

^{208}Pb 的 Lane 自洽色散光学势

杜文青 赵岫鸟[†]

(渤海大学物理科学与技术学院, 锦州 121013)

(2024 年 9 月 10 日收到; 2024 年 12 月 30 日收到修改稿)

采用色散光学模型成功构建了球形核 ^{208}Pb 的 Lane 自洽色散光学势, 采用同一套势参数同时对 ^{208}Pb 的两种核子 (中子和质子) 弹性散射数据进行了良好的描述, 高质量地计算了包括中子总截面、核子弹性散射角分布、分析本领以及 (p, n) 准弹性散射角分布在内的相关核子散射数据, 理论计算结果与实验数据具有很好的一致性.

关键词: 光学模型, 色散光学势, 核子弹性散射

PACS: 24.10.-i, 24.10.Ht

CSTR: 32037.14.aps.74.20241273

DOI: 10.7498/aps.74.20241273

1 引言

铅作为一种常见的材料核, 对其核数据的研究和计算具有重要的理论价值和应用前景. 铅铋共晶合金也是重要的冷却剂, 被应用于欧洲铅冷却系统 (ELSY) 以及中国铅基研究反应堆 (CLEAR-I)^[1] 等铅冷快堆的建设和第四代反应堆的相关研究中. 此外, 铅的核反应数据对包括加速器驱动的亚临界系统 ADS、核废料的嬗变、放射性同位素生产、放射治疗以及反应堆设计^[2-5] 在内的诸多应用都是非常重要的. 而根据现有的积分基准检验结果以及 Lawrence Livermore 国家实验室 (LLNL) 的铅脉冲球实验得到的数据来看, 为了减少相关评估数据的不确定性, 仍需对铅核的核反应数据理论计算进行研究, 进而改进对铅核的核数据评价^[6,7].

Koning 和 Delaroche (K-D) 提出了一套球形光学势^[8], 采用该光学势可以实现对核子入射能量高达 200 MeV 时的核子诱发核反应数据的理论计算, 该光学势得到了广泛的应用. 然而, 包括 K-D 光学势在内的诸多光学势通常将势深表示为多项

式形式, 需要额外地添加色散修正项来考虑色散效应, 并且在描述中子和质子入射时需要使用两套不同的势参数, 参数的得出受到单一核子实验数据数量和质量的影响. 近期, 色散光学模型 (DOM) 被广泛应用于分析和计算核子在大能量区间以及大质量范围内的弹性散射数据^[9-12]. 根据因果关系的要求, 色散光学模型在光学势中利用色散关系自洽地引入了色散修正项^[13]. 色散光学势的虚部与实部通过色散关系相互联系, 从而在一定程度上减少了光学势参数的数量以及不确定性, 并且消除了几何参数中的能量依赖关系. 同时, 通过对色散光学势的体虚部势进行高能修正, 可以更好地描述核子入射能量远离费米能时的散射数据, 使得光学势适用的核子入射能量可达到 200 MeV^[14]. 此外, 采用色散光学模型还使得光学势有可能在形式上与 Lane 方程自洽, 即将质子和中子入射看作是两种处于不同状态的同种粒子入射, 通过引入同位旋矢量项来区分核子的这两种状态. 基于此, 描述中子入射和质子入射的光学势的差异可以完全由同位旋矢量项来确定, 由此实现使用同一套势参数的光学势计算两种核子诱发的核反应数据, 并且在拟合势

[†] 通信作者. E-mail: zhaoxiumiao@163.com

参数时,可以同时使用中子和质子实验数据.通过同位旋矢量项确定的差异势还可以实现对 (p, n) 准弹性散射角分布数据的理论计算^[15].

^{208}Pb 是铅核同位素中最稳定且丰度最高的同位素,对 ^{208}Pb 核子散射数据的高精度描述是实现铅核的核反应数据理论计算的关键.本工作采用色散光学模型,通过在色散光学势中定义合适的同位旋矢量项构建一套 Lane 自洽的色散光学势,实现用同一套参数同时描述中子和质子散射数据,进而实现对 ^{208}Pb 中子总截面、核子弹性散射角分布、分析本领以及 (p, n) 准弹性散射角分布等核子散射数据的高精度描述.

2 色散光学势

基于色散光学模型,本文描述 ^{208}Pb 核子弹性散射数据的色散光学势的具体形式如下:

$$\begin{aligned} V(r, R, E) = & -V_{\text{HF}}(E^*) \times f_{\text{ws}}(r, R_{\text{HF}}) \\ & - [\Delta V_{\text{v}}(E^*) + iW_{\text{v}}(E^*)] \times f_{\text{ws}}(r, R_{\text{v}}) \\ & - [\Delta V_{\text{s}}(E^*) + iW_{\text{s}}(E^*)] \times g_{\text{ws}}(r, R_{\text{s}}) \\ & + \left(\frac{\hbar}{m_{\pi}c} \right)^2 [V_{\text{so}}(E^*) + \Delta V_{\text{so}}(E^*) + iW_{\text{so}}(E^*)] \\ & \times \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f_{\text{ws}}(r, R_{\text{so}}) \times (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L}) + V_{\text{Coul}}(r, R_{\text{c}}), \quad (1) \end{aligned}$$

其中 f_{ws} 和 g_{ws} 为 Woods-Saxon 形式的势形状因子. (1) 式中包含实部 Hartree-Fock (HF) 势,体 (v) 虚部势、表面 (s) 虚部势、自旋-轨道耦合 (so) 实部和虚部势^[16-19],各个势的具体表达形式如下:

$$V_{\text{HF}}(E) = A_{\text{HF}} \exp[-\lambda_{\text{HF}}(E - E_{\text{F}})], \quad (2)$$

$$W_{\text{v}}(E) = A_{\text{v}} \frac{(E - E_{\text{F}})^2}{(E - E_{\text{F}})^2 + (B_{\text{v}})^2}, \quad (3)$$

$$W_{\text{s}}(E) = A_{\text{s}} \frac{(E - E_{\text{F}})^2}{(E - E_{\text{F}})^2 + (B_{\text{s}})^2} \exp(-C_{\text{s}}|E - E_{\text{F}}|), \quad (4)$$

$$V_{\text{so}}(E) = V_{\text{SO}} \exp[-\lambda_{\text{so}}(E - E_{\text{F}})], \quad (5)$$

$$W_{\text{so}}(E) = W_{\text{SO}} \frac{(E - E_{\text{F}})^2}{(E - E_{\text{F}})^2 + (B_{\text{so}})^2}, \quad (6)$$

色散修正项由相应的虚部势通过色散关系计算得到^[20].

为实现对质子入射情况的计算,光学势中需要考虑库仑势 V_{Coul} ,并引入有效能量“ E^* ”来考虑由于原子核的排斥而引起的库仑修正^[21].在计算中

子入射时,有效能量 E^* 等价于中子的入射能量,而在质子入射时, E^* 定义为质子的入射能量与 E_{Coul} 的差值,其中 $E_{\text{Coul}} = C_{\text{Coul}}(ZZ'/A^{1/3})$ (Z 和 Z' 分别代表入射核子和靶核的电荷数, A 为靶核的质量数, C_{Coul} 为可调参数).

本文通过在实部势 V_{HF} 和表面虚部势 W_{s} 的势深常数中引入同位旋矢量项 (即 Lane 项^[22,23]) 合理地考虑了同位旋依赖性,具体形式如下:

$$A_{\text{HF}} = V_0 \left[1 + (-1)^{(Z'+1)} \frac{C_{\text{viso}}(N-Z)}{V_0 A} \right], \quad (7)$$

$$A_{\text{s}} = W_0 \left[1 + (-1)^{(Z'+1)} \frac{C_{\text{wisso}}(N-Z)}{W_0 A} \right], \quad (8)$$

中子和质子入射时的实部势 V_{HF} 和表面虚部势 W_{s} 深度随能量的变化情况如图 1 所示.描述两种核子入射时的光学势之间的差异由同位旋矢量项、库仑修正项决定.借此,区别于包括 K-D 势在内的诸多光学势,该光学势可以采用一套相同的势参数同时描述中子和质子诱发的核反应数据.表 1 列出了本文所采用的色散光学势的参数.

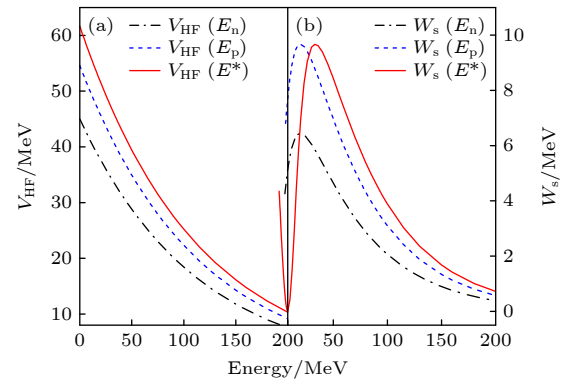


图 1 中子和质子入射 ^{208}Pb 时的实部势 V_{HF} 和表面虚部势 W_{s} 深度随能量的变化情况

Fig. 1. Energy dependence of the real potential V_{HF} and the surface imaginary potential W_{s} depths for neutron and proton induced reactions on ^{208}Pb .

3 结果与分析

本文对中子总截面的计算结果与实验数据以及由 K-D 光学势给出的计算结果的比较情况如图 2 所示.本文给出的理论计算结果很好地重现了实验数据,并且描述情况明显优于 K-D 光学势,特别是在中子入射能量为 10 MeV 左右的能量区域以及对振荡区实验数据平均趋势的描述.本文所使用的所有实验数据及其文献均可在 EXFOR

表 1 ^{208}Pb 的色散光学模型势参数
Table 1. Dispersive optical-model potential parameters for nucleon induced reactions on ^{208}Pb .

	V_{HF}	Volume	Surface	Spin-orbit	Coulomb
Potential	$V_0 = 52.4 \text{ MeV}$	$A_v = 12.47 \text{ MeV}$	$W_0 = 15.82 \text{ MeV}$	$V_{\text{SO}} = 8.1 \text{ MeV}$	$C_{\text{Coul}} = 1.0 \text{ MeV}$
	$\lambda_{\text{HF}} = 0.009 \text{ MeV}^{-1}$	$B_v = 81.67 \text{ MeV}$	$B_s = 13.31 \text{ MeV}$	$\lambda_{\text{so}} = 0.005 \text{ MeV}^{-1}$	
	$C_{\text{viso}} = 23.85 \text{ MeV}$	$E_a = 56 \text{ MeV}$	$C_s = 0.02 \text{ MeV}^{-1}$	$W_{\text{SO}} = -3.1 \text{ MeV}$	
Geometry	$r_{\text{HF}} = 1.24 \text{ fm}$	$r_v = 1.25 \text{ fm}$	$r_s = 1.18 \text{ fm}$	$r_{\text{so}} = 1.08 \text{ fm}$	$r_c = 1.03 \text{ fm}$
	$a_{\text{HF}} = 0.63 \text{ fm}$	$a_v = 0.69 \text{ fm}$	$a_s = 0.63 \text{ fm}$	$a_{\text{so}} = 0.59 \text{ fm}$	$a_c = 0.61 \text{ fm}$

实验数据库 [24] 中找到, 用于比较的 K-D 势为 RIPL 库 [25] 中分别针对 ^{208}Pb 的中子和质子散射实验数据进行单独调参得到的中子光学势和质子光学势.

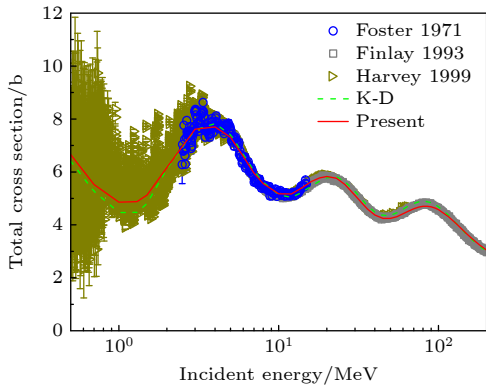


图 2 ^{208}Pb 的中子总截面计算结果与 K-D 中子光学势给出的计算结果以及相关实验数据的比较
Fig. 2. Comparison of the calculated neutron total cross section for ^{208}Pb with experimental data and those by K-D potential.

本文对中子弹性散射截面的计算结果与天然铅的实验数据的比较情况如图 3 所示, 我们的计算结果与实验数据表现出非常好的一致性, 明显优于 K-D 光学势给出的计算结果.

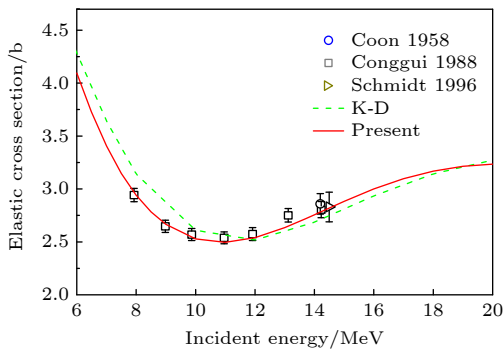


图 3 ^{208}Pb 的中子弹性散射截面计算结果与 K-D 中子光学势给出的计算结果以及天然铅的相关实验数据的比较
Fig. 3. Comparison of the calculated neutron elastic cross section for ^{208}Pb with experimental data and those by K-D potential.

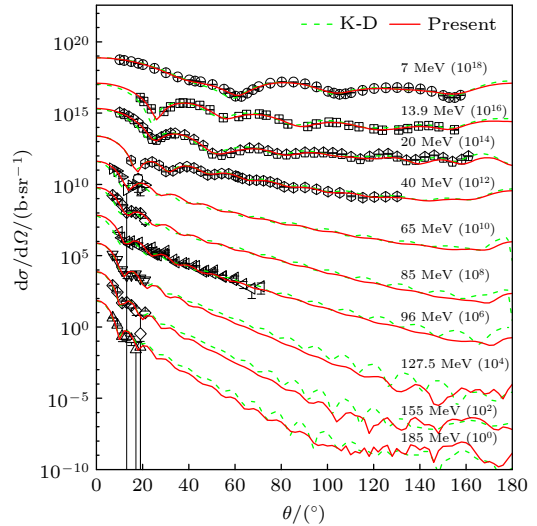


图 4 ^{208}Pb 的中子弹性散射角分布计算结果与 K-D 中子光学势给出的计算结果以及相关实验数据的比较
Fig. 4. Calculated neutron elastic scattering angular distributions for ^{208}Pb , compared with experimental data and those by K-D potential.

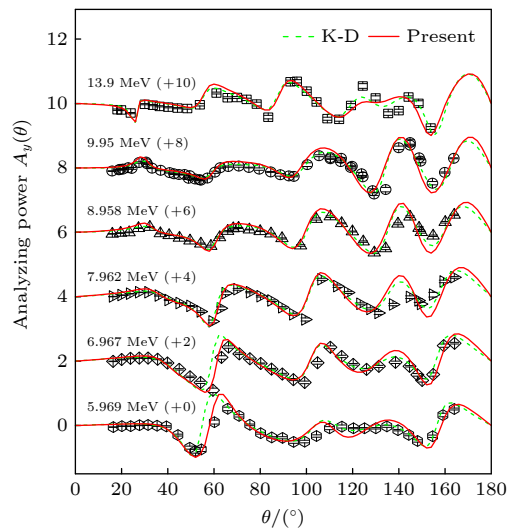


图 5 ^{208}Pb 的中子弹性散射分析本领计算结果与 K-D 中子光学势给出的计算结果以及相关实验数据的比较
Fig. 5. Calculated neutron elastic scattering analyzing powers for ^{208}Pb , compared with experimental data and those by K-D potential.

本文对 ^{208}Pb 的中子弹性散射角分布和分析本领的计算情况如图 4 和图 5 所示. 我们的计算结果较好地描述了实验数据, 对实验数据的描述质量优于 K-D 光学势.

本文对 ^{208}Pb 的质子弹性散射分析本领的计算情况如图 6 和图 7 所示. 我们的计算结果与实验数据符合得很好, 对实验数据的描述质量明显优于 K-D 光学势给出的结果.

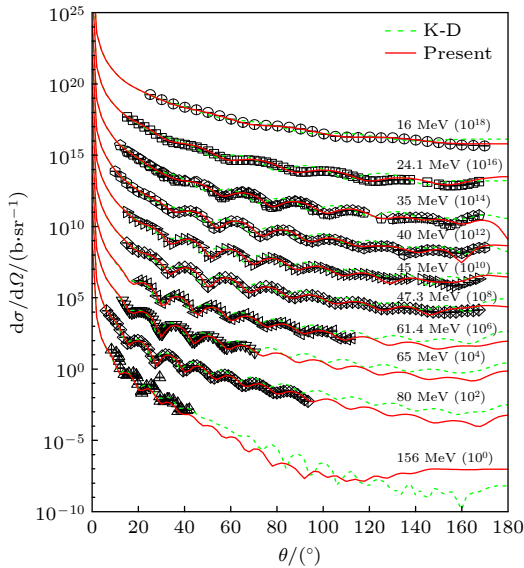


图 6 ^{208}Pb 的质子弹性散射角分布计算结果与 K-D 质子光学势给出的计算结果以及相关实验数据的比较

Fig. 6. Calculated proton elastic scattering angular distributions for ^{208}Pb , compared with experimental data and those by K-D potential.

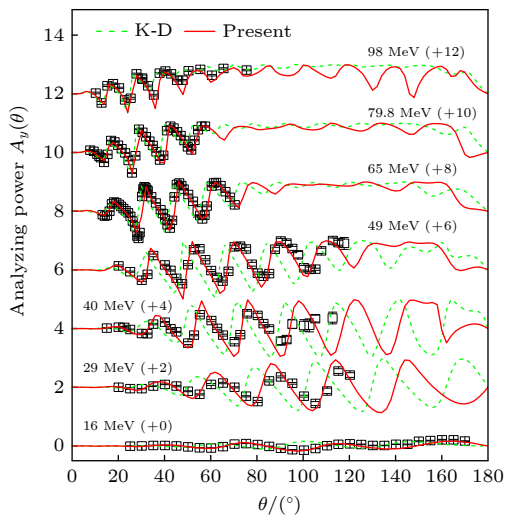


图 7 ^{208}Pb 的质子弹性散射分析本领计算结果与 K-D 质子光学势给出的计算结果以及相关实验数据的比较

Fig. 7. Calculated proton elastic scattering analyzing powers for ^{208}Pb , compared with experimental data and those by K-D potential.

如图 8 所示, 由于描述中子和质子两种核子同位旋态的光学势之间的差异可以由同位旋矢量项来确定, 因此本文实现了对 (p, n) 准弹性散射角分布数据的合理描述.

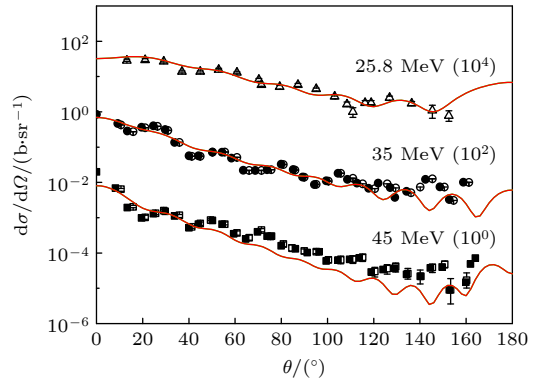


图 8 ^{208}Pb 的 (p, n) 准弹性散射角分布计算结果与相关实验数据的比较

Fig. 8. Comparison of (p, n) angular distributions of the quasielastic (p, n) scattering on ^{208}Pb with experimental data.

4 结 论

本文通过引入同位旋矢量项合理地考虑了同位旋依赖性, 使得光学势在形式上与 Lane 方程自洽, 区别于 K-D 光学势在计算中子和质子诱发核反应数据时需要采用两套参数, 本文的光学势实现了采用同一套参数计算两种核子入射时的核反应数据. 利用所得到的 Lane 自洽的色散光学模型及其光学势, 高质量地实现了对 ^{208}Pb 包括中子总截面、弹性散射角分布、分析本领以及 (p, n) 准弹性散射角分布在内的散射数据的描述.

参考文献

- [1] Wu Y C, Bai Y Q, Song Y, Huang Q Y, Liu C, Wang M H, Zhou T, Jin M, Wu Q S, Wang J Y, Jang J Q, Hu L Q, Li C J, Gao S, Li Y Z, Long P C, Zhao Z M, Yu J, FDS Team 2014 *Nucl. Sci. and Eng.* **34** 201 (in Chinese) [吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 黄群英, 刘超, 王明煌, 周涛, 金鸣, 吴庆生, 汪建业, 蒋洁琼, 胡丽琴, 李春京, 高胜, 李亚洲, 龙鹏程, 赵柱民, 郁杰, FDS 团队 2014 *核科学与工程* **34** 201]
- [2] Nifenecker H, David S, Loiseaux J M, Meplan O 2001 *Nucl. Instrum. Methods A* **463** 505
- [3] Gudowski W 2000 *Nucl. Phys. A* **663-664** 169c
- [4] Qaim S M 2001 *Radiochim. Acta* **89** 189
- [5] Stankovskiy A, Malambu E, Eynde G V D, Diez C J 2014 *Nucl. Data Sheets* **118** 513
- [6] Yang W S, Khalil H S 1999 *Trans. Am. Nucl. Soc.* **81** 273
- [7] Martin M J 2007 *Nucl. Data Sheets* **108** 1583
- [8] Koning A J, Delaroche J P 2003 *Nucl. Phys. A* **713** 231
- [9] Soukhovitskii E Sh, Capote R, Quesada J M, Chiba S 2005 *Phys. Rev. C* **72** 024604

- [10] Capote R, Chiba S, Soukhovitskiĭ E Sh, Quesada J M, Bauge E 2008 *J. Nucl. Sci. Tech.* **45** 333
- [11] Zhao X N, Sun W L, Soukhovitskiĭ E Sh, Martyanov D S, Quesada J M, Capote R 2021 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **48** 075101
- [12] Zhao X N, Du W Q, Capote R, Soukhovitskiĭ E Sh 2023 *Phys. Rev. C* **107** 064606
- [13] Mahaux C, Sartor R 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 3015
- [14] Zhao X N, Du W Q 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 222401 (in Chinese) [赵岫鸟, 杜文青 2023 物理学报 **72** 222401]
- [15] Quesada J M, Capote R, Soukhovitskiĭ E Sh, Chiba S 2007 *Phys. Rev. C* **76** 057602
- [16] Lipperheide R 1967 *Z. Phys.* **202** 58
- [17] Mahaux C, Sartor R 1991 *Nucl. Phys. A* **528** 253
- [18] Brown G E, Rho M 1981 *Nucl. Phys. A* **372** 397
- [19] Delaroche J P, Wang Y, Rapaport J 1989 *Phys. Rev. C* **39** 391
- [20] Quesada J M, Capote R, Molina A, Lozano M, Raynal J 2003 *Phys. Rev. C* **67** 067601
- [21] Chiba S, Iwamoto O, Yamanouti Y, Sugimoto M, Mizumoto M, Hasegawa K, Soukhovitskiĭ E Sh, Porodzinski ĩ Y V, Watanabe Y 1997 *Nucl. Phys. A* **624** 305
- [22] Lane A M 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 171
- [23] Lane A M 1962 *Nucl. Phys.* **35** 676
- [24] EXchange FORmat database (EXFOR) is maintained by the Network of Nuclear Reaction Data Centers (see www-nds.iaea.org/nrdc/). Data available online (e.g., at www-nds.iaea.org/exfor/)
- [25] Capote R, Herman M, Obložinský P, Young P G, Goriely S, Belgya T, Ignatyuk A V, Koning A J, Hilaire S, Plujko V A, Avrigeanu M, Bersillon O, Chadwick M B, Fukahori T, Ge Z G, Han Y L, Kailas S, Kopecky J, Maslov V M, Reffo G, Sin M, Soukhovitskiĭ E Sh, Talou P 2009 *Nucl. Data Sheets* **110** 3107

Research on Lane-consistent dispersive optical-model potential for ^{208}Pb

DU Wenqing ZHAO Xiuniao[†]

(College of Physical Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

(Received 10 September 2024; revised manuscript received 30 December 2024)

Abstract

Lead is an important alloy material and nuclear fuel component. Lead-based eutectic alloys serve as important coolants and have been extensively utilized in the construction of lead-cooled fast reactor, such as the European lead-cooled System (ELSY) and the China lead-based Research reactor (CLEAR-I). These materials also play a significant role in research related to Generation-IV reactors. The study and calculation of lead nuclear data have important theoretical value and application prospects. ^{208}Pb is the most stable and abundant isotope in lead nuclei, and high-quality description of ^{208}Pb nuclear scattering data is important in achieving accurate theoretical calculations of nuclear reaction cross-sections in lead-based nuclear systems. Based on the dispersive optical model, the nucleon scattering on ^{208}Pb is described through the implementation of a dispersive optical potential in this work. The dispersive optical model potential is defined as energy-dependent real potential and imaginary potential. The dispersive contribution corresponding to the real potential is calculated analytically from the corresponding imaginary potential by using a dispersion relation, and the isospin dependence is reasonably considered by introducing an isovector component (i.e. Lane term) into the real part and the imaginary part of potential: the depth constant of the real Hartree-Fock potential V_{HF} and the depth constant of surface imaginary potential W_s . Unlike K-D potential, which requires two different sets of parameters to describe neutron and proton induced scattering data. This optical potential uses the same set of parameters to simultaneously describe nucleon-nucleus scattering data. The derived potential in this work shows a very good description of nucleon-nucleus scattering data on ^{208}Pb with energies up to 200 MeV. The calculated neutron total cross sections, neutron and proton elastic scattering angular distributions, and neutron and proton elastic analyzing powers are shown to be in good agreement with experimental data. Additionally, the difference in potential between neutrons and protons induced is described by an isovector term, achieving the reasonable and good prediction of quasielastic (p, n) scattering data.

Keywords: optical model, dispersive optical model potential, nucleon elastic scattering

PACS: 24.10.-i, 24.10.Ht

DOI: 10.7498/aps.74.20241273

CSTR: 32037.14.aps.74.20241273

[†] Corresponding author. E-mail: zhao_xiuniao@163.com



^{208}Pb 的Lane自洽色散光学势

杜文青 赵岫鸟

Research on Lane-consistent dispersive optical-model potential for ^{208}Pb

DU Wenqing ZHAO Xiuniao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 052401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241273

CSTR: 32037.14.aps.74.20241273

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241273>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于色散光学模型的 ^{40}Ca 核子散射数据计算

Calculation of nucleon scattering on ^{40}Ca based on dispersive optical model

物理学报. 2023, 72(22): 222401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231054>

离子的低能电子弹性散射研究: 共振态与同分异构

Low-energy electron elastic scattering of anions: Resonance states and conformers

物理学报. 2024, 73(24): 243401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241377>

大气光学湍流模式研究—方法和进展

Analysis of atmospheric optical turbulence model—methods and progress

物理学报. 2023, 72(4): 049201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221986>

一种基于多重散射的光学Hash函数

Optical Hash function based on multiple scattering media

物理学报. 2021, 70(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201492>

光学腔中一维玻色-哈伯德模型的奇异超固相

Exotic supersolid phase of one-dimensional Bose-Hubbard model inside an optical cavity

物理学报. 2021, 70(19): 193701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210778>

金属基底上光学偶极纳米天线的自发辐射宽带增强: 表面等离子激元直观模型

Broadband enhancement of spontaneous emission by optical dipole nanoantenna on metallic substrate: An intuitive model of surface plasmon polariton

物理学报. 2022, 71(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212290>