

中子与^{116,118,120,122,124}Sn 反应非弹性散射的 理论计算和分析*

韩银录

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 应用现有的中子与原子核 Sn 及其同位素反应的总截面,去弹性散射截面,弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据,获得一组普适的中子与 Sn 及其同位素反应的光学模型势参数.利用这组光学模型势参数,扭曲波玻恩近似理论,核反应 Hauser-Feshbach 理论和预平衡反应的激子模型,计算和分析了中子与^{116,118,120,122,124}Sn 反应分离能级的非弹性散射截面和角分布.理论计算与实验数据进行了分析比较.

关键词 光学模型势 非弹性散射 扭曲波玻恩近似理论

1 引言

Sn 的同位素^{116,118,120,122,124}Sn 是单满壳核($Z = 50$),通过分析中子与其反应的非弹性散射截面和角分布实验数据,并应用理论模型,可以得到原子核结构的一些信息.例如,原子核能级密度参数,振动模型的四级和八级变形参数等,另外比较从中子反应获得的结果与从质子反应获得的结果,可研究核反应中的同位旋效应.因此,系统的计算和分析中子与核反应的非弹性散射截面和角分布,对原子核结构的研究以及反应截面的系统学规律具有重要的意义,为推广到非稳定核的理论计算提供方法.

在以前的国内外研究工作中,只对某一个核或某一能量区间的非弹性散射截面和角分布进行计算分析;而光学势仅通过符合弹性散射角分布的实验数据得到;另外复合核反应过程没有考虑.本工作利用 Sn 和其同位素的中子反应总截面,去弹性散射和弹性散射截面,弹性散射角分布的实验数据,给出入射中子能量在 30MeV 以下,一组普适的中子与 Sn 及其同位素反应光学模型势参数;应用扭曲波玻恩近似理论,核反应 Hauser-Feshbach 理论和预平衡反应激子模型,系统计算和分析中子与^{116,118,120,122,124}Sn

反应分离能级的非弹性散射截面和角分布.

2 理论模型和参数

光学模型描述核反应的势散射和吸收,给出中子与原子核反应的总截面,去弹性散射截面,弹性散射截面,弹性散射角分布,复合核和预平衡发射过程的传输系数.光学模型势也为扭曲波玻恩近似理论提供了核子与原子核的相互作用势.在本工作中 Woods-Saxon^[1]势被应用.由于天然核 Sn 有 10 个同位素,但是,仅天然核有较多的总截面、去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据,而单个同位素只有较少的弹性散射角分布的实验数据.我们选择了丰度最大的¹²⁰Sn(32.59%),利用天然核 Sn 的中子反应的总截面,去弹性散射截面,弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据和¹²⁰Sn 的弹性散射角分布的实验数据以及光学模型程序 APOM^[2],在入射中子能量 $E_n \leq 30\text{MeV}$,获得了一组普适的¹²⁰Sn 中子光学模型势参数.结果为:

光学模型势的实部

$$V = 51.0653 - 0.2792 E_n + 0.001383 E_n^2 - 24.0(N - Z)/A, \quad (1)$$

2002-06-05 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022603)资助

虚部势的面吸收部分

$$W_s = 10.1201 + 0.004743 E_n - 12.0(N - Z)/A, \quad (2)$$

虚部势的体吸收部分

$$W_v = -2.1008 + 0.1770 E_n - 0.002475 E_n^2, \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势

$$U_{so} = 6.2, \quad (4)$$

光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋-轨道耦合势的半径分别为

$$r_r = 1.2317, r_s = 1.2558, r_v = 1.5283, r_{so} = 1.2317. \quad (5)$$

光学模型势的实部、虚部势的面吸收、虚部势的体吸收、自旋-轨道耦合势的弥散宽度分别为

$$a_r = 0.6845, a_s = 0.5109, a_v = 0.6629, a_{so} = 0.6845. \quad (6)$$

其中 Z, N, A 分别为靶核电荷数, 中子数和质量数. E_n 是入射中子能量. V, W_s, W_v, U_{so}, E_n 以 MeV 为单位, $r_r, r_s, r_v, r_{so}, a_r, a_s, a_v, a_{so}$ 以 fm 为单位.

应用这一组光学模型势参数, 分别对中子与天然核 Sn 及其 10 个同位素的反应总截面, 弹性散射截面, 弹性散射角分布和天然核 Sn 的去弹性散射截面进行了理论计算并与其相应的实验数据进行了比较. 结果表明, 我们得到的普适中子光学模型势参数能够很好的再现实验数据并适用于天然核 Sn 及其 10 个同位素. 作为例子, 图 1 和图 2 仅给出天然核的总截面和¹¹⁶Sn 的中子弹性散射角分布与实验数据的比较.

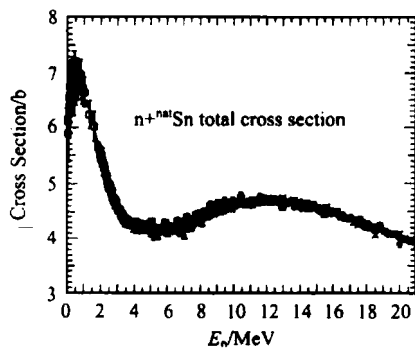


图 1 n + nat Sn 反应总截面与实验数据的比较

扭曲波玻恩近似理论描述核反应的直接反应过程, 这种理论认为入射粒子(平面波)进入靶核后, 受到光学势作用而使平面波发生扭曲, 变成扭曲波, 以此扭曲波为出发点, 作玻恩近似, 求得初、末态跃迁

T 矩阵, 在此基础上求得散射截面^[3]. 统一的 Hausser-Feshbach 和激子模型理论^[4,5] 分别描述核反应的平衡和预平衡反应过程. 详细介绍可参阅有关文献.

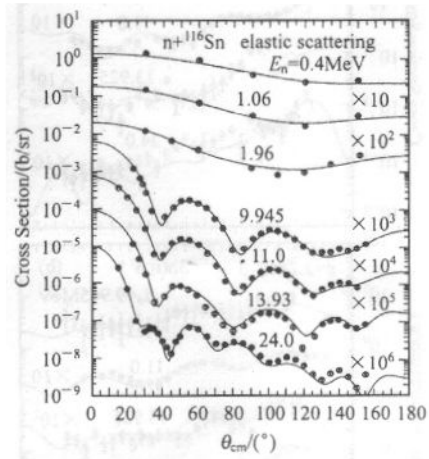


图 2 n + ¹¹⁶Sn 反应弹性散射角分布与实验数据的比较

3 计算结果及分析

应用我们获得的光学模型势参数, 光学模型, 扭曲波玻恩近似理论, Hausser-Feshbach 理论和激子模型, 分别计算了中子与¹¹⁶Sn, ¹¹⁸Sn, ¹²⁰Sn, ¹²²Sn, ¹²⁴Sn 反应的截面和角分布. 计算中所使用的主程序是 UNF^[4] 程序, 得到的变形参数, 能级密度参数 a 和对修正 Δ 在表 1 中给出.

表 1 变形参数和能级密度参数

	2 ⁺	3 ⁻	a	Δ
¹¹⁶ Sn	0.113	0.173	16.574	0.79
¹¹⁸ Sn	0.125	0.190	16.631	0.62
¹²⁰ Sn	0.120	0.175	16.010	0.63
¹²² Sn	0.104	0.150	15.479	0.52
¹²⁴ Sn	0.100	0.130	13.472	0.82

图 3 是入射中子能量分别为 9.945, 11.0, 13.925 和 24.0 MeV, 中子与¹¹⁶Sn 反应时, ¹¹⁶Sn 的第一激发态(激发能、自旋和宇称为 $\epsilon = 1.2936 2^+$) 和第六激发态($\epsilon = 2.2662 3^-$) 的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据^[5-8] 的比较. 从图中可以看出, 第六激发态的角分布理论计算结果与实验数据不论是峰谷的位置, 还是振幅的大小都符合的很好. 而第一激发态的角分布理论计算结果在入射中子能量分别为 9.945 和 11.0 MeV 与实验数据很好的符合; 入射中子能量分别为 13.925 和 24.0 MeV 时, 在部分角度, 理论计算值小于实验值. 图 4 给出了中子与¹¹⁸Sn 反应分离能级角分布理论计算结果与实验

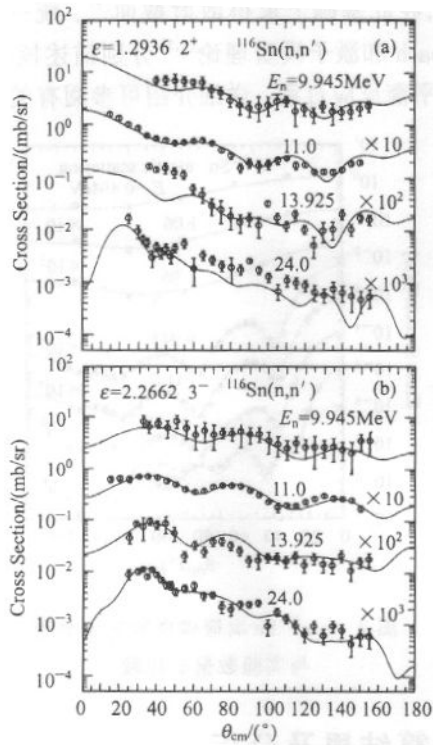


图 3 $n + {}^{116}\text{Sn}$ 反应非弹性散射角分布与实验数据的比较

数据的比较,理论计算结果与实验数据符合很好,特别是与文献[9]中的实验数据.中子与 ${}^{120}\text{Sn}$ 反应分离能级角分布理论计算与实验数据的比较结果显示,除在入射中子能量为13.923MeV,第一激发态的部分角度为 ${}^{116}\text{Sn}$ 存在相同问题外,理论计算与实验数据符合很好,如图5所示.另外也计算和分析了中子能量为11.0MeV,中子与 ${}^{122}\text{Sn}$ 和 ${}^{124}\text{Sn}$ 反应的分离能级角分布,结果显示,理论计算与实验符合很好.

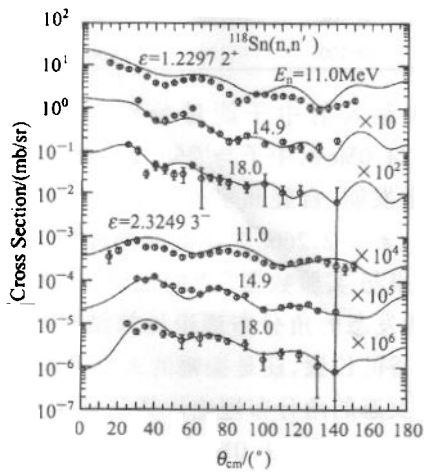


图 4 $n + {}^{118}\text{Sn}$ 反应非弹性散射角分布与实验数据的比较

图3和图5中,文献[6]给出的实验数据在入射中子能量分别为13.925和13.923MeV, ${}^{116}\text{Sn}$ 和 ${}^{120}\text{Sn}$ 第一激发态非弹性散射角分布在角度为 $40^\circ-50^\circ$ 范围内与理论计算结果不一致.通过系统分析 ${}^{116}\text{Sn}$, ${}^{118}\text{Sn}$, ${}^{120}\text{Sn}$, ${}^{122}\text{Sn}$, ${}^{124}\text{Sn}$ 第一激发态非弹性散射角分布在所有入射中子能量点的结果可以看出,入射中子能量分别为13.925和13.923MeV, ${}^{116}\text{Sn}$ 和 ${}^{120}\text{Sn}$ 实验数据在角度为 $40^\circ-55^\circ$ 明显偏离系统学规律,而理论结果是可信的.

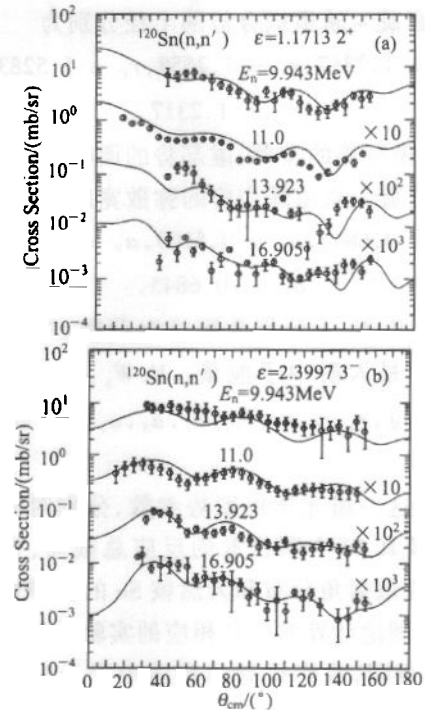


图 5 $n + {}^{120}\text{Sn}$ 反应非弹性散射角分布与实验数据的比较

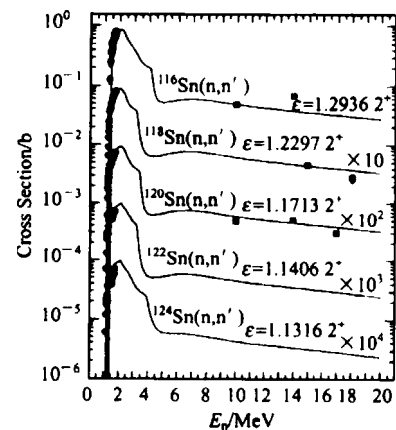


图 6 $n + {}^{116,118,120,122,124}\text{Sn}$ 反应非弹性散射截面与实验数据的比较

图6和图7分别给出了中子与 ${}^{116}\text{Sn}$, ${}^{118}\text{Sn}$, ${}^{120}\text{Sn}$,

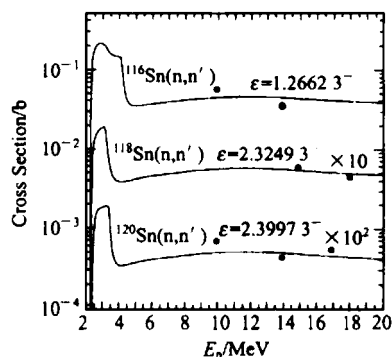


图 7 $n + {}^{116,118,120}\text{Sn}$ 反应非弹性散射截面
与实验数据的比较

¹²²Sn, ¹²⁴Sn 反应时, 靶核的第一激发态和较高激发态的非弹性散射截面理论计算与实验的比较. 理论结果与实验基本一致.

从理论计算中也可以看出, 在入射中子能量大约 5 MeV 以下, 分离能级的非弹性散射截面主要是复合核反应的贡献, 在 5 MeV 以上, 主要是直接反应的贡献. 分离能级的非弹性散射角分布的形状由直

接反应给出.

4 结语

在中子与天然核 Sn 和其同位素反应的总截面, 去弹性散射截面, 弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据基础上, 应用光学模型程序 APOM, 在入射中子能量在 0.1—30 MeV 范围内, 获得了一组普适的¹²⁰Sn 核的中子光学模型势参数; 这组参数能很好再现中子与天然核 Sn 和其同位素反应的总截面, 去弹性散射截面, 弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据. 应用光学模型势参数, 扭曲波玻恩近似理论, Hauser-Feshbach 理论和激子模型计算程序 UNF, 对中子与^{116,118,120,122,124}Sn 反应分离能级的非弹性散射截面和角分布进行了理论计算和分析, 理论计算结果和实验数据进行了比较, 计算结果与实验数据很好的符合.

参考文献 (References)

- 1 Becchetti Jr F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, **182**:1190
- 2 SHEN Qing-Biao. Comm. Nucl. Data Prog., 1992, **7**:43
- 3 Kunz P D. Distorted Wave Code DWUCK4, University of Colorado
- 4 ZHANG Jing-Shang. CNIC-01616, CNDC-0032, 2001
- 5 SUN Z, WANG S, ZHANG J et al. Z. Phys., 1982, **A305**:61
- 6 Guss P P, Byrd R C et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:405
- 7 Finlay R W, Rapaport J et al. Nucl. Phys., 1980, **A338**:45
- 8 Finlay R W, Hadizad M H et al. Nucl. Phys., 1980, **A344**:257
- 9 Chiba S, Yamanouti Y et al. Nucl. Sci. Tech., 1988, **25**:511

Theoretical Calculations and Analysis of Inelastic Scattering for $n + {}^{116,118,120,122,124}\text{Sn}$ Reactions *

HAN Yin-Lu

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

Abstract Based on experimental data of total, nonelastic, elastic cross section and elastic scattering angular distributions for $n + \text{Sn}$ reactions, a set of neutron optical model potential parameters is obtained. The inelastic scattering cross sections and angular distributions of discrete levels are calculated and analyzed by the distorted wave Born approximation theory based on the unified Hauser-Feshbach theory and the exciton model. With the fitting procedure the neutron optical model potential parameters are obtained. The results indicate that the systematicness of the inelastic scattering cross sections can be given for $n + {}^{116,118,120,122,124}\text{Sn}$ which are all in good agreement with experimental data.

Key words neutron optical model potential, inelastic scattering, distorted wave Born approximation

Received 5 June 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G1999022603)