

# <sup>14</sup>C 激发态中子晕\*

刘祖华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 利用 <sup>13</sup>C(d,p)<sup>14</sup>C 反应实验数据,抽取转移反应重叠函数渐近归一化常数,计算了 <sup>14</sup>C 的 1<sup>-</sup> 和 0<sup>-</sup> 激发态的最后一个中子的密度分布的均方根半径和在核外的几率. 研究结果表明,<sup>14</sup>C 的 1<sup>-</sup> 和 0<sup>-</sup> 激发态为中子晕态.

**关键词** 转移反应 核 ANC 均方根半径 中子晕

## 1 引言

<sup>14</sup>C 半衰期 5730 年,是自然界标准时钟,又可作为示踪原子. 因此,在考古、生物医学、工程建设等人文科学、自然科学研究和国民经济建设中有着广泛的应用. <sup>14</sup>C 是宇宙射线在高层大气层中产生的.<sup>14</sup>C 的核结构,尤其是晕结构与其产生率密切相关. 由此可见,<sup>14</sup>C 核结构的研究有较重要的意义.

十几年前,在不稳定轻核中中子晕核的发现<sup>[1]</sup>,推动了放射性核束物理的迅速发展. 由此,核物理研究翻开了崭新的一页. 十几年来,已在 <sup>11</sup>Li,<sup>11,14</sup>Be 和 <sup>19</sup>C<sup>[1-3]</sup> 等一些轻核基态发现了中子晕,找到了 <sup>8</sup>B<sup>[6-10]</sup> 和 <sup>26,27,28</sup>P 质子晕(皮)核<sup>[11]</sup>,证实了在中子滴线和质子滴线及其附近晕核的存在. 近年来,我们在中国原子能科学研究院串列加速器上,利用转移反应寻找稳定核激发态中子晕,发现 <sup>12</sup>B 的第二、三激发态,<sup>13</sup>C 的第一激发态为中子晕态<sup>[12-15]</sup>,为证实晕现象的普遍性提供了确切的实验证据. 下面利用已有的 <sup>13</sup>C(d,p)<sup>14</sup>C 反应实验结果<sup>[16]</sup>,证明 <sup>14</sup>C 激发态中也存在晕结构,为激发态中子晕提供又一实例. 因此 <sup>14</sup>C 核结构的研究在核物理本身也有一定意义.

## 2 探索激发态晕的方法

在晕核的研究中,最常用的方法是相互作用截

面或反应总截面、动量分布测量. 虽然这些方法仍被广泛使用,目前人们对利用研究稳定核时发展起来的传统方法用于晕核详细结构研究越来越有兴趣. 转移反应是研究核谱和核结构的有效工具. 最近的实验研究表明<sup>[15-17]</sup>,直接表面反应前角微截面对核的晕结构灵敏. 以下,我们将叙述如何由转移反应角分布抽取处于某核态的核子密度分布的均方根半径和在核外的几率分布,以判明该核态是否具备晕结构. 设转移反应 A(a,b)B,其中 a = b + N, B = A + N. 核子 N 转移到 B 的 (n, l, j) 轨道,其中 n, l, j 分别代表波函数的节点数、轨道角动量和总角动量. 转移反应的微分截面可写成

$$\frac{d\sigma_{\text{exp}}(\theta)}{d\Omega} = (C_{\text{AN}l}^B)^2 (C_{\text{lN}}^A)^2 R_l(\theta), \quad (1)$$

(1)式中的  $C_{\text{AN}l}^B$ ,  $C_{\text{lN}}^A$  为表面反应重叠波函数的渐近归一化常数(ANC),而

$$R_l(\theta) = \frac{\sigma^{\text{DW}}(\theta)}{b_{\text{AN}l}^2 b_{\text{lN}}^2}, \quad (2)$$

$\sigma^{\text{DW}}(\theta)$  为扭曲波恩近似(DWBA)计算的微分截面, $b_{\text{AN}l}$ ,  $b_{\text{lN}}$  分别为单粒子波函数的渐近归一化常数, $\theta$  为质心角度.  $R_l(\theta)$  为模型计算量. 如弹核的核 ANC 值  $C_{\text{lN}}^A$  已知,则可通过实验测量的前角微分截面  $d\sigma_{\text{exp}}(\theta)/d\Omega$  与  $R_l(\theta)$  的比较抽取余核 B 的核 ANC 值  $C_{\text{AN}l}^B$ . 我们已经证明<sup>[15]</sup>  $R_l(\theta)$ , 因而  $C_{\text{AN}l}^B$  与模型参数无关. 在单粒子近似下,  $C_{\text{AN}l}^B$ ,  $b_{\text{AN}l}$  与单粒子谱因子  $S_l^{\text{SP}}$  有如下关系<sup>[18]</sup>,

2002-03-06 收稿

\* 国家重点基础研究发展规划(G200007400),国家自然科学基金(19875078,10075077)资助

$$S_j^{(SP)} = \frac{(C_{ANj}^B)^2}{b_{ANj}^2}, \quad (3)$$

其中  $S_j^{(SP)}$  的上标 (SP) 表示单粒子. 由 (3) 式可见,  $S_j^{(SP)}$ ,  $C_{ANj}^B$ ,  $b_{ANj}$  3 个量中, 只要知道其中的两个量, 就可以求得第三个量. 我们在以下的讨论中采用实验的单粒子谱因子值  $S_j^{(SP)}$ , 计算的单粒子 ANC 值  $b_{ANj}$ , 求核 ANC 值  $C_{ANj}^B$ .

如处于  $(nlj)$  轨道的核子径向波函数为  $\Phi_{nj}(r)$ , 在渐近核区有

$$\Phi_{nj}(r) = b_{ANj} \frac{W_{-\eta, l+1/2}(2kr)}{r}, \quad r > R_N, \quad (4)$$

$W_{-\eta, l+1/2}$  为 Whittaker 函数,  $k = \sqrt{2\mu\epsilon_B}$  是波矢,  $\eta$  为库仑参数,  $\mu, \epsilon_B$ ,  $R_N$  分别为束缚态 (A + N) 的约化质量、核子结合能和核相互作用半径. 由 (4) 式求  $b_{ANj}$  时, 取  $r > 5.5\text{fm}$  的平均值.  $5.5\text{fm}$  略大于  $R_N$  值, 但不影响均方根半径  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  的计算结果.

晕核的特征是最后的核子径向分布非常弥散, 与稳定核相比应有大的均方根半径和高的核子在核外的几率. 在从转移反应实验角分布抽取核 ANC 值  $C_{ANj}^B$  之后, 为了证明是否有晕结构, 需计算均方根半径  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  和核子在核外的几率. 在  $(nlj)$  轨道的核子的均方根半径可写成<sup>[15]</sup>

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = \left[ \int_0^{R_N} r^4 \Phi_{nj}^2(r) dr + (C_{ANj}^B)^2 \times \int_{R_N}^{\infty} r^2 W_{-\eta, l+1/2}^2(2kr) dr \right]^{1/2}. \quad (5)$$

以下我们将看到, 对  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  的绝大部分贡献来自 (5) 式中的第二项. 由于  $C_{ANj}^B$  与模型参数无关, 所以第二项的值也与模型无关. 由此增加了通过转移反应抽取的核子密度分布均方根半径的可靠性. 核外区域的贡献可作以下估计:

$$D_\lambda(R_N) = \left[ \frac{\int_{R_N}^{\infty} r^{2\lambda} \Phi_{nj}^2(r) dr}{\int_0^{\infty} r^{2\lambda} \Phi_{nj}^2(r) dr} \right]^{1/\lambda} \quad (6)$$

$\lambda = 1, 2$ .  $D_1$  代表最后一核子在核外的几率,  $D_2$  为 (5) 式中第二项对  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  的贡献. 在我们的计算中,  $R_N = r_0(A_{\text{core}}^{1/2} + A_v^{1/3})$ ,  $r_0 = 1.25\text{fm}$ ,  $A_{\text{core}}$  和  $A_v$  分别为核心和价核子的质量数. 我们利用  $^{13}\text{C}(d, p)^{14}\text{C}$  反应的实验结果<sup>[16]</sup>, 计算  $^{14}\text{C}$  的  $1^-, 0^-$  激发态的  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  和  $D_\lambda(R_N)$ , 以证明是否有晕结构存在.

### 3 计算结果

单粒子波函数计算采用典型的 Woods-Saxon 势,

$r_0 = 1.25\text{fm}$ ,  $a_0 = 0.65\text{fm}$ , 调节势阱深度  $V_0$  以拟合核子的结合能  $\epsilon_B$ , 由此确定势阱深度. 利用 (4) 式, 从计算的单粒子径向波函数  $\Phi_{nj}(r)$  抽取单粒子 ANC 值  $b_{ANj}$ . 图 1 显示  $^{14}\text{C}$  的  $0^-$  激发态的单粒子波函数  $r\Phi_{nj}(r)$  与  $b_{ANj}W_{-\eta, l+1/2}(2kr)$  的比较. 由单粒子径向波函数, 可得到最后一个核子的密度分布  $\rho(r) = \Phi_{nj}^2(r)/4\pi$ . 图 2 给出  $^{14}\text{C}$  的基态中子、质子与  $1^-, 0^-$  激发态中子密度分布的比较. 由图可见, 处于  $1^-, 0^-$  激发态的中子的密度分布伸展到核外很远的区域, 即具有中子晕核的特征.

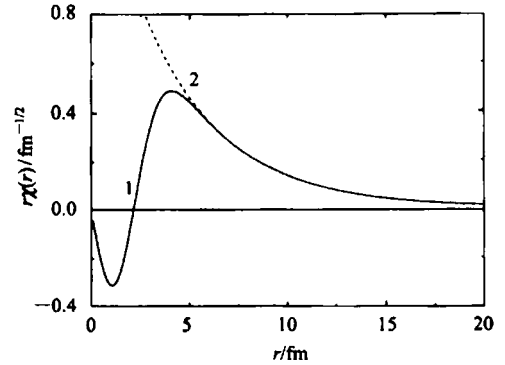


图 1  $^{14}\text{C}$  的  $0^-$  激发态的单粒子波函数  $r\Phi_{nj}(r)$  (1) 与  $b_{ANj}W_{-\eta, l+1/2}(2kr)$  (2) 的比较

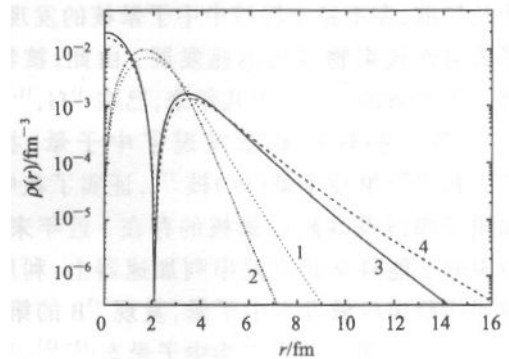


图 2  $^{14}\text{C}$  的基态中子 (1), 质子 (2),  $1^-$  激发态 (3),  $0^-$  激发态 (4) 中子密度分布的比较

文献 [16] 给出了  $^{14}\text{C}$  的  $1^-, 0^-$  激发态的单粒子谱因子  $S_j^{(SP)}$  值. 利用 (3) 式, 可求得核 ANC 值  $C_{ANj}^B$ . 所得  $C_{ANj}^B$  值连同  $S_j^{(SP)}$  值列于表 1. 在求得核的 ANC 值后, 由 (5) 式计算核子密度分布的均方根半径  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ . (5) 式的第一项与势阱的参数  $r_0, a_0$  有关, 但由于在整个积分中, 只占小部分的贡献, 所以由参数  $r_0, a_0$  的不确定性引入的误差很小. 此外, 我们还按公式 (6) 计算了最后一个中子在核外的几率  $D_1$  以及 (5) 式中第二项对  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  值的贡献  $D_2$ . 对于  $^{14}\text{C}$ ,

$R_N = 4.2 \text{ fm}$ .  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ ,  $D_1$  和  $D_2$  值也列于表 1 之中. 对于 <sup>14</sup>C 的  $1^-$  和  $0^-$  激发态, 最后一个中子在核外的几率  $D_1$  均大于 50%. 如以核子在核外的几率大于

或等于 50% 作为晕核的判据, <sup>14</sup>C 的这两个态都为中子晕态.

表 1 <sup>14</sup>C 两个激发态的能级参数、单粒子谱因子、核 ANC 值、均方根半径以及  $D_1$ ,  $D_2$  值

$E_X/\text{MeV}$	$\epsilon_B/\text{MeV}$	$l/\hbar$	$J^\pi$	$S_{ij}^{(\text{SP})}$	$C_{\text{ANC}ij}^B/\text{fm}^{-1/2}$	$\langle r^2 \rangle^{1/2}/\text{fm}$	$D_1$	$D_2$
6.0938	2.0826	0	$1^-$	0.75	$1.84 \pm 0.11$	$4.57 \pm 0.30$	0.557	0.914
6.9026	1.2738	0	$0^-$	1.02	$1.54 \pm 0.09$	$5.78 \pm 0.36$	0.639	0.946

## 4 小结

<sup>14</sup>C 的  $1^-$ ,  $0^-$  激发态的最后一个中子的轨道角动量  $l=0$ , 且结合能很小, 符合晕核的条件. 我们在已有的 <sup>13</sup>C(d, p) <sup>14</sup>C 转移反应实验数据的基础上, 抽

取了核 ANC 值  $C_{\text{ANC}ij}^B$ , 计算了最后一个中子密度分布的均方根半径  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ , 核外中子几率  $D_1$  和渐近核区部分对  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  值的贡献  $D_2$ . 处于上述两态的中子空间分布明显扩展到核外区域, 在核外的几率  $D_1$  大于 50%. 由此证实 <sup>14</sup>C 的  $1^-$  和  $0^-$  两激发态为中子晕态.

## 参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676
- 2 Tanihata I et al. Phys. Lett. 1985, **B309**:380
- 3 Tanihata I et al. Phys. Lett. 1998, **B406**:592
- 4 Guimaraes V et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:064609
- 5 Baumann T et al. Phys. Lett., 1998, **B439**:256
- 6 Minanisono T et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2058
- 7 Pecina I et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:191
- 8 Negoita F et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1787
- 9 Kelley J H et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:5020
- 10 Smedberg M H et al. Phys. Lett., 1999, **B452**:1
- 11 Navin A et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:5089
- 12 LIU Z H et al. Chin. Sci. Bull., 2001, **46**:43
- 13 LIN C J et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**:1183
- 14 LIN C J et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**:1446
- 15 LIU Z H et al. Phys. Rev., 2001, **C64**:034312
- 16 Peterson R J et al. Nucl. Phys., 1984, **A425**:469
- 17 Lewis R, Hayes A C. Phys. Rev., 1999, **C59**:1211
- 18 XU H M et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **73**:2027

## Neutron Halo of the Excited States in <sup>14</sup>C\*

LIU Zu-Hua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The experimental data of the <sup>13</sup>C(d, p)<sup>14</sup>C reaction are used to extract the asymptotic normalization coefficients of the overlap integral, the root-mean-square radii  $\langle r^2 \rangle^{1/2}$  and the probabilities  $D_1$  outside the range of the interaction radius  $R_N$  for the last neutron of the  $1^-$  and  $0^-$  excited states in <sup>14</sup>C. We obtain  $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 4.57 \pm 0.30 \text{ fm}$ ,  $5.78 \pm 0.36 \text{ fm}$  and  $D_1 = 55.7\%$ ,  $63.9\%$  for these two states, respectively. These large values are the good sign that the  $1^-$  and  $0^-$  excited states in <sup>14</sup>C are neutron halo states.

**Key words** transfer reaction, nuclear asymptotic normalization coefficient, root-mean-square radius, neutron halo

Received 6 March 2002

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and National Natural Sciences Foundation of China (19875078, 10075077)