究最近在 *Nature Astronomy* 发表^[12]。这项发现不但刷新了人类对于富锂巨星中 Li 丰度的认知上限,同时在理论上排除了这颗恒星通过外部增丰的可能性,并对 Li 元素通过恒星内部增丰提出了合理的解释。在一定程度上突破了原有理论的局限性,提出了独树一帜的新观点。这一成果是我国大型科学装置 LAMOST 在前沿基础学科取得突破性进展的又一实例,也是基础研究领域跨学科深入推进合作研究的一次成功尝试。

参考文献

- [1] Cyburt R H *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88:015004
- [2] Iben I Jr. *Astrophys. J.*, 1967, 147:624
- [3] Brown A J *et al.* *Astrophys. J. (Suppl.)*, 1989, 71:293
- [4] Wallerstein G, Sneden C. *Astrophys. J.*, 1982, 255:577
- [5] Denissenkov P A, Herwig F. *Astrophys. J.*, 2004, 612:1081
- [6] Delgado Mena E. *Astron. Astrophys.*, 2016, 587:A66
- [7] Aguilera-Gómez C *et al.* *Astrophys. J.*, 2016, 833:L24
- [8] de la Reza R *et al.* *Astrophys. J.*, 1997, 482(1):L77
- [9] Kumar Y B *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2015, 577:A10
- [10] Cameron A G W, Fowler W A. *Astrophys. J.*, 1971, 164:111
- [11] Sackmann I J, Boothroyd A I. *Astrophys. J.*, 1999, 510:217
- [12] Yan H L *et al.* *Nature Astron.*, 2018, 2:790