

丰中子氮同位素 β^- 衰变的理论研究*

张玉美¹⁾ 许甫荣^{1) 2)}

1) 北京大学物理学院 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

2) 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(2007 年 12 月 31 日收到 2008 年 3 月 5 日收到修改稿)

使用壳模型系统地研究了丰中子氮同位素的 β^- 衰变, 并对其衰变子核 $^{18, 19, 20, 21}\text{O}$ 的能级结构性质给出理论计算, 所得结果与实验符合较好. 研究了 $^{18, 19, 20}\text{N}$ 核的 Gamow-Teller 允许型 β^- 衰变的特性, 对与近期实验观测不一致之处进行了讨论和分析. 预言了 ^{21}N 的 β^- 衰变及其子核高激发态的能级结构性质. 这些计算将对氮同位素的实验研究很有帮助.

关键词: 中子滴线, β^- 衰变, 氮同位素, 壳模型

PACC: 2160C, 2340

1. 引 言

远离稳定线的原子核通常都会发生 β 衰变, 因此 β 衰变是用来研究奇特核的有效方法. 丰中子核可以发生 β^- 衰变, 甚至可以发生 β 缓发中子发射或 β 缓发 α 衰变等. β 衰变按照发射粒子的自旋性质可以分为 Fermi 跃迁和 Gamow-Teller 跃迁, 其中 Gamow-Teller 跃迁敏感地依赖于原子核的结构特点, 与子母核的初态和末态的自旋宇称相关, 与初末态的波函数相似程度相关. Gamow-Teller 跃迁在理论和实验方面都有重要的意义.

近些年, 质子数为 $Z = 8$ 幻数的丰中子氧同位素已经成为寻找丰中子轻核区可能存在的新幻数的理想研究对象, 受到了越来越多的理论和实验上的重视. 作为其 β^- 衰变的母核, 丰中子氮同位素的研究也就变得很有意义. 实验上, 1994 年 Scheller 等^[1] 使用飞行时间探测束流进行了 ^{18}N 的 β^- 缓发中子实验. 2005 年北京大学的 Li 等^[2] 测量了 ^{18}N 的 β 缓发中子和 β 缓发 γ 衰变. 2006 年在美国的 NSCL (National Superconducting Cyclotron Laboratory) 进行了关于 ^{19}N 和 ^{20}N 的 β^- 衰变的研究^[3]. 这一系列氮同位素相关的实验大大推动了丰中子氮同位素的研究, 另一方面也要求理论给出相应的系统研究.

壳模型是研究轻核的有效理论模型之一, 可

以用来较精确地描述原子核的一些基本特性. Brown 和 Wildenthal^[4, 5] 曾经在 sd 壳空间成功地计算了 $A = 17-39$ 区域轻核的结构性质. 本文作者对 ^{18}N 的 β^- 衰变性质做了详细的研究^[6], 认为 p-sd 壳层相对于 s-p-sd-pf 壳层更适用于 ^{18}N 的 β^- 衰变研究. 本文的主要目的是将模型空间限制在 p-sd 壳层空间, 使用壳模型方法以及 Warburton 和 Brown 提出的 WBT 相互作用^[7], 针对丰中子核 $^{18, 19, 20, 21}\text{O}$ 的能级结构特点做系统的计算和讨论. 在此基础上, 研究 $^{18, 19, 20}\text{N}$ 的 β^- 衰变相关的特性, 进而预言 ^{21}N 的 β^- 衰变性质.

2. 计算与讨论

2.1. ^{18}N

相对而言, ^{18}N 比较靠近稳定线, 实验上比较容易进行衰变和结构的研究. 在理论上, 对检验模型的预言能力起到了重要的作用. 对于 ^{18}N , 最早是从 Chase 和他的合作者^[8] 在 1964 年发现从 ^{18}N 到 ^{18}O 的 β^- 衰变开始的. 当时只有一条能级 (4455 keV) 被测量到, 测得 ^{18}N 核的半衰期是 (630 ± 30) ms. 之后, 关于这个衰变过程的实验主要是侧重于其子核 ^{18}O 的能级和 ^{18}N 的半衰期测量^[9, 10]. 近几年, 随着实验技

* 国家自然科学基金 (批准号: 10525520, 10735010, 10475002) 和国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2007CB815000) 资助的课题.

† E-mail: frxu@pku.edu.cn

术的提高,又出现了更多关于 $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$ 粒子发射相关的实验^[1,11-13].最新的实验是在2005年完成

的,测量了子核 ^{18}O 从8.68到11.45 MeV范围内的中子发射数据^[2].

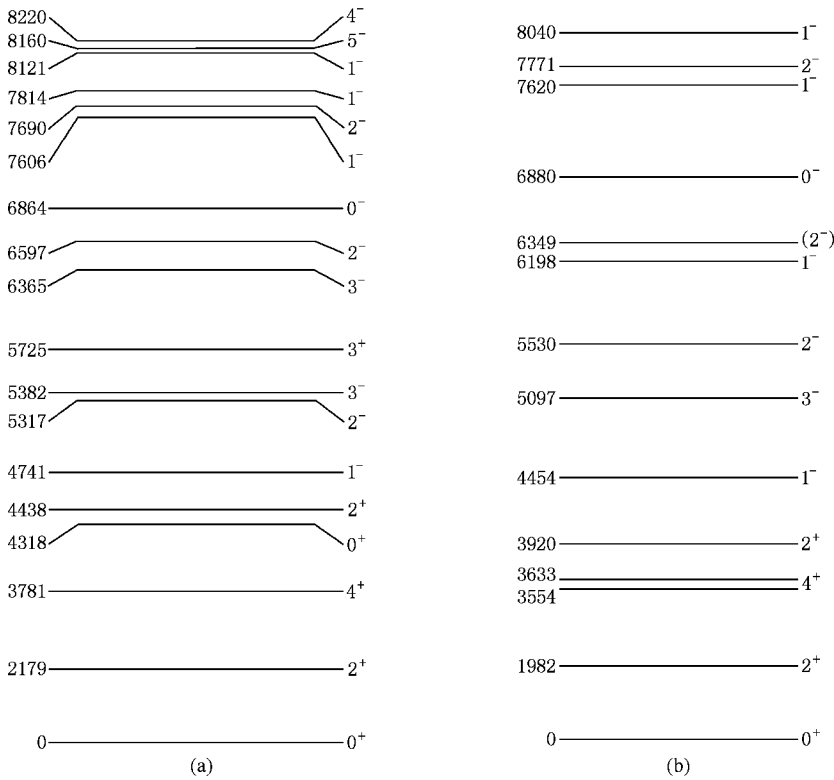


图1 ^{18}O 的理论能级与文献10的实验数据对比 (a)理论结果 (b)实验结果

本文使用壳模型对 $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$ 这一过程进行了详细的理论计算.计算是在 p-sd 壳层空间进行的.图1给出了计算得到的子核 ^{18}O 的能级与实验数据^[10]的对比.在本文能级图中,左侧数值为能量值(单位为 keV),右侧数值为能级的自旋值,自旋值右上角的“+”或“-”号表示态的宇称.总体上,我们的计算能合理地再现低能区的能级结构.实验所观测到的3633 keV能级^[10]目前还不能确定它的自旋宇称.而本文的计算给出了这个态应该是 0^- 态.较高能量区域的理论计算也与实验相符.对于6349 keV态,理论计算与实验一致,认为是 2^- 态. β 衰变的分支比是实验上一个比较重要的物理量,这个量不仅直观而且还可以与理论计算进行直接对比. $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$ 的允许型 Gamow-Teller 跃迁的分支比在图2中给出,其中实验数据来自文献10].在本文分支跃迁比的图中,横坐标为子核的激发能 E_{ex} ,竖线为本文的理论计算值,圆点为实验数据.从图2可以看出,对于实验上几个比较大的分支比数据(4.5, 6.8, 7.6 MeV等激发能附近的分支比),理论计算结果都与此一致.这说明理论计算选择的结构

组态应该是合理的.在4.5 MeV附近,实验数据(47.2 ± 0.9)%要比理论值36.5%大一些.这与实验上能够测到的态的个数等其他信息有关.

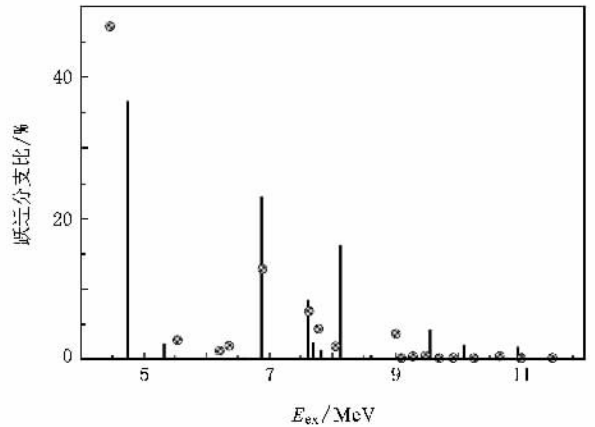


图2 $^{18}\text{N}(\beta^-)^{18}\text{O}$ 衰变的跃迁分支比理论值与文献10的实验数据对比

2.2. ^{19}N 和 ^{20}N

对于氮同位素的研究,目前实验上已经可以到

达²⁰N. 关于¹⁹N 的 β^- 衰变实验研究始于 1986 年 Dufour 等^[14]在法国的 GANIL 观测¹⁹N 的 β^- 缓发 γ 谱. 他们给出的¹⁹N 的半衰期是 (0.32 ± 0.10) s, 并且已观测到了 3 个 γ 跃迁. 比较详细的理论研究是 1988 年 Warburton^[15]对¹⁹N (β^-)¹⁹O 做过的理论计算, 计算空间包含 f_7 壳层. 而对于²⁰N, 实验上的数据相对较少. Mueller 在 1988 年曾经测量²⁰N 的半衰期为 $(0.100^{+0.030}_{-0.020})$ s, 而 Reeder 等^[13]在 1991 年给出新的实验结果是 (0.142 ± 0.019) s. 之后, Reeder 等^[16]在 1995 年给出¹⁹N 的半衰期为 (0.271 ± 0.008) s, 同时更新了²⁰N 的半衰期数据为 (0.129 ± 0.008) s. 目前关于¹⁹N 和²⁰N 的 β^- 衰变, 最新的实验数据是来自 2006 年 Sumithrarachchi 等^[3]报道的¹⁹N 和²⁰N 的 β^- 缓发中子发射和 γ 发射的工作.

图 3 和图 4 分别给出了理论计算得到的子核¹⁹O 和²⁰O 的能级与实验数据^[10]的对比. 对于¹⁹O, 实验在高激发能区域部分态的自旋宇称不确定. 从图 3 可以看出, 理论计算总体上与实验一致, 实验观测到的 3067 keV 态, 实验上^[10]是 $(3/2)^+$ 态, 但还需进一步确定. 理论计算给出的与实验值最接近的 $3/2^+$ 态在激发能为 3745 keV 处. 另外, 理论计算给出的 2624 keV 为 $1/2^-$, 实验上还没有观

测到这样的态. 对于²⁰O, 我们的计算能够很好地重复实验数据(图 4). 在高一些的能量区, 实验上有多个态的自旋宇称不确定, 我们的计算将对确定这些态有所帮助. 图 5 和图 6 分别给出了¹⁹N 和²⁰N 发生允许型 β^- 衰变的分支比随子核激发能的变化, 图中的数据点为取自文献[3]的实验值. ¹⁹N (β^-)¹⁹O 在子核激发能为 3.95 MeV 处有一个大的实验分支比(41.4%), 我们的计算目前不能再现这个大的衰变值, 文献[15]的理论计算也未能重复这个实验值, 这需要进一步的理论和实验研究.

²⁰N (β^-)²⁰O 的实验数据目前还不够完善. 在子核激发能 7.5 MeV 之下实验上测到 7 个禁戒跃迁, 尚未测到允许跃迁, 且所有通过允许跃迁衰变到子态的自旋都尚未确定. 由于分支比是个相对量, 且实验分支比数据中存在禁戒跃迁的影响, 所以允许跃迁分支比有一定差异是可以理解的. 我们的计算显示在 6.8 MeV 附近有个大的分支比, 目前的实验还没有得到这样的衰变, 有待于讨论和进一步的实验研究. 此外, 我们还计算了¹⁹N 和²⁰N 的半衰期, 分别是 0.339 和 0.101 s, 与文献[16]的实验数据一致.

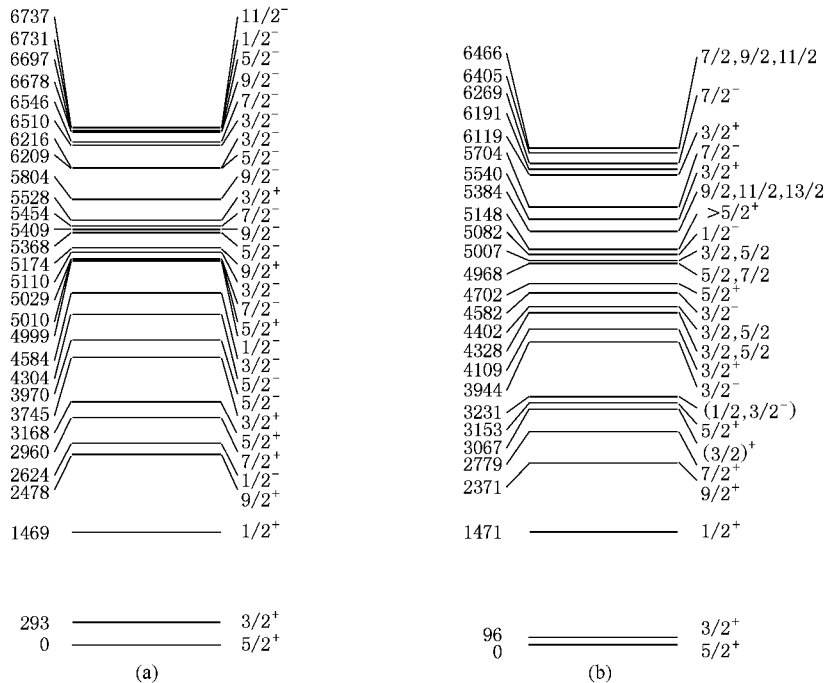


图 3 ¹⁹O 的理论能级与文献 [10] 的实验数据对比 (a) 理论结果 (b) 实验结果

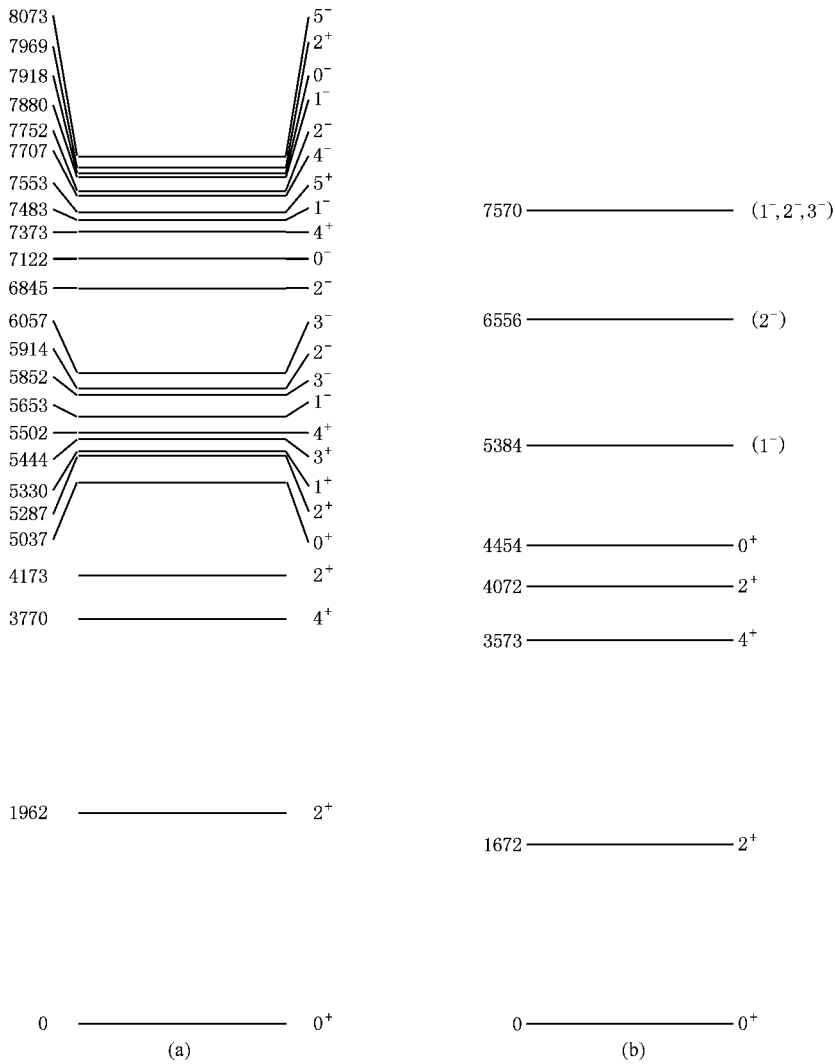


图 4 ^{20}O 的理论能级与文献 10 的实验数据对比 (a) 理论结果 (b) 实验结果

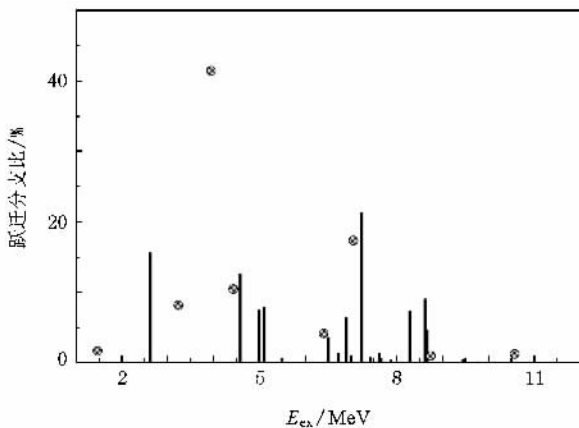


图 5 $^{19}\text{N} \beta^-$ ^{19}O 衰变的跃迁分支比理论值与文献 [3] 的实验数据对比

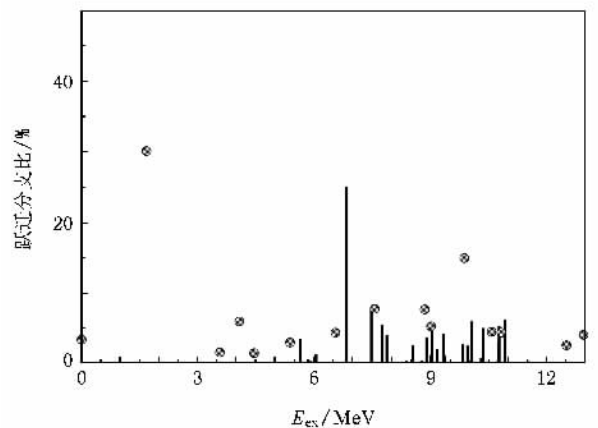


图 6 $^{20}\text{N} \beta^-$ ^{20}O 衰变的跃迁分支比理论值与文献 [3] 的实验数据对比

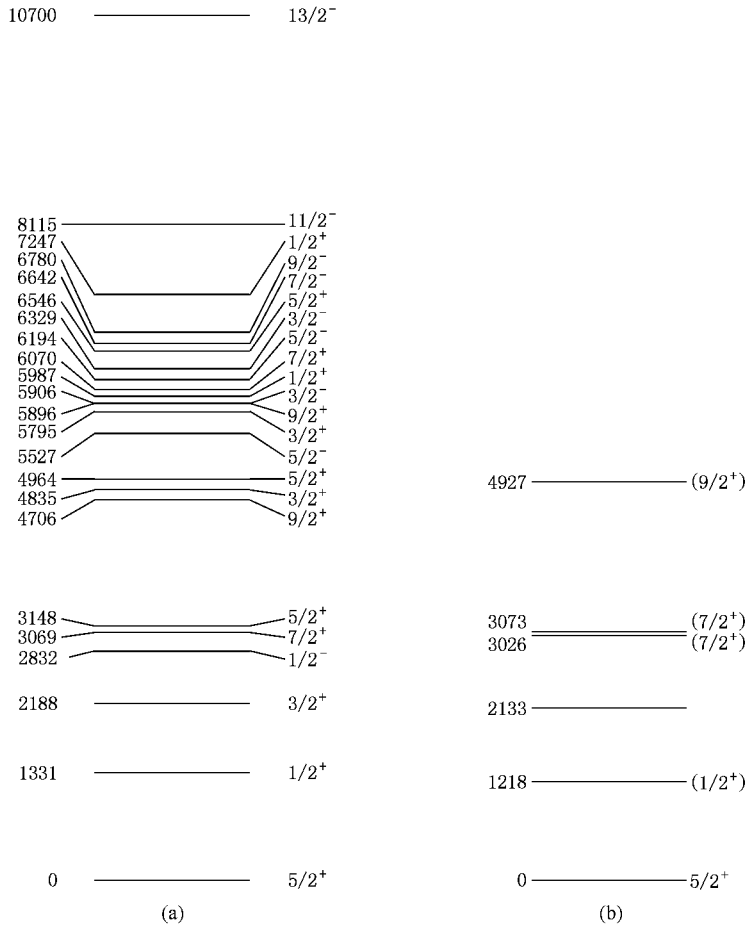


图 7 ^{21}O 的理论能级与文献 [17] 的实验数据对比 (a) 理论结果 (b) 实验结果

2.3. 对 ^{21}N 的预言

目前实验上关于 $^{21}\text{N} (\beta^-) ^{21}\text{O}$ 中的子核 ^{21}O 的能级数据 [17] 共有 6 条, ^{21}N 的 β^- 衰变相关数据仍然相对缺乏. 图 7 给出子核 ^{21}O 的理论计算值与实验数据对比的能级图. 理论除了很好地重现出实验上的低激发态能级数据之外, 还预言出高激发态区域的多条能级. 图 7 中在 6600 keV 之上的理论能级仅选择性地给出第一个自旋宇称态出现的位置. 理论计算确定了 ^{21}O 在实验上仍不确定的第一激发态的自旋宇称 $1/2^+$, 给出了第二激发态的自旋宇称为 $3/2^+$. 实验上测得的 ^{21}O 的 3073 和 3026 keV 态还未能确定. 我们的理论计算在这一区域范围给出两条邻近的能级, 分别是 3069 keV ($7/2^+$) 和 3148 keV ($5/2^+$) 态. 理论计算给出 ^{21}N 的半衰期为 0.058 s, 与实验测量的 $(0.085 \pm 0.007) \text{ s}$ [17] 相差不大. 理论计算还预言了 ^{21}N 发生允许型 β^- 衰变的分支比, 如图 8 所示.

^{21}N 的 β^- 衰变最大分支比在 5.9 MeV 附近. 关于 $^{21}\text{N} (\beta^-) ^{21}\text{O}$ 跃迁分支比的理论预言将对以后 ^{21}N 的 β^- 衰变相关实验具有指导作用.

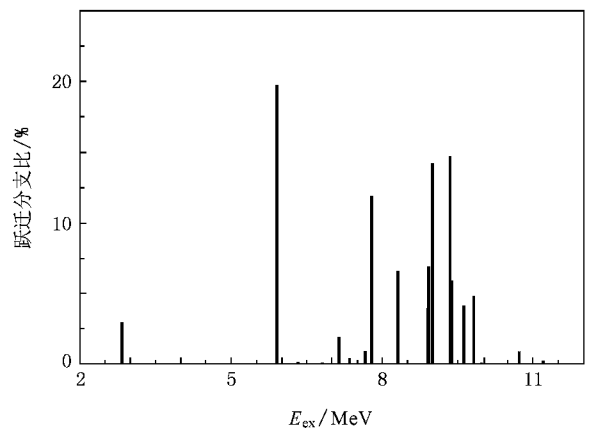


图 8 壳模型预言 $^{21}\text{N} (\beta^-) ^{21}\text{O}$ 衰变的 Gamow-Teller 允许跃迁分支比

3. 结 论

为了了解氮同位素的结构特点和 β^- 衰变特性, 我们使用壳模型在 p-sd 壳层空间对丰中子核 $^{18,19,20,21}\text{O}$ 的能级结构进行了详细的理论计算并与实验数据进行了对比, 较好地再现了 $^{18,19,20}\text{O}$ 低能区的实验数据, 与现有的 ^{21}O 的低激发态能级数据符合很好. 同时, 预言了 ^{21}O 的高激发态能级. 此外, 本文还着重对 $^{18,19,20}\text{N}$ 的 β^- 衰变允许型跃迁的分支比进行了计算. 通过与实验数据的对比分析, 我们认为壳模型可以合理地描述丰中子氮同位素的 β^- 衰变及其子核的能级结构特点. 同时也存在着一些与实验不一致的地方. 比如实验上观测到 ^{19}N 的 β^- 衰变的最

大分支比在子核 ^{19}O 的 3.95 MeV 处, 而理论计算在这个区域没有找到 ^{19}N 允许跃迁的分支比. ^{20}N 的 β^- 衰变, 理论计算得到允许跃迁的最大分支比出现在 ^{20}O 能量为 6.8 MeV 附近, 实验上尚未观测到. 另外, 实验上 ^{20}O 较高的激发态能级数据尚不完备, 这可能会影响到实验分支比的数据. 所以, 需要新的实验来给出更多的有关 ^{20}N 的 β^- 衰变数据及其子核的能级数据. 本文还预言了 ^{21}N 发生允许型 β^- 衰变的分支比, 这些工作将对以后的丰中子氮同位素的 β^- 衰变相关的实验很有帮助.

感谢北京大学冒亚军教授为本文的计算工作提供计算机群.

-
- [1] Scheller K W, Görres J, Ross J G, Wiescher M, Harkewicz R, Morrissey D J, Sherrill B M, Steiner M, Orr N A, Winger J A 1994 *Phys. Rev. C* **49** 46
- [2] Li Z H, Ye Y L, Hua H, Jiang D X, Zhang Y M, Xu F R, Hu Q Y, Zhang G K, Chen Z Q, Zheng T, Wu C E, Lou J L, Li X Q, Pang D Y, Wang S, Li C, Xu H S, Sun Z Y, Duan L M, Hu Z G, Hu R J, Xu H G, Mao R S, Wang Y, Yuan X H, Gao H, Wu L J, Qi H R, Huang T H, Fu F, Jia F, Gao Q M, Ding X L, Han J L, Zhang X Y 2005 *Phys. Rev. C* **72** 064327
- [3] Sumithrarachchi C S, Anthony D W, Lofy P A, Morrissey D J 2006 *Phys. Rev. C* **74** 024322
- [4] Brown B A, Wildenthal B H 1983 *Phys. Rev. C* **28** 2397
- [5] Brown B A, Wildenthal B H 1978 *At. Data Nucl. Data Tables* **33** 347
- [6] Zhang Y M, Xu F R 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2046
- [7] Brown B A, Wildenthal B H 1988 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **38** 29
- [8] Chase L F Jr, Grench H A, McDonald R E, Vaughn F J 1964 *Phys. Rev. Lett.* **13** 665
- [9] Olness J W, Warburton E K, Alburger D E, Lister C J, Millener D J 1982 *Nucl. Phys. A* **373** 13
- [10] Tilley D R, Weller H R, Cheves C M, Chasteler R M 1995 *Nucl. Phys. A* **595** 1
- [11] France R H 2003 *Phys. Rev. C* **68** 057302
- [12] Zhao Z, Gai M, Lund B J, Rugari S L, Mikolas D, Brown B A, Nolen J A Jr, Samuel M 1989 *Phys. Rev. C* **39** 1985
- [13] Reeder P L, Warner R A, Hensley W K, Vieira D J, Wouters J M 1991 *Phys. Rev. C* **44** 1435
- [14] Dufour J P, Del Moral R, Fleury A, Hubert E, Jean D, Pravikoff M S, Delarange H, Geissel H, Schmidt K H 1986 *Z. Phys. A* **324** 487
- [15] Warburton E K 1988 *Phys. Rev. C* **38** 935
- [16] Reeder P L, Kim Y, Hensley W K, Miley H S, Warner R A, Zhou Z Y, Vieira D J, Wouters J M, Seifert H L 1995 *Proc. Int. Conf. Exotic Nuclei and Atomic Masses* (Gif-sur-Yvette: Frontières) p 587
- [17] Firestone R B 2004 *Nuclear Data Sheets* **103** 269

Theoretical investigation of β^- decays in neutron-rich nitrogen isotope^{*}

Zhang Yu-Mei¹⁾ Xu Fu-Rong^{1,2)†}

¹⁾ *State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

²⁾ *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China*

(Received 31 December 2007 ; revised manuscript received 5 March 2008)

Abstract

We have studied the low-lying level schemes of $^{18,19,20,21}\text{O}$ and the β^- -decay branching ratios of nitrogen isotope. The shell-model calculations have been carried out in the psd shell space. The results are compared with the recent experimental data with reasonable agreement. Our calculations also predict the β^- -decay property of ^{21}N and the structure of ^{21}O .

Keywords : neutron drip line , β^- decay , nitrogen isotope , shell model

PACC : 2160C , 2340

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10525520 , 10735010 , 10475002) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB815000).

[†] E-mail : frxu@pku.edu.cn