

# $p+^{59}\text{Co}$ 原子核反应的理论计算

张雍雍, 颀琼, 张正军

(西北大学 物理学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 基于光学模型势方法, 依据  $p+^{59}\text{Co}$  反应的总截面和弹性散射角分布的实验数据, 利用 APMN. FOR 程序, 给出 1 套与实验数据符合很好的光学势参数。将光学势参数应用于质子与  $^{59}\text{Co}$  的邻近核  $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$  的核反应理论计算, 质子入射能量小于 200 MeV 时, 该光学势参数有很好的普适性。

**关键词:** 光学模型; 质子反应; 反应截面; 角分布

中图分类号: O571.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)10-1157-04

## Theoretical Calculation of $p+^{59}\text{Co}$ Nuclear Reaction

ZHANG Yong-yong, XIE Qiong, ZHANG Zheng-jun

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

**Abstract:** A good set of optical model potential parameters was established from the code APMN. FOR based on the experimental data of  $p+^{59}\text{Co}$  reaction. Excitingly, the parameters can be used widely in the nuclear reaction for  $^{59}\text{Co}$  neighboring nuclides with proton of incident energy below 200 MeV, which can be seen from the calculation of the reaction  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$  with proton.

**Key words:** optical model; proton reaction; reaction cross section; angular distribution

近年来, 加速器驱动的次临界系统(ADS)成为核物理领域一被广泛关注的课题, 中国从 1995 年开始了概念性预研<sup>[1]</sup>。Co 是 ADS 的重要结构材料, 因此, 它的高质量核数据具有重要的学术意义及应用价值。

本工作基于光学模型的理论计算, 利用质子与  $^{59}\text{Co}$  反应的总截面和弹性散射角分布的实验数据及光学模型自动调参程序 APMN. FOR<sup>[2]</sup>, 给出 1 套与实验数据符合很好的光学势参数, 将其直接应用于质子与  $^{59}\text{Co}$  的邻近核  $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$  的核反应理论计算。

### 1 理论模型与参量

光学模型中用复数势来描述入射粒子与靶核的相互作用, 入射粒子在靶核形成的平均势场中被散射和吸收。光学模型势包含有许多成分的位势, 如中心实部势  $V_r$ 、库仑势  $V_c$ 、体吸收虚部势  $W_v$ 、自旋-轨道耦合势  $V_{so}$ 。通过薛定谔方程加边界条件解出出射波函数, 给出反应截面。

光学模型势及能量相关形式取法<sup>[3-4]</sup>如下。

总的光学模型势为:

$$V = V_r + V_c + i(W_s + W_v) + V_{so}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{L}) \quad (1)$$

其中:

$$V_r = -(V_0 + V_1 E_p + V_2 E_p^2 + V_3(N-Z)/A + V_4 Z/A^{1/3}) f_r(r) \quad (2)$$

$$V_c = \begin{cases} \frac{Z_b Z e^2}{r} & r \geq R_c \\ \frac{Z_b Z e^2}{2R_c} \left(3 - \frac{r^2}{R_c^2}\right) & r < R_c \end{cases} \quad (3)$$

$$W_s = 4 \left( W_0 + W_1 E_p + \frac{W_2(N-Z)}{A} \right) \frac{df_s(r)}{dr} \quad (4)$$

$$W_v = -(U_0 + U_1 E_p + U_2 E_p^2) f_v(r) \quad (5)$$

$$V_{so} = \frac{2U_{so}}{r} [J(J+1) -$$

$$L(L+1) - S_b(S_b+1)] \frac{df_{so}(r)}{dr} \quad (6)$$

式中:  $A, Z, N$  分别为靶核的质量数、质子数和中子数;  $J, L$  分别为靶核的总角动量和轨道角动量;  $s, l$  分别为自旋角动量和轨道角动量;  $S_b$  和  $Z_b$  为入射粒子的自旋和电荷;  $E_p$  为入射粒子的入射能量;  $r$  为入射粒子到靶核的距离;  $f_i(r)$  ( $i = r, s, v, so$ ) 为形状因子;  $R_c$  为光学势半径参量;  $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, W_0, W_1, W_2, U_0, U_1, U_2$  为能量相关系数。

$f_i(r)$  的表达式为:

$$f_i(r) = \frac{1}{1 + e^{(r-R_i)/a_i}} \quad (i = r, s, v, so) \quad (7)$$

式中:  $a_i$  表示光学势弥散宽度;  $R_i$  为光学势半径参量。

$R_i$  的表达式为:

$$R_i = r_i A^{1/3} \quad (i = r, s, v, so, c) \quad (8)$$

$r_r, r_s, r_v, r_{so}$ 、库仑半径  $r_c, a_i, V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, W_0, W_1, W_2, U_0, U_1, U_2$  在理论上均为常量, 对不同的核可在物理意义允许的范围内调节。本文中, 能量单位为 MeV, 长度单位为 fm。

利用质子与  $^{59}\text{Co}$  反应的总截面<sup>[5]</sup>、弹性散射角分布的实验数据(取自 EXFOR 核实验数据库)和光学模型自动调参程序 APMN.FOR, 在入射质子能量  $E_p \leq 200$  MeV 条件下获得了 1 组最佳的  $^{59}\text{Co}$  质子光学模型势参数, 结果列于表 1。

## 2 计算结果与讨论

利用表 1 中的光学势参数对  $p+^{59}\text{Co}$  反应的总反应截面和弹性散射角分布进行理论预

言。图 1 示出光学模型计算的  $p+^{59}\text{Co}$  的总反应截面理论曲线与实验数据的比较。实验数据集中在 100 MeV 以下, 从图 1 可看到, 理论结果很好地再现了这部分实验数据。

表 1  $p+^{59}\text{Co}$  的光学势参数

Table 1 Optical potential parameters of  $p+^{59}\text{Co}$

参量	数值	参量	数值
$V_0$	54.171 665 19 MeV	$U_1$	0.059 462 38 MeV
$V_1$	-0.435 023 49 MeV	$U_2$	-0.001 565 54 MeV
$V_2$	0.000 486 45 MeV	$r_r$	1.166 611 67 fm
$V_3$	-45.000 000 00 MeV	$r_s$	1.011 949 18 fm
$V_4$	1.255 419 73 MeV	$r_v$	1.646 005 51 fm
$W_0$	4.390 354 63 MeV	$a_r$	0.655 126 93 fm
$W_1$	0.038 563 29 MeV	$a_s$	0.700 379 49 fm
$W_2$	14.861 684 80 MeV	$a_v$	0.182 710 54 fm
$U_0$	1.133 821 96 MeV	$r_c$	2.063 886 88 fm

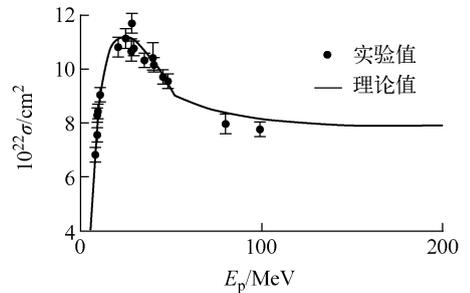


图 1  $p+^{59}\text{Co}$  的总反应截面

Fig. 1 Total reaction cross sections of  $p+^{59}\text{Co}$

图 2 示出质子入射能为 9.67<sup>[6]</sup>、17.0<sup>[7]</sup>、30.3<sup>[8]</sup>、65.0<sup>[9-10]</sup> MeV 时弹性散射角分布的理论计算结果与实验数据的比较。在计算前对弹性散射角分布实验数据进行了分析比较, 从 EXFOR 库中共搜索到 5 家实验数据, 发现在质子入射能量为 65.0 MeV 时, 文献[9-10]提供的实验数据有差异。这两组实验数据由 H. Sakaguchi 等分别在 1981 和 1982 年测得, 图中的实验数据取自文献[9], 与理论计算的数据一致, 因此更为可信。

从以上比较可见, 理论计算结果与已有的  $p+^{59}\text{Co}$  反应的总反应截面和弹性散射角分布实验数据符合很好。这组光学势参数对质子入射能在 65 MeV 以下时, 能可靠预言  $p+^{59}\text{Co}$  的总反应截面及弹性散射角分布。

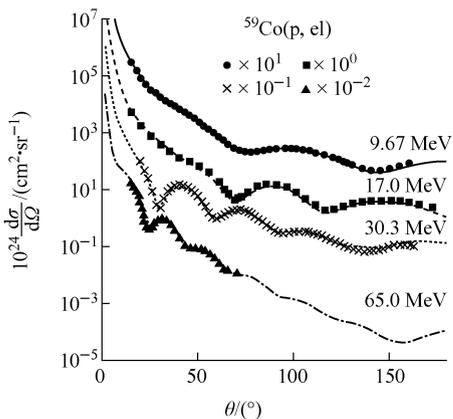


图2  $p+^{59}\text{Co}$  的弹性散射角分布

Fig. 2 Elastic scattering angular distribution of  $p+^{59}\text{Co}$

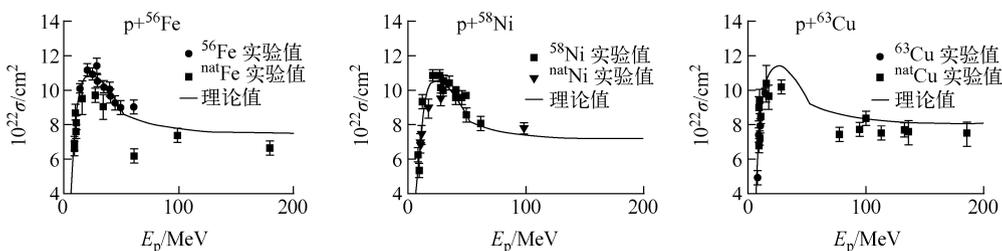


图3  $p+^{56}\text{Fe}$ 、 $p+^{58}\text{Ni}$ 、 $p+^{63}\text{Cu}$  的总反应截面

Fig. 3 Total reaction cross sections of  $p+^{56}\text{Fe}$ ,  $p+^{58}\text{Ni}$ ,  $p+^{63}\text{Cu}$

图4~6分别示出了光学模型计算的  $p+^{56}\text{Fe}$ 、 $p+^{58}\text{Ni}$ 、 $p+^{63}\text{Cu}$  的弹性散射角分布理论值与实验数据(取自 EXFOR 核实验数据库)的比较。通过比较可见:当质子入射能量小于200 MeV时,理论计算结果与实验结果基

### 3 对 $^{59}\text{Co}$ 邻近核的计算

因光学势参数有很好的普适性,将表1中的光学势参数直接应用到 $^{59}\text{Co}$ 的邻近核 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$ 与质子的核反应理论计算中,分析计算结果是否合理。图3示出光学模型计算的  $p+^{56}\text{Fe}$ 、 $p+^{58}\text{Ni}$ 、 $p+^{63}\text{Cu}$  的总反应截面理论曲线与实验数据<sup>[5]</sup>的比较。 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$  的丰度分别为91.72%、68.08%和69.17%,实验数据集中在60 MeV以下,因此在与理论计算结果比较时考虑了 $^{nat}\text{Fe}$ 、 $^{nat}\text{Ni}$ 、 $^{nat}\text{Cu}$  的实验数据<sup>[5]</sup>,可以看出,实验数据分布趋势与理论计算结果符合很好,说明理论计算结果是可靠的。

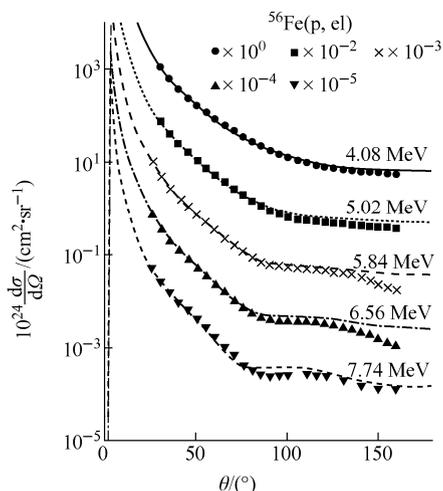
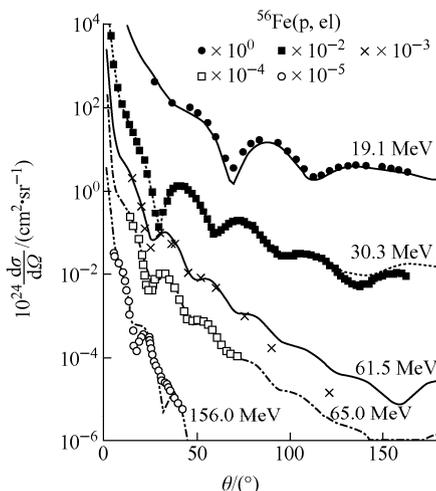


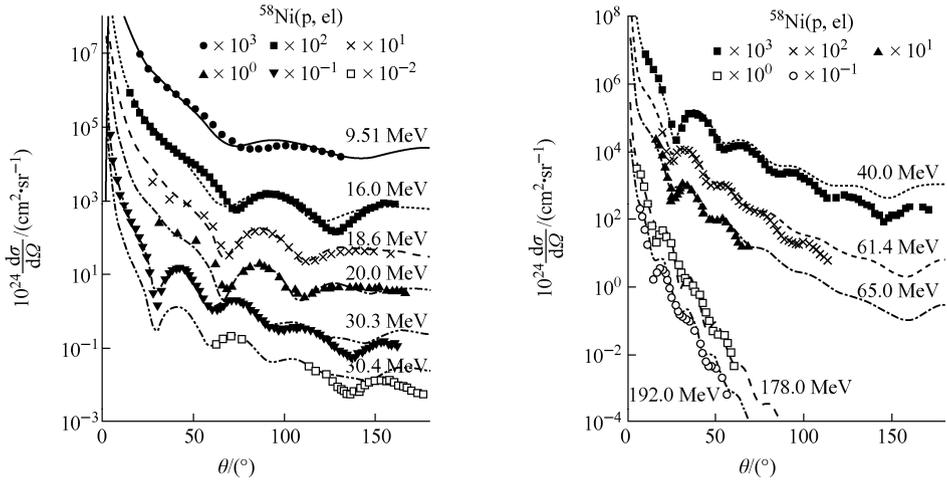
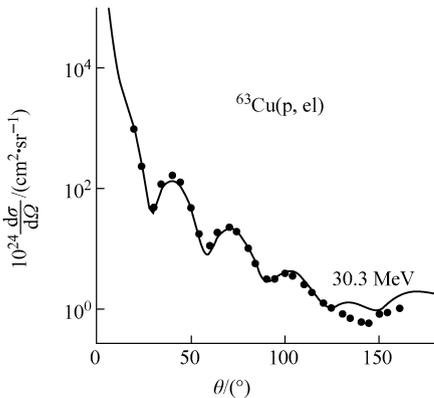
图4  $p+^{56}\text{Fe}$  的弹性散射角分布

Fig. 4 Elastic scattering angular distribution of  $p+^{56}\text{Fe}$

本符合;当质子入射能量大于200 MeV时,理论计算结果与实验结果相差较大,在此未给出。

可见,本工作给出的这组光学势参数对质子入射能量小于200 MeV时,能普适地用于  $p+^{56}\text{Fe}$ 、 $p+^{58}\text{Ni}$ 、 $p+^{63}\text{Cu}$  核反应的理论计算。



图5  $p+^{58}\text{Ni}$  的弹性散射角分布Fig. 5 Elastic scattering angular distribution of  $p+^{58}\text{Ni}$ 图6  $p+^{63}\text{Cu}$  的弹性散射角分布Fig. 6 Elastic scattering angular distribution of  $p+^{63}\text{Cu}$ 

#### 4 总结

本工作利用核反应的光学模型理论,对质子入射 $^{59}\text{Co}$ 的核反应进行了研究,给出了1组最佳光学势参数,并对 $p+^{59}\text{Co}$ 核反应的反应截面、角分布进行了理论计算,计算结果与实验数据符合较好。另外,直接将这组光学势参数应用于 $^{59}\text{Co}$ 的邻近核 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Cu}$ 与质子核反应的计算中,质子入射能量小于200 MeV时,发现理论计算的反应截面和角分布与实验数据符合很好,说明这组参数具有很好的普适性,因此,可将其用于质子与 $^{59}\text{Co}$ 的邻近核核反应的理论计算。

#### 参考文献:

[1] 丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱动放射性洁净核能系统[C]//加速器驱动放射

性洁净核能系统概念研究论文集. 北京:原子能出版社,2000:3-16,53-69.

- [2] SHEN Qingbiao. APMN: A program for automatically searching optimal optical potential parameters in the  $E \leq 300$  MeV energy region[J]. Nuclear Science and Engineering, 2002, 141: 78-84.
- [3] 申庆彪. 低能和中能核反应理论(上册)[M]. 北京:科学出版社,2005:302-305.
- [4] ZHANG Zhengjun, SUN Xiuquan, CAI Chonghai, et al. Calculations for proton-induced reactions below 250 MeV on  $^{208}\text{Pb}$  and  $^{209}\text{Bi}$  targets [J]. Nuclear Science and Engineering, 2003, 143: 90-98.
- [5] CARLSON R F. Proton-nucleus total reaction cross sections and total cross sections up to 1 GeV[J]. Atomic and Nuclear Data Tables, 1996, 63: 93-116.
- [6] GREENLEES G W, POPPE C H, SIEVERS J A, et al. Proton elastic scattering measurements at 9.8 MeV with optical-model analysis [J]. Physical Review C, 1971, 3: 1 231-1 242.
- [7] DAYTON I E, SCHRANK G. Elastic scattering of 17 MeV protons by nuclei [J]. Physical Review, 1956, 101: 1 358-1 367.
- [8] RIDLEY B W, TURNER J F. Optical model studies of protons scattering at 30 MeV differential cross sections for elastic scattering of protons at 30.3 MeV[J]. Nuclear Physics, 1964, 58: 497-508.
- [9] SAKAGUCHI H, NAKAMURA M, HATANAKA K, et al. Shell effects in the spin-orbit part of the optical potential[J]. Physics Letters B, 1981, 99: 92-95.
- [10] SAKAGUCHI H, NAKAMURA M, HATANAKA K, et al. Elastic scattering of 65 MeV polarized protons [J]. Physical Review C, 1982, 26: 944-960.