

WLW 原子核质量模型在 r 过程研究中的应用*

李竹¹⁾ 牛中明²⁾ 孙保华¹⁾ 王宁³⁾ 孟杰^{1)2)†}

1) (北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

2) (北京大学物理学院, 北京 100871)

3) (广西师范大学物理系, 桂林 541004)

(2011年6月3日收到; 2011年7月10日收到修改稿)

本工作利用最近提出的 WLW 宏观 - 微观原子核质量模型, 在经典 r 过程框架下很好地描述了太阳系 r 过程核素丰度分布. 与常用的 FRDM 质量模型相比, 新计算更好地再现了 $A \approx 135$ 和 $A \approx 180$ 质量区的太阳系 r 过程核素丰度, 尤其避免了其他相似计算中 $A = 135$ 附近出现的与观测不符的丰度峰问题. 分析表明, 这种差异可能暗示 WLW 更为合理地处理了壳结构和对称能.

关键词: r 过程, 原子核质量模型, 壳结构演化, 对称能

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

1 引言

宇宙元素的起源是当今核天体物理的研究热点之一. 1957 年, Burbidge 等人提出了恒星核合成理论, 认为快中子俘获过程 (r 过程) 作为恒星核合成过程之一, 能够解释大约一半超铁元素的起源 [1].

尽管 r 过程早在 50 多年前就被提出, 但是目前对 r 过程的研究还相当不足. r 过程研究的难点, 一方面在于很难利用直接观测到的元素丰度来确定其发生的天体物理场所. 一般认为, r 过程发生在高温 ($T \gtrsim 10^9$ K) 高中子数密度 ($n_n \gtrsim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 的环境当中 [2], 当前研究较多的天体物理场所包括超新星爆发 [3,4] 和中子星融合 [5,6] 等. 另一方面, 由于 r 过程路径上的丰中子核素远离 β 稳定线, 其衰变寿命很短, 目前对这些原子核的性质还无法进行系统的实验测量. 因此在当前的研究中, 计算模拟必须依赖于原子核理论模型. 其中最为重要的一个物理量是原子核质量, 一级近似下它直接决定了 r 过程的演化路径.

在过去二十几年里, 原子核质量模型的理论研究取得了很大的进展, 对已有的质量实验数据描述有了较大改进. 较为常用的质量模型

包括有限力程小液滴模型 (FRDM)^[7]、考虑壳弱化 (shell quench) 效应的 Extended Thomas-Fermi plus Strutinsky Integral (ETFSI-Q) 模型^[8]、Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 模型^[9] 和相对论平均场 (RMF) 模型^[10] 等. 然而, 外推至实验上未知的丰中子区时, 不同模型的预言结果差别明显^[11]. 基于这些模型所作的计算^[8,12-14] 表明, 原子核质量表对 r 过程计算丰度的影响很大^[15], 并相应地影响对宇宙核时钟的研究^[16]. 因此, 更为精确可靠的原子核质量模型对 r 过程的研究具有至关重要的意义.

原则上, 相比原子核质量模型, 已有的局域原子核质量公式, 如 G-K 公式^[17] 和 IMME 公式^[18], 都能很好地符合现有的质量数据, 与实验数据的均方根误差一般都在 200 keV 以内. 但当外推至远离稳定线的丰中子核区时, 这些经验公式都不具备很好的外推可靠性. 因此, r 过程的研究仍需要更为可靠的原子核质量模型为其提供核物理信息.

最近, 文献 [19, 20] 发展了一个宏观 - 微观质量模型 (WLW 模型, 文献 [20] 称为 WS* 模型), 通过考虑参数的同位旋依赖性以及对镜像核质量差的限制, 很好地符合了原子核质量的实验数据, 并再

* 北航国家大学生科研训练计划 (SRTP) 项目基金, 新世纪优秀人才支持计划, 973 项目 (批准号: 2007CB815000) 和国家自然科学基金 (批准号: 10975007, 10975008, 11105010 和 11128510) 资助的课题.

† E-mail: mengj@pku.edu.cn

现了丰中子核区的新幻数 $N = 16$ 以及 $Z = 36$ 核区附近一些核素的形状共存现象.

在研究远离 β 稳定线的原子核时, 与在 r 过程研究中广泛使用的 FRDM 模型相比, WLW 模型有三个特点: 1) 参照 Skyrme 能量密度泛函考虑了自旋 - 轨道耦合强度的同位旋依赖性 [19], 而 FRDM 模型只考虑自旋 - 轨道耦合强度的质量依赖. 对于丰中子区的奇特原子核, 这种修正能再现中子滴线附近的新幻数 $N = 16$; 2) 通过对称能系数中引入同位旋依赖项, 有效地考虑了原子核的 Wigner 效应; 3) 考虑了原子核同位旋对称性引起的镜像核约束条件, 即镜像核的结合能在排除库仑能影响后近似相等. 总之, WLW 模型不仅比 FRDM 模型的参数更少, 而且更好地再现了原子核的质量实验数据. 对于质子数 Z 和中子数 N 均大于 8 的 2149 个原子核 [21], 相比 FRDM 质量表, WLW 质量表与实验数据的均方根偏差由 0.669 MeV 缩小至 0.441 MeV. 因此, 将 WLW 质量表应用于 r 过程计算, 对 r 过程的研究将具有重要意义, 同时也可以进一步检验该模型的可靠性.

本文基于经典 r 过程模型, 利用 WLW 质量表作为核物理输入量, 进行 r 过程计算, 并着重讨论原子核质量对 r 过程计算的影响.

2 理论模型

由于 r 过程发生的天体物理条件尚未确定, 因此已有的研究通常利用太阳系 r 过程核素丰度对天体物理条件进行限制. 经典 r 过程模型就是其中一种较为常用的理论方法 [12,22,23], 该方法假设核合成在极高的温度和中子流强下, 以铁族元素作为种子核, 将具有不同中子数密度 ($n_n = 10^{20} - 10^{27.5} \text{ cm}^{-3}$) 的多个分支的计算结果进行叠加来得到 r 过程核素丰度分布 [14,22,23]. 各分支的权重因子 ω 和辐照时间 τ 均取为中子数密度 n_n 的函数 [24], 即

$$\begin{aligned}\tau(n_n) &= a \times n_n^b, \\ \omega(n_n) &= c \times n_n^d.\end{aligned}\quad (1)$$

其中参数 a, b, c, d 通过拟合太阳系 r 过程丰度 [25] 得到.

由于 r 过程发生的环境中中子流强极高, (n, γ) 与 (γ, n) 反应已经达到了平衡 (等待点近似). 在这种假设下, 一条同位素链上相邻同位素的丰度比可

由下式得到:

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

其中, $Y(Z, A)$, $G(Z, A)$ 和 $S_n(Z, A)$ 分别代表核素 (Z, A) 的丰度、配分函数和单中子分离能, \hbar, k, m_μ 则分别是约化普朗克常数、玻尔兹曼常数与原子质量单位. 忽略配分函数及质量数比值的影响, 同位素链上的丰度分布就仅由中子数密度 n_n 、单中子分离能 S_n 及温度 T 三个物理量决定.

如果不考虑裂变影响, 则同位素链间的丰度变化由 β 衰变确定. 一条同位素链丰度随时间的变化由下面微分方程描述:

$$\begin{aligned}\dot{Y}(Z) &= \sum_A [Y(Z-1, A)\lambda_\beta(Z-1, A)] \\ &- \sum_A [Y(Z, A)\lambda_\beta(Z, A)].\end{aligned}\quad (3)$$

其中, $\lambda_\beta^{(Z,A)}$ 代表核素 (Z, A) 的 β 衰变率, $Y(Z) = \sum_A Y(Z, A) = \sum_A P(Z, A)Y(Z)$ 代表每条同位素链的总丰度. 根据方程 (2) 与 (3), 就能给出 r 过程合成的各核素的丰度. 因为 r 过程路径远离 β 稳定线, 由此合成的原子核均是不稳定原子核, 这些原子核将会经历一系列 β 或 α 衰变至稳定原子核, 最终得到稳定核素的 r 过程丰度分布.

3 结果和讨论

在本文中, r 过程涉及到的原子核质量和 β 衰变性质分别取自文献 [20] 与 [26]. 为更好地再现太阳系 r 过程核素丰度, 对于已有实验数据的原子核, 其质量和 β 衰变性质分别取自文献 [11,21] 与 [27].

通过拟合太阳系 r 过程丰度, 利用 WLW 模型得到的最佳天体物理条件是 $\tau(n_n) = 0.887n_n^{0.011}$, $\omega(n_n) = 24750n_n^{-0.157}$. 由于利用 FRDM 质量表最佳拟合太阳系 r 过程丰度得到的结果与采用上述天体物理条件得到的结果类似. 为便于比较, 图 1 给出在相同的天体物理条件下以 FRDM 质量表做为输入量计算的 r 过程丰度. 从图可见, 利用 WLW 质量表得到的计算结果更好地再现了太阳系 r 过程丰度分布, 与 $90 \leq A \leq 205$ 核区的观测丰度数据的均方根偏差由 0.22 降至 0.14.

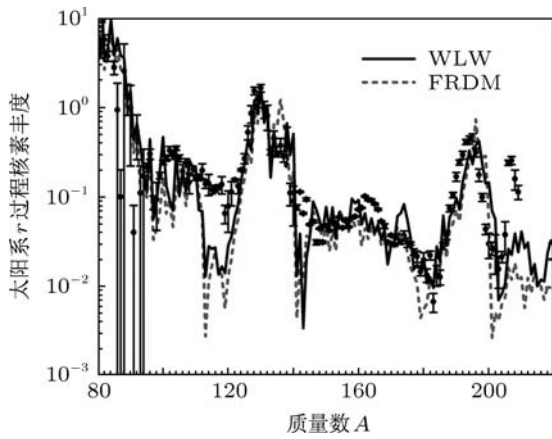


图 1 利用 WLW 和 FRDM 质量表计算得到的 r 过程丰度曲线, 分别用实线和虚线表示. 圆点表示太阳系 r 过程丰度值

在 r 过程第二个峰值 $A = 130$ 之后, 利用 FRDM 质量表得到的结果出现了明显的双峰结

构 ($A \approx 135$), 与观测值偏差较大. 文献 [12] 中的结果表明, ETFSI-Q 和 HFB-13 质量表存在着同样的问题. 而利用 WLW 计算得到的丰度则在 $A \approx 135$ 区很好地符合了观测数据. 为了研究 WLW 与其他质量表的差异, 用 WLW 质量表的数据替换 FRDM 质量表中 $Z = 50$ (元素 Sn) 同位素链上的核素质量, 然后进行 r 过程计算, 结果在图 2(a) 中用点线给出. 可以发现, FRDM 质量表的计算结果在质量数 $A \approx 135$ 区的双峰结构消失, 从而明显改善与太阳系 r 丰度观测值的符合程度.

原子核单中子分离能 S_n 是 r 过程计算的核物理输入量之一, 它直接影响丰度结果. 因此, 为研究 WLW 模型与 FRDM 模型在 $A \approx 135$ 区的差异, 有必要对比研究两模型对 $Z = 50$ 同位素链 S_n 变化行为的预言结果.

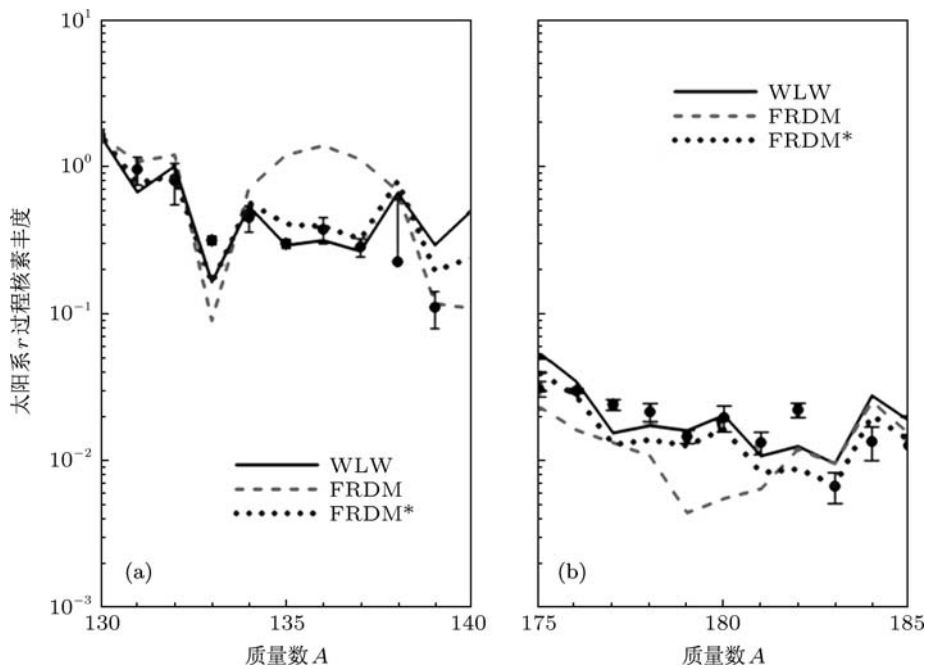


图 2 利用 WLW 与 FRDM 质量表计算的 r 过程丰度在 $A = 135$ 和 $A = 180$ 附近的差别, 结果分别由实线和虚线表示. 太阳系 r 过程丰度观测值由圆点表示. (a) 中点线是将 FRDM 质量表中 $Z = 50$ 同位素链的质量换成 WLW 质量表中相应数据重新计算的结果, 在图中用 FRDM* 标记. (b) 中点线则是将 FRDM 质量表中 $Z = 62, 63$ 两条同位素链的质量换成 WLW 质量表中相应数据重新计算的结果, 在图中也用 FRDM* 标记

图 3(a) 给出了 WLW 模型与 FRDM 模型预测的锡 (Sn, $Z = 50$) 同位素链上核素的平均单中子分离能 $S_{2n}/2$ 在趋向中子滴线时的行为. 可见, 从 ^{134}Sn 到 ^{140}Sn , WLW 模型计算的平均单中子分离能下降幅度 (0.57 MeV) 明显小于 FRDM 模型平均单中子分离能的降幅 (1.15 MeV). 进一步的研究发现, 上述差别主要归因于壳修正能量 (E_{sh}) 的差异, 如图 3(b) 所示. 相似的结论也适用于对 ETFSI-

Q 和 HFB-13 的讨论. 由此导致 FRDM 模型预言 Sn 同位素链的丰度主要集中在 ^{138}Sn 和 ^{140}Sn 两个核素上面, 其中在核素 ^{138}Sn 上集中了该同位素链 60% 以上的丰度, 从而抬高了 $A \approx 135$ 区的 r 过程丰度, 形成与观测不符的双峰结构. 而由于有变化较为平缓的 S_n , WLW 模型预言的 Sn 同位素链丰度分布更加均匀. 对于造成 FRDM 在 $A \approx 135$ 双峰结构的核素 ^{138}Sn , 在它上面只积累了 Sn 同位

素链上 13% 的丰度. 基于此结果得到可能的结论是, 对于 Sn 同位素链, WLW 模型比 FRDM 模型描述了更为合理的壳结构.

相比于 FRDM 结果, WLW 质量表对 r 过程模拟计算的另外一个改进之处是第三个丰度峰 $A = 195$ 之前. 我们用 WLW 质量表的数据替换 FRDM 质量表中 $Z = 62$ 与 $Z = 63$ 两条同位素链上的核素质量, 相应的 r 过程计算结果在图 2(b) 中用点线给出. 从中可见, FRDM 质量表的计算结果在质量数 $A \approx 180$ 区也得到了明显改善.

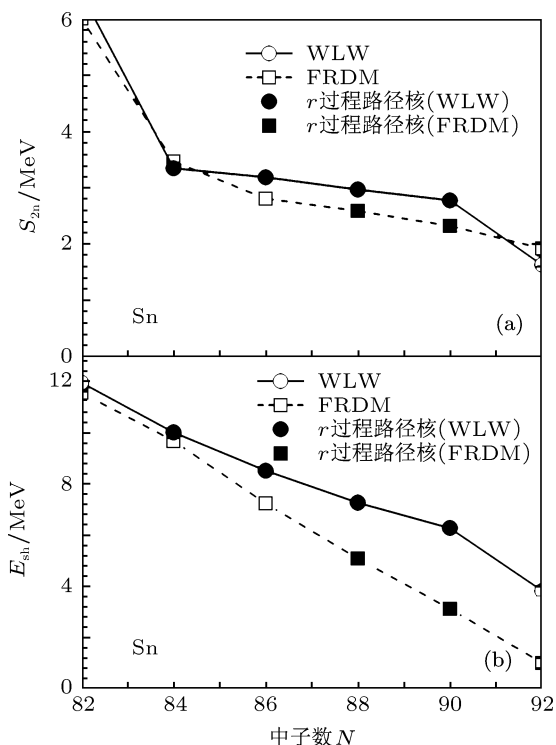


图 3 (a) 是 WLW 质量表与 FRDM 质量表预言的 Sn 同位素链平均单中子分离能随中子数 N 的变化曲线. 实线和虚线分别表示 WLW 和 FRDM 同位素链. 曲线上的实心图标分别表示两模型 r 过程路径上的核素, 即相对丰度占各自同位素链总丰度 10% 以上的原子核. (b) 是 WLW 质量表与 FRDM 质量表预言的 $Z = 50$ 同位素链上核素的壳修正能量随中子数的变化曲线, 图例同 (a)

类似地, 对 $Z = 62$ 与 $Z = 63$ 两条同位素链的研究发现, WLW 模型预言的平均单中子分离能在 $A = 180$ 与 $A = 184$ 处都出现了极小值, 而 FRDM 模型的结果只是在 $A = 182$ 处出现了一个极小值. 这种差异导致 WLW 模型预言的 r 过程路径在 $Z = 62, 63$ 两条同位素链上包含了更多的核素. 丰度在 ^{182}Sm 与 ^{183}Eu 这两个核素上的积累, 使 WLW 质量表的计算结果更好地再现了 $A \approx 180$ 区的太阳系 r 过程丰度值. 导致两模型计算结果在 $A \approx 180$ 区存在差异的原因可能是 WLW 模型比 FRDM 模型更为可靠地描述了对称能和壳结构.

同时应该注意到, 与 FRDM 模型相似, 利用 WLW 模型所做的计算同样低估了 $A = 130$ 峰值之前的丰度. 已有研究表明, 在 $A = 130$ 峰值之前的丰度低估可能是由过高估计了中子数 $N = 82$ 的壳隙 (shell gap)^[12,14,24] 和对未知核素 β 衰变寿命的估计不足^[12] 等因素造成的. 类似地, 我们发现, 先将 WLW 质量表中子幻数 $N = 82$ 处的壳隙能减少 2 MeV, 结果在图 4 中用虚线表示, $A = 120$ 附近的计算丰度得到提升. 接着, 再将原子核 $^{114,116,118}\text{Zr}$ 的 β 衰变寿命增加 5 倍, 结果在图 4 中用点划线表示, 此时 $A = 110$ 附近丰度与观测值的符合程度也得到了很大改善.

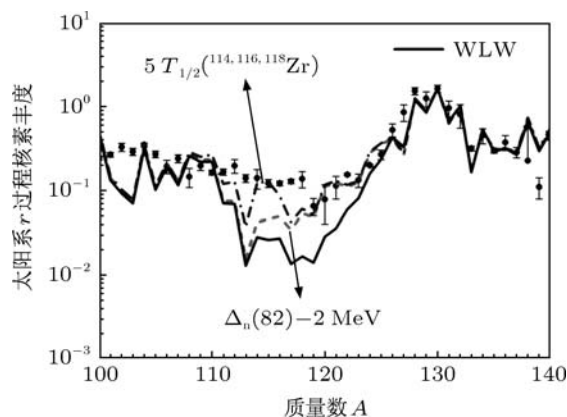


图 4 以 WLW 质量表计算的 r 过程核素丰度由实线表示. 将 WLW 质量表中 $N = 82$ 处壳隙能减少 2 MeV, 结果由虚线表示. 接着将 $^{114,116,118}\text{Zr}$ 三种同位素的 β 衰变寿命增加 5 倍, 结果由点划线表示

4 结论与展望

本文基于经典 r 过程模型, 以 WLW 质量表作为核物理输入量进行计算, 发现结果很好地再现了太阳系 r 过程核素丰度分布, 特别是在 $A \approx 135$ 和 $A \approx 180$ 区, 这可归因于 WLW 模型预言了更为合理的壳结构和对称能. 与 FRDM 质量表类似, 利用 WLW 质量表得到的计算结果同样低估了 $A = 130$ 丰度峰值之前的 r 过程丰度. 通过考虑 $N = 82$ 处可能存在的壳弱化效应和 β 衰变寿命的估计偏差, 修正的计算结果明显改善了对丰度观测数据的符合程度.

由于 r 过程的研究同时受到核物理输入量与天体物理条件的影响, 因此为更深刻地理解 r 过程, 一方面需要更精确的丰中子原子核质量数据, 特别是对 r 过程路径研究具有重要意义的 $N = 82$ 和 $N = 126$ 中子幻数附近的原子核质量; 另一方面, 还需要对尚未确定的 r 过程天体物理条件进行更为深入的探索.

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, Hoyle F 1957 *Rev. Mod. Phys.* **29** 547
- [2] Arnould M, Goriely S, Takahashi K 2007 *Phys. Rep.* **450** 97
- [3] Cameron A G W 2001 *Astrophys. J.* **562** 456
- [4] Ning H, Qian Y Z, Meyer B S 2007 *Astrophys. J.* **667** L159
- [5] Freiburghaus C, Rosswog S, Thielemann F K 1999 *Astrophys. J.* **525** L121
- [6] Goriely S, Demetriou P, Janka H T, Pearson J M, Samyn M 2005 *Astrophys. J.* **758** 587
- [7] Möller P, Nix J R, Myers W D, Swiatecki W J 1995 *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **59** 185
- [8] Pearson J M, Nayak R C, Goriely S 1996 *Phys. Lett. B* **387** 455
- [9] Goriely S, Samyn M, Heenen P H, Pearson J M, Tondeur F 2002 *Phys. Rev. C* **66** 024326
- [10] Geng L S, Toki H, Meng J 2005 *Prog. Theor. Phys.* **113** 785
- [11] 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, Müzenberg 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
- [12] Sun B, Montes F, Geng L S, Geissel H, Litvinov Y A, Meng J 2008 *Phys. Rev. C* **78** 025806
- [13] Wanajo S, Goriely S, Samyn M, Itoh N 2004 *Astrophys. J.* **606** 1057
- [14] Pfeiffer B, Kratz K L, Thielemann F K 1997 *Z. Phys. A* **357** 235
- [15] Sun B, Meng J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2429
- [16] Niu Z M, Sun B, Meng J 2009 *Phys. Rev. C* **80** 065806
- [17] Fu G J, Zhao Y M, Pittel S, Arima A 2010 *Phys. Rev. C* **82** 034304
- [18] Sun B, Zhao P W, Meng J 2011 *Science China G* **54** 210
- [19] Wang N, Liu M, Wu X 2010 *Phys. Rev. C* **81** 044322
- [20] Wang N, Liang Z, Liu M, Wu X 2011 *Phys. Rev. C* **82** 044304
- [21] Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra A H 2003 *Nucl. Phys. A* **729** 3
- [22] Kratz K L, Bitouzet J P, Thielemann F K, Moller P, Pfeiffer B 1993 *Astrophys. J.* **403** 216
- [23] Kratz K L, Farouqi K, Pfeiffer B, Truran J W, Sneden C, Cowan J J 2007 *Astrophys. J.* **662** 39
- [24] Chen B, Dobaczewski J, Kratz K L, Langanke K, Pfeiffer B, Thielemann F K, Vogel P 1995 *Phys. Lett. B* **355** 37
- [25] Simmerer J, Sneden C, Cowan J J, Collier J, Woolf V M, Lawler J E 2004 *Astrophys. J.* **617** 1091
- [26] Möller P, Pfeiffer B, Kratz K L 2003 *Phys. Rev. C* **67** 055802
- [27] National Nuclear Data Center <http://www.nndc.bnl.gov>

WLW mass model in nuclear r -process calculations*

Li Zhu¹⁾ Niu Zhong-Ming²⁾ Sun Bao-Hua¹⁾ Wang Ning³⁾ Meng Jie¹⁾²⁾†

1) (School of Physics Science and Nuclear Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (School of Physics, Peking University, Beijing 100871 China)

3) (Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

(Received 3 June 2011; revised manuscript received 10 July 2011)

Abstract

The rapid neutron-capture process (r -process), which is an interdisciplinary field of astrophysics and nuclear physics, is bound up with various characteristics of thousands of neutron-rich exotic nuclei, such as nuclear masses, and the relevant reactions. By employing the WLW microscopic-macroscopic nuclear mass model developed recently, the solar r -process abundance distribution is well reproduced in the classical r -process approach. In comparison with the well known FRDM model, the present calculation better pictures the nuclear region of $A \approx 135$ and $A \approx 180$, and especially avoids the abundance peaks at $A \approx 135$ often obtained in other calculations. The improvement in the r -process calculation may indicate a more suitable description of the evolution of shell structure and symmetry energy towards the drip line in the WLW model.

Keywords: r -process, nuclear mass model, the evolution of shell structure, symmetry energy

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

* Project supported by the Major State 973 Program (Grant No. 2007CB815000), the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10975007, 10975008, 11105010 and 11128510), Beihang University SRTP and Program for New Century Excellent Talents in University.

† E-mail: mengj@pku.edu.cn