宇宙大爆炸锂问题

何建军^{1,2,3}

1. 北京师范大学核科学与技术学院射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京市辐射中心, 北京 100875;

3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

E-mail: hejianjun@bnu.edu.cn

2020-07-30 收稿, 2020-09-13 修回, 2020-09-16 接受, 2020-09-17 网络版发表

国家自然科学基金(11825504, 11490562, 11961141004)和国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项(2016YFA0400503)资助

摘要 原初大爆炸核合成(big-bang nucleosynthesis, BBN)始于宇宙大爆炸约3 min之后, 随着扩张着的宇宙温度和密度的逐渐降低, 核反应大约半个小时后熄灭, 该过程结束. 原初BBN过程的产物大部分是 ^1H 和 ^4He , 还有少量的 ^2H (即D)、 ^3He 和 ^7Li , 其他的核素含量微乎其微. 这些遗迹为人们研究早期宇宙提供了独一无二的窗口. 目前, 利用标准BBN理论结合威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP)精确的宇宙重子密度结果, 可以对原初轻核的丰度做出严格的预言. 其中, D和 ^4He 的天文观测结果与理论预言符合得很好, 但是BBN+WMAP预言的原初 ^7Li 丰度要比观测的高3~4倍. 这种在 4σ ~ 5σ 置信度区间的差异被称为宇宙锂问题. 在过去的十几年里, 人们做了很多尝试, 但是传统的核物理都未能在标准的大爆炸模型框架下解决该疑难问题. 本文针对这一悬而未决的问题进行了系统的阐述, 重点介绍了核物理科学家们近年来所做出的努力和尝试, 总结了相关研究方向的具体目标, 为研究者指出了未来可能的研究方向.

关键词 核天体物理, 大爆炸核合成, 宇宙锂问题, 核反应

1946年, Gamow^[1]首次提出了宇宙大爆炸理论. 目前, 它已成为人们普遍接受的标准宇宙学模型. 根据宇宙大爆炸理论, 我们的宇宙诞生于大约138亿年前的一次大爆炸(big bang), 之后经过暴涨、冷却, 在大约100 s或者说3 min之后, 温度降到 $\sim 10^9$ K(即1 GK, 对应粒子能量为 $kT \sim 100$ keV), 自此开始了有效的原初(primordial)较轻元素的合成. 大约持续半个小时后, 温度降低到 $\sim 0.3 \times 10^9$ K, 这时核反应基本就熄灭了. 原初大爆炸核合成(big-bang nucleosynthesis, BBN)过程产生的轻核素大部分是 ^1H (~75%)和 ^4He (~25%), 还有少量的 ^2H (即D)、 ^3He 和 ^7Li (约占万分之零点一), 而其他的核素含量微乎其微. 这些遗迹为人们研究早期宇宙提供了独一无二的窗口. 早在1967年, Wagoner等人^[2]首次计

算了原初BBN过程. BBN模型计算的轻核素丰度依赖于一个非常重要的输入量, 即宇宙中的重子数密度($\Omega_b h^2$), 或者等价于人们常说的重子与光子的比值($\eta = n_b/n_\gamma = 2.74 \times 10^{-8} \Omega_b h^2$)^[3]. 当时, 由于缺乏天文观测的 η 值, 因此人们很难把BBN计算的丰度值与天文观测值很好地对应起来.

2001年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了探测宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)的卫星, 搭载的是威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP). WMAP团队于2003年发布了宇宙诞生初期的图像以及一系列物理成果, 即First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

引用格式: 何建军. 宇宙大爆炸锂问题. 科学通报, 2020, 65: 4047–4062

He J J. Cosmological lithium problem (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 4047–4062, doi: 10.1360/TB-2020-0951

(WMAP) Observations, 简称WMAP1. WMAP1^[4,5]的测量结果为 $\Omega_b h^2 = 0.024 \pm 0.001$, 结合其他天文观测数据, 得到的最佳拟合结果为 $\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$, 对应的重子与光子的比值为 $\eta = (6.1^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-10}$. η 是一个非常小的量, 为了方便, 人们通常定义一个比较大的量, 即 $\eta_{10} = \eta \times 10^{10}$. 这样, WMAP1给出的最佳拟合结果即可以表示为 $\eta_{10} = 6.1^{+0.3}_{-0.2}$. WMAP1系列文章是在2003年2月11日投稿的. 很快, Cyburt等人^[6]基于这一精确观测的 η 值, 对BBN计算的丰度进行了细致的讨论, 指出可能需要一些新理论来解释预言和观测上的差异. 同时, 他们指出, 预言的 ${}^7\text{Li}$ 丰度比天文观测值高2~3倍, 也就是后来人们常说的锂问题或者宇宙锂问题(cosmological lithium problem). 该文章的投稿时间为2003年3月4日, 可以看出, 理论家一直在等待这一观测数据, 并做足了充分的准备. 最新的9年观测结果为WMAP9^[7,8]于2013年发布, 只采用WMAP的观测数据给出的结果是 $\Omega_b h^2 = 0.02264 \pm 0.00050$ (即 $\eta_{10} = 6.19 \pm 0.14$), 如果结合其他天文观测数据(WMAP+eCMB+BAO+ H_0), 则给出的最佳拟合结果是 $\Omega_b h^2 = 0.02223 \pm 0.00033$ (即 $\eta_{10} = 6.079 \pm 0.090$). 历经10年, WMAP测量的精度从最初的~4%提高到~2%, 当然, 结合其他观测数据给出的最佳拟合结果的精度更高一些. 2009年, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射了PLANCK卫星, 得到了更精确的宇宙诞生初期的宇宙微波背景辐射图像. 首次发布的数据Planck2013^[9]给出 $\Omega_b h^2 = 0.02205 \pm 0.00028$ (精度为~1.3%), 最新发布的数据Planck2018^[10]给出 $\Omega_b h^2 = 0.02240 \pm 0.00001$ (精度为~0.5%). WMAP9和Planck2018给出的 $\Omega_b h^2$ 值相差不超过1%, 但是后者的精度更高一些.

利用标准BBN模型结合WMAP或PLANCK卫星观测到的 $\Omega_b h^2$ 或 η_{10} 值, 就可以对原初轻核丰度做出严格的预言. 利用最新的核反应数据以及天文观测数据, 人们发现, 在 $\Omega_b h^2$ 或 η_{10} 值的约束范围内, D和 ${}^4\text{He}$ 的天文观测结果与理论预言符合得很好, 但是理论预言的原初 ${}^7\text{Li}$ 丰度比观测的高3~4倍^[11~15], 被称为宇宙锂问题, 典型图像如图1所示^[16~20]. 如果没有特别说明, 本文中的锂专指 ${}^7\text{Li}$. 该问题的确切提出距今已有17年左右. 在此期间, 来自天体物理和核物理领域的科学家们一直试图解决该问题. 然而, 传统的核物理尚未在标准大爆炸模型框架下取得成功. 有兴趣的读者可以参考相关的综述文献^[3,21~24].

图1 BBN模型预言和天文观测的轻核素丰度随 $\Omega_b h^2$ 或 η_{10} 值的变化^[16]. 绿色带子表示带1 σ 误差的天文观测值^[17~20], 蓝色带子表示BBN模型预言的结果, 带子的宽度表示核反应率的不确定度所造成的计算误差. 两个垂直的带子表示WMAP和PLANCK给出的 $\Omega_b h^2$ 或 η_{10} 值的观测约束. 图片授权来自AAS

Figure 1 BBN predicted abundances of ${}^4\text{He}$ (mass fraction), D, ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ (by number relative to H) as a function of the baryon-to-photon ratio η_{10} or $\Omega_b h^2$ values^[16]. The hatched green bands represent primordial ${}^4\text{He}$, D, ${}^3\text{He}$ and ${}^7\text{Li}$ abundances deduced from different primitive astrophysical sites^[17~20]. The 1 σ blue bands are calculated by Monte Carlo with the full BBN network. The vertical bands correspond to the WMAP (dot, black) and PLANCK (solid, yellow) baryonic density constraints, respectively. ©AAS, reproduced with permission

另外, 在宇宙大爆炸后期的恒星演化过程中, 原初的锂丰度将会有一定的增长, 主要是由于高能宇宙射线轰击星际介质中较重的原子核(如碳和氧), 通过散裂过程将它们分裂成较轻的元素(如锂、铍和硼等). 研究人员普遍认为, 这些锂元素将会在恒星演化过程中逐渐消失. 这是由于锂在恒星内部相对较低的温度下($T \geq 2.5 \times 10^6$ K)就可以参与核反应, 再经过与外部大气的混合, 锂元素就会在恒星生命周期中消失. 比如, 太阳与地球的组成元素高度相似, 且被认为几乎同时形成, 但太阳中的锂含量却只有地球中的1/100. 因此, 锂

元素是连接宇宙大爆炸、星际物质和恒星的关键元素。随着观测技术的进步,人们陆续发现,部分类太阳恒星(在银河系中大约占1/100)大气中的锂含量非常高。例如,中国科学院国家天文台赵刚领导的科研团队^[25]依托大科学装置郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)发现了一颗奇特天体,它的锂元素含量约是同类天体的3000倍,这是目前人类已知的锂元素丰度最高的恒星。到底什么原因导致了类太阳恒星中锂含量异常升高?最近,赵刚研究团队^[26]借助国内外巡天数据,发现类太阳恒星经过氦闪后普遍可以产生锂元素,解开了上述谜团。氦闪是类太阳恒星中的一个标志性事件,在恒星演化的晚期,其核心不断积累氦元素,并导致温度和压力持续上升。这个巨大的氦核最终被点燃,发生剧烈失控的核燃烧,就像在恒星内部引爆了一颗氢原子弹,在几分钟内释放出相当于整个银河系的能量。观测发现,这些恒星的锂含量平均高出理论预测值200多倍。由于氦闪是类太阳恒星演化过程中必然会经历的过程,因此类太阳恒星经过氦闪后普遍会产生锂元素。这里, LAMOST数据在鉴别氦闪恒星的过程中发挥了重要作用。这部分恒星内部的锂丰度演化问题与本文所要阐述的原初锂问题是两个完全不同的概念,因此,本文将不对前者做具体的展开论述。

1 可能的解决方案

当前,宇宙锂问题仍然是核天体领域非常重要的一个疑难问题。在过去大约20年里,人们做了很多理论和实验方面的尝试,但是传统的核物理都未能在标准的大爆炸模型下解决该问题。科学家们提出了许多解决这一问题的可能途径或研究方向^[3],归纳起来主要可以分为三类:(1)天体物理解;(2)超出标准模型解;(3)核物理解。为了逻辑更清楚,本文把核物理解放在最后作为重点来论述。

1.1 天体物理解

在天文学上,金属元素指的是除了氢和氦以外所有的重元素。金属度(metallicity)定义为恒星大气铁丰度与太阳大气相应值之比的常用对数,以 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 表示。1982年,Spite和Spite^[27]在宇宙锂丰度问题上做出了先驱性的工作。他们对银河系中低金属度晕星进行了大量观测,这些最温暖的贫金属矮星的金属度为 $-2.4 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 1.4$,有效温度为 $5700 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 6250 \text{ K}$ 。他们

发现,观测的锂丰度不依赖于金属度的大小,并且出人意料地呈现为一个恒定的值。这一恒定的锂丰度后来通常被称为“锂平台”(lithium plateau)或“Spite平台”(Spite plateau)。他们认为,这一观测到的平台锂丰度就是大爆炸后形成的星系前气体(pre-galactic gas)中的锂丰度,也就是BBN结束之后的原初锂丰度,因此可以直接与BBN模型预言进行对比。这一结论基于的假设是这些晕星表面的锂没有被损耗掉,因此观测到的丰度就等于原初的那个值。自此以后,测量并确定那些未演化的贫金属星的锂丰度成为一个非常活跃的研究主题,因为它在宇宙学诊断方面扮演着一个重要角色。许多天文观测者对Spite平台进行了更细致的研究,发现有些锂丰度只是稍微偏离了最初两位Spite的估计值,这些小的分散偏离表明恒星表面的损耗过程可能不是非常有效的。

图2显示了晕星样本中锂丰度随金属度变化的观测结果^[11,15,28]。锂对氢的比值(即锂丰度, $[\text{Li}/\text{H}]$)近似独立于铁对氢的比值(即金属度, $[\text{Fe}/\text{H}]$),这个平坦的趋势就是著名的Spite平台。随着星系核合成的进行以及恒星中物质的循环进出,金属元素的丰度会随着时间的推移而不断增加。这一平台表明,大多数晕星中的锂与星系核合成无关,因此,锂是原初大爆炸后遗留下来的。

图2 天文观测的银河系贫金属晕星锂丰度。横轴表示恒星的金属度相对于太阳系的比值,即 $[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10}[(\text{Fe}/\text{H})_{\text{obs}}/(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}]$ 。水平红色线给出了CMB+BBN理论预言的 ^7Li 丰度,点线表示银河系宇宙线核合成模型预言的锂丰度^[3]。另外, ^6Li 的观测丰度数据也已标出。观测数据取自文献^[15,28]

Figure 2 Lithium abundances in selected metal-poor galactic halo stars. For each star, both lithium isotopes are plotted versus the star's metallicity: $[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10}[(\text{Fe}/\text{H})_{\text{obs}}/(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}]$. The flatness of lithium abundance v.s. metallicity is known as the Spite plateau, and the dotted curves show predictions of a galactic cosmic-ray nucleosynthesis model^[3]. The horizontal band gives the CMB+BBN prediction. The observational data are taken from Refs. ^[15,28]

另外, 人们对一个吸积的贫金属矮星系中恒星的锂元素进行了观测^[29], 发现其锂丰度与Spite平台是一致的, 表明这个平台在不同的星系具有普遍性. 图2也包含了⁶Li的相关丰度信息. 天文观测的⁶Li丰度比BBN模型预言的高3个多数量级, 目前在标准模型框架下还没有一个令人满意的解释. 关于⁶Li丰度的疑难问题, 将不在本文叙述.

作为天体物理解, 首先需要假设BBN预测是合理的这一情形, 即假设标准宇宙学和粒子物理学是正确的, 并且利用核物理输入量正确地计算了锂的丰度. 果真如此, 那么原初锂丰度的测量值一定是错误的, 或者是测量值外推到原初零金属度时出现了错误, 总之原初的真实值必须比观测的高3~4倍.

在天文学上, 锂丰度是通过测量原始的低金属度恒星光球中的吸收线来得到的. 对于每颗恒星, 锂吸收线的强度用于推断Li/H的丰度. Spite平台表面锂丰度对金属度几乎不敏感, 暗示着锂元素是独立于星际核合成的, 因此被认为是在大爆炸原初过程产生的. 如果在这一系列推理中存在失误或错误, 那么锂问题就可能得到缓解. 例如, 观测的系统误差可能会改变每颗恒星的Li/H比值. 人们最终寻求的是恒星光球中锂的总量, 即对锂元素所有离化态求和. 但是, 可观测的单个670.8 nm锂线仅对中性Li⁰敏感. 更重要的是, 在所感兴趣的恒星中, 绝大多数的锂都是单电离的, 即处于Li⁺态. 因此, 人们必须引入一个很大的离化修正因子, 即Li⁺/Li⁰, 这一修正因子对恒星温度非常敏感(呈指数关系). 这样, 如果系统性上移晕星的温度刻度就可以增加所有恒星的锂丰度, Spite平台就会被抬升, 进而趋近或者进入到BBN+WMAP的预测范围. 在实践中, 精确测定恒星温度仍然很重要, 因为出射辐射不是完美的普朗克曲线(否则将没有锂线), 并且在恒星大气中也不能完全达到局部热力学平衡. 定量地, 解决锂丰度问题所需的温度刻度的系统性上移大约为 $\Delta T_{\text{eff}}=500\sim 600\text{ K}$, 即比测量的基准值增加了~10%, 这超出了先前要求的误差^[30]. 因此, 关于贫金属星的温度刻度以及离化修正因子(Li⁺/Li⁰)还需要进一步的研究.

当然, 还有一个完全不同的问题, 就是恒星当前的锂含量是否能反映出其最初在恒星中的丰度? 如果晕星破坏了一些锂, 则它们当前的Li/H比值为原初锂丰度设置了一个下限. 确实, 由于⁷Li具有比较低的核结合能, 它仅需暴露在较低的恒星温度下($T\geq 2.5\times 10^6\text{ K}$), 即可在晕星数十亿年的寿命中遭受重大破坏, 导致观

测的丰度较低.

锂损耗(lithium depletion)是对恒星结构和演化进行诊断的主要手段^[31~34]. 对于具有和太阳相同成分的恒星, 人们对其演化模型中的锂破坏进行了长期的研究^[35,36]. 主要的效应就是对流, 它将光球物质循环到能够发生核燃烧的深处(尽管仍然远离恒星的核心). 这样, 对于适用于描述Spite平台的低金属度恒星演化模型而言, 可以包括许多混合效应来改变光球的锂丰度, 如对流运动、湍流、旋转环流、扩散和重力沉降以及内部重力波^[34,37~39]. 这些效应一定在某种程度上发生, 并且模型已经成功地拟合了某些观测到的晕星趋势. 人们普遍认为, 低金属度恒星的对流区要比具有太阳金属度的恒星浅很多, 因此其损耗应该只有在太阳金属度的恒星中观测到的1/100^[40]. 然而, 目前模型仍然难以定量地拟合所有数据^[41]. 因此, 人们还需要对晕星中的锂损耗开展更深入的研究. 另外, 扩散(diffusion)理论预测恒星大气中元素的丰度会随着时间而变化^[42], 这可能为锂问题提供线索. Korn等人^[43]报告了贫金属球状星团NGC6397中恒星的光谱观察结果, 揭示了各种元素演化过程中大气丰度的变化趋势. 考虑扩散和湍流混合的恒星演化模型能够很好地解释这些趋势^[39]. 他们认为, 扩散可以将表面大气中的锂传送到恒星的深处, 这是造成观测到的古老恒星大气较低锂丰度的主要原因, 考虑这些效应就能够完全解释锂问题. 但是, 球状星团与场星之间锂丰度的系统差异增加了人们对球状星团作为约束原初锂场所的担忧^[44].

2019年, Aguado等人^[45]报告了一个关于锂丰度的最新观测结果, 如图3中红色实心点所示. 他们利用8.2 m VLT(Very Large Telescope)望远镜上的UVES(Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph)高分辨光谱仪对主序上极贫铁矮星J0023+0307进行了光谱观测. 因为无法检测到光谱中的铁线, 通过假设 $[\text{Ca}/\text{Fe}]\geq 0.40$, 从Ca II共振线中得到了 $[\text{Fe}/\text{H}]<-6.1$. 这是迄今为止观测到的最贫金属的恒星. J0023+0307的化学丰度模式具有非常低的 $[\text{Fe}/\text{Mg}]$ 和 $[\text{Ca}/\text{Mg}]$ 丰度比, 但具有相对较高的Mg和Si绝对丰度, 因此它是一颗受到污染的分

图3 锂丰度随金属度变化的天文观测结果^[45]。其中, 标记为J0023+0307的红色点表示最新的观测结果^[45], 蓝色点表示来自Bonifacio等人^[46]及其引用文献的观测值, 蓝色带箭头的点取自文献^[47,48]。蓝色短线表示标准BBN模型计算的结果, 绿色短线表示F. Spite和M. Spite最早发现的锂平台(或称为Spite plateau)。图片授权来自AAS
Figure 3 Lithium abundance v.s. metallicity of J0023+0307 compared with other dwarf—turn-off stars^[45]. The Li abundances are the observed values from Bonifacio et al.^[46] and references therein, the blue filled circles connected with arrows indicate the observed results in Refs. ^[47,48]. The Spite plateau reference is shown as a green dashed line at a level of $A(\text{Li})=2.20$ dex, and the blue dashed line represents the primordial lithium abundance predicted by BBN+WMAP. ©AAS, reproduced with permission

但由于损耗过程而导致观测时变低的结果, 恰恰相反, 它暗示了一个较低的原初丰度。这可能指向新的物理学, 例如大粒子衰变、基本常数变化, 或者是未知的核共振反应等, 这些因素都可能会影响原初锂的丰度。

宇宙第一代恒星(first generation stars)即星族Ⅲ恒星。它们的具体形成时间目前还没有定论, 预计在宇宙大爆炸后数千万年。那时, 宇宙中分布着由氢和氦元素构成的气体云团, 这些物质在万有引力作用下开始聚集, 并形成了恒星, 也就是宇宙中的第一代恒星, 而且以大质量恒星居多。恒星质量越大, 寿命越短, 这些大质量恒星的寿命从1000万年到1亿年不等, 最后以超新星爆炸的方式结束生命, 生成各种重元素并被抛向四周, 这些重元素将成为下一代恒星的组成物质。但是, 第一代恒星要想演化到现在, 其质量必须非常小(略大于0.07个太阳质量), 这样的恒星寿命可以高达数百亿年。对第一代恒星的观测非常困难, 至今没有被观测到。对其探测和研究有着十分重要的意义: 第一代恒星研究为星系的早期演化、大质量黑洞的形成和原始气体星云的演化提供了丰富的信息。另外, 通过对第一代恒星分光 and 测光观测资料的分析, 能提取出许多与之相关的重要信息, 当然, 对锂丰度的研究也将给出终极

的天文丰度观测数据。

1.2 超出标准模型解

假设人们已正确测量了原初锂丰度, 并且已正确地应用了BBN中的核物理。在这种情况下, 人们不得不质疑标准BBN计算所依据的假设——标准模型; 也就是说, 为了解决锂问题, 我们可能必须要超越标准粒子物理学和(或)标准宇宙学模型。当然, 这些大多数都是理论上比较“疯狂”的猜想, 需要实验上的证实。

在宇宙大爆炸BBN中一定存在暗物质。通常, 它被认为是非相对论的又是弱相互作用的, 因此, 它对宇宙动力学和微观物理的相互作用并不重要。同样, 暗能量也可以忽略不计。尽管暗物质的身份目前尚不清楚, 但一个简单、流行且具有良好物理驱动的候选体就是弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particles, WIMPs)。今天的WIMPs可能是一个级联衰变的稳定终点。如果是这样, 则WIMPs是级联中次轻粒子的衰变所产生的子体。尽管这些衰变的本质是模型有关的, 但它们通常会产生标准模型粒子并与背景等离子体发生相互作用。人们对发生在BBN期间或之后的衰变大质量粒子X的效应进行了理论研究, 认为在特定参数条件下考虑这一相互作用就能够解决锂问题^[23,49,50]。

锂问题也可能表明宇宙学是不规范的。最近有人提议, 宇宙加速可能是宇宙密度的大尺度不均匀性造成的。这样的图景解释了广义相对论中的宇宙加速, 其中并没有引入暗能量, 但是必须放弃现有的宇宙学原理。当然, 除了WMAP美学之外, 天文观测到的是一个不均匀的宇宙。如果重子与光子的比值沿着不均匀性变化, 那么BBN在这种宇宙中的发生方式可能会有所不同。Clarkson和Regis^[51]特别强调, ^7Li 的观测是在红移 z 较低的局部进行的, 而D/H和CMB都在红移 z 较高的遥远宇宙中测量的。如果局部的重子与光子之比 η 降低大约两倍, 那么确实可以预期: 局部的 ^7Li 会低于WMAP预测, 但是D/H与预测的一致。不过, 这种聪明的想法必须要面对一系列观测上的严格检验。

此外, 在标准模型框架下, 人们也可以从另外的角度来审视锂疑难问题。众所周知, 反应率是BBN模型中最重要的核物理输入量。核天体反应率是由能量依赖的反应截面与粒子的经典麦克斯韦-玻尔兹曼速度分布(简称MB分布)的卷积计算得到的, 即影响核合成的反应率与参与核反应的原子核的速度分布有关。近年来, Hou等人^[52]利用非广延统计代替经典的玻尔兹

曼吉布斯统计来描述原初等离子体的粒子分布,即用非广延的Tsallis分布^[53,54]来代替经典的MB分布来研究大爆炸核合成. Tsallis分布通过引入非广延参数 q 来描述,当 q 趋近于1时,即为经典MB分布.通过对大爆炸涉及的所有主要核反应及相关的逆反应进行非广延处理,发现当非广延参数 q 的值在 $1.069 \leq q \leq 1.082$ 范围内,就可以成功解决悬而未决的宇宙锂问题,如图4所示^[55,56].所用方法对于研究其他天体场所的核合成过程具有重要的启发意义.这意味着在天体极端条件下,经典MB速度分布可能需要修正.当然,极高温环境下粒子的速度分布规律迫切需要实验进一步证实,比如利用上海的强激光神光II装置^[57]等.

1.3 核物理解

对于核物理解,我们需要假设天文观测的锂丰度是正确的,并且标准宇宙学和粒子物理学也是正确的这一情形.这样,锂问题就指向了BBN丰度预言上的错误. BBN涉及非常复杂的核反应网络,其所应用的核反应数据如果存在错误,或者在伽莫夫能区没有实验数据而只有理论外推,或者网络里忽略了某些重要的反应等,都会造成BBN预言的不准确或错误.这些因素是标准BBN模型计算中唯一可能的薄弱环节,也可能正是人们寻求锂问题的核物理解决方案.

Pospelov和Pradler^[23]给出了标准BBN模型预言的轻核素丰度随演化时间以及环境温度或能量的变化(文献[23]中图1),并且标记了中微子退耦(ν decoupling)、中子/质子退耦(n/p decoupling)、正负电子湮灭($e^\pm$ annihilation)、氘瓶颈(D bottleneck)以及标准BBN冻结或熄灭(SBBN freeze-out)的4个典型阶段.由于 ${}^7\text{Be}$ 的半衰期只有大约53 d,在BBN结束后不久就衰变成 ${}^7\text{Li}$,因此人们观测到的锂丰度其实是 ${}^7\text{Be}$ 衰变的 ${}^7\text{Li}$ 与反应产生的 ${}^7\text{Li}$ 的总和.可以看出,前者的贡献大约是后者的13~15倍.因此,只有大量的 ${}^7\text{Be}$ 被破坏(或损耗掉),才能最终得到天文观测到的较低 ${}^7\text{Li}$ 丰度,从而解决锂问题.

Fields^[3]给出了BBN模型中最重要的核反应及其网络核合成图像(文献[3]中图1).当然,真实的BBN核合成网络比图中显示的复杂得多,但是大量研究表明,图中未包括的那些核反应对 $A \leq 7$ 轻核素丰度的计算影响很小^[13,58,59],几乎可以忽略. Boyd等人^[60]系统地研究了通过一些新的核反应解决锂问题的可能性.这项研究的重点几乎完全集中在非共振反应上,结论是这些新

图4 红色曲线表示BBN模型计算的原初丰度值随非广延参数值 q 的变化^[52]. 阴影水平带表示天文观测的丰度值 1σ 的误差^[55,56,20]. 蓝色垂直带表示天文观测值约束的非广延统计参数 q 的取值范围: $1.069 \leq q \leq 1.082$ ^[52]. 图片授权来自AAS

Figure 4 Predicted primordial abundances as a function of parameter q (in red solid lines)^[52]. The observed primordial abundances^[55,56,20] with 1σ uncertainty for D, ${}^4\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ are indicated as hatched horizontal bands. The vertical (blue) band constrains the range of the parameter q to $1.069 \leq q \leq 1.082$ ^[52]. ©AAS, reproduced with permission

添加的反应对解决锂问题无能为力. 理论家们^[61,62]提出了通过 ${}^7\text{Be}+d$ (d 为deuterium的缩写)、 ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}$ 和 ${}^7\text{Be}+t$ (t 为tritium的缩写)共振反应道来破坏 ${}^7\text{Be}$,通过共振来大幅降低预言的 ${}^7\text{Li}$ 丰度,进而解决锂问题.在文献[3]的图1中,标记红色的反应和箭头即表示这3个反应道.由于 d 比 t 和 ${}^3\text{He}$ 的丰度都高(见Pospelov和Pradler^[23]的图1),因此简单来讲, ${}^7\text{Be}+d$ 的破坏效应更强.当然,如果考虑共振强度的不同,则 ${}^7\text{Be}+t$ 和 ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}$ 的贡献也不可忽略.有关这些共振反应的现状和实验方案在后面的章节有详细的论述,这里不再赘述.

2 核物理方面的努力

近十几年来,核物理学家在解决锂问题方面做出了各种努力和尝试.尽管都没有取得成功,但是这些工作为大爆炸BBN模型提供了大量可靠的实验数据,为人们更好地理解宇宙大爆炸的遗迹作出了重要贡献.除此之外,还有一些研究需要继续深入下去,并有可能

成为最终核物理解决方案,相关内容将在下一章节予以详细的论述.

图5显示了BBN模型中产生和破坏 ${}^7\text{Be}$ 核素的主要反应道的贡献随反应能量和温度的变化关系^[13]. 模型计算表明, ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ 是破坏 ${}^7\text{Be}$ 核素第一重要的核反应^[13,58]. 值得说明的是, 图5中这些核反应的贡献大小是基于当时文献所采用的反应率的计算结果, 其中并不考虑有未知新共振的情况, 当然, 如果出现了新的共振, 那么他们的角色就会相应地发生变化. 2018年, Damone等人^[63]在瑞士CERN(European Organization for Nuclear Research)的n_TOF装置上, 首次完成了 ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ 反应在热中子到325 keV中子能区的直接截面测量. 新测的反应截面在热中子到~1 keV能区比之前数据大~40%, 但是在50 keV以上能区与之前的基本一致. 导致的结果是, 在BBN感兴趣的温度范围内, 新的反应率比旧的只是稍微大了一些(~10%). 利用新的反应率计算的锂丰度只是降低了10%左右, 不足以解决锂问题.

${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 是破坏 ${}^7\text{Be}$ 第二重要的核反应, 如图5所示. 在之前的BBN模型计算中, 对于该反应的反应率普遍采用的是1969年Wagoner^[64]的简单理论估计值. Hou等人^[65]利用已有 ${}^4\text{He}(\alpha,p){}^7\text{Li}$ 和 ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$ 实验反应截面数据, 根据电荷对称性和细致平衡原理重新计算了 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 的天体物理反应率. 新的反应率比Wagoner的理论估计值小10倍左右. 2016年, 在瑞士CERN的n_TOF装置上, Barbagallo等人^[66]在10 meV~10 keV的中子能区首次完成了 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 反应的截面测量. 在总截面计算中, 他们采用了Hou等人^[65]的评估数据. 2017年, 在日本大阪大学RCNP(Research Center for Nuclear Physics)的飞行时间装置上, Kawabata等人^[67]完成了质心能量在0.20~0.81 MeV能区的 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 反应截面的测量, 其结果与Hou等人^[65]的评估数据一致. 但是, BBN理论计算表明, 这个破坏 ${}^7\text{Be}$ 的(n, α)反应截面太小, 不足以对锂丰度产生较大的影响, 新的实验数据对锂丰度的影响只有~2%的水平.

模型计算表明, ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ 是产生 ${}^7\text{Be}$ 第三重要的反应, 但是其低能区的反应截面还存在一定的争议^[58]. Chen等人^[68]在兰州320 kV平台上建立了核天体物理研究装置, 并对这一反应的天体物理S因子进行了直接测量^[69]. 实验结果表明, 在200 keV以下的低能区, 该反应的天体物理S因子随能量降低而减小, 这与所有以前的理论预言都不相符(图6), 目前尚未找到确切的理解

图5 (网络版彩色)BBN模型中产生和破坏 ${}^7\text{Be}$ 核素的主要反应道^[13]. 上方横轴为对应的温度标度 T_9 . 图片授权来自AAS
Figure 5 (Color online) Leading processes for production and destruction of ${}^7\text{Be}$ in the BBN model^[13]. The axis above the figure corresponds to temperature of T_9 . ©AAS, reproduced with permission

释. 这可能暗示着 ${}^7\text{Be}$ 核中存在一个新能级, 或者需要新的理论来解释这一超出理论预期的S因子下降趋势. 最近, Li等人^[70]对这一可能新能级的共振参数进行了更细致研究. 虽然新的实验数据消除了这一反应在大爆炸能区理论计算的不确定性, 但是对于锂丰度几乎没有影

图6 (网络版彩色) ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ 天体物理S因子随能量的变化^[69]. 基于兰州320 kV平台装置测量的结果以实心和空心圆圈表示, 其他实验和理论的结果也显示在图中. 图中的文献编号请参考文献^[69]
Figure 6 (Color online) Astrophysical S-factors of ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ as a function of energy. The solid and hollow circles represent the results measured on the Lanzhou 320 kV platform^[69], and other experimental and theoretical results are also shown for comparison. For the reference numbers cited in the figure, please see Ref. ^[69]

响. 其实更重要的是, 这提醒人们在低能区简单的理论外推有时很不可靠, 这也是人们进入深地低本底实验室开展低能核反应直接测量的主要原因之一^[71].

在过去近20年间, 中国原子能科学研究院的Li等人^[72]基于HI-13串列加速器上的放射性束装置^[73]和Q3D磁谱仪^[74], 对宇宙锂问题所涉及的一系列核反应进行了间接测量, 即通过测量转移反应的角分布, 利用DWBA(distorted wave Born approximation)方法提取出原子核的单粒子谱因子(spectroscopic factor), 进而计算出相关反应的天体物理反应率. 这些实验主要包括质子诱发的核反应: ${}^6\text{He}(\text{p}, \text{n}){}^6\text{Li}$ ^[75]、 ${}^8\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^9\text{Be}$ ^[76]、 ${}^8\text{Li}(\text{p}, \text{t}){}^6\text{Li}$ ^[77]、 ${}^6\text{He}(\text{p}, \gamma){}^7\text{Li}$ ^[78]、 ${}^6\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^7\text{Be}$ ^[70, 79], 中子诱发的核反应: ${}^8\text{Li}(\text{n}, \gamma){}^9\text{Li}$ ^[80]、 ${}^7\text{Li}(\text{n}, \gamma){}^8\text{Li}$ ^[77]、 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \gamma){}^7\text{Li}$ ^[79], 以及氘诱发的核反应: ${}^8\text{Li}(\text{d}, \text{p}){}^9\text{Li}$ ^[80]、 ${}^8\text{Li}(\text{d}, \text{n}){}^9\text{Be}$ ^[76]、 ${}^7\text{Be}(\text{d}, {}^3\text{He}){}^6\text{Li}$ ^[81]. 他们通过这些实验得到了大量可靠的反应截面和反应率的数据, 遗憾的是都未能有效地缓解锂问题.

3 核物理实验解决方案

实验核物理学家期望解决宇宙锂问题的最完美方式是找到标准大爆炸模型下的核物理解. 如前文所述, 宇宙中原初核 ${}^7\text{Li}$ 的丰度大部分都是来自 ${}^7\text{Be}$ 核的衰变, 因此, 只要能找到一个或几个核反应, 这些核反应需要比原先预想的更有效地破坏已有的 ${}^7\text{Be}$ 核, 使得BBN预言的最终 ${}^7\text{Li}$ 丰度大幅度减小, 从而与天文观测结果相符. 具体地说, 我们需要在BBN感兴趣的伽莫夫能区寻找一些新的共振态, 这样就能够显著地增大破坏 ${}^7\text{Be}$ 核相关反应的反应截面(或反应率), 从而更有效地破坏 ${}^7\text{Be}$ 核, 并最终大大地缓解甚至是解决锂问题.

2011年, Chakraborty等人^[62]系统地预言了一些共振反应, 这些共振反应可以显著地破坏 ${}^7\text{Be}$ 或 ${}^7\text{Li}$, 从而部分缓解或完全解决锂问题. 然而, 这些预言的共振态

的性质(即共振能量、有效宽度、自旋宇称)尚需实验验证. 尽管理论预言可能还存在一些问题, 例如计算中需要异常大的道半径问题(如下文所述), 但是实验家还是希望穷尽所有的核物理反应来解决锂问题. 综合之前的理论预言^[61, 62], 本文建议重点从以下3个反应道, 即 ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}$ 、 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 、 ${}^7\text{Be}+\text{t}$ 开展实验研究, 相关共振信息总结于表1中.

3.1 反应道 ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}$

根据理论预言^[62], 如果在 ${}^{10}\text{C}$ 的 ${}^3\text{He}$ 分离阈($Q=15.003\text{ MeV}$)附近(即激发能 $E_x\approx 14.95\sim 15.10\text{ MeV}$)存在一个自旋为1或2、宇称为负、有效宽度 $\Gamma_{\text{eff}}\approx 10\text{ keV}$ 的共振态(阈上或阈下共振态均可), 就能够缓解或彻底解决锂问题. 相关反应道、能级纲图以及理论预言能级的位置等信息如图7所示^[82]. 历史上, 霍伊尔(F. Hoyle)曾做出一个非常著名的预言^[83], 即假设在 ${}^{12}\text{C}$ 中存在一个Hoyle共振态($E_x=7.68\text{ MeV}$)就可以解决天体核合成中著名的“碳问题”, 后来实验上真的找到了这个“霍伊尔”态($E_x=7.654\text{ MeV}$)^[84]. 因此, 如果人们能够找到该未知的 ${}^{10}\text{C}$ 共振态, 那将是对天文学家霍伊尔先生再一次最好的致敬.

在 $E_x=10.0\sim 16.5\text{ MeV}$ 激发能区, 对 ${}^{10}\text{C}$ 核能级结构的实验研究还很缺乏. 2013年, Hammache等人^[85]利用 ${}^{10}\text{B}({}^3\text{He}, \text{t}){}^{10}\text{C}$ 反应对 ${}^{10}\text{C}$ 的激发能级进行了研究, 但是未能找到预言的共振态. 他们分析原因可能有3种: (1) 该共振态太宽, 无法鉴别; (2) 电荷交换反应截面太小, 无法有效布居该共振态; (3) ${}^{10}\text{C}$ 在这一能区无独立共振态, 呈现出连续谱. 另一个重要的原因, 笔者认为, 可能是该实验的能量分辨率($\sim 37\text{ keV}$)和统计都不够理想. 事实上, 早在四、五十年前, 人们曾对 ${}^{12}\text{C}(\text{p}, \text{t}){}^{10}\text{C}$ 反应做过实验研究, 但所分析和研究的激发能区仅限于 $E_x\leq 6.61\text{ MeV}$ ^[86, 87]. 本文作者重新检查了之前的实验结果,

表1 解决宇宙锂问题的最可能候选共振^[61, 62]

Table 1 Most probable candidate resonances which can solve the cosmological lithium problem^[61, 62]

候选的共振态	入射道	共振能量 $E_R(\text{keV})$	总宽度 $\Gamma_{\text{tot}}(\text{keV})$	主要的出射道	出射道宽度
${}^{10}\text{C}$, 未知 ^{a)}	${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}$	未知	未知	p、 α 、 ${}^3\text{He}$	未知
${}^9\text{B}$, $(5/2^+)$, $16.71\text{ MeV}^{\text{b)}$	${}^7\text{Be}+\text{d}$	219.9	未知	p、 α	未知
${}^{10}\text{B}$, (2^+) , $18.80\text{ MeV}^{\text{c)}$	${}^7\text{Be}+\text{t}$	130.9	<600	p、 ${}^3\text{He}$ 、 α	未知

a) Chakraborty等人^[62]理论预言: $E_R=(-10\sim +40)\text{ keV}$, $J^\pi=1^-$ 或 2^- , $\Gamma_{\text{eff}}\approx 10\text{ keV}$; b) Cyburt和Pospelov^[61]理论预言: $E_R=(170\sim 220)\text{ keV}$, $\Gamma_d=(10\sim 40)\text{ keV}$, $\Gamma_{\text{tot}}\leq 40\text{ keV}$; c) Chakraborty等人^[62]理论预言: $E_R\approx 30\text{ keV}$, Γ_{eff} 约为几百keV

图7 (网络版彩色) ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}\rightarrow{}^{10}\text{C}^*$ 反应及其相关衰变道。理论预言^[62]的共振位置和相关信息已在图中标出。能级结构和反应数据取自NNDC数据库^[82]

Figure 7 (Color online) ${}^7\text{Be}+{}^3\text{He}\rightarrow{}^{10}\text{C}^*$ reaction and the relevant decay channels. The predicted resonant state^[62] around $E_x=15.0$ MeV is shown. The nuclear structure and reaction data are adopted from NNDC^[82]

有趣的是，在理论预言的15.0 MeV附近发现了比较弱的共振迹象，如图8所示。但是，由于他们统计和能量分辨(~140 keV)的原因，目前还无法完全确定该共振态的存在。因此，有必要利用 ${}^{12}(\text{p},\text{t}){}^{10}\text{C}$ 反应对 ${}^{10}\text{C}$ 的较高激发能级进行高能量分辨的实验研究，以寻找该预言的共振态。

另外，也可以选取 ${}^{12}\text{C}(\alpha, {}^6\text{He}){}^{10}\text{C}$ 和 ${}^{10}\text{B}({}^3\text{He}, \text{t}){}^{10}\text{C}$ 反应道来布居这一未知的共振态。当然，两个“副产物”反应道 ${}^{12}\text{C}(\alpha, {}^6\text{Li}){}^{10}\text{B}$ 和 ${}^{10}\text{B}({}^3\text{He}, {}^3\text{He}){}^{10}\text{B}$ 也可以提供 ${}^{10}\text{B}$ 核的共振特性。目前， ${}^{10}\text{B}$ 中位于 $E_x=18.80$ MeV($J^\pi=2^+$)能级的共振特性还不清楚，根据理论计算^[61,62]， ${}^7\text{Be}+\text{t}$ 反应道通过这个共振态也能够缓解锂问题(见3.3节)。

在实验上，建议利用日本大阪大学核物理研究中心的高分辨磁谱仪(Grand Raiden)来开展实验研究。目前，该磁谱仪是世界上能量分辨率最好的，在较高的激发能区可以达到~13 keV^[88]，完全能够实现对预言的共振态的鉴别。当然，在南非iThembe LABS实验室的K600磁谱仪上也可以开展相关的实验工作，能量分辨率可以达到~30 keV^[89]。目前，北京师范大学的科研人

图8 (网络版彩色) 以前实验在 ${}^{12}\text{C}(\text{p},\text{t}){}^{10}\text{C}$ 反应中测得的氚谱(取出Benenson等人^[86]图1中的数据进行重新作图，并且画上了统计误差)。其中，用箭头标出了之前实验没有分析的 ${}^{10}\text{C}$ 中一些可能的激发态，理论预言的15.0 MeV共振位置也已标出

Figure 8 (Color online) Previously measured triton spectra of the ${}^{12}\text{C}(\text{p},\text{t}){}^{10}\text{C}$ reaction (i.e., redrawing of Figure 1 shown by Benenson et al.^[86] by connecting all data points, with statistical errors added). The arrows indicate those possible states which were not analyzed before, where location of the predicted resonance around $E_x=15.0$ MeV is indicated

员已经建立了一支国际合作团队，包括中国科学院近代物理研究所、北京航空航天大学、中国科学院国家天文台，日本的大阪大学(Osaka University)、理化学研究所(Rikagaku KENkyusho/Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)、京都大学(Kyoto University)、东北大学(Tohoku University)、美国的圣母大学(University of Notre Dame)等，已经提交了基于RCNP装置的束流申请书，期望能够对宇宙锂问题作出贡献。

3.2 反应道 ${}^7\text{Be}+\text{d}$

图9显示了 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 反应道及其相关能级纲图。早在1960年，Kavanagh^[90]首次测量了该反应在 $E_{\text{c.m.}}=0.58\sim 1.32$ MeV能区的截面，但是只包括了退激到 ${}^8\text{Be}$ 基态和第一激发态($E_x=3.04$ MeV)的贡献，如图10中空心圆点所示。事实上， ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ 总反应截面应该还包括退激到 ${}^8\text{Be}$ 第二($E_x=11.40$ MeV)、第三($E_x=16.626$ MeV)，甚至是第四($E_x=16.922$ MeV)激发态的贡献。Parker^[92]根据Kavanagh^[90]的结果，考虑到更高激发态的贡献，简单地假设总截面是Kavanagh测量的3倍，如果去除测量到的两个共振($E_x=17.076$ 和 17.638 MeV)的影响，可以近似假定该反应的天体物理S因子为一恒定值，即~100 MeV b。基于此恒定值，Caughlan和Fowler^[93]计算了 ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ 的反应率，并收录到著名的CF88数据库

图9 (网络版彩色) ${}^7\text{Be}+\text{d}\rightarrow{}^9\text{B}^*$ 反应及其相关衰变道. ${}^9\text{B}$ 中标记17.076和17.638 MeV的2条能级已经被实验^[90]所观测到; 理论预言能级的位置大约在16.71 MeV, 需要实验进一步研究. 可以看出, 在BBN感兴趣能区 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 有4个出射道, 即p、 α 、 ${}^3\text{He}$ 以及 γ . 能级结构和反应数据取自NNDC数据库^[82]

Figure 9 (Color online) ${}^7\text{Be}+\text{d}\rightarrow{}^9\text{B}^*$ reaction and the relevant reaction channels. Two levels in ${}^9\text{B}$ at 17.076 and 17.638 MeV were observed previously^[90]. The predicted level is located around 16.71 MeV, which needs to be studied experimentally. It shows clearly that there are four emitting channels for ${}^7\text{Be}+\text{d}$ reaction in the BBN interested energy region, i.e., p, α , ${}^3\text{He}$ and γ . The nuclear structure and reaction data are adopted from NNDC^[82]

中. 因此, 这一反应率具有非常大的不确定性. 在目前的BBN模型中, 该 ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ 反应率一般采用的是CF88的数据. 2004年, Coc等人^[11]的理论计算表明, 如果把该反应率提高100倍以上, 则可以很大程度上缓解甚至解决宇宙锂问题. 不久, Angulo等人^[91]利用 ${}^7\text{Be}$ 放射性束轰击 CD_2 靶进行了 ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ 的反应截面测量, 但是只测量了两个数据点, 如图10中实心圆圈和三角点所示. 尽管在1.15 MeV处, Angulo等人^[91]的数据(图10中的实心圆圈)与之前的在误差范围内符合, 但是他们测量的误差还是非常大, 超过20%. 由于截面比较小, 他们在BBN能区只测量了一个数据点, 即在 $E_{\text{c.m.}}=0.37$ MeV处, 得到的总S因子为 $S_{\text{tot}}\approx 9.3(4.9)$ MeV b. 这一结果比之前CF88采用的还要小大约10倍, 与Coc

等人^[11]理论假设的趋势完全相反, 因此他们认为这一(d,p)反应对解决锂问题不仅没有帮助, 反而使问题进一步恶化.

2009年, Cyburt和Pospelov曾经在学术论文预印本arXiv上做过一个理论预言^[61], 并于2012年发表在正式期刊上^[94]. 在目标核 ${}^9\text{B}$ 的镜像核 ${}^9\text{Be}$ 中, Dixit等人^[95]测量到一个位于 $E_x=16.671(8)$ MeV、 $J^\pi=5/2^+$ 的激发态, 能级宽度非常窄, $\Gamma=41(4)$ keV. 根据镜像类比, Cyburt和Pospelov^[61]预期在 ${}^9\text{B}$ 核中也应该存在一个类似的态, 能量为 $E_x\approx 16.7$ MeV. 对应于 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 反应道的共振能量为 $E_R\approx 210$ keV. 利用BBN模型, 他们对这一共振的参数特性进行了研究, 认为一个能量在 $E_R=(170\sim 220)$ keV、入射分宽度 $\Gamma_d=(10\sim 40)$ keV、总宽度 $\Gamma\leq 40$ keV的共振就

图 10 (网络版彩色)截至2005年 ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ 反应的实验天体物理S因子。空心圆圈表示Kavanagh^[90]测量的数据(包括基态和第一激发态的贡献,即 S_{0+1})。实心圆圈表示Angulo等人^[91]测量的数据(包括基态和第一激发态的贡献,即 S_{0+1})。而三角形数据点表示考虑了更高激发态的贡献后总的 S_{total} 。对于原初核合成BBN过程,典型的温度区间为(0.3~0.8) GK,对应的伽莫夫能量范围已用箭头在图中画出。Cyburt和Pospelov理论预言^[61]的共振区域以阴影方框标出

Figure 10 (Color online) The experimental astrophysical S-factors of ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{p}){}^8\text{Be}$ reaction up to year 2005. Open circles represent the data from Kavanagh^[90]; filled circles represent the data from Angulo et al.^[91]. Both data include contributions from the ground and first excited states of ${}^8\text{Be}$ only, i.e., S_{0+1} . The triangles indicate the total S-factors. The Gamow window for a typical BBN temperature (0.3~0.8) GK is also shown. The resonant region predicted by Cyburt & Pospelov^[61] is shown by the shaded box

可以极大地缓解甚至是解决锂问题。但是正如他们在论文里指出的,这里存在一个问题,即只有假设非常大的人射道半径($a_{27} \geq 9$ fm),才能得到如此大的人射宽度,然而,通常人们采用的值是 $a_{27} = 1.4 \times (2^{1/3} + 7^{1/3}) = 4.4$ fm。这个半径问题一直没有得到很好的解决。

事实上,1985年,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的Pugh博士^[96]曾经报道了 ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ 的实验结果,其中测量到了一条 $E_x = 16.71(10)$ MeV的能级(即误差为100 keV)。虽然该工作没有正式发表过,但是这一能级被收录在NNDC的数据库^[82]中,Cyburt和Pospelov^[61]预言的那个16.71 MeV态应该是基于这篇未发表的博士论文。2011年7月12日,Scholl等人^[97]利用前文提到的日本大阪大学的Grand Raiden磁谱仪,通过 ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},\text{t}){}^9\text{B}$ 反应对 ${}^9\text{B}$ 的激发能级进行了精确的测量。他们测量到一条位于 $E_x = 16.800(10)$ MeV(即误差为10 keV)的能级,能级总宽度为 $\Gamma = 81(5)$ keV。不久之后的8月29日,Kirsebom和Davids^[98]就投稿了一篇基于该实验结果的理论计算文章,认为该16.8 MeV共振态最多只能把锂丰度降低~3.5%,无法解决锂问题。因为这一实验能量比预言的上限高

了90 keV,所以本文作者认为,还需要另外的验证实验来检验这一激发能量是否可靠,例如可以利用前文提到的南非K600磁谱仪等实验装置。

最近,Rijal等人^[99]利用 ${}^7\text{Be}$ 束流轰击氖气靶,采用厚靶方法对 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 在 $E_{\text{c.m.}} = 0.2 \sim 1.7$ MeV能区的(d,p)和(d, α)激发函数进行了测量。注意,之前还没有人在此能区测量过 ${}^7\text{Be}(\text{d},\alpha){}^5\text{Li}$ 的反应截面。实验采用的是活性靶探测技术,激发函数和天体物理S因子的结果如图11所示。可以看出,(1) (d, α)的反应截面比(d, p_{0+1})的大很多;(2) Rijal等人^[99]的(d, p_{0+1})的结果比Kavanagh^[90]的小,但是本文作者认为Kavanagh的直接测量数据更为可靠;(3) (d, α)截面在 $E_{\text{c.m.}} = (360 \pm 50)$ keV有一个共振现象,虽然能量和Scholl等人^[97]测量的 $E_{\text{c.m.}} = (310 \pm 10)$ keV在误差范围内是一致的,但是仍需要实验进一步确认,因为这个共振能量的位置对计算反应率非常重要。Rijal等人^[99]认为,新的实验结果能够改变一些锂丰度,但是还无法解决问题。笔者认为,他们的结果无法鉴别出(d,p)到更高激发态的事件,只能给出(d, p_{0+1})的贡献,因此得出上述结论还为时尚早。另外,从图11(b)可以看出,对于(d, α)反应道来说,在低能100 keV处还存在一个较大共振的可能,也需要人们开展进一步的实验研究。

综上所述,我们认为,有必要在理论预言可能存在共振的能区(即 $E_{\text{c.m.}} = 0.17 \sim 0.22$ MeV,图10和11中标记阴影的区域)对该 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 反应道的总截面开展直接测量工作,特别是在实验设计上要考虑 ${}^8\text{Be}$ 高激发态的贡献。当然,对预言的 $E_x \approx 16.7$ MeV附近共振态及其性质开展间接的测量工作也是非常重要的。

3.3 反应道 ${}^7\text{Be}+\text{t}$

这个反应道的反应Q值为18.669 MeV,阈上最近的能级位于 $E_x = 18.80$ MeV(2^+),对应的共振能量为 $E_R \approx 130$ keV(表1)^[82],如图12所示。对这个能级的总宽度只有一个比较弱的实验限制,即 $\Gamma_{\text{tot}} < 600$ keV;其出射道p、 ${}^3\text{He}$ 、 α 的宽度都是实验未知的。Chakraborty等人^[62]的计算表明,这个实验观测到的 $E_R \approx 130$ keV的能量太高,几乎对锂问题没有贡献。但是,如果把这个能量降低100 keV或者更低,即降到 $E_R \approx 30$ keV,就有可能解决问题。对于这条能级的激发能量,NNDC^[82]并没有给出具体的不确定度,但是附近能级的不确定度都是100~200 keV,上述假设把能量降低~100 keV还是非常可能的。因此,上述假设还需要精确的实验验证,即利用高精度的磁谱仪对 ${}^{10}\text{B}$ 核在 $E_x = 18.8$ MeV附近能级的

图 11 最新实验测量的 ${}^7\text{Be}+\text{d}$ 反应截面(a)及天体物理S因子(b)^[99]. Kavanagh^[90]的数据是其原始微分截面数据乘以 4π (假设各向同性); Angulo等人^[91]的数据是总的S因子, 即图10中蓝色三角点 S_{total} . (a)中蓝色阴影区域表示理论预言的共振能级. 图片授权来自American Physical Society
Figure 11 (a) Newly measured ${}^7\text{Be}+\text{d}$ reaction cross section^[99]. Shown for comparison are differential cross sections from Kavanagh^[90], multiplied by 4π (by isotropic assumption). (b) The associated astrophysical S-factors^[99]. The solid line represents the R-matrix fit including the 100 keV experimental resolution (FWHM), while the dashed line without the experimental resolution included. Data points from Angulo et al.^[91] (i.e., the blue triangles in Figure 10) are shown for comparison. The resonant region predicted is shown by the blue shaded box in the left panel (a). Reprinted Figures 3&4 with permission from [99], Copyright (2019) by the American Physical Society

图 12 ${}^7\text{Be}+\text{t}\rightarrow{}^{10}\text{B}^*$ 反应及其相关衰变道。 ${}^{10}\text{B}$ 中理论预言能级的位置已标定. 在Chakraborty等人^[62]的计算中, 考虑了 ${}^9\text{Be}$ 中 $E_x=11.81$ MeV态的质子出射道贡献. 能级结构和反应数据取自NNDC数据库^[82]
Figure 12 ${}^7\text{Be}+\text{t}\rightarrow{}^{10}\text{B}^*$ reaction and the relevant decay channels. The resonance predicted around $E_R\approx 30$ keV in ${}^{10}\text{B}$ is indicated, which needs to be studied experimentally. In the work of Chakraborty et al.^[62], they considered the $E_x=11.81$ MeV state in the p exit channel. The nuclear structure and reaction data are adopted from NNDC^[82]

能量进行精确测量. 当然, 对这条能级出射道宽度的确定也是非常重要的, 因为它们还都是未知的.

4 前景与展望

核天体物理是国际前沿的交叉学科, 涵盖天体物

理、天文、核物理、粒子物理、等离子体物理等, 目前还存在许多挑战性的科学问题需要突破, 本文评述的宇宙锂问题更是需要多学科交叉才能解决. 特别是, 如果核物理学家能够找到一个解决锂问题的“霍伊尔”共振态, 那将是非常重要且有意义的事情.

致谢 特别感谢家人在疫情期间给予的默默支持和鼓励.

参考文献

- Gamow G. Expanding universe and the origin of elements. *Phys Rev*, 1946, 70: 572–573
- Wagoner R V, Fowler W A, Hoyle F. On the synthesis of elements at very high temperatures. *Astrophys J*, 1967, 148: 3–49
- Fields B D. The primordial lithium problem. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2011, 61: 47–68
- Bennett C L, Halpern M, Hinshaw G, et al. First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Preliminary maps and basic results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2003, 148: 1–27
- Spergel D N, Verde L, Peiris H V, et al. First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters. *Astrophys J Suppl Ser*, 2003, 148: 175–194
- Cybur R H, Fields B D, Olive K A. Primordial nucleosynthesis in light of WMAP. *Phys Lett B*, 2003, 567: 227–234
- Hinshaw G, Larson D, Komatsu E, et al. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological parameter results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2013, 208: 19
- Bennett C L, Larson D, Weiland J L, et al. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Final maps and results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2013, 208: 20
- Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A16
- Aghanim N, Arkrani Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2020, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>, arXiv: 1807.06209
- Coc A, Vangioni-Flam E, Descouvemont P, et al. Updated big bang nucleosynthesis compared with Wilkinson Microwave Anisotropy Probe observations and the abundance of light elements. *Astrophys J*, 2004, 600: 544–552
- Cybur R H. Primordial nucleosynthesis for the new cosmology: Determining uncertainties and examining concordance. *Phys Rev D*, 2004, 70: 023505
- Serpico P D, Esposito S, Iocco F, et al. Nuclear reaction network for primordial nucleosynthesis: A detailed analysis of rates, uncertainties and light nuclei yields. *J Cosmol Astropart Phys*, 2004, (12): 010
- Cuoco A, Iocco F, Mangano G, et al. Present status of primordial nucleosynthesis after WMAP: Results from a new BBN code. *Int J Mod Phys A*, 2004, 19: 4431–4453
- Asplund M, Lambert D L, Nissen P E, et al. Lithium isotopic abundances in metal-poor halo stars. *Astrophys J*, 2006, 644: 229–259
- Coc A, Uzan J P, Vangioni E. Standard big bang nucleosynthesis and primordial CNO abundances after Planck. *J Cosmol Astropart Phys*, 2014, (10): 050
- Aver E, Olive K A, Porter R L, et al. The primordial helium abundance from updated emissivities. *J Cosmol Astropart Phys*, 2013, (11): 017
- Cooke R J, Pettini M, Jorgenson R A, et al. Precision measures of the primordial abundance of deuterium. *Astrophys J*, 2014, 781: 31
- Bania T M, Rood R T, Balser D S. The cosmological density of baryons from observations of $^3\text{He}^+$ in the Milky Way. *Nature*, 2002, 415: 54–57
- Sbordone L, Bonifacio P, Caffau E, et al. The metal-poor end of the Spite plateau. *Astron Astrophys*, 2010, 522: A26
- Steigman G. Primordial nucleosynthesis in the precision cosmology era. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2007, 57: 463–491
- Iocco F, Mangano G, Miele G, et al. Primordial nucleosynthesis: From precision cosmology to fundamental physics. *Phys Rep*, 2009, 472: 1–76
- Pospelov M, Pradler J. Big bang nucleosynthesis as a probe of new physics. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2010, 60: 539–568
- Cybur R H, Fields B D, Olive K A, et al. Big bang nucleosynthesis: Present status. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 015004
- Yan H L, Shi J R, Zhou Y T, et al. The nature of the lithium enrichment in the most Li-rich giant star. *Nat Astron*, 2018, 2: 790–795
- Kumar Y B, Reddy B E, Campbell S W, et al. Discovery of ubiquitous lithium production in low-mass stars. *Nat Astron*, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1139-7>
- Spite F, Spite M. Abundances of lithium in unevolved halo stars and old disk stars: Interpretation and consequences. *Astron Astrophys*, 1982, 115: 357–366
- Ryan S G, Beers T C, Olive K A, et al. Primordial lithium and big bang nucleosynthesis. *Astrophys J*, 2000, 530: L57–L60
- Monaco L, Bonifacio P, Sbordone L, et al. The lithium content of ω Centauri. *Astron Astrophys*, 2010, 519: L3

- 30 Fields B D, Olive K A, Vangioni-Flam E. Implications of a new temperature scale for halo dwarfs on LiBeB and chemical evolution. *Astrophys J*, 2005, 623: 1083–1091
- 31 Wallerstein G, Conti P S. Lithium and beryllium in stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1969, 7: 99–120
- 32 Spite M, Spite F. The composition of field halo stars and the chemical evolution of the halo. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1985, 23: 225–238
- 33 Gustafsson B. Chemical analyses of cool stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1989, 27: 701–756
- 34 Pinsonneault M. Mixing in stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1997, 35: 557–605
- 35 Bodenheimer P. Studies in stellar evolution. II. Lithium depletion during the pre-main contraction.. *Astrophys J*, 1965, 142: 451–461
- 36 Iben I Jr. Stellar evolution. VI. Evolution from the main sequence to the red-giant branch for stars of mass $1M_{\odot}$, $1.25M_{\odot}$, and $1.5M_{\odot}$. *Astrophys J*, 1967, 147: 624–648
- 37 Pinsonneault M H, Deliyannis C P, Demarque P. Evolutionary models of halo stars with rotation. II-Effects of metallicity on lithium depletion, and possible implications for the primordial lithium abundance. *Astrophys J Suppl Ser*, 1992, 78: 179–203
- 38 Talon S, Charbonnel C. Angular momentum transport by internal gravity waves. *Astron Astrophys*, 2004, 418: 1051–1060
- 39 Richard O, Michaud G, Richer J. Implications of WMAP observations on Li abundance and stellar evolution models. *Astrophys J*, 2005, 619: 538–548
- 40 Greenstein J L, Richardson R S. Lithium and the internal circulation of the sun. *Astrophys J*, 1951, 113: 536–545
- 41 Bonifacio P, Molaro P, Sivarani T, et al. First stars VII-Lithium in extremely metal poor dwarfs. *Astron Astrophys*, 2007, 462: 851–864
- 42 Aller L H, Chapman S. Diffusion in the sun. *Astrophys J*, 1960, 132: 461–472
- 43 Korn A J, Grundahl F, Richard O, et al. A probable stellar solution to the cosmological lithium discrepancy. *Nature*, 2006, 442: 657–659
- 44 González Hernández J I, Bonifacio P, Caffau E, et al. Lithium in the globular cluster NGC 6397. Evidence for dependence on evolutionary status. *Astron Astrophys*, 2009, 505: L13
- 45 Aguado D S, González Hernández J I, Prieto C A, et al. Back to the lithium plateau with the $[\text{Fe}/\text{H}] < -6$ star J0023+0307. *Astrophys J Lett*, 2019, 874: L21
- 46 Bonifacio P, Caffau E, Spite M, et al. TOPoS IV. Chemical abundances from high-resolution observations of seven extremely metal-poor stars. *Astron Astrophys*, 2018, 612: A65
- 47 González Hernández J I, Bonifacio P, Ludwig H G, et al. First stars XI. Chemical composition of the extremely metal-poor dwarfs in the binary CS 22876–032. *Astron Astrophys*, 2008, 480: 233–246
- 48 Aoki W, Ito H, Tajitsu A. Examination of the mass-dependent Li depletion hypothesis by the Li abundances of the very metal-poor double-lined spectroscopic binary G166-45. *Astrophys J*, 2012, 751: L6
- 49 Jedamzik K, Pospelov M. Big bang nucleosynthesis and particle dark matter. *New J Phys*, 2009, 11: 105028
- 50 Kusakabe M, Kim K S, Cheoun M K, et al. Revised big bang nucleosynthesis with long-lived, negatively charged massive particles: Updated recombination rates, primordial ${}^9\text{Be}$ nucleosynthesis, and impact of new ${}^6\text{Li}$ limits. *Astrophys J Suppl Ser*, 2014, 214: 5
- 51 Clarkson R, Regis M. The cosmic microwave background in an inhomogeneous universe. *J Cosmo Astrophys Phys*, 2011, (2): 013
- 52 Hou S Q, He J J, Parikh A, et al. Non-extensive statistics to the cosmological lithium problem. *Astrophys J*, 2017, 834: 165
- 53 Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *J Stat Phys*, 1988, 52: 479–487
- 54 Gell-Mann M, Tsallis C. Nonextensive Entropy: Interdisciplinary Applications. New York: Oxford University Press, 2004
- 55 Olive K A, Petitjean P, Vangioni E, et al. Higher D or Li: Probes of physics beyond the standard model. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 426: 1427–1435
- 56 Aver E, Olive K A, Skillman E D. A new approach to systematic uncertainties and self-consistency in helium abundance determinations. *J Cosmol Astropart Phys*, 2010, (5): 003
- 57 Zhu J, Zhu J, Li X, et al. Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP. *High Pow Laser Sci Eng*, 2018, 6: e55
- 58 Smith M S, Kawano L H, Malaney R A. Experimental, computational, and observational analysis of primordial nucleosynthesis. *Astrophys J Suppl Ser*, 1993, 85: 219–247
- 59 Coc A, Goriely S, Xu Y, et al. Standard big bang nucleosynthesis up to CNO with an improved extended nuclear network. *Astrophys J*, 2012, 744: 158
- 60 Boyd R N, Brune C R, Fuller G M, et al. New nuclear physics for big bang nucleosynthesis. *Phys Rev D*, 2010, 82: 105005
- 61 Cyburt R H, Pospelov M. Resonant enhancement of nuclear reactions as a possible solution to the cosmological lithium problem. 2009, arXiv: 0906.4373
- 62 Chakraborty N, Fields B D, Olive K A. Resonant destruction as a possible solution to the cosmological lithium problem. *Phys Rev D*, 2011, 83: 063006
- 63 Damone L, Barbagallo M, Mastromarco M, et al. ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ reaction and the cosmological lithium problem: Measurement of the cross section in a wide energy range at n_TOF at CERN. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 042701
- 64 Wagoner R V. Synthesis of the elements within objects exploding from very high temperatures. *Astrophys J Suppl Ser*, 1969, 18: 247–295
- 65 Hou S Q, He J J, Kubono S, et al. Revised thermonuclear rate of ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ relevant to big-bang nucleosynthesis. *Phys Rev C*, 2015, 91: 055802
- 66 Barbagallo M, Musumarra A, Cosentino L, et al. ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ reaction and the cosmological lithium problem: Measurement of the cross section in a

- wide energy range at n_TOF at CERN. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 152701
- 67 Kawabata T, Fujikawa Y, Furuno T, et al. Time-reversal measurement of the p-wave cross sections of the ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ reaction for the cosmological Li problem. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 052701
 - 68 Chen S Z, Xu S W, He J J, et al. A new experimental setup established for low-energy nuclear astrophysics studies. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2014, 735: 466–470
 - 69 He J J, Chen S Z, Rolfs C E, et al. A drop in the ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ reaction at low energies. *Phys Lett B*, 2013, 725: 287–291
 - 70 Li Z H, Li E T, Su J, et al. New determination of the ${}^7\text{Be}$ ground state spectroscopic factor and the ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ astrophysical $S(E)$ factors. *Chin Phys C*, 2018, 42: 065001
 - 71 Liu W P, Li Z H, He J J, et al. Progress of Jinping Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA). *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 642001
 - 72 Li Z H, Li E T, Su J, et al. Study of the primordial lithium abundance. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: s67–s72
 - 73 Liu W, Li Z, Bai X, et al. Current progress of nuclear astrophysics study and BRNBF at CIAE. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2003, 204: 62–70
 - 74 Li Z C, Cheng Y H, Yan C, et al. Beijing Q3D magnetic spectrometer and its applications. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 1993, 336: 150–161
 - 75 Li Z H, Liu W P, Bai X X, et al. First observation of neutron–proton halo structure for the 3.563 MeV 0^+ state in ${}^6\text{Li}$ via ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})_n$ reaction. *Phys Lett B*, 2002, 527: 50–54
 - 76 Zeng S, Liu W P, Li Z H, et al. Measurement of ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Be})_n$ reaction relevant to primordial nucleosynthesis. *Chin Phys Lett*, 2005, 22: 2219–2221
 - 77 Li Y J, Li Z H, Guo B, et al. Measurement of angular distribution for the ${}^8\text{Li}(p,d){}^7\text{Li}$ reaction. *Chin Phys Lett*, 2008, 25: 455–457
 - 78 Li E T, Li Z H, Su J, et al. Astrophysical rates for the ${}^6\text{He}(p,\gamma){}^7\text{Li}$ reaction. *Chin Phys Lett*, 2011, 28: 052102
 - 79 Su J, Li Z H, Guo B, et al. Neutron spectroscopic factors of ${}^7\text{Li}$ and astrophysical ${}^6\text{Li}(n,\gamma){}^7\text{Li}$ reaction rates. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 052101
 - 80 Li Z H, Liu W P, Bai X X, et al. The ${}^8\text{Li}(d,p){}^9\text{Li}$ reaction and the astrophysical ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ reaction rate. *Phys Rev C*, 2005, 71: 052801
 - 81 Li E T, Li Z H, Yan S Q, et al. Measurement of the ${}^2\text{H}({}^7\text{Be}, {}^6\text{Li}){}^3\text{He}$ reaction rate and its contribution to the primordial lithium abundance. *Chin Phys C*, 2018, 42: 044001
 - 82 Tilley D R, Kelley J H, Godwin J L, et al. Energy levels of light nuclei. *Nucl Phys A*, 2004, 745: 155–362
 - 83 Hoyle F. On nuclear reactions occurring in very hot STARS.I. The synthesis of elements from carbon to nickel. *Astrophys J Suppl Ser*, 1954, 1: 121–146
 - 84 Cook C W, Fowler W A, Lauritsen C C, et al. B^{12} , C^{12} , and the red giants. *Phys Rev*, 1957, 107: 508–515
 - 85 Hammache F, Coc A, de Séréville N, et al. Search for new resonant states in ${}^{10}\text{C}$ and ${}^{11}\text{C}$ and their impact on the cosmological lithium problem. *Phys Rev C*, 2013, 88: 062802
 - 86 Benenson W, Crawley G M, Dreisbach J D, et al. Excited states of ${}^{10}\text{C}$ from the ${}^{12}\text{C}(p,t){}^{10}\text{C}$ reaction at $E_p=43$ and 52 MeV. *Nucl Phys A*, 1967, 97: 510–514
 - 87 Yasue M, Yokomizo H, Kubono S, et al. ${}^{12}\text{C}(p,t){}^{10}\text{C}$ and ${}^{12}\text{C}(p,{}^3\text{He}){}^{10}\text{B}$ reactions at $E_p=51.9$ MeV. *J Phys Soc Jpn*, 1977, 42: 367–375
 - 88 Matic A, Berg A M, Harakeh M N, et al. High-precision (p,t) reaction measurement to determine ${}^{18}\text{Ne}(\alpha,p){}^{21}\text{Na}$ reaction rates. *Phys Rev C*, 2009, 80: 055804
 - 89 Neveling R, Fujita H, Smit F D, et al. High energy-resolution zero-degree facility for light-ion scattering and reactions at iThemba LABS. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2011, 654: 29–39
 - 90 Kavanagh R W. Protons from deuteron bombardment of Be^7 . *Nucl Phys*, 1960, 18: 492–501
 - 91 Angulo C, Casarejos E, Couder M, et al. The ${}^7\text{Be}(d,p)2\alpha$ cross section at big bang energies and the primordial ${}^7\text{Li}$ abundance. *Astrophys J*, 2005, 630: L105–L108
 - 92 Parker P D. Comments on the destruction of ${}^7\text{Be}$ in the solar interior. *Astrophys J*, 1972, 175: 261–264
 - 93 Caughlan G R, Fowler W A. Thermonuclear reaction rates V. *Atom Data Nucl Data Tables*, 1988, 40: 283–334
 - 94 Cyburt R H, Pospelov M. Resonant enhancement of nuclear reactions as a possible solution to the cosmological lithium problem. *Int J Mod Phys E*, 2012, 21: 1250004
 - 95 Dixit S, Bertozzi W, Buti T N, et al. Structure of ${}^9\text{Be}$ from proton scattering at 180 MeV. *Phys Rev C*, 1991, 43: 1758–1776
 - 96 Pugh B J. The (p,n) reaction on ${}^9\text{Be}$ and ${}^{17}\text{O}$ at 135 MeV. Doctor Dissertation. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1985
 - 97 Scholl C, Fujita Y, Adachi T, et al. High-resolution study of the ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},t){}^9\text{B}$ reaction up to the ${}^9\text{B}$ triton threshold. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014308
 - 98 Kirsebom O S, Davids B. One fewer solution to the cosmological lithium problem. *Phys Rev C*, 2011, 84: 058801
 - 99 Rijal N, Wiedenhöver I, Blackmon J, et al. Measurement of $d+{}^7\text{Be}$ cross sections for big-bang nucleosynthesis. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 182701

Summary for “宇宙大爆炸锂问题”

Cosmological lithium problem

Jianjun He^{1,2,3}¹ Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;² Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China;³ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, ChinaE-mail: hejianjun@bnu.edu.cn

Firstly proposed in 1946 by George Gamow, the hot big bang theory is now the most widely accepted cosmological model of the Universe, where the Universe expanded from a very high-density state dominated by radiation. The theory has been vindicated by the observation of the cosmic microwave background, our emerging knowledge of the large-scale structure of the Universe, and the rough consistency between calculations and observations of primordial abundances of the lightest elements in nature: Hydrogen, helium, and lithium. Primordial big-bang nucleosynthesis (BBN) began when the Universe was 3 minutes old and ended less than half an hour later when nuclear reactions were quenched by the low temperature (about 10^9 K, i.e., ~ 1 GK, or $kT \sim 100$ keV) and density conditions in the expanding Universe. Only the lightest nuclides (^2H , ^3He , ^4He , and ^7Li) were synthesized in appreciable quantities through BBN, and these relics provide us a unique window on the early Universe. Constrained by the baryon density determined by the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) and PLANCK satellites, the primordial abundances of ^2H (referred to as D hereafter) and ^4He inferred from observational data are in good general agreement with predictions; however, the standard BBN theory overestimates the primordial ^7Li abundance by about a factor of three to four. This significant deviation is the so-called “cosmological lithium problem.” Over about two decades, many attempts to resolve this discrepancy using conventional nuclear physics have been unsuccessful yet. The possible solutions to this unresolved problem have been suggested, which can be mainly categorized into three groups, according to which part of the preceding analysis is called into question: (1) Astrophysical solutions revise the measured primordial lithium abundance; (2) solutions beyond the standard model invoke new particle physics or nonstandard cosmological physics; (3) nuclear physics solutions alter the reaction flow into and out of mass-7.

This paper systematically reviews three major aspects of this long-pending cosmological lithium problem. It includes the scientific background, motivation, possible solutions and attempts made in the past. Here, we mainly focus on the nuclear physics solutions, which might solve this problem in an elegant way. In this review, the goals of different research directions are summarized and evaluated, and the promising direction is guided for future investigations.

nuclear astrophysics, big-bang nucleosynthesis (BBN), cosmological lithium problem, nuclear reaction

doi: [10.1360/TB-2020-0951](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0951)