

^{238}U 核子散射数据的理论计算*

赵岫鸟 杜文青†

(渤海大学物理科学与技术学院, 锦州 121013)

(2025 年 10 月 28 日收到; 2025 年 12 月 23 日收到修改稿)

变形核 (尤其是大变形核) 核反应数据的研究意义不言而喻. 其中, ^{238}U 作为最主要的铀同位素以及锕系核素, 对其核子散射数据的计算和研究具有重要的理论价值和应用前景. 通过旋转子模型再现 ^{238}U 的低激发态集体能级, 本工作获得了 ^{238}U 的耦合道色散光学势. 利用该光学势不仅可以良好地实现对 ^{238}U 中子总截面以及包括弹性散射角分布和分析本领在内的核子弹性散射数据的理论计算, 还能够通过耦合道方法同时实现对核子非弹性散射数据的理论计算.

关键词: 耦合道光学模型, 色散光学势, 核子散射**DOI:** 10.7498/aps.75.20251469**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251469

1 引言

在散射过程中, 核子与重质量靶核的相互作用体系非常复杂, 不仅要考虑靶核与入射核子之间的相互作用, 还要考虑靶核中所有核子之间的相互作用, 其中每组核子-核子相互作用又都包含中心分量、交换分量和张量分量. 若想从核子-核子相互作用出发, 对整个庞大的相互作用体系进行完整而精密的描述几乎是无法实现的, 因此在核反应数据的计算中通常需要采用光学模型. 采用光学模型可将复杂的相互作用体系所引起的多体问题近似为一个两体问题, 从而将核子与靶核的相互作用近似地看作一个核子与靶核之间的两体势. 作为描述核反应最基本的理论模型, 光学模型从提出到现在得到了长足的发展^[1-8], 利用光学模型可以实现总截面以及核子散射数据的理论计算, 被广泛地应用于各大核数据库的相关计算中. 近期, 作者采用一种形式上电荷独立且与 Lane 方程自洽的色散光学势对球形核的核数据进行了理论计算和研究, 实现了

^{208}Pb 等核素核子散射数据的良好描述^[9-11]. 区别于以往工作中出于对色散效应的考虑需要额外添加修正项, 该光学势引入色散关系, 通过虚部自洽地得到色散修正项, 同时去除了光学势中几何参数的能量相关性. 此外, 该势还引入同位旋矢量项, 实现了用一套参数同时对中子和质子散射数据进行描述, 进一步减少了光学势参数的个数和参数选取的不确定性^[10].

对于球形核 (或近球形核), 非弹性散射等直接反应发生的概率相较于弹性散射来说较小, 除弹性散射外剩余相互作用较小, 可以采用球形的光学势对弹性散射数据进行计算, 而包括直接非弹性散射在内的直接反应数据通常采用扭曲波玻恩近似 (DWBA) 方法进行计算. 对于变形核 (乃至大变形核), 由于其激发态较低, 除弹性散射外发生其他反应的概率较大, 剩余相互作用较大, DWBA 方法不再像对球形核以及近球形核那样适用. 变形核的核子散射问题可以采用耦合道光学模型进行分析和计算^[12-14]. 耦合道光学模型通过利用原子核的形状变化来描述靶核的集体运动, 入射粒子和靶核

* 辽宁省自然科学基金计划博士科研启动项目 (批准号: 2025-BS-0824) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: duwenqing@qymail.bhu.edu.cn

之间的相互作用需要采用非球形光学势来进行唯象描述. 耦合道光学模型中光学势可以分为与角度无关的球形部分以及与角度有关的耦合项. 因此, 原子核的形变不能被忽略, 需要利用几何模型对形变信息进行考虑, 从而描述非球形的耦合项以及相应的径向波函数. 基于 Davydov-Chaban 几何模型^[15,16], 旋转子模型被提出并且得到了较大的发展^[17-19], 该模型将原子核看作是一个可以发生形变的转子, 允许发生包括沿着轴向的、非轴向的多极形变, 可用来描述转动、 β 振动和 γ 振动能级, 即描述靶核的低激发集体态能级. 耦合项会引起不同态间的耦合, 从而得到各自径向波函数所满足的耦合方程. 求解径向方程即可计算相应截面, 并且同时计算包括弹性散射和(低激发集体态的)非弹性散射角分布在内的散射数据^[20].

在天然铀中, ^{238}U 的自然丰度高达 99.27%, 而在重要的军工材料贫铀中, ^{238}U 的占比达到 99.8% 以上. 作为最主要的铀同位素, ^{238}U 在武器、军工以及能源等核科学与技术领域都有着重要的地位, 因此对 ^{238}U 核子散射数据的计算和研究有着重要的理论价值和应用前景. 通过旋转子模型再现 ^{238}U 的低激发态集体能级并构建耦合能级系统, 本文采用耦合道光学模型旨在实现对 ^{238}U 中子总截面、核子弹性散射角分布、核子非弹性散射角分布以及分析本领等核子散射数据的高质量描述.

2 理论模型

本工作采用耦合道光学模型对变形核 ^{238}U 的核子散射数据进行理论计算, 其中耦合道色散光学势的具体形式如下:

$$\begin{aligned}
 & V(r, R(\theta', \varphi'), E) \\
 &= -V_{\text{HF}}(E^*) \times f_{\text{WS}}(r, R_{\text{HF}}(\theta', \varphi')) \\
 &\quad - [\Delta V_v(E^*) + iW_v(E^*)] \times f_{\text{WS}}(r, R_v(\theta', \varphi')) \\
 &\quad - [\Delta V_s(E^*) + iW_s(E^*)] \times g_{\text{WS}}(r, R_s(\theta', \varphi')) \\
 &\quad + \left(\frac{\hbar}{m_\pi c}\right)^2 [V_{\text{so}}(E^*) + \Delta V_{\text{so}}(E^*) + iW_{\text{so}}(E^*)] \\
 &\quad \times \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f_{\text{WS}}(r, R_{\text{so}}(\theta', \varphi')) \times (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{L}) \\
 &\quad + V_{\text{Coul}}(r, R_C(\theta', \varphi')), \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中, V_{HF} 和 V_{so} 分别表示 Hartree-Fock 势和自旋-轨道耦合实部势; W_v , W_s 和 W_{so} 分别表示体、表

面和自旋-轨道耦合虚部势; V_{Coul} 表示库仑势; 中子入射时有效能量 E^* 表示中子的入射能量, 而质子入射时 E^* 表示质子的入射能量与 E_{Coul} 的差值. 各个势的含义以及具体表示形式详见文献^[10]. 区别于球形色散光学势, 变形核的形变信息被考虑在色散耦合道光学模型势的形变半径 $R_i(\theta', \varphi')$ (下标 i 分别代表 HF, v, s, so) 中. 利用旋转子模型, 在随体坐标系中瞬时形变的半径可表示为

$$\begin{aligned}
 R_i(\theta', \varphi') &= R_{0i} \left\{ 1 + \sum_{\lambda=2,4,6,8} \beta_{\lambda 0} Y_{\lambda 0}(\theta', \varphi') \right. \\
 &\quad + \beta_2 \left[\cos \gamma Y_{20}(\theta') + \frac{\sin \gamma}{\sqrt{2}} (Y_{22}(\theta', \varphi') + Y_{2-2}(\theta', \varphi')) \right] \\
 &\quad \left. + \beta_3 \left[\cos \eta Y_{30}(\theta') + \frac{\sin \eta}{\sqrt{2}} (Y_{32}(\theta', \varphi') + Y_{3-2}(\theta', \varphi')) \right] \right\}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

其中, $Y_{\lambda\mu}(\theta', \varphi')$ 表示球谐函数, (θ', φ') 表示随体坐标系中的角度坐标; $\beta_{\lambda 0}$ 表示静态形变参数; β_2 (四极形变)、 γ (四极非轴形变)、 β_3 (八极变形) 和 η (八极非轴形变) 表示动态形变参数^[21].

如图 1 所示, 本工作采用旋转子模型很好地再现了 ^{238}U 的低激发集体态能级, 构建了 ^{238}U 的 5 条能带中 21 条能级的耦合能级系统, 包括 $K^\pi = 0^+$ 的基态转动带、 $K^\pi = 0^-$ 的八极振动带、 $K^\pi = 2^+$ 的 γ 振动带、 $K^\pi = 0^+$ 的不规则能带以及 $K^\pi = 0^+$ 的 β 振动带在内.

由截面 σ_{tot} 和角分布 $d\sigma/d\Omega$ 数据的实验值和计算值可以定义如下形式的目标函数 χ^2 ^[9,21]:

$$\begin{aligned}
 \chi^2 &= \frac{1}{N+M} \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} \left(\frac{d\sigma_{ij}^{\text{cal}}/d\Omega - d\sigma_{ij}^{\text{exp}}/d\Omega}{\Delta\sigma_{ij}^{\text{exp}}/d\Omega} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{i=1}^M \left(\frac{\sigma_{\text{tot},i}^{\text{cal}} - \sigma_{\text{tot},i}^{\text{exp}}}{\Delta\sigma_{\text{tot},i}^{\text{exp}}} \right)^2 \right]. \tag{3}
 \end{aligned}$$

表 1 列出了本文通过使目标函数 χ^2 达到最小所得到的耦合道色散光学势参数.

3 结果及分析

^{238}U 中子总截面的计算结果如图 2 所示. 本文对中子入射能量在 0.1 MeV 以下的中子总截面平均趋势的描述与 JENDL-5 给出的评价数据相似, 在 0.1—1 MeV 能量区域内对中子总截面的描述与 CENDL-3.2 库给出的评价数据一致, 而在

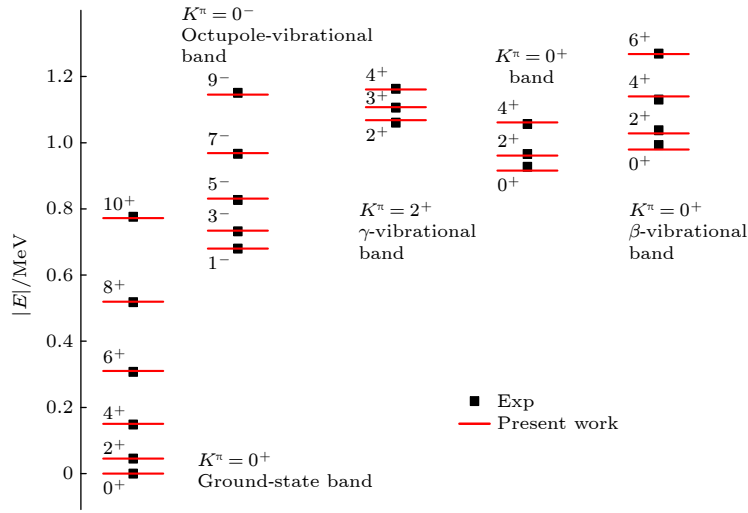


图 1 ^{238}U 的耦合能级系统

Fig. 1. Coupling scheme used in the coupled-channels calculation for ^{238}U .

表 1 ^{238}U 的耦合道色散光学势参数

Table 1. Dispersive coupled-channels optical-model potential parameters for nucleon induced reactions on ^{238}U .

	V_{HF}	Volume	Surface	Spin-orbit	Coulomb
Potential	$V_0 = 50.4 \text{ MeV}$	$A_v = 11.2 \text{ MeV}$	$W_0 = 16.2 \text{ MeV}$	$V_{\text{so}} = 7.0 \text{ MeV}$	$C_{\text{Coul}} = 1.0 \text{ MeV}$
	$\lambda_{\text{HF}} = 0.009 \text{ MeV}^{-1}$	$B_v = 80.5 \text{ MeV}$	$B_s = 10.6 \text{ MeV}$	$\lambda_{\text{so}} = 0.005 \text{ MeV}^{-1}$	
	$C_{\text{viso}} = 19.85 \text{ MeV}$	$E_a = 56 \text{ MeV}$	$C_s = 0.01 \text{ MeV}^{-1}$	$W_{\text{SO}} = -3.1 \text{ MeV}$	
			$C_{\text{viso}} = 29.98 \text{ MeV}$	$B_{\text{so}} = 160 \text{ MeV}$	
Geometry	$r_{\text{HF}} = 1.26 \text{ fm}$	$r_v = 1.27 \text{ fm}$	$r_s = 1.17 \text{ fm}$	$r_{\text{so}} = 1.00 \text{ fm}$	$r_c = 1.50 \text{ fm}$
	$a_{\text{HF}} = 0.63 \text{ fm}$	$a_v = 0.70 \text{ fm}$	$a_s = 0.60 \text{ fm}$	$a_{\text{so}} = 0.60 \text{ fm}$	$a_c = 0.60 \text{ fm}$

1—30 MeV 能量区域内对 neutron 总截面的描述与 ENDF/B-VIII.1 库给出的评价数据一致. 此外, 相比于 JENDL-5 库给出的评价数据, 本文对 neutron 入射能量在 30 MeV 以上的 neutron 总截面的描述与实验数据符合得更好. 其中, ENDF/B-VIII.1 评价库

只给出了 neutron 入射能量在 30 MeV 以下的评价数据, 而本文得到的光学势能够很好地再现 neutron 入射能量高达 200 MeV 的 ^{238}U neutron 总截面实验数据, 并且所得到的计算结果与实验数据的吻合程度 (尤其在 10 MeV 附近) 优于文献 [22] 中的光学势. 文中出现的实验数据以及相应的文献均可在 EXFOR 实验数据库 [23] 中找到.

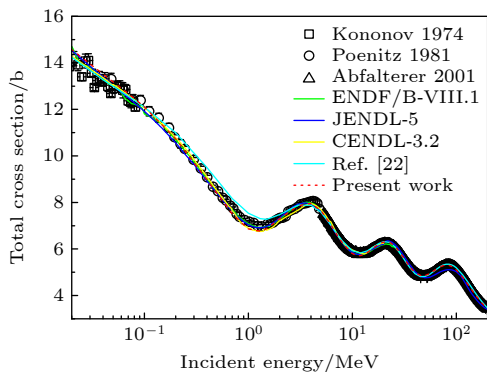


图 2 ^{238}U neutron 总截面的计算结果与实验数据、各大数据库中评价数据以及采用文献 [22] 中光学势得到的计算结果的比较

Fig. 2. Comparison of calculated total neutron cross sections for ^{238}U with experimental data, evaluated data, and calculations using the optical potential from Ref. [22].

图 3 和图 4 分别展示了 neutron 和质子弹性散射角分布计算结果与相应实验数据的比较情况, 计算结果很好地吻合了实验数据. 当入射能量较低时, 弹性散射反应道占主导地位. 随着入射能量的增加, 其他反应道相继出现, 与弹性散射竞争, 从而减小了弹性散射截面. 此外, 核子入射能量较低时, 复合弹性散射对总弹性散射有着显著的贡献, 该贡献将随着核子入射能量的升高而减少.

非弹性散射是在剩余相互作用下入射粒子与靶核中核子发生碰撞的一种直接反应, 该过程使入射粒子在损失部分能量后射出的同时让靶核处于低激发集体态. 这种激发是入射粒子与靶核的集体

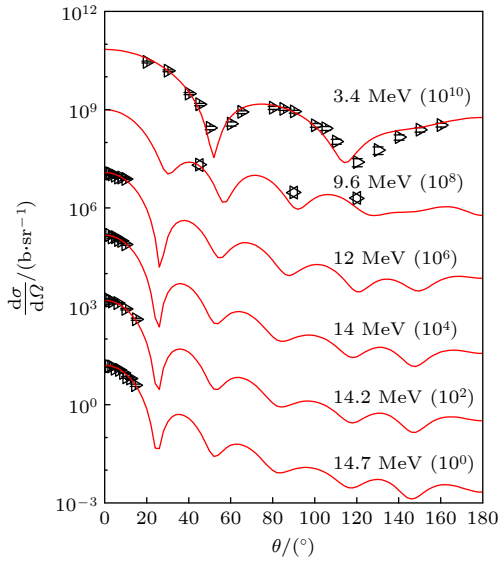


图 3 ^{238}U 中子弹性散射角分布的计算结果与实验数据的比较

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated neutron elastic scattering angular distributions for ^{238}U at different incident neutron energies.

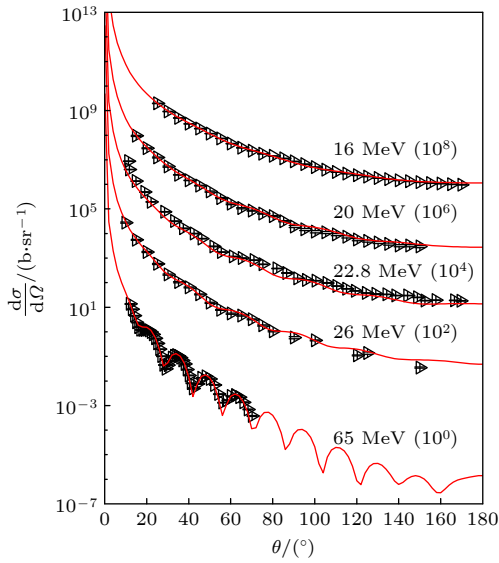


图 4 ^{238}U 质子弹性散射角分布的计算结果与实验数据的比较

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated proton elastic scattering angular distributions for ^{238}U at different incident proton energies.

运动自由度相互作用得到的振动和转动激发, 耦合道方法通过描述低激发集体态可以实现对核子非弹性散射数据的计算. 图 5 和图 6 分别展示了中子和质子非弹性散射角分布计算结果与相应实验数据的比较情况. 图中展示的非弹性散射的能级为基态能带的能级. 核子入射能量较低时, 计算结果相较于实验数据偏低, 这部分差异与复合系统的贡献

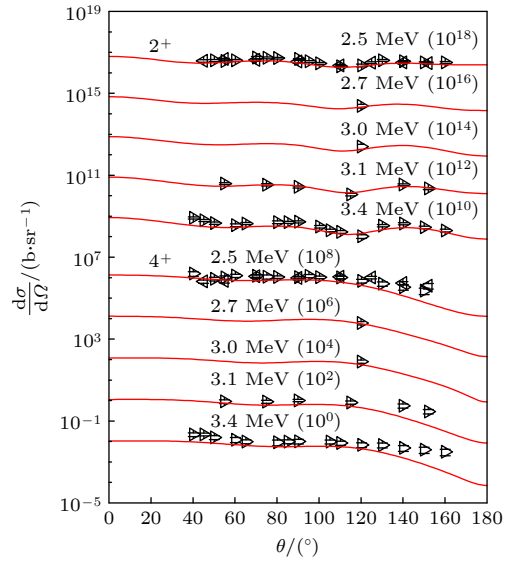


图 5 ^{238}U 中子非弹性散射角分布的计算结果与实验数据的比较

Fig. 5. Comparison of experimental and calculated neutron inelastic scattering angular distributions for ^{238}U at different incident neutron energies.

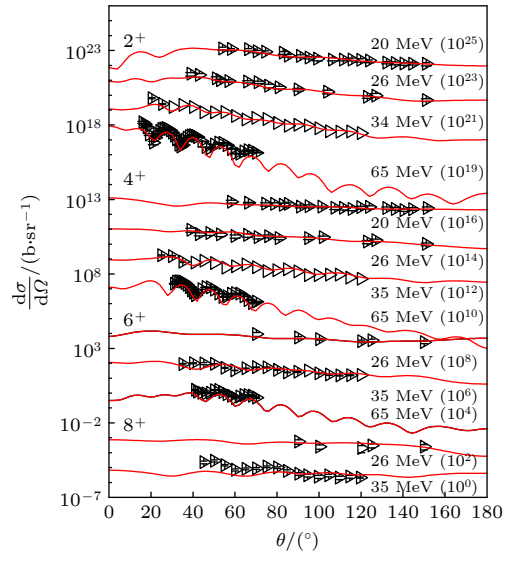


图 6 ^{238}U 质子非弹性散射角分布的计算结果与实验数据的比较

Fig. 6. Comparison of experimental and calculated proton inelastic scattering angular distributions for ^{238}U at different incident proton energies.

有关. 复合系统对非弹性散射的贡献与其对弹性散射的贡献相似, 复合核反应主要发生在低入射能量下, 并随着入射能量的增加而减小. 此外, 复合系统对散射角分布的贡献关于 90° 对称.

^{238}U 核子散射分析本领的计算结果与实验数据的比较情况如图 7 所示, 图中发生非弹性散射的能级为基态能带的能级. 可以看出, 本文给出的理

论计算与实验数据有着较好的一致性,但对自旋较高的能级描述的准确性还有待提高.

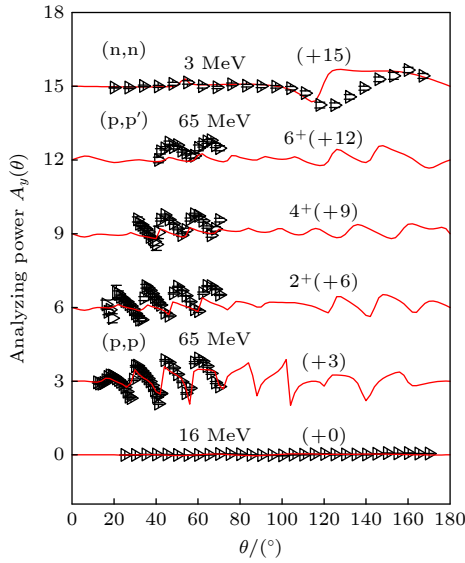


图 7 ^{238}U 核子散射分析本领的计算结果与实验数据的比较
Fig. 7. Comparison of experimental and calculated nucleon elastic and inelastic scattering analyzing powers for ^{238}U at different incident nucleon energies.

4 结 论

本工作采用耦合道光学模型,通过采用旋转子模型很好地再现了 ^{238}U 的低激发态集体能级,获得了重要锕系核 ^{238}U 的耦合道色散光学势.利用该势不仅可以很好地计算中子总截面以及包括核子弹性散射角分布和分析本领在内的弹性散射数据,还可以利用耦合道方法同时实现对核子非弹性散射角分布和分析本领等核子非弹性散射数据的理论计算.

参考文献

- [1] Woods C L, Brown B A, Jelley N A 1982 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **8** 1699
- [2] Satchler G R, Love W G 1979 *Phys. Rep.* **55** 183
- [3] Koning A J, Delaroche J P 2003 *Nucl. Phys. A* **713** 231
- [4] Morillon B, Romain P 2004 *Phys. Rev. C* **70** 014601
- [5] Dickhoff W H, Charity R J 2019 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **105** 252
- [6] Zhao X N, Sun W L, Soukhovitskiĭ E Sh, Martyanov D S, Quesada J M, Capote R 2019 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **46** 055103
- [7] Zhao X N, Sun W L, Capote R, Soukhovitskiĭ E Sh, Martyanov D S, Quesada J M 2020 *Phys. Rev. C* **101** 064618
- [8] Zhao X N, Du W Q, Capote R, Soukhovitskiĭ E Sh 2023 *Phys. Rev. C* **107** 064606
- [9] 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]
- [10] Du W Q, Zhao X N 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 052401 (in Chinese) [杜文青, 赵岫鸟 2025 *物理学报* **74** 052401]
- [11] Du W Q, Zhao X N 2025 *Eur. Phys. J. A* **61** 52
- [12] Sukhovitskiĭ E Sh, Chiba S, Lee J Y, Iwamoto O, Fukahori T 2004 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **30** 905
- [13] Sukhovitskiĭ E Sh, Capote R, Quesada J M, Chiba S 2005 *Phys. Rev. C* **72** 024604
- [14] Capote R, Sukhovitskiĭ E Sh, Quesada J M, Chiba S 2005 *Phys. Rev. C* **72** 064610
- [15] Davydov A S 1960 *Nucl. Phys.* **16** 597
- [16] Davydov A S 1961 *Nucl. Phys.* **24** 682
- [17] Sukhovitskiĭ E Sh, Chiba S, Iwamoto O, Porodzinskiĭ Yu V 1998 *Nucl. Phys. A* **640** 147
- [18] Sukhovitskiĭ E Sh, Capote R, Quesada J M, Chiba S, Martyanov D S 2016 *Phys. Rev. C* **94** 064605
- [19] Zhao X N, Sun W L, Sukhovitskiĭ E Sh, Martyanov D S, Quesada J M, Capote R 2021 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **48** 075101
- [20] Tamura T 1965 *Rev. Mod. Phys.* **37** 679
- [21] Sukhovitskiĭ E Sh, Lee J Y, Chang J, Chiba S, Iwamoto O 2000 *Phys. Rev. C* **62** 044605
- [22] Martyanov D S, Sukhovitskiĭ E Sh, Capote R, Quesada J M, Chiba S 2017 *EPJ Web of Conf.* **146** 12031
- [23] 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/)

Theoretical calculation of nucleon scattering data on $^{238}\text{U}^*$

ZHAO Xiuniao DU Wenqing[†]*(College of Physical Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China)*

(Received 28 October 2025; revised manuscript received 23 December 2025)

Abstract

The investigation of nuclear reaction data for deformed nuclei (especially well-deformed nuclei) is self-evident in its significance. As the most major uranium isotope and actinide, the natural abundance of ^{238}U is as high as 99.27%, and in the important military material depleted uranium, ^{238}U accounts for more than 99.8%. ^{238}U plays an important role in nuclear science and technology fields such as weapons, military, and energy. Therefore, the theoretical calculation and research of ^{238}U nucleon scattering data have significant theoretical value and application prospects. For spherical nuclei (or near-spherical nuclei), the elastic scattering data can be calculated using the spherical optical potential, while for nucleon scattering of deformed nuclei (or even well-deformed nuclei), a coupled-channels optical model needs to be used for analysis and calculation. The coupled-channels optical model no longer uses a spherical optical potential. Moreover, the nuclear deformation cannot be ignored and needs to be described in the rotator structure model. The low-lying collective levels of ^{238}U are well reproduced using the soft-rotator model. Using the coupled-channels optical model, a dispersive coupled-channels optical potential for ^{238}U is obtained. The derived potential shows a good description of nucleon-nucleus scattering data up to 200 MeV, including neutron total cross sections, nucleon elastic scattering angular distributions, nucleon inelastic scattering angular distributions, nucleon elastic analyzing powers, and nucleon inelastic analyzing powers.

Keywords: coupled channel optical model, dispersive optical potential, nucleon scattering**DOI:** [10.7498/aps.75.20251469](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251469)**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251469](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251469)

* Project supported by the Doctoral Scientific Research Staring Foundation of Liaoning Province, China (Grant No. 2025-BS-0824).

[†] Corresponding author. E-mail: duwenqing@qymail.bhu.edu.cn



^{238}U 核子散射数据的理论计算

赵岫鸟 杜文青

Theoretical calculation of nucleon scattering data on ^{238}U

ZHAO Xiuniao DU Wenqing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090104 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251469

CSTR: 32037.14.aps.75.20251469

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251469>

当期内容 View table of contents: <http://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>

^{208}Pb 的Lane自洽色散光学势

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

物理学报. 2025, 74(5): 052401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241273>

亚化学计量金属氢化物热散射律数据计算分析

Calculation and analysis of thermal scattering law data of sub-stoichiometric metal hydrides

物理学报. 2025, 74(22): 222801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250928>

周期调制四通道光学波导的宇称-时间对称特性调控和动力学研究

Parity-time symmetry characterization and dynamics of periodically modulated four-channel optical waveguides

物理学报. 2024, 73(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240690>

传统光学模型的改进及其在重离子碰撞反应中的应用

Improvements of traditional optical model and its applications in heavy-ion collision reaction

物理学报. 2025, 74(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250633>

高阶色散下双耦合微腔中克尔光频梳的稳定性和非线性动力学分析

Stability and non-linear dynamic analysis of Kerr optical frequencycombs in dual-coupled microcavities with high-order dispersion

物理学报. 2022, 71(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220691>