

${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势灵敏半径的能量相依性

杨磊, 林承键, 贾会明, 徐新星, 杨峰, 张焕乔, 刘祖华, 马南茹, 孙立杰, 王东玺

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要: 光学势灵敏区域的确定是研究光学势性质的先决要素。本工作利用扰动法, 抽取并研究了弱束缚体系 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势灵敏区域的能量相依性。结果表明, 该体系光学势实部和虚部的灵敏区域均呈现多峰结构。内部的灵敏区域对应体系库仑势垒的穿过程, 其位置基本不随能量的变化而改变; 而外部的灵敏区域则对应体系的表面相互作用过程, 并且存在强烈的能量相依性。采用新的灵敏区域重新检测了 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势的性质, 结果表明在新的灵敏区域内, ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势虚部表现出传统的阈异常现象, 而非之前所观察到的破裂阈异常现象。

关键词: 光学势; 灵敏区域; 扰动法; 阈异常

中图分类号: O571.416

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2017)03-0385-05

doi: 10.7538/yzk.2017.51.03.0385

Energy Dependence of Sensitive Radius of Optical Model Potential for ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$

YANG Lei, LIN Cheng-jian, JIA Hui-ming, XU Xin-xing, YANG Feng,
ZHANG Huan-qiao, LIU Zu-hua, MA Nan-ru, SUN Li-jie, WANG Dong-xi

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-10, Beijing 102413, China)

Abstract: The sensitive region is the most fundamental ingredient in the study of the optical model potential. In the present work, the sensitive regions of the potential of ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ were extracted and studied by using notch method. The results show that multi-peak structure is observed for both the sensitive regions of real and imaginary parts of the optical model potential. The inner sensitive region corresponds to the Coulomb barrier penetration process and the position of which does not vary with the interaction energy, while the outer sensitive region, which arising from the surface interaction process, presents strong dependence on the interaction energy. With the new sensitive region, the properties of the optical model potential of ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ were re-checked. The threshold anomaly, not the breakup threshold anomaly, is found in the imaginary part of the optical potential.

Key words: optical model potential; sensitive region; notch method; threshold anomaly

核-核相互作用势是核反应研究过程中最基本的物理量^[1]。通常使用光学势(OMP)来唯象地描述核-核之间的相互作用。通过对光学势长期而系统的研究,人们发现并总结出光学势的很多基本特性。Lilley 等^[2]首先在 $^{16}\text{O}+^{208}\text{Pb}$ 体系中观察到了光学势的阈异常现象(TA),即光学势的实部和虚部在库仑势垒附近表现出强烈的能量相依赖性:在势垒附近,虚部深度随能量的降低而迅速减小至0,表明存在反应阈能;同时实部表现出剧烈起伏变化,在势垒附近呈钟罩形状。实部和虚部变化之间的关系可由色散关系来进一步描述^[3]。近年来,随着放射性束物理的兴起,弱束缚体系的光学势的性质引起了人们极大的兴趣^[4-6]。例如在对 $^{6,7}\text{Li}$ 和 ^9Be 等弱束缚体系的研究中发现了反常的阈异常现象^[7-11]:在垒下区域随着能量的降低,虚部势深度反而呈现上升趋势。通常认为这种现象源自于与破裂反应道的强烈耦合作用,因此这种反常的阈异常现象又被称为破裂阈异常(BTA)。但是,基于因果律的色散关系在弱束缚体系中的适用性目前仍存在争论^[12]。

通常利用弹性散射来抽取相互作用体系的光学势参数,但对于一给定的弹性散射角分布,通常存在多套光学势参数均能够准确描述实验数据,即所谓的 Igo 模糊^[13]。造成这种现象的根本原因在于,利用弹性散射只能确定光学势指数衰减的尾部信息,即只有尾部才是光学势的敏感区域,对敏感区域内光学势的讨论才有意义^[14]。因此,如何确定光学势的灵敏区域及光学势灵敏区域的性质是研究光学势特性的先决问题。

目前存在多种抽取光学势灵敏区域的方法^[14-16],其中最常用的方法是通过寻找光学势的交点来确定光学势的灵敏半径。虽然交点法易于操作,但其存在一定的局限性:首先,基于量子机制,波函数不应该只敏感于某一点处的光学势,而应该存在一灵敏区域,显然交点法无法给出灵敏区域范围的信息;其次,当光学势采用不同的形状因子时,交点法得到的灵敏半径往往存在较大差异^[17]。因此交点法并不能客观给出光学势的灵敏区域。

Cramer 等^[14]提出了一种新的方法,即扰动法,该方法能更直接有效地抽取光学势的灵

敏区域。因此,本工作采用扰动法来抽取 $^6\text{Li}+^{208}\text{Pb}$ (^6Li 实验室系能量 $E_{\text{lab}}(^6\text{Li})=25、27、29、31、33、35、37、39、41、43$ 和 46 MeV)^[7,18] 体系光学势的灵敏区域,并对该体系灵敏区域的性质进行讨论。

1 扰动法

扰动法即在已有的光学势的基础上引入一扰动项,移动该扰动项并进一步观察由其引起的理论计算结果的变化^[14]。光学势 V_N 可写成如下形式:

$$V_N = V(r) + iW(r) = -V_0 f_V(r) - iW_0 f_W(r) \quad (1)$$

其中: $V(r)$ 、 $W(r)$ 分别为实部和虚部光学势, r 为作用距离; V_0 和 W_0 为代表光学势实部和虚部的深度; $f_i(r)$ 为形状因子, $i=V, W$, 采取 Woods-Saxon 形式:

$$f_i(r) = (1 + \exp((r - R_i)/a_i))^{-1} \quad (2)$$

其中: R_i 为势半径, $R_i = r_{0i}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, r_{0i} 为约化半径, A_1 、 A_2 分别为弹核和靶核的质量数; a_i 为弥散参数。

在此光学势的基础上,分别在实部和虚部引入 Woods-Saxon 微分形式的扰动项:

$$g(R', a', d; r) = 1 - 4df(R', a'; r)(1 - f(R', a'; r)) \quad (3)$$

其中: R' 为扰动项所处的位置; a' 为扰动的宽度; d 为扰动的深度。

式(3)与无扰动的光学势做乘积,可得微扰后的光学势。以实部势为例,扰动后的光学势可写为:

$$V(r) = -V_0 f(r) g(R', a', d; r) \quad (4)$$

图1示出扰动法的形状因子 $f(r)$ 、 $g(r)$ 和 $f(r) \times g(r)$, 其中 $f(r)$ 的参数为 $r_0 = 1.25\text{ fm}$, $a = 0.65\text{ fm}$, 扰动项 $g(r)$ 的参数为 $R' = 0\text{ fm}$, $a' = 0.1\text{ fm}$, $d = 1$ 。关于扰动项各参数的选取在文献[19]中已进行过详细讨论。

如果该扰动处于光学势的灵敏区域,则会对光学模型的计算结果产生较大影响,具体表现为体现理论计算结果与实验数据差异的 χ^2 会显著增大;反之,如果该扰动项位于光学势的不敏感区域,则基本不会影响理论计算结果, χ^2 无明显变化。因此 χ^2 明显变化的区域即对应着光学势的灵敏区域。本工作利用 FRESCO

程序^[20]对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布进行计算,并利用扰动法抽取该体系光学势的灵敏区域。

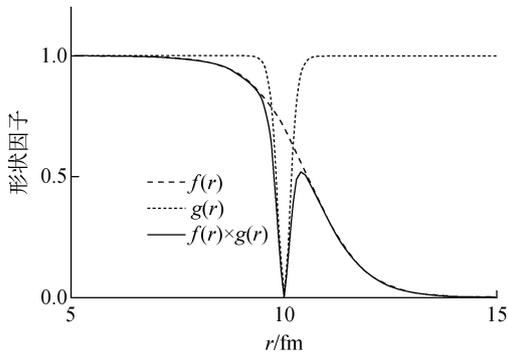


图 1 扰动法的形状因子 $f(r)$ 、 $g(r)$ 和 $f(r) \times g(r)$

Fig. 1 Form factors of $f(r)$, $g(r)$ and $f(r) \times g(r)$ in notch method

2 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的灵敏区域

利用扰动法得到的 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的灵敏区域如图 2 所示,同时在图 2 中标注了一些重要的位置和距离参量: R_{int} 为光学势作用半径, R_{B} 为库仑势垒的位置, R_{sa} 为强吸收半径, D_{min} 为纯库仑场中弹核与靶核的最趋近距离, D_0 为核势开始起作用的距离。

由图 2 可得到如下结论。

1) 所有灵敏区域均位于核势的指数衰减的尾部,即 R_{int} 至 D_0 之间的区域,这意味着通过弹性散射无法获知内部(R_{int} 之内)的光学势信息,根据对 ${}^{16}\text{O}+{}^{28}\text{Si}$ ($E_{\text{lab}}({}^{16}\text{O}) = 1, 2 \text{ GeV}$) 的研究^[14] 表明,即使在如此高的能量下,依然无法探测到核势内部的信息。

2) 在库仑势垒之上的能区,实部和虚部光学势的灵敏区域均出现多峰结构,根据其所处的位置,可进一步判断该灵敏区域的来源:对于实部和虚部最外侧的峰,全都位于库仑势垒 R_{B} 的外侧,其对应着表面过程,即实部的该区域对应于形状散射,而虚部的该灵敏区域则对应着表面的直接反应过程;在库仑势垒附近,实部和虚部均存在灵敏区域,其中实部的灵敏区域位于 R_{B} 内侧,而虚部的灵敏区域则几乎位于 R_{B} 的位置,且两个区域的位置基本不随能量的改变而变化。因此,该灵敏区域对应着弹-靶相互作用中的位垒穿透的过程,即实部的该灵敏区域源自复合核

散射过程,而虚部的该区域则对应着融合反应过程。同时可看到,相对于外侧的峰,内部峰的幅度随能量降低而迅速降低,这是由于势垒穿透的概率随能量的降低而迅速减小,因此在低能情况下难以观测到 R_{B} 内部的灵敏区域。

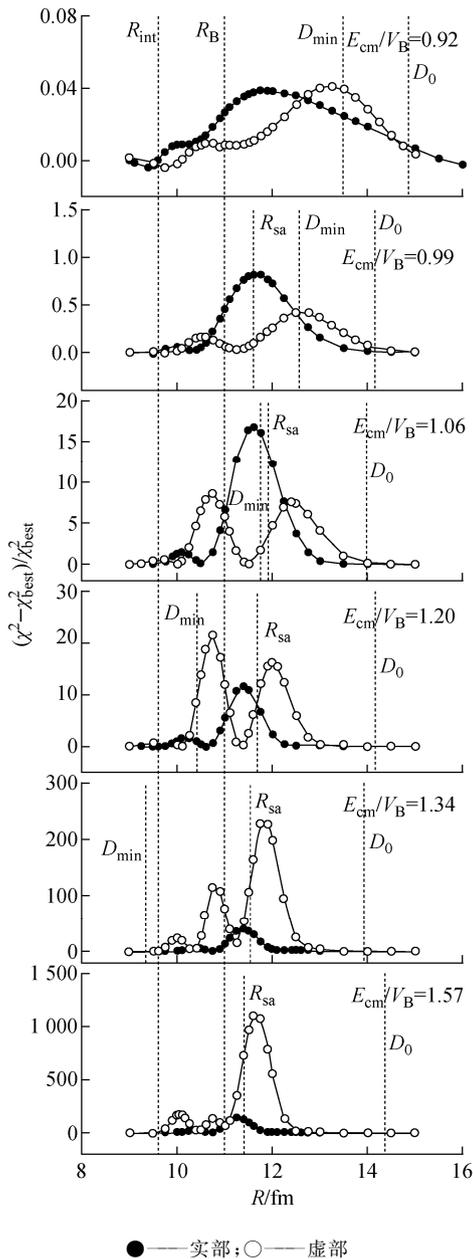


图 2 由扰动法抽取得到的

${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系光学势的灵敏区域

Fig. 2 Sensitivity function of optical model potential for ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ using notch method

3) 随着能量的降低, χ^2 的相对变化也越来越小,同时,灵敏区域的宽度也逐渐增大,说明

弹性散射之于光学势的灵敏性在逐渐减弱。

由于光学势实部和虚部内部的灵敏区域对应于势垒穿过程程,其位置基本不随反应体系能量的变化而改变,因此只讨论 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系光学势对应表面作用的灵敏区域的能量相依性,其结果如图3所示。由图3可见,在垒上区域,实部和虚部的灵敏区域均位于体系的强吸收半径附近,而在垒下区域,灵敏区域与反应体系库仑场中的最趋近距离基本相符。

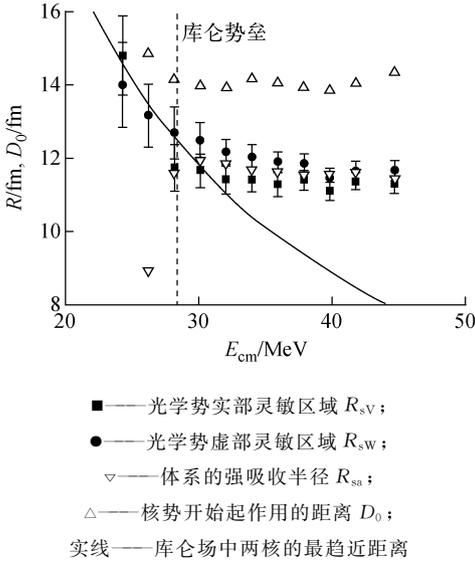


图3 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系光学势对应表面作用的灵敏区域的能量相依性

Fig. 3 Energy dependence of radial sensitive region of surface interaction for ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$

3 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的光学势

前面光学势性质的讨论中,几乎都是取固定灵敏半径处的光学势信息。根据本工作的结果,对应表面相互作用的光学势的灵敏区域存在着强烈的能量相依性,因此,不能简单地将灵敏半径固定在强吸收半径处。根据图3所示的灵敏区域的变化,对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系光学势的能量相依性重新进行考察。对光学势进行带高斯权重的体积分:

$$[G(E)]_i = \frac{1}{A_P A_T} \int V_i(r; E) G(r) 4\pi r^2 dr \quad (5)$$

$i = V, W$

其中: A_P 和 A_T 分别为弹核和靶核的质量; $V_i(r; E)$ 为光学势; $G(r)$ 为高斯权重函数,如式(6)所示:

$$G(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{r-R_g}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

其中, R_g 和 σ 分别为灵敏区域的中心值和宽度。

体积分的结果如图4所示,由图4可见,对于弱束缚体系,灵敏区域内的光学势虚部表现出阈异常现象,并非之前所观察到的破裂阈异常现象。

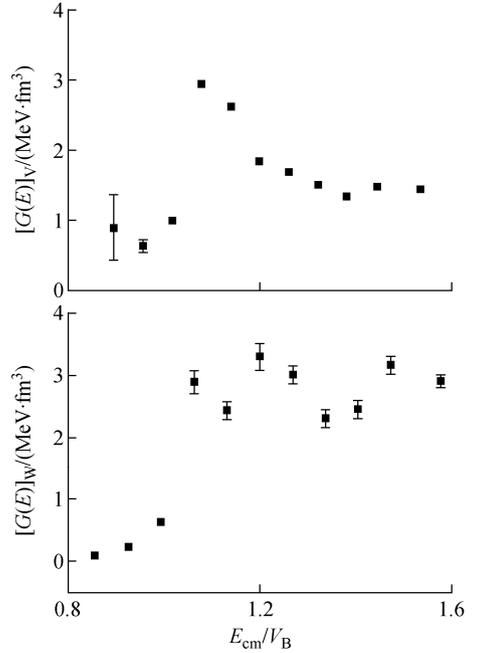


图4 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系灵敏区域内的光学势的体积分

Fig. 4 Integrate result of optical model potential within sensitive region for ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$

4 结论

本工作利用扰动法抽取并研究了弱束缚体系 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势的灵敏区域的能量相依性。结果表明,该体系光学势实部和虚部的灵敏区域均呈现多峰结构。根据灵敏区域所处位置可判断,内部的灵敏区域对应体系库仑势垒的穿过程程,该灵敏区域的位置不随能量的改变而变化。外部的灵敏区域则对应体系表面的相互作用过程,且存在强烈的能量相依性:垒上能区可用体系的强吸收半径来表示灵敏区域,垒下能区可用体系库仑场中的最趋近距离描述灵敏区域的变化趋势。采用新的灵敏区域重新检测了 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势的性质,结果表明在新的灵敏区域内, ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 光学势虚部表现

出阈异常现象,并非之前所观察到的破裂阈异常现象。其中的物理原因还需进一步的研究和探索。

参考文献:

- [1] BRANDAN M E, SATCHLER G R. The interaction between light heavy-ions and what it tells us[J]. Phys Rep, 1997, 285: 143-243.
- [2] LILLEY J S, FULTON B R, BANES D, et al. Excitation of ${}^{17}\text{O}$ and ${}^{18}\text{O}$ scattered by ${}^{208}\text{Pb}$ in the Coulomb-nuclear interference region[J]. Phys Lett B, 1983, 128: 153-156.
- [3] MAHAUX C, NGO H, SATCHLER G R. Causality and the threshold anomaly of the nucleus-nucleus potential[J]. Nucl Phys A, 1986, 449: 354-394.
- [4] PENIONZHKEVICH Y E. Reactions induced by beams of neutron and proton halo nuclei[J]. Nucl Phys A, 1997, 616: 247-253.
- [5] BECCHETTI F D, LIU W Z, ASHKTORAB K, et al. Systematics of ${}^8\text{Li}$ -induced radioactive beam reactions: $E=13\text{-}20\text{ MeV}$ [J]. Phys Rev C, 1993, 48: 308-318.
- [6] MOTOBAYASHI T. Determination of the astrophysical ${}^{13}\text{N}(p,\gamma){}^{14}\text{O}$ cross section through the Coulomb dissociation method[J]. Phys Lett B, 1991, 264: 259-263.
- [7] KEELEY N, BENNETT S J, CLARKE N M, et al. Optical model analyses of ${}^6,7\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ elastic scattering near the Coulomb barrier[J]. Nucl Phys A, 1994, 571: 326-336.
- [8] SIGNORINI C, ANDRIGHETTO A, RUAN M, et al. Unusual near-threshold potential behavior for the weakly bound nucleus ${}^9\text{Be}$ in elastic scattering from ${}^{209}\text{Bi}$ [J]. Phys Rev C, 2000, 61: 061603(R).
- [9] HUSSEIN M S, GOMES P R S, LUBIAN J, et al. New manifestation of the dispersion relation: Breakup threshold anomaly [J]. Phys Rev C, 2006, 73: 044610.
- [10] FIGUEIRA J M, ABRIOLO D, NIELLO J O F, et al. Absence of the threshold anomaly in the elastic scattering of the weakly bound projectile ${}^7\text{Li}$ on ${}^{27}\text{Al}$ [J]. Phys Rev C, 2006, 73: 84-105.
- [11] NIELLO J O F, FIGUEIRA J M, ABRIOLO D, et al. Study of the threshold anomaly in the scattering of Li isotopes on ${}^{27}\text{Al}$ [J]. Nucl Phys A, 2007, 787: 484-490.
- [12] YANG L, LIN C J, JIA H M, et al. Optical model potentials for the ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ reaction from a ${}^{208}\text{Pb}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^{209}\text{Bi}$ reaction analysis[J]. Phys Rev C, 2014, 89: 044615.
- [13] IGO G. Optical model potential at the nuclear surface for the elastic scattering of alpha particles [J]. Phys Rev Lett, 1958, 1: 72-73.
- [14] CRAMER G, DEVRIES R M. Radial sensitivity of elastic scattering[J]. Phys Rev C, 1980, 22: 91-96.
- [15] MOFFA P J, DOVER C B, VARY J P. Localization in heavy-ion elastic, inelastic and transfer reactions[J]. Phys Rev C, 1976, 13: 147-155.
- [16] LIN C J, XU J C, ZHANG H Q, et al. Threshold anomaly in the ${}^{19}\text{F}+{}^{208}\text{Pb}$ system[J]. Phys Rev C, 2001, 63: 064606.
- [17] MACFARLANE M H, PIEPER S C. The sensitive radius-spatial localization in the heavy-ion reaction analyses[J]. Phys Lett B, 1981, 103: 169-172.
- [18] ZHANG Chunlei, ZHANG Huanqiao, LIN Chengjian, et al. Unusual threshold anomaly in the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system[J]. Chin Phys Lett, 2006, 23(5): 1 146-1 149.
- [19] YANG Lei, LIN Chengjian, JIA Huiming, et al. Test of the notch technique for determining the radial sensitivity of the optical model potential [J]. Chin Phys C, 2016, 40(5): 056201.
- [20] THOMPSON I J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics[J]. Comp Phys Rep, 1988, 7: 167-212.