



· 物理学与光电子学 ·

$n + \text{Ce}^{140}$ 核反应数据的理论计算及分析

肖建, 孙秀泉, 张正军

(西北大学 物理学系, 陕西 西安 710069)

摘要: **目的** 为了获得中子入射 Ce^{140} 核反应各种截面的理论计算值, 以与现有的实验结果进行对照, 并检验和完善所用的理论方法。 **方法** 根据中子入射 Ce^{140} 核反应的相关实验数据, 用 APOM94 程序进行光学势自动调参, 得到入射中子能量在 0.01 ~ 20 MeV 之间的一组合适的中子光学势参数。在此基础上, 用 DWUCK4 程序计算了直接非弹性截面, 用 SUNF 程序计算了各反应道的反应截面。 **结果** 分别得到总反应截面、 (n, γ) 道、 (n, α) 道、 (n, p) 道、 (n, xn) 道, 以及形弹、去弹、非弹等的反应截面。 **结论** 理论计算与实验值符合得很好, 所用的理论模型是成功的, 结果已被中国核数据中心(CNDC)收入。

关键词: 光学模型; Hauser-Feshbach 理论; 激子模型; 统一的 Hauser-Feshbach 理论与激子模型 (多步过程半经典理论)

中图分类号: O571.42⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1000-274 X (2004)01-0027-04

1 理论基础

以往采用的复合核平衡态理论 (Hauser-Feshbach 理论) 考虑了角动量 J , 宇称 π 守恒, 适用于低能中子核反应, 可给出中子反应全套数据。但是, 随着入射中子能量的提高, 预平衡发射越来越显著, H-F 理论不能予以考虑, 此时普通激子模型是一种简单有效的方法, 得到广泛应用。然而, 普通激子模型不能考虑角动量、宇称守恒及分立能级结构, 因此上述经典方法是有缺陷的。

针对以上不足, 提出统一的 Hauser-Feshbach 理论与激子模型 (多步半经典理论)^[1] (相应地采用与 $J\pi$ 有关的激子模型), 它可以同时考虑角动量、宇称守恒、分立能级结构和预平衡发射机制。即: 当不计角动量宇称守恒时, 就退化回普通激子理论; 当不计预平衡发射时, 就退化回 H-F 理论。可见, 这是一种较高级的理论方法。该方法已得到初步验证, 结果令人满意。本文采用这一方法作为理论基础。

在这个新的理论框架下, 可以把核反应粒子发

射分解为多步过程, 并分为平衡态、预平衡态发射两部分, 基本的能谱公式如下

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sum_{J\pi} \sigma_a^{J\pi} \sum_n P^{J\pi}(n) \frac{W_b^{J\pi}(n, E^*, \varepsilon)}{W_i^{J\pi}(n, E^*)}$$

式中: $\sigma_a^{J\pi}$ 为反应吸收截面, 且满足 $\sigma_a = \sum_{J\pi} \sigma_a^{J\pi}$, 可由光学模型给出; $P^{J\pi}(n)$ 为 $J\pi$ 态下 n 激子态占据几率, 可由解 $J\pi$ 激子主方程给出; $W_b^{J\pi}(n, E^*, \varepsilon)$ 为 n 激子态发射能量为 ε 的 b 粒子的发射率, E^* 为有效激发能^[1]; $W_i^{J\pi}(n, E^*)$ 为总发射率, $W_i^{J\pi}(n, E^*) = \sum_{\varepsilon} W_b^{J\pi}(n, E^*, \varepsilon)$ 。

本文处理的是中子入射能量小于 20 MeV 的情形, 对于预平衡机制, 只需考虑 $n = 3$ 的激子态, 因此, 上述能谱公式简化为

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sum_{J\pi} \sigma_a^{J\pi} \cdot \left\{ P^{J\pi}(3) \frac{W_b^{J\pi}(3, E^*, \varepsilon)}{W_i^{J\pi}(3, E^*)} + Q^{J\pi}(3) \frac{W_b^{J\pi}(E^*, \varepsilon)}{W_i^{J\pi}(E^*)} \right\}$$

式中: $Q^{J\pi}(3) = 1 - P^{J\pi}(3)$ 是 $J\pi$ 态达到平衡态的几率, $W_b^{J\pi}(E^*, \varepsilon)$ 是平衡态 (H-F 理论) 发射率。

收稿日期: 2002-01-25

基金项目: 中国核数据专项基金资助项目

作者简介: 肖建 (1970-), 男, 陕西西安人, 西北大学硕士生, 从事理论物理 (核反应理论与计算核物理) 研究。

这样,可给出一次、二次以至多次粒子发射的能谱与截面公式^[1]。

另外,基于统计过程的 γ 俘获辐射的俘获截面 $\sigma_{obs}^{\gamma}(\epsilon)$ 计算所需的强度函数 $f_{\lambda}(E, \epsilon)$ 仍采用标准的和推广的 Lorentzian 型公式^[1]。但是,对于中、重核,基于非统计过程的 γ 产生数据理论需要被考虑,否则无法解释 γ 能谱高能端强度较大的分立谱线和过高的 γ 多重数理论值。非统计过程的俘获辐射截面 $\sigma_{\gamma}(n, \gamma)$ 公式由文献^[1]给出。综上,就能计算 γ 道俘获辐射截面。

最后,虽然 Ce^{140} 是重核,反冲效应很弱,但反冲核效应也被严格考虑^[1]。

以上的多步过程半经典理论,构成了 SUNF 程序^[2]的主要理论基础。

APOM94 程序^[3]的理论基础是熟知的光学模型(唯象的),利用该程序可以进行有关截面的理论计算和光学势调参。

DWUCK4 程序基于扭曲波玻恩近似,用于计算直接去弹截面,可在中核数据中心得到。

2 实验数据来源

天然 Ce 主要由 Ce^{140} 和 Ce^{142} 组成,其丰度分别

表 1 Ce^{140} 光学势参数

Tab. 1 The optical potential parameters of Ce^{140}

I	N	P	A	He3	D	T
A_r	0.786 22	0.550 00	0.610 00	0.720 00	0.760 00	0.760 00
A_n	0.385 90	0.450 00	0.560 00	0.880 00	0.750 00	0.750 00
A_v	0.580 01	0.450 00	0.560 00	0.880 00	0.750 00	0.750 00
A_{so}	0.786 22	0.550 00	0.610 00	0.720 00	0.760 00	0.760 00
R_r	1.202 38	1.100 00	1.350 00	1.200 00	1.370 00	1.370 00
R_n	1.333 44	1.100 00	1.350 00	1.400 00	1.430 00	1.400 00
R_v	1.310 36	1.100 00	1.350 00	1.400 00	1.430 00	1.400 00
R_{so}	1.202 38	1.100 00	1.350 00	1.200 00	1.370 00	1.370 00
R_c	1.250 00	1.250 00	1.400 00	1.300 00	1.300 00	1.300 00
U_0	-1.561 5	-2.700 0	21.000 0	46.588 9	0.0	38.143 0
U_1	0.218 83	0.320 00	0.250 00	-0.330 0	0.0	-0.330 0
U_2	-0.074 7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V_0	53.046 4	58.000 0	133.000	151.900	80.130 0	165.000
V_1	-0.098 9	-0.320 0	-0.030 0	-0.170 0	0.0	-0.170 0
V_2	-0.015 4	0.0	0.010 0	0.0	0.0	0.0
V_3	-24.000	24.000 0	0.0	50.000 0	0.0	-6.400 0
V_4	0.0	0.400 00	0.0	0.0	2.200 00	0.0
V_{so}	6.200 00	6.200 00	0.0	2.500 00	7.000 00	2.500 00
W_0	6.817 10	16.800 0	0.0	0.0	14.894 0	0.0
W_1	0.640 88	-0.050 0	0.0	0.0	0.0	0.0
W_2	-12.000	12.000 0	0.0	0.0	0.0	0.0

2) 把上述光学势参数和靶核前 3 个能级的能量、自旋、宇称、形变的数据作为程序 DWUCK4 的输入参数,计算了直接非弹性截面。

3) 能级密度参数、对修正参数、K 值:

为 88.48% 和 11.08%。另外两种核 Ce^{141} 和 Ce^{144} 是不稳定核,总丰度只有 0.44%。 Ce^{140} 的实验数据全部取自 EXFOR 库。天然 Ce 的总截面有大量实验数据, Ce^{140} 只有一家总截面实验数据, $Ce^{140}(n, \gamma)$, $Ce^{140}(n, 2n)$, $Ce^{140}(n, \alpha)$, $Ce^{140}(n, p)$ 有实验数据可供参考。

3 主要理论参数的计算

1) 光学势 根据 Ce 各核素及各反应道相关的总截面、弹性散射截面、去弹截面,以及弹性散射角分布的实验值,利用基于光学模型的 APOM94 程序自动调节中子光学势参数,并计算截面、角分布的理论值,直到理论值与实验值符合得很好,就认为得到了一组合适的光学势参数。

计算中考虑到 Ce^{140} 的丰度达 88.48%,且天然 Ce 的总截面和 Ce^{140} 的总截面实际上没有差别,所以在调节 Ce^{140} 光学势参数时充分利用了天然的 Ce 和 Ce^{140} 的总截面的实验数据。

用 APOM94 程序得到一组合适的 Ce^{140} 光学势参数(见表 1)。

对于 Ce^{140} 的各反应道见表 2。

4) 把上述光学势参数、直接非弹截面、能级密度、对修正参数、K 值作为程序 SUNF 的输入参数,即可计算出各反应道的全套数据。

表2 3个辅助参数

Tab.2 Three subsidiary parameters

反应道	(n,n')	(n,2n)	(n,3n)
能级密度	11.905	15.334	15.640
对修正	2.25	1.000	2.570

Ce^{140} 激子模型的 K 值为 900。

4 计算结果及分析

图 1a 与图 1b 分别是 Ce^{140} 总截面理论计算值与天然 Ce 的总截面实验数据及 Ce^{140} 的总截面实验数据的比较, 两者符合得很好。

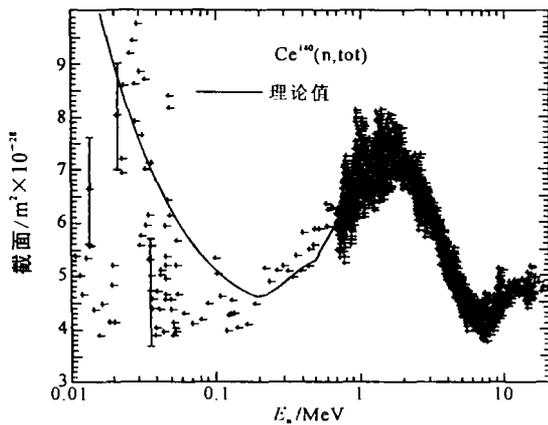


图 1a Ce^{140} 总截面理论值与天然 Ce 的总截面实验值的比较
Fig. 1a The comparison between the theoretical total cross sections of Ce^{140} and the experimental total cross section data of nature Ce

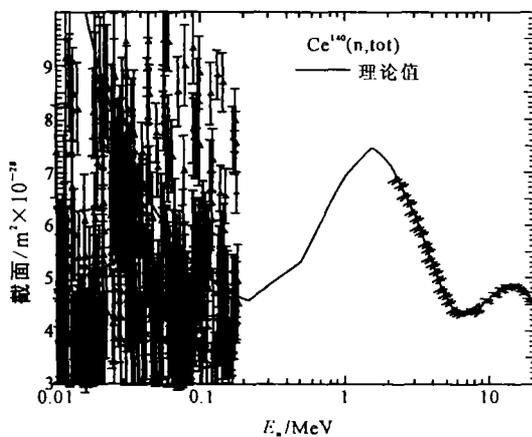


图 1b Ce^{140} 总截面理论值与 Ce^{140} 的总截面实验值的比较
Fig. 1b The comparison between the theoretical total cross sections of Ce^{140} and the experimental total cross sections of Ce^{140}

图 2 是 $\text{Ce}^{140}(n, \gamma)$ 截面理论计算值与实验数据的比较, 两者符合得很好。

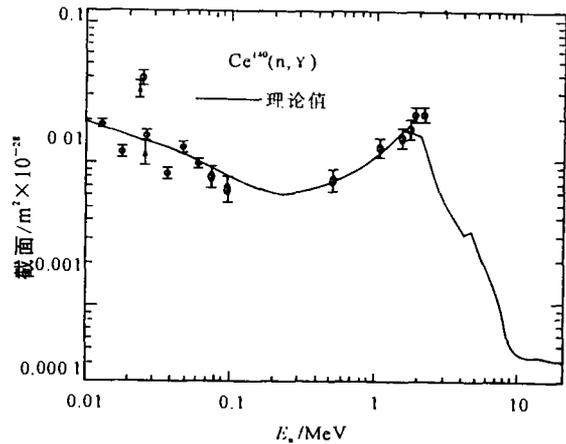


图 2 $\text{Ce}^{140}(n, \gamma)$ 截面理论值与实验值的比较
Fig. 2 The comparison between the theoretical cross sections of $\text{Ce}^{140}(n, \gamma)$ and the experimental data respectively

图 3 是 $\text{Ce}^{140}(n, p)$ 截面理论计算值与实验数据的比较, 两者符合得很好。

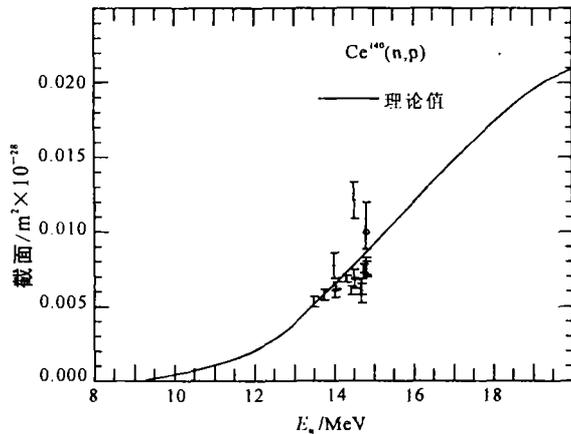


图 3 $\text{Ce}^{140}(n, p)$ 截面理论值与实验值的比较
Fig. 3 The comparison between the theoretical cross sections of $\text{Ce}^{140}(n, p)$ and the experimental data respectively

图 4 是 $\text{Ce}^{140}(n, xn)$ 截面理论值与 $\text{Ce}^{140}(n, 2n)$

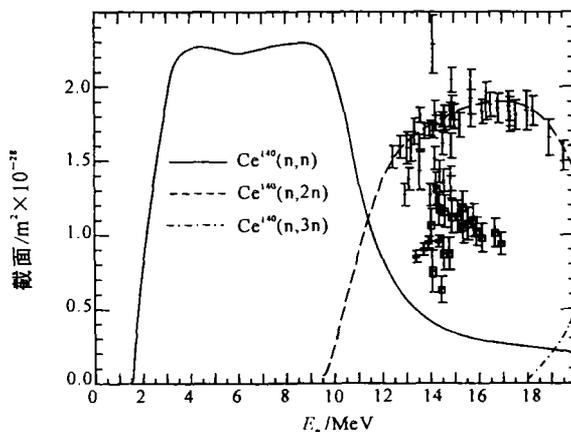


图 4 $\text{Ce}^{140}(n, xn)$ 截面理论值与 $\text{Ce}^{140}(n, 2n)$ 截面实验值的比较
Fig. 4 The comparison between the theoretical cross sections of $\text{Ce}^{140}(n, xn)$ and the experimental data of $\text{Ce}^{140}(n, 2n)$

反应道截面实验数据的比较,图中 M 态的实验数据明显偏低。从图可见 $Ce^{140}(n,2n)$ 截面的理论值与相应的实验数据符合得很好。

5 小 结

应用基于“统一的 H-F 理论与激子模型”的新的核反应理论模型,对能区在 0.01 ~ 20 MeV 的 $n + Ce^{140}$ 核反应各反应道作了计算和分析。计算中,严格考虑了预平衡过程的角动量、宇称守恒,并考虑了反冲核效应。

结果表明,新的核反应理论模型计算结果很好

地与实验一致。本文的结果经过编评,已被中国核数据中心(CNDC)收入评价库,并于 2001 年 10 月提交国际原子能机构参加国际比对。

参考文献:

- [1] 张竞上. 中子物理[M]. 北京:原子能出版社,2001.
- [2] ZHANG Jing-shang. User Manual of Unf Code[M]. Beijing: China Nuclear Industry Audio & Visual Publishing House, 2001.
- [3] SHEN Qing-biao. A code APMN for automatically searching optical potential parameters below 300 MeV[J]. Communication of Nuclear Data Progress, 2001, 25: 19-22.

(编辑 亢小玉)

Calculation and recommendation of $n + Ce^{140}$ reactions

XIAO Jian, SUN Xiu-quan, ZHANG Zheng-jun

(Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract; Aim To obtain Various theoretical cross sections of $n + Ce^{140}$ nuclear reactions, so that can have a contrast with experimental data, then to test and improve the theoretical model we used. **Methods** According to the experimental data of $n + Ce^{140}$ nuclear reactions respectively, the code APOM94 was used to adjust the optical potential parameters automatically. A set of proper neutron optical potential parameters was obtained in the energy range from 0.01 to 20 MeV. Based on this results, the code DWUCK4 was used to calculate the direct inelastic scattering cross section. The code SUNF was used to calculate the cross sections of all channels. **Results** The total cross sections, (n, γ) , (n, α) , (n, p) , (n, xn) , elastic, nonelastic, inelastic cross sections was obtained respectively. **Conclusion** The theoretical results are in good agreement with experimental data. The theoretical model used is successful. The results have been accepted by China Nuclear Data Centre (CNDC).

Key words: optical model; Hauser-Feshbach theory; exciton model; the unified Hauser-Feshbach theory and excitation model (semi - classical model of multi - step nuclear reaction)

· 学术动态 ·

陕西青年科学家论坛在西北工业大学举行

第八届陕西青年科学家论坛于 2003 年 11 月 25 日在西北工业大学举行。西安交通大学、西北大学、西北工业大学、西安电子科技大学等 38 家单位的专家、学者共 70 余人参加了此次论坛。陕西省信息产业厅厅长武积有、陕西省教育厅副厅长张炜、西北工业大学副校长高德远、陕西省科协党组书记、常务副主席等领导出席。本刊 5 位编辑参加会议,并特约了一些稿件。论坛由陕西省青年科技工作者联合会副理事长、本刊主编姚远编审主持。

本次论坛以“信息化带动和提升传统产业、促进陕西省经济跨越式发展”为主题,分别就“陕西省信息化建设中存在的问题、发展现状及未来发展思路、目标、任务”、“政府信息化的社会责任和主要问题”、“防汛水利信息化发展构思与建设对策”、“企业信息化与软件开发”、“陕西省软件产业的展望”等专题进行了大会发言。与会专家结合陕西的具体情况,经过认真讨论和集思广益,向省上提出了“加快推动我省国民经济和信息化建设”的书面建议,建议内容有 7 条,供决策时参考。

(薛 鲍)