

# $^{27}\text{P}$ 基态晕结构和激发态质子宽度的研究\*

郭冰<sup>1)</sup> 李志宏 柳卫平 白希祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 首先利用扭曲波波恩近似(DWBA)分析了 $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$ 反应布居 $^{27}\text{Mg}$ 基态、第一和第二激发态的角分布,导出了 $^{27}\text{Mg}$ 前3个态的渐进归一化系数(ANC).然后根据镜像核的电荷对称性得出了 $^{27}\text{P}$ 基态的核谱因子和ANC,以及第一、第二激发态的质子宽度.基于 $^{27}\text{P}$ 基态的核谱因子和ANC导出了其价质子的均方根半径,验证了 $^{27}\text{P}$ 基态具有单质子晕结构.

**关键词** 核谱因子 渐进归一化系数 均方根半径 质子宽度

## 1 引言

自从1985年Tanihata等发现 $^{11}\text{Li}$ 的晕结构以来<sup>[1]</sup>,许多丰中子核已被确认为晕核.在质子滴线附近探寻质子晕核是目前国际上核物理研究中感兴趣的课题之一.滴线核 $^{27}\text{P}$ 质子结合能很小,仅有0.861MeV,近年来,已有几个实验工作研究过其质子晕结构. Navin等通过退激 $\gamma$ 射线与弹核碎片符合测量证实了 $^{27}\text{P}$ 基态具有单质子晕结构;在 $^{27}\text{P}$ 与 $^{12}\text{C}$ , $^{28}\text{Si}$ 靶的反应截面测量中都分别观测到了 $^{27}\text{P}$ 的单质子晕结构<sup>[2-4]</sup>.

能级的总宽度等于所有分宽度之和,总宽度越大,能级寿命越短.对于 $^{27}\text{P}$ 第一和第二激发态,总宽度为质子宽度与 $\gamma$ 宽度之和.1995年,Herndl等利用壳模型计算了 $^{27}\text{P}$ 前两个激发态的质子宽度,并应用于天体物理重要反应 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 的研究<sup>[5]</sup>.

通过比较 $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$ 反应布居 $^{27}\text{Mg}$ 基态、第一和第二激发态实验测量的角分布与DWBA理论模型计算结果,导出了相应虚衰变 $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg}+n$ 的中子ANC.进而利用镜像核的电荷对称性,得出了基态虚衰变 $^{27}\text{P} \rightarrow ^{26}\text{Si}+p$ 的核谱因子和质子ANC,以及第一和第二激发态的质子宽度.通过 $^{27}\text{P}$ 基态的质子ANC和核谱因子,导出了其价质子的均方根半径,以及通过对价质子在相互作用半径外的几率和核外部分对均方根半径贡献的分析,验证了 $^{27}\text{P}$ 基态具有单质子晕结构.

## 2 $^{27}\text{Mg}$ 中子ANC

如果转移反应是周边过程,ANC可以通过DWBA理论模型拟合实验测量的角分布得出,

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} = \sum_{j_i j_f} (C_{l_i j_i}^d)^2 (C_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2 \frac{\sigma_{l_i j_i l_f j_f}^{\text{DW}}}{(b_{l_i j_i}^d)^2 (b_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2}, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{l_i j_i l_f j_f}^{\text{DW}}$ 指DWBA计算的微分截面. $C_{l_f j_f}^{27\text{Mg}}$ ,  $C_{l_i j_i}^d$ 和 $b_{l_f j_f}^{27\text{Mg}}$ ,  $b_{l_i j_i}^d$ 分别是 $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg}+n$ 和 $d \rightarrow p+n$ 虚衰变的核ANC和单粒子ANC. $l_i, j_i$ 和 $l_f, j_f$ 分别是转移中子在 $d$ 和 $^{27}\text{Mg}$ 中的轨道角动量和总角动量.

DWBA程序DWUCK<sup>[6]</sup>用于计算 $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$ 反应的角分布.通过拟合能量为12MeV的 $d$ 在 $^{27}\text{Mg}$ 上弹性散射角分布的实验数据<sup>[7]</sup>抽取出入射道的光学势参数,出射道的光学势参数取自临近稳定核系统或普适势<sup>[8-10]</sup>.图1比较了实验测量的 $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$ 反应角分布和利用4套光学势参数的DWBA计算结果,得到的3个末态的中子ANC列于表1,结果的误差来源于实验误差和光学势参数的不确定性.为了验证该反应的周边性,利用Woods-Saxon势不同的几何参数计算了核谱因子和ANC随单粒子ANC的变化关系,示于图2.可以看出:谱因子随单粒子ANC变化比较大,而ANC几乎保持不变.这就表明:在当前能量下,对于末态为基态、第一和第二激

\* 国家自然科学基金(10375096, 10575137)资助

1) E-mail: guobing@iris.ciae.ac.cn

发态的 $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$ 反应周边性比较好.

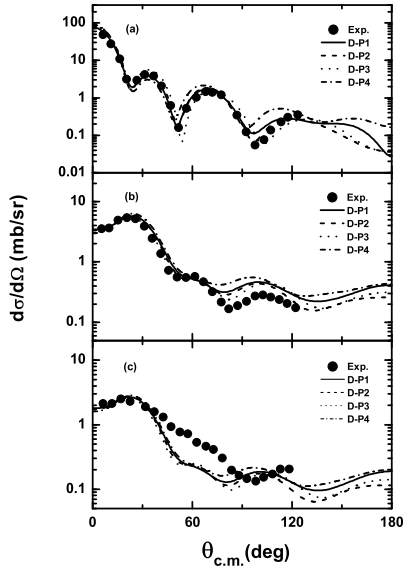


图1  $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$  反应实验测量的角分布和利用4套光学势参数的DWBA计算结果 (a), (b)和(c)分别对应于末态为 $^{27}\text{Mg}$ 基态、第一和第二激发态的角分布.

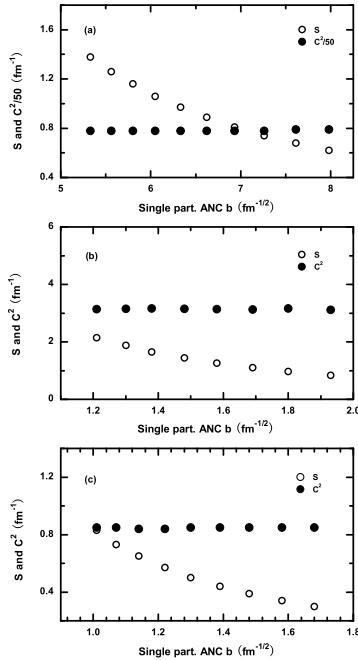


图2 ANC与核谱因子随单粒子ANC的变化关系 (a), (b)和(c)分别对应于末态为 $^{27}\text{Mg}$ 基态、第一和第二激发态.

表1 DWBA计算中的一些输入量以及导出的 $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg}+n$ 虚衰变的ANC

反应	$E_x/\text{MeV}$	$J^\pi$	$nl_f j_f$	$\text{ANC}^2/\text{fm}^{-1}$
$^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$	0	$1/2^+$	$1s_{1/2}$	$44.0 \pm 5.3$
	0.985	$3/2^+$	$0d_{3/2}$	$3.40 \pm 0.32$
	1.698	$5/2^+$	$0d_{3/2}$	$0.90 \pm 0.08$

表中 $n$ 是径向函数除原点和无穷大外的节点数.

### 3 $^{27}\text{P}$ 质子ANC和质子宽度

$^{27}\text{P}$ 和 $^{27}\text{Mg}$ 基态互为镜像核, 因此虚衰变 $^{27}\text{P} \rightarrow ^{26}\text{Si}+p$ 的质子ANC可以从虚衰变 $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg}+n$ 的中子ANC导出,  $(C_{l_f j_f}^{27\text{P}})^2 = R(C_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2$ , 式中 $R$ 可用如下方程计算得出<sup>[11]</sup>

$$R = \left| \frac{F_l(ik_p R_N)}{k_p R_N j_l(ik_n R_N)} \right|^2, \quad (2)$$

其中 $F_l$ 和 $j_l$ 分别是正则库仑波函数和球贝塞尔函数,  $R_N$ 为核半径, 波数可用如下公式计算 $k_{p(n)} = (2\mu\varepsilon_{p(n)}/\hbar^2)^{1/2}$ ,  $\varepsilon_{p(n)}$ 为质子(中子)结合能. 利用该方程计算出的 $R$ 值为44.2.

由于镜像核之间的单粒子谱因子近似相等, 基于单粒子谱因子和ANC的关系 $C_{p(n)} = \sqrt{S_{p(n)}}b_{p(n)}$ ,  $R$ 也可由下式计算得出,

$$R = (b_{l_f j_f}^{27\text{P}})^2 / (b_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2. \quad (3)$$

根据相同计算方法<sup>[12]</sup>, 该方程计算得出的 $R$ 值为39.5.

$R$ 的平均值为 $41.9 \pm 2.4$ , 误差来源于这两种计算方法的偏差. 进而导出虚衰变 $^{27}\text{P} \rightarrow ^{26}\text{Si}+p$ 的质子ANC为 $1840 \pm 240 \text{fm}^{-1}$ , 核谱因子为 $0.98 \pm 0.13$ .

$^{27}\text{P}$ 和 $^{27}\text{Mg}$ 第一、第二激发态互为镜像核, 因此 $^{27}\text{P}$ 这两个态的质子宽度可用 $^{27}\text{Mg}$ 相应态的中子ANC得到,  $\Gamma_p = R^{\text{res}}(C_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2$ , 其中 $R^{\text{res}}$ 可用如下方程得出<sup>[11]</sup>

$$R^{\text{res}} = \frac{\hbar^2 k_p}{\mu} \left| \frac{F_l(k_p R_N)}{k_p R_N j_l(ik_n R_N)} \right|^2. \quad (4)$$

同样, 基于镜像核单粒子谱因子近似相等的假设,  $R^{\text{res}}$ 也可用如下方程计算,

$$R^{\text{res}} = \Gamma_p^{\text{s.p.}} / (b_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2, \quad (5)$$

其中 $\Gamma_p^{\text{s.p.}}$ 是单粒子宽度.

进而可以导出 $^{27}\text{P}$ 第一、第二激发态的质子宽度, 得到的 $R^{\text{res}}$ 与质子宽度列于表2. 可以看出: 对于第一激发态, 我们的结果比壳模型计算<sup>[5]</sup>大约大7倍; 对于第二激发态, 本工作的结果比壳模型计算大约大25%.

表2  $^{27}\text{P}$ 第一、第二激发态的质子宽度以及 $R^{\text{res}}$

$^{27}\text{P}$	1	2
$E_x/\text{MeV}$	1.199	1.631
$J^\pi$	$3/2^+$	$5/2^+$
$R^{\text{res}}/(\text{MeV}\cdot\text{fm})$	$3.81 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-5}$
	$3.64 \times 10^{-9}$	$1.86 \times 10^{-5}$
$\Gamma_p/\text{MeV}$	$1.27 \pm 0.12 \times 10^{-8}$	$1.74 \pm 0.16 \times 10^{-5}$
	$1.7 \times 10^{-9}$ <sup>[5]</sup>	$1.36 \times 10^{-5}$ <sup>[5]</sup>

## 4 $^{27}\text{P}$ 基态价质子均方根半径

价质子均方根半径可以表示为

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = \left[ S_{26\text{Si,p}}^{27\text{P}} \int_0^{R_N} r^4 \phi^2(r) dr + (C_{l_f j_f}^{27\text{Mg}})^2 \int_{R_N}^{\infty} r^2 W^2(2k_B r) dr \right]^{1/2}, \quad (6)$$

其中  $S_{26\text{Si,p}}^{27\text{P}}$  为核谱因子,  $\phi(r)$  为价质子的束缚态波函数,  $W(2k_B r)$  为 Whittaker 函数. 通过计算得出价质子均方根半径为  $4.57 \pm 0.36 \text{ fm}$ , 结果与相对论平均场理论计算结果 ( $4.46 \text{ fm}$ ,  $4.47 \text{ fm}$ ,  $4.19 \text{ fm}$ ,  $4.26 \text{ fm}$ )<sup>[13]</sup> 在误差范围内是一致的. 可以看出:  $^{27}\text{P}$  基态价质子均方根半径远大于其物质半径 ( $3.22 \pm 0.23 \text{ fm}$ ,  $3.02 \pm 0.16 \text{ fm}$ )<sup>[2, 3]</sup>, 表明  $^{27}\text{P}$  基态具有单质子晕结构. 对价质子在相互作用半径外的几率以及核外部分对

均方根半径贡献的分析也表明  $^{27}\text{P}$  基态具有单质子晕结构.

## 5 总结

核谱因子是单粒子模型中关键的核结构参数之一, 对不稳定核的壳结构和幻数研究有重要意义. 我们分析了  $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$  反应布居  $^{27}\text{Mg}$  基态、第一和第二激发态的角分布, 导出了  $^{27}\text{Mg}$  前 3 个态的中子 ANC. 进而利用核力的电荷无关性, 得出了其镜像核  $^{27}\text{P}$  基态的核谱因子和质子 ANC, 以及第一和第二激发态的质子宽度. 通过  $^{27}\text{P}$  基态的核谱因子和质子 ANC 导出了其价质子的均方根半径, 验证了  $^{27}\text{P}$  基态具有单质子晕结构. 此外, 本工作中得出的质子 ANC 和质子宽度也已用于天体物理重要反应  $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$  的研究<sup>[14]</sup>.

## 参考文献(References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676—2679
- 2 FANG D Q, SHEN W Q, FENG J et al. Eur. Phys. J., 2001, **A12**: 335—339
- 3 ZHANG H Y, SHEN W Q, REN Z Z et al. Nucl. Phys., 2002, **A707**: 303—324
- 4 LIU Z H, RUAN M, ZHAO Y L et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034326-1—034326-6
- 5 Herndl H, Görres J, Wiecher M et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1078—1094
- 6 Kunz P D. Computer Code DWUCK4 (unpublished)
- 7 Meurders F, Steld A Van Der. Nucl. Phys., 1974, **A230**: 317—328
- 8 Perey F G. Phys. Rev., 1963, **131**: 745—763
- 9 Becchetti F D, Greenlees G W. Phys. Rev., 1969, **182**: 1190—1209
- 10 Perey C M, Perey F G. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1976, **17**: 1—101
- 11 Timofeyuk N K, Johnson R C, Mukhamedzhanov A M. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 232501-1—232501-4
- 12 GUO B, LI Z H, LIU W P et al. Nucl. Phys., 2005, **A761**: 162—172
- 13 REN Z Z, Mittig W, Sarazin F. Nucl. Phys., 1999, **A652**: 250—270
- 14 GUO B, LI Z H, BAI X X et al. Phys. Rev., 2006, **C73**: 048801-1—048801-4

# Study of Halo for the Ground State and Proton Widths for the First Two Excited States of $^{27}\text{P}^*$

GUO Bing<sup>1)</sup> LI Zhi-Hong LIU Wei-Ping BAI Xi-Xiang  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The neutron asymptotic normalization coefficients (ANCs) for the virtual decay  $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + n$  are determined from the angular distributions of the  $^{26}\text{Mg}(d,p)^{27}\text{Mg}$  reaction leading to the ground, first and second excited states of  $^{27}\text{Mg}$  respectively, based on distorted wave Born approximation analysis (DWBA). According to charge symmetry of mirror nuclei, we extract the proton ANC and spectroscopic factor for  $^{27}\text{P}$  ground state and the proton widths of the first and second excited states of  $^{27}\text{P}$ . The rms radius of valence proton is then derived. Our result indicates that the  $^{27}\text{P}$  ground state has a proton halo structure.

**Key words** spectroscopic factor, asymptotic normalization coefficient, rms radius, proton width

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375096, 10575137)

1) E-mail: guobing@iris.ciae.ac.cn