

文章编号: 1007-4627(2006)03-0290-06

1 keV—200 MeV $A > 24$ 核子唯象定域和非定域球形核光学势的最新进展*

王书暖

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 简要介绍了核子唯象定域和非定域球形核光学势的最新进展。

关键词: 核子; 定域光学势; 非定域光学势

中图分类号: 0571.41+6 **文献标识码:** A

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。从广泛意义上来说, 通常有 3 种类型的核反应模型被采用: (1) 共振反应的 R 矩阵理论基于实验信息用来很精确地描述低能范围中子和质子所引起的高分辨率测量得到的反应共振结构; (2) 广泛意义上的统计模型, 即综合应用直接反应、预平衡反应和平衡反应(包括裂变)机制以及光学模型等; (3) 核内核子的级联模型(适合较高能量核反应 200 MeV—1 GeV)。人们知道, 由模型理论给出的计算结果强烈地同核结构和核反应模型输入参数相关。例如: 核的质量、分立能级、中子共振参数、光学模型参数、核的能级密度、 γ 射线强度函数等。

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的和最为充分的应用。例如: 反应总截面 σ_t , 势散射截面 σ_{el} , 势散射微分截面 $\sigma_{el}(\theta)$, 反应吸收截面 σ_a 等截面的计算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; 预平衡反应中唯象激子模型的各种出射粒子的宽度计算(逆截面)以及量子力学机制多步复合(同 Hauser-Feshbach 公式)和多步直接过程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、常用的核子定域唯象球形核光学势, 如有 Becchetti and Greenlees 定域唯象球形光

学势($A > 40, E < 50$ MeV)^[1]和 Perey and Buck 的非定域唯象球形核光学势($E_n < 25$ MeV, $A > 27$)^[2]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、能区范围上均有限。

这里将介绍的是关于核子唯象定域和非定域球形核光学势的最新进展。

Koning 和 Delaroche^[3]新近给出了一套适合于 $A > 24$ 的球形核附近 1 keV—200 MeV 中子、质子唯象光学势。这套光学势的结果覆盖了较宽广的能区和核素范围, 并与现有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:

$$v_V(r, E) = V_V(E)f(r, R_V, a_V),$$

$$w_V(r, E) = W_V(E)f(r, R_V, a_V),$$

$$w_D(r, E) = -4a_D W_D(E) \frac{d}{dr} f(r, R_D, a_D),$$

$$v_{SO}(r, E) = V_{SO}(E) \left(\frac{\hbar}{m_{\pi}c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{SO}, a_{SO}),$$

* 收稿日期: 2006-04-27; 修改日期: 2006-06-12

作者简介: 王书暖(1942-), 女(汉族), 山东烟台人, 研究员, 从事核反应理论研究及核数据理论计算;

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

$$\omega_{\text{SO}}(r, E) = W_{\text{SO}}(E) \left(\frac{\hbar}{m_{\pi} c} \right)^2 \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, R_{\text{SO}}, a_{\text{SO}}) .$$

形状因子 $f(r, R_i, a_i)$ 取为 Woods-Saxon 形式:

$$f(r, R_i, a_i) = \frac{1}{1 + \exp((r - R_i)/a_i)} ,$$

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

$$v_C(r) = \frac{Zze^2}{2R_C} \left(3 - \frac{r^2}{R_C^2} \right), \text{ for } r \leq R_C$$

$$= \frac{Zze^2}{r}, \text{ for } r \geq R_C$$

这里, $Z(z)$ 为靶核(入射粒子)电荷数。定义费米能 E_F 为

$$E_F(^N_Z A) = -\frac{1}{2} [S_n(^N_Z A) + S_n(^{N+1}_Z A + 1)] ,$$

$$E_F(^N_Z A) = -\frac{1}{2} [S_p(^N_Z A) + S_p(^{N+1}_Z A + 1)] ,$$

这里 S_n 和 S_p 分别为在各自系统中的中子、质子的结合能。

光学势形式和参数如下:

$$V_V(E) = v_1 [1 - v_2(E - E_F) + v_3(E - E_F)^2 - v_4(E - E_F)] + \epsilon 0.42Z/A^{1/3} ,$$

$$W_V(E) = w_1 \frac{(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + \omega_2^2} ,$$

$$W_D(E) = d_1 \exp[-d_2(E - E_F)] \frac{(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + d_3^2} ,$$

$$V_{\text{SO}}(E) = v_{\text{SO}1} \exp[-v_{\text{SO}2}(E - E_F)] ,$$

$$W_{\text{SO}}(E) = w_{\text{SO}1} \frac{(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + \omega_{\text{SO}2}^2} ,$$

$r_V, r_D, r_{\text{SO}}, r_C, a_V, a_D$ 和 a_{SO} 均为常数; 对中子而言, $\epsilon = 0$; 对质子而言, $\epsilon = 1$ 。

光学势参数系统学结果如下:

(1) 对中子有:

$$v_1 = 59.30 - 21.0(N - Z)/A - 0.024 A \text{ MeV} ,$$

$$v_2 = 0.007 228 - 1.481 0^{-6} A \text{ MeV}^{-1} ,$$

$$v_3 = 1.994 10^{-5} - 2.010^{-8} A \text{ MeV}^{-2} ,$$

$$v_4 = 7.010^{-9} A \text{ MeV}^{-3} ,$$

$$w_1 = 12.195 + 0.016 7A \text{ MeV} ,$$

$$\omega_2 = 73.55 + 0.079 5A \text{ MeV} ,$$

$$r_V = 1.303 9 - 0.405 4A^{-1/3} \text{ fm} ,$$

$$a_V = 0.677 8 - 1.48710^{-4} A \text{ fm} ,$$

$$d_1 = 16.0 - 16.0(N - Z)/A \text{ MeV} ,$$

$$d_2 = 0.018 0 + 0.003 802/\{1 + \exp[(A - 156.0]/8.0)\} \text{ MeV} ,$$

$$r_D = 1.342 4 - 0.015 85 A^{1/3} \text{ fm} ,$$

$$a_D = 0.544 6 - 1.656 10^{-4} A \text{ fm} ,$$

$$v_{\text{SO}1} = 5.922 + 0.003A \text{ MeV} ,$$

$$v_{\text{SO}2} = 0.004 \text{ MeV}^{-1} ,$$

$$w_{\text{SO}1} = -3.1 \text{ MeV} ,$$

$$w_{\text{SO}2} = 160 \text{ MeV} ,$$

$$r_{\text{SO}} = 1.185 4 - 0.647A^{1/3} \text{ fm}, a_{\text{SO}} = 0.59 \text{ fm},$$

$$r_C = 0.0 \text{ fm},$$

$$E_F = -11.281 4 + 0.026 46A \text{ MeV} .$$

(2) 对质子有:

$$v_1 = 59.30 + 21.0(N - Z)/A - 0.024A \text{ MeV} ,$$

$$v_2 = 0.007 067 + 4.361 0^{-6} A \text{ MeV}^{-1} ,$$

$$v_3 = 1.747 10^{-5} + 1.510^{-8} A \text{ MeV}^{-2} ,$$

$$w_1 = 14.336 + 0.018 9A \text{ MeV} ,$$

$$d_1 = 14.3 + 20.0(N - Z)/A \text{ MeV} ,$$

$$a_D = 0.541 3 + 3.963 10^{-4} A \text{ fm} ,$$

$$r_C = 1.198 + 0.697A^{-2/3} + 12.994A^{-5/3} \text{ fm} ,$$

$$E_F = -8.407 5 + 0.013 78A \text{ MeV} ,$$

(其它项目同中子)。

下面给出 Koning 和 Delaroche 1 keV—200 MeV 中子、质子唯象光学势的一些计算结果与实验值的比较, 分别由图 1、图 2 和图 3 表示。

继 Koning 和 Delaroche 2003 年给出的一套适合于 $A > 24$ 的球形核附近 1 keV—200 MeV 中子、质子唯象光学势之后, Morillon 和 Romain^[4] 于 2004 年给出了一套适合于 $24 \leq A \leq 209$, 1 keV—200 MeV 球形核中子的包括色散关系的非定域(定域能量近似)唯象光学势。

Morillon 和 Romain 色散关系的非定域(定域能量近似)唯象光学势形式和参数表达如下:

$$U(r, E) = [V_V(E) + iW_V(E)]f(r, R_V, a_V) + [V_S(E) + iW_S(E)]g(r, R_S, a_S) + [V_{\text{SO}}(E) + iW_{\text{SO}}(E)] \left(\frac{\hbar}{m_{\pi} c} \right)^2 .$$

$$\frac{1}{r}g(r, R_{SO}, a_{SO})\mathbf{l} \cdot \mathbf{S} \quad ,$$

$$g(r, R, a) = -4a \frac{d}{dr}f(r, R, a) \quad .$$

这里 V_i ($i=V, S, SO$) 和 W_i ($i=V, S, SO$) 分别为体吸收、面吸收和自旋-轨道耦合势的实部和虚部。 R_i ($i=V, S, SO$) 和 a_i ($i=V, S, SO$) 分别为其扩散半径和弥散宽度, 且均与能量无关。 f 为 Woods-Saxon 形式因子, g 为 Woods-Saxon 微分形式因子, 分别表示为

$$f(r, R, a) = \frac{1}{1 + \exp[(r - R)/a]} \quad ,$$

体势的实部 V 和虚部 W 满足如下的色散关系^[5]

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

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

这里 P 为主值积分, $V_{HF}(E)$ 为 Hartree-Fock 平均场。

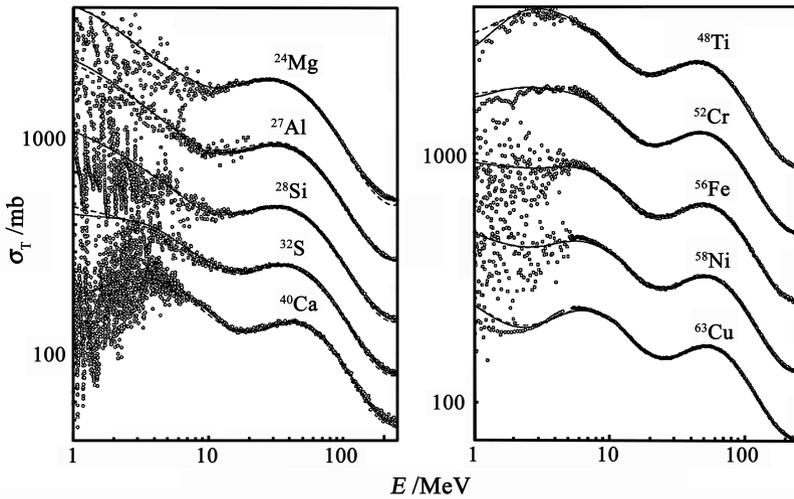


图 1 1—250 MeV 的 $n + \text{Mg} - \text{Ca}$, $\text{Ti} - \text{Cu}$ 总截面计算结果与实验值的比较

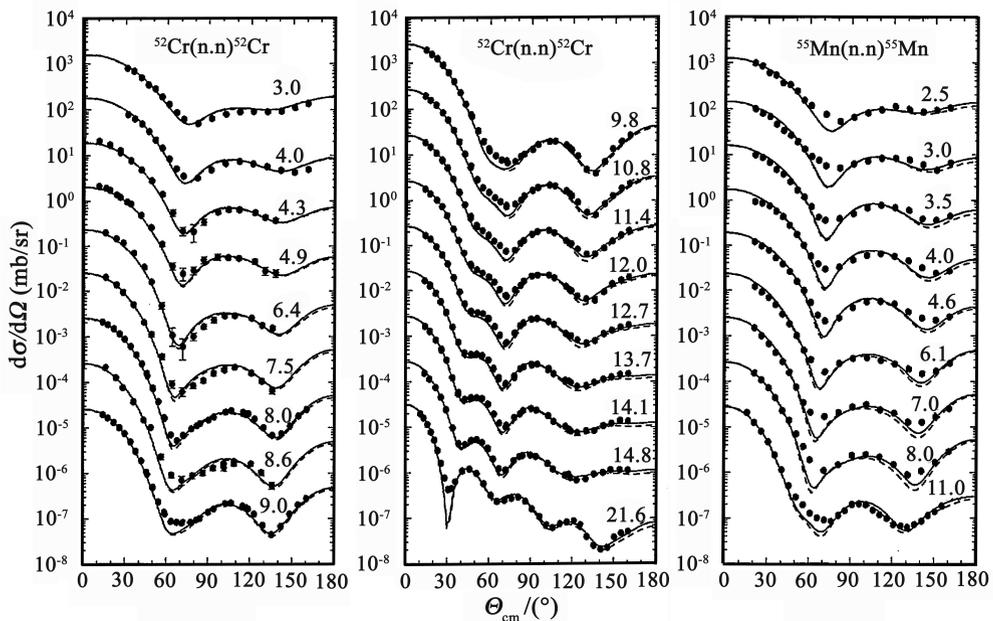


图 2 不同能量的 $n + \text{Cr}$, Mn 弹性散射角分布计算结果与实验值的比较

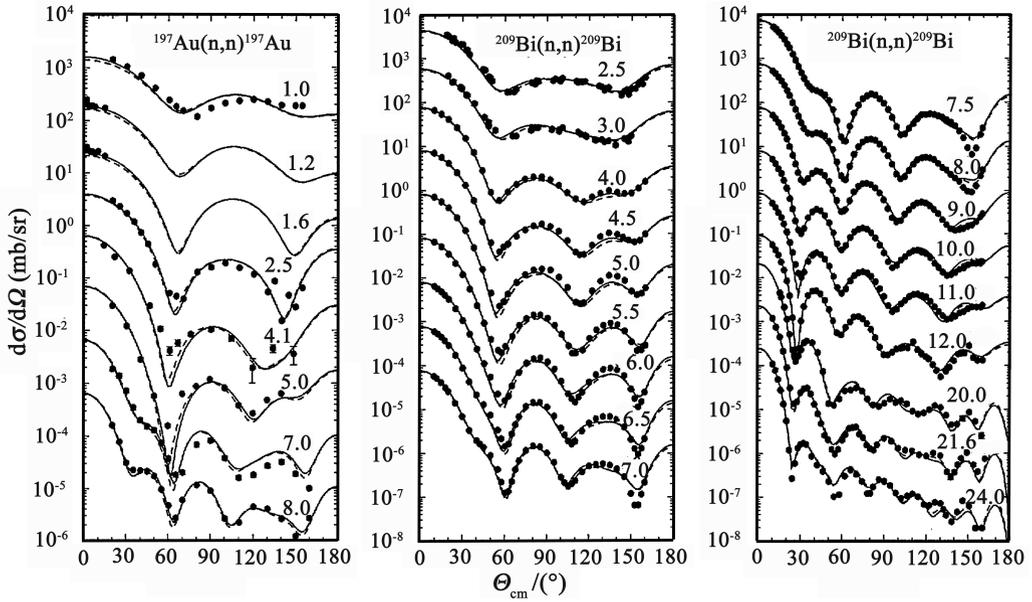


图 3 不同能量的 n+Au, Bi 弹性散射角分布计算结果与实验值的比较

虚部势分别为^[6, 7]

$$W_v(E) = \frac{A_v(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + B_v^2},$$

$$W_s(E) = \frac{A_s(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + B_s^2} \exp[-C_s(E - E_F)],$$

这里 A_v, B_v, A_s, B_s 和 C_s 均为调试参数。

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

$$E_F = -[S_n(Z, N) + S_n(Z, N + 1)],$$

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。

下面给出关于 $V_{HF}(E)$ 的计算。

前面所讨论的光学势的一般形式叫定域势。此外还有一种形式的光学势叫非定域势。所谓非定域势是这样的位能算符 V ，它作用在态矢 $|\Psi\rangle$ 上的结果在坐标表象中可写为

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{r} | V | \Psi \rangle &= \int \langle \mathbf{r} | V | \mathbf{r}' \rangle \langle \mathbf{r}' | \Psi \rangle d\tau' \\ &= \int V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Psi(\mathbf{r}') d\tau', \end{aligned}$$

这里有

$$\begin{aligned} V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \langle \mathbf{r} | V | \mathbf{r}' \rangle, \\ \Psi(\mathbf{r}') &= \langle \mathbf{r}' | \Psi \rangle. \end{aligned}$$

上式表明 $V|\Psi\rangle$ 和空间各点的波函数与位能均有关系，因而非定域的。称 $V(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为非定域势。为了保证 $V(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 是厄米的，并满足宇称和角动量守恒的要求(中心力场)，因而 $V(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 必须满足以下条件，即

$$\begin{aligned} V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') &= V^*(\mathbf{r}', \mathbf{r}), \quad H = H^+ \text{ 的厄米性} \\ V(-\mathbf{r}, -\mathbf{r}') &= V(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \quad \text{空间反演不变} \end{aligned}$$

以及 $V(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为 \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 所组成的标量函数。

实际上，由于粒子是全同粒子，要讨论的并不是某个特定的粒子所承受的平均相互作用，而是某个单粒子态所承受的平均相互作用。因而平均相互作用位势本应是非定域的。

在唯象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

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

这里 ρ 称为不定域力程。 ρ 愈小，不定域势愈接近于定域势。

参数化的 Hartree-Fock 平均场 $V_{\text{HF}}(E)$ 由 Perey 和 Buck^[2] 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小于 25 MeV、比 Al 重的靶核的中子光学势。其形式如下:

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

有关参数如下:

$$r_u = r_w = r_{\text{SO}} = 1.22 \quad , \quad a_u = a_{\text{SO}} = 0.65 \quad , \\ a_w = 0.47 \quad , \quad \rho = 0.85 \quad , \quad \text{长度单位为 fm} \quad .$$

这套非定域光学势可进一步简化为如下高斯型:

$$V_{\text{HF}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = V(r) \exp \left(\frac{-| \mathbf{r} - \mathbf{r}' |^2}{\rho^2} \right) \quad ,$$

这里 ρ 为非定域力程。

采用定域能量近似^[8]后有:

$$V_{\text{HF}}(E) = V_{\text{HF}} \exp \left(-\mu\rho^2 \frac{E - V_{\text{HF}}(E)}{2\hbar^2} \right) \quad ,$$

这里 μ 为系统的折合质量, V_{HF} 为相应的可调参数。

进一步采用 Romain 等^[8]的如下形式后有:

$$V_{\text{HF}}(E) = V_{\text{HF}} \exp \left(-\mu\rho^2 \frac{E - V_{\text{HF}}(E)}{2\hbar^2} \right) \cdot \exp \left(+4\mu^2 \gamma^2 \frac{[E - V_{\text{HF}}(E)]^2}{\hbar^4} \right) \quad ,$$

因此有:

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

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

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

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

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

普适于 1 keV—200 MeV 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)球形核唯象光学势共有 14 个参数: 3 个扩散半径参数

和 3 个弥散宽度参数 R_i ($i = V, S, \text{SO}$), a_i ($i = V, S, \text{SO}$), 非定域力程参数 ρ, γ , 实部势阱深度 V_{HF} 以及虚部势参数 A_V, B_V, A_S, B_S 和 C_S 。

调试参数过程中使用了如下最优化计算公式:

$$\chi_{\text{XS}}^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{XS}}} \left[\frac{\sigma_{T_i}^{\text{exp}} - \sigma_{T_i}^{\text{cal}}}{\Delta \sigma_{T_i}^{\text{exp}}} \right]^2 \quad , \\ \chi_{\text{AD}}^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{AD}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{AD}_i}} \left[\frac{\sigma_i^{\text{exp}}(\theta_j) - \sigma_i^{\text{cal}}(\theta_j)}{\Delta \sigma_i^{\text{exp}}(\theta_j)} \right]^2 \quad ,$$

这里 $\sigma_T, \sigma(\theta), \Delta$ 分别为总截面、弹性散射角分布及其误差。“exp”表示实验值,“cal”表示理论计算值。 N_{XS} 为每个核的总截面实验数据点数, N_{AD} 为每个核的实验弹性散射角分布数, N_{AD_i} 为每一给定的实验弹性散射角分布 i 的数据点数。

计算中充分利用了 Koning 和 Delaroche 的数据库^[3] 并以其光学势参数^[3] 为初值, 以^{nat} Mg, ²⁷ Al, ^{nat} Si, ^{nat} S, ^{nat} Ca, ^{nat} Ti, ^{nat} Cr, ^{nat} Fe, ^{nat} Ni, ^{nat} Cu, ⁸⁹ Y, ⁹⁰ Zr, ⁹³ Nb, ^{nat} Mo, ^{nat} Sn, ^{nat} Ce, ¹⁹⁷ Au, ^{nat} Hg, ²⁰⁸ Pb 和 ²⁰⁹ Bi 20 个核的 $\sigma_T, \sigma(\theta), \Delta$ 数据及上述所定义的 $\chi_{\text{XS}}^2, \chi_{\text{AD}}^2$ 调试了参数。在与实验值比较具有较好或相当于 Koning 和 Delaroche 的 $\chi_{\text{XS}}^2, \chi_{\text{AD}}^2$ 值的情况下得到了如下最佳参数结果:

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad , \quad r_0 = 1.295 - 2.7 \times 10^{-4} A \quad (\text{fm}) \quad , \\ a = 0.566 + 5 \times 10^{-9} A^3 \quad (\text{fm}) \quad ,$$

R_i ($i = V, S, \text{SO}$), a_i ($i = V, S, \text{SO}$) 6 个参数简化为以上 4 个参数)。

$$V_{\text{HF}} = -82.8 \text{ MeV} \quad , \quad \rho = 1.114 \text{ fm} \quad ,$$

$$\gamma = 0.233 - 2 \times 10^{-4} A \quad \text{fm} \quad ,$$

$$B_S = 11.5 \text{ MeV} \quad ,$$

$$C_S = 0.023 \text{ MeV}^{-1} \quad ,$$

$$A_S = -15 + 0.018A \text{ MeV} \quad ,$$

$$A_V = -11.21 - 0.017A \text{ MeV} \quad ,$$

$$B_V = 62 + 0.12A \text{ MeV} \quad ,$$

(最终仅有以上 16 个优化选定参数)。

这套光学势参数考虑了色散关系和唯象非定域光学势, 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 Koning 和 Delaroche 的结果(由 $\chi_{\text{XS}}^2, \chi_{\text{AD}}^2$ 小于或相当于 Koning 和 Delaroche 的结果所保证)。

参 考 文 献:

- [1] Bechitte F D, Greenless G W. Phys Rev, 1969, **182**: 1 190.
- [2] Perey F G, Buck B. Nucl Phys, 1962, **32**: 353.
- [3] Koning A J, Delaroche J P. Nucl Phys 2003, **A713**: 231;IN-DC(NDS)- 431, 55.
- [4] Morillon B, Romain P. Phys Rev, 2004, **C70**: 014 601.
- [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 ^{181}Ta and $^{182, 184, 186}\text{W}$ up to 200 MeV. Proceedings of the Specialist, Meeting on the Nucleon Nucleus Optical Model up to 200 MeV. Ruyeres-Le-Chatel, France, 1996 (<http://www.nea.fr/html/sciences/om200>).

Progress of 1 keV—200 MeV $A > 24$ Nucleon Local and Non-local Spherical Optical Potential

WANG Shu-nuan

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

Abstract: The progress of 1 keV—200 MeV $A > 24$ nucleon local and non-local spherical optical potential is briefly introduced.

Key words: nucleon; local-potential; non-local potential