

F 同位素的反应总截面测量和¹⁷F 可能的质子皮结构*

张虎勇^{1;1)} 沈文庆^{1,2} 马余刚¹ 蔡翔舟¹ 方德清¹ 钟晨¹
余礼平¹ 詹文龙³ 郭忠言³ 肖国青³ 王建松³ 王金川³
李加兴³ 王猛³ 王建峰³ 宁振江³ 王全进³ 陈志强³

1 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2 (宁波大学物理系 宁波 315211)

3 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 应用透射法对中能区 F 同位素与 C 靶的反应总截面进行了测量, 发现¹⁷F 的反应总截面比其邻近同位素的反应总截面稍有增强. 用 Glauber 模型和 BUU 模型对 F 同位素进行了差异因子 d 的分析. ¹⁷F 的差异因子 d 比其附近同位素稍有增强. 分析结果表明¹⁷F 可能存在质子皮结构.

关键词 透射法 反应总截面 质子皮

1 引言

核反应总截面 σ_R 是核反应研究中的一个基本物理量, 它可以向人们提供关于原子核之间相互作用和原子核大小以及有关核反应、核结构、核内核子分布的一些基本而又重要的消息. 实际上, 中子晕就是通过测量放射性奇异核束流引起的反应总截面时被发现的^[1]. 因此, 奇异核诱发的反应总截面的测量对于原子核的晕或皮的奇异结构的认识提供了一条有效的途径, 它对于核子分布密度和核子均方根半径的研究同样是一个直接、有效的方法. 对许多反应系统曾测量过在不同能量下的弹性散射截面, 并通过光学模型提取了反应总截面和相互作用半径. 反应总截面无论在实验上还是在理论上都有十分广泛的研究空间^[1-8].

随着研究的进展, 人们对奇异结构核的研究也从丰中子核扩展到丰质子核区域. 最近相对论平均场 (RMF) 和 Hatree-Fork-Bogliubov (RHB)^[9] 理论计算预言, 许多不稳定的丰

2001-04-04 收稿

* 国家重点基础研究发展规划 (G200077400), 国家杰出青年基金 (19725521), 国家自然科学基金 (19705012), 上海市科技启明星计划 (97QA14038) 和中国科学院院长基金共同资助

1) E-mail: zhanghy@sinr.ac.cn

中子核或丰质子核都可能具有中子皮、中子晕或质子皮、质子晕结构。因此,通过核反应总截面的测量来研究丰中子核和丰质子核是否存在中子晕、中子皮、质子晕、质子皮的特征成了人们非常感兴趣的课题。R. Morlock 等^[10]使用非相对论的平均场理论对 ^{17}F 进行了研究,发现 ^{17}F 的第一激发态是质子晕核,并且给出了 ^{17}F 基态和第一激发态的均方根半径分别为 3.698 和 5.333fm。为了提取核半径,通常人们用相互作用截面测量、碎裂产物动量分布、电四极矩测量及弹性散射角分布等不同的实验方法,而核反应总截面的测量是最基本、最常用的方法。

本文采用透射法对丰质子核 ^{17}F 及其它 F 同位素与 C 靶在中能区的反应总截面进行了测量,并且对于测得的反应总截面,结合 Glauber 模型和 BUU 模型进行差异因子 d 的分析。实验结果表明 ^{17}F 可能有质子皮结构。

2 实验装置

实验是在中国科学院近代物理研究所重离子加速器 (HIRFL) 的放射性束流线 (RIBLL) 上开展的,用 69MeV/u 的 ^{36}Ar 轰击 $\text{Ni}(92.3\text{mg}/\text{cm}^2)$ 的初级靶产生的放射性束流再

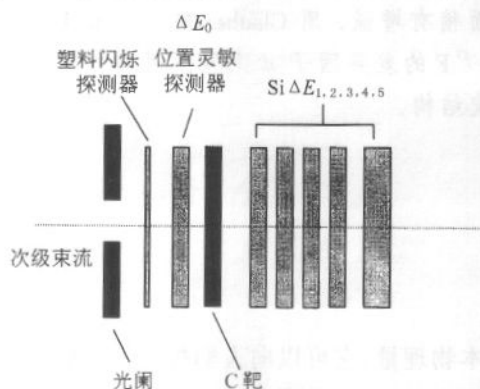


图 1 实验探测器布局

轰击次级 C 靶。反应总截面测量的探测器如图 1 所示,图中最前面的光阑是为了限制束流的发散度,快速塑料闪烁探测器与束流线前方 16.8m 处的另一快速塑料闪烁探测器组合测量靶前粒子的飞行时间,靶前的 ΔE 探测器是 $150\mu\text{m}$ 的金-硅面垒半导体探测器。由于有足够长的飞行时间 (TOF),靶前的粒子由 TOF 和 ΔE 就可以很好地鉴别。靶后的粒子鉴别系统是由 5 个金-硅面垒半导体探测器组成。靶后的出射粒子通过能量损失 (ΔE) 和总能量 E 方法来鉴别。每个探测器给出一个能损或剩余能量信息,求和可以给出产物的总能量。靶后 5 个探测器的厚度分别为 150, 150, 700, 700 和 $2000\mu\text{m}$,它们的分辨率不低于 1.8%。每个探测器之间的距离很近,而且靶室处于很好的真空状态,因而可以不用考虑粒子在探测器间隙之间运动所受到的影响。实验中用的靶 ^{12}C 的厚度为 $109.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

3 实验数据分析

实验数据分析的方法与文献[8, 11, 12]相一致。靶后的能量沉积谱用于提取经过靶后没有发生反应的粒子,具体见文献[11]。 ^{17}F , ^{18}F , ^{19}F , ^{20}F 和 ^{21}F 进入到 C 靶中间位置时不同的同位素具有不同的能量,它们的能量范围为 16—33MeV/u。反应截面的误差包括统计误差。为了比较的一致性,我们对于在不同能量下的 ^{17}F , ^{18}F , ^{19}F , ^{20}F 和 ^{21}F 同位素的反应总截面值使用参数化公式^[7]转化成 30MeV/u 能量点时的反应总截面值。这个转换造成的截

面变化小于 5%。公式中的半径参数通过拟合测量到的反应总截面可以被确定下来, 然后用此半径来计算 30 MeV/u 时的反应总截面的值, 计算结果见图 2。从图中可以清楚地看到, ^{17}F 的反应总截面与 $^{18-21}\text{F}$ 同位素相比较显得稍微大了一点。图中的虚线是用下述公式计算得到的反应总截面,

$$\sigma_R = \pi [r_0 A^{1/3} + R_1(^{12}\text{C})]^2,$$

这里 $R_1(^{12}\text{C})$ 是 ^{12}C 相互作用半径, 取 fm, r_0

取 fm, 此公式通常使用于计算相对论能量下的相互作用截面^[1,2], 但是也能够粗略地对中能区的反应总截面进行估算。通常稳定的核遵循 $A^{1/3}$ 规律, 不稳定的核会偏离此规律。 ^{18}F , ^{19}F , ^{20}F 和 ^{21}F 同位素的反应总截面值比较接近于此虚线, 而 ^{17}F 的反应总截面值相对于虚线就显得有所增加, 增加达 8%。从而我们认为 ^{18}F , ^{19}F , ^{20}F 和 ^{21}F 同位素是稳定的元素, 而 ^{17}F 可能会是有奇异结构的核。

用测量到的反应总截面, 在 Glauber 模型中运用光学极限近似的方法能够提取奇异核的大小以及物质密度分布^[13-15]。Ozawa 等^[3,16] 运用光学极限近似的 Glauber 模型, 对相对论能量下的反应总截面与在中能下的反应总截面之间的区别做了比较。计算反应总截面的激发函数采用的是 HO-type 密度分布。HO-type 的密度分布的宽度是唯一的参数, 可通过拟合相对论能量下的反应总截面得到。但是用该参数的 Glauber 模型通常低估中能情况下的反应总截面值。为了能够定性地对实验测到的数据进行讨论, 采用差异因子 d 来进行讨论, d 被定义为

$$d = \frac{\sigma_R(\text{exp}) - \sigma_R(\text{cal})}{\sigma_R(\text{cal})},$$

其中, $\sigma_R(\text{exp})$ 是中能区的实验的反应总截面值, 而 $\sigma_R(\text{cal})$ 是势参数用拟合同一反应在相

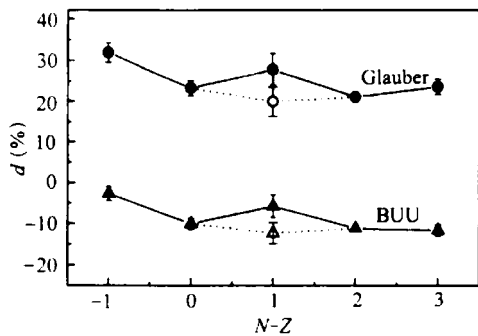


图 3 F 同位素的差异因子 d 随 $(N - Z)$ 的变化 $\sigma_R(\text{cal})$ 是通过 BUU 模型计算得到的。可以发现用 BUU 模型得到的差异因子 d 比用 Glauber 模型得到的有明显的下降, 也就是说用 BUU 模型把高能实验数据点外推到中能实验数据与实验值比较接近, 而 Glauber 模型就显得差了一点, 图 3 中的实心圆点是使用 Glauber 模型得到的差异因子, 而实心三角是使用 BUU 模型得到的差异因子。但是两种不同模型外推到中能情况下得到的差异因子的趋

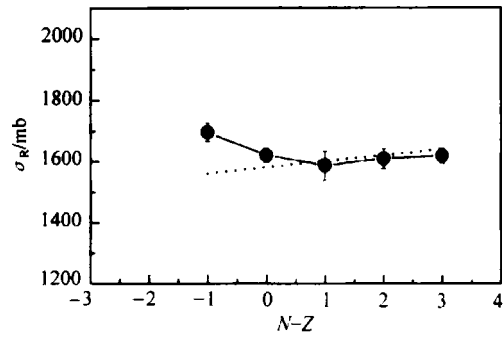


图 2 F 同位素的反应总截面随 $(N - Z)$ 的变化

势是一致的,也就是说两种模型对于实验数据分析的结果并不相互矛盾.

从两种不同模型对于差异因子的分析中,我们可以看到 ^{17}F 相对于其它同位素有一定的增加,但它的差异因子的增加与晕核的差异因子的增加相比显得比较小.用 Glauber 模型计算得到的晕核的差异因子 d 的大小为一般在 40%—50% 左右,而用 BUU 模型得到的晕核的差异因子 d 的大小一般为 10%—20% 左右.显然 ^{17}F 是质子晕核结构的可能性就显得比较小.图 3 中 ^{19}F 与邻近核相比也略有增高,对此我们进行了进一步深入的研究.我们用 ^{18}F 和 ^{20}F 同位素相对论能区实验的反应总截面来推 ^{19}F 同位素的反应总截面,再计算 ^{19}F 的 d .在图中分别用空心圆点和空心三角来表示 Glauber 模型和 BUU 模型的计算结果.显然这个结果比直接用 ^{19}F 相对论能量下实验数据得到的 d 值要小. ^{19}F 在相对论能量下的实验数据可能存在一定的误差^[17],导致图 3 中 ^{19}F 的差异因子有所增强,对 ^{18}F 和 ^{20}F ,直接用相对论实验截面计算的 d 和用临近元素相对论实验截面推出的 ^{18}F 和 ^{20}F 截面计算的 d 是很接近的.而 Glauber 模型和 BUU 模型得到的结果也是一致的,这说明 ^{19}F 增强的现象不是由于不同模型所造成的,可能是 ^{19}F 在相对论下的实验数据误差造成的^[17].

由于 ^{17}F 同位素最外层的一个质子的分离能很小,仅仅只有 0.6MeV,文献[10,18,19]已经进行了研究.理论上的计算表明 ^{17}F 同位素是具有奇异结构的核,可能是质子皮核.文献[10,19]通过实验测量表明 ^{17}F 的第一激发态(最外一个质子处于 $2s_{1/2}$ 态,分离能为 127.63MeV)是质子晕激发态,在 $\left(\frac{1}{2}\right)^+$ 的束缚态的质子晕的均方根半径为 5.5fm^[10],而 ^{16}O 核心的均方根半径大约为 2.6fm,同时文献[19]还预言, ^{17}F 基态的最外一个质子处于 $1d_{5/2}$ 态,不能形成质子晕态,但可能形成质子皮态,如果最外一个质子处于 $2s_{1/2}$ 态,则可能形成质子晕态.我们的实验测量了 ^{17}F 的反应总截面,从实验上证明 ^{17}F 基态可能有质子皮结构.由于 ^{17}F 基态和激发态表现出丰富的特殊结构现象,对 ^{17}F 进行更深入一步的研究可能是很有意义的.

4 结论

对中能区 $^{17-21}\text{F}$ 的反应总截面进行了测量,发现 ^{17}F 的反应总截面相对于 ^{18}F , ^{19}F , ^{20}F 和 ^{21}F 来说稍微有所增强.用 Glauber 模型和 BUU 模型对 $^{17-21}\text{F}$ 的差异因子 d 进行了进一步地分析,同样发现 ^{17}F 的差异因子与 $^{18-21}\text{F}$ 相比有所增强. ^{17}F 核素最外层的一个质子的分离能很小,只有 0.6MeV 左右.从以上的分析表明 ^{17}F 可能存在质子皮结构.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676—2679
- 2 Tanihata I et al. Phys. Lett., 1992, **B289**:261—266
- 3 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 1996, **A608**:63—76
- 4 Tanihata I et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:380—384
- 5 Mitting W et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**:889—892
- 6 Warner R E et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:R1166—R1169

- 7 SHEN W Q et al. Nucl. Phys., 1989, **A491**:130—146
- 8 Warner R E et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1700—1709
- 9 ZHU Z Y et al. Phys. Lett., 1994, **B328**:1—4
- 10 Morlock R et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:3837—3840
- 11 FANG D Q et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:064311(1—5)
- 12 FANG D Q et al. Chin. Phys. Lett., 2000, **17**:655—657
- 13 Fukuda M et al. Phys. Lett., 1991, **B268**:339—344
- 14 Bertsch G F, Gupta S Das. Phys. Rep., 1998, **160**:189—233
- 15 Bertsch G F et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:1154—1162
- 16 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**:3241—3250
- 17 Ozawa A, Bochkarevb O, Chulkov L et al. 2000, RIKEN-AF-376
- 18 Ozawa A et al. Phys. Lett., 1994, **B334**:18—22
- 19 REN Z Z et al. Phys. Rev. 1998, **C57**:2752—2755

Measurements of Reaction Cross Section for F Isotopes and Possible Proton Skin Structure for ¹⁷F*

ZHANG Hu-Yong^{1,1)} SHEN Wen-Qing^{1,2} MA Yu-Gang¹ CAI Xiang-Zhou¹ FANG De-Qing¹
ZHONG Chen¹ YU Li-Ping¹ ZHAN Wen-Long³ GUO Zhong-Yan³ XIAO Guo-Qing³
WANG Jian-Song³ WANG Jin-Chuan³ LI Jia-Xing³ WANG Meng³ WANG Jian-Feng³
NING Zhen-Jiang³ WANG Quan-Jin³ CHEN Zhi-Qiang³

1 (Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2 (Physical Department of Ningbo University, Zhejiang Ningbo 315211, China)

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

Abstract The reaction cross sections σ_R of F isotopes on carbon target were measured at intermediate energies via the transmission method. It was found that the reaction cross section of ¹⁷F has a little enhancement compared with that of its neighbor isotopes. The difference factor d has been deduced from the measured σ_R by using the BUU model and Glauber model. It is enhanced also for ¹⁷F compared with its neighbor isotopes. From the above analysis, a possible proton skin structure is suggested for ¹⁷F.

Key words transmission method, reaction cross section, proton skin

Received 4 April 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G200077400), National Natural Sciences Funds for Distinguished Young Scholar (19725521), the National Natural Foundation of China (19705012), Shanghai Science and Technology Development Funds (97QA14038) and Special Foundation of President of The Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: zhanghy@sinr.ac.cn