

文章编号:1673-0062(2016)03-0005-05

利用 $n+^{206}\text{Pb}$ 反应研究核物质宏观参量对核反应数据的影响

宋 誉¹, 郑 波¹, 向 东¹, 李小华^{1*}, 蔡崇海²

(1.南华大学核科学技术学院,湖南衡阳 421001;2.南开大学物理学院,天津 300071)

摘要:以 Skyrme 力的微观光学模型及 Modified Skyrme Like 模型为基础,利用 $n+^{206}\text{Pb}$ 反应研究了核物质的宏观参量对核反应数据的影响.研究表明:饱和密度处对称能的值 $E_{\text{sym}}(\rho_0)$ 、核子同位旋标量有效质量 m_s^* 及不可压缩系数 K_0 的变化对核反应数据的影响较大.通过计算分析可以给出它们的近似取值: $E_{\text{sym}}(\rho_0) \approx 31.56 \text{ MeV}$, $m_s^* = 0.67m$, (m 为自由核子质量), $L \approx 70.2 \text{ MeV}$.

关键词: Skyrme 力;核物质宏观参量;微观光学模型

中图分类号: O571.4 **文献标识码:** B

Effect of Nuclear Matter Macroscopic Parameters on Nuclear Reaction Data Studied through $n+^{208}\text{Pb}$ Reaction

SONG Yu¹, ZHENG Bo¹, XIANG Dong¹, Li Xiao-hua^{1*}, CAI Chong-hai²

(1.School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Based on Microscopic Optical Model of Skyrme force and Modified Skyrme Like Model, using the reaction of $n+^{206}\text{Pb}$ reaction as example, we study the effect of Nuclear Matter Macroscopic Parameters on the nuclear reaction data. The results indicate that the nuclear reaction data is very sensitive to the value of symmetry energy at normal density $E_{\text{sym}}(\rho_0)$, the nucleon iso-scalar effective mass m_s^* and the incompressibility coefficient K_0 . Through the analysis of calculations, we can obtain the approximate values of those, i. e. $E_{\text{sym}}(\rho_0) \approx 31.56 \text{ MeV}$, $m_s^* \approx 0.67m$ (where m is the mass of nucleon in free-space), $L \approx 70.2 \text{ MeV}$.

收稿日期: 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11205083; 11205082); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3103; 12JJ4009); 湖南省教育厅重点基金资助项目(15A159); 南华大学博士科研启动基金(2010XQD29; 2011XQD28); 南华大学粒子物理与原子核物理创新团队

作者简介: 宋 誉(1990-),男,湖南益阳人,南华大学核科学技术学院硕士研究生.主要研究方向:核反应理论及对称能.* 通讯作者.

key words: Skyrme force; nuclear matter macroscopic parameters; microscopic optical model

0 引言

按时间发生的先后顺序,核反应可分为三个阶段^[1]:1)独立粒子阶段,2)复合系统阶段,3)结束阶段.不同的阶段用不同的模型理论来描述,光学模型则是描述核反应第一阶段的成功理论.光学模型将核子-核之间的相互作用归结为核子在核所提供的平均场中做单粒子运动.它是核反应理论模型计算的基础和基本出发点.光学势则是光学模型的核心,它按类型可分为微观势和唯像势.本工作利用基于 Skyrme 力的微观光学模型^[2-3]及 Modified Skyrme like 模型^[4],以 $n+^{206}\text{Pb}$ 反应为例,分析了核物质宏观参量对核反应实验数据的影响.

1 理论模型

1.1 Skyrme 力

1956年,Skyrme 根据核力具有短程性及饱和性的特点,给出了一种核力的唯像形式,后来将这种唯像核力称为 Skyrme 力^[5],其形式如下:

$$\begin{aligned}
 V_{12}(\vec{R},\vec{r}) = & t_0(1+x_0P^\sigma)\delta(\vec{r}) + \\
 & \frac{1}{6}t_3(1+x_3P^\sigma)\rho^\alpha\delta(\vec{r}) + \\
 & \frac{1}{2}t_1(1+x_1P^\sigma)(\vec{K}^{\prime 2}\delta(\vec{r}) + \delta(\vec{r})\vec{k}^2) + \\
 & \frac{1}{2}t_4(1+x_4P^\sigma)(\vec{K}^{\prime 2}\rho(\vec{R})\delta(\vec{r}) + \\
 & \delta(\vec{r})\rho(\vec{R})\vec{K}^2) + \\
 & t_2(1+x_2P^\sigma)\vec{K}^{\prime} \cdot \delta(\vec{r})\vec{k} + \\
 & t_5(1+x_5P^\sigma)\vec{K}^{\prime} \cdot \rho(\vec{R})\delta(\vec{r})\vec{k} + \\
 & iW_0(\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2) \cdot \vec{k}^{\prime} \times \delta(\vec{r})\vec{k}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\vec{R} = \frac{1}{2}(\vec{r}_1 + \vec{r}_2)$, $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$, $\vec{k} = \frac{1}{2i}(\vec{\nabla}_1 - \vec{\nabla}_2)$ 表示向右作用, $\vec{k}^{\prime} = -\frac{1}{2i}(\vec{\nabla}_1 - \vec{\nabla}_2)$ 表示向左作用.与密度有关的 t_3, t_4, t_5 三项均为由三体力转变过来的二体力项.

1.2 Modified Skyrme Like 模型

陈列文等人利用 MSL(Modified Skyrme Likem)模型^[4],解析给出了核物质的宏观参量与 Skyrme 力

参数的解析对应关系可表示为如下的形式:

$$t_0 = \frac{4\alpha}{3\rho_0} \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{20C}{[9\rho_0(k_F^0)^2]} + \frac{8G_S}{3} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{4(25C - 18D)}{9\rho_0(k_F^0)^2} - \frac{8(G_S + 2G_V)}{3} \quad (4)$$

$$t_3 = \frac{16\beta}{\rho_0^\gamma(\gamma + 1)} \quad (5)$$

$$x_0 = \frac{3(\gamma - 1)E_{sym}^{loc}(\rho_0)}{\alpha} - \frac{1}{2} \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{12G_V - 4G_S - \frac{6D}{\rho_0(k_F^0)^2}}{3t_2} \quad (7)$$

$$x_2 = \frac{20G_V + 4G_S - \frac{5(16C - 18D)}{3\rho_0(k_F^0)^2}}{3t_2} \quad (8)$$

$$x_3 = \frac{-3y(\gamma + 1)E_{sym}^{loc}(\rho_0)}{2\beta} - \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$\sigma = \gamma - 1 \quad (10)$$

其中, ρ_0 为核物质的饱和密度, $k_F^0 = (1.5\pi^2\rho_0)^{1/3}$ 为在核物质饱和密度下的费米动量. MSL 模型中的七个参量 $\alpha, \beta, \gamma, C, D, E_{sym}^{loc}(\rho_0), y$ 都可以通过七个宏观参量 $\rho_0, E_0(\rho_0), K_0, m_s^*, m_v^*, E_{sym}(\rho_0)$ 和 L 解析地表示出来^[4], $t_0 \sim t_3, x_0 \sim x_3$ 和 σ 是 Skyrme 力参数,这样 Skyrme 力参数就与宏观参量一一对应起来了.

1.3 微观光学模型势

1960年代, Bell 等人^[6]研究表明:核物质光学势可用单粒子格林函数的质量算符表示.有限核的微观光学模型势可通过一些近似方法得到,最常见的有两种:一种是“核物质方法”^[7-8],此方法是从现实核力出发,利用 Brueckner-Hartree-Fock(BHF)近似及定域密度近似来计算有限核的微观光学势;另一种是“核结构方法”^[9-10],此方法是从有效核力出发,利用无规相位近似及定域密度近似来计算有限核的微观光学模型势.本工作中所使用的微观光学势利用申庆彪等人基于有效 Skyrme 力的核物质近似方法得到的有限核微观光学势^[2-3].

核子诱发核反应的光学势可表示为如下的

形式:

$$U_{\tau_\alpha}(r) = V_{\tau_\alpha}(r) + iW_{\tau_\alpha}(r) + [V_{SO}^\alpha(r) + iW_{SO}^\alpha(r)](\vec{\sigma} \cdot \vec{l}) \quad (11)$$

其中等式右边项依次为光学势实部与虚部,自旋轨道耦合势实部与虚部.

在核物质近似下,光学势的实部为:

$$\begin{aligned} V_{\tau_\alpha} = & t_0 \left[\left(1 + \frac{x_0}{2} \right) \rho - \left(x_0 + \frac{1}{2} \right) \rho_{\tau_\alpha} \right] + \\ & \frac{1}{6} t_3 \rho^\alpha \left[\left(1 + \frac{x_3}{2} \right) \rho - \left(x_3 + \frac{1}{2} \right) \rho_{\tau_\alpha} \right] + \\ & \frac{1}{4} t_{03} (\rho^2 - \rho_{\tau_\alpha}^2) + \frac{1}{4} \left\{ t_1 \left[\left(1 + \frac{x_1}{2} \right) \rho - \right. \right. \\ & \left. \left. \left(x_1 + \frac{1}{2} \right) \rho_{\tau_\alpha} \right] + t_4 \rho \left[\left(1 + \frac{x_4}{2} \right) \rho - \right. \right. \\ & \left. \left. \left(x_4 + \frac{1}{2} \right) \rho_{\tau_\alpha} \right] + t_2 \left[\left(1 + \frac{x_2}{2} \right) \rho + \right. \right. \\ & \left. \left. \left(x_2 + \frac{1}{2} \right) \rho_{\tau_\alpha} \right] \right\} k_\alpha^2 + \frac{1}{40\pi^2} \{ [t_1(1-x_1) + \\ & t_4\rho(1-x_4) + 3t_2(1+x_2)] k_{\tau_\alpha}^5 + \\ & [t_1(2+x_1) + t_4\rho(2+x_4) + \\ & t_2(2+x_2)] k_{-\tau_\alpha}^5 \} \quad (12) \end{aligned}$$

其中 k_{τ_α} 为核子 τ_α 的费米动量,它满足如下的

$$\chi^2 = \frac{\frac{W_{tot}}{N_{tot}} \sum_{i=1}^{N_{tot}} \left(\frac{\sigma_{tot,i}^{th} - \sigma_{tot,i}^{exp}}{\Delta\sigma_{tot,i}^{exp}} \right)^2 + \frac{W_{el}}{N_{el}} \sum_{i=1}^{N_{el}} \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{\sigma_{el}^{th}(i,j) - \sigma_{el}^{exp}(i,j)}{\Delta\sigma_{el}^{exp}(i,j)} \right)^2}{W_{tot} + W_{el}} \quad (21)$$

其中 $\sigma_{tot,i}^{th}$ 和 $\sigma_{tot,i}^{exp}$ 表示第 i 个人射能点全截面的理论计算值及实验值; $\sigma_{el}^{th}(i,j)$ 和 $\sigma_{el}^{exp}(i,j)$ 表示第 i 个人射能点第 j 个角度的弹性散射微分截面的理论计算值及实验值; N_{tot} 、 N_{el} 及 N_i 表示全截面能点的个数,弹性散射角分布能点的个数及某个弹性散射角分布能点下角度的个数; $\Delta\sigma_{tot,i}^{exp}$ 和 $\Delta\sigma_{el}^{exp}(i,j)$ 表示全截面及弹性双微分截面的实验误差; W_{tot} 和 W_{el} 表示全截面及弹性散射角分布的权重因子. 本工作所使用的实验数据来自参考文献[13], 权重因子的选取根据实验数据的相对比来确定.

本工作以 MSLO 参数^[4]为基本出发点,改变其中一个宏观参量的取值,固定其他的9个宏观参量,计算了 χ^2 随不同宏观量变化的结果,如图1所示.其中 E_0 、 E_{sym} 、 K_0 和 L 分别表示在饱和密度 ρ_0 处每核子结合能、对称能、不可压缩系数和对

形式

$$k_\alpha^2 = \frac{2m_{\tau_\alpha}}{\hbar^2} \left(\frac{M}{M + m_{\tau_\alpha}} E_L - V_{\tau_\alpha} - V_C \right) \quad (13)$$

上式中 m_{τ_α} 和 M 分别是核子 τ_α 和靶核的质量, E_L 是实验室系入射核子的能量, V_C 是库仑势.

光学势虚部为:

$$W_{\tau_\alpha} = W_A + W_B \quad (14)$$

其中:

$$W_A = -\frac{\pi}{(2\pi)^6} \sum_{i=1}^7 W_i \quad (15)$$

$$W_B = -\frac{\pi}{(2\pi)^{12}} W_T \quad (16)$$

$W_1 \sim W_7$ 和 W_T 的详细计算来自于参考文献[11].

自旋轨道耦合势可表示为:

$$V_{SO}^\alpha(r) = \frac{1}{2r} W_0 \frac{d}{dr} [\rho(r) + \rho_{\tau_\alpha}(r)] \quad (17)$$

其中 $\rho(r)$ 、 $\rho_{\tau_\alpha}(r)$ 为靶核的核子密度,利用 Skyrme-Hartree-Fock 自洽计算得到,具体的计算方法见参考文献[12]

2 计算结果与分析

χ^2 用来衡量理论计算值与实验结果的偏差程度.本工作中 χ^2 定义为:

称能梯度参数; G_s 、 G_v 、 m_s^* 、 m_v^* 、 ρ_0 和 W_0 分别表示核物质密度梯度、核物质密度梯度差、标量核子有效质量、矢量核子有效质量、饱和密度和自选轨道耦合参数.

由图1,可以看出,核物质宏观参量中同位旋标量有效质量 m_s^* 、饱和密度处的对称能值 $E_{sym}(\rho_0)$ 及不可压缩系数 K_0 的变化对核反应数据比较敏感.同位旋标量有效质量 m_s^* 、饱和密度处的对称能值 $E_{sym}(\rho_0)$ 与核子的单粒子势(光学势的实部)密切相关,因而核反应数据对它们比较敏感是可以理解的.由图1知 $m_s^* = 0.67m$ 、 $E_{sym}(\rho_0) = 31.56 \text{ MeV}$ 及 $L = 70.2 \text{ MeV}$ 时 χ^2 有最小值.这几个宏观参数2取值与经验2值基本吻合^[7,14-15].因而,我们可以利用核反应实验数据来提取核物质宏观参量的取值范围.

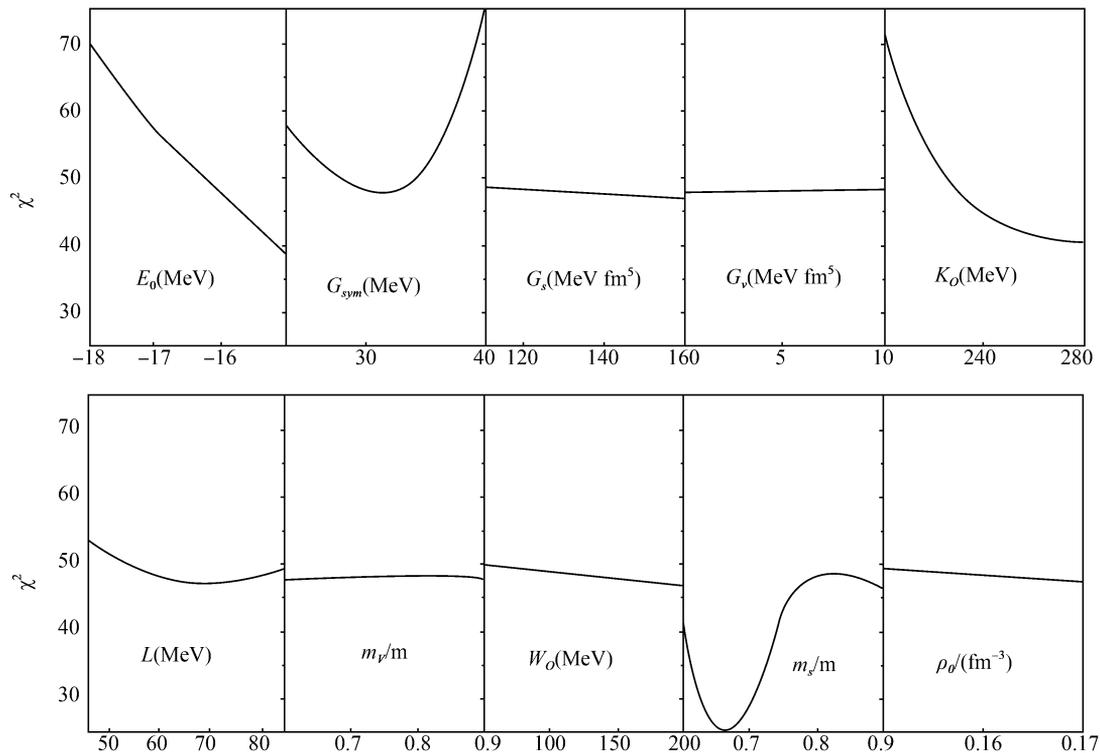


图1 随核物质宏观量的变化

Fig.1 The change with the Macroscopic parameters of Nuclear Matter.

3 结论

本工作基于 Skyrme 力的微观光学模型及 Modified Skyrme like 理论,通过 Skyrme 力的桥梁作用,以 $n+^{206}\text{Pb}$ 反应为例,研究了核物质宏观参量对核反应实验数据的影响.并提取出核物质的几个宏观参量的取值,即:同位旋标量有效质量 $m_s^* = 0.67m$ 、饱和密度处的对称能 $E_{sym}(\rho_0) = 31.56 \text{ MeV}$ 及饱和密度处对称能的梯度参数 $L = 70.2 \text{ MeV}$,这些宏观参量的取值跟前期研究的实验及理论研究结论相吻合.

参考文献:

- [1] 申庆彪.低能和中能核反应理论:上册[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] Shen Qingbiao, Zhang Jingshang, Tian Ye, et al. Semi-microscopic optical potential calculation by the nuclear matter approach[J]. Z. Phys. A, 1981, 303: 69-83.
- [3] Li Xiaohua, Liang Chuntian, Cai Chonghai. Comparison between global phenomenological and microscopic optical potentials for proton as projectile below 100 MeV[J]. Chin. Phys. C, 2009, 33: 415-422.
- [4] Chen Liewen, Ko Cheming, Li Baoan, et al. Density slope of the nuclear symmetry energy from the neutron skin thickness

of heavy nuclei[J]. Phys. Rev. C, 2010, 82: 024321.

- [5] Skyrme T H R. The nuclear surface[J]. Phil. Mag., 1956, 1: 1043-1054.
- [6] Bell J S, Squires E J. A Formal Optical Model[J]. Phys. Rev. Lett., 1959, 3: 96-97.
- [7] Jeukenne J P, Lejeune A, Mahaux C. Many-body theory of nuclear matter [J]. Phys. Rep., 1976, 25: 83-174.
- [8] Brieva F A, Rook J R. Nucleon-nucleus optical model potential: (II). Finite nuclei [J]. Nucl. Phys. A, 1977, 291: 317-341.
- [9] Bernard V, Van Giai Nguyen. Microscopic optical potential for ^{208}Pb in the nuclear structure approach [J]. Nucl. Phys. A, 1979, 327: 397-418.
- [10] Mau N Vinh, Bouyssy A. Optical potential for low-energy neutrons: Imaginary potential for neutron- ^{40}Ca elastic scattering[J]. Nucl. Phys. A, 1976, 257: 189-220.
- [11] Shen Q B, Han Y L, Guo H R. Isospin dependent nucleon-nucleus optical potential with Skyrme interactions [J]. Phys. Rev. C, 2009, 80: 024604.
- [12] Vautherin D, Brink D M. Hartree-Fock Calculations with Skyrme's Interaction. I. Spherical Nuclei [J]. Phys. Rev. C, 1972, 5: 626-647.
- [13] Li Xiaohua, Chen Liewen. Isospin dependent global neutron-nucleus optical model potential [J]. Nucl. Phys. A, 2012, 874: 62-80.

(下转第 18 页)

器提供了参数.

参考文献:

- [1] Aad G, Abbott B, Abdallah J, et al. ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider[J]. The European Physical Journal C, 2015, 75(10):1-48.
- [2] Crotty I, Zeballos EC, Valverde JL, et al. The wide gap resistive plate chamber [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1995, 360(3):512-520.
- [3] Oed A. Properties of micro-strip gas chambers (MSGC) and recent developments [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1995, 367(1):34-40.
- [4] Sauli F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, 86(2):531-534.
- [5] Ketzer B, Weitzel Q, Paul S, et al. Performance of triple GEM tracking detectors in the COMPASS experiment [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 535(1):314-318.
- [6] Bencivenni G, De Simone P, Murtas F, et al. Performance of a triple-GEM detector for high rate charged particle triggering [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 494(1):156-162.
- [7] 董静. 二维位置灵敏 X 射线气体电子倍增器的研制 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [8] Huang Meng, Li Yulan, Niu Libo, et al. Analysis and optimization of energy resolution of neutron-TPC [J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, 26(4):040602.
- [9] Wang Xiaodong, Zhang Yulian, Zhang Chunhui, et al. Monte Carlo simulation of GEM-based for 14 MeV neutron detector, SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 9(56):1744-1749.
- [10] Wang Xiaodong, Yang Herun, Ren Zhongguo, et al. Study on the novel neutron-to-proton convertor for improving the detection efficiency of a triple GEM-based on fast neutron detector, Chinese Physics C, 2015, 39(2):026001.
- [14] Xu Chang, Li Bao-An, Chen Lie-Wen. Symmetry energy, its density slope, and neutron-proton effective mass splitting at normal density extracted from global nucleon optical potentials [J]. Phys. Rev. C, 2010, 82:054607.
- [15] Ma Zhong-Yu, Wandelt A, Van Giai Nguyen, et al. Collective multipole excitations in a microscopic relativistic approach [J]. Nucl. Phys. A, 2002, 703:222-239.

(上接第 8 页)