

中子与裂变核 ^{238}U 反应双微分截面的理论分析*

韩银录¹⁾

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 根据中子与原子核 U 及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,获得了入射中子能量 0.1—20MeV 的一组普适中子与 U 及其同位素反应的光学模型势参数. 应用光学模型,核裂变理论,耦合道理论,扭曲波玻恩近似理论,宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论和预平衡反应的激子模型,计算和分析了中子与 ^{238}U 反应的所有截面、角分布、能谱和双微分截面. 理论计算与实验数据进行了分析比较.

关键词 光学模型势 耦合道理论 扭曲波玻恩近似理论 激子模型 核裂变

1 引言

原子核 ^{238}U 是大变形核,通过分析中子与其反应的实验数据,并应用理论模型,可以得到原子核结构的一些信息. 例如,原子核变形参数等. 而发射中子的双微分截面可以给出原子核的分离能级和连续能级的结构、发射粒子和原子核裂变的基本信息. 因此,系统的计算和分析中子与变形核反应的双微分截面,对原子核结构和反应的研究有重要的意义.

近年来,随着大型实验设备和实验方法的建立,精确测量可裂变核发射粒子双微分截面的工作在国内外研究中陆续进行,并给出了一些数据. 而应用理论模型系统的计算和分析双微分截面实验数据的工作还较缺乏.

本工作利用 U 和其同位素的中子反应的总截面,去弹性散射和弹性散射角分布的实验数据,给出入射中子能量在 20MeV 以下,一组普适的中子与 U 及其同位素反应的光学模型势参数;应用包括光学模型,核裂变理论,宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论和激子模型的理论模型程序 UNF 系列^[1],以及耦合道理论和扭曲波玻恩近似理论,系统的计算和分析中子与 ^{238}U 反应截面,角分布和双微分截面.

2 理论模型和参数

光学模型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转移系数. 光学模型势为耦合道理论和扭曲波玻恩近似理论提供了核子与原子核的相互作用势. 本工作中 Woods-Saxon^[2] 势被应用. 利用天然核 U 和 ^{238}U 的中子反应总截面,去弹性散射截面和弹性散射角分布的实验数据和光学模型程序 APMN^[3],在入射中子能量 $E_n \leq 20\text{MeV}$,获得了一组普适的 ^{238}U 中子光学模型势参数. 结果为:

光学模型势的实部

$$V = 50.1518 - 0.3370 E_n + 0.01283 E_n^2 - 24.0(N - Z)/A, \quad (1)$$

虚部势的面吸收部分

$$W_s = 6.4970 + 0.1544 E_n - 12.0(N - Z)/A, \quad (2)$$

虚部势的体吸收部分

$$W_v = 0.1676 + 0.0226 E_n - 0.001548 E_n^2, \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势

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

2003-07-22 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

$$\begin{aligned} r_r &= 1.2416, r_s = 1.2428, \\ r_v &= 1.8429, r_{so} = 1.2416. \end{aligned} \quad (5)$$

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为

$$\begin{aligned} a_r &= 0.5828, a_s = 0.7342, \\ a_v &= 0.7020, a_{so} = 0.5828. \end{aligned} \quad (6)$$

其中 Z, N, A 分别表示靶核的电荷数, 中子数和质量数. E_n 是入射中子的能量. 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, 对中子与 ^{238}U 的反应总截面, 弹性散射截面和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, 得到的普适中子光学模型势参数能够很好的再现实验数据. 图 1 给出 ^{238}U 的中子去弹性散射截面与实验数据的比较.

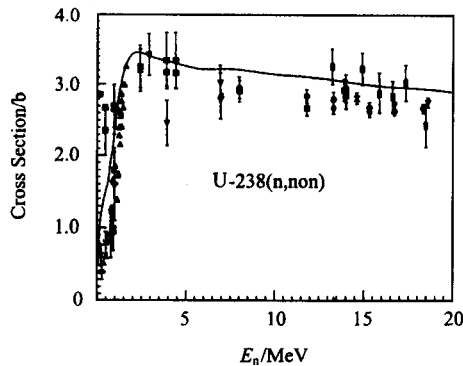


图 1 ^{238}U 的去弹性散射截面与实验数据的比较

耦合道理论和扭曲波玻恩近似理论^[4]描述核反应的直接过程, 核裂变理论描述核裂变, Hauser-Feshbach 理论^[5]和激子模型^[6]分别描述核反应的平衡和预平衡反应过程.

3 计算结果及分析

应用获得的光学模型势参数, 核反应理论模型程序 UNF 系列, 耦合道理论, 扭曲波玻恩近似理论, 计算了中子与 ^{238}U 反应的截面、角分布、能谱和双微分截面. 图 2 是入射中子能量分别为 3.0, 4.5, 5.0, 5.5, 5.9, 6.5, 7.14, 7.5, 7.81, 8.03, 8.4, 9.06, 9.5, 10.0, 14.2, 15.0 MeV 中子与 ^{238}U 反应弹性散射和非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据^[7-10]

的比较. 由于考虑了 ^{238}U 的第一转动带的贡献, 从图中可以看出, 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得很好. ^{238}U 的形变参数为: $\beta_2 = 0.195, \beta_4 = 0.082$.

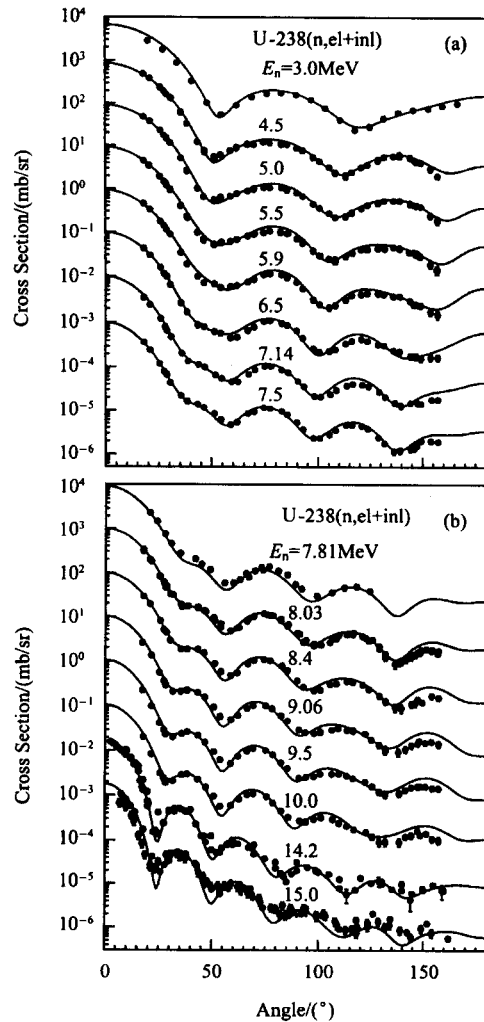


图 2 ^{238}U 的中子弹性散射角分布与实验数据的比较
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^7$.

在入射中子能量小于 20 MeV, 中子与 ^{238}U 的反应道主要是 $(n, \gamma), (n, n'), (n, 2n), (n, 3n)$ 和裂变反应, 并有实验测量结果, 理论计算结果很好的与实验符合. 图 3 是裂变截面理论与实验^[11]的比较. 对于其他反应道, 没有实验测量的结果, 理论模型合理的预言了所有反应道的结果. 在此基础上, 计算了发射中子双微分截面.

图 4 给出了入射中子能量在 1.79 和 2.19 MeV, 发射角度在 120° 时, 发射中子双微分截面的理论结果与实验^[12]的比较, 理论结果与实验一致. 图中的结构是 ^{238}U 分离能级的贡献, 而当发射中子的能量

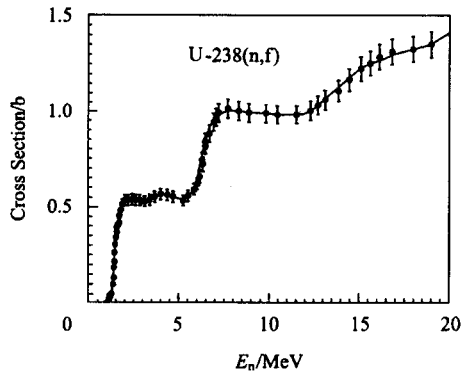


图 3 ^{238}U 裂变截面与实验数据的比较

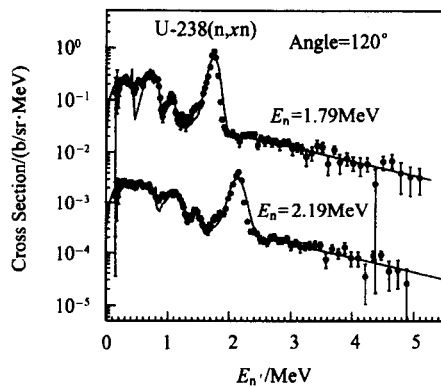


图 4 入射中子能量在 1.79 和 2.19 MeV 时发射中子双微分截面

从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^2$.

大于入射中子的能量时,是核裂变截面的贡献.图 5 给出了入射中子能量在 6.1 MeV,不同发射角度时,发射中子双微分截面的理论结果与实验^[13]的比较,理论结果与实验很好一致.两个峰是弹性道和非弹

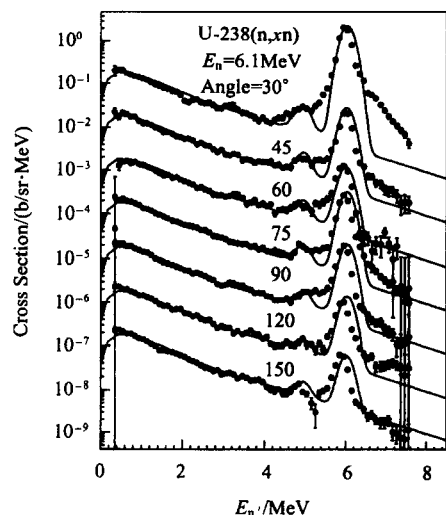


图 5 入射中子能量在 6.1 MeV 时发射中子双微分截面
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, \dots, 10^6$.

性道的分离能级的贡献,发射中子的能量小于 5 MeV 主要是非弹性道的连续能级的贡献.

图 6 为入射中子能量在 9.6 MeV,不同发射角度时,发射中子双微分截面理论结果与实验^[14]的比较.在此能量,非弹散射,(n,2n)反应和核裂变都有贡献.

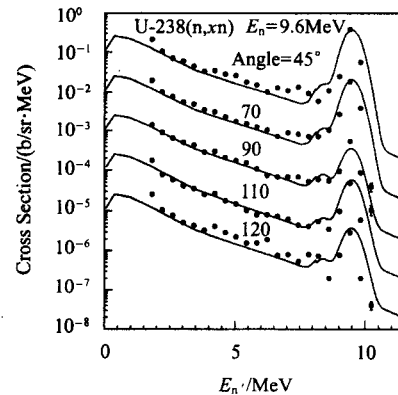


图 6 入射中子能量在 6.1 MeV 时发射中子双微分截面
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, \dots, 10^4$.

图 7 和 8 分别给出了入射中子能量^[13,15]在 14.05 和 18.0 MeV,发射中子双微分截面.从图中可以看出,在较高的人射能量时,主要是各个反应道中连续能级的贡献,并包括较多的反应道.在 18.0 MeV,裂变道的贡献最大.

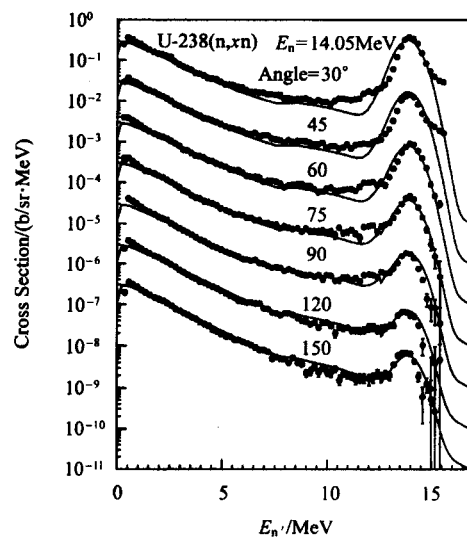


图 7 入射中子能量在 14.05 MeV 时发射中子双微分截面
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, \dots, 10^6$.

同时发射中子能谱的理论结果与实验很好的一致.发射中子双微分截面的理论计算和实验的一致也表明,理论计算的非弹性散射截面,(n,2n)反应截

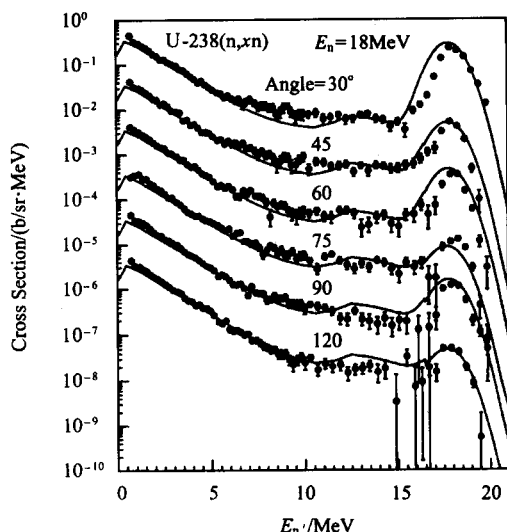


图 8 入射中子能量在 14.05 MeV 时发射中子双微分截面
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 $10^0, 10^1, \dots, 10^5$.

面, $(n, 3n)$ 反应截面和裂变截面及裂变谱是合理的.

4 结语

应用中子与天然核 U 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, 以及核反应光学模型, 核裂变理论, 耦合道理论, 扭曲波玻恩近似理论, 宽度涨落修正的 Hauser-Feshbach 理论, 预平衡反应的激子模型在入射中子能量从 0.1—20 MeV 范围内, 对中子与 ^{230}U 反应截面、能谱和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. 因此, 本文使用的理论模型可以合理地分析在中子与大变形核, 一般的变形核^[16], 球形核^[17] 和轻核^[18] 相互作用时, 在入射中子能量小于 20 MeV 的实验数据.

参考文献 (References)

- 1 ZHANG Jing-Shang. Nucl. Sci. Eng., 2002, **142**:207
- 2 Becchetti Jr F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, **182**:1190
- 3 SHEN Qing-Biao. Nucl. Sci. Eng., 2002, **141**:78
- 4 Kunz P D. Distorted Wave Code DWUCK4, University of Colorado
- 5 ZHANG Jing-Shang. Commun. Nucl. Data Prog., 1992, **7**:15
- 6 SUN Z, WANG S, ZHANG J, ZHUO Y. Z. Phys., 1982, **A305**:61
- 7 Smith A B, Chiba S. Ann. Nucl. Energy, 1996, **23**:459
- 8 Annand J, Galloway R. J. Phys., 1985, **G11**:1341
- 9 SHEN Guan-Ran et al. Chinese Nucl. Phys., 1984, **6**:193
- 10 Hudson Jr C I, Walker W S, Berko S. Phys. Rev., 1962, **128**:1271
- 11 Oleg Shcherbakov et al. J. Nucl. Sci. Tech., 2002, **2**(Supplement): 230
- 12 Kornilov N V, Kagalenko A B. et al. Nucl. Sci. Eng., 1995, **120**:55
- 13 Baba M et al. J. Nucl. Sci. Tech., 1989, **27**:601
- 14 QI Bu-Jia et al. Chinese Nucl. Phys., 1992, **14**:147
- 15 Matsuyama S, Baba M et al. J. Nucl. Sci. Tech., 1990, **27**:601
- 16 HAN Yin-Lu. HEP & NP, 2003, **27**:436(in Chinese)
(韩银录. 高能物理与核物理, 2003, **27**:436)
- 17 HAN Yin-Lu. HEP & NP, 2004, **28**(1):48(in Chinese)
(韩银录. 高能物理与核物理, 2004, **28**(1):48)
- 18 FAN Xiao-Li. HEP & NP, 2001, **25**:859(in Chinese)
(范晓丽等. 高能物理与核物理, 2001, **25**:859)

Theoretical Analysis of Double Differential Cross Sections for $n + ^{238}\text{U}$ Reaction *

HAN Yin-Lu¹⁾

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

Abstract Based on the new measurements of total, nonelastic, elastic cross section and elastic scattering angular distributions for $n + \text{U}$ reactions, a set of neutron optical model potential parameters is obtained in the region of incident neutron energy from 0.1 to 20 MeV. The cross sections, angular distributions, energy spectra and double differential cross sections are calculated and analyzed by optical model, nuclear fission theory, distorted wave Born approximation theory, coupled channel theory, the unified Hauser-Feshbach theory, as well as exciton model. The results indicate that our theoretical model can reasonably analysis $n + ^{238}\text{U}$ reaction data with neutron energy lower than 20 MeV.

Key words optical model potential, the distorted wave Born approximation, exciton model, coupled channel theory, nuclear fission

Received 22 July 2003

* Supported by China Ministry of Science and Technology (G1999022603)

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