

弱束缚核 ^{17}F 弹性散射角分散*

王琦^{1;1)} 韩建龙^{1,5} 肖志刚¹ 徐珊珊¹ 孙志宇¹ 胡正国^{1,5} 张雪荧^{1,5}
王宏伟¹ 毛瑞士¹ 袁小华^{1,5} 徐治国¹ 赵铁成¹ 张宏斌¹ 徐华根^{1,5}
祁辉荣^{1,5} 王^{1,5} 贾飞^{1,5} 武丽杰^{1,5} 丁先利^{1,5} 高启^{1,5} 高辉^{1,5}
李松林¹ 白真^{1,5} 肖国青¹ 靳根明^{1,2} 任中洲^{2,3}
周善贵⁴ SERGEY Yu-Kun^{6,7}

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

3(南京大学物理系 南京 210008)

4(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

5(中国科学院研究生院 北京 100049)

6(Centro de Ciencias Físicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico)

7(Center for Nonlinear Physics, RSPHysSE, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia)

摘要 在兰州放射性束流线(RIBLL)上完成了 $^{17}\text{O}/^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射微分截面角分布测量. 分析了 $^{17}\text{O}/^{17}\text{F}$ 弹性散射产物的角分散, 即微分截面的对数 $\ln(d\sigma/d\theta)$ 随散射角平方 θ^2 的依赖关系. 结果表明, 在所测量的角度范围内 ($6^\circ-20^\circ$), ^{17}O 的这一依赖关系可以用一条直线很好地拟合, 而 ^{17}F 的这一依赖关系需要两条不同斜率的直线才能拟合. ^{17}F 数据拟合中的这种斜率改变可能起因于 ^{17}F 的奇异结构. 对其他实验组数据的分析支持以上的结论, 即在一定的角度范围内, 弱束缚核与稳定核相比, 弹性散射产物的微分截面与散射角平方的依赖关系有明显的差异, 这可以作为深入研究“晕/皮核”的一个新探针.

关键词 弹性散射 微分截面 角分散 晕核

1 引言

随着一些核物理实验室放射性束流线的建成, 20 世纪 80 年代以来, 对远离 β 稳定线的核的研究吸引了越来越多的科学家的兴趣, 并由此发现了一批具有奇异结构(晕或皮)的核, 例如 ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^8B , $^{26-28}\text{P}^{[1-13]}$ 等. 利用放射性束流线进行的核反应实验得到大量关于奇异核结构的信息. 对于晕核, 通常用核反应总截面的异常增大以及核反应碎片窄的动量分布来判别. 本文通过对 $^{17}\text{O}/^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 弹性散射实验数据的分析, 发现具有晕或皮结构的奇异核的角分散有着不同于稳定核角分散的奇异行为. 而晕/皮核弹性散射角分散的这种奇异行为可以作为新的探针, 用

来鉴别具有奇异结构的弱束缚核.

2 理论模型

在重离子周边碰撞衍射理论的框架下, Strutinsky 提出了一个计算角分散的模型^[14]. 这个模型被广泛应用在核物理实验数据的分析处理中^[15-21]. 根据 Strutinsky 的理论, 在小的散射角度范围内, 微分截面 $(d\sigma/d\theta)$ 有如下表达式:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} \propto e^{-[(\theta-\theta_0)/\xi]^2} + e^{-[(\theta+\theta_0)/\xi]^2}. \quad (1)$$

如果反应产物的角分布是前角成峰的, 即 $\theta_0 = 0$, 那么

* 国家自然科学基金(10675149,10475101,10535010)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn

公式(1)可以简化为

$$\frac{d\sigma}{d\theta} \propto e^{-(\theta/\xi)^2}. \quad (2)$$

从公式(2)可以看到, 微分截面的自然对数 $\ln(d\sigma/d\theta)$ 与散射角的平方 θ^2 之间是正比关系. 实验上直接测量到微分截面 $d\sigma/d\theta$ 和散射角 θ 后, 就可以作出 $\ln(d\sigma/d\theta)$ 与 θ^2 的关系图, 也就是角分散图. 在角分散图中, 用最小二乘法对实验数据进行直线拟合, 直线所对应的斜率就是反应系统所谓的角分散参数 ξ . 根据 Strutinsky 模型, 反应系统的角分散参数 ξ 由量子角分散 ξ_q 和动力学角分散 ξ_r 两部分组成:

$$\xi = (\xi_q^2 + \xi_r^2)^{1/2}. \quad (3)$$

对于弹性散射而言, 动力学角分散可以忽略, 即:

$$\xi = \xi_q. \quad (4)$$

角分散参数 ξ 对于核反应截面的变化很敏感, 而核反应总截面的异常增大是晕核核反应的特点, 所以, 晕核核反应的角分散参数应该与稳定核的角分散参数有差异. 基于这样的考虑, 我们进行了 $^{17}\text{O}/^{17}\text{F}+^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射实验.

3 实验和数据处理

实验是在兰州重离子加速器国家实验室的放射性束流线 (RIBLL)^[22-24] 上完成的. 由兰州重离子研究装置 HIRFL 提供的 70 MeV/A 的 ^{20}Ne 初级束流轰击 3.5 mm 厚的 ^9Be 初级靶, 产生次级放射性束流, 其中的 $^{17}\text{O}/^{17}\text{F}$ 碎片被 RIBLL 选择、分离、纯化并降至合适的能量后传输到 RIBLL 的末端, 打在厚度为 2 mg/cm² 的 ^{208}Pb 靶上. 实验中 ^{17}O 的能量为 128 MeV, ^{17}F 的能量为 141 MeV, 动量分散度 $\Delta P/P = \pm 0.1\%$.

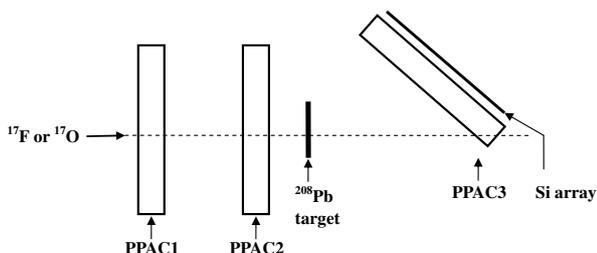


图 1 探测器系统示意图

图 1 为探测器系统示意图, 自行研制的三块平行板雪崩计数器 (PPAC1-PPAC3) 有效面积均为 100 mm × 100 mm, 位置分辨率为 0.5 mm. PPAC1 和 PPAC2 用来确定入射粒子打在 ^{208}Pb 靶上的位置和入射角. PPAC3 用来确定最终 Si 阵列上出射粒子

的散射角, 其对应的角分辨好于 0.2°. Si 探测器阵列由 5 块面积为 45 mm × 45 mm 的 Si 面垒型探测器组成, 其分辨率好于 1%. 由于次级束流的动量分散度为 $\Delta P/P = \pm 0.1\%$, 所以, 探测器系统无法区分 ^{17}F 的第一激发态 (0.4953 MeV) 和 ^{208}Pb 的第一激发态 (2.614 MeV). 在数据处理过程中, 通过飞行时间 TOF 和 Si 阵列上探测到的粒子总能量 E 来对弹散事件进行选择, 然后逐事件分析得到其散射角. 由于 Si 阵列的探测角度为 6°—20°, 我们将每一度划分为一个区域, 共 15 个角度, 并用蒙特卡罗模拟得到每个角度所对应的立体角. 由公式

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{N_{\text{event}}}{N_{\text{in}} N_s d\Omega_\theta} \cdot 2\pi \sin\theta \quad (5)$$

得到每一个角度对应的微分截面. 其中, N_{event} , N_{in} , N_s 和 $d\Omega_\theta$ 分别为出射到 θ 角的粒子数, 入射粒子数, 单位面积上的靶核数以及 θ 角所对应的立体角.

4 实验结果

实验测量分别得到了 128 MeV 的 ^{17}O 和 141 MeV 的 ^{17}F 在 ^{208}Pb 靶上的弹性散射产物从 6° 到 20° 的角分布. 并由此作出了这两种产物的角分散图, 如图 2 所示.

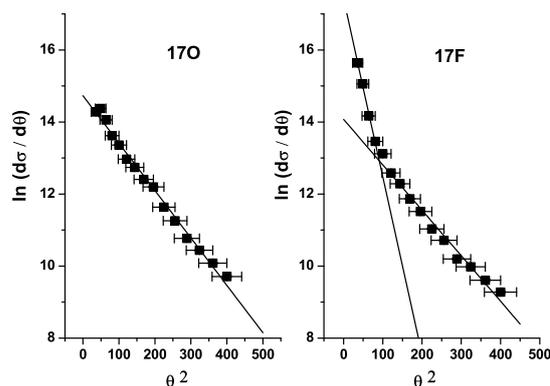


图 2 实验测得的 ^{17}O 和 ^{17}F 的角分散图 $\ln(d\sigma/d\theta)-\theta^2$

^{17}O 和 ^{17}F 的角分散图表现出明显不同的行为. ^{17}O 的角分散用一条直线可以很好地拟合, 而 ^{17}F 的数据则必须用两条斜率不同的直线才能拟合. 我们认为, ^{17}F 角分散的这个行为可能起因于它的晕或皮的奇异结构. 为了检验这一现象是否是奇异核弹性散射角分散的普遍行为, 我们分析了可以得到的一些其他实验小组已经发表的重离子弹性散射实验数据^[25-29], 分别作出了它们的角分散图, 如图 3 所示. 图 3 中, (b), (c), (d), (e) 和 (f) 的数据分别取自参考文献 [25—29]

中显示弹性散射截面的图2、4、4、1和4. 由图3可以看到, 这些重离子弹性散射反应系统的角分散图中均存在拐点, 拐点处散射角 θ_{tu} 与反应系统擦边角 θ_{gr}

的比值, 如表1所列, 晕核 ${}^6\text{He}$ 和晕或皮核 ${}^{17}\text{F}$ 的这一比值在0.2左右, 稳定核 ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^{16}\text{O}$ 的这一比值大约是0.4.

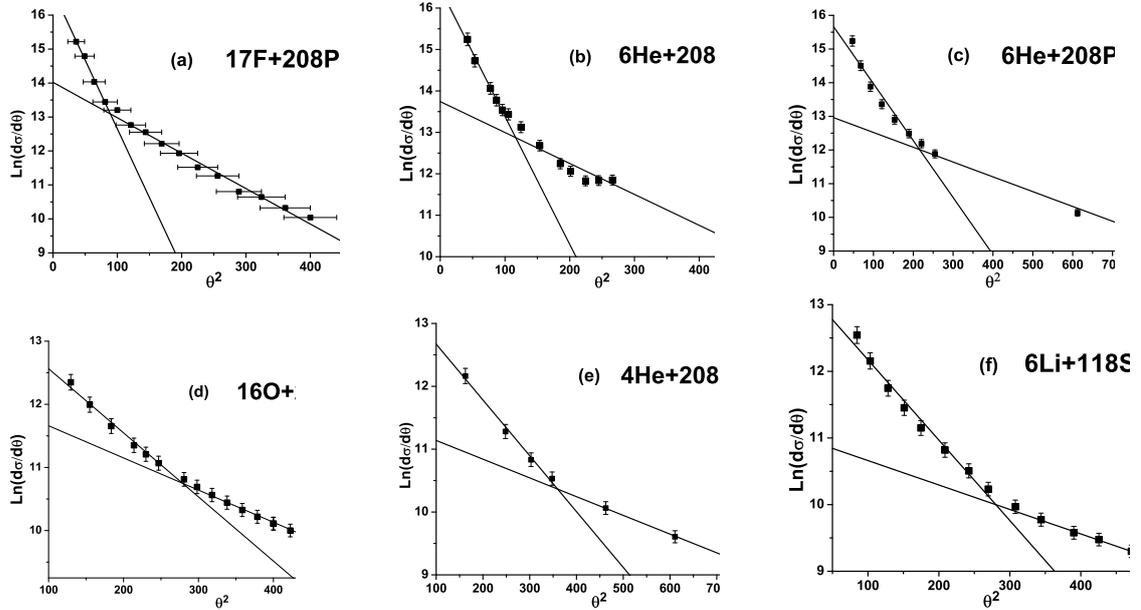


图3 重离子弹性散射角分散

表1 重离子弹性散射角分散图中的拐点角度*

reaction system	E_{lab}	$E_{cm}/V_{coul}^{[a]}$	$\theta_{gr}^{[b]}$	angular range	θ_{tu}	θ_{tu}/θ_{gr}	projectile	Ref.
${}^6\text{He}+{}^{208}\text{Pb}$	29.6	1.4	67°	$> 6^\circ$	11°	0.16	halo	Ref. [25]
${}^6\text{He}+{}^{208}\text{Pb}$	27	1.3	80°	$> 6^\circ$	15°	0.19	halo	Ref. [26]
${}^{17}\text{F}+{}^{208}\text{Pb}$	141	1.5	59°	$6-20^\circ$	12°	0.20	skin/halo	our work
${}^{17}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$	128	1.5	57°	$6-20^\circ$	$> 21^\circ$	> 0.37	stable	our work
${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$	170.1	2.0	38°	$> 11^\circ$	17°	0.45	stable	Ref. [27]
${}^4\text{He}+{}^{208}\text{Pb}$	40	1.9	43°	$> 12^\circ$	19°	0.44	stable	Ref. [28]
${}^6\text{Li}+{}^{118}\text{Sn}$	42	1.9	41°	$> 9^\circ$	17°	0.41	stable	Ref. [29]

*表中1—9列的意义分别为: 核反应系统; 弹核在实验室系的能量, 单位MeV; 弹核在质心系的能量与反应系统库仑位垒的比值; 反应系统在质心系的擦边角 θ_{gr} ; 实验中探测的角度范围; 拐点出现的质心系角度 θ_{tu} ; 拐点角度 θ_{tu} 与擦边角 θ_{gr} 的比值; 弹核的性质; 数据的出处.

^a 库仑位垒的计算方法请参考文献[30].

^b 擦边角的计算没有考虑相对论效应, 参看文献[31].

5 讨论

一般而言, 在重离子弹性散射碰撞中, 核力和库仑力都在起作用. 当弹核距离靶核很远, 即碰撞参数很大时, 由于核力是短程力, 主要是库仑力在起作用. 此时, 出射粒子的偏转函数与库仑势是一致的, 弹散截面近似等于卢瑟福散射截面, 出射粒子的散射角度很小, 其角分散如公式(2)表述, 应该是一条直线, 也就是图3中拐点以前所示的部分. 随着碰撞参数的减小, 核吸引力与库仑排斥力同时起作用, 当这两种作

用力对弹性散射截面的贡献可比拟时, 角分散曲线出现拐点, 这种情况对应的是图3中拐点以后的部分, 此时公式(3)中的动力学角分散 ξ_r 必须被考虑. 这也就是说, 角分散图中, 不同的斜率对应着不同的核反应机制. 正如文献[32]中所指出的那样, 库仑势作用是排斥作用, 而核势作用通常既有吸引力又有排斥力. 在重离子弹性散射反应中, 由于核势的吸引作用, 使得一些具有较小碰撞参数的出射粒子, 有向负角度偏转的趋势. 这时, 碰撞参数与散射角之间不再是一一对应的关系, 而且 θ_{tu} 小于反应系统的擦边角 θ_{gr} . 擦边角标志反应系统核力相互作用的开始, 而角分散图中拐点

出现的角度 θ_{tu} , 或者说 θ_{tu} 与反应系统的擦边角 θ_{gr} 的比值的大小, 同样标志了核力作用的范围, θ_{tu} 越小或 $\theta_{\text{tu}}/\theta_{\text{gr}}$ 的值越小, 表明在弹性散射中核力起作用越早. 这是晕/皮核明显区别于稳定核的一个特点.

6 结语

$^{17}\text{O}/^{17}\text{F}$ 弹性散射的角分散表明, (1) 重离子弹性散射角分散图中出现拐点是一个普遍现象, 这个拐点出现的角度 θ_{tu} 小于反应系统的擦边角 θ_{gr} ; (2) 对于具有晕或皮结构的奇异核而言, 角分散图中拐点出现的角度 θ_{tu} 小于稳定核的这一角度. 对其他实验小组发表的 ^6He , ^4He , $^{16}\text{O}+^{208}\text{Pb}$ 以及 $^6\text{Li}+^{118}\text{Sn}$ 弹散实验数据的分析支持以上结论.

我们实验测得的 ^{17}O 的角分散图中没有出现拐点是因其拐点出现的角度超出了我们的测量范围. 我们的实验中, ^{17}F 和 ^{17}O 核具有几乎相同的核半径, 并且两个反应系统的擦边角也几乎相同, 而 ^{17}F 具有晕或皮的结构, 这说明角分散图中拐点出现的角度对核结构是很敏感的, ^{17}F 角分散图中的拐点角度更小, 可能起因于其大的表面弥散度.

晕核角分散图中在较小的角度范围内出现拐点的现象可以用来作为一个新的探针以鉴别具有晕或皮结构的奇异核.

作者感谢王顺金教授、刘建业研究员、赵恩广研究员、杨亚天教授在本课题研究中给予的帮助和有益的讨论.

参考文献(References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Mittig W et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 1889
- 3 Saint-Laurent M G et al. Z. Phys., 1989, **A332**: 457
- 4 Zhongzhou Ren et al. Phys. Rev., 1996, **C53**: R572
- 5 Brown B A, Hansen P G. Phys. Lett., 1996, **B381**: 391
- 6 Morlock R et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 3837
- 7 Navin A et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 5089
- 8 ZHANG H Y, SHEN W Q, REN Zhong-Zhou et al. Nucl. Phys., 2002, **A707**: 303
- 9 REN Zhong-Zhou, Faessler A, Bobyk A. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2752
- 10 LIN C J, ZHANG H Q, LIU Z H et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 067302
- 11 Warner R E, Kelley J H, Zecher P et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: R1166
- 12 CAI X Z, ZHANG H Y, SHEN W Q et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 024610
- 13 LIU Zu-Hua, RUAN Ming, ZHAO Yao-Lin. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**: 1711
- 14 Strutinsky V M. Phys. Lett., 1973, **B44**: 245
- 15 Abul-magd A Y, Simbel M H. Phys. Lett., 1979, **B83**: 27
- 16 Gobbi A, Nörenberg W, Heavy Ion Collisions. Vol.2. North-Holland:Pub.Co.Amsterdam, 1980, 127—274
- 17 Rosa A De et al. Phys. Rev., 1989, **C40**: 627
- 18 Rosa A De et al. Phys. Rev., 1990, **C41**: 2062
- 19 Rosa A De et al. Phys. Rev., 1991, **C44**: 747
- 20 WANG Qi, DONG Y C, LI S L et al. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**: 1911
- 21 DONG Y C, WANG Q, LI S L et al. HEP & NP, 2005, **29**(12): 147(in Chinese)
(董玉川, 王琦, 李松林等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(12): 147)
- 22 SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y et al. Nucl. Instrum. and Methods, 2003, **A503**: 496
- 23 Ozawa A, CAI Y Z, CHEN Z Q et al. Nucl. Instrum. and Methods, 2006, **B247**: 155
- 24 LI Z H, YE Y L, HUA H et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064327
- 25 Rusek K, Keeley N, Kemper K W et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 041604R
- 26 Kakuee O R, Rahighi J, Sanchez-Benitez et al. Nucl. Phys., 2003, **A728**: 339
- 27 Baker S D, McIntyre J A. Phys. Rev., 1967, **161**: 1200
- 28 Perry R, Nadasen A, Hendrie D L et al. Phys. Rev., 1981, **C24**: 1471
- 29 Zeller A F, Kemper K W, Ophel T R et al. Nucl. Phys., 1978, **A309**: 255
- 30 Huizenga J R. USERDA Progress Report, 1977, **COO-3496-65**: 131
- 31 Marion J B. Nuclear Reaction Analysis. North-Holland: North-Holland Publishing Company, 1968
- 32 Nörenberg W. Heavy Ion Collisions. Vol.2. North-Holland: North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1980, 1-43

Elastic Scattering Angular Dispersion of Weakly Bound Nucleus $^{17}\text{F}^*$

WANG Qi^{1,1)} HAN Jian-Long^{1,5} XIAO Zhi-Gang¹ XU Hu-Shan¹ SUN Zhi-Yu¹ HU Zheng-Guo^{1,5}
 ZHANG Xue-Yin^{1,5} WANG Hong-Wei¹ MAO Rui-Shi¹ YUAN Xiao-Hua^{1,5} XU Zhi-Guo¹
 ZHAO Tie-Cheng¹ ZHANG Hong-Bin¹ XU Hua-Gen^{1,5} QI Hui-Rong^{1,5} WANG Yue^{1,5}
 JIA Fei^{1,5} WU Li-Jie^{1,5} DING Xian-Li^{1,5} GAO Qi^{1,5} GAO Hui^{1,5} LI Song-Lin¹
 BAI Zhen^{1,5} XIAO Guo-Qing¹ JIN Gen-Ming^{1,2} REN Zhong-Zhou^{2,3}
 ZHOU Shan-Gui⁴ SERGEY Yu-Kun^{6,7}

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy-Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

3 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

4 (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

5 (The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

6 (Centro de Ciencias Físicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico)

7 (Center for Nonlinear Physics, RSPHysSE, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia)

Abstract The differential cross-sections for elastic scattering of ^{17}F and ^{17}O on ^{208}Pb have been measured at Radioactive Ion Beam Line at Lanzhou (RIBLL). The variation of the logarithms of differential cross-sections with the square of scattering angles, viz. angular dispersion plot, shows clearly that there exists a turning point in the range of small scattering angles (6° — 20°) for ^{17}F due to its exotic structure, while no turning point was observed for ^{17}O . The experimental results have been compared with previous data of other groups. Systematical analysis on the available data seems to conclude that there is an exotic behavior of elastic scattering angular dispersion of weakly bound nuclei with halo or skin structure as compared with that of the stable nuclei. Therefore the fact that the turning point of the elastic scattering angular dispersion plot appears at small angle for weakly bound nuclei can be used as a new probe to investigate the halo and skin phenomenon.

Key words elastic scattering, differential cross-section, angular dispersion, halo nuclei

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10475101, 10535010) and National Major State Basic Research and Development Programme of China (G2000077400)

1) E-mail: wangqi@impcas.ac.cn