

宇宙核时钟不确定度的研究*

张蔚泓¹⁾ 牛中明²⁾ 王枫¹⁾ 龚孝波¹⁾ 孙保华^{1)†}

1) (北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 软件开发环境国家重点实验室, 北京 100191)

2) (安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 230039)

(2011年8月21日收到; 2011年10月16日收到修改稿)

基于经典快过程理论模型, 研究了原子核物理输入量的不确定性对 Th/U, Th/Hf, Th/Eu, Th/Os, Th/Ir 等核时钟估算宇宙年龄的影响. 其中利用蒙特卡罗模拟方法, 计算了不同质量模型下由单中子分离能引起的不确定性. 结果表明, Th/U 核时钟由原子核质量不确定性引起的误差大约为 1.66 Ga, 比其他核时钟小 2 Ga 以上. 对 Th/Eu, Th/Os 和 Th/Ir 核时钟, 该误差分别为 5.15, 3.93 和 3.95 Ga. 由于 Th/Hf 核时钟受质量模型影响太大, 而 Th/Os 和 Th/Ir 的计算结果又明显偏大, 因此在年龄计算中都需谨慎使用. 综合考虑原子核物理输入量和天文观测带来的误差, 利用 Th/U 核时钟估算的宇宙年龄为 14.1 ± 3.8 Ga.

关键词: 宇宙年龄, 核时钟, 快中子俘获过程, 原子核质量

PACS: 26.30.Hj, 98.80.Ft, 21.10.Dr

1 引言

作为现代天体物理学的重要物理量之一, 宇宙年龄可以通过测算宇宙自大爆炸以来的时间^[1]、测定长寿命放射性元素的产生时间^[2-5]、测定球状星团或银盘的年龄^[6]或测定白矮星的形成时间^[7]等方法来估算.

利用长寿命放射性元素测定天体年龄的方法可以一直追溯至原子核物理学发展的最初阶段. 早在 1929 年, Rutherford^[8]就提出可以利用岩石中 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的相对丰度来确定地球年龄的思想. 除 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 外, ^{232}Th 和 ^{235}U 的寿命分别长达 14.05 和 4.47 Ga, 与宇宙年龄在同一数量级, 因此也可以利用 Th-U 丰度比的变化来测定宇宙年龄. 其中, 现在的丰度可以由天文观测给出, Noddack 等^[9]在 1930 年就已从陨石的 analysis 资料中得出元素丰度图. 但在年龄计算中还需准确预言这些元素的初始丰度. 1957 年, Burdidge 等^[2]建立了元素

的核合成理论, 认为快中子俘获过程 (r 过程) 负责产生一半左右的超铁元素, 而长寿命放射性元素 Th 和 U 则纯粹通过 r 过程产生, 相应的初始丰度可由 r 过程计算得到. Burdidge 等进而利用星系演化模型和太阳系中 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的相对丰度得出银河系年龄下限为 6.6 Ga. 1960 年, Fowler 和 Hoyle^[10]利用 Th/U 丰度比来计算银河系年龄. 1987 年, 在太阳附近的恒星中观测到了 Th 谱线, Butcher^[11]将该方法用于太阳以外的恒星. 到 1993 年, François 等^[12]又将这种方法拓展到贫金属星年龄的计算中. 然而, 上述测算年龄的方法均依赖于星系的化学演化, 因此具有较大的不确定性.

极贫金属星中铁与氢的丰度比为太阳的千分之一甚至更小. 一般认为, 它们产生于星系形成的初期, 其年龄可以近似认为是星系乃至宇宙的年龄. 此外, 极贫金属星形成之后并没有参与星系后继的化学演化, 其表面元素的丰度仍然是星系形成时的初始丰度. 近些年的观测表明, 极贫金属星中 Ba 以后的 r 过程元素丰度与太阳系的 r 过程元素丰度分

* 北航大学生科研训练计划 (SRTP)、软件开发环境国家重点实验室 (批准号: SKLSDE-2011ZX-18)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-09-0031)、安徽大学 211 工程 (批准号: 02303319) 和国家自然科学基金 (批准号: 10975008, 11105010, 11035007, 11128510) 资助的课题.

† E-mail: bhsun@buaa.edu.cn

布一致, 因此可以利用 r 过程核合成的理论模型来反推元素形成时的初始丰度, 从而使宇宙年龄的计算摆脱星系化学演化的影响^[13].

1996 年, Sneden 等^[14] 在极贫金属星 CS 22892-052 中观测到 Th 谱线, 并利用 Th/Eu 核时钟得出该星体的年龄下限为 15.2 ± 3.7 Ga. 此后, Th 谱线在越来越多的贫金属星中被观测到, 如 HD 115444^[15], CS 31082-001^[16], HE 1523-0901^[17] 等. 2001 年, Cayrel 等^[18] 在极贫金属星 CS 31082-001 上观测到 U 谱线, 并综合了 U/Th, U/Os, U/Ir 核时钟的计算结果, 得出该星体年龄为 12.5 ± 3.0 Ga. U 谱线随后又在极贫金属星 BD +17°3248^[19] 和 HE 1523-0901^[17] 中被观测到. 与 Th/ X 或 U/ X (X 代表稳定元素) 核时钟相比, 由于 U 与 Th 的原子性质与演化过程更为接近, 因此核时钟 Th/U 原则上更为可靠, U 谱线在极贫金属星中的观测使得利用长寿命元素测定宇宙年龄的方法的可靠性大大增强. 但天文观测中 U 谱线非常弱, 而且与 CH 和 CN 分子带的谱线混合, 因此能观测到 U 谱线的极贫金属星数量很有限, 所以探索利用其他核时钟估算年龄的工作仍很有必要.

利用核时钟对极贫金属星进行精确的年龄测算虽然摆脱了星系化学演化的影响, 但却依赖于对 Th 和 U 等 r 过程元素初始丰度的可靠估计. r 过程理论模拟中涉及大量丰中子奇特原子核的物理数据, 其中最重要的物理量包括原子核质量和 β 衰变寿命等. 除少数原子核外, 这些物理量目前只能利用理论模型的预言值. 而不同理论模型对丰中子核的预言仍存在着较大差异, 因此有必要探索核物理输入量的不确定性对年龄评估的影响. 1999 年, Cowan 等^[3] 利用经典 r 过程模型评估了原子核质量模型对年龄计算的不确定性, 得到星体 CS 22892-052 和 HD 115444 的平均年龄为 15.6 ± 4.6 Ga. 基于多事件模型, 文献^[20] 分析了 32 种不同的天文条件以及原子核理论模型的计算结果, 较为系统地评估了宇宙年龄的不确定性, 并利用 Th/U 核时钟给出贫金属星 CS 31082-001 的年龄为 8.94—17.73 Ga. 2002 年, Schatz 等^[21] 使用更新的原子核物理输入量, 重新计算了 Th/Eu 和 Th/U 的初始丰度比, 分析了经典 r 过程模型评估星体年龄的误差; 并利用蒙特卡罗方法, 评估了 β 衰变寿命的不确定性对计算结果的影响,

最后利用 Th/U 核时钟给出 CS 31082-001 的年龄为 15.5 ± 3.2 Ga.

近年来, 远离 β 稳定线原子核的质量数据更加详细^[22,23], 原子核质量模型也有了很大进展, 如 DZ10 (Dufflo-Zuker) 和 DZ28 模型^[24]、KTUY (Koura-Tachibana-Uno-Yamada) 模型^[25]、HFB-17 (Hartree-Fock-Bogoliubov) 模型^[26] 和相对论平均场 (RMF) 模型^[27] 等, 因此结合新的质量和衰变数据来研究核时钟很有必要. 2007 年, Kratz 等^[28] 利用新的核物理数据, 在经典 r 过程模型的框架下再次计算了 r 过程核素丰度, 并且提出 Th/Hf 可能为一种新的较为可靠的核时钟. 2009 年, 文献^[4] 结合新的实验数据以及八个质量模型, 发现利用不同质量表估算的年龄的差别最大可至 6.3 Ga. 然而, 该文献仅限于研究 Th/U 核时钟, 而且尚未考虑在某一原子核质量模型内单中子分离能的计算误差对估算年龄的影响. 本文结合最近发展的质量模型, 首次利用蒙特卡罗方法模拟某一原子核质量模型内由单中子分离能计算误差所引起的计算年龄的不确定度, 同时评估常用 Th/ X 核时钟的不确定度.

2 理论框架

设放射性核素的初始丰度为 N_0 , 衰变常数为 λ , 则经过时间 t 后其丰度变为

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{\left(\frac{-0.693t}{\tau_{1/2}}\right)}, \quad (1)$$

其中 $\tau_{1/2} = \ln 2/\lambda$ 为核素的半衰期.

为了减小的观测误差, 计算年龄一般采用两种元素的丰度比, 由 (1) 式可得:

$$t = 46.7 \times [\lg(Y(^{232}\text{Th})/Y(X))_0 - \lg(Y(^{232}\text{Th})/Y(X))_{\text{obs}}], \quad (2)$$

$$t = 14.8 \times [\lg(Y(^{238}\text{U})/Y(X))_0 - \lg(Y(^{238}\text{U})/Y(X))_{\text{obs}}], \quad (3)$$

$$t = -21.8 \times [\lg(Y(^{232}\text{Th})/Y(^{238}\text{U}))_0 - \lg(Y(^{232}\text{Th})/Y(^{238}\text{U}))_{\text{obs}}], \quad (4)$$

其中, $Y(X)$ 代表某一 r 过程稳定元素 X 的核素丰度. 下标 0 表示初始丰度, 可由经典 r 过程模型计算得到, 下标 obs 表示观测丰度, 其值由天文观测给出.

在经典 r 过程的计算中, 本文以铁族元素作为种子核, 温度取为 $T = 1.5 \text{ GK}$, 中子数密度 n_n 在 $10^{20} - 10^{27.5} \text{ cm}^{-3}$ 范围内变化, 并取 16 个分支进行叠加来模拟真实的快中子俘获过程发生的场所. 通过调整不同分支的辐照时间 τ 以及权重因子 ω , 来拟合太阳系 r 过程丰度, 由此模拟出一个真实的 r 过程场所. 通常, 假设各分支的 ω 与 τ 是中子数密度 n_n 的指数函数 [29,30]

$$\begin{aligned}\omega(n_n) &= a \times n_n^b, \\ \tau(n_n) &= c \times n_n^d,\end{aligned}\quad (5)$$

其中参数 a, b, c, d 可通过最佳拟合太阳系 r 过程丰度来得到.

之前的研究发现 [4], 拟合质量数 $A \geq 125$ 的太阳系 r 过程同位素丰度和质子数 $Z \geq 56$ 的贫金属星的元素丰度可以得到一致的结论. 以贫金属星 CS 31082-001 为例, 当选用 DZ10, DZ28, KTUY, HFB-17, RMF 质量模型时, 前一种方法给出的结果为 $14.1 \pm 3.2 \text{ Ga}$, 后一种方法为 $14.0 \pm 2.5 \text{ Ga}$, 两者在误差范围内相符合. 这进一步证实了极贫金属星中 Ba 以后的 r 过程元素丰度与太阳系的 r 过程元素丰度分布一致的猜想 [13]. 另一方面, 由于贫金属星的观测数据仍然很缺乏, 在研究 Th/X 核时钟时, 不能很好地约束相应的丰度比. 基于这些考虑, 下面的讨论均通过拟合太阳系 r 过程丰度来计算 r 过程初始丰度.

在高温及高中子数密度的条件下, 中子俘获反应和光解反应可近似达到平衡; 此时, 一条同位素链上相邻同位素的丰度比由下式给出:

$$\begin{aligned}& \frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} \\ &= n_n \left(\frac{h^2}{2\pi m_\mu \kappa T} \right)^{3/2} \frac{G(Z, A+1)}{2G(Z, A)} \left(\frac{A+1}{A} \right)^{3/2} \\ & \times \exp \left[\frac{S_n(Z, A+1)}{\kappa T} \right],\end{aligned}\quad (6)$$

其中 $Y(Z, A)$, $S_n(Z, A)$ 和 $G(Z, A)$ 分别代表核素 (Z, A) 的丰度、单中子分离能和配分函数, h, κ, m_μ 分别为普朗克常量、玻尔兹曼常量和原子质量单位. 忽略相邻核素间配分函数和质量数的差异, 一条同位素链上的丰度分布取决于 n_n, T 和原子核单中子分离能 S_n .

忽略裂变的影响, 经过 β 衰变从一条同位素链到另一条同位素链上的丰度随时间的变化可由以

下微分方程求得:

$$\begin{aligned}\frac{dY(Z)}{dt} &= Y(Z-1) \sum_A P(Z-1, A) \lambda_\beta^{Z-1, A} \\ & - Y(Z) \sum_A P(Z, A) \lambda_\beta^{Z, A},\end{aligned}\quad (7)$$

其中 $\lambda_\beta^{Z, A}$ 为核素 (Z, A) 的 β 衰变常量, $Y(Z) = \sum_A Y(Z, A) = \sum_A P(Z, A) Y(Z)$ 表示每条同位素链的总丰度. 对于给定的 n_n , 由方程 (6) 和 (7) 即可确定 r 过程合成的各个核素的丰度.

至于 r 过程模型计算涉及到的原子核质量, 本文分别考虑了 DZ10, DZ28, KTUY, HFB-17, RMF 等五个质量模型, 已有的实验数据取自文献 [22] 和 [23]. 至于其他一些常用的质量模型, 如有限力程小液滴模型 [31]、考虑壳弱化效应的 ETFSI (extended Thomas-Fermi plus Strutinsky integral) 模型 [32], 由于预言的 Th/U 丰度比较大, 不适用于核时钟的计算 [4]. r 过程计算中涉及到的原子核 β 衰变数据取自文献 [33]. 极贫金属星 CS 31082-001 与太阳系的观测丰度数据分别取用文献 [16] 和 [34].

3 结果讨论

首先从核合成机理上定性地评估各核时钟的可靠性, 然后给出 S_n 对计算宇宙年龄的影响, 最后结合天文观测数据系统评估各核时钟的不确定度.

3.1 不同的中子数密度得到的 r 过程元素丰度

r 过程发生环境的中子数密度对元素的合成具有重要影响. 图 1 给出了 r 过程合成的各元素的丰度随中子数密度的变化曲线, 其中天体环境中的温度 $T = 1.5 \text{ GK}$. 图 1 选取了 6 种代表性的元素. 除估算年龄时常用的 Th, U, Eu 元素外, 本文还考虑了第三峰上接近 Th 与 U 的元素 Os 和 Ir; 2007 年, Kratz 等 [28] 提出 Th/Hf 是一种较为可靠的核时钟, 作为比较, 文中也给出了 Hf 的计算结果. 上述元素都主要由 r 过程产生, 且具有较高的观测精度. 图 1(a) 和 (b) 分别对应利用 DZ28 和 RMF 模型的计算结果, 对于 DZ10, HFB-17 和 KTUY 质量表, 相应的丰度曲线都与图 1(a) 类似. 为了更直观地比较各 n_n 的贡献, 图 1 中各元素丰度曲线都将最大值归一至 $\lg Y = 1$.

由图 1 可见,不同的质量模型得出的曲线都具有类似特点. 首先,每种元素所对应的曲线形状基本相同,峰值对应于合成该元素的最佳中子数密度. 其次,原子序数较大的元素,其合成需要更高的中子数密度. 两种元素的曲线越接近,即各个中子数密度分支 n_n 贡献的比例越接近,则说明这两种元素的合成机理越相似,由这两种元素组成的核时钟也就更为可靠. Th 和 U 在各个质量模型下合成环境基本一致,因此 Th/U 核时钟的不确定度应该小于 Th/X 核时钟. 下面定量研究理论模型预言的 S_n 不确定度对不同核时钟的影响.

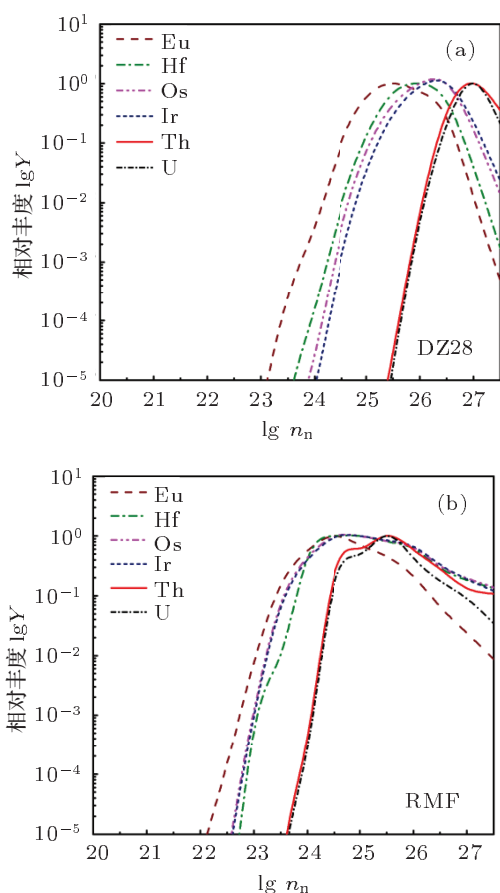


图 1 利用不同中子数密度 n_n 计算得到的 r 过程元素的相对丰度 (a) DZ28 模型; (b) RMF 模型

3.2 S_n 不确定度对年龄估算的影响

在经典快过程模型中,从 (6) 式可见,影响元素丰度的两个关键原子核物理输入量是原子核单中子分离能(可由原子核质量得到)和原子核 β 衰变率. 其中, β 衰变率带来的误差参见文献 [21]. 该文献利用蒙特卡罗模拟,在 0.2—5 倍间随机改变原子核的 β 衰变率,并同时变化 β 缓发中子数

据,通过 100 次计算,得出由原子核 β 衰变率引起 $\lg(Y(\text{Th})/Y(\text{U}))$ 和 $\lg(Y(\text{Th}))/Y(\text{X}))$ 初始丰度比的误差分别为 0.07 和 0.1.

类似地,本文利用蒙特卡罗方法,通过随机改变原子核的单中子分离能 S_n 来评估理论模型预言的 S_n 不确定度对计算极贫金属星年龄的影响. 改变 S_n 时需满足如下两点物理要求: 1) 由于配对效应,需要保证具有偶中子数 N 的原子核的 S_n 大于相邻奇中子数原子核,即当 N 为偶数时,有 $S_n(Z, N) > S_n(Z, N - 1)$ 且 $S_n(Z, N) > S_n(Z, N + 1)$; 2) 在一条同位素链上,中子数的增加会使原子核对最后一个中子的束缚能力减弱,而由于原子核形状相变的存在又会导致出现小部分 S_n 增加的情况,因此,应令 S_n 整体上随着 N 的增加呈下降趋势,同时允许个别微小的上升. 此外,从物理的角度考虑,还要求每次模拟后计算出来的 Th/U 丰度比必须小于相应的原初太阳系丰度 [35,36],即宇宙年龄值至少要大于太阳系的年龄 4.6 Ga.

以 RMF 质量表中 Eu 同位素链为例,图 2 为蒙特卡罗模拟中 S_n 的取值范围示意图. 其中,实心点为相应核素的 S_n ,阴影区域的高度为其可变范围,该范围由以下两点确定:粗实线为相邻核 S_n 的平均值,它严格保证了偶 N 核的 S_n 大于奇 N 核;虚线为 N 相差 2 的两个核的 S_n 的平均值,令投点范围超过该线 1/5,则可使得 S_n 整体上呈下降趋势,同时又可产生约 0.1 概率的上升.

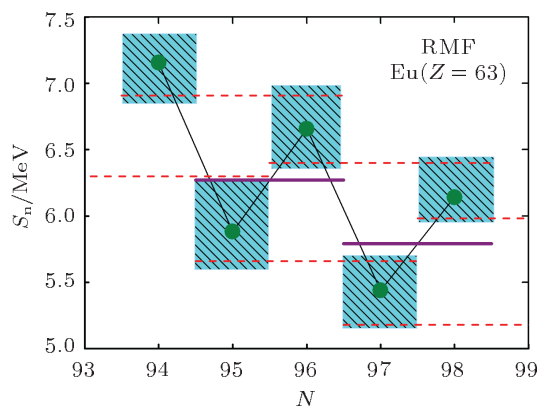


图 2 以 RMF 质量表中 Eu 同位素链为例,蒙特卡罗模拟中 S_n 的取值范围示意图

以 DZ28 质量模型为例,利用蒙特卡罗方法随机改变单中子分离能 S_n 得到的年龄不确定度(即多次随机投点前后年龄变化的标准偏差)随总模拟次数的关系见图 3. 显然,随着模拟次数的增加,

蒙特卡罗分析的不确定度越低, 而相应得到的年龄不确定度趋于稳定. 由图 3 可以看出, 在大约 100 次投点之后, Th/U 核时钟的不确定度已基本稳定, 波动范围不超过 0.1 Ga, 而对于其他核时钟, 则需要 500 次以上的模拟才能达到同样的稳定性. 从不确定度计算的结果上来讲, 其他核时钟计算宇宙年龄时的不确定度比 Th/U 大一倍以上, 这说明 S_n 的不确定性对这些核时钟的影响更大, 而对 Th/U 核时钟影响较小. 对于其他质量模型, 也可得出以上结论.

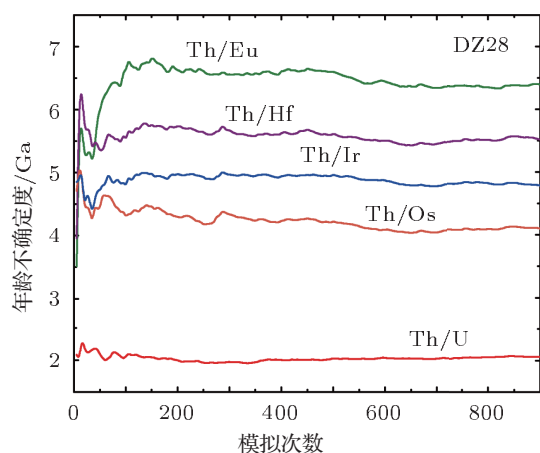


图 3 用 DZ28 质量模型, 基于核时钟 Th/Eu, Th/Hf, Th/Os, Th/Ir, Th/U 计算得到的年龄不确定度随模拟次数的变化

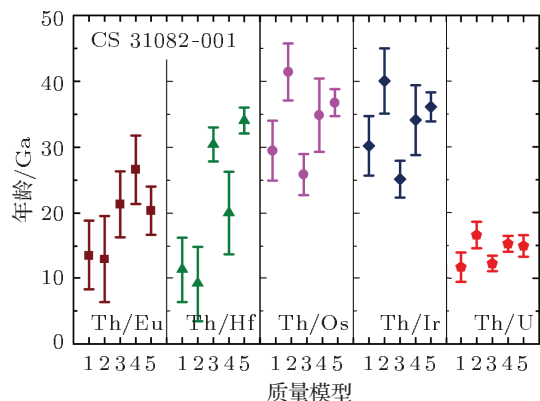


图 4 利用不同核时钟计算得到的贫金属星 CS 31082-001 的年龄, 每个子图中 1—5 分别代表利用 DZ10, DZ28, HFB-17, KTUY 和 RMF 质量模型得到的结果, 误差来自 S_n 的不确定度

图 4 给出了利用不同核时钟计算得到的贫金属星 CS 31082-001 的年龄, 误差来自 S_n 的不确定度, 计算中考虑了 DZ10, DZ28, HFB-17, KTUY 和 RMF 五个质量模型. 不考虑质量模型之间的差异, Th/U 核时钟由 S_n 不确定度引起的误差平均值为 1.66 Ga, 而对 Th/Eu, Th/Hf, Th/Os, Th/Ir 核时钟

则分别为 5.15, 4.30, 3.93, 3.95 Ga. 可见, 与图 1 定性的分析结果一致, Th/U 核时钟的误差明显小于其他核时钟. 同时发现, Th/Hf 核时钟计算得到的年龄受原子核质量模型的影响过大, 利用不同质量模型得到的年龄不相符合, 因此在使用时需谨慎对待. 相比而言, 其他核时钟利用各质量模型预言的年龄在误差允许的范围内基本一致.

3.3 不同核时钟计算年龄的不确定度

结合前两部分的结果, 图 5 给出了各核时钟计算得到的贫金属星 CS 31082-001 的年龄, 该年龄为所研究的五个质量模型计算结果的平均值. 图 5 所示的各项误差中, 天文观测的误差 σ_{obs} 由观测数据给出, r 过程计算的误差 σ_{cal} 中包括不同质量模型所得年龄值的均方根偏差、 β 衰变率引起的误差 [21] 以及在某一质量模型中的 S_n 引起的误差. 由于 σ_{obs} 与 σ_{cal} 间相互独立, 所以总误差 $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 + \sigma_{\text{cal}}^2$. 此外, 如 3.2 节中分析, Th/Hf 核时钟利用不同的质量模型计算得到的结果差距太大, 在使用其作为核时钟时需谨慎, 因此图 5 未给出 Th/Hf 核时钟的结果.

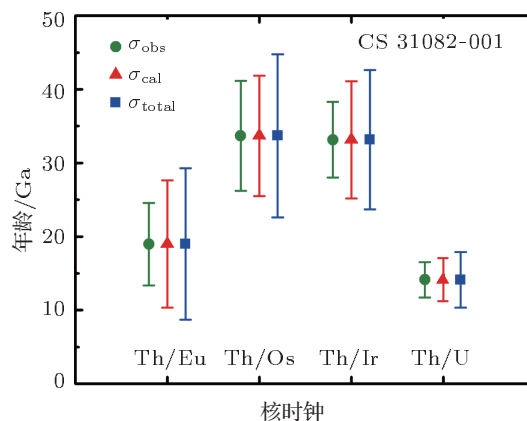


图 5 利用各核时钟计算的贫金属星 CS 31082-001 年龄

由图 5 可见, Th/U 的误差远小于其他核时钟, 其由天文观测和 r 过程计算带来的误差分别为 2.4 和 2.9 Ga, 利用 Th/U 核时钟计算的极贫金属星 CS 31082-001 的年龄为 14.1 ± 3.8 Ga, 即与文献 [4] 中直接拟合太阳系 r 过程丰度分布的结果完全一致. 同样地, 利用 Th/Eu, Th/Os, Th/Ir 核时钟得到的年龄分别为 19.0 ± 10.3 Ga, 33.7 ± 11.1 Ga 和 33.2 ± 9.5 Ga. 可见, 利用 Th/Eu 核时钟计算得到的年龄与利用 Th/U 得到的结果较为相近. 而对

于 Th/Os 和 Th/Ir 核时钟, 虽然利用不同质量模型估算的年龄在误差范围内相符, 但是与 Th/U 核时钟结果相比明显偏大, 这可能是由于贫金属星中 Os 与 Ir 的观测丰度过高所导致^[34,37]. 因此, 对于某些未观测到 U 谱线的星体, 其年龄利用 Th/Eu 核时钟来估算较为可靠. 对于某些更古老星体, 由于其谱线强度较弱, 因此 U 谱线的观测也更为困难. 如果能够首先观测到 Th 谱线, 便可以利用 Th/Eu 核时钟计算得到这些古老星体的年龄, 从而给出与宇宙年龄更为接近的年龄下限值.

4 结论

本文基于经典 r 过程理论模型, 利用 DZ10, DZ28, HFB-17, KTUY 和 RMF 五个质量模型, 对 Th/U, Th/Hf, Th/Eu, Th/Os, Th/Ir 五个核时钟的可靠性和年龄计算的不确定度进行了分析与讨论. 其中首次利用蒙特卡罗方法, 评估了单中子分离能 S_n 的不确定性对计算年龄的影响, 发现 Th/U

核时钟的稳定性最好, 由 S_n 引起的年龄不确定度为 1.66 Ga, 比其他的核时钟小 2 Ga 以上. 由其得到极贫金属星 CS 31082-001 的年龄为 14.1 ± 3.8 Ga, 该年龄可作为宇宙年龄的下限.

对于 Th/Hf 核时钟, 由于不同的质量模型计算结果差异太大, 将其用于宇宙年龄计算时需要特别谨慎; 对于 Th/Os 和 Th/Ir 核时钟, 虽然利用不同质量模型估算的年龄在误差范围内相符, 但是与目前最精准的 Th/U 核时钟相比计算结果明显偏大; 而利用 Th/Eu 核时钟计算的年龄与 Th/U 核时钟较为接近, 且其不确定度相对较小, 所以也可用于宇宙年龄的计算.

总之, 作为一种计算宇宙年龄的方法, 随着天文观测数据精度的提高以及天体物理与核物理模型的进一步改善, 核纪年法将会给出越来越可靠的年龄估算, 对贫金属星中 Re 丰度的观测可能导出新的可靠核时钟 Re/X. 同时, 核纪年法也有助于约束其他测算宇宙年龄的模型, 促进天体环境下重元素乃至超重元素的核合成机理等方面的研究.

- [1] Komatsu E, Dunkley J, Nolte M R, Bennett C L, Gold B, Hinshaw G, Jarosik N, Larson D, Limon M, Page L, Spergel D N, Halpern M, Hill R S, Kogut A, Meyer S S, Tucker G S, Weiland J L, Wolack E, Wright E L 2009 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **180** 330
- [2] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, Hoyle F 1957 *Rev. Mod. Phys.* **29** 547
- [3] Cowan J J, Pfeiffer B, Kratz K L, Thielemann F K, Sneden C, Burles S, Tytler D, Beers T C 1999 *Astrophys. J.* **521** 194
- [4] Niu Z M, Sun B H, Meng J 2009 *Phys. Rev. C* **80** 065806
- [5] Meng J, Niu Z M, Liang H Z, Sun B H 2011 *Sci. Chin. G* **54** s119
- [6] Carretta E, Gratton R G, Clementini G, Pecci F F 2000 *Astrophys. J.* **533** 215
- [7] Hansen B M S, Richer H B, Fahlman G G, Stetson P B, Brewer J, Currie T, Gibson B K, Ibata R, Rich R M, Shara M M 2004 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **155** 551
- [8] Rutherford E 1929 *Nature* **123** 313
- [9] Noddack I, Noddack W 1930 *Naturwiss.* **35** 59
- [10] Fowler W A, Hoyle F 1960 *Ann. Phys.* **10** 280
- [11] Butcher H R 1987 *Nature* **328** 127
- [12] François P, Spite M, Spite F 1993 *Astron. Astrophys.* **274** 821
- [13] Cowan J J, Sneden C 2006 *Nature* **440** 1151
- [14] Sneden C, McWilliam A, Preston G W, Cowan J J, Burris D L, Armosky B J 1996 *Astrophys. J.* **467** 819
- [15] Westin J, Sneden C, Gustafsson B, Cowan J J 2000 *Astrophys. J.* **530** 783
- [16] Hill V, Plez B, Cayrel R, Beers T C, Nordström B, Andersen J, Spite M, Spite F, Barbey B, Bonifacio P, Depagne E, François P, Primas F 2002 *Astron. Astrophys.* **387** 560
- [17] Frebel A, Christlieb N, Norris J E, Thom C, Beers T C, Rhee J 2007 *Astrophys. J.* **660** L117
- [18] Cayrel R, Hill V, Beers T C, Barbey B, Spite M, Spite F, Plez B, Andersen J, Bonifacio P, François P, Molaro P, Nordström B, Primas F 2001 *Nature* **409** 691
- [19] Cowan J J, Sneden C, Burles S, Ivans I I, Beers T C, Truran J W, Lawler J E, Primas F, Fuller G M, Pfeiffer B, Kratz K L 2002 *Astrophys. J.* **572** 861
- [20] Goriely S, Arnould M 2001 *Astron. Astrophys.* **379** 1113
- [21] Schatz H, Toenjes R, Pfeiffer B, Beers T C, Cowan J J, Hill V, Kratz K L 2002 *Astrophys. J.* **579** 626
- [22] Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra A H 2003 *Nucl. Phys. A* **729** 3
- [23] Sun B, Knöbel R, Litvinov Y A, Geissel H, Meng J, Beckert K, Bosch F, Boutin D, Brandau C, Chen L, Cullen I J, Dimopoulou C, Fabian B, Hausmann M, Kozuharov C, Litvinov S A, Mazzocco M, Montes F, Münzenberg G, Musumarra A, Nakajima S, Nociforo C, Nolden F, Ohtsubo T, Ozawa A, Patyk Z, Plaß W R, Scheidenberger C, Steck M, Suzuki T, Walker P M, Weick H, Winckler N, Winkler M, Yamaguchi T 2008 *Nucl. Phys. A* **812** 1
- [24] Duflo J, Zuker A P 1995 *Phys. Rev. C* **52** R23
- [25] Koura H, Tachibana T, Uno M, Yamada M 2005 *Prog. Theor. Phys.* **113** 305
- [26] Goriely S, Chamel N, Pearson J M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 152503
- [27] Geng L S, Toki H, Meng J 2005 *Prog. Theor. Phys.* **113** 785
- [28] Kratz K L, Farouqi K, Pfeiffer B, Truran J W, Sneden C, Cowan J J 2007 *Astrophys. J.* **662** 39

- [29] Sun B, Montes F, Geng L S, Geissel H, Litvinov Y A, Meng J 2008 *Phys. Rev. C* **78** 025806
- [30] Sun B H, Meng J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2429
- [31] Möller P, Nix J R, Myers W D, Swiatecki W J 1995 *At. Data Nucl. Data Tables* **59** 185
- [32] Pearson J M, Nayak R C, Goriely S 1996 *Phys. Lett. B* **387** 455
- [33] Möller P, Pfeiffer B, Kratz K L 2003 *Phys. Rev. C* **67** 055802
- [34] Sneden C, Cowan J J, Gallino R 2008 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46** 241
- [35] Simmerer J, Sneden C, Cowan J J, Collier J, Woolf V M, Lawler J E 2004 *Astrophys. J.* **617** 1091
- [36] Lodders K 2003 *Astrophys. J.* **591** 1220
- [37] Otsuki K, Mathews G J, Kajino T 2003 *New Astron.* **8** 767

Uncertainties of nucleo-chronometers from nuclear physics inputs*

Zhang Wei-Hong¹⁾ Niu Zhong-Ming²⁾ Wang Feng¹⁾
Gong Xiao-Bo¹⁾ Sun Bao-Hua^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Software Development Environment, School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039, China)

(Received 21 August 2011; revised manuscript received 16 October 2011)

Abstract

The influences of uncertainties in nuclear physics inputs on the Th/U, Th/Hf, Th/Eu, Th/Os, Th/Ir nucleo-chronometers are investigated in the framework of the classical r-process approach. A Monte-Carlo method is used to evaluate the age uncertainty originating from neutron separation energies for each nuclear mass model. It is found that the deduced age uncertainty for Th/U can be up to 1.66 Ga, and for the three chronometers, Th/Eu, Th/Os, Th/Ir, the uncertainties are 5.15 Ga, 3.93 Ga and 3.95 Ga, respectively. The recently proposed chronometer, Th/Hf, shows a clear model dependence, while Th/Os and Th/Ir chronometers tend to overestimate the age of Universe. Taking into account the uncertainties in nuclear physics inputs and observations, an up-to-date age estimation for the universe with the Th/U chronometer is 14.1 ± 3.8 Ga.

Keywords: age of universe, nucleochronometer, rapid neutron-capture process, nuclear mass

PACS: 26.30.Hj, 98.80.Ft, 21.10.Dr

* Project supported by the Student Research Training Program of Beihang University, China, the Research Fund of State Key Laboratory of Software Development Environment, China (Grant No. SKLSDE-2011ZX-18), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-09-0031), the 211 Project of Anhui University, China (Grant No. 02303319), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975008, 11105010, 11035007, 11128510).

† E-mail: bhsun@buaa.edu.cn