



近垒能区 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 的准弹性散射研究

常昶 杨磊 林承键 杨彦云 温培威 骆天鹏 马军兵 许世伟 王康 段芳芳 马南茹 贾会明 杨峰 黄大湖 张明昊 杨过 杨赟 莫腾欢

Quasielastic Scattering Study for the ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ System at the Energy Near the Coulomb Barrier

CHANG Chang, YANG Lei, LIN Chengjian, YANG Yanyun, WEN Peiwei, LUO Tianpeng, MA Junbing, XU Shiwei, WANG Kang, DUAN Fangfang, MA Nanru, JIA Huiming, YANG Feng, HUANG Dahu, ZHANG Minghao, YANG Guo, YANG Yun, MO Tenghuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023005>

引用格式:

常昶, 杨磊, 林承键, 杨彦云, 温培威, 骆天鹏, 马军兵, 许世伟, 王康, 段芳芳, 马南茹, 贾会明, 杨峰, 黄大湖, 张明昊, 杨过, 杨赟, 莫腾欢. 近垒能区 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 的准弹性散射研究[J]. 原子核物理评论, 2023, 40(3):356–361. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023005

CHANG Chang, YANG Lei, LIN Chengjian, YANG Yanyun, WEN Peiwei, LUO Tianpeng, MA Junbing, XU Shiwei, WANG Kang, DUAN Fangfang, MA Nanru, JIA Huiming, YANG Feng, HUANG Dahu, ZHANG Minghao, YANG Guo, YANG Yun, MO Tenghuan. Quasielastic Scattering Study for the ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ System at the Energy Near the Coulomb Barrier[J]. Nuclear Physics Review, 2023, 40(3):356–361. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近垒及垒下能区 ${}^{28}\text{Si}+{}^{174}\text{Yb}$ 体系的裂变碎片质量分布

Research of Fission Fragment Mass Distribution for ${}^{28}\text{Si}+{}^{174}\text{Yb}$ at Energies near the Coulomb Barrier
原子核物理评论. 2017, 34(3): 534–538 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.534>

高 Q^2 电子原子核单举准弹性散射截面的计算方法

A Calculation Method of Inclusive Electron Nucleus Quasi-elastic Scattering Cross Section at High Q^2
原子核物理评论. 2017, 34(4): 718–723 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.718>

${}^{12}\text{C}+{}^{13}\text{C}$ 在库仑位垒以下能区的熔合截面测量

Measurement of ${}^{12}\text{C}+{}^{13}\text{C}$ Fusion Cross Sections Below Coulomb Barrier Energies
原子核物理评论. 2017, 34(4): 705–709 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.705>

20MeV以下快中子与 ${}^{56}\text{Fe}$ 非弹性散射截面的分歧研究

Research on Discrepancy of Inelastic Cross Section for ${}^{56}\text{Fe}$ in Fast Neutron Range
原子核物理评论. 2017, 34(3): 514–519 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.514>

弱束缚原子核引起的熔合反应机制研究

Study of Fusion Reaction Mechanism Induced by Weakly Bound Nuclei
原子核物理评论. 2020, 37(2): 119–135 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019060>

近垒重离子熔合反应中的中子转移效应(英文)

Role of Neutron Transfers in Initiating Near-barrier Fusion of Heavy-ions
原子核物理评论. 2017, 34(3): 361–369 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.361>

文章编号: 1007-4627(2023)03-0356-06

近垒能区 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 的准弹性散射研究

常昶¹, 杨磊^{1,†}, 林承键^{1,2,†}, 杨彦云³, 温培威¹, 骆天鹏¹, 马军兵³, 许世伟³, 王康³, 段芳芳³,
马南茹¹, 贾会明¹, 杨峰¹, 黄大湖^{1,2}, 张明昊¹, 杨过³, 杨赞^{1,2}, 莫腾欢^{1,2}

(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, 广西 桂林 541004;

3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 近垒能区弱束缚核的反应动力学是目前核物理研究热点之一。本工作使用大立体角硅探测器阵列测量了 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系在48.05 MeV的准弹性散射, 结合蒙特卡罗模拟得到其微分截面。基于光学模型, 分别用频率方法和贝叶斯方法对角分布进行拟合。在前角区, 两种方法给出了一致的结果; 在后角区, 频率方法的结果呈现明显的振荡结构, 而贝叶斯方法的结果较为平滑, 在靠近 180° 有振荡上升的趋势。

关键词: 近垒能区; 弱束缚核; 准弹性散射角分布; 光学模型; 频率方法; 贝叶斯方法

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023005

0 引言

在过去的二十年里, 随着加速器的发展, 研究人员具备了产生远离稳定线核素的能力, 开展了大量放射线束物理方面的研究工作, 大大扩展了核物理研究的领域。库仑势垒附近能区弱束缚核的反应动力学研究, 引起了低能核物理学界的极大兴趣^[1-3]。弱束缚核结合能较低, 通常具有奇特的结构, 如团簇结构、中子晕和质子晕等^[4-5]。弱束缚核在与靶核相互作用时较容易破裂, 破裂之后可能会影响其他反应道, 比如弹性散射过程发现有库仑虹部分消失或全部消失、四分之一角较小等^[6-7]。弹性散射是核碰撞的一个基本的过程, 主要发生在两核密度无交叠或者少量交叠的区域。虽然弹性散射过程比较简单, 但它是研究核-核相互作用以及原子核的基本性质, 如核物质的分布(尺寸、表面弥散等)的基本实验方法^[8]。同时, 通过测量弹性散射微分截面, 可以提取总反应截面, 这对于揭示弱束缚核反应机制至关重要。此外, 通过测量弹性散射角分布, 还可以进一步研究其它反应过程, 如非弹、破裂、转移等, 对弹性散射的耦合效应。在广义上, 准弹性散射包括了弹性散射、非弹性散射、少数核子转移等接近弹性散射的周边反应

过程。

为了更清楚地了解近垒能区弱束缚核的反应动力学, 我们选择 ${}^7\text{Be}$ 作为研究对象。 ${}^7\text{Be}$ 是位于质子滴线的放射性核, 半衰期为53.2 d, 容易破裂为 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 集团, 分离能为1.586 MeV。 ${}^7\text{Be}$ 因为是质子晕 ${}^8\text{B}$ 的核心, 所以更加令人关注。对 ${}^7\text{Be}$ 的研究可以帮助我们更好地了解 ${}^8\text{B}$ 的反应机制^[9-10]。 ${}^8\text{B}$ 的质子的分离能只有0.138 MeV, 具有质子晕结构, 另外, ${}^8\text{B}$ 在天体物理上也有着重要的意义。从实验角度来看, ${}^7\text{Be}$ 直接破裂的产物 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 都是带电粒子, 很容易被探测到。因此, ${}^7\text{Be}$ 也是研究近垒能区反应机制的理想对象。

目前研究人员已经测量了 ${}^7\text{Be}$ 与 ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{51}\text{V}$, ${}^{58}\text{Ni}$, 和 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶核的准弹性散射^[10-18]。总体来说, 除了 ${}^7\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$ 的散射体系外, ${}^7\text{Be}$ 的弹散数据均表明连续态对弹散的耦合效应并不显著。本工作中, 我们测量了 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系在48.05 MeV能量下的弹性散射角分布。选择 ${}^{120}\text{Sn}$ 作为靶核, 是因为目前仍然缺少关于 ${}^7\text{Be}$ 与中等质量靶核的反应数据; 同时该体系库仑相互作用和核相互作用都起着重要作用, 使我们能够研究两者之间的相干效应。此外, 人们发表了一系列弱束缚核在 ${}^{120}\text{Sn}$ 靶上的弹性散射数据, 如 ${}^{6,7}\text{Li}$ ^[19], ${}^6\text{He}$ ^[20], ${}^8\text{B}$ ^[21]。

收稿日期: 2023-01-12; 修改日期: 2023-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0404404); 国家自然科学基金资助项目(12235020, U2167204, 12175313, 12175314, U1732145, U1867212和119611012); 稳定支持基础科研计划; 中核集团领创项目(LC192209000701, LC202309000201); 青年人才发展基金项目(YC2122120001); 国防基础科研计划项目(JCKY2020201C002)

作者简介: 常昶(1998-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 从事原子核反应研究; E-mail: changchangccc@outlook.com

†通信作者: 杨磊, E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn; 林承键, E-mail: cjin@ciae.ac.cn

因此可以通过与同一靶核上的这些数据进行比较来进一步研究 ${}^7\text{Be}$ 的反应动力学。

1 实验装置和数据处理

本实验是在中国科学院近代物理研究所的放射性离子束流线(RIBLL1)^[22-23]上完成的。使用 60.2 MeV 的 ${}^7\text{Li}^{3+}$ 初级束, 流强为 150~280 pA, 通过 ${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$ 反应 ($Q=-1.64$ MeV) 产生 ${}^7\text{Be}$ 次级束。氢气靶^[24]长 80 mm, 窗为 2.5 μm 的 Havar 膜, 气压为 800×10^2 Pa, 液氮制冷, 温度约为 80 K。两个厚度为 10 μm 的塑料闪烁体 (C_9H_{10}) 分别安装在 RIBLL1 的 T_1 和 T_2 靶室, 用来测量粒子的飞行时间(TOF)。经过 RIBLL1 的纯化和传输, ${}^7\text{Be}$ 次级束进而轰击 2.78 mg/cm^2 厚的自支撑同位素 ${}^{120}\text{Sn}$ 靶, 丰度为 98%, 靶中心能量为 48.05 MeV。次级束流强为 1×10^5 pps, 纯度约为 90%, 主要污染物为初级束 ${}^7\text{Li}$ 。

利用由 9 组硅望远镜组成的大立体角探测器阵列测量反应产物, 如图 1 所示。阵列可分为前角和后角两部分。前角的每组望远镜包括三层硅探测器: 第一层和第二层是单面硅条探测器(SSSD), 厚度分别为 20 和 300 μm , 然后是厚度为 1 500 μm 的四分硅探测器(QSD)。后角的望远镜有着不同的结构: 第一层是 40 μm 双面硅条探测器(DSSD), 其次是两个厚的 QSD, 厚度分别为 300 和 1 500 μm 。SSSD 和 DSSD 上每根硅条的宽度为 3 mm, 间隙是 0.1 mm, 灵敏探测面积是 48 $\text{mm}\times 48$ mm, QSD 的灵敏面积为 50 $\text{mm}\times 50$ mm。前置放大器采用高性能电荷灵敏前置放大器^[25], 与探测器密切配合, 处于真空室中, 以降低电子学噪声。本套探测系统共有 502 路信号, 具有模块化、设计紧凑、几何效率高的优点。数据获取系统的触发条件是所有硅探测器的或逻辑(在 0° 处的硅探测器的触发做了 100 分除, 避免计数率太高使得获取堵死)。TOF- E_r (由 0° 望远镜测得的能量)如图 2(a) 所示, 可以将次级束 ${}^7\text{Be}$ 与初级束 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^4\text{He}$ 分开。图 2(b) 显示了由一个前角望远镜测到的 ΔE - E_r 能谱。可以看出, ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 以及反应产物 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^3\text{He}$ 可以清晰地鉴别。为了确定探测器的几何效率, 我们利用蒙特卡罗方法模拟粒子各向同性发射。结果表明, 阵列可以覆盖 $0^\circ\sim 21.2^\circ$, $29.8^\circ\sim 68.8^\circ$ 和 $101.7^\circ\sim 164.2^\circ$ 的极角范围, 立体角覆盖为 36% 4π 。望远镜总能量分辨约为 3.1%, 不足以分辨 ${}^7\text{Be}$ 的第一激发态 ($E_{\text{ex}}=0.429$ MeV, $J^\pi=1/2^-$)。因此, 得到的散射结果被认为是准弹性散射角分布。

弹性散射微分截面的角分布由下式得到:

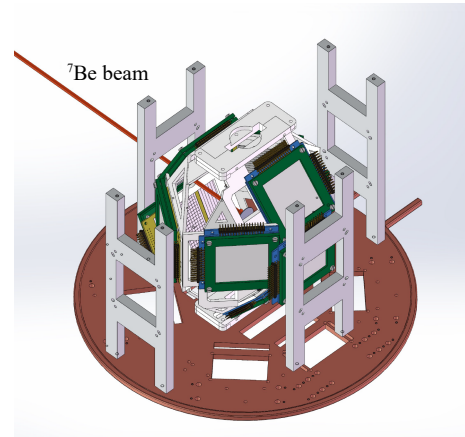


图 1 具有大立体角覆盖范围的硅探测器阵列示意图(红线表示束流入射方向)(在线彩图)

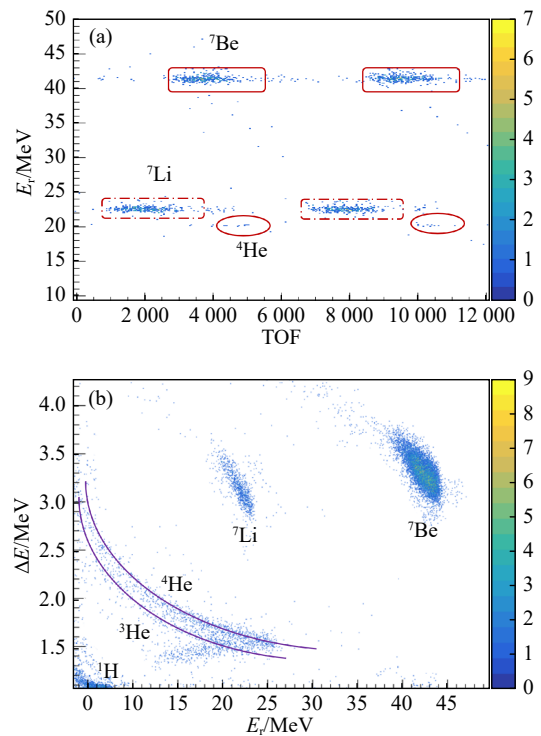


图 2 粒子鉴别图(在线彩图)

(a) TOF- E_r 可以将初级束 ${}^7\text{Li}$ 、次级束 ${}^7\text{Be}$ 和束流中的 ${}^4\text{He}$ 区分; (b) ΔE - E_r 二维谱, ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^3\text{He}$ 可以清晰的鉴别(为了方便区分 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^3\text{He}$, 用紫线示意两者理论分布)。

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\sigma_{\text{Ruth}}(\theta)} = C \frac{N(\theta)_{\text{expt}}}{N(\theta)_{\text{Ruth}}}, \quad (1)$$

式中: $N(\theta)_{\text{expt}}$ 是实验室角度 θ 处 ${}^7\text{Be}$ 弹性事件的产率; $N(\theta)_{\text{Ruth}}$ 是蒙特卡罗模拟的卢瑟福散射产率。归一化常数 C 是一个全局归一化因子, 它通过假设 15° 处的弹性散射截面为卢瑟福散射截面来确定。卢瑟福散射公式为

$$\frac{d\sigma_{\text{Ruth}}(\theta_{\text{c.m.}})}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta_{\text{c.m.}}}{2}}, \quad (2)$$

其中： Z_1 、 Z_2 分别为弹核和靶核的质子数； e 为电子电荷， E 为弹核入射动能； $\theta_{\text{c.m.}}$ 为质心系角度，得到的截面为质心系截面。在数据处理过程中需要从实验室系转换到质心系，公式为

$$\frac{\sigma_L(\theta_L)}{\sigma_{\text{c.m.}}(\theta_{\text{c.m.}})} = \frac{(1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \theta_{\text{c.m.}})^{3/2}}{1 + \gamma \cos \theta_{\text{c.m.}}}, \quad (3)$$

其中 γ 为弹核和靶核质量数的比值。从卢瑟福散射公式中看到，如果 θ 在趋近于 0 的时候，截面会趋近于无限大，这显然和事实不符。因为卢瑟福散射公式在推导的过程中认为只发生单次散射并忽略核外电子的作用。而实际上在散射角很小时，核外电子与弹核的相互作用已经不能忽略，发生多次小角散射的概率也很大。因此，需要在合适的角度截断。在本工作的模拟过程中，截断角度设为 8° 。本阵列在 0° 放置有望远镜，可以方便地确定束流漂移位置 [图 3(a)]，将其投影到 x 和 y 方向见图 3(b)、(c)，可以确定束流中心 x 方向向右偏离 3 mm，半高宽约为 12 mm， y 方向向上偏离 3 mm，半高宽约为 15 mm。根据束流偏移可以对散射角度做修正，图 4(a)、(b) 分别是模拟粒子各向同性发射和卢瑟福散射并考虑束流偏移的结果。

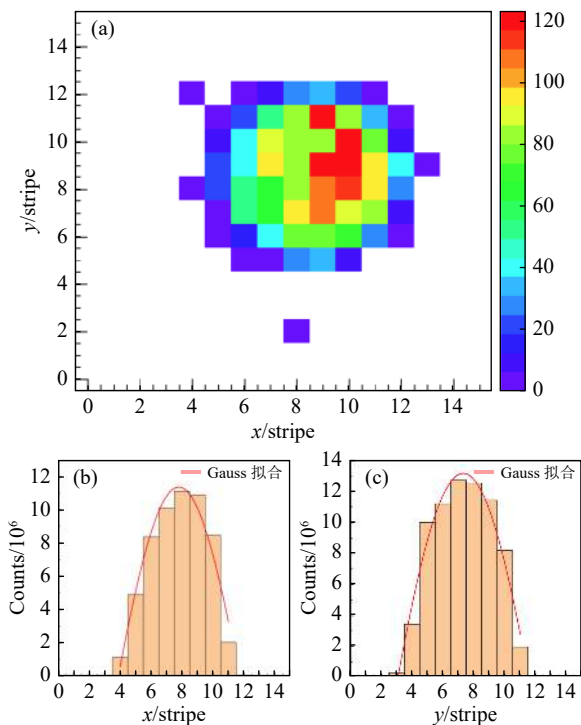


图 3 (a) $0^\circ \sim 20^\circ$ 望远镜探测束流分布；(b) 将束流投影到 x 方向；(c) 将束流投影到 y 方向；红线为高斯拟合结果 (在线彩图)

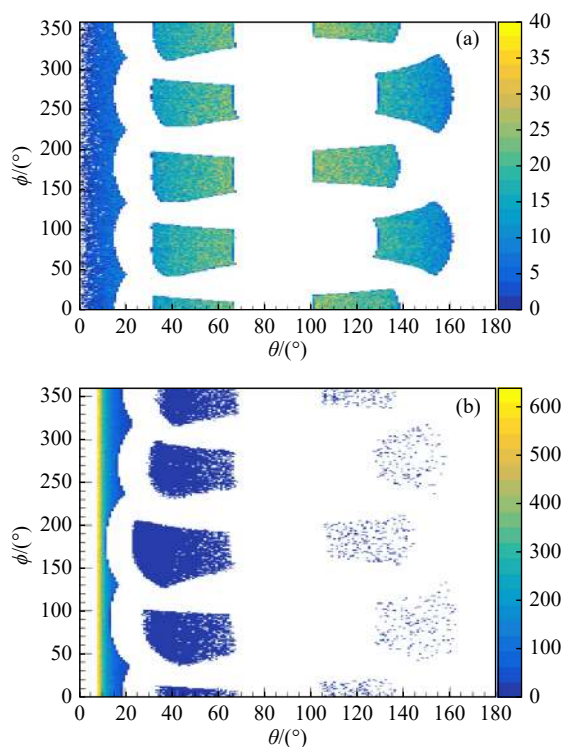


图 4 蒙特卡罗模拟 θ - ϕ 二维图 (在线彩图)
(a) 各向同性粒子发射，模拟阵列立体角为 $36\%4\pi$ ；(b) 模拟卢瑟福散射，并考虑束流偏移。

2 光学模型分析

光学模型 (Optical Model) 是核反应理论中最基础的理论模型，主要用来描述核反应的独立粒子阶段，这个阶段也是所有核反应都要经历的阶段。光学模型认为核碰撞过程可以描述为在弹靶系统组成的平均场中的运动，平均的核势场可以用一个复数的有效势来表示：

$$U_N(r) = V(r) + iW(r), \quad (4)$$

$V(r)$ 表示透射或者反射，虚部 $W(r)$ 表示吸收，这个过程与光在介质中的传播类似，所以类似于光学中复折射率的方法。光学模型可以解决入射粒子在靶核平均场中的散射和吸收问题，利用它可以计算核反应的弹性散射截面和吸收截面 (反应截面)。

对于唯象光学势，实部和虚部可以写成：

$$U_N(r) = V_0 f_V(r) + iW_0 f_W(r), \quad (5)$$

其中： V_0 、 W_0 分别为实部、虚部深度； $f(r)$ 是形状因子，通常取 [26]

$$f(r) = \left[1 + \exp\left(\frac{r - r_0(A_p + A_t)^{1/3}}{a_0} \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

r_0 、 a_0 分别为作用势的半径和弥散参数，为可调参数； A_p 、 A_t 分别为弹核和靶核的质量数。

基于 OM, 我们用 FRESKO 程序 [27] 对实验角分布做了拟合。FRESKO 是一个耦合道计算程序, 基于直接核反应理论框架, 求解被认为在反应中起重要作用的原子核某种组分以及它们的相互作用势的薛定谔方程。拟合采用了 2 种方法: 传统的频率方法和贝叶斯方法, 见图 5。频率方法是指在参数空间中逐步减小 χ^2 值来找到最优参数的方法, 本文采用了 MIGRAD 算法 [28]。贝叶斯方法是一种基于贝叶斯定理的统计推断方法。它的基本概念是利用先验概率和观测数据来计算后验概率, 从而对未知参数或假设进行推断。在贝叶斯方法中, 我们首先对未知参数或假设的先验分布进行设定, 然后利用观测数据来更新这些分布, 得到后验分布。这样, 我们可以通过后验分布来对未知参数或假设进行推断和决策。根据贝叶斯定理, 模型参数的后验概率分布函数可以写为

$$P(x|D) = \frac{P(D|x)P(x)}{P(D)}, \quad (7)$$

$P(x)$ 为在没有给定数据集 D 的情况下, 模型参数 x 的先验分布, 表示对参数集的先验知识。 $P(D|x)$ 是似然函数, 通过比较实验数据与参数集为 x 的模型值给出, 采用了高斯分布的形式。 $P(D)$ 为归一化常数, 保证后验分布是一个有效的积分为 1 的概率密度。后验分布 $P(x|D)$ 代表了考虑数据集 D 后参数 x 的最可能的分布。尽管贝叶斯定理的概念如此简单, 但是在实际计算中, 后验分布通常都是复杂高维的分布, 很难进行抽样, 这使得早期贝叶斯方法的使用受到了极大的限制。马尔可夫链蒙特卡罗方法 (MCMC) 的提出解决了这个问题 [29]。

频率方法适合拟合少量参数, 参数多时由于极小点众多, 结果往往都在初值附近。这个方法的一个重要结论是, 光学势的一些参数之间存在着很强的关联性。相比之下, 贝叶斯方法通常依赖于马尔可夫链蒙特卡罗 (MCMC) 方法来对参数空间进行采样, 并从似然函数和先验分布的乘积中获得后验预测, 可以对参数的分布有一个整体展现, 最后给出的结果是整体的期望值, 但受先验分布的影响较大 [30]。贝叶斯方法已广泛应用于核物理, 并在弹性散射研究与传统的频率方法进行了对比 [30-36], 该方法可以基于实验数据对光学势参数及其 1σ 置信区间进行理论预测 (图 5 中的阴影区域), 这也是其优点之一, 可以给出好的误差范围。两种方法拟合的光学势, 见表 1。对比发现, 两种方法的光学势参数有一定的差别, 尤其是贝叶斯方法给出的 r_{0V} 太小、两者 V_0 和 W_0 相差较大, 贝叶斯的光学势参数普遍较小, 频率方法的结果和文献基本一致。

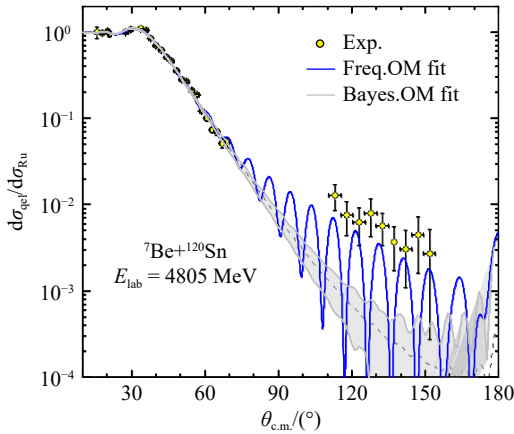


图 5 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系在 48.05 MeV 能量下的准弹性散射角分布 (在线彩图)
虚线为贝叶斯方法拟合的结果, 蓝线是频率方法拟合的实验结果 (使用的 MINUIT 程序 [28])。阴影区域为贝叶斯方法给出的 1σ 置信区间。

表 1 频率方法与贝叶斯方法拟合的光学势参数

	V_0/MeV	r_{0V}/fm	a_V/fm	W_0/MeV	r_{0W}/MeV	a_W/MeV
频率方法	39.57	1.14	0.77	49.00	1.06	0.83
贝叶斯方法	27.72 ± 9.41	0.26 ± 0.05	0.67 ± 0.38	28.95 ± 9.04	1.23 ± 0.09	0.69 ± 0.10

在前角区, 两种方法给出了一致的结果, 表面核力和库仑力相互干涉导致的库仑虹抑制不明显; 在后角区, 频率方法的结果呈现明显的振荡结构, 可能是内部核力和库仑力相互干涉, 也可能是近边散射和远边散射相干叠加, 而贝叶斯方法的结果较为平滑, 是对多个振荡的平均, 但在近 180° 有振荡上升的趋势。OM 拟合结果在大角度下与实验值有很大差异, 在之前的研究中也出现了这样的问题 [37-38], 可能是因为非弹性过程和多步过程等因素的影响, 需要进一步研究。

3 结论

本工作测量了弱束缚 ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ 体系准弹性散射角分布。我们设计了立体角覆盖为 $36\% 4\pi$ 的硅探测器阵列。本阵列在 0° 放置了一组望远镜, 在蒙特卡罗模拟卢瑟福散射时, 可以利用这组望远镜进行束流漂移修正。对于实验结果, 我们基于 OM 使用传统的频率方法和贝叶斯方法拟合, 前角区两者结果相似, 库仑虹抑制不明显, 说明 ${}^7\text{Be}$ 的破裂道耦合效应较弱; 后角区两者差异

明显,且都与实验数据存在一定偏差。本实验补充了 ${}^7\text{Be}$ 与中重核的实验数据,将来可以比较 ${}^7\text{Be}$ 与不同质量靶核的系统学。在 ${}^7\text{Be}$ 的反应动力学方面,尤其是破裂碎片之间的关联还需要在未来进一步研究。

参考文献:

- [1] KEELEY N, RAABE R, ALAMANOS N, et al. *Prog Part Nucl Phys*, 2007, 59(2): 579.
- [2] CANTO L, GOMES P, DONANGELO R, et al. *Phys Rep*, 2006, 424(1-2): 1.
- [3] MAZZOCCO M. *Int J Mod Phys E*, 2010, 19(05n06): 977.
- [4] RAABE R, SIDA J, CHARVET J, et al. *Nature*, 2004, 431(7010): 823.
- [5] KOLATA J J, AMRO H, BECCHETTI F D, et al. *Phys Rev C*, 2007, 75: 031302.
- [6] DI PIETRO A, RANDISI G, SCUDERI V, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 022701.
- [7] STANDYŁO L, ACOSTA L, ANGULO C, et al. *Phys Rev C*, 2013, 87: 064603.
- [8] JACKSON D. *Rep Prog Phys*, 1974, 37(1): 55.
- [9] AGUILERA E F, MARTINEZ-QUIROZ E, LIZCANO D, et al. *Phys Rev C*, 2009, 79: 021601.
- [10] JONSON B. *Phys Rep*, 2004, 389(1): 1.
- [11] VERMA S, DAS J, JHINGAN A, et al. *Eur Phys J A*, 2010, 44(3): 385.
- [12] BARIONI A, ZAMORA J C, GUIMARÃES V, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014603.
- [13] ZAMORA J C, GUIMARÃES V, BARIONI A, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 034611.
- [14] TABACARU G, AZHARI A, BRINKLEY J, et al. *Phys Rev C*, 2006, 73: 025808.
- [15] MORCELLE V, LICHTENTHÄLER R, LINARES R, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 044611.
- [16] KALITA K, VERMA S, SINGH R, et al. *Phys Rev C*, 2006, 73: 024609.
- [17] LICHTENTHÄLER R, DE FARIA P, LÉPINE-SZILY A, et al. *Eur Phys J Spec Top*, 2007, 150(1): 27.
- [18] MAZZOCCO M, KEELEY N, BOIANO A, et al. *Phys Rev C*, 2019, 100: 024602.
- [19] BASAK A, BILLAH M, KOBRA M, et al. *Eur Phys Lett*, 2011, 94(6): 62002.
- [20] DE FARIA P N, LICHTENTHÄLER R, PIRES K C C, et al. *Phys Rev C*, 2010, 81: 044605.
- [21] YANG L, LIN C, YAMAGUCHI H, et al. *Nat Commun*, 2022, 13: 7193.
- [22] ZHAN W, GUO Z, LIU G, et al. *Sci China Math*, 1999, 42(5): 528.
- [23] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 503(3): 496.
- [24] HE J, XU S, MA P, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2012, 680: 43.
- [25] WANG D X, LIN C J, YANG L, et al. Compact 16-channel Integrated Charge-sensitive Preamplifier Module for Silicon Strip Detectors[Z].
- [26] WOODS R D, SAXON D S. *Phys Rev*, 1954, 95: 577.
- [27] THOMPSON I J. *Comput Phys Commun*, 1988, 7(4): 167.
- [28] JAMES F, ROOS M. *Comput Phys Commun*, 1975, 10(20): 343.
- [29] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, et al. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6): 1087.
- [30] YANG L, LIN C, ZHANG Y, et al. *Phys Lett B*, 2020, 807: 135540.
- [31] NIU Z, LIANG H. *Phys Lett B*, 2018, 778: 48.
- [32] NIU Z, LIANG H, SUN B, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99(6): 064307.
- [33] WANG Z A, PEI J, LIU Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(12): 122501.
- [34] SIVIA D, CARLILE C, HOWELLS W, et al. *Phys B*, 1992, 182: 341.
- [35] RONG C, RANGEL J, WU Y, et al. *The European Physical Journal A*, 2021, 57(4): 1.
- [36] KING G B, LOVELL A E, NEUFCOURT L, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 232502.
- [37] CANTO L, GOMES P, DONANGELO R, et al. *Phys Rep*, 2015, 596: 1.
- [38] KOLATA J, GUIMARÃES V, AGUILERA E. *Eur Phys J A*, 2016, 52(5): 1.

Quasielastic Scattering Study for the ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ System at the Energy Near the Coulomb Barrier

CHANG Chang¹, YANG Lei^{1,†}, LIN Chengjian^{1,2,†}, YANG Yanyun³, WEN Peiwei¹, LUO Tianpeng¹, MA Junbing³,
XU Shiwei³, WANG Kang³, DUAN Fangfang³, MA Nanru¹, JIA Huiming¹, YANG Feng¹, HUANG Dahu^{1,2},
ZHANG Minghao¹, YANG Guo³, YANG Yun^{1,2}, MO Tenghuan^{1,2}

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Physics and Technology & Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The reaction kinetics of weakly bound nuclei in the nearbarrier energy region is currently one of the hotspots in nuclear physics research. The quasielastic scattering of the ${}^7\text{Be}+{}^{120}\text{Sn}$ system at 48.05 MeV was measured using a large solid angle covered silicon detector array, and its differential cross section was obtained in combination with Monte Carlo simulations. Based on the optical model, the angular distributions were fitted by the frequentist method and the Bayesian method, respectively. At the forward angles, the two methods give consistent results; at the backward angles, the results of the frequentist method show an obvious oscillatory structure, while the results of the Bayesian method are smooth, with an oscillatory upward trend near 180° .

Key words: energy near the Coulomb barrier; weakly bound nucleus; quasielastic scattering angular distribution; optical model; frequentist approach; bayesian method

Received date: 12 Jan. 2023; Revised date: 29 Jan. 2023

Foundation item: National Key R&D Program of China(2018YFA0404404); National Natural Science Foundation of China(12235020, U2167204, 12175313, 12175314, U1732145, U1867212, 11961131012); Continuous-Support Basic Scientific Research Project; Leading Innovation Project(LC192209000701, LC202309000201); Young Talent Development Foundation(YC212212000101); Basic Scientific Research Program under grant(JCKY2020201C002)

† Corresponding author: YANG Lei, E-mail: yang_lei@ciae.ac.cn; LIN Chengjian, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn