

文章编号: 1007-4627(2004)04-0271-05

远离稳定线核研究进展*

靳根明, 付 芬, 黄 熙

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 近几年在对远离核的实验研究中, 观测到了理论预言的新衰变模式, 如 ^{45}Fe 的双质子衰变, β^- 缓发裂变; 对中子滴线外一些核的存在可能性也进行了较多的实验探索和理论分析; 开始了对人们一直关注的中子集团存在可能性的实验探索. 远离核谱学和衰变性质研究逐渐深入, 通过对一些远离核第一激发态能量的系统比较和许多远离核 β 衰变 Q 值的测量, 以及核质量的精确测量, 发现在远离核区, 原有的一些幻数消失, 代之产生了一些新的幻数, 对其产生原因的理论分析做了简要的综述.

关键词: 远离核谱学; 双质子衰变; 中子集团; 滴线外核; 幻数

中图分类号: O571.21; O571.3 **文献标识码:** A

1 引言

自从 1985 年 Tanihata 等^[1] 发现 ^{11}Li 的特殊结构——晕结构以来, 随着放射性束流装置的不断发展, 远离稳定线核的研究获得了巨大的进步. 在轻质量区合成和研究了一大批远离稳定线, 直至中子滴线和质子滴线的核素, 并对其中许多核的结构和性质进行了尽可能深入的研究, 发现许多核都具有单中子晕、双中子晕, 单质子晕核结构, 其特点是价核子或核子集团结合松散, 在核表面的密度分布弥散大, 并延伸到核外很远处, 因此破裂余核的动量分布很窄. 刘祖华等^[2] 从价核子在核外的分布分析了实验数据, 给出了具有晕结构的较为宽松的条件. 我国研究人员不仅从理论上预言了 $^{26, 27, 28}\text{P}$ 具有晕结构^[3], 而且从实验上也发现了一些可能具有质子晕结构的核如 ^{27}P , ^{23}Al 等^[4]. 在轻稀土质子滴线区合成了一批滴线附近的新核素, 结果表明在该质量区, 质子滴线的位置要比理论预言的更靠缺中子一侧^[5]. 在重质量缺中子区通过利用电子冷却存储环对许多核素质量的精确测量, 推论出了该核区开始发生单质子衰变的位置和发生双质子衰变的位置^[6]. 在重丰中子核区, 近年来合成了一批丰中子

的新核素, 并发现了 β^- 缓发裂变, 对该核区核的衰变性质有了更深入的了解^[7].

超重核的合成是近年来的一个研究热点^[8]. 不仅利用冷熔合反应合成了 107—112 号元素, 而且又利用热熔合(暖熔合)初步合成了 114, 115 和 116 号元素. 这对进一步探索超重稳定岛的存在具有重要意义. 本文将介绍近年来自远离核研究中的几个方面的进展.

2 远离核研究进展

· 双质子衰变的发现

当趋于质子滴线时, 由于质子的结合能逐渐减少, 原子核会发生一些新的衰变过程: β^+ 缓发质子发射或者直接单质子衰变, 甚至直接双质子衰变. 如果一个极丰质子核发生 β^+ 衰变可以布局在子核的一些激发态上, 随后发射的两个质子则各向同性相继发射. 如果没有中间态可以布局, 母核则同时发射两个质子. 预期质子滴线上的偶 Z 核会发生这样的衰变, 因为对关联使得 $Z-1$ 核是非束缚核, 这就导致偶 Z 核的单质子发射通常是禁戒的^[9]. 双质子发射可以是各向同性的, 也可能是互相关联的

收稿日期: 2004 - 10 - 11

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-No7); 国家自然科学基金重点项目(10235020); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000076401)

作者简介: 靳根明(1943—), 男(汉族), 河南许昌人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理及其相关交叉学科研究;
E-mail: jingm@impcas.ac.cn

(^2H), 两种情况下都具有相等的能量. 到目前为止, 除发现 ^6Be 和 ^{12}O 两个具有极短寿命($\sim 10^{-21}\text{ s}$)的双质子衰变核外, 理论上预言的 ^{45}F , ^{48}Ni 和 ^{54}Zn 双质子衰变核(极可能是 ^2H 发射)一直没有实验证据. 近两年来在 GANIL 和 GSI 的实验中都利用 ^{58}Ni 弹核碎裂反应鉴别出了 ^{45}Fe [10], 并测量了它的衰变方式, 结果表明 ^{45}Fe 是双质子衰变. Giovinazzo 等[11]的结果是 $T_{1/2} = 4.7^{+3.4}_{-1.4}\text{ ms}$, 两个质子的能量为 $(1.14 \pm 0.05)\text{ MeV}$. 而 GSI 小组测得的结果是 $T_{1/2} = 3.8^{+2.0}_{-0.8}\text{ ms}$, $Q_{2p} = (1.1 \pm 0.1)\text{ MeV}$ [12]. 但是两个质子是否是关联的, 即是否是 ^2H 发射, 还有待实验上进一步证实.

· 滴线外核的研究

中子滴线外, 特别是 Li 和 He 元素的中子滴线外核的研究, 对深入了解中子对能对核结构的影响, 以及极丰中子核内中子的分布有重要的意义[13-15]. 在 He 同位素链中, ^6He 和 ^8He 的结构分别是 $\alpha + 2n$ 和 $\alpha + 4n$, 那么, 在 H 同位素链中是否也存在如 $t + 2n$ 和 $t + 4n$ 的情况? 为此, 近几年来对 ^5H 和 ^7H 的存在可能性进行了多次的实验和理论研究. Zhukov 等[16]在实验中证实 ^5H 具有共振态, 并从理论上分析 ^5H 的结构类似 ^6He 的 $\alpha + 2n$ 结构, 是 $t + 2n$ 的结构形式. 同时, 还在 RIKEN 利用($^8\text{He}, pp$) ^7H 反应测量了 ^7H 的共振态[17](见图 1), 证明了在 $t + 4n$ 的阈能附近存在 ^7H 的共振态,

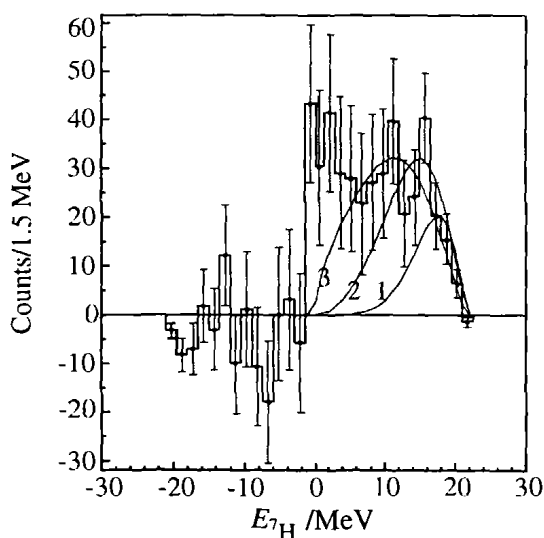


图 1 在 $p(^8\text{He}, pp)$ 反应中得到的扣除空靶本底后 ^7H 能谱, 详情见文献[18]

并详细讨论了 ^7H 内除 t 外的 4 个中子的运动模式.

通过与实验结果比较, 认为 ^7H 内部的 4 个中子更可能是一个结合比较松的中子集团, 但这些都需进一步的实验证实. 无论如何, 我们可以通过对这些核的共振态结构的研究深入认识核子及核子对的作用, 特别是中子集团的存在与否.

· 中子集团的探索

从 1960 年开始探索电中性核至今, 仅证明 2n 是非束缚的, 对滴线核的研究建议 $^4, ^6, ^8n$ 可能有束缚态[18]. ^8He 的稳定性表明 $4n$ 的结合能上限为 $\sim 3.1\text{ MeV}$. 如果 4n 的结合能大于 1 MeV , $\alpha + 4n$ 将是 ^8He 的第一个粒子不稳定阈, 即 ^8He 首先以 $\alpha + 4n$ 的形式衰变, 但事实上 ^8He 衰变中 $^6\text{He} + 2n$ 是主要衰变道, 这表明 $4n$ 集团的结合能要小于 1 MeV . 在核内是否存在 4n 集团必须从实验上进一步证实. Marques 小组[19, 20]利用极丰中子核 ^{11}Li , ^{14}Be 和 ^{15}B 的破裂反应对 4n 集团进行了探索. 我们知道中子的能量是通过探测中子与探测器介质中的质子散射所产生的质子能量而获得的, 因此, 探测到的能量与中子的实际能量之比应 ≤ 1 . 对多个中子同时入射到探测器时, 其探测到的总能量应分布在小于其总能量的很宽范围内. 该小组的实验结果表明, 与 ^{14}Be 破裂产物 ^{10}Be 相关联的 7 个事件中, 中子能量分布 ≤ 1.41 , 利用三种不同的近似分析的结果表明多个信号堆积的可能性只有 10%, 有 6 个事件可能来自于中子集团. 但有待于更多的实验, 以便获得确切的实验数据.

· 幻数的变化

在现有的核结构理论中, 都认为 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126……是幻数, 即当核内的中子数或质子数等于这些数时, 就变得比较稳定. 这些幻数的形成是核内核子相互作用, 包括质子-质子, 质子-中子, 中子-中子相互作用的结果, 而且是研究稳定线附近核时得到的. 当趋于中子滴线或者质子滴线时, 核内中子-质子数之比与稳定核的有很大差异. 原来有些可以忽略的相互作用的积累导致了核子相互作用等的较大变化, 使核内中子或质子的分布发生变化, 核的能级位置、大小、形状等产生较大变化, 最终导致原有的幻数发生变化. 如图 2 所示, 对 $^9\text{He}-^{15}\text{O}$ 一系列同中素而言, 由于核内质子数的不同, 使得 $1/2^+$ 和 $1/2^-$ 能级的能量与最后一个中子结合能之差发生很大的变化, 致使两个能级的位置发生倒置[21].

幻数的变化可以通过几个途径进行研究：核谱学的研究，质量精确测量。在核谱学的研究中又包括了衰变 Q_β 值、能级位置、 $B(E_2)$ 值和形状变化等的研究。

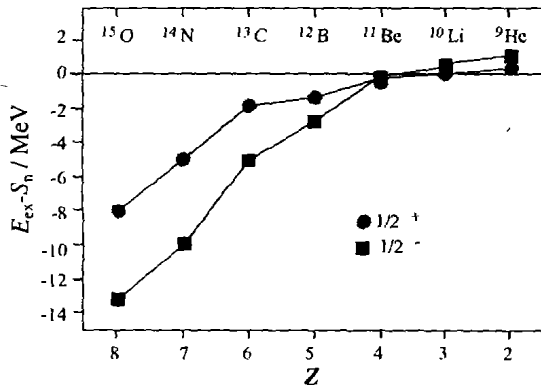


图 2 $N=7$ 同中素的 $1/2^+$ 和 $1/2^-$ 能态与其中子分离能之差的系统性

远离核的谱学研究近年来越来越广泛。除了对已知的 ^6He , ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be 等晕核的激发谱进行更深入的研究外，着重对具有所谓幻数核子，如 $N=20, 28, 82$ 附近的一些远离核进行了 Q_β , $E_{\text{ex}}^{\text{th}}$ 和 $B(E_2)$ 等的测量^[22-24]。例如，Kanugo 等^[25] 将质量数 $A=1-95$ 的奇 A 核的 Q_β 值分不同同位旋对 A 作图(见图 3)。对稳定核，在曲线突然变化的位置表明了幻数的存在。可以看出，随同位旋的增加， $N=20$ 幻数逐渐消失，而 $N=16$ 则成为一个新的幻数，同样， $Z=16$ 也表现出幻数行为。在 $N=30$ 附近也可以看出有幻数存在。

Kaunago 还将偶-偶核($N=2-34$)的第一激发态能量对质子数作图，则也清楚地看到在原有的幻数位置，激发能有明显的突然变化。对某些非常丰中子的核，如 $Z=8, 10$ 的核，在 $Z=16$ 时，第一激发态能量突然上升。同时从这样的图中还可以看到，对 ^{12}Be 而言($N=8$)，其第一激发态能量只有 ~ 2 MeV，远低于 $^{10, 11}\text{Be}$ 。这意味对 $Z=4$ 的核， $N=8$ 不再是幻数。对 $Z=12(\text{Mg})$ 核素， $N=20$ 时的第一激发态能量反倒低于相近的几个中子数较少的同位素，这也说明对 ^{32}Mg 而言 $N=20$ 的幻数也消失了。对 ^{32}Mg 提取的 β 值已达 0.5 左右，这也意味着 Mg 的丰中子同位素 ^{32}Mg 已不是球形核，而是一个典型的大形变核^[26]。Dillmann 等^[27] 对 $N=82$ 的丰中子核 ^{130}Cd 的 Q_β 值进行了测量，结果发现比相邻的 ^{132}Sn 的 Q_β 有一突然的增加，也意味着对 $Z=48$ 而

言， $N=82$ 满壳消失了。

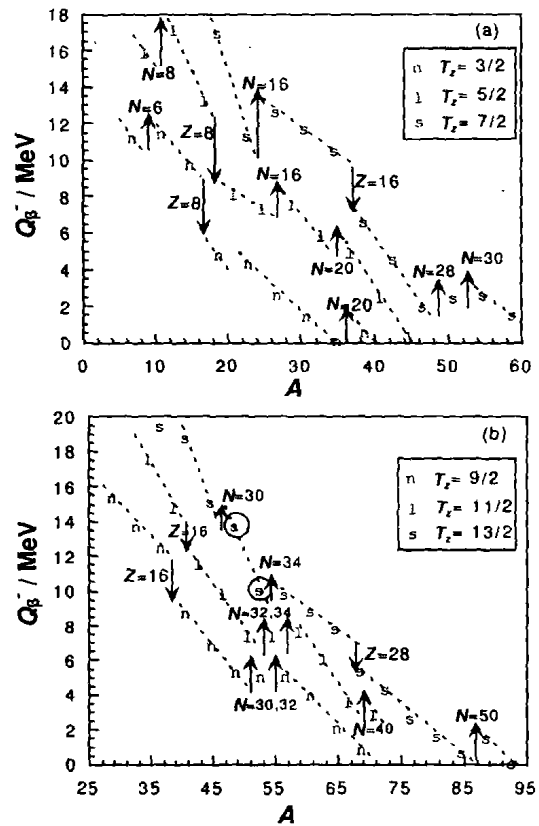


图 3 不同同位旋奇 A 核的 Q_β 值与质量数的关系^[25]
上箭头和下箭头分别表示中子和质子幻数。

核质量的精确测量可以用来计算核内的最后 1 (2) 个中子或质子的分离能。对同一个 Z ，随着中子数的增加(丰中子侧)，最后 1(2) 个中子结合能会逐渐减少，如果 N 为幻数，则分离能会有一个突然的变化。在丰质子侧也有同样的情况。因此，最后 1 (2) 个中子和质子的分离能也是鉴别幻数的一个重要依据。近几年来，由于离子阱的发展和重离子冷却储存环的运行，为远离核的质量精确测量提供了良好的条件^[28, 29]，使远离核质量的测量精度提高到 $10^{-6}-10^{-7}$ 。图 4 是 $\text{O}-\text{Ca}$ 各同位素的最后两个中子的分离能^[30]。从图中可以看出，当这些核素的中子数逐渐增加时，在 $N=16(\text{O}-\text{Mg})$, $30(\text{K}, \text{Ca})$ 的位置 S_{2n} 出现了突然的变化。这表明，对上述那些极丰中子的核素 $N=16$ 和 30 成为了幻数。当趋于中子滴线时，由于核内中子数相对稳定核极度增大，核子之间的相互作用使得内部中子轨道之间的间隙(如 sd 与 pf 之间)降低，从而导致基态的侵入态结构，使得原有的幻数消失，并出现大的形变，这是对 $N=20$ 幻数消失的一种解释^[31]。

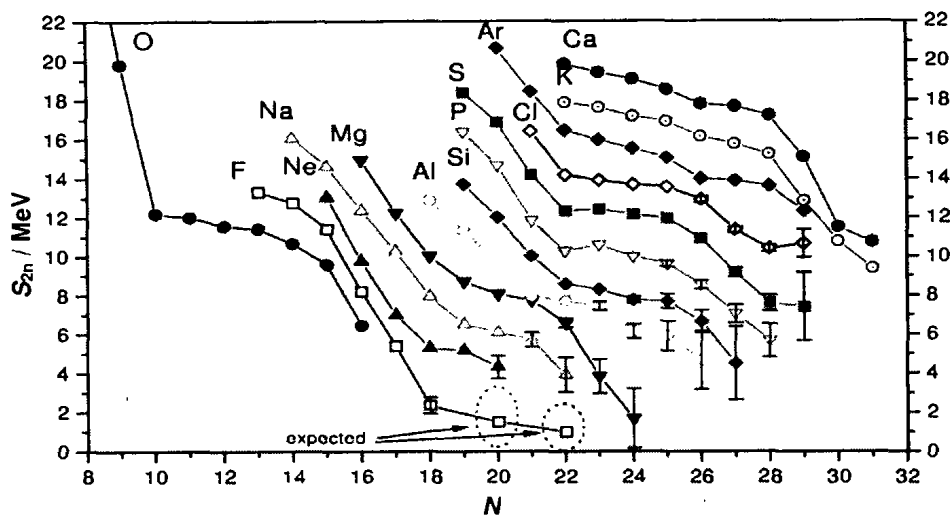


图 4 双中子分离能与中子数的关系

总之，如前面所述，核子-核子相互作用，核子对关联是决定核结构的重要因素。由于我们对这些相互作用的细节还不是非常清楚，特别是在非常远离稳定线的核了解的更少。为了更深入地了解远离核的性质和结构，不仅要研究对稳定核进行更深入的研究，更重要的是对远离核的谱学特性进行深入研究。近年来，理论上出现了各种模型，都只能描述远离核的某一局部或某一方面的特征，所以，正像 Talmi^[32] 在越南召开的放射性核讨论会上所说的“各种模型都已用来描述已有的数据和新的现象，都或多或少取得了成功，但是，它们中任何一个模型都不可能是万能的，不论是简单的壳模型，或是 HF, HFB, RMF 等等。实验核物理学家发现了非稳定核新领域，理论核物理学家与实验学家应共同去对这一新领域进行深入探讨和理解”。

3 总结

由于放射性束装置的出现和发展，为远离核的研究提出了新的条件，不仅合成了一大批远离稳定线的新核素，特别是一些关键性的核素，观测到了新的衰变模式，对滴线外的一些核素的存在和可能结构进行了探索。特别是近年来对远离核的谱学，包括 β^- 衰变 Q 值和第一激发态能量，进行了较多的研究，对远离核的质量进行了许多精确的测量，推出许多远离核的最后 1(2) 个中子和质子的结合能。这些实验数据表明在远离核区，一些原有的幻数消失，出现了新的幻数。这些现象的产生与核内核子相互作用、对关联有密切关系，这都需要更多的实验和理论的努力，以便对其有深入的理解。

参 考 文 献:

[1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, 55; 2 676.

[2] 刘祖华, 张锡珍, 张焕乔. 原子核物理评论, 2004, 21(1); 1 及其参考文献.

[3] 陈宝秋, 马中玉. 原子核物理评论, 2001, 18(1); 1; 陈奋策, 陈宝秋. 原子核物理评论, 2000, 17(2); 82.

[4] 沈文庆, 詹文龙, 叶沿林等. 原子核物理评论, 2001, 18(4); 206 及其参考文献.

[5] 靳根明. 原子核物理评论, 2004, 21(2); 73 及其参考文献.

[6] Novikov Yu N, Attallah F, Bosch F, *et al.* Nucl Phys, 2002, A697; 92.

[7] 袁双贵, 杨维凡, 徐岩冰等. 高能物理与核物理, 2000, 24, 1 193.

[8] 靳根明. 原子核物理评论, 2003, 20(2); 71 及其参考文献.

[9] Goldensky V I. Nucl Phys, 1960, 19; 482.

[10] Blank B. Phys Rev Lett, 1996, 77; 2 893.

[11] Giovinazzo J, Blank B, Borcea C. Nucl Phys, 2003, A722; 434C.

[12] Pfützner M, Badura E, Bigham C, *et al.* Eur Phys J, 2002, A14; 279.

[13] Koji Arai. Phys Rev, 2003, C68; 0343030.

[14] Korshennikov A A, Yoshida K, Aleksandror D V. Phys

- Lett, 1994, **B326**: 31.
- [15] Aoyama S. Nucl Phys, 2003, **A722**: 474C.
- [16] Meister M, Chulkov L V, Simon H, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **91**: 062504-1.
- [17] Korshennikov A A, Nikolskip E Yu, Kuzmin E A, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**(8): 082501-1 及其参考文献.
- [18] Ciesielsk F. Ph D Thesis, University Joseph Fourier, Grenoble 1997, ISN97-97.
- [19] Marques F M, Labiche M, Orr N A, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 044006.
- [20] Nigel Orr. Prog Theor Phys Supp, 2003, **146**: 201.
- [21] Bjorn Jonson. Nuclear Physics Report, 2004, **389**: 1 及其参考文献.
- [22] Lewitowicz M. Nucl Phys, 2003, **A722**: 67C.
- [23] Lepine-Szily A, Oliveira J M, Galante D, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A722**: 512C.
- [24] Shimoura S. Nucl Phys, 2003, **A722**: 164C.
- [25] Rituparna Kanungo, Tanihata I, Ozawa A, *et al.* Phys Lett, 2002, **B528**: 58 及其参考文献.
- [26] Iwasaki H, Motobayashi T, Sakurai H, *et al.* Phys Lett, 2001, **B522**: 227 及其参考文献.
- [27] Dillmann I, Kratz K-L, Wöhr A, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **91**: 162503-1.
- [28] Bollen G. Nucl Phys, 2001, **A693**: 3.
- [29] Toader C, Monsanglant C, Audi G. Nucl Phys, 2002, **A701**: 184C.
- [30] Dlouhy Z, Angelique J C, Anne R, *et al.* Nucl Phys, 2002, **A701**: 189C.
- [31] Caurier, Nowacki F, Poves A. Nucl Phys, 2004, **A743**: 14.
- [32] Igal Talmi. Nucl Phys, 2003, **A722**: 573C.

Progress of Studies on Nuclei far from Stability Line*

JIN Gen-ming, FU Fen, HUANG Xi

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Recently the predicted new decay model, for instance two-proton decay and β^- delayed fission have been observed in the investigations of the nuclei far from stability line. The existence of the nuclei located beyond the drip-line has already been studied experimentally and theoretically. It has been started to search for the neutron cluster in experiment by using neutron-rich nuclei. The researches of the spectroscopy and decay properties of the nuclei far from stability line are more and deeper, and found that in the region some old magic numbers are vanishing and some new magic numbers are appearing by comparing the energies of the first excited state, Q_β values and the separation energies of the last one or two neutrons and protons. The reasons for these are introduced briefly.

Key words: spectroscopy of nuclei far from stability; two proton decay; neutron cluster; nuclei beyond drip-line; magic number

* **Foundation item:** Knowledge Inovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No7); National Natural Science Foundation of China(10235020); Major State Basic Research Development Program (G2000077401)