

# 1keV—200MeV $A > 24$ 核子唯像定域和非定域球形核光学势

王书暖<sup>1)</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 简要介绍核子唯像定域和非定域球形核光学势的最新进展.

**关键词** 核子 定域 非定域光学势

在核反应理论基础和应用基础研究中,核模型方法研究和理论计算是十分必要和不可缺少的.在中、低能核反应研究领域光学模型在广泛意义上的统计模型计算中有着不可缺少和最为充分的应用,比如:反应总截面 $\sigma_t$ ,势散射截面 $\sigma_{el}$ ,势散射微分截面 $\sigma_{el}(\theta)$ ,反应吸收截面 $\sigma_a$ 以及极化的有关计算;平衡态统计理论中各种出射粒子传输系数或宽度的计算;DWBA,CCBA和耦合道光学模型以及CRC中相应波函数的计算等;预平衡反应唯像激子模型中的各种出射粒子的宽度(逆截面)、复合系统形成截面的计算;量子力学机制多步复合(同Hauser-Feshbach公式)和多步直接中相关波函数的计算等.因此,光学模型在中重核、裂变核和重离子反应中都有着广泛的应用.

人们熟悉的、常用的核子定域唯像球形核光学势,比如Becchetti and Greenlees( $A > 40$ ,  $E < 50\text{MeV}$ )<sup>[1]</sup>;Perey and Buck的非定域唯像球形核光学势( $E_n < 25\text{MeV}$ ,  $A > 27$ )<sup>[2]</sup>等,由于是较早的工作,受所使用的已有实验数据的限制,因此在适用的核素、能区的范围上均有限.

A.J. Koning, J.P. Delaroche<sup>[3]</sup>新近给出了一套适合于 $A > 24$ 的球形核附近1keV—200MeV中子、质子唯像光学势.其结果覆盖了较宽广的能区和核素范围,计算结果与现有的、全部的平均共振参数、总截面、去弹截面、弹性散射角分布等大量的实验数据进行了比较,得到了令人满意的结果.

光学势 $u$ 形式定义如下:

$$u(r, E) = -v_V(r, E) - iw_V(r, E) - iw_D(r, E) + v_{SO}(r, E) + iw_{SO}(r, E) + v_C(r),$$

这里 $v_{V,SO}$ 和 $w_{V,D,SO}$ 分别为体(V)、面(D)和自旋轨道(SO)耦合中心势的实部和虚部, $E$ 为实验室系入射粒子能量,并有

$$\begin{aligned} v_V(r, E) &= V_V(E)f(r, R_V, a_V), \\ w_V(r, E) &= W_V(E)f(r, R_V, a_V), \\ w_D(r, E) &= -4a_D W_D(E) \frac{d}{dr} f(r, R_D, a_D), \\ v_{SO}(r, E) &= V_{SO}(E) \left( \frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, a_{SO}), \\ w_{SO}(r, E) &= W_{SO}(E) \left( \frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, a_{SO}). \end{aligned}$$

形状因子 $f(r, R_i, a_i)$ 取为Woods-Saxon型.几何半径参数为 $R_i = r_i A^{1/3}$ .这里 $A$ 为原子核的质量数, $a_i$ 为弥散宽度.

对带电粒子,Coulomb势 $v_C$ 为

$$\begin{aligned} v_C(r) &= \frac{Zze^2}{2R_C} \left( 3 - \frac{r^2}{R_C^2} \right) \text{ for } r \leq R_C. \\ &= \frac{Zze^2}{r} \text{ for } r \geq R_C. \end{aligned}$$

这里 $Z(z)$ 为靶核(入射粒子)电荷数.光学势形式和参数详见文献[3].

继A.J. Koning, J.P. Delaroche 2003年给出的一套适合于 $A > 24$ 的球形核附近1keV—200MeV中子、质子唯像光学势之后,B.Morillon and P.Romain<sup>[4]</sup>于2004年给出了一套适合于 $24 \leq A \leq 209$ , 1keV—

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

200MeV球形核中子的包括色散关系的非定域(定域能量近似)唯像光学势.

B.Morillon and P.Romain色散关系的非定域(定域能量近似)唯像光学势形式和参数表达如下:

$$U(r, E) = [V_V(E) + iW_V(E)]f(r, R_V, a_V) + [V_S(E) + iW_S(E)]g(r, R_S, a_S) + [V_{SO}(E) + iW_{SO}(E)] \times \left(\frac{\hbar}{m_\pi C}\right)^2 \frac{1}{r} g(r, R_{SO}, a_{SO}) \mathbf{l} \cdot \mathbf{S},$$

这里  $V_{V,S,SO}$ ,  $W_{V,S,SO}$  分别为体吸收、面吸收和自旋-轨道耦合势的实部和虚部.  $R_{V,S,SO}$ ,  $a_{V,S,SO}$  分别为其扩散半径和弥散宽度, 且均于能量无关.  $f$  为 Woods-Saxon 形式因子,  $g$  为 Woods-Saxon 微分形式因子. 体势的实部  $V$  和虚部  $W$  满足如下的色散关系<sup>[5]</sup>:

$$V(E) = V_{HF}(E) + \Delta V(E),$$

$$\Delta V(E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(E')}{E' - E} dE'.$$

这里  $P$  为主值积分,  $V_{HF}(E)$  为 Hartree-Fock 平均场. 虚部势分别为<sup>[6, 7]</sup>

$$W_V(E) = \frac{A_V(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + B_V^2},$$

$$W_S(E) = \frac{A_S(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + B_S^2} \exp[-C_S(E - E_f)].$$

这里  $A_V, B_V, A_S, B_S, C_S$  均为调适参数.

$$W_{SO}(E) = \frac{-3(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + 160^2},$$

$$E_f = -[S_n(Z, N) + S_n(Z, N + 1)]/2.$$

$S_n$  为相应系统的中子结合能, 自旋-轨道耦合势的虚部类同于 Koning 等人的结果.

在唯像的非定域光学势研究中, 常把非定域势写为

$$V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = V_{NL} f\left(\frac{1}{2}|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|\right) g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|).$$

这里  $g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$  为非定域力程函数. 如果  $g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ , 即由非定域势得到定域势. 一般  $g$  可取为高斯型. 有

$$g(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) = (\pi\rho^2)^{-\frac{3}{2}} \exp[-|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2/\rho^2].$$

这里  $\rho$  称为不定域力程.  $\rho$  愈小, 不定域势愈接近于定域势.

参数化的 Hartree-Fock 平均场  $V_{HF}(E)$  由 Perey 和 Buck<sup>[2]</sup> 非定域给出. 他们的非定域光学势是由拟合实

验数据给出的适用于中子能量  $< 25\text{MeV}$ 、比 Al 重的靶核的中子光学势. 其形式如下:

$$V = \left\{ -71f_u \left(\frac{1}{2}|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|\right) + i15(4a_w)f'_w \times \left(\frac{1}{2}|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|\right) \right\} (\pi\rho^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left\{ \frac{-|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}{\rho^2} \right\} + 7.2 \left(\frac{\hbar}{m_\pi C}\right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f_{SO}(r) (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}). \quad (\text{MeV})$$

有关参数详见参考文献[2].

这套非定域光学势可进一步简化为如下高斯型:

$$V_{HF}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = V(\mathbf{r}) \exp(-|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2/\rho^2).$$

这里  $\rho$  为非定域力程. 采用定域能量近似<sup>[8]</sup>后有,

$$V_{HF}(E) = V_{HF} \exp(-\mu\rho^2[E - V_{HF}(E)]/2\hbar^2),$$

这里  $\mu$  为系统的折合质量.  $V_{HF}$  为相应的可调参数. 进一步采用 Romain<sup>[8]</sup> 等人的如下形式后有

$$V_{HF}(E) = V_{HF} \exp(-\mu\rho^2[E - V_{HF}(E)]/2\hbar^2) \times \exp(+4\mu^2\gamma^2[E - V_{HF}(E)]^2/\hbar^4).$$

最后得

$$V_V(E) = V_{HF}(E) + \Delta V_V(E),$$

$$\left(\Delta V_V(E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W_V(E')}{E' - E} dE'\right),$$

$$V_S(E) = \Delta V_S(E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W_S(E')}{E' - E} dE',$$

$$V_{SO}(E) = 6 \exp[-0.004(E - E_f)] + \Delta V_{SO}(E),$$

$$\left(\Delta V_{SO}(E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W_{SO}(E')}{E' - E} dE'\right).$$

普适于 1keV—200MeV 中子、靶核为  $24 \leq A \leq 209$  的包括色散关系的非定域(定域能量近似)球形核唯像光学势共有 14 个参数: 3 个扩散半径参数和弥散宽度参数  $R_{V,S,SO}$ ,  $a_{V,S,SO}$ , 非定域力程参数  $\rho, \gamma$ , 实部势阱深度  $V_{HF}$  以及虚部势参数  $A_V, B_V, A_S, B_S, C_S$ .

调适参数过程中使用了相应实验数据和最优化计算公式, 充分利用了 A.J.Koning, J.P.Delaroche 的数据库<sup>[3]</sup> 并以其光学势参数<sup>[3]</sup> 为初值, 以  $^{nat}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{nat}\text{Si}$ ,  $^{nat}\text{S}$ ,  $^{nat}\text{Ca}$ ,  $^{nat}\text{Ti}$ ,  $^{nat}\text{Cr}$ ,  $^{nat}\text{Fe}$ ,  $^{nat}\text{Ni}$ ,  $^{nat}\text{Cu}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{nat}\text{Mo}$ ,  $^{nat}\text{Sn}$ ,  $^{nat}\text{Ce}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{nat}\text{Hg}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  等 20 个核的  $\sigma_T$ ,  $\sigma(\theta)$  及其误差数据调适了参数.

参数结果详见参考文献[4]. 这套光学势参数考虑了色散关系和唯像非定域光学势, 理论基础较好, 参数少, 并且与实验值有较好符合. 一般讲, 其结果好于或相当于 A.J.Koning, J.P. Delaroche 的结果.

最近, B. Morillon 和 P. Romain 又将这套考虑了色散关系和唯像非定域光学势的实部进行了中子束缚单粒子态和中子结合能的计算<sup>[9]</sup>, 均得到了与实

验值有较好符合的结果, 并好于 A.J.Koning, J.P. Delaroche 的光学势参数的相应计算的结果. B.Morillon and P.Romain 的这套光学势参数不仅能较好的描述散射态实验数据, 而且也可以较好的描述中子束缚单粒子态和中子结合能的实验数据. 这显示了散射数据和束缚态信息被同时、自洽地用来确定核相互作用位势的可能性.

### 参考文献(References)

- 1 Bechitte F D, Greenless G W. Phys. Rev., 1969, **182**: 1190
- 2 Perey F G, Buck B. Nucl. Phys., 1962, **32**: 353
- 3 Koning A J, Delaroche J P. Nucl. Phys., 2003, **A713**: 231; INDC(NDS)-431, 55
- 4 Morillon B, Romain P. Phys. Rev., 2004, **C70**: 014601
- 5 Mahaux C, Ngo H, Satchler G R. Nucl. Phys., 1986, **A449**: 354
- 6 Brown G E, Rho M. Nucl. Phys., 1981, **A372**: 397
- 7 Delaroche J P, WANG Y, Papaport J. Phys. Rev., 1989, **C39**: 391
- 8 Romain P, Delaroche J P. A Dispersive Coupled Channels Analysis of Nucleon Scattering from <sup>181</sup>Ta and <sup>182,184,186</sup>W up to 200MeV, Proceedings of the Specialist Meeting on the Nucleon Nucleus Optical Model up to 200MeV. Ruyeres-Le-Chatel, France, 1996
- 9 Morillon B, Romain P. Phys. Rev., 2006, **C774**: 014601

## 1keV—200MeV $A > 24$ Nucleon Phenomenological Local and Non-local Spherical Optical Potentials

WANG Shu-Nuan<sup>1)</sup>

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

**Abstract** Latest progress of 1keV—200MeV  $A > 24$  nucleon phenomenological local and non-local spherical optical potentials are briefly introduced.

**Key words** nucleon, local and non-local, potential

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