

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的反常阈异常现象*黄志杰¹⁾ 杨磊^{1)†} 林承键^{1)2)‡} 贾会明¹⁾ 马南茹¹⁾ 杨峰¹⁾ 温培威¹⁾

1) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

2) (广西师范大学物理科学与技术学院, 广西核物理与核技术重点实验室, 桂林 541004)

(2025 年 9 月 16 日收到; 2025 年 10 月 30 日收到修改稿)

光学势作为描述核碰撞相互作用的重要工具, 被广泛应用于核反应机制的研究中. 光学势对核结构具有高度敏感性, 故弱束缚核与紧束缚核的光学势存在显著差异. 大量研究表明, 紧束缚核体系的唯象光学势在近库仑势垒能区表现出阈异常现象, 其实部与虚部的关系可通过色散关系精确描述. 然而对于弱束缚核体系(如 ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ 和 ${}^6\text{He}$ 等)引起的反应, 由于在近垒及垒下能区缺乏足够的实验数据, 其光学势的行为仍存在争议. 在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上, 实验测量了 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系在近垒和深垒能区的弹性散射角分布, 并经光学模型拟合获取其光学势参数. 该体系的光学势呈现出反常的阈异常特征, 且色散关系也不适用于该体系. 此外, 从深垒数据得到 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的反应阈值约 $0.73 V_B$ (V_B 为库仑势垒), 并进一步对不同体系的反应阈值和破裂阈值进行了系统学分析. 本工作测量了近垒及深垒能量下 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的光学势, 为进一步研究反常阈异常现象提供了数据支持. 本文数据集可在 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00218> 中访问获取.

关键词: 光学势, 弹性散射角分布, 弱束缚核**DOI:** [10.7498/aps.75.20251271](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251271)**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251271](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251271)

1 引言

光学模型作为核反应领域最基础的理论模型, 在过去七十年取得了巨大成功, 被广泛地应用于分析核反应的散射过程和抽取反应截面. 光学模型对于入射粒子与靶核的相互作用引入了一个复数势, 即光学势. 为深入理解其本质, 微观光学势的研究也取得了重要进展. 对于轻核如 p , n , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6,7\text{Li}$ 等, 在库仑势垒以上的能区都能通过微观光学势较好地再现出其弹散角分布和反应截面^[1-5]. 在近垒及垒下能区显著的耦合道效应会产生强烈的动力学极化势, 因此微观光学势并不能直接再现实验数

据, 而是需要通过具有能量依赖性的重整化因子加以修正^[6].

从实验上抽取的唯象光学势则包括了裸势和动力学极化势, 是一种有效势. 因此在近垒能区想要得到较为可靠的光学势可以通过实验来提取. 实验上常用弹性散射提取光学势, Lilley 等^[7] 测量了 ${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布, 发现在能量接近库仑势垒时其核势会表现出反常现象: 首先虚部深度在近库仑势垒能区会伴随能量的降低而减小至 0; 其次在势垒附近实部深度呈现出反常的拱状变化, 此即“阈异常 (threshold anomaly, TA)”现象. 随后 Nagarajan 等^[8] 提出核势的实部和虚部之间可以通过色散关系^[9,10] 联系起来, 这种现象在近

* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1606402, 2022YFA1602302)、国家自然科学基金 (批准号: 12235020, 12275360, 12375130) 和稳定支持基础科研计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: cjlin@ciae.ac.cn

垒核反应中普遍存在, 来源于量子场论中的微观因果性原理^[11]——对于类空间隔的两个时空点, 相应的场算符必须是对易的 (对于玻色子) 或反对易的 (对于费米子). 在量子场论中, 散射振幅是坐标空间关联函数的傅里叶变换, 微观因果性是对坐标空间中场算符在类空间隔下的约束. 经过复杂的数学分析, 可以证明微观因果性条件直接导致了散射振幅在复平面上是解析的. 然后应用柯西定理, 可以精确地推导出 Kramers-Kronig 关系. 这个积分关系就是色散关系.

近年来, 放射性束流装置的发展扩展了核物理的研究范围, 各种弱束缚的核素所表现出的独特性质也不断地吸引着研究人员的眼球. 相应地, 弱束缚核体系的光学势性质也同样是近年来的热点话题. 弱束缚原子核中核子之间的结合能较小 (通常小于 5 MeV), 核子结合并不十分紧密, 因此它们有较低的破裂阈值, 并且往往具有一些奇特的结构 (如集团结构, 晕/皮结构^[12-15]). 由于光学势对于核结构非常敏感, 因此弱束缚核异常松散的结构可能会对其光学势产生特殊的影响. 事实上, 针对某些稳定的弱束缚核, 已有若干研究进行了探讨^[16-21]. 结果发现, 在能量降至垒下时这些体系的虚势并未迅速衰减至零, 反而呈现上升趋势, 也就是在垒下仍有非弹反应道未关闭; 实部的变化较为模糊, 目前仍有争议. 该现象被称作反常阈异常 (abnormal threshold anomaly, ATA). 最近, 杨磊等^[19]通过转移反应首次在深垒处得到了晕核体系 ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 的光学势, 发现该晕核体系的光学势表现出了反常阈异常现象, 并且在深垒处发现了虚势随能量下降而减少的趋势. 此外, 经典的色散关系并不适用于该体系光学势. 而对于稳定的弱束缚核 (如 ${}^6, {}^7\text{Li}$), 目前虽然也积累了大量的实验数据, 但能量大部分集中在库仑势垒附近及以上, 鲜有对深垒能区的测量. 弱束缚核深垒处光学势的趋势是否会像此前在晕核体系 ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 中观察到的随能量下降而减少? 色散关系是否适用? 这些问题的解决都需要对弱束缚核体系近垒及深垒能区光学势进行精确测量. 本工作对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系在近垒及深垒能区的弹性散射角分布开展了精确测量, 并基于 FRESKO 程序^[22]拟合了其弹散角分布, 获得了唯象光学势的相关参数. 在此基础上, 对色散关系在这一体系中的适用性进行了讨论, 并通过分析该体系光学势实部和虚部能量依赖性, 确定了反应阈值.

2 实验设置与测量结果

${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布的测量工作在中国原子能科学研究所的 HI-13 串行加速器上开展. 实验设置如图 1 所示. 加速器提供的 ${}^6\text{Li}$ 束流由 R60 束流管道传输到反应靶室内, 轰击位于靶室中心靶位上的 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶. 本次实验采用的 ${}^6\text{Li}$ 束流能量为 20.22—32.02 MeV. 实验中的 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶为采用真空蒸镀法蒸镀到 C 底衬上的同位素靶. 其中 ${}^{208}\text{Pb}$ 的厚度为 $110\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$, C 底衬厚度为 $25\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$. 由于 Pb 靶熔点较低, 太大的流强容易造成靶的熔化, 因此实验中束流强度控制在 10—50 enA. 实验采用 PIN 探测器来测量 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射角分布, 测量的角度范围为实验室系下 20° — 175° (每 5° 放置一个 PIN 探测器). 此外, 在靶室相应束流中心 12.5° 处放置了 4 块耐辐照的 SiC 探测器作为 Monitor 探测器以监测束流的稳定性, 并用于测得角分布的相对归一.

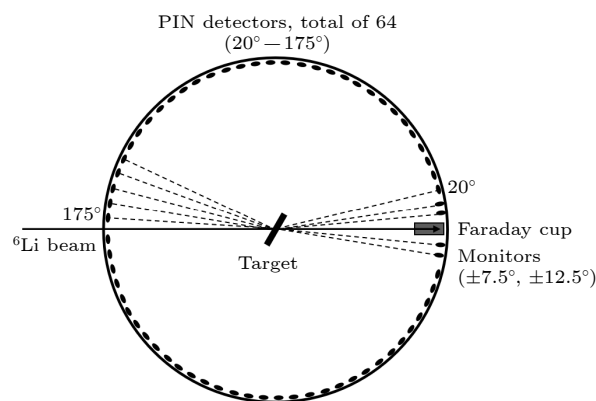


图 1 实验设置示意图

Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

实验中 PIN 探测器记录的 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 的典型能谱如图 2 所示. 图中 ${}^6\text{Li}$ 束流能量为 $E_{\text{lab}} = 30.05\ \text{MeV}$, 角度为 45° . 从能谱上可以清晰地分辨出 ${}^6\text{Li}$ 的弹性散射峰, 实线为高斯拟合弹性散射峰的结果. ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布如图 3 所示, 图中红色实线为 FRESKO 程序^[22]的拟合结果. 在数据处理的过程中, 主要考虑的误差来源包括总计数的统计误差, 以及拟合弹性散射峰面积时引入的拟合误差. 本次实验的目的在于对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系近垒及深垒能区光学势的精确测量, 因此在各能量下都给予了较长的时间来累计弹性散射事件, 即使在背角统计误差也小于 1%.

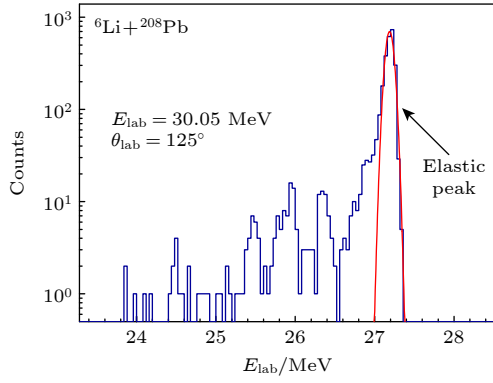


图 2 PIN 探测器测得的 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的典型能谱
Fig. 2. Typical energy spectrums of the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system obtained by the PIN detector.

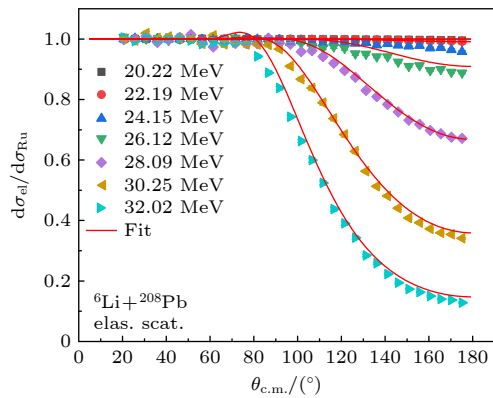


图 3 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系在近垒及深垒能量下的弹性散射角分布. 红色实线为 FRESKO 程序的拟合结果
Fig. 3. Elastic scattering angular distributions for the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system at near-barrier and deep-barrier energies. The red solid lines are the fitting results of the FRESKO.

3 光学势分析

通过对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布进行拟合, 可以抽取 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的光学势参数. 计算中采用标准的 Woods-Saxon 形状因子:

$$f(r, R_i, a_i) = \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_i}{a_i}\right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$R_i = r_i \left(A_p^{1/3} + A_T^{1/3} \right) \quad i = V, W, \quad (2)$$

式中, r_i 和 a_i ($i = V, W$) 为几何参数. 为了抽取最佳的光学势参数, 首先利用 FRESKO 程序对光学势的 6 个参数 $X_i = V, r_V, a_V, W, r_W, a_W$, 同时进行了拟合. 在拟合过程中, 对所有 6 个势参数进行了网格搜索, 以便获得不同轰击能量下角分布的最佳拟合, 拟合优度由 χ^2 描述. 通过最佳拟合结果, 提取出了平均几何参数 ($r_V = 1.15$ fm,

$a_V = 0.66$ fm, $r_W = 1.29$ fm, $a_W = 0.60$ fm). 由于光学势参数存在一定的模糊性^[23], 为了减少拟合结果的不确定性, 在这些几何参数固定的情况下, 势深度 V 和 W 被重新拟合, 以获取此特殊体系的系统光学势参数集. 最终结果以及每点的 χ^2 列在表 1 中.

表 1 从 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系的弹性散射角分布提取出的光学势参数, 拟合过程中所有的几何参数固定为 $r_V = 1.15$ fm, $a_V = 0.66$ fm, $r_W = 1.29$ fm, $a_W = 0.60$ fm
Table 1. The optical model potential parameters of ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ extracted from elastic scattering by the OM calculations. The geometry parameters were fixed as $r_V = 1.15$ fm, $a_V = 0.66$ fm, $r_W = 1.29$ fm, $a_W = 0.60$ fm.

$E_{\text{lab}}/\text{MeV}$	V/MeV	W/MeV	χ^2/pt
32.02	101.72	33.24	7.76
30.05	106.77	36.93	5.47
28.09	126.60	31.71	3.44
26.12	148.95	52.07	3.64
24.15	85.15	49.81	2.55
22.19	67.01	10.35	2.13
20.22	2.91	0.96	2.21

最终得到的光学势参数计算出的弹散角分布如图 3 红色实线所示, 可见拟合线很好地重现了实验的弹散角分布. 为了研究 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 系统光学势的能量依赖性, 需要先确定灵敏半径 R_S . 利用开槽法^[24-26], 可以在拟合的光学势中引入一个局部扰动, 即开一个小槽, 通过其对弹散角分布的影响来直观地呈现出光学势的灵敏区域. 最终确定灵敏半径 $R_S = 12.42$ fm. ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系在灵敏半径 12.42 fm 处的光学势的实部和虚部如图 4 所示, 其中高能点的数据来自文献^[27], 以星号表示. 可以发现, 误差在深垒能区内变得很大. 这表明, 在垒下能区弹性散射角分布实验数据可能对光学势的深度不如在垒上能区那样敏感. 对于虚部的深度, 随着入射能量的降低, 存在逐渐上升的趋势. 当入射能量低于库仑势垒 (约 29 MeV) 时, 虚部的深度开始逐渐降低并迅速接近零, 表明反应存在一个阈值. 对于实部深度, 在势垒附近表现出一个钟形曲线. 这些结果与 ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 体系的结果非常相似, 是一种反常的阈异常现象.

下面分析色散关系对该体系的适用性. 对色散关系的积分计算非常困难, 且积分也不可能真正做到 $E \rightarrow \infty$ 的范围. 因此在实际应用中, 采取对虚部进行分段线性拟合的方法进行色散关系计算^[28].

通过观察实验数据可以将虚部用四段线性函数来描述, 具体的能量分段点以及各个分段函数的参数取值则通过对实验数据进行拟合得到. 最终将虚部描述为

$$W(E_{c.m.}) = \begin{cases} 0, & E_{c.m.} \leq 21.45, \\ 0.305E_{c.m.} - 6.552, & 21.45 < E_{c.m.} \leq 24.13, \\ -0.096E_{c.m.} + 3.139, & 24.13 < E_{c.m.} \leq 29.30, \\ 0.32, & E_{c.m.} > 29.30. \end{cases} \quad (3)$$

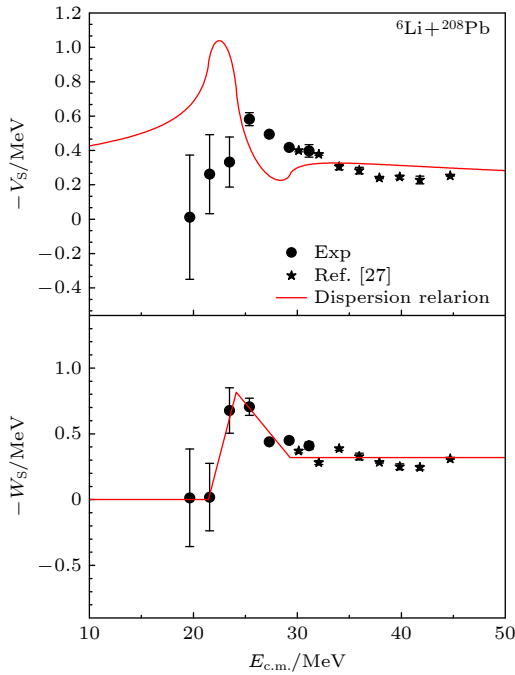


图 4 在灵敏半径 $R_S = 12.42$ fm 处, ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系实势 (a) 和虚势 (b). 图 (a) 中的红色实线是虚部的分段线性拟合曲线, 图 (b) 中的红色实线是由色散关系计算出的实部的预测曲线. 本次实验结果由圆点表示, 高能处的星形点数据来自文献 [27]

Fig. 4. At the sensitivity radius of 12.42 fm, the real (a) and imaginary (b) potentials of the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system. The solid red line in panel (a) is the piecewise linear fit curve of the imaginary part, while in panel (b) is the predicted curve of the real part calculated based on the dispersion relation. The present results are shown by the circles, and asterisks represent the results taken from Ref. [27].

然后, 由色散关系, 可以根据虚部的变化计算出实部的预测曲线, 如图 4(a) 所示. 图中红色实线表示色散关系的预测曲线, 与实验抽取的光学势并不相符. 因此色散关系不适用于 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系, 这在其他弱束缚核体系中也表现 [29,30]. 色散关系是因果性原理通过 KK 关系 (Kramers-Kronig 关

系 [31,32]) 得以体现的, 而 KK 关系源自柯西留数定理. 要满足推导条件, 复平面必须包含一系列与相互作用核体系离散态对应的孤立奇点. 而对于奇特核体系而言, 破裂过程产生的连续态可能不符合留数定理的要求. 因此, 直接将色散关系应用于奇特核体系在数学上可能并不严谨. 有必要建立一种新关系, 用以描述弱束缚核体系中具有连续态时实势与虚势之间的异常行为.

通过对虚部的拟合, 得到的反应阈值 $E_B = (21.45 \pm 0.85)$ MeV, 约为 $0.73 V_B$. 值得注意的是, 典型的紧束缚核如 ${}^{16}\text{O}$ 的破裂阈值约为 7.16 MeV, 其光学势表现出典型的阈异常现象. ${}^6\text{Li}$ 的破裂阈值 (约 1.47 MeV) 和 ${}^9\text{Be}$ 的破裂阈值 (约 1.69 MeV) 较为接近, 远低于一般的紧束缚核, 其光学势就表现出与 ${}^9\text{Be}$ 体系类似的反常阈异常现象. 而这意味着反应阈值和破裂阈值之间可能存在关联. 图 5 显示了某些体系 [8,19,30,33-37] 反应阈值的破裂阈值依赖性. 如图 5 所示, 对于典型的紧束缚核体系, 如 ${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$ 和 ${}^{19}\text{F}+{}^{208}\text{Pb}$, 有较多的实验对其反应阈值进行了测量. 对于弱束缚核体系, 特别是 ${}^6\text{He}$ 等晕核, 目前对其反应阈值的研究仍然非常有限. 这是因为这些体系往往表现出反常阈异常现象, 因此在极深垒能区才会完全关闭所有的反应道. 目前, ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 是唯一一个测量了反应阈值的晕核体系, 其反应阈值为 $0.68 V_B$ [19]. 从图 5 可以看出, 对于紧束缚核体系, 其反应阈值通常在 $0.9 V_B$ 左右, 而对于弱束缚核体系, 特别是晕系统, 现有数据证明它们的反应阈值在 $0.7 V_B$ 左右. 此外, 图 5 中的红色实线是利用 Weibull 分布函数对反应阈值 $y = E_{th}/V_B$ 与破裂阈值 S_x 的拟合, 拟合的关系式如下

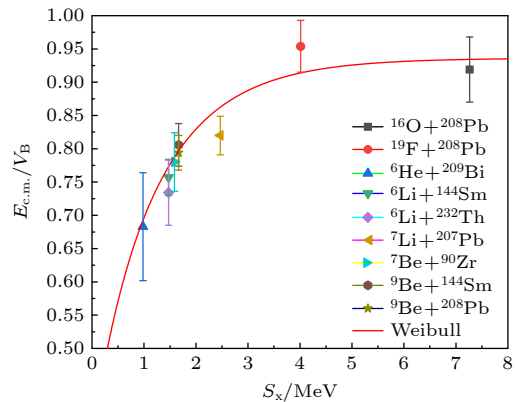


图 5 不同体系反应阈值与破裂阈值的关系

Fig. 5. The relationship between the reaction threshold and the breakup threshold in different systems.

所示:

$$y = y_0 + A_1 \left[1 - e^{-(x/a)b} \right]^{-1}. \quad (4)$$

经拟合得到 (4) 式中参数 $y_0 = -0.074$, $A_1 = 1.013$, $a = 0.586$, $b = 0.809$. 从图 5 可以看到, 拟合曲线能较好地符合实验数据. 这证明了反应阈值和断裂阈值之间存在着系统性的关联.

4 总结

本文的主要工作在于对 ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系近垒和深垒能区的弹性散射角分布的精确测量, 且提取并分析了该体系的光学势, 为研究反常阈异常现象以及涉及强变形核的体系的反应机制提供了数据支持. ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 体系光学势表现出明显的反常阈异常, 且经典色散关系无法用来描述实部和虚部之间的关联. 这一结果与 ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 体系^[19]的结论一致. 同时讨论了这种特定行为的可能原因, 但需要进一步的研究来揭示其深层的物理原因. 此外, 通过深垒处的弹散数据确定了该体系的反应阈值, 约为 $0.73 V_B$, 并对不同体系的反应阈值和断裂阈值之间的关联进行了简单的系统学分析, 发现利用 Weibull 分布函数能较好地描述两者之间的联系. 目前弱束缚核 (尤其是晕核) 垒下能区的实验数据仍然不足, 要想更系统性地分析断裂效应对反应截面的影响, 仍需开展更多体系在垒下能区的实验测量.

5 数据可用性声明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00218> 中访问获取.

参考文献

- [1] Shen Q B, Han Y L, Guo H R 2009 *Phys. Rev. C* **80** 024604
- [2] Guo H R, Xu Y L, Liang H Y, Han Y L, Shen Q B 2014 *Nucl. Phys. A* **922** 84
- [3] Guo H R, Xu Y L, Han Y L, Shen Q B 2010 *Phys. Rev. C* **81** 044617
- [4] Guo H R, Zhang Y, Han Y L, Shen Q B 2009 *Phys. Rev. C* **79** 064601
- [5] Ma Y Q, Ma Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 74 (in Chinese) [马引群, 马中玉 2008 *物理学报* **57** 74]
- [6] Baeza A, Bilwes B, Bilwes R, Díaz J, Ferrero J 1984 *Nucl. Phys. A* **419** 412
- [7] Lilley J, Fulton B, Nagarajan M, Thompson I, Baner D 1985 *Phys. Lett. B* **151** 181

- [8] Nagarajan M A, Mahaux C C, Satchler G R 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 1136
- [9] Passatore G 1967 *Nucl. Phys. A* **95** 694
- [10] Carlson B V, Frederico T, Hussein M S, Esbensen H, Landowne S 1990 *Phys. Rev. C* **41** 933
- [11] Nussenzweig H 1972 *Causality and Dispersion Relations* (New York: Academic Press) pp3-53
- [12] Fukuda M, Ichihara T, Inabe N, Kubo T, Kumagai H, Nakagawa T, Yano Y, Tanihata I, Adachi M, Asahi K, Kouguchi M, Ishihara M, Sagawa H, Shimoura S 1991 *Phys. Lett. B* **268** 339
- [13] Tanihata I, Kobayashi T, Suzuki T, Yoshida K, Shimoura S, Sugimoto K, Matsuta K, Minamisono T, Christie W, Olson D, Wieman H 1992 *Phys. Lett. B* **287** 307
- [14] Suzuki T, Kanungo R, Bochkarev O, et al. 1999 *Nucl. Phys. A* **658** 313
- [15] Smedberg M, Baumann T, Aumann T, et al. 1999 *Phys. Lett. B* **452** 1
- [16] Keeley N, Bennett S, Clarke N, Fulton B, Tungate G, Drumm P, Nagarajan M, Lilley J 1994 *Nucl. Phys. A* **571** 326
- [17] Figueira J M, Niello J O F, Arazi A, et al. 2010 *Phys. Rev. C* **81** 024613
- [18] Hussein M S, Gomes P R S, Lubian J, Chamon L C 2007 *Phys. Rev. C* **76** 019902
- [19] Yang L, Lin C J, Jia H M, Wang D X, Ma N R, Sun L J, Yang F, Xu X X, Wu Z D, Zhang H Q, Liu Z H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 042503
- [20] Fimiani L, Figueira J M, Martí G V, et al. 2012 *Phys. Rev. C* **86** 044607
- [21] Gómez Camacho A, Gomes P R S, Lubian J 2010 *Phys. Rev. C* **82** 067601
- [22] Thompson I J 1988 *Comput. Phys. Rep.* **7** 167
- [23] Igo G 1958 *Phys. Rev. Lett.* **1** 72
- [24] Cramer J G, DeVries R M 1980 *Phys. Rev. C* **22** 91
- [25] Roubos D, Pakou A, Alamanos N, Rusek K 2006 *Phys. Rev. C* **73** 051603(R)
- [26] Michel F, Albinski J, Belery P, Delbar T, Grégoire G, Tasiaux B, Reidemeister G 1983 *Phys. Rev. C* **28** 1904
- [27] Zhang C L, Zhang H Q, Lin C J, Ruan M, Liu Z H, Yang F, Wu X K, Zhou P, An G P, Jia H M, Wu Z D, Xu X X, Bai C L 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1146
- [28] Mahaux C, Ngô H, Satchler G 1986 *Nucl. Phys. A* **449** 354
- [29] Lipperheide R, Schmidt A 1968 *Nucl. Phys. A* **112** 65
- [30] Pakou A, Alamanos N, Doukelis G, et al. 2004 *Phys. Rev. C* **69** 054602
- [31] Szabó Z 2017 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **65** 1150
- [32] Yan C S 2019 *Chin. Opt.* **12** 179 (in Chinese) [阎春生 2019 *中国光学* **12** 179]
- [33] Lin C J, Xu J C, Zhang H Q, Liu Z H, Yang F, Lu L X 2001 *Phys. Rev. C* **63** 064606
- [34] Dubey S, Mukherjee S, Biswas D C, et al. 2014 *Phys. Rev. C* **89** 014610
- [35] Palli K, Pakou A, Moro A M, et al. 2023 *Phys. Rev. C* **107** 064613
- [36] So W Y, Udagawa T, Kim K S, Hong S W, Kim B T 2010 *Phys. Rev. C* **81** 047604
- [37] Huang Z J, Lin C J, Yang L, Jia H M, Ma N R, Wen P W, Yang F, Wang D Y, Luo T P, Chang C, Duan H R, Zhu S X, Yin C, Yang J H, Wang H R, Fan Z R, Fu L Y, Li H Y 2024 *At. Energy Sci. Technol.* **58** 2255 (in Chinese) [黄志杰, 林承键, 杨磊, 贾会明, 马南茹, 温培威, 杨峰, 王丹英, 骆天鹏, 常昶, 段海锐, 祝颂娴, 尹诚, 杨灵和, 王浩睿, 范泽睿, 傅凌逸, 李慧艳 2024 *原子能科学技术* **58** 2255]

SPECIAL TOPIC—Thematic data in nuclear physics: Experimental, theoretical and applied research

Abnormal threshold anomaly in the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system*

HUANG Zhijie¹⁾ YANG Lei^{1)†} LIN Chengjian^{1)2)‡} JIA Huiming¹⁾

MA Nanru¹⁾ YANG Feng¹⁾ WEN Peiwei¹⁾

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

2) (*Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, College of Physics and Technology & Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*)

(Received 16 September 2025; revised manuscript received 30 October 2025)

Abstract

The optical potential is a key tool for describing interactions in nuclear collisions and is widely used in studies of nuclear reaction mechanisms. The optical potential is highly sensitive to nuclear structure, thereby leading to distinct characteristics between weakly bound and tightly bound nuclear systems. For weakly bound nuclei such as ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ and ${}^6\text{He}$, the behavior of the optical potential remains controversial due to insufficient experimental data at near-barrier and deep-barrier energies. In this work, elastic scattering angular distributions for the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system are measured at near-barrier and deep-barrier energies. Optical model fitting is employed to extract the optical potential parameters. The results indicate that there is an anomalous threshold anomaly for the optical potential of this system, so the dispersion relation is not applicable. Furthermore, the reaction threshold for the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system is determined to be approximately $0.73V_B$ based on deep-barrier data. A systematic analysis is also performed on the reaction thresholds and breakup thresholds of different nuclear systems. In this work the optical potential of the ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ system is measured at near-barrier and deep sub-barrier energies, providing data support for further investigation of the anomalous threshold anomaly. The datasets presented in this paper are openly available at <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00218>.

Keywords: optical potential, elastic scattering angular distribution, weakly bound nuclei

DOI: [10.7498/aps.75.20251271](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251271)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251271](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251271)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2023YFA1606402, 2022YFA1602302), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12235020, 12275360, 12375130), and the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China.

† Corresponding author. E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: cjlin@ciae.ac.cn