

# 中能中子与<sup>208</sup>Pb 反应的理论计算和分析\*

韩银录<sup>1)</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 在中子与原子核 Pb 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基础上,获得了入射中子能量从 1—300MeV 的一组普适中子与 Pb 及其同位素反应的光学模型势参数.应用光学模型,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和核内级联模型,计算和分析了中子与<sup>208</sup>Pb 反应的所有截面、角分布和能谱.理论计算与实验数据进行了分析比较.

**关键词** 光学模型势 扭曲波玻恩近似理论 激子模型 核内级联模型 中能核反应

## 1 引言

加速器驱动的洁净核能系统成为国际核物理界广泛关注的领域,而与此密切相关的中高能核反应理论及其反应数据的研究,起着重要作用.

原子核<sup>208</sup>Pb 是双满壳核( $Z = 82, N = 206$ ),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截面的实验数据得到.本工作利用 Pb 和其同位素的中子反应的总截面,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 300MeV 以下,一组普适的中子与 Pb 及其同位素反应的光学模型势参数;应用光学模型,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和核内级联模型,系统的计算和分析中子与<sup>208</sup>Pb 反应截面,角分布和能谱.

## 2 理论模型和参数

光学模型描述核反应的势散射阶段,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<sup>[1]</sup>势被应用.利用天然核 Pb 和<sup>208</sup>Pb 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光学模型程序 APMN<sup>[2]</sup>,在入射中子能量  $E_n \leq 300\text{MeV}$ ,获得了一组普适的<sup>208</sup>Pb 中子光学模型势参数.结果为

光学模型势的实部:

$$V = 53.10122 - 0.29553 E_n + 0.00061481 E_n^2 - 24.0(N - Z)/A, \quad (1)$$

虚部势的面吸收部分:

$$W_s = 11.08513 - 0.057739 E_n - 12.0(N - Z)/A, \quad (2)$$

2003-04-24 收稿

\* 国家重点基础研究规划项目(G1999022603)资助

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

虚部势的体吸收部分:

$$W_v = -1.80331 + 0.12819 E_n - 0.00026511 E_n^2, \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} r_r &= 1.22873, r_s = 1.14462, \\ r_v &= 1.17580, r_{so} = 1.22873. \end{aligned} \quad (5)$$

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:

$$\begin{aligned} a_r &= 0.65849, a_s = 0.63153, \\ a_v &= 0.76447, a_{so} = 0.65849. \end{aligned} \quad (6)$$

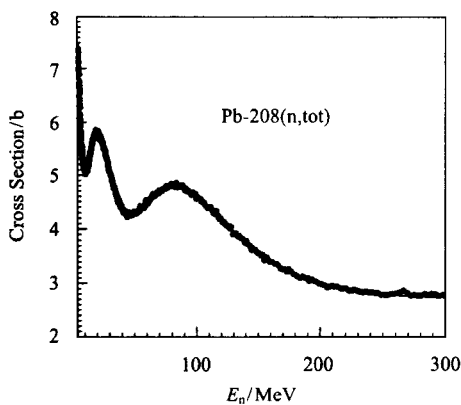


图 1 <sup>208</sup>Pb 的总截面与实验数据的比较

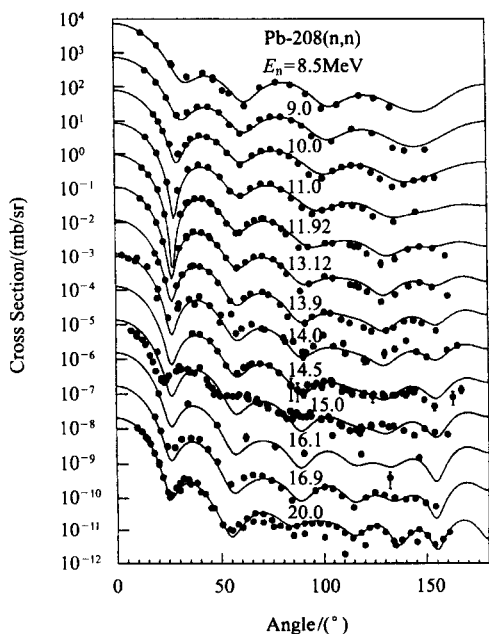


图 2 <sup>208</sup>Pb 中子弹弹性散射角分布与实验数据的比较  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 10<sup>0</sup>, 10<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup>, ..., 10<sup>12</sup>

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, 分别对中子与天然核 Pb 及其 4 个同位素的反应总截面, 弹性散射截面, 弹性散射角分布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, 我们得到的普适子光学模型势参数能够很好地再现实验数据并适用于天然核 Pb 及其同位素. 图 1—4 给出 <sup>208</sup>Pb 的总截面和中子弹弹性散射角分布以及天然核 Pb 的去弹性散射截面与实验数据的比较.

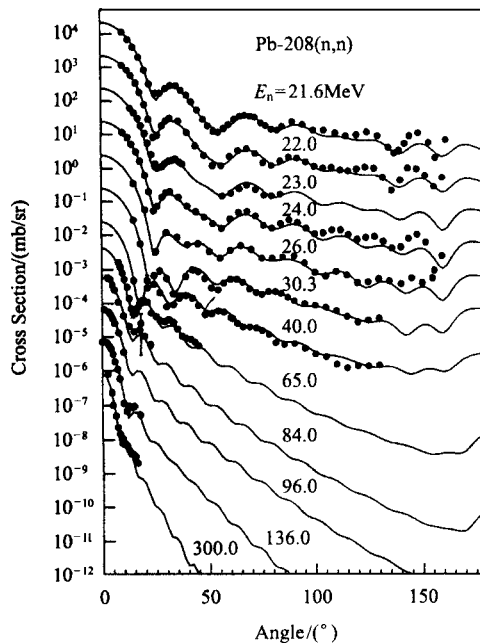


图 3 <sup>208</sup>Pb 的中子弹弹性散射角分布与实验数据的比较  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 10<sup>0</sup>, 10<sup>1</sup>, 10<sup>2</sup>, ..., 10<sup>11</sup>

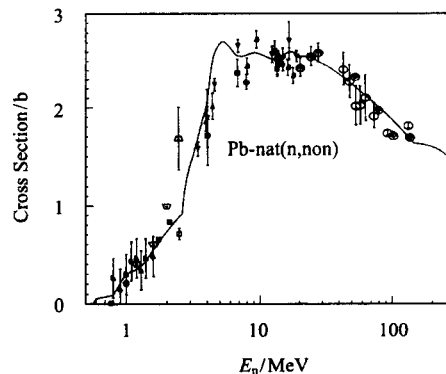


图 4 天然核 Pb 的去弹性散射截面与实验数据的比较

扭曲波玻恩近似理论<sup>[3]</sup>描述核反应的直接过程, Hauser-Feshbach 理论<sup>[4]</sup>, 激子模型<sup>[5]</sup>和核内级联模型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, Hauser-Feshbach 理论, 激子模型和核内级联模型, 计算了中子与<sup>208</sup>Pb 反应的截面、角分布和能谱.

图 5 和 6 是入射中子能量分别为 5.5, 7.0, 8.5, 11.0, 13.7, 20.0, 22.0, 25.7 MeV 和 7.93, 8.98, 9.87, 10.96, 11.92, 13.12, 14.23 MeV 中子与<sup>208</sup>Pb 反应的第一激发态(激发能、自旋和宇称为  $\epsilon = 2.6146 \quad 3^-$ )的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据<sup>[6-8]</sup>的比较. 从图中可以看出, 第一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. 在中子入射的有些能量点, 实验上既给出了弹性散射角分布, 又给出了非弹性散射角分布. 图 2 和 6 中的结果表明, 来自文献[8]的实验结果是自洽的, 与理论结果很好的一致.

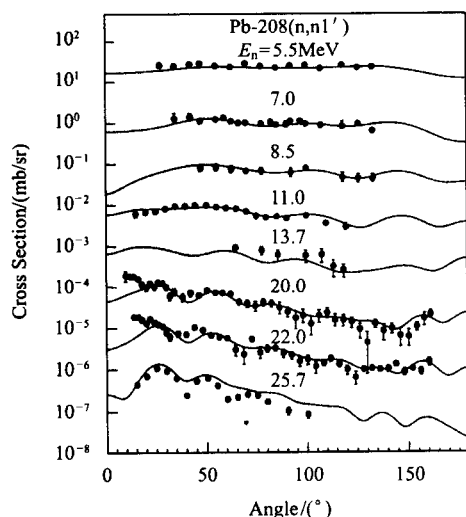


图 5 中子与<sup>208</sup>Pb 反应的第一激发态非弹性散射角分布  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以  $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^7$

图 7 是入射中子能量分别为 5.5, 6.0, 6.49, 7.0, 7.5, 8.01, 11.0 和 25.7 MeV, 中子与<sup>208</sup>Pb 反应的第二激发态(激发能、自旋和宇称为  $\epsilon = 3.1977 \quad 5^-$ )的非弹性散射角分布理论计算结果与实验数据<sup>[5-8]</sup>的比较. 结果显示, 理论计算与实验很好的一致.

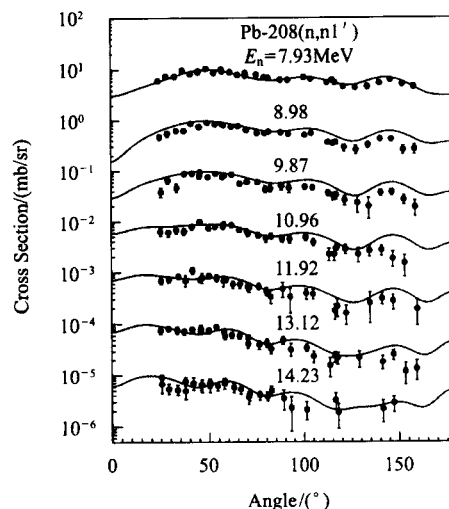


图 6 中子与<sup>208</sup>Pb 反应的第一激发态非弹性散射角分布  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以  $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^6$

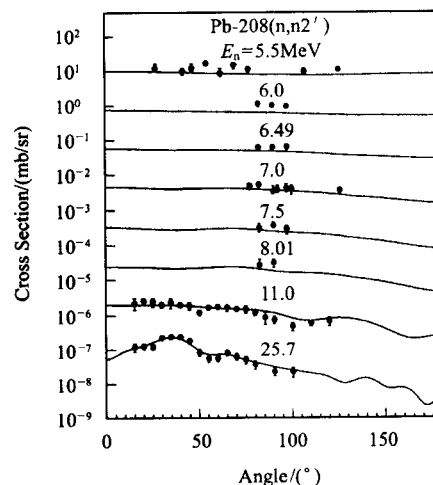


图 7 中子与<sup>208</sup>Pb 反应的第二激发态非弹性散射角分布  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以  $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^7$

以上的结果表明, 本工作获得的中子光学模型势参数, 不仅可以很好地再现弹性散射角分布的实验数据, 而且能很好地再现非弹性散射角分布的实验数据. 在此基础上, 得到了<sup>208</sup>Pb 激发态的形变参数. 表 1 给出了获得的激发态的形变参数并与由质子非弹性散射角分布的实验数据获得的相同激发态的形变参数进行了比较. 结果表明, 由中子非弹性散射角分布得到的激发态的形变参数明显大于由质子非弹性散射角分布得到的相应激发态的形变参数<sup>[9]</sup>. 同时可以看出, 在核反应中, 同位旋效应很明显.

图 8 是中子发射的所有反应道截面的理论计算结果, 仅(n, n')和(n, 2n)反应道在入射中子能量小

于 20MeV 有实验测量结果,理论计算结果很好地与实验符合. 对于其他反应道,没有实验测量的结果,理论模型合理地预言了所有反应道的结果.

表 1 <sup>208</sup>Pb 激发态的形变参数

能量	自旋	宇称	形变参数 (n, n')	形变参数 (p, p)
2.6146	3.0	-	0.134	0.120
3.1977	5.0	-	0.067	0.058
3.7084	5.0	-	0.065	0.034
4.0505	3.0	-	0.075	0.013
4.0854	2.0	+	0.070	0.058
4.1060	3.0	-	0.065	0.010
4.1410	2.0	+	0.050	0.0084
4.1590	2.0	+	0.050	0.0067
4.3180	2.0	+	0.050	
4.4630	2.0	+	0.050	0.0056
4.6982	3.0	-	0.050	

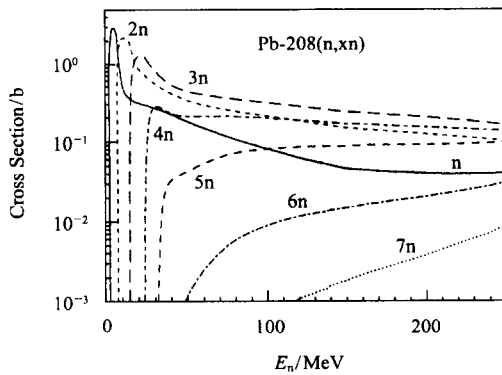


图 8 中子发射的所有反应道截面

图 9 给出了入射中子能量在 65MeV,发射中子双微分截面的理论结果与实验<sup>[10]</sup>的比较,理论结果与实验一致.

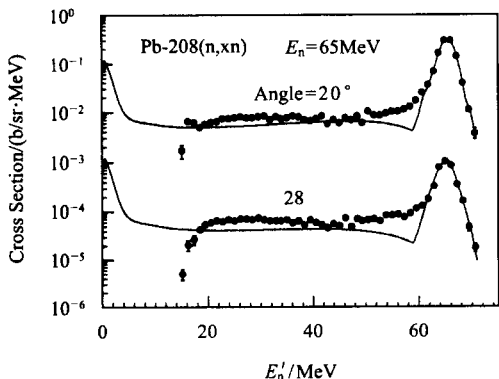


图 9 入射中子能量在 65MeV 时发射中子双微分截面  
从上至下每条理论曲线和实验分别乘以 10<sup>0</sup>,10<sup>2</sup>

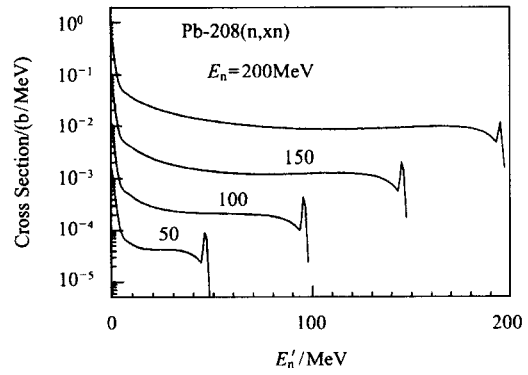


图 10 入射中子能量在 50,100,150 和 200MeV 时  
中子发射能谱  
从上至下每条理论曲线分别乘以 10<sup>0</sup>,10<sup>1</sup>,10<sup>2</sup>,10<sup>3</sup>

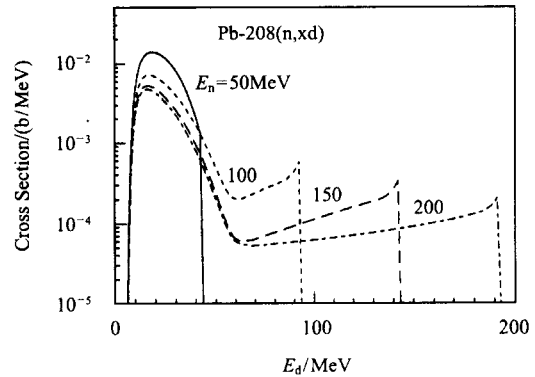


图 11 入射中子能量在 50,100,150 和 200MeV 时发  
射氦核的能谱

图 10 和 11 分别给出了入射中子能量在 50, 100,150 和 200MeV,发射中子和氦核的能谱. 从图 10 中可以看出,在中高能核反应中,主要是预平衡反应的贡献,而平衡反应只有在较低的能量范围内才有贡献. 而发射质子的能谱的结果与中子的相似. 由于在预平衡反应模型中,考虑了核反应的 pick-up 机制,得到的发射复杂粒子(d, t, He<sup>3</sup>, α)的能谱和双微分截面得到了明显的改善. 图 11 的结果表明,在入射中子能量小于 50MeV 时,主要是平衡反应的贡献,预平衡反应的贡献较小;随着入射中子能量的增加,预平衡反应的贡献越来越大. 发射粒子 t, He<sup>3</sup> 和 α 的能谱的结果与 d 核的相似.

## 4 结语

应用中子与天然核 Pb 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,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和核内级联模型在入射中子能量

从 1—300MeV 范围内,对中子与<sup>208</sup>Pb 反应截面和能谱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)

- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Becchetti Jr F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, <b>182</b>:1190</li> <li>2 SHEN Qing-Biao. Comm. Nucl. Data Prog., 1992, <b>7</b>:43</li> <li>3 Kunz P D. Distorted Wave Code DWUCK4, University of Colorado</li> <li>4 ZHANG Jing-Shang. Commun. Nucl. Data Prog., 1992, <b>7</b>:15</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>5 SUN Z et al. Z. Phys., 1982, <b>A305</b>:61</li> <li>6 Kinney W E, Perey F G. ORNL-4909, 1974</li> <li>7 Bainum D E et al. Phys. Rev., 1977, <b>C16</b>:1377</li> <li>8 Schmidt D, Mannhart W, XIA Hai-Hong, PTB-N-27, 1996</li> <li>9 Wagner W T, Crawley G M, ET AL. Phys. Rev., 1975, <b>C12</b>:757</li> <li>10 Hjort E L et al. Phys. Rev., 1996, <b>C53</b>:237</li> </ol> |
|--|---|

## Theoretical Calculations and Analysis of $n + {}^{208}\text{Pb}$ Reaction for Intermediate Energy Neutron \*

HAN Yin-Lu<sup>1)</sup>

(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  $n + \text{Pb}$  reactions, a set of neutron optical model potential parameters is obtained in the region of incident neutron energy from 1—300 MeV. The cross sections, angular distributions and energy spectra are calculated and analyzed by optical model, distorted wave Born approximation theory, Hauser-Feshbach theory, exciton model and cascade mechanism inside nuclear. The results indicate that the cross sections can be given for  $n + {}^{208}\text{Pb}$  reactions which are all in good agreement with experimental data.

**Key words** optical model potential, the distorted wave Born approximation, exciton model, intranuclear cascade mechanism, intermediate energy nuclear reactions

Received 24 April 2003

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

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