

# 丰中子核 $^{18}\text{N}$ 的 $\beta$ 衰变研究\*

张玉美<sup>1</sup> 许甫荣<sup>1,2,3;1)</sup>

1(北京大学物理学院和重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

2(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

3(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

**摘要** 用壳模型方法研究了丰中子核  $^{18}\text{N}$  的  $\beta$  衰变. 在  $psd$  模型空间使用不同的相互作用进行理论计算, 对不同相互作用得到的  $B(\text{GT})$  值进行对比和讨论, 给出了最吻合的计算结果. 讨论了  $^{18}\text{N}$  核的 Gamow-Teller 型衰变的特性, 理论计算对近期的实验观测给出了合理的解释: 粒子的激发主要存在于  $psd$  空间; 另外预言出 9.5MeV 附近存在一个  $B(\text{GT})$  峰值, 这些计算对氮同位素的  $\beta$  衰变的实验研究将很有意义.

**关键词** 中子滴线  $\beta$  衰变 Gamow-Teller 跃迁  $^{18}\text{N}$  壳模型

## 1 引言

随着近几年实验技术的发展, 实验上可以产生和研究越来越多的奇异核. 远离稳定线的丰中子奇异核通常都可以发生  $\beta^-$  衰变. 其中一些奇异核甚至可以发生  $\beta$  缓发中子发射和  $\beta$  缓发  $\alpha$  发射.  $\beta$  衰变在核结构的研究中起到了重要的作用. 允许型  $\beta$  衰变可以再分为两种类型: Fermi 型跃迁和 Gamow-Teller 型跃迁. Gamow-Teller 型跃迁的  $B(\text{GT})$  依赖于原子核的结构特点. Brown 和 Wildenthal 曾经系统地研究过  $A=17-39$  区域的轻核<sup>[1, 2]</sup>. 在 1993 年, Chou 等人<sup>[3]</sup> 将 Brown 和 Wildenthal 计算过的  $sd$  壳层拓展到  $psd$  壳层对  $A \leq 18$  轻核进行了系统的计算. 核物理近些年来一个重要任务就是理解奇异核出现的新的幻数结构<sup>[4]</sup>.  $Z=8$  的单幻数氧同位素核是近些年来实验和理论方面研究的焦点. 他们的结构可以通过对氮同位素的  $\beta$  衰变进行研究而了解.

对于氮同位素, 奇异核  $^{18}\text{N}$  由于比较靠近稳定线, 而且处于氮同位素中丰中子奇异核的开始阶段, 所以研究  $^{18}\text{N}$  将对继续研究中子数更多的氮同位素有重要的帮助. 实验上目前可以提供关于  $^{18}\text{N}$  衰变到  $^{18}\text{O}$  多个态的大量的数据. Chase 和他的合作者在 1964 年最早发现了  $^{18}\text{N}$  到  $^{18}\text{O}$  的  $\beta$  衰变<sup>[5]</sup>. 当时只有

一条能级 (4455keV) 被测量到, 测得  $^{18}\text{N}$  核的半衰期是  $630 \pm 30\text{ms}$ . 随后几年, 关于这个衰变过程的实验主要是侧重于  $^{18}\text{O}$  的能级和  $^{18}\text{N}$  的半衰期的测量<sup>[5-7]</sup>. 在最近几年中, 又出现了更多的关于  $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$  粒子发射的实验<sup>[8-11]</sup>. 1994 年, Scheller 等人使用时间飞行探测束流进行了  $\beta$  缓发中子发射的实验, 给出了跃迁到 9 个非束缚态的分支比是  $2.2 \pm 0.4\%$ <sup>[8]</sup>. 他们也测量了详细的相对中子发射分支比. 最新的关于  $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$  的实验是在 2005 年测量了从子核  $^{18}\text{O}$  的 8.68MeV 到 11.45MeV 范围区的中子发射<sup>[12]</sup>. 但是目前在这一部分的理论计算还不是很详细. 尽管我们之前也曾经在  $spsdpf$  空间做过这一过程的理论计算<sup>[12]</sup>, 但是所得到的结果并不是很理想. 所以在本次工作中, 在  $psd$  空间使用多相互作用对  $^{18}\text{N}$  的允许型 Gamow-Teller 的  $\beta$  衰变进行计算并且讨论.

## 2 理论基础

壳模型是研究轻核的最有效的理论模型之一, 它可以用来精确地描述原子核的一些基本特性. 所以本次工作主要是在壳模型的基础上完成的.

通常在考虑  $\beta$  的衰变半衰期时, 可以用其比较半

\* 国家自然科学基金(10525520, 10475002), 教育部博士点基金(20030001088)和教育部科学技术研究重点项目(305001)资助

1) E-mail: frxu@pku.edu.cn

衰期  $\log ft$  值来表示,

$$ft_{\frac{1}{2}} = \frac{K}{g_V^2 \langle \tau \rangle^2 + g_A^2 \langle \sigma \tau \rangle^2}, \quad (1)$$

其中  $f$  是相空间因子,  $t_{1/2}$  是半衰期,  $K$  是通过下面公式确定的一个常数

$$K = \frac{2\pi^3 (\ln 2) \hbar^7}{m_e^5 c^4} = 1.230618 \times 10^{-94} \text{erg}^2 \text{cm}^6 \text{sec}, \quad (2)$$

$g_V$  和  $g_A$  分别是弱相互作用的矢量和轴矢量耦合常数.

$\beta$  衰变通常可以分为  $\beta^+$  衰变,  $\beta^-$  衰变以及轨道电子俘获. 丰中子核发生衰变通常是以  $\beta^-$  衰变的形式.  $\beta^-$  衰变又能够分成两种类型: 一类是 Gamow-Teller 型衰变, 一类是 Fermi 型衰变. 与前面公式中对应的 Fermi 型衰变的矩阵元是

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle f \| \sum_k t_{\pm}^k \| i \rangle}{\sqrt{2J_i + 1}}, \quad (3)$$

$$t_{\pm} = \frac{1}{2}(\tau_x \pm i\tau_y), \quad (4)$$

其中的  $\pm$  是指  $\beta^{\pm}$  衰变,  $J_i$  是初态的自旋. Gamow-Teller 型衰变的矩阵元是

$$\langle \sigma \tau \rangle = \frac{\langle f \| \sum_k \sigma^k t_{\pm}^k \| i \rangle}{\sqrt{2J_i + 1}}, \quad (5)$$

$\sigma$  是自旋算符. Fermi 型衰变和 Gamow-Teller 型衰变有不同的相空间算符影响. 考虑进去这些因素的话,

$$B(F) = \langle \tau \rangle^2, \quad (6)$$

$$B(GT) = \left( \frac{g_A}{g_V} \right)^2 \langle \sigma \tau \rangle^2, \quad (7)$$

这样, 定义出 Fermi 型衰变的约化跃迁矩阵元  $B(F)$  和 Gamow-Teller 型衰变的约化跃迁矩阵元  $B(GT)$ .

### 3 理论计算

到现在为止, 已有两个实验<sup>[8, 12]</sup> 给出了在中子分离能 (8.044MeV) 之上的  $^{18}\text{N}$  到  $^{18}\text{O}$  独立能级的  $\beta$  衰变特性. 其中最近的实验<sup>[12]</sup> 扩大了测量能级的范围并且第一次给出了 8.6MeV 附近的一个新的  $B(GT)$  值. 在之前的工作中<sup>[12]</sup>, 已经在  $spdpf$  空间做了理论计算, 但是计算的结果和实验吻合的不是很好. 本次工作主要在  $psd$  空间用不同的相互作用对  $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$  的衰变进行详细的理论计算. 并且与实验数据进行对比和讨论. 实验上,  $^{18}\text{N}$  的基态是  $1^-$  态. 计算也是建立在从  $^{18}\text{N}$  的基态  $1^-$  态衰变到  $^{18}\text{O}$  的各个态上. 在图1中我们给出了几种相互作用计算得到的  $B(GT)$  值和最新的实验数据<sup>[12]</sup>. 在对各种相互作用得到的数据与实验进行对比之后, 可以看出 WBT 相互作用的计算结果

要好于其他相互作用. WBT 相互作用是  $sd$  壳层的 W 相互作用的一种拓展<sup>[13]</sup>. 在图2中将 WBT 相互作用的计算结果与实验数据<sup>[12]</sup> 单独进行比较, 可以看出实验上<sup>[12]</sup> 的3个主要的  $B(GT)$  峰值与我们的理论计算非常吻合. 另外, 在实验的能量范围内, 计算又给出了 9.5MeV 附近一个很强的  $B(GT)$  计算值, 但是这个值在实验上没有被观测到. 我们还在这个计算的基础上给出了  $^{18}\text{N}$  衰变到  $^{18}\text{O}$  各个态的其他物理参量<sup>[14]</sup> 并与实验<sup>[12]</sup> 对比.

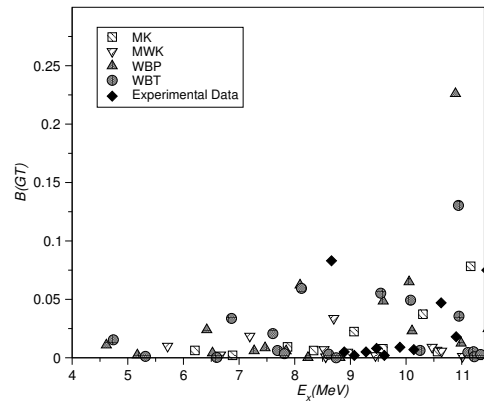


图1  $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$  在不同相互作用下计算得到的  $B(GT)$  结果与实验对比

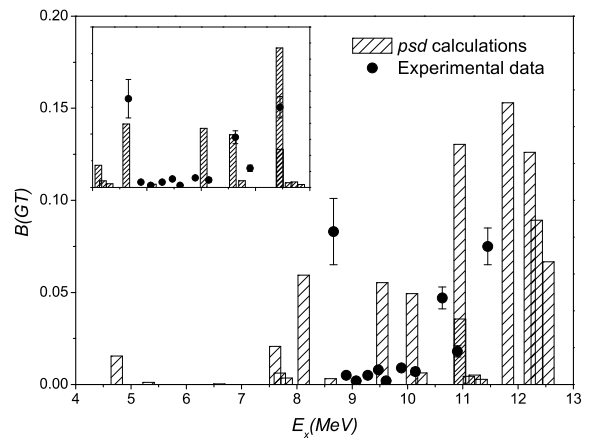


图2 WBT 相互作用给出的  $B(GT)$  计算结果与实验单独对比

计算出  $^{18}\text{N}$  允许型  $\beta$  的衰变半衰期为 0.9s, 比实验上的结果 (0.624s) 略大, 这可以解释为我们的计算只考虑了允许型的跃迁, 而没有包括禁戒的  $\beta$  衰变过程.

### 4 结论

用壳模型在  $psd$  空间对  $^{18}\text{N}$  的  $\beta$  衰变过程进行了研究. 使用多种相互作用系统地计算了从  $^{18}\text{N}$  的基态  $1^-$  态到  $^{18}\text{O}$  的各个子态的允许型 Gamow-Teller  $\beta$  衰

变. 在对多种相互作用的结果进行对比后, 可以找出与实验数据非常吻合的WBT相互作用的结果. 而此结果要比之前给出的 *spsdpf* 空间的结果好很多. 这给

出很多有意义的信息, 说明粒子的激发是限制在 *psd* 空间; 另外预言出9.5MeV附近存在一个  $B(\text{GT})$  峰值, 这些对氮同位素的  $\beta$  衰变的实验研究将很有意义.

### 参考文献(References)

- 1 Brown B A, Wildenthal B H. Phys. Rev., 1983, **C28**: 2397
- 2 Brown B A, Wildenthal B H. At. Data Nucl. Data Tables, 1978, **33**: 347
- 3 Chou W T, Warburton E K, Brown B A. Phys. Rev., 1993, **C47**: 163
- 4 Brown B A. Prog. Part. Nucl. Phys., 2001, **47**: 517
- 5 Chase L F, Jr., Grench H A et al. Phys. Rev. Lett., 1964, **13**: 665
- 6 Olness J W, Warburton E K, Alburger D E et al. Nucl. Phys., 1982, **A373**: 13
- 7 Tilley D R, Weller H R, Cheves C M et al. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 1
- 8 Scheller K W, Görres J, Ross J G et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: 46
- 9 France R H. Phys. Rev., 2003, **C68**: 057302
- 10 ZHAO Z, GAI M, Lund B J et al. Phys. Rev., 1989, **C39**: 1985
- 11 Reeder P L, Warner R A, Hensley W K et al. Phys. Rev., 1991, **C44**: 1435
- 12 LI Z H et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064327
- 13 Warburton E K, Brown B A. Phys. Rev., 1992, **C46**: 923
- 14 ZHANG Yu-Mei, XU Fu-Rong. Chin. Phys. Lett., 2006, **23**: 2046—2048

## $\beta$ -Decay of Neutron-Rich Nucleus $^{18}\text{N}^*$

ZHANG Yu-Mei<sup>1</sup> XU Fu-Rong<sup>1,2,3;1)</sup>

<sup>1</sup>(School of Physics and MOE Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

<sup>2</sup>(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>3</sup>(Center for Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory for Heavy Ion Physics, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** We used the shell model to investigate the  $\beta$  decays of the neutron-rich nucleus  $^{18}\text{N}$ . The reduced transition strengths  $B(\text{GT})$  of Gamow-Teller  $\beta$  decays in  $^{18}\text{N}$  are calculated with the different interactions in the *psd* shell space; the results are compared and discussed. A series of consistent results with the recent experimental data are found in this shell space, which seems to show that the observed properties of  $^{18}\text{N}$  and  $^{18}\text{O}$  are mainly produced in *psd* shell space. In addition, a  $B(\text{GT})$  value is predicted around 9.5MeV in our calculation. These will be useful in the future experiment.

**Key words** neutron drip line,  $\beta$ -decay, Gamow-Teller transition,  $^{18}\text{N}$ , shell model

\* Supported by Natural Science Foundation of China (10525520, 10475002), Doctoral Foundation of Chinese Ministry of Education (20030001088) and Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (305001)

1) E-mail: frxu@pku.edu.cn