

平均中子辐照量计算公式对钡星的应用*

张凤华^{1,2†} 张 璐³ 崔文元² 张 波²

(1 沧州师范学院物理与信息工程学院 沧州 061001)

(2 河北师范大学物理科学与信息工程学院 石家庄 050024)

(3 河北师范大学数学与信息科学学院 石家庄 050024)

摘要 最新的研究结果表明: 目前流行的 ^{13}C 壳层(^{13}C pocket)在热脉冲间隔期间辐射燃烧的低质量AGB (Asymptotic Giant Branch)星s-过程核合成模型, 其核合成区域的中子辐照量分布可视为指数形式, 平均中子辐照量 τ_0 和模型参量之间的关系为 $\tau_0 = -\Delta\tau / \ln[q/(1-r+q)]$, 式中 $\Delta\tau$ 为每次照射的中子辐照量, r 为重叠因子, q 为 ^{13}C 壳层占氦中间壳层的质量比例. 将该公式应用到26颗钡星样品星, 对其可靠性进行了检验, 在此基础上对26颗Ba星的中子辐照特点进行了分析. 研究表明: 公式是可靠的; 26颗Ba星中, 至少有8颗星的AGB伴星具有指数形式的中子辐照量分布, 有12颗星极有可能经历指数中子辐照, 有4颗星更倾向于经历单辐照; 26颗Ba星的AGB伴星中, 大多数在s-过程核素丰度达渐近分布前可能只经历很少次数的中子照射.

关键词 恒星: AGB和后AGB, 恒星: 中子, 钡星: 丰度

中图分类号: P144; **文献标识码**: A

1 引言

s-过程即慢中子俘获过程, 是为解释比铁族元素更重元素(原子序数 $A > 30$)的核合成而提出的一种物理机制^[1]. 它要求较低的中子数密度条件($N_n < 10^8 \text{ cm}^{-3}$), 使得任何不稳定的核都在俘获下一个中子前先进行衰变, s-过程路径沿 β 稳定谷.

s-过程核合成理论的研究主要有两种途径. 一是唯象的方法, 即所谓的经典s-过程模型. 该模型指出, 定义中子流 $N_n v_T$ (N_n 为中子数密度, v_T 为中子的热运动速率)对时间的积分 $\tau = \int N_n v_T dt$, τ 称为中子辐照量, 表示在整个照射时间内通过单位面积的中子数目, 并令 $\rho(\tau)d\tau$ 表示太阳系中子辐照量在 $\tau \sim \tau + d\tau$ 之间的铁种子核占被中子照射过的铁种子核的数目比例, $\rho(\tau)$ 称为中子辐照量分布(distribution of neutron exposures, 以下简称DNE), 则当 $\rho(\tau)$ 取指数形式

$$\rho_{\odot}(\tau) = f N_{\odot}^{56} / \tau_0 \exp(-\tau / \tau_0) \quad (1)$$

2017-06-01收到原稿

*国家自然科学基金项目(11673007、11643007), 河北省自然科学基金项目(A2014110008)资助

[†]zfh1968zfh@163.com

时, 所得结果可以拟合太阳系的s-过程元素丰度分布, 式中 $N_{\odot}^{56}$ 为太阳系中种子核 ^{56}Fe 的丰度, 因子 f 为被中子照射过的 ^{56}Fe 核的比例, 常数 τ_0 称为平均中子辐照量^[2-3]. 要详细地解释全部的太阳系s-过程元素丰度分布至少需要3个不同的DNE, 即弱分量(负责生产 $A < 88$ 的s-核素)、主要分量(生产 $88 \leq A \leq 208$ 的s-核素)和强分量(生产约50%的 ^{208}Pb)^[4]. 利用经典模型拟合的太阳系s-过程主要分量元素丰度分布得到的 $\tau_0 = (0.296 \pm 0.003)(kT/30)^{1/2} \text{ mbarn}^{-1}$ ^[5], 式中 kT 为以keV为单位的分子热运动能量, k 为玻耳兹曼常数. 经典s-过程模型可确定s-过程的平均物理条件, 如中子辐照量、中子数密度、温度以及s-过程时标等.

s-过程核合成理论研究的另一个有效途径是进行与热脉冲AGB阶段的恒星模型耦合的核合成数值计算. 1952年恒星光谱中不稳定核素的发现, 证实了s-过程主要发生在恒星氦燃烧阶段^[6]. 在这个阶段可以产生两个中子源: 一个是 ^{13}C 中子源, 通过反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 释放中子; 另一个是 ^{22}Ne 中子源, 通过 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 释放中子^[7].

20世纪70年代, Ulrich^[8]根据热脉冲AGB模型, 提出了一个部分重叠的对流热脉冲循环s-过程核合成机制, 并表明无论什么样的中子源, 该s-过程机制都可以在其核合成区域自然地产生一个指数形式的渐近DNE, 即氦中间壳层(氦燃烧壳层和氦燃烧壳层之间的区域)内经历中子辐照量 τ 的物质比例为

$$\rho_{\text{AGB}}(\tau) = C/\tau_0 \exp(-\tau/\tau_0), \quad (2)$$

式中 C 是比例系数, 平均中子辐照量 τ_0 与恒星模型特征参量间存在关系

$$\tau_0 = -\frac{\Delta\tau}{\ln r}, \quad (3)$$

其中 r 为连续经历两次热脉冲的物质占氦中间壳层的质量比例, 称为重叠因子, $\Delta\tau$ 为每次照射的中子辐照量. 上述结果为经典模型太阳系DNE指数形式的唯象选择提供了天体物理依据.

20世纪后20 yr的研究表明: $M \leq 3 M_{\odot}$ 的低质量AGB星是星系s-过程主要分量和强分量同位素的主要生产场所, 而 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 是主要中子源^[9-10]. 20世纪80年代初, Iben等^[11-12]提出了 ^{13}C 壳层对流燃烧的低质量AGB星s-过程核合成模型(^{13}C pocket convective burning model, 以下简称为CPCB模型). 该模型虽然包含了两个中子源, 但仍给出满足(3)式的指数DNE. 利用该模型, 人们首次在单颗AGB星内重现出太阳系的主要s-过程分量, 并表明太阳系的核素丰度是在长期的星系演化过程中不同质量、不同年龄的许多代恒星s-过程核合成的平均结果. 该模型在探究产生恒星观测丰度的物理条件方面取得很大进展. 由于经典模型完全不依赖于恒星模型, 通过(3)式, 经典模型能够为恒星模型的核合成数值计算提供指导和约束^[4,9].

直到20世纪90年代中期, Straniero等^[13-14]、Gallino等^[15](以下简称G98)指出: ^{13}C 壳层中的 ^{13}C 实际上是在热脉冲间隔阶段的辐射平衡状态下燃烧释放中子并引发s-过程核合成的, 由此建立的低质量AGB星s-过程模型(^{13}C pocket radiative burning model, 以下简称为CPRB模型)目前仍然流行^[16-19]. 多年来, 人们根据该模型进行了大量的s-过程核合成计算^[20-24], 由于 ^{13}C 壳层形成的具体物理机制还不清楚, 因此在核合成计算中, ^{13}C 壳层是根据观测约束人为地引入的. 计算结果表明: 对于给定的 ^{13}C 壳层, s-过程的

效率强烈依赖于金属丰度. 利用该模型可以在单颗AGB星中更加成功地拟合出太阳系主要s-过程分量, 并再次证实太阳系的核素丰度分布确实是星系演化的平均结果. 利用该模型, 采取不同的效率、金属丰度、初始质量和初始r-过程增丰, 可以对s-过程核素增丰的恒星观测丰度给予合理的解释. 通过这个模型, 人们还预言s-过程弱分量的产生场所可能是大质量星, 并预言了星系早期Pb星的存在(该预言已经被后来的观测证实). 至于DNE, G98却指出: 与Ulrich模型^[8]、CPCB模型不同, CPRB模型的DNE变得非常复杂, 很难再做解析表达. 在假设模型参量不随脉冲数变化的条件下, G98和Cristallo^[25]先后给出了实质上很相似的该模型DNE的表达式, 并得出结论: CPRB模型的DNE更接近于几个单辐照的迭加而不是指数分布, 恒星模型发展至此, 和经典模型不再一致, 经典模型似乎失去作用, 平均中子辐照量概念不再有意义. 该结论先后被许多文献引用^[5,9-10,25-26].

实际上如前所述, CPRB模型同经典模型以及CPCB模型一样都能很好地拟合出太阳系的分布, 而且Straniero等^[13]也曾经表明: 在一定条件下, CPRB模型可以给出与CPCB模型相同的s-过程元素丰度分布. 而原则上讲, 相似的s-过程分布应该对应相似的DNE. 也就是说, 尽管CPRB模型的DNE比较复杂, 但实质上不应偏离指数形式太远. 基于以上认识, 近年来, 我们对CPRB模型的DNE进行了比较系统和深入的研究^[27-33]. 结果表明: CPRB模型的DNE虽然不再是严格的指数分布, 但在中子辐照量的有效值范围内^[34]仍可视作指数分布. 若同G98以及Cristallo^[25]一样不考虑模型参量随脉冲数的变化, 则该模型平均中子辐照量的解析表达式为^[32-33]

$$\tau_0 = -\frac{\Delta\tau}{\ln[q/(1-r+q)]}, \quad (4)$$

q 为 ^{13}C 壳层占氦中间壳层的质量比例. 显然, (4)式再一次将经典模型和CPRB恒星模型联系起来, 表明了两种模型的一致性. 利用此式, 可以有效探讨恒星中子俘获元素观测丰度产生的物理条件. 然而, 在将(4)式进行广泛的应用之前, 对其可靠性进行充分的检验是非常必要的. 本文将该式应用到Allen等^[35] (以下简称为A06)分析的26颗Ba星中, 通过将计算结果和其他指数模型计算结果进行对比来检验公式, 并根据计算结果分析这批星的DNE特点.

2 不同s-过程模型对26颗Ba星观测丰度的拟合结果

钡星是大气中含有过量的钡和其他重元素的巨星或矮星(主序星)^[36]. 因Ba星还未演化到AGB阶段, 因此它们自身并不能合成重元素. 一般认为它们属于双星系统, 其初始质量较大的伴星已经经历了AGB阶段(现已演化为白矮星), 质量较小的星也就因此而吸积了其伴星抛出的富含重元素的物质成为Ba星. 研究Ba星表面重元素丰度分布, 对理解AGB星重元素核合成具有重要的意义. 如前所述, (4)式是对CPRB模型的DNE进行指数拟合得到的. 为验证该式, 需要分别来自指数DNE的s-过程核合成模型和CPRB模型对恒星观测丰度的拟合结果. 为了保证检验结果的可信度, 采用文献中发表的拟合数据. 综合考虑以上因素, 我们选择A06分析的26颗Ba星作为样本星, 如表1第1列所示. 第2列给出了各恒星的金属丰度. 这26颗星中有一半是Ba矮星, 一半是Ba亚巨星或巨星, 初始质量小于 $2 M_{\odot}$. 除1颗星的金属丰度较低($[\text{Fe}/\text{H}] = -1.19$), 其余25颗星介

于 $-0.63 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.04$ 范围. 在这些星的高分辨率光谱中观测到许多重元素, 包括第1峰元素Sr、Y、Zr, 第2峰元素Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm, 并且首次探测到了第3峰元素Pb.

A06对26颗Ba星的中子俘获元素观测丰度进行了DNE拟合, 考察了各Ba星AGB伴星内s-过程的中子辐照情况. A06将每颗星的中子俘获元素观测丰度与Malaney^[37–38] AGB星单辐照模型和指数辐照模型的核合成理论计算丰度进行拟合, 得到最佳的平均中子辐照量 τ_0^f (30 keV)的值, 如表1第3列所示(其中标注“ 10^{12} ”的表示对应的中子数密度为 10^{12} cm^{-3} , 其余未标注的对应的中子数密度为 10^8 cm^{-3}). A06得出一个重要结果: 26颗Ba星中有19颗对应指数中子辐照, 仅有7颗对应单辐照(表中以“sing”标出). 这为(4)式的合理性提供了有力证据. A06还利用经典模型无分叉s-过程方程组指数辐照解析解^[3]对恒星观测丰度的s-过程主要分量进行了 $\sigma_A N_A$ - A 曲线拟合(σ_A 、 N_A 分别为原子序数为 A 的核素的中子捕获截面和s-过程元素丰度), 得到平均中子辐照量 $\tau_0(\sigma N)$ 的值, 如表1第4列所示. 最近, Cui等^[39]利用参数化CPCB模型对这26颗Ba星的观测丰度进行了拟合, 所得重叠因子 r^c 、每次照射的中子辐照量 $\Delta\tau^c$ ($T_9 = 0.1$, T_9 为以 10^9 K 为单位的温度值)的值分别如表1第5、6列所示, 根据(2)式得到的平均中子辐照量 τ_0^c (已经根据公式 $\tau_0 \propto \sqrt{T_9}$ 转化成了 $T_9 = 0.348$, 即 $kT = 30 \text{ keV}$ 时的值)如表1第7列所示.

Husti等^[23](以下简称H09)利用CPRB模型对26颗Ba星的观测丰度进行了拟合, 给出了最佳拟合方案, 所得 ^{13}C 壳层效率参数的值如表1第8列所示. 值得指出的是: H09对每颗星都分别采用初始质量为 $1.5 M_\odot$ 、 $2 M_\odot$ 和 $3 M_\odot$ 的模型来寻找最佳拟合方案, 但除HD 76225之外, 所采取的 ^{13}C 壳层并不随模型的初始质量发生改变.

3 计算方法和结果

为了检验(4)式, 需要根据H09对Ba星观测丰度的拟合结果确定出以下恒星模型参数的值, 即 ^{13}C 壳层占对流氦壳层的质量比例 q 、重叠因子 r 以及每次照射的中子辐照量 $\Delta\tau$, 然后将其代入(4)式求解 τ_0 . 根据文献G98, 取 $q = 0.05$. 下面主要讨论如何确定参数 r 和 $\Delta\tau$ 的值.

3.1 $\Delta\tau$ 值的确定

在AGB星模型中, 每次照射的中子辐照量 $\Delta\tau$ 是一个基础参数. G98的计算结果表明, 在分子热运动能量 $kT = 8 \text{ keV}$ 时, 对于 $3 M_\odot$ 、太阳金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ 的AGB星模型, 1个标准的 ^{13}C 壳层(ST) 1次照射产生的中子辐照量平均值为 0.2 mbarn^{-1} ^[5,15]. 由于 $\Delta\tau \propto (kT)^{1/2}$, 因而 $kT = 30 \text{ keV}$ 时, 1个标准的 ^{13}C 壳层1次照射产生的中子辐照量为 0.387 mbarn^{-1} . 再假定每次照射的中子辐照量随金属丰度的变化规律为 $\Delta\tau \propto 1/Z^{0.7}$ ^[40], 由此可以得到 $k \times \text{ST}$ 情形的 ^{13}C 壳层在任意金属丰度时1次照射产生的中子辐照量为

$$\Delta\tau^r = 0.387 \times k \times \left(\frac{1}{10^{[\text{Fe}/\text{H}]}} \right)^{0.7}, \quad (5)$$

式中上标 r 表示辐射核合成模型. 据(5)式确定的26颗Ba星 $\Delta\tau^r$ 的值如表1第9列所示.

表 1 来自文献的拟合参数及根据(4)式的计算结果
Table 1 The fitted nucleosynthesis parameters from the published literature and the calculated results according to Eq. (4)

star	[Fe/H]	results ^[35]		results ^[39]			results ^[23]	results from this paper					
		τ_0^f	$\tau_0(\sigma N)$	r^c	$\Delta\tau^c$	τ_0^c		$\Delta\tau^r$	r^r	pulse	M	τ_{0cal}^r	τ_{0cal}^r/τ_0^c
HD 749	-0.06	0.8	0.41	0.18	0.32	0.37	ST $\times$ 1.3	0.29	0.63	ini	3 $M_\odot$	0.26	0.71
HR 107	-0.36	0.1 (sing)	0.43	0.10	0.42	0.29	ST $\times$ 1.3	0.46	0.40	fin	3 $M_\odot$	0.35	1.20
HD 5424	-0.55	1.1 (sing)	1.05	0.09	0.52	0.43	ST	0.49	0.57	ini	3 $M_\odot$	0.42	0.98
HD 8270	-0.42	0.2	0.27	0.26	0.16	0.23	ST/2	0.20	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.21	0.94
HD 12392	-0.12	0.8	0.40	0.1	0.52	0.43	ST $\times$ 2	0.49	0.62	ini	3 $M_\odot$	0.44	1.03
HD 13551	-0.44	0.2	0.22	0.25	0.16	0.23	ST/2	0.20	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.22	0.94
HD 22589	-0.27	0.2	0.19	0.1	0.42	0.35	ST/2	0.15	0.70	ini	2 $M_\odot$	0.15	0.43
HD 27271	-0.09	0.05 (10^{12})	0.27	0.25	0.16	0.23	ST $\times$ 3	0.30	0.63	ini	3 $M_\odot$	0.27	1.19
HD 48565	-0.62	0.4	0.66	0.27	0.33	0.48	ST	0.54	0.54	fin	1.5 $M_\odot$	0.45	0.94
HD 76225	-0.31	0.2	0.25	0.12	0.24	0.21	ST-ST/1.5	0.22	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.24	1.13
HD 87080	-0.44	0.6	0.71	0.33	0.3	0.52	ST	0.41	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.44	0.85
HD 89948	-0.30	0.2	0.24	0.10	0.26	0.21	ST/1.5	0.22	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.24	1.13
HD 92545	-0.12	0.3 (10^{12})	0.29	0.1	0.44	0.27	ST $\times$ 2	0.49	0.42	fin	3 $M_\odot$	0.37	1.39
HD 106191	-0.29	0.05 (10^{12})	0.38	0.1	0.38	0.27	ST/1.5	0.21	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.23	0.84
HD 107574	-0.55	0.9 (sing)	0.30	0.02	0.48	0.23	ST	0.49	0.47	fin	3 $M_\odot$	0.39	1.68
HD 116869	-0.32	1.1 (sing)	0.55	0.32	0.3	0.50	ST $\times$ 2	0.67	0.55	fin	1.5 $M_\odot$	0.56	1.13
HD 123396	-1.19	1.1 (sing)	0.54	0.16	0.56	0.60	ST/4.5	0.30	0.71	ini	1.5 $M_\odot$	0.30	0.50
HD 123585	-0.48	0.4	0.46	0.28	0.26	0.39	ST	0.43	0.74	ini	1.5 $M_\odot$	0.46	1.17
HD 147609	-0.45	0.2	0.29	0.13	0.28	0.27	ST/2	0.21	0.70	ini	2 $M_\odot$	0.21	0.77
HD 150862	-0.10	0.9 (sing)	0.27	0.1	0.41	0.23	ST $\times$ 1.3	0.31	0.56	fin	1.5 $M_\odot$	0.26	1.14
HD 188985	-0.30	0.40	0.40	0.17	0.30	0.33	ST	0.32	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.35	1.05
HD 210709	-0.04	1.1 (sing)	0.31	0.19	0.32	0.37	ST $\times$ 2	0.43	0.56	fin	1.5 $M_\odot$	0.36	0.99
HD 210910	-0.37	0.3 (10^{12})	0.44	0.17	0.26	0.29	ST/1.5	0.24	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.26	0.89
HD 222349	-0.63	0.4	0.38	0.25	0.31	0.43	ST	0.55	0.54	fin	1.5 $M_\odot$	0.46	1.07
BD+185215	-0.53	0.05 (10^{12})	0.27	0.1	0.3	0.19	ST/2	0.23	0.54	fin	1.5 $M_\odot$	0.20	1.01
HD 223938	-0.35	0.5	0.384	0.25	0.3	0.43	ST	0.35	0.75	ini	1.5 $M_\odot$	0.38	0.88

3.2 r 值的确定

在AGB星模型中, 重叠因子 r 也是一个基础参数. Iben^[41]曾经给出了一个重叠因子与核心质量关系的经验公式如下:

$$r = 0.43 - 0.795(M_C - 0.96) + 0.346(M_C - 0.96)^2. \quad (6)$$

其适用范围为 $0.6 \leq M_C/M_\odot \leq 1.36$. Zijlstra^[42]总结了贫金属环境下AGB星的星风物质

损失情况, 并根据核心质量与光度关系公式给出了中等质量星不同金属丰度下的初终质量关系. Cui等^[43]通过拟合Zijlstra^[42]的结果, 得到一个初终质量关系随金属丰度变化的公式

$$M_C = A(Z) + B(Z)M, \quad (7)$$

式中

$$A(Z) = 0.46449 + 0.03279 \lg \frac{Z}{Z_\odot} + 0.00044 \left(\lg \frac{Z}{Z_\odot} \right)^2, \quad (8)$$

$$B(Z) = 0.08729 - 0.04851 \lg \frac{Z}{Z_\odot} + 0.00468 \left(\lg \frac{Z}{Z_\odot} \right)^2, \quad (9)$$

该函数的适用范围是 $-4 \leq \lg \frac{Z}{Z_\odot} \leq 0$. 联合(6)–(9)式, 就可以得到中等质量星重叠因子 r 与恒星的初始质量 M 和金属丰度 Z 的关系.

至于低质量星, 我们在文献中还没有发现类似的函数关系. 图1曲线1是根据上述函数关系给出的 $3 M_\odot$ 模型的 $r - [\text{Fe}/\text{H}]$ 关系曲线. Cristallo等^[44]给出了初始质量在 $1.5 \leq M/M_\odot \leq 3$ 范围、金属丰度在 $1 \times 10^{-3} \leq Z \leq 2 \times 10^{-2}$ 范围内的详尽的热脉冲低质量AGB星演化模型. 我们据此描绘出了 $3 M_\odot$ 质量模型最后一个带挖掘脉冲对应的重叠因子以及最初几个(第3或第4个)带挖掘脉冲对应的重叠因子随金属丰度变化的曲线, 分别如图1曲线2和3所示. 可以看出, 3线近似平行, 且重叠因子随脉冲数增加而减小. 进一步的分析表明, 初始质量为 $1.5 M_\odot$ 、 $2 M_\odot$ 的低质量AGB星模型具有同样特点.

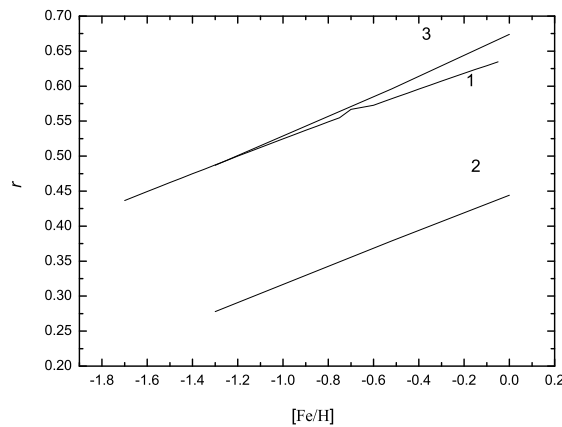


图 1 重叠因子 r 随金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的变化

Fig. 1 Overlap factor r versus $[\text{Fe}/\text{H}]$

由此可见, 假设根据(6)–(9)式求得的重叠因子值为 $r(M)$, 则对于质量为 M 的低质量AGB星模型, 其在某个脉冲时的重叠因子值可以通过将 $r(M)$ 减去1个合适的值 c 即 $r(M) - c$ 得到.

如前所述, (4)式是假设模型参量不随脉冲数变化的条件下得到的. 利用该公式进行计算和讨论时, 我们仿照G98, 取重叠因子为渐近值. 参数化CPCB模型对恒星观测丰度的拟合结果表明^[39,45]: 所得 r 值有时很小, 例如, $r \leq 0.1$, 此时s-过程元素丰度分布在

经历1次或很少的几次照射就能达渐近分布. 因此, 我们在确定H09拟合模型的重叠因子 r^r 的值时, 一是假定 r^r 为模型最终脉冲(记作“fin”)的值, 近似取 $r^r = r(M) - 0.2$, 二是假定模型经历几个脉冲(记作“ini”)即达渐近分布, 近似取 $r^r = r(M)$.

将以上两种 r^r 值和模型参量 q 、 $\Delta\tau^r$ 的值代入(4)式, 计算出平均中子辐照量 τ_{0cal}^r 的值, 并将最接近文献[39]的值作为最终的 τ_{0cal}^r 值, 如表1第13列所示. 并由此确定出 r^r 和 M 的最佳取值, 如表1第10列和第12列所示. 第11列标出了 r^r 所属的脉冲次数属性.

4 讨论

为了检验(4)式的可靠性, 我们将据(4)式得到的CPRB模型的平均中子辐照量 τ_{0cal}^r 值, 与不同指数DNE的s-过程模型给出的平均中子辐照 τ_0^f 、 $\tau_0(\sigma N)$ 和 τ_0^c 比较. 考虑到只有文献[39]和H09是对Pb元素丰度在内的整个中子俘获元素观测丰度分布进行拟合, 因此, 我们主要将 τ_{0cal}^r 与 τ_0^c 进行比较. 表1第14列给出了26颗Ba星的 τ_{0cal}^r/τ_0^c 值, 图2示意出了各Ba星 τ_{0cal}^r 对 τ_0^c 的符合程度(空心方块), 图2直线代表 $\tau_{0cal}^r = \tau_0^c$ 的数值点.

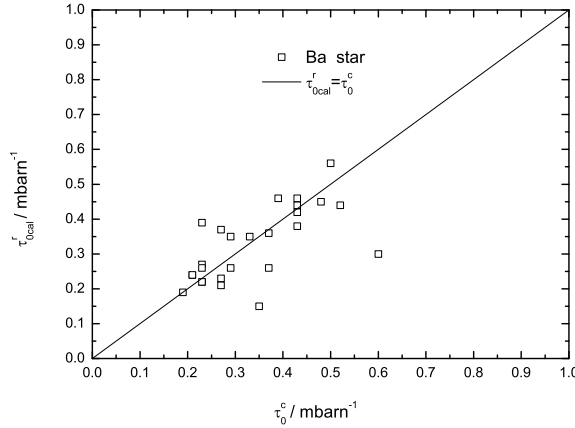


图2 τ_{0cal}^r 值与 τ_0^c 值的对比

Fig. 2 Comparison of the values of τ_{0cal}^r with those of τ_0^c

在对 τ_{0cal}^r 与 τ_0^c 的比较结果进行讨论之前, 有必要对本文计算结果的不确定性因素进行简要分析.

首先, 恒星模型金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的值会给计算结果带来不确定性. 从(5)式可以看出, τ_{0cal}^r 值对AGB恒星模型金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的取值很敏感. H09并没有给出所有Ba星拟合模型的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值, 我们计算时采用的是A06给出的Ba星的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值. 实际上, H09拟合模型的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值, 通常是略大于或小于Ba星的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值, 这会使得我们计算的 τ_{0cal}^r 值与实际模型的值略有不同. 例如样品星HD 123585的 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.48$, 而H09所采用AGB星模型的 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.52$, 按两种金属丰度计算所得的 τ_{0cal}^r 值分别为 0.46 mbarn^{-1} 和 0.51 mbarn^{-1} .

其次, 重叠因子 r 的取值方法会给计算结果带来影响. 如前所述, (4)式是假设模型参量不随脉冲数变化的条件下得到的, 这和文献[39]参数化方法一致. 利用该公式进行计算和讨论时, 我们仿照G98, 取CPRN模型的重叠因子 r^r 为渐近值. 但从3.2节可以看出,

r^r 的取值方法并不能严格满足上述要求.

另外, 不同模型对恒星观测丰度的拟合方法不同也会给拟合结果带来差异. 如文献[39]的参数化方法是对所有中子俘获元素的观测丰度进行拟合, 而文献H09则是专注于对观测的s-过程效率指标[ls/Fe]、[hs/Fe]、[hs/ls]及[Pb/Fe]的拟合效果, 且对不同指标的最佳拟合结果也不同. 例如, HD 5424与HD 107574, 二者[ls/Fe]、[Pb/Fe]相近, 但[hs/Fe]相差近1倍, 而H09给出的“case”相同, 应理解为主要拟合的是[ls/Fe]和[Pb/Fe].

考虑到以上及其他不确定性因素, 满足 $0.75 \leq \tau_{0\text{cal}}^r/\tau_0^c \leq 1.33$ 即可以认为 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 与 τ_0^c 相符是合理的. $\tau_{0\text{cal}}^r$ 值与 τ_0^f 、 $\tau_0(\sigma N)$ 值的比较采取同样标准.

表1的计算结果表明: 26颗Ba星中有21颗的 $0.75 \leq \tau_{0\text{cal}}^r/\tau_0^c \leq 1.33$, 即 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 与 τ_0^c 符合较好. 有5颗星的 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 与 τ_0^c 值偏离较大, 但其中HD 22589、HD 92545的 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 都分别与相应的 τ_0^f 和 $\tau_0(\sigma N)$ 值接近, 另外3颗则是比较特殊的星. 一是HD 107574, A06预测其对应单辐照, 文献[39]预测的重叠因子极小, $r^c = 0.02$, 也表明是单辐照; 二是HD 123396, A06也预测其对应单辐照, 且HD 123396的 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.19$, 是26颗Ba星中金属丰度最低的, 此时中子数密度(因而中子辐照量)随金属丰度的变化规律可能与较高金属丰度情况有显著不同^[40]. 三是HD 749, 其 $[\text{Pb}/\text{hs}] = 0.79^{[23]}$, 是26颗Ba星中的最小值. 虽然HD 749被估计的质量只有 $1.2 M_\odot$, 文献H09却表明只能使用 $3 M_\odot$ 的AGB模型进行观测丰度的拟合. 以上结果充分表明了(4)式的可靠性.

进一步综合分析表1各种模型的计算结果, 可以增加我们对各Ba星AGB伴星s-过程核合成物理条件的理解.

表1第10列表明: CPRB模型的重叠因子范围为 $0.4 \leq r^r \leq 0.75$, 且有17颗星的 r^r 值与AGB模型初始的几个脉冲相对应, 这和文献[39]参数化CPCB模型拟合的普遍较小 r^c 值, 即 $0.02 \leq r^r \leq 0.33$ 一致, 表明很多AGB伴星只经历较少次数的中子照射就达到渐近分布, 这与CPRB模型很小的核合成区域值 $q = 0.05$ 一致.

从表1还可以看出, 4种模型对HD 8270、HD 13551、HD 76225、HD 89948、HD 123585、HD 147609、HD 188985和HD 222349这8颗Ba星拟合的平均中子辐照量 τ_0^f 、 $\tau_0(\sigma N)$ 、 τ_0^c 和 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 的值是彼此一致的, 由此可以推断, 这8颗星的AGB伴星具有指数DNE. 另外, HD 12392、HD 27271、HD 116869、HD 150862、HD 210709、BD+185215和HD 223938这7颗Ba星的3种平均中子辐照量 $\tau_0(\sigma N)$ 、 τ_0^c 和 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 的值基本一致, HD 48565、HD 87080和HD 210910这3颗星的 τ_0^f 、 τ_0^c 和 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 值基本一致, HD 22589和HD 92545的 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 都分别与相应的 τ_0^f 、 $\tau_0(\sigma N)$ 的值比较接近, 因此可以推断这12颗Ba星的AGB伴星也极有可能具有指数形式的DNE.

HR 107、HD 5424、HD 107574和HD 123396这4颗星, 一方面, A06给出其AGB伴星经历中子单辐照, 与此一致, 文献[39]给出拟合模型的 r^c 都很小, 分别为0.1、0.09、0.02和0.16; 另一方面, 对每颗星拟合的 $\tau_0(\sigma N)$ 、 τ_0^c 和 $\tau_{0\text{cal}}^r$ 值比较分散, 因此可以推断这4颗星的AGB伴星可能经历的是单次中子照射.

对于HD 749和HD 106191, 4种方法拟合的平均中子辐照量值比较分散, 如前所述, HD 749是一颗比较特殊的星, 而关于HD 106191的特点还需要做进一步的考察.

5 结论

利用文献中不同s-过程核合成模型对A06的26颗Ba星观测丰度的拟合结果, 对CPRB模型平均中子辐照量公式(4)式进行了检验, 在此基础上, 综合不同s-过程模型对26颗Ba星观测丰度的拟合结果, 对各Ba星伴星s-过程核合成物理条件进行了探讨. 所得结论总结如下:

(1)研究表明(4)式是可靠的, 也就是说, CPRB模型仍具有指数形式的DNE.

(2)利用(4)式, 将CPRB模型、CPCB模型和经典模型对恒星中子俘获元素观测丰度拟合的平均中子辐照量结果进行对比, 可以有效判别AGB星s-过程核合成区域DNE的特点, 还可以有效筛选偏离族群样本星共性的特殊星.

(3)在A06分析的26颗Ba星中, 至少有8颗星的AGB伴星具有指数形式的DNE, 有12颗星极有可能具有指数DNE, 有4颗星更倾向于经历单辐照, 且26颗Ba星的AGB伴星中大多数在s-过程核素丰度达渐近分布前可能只经历较少次数的中子照射.

本文研究结果为进一步探究26颗Ba星s-过程观测丰度产生的物理条件提供了有益的参考. 考虑到壳层的不确定性, (4)式对CPRB模型核合成计算的约束作用值得做进一步的探讨.

参考文献

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *RvMP*, 1957, 29: 547
- [2] Seeger P A, Fowler W A, Clayton D D. *ApJS*, 1965, 11: 121
- [3] Clayton D D, Ward R A. *ApJ*, 1974, 193: 397
- [4] Käppeler F, Beer H, Wisshak K. *RPPh*, 1989, 52: 945
- [5] Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K, et al. *ApJ*, 1999, 525: 886
- [6] Merrill P W. *ApJ*, 1952, 116: 21
- [7] Cameron A G W. *PhR*, 1954, 93: 932
- [8] Ulrich R K. *The s-process in Stars*//Schramm D N, Arnett W D. *Explosive Nucleosynthesis*. Austin: University of Texas Press, 1973: 139-167
- [9] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. *ARA&A*, 1999, 37: 239
- [10] Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. *RvMP*, 2011, 83: 157
- [11] Iben I Jr, Renzini A. *ApJ*, 1982, 259: L79
- [12] Iben I Jr, Renzini A. *ApJ*, 1982, 263: L23
- [13] Straniero O, Gallino R, Busso M, et al. *ApJ*, 1995, 440: L85
- [14] Straniero O, Chieffi A, Limongi M, et al. *ApJ*, 1997, 478: 332
- [15] Gallino R, Arlandini C, Busso M, et al. *ApJ*, 1998, 497: 388
- [16] Cristallo S, Karinkuzhi D, Goswami A, et al. *ApJ*, 2016, 833: 181
- [17] Trippella O, Busso M, Palmerini S, et al. *ApJ*, 2016, 818: 125
- [18] Bisterzo S, Travaglio C, Gallino R, et al. *ApJ*, 2014, 787: 10
- [19] Bisterzo S, Travaglio C, Wiescher M, et al. *ApJ*, 2017, 835: 97
- [20] Travaglio C, Galli D, Gallino R, et al. *ApJ*, 1999, 521: 691
- [21] Busso M, Gallino R, Lambert D L, et al. *ApJ*, 2001, 557: 802
- [22] Straniero O, Gallino R, Cristallo S. *NuPhA*, 2006, 777: 311
- [23] Husti L, Gallino R, Bisterzo S, et al. *PASA*, 2009, 26: 176
- [24] Bisterzo S, Gallino R, Straniero O. *MNRAS*, 2011, 418: 284
- [25] Cristallo S. *PASP*, 2006, 118: 1360
- [26] Straniero O, Cristallo S, Gallino R. *PASA*, 2009, 26: 133

- [27] Cui W Y, Zhang F H, Zhang W J, et al. ChJAA, 2007, 7: 224
- [28] 张风华, 周贵德, 张波. 天文学报, 2008, 49: 133
- [29] Zhang F H, Zhou G D, Zhang B. ChA&A, 2008, 32: 369
- [30] 张风华, 周贵德, 崔文元, 等. 天文学报, 2013, 54: 9
- [31] Zhang F H, Zhou G D, Cui W Y, et al. ChA&A, 2013, 37: 405
- [32] 张风华, 周贵德, 马坤, 等. 天文学报, 2015, 56: 564
- [33] Zhang F H, Zhou G D, Ma K, et al. ChA&A, 2016, 40: 322
- [34] Goriely S. A&A, 1997, 327: 845
- [35] Allen D M, Barbuy B. A&A, 2006, 454: 917
- [36] Bidelman W P, Keenan P C. ApJ, 1951, 114: 473
- [37] Malaney R A. ApJ, 1987, 321: 832
- [38] Malaney R A. Ap&SS, 1987, 137: 251
- [39] Cui W Y, Shi J R, Geng Y Y, et al. Ap&SS, 2013, 346: 477
- [40] Gallino R, Busso M, Lugaro M, et al. The Nature of the s-process by AGB Stars at Various Metallicities//Prantzos N, Harissopulos S. Nuclei in the Cosmos V. Paris: Edition Frontières, 1999: 216-222
- [41] Iben I Jr. ApJ, 1977, 217: 788
- [42] Zijlstra A A. MNRAS, 2004, 348: L23
- [43] Cui W Y, Zhang B. MNRAS, 2006, 368: 305
- [44] Cristallo S, Piersanti L, Straniero O, et al. ApJS, 2011, 197: 17
- [45] Aoki W, Ryan S G, Norris J E, et al. ApJ, 2001, 561: 346

Applicaton of the Calculating Formula for Mean Neutron Exposure on Barium stars

ZHANG Feng-hua^{1,2} ZHANG Lu³ CUI Wen-yuan² ZHANG Bo²

(1 Department of Physics and Information Engineering, Cangzhou Normal College, Cangzhou 061001)

(2 College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University,
Shijiazhuang 050024)

(3 College of Mathematics and Information Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

ABSTRACT Latest studies have shown that, in the s-process nucleosynthesis model for the low-mass asymptotic giant branch (AGB) star with ^{13}C pocket radiative burning during the interpulse period, the distribution of neutron exposures in the nucleosynthesis region can be regarded as an exponential function, and the relation between the mean neutron exposure τ_0 and the model parameters is $\tau_0 = -\Delta\tau / \ln[q/(1-r+q)]$, in which $\Delta\tau$ is the exposure value of each neutron irradiation, r is the overlap factor, and q is the mass ratio of the ^{13}C shell to the He intershell. In this paper the formula is applied to 26 samples of barium stars to test its reliability, and furthermore the neutron exposure nature in the AGB companion stars of 26 barium stars are analyzed. The results show that, the formula is reliable; in the AGB companion stars of 26 barium stars, at least 8 stars definitely have and 12 stars are highly likely to have exponential distribution of neutron exposures, while 4 stars tend to experience single neutron exposure; most of the AGB companion stars may have experienced fewer times of neutron irradiations before the element abundance distribution of the s-process comes to asymptotic condition.

Key words stars: AGB and post-AGB, stars: neutron, barium star: abundance