

^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子的弹性散射角分布*

卢朝晖 吴和宇 胡荣江 诸永泰 张保国 李祖玉 魏志勇
段利敏 王宏伟 肖志刚 王素芳 靳根明 郭忠言
肖国青 朱海东 柳永英 陈克良

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

陈陶 李湘庆 李智焕

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 采用逆运动学方法对放射性核束 ^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子进行弹性散射实验,得到了实验测量微分截面.用较准确描述放射性核素性质的CH89参数化的光学势为初始光学势,用扭曲波玻恩近似的理论计算程序DWUCK4和自动参数搜索程序ABOD对实验数据进行光学势参数理论拟合,得到了与实验数据相符合的光学势参数.将得到的光学势参数进行分析,得到了 ^{17}F 和 ^{18}Ne 实势相互作用均方根半径分别为3.239fm和3.317fm.

关键词 放射性核束 弹性散射 光学势

1 引言

1985年Tanihata等^[1]在劳伦兹贝克莱实验室对已知的 $^6\text{-}^{11}\text{Li}$ 同位素, ^7Be , ^9Be 和 ^{10}Be 以790MeV/u能量与Be,C,Al的相互作用截面进行了测量.通过Glauber-type计算相互作用截面得到这些同位素及氦同位素的均方根半径.第一次测量到同量异位素(^6He - ^6Li , ^8He - ^8Li 和 ^9Li - ^9Be)的半径有较大差异,而 ^{11}Li 有特大的核半径.这说明可能有大的形变或物质分布有一长尾. ^6He 和 ^{11}Li 被证明有一外延的中子分布,称中子晕或中子皮^[2].因此,对奇异核的研究成为核物理研究的一个主要方向,并在实验和理论上都已取得重大进展.

Korshennikov等人用 $E \approx 65\text{--}75\text{MeV/u}$ 的奇异核测量了 $^{11}\text{Li} + \text{p}$, $^8\text{He} + \text{p}$, $^6\text{He} + \text{p}$, $^3\text{H} + \text{p}$ 和 $^{14}\text{Be} + \text{p}$ 的弹性与非弹性截面^[3],并对这些核的基态和激发态进行了研究.对 ^6He , ^8He , ^{11}Li 与质子散射的数据^[3,4]作对比分析表明:质子与 ^6He 和 ^8He 的价核子有相互

2001-07-04 收稿

* 中国科学院百人计划基金,国家自然科学基金(10175081)和国家自然科学基金重点项目(19735010)资助

作用行为,而与 ^{11}Li 的价核子没有相互作用.反映了皮与晕的不同性质.

Kelly等人对 39MeV/u 的 ^{38}S 与质子的弹性散射和非弹性散射截面角分布进行了测量^[5].将光学势和折叠模型计算与弹性散射进行了分析比较.用耦合道模型计算, 2_1^+ 态的 β_2 值为 0.35 ± 0.04 ,与库仑激发测量比较,得到中子与质子多极跃迁矩阵元比率 $M_n/M_p = (1.5 \pm 0.3)N/Z$,显示了 ^{38}S 的 2_1^+ 态的同位旋矢量分布.这表明可以认为 ^{38}S 由核心 ^{36}S 和两个价中子组成.进而研究更丰中子核区是否有类似的性质是很有意义的,因这时中子皮效应可能更大.而在丰质子核这一侧,人们曾预言质子晕核质子皮的存在.至今对这些核性质的研究还进行得很少.

本文对丰质子核性质的实验研究是在兰州放射性束流装置(RIBLL)上用 ^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子的弹性散射进行的.采用逆运动学方法,放射性核束 ^{17}F 和 ^{18}Ne 轰击靶 $(\text{CH}_2)_n$,测量反冲质子的角分布,用CH89参数化的光学势为初始光学势对实验数据进行理论拟合,得到了与实验测量数据相符合的光学势参数.将得到的光学势参数进行折叠模型分析来研究 ^{17}F 和 ^{18}Ne 的性质.这将对丰质子核的结构的认识有参考价值.

2 实验情况介绍

实验是在中国科学院近代物理研究所的RIBLL上进行的,实验选用束流强度为 80nA ,能量为 45MeV/u 的 ^{20}Ne 束与 1mm 厚的 ^9Be 初级靶反应,通过 $500\mu\text{m}$ 厚 ^{27}Al 降能片筛选,得到束流强度约为 6000ions/s ,其中 ^{18}Ne , ^{17}F 和 ^{16}O 分别占 32% , 47% 和 11% ,能量约 20MeV/u .实验所使用的靶为聚乙烯 $(\text{CH}_2)_n$,厚为 $60\mu\text{m}$.为了减小靶中反冲质子的吸收和选定合适的探测区域,将靶偏转 10° ,则实际 He 靶厚为 0.8mg/cm^2 .

束流及探测器布局情况如图1所示.由平行板雪崩室PPAC1和PPAC2给出入射粒子的位置信息,PPAC3给出出射粒子的位置,其后的Plastic+CsI用来进行监测束流.1#,2#,3#,4#是由位置灵敏半导体探测器(PSSD)和大面积硅组成的望远镜;5#是由PSSD和CsI(面积为 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$,用 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的光二极管引出信号)组成的望远镜.

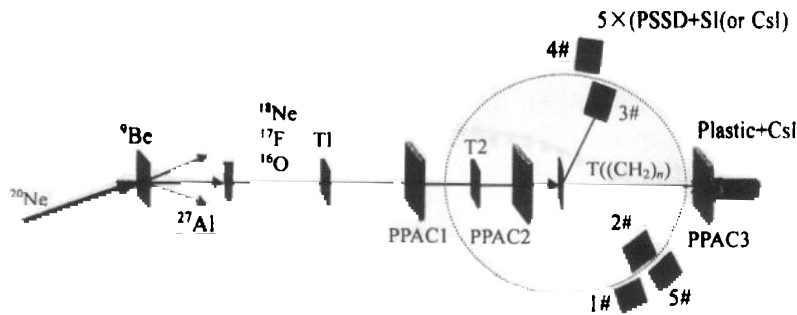


图1 束流与探测器布局图

PPAC1与PPAC2的距离为 1142.5mm ,PPAC2与PPAC3距离为 524mm ,靶心离PPAC2的距离为 274mm .用于测量飞行时间的闪烁体探测器T1和T2之间的距离为 1737.3cm .

PSSD1 的中心位于 79° , 覆盖角度范围为 $86^\circ-72^\circ$. PSSD2 的中心位于 68° , 覆盖角度范围为 $75^\circ-61^\circ$. PSSD3 的中心位于 52.2° , 覆盖角度范围为 $59.2^\circ-45.2^\circ$. PSSD4 的中心位于 64° , 覆盖角度范围为 $71^\circ-57^\circ$. PSSD5 的中心位于 60° , 覆盖角度范围为 $67^\circ-53^\circ$. 所有 PSSD 中心离靶心的距离均为 18cm.

3 实验数据处理

根据放射性核束经过相同的飞行路径和磁场的条件, 采用放射性核束粒子的不同飞行时间来确定放射性核素的种类, 如图 2 所示, 其相应的能量为 $E_{Nc} = 17.7\text{MeV/u}$, $E_F = 16.0\text{MeV/u}$, $E_0 = 14.1\text{MeV/u}$.

实验中, 由入射粒子在 PPAC1 和 PPAC2 上的位置可以确定其入射方向, 由此方向可以确定入射粒子在靶上的散射点, 再由 PSSD 上所测得的反冲质子的位置就可以确定反冲质子的散射方向. 放射性核束轰击 $(\text{CH}_2)_n$ 靶后, 出射的粒子中有反冲质子和反冲碳核, 散射后反冲质子和反冲碳核都可能入射到 PSSD 上. 根据运动学原理由事件中弹核方向改变的大小来鉴别质子和反冲碳核事件. 采用逐个事件的方法对事件的几何探测效率进行归一化修正^[6]. 对事件鉴别和实验角分布归一化后, 将实验数据转换到质心系, 再根据入射放射性弹核数、单位面积靶核数和事件数, 分别得到 ^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子弹性散射角分布, 即 ^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子弹性散射微分截面, 如图 3 所示. 图中的误差包括了统计误差和修正方法引入的误差.

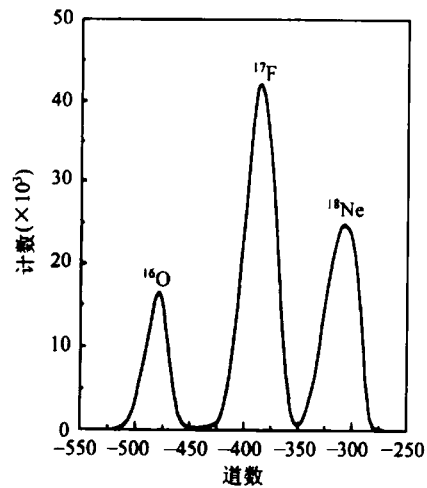


图 2 飞行时间谱(T2-T1)

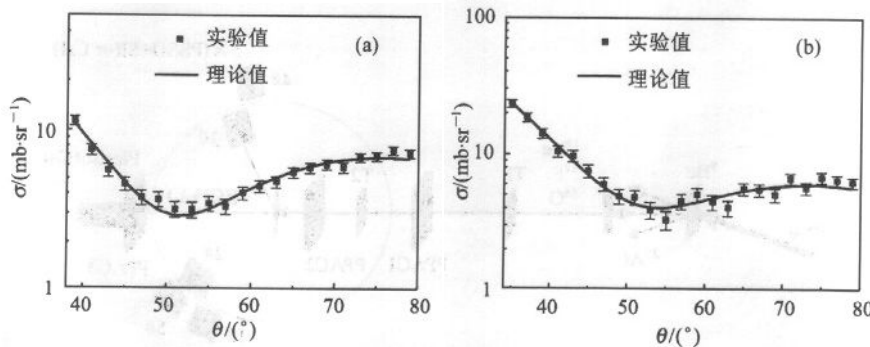


图 3 ^{17}F 和 ^{18}Ne 与质子弹性散射角分布的光学势拟合

4 实验数据的光学势参数理论拟合

将实验测量得到的弹性散射微分截面数据进行理论计算拟合,得到描述反应过程的光学势.用采用零程相互作用的扭曲波玻恩近似的理论计算程序 DWUCK4,较准确描述奇异核性质的 CH89 参数化^[7]的光学势为理论计算的初始化参数,用实验数据跟理论结果之差与实验误差的比值的平方取最小值的方法,将理论计算的结果跟实验结果进行比较.根据二者之间的差异,调整光学势参数得到跟实验数据相符合的光学势参数.在光学势参数搜索之前对光学势参数的敏感性进行分析,确定光学势参数搜索的顺序.在光学势参数的调整过程中,采用跟各光学势参数相关联的参数搜索程序 ABOD^[8]进行参数自动搜索,保证了参数搜索的准确性.对¹⁷F和¹⁸Ne与质子散射的实验数据进行了光学势拟合,得到¹⁷F和¹⁸Ne与质子散射的光学势.理论计算与实验数据拟合的结果如图3所示.

通过对 16.1MeV/u ¹⁷F 和 17.7MeV/u ¹⁸Ne 与质子弹性散射实验的理论拟合,得到的光学势参数列在表1中.

表1 实验数据理论拟合光学势参数结果

	¹⁷ F + P	¹⁸ Ne + P		¹⁷ F + P	¹⁸ Ne + P
V_r/MeV	54.28	52.24	a_{SO}/fm	0.732	0.783
R_r/fm	1.161	1.112	V_i/MeV	7.344	6.892
a_r/fm	0.610	0.640	R_i/fm	1.315	1.287
V_{SO}/MeV	15.36	17.63	a_i/fm	0.498	0.479
R_{SO}/fm	1.231	1.271	R_{CO}/fm	1.509	1.547

5 分析讨论

5.1 光学势径向分布

由于理论拟合时,计算程序 DWUCK4 采用的实势形式为 Woods-Saxon 形式,即

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp[(r - R_r A^{1/3})/a]},$$

则实势为

$$V(r) = V_r f(r) = V_r \frac{1}{1 + \exp[(r - R_r A^{1/3})/a]}$$

根据得到的光学势参数,光学势径向分布如图4所示.

计算程序 DWUCK4 采用的自旋轨道耦合势形式为

$$V_i(r) = -V_i \frac{1}{r} g(x_i); \quad g(x) = \frac{df(x)}{dx},$$

即

$$V_i(r) = V_i \frac{1}{r} \frac{\frac{1}{a} \exp[(r - R_{\text{SO}} A^{1/3})/a]}{\{1 + \exp[(r - R_{\text{SO}} A^{1/3})/a]\}^2}.$$

所得到的自旋轨道耦合势径向分布如图 5 所示。

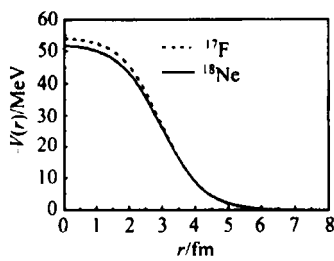


图 4 实势径向分布

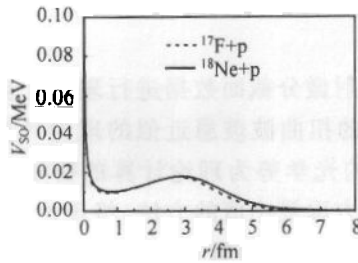


图 5 自旋轨道耦合势径向分布

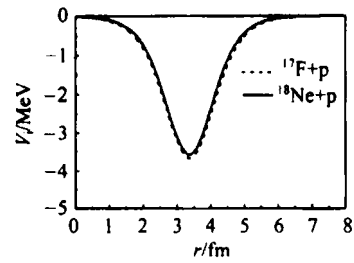


图 6 表面虚势径向分布

计算程序 DWUCK4 采用的表面虚势形式为

$$V_i(r) = V_i g(x_i); g(x) = \frac{df(x)}{dx},$$

即

$$V_i(r) = V_i \frac{-\frac{1}{a} \exp[(r - R_{so} A^{1/3})/a]}{\{1 + \exp[(r - R_i)/a]\}},$$

虚势径向分布如图 6 所示。

5.2 光学势折叠模型分析

原子核的大小与核势阱的形状和核物质的密度分布密切相关,常用均方根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 来表示原子核的大小.重离子弹性散射的主要贡献来自光学势的尾部,同时中子和质子分布密度的差别可提供与同位旋相关的核性质.对中子晕核的研究表明,它们的均方根半径要比按经典的 $A^{1/3}$ 规律得到的均方根半径大^[1].但是对很丰质子的核是否是同样的情况,还缺乏足够的实验证据.

从作用势的体积分可分别得到¹⁷F 和¹⁸Ne 的实势和自旋轨道耦合势的均方根半径为

$$\langle r^2 \rangle_{rF}^{1/2} = 3.239(\text{fm}) = 1.26 \cdot A^{1/3}(\text{fm}), \quad \langle r^2 \rangle_{rNe}^{1/2} = 3.317(\text{fm}) = 1.27 \cdot A^{1/3}(\text{fm});$$

$$\langle r^2 \rangle_{soF}^{1/2} = 4.718(\text{fm}) = 1.83 \cdot A^{1/3}(\text{fm}), \quad \langle r^2 \rangle_{soNe}^{1/2} = 4.978(\text{fm}) = 1.89 \cdot A^{1/3}(\text{fm}).$$

¹⁷F 和¹⁸Ne 核位于外层的价质子有一定的布居几率,而自旋轨道耦合势的均方根半径的增加主要来自这些价质子的贡献与相对论平均场的理论计算结果^[9]是相符的.但¹⁷F 和¹⁸Ne 是否是质子晕核还需要做进一步的研究.

6 结论

用放射性核束¹⁷F 和¹⁸Ne 与质子进行弹性散射实验,得到了实验测量微分截面,将实验数据进行光学势参数理论拟合,得到了跟实验数据相符合的光学势.弹性散射反映核表面的相互作用行为,它描述了核表面某一作用区域的性质,得到的光学势参数反映了核表面这一作用区域的相互作用特性.这将对¹⁷F 和¹⁸Ne 的表面相互作用特性和核的宏观

性质的描述提供实验基础.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2627
- 2 Hansen P G, Johnson B. Euro. Phys. Lett., 1987, **4**:409
- 3 Korshennikov A A et al. Nucl. Phys., 1997, **A616**:189
- 4 Neumaier S et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**:799c
- 5 Kelley J H et al. Phys. Rev., 1997, **C56**:R1706
- 6 LU Zhao-Hui, WU He-Yu, ZHU Yong-Tai et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, **23**(3): 161(in Chinese)
(卢朝晖,吴和宇,诸永泰等.核电子学与探测技术,2001,**23**(3):161)
- 7 Varner R L et al. Phys. Rep., 1991, **201**(2):57
- 8 Smith W R, Search subroutine. Comp. Phys. Commun, 1969, **1**:135
- 9 Kitching P et al. Nucl. Phys., 1980, **A430**:423

Angular Distribution of Elastic Scattering of ^{17}F and ^{18}Ne on Proton

LU Zhao-Hui WU He-Yu HU Rong-Jiang ZHU Yong-Tai ZHANG Bao-Guo LI Zu-Yu
WEI Zhi-Yong DUAN Li-Min WANG Hong-Wei XIAO Zhi-Gang
WANG Su-Fang JIN Gen-Ming GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing
ZHU Hai-Dong LIU Yong-Ying CHEN Ke-Liang

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

CHEN Tao LI Xiang-Qing LI Zhi-Huan

(Department of Technical Physics, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract Under reverse kinematics, elastic scattering of ^{17}F and ^{18}Ne on proton is studied. The experimental differential cross sections were measured. A kind of global optical potential with the CH89 parameters is used to describe the radioactive nucleus as an initial optical potential parameters. The experimental differential cross section data are analyzed by using the theoretical calculation code DWUCK4 with the distorted-wave Born approximation and parameter search subroutine ABOD which automatically searches the suitable parameters. Then the optical potential parameters of scattering ^{17}F and ^{18}Ne on proton are obtained. From the analyses of the optimized parameters, the real central potential mean-square radii of ^{17}F and ^{18}Ne , 3.239fm and 3.317fm are deduced, respectively.

Key words radioactive beam, elastic scattering, optical potential

Received 4 July 2001

* Supported by 100 Talent Program of CAS, NSFC (10175081), and Key Project of National Natural Science Foundation of China (19735010)