

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.05

基于 Th/U 核纪年法的 r 过程增丰贫金属星 年龄研究

隆 寅¹, 陈梦华²

(1. 河池学院 数理学院, 河池 546300; 2. 北京大学 科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871)

摘要: 贫金属星是形成于宇宙早期的恒星, 其保留了早期元素合成留下的化学特征, 为研究重元素合成机制以及早期宇宙的化学演化提供了关键线索。基于 Th/U 核纪年法, 分析了目前已发现的 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄, 这些贫金属星为: CS31082-001、BD+17°3248、HE1523-0901、CS29497-004、J2038-0023、J0954+5246、J2003-1142 和 J2213-5137。研究结果表明, 这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄范围为 7.4 ~ 16.9 Ga, 平均年龄为 13.2 Ga。这些贫金属星的年龄在其误差范围内均未明显超出宇宙微波背景辐射推断的宇宙年龄 (13.8 Ga), 为宇宙大爆炸理论提供了独立的证据支持。Th/U 核纪年法在估算贫金属星的年龄时, 主要的误差来源于 Th 和 U 元素的初始丰度及观测丰度的不确定性。

关键词: Th/U 核纪年法; 贫金属星; r 过程

中图分类号: P152 **文献标识码:** A

1 引言

根据元素核合成理论, 重元素主要通过两种过程合成: 快中子俘获过程 (rapid neutron-capture process, 简称 r 过程) 和慢中子俘获过程 (slow neutron-capture process, 简称 s 过程)。其中, r 过程被认为是合成重元素的主要途径, 能够合成宇宙中超过一半的重元素, 包括所有的钍 (Th) 和铀 (U) 元素^[1,2]。在 r 过程中, 原子核通过快速俘获多个中子, 形成丰中子核素; 这些丰中子核素通常是不稳定的, 会发生 β 衰变, 导致原子序数增加, 从而生成更重的元素; 随后, 这些新产生的元素能够继续俘获中子, 进一步合成更重的重元素。r 过程不仅能够解释太阳系中 r 过程重元素的丰度特征, 还与贫金属星的重元素丰度观测结果相符^[2]。

收稿日期: 2024-09-16; 修回日期: 2024-10-10

资助项目: 国家自然科学基金 (12347172, 12403043); 中国博士后科学基金 (GZB20230029, 2024M750057)

通讯作者: 陈梦华, physcmh@pku.edu.cn

Fowler 因其在重元素合成理论方面的杰出贡献, 于 1983 年获得诺贝尔物理学奖。

r 过程的反应条件十分特殊, 需在高温、高密及高中子丰度的环境中进行。大量模拟研究表明, 满足 r 过程核反应条件的天体环境主要有两种: (1) 核坍缩型超新星爆发; (2) 双中子星并合或中子星与黑洞的并合。科学家通过进一步研究发现, 在核坍缩型超新星爆发过程中, 由于中子丰度较低, 仅能合成部分相对较轻的 r 过程元素^[3]。而在双中子星并合过程中, 部分物质因潮汐离心、碰撞挤压和吸积反馈等作用被抛射出来; 这些抛射物中富含大量的自由中子, 能够通过 r 过程合成大量的重元素^[4]。因此, 双中子星并合被认为是 r 过程发生的理想场所^[5]。2017 年 8 月 17 日, 美国激光干涉引力波天文台 (LIGO) 首次探测到中子星并合事件的引力波信号 (GW170817)^[6]。随后, 科学家对这一事件进行了多波段、多信使的跟踪观测, 发现了与之成协的伽马射线暴 (GRB170817A) 和千新星辐射 (AT2017gfo)^[7]。科学家通过分析千新星辐射的光变曲线和能谱特征, 推断这次事件合成了大约 $0.05M_{\odot}$ 的重元素^[8]。此外, 他们在光谱中首次发现重元素锶的直接存在证据^[9]。北京大学研究团队通过分析中子星并合事件的发生率以及每次事件中重元素的产额, 发现这些事件不仅能够再现太阳系中 r 过程元素的观测特征, 还能够很好地解释银河系中重元素总量的观测结果^[10]。此结果表明, 中子星并合事件是 r 过程的主要发生场所, 也是宇宙中重元素的重要来源。

重元素在中子星并合事件中合成后被抛射到星际介质中, 并促成下一代恒星的形成。这些重元素的丰度特征被保留在一些古老恒星中, 例如 r 过程增丰贫金属星^[11]。r 过程增丰贫金属星指在宇宙早期形成的、金属丰度较低但富含 r 过程元素的恒星。由于这些恒星保留了宇宙早期元素合成的化学特征, 它们为研究 r 过程的核合成机制以及早期宇宙的化学演化提供了关键线索。为精确测定这些贫金属星的年龄, 科学家通常采用 Th/U 核纪年法。该方法利用了两种长寿命的放射性同位素: 钍 (^{232}Th) 和铀 (^{238}U), 其中 ^{232}Th 的半衰期约为 14 Ga, 而 ^{238}U 的半衰期约为 4.5 Ga。通过测量这两种同位素的初始丰度比和观测丰度比, 并结合其放射性衰变规律, 可以推算出贫金属星的年龄。这一方法为研究恒星的形成历史及其在宇宙早期的演化提供了重要依据。此外, Th/Eu 核纪年法或 U/Eu 核纪年法也可用于测定贫金属星的年龄。值得一提的是, Th 和 U 元素是纯 r 过程元素, 仅能通过 r 过程合成; 而 Eu 元素的合成则同时受到 s 过程和 r 过程的影响, 这将对其年龄的计算产生较大的不确定性。近期, 中国科学院国家天文台的研究团队通过郭守敬望远镜 (LAMOST) 发现了一颗具有极高 Eu 丰度的 r 过程增丰恒星^[12], 这意味着恒星中的 Eu 元素可能存在复杂的形成机制和增丰过程。另一方面, Th 元素 (原子序数为 90) 和 U 元素 (原子序数为 92) 是相邻元素, 它们的丰度比受天体环境参数和原子核物理输入量的影响相对较小; 而 Eu 元素 (原子序数为 63) 与 Th 和 U 元素之间的原子序数差距较大, 这可能导致较大的系统误差。因此, Th/U 核纪年法是一种基于原子核衰变规律的独立测年方法, 并且不依赖于星系演化模型, 适用于测定贫金属星的年龄^[13]。

截至 2024 年 9 月, 科学家已经发现了 8 颗具有 Th 和 U 观测数据的 r 过程增丰贫金属星, 分别为: CS31082-001^[14]、BD+17°3248^[15]、HE1523-0901^[16]、CS29497-004^[17]、J2038-0023^[18]、J0954+5246^[19]、J2003-1142^[20] 和 J2213-5137^[21]。这些恒星的金属含量极低 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$), 表明它们形成于宇宙早期阶段。此外, 这 8 颗贫金属星具有显著的 r 过程元素吸收

线特征, 表明它们在宇宙早期经历了显著的 r 过程增丰。本文将采用 Th/U 核纪年法对这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄进行分析。

2 研究方法

根据原子核的放射性衰变规律, 放射性核素在经过时间 t 后剩余的核素数量 $N(t)$ 与初始时刻的数量 $N(0)$ 之间的关系可以表示为:

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t) \quad , \quad (1)$$

其中, λ 为该核素的衰变常数。对于 ^{232}Th 和 ^{238}U 的放射性衰变, 可以分别表示为:

$$N_{\text{Th}}(t) = N_{\text{Th}}(0) \exp(-\lambda_{\text{Th}}t) \quad , \quad (2)$$

$$N_{\text{U}}(t) = N_{\text{U}}(0) \exp(-\lambda_{\text{U}}t) \quad . \quad (3)$$

结合式 (2) 与式 (3), 可得:

$$\frac{N_{\text{U}}(t)}{N_{\text{Th}}(t)} = \frac{N_{\text{U}}(0)}{N_{\text{Th}}(0)} \exp[-(\lambda_{\text{U}} - \lambda_{\text{Th}})t] \quad . \quad (4)$$

将式 (4) 两边同时取对数可得:

$$\lg\left(\frac{N_{\text{U}}(t)}{N_{\text{Th}}(t)}\right) = \lg\left(\frac{N_{\text{U}}(0)}{N_{\text{Th}}(0)}\right) - (\lambda_{\text{U}} - \lambda_{\text{Th}})t \lg e \quad . \quad (5)$$

将式 (5) 化简可得:

$$t = \frac{1}{(\lambda_{\text{U}} - \lambda_{\text{Th}}) \lg e} \left[\lg\left(\frac{N_{\text{U}}(0)}{N_{\text{Th}}(0)}\right) - \lg\left(\frac{N_{\text{U}}(t)}{N_{\text{Th}}(t)}\right) \right] \quad . \quad (6)$$

原子核的半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 λ 之间的关系为

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad . \quad (7)$$

根据国际核数据中心 NuDat3.0 数据库, 放射性同位素 ^{232}Th 和 ^{238}U 的半衰期分别为 14.07 Ga 和 4.46 Ga。代入式 (6) 并化简后, 贫金属星的年龄可以表示为:

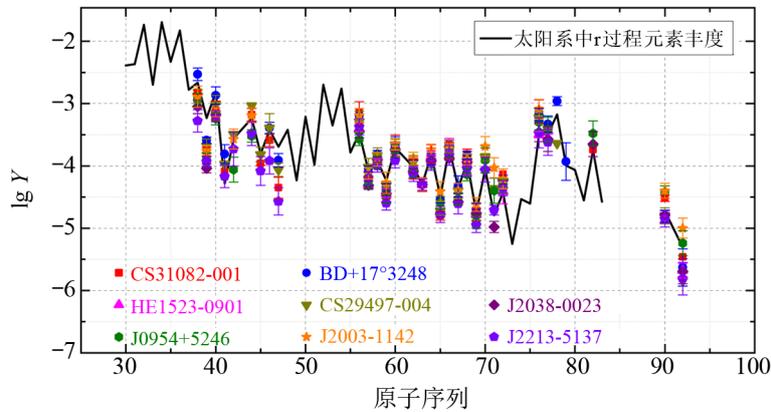
$$t = 21.71 \left[\lg\left(\frac{\text{U}}{\text{Th}}\right)_{\text{ini}} - \lg\left(\frac{\text{U}}{\text{Th}}\right)_{\text{obs}} \right] \quad , \quad (8)$$

其中, t 的单位为 Ga, $(\text{U}/\text{Th})_{\text{ini}}$ 和 $(\text{U}/\text{Th})_{\text{obs}}$ 分别表示初始和观测时的 U 与 Th 的丰度比。

根据贫金属星年龄的计算公式, 利用 Th/U 核纪年法确定贫金属星的年龄, 需要已知初始和观测时的 U 与 Th 的丰度比。Basuswein 等人^[22]通过对中子星并合事件中的 r 过程核反应进行模拟研究, 发现 Th 与 U 的丰度比约为 1.7, 即 $\lg(\text{U}/\text{Th})_{\text{ini}} = -0.23$ 。此外, Frebel 等人^[16]综合考虑了天体环境参数对 r 过程核合成的影响, 得出 $\lg(\text{U}/\text{Th})_{\text{ini}}$ 的范围为 $-0.22 \sim -0.30$ 。这一结果与 Basuswein 等人的结果一致。因此, 在本工作中, 我们设定 $\lg(\text{U}/\text{Th})_{\text{ini}} = -0.26 \pm 0.04$ 。

3 结果与分析

图 1 展示了 8 颗贫金属星的重元素丰度, 黑色实线表示太阳系中 r 过程元素的丰度。从图中可以看出, 这 8 颗贫金属星的重元素丰度与太阳系中的 r 过程元素丰度一致。这一结果表明, 这 8 颗贫金属星在宇宙早期经历了显著的 r 过程增丰。因此, 可以采用 Th/U 核纪年法来测定这些 r 过程增丰贫金属星的年龄。图 2 展示了 8 颗 r 过程增丰贫金属星的金属丰度及 U 与 Th 的观测丰度比。从图中可以看出, 这些贫金属星的 $\lg(U/Th)_{\text{obs}}$ 范围为 $-1.1 \sim -0.6$ 。其中, 有 3 颗贫金属星的观测丰度比的不确定性达到了 ± 0.30 , 分别是 BD+17°3248、CS29497-004 和 J2213-5137; 而贫金属星 CS31082-001 的观测丰度比的不确定性较小, 为 ± 0.11 。



注: 横坐标表示原子序数, 纵坐标表示重元素的观测丰度。黑色实线表示太阳系中 r 过程元素的丰度, 数据来源于文献 [23]。贫金属星的重元素丰度已标准化为 $Y(\text{Eu}) = 4.5 \times 10^{-5}$ 。

图 1 8 颗 r 过程增丰贫金属星的重元素丰度

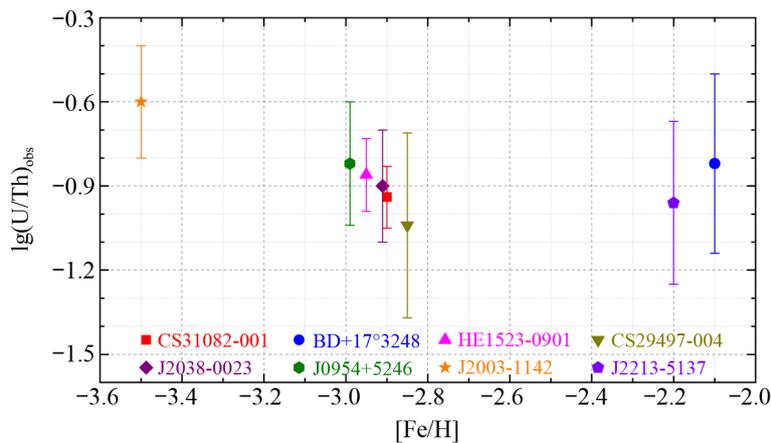
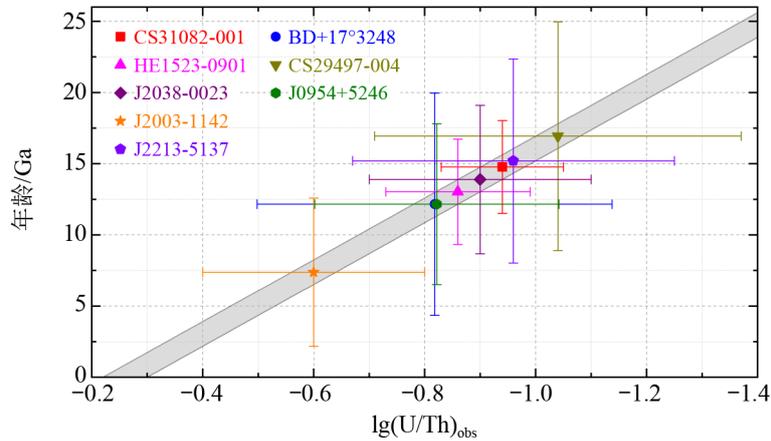


图 2 8 颗 r 过程增丰贫金属星的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 及 U 与 Th 的观测丰度比 $\lg(U/Th)_{\text{obs}}$

根据 Th/U 核纪年法给出的贫金属星的年龄公式, 我们计算了 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄, 如图 3 所示。图中的阴影区域表示由初始丰度 $(U/Th)_{ini}$ 引起的误差范围, 而误差棒表示由观测丰度 $(U/Th)_{obs}$ 引起的误差。从图中可以看出, 在给定初始丰度比的情况下, 贫金属星的年龄与其观测丰度比 $\lg(U/Th)_{obs}$ 呈线性关系, 即随着贫金属星年龄的增加, 其观测丰度比 $\lg(U/Th)_{obs}$ 的绝对值也相应增大。这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄在 7.4 ~ 16.9 Ga 之间, 平均年龄为 13.2 Ga。在 r 过程核反应模拟中, 初始丰度比为 $\lg(U/Th)_{ini} = -0.26 \pm 0.04$, 因此由初始丰度引起的年龄误差为 0.9 Ga。从图中可以看出, 由观测丰度 $(U/Th)_{obs}$ 引起的不确定性显著大于由初始丰度 $(U/Th)_{ini}$ 引起的不确定性。其中, 贫金属星 CS31082-001 的不确定性最小, 其观测丰度 $(U/Th)_{obs}$ 引起的年龄误差仅为 2.4 Ga; 而不确定性最大的贫金属星 CS29497-004 的年龄误差达到了 7.2 Ga。这一结果表明, 对 r 过程增丰贫金属星中 Th 和 U 元素观测丰度的精确分析将有效减小年龄计算中的不确定性。此外, 采用高精度的 r 过程核反应程序对 Th 和 U 的初始丰度进行精确评估, 也有助于减少年龄计算中的不确定性。

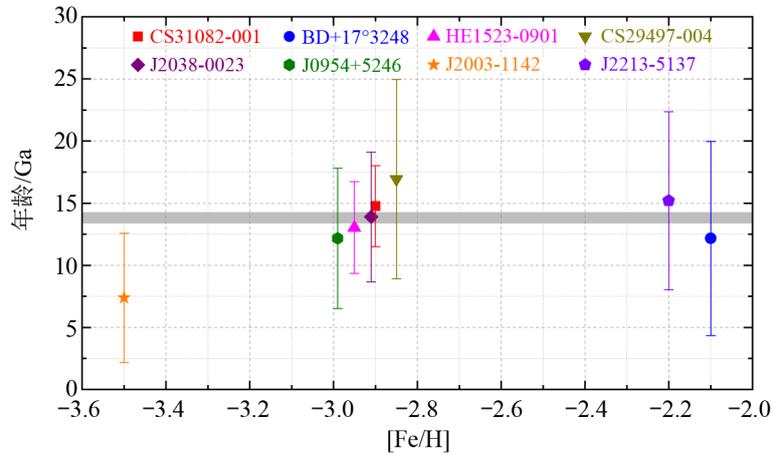


注: 阴影区域表示由初始丰度 $(U/Th)_{ini}$ 引起的误差范围, 而误差棒表示由观测丰度 $(U/Th)_{obs}$ 引起的误差。

图 3 采用 Th/U 核纪年法计算得到的贫金属星年龄

图 4 给出了 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄计算结果。图中的误差棒考虑了由初始丰度和观测丰度共同引起的年龄不确定性。从图中可以看出, 目前已发现的 8 颗 r 过程增丰贫金属星中, 最古老的是 CS29497-004, 年龄为 16.9 ± 8.0 Ga; 最年轻的是 J2003-1142, 年龄为 7.4 ± 5.2 Ga。不确定性最小的贫金属星是 CS31082-001, 年龄为 14.8 ± 3.3 Ga。此外, 贫金属星的年龄与其金属丰度 $[Fe/H]$ 之间无明显关联。表 1 列出了这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄计算结果及其误差范围。

图 4 中还将这 8 颗贫金属星的年龄与宇宙微波背景辐射推断的宇宙年龄进行了比较。由于从宇宙诞生到 r 过程增丰贫金属星的形成需要经历较长的演化时间, 贫金属星的年龄应当比宇宙的年龄小。因此, Th/U 核纪年法作为一种独立的测年方法, 可以通过测定古老恒星的年龄来确定宇宙年龄的下限, 从而为宇宙大爆炸理论提供有力的证据。从图中可以



注: 阴影区域表示宇宙微波背景辐射提供的宇宙年龄^[24], 即 13.8 Ga。

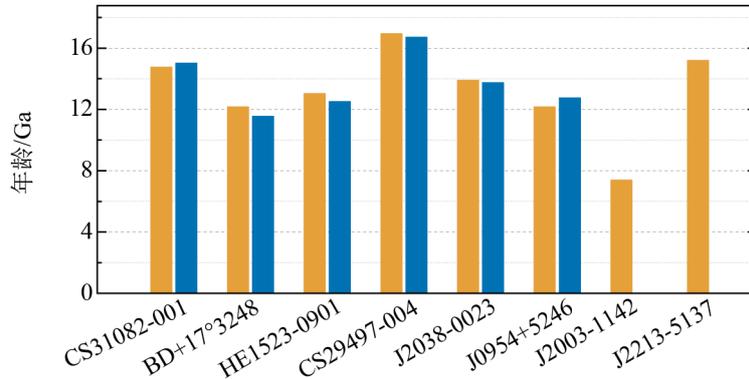
图 4 8 颗 r 过程增丰贫金属星的金属丰度和年龄

表 1 8 颗 r 过程增丰贫金属星中 Th 与 U 元素的观测丰度比及其年龄计算结果

贫金属星	[Fe/H]	$\lg(\text{U}/\text{Th})_{\text{obs}}$	年龄/Ga
CS31082-001	-2.90	-0.94 ± 0.11	14.763 ± 3.256
BD+17°3248	-2.10	-0.82 ± 0.32	12.158 ± 7.816
HE1523-0901	-2.95	-0.86 ± 0.13	13.026 ± 3.691
CS29497-004	-2.85	-1.04 ± 0.33	16.934 ± 8.033
J2038-0023	-2.91	-0.90 ± 0.20	13.894 ± 5.210
J0954+5246	-2.99	-0.82 ± 0.22	12.158 ± 5.645
J2003-1142	-3.50	-0.60 ± 0.20	7.381 ± 5.210
J2213-5137	-2.20	-0.96 ± 0.29	15.197 ± 7.164

看到, 这些形成于宇宙早期的 r 过程增丰贫金属星, 其年龄在误差范围内均未明显超出宇宙微波背景辐射推断的宇宙年龄。这一结果表明, Th/U 核纪年法测定的古老恒星年龄为宇宙微波背景辐射推断的宇宙年龄提供了独立的证据支持。

我们将本工作测定的贫金属星年龄与 Wu 等人^[25]估算的年龄进行了对比研究, 如图 5 所示。Wu 等人采用 r 过程核反应模拟, 对 6 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄进行了分析, 其中不包括最近发现的贫金属星 J2003-1142 和 J2213-5137。从图中可以看出, 基于 Th/U 核纪年法测定的贫金属星年龄与 Wu 等人采用 r 过程核反应模拟得到的结果基本一致。本工作还对最近发现的 2 颗 r 过程增丰贫金属星 J2003-1142 和 J2213-5137 进行了分析, 它们的年龄分别为 7.381 ± 5.210 Ga 和 15.197 ± 7.164 Ga。



注：黄色表示本工作的研究成果；蓝色表示 Wu 等人^[25]得到的结果。

图 5 两种方法测定的 r 过程增丰贫金属星的年龄

4 总结与讨论

基于 Th/U 核纪年法，我们对目前已发现的 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄进行了研究，这些贫金属星为：CS31082-001、BD+17°3248、HE1523-0901、CS29497-004、J2038-0023、J0954+5246、J2003-1142 和 J2213-5137。通过对这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的重元素丰度进行分析，发现其 U 与 Th 的观测丰度比 $\lg(U/Th)_{\text{obs}}$ 在 $-1.1 \sim -0.6$ 之间。根据 Th/U 核纪年法的贫金属星年龄公式，我们计算了这 8 颗 r 过程增丰贫金属星的年龄。对于目前已发现的 8 颗 r 过程增丰贫金属星，推断其年龄范围为 7.4 ~ 16.9 Ga，平均年龄为 13.2 Ga。基于 Th/U 核纪年法测定的贫金属星年龄与 Wu 等人采用 r 过程核反应模拟得到的结果基本一致。

Th/U 核纪年法作为一种独立的测年方法，避免了由引入星系演化模型引起的不确定性。通过测定古老恒星的年龄，该方法可以有效地确定宇宙年龄的下限。在本工作中，基于 Th/U 核纪年法测定的 r 过程增丰贫金属星的年龄在其误差范围内均未明显超出宇宙微波背景辐射推断的宇宙年龄。这一研究结果为宇宙大爆炸理论提供了独立的证据支持。

本文还对 Th/U 核纪年法的不确定性来源进行了分析。研究表明，Th/U 核纪年法的不确定性主要源自两个方面：(1) Th 和 U 元素的初始丰度比；(2) Th 和 U 元素的观测丰度比。对于大多数贫金属星，由观测丰度比引起的不确定性显著大于由初始丰度比引起的不确定性。因此，对 r 过程增丰贫金属星中 Th 和 U 元素观测丰度的精确分析将有效减小年龄计算中的不确定性。此外，采用高精度的 r 过程核反应程序对 Th 和 U 元素的初始丰度进行精确评估，也有助于减小年龄计算中的不确定性。

参考文献：

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *Reviews of Modern Physics*, 1957, 29(4): 547
- [2] Cowan J J, Sneden C, Lawler J E, et al. *Reviews of Modern Physics*, 2021, 93(1): 015002
- [3] Wanajo S, Janka H T, Müller B. *ApJL*, 2010, 726(2): L15
- [4] Korobkin O, Rosswog S, Arcones A, et al. *MNRAS*, 2012, 426(3): 1940.
- [5] Shibata M, Hotokezaka K. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2019, 69(1): 41

- [6] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *Physical Review Letters*, 2017, 119(16): 1101
- [7] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *ApJL*, 2017, 848(2): L12
- [8] Kasen D, Metzger B, Barnes J, et al. *Nature*, 2017, 551: 80
- [9] Watson D, Hansen C J, Selsing J, et al. *Nature*, 2019, 574: 497
- [10] Chen M H, Li L X, Chen Q H, et al. *MNRAS*, 2024, 529(2): 1154
- [11] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2008, 46(1): 241
- [12] Xie X J, Shi J, Yan H L, et al. *ApJL*, 2024, 970(2): L30
- [13] Niu Z, Sun B, Meng J. *Physical Review C*, 2009, 80(6): 5806
- [14] Hill V, Plez B, Cayrel R, et al. *A&A*, 2002, 387(2): 560
- [15] Cowan J J, Sneden C, Burles S, et al. *ApJ*, 2002, 572(2): 861
- [16] Frebel A, Christlieb N, Norris J E, et al. *ApJ*, 2007, 660(2): L117
- [17] Hill V, Christlieb N, Beers T C, et al. *A&A*, 2017, 607: A91
- [18] Placco V M, Holmbeck E M, Frebel A, et al. *ApJ*, 2017, 844(1): 18
- [19] Holmbeck E M, Beers T C, Roederer I U, et al. *ApJL*, 2018, 859(2): L24
- [20] Yong D, Kobayashi C, Da Costa G S, et al. *Nature*, 2021, 595: 223
- [21] Roederer I U, Beers T C, Hattori K, et al. *ApJ*, 2024, 971(2): 158
- [22] Bauswein A, Goriely S, Janka H T. *ApJ*, 2013, 773(1): 78
- [23] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. *Physics Reports*, 2007, 450(4-6): 97
- [24] Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. *A&A*, 2020, 641: A6
- [25] Wu X H, Zhao P W, Zhang S Q, et al. *ApJ*, 2022, 941(2): 152

Investigating the Ages of R-Process Enhanced Metal-Poor Stars Using Th/U Nuclear Chronometry

LONG Yin¹, CHEN Menghua²

(1. School of Mathematics and Physics, Hechi University, Hechi 546300, China; 2. Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: R-process enhanced metal-poor stars are those formed in the early universe and preserve the chemical features of early element synthesis, providing crucial clues for studying the mechanisms of heavy element nucleosynthesis and the chemical evolution of the early universe. Based on Th/U nuclear chronometry, the ages of eight r-process enhanced metal-poor stars were analyzed, which include CS31082-001, BD+17°3248, HE1523-0901, CS29497-004, J2038-0023, J0954+5246, J2003-1142, and J2213-5137. The ages of these metal-poor stars range from 7.4 to 16.9 Ga, with an average age of 13.2 Ga. These estimated ages do not significantly exceed the cosmic age of 13.8 Ga inferred from the cosmic microwave background radiation, providing independent evidence to support the Big Bang theory. The main source of error in Th/U nuclear chronometry arises from uncertainties in both the initial and observed abundances of thorium and uranium.

Key words: Th/U nuclear chronometry; metal-poor star; r-process