

文章编号: 1007-4627(2004)04-0266-05

$^{27,28}\text{P} + ^{28}\text{Si}$ 总反应截面增强及可能相关的机制*

刘祖华, 阮明, 赵跃林, 张焕乔¹⁾, 杨峰, 马中玉, 林承键, 陈宝秋, 吴岳伟

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

詹文龙, 郭忠言, 肖国青, 徐瑚珊, 孙志宇, 李加兴, 陈志强

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 测量了 $^{27,28}\text{P}$ 和相应同中子异位素在 ^{28}Si 靶上的中能反应截面. 测得 $N=12$ 和 13 同中子异位素的反应截面在 $Z=15$ 处突然增大. 对 $Z\leq 14$ 同中子异位素和 ^{28}P 的实验数据结果可以用改进的光学极限近似的 Glauber 理论很好地描述. ^{28}P 的反应截面能够用扩大核芯以改进的 Glauber 理论来解释. 但是, 用改进光学极限和少体近似的 Glauber 理论却低估了 ^{27}P 的实验数据. 理论分析表明, 扩大的核芯加质子晕可能是响应 $^{27}\text{P} + ^{28}\text{Si}$ 反应截面增强的机制.

关键词: 反应截面; Glauber 理论; 质子晕; 扩大的核芯

中图分类号: O571 **文献标识码:** A

1 引言

在质子滴线附近探寻质子晕核是当前核物理研究中感兴趣的课题之一. 实验上探寻质子晕核比中子晕核更为困难, 因为前者存在库仑位垒的限制, 妨碍了质子晕的形成. 目前 ^8B 质子晕^[1-7]是较肯定的, 但在许多实验中仍有矛盾的结论. 近年来, Navin 等^[8]采用退激 γ 射线与弹核碎片符合测量了 $^{26,27,28}\text{P}$ 的质子晕结构, 揭示了 $\pi_{s1/2}$ 轨道起重要作用, 证实了理论上的预言^[9-11]. 但是, 最近在 $^{27,28}\text{P} + ^{12}\text{C}$ 中能反应截面测量^[12]中没有观测到 ^{28}P 的质子晕. 因此, 实验上重新研究 ^{28}P 是否存在质子晕是必要的. 此外, 最近 Ozawa 等^[13]在研究 N, O, F 同位素中揭示出在 $N=15$ 处相互作用截面 σ_R 突然上升, 在“核芯加晕中子”模型中以价中子具有 100% s 波概率计算仍低估了截面, 因此, 提出这些核中核芯变更^[14]. Kanungo 等^[15]对 72 MeV/u ^{23}O 与 C 靶反应测量 1 中子和 2 中子迁移碎片的纵向动量分布, 结果表明近中子滴线的核芯 ^{22}O 结构发生变更. 我们在 sd 壳核中出现这种新

型异常和加上 ^{28}P 质子晕的不同实验结果推动下, 开展了 $N=12$ 和 13 同中子异位素与 ^{28}Si 靶反应的截面测量, 特别是注意 $Z=15$ 的 $^{27,28}\text{P}$, 考察它们的核芯有否变更.

2 实验方法

实验是在中科院近代物理研究所的 HIRLF-RIBLL 上完成的. $^{27,28}\text{P}$ 和相应的同中子异位素的次级束是用 69 MeV/u ^{36}Ar 初级束轰击 Be 靶由弹核碎裂产生的. Be 靶厚度为 98.8 mg/cm², 次级束的同位素经 RIBLL 分离和选择. 实验中采用楔形降能片改善次级束的动量分辨和纯度. 在 RIBLL 的第一和第二消色差焦面(相距 16.8 m)处放置闪烁探测器测量弹核飞行时间(TOF), 分辨时间 4 ns. 在第二个闪烁探测器前后放置 2 块平行板雪崩计数器(PPAC)提供位置信号. 在第 2 块 PPAC 后面放置一套由 7 块穿透型 Si 面垒探测器组成的粒子望远镜, 第 1 块 Si 探测器厚 150 μm , 其余各块

收稿日期: 2004 - 07 - 08

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175092, 10235030, 10275092, 10275094); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077406)

作者简介: 刘祖华(1940-), 男(汉族), 浙江舟山人, 研究员, 从事核裂变放射性核束实验及晕核性质的研究;
E-mail: zhliu@iris.ciae.ac.cn

1) 报告人: 张焕乔院士, E-mail: huan@impcas.ac.cn

厚 $300\ \mu\text{m}$. 这些 Si 探测器除作为 ΔE 探测器外, 还用作反应靶, 这样可允许同时测量几个不同能量的反应截面. 从测量得到的 TOF, ΔE_i 和位置信号实现粒子鉴别. 图 1 显示一个典型的 TOF 对 ΔE_2 的二维谱. 由图可看出用这种方式能清晰鉴别粒子.

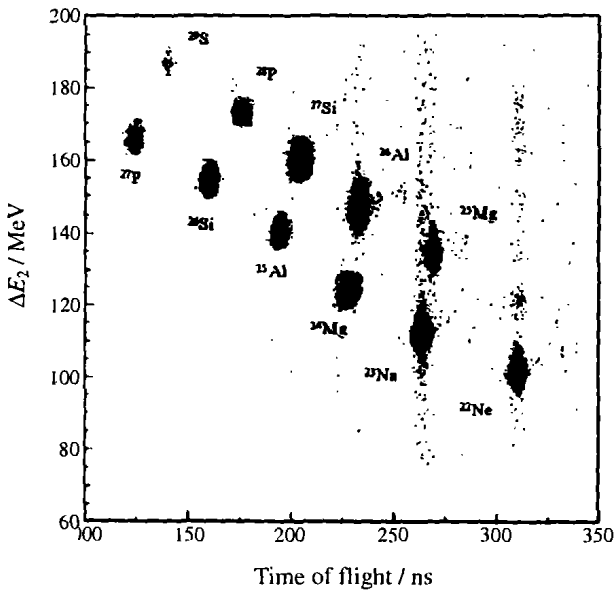


图 1 飞行时间对 ΔE_2 的二维谱

实验数据分析与 Warner 等^[16]采用的方法类似. 图 2 显示 ^{28}P 在 Si 望远镜中沉积能量谱. 左边

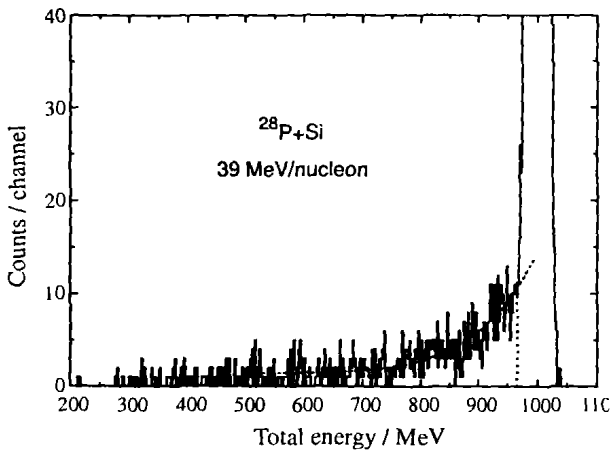


图 2 ^{28}P 弹核在 Si 望远镜中总能量沉积谱

点线指示反应事件. 超出第 1 个 Si 探测器发生的概率 η_1 是由在 PPACs, TOF 和 ΔE_1 上开窗得到的能谱上相应反应事件与总事件之比确定的. 同样, 对超出第 $(i+1)$ 个 Si 探测器发生的反应概率 η_{i+1} 是由在 PPACs, TOF 和第 $(i+1)$ 个 Si 探测器上开窗的总能谱中求出的. 根据测定的 η_i 和 η_{i+1} , 给出相应

在第 i 个 Si 探测器上发生反应的平均反应截面为

$$\sigma_R = \frac{A}{\nu\rho(\Delta X)_i} \ln\left(\frac{1-\eta_{i+1}}{\eta_i}\right), \quad (1)$$

式中 A 和 ρ 分别是靶核质量数和密度, ν 是亚佛加得罗常数, $(\Delta X)_i$ 是第 i 个 Si 探测器的厚度. σ_R 对弹性峰下的反应事件按能谱左边的点线外推做了修正, 其修正量仅占总反应截面的百分之几. 截面误差包括计数统计、探测器厚度和反应事件外推的不确定性等. 测量得到的反应截面分别标在图 3、图 4 和图 5 中.

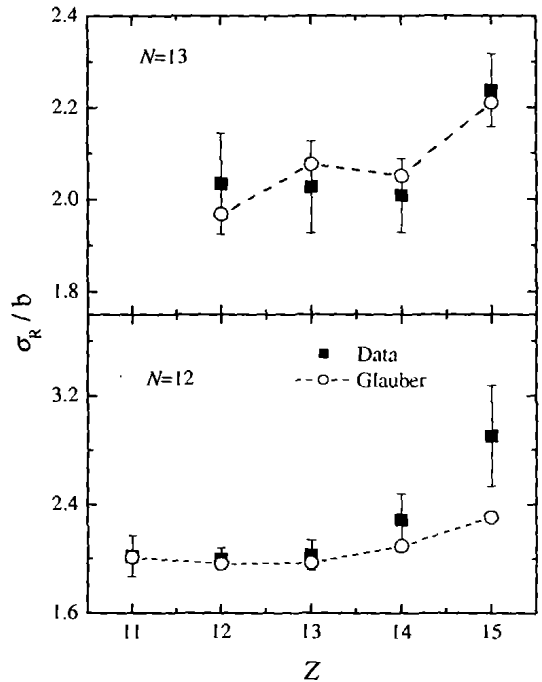


图 3 40 MeV/u $N=12$ 和 13 同中子异位素与 ^{28}Si 靶的反应总截面随原子序数的变化

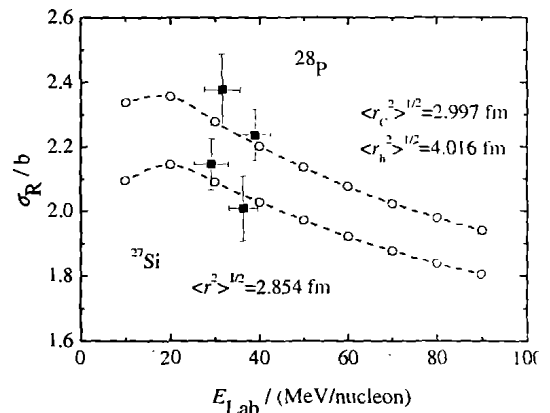


图 4 ^{27}Si , $^{28}\text{P} + ^{28}\text{Si}$ 反应截面激发函数

○ 改进的 OL 近似的 Glauber 模型计算值, ■ 实验数据.

图 3 中标出在 40 MeV/u 能量测得 $N=12$ 和

13 同中子异位素反应截面 σ_R 作为原子序数 Z 的函数. 值得注意的是, 在 $Z=15$ 处 σ_R 明显增加, 这种情况非常类似 N, O 和 F 同位素在 $N=15$ 处观测到它们的 σ_R 有大的增加^[13, 14]. 这种类似可能是远离 β 稳定线核中核力电荷无关的一种迹象. 另外, 还观测到²⁷P(偶 N 核)截面比²⁸P(奇 N 核)的上升陡得多, 再次表明这个性质类似于 N, O 和 F 同位素. 在后一种情况, 偶 Z 核(¹¹Be, ¹⁹C 和 ²³O)反应截面上升较陡, 而奇 Z 核(²²N 和 ²⁴F)截面呈连续增加趋势. 这些偶-奇特性可能反映对相互作用效应^[14].

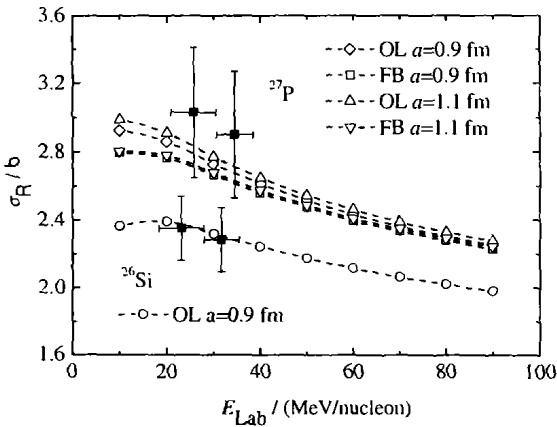


图 5 ²⁶Si, ²⁷P+²⁸Si 反应截面激发函数
○ 改进的 OL 和 FB 近似的 Glauber 模型计算值, ■ 实验数据.

3 改进的 Glauber 模型计算

通常认为晕核是由核芯加松散束缚的价核子组成, 这些弱束缚的价核子隧穿远离核芯^[17]. 当一个原子核的 σ_R 比起它相邻同位素或同中子异位素的截面突然增加时, 这可能是出现晕结构的迹象. 晕结构常用“核芯+晕核子”模型^[14, 15]来分析, 这多是用少体(FB)Glauber 模型^[18, 19]来实现的. 在 FB Glauber 模型中, 弹核被分解成核芯和晕核子, 这里明显考虑了核芯、晕核子和靶核之间的空间关联. 当原子核只有 1 个晕核子时, 反应截面表示为

$$\sigma_R^{FB} = \int db \{ 1 - | \langle \varphi_0 \exp[iX_{FT}(\bar{a}) + iX_{nT}(\bar{a} + s_1)] | \varphi_0 \rangle |^2 \}, \quad (2)$$

$$iX_{FT}(\bar{a}) = - \int ds T_F(s) \int dt T_T(t) \Gamma(\bar{a} + s - t), \quad (3)$$

$$iX_{nT}(\bar{a} + s_1) = - \int dt T_T(t) \Gamma(\bar{a} + s_1 - t), \quad (4)$$

式中, b 是碰撞参数的二维矢量, 它垂直于入射方向; $\bar{a} = b - (s_1/A)$ 是核芯碰撞参数矢量; A 是弹核质量数; s_1 是晕核子坐标相对核芯质心的垂直成分; φ_0 是束缚态波函数; X_{FT} 和 X_{nT} 分别是核芯和晕核子被靶核散射的光学相移函数; T_F 是核芯厚度函数; T_T 是靶核厚度函数; Γ 是 N-N 散射的剖面函数. 在我们计算中, Γ 取下面的表达式^[20]:

$$\Gamma(b) = \frac{\sigma_{NN}}{2\pi\beta^2} (1 - i\alpha_{NN}) \exp\left(-\frac{b^2}{\beta^2}\right), \quad (5)$$

式中, σ_{NN} 是核子-核子散射全截面, α_{NN} 是朝前 N-N 散射振幅实部与虚部之比, β 表示 N-N 相互作用的有限程. 为了重现低能和中能的实验数据, 考虑有限程 N-N 相互作用是重要的^[21]. 在本工作中, 取 $\beta = 1.0$ fm. 由于^{27, 28}P 实验反应截面有大的增强, 要求用上面描述的光学极限(OL)和少体(FB)近似的 Glauber 理论作仔细分析.

图 3 将改进的光学极限近似的 Glauber 理论^[21, 22]的预言值与实验截面作了比较. 在这个近似中, 考虑了库仑修正和有限程修正. 在计算中, 核密度分布在 Woods-Saxon(WS)势下求值, 半径和弥散参数取 $R_0 = 1.17$ fm 和 $a = 0.65$ fm, 调节 WS 势深度去重现单质子分离能. ²⁵Al 的计算是唯一的例外, 由于它小的价质子分离能导致太弥散的密度. 为了重现实验数据, 用拟合中子分离能去调节 WS 势深度. 从图中可以看出, 对 $Z \leq 14$ 的同中子异位素理论值与实验值满意地一致. ²⁷P 实验数据明显大于计算值. 虽然²⁸P 的反应截面比相邻同中子异位素有所增强, 但用改进的 Glauber 理论以弥散的密度分布可以描述²⁸P 的实验数据.

如图 4 所示, 测量²⁷Si+²⁸Si 的反应截面 σ_R 用改进的 OL 近似的 Glauber 理论能够很好地描述. 在这些计算中, WS 势的几何参数取 $r_0 = 1.17$ fm 和 $a = 0.65$ fm, WS 势深度由重现²⁷Si 和²⁸Si 价质子的分离能来调节. 由于 WS 势深度不同, 裸核和核芯核²⁷Si 的均方根(rms)半径有不同的值, 分别为 2.854 和 2.997 fm. 这意味着²⁸P 的核芯²⁷Si 比裸核增大了约 0.143 fm. 由于存在库仑位垒, ²⁸P 的 $2s_{1/2}$ 态的质子 rms 半径在 WS 势几何 $(r_0, a) = (1.17, 0.65)$ fm 下仅为 4.016 fm. 因此, 在²⁸P+²⁸Si 反应中测量 σ_R 的增强能够用核芯²⁷Si 大小扩大和改进 OL 近似的 Glauber 理论给出处于 $2s_{1/2}$ 的价

质子波函数来满意地描述.

对 $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 反应, 核芯 ^{26}Si 是一个缺 2 个中子的同位素. 如图 5 所示, 如果 WS 势几何采用 $(r_0, a)=(1.27, 0.9)$ fm, 得到一个弥散的密度分布, 用 OL 近似的 Glauber 理论能够很好地描述 $^{26}\text{Si}+^{28}\text{Si}$ 的实验数据. 这样得到裸核 ^{26}Si 的 rms 半径为 3.190 fm. 加 1 个质子到 $2s_{1/2}$ 态且调节 WS 势深度去重现价质子分离能, 用相同的几何参数计算核芯 ^{26}Si 和价质子的密度分布. 利用改进的 OL 和 FB 近似的 Glauber 理论得到的这些密度分布分别计算了 $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 的反应截面 σ_R . 在这些计算中, 处于 $2s_{1/2}$ 态的价质子具有弱束缚能, 因此有相对弥散的密度分布, 核芯被扩大. 从这些密度分布抽取核芯和价质子的 rms 半径分别为 3.470 和 4.875 fm, 得出 ^{26}Si 核芯和裸核 rms 半径之差为 0.280 fm. OL 和 FB 近似的 Glauber 理论计算结果分别用空心菱形和空心正方形显示在图 4 中, 显然, 这些计算结果低估了实验值. 为了改善数据的一致性, 我们将价质子 WS 势弥散参数 a 增加到 1.1 fm, 同时, 保持半径参数和核芯密度分布不变, 再用 OL 和 FB 近似的 Glauber 理论计算 $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 的反应截面. 虽然计算截面稍有增加, 但仍低于实验值, 这时, 价

质子的 rms 半径为 5.235 fm. 计算表明, 扩大的核芯加上质子晕可能是响应 $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 反应截面增强的机制.

4 总结

我们测量了 $^{27,28}\text{P}$ 和相应同中子异位素在 Si 靶上的中能反应截面, 观测到 $N=12$ 和 13 同中子异位素的反应截面在 $Z=15$ 处有大的增加. 对 $Z\leq 14$ 同中子异位素和 ^{28}P 的实验结果用改进的 OL 近似的 Glauber 理论能够很好地描述. $^{28}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 反应截面的增强可用改进的 OL 近似的 Glauber 理论加上核芯扩大得到很好的解释. 处于 ^{28}P 的 $2s_{1/2}$ 态的价质子没有像晕核子中观察到的那种弥散的密度分布. 此外, 用改进的 OL 和 FB 近似的 Glauber 理论却低估了 ^{27}P 的实验截面数据. 理论分析表明, 扩大的核芯加上质子晕可能是响应 $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$ 反应截面增强的机制. 应当指出, 这里的预测只能看作初步的理论解释. 实际上, sd 壳丰质子核的结构理论上还不完全清楚. 为了弄清这些可能的机制, 还需要进一步仔细从实验和理论上加以研究.

参 考 文 献:

- [1] Minamisono T, Ohtsubo T, Minami I, *et al.* Phys Rev Lett, 1992, **69**: 2 058.
- [2] Blank B, Marchand C, Pravikoff M S, *et al.* Nucl Phys, 1997, **A624**: 242.
- [3] Schwab W, Geissel H, Lenske H, *et al.* Z Phys, 1995, **A350**: 283.
- [4] Negoita F, Borcea C, Carstoiu F. Phys Rev, 1996, **C54**: 1 787.
- [5] Kelley J H, Austin Sam M, Azhari A, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 5 020.
- [6] Smedberg M H, Baumann T, Aumann T, *et al.* Phys Lett, 1999, **B452**: 1.
- [7] Fukuda M, Mihara M, Fukao T, *et al.* Phys, 1999, **A656**: 209.
- [8] Navin A, Bazin D, Brown B A, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **81**: 5 089.
- [9] Brown B A, Hansen P G. Phys Lett, 1996, **B381**: 391.
- [10] Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y, *et al.* Phys Rev, 1996, **C53**: 572.
- [11] Chen B Q, Ma Z Y, Grummer F, *et al.* J Phys, 1998, **G24**: 97.
- [12] Zhang H Y, Sun W Q, Ren Z Z, *et al.* Nucl Phys, 2002, **A707**: 303.
- [13] Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A691**: 599.
- [14] Kanungo R, Tanihata I, Ozawa A. Phys Lett, 2001, **B512**: 261.
- [15] Kanungo R, Masami Chiba, Naohito Iwasa, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **88**: 142502.
- [16] Warner R E, Kelley J H, Zecher P, *et al.* Phys Rev, 1995, **C52**: R1 166; Nucl Phys, 1998, **A635**: 292.
- [17] Jensen A S, Riiseger K. Phys Lett, 2000, **B480**: 39.
- [18] Ogawa Y, Tanihata I. Nucl Phys, 1992, **A543**: 727.
- [19] Al-khalili J S, Tostevin J A. Phys Rev Lett, 1996, **76**: 3 903.
- [20] Charagi S K, Gupta S K. Phys Rev, 1997, **C56**: 1 171.
- [21] Zhao Y L, Ma Z Y, Chen B Q, *et al.* Commun Theor Phys, 2001, **36**: 313.
- [22] 赵跃林, 马中玉, 陈宝秋等. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 506.

[23] Suzuki T, *et al.* Nucl Phys, 1998, **A630**: 661.

[24] Cai X Z, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 024610.

Enhancement of Total Reaction Cross Sections for $^{27,28}\text{P}$ with a ^{28}Si Target and Examination of Possibly Relevant Mechanisms*

LIU Zu-hua, RUAN Ming, ZHAO Yao-lin, ZHANG Huan-qiao, YANG Feng, MA Zhong-yu,
LIN Cheng-jian, CHEN Bao-qiu, WU Yue-wei
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

ZHAN Wen-long, GUO Zhong-yan, XIAO Guo-qing, XU Hu-shan, SUN Zhi-yu,
LI Jia-xing, CHEN Zhi-qiang
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The reaction cross sections of $^{27,28}\text{P}$ and the corresponding isotones on Si target were measured at intermediate energies. The measured reaction cross sections of the $N=12$ and 13 isotones show an abrupt increase at $Z=15$. The experimental results for the isotones with $Z\leq 14$ and ^{28}P can be described well by the modified Glauber theory of the optical limit approach. The enhancement of the reaction cross section for ^{28}P could be explained by the modified Glauber theory with an enlarged core. Theoretical analysis with the modified Glauber theory of the optical limit and few-body approaches shows that an enlarged core together with proton are probably the mechanism responsible for the enhancement of the cross sections for the reaction of $^{27}\text{P}+^{28}\text{Si}$.

Key words: reaction cross section; Glauber theory; proton halo; enlarged core

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10175092, 10235030, 10275092, 10275094); Major State Basic Research Development Program(G2000077406)

This is presented by Zhang Huan-qiao the Partial Invited Talk at the 12th National Nuclear Physics Conference.