

文章编号: 1007-4627(2009)01-0023-04

间接测量中重放射性核中子俘获截面——替代比率法^{*}

颜胜权

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: s 过程中的放射性核素中子俘获截面对天体核合成和核素丰度有重大影响, 在直接测量异常困难的情况下, 替代比率法是获得放射性核素中子俘获截面数据的一种间接新方法。简单介绍了替代比率法理论, 并简要论述了用替代比率法推导中重核区放射性核素中子俘获截面的可行性。

关键词: 放射性核素; 中子俘获截面; 替代比率法

中图分类号: O571.1 **文献标识码:** A

1 引言

在天体演化研究中, 核素的中子俘获截面对天体核合成有着至关重要的意义, 尤其是恒星中比铁重的核素的合成, 其主要的核反应机制为中子俘获。在中子密度较低的恒星环境中, 比铁重的核素的合成主要通过 s 过程, 即慢过程进行, 其反应路径和产物都通过或者靠近 β 稳定线, 路径上的一些寿命较长的不稳定核, 如 ^{63}Ni , ^{79}Se , ^{85}Kr 等^[1, 2], 其衰变和中子俘获之间的竞争将影响到后续核素的丰度, 其中 ^{63}Ni 的 β 衰变和中子俘获之间的竞争将影响到纯 s 过程的 ^{64}Zn 的丰度。同时此类放射性核的衰变和中子俘获之间的竞争会形成不同的合成路径, 从而影响核合成的速度。

目前 s 过程涉及到的大部分稳定核素的中子俘获截面已经得到了较好的实验数据, 天体环境中不稳定核的有效半衰期也得到了较好的结果^[3-11], 为研究恒星的演化提供了坚实的基础, 但由于一些放射性同位素的 (n, γ) 截面仍然还没有可靠的实验数据, 在天体核合成模型的计算中此类核的中子俘获截面的不确定性将带来较大的误差。虽然许多大型的中子装置都可以直接测量长半衰期放射性核的中子俘获截面^[12, 13], 如欧洲核子中心(CERN)的 n_TOF 装置直接测量了半衰期为 100 a 的 ^{151}Sm 中子俘获截面^[14], 但寿命较短的放射性同位素制靶及放射性核素的强辐射本底为实验带来比较大困难。

在直接测量放射性核的 (n, γ) 截面仍然比较困难的情况下, 目前一种在替代法上改进的替代比率

方法已经被用于裂变反应的间接测量^[15-17], 此方法也适用于放射性核的 (n, γ) 测量。这种方法改进了替代法测定复合核数目时带来的误差, 用两个复合核之间的衰变比率和参照核中子俘获截面间接推导出放射性核的 (n, γ) 截面。本文将讨论用替代比率法测量放射性核的 (n, γ) 截面。

2 替代比率法

目前, 替代法已经被用于不可能直接测量或直接测量非常困难的复合核反应中, 如短半衰期的放射性核的 (n, γ) 截面测量, 铜类元素的 (n, f) 截面^[18]等。由于缺乏实验数据, s 过程中的分支点核^[1, 2]的 (n, γ) 截面测量也是替代法的焦点之一, 但替代法易受靶核杂质的影响, 测定复合核数目时带来的误差较大, 推导感兴趣核的中子俘获截面的理论计算也较为复杂, 因此推导的不稳定核 (n, γ) 截面的误差较大。改进并简化替代法对于推导出感兴趣的可靠截面是非常有意义的。

根据 Hauser-Feshbach 理论, 对入射道为 $a+A$ (α 道, 能量为 E_a) 形成复合核 B^* 衰变到出射道为 $c+C$ (χ 道) 的反应来说, 单位能量下的平均反应截面可表示为

$$\frac{d\sigma_{\alpha\chi}^{\text{HF}}(E_a)}{dE_\chi} = \sum_{J, \pi} \sigma_a^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi) \times G_\chi^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi), \quad (1)$$

这里, E_{ex} 为形成复合核的激发能, $\sigma_a^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi)$ 为复合核的形成截面, $G_\chi^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi)$ 为复合核衰

* 收稿日期: 2008-03-31; 修改日期: 2008-08-27

作者简介: 颜胜权(1977—), 男(汉族), 四川荣县人, 助理研究员, 从事核天体物理实验测量研究; E-mail: panyu@ciae.ac.cn

变到 χ 道的分支比。对于复合核反应来说,在激发能比较高的情况下入射道和出射道之间的修正因子可忽略,复合核的形成和衰变可以认为是相互独立的,因而可以采用实验和理论相结合的替代法来间接确定反应截面。在替代实验中,一般采用实验上容易实现的反应 $d + D \rightarrow b + B^*$ (δ 道)来替代实验上难以实现的 $a + A$ 形成复合核。如图1所示,直接反应 $d + D \rightarrow b + B^*$ 形成复合核的数目($N_{\delta}(E_{ex})$)可以通过鉴别 b 粒子得到,复合核衰变到 χ 道的数目($N_{\delta\chi}(E_{ex})$)可以通过探测鉴别复合核衰变的 c 或者 C 得到。Hauser-Feshbach理论的Weisskopf-Ewing近似进一步认为,在复合核激发能较高的情况下,复合核的衰变分支比 G_{χ}^{CN} 可以近似处理为与角动量、宇称无关,因此衰变分支比可以表示为

$$G_{\chi}^{CN}(E_{ex}) = \frac{N_{\delta\chi}(E_{ex})}{N_{\delta}(E_{ex})}。$$

通过实验测定复合核衰变到 χ 道的分支比,结合理论计算的形成截面 σ_a^{CN} 就可间接推导出 $a + A \rightarrow c + C$ 反应截面。但靶上一旦有杂质的影响,在实验上要精确确定 N_{δ} 会变得十分困难,难以推导出感兴趣核反应的可靠截面。

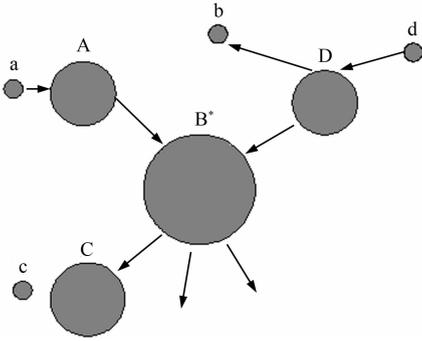


图1 替代法示意图

替代比率法是在替代法基础上发展起来的一种方法,主要是为了确定两个相似的复合核反应截面的比率:

$$R(E) = \frac{\sigma_{a_1\gamma_1}(E)}{\sigma_{a_2\gamma_2}(E)}, \quad (2)$$

$\sigma_{a_1\gamma_1}(E)$ 和 $\sigma_{a_2\gamma_2}(E)$ 分别为反应 $a_1 + A_1 \rightarrow B_1^* \rightarrow c_1 + C_1$ 和 $a_2 + A_2 \rightarrow B_2^* \rightarrow c_2 + C_2$ 的反应截面,其中一个为需要测量的反应截面,另一个为已经有可靠数据的参考反应截面, E 为入射粒子能量。由Weisskopf-Ewing近似可以表示为

$$R(E) = \frac{\sigma_{a_1}^{CN}(E)G_{\gamma_1}^{CN}(E)}{\sigma_{a_2}^{CN}(E)G_{\gamma_2}^{CN}(E)}。 \quad (3)$$

采用实验上容易实现的两个相似的替代反应 $d_1 + D_1 \rightarrow b_1 + B_1^*$ 和 $d_2 + D_2 \rightarrow b_2 + B_2^*$ 替代 $a_1 + A_1 \rightarrow B_1^*$ 和 $a_2 + A_2 \rightarrow B_2^*$, 生成相似的复合核,分支比率可以表达为

$$\frac{G_{\gamma_1}^{CN}(E)}{G_{\gamma_2}^{CN}(E)} = \frac{N_{\delta_1\gamma_1}(E)}{N_{\delta_2\gamma_2}(E)} \times \frac{N_{\delta_2}(E)}{N_{\delta_1}(E)}, \quad (4)$$

$$R(E) = \frac{\sigma_{a_1}^{CN}(E)N_{\delta_1\gamma_1}(E)}{\sigma_{a_2}^{CN}(E)N_{\delta_2\gamma_2}(E)} \times \frac{N_{\delta_2}(E)}{N_{\delta_1}(E)}。 \quad (5)$$

入射粒子能量 E_a 和复合核激发能 E_{ex} 的关系为 $E_{ex} = E_a + S_a$, 其中 S_a 为 a 粒子在复合核 B^* 中的分离能。为了便于计算,等式(5)中的能量 E 通常采用入射粒子 a 的能量 E_a , 以避免采用复合核激发能 E_{ex} 时参照反应截面能量对应值可能为负。其中 $N_{\delta\chi}(E)$ 和 $N_{\delta}(E)$ 中的能量 E 为入射 a 粒子的等效能量 E_a 。

为了简化(5)式,避免复杂的 $\sigma_{a_1}^{CN}$, $\sigma_{a_2}^{CN}$ 理论推导及测量 N_{δ_1} , N_{δ_2} 时反应靶中杂质对实验测量的影响,替代比率法通常选取与要推导的目标反应相似的核反应作为参照,使得参照反应与目标反应复合核形成截面在一定误差范围内近似相等,即 $\sigma_{a_1}^{CN}(E) \approx \sigma_{a_2}^{CN}(E)$ 。实验测量中,使得两个替代反应生成复合核数目在一定的误差范围内也相等,即 $N_{\delta_1}(E) \approx N_{\delta_2}(E)$, 在此近似下(5)式便可简化为

$$R(E) = \frac{N_{\delta_1\gamma_1}(E)}{N_{\delta_2\gamma_2}(E)}。 \quad (6)$$

一般选取 a_1 , a_2 为相同核, A_1 , A_2 为相差两个中子的同位素核(避免奇偶性对复合核形成截面的影响,同时也要考虑壳层结构的影响)。同样,考虑实际实验中反应靶制备因素后,一般选取 d_1 , d_2 为同一核, D_1 , D_2 为相差两个中子的同位素核。通过实验测得参照反应与目标反应之间的比率,替代比率法就可以利用参照反应的已知截面间接推导出目标反应的反应截面,避免了替代法中复杂的形成截面理论计算及实验时困难的 N_{δ} 精确测量。

3 用替代比率法测量中重核区放射性核中子俘获反应

目前采用替代比率法推导重核的(n, f)截面在实验上已经得到了验证,对于寿命较短或者制靶十分困难的放射性核中子俘获反应来说,用替代比率

法是一种简单易行的方法。对于推导中子俘获反应 $n+A \rightarrow B^* \rightarrow B+\gamma$ 反应截面时, 选取已知俘获截面的 $n+A_{\text{ref}} \rightarrow B_{\text{ref}}^* \rightarrow B_{\text{ref}}+\gamma_{\text{ref}}$ 反应作为参照, 若 A_{ref} 核是与 A 核相差两个中子的同位素, 在中重和重核区一般可以满足中子俘获形成截面 $\sigma_{n+A}^{\text{CN}}(E_n) \approx \sigma_{n+A_{\text{ref}}}^{\text{CN}}(E_n)$ 。同时实验测量中, 选取替代反应也须考虑到生成 B_{ref}^* 和 B^* 复合核的形成截面在一定的误差范围内近似相等, 即实验中复合核生成数目 $N_{\delta(B+\alpha)}(E_n) \approx N_{\delta(B_{\text{ref}}+\alpha)}(E_n)$, 以简化计算, 式中 E_n 为等效中子能量。

选取参照核时, 由于 s 过程中关键的分支点放射性核都分布在稳定线附近, 可以较为容易地找到与其相差两个中子的稳定同位素作为参照。对于 ^{63}Ni , ^{79}Se 和 ^{85}Kr 等分支点放射性核, 与其相差两个中子的同位素 ^{61}Ni , ^{77}Se 和 ^{83}Kr , 为有自然丰度的稳定同位素, 其中子俘获截面也相对比较容易测量。例如, $^{63}\text{Ni}(n, \gamma)^{64}\text{Ni}$ 可以参照目前已有截面数据的 $^{61}\text{Ni}(n, \gamma)^{62}\text{Ni}$ 反应。根据理论计算, 在低能范围内, $^{61}\text{Ni}+n$ 和 $^{63}\text{Ni}+n$ 形成复合核的形成截面在 5% 的误差范围内近似相等, 如图 2 所示, 因此可认为 $\sigma_{n+A}^{\text{CN}}(E_n) \approx \sigma_{n+A_{\text{ref}}}^{\text{CN}}(E_n)$ 成立。

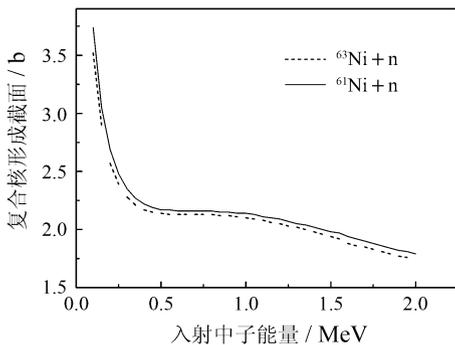


图 2 $^{61}\text{Ni}+n$ 和 $^{63}\text{Ni}+n$ 形成复合核的形成截面

选取替代反应替代目标反应和参照反应时, 须满足两个替代反应的复合核形成截面近似相等, 即相同的实验条件下复合核生成数目 $N_{\delta(B+\alpha)}(E_n) \approx N_{\delta(B_{\text{ref}}+\alpha)}(E_n)$, 以简化理论推导和计算。拾取、熔合反应及轻粒子非弹性散射反应等都可以作为替代反应, 替代参照反应和难以直接测量的目标反应。由于感兴趣的放射性分支点核 ^{63}Ni , ^{79}Se , ^{85}Kr 和参照核 ^{61}Ni , ^{77}Se , ^{83}Kr 中子俘获反应生成核皆为具有自然丰度的同位素, 因此可以选取生成核的轻粒子非弹性散射作为替代反应生成所需复合核。例如, 对

于感兴趣的目标反应 $^{63}\text{Ni}(n, \gamma)^{64}\text{Ni}$, 其参照反应为 $^{61}\text{Ni}(n, \gamma)^{62}\text{Ni}$, 可以用 $^{64}\text{Ni}+^4\text{He} \rightarrow ^{64}\text{Ni}^*+^4\text{He}$ 和 $^{62}\text{Ni}+^4\text{He} \rightarrow ^{62}\text{Ni}^*+^4\text{He}$ 替代中子俘获反应生成 $^{64}\text{Ni}^*$ 和 $^{62}\text{Ni}^*$ 复合核。

由于 ^{64}Ni , ^{62}Ni 是只相差两个中子的同位素, 根据理论计算, 在同样的实验条件下, 用 ^4He 轰击薄靶时生成的 $^{64}\text{Ni}^*$, $^{62}\text{Ni}^*$ 替代复合核的截面在 30% 的误差范围内近似相等, 如图 3 所示。若采用轻粒子非弹性散射作为替代反应, 实验中可利用出射轻粒子与衰变粒子符合测量得到替代反应复合核衰变的比率 $R(E)$, 根据参照核的中子俘获截面即可推导出感兴趣的中子俘获截面。因此, 替代比率法在一定的误差范围内能够适用于 s 过程中关键分支点放射性核的中子俘获截面的推导。

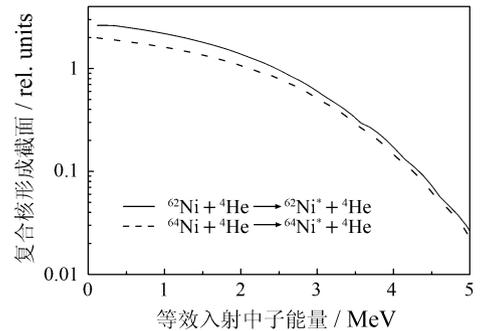


图 3 ^4He 轰击 ^{64}Ni 和 ^{62}Ni 非弹性散射反应形成高激发态余核 $^{64}\text{Ni}^*$ 和 $^{62}\text{Ni}^*$ 截面理论计算

轰击 ^{62}Ni 和 ^{64}Ni 的 ^4He 能量分别为 23.12 和 22.00 MeV; 横轴为等效中子能量 E_n , $E_n = E_{\text{ex}} - S_n$, 其中, E_{ex} 为高激发态余核激发能, S_n 为中子分离能。

用替代比率法推导感兴趣的中子俘获反应截面, 其截面误差主要来源于三方面: 第一为参照核反应的截面误差; 第二为替代反应生成复合核截面带来的误差, 用轻粒子非弹反应作为替代反应带来的误差理论估计不超过 30%, 此项误差随不同的反应类型及不同的反应核变化而变化; 第三为替代实验测量带来的统计误差。用替代比率法推导的截面误差一般不超过 40%, 对于没有实验数据的 s 过程中放射性核中子俘获截面仍有十分积极意义。

在 s 过程中感兴趣的放射性核主要有^[11]: $^{63}\text{Ni}(100 \text{ a})$, $^{79}\text{Se}(10^5 \text{ a})$, $^{85}\text{Kr}(10 \text{ a})$, $^{93}\text{Zr}(10^6 \text{ a})$, $^{94}\text{Nb}(2 \times 10^4 \text{ a})$, $^{99}\text{Tc}(2 \times 10^5 \text{ a})$, $^{151}\text{Sm}(90 \text{ a})$, $^{166}\text{Ho}(10^5 \text{ a})$, 这些核素在星体的核合成过程中具有一定的丰度, 其衰变与中子俘获之间的竞争, 影

响了后续核素的丰度及合成后续核素的快慢。目前一些大型的中子源设备,如CERN的n_TOF装置和美国Oak Ridge实验室已经直接测量了一些放射性核的中子俘获截面,但由于制靶的巨大困难,⁶³Ni,⁷⁹Se和⁸⁵Kr等核都还没有得到可靠的实验数据。

4 结论

目前s过程中感兴趣的放射性核中子俘获截面实验数据缺乏,并且直接测量异常困难,替代比率法作为一种简单易行的间接测量方法为实验测量提供了一条出路。虽然替代比率法中的理论近似使得推导的截面存在较大的误差,但在实验数据缺乏的情况下,实验上误差较大的定量数据也会大大减小天体核合成模型中计算的元素丰度的不确定性。

替代比率法不仅适用于天体物理感兴趣的放射性的中子俘获截面的间接测量,而且也适合中重核区其他短寿命放射性核的中子俘获截面的推导,对于反应堆中裂变反应产物的中子俘获和其他相关的应用也有积极意义。

参考文献 (References):

[1] Bell G I. Rev Mod Phys, 1967, 39: 59.

- [2] Bao Z Y, Beer H, Käppeler F, *et al.* At Data Nucl Data Tables, 2000, 76: 70.
- [3] Daudel R. Rev Sci, 1947, 85: 162.
- [4] Bahcall J N. Phys Rev, 1961, 124: 495.
- [5] Bahcall J N. Phys Rev, 1964, B135: 137.
- [6] Bahcall J N. Phys Rev Lett, 1964, 12: 300.
- [7] Takahashi K, Boyd R N, Mathews G J, *et al.* Phys Rev, 1987, C36: 1 522.
- [8] Klay N, Käppeler F. Phys Rev, 1988, C38: 295.
- [9] Klay N, Käppeler F, Beer H, *et al.* Phys Rev, 1991, C44: 2 839.
- [10] Jung M, Bosch F, Beckert K, *et al.* Phys Rev Lett, 1992, 69: 2 164.
- [11] Bosch F, Faestermann T, Friese J, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, 77: 5 190.
- [12] Günsing F, Leprêtre A, Mounier C, *et al.* Nucl Phys, 2001, A688: 496c.
- [13] Macklin R L. Astrophys Sp Sci, 1985, 115: 71.
- [14] Marrone S, Abbondanno U, Aerts G, *et al.* Phys Rev, 2006, C73: 034 604.
- [15] Escher J E, Dietrich F S. Phys Rev, 2006, C74: 054 601.
- [16] Burke J T, Bernstein L A, Escher J, *et al.* Phys Rev, 2006, C73: 054 604.
- [17] Plettner C, Ai H, Beausang C W, *et al.* Phys Rev, 2005, C71: 051 602(R).
- [18] Dietrich F S, Escher J E. Nucl Phys, 2007, A787: 237c.

Surrogate Ratio Method to Determine Radioactive Nuclei Neutron Capture Cross Section in s-process^{*}

YAN Sheng-quan¹⁾

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The radioactive nuclei neutron capture cross section is very important to nuclearsynthesis and nuclide abundance in s-process, but it is difficult to be measured directly because of the target production. A new method, surrogate ratio method which is developed from surrogate method, could be used to determine the cross section of radioactive nuclei neutron capture. In this paper, the surrogate ratio method was introduced and the feasibility was discussed to deduce the desired neutron capture cross sections with surrogate ratio method.

Key words: radioactive nuclei; neutron capture cross section; surrogate ratio method

* Received date: 13 Mar. 2008; Revised date: 27 Aug. 2008

1) E-mail: panyu@ciae.ac.cn