

中子与 $^{63,65}\text{Cu}$ 反应的理论计算*

韩银录^{1;1)} 韩健² 张正军²

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (西北大学物理系 西安 710069)

摘要 根据中子与天然 Cu 及其同位素反应的总截面, 去弹截面和弹性散射角分布的实验数据, 得到中子的光学模型势参数; 应用得到的光学模型势参数, 光学模型, 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论, 以及扭曲波玻恩近似理论, 系统计算和分析了中子与 $^{63,65}\text{Cu}$ 反应的非弹散射角分布和双微分截面, 理论结果与实验很好的一致.

关键词 光学模型势 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论 扭曲波玻恩近似理论 非弹散射角分布 双微分截面

1 引言

通过分析中子与原子核反应的非弹性散射角分布实验数据, 并应用相关的理论模型, 可以得到原子核结构的一些信息. 例如, 原子核振动模型的四级和八级变形参数等, 同时比较从中子反应获得的实验测量结果与从质子反应获得的实验测量结果, 可研究核反应中的同位旋效应. 由于天然 Cu 及其同位素是非常重要的结构材料核, 在核科学和工程中具有重要的应用. 因此, 系统的计算和分析中子与核反应的非弹性散射角分布, 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.

在以前的国内外研究工作中, 只对某一个核或者某一能量的非弹性散射角分布进行计算分析; 而光学模型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 Cu 和其同位素的中子反应的总截面, 去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据, 给出入射中子能量在 20 MeV 以下, 一组普适的中子与 Cu 及其同位素反应的光学模型势参数; 应用扭曲波玻恩近似理论, 核反应统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论, 系统地计算和分析中子与 $^{63,65}\text{Cu}$ 反应分立能级的非弹性散射角分布和总发射中子的双微分截面.

2 理论模型和参数

光学模型描述核反应的势散射和吸收, 并且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. 在本工作中应用了 Woods-Saxon^[1] 势形式. 利用天然核中子反应的总截面, 去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据, ^{63}Cu 的弹性散射角分布的实验数据以及光学模型程序 APMN^[2], 在入射中子能量 $E_n \leq 20\text{MeV}$, 获得了一组普适的 ^{63}Cu 中子光学模型势参数. 结果为:

光学模型势的实部:

$$V = 55.2639 - 0.2787E - 0.009475E^2 - 24.0(N - Z)/A, \quad (1)$$

虚部势的面吸收部分:

$$W_s = 8.2088 - 0.05412E - 12.0(N - Z)/A, \quad (2)$$

虚部势的体吸收部分:

$$W_v = -1.0539 + 0.2476E - 0.007602E^2, \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势:

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

2005 - 01 - 10 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022603)资助

1) E-mail: han@iris.ciae.ac.cn

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

$$\begin{aligned} r_r &= 1.1816, & r_s &= 1.2897, \\ r_v &= 1.7574, & r_{so} &= 1.1816. \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} a_r &= 0.6949, & a_s &= 0.5396, \\ a_v &= 0.1505, & a_{so} &= 0.6949. \end{aligned} \quad (6)$$

其中 Z, N, A 分别表示靶核的电荷数, 中子数和质量数. E 是入射中子在质心系中的能量. V, W_s, W_v, U_{so}, E 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和 $^{63,65}\text{Cu}$ 的反应总截面, 弹性散射截面, 弹性散射角分布和天然核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, 得到的普适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及其同位素. 图 1、图 2 和图 3 给出 ^{63}Cu 中子总截面和弹性散射角分布, ^{65}Cu 弹性散射角分布的理论计算结果与实验数据的比较, 结果表示与实验测量数据得到了很好的符合.

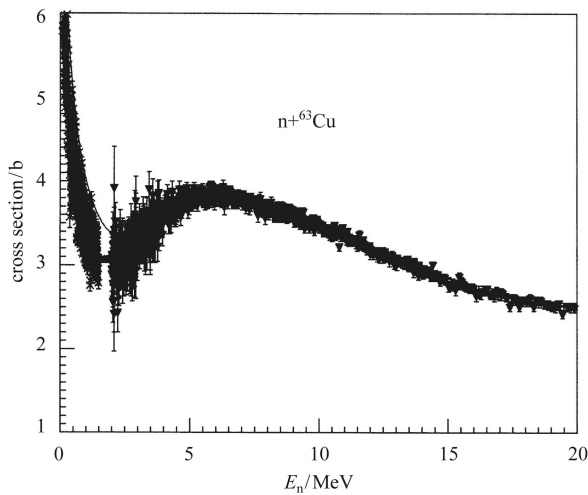


图 1 中子与 ^{63}Cu 反应的总截面

扭曲波玻恩近似理论描述核反应的直接反应过程^[3]. 统一的 Hauser-Feshbach 和激子模型理论^[4] 分别描述核反应的平衡和预平衡反应过程.

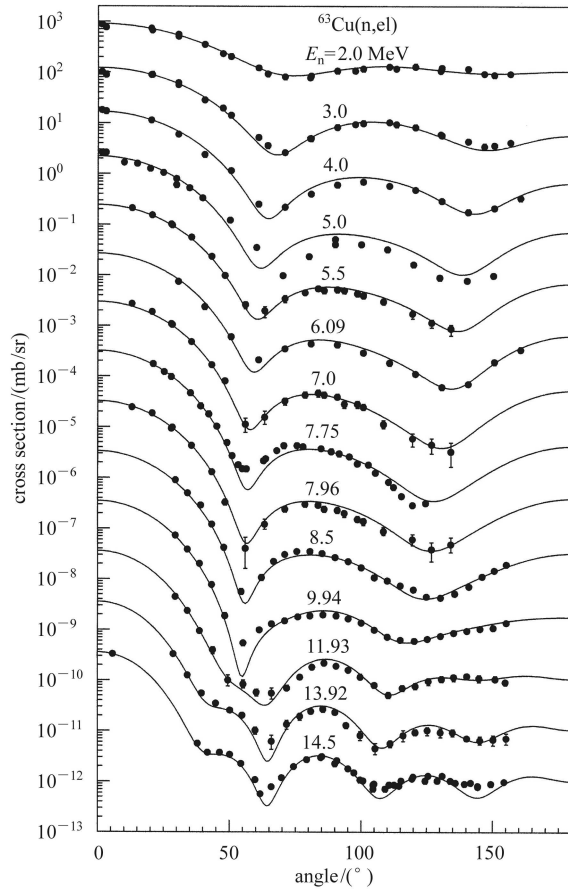


图 2 ^{63}Cu 中子弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^{13}$.

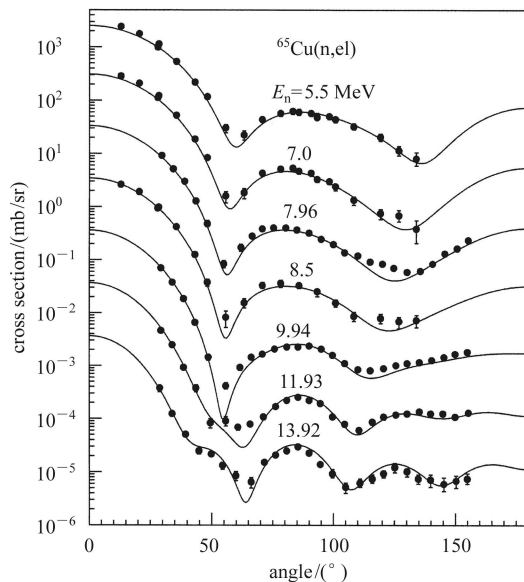


图 3 ^{65}Cu 中子弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^6$.

3 计算结果及分析

应用获得的光学模型势参数和包括光学模型, 统一的Hauser-Feshbach和激子模型理论的计算程序UNF^[4], 扭曲波玻恩近似理论, 分别计算了中子与^{63,65}Cu反应的截面和角分布. 通过符合分立能级角分布和发射中子的双微分截面实验数据, 得到了相应能级的形变参数, 并在表1中给出.

表1 激发态的形变参数 β

⁶³ Cu			⁶⁵ Cu		
ε	$J\pi$	β	ε	$J\pi$	β
0.6697	1/2 ⁻	0.07	0.7706	1/2 ⁻	0.07
0.9621	5/2 ⁻	0.11	1.1156	5/2 ⁻	0.11
1.3270	7/2 ⁻	0.13	1.4818	7/2 ⁻	0.09
1.4121	5/2 ⁻	0.07	1.6234	5/2 ⁻	0.07
2.5358	5/2 ⁻	0.10	2.6497	5/2 ⁻	0.07
3.0430	5/2 ⁻	0.10			

注: 其中 ε 表示分立能级能量, $J\pi$ 分别表示该能级的自旋与宇称

中子与^{63,65}Cu反应分立能级角分布的实验数据, 除⁶⁵Cu第2激发态(激发能、自旋和宇称为 $\varepsilon = 1.1156$ 5/2⁻)有实验测量的结果外, 实验测量的数据是第1激发态至第5激发态总的结果. 这就很难唯一的确定每条分立能级的变形参数. 因此, 考虑了发射中子的双微分截面实验数据.

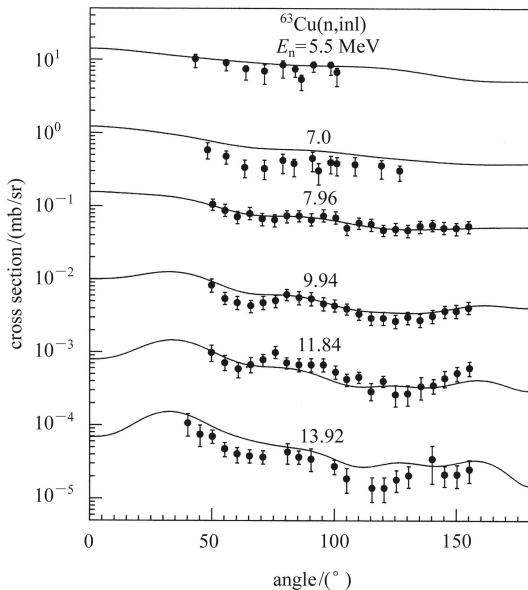


图4 ⁶³Cu激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^5$.

图4是入射中子能量分别为5.5, 7.0, 7.96, 9.94, 11.84和13.92MeV, 中子与⁶³Cu反应的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据^[5, 6]的比较. 其中中子能量为5.5和7.0MeV时, 是⁶³Cu的第3激发态(激发能、自旋和宇称为 $\varepsilon = 1.3270$ 7/2⁻)、第4激发态($\varepsilon = 1.4121$ 5/2⁻)和第5激发态($\varepsilon = 1.5470$ 3/2⁻)的贡献. 中子能量为7.96和9.94MeV时, 是⁶³Cu的第1激发态($\varepsilon = 0.6697$ 1/2⁻)、第2激发态($\varepsilon = 0.9621$ 5/2⁻)和第3激发态的贡献. 中子能量为11.84和13.92MeV时, 是⁶³Cu的第1激发态至第5激发态的贡献. 从图中可以看出, 在入射中子能量分别为5.5, 7.96, 9.94和11.84MeV时, 分立能级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. 而入射中子能量分别为7.0和13.92MeV时, 理论计算值与实验值有一定分歧, 但理论计算结果的形状与实验结果相同.

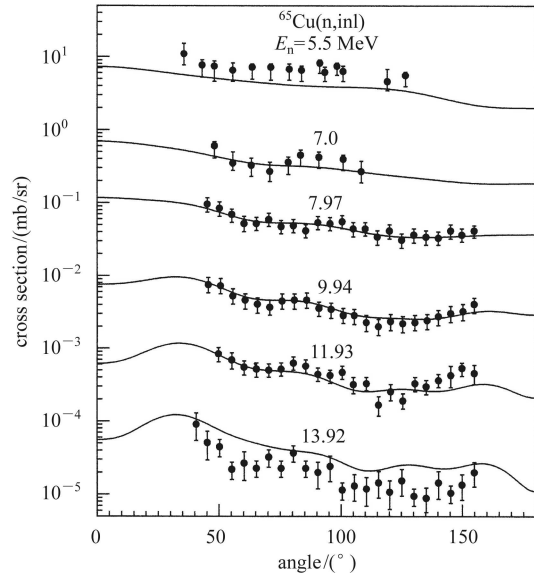


图5 ⁶⁵Cu激发态中子非弹性散射角分布
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^5$.

图5是入射中子能量分别为5.5, 7.0, 7.97, 9.94, 11.93和13.92MeV, 中子与⁶⁵Cu反应的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据^[5, 6]的比较. 其中中子能量为5.5和7.0MeV时, 是⁶⁵Cu的第3激发态(激发能、自旋和宇称为 $\varepsilon = 1.4818$ 7/2⁻)、第4激发态($\varepsilon = 1.6235$ 5/2⁻)和第5激发态($\varepsilon = 1.7250$ 3/2⁻)的贡献. 中子能量为7.97和9.94MeV时, 是⁶⁵Cu的第1激发态($\varepsilon = 0.7706$ 1/2⁻)、第2激发态和第3激发态的贡献. 中子能量为11.93和13.92MeV时, 是⁶⁵Cu的第1激发态至第5激发态的贡献. 从图中可以看出, 在入射中子能量分别为7.0, 7.97, 9.94和11.93MeV时, 分

立能级的角分布理论计算结果与实验数据符合的很好. 而入射中子能量为 5.5MeV 时, 理论计算值小于实验值; 入射中子能量为 13.92MeV 时, 理论计算值大于实验值. 而理论计算结果的形状与实验结果相同.

图 4 和图 5 的结果表明, 参考文献[5]和参考文献[6]中的实验结果有分歧. 而中子能量为 13.92MeV 时, 理论计算结果大于实验结果. 实验结果需要进一步检验.

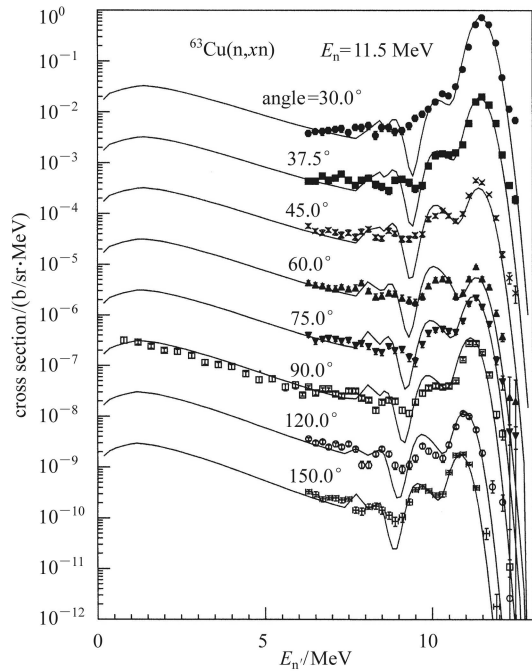


图 6 ^{63}Cu 总中子发射双微分截面
 从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^7$.

在所有的反应截面与实验结果符合的基础上, 对中子发射的双微分截面进行了理论计算. 图 6 给出了入射中子能量为 11.5MeV, 中子与 ^{63}Cu 反应的中子发射双微分截面理论与实验结果^[7]的比较. 理论与实验结果很好地一致. 其中两个小峰是较高的激发态非弹性道的贡献, 两个大的峰是弹性道和第 1 激发态至第 5 激发态非弹性道的贡献. 图 7 给出了入射中子能量为 14.1MeV, 中子发射双微分截面理论与实验结果^[8]的比较. 由于分立能级的直接非弹性散射的贡献包括在计算中, 中子发射能量大于 10MeV 时, 理论计算结果与实验结果不论是峰谷的位置, 还是振幅的大小都很好一致. 图 8 给出了入射中子能量为 18.0MeV, 中子发射双微分截面理论与实验结果^[8]的比较. 由于随着入射中子能量的增加, 分立能级的贡献越来越小, 连续能级的贡献越来越大, 因此, 很难区分第 1 激发态至第 5 激发态非弹性道的贡献和弹性道的贡献. 双微分

截面的结果表明, 分立能级非弹性散射的理论计算结果是合理的.

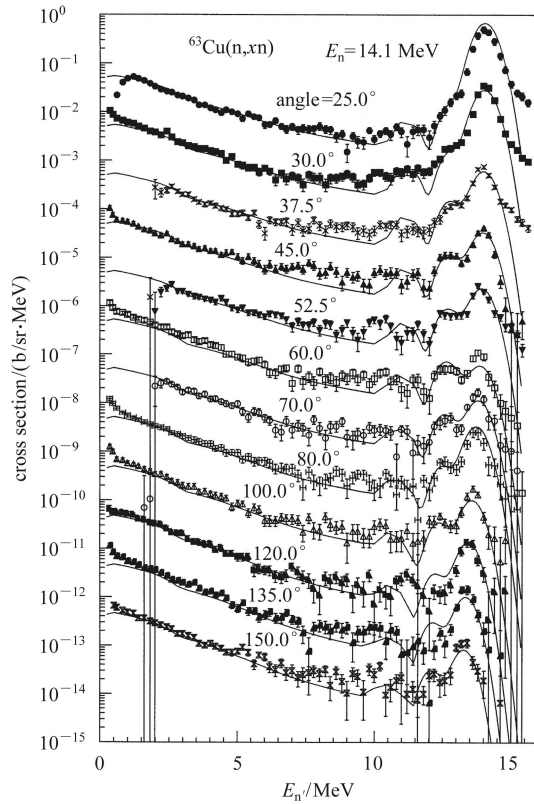


图 7 ^{63}Cu 总中子发射双微分截面
 从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^{11}$.

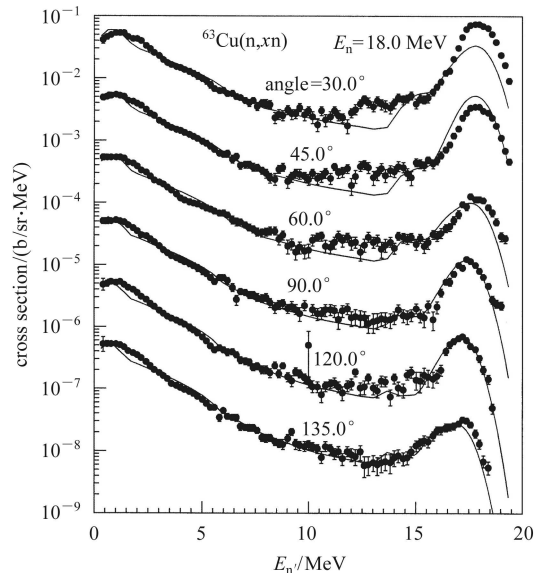


图 8 ^{63}Cu 总中子发射双微分截面
 从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^5$.

中子与 ^{65}Cu 反应的中子发射双微分截面理论与实验结果也进行了比较. 理论与实验结果很好地一致.

4 结语

在中子与天然核Cu和其同位素反应的总截面, 去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APMN, 在入射中子能量从1—20MeV范围内, 获得了一组普适的 $^{63,65}\text{Cu}$ 核的中子光学模型势参数; 这组参数能很好的再现中子与天

然核Cu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, 统一的Hauser-Feshbach和激子模型理论计算程序UNF, 对中子与 $^{63,65}\text{Cu}$ 反应分立能级的非弹性散射角分布和中子发射的双微分截面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. 在此基础上, 得到了中子核反应中原子核分立能级的变形参数, 为研究原子核的同位旋相关性质提供了合理的基础数据.

参考文献(References)

- 1 Becchetti Jr F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, **182**: 1190
- 2 SHEN Qing-Biao. Nucl. Sci. Eng., 2002, **141**: 78
- 3 Kunz P D. Distorted Wave Code DWUCK4. University of Colorado
- 4 ZHANG Jing-Shang. Nucl. Sci. Eng., 2002, **142**: 207
- 5 Kinney W E, Perey F G. ORNL-4908, 1974
- 6 El-kadi S M, Nelson C E et al. Nucl. Phys., 1982, **A390**: 509
- 7 Soda D, Matsuyama S et al. JAERI-96-008, 1995. 146
- 8 Baba M, Ishikawa M et al. NETU-49, 1987

Theoretical Calculations for $n+^{63,65}\text{Cu}$ Reactions*

HAN Yin-Lu^{1,1)} HAN Jian² ZHANG Zheng-Jun²

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

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

Abstract By fitting the experimental data of total, inelastic and elastic scattering angular distributions for $n+\text{Cu}$ reactions, a set of neutron optical model potential parameters is obtained. The inelastic scattering angular distributions of discrete levels and double differential cross sections are calculated and analyzed by using the distorted wave Born approximation theory, the unified Hauser-Feshbach model and the exciton model. By fitting data the neutron level deduced deformation parameters are obtained. The results indicate that the calculated results of the inelastic scattering angular distributions and the total outgoing neutron double-differential cross sections for $n+^{63,65}\text{Cu}$ can be obtained, which are all in good agreement with the experimental data.

Key words optical model potential, the unified Hauser-Feshbach and the exciton model theories, distorted wave Born approximation theory, inelastic scattering angular distribution, double differential cross section