

对质子滴线核 ^{19}Na 的 β 延迟质子衰变 的首次观察*

徐晓冀 马瑞昌 黄文学 胡志强 郭俊盛

郭应祥 徐连联 刘洪业 罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

王书鸿 孔登明 乔际民

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-11-24 收稿

摘 要

由 $^{20}\text{Ne}(p, 2n)^{19}\text{Na}$ 反应, 对质子滴线核 ^{19}Na 进行了研究, 实验在中国科学院高能物理研究所质子直线加速器上进行, 首次观察到了 ^{19}Na 的 β 延迟质子衰变, 测定其质子能量为 $1.10 \pm 0.08\text{MeV}$, 半衰期为 $47 \pm 20\text{ms}$, 它相应于 ^{19}Na 基态到 ^{19}Ne 的 7.62MeV 、 $T = 3/2$ 同位旋相似态的超允许 β 跃迁和由此态到 ^{18}F 基态的级联质子衰变。

关键词 质子衰变, β 延迟, 先驱核, 滴线核。

1 引 言

迄今已知, $A = 4n + 3, T_z = -3/2$ 核系列, 从 ^{23}Al 到 ^{55}Cu (除了 ^{39}Sc 以外) 都是 β 延迟质子先驱核^[1-7]。这些核的衰变特征是: 先驱核首先经由超允许或允许 β 跃迁衰变到子核中高于质子结合能的激发态, 然后以发射质子退激。此系列朝着轻质量区方向延伸就到了 ^{19}Na , 它是位于质子滴线区的一个核。由于 ^{19}Na 的质子结合能为负值 (-321keV)^[8], 长期以来, 它被认为是质子不稳定核。但是也存在这样的可能性, 质子从核内发射出来需要有一定的渡越时间以穿过原子核的库仑位垒和离心位垒, 在质子结合能为很小的负值时(例如 ^{19}Na 的情况)尤其可能如此。因此, 一个很有兴趣的问题是: ^{19}Na 的质子不稳定态是否能通过测量其可能的 β 延迟质子衰变而被探测到? 也即, 是否 ^{19}Na 也如 $A = 4n + 3, T_z = -3/2$ 系列核一样是一个 β 延迟质子先驱核? 此外, 据最新的理论预言, ^{19}Na 可能是一个质子晕核, 即它可被看成是一个具有以 ^{16}O 为核心, 外围被三个质子环绕的原子核, 如同已发现的中子晕核(例如 ^{11}Li) 一样^[9], 这样的原子核在核结构上必然会有反常的特性。因此, 在实验上探索 ^{19}Na 具有重要的理论意义, 至少它会告诉我

* 国家自然科学基金资助。

们在轻质量区,当原子核更加远离 β 稳定线以后,壳模型理论在多大程度上还适用。

2 实 验

实验是在中国科学院高能物理研究所质子直线加速器(BPLA)上进行的,分别用35.5MeV和29.0MeV的质子束流轰击浓缩气体氖靶(纯度为99.995%)。选择入射能35.5和29.0MeV是因为它们分别超过或低于 $^{20}\text{Ne}(p, 2n)^{19}\text{Na}$ 反应的反应阈能(30.3MeV)。实验中采用喷氦技术(He-jet)将反应产物传到收集地点,实验装置如图1所示。混合在氦气体(纯度99.999%)中的气体氖靶被质子轰击后,反应产物由具有氯化钠(光谱纯)为添加剂的氦气传输、经过毛细管传送到收集室。在此,反应产物从毛细管中喷

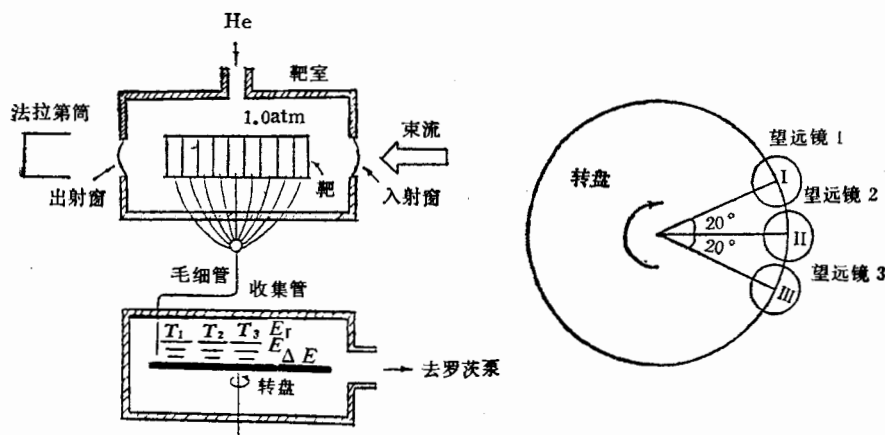


图1 氦喷系统和所使用的望远镜安排示意图

出并附着在收集盘上,随着盘的转动,放射性产物依次被三个粒子望远镜探测。这三个望远镜是沿着运动的放射源的轨迹圆放置,彼此相互分开 20° 。粒子望远镜由 $8\mu\text{m}$ 厚度的 ΔE (面积 50mm^2) $56\mu\text{m}$ 厚度的 E (面积 154mm^2)和 $150\mu\text{m}$ 厚度的 E_r (面积 314mm^2)金硅面垒半导体探测器组成,其能量分辨对于 $5.486\text{MeV}^{241}\text{Am}$ α 源为 50keV 。用此望远镜可对反应产物的放射性进行粒子鉴别。 E_r 探测器用作反符合测量,以消除正电子和其它长射程粒子的干扰。实验中并使用了所谓的“锁机技术”,以防止来自束流脉冲的很强的电磁辐射干扰。在上述实验装置上可用两种方法测定核的半衰期,一是以核的半衰期

$$\frac{\eta_1(g, t_w, t_{1/2})}{\eta_2(g, t_w, t_{1/2})} = \frac{R_1 \times I_2}{R_2 \times I_1}, \quad (1)$$

$$t_{1/2} = \frac{t_w \times \ln 2}{18(\ln I - \ln II)} = \frac{t_w \times \ln 2}{18(\ln II - \ln III)} = \frac{t_w \times \ln 2}{9(\ln I - \ln III)}, \quad (2)$$

$t_{1/2}$ 为参数拟合方程式(1),这里 η 是粒子望远镜的绝对探测效率^[10],它是 g, t_w 和 $t_{1/2}$ 的函数, g 是望远镜的几何因子, t_w 是转盘旋转一周所需的时间,而 R 是粒子谱中所特指峰的峰下面积, I 是积分束流,下标1,2分别指不同的转盘速度;第二种方法是按公式(2)得

到核的半衰期,这里 I、II 和 III 分别是由望远镜 1、2 和 3 所探测到的谱中特定峰的积分计数。首先用 ^{241}Am α 源和精密脉冲产生器对探测系统作能量刻度粗刻,然后用反应中同时产生的已知的 ^{20}Na 的 α 粒子能量作最终能量刻度。粒子能量还对金硅面垒半导体探测器的金、铝层窗和死层作了修正。

实验中,测量了由 $p + ^{20}\text{Ne}$ 反应得到的衰变粒子谱,并以同样的积分束流测量本底谱,即: 氦喷系统保持工作状态,但在氦气中不混以氖气。为了使所得的粒子谱有足够的统计,每测一个谱都累计了 50mC 的积分束流(部分谱累计了 12mC),它相当于 $5\mu\text{A}$ 的平均质子流强照射靶约 3 小时。

3 结果与讨论

在束流能量为 35.5MeV 时,由 $p + ^{20}\text{Ne}$ 反应得到的两维粒子谱如图 2 所示。从图中可清楚地看到谱中有 α 带和质子带,在双维谱左边及 α 带下面有三团计数,上面的两处相应于 ^{20}Na β 延迟低能 α 衰变和 ^{16}O 反冲,而最下面一块是正电子本底及电子学噪声。在粒子带中(特别在 α 带中可清楚看到),由几个斜条而不是圆斑代表着几组不同的粒子能量。这是由于放射源随着转盘运动,粒子穿过探测器的有效入射角不同,也即 ΔE 探测器的有效厚度在变化所致。 α 是来自 $^{20}\text{Ne}(p,n)^{20}\text{Na}$ 反应中产生的 $^{20}\text{Na}\beta$ 延迟 α 衰变,测到的 α 粒子能量半衰期及相对强度与文献[11]的结果完全一致。

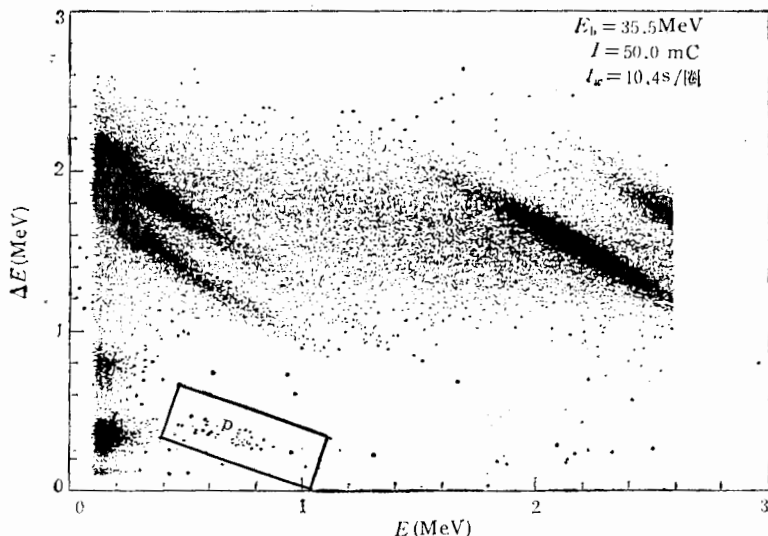


图 2 由 $p + ^{20}\text{Ne}$ 反应得到的粒子谱

需要强调指出的是,图 2 中右下角存在一条强度较弱但十分清楚的质子带。图 3 及图 4 分别显示了在转速为 10.4 秒/每圈和 5.0 秒/每圈情况下,由质子带所得到的质子谱 ($E_{\text{cor},1}^p = k_1\Delta E + k_2E + b$, k 为能量刻度系数)。由谱可见在 1.10MeV 处有一明显的质子峰,对于此一新的质子活性,质子能量被测定为 $1.10 \pm 0.08\text{MeV}$,按照公式(1),测得该质子峰的半衰期为 $47 \pm 20\text{ms}$ (毫秒)。十分有趣的是,当束流能量为 29.0MeV 时,也即

低于反应阈能 30.3MeV 时,没有测到这一新的质子活性。

根据以下的证据,我们指定本工作中观测到的 1.10MeV 新的质子放射性为 ^{19}Na 的 β 延迟质子衰变: (1)、该质子能量所反映的衰变能与 ^{19}Ne 7.62MeV 激发态和 ^{18}F 6.41MeV 基态的能级差^[12]一致;(2)、 $47 \pm 20\text{ms}$ 的半衰期和预言的 ^{19}Na β 衰变半衰期的

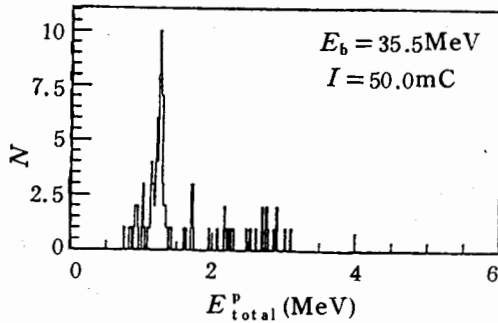


图 3 收集盘转速为 10.4 秒/圈得到的质子谱 (E_r 反符合后)

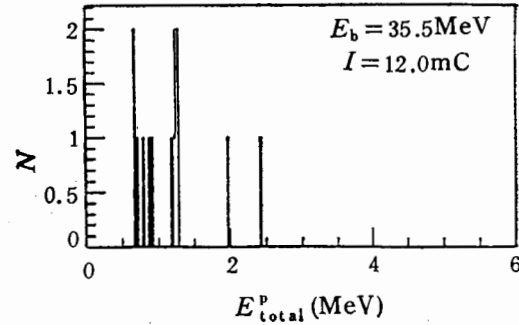


图 4 收集盘转速为 5.0 秒/圈得到的质子谱 (E_r 反符合后)

范围一致^[13]; (3)、此一质子新活性仅在束流能量为 35.5MeV 时出现,而在束流能量为 29.0MeV 时消失,说明在生成 ^{19}Na 的反应阈能 30.3MeV 之下,该质子活性不再出现;(4)、此一指定还基于以下的反应道分析:首先, ^{20}Na 不可能是这新的质子活性的来源,因为它的 Q_β 窗(即 $Q_\beta - B_p = 1.04\text{MeV}$) 太小不足以发射质子。再者, ^{20}Na 的半衰期为 447ms,这与半衰期测量值 47ms 很不一致。此外,按照已知的结果, ^{17}Ne 是 β 延迟质子先驱核,并可能在 $^{20}\text{Ne}(p, p3n)$ 反应中产生。但是此一反应的阈能是 50.13MeV,产生 ^{17}Ne 的可能性应该排除。除了 ^{17}Ne 以外, ^{18}Ne 、 ^{19}Ne 也会在 $p + \text{Ne}$ 反应中产生,但是由于它们的 $Q_\beta - B_p$ 都小于零,因而都不可能是 β 延迟质子先驱核。 ^{16}F 是质子不稳定核, ^{17}F 的半衰期很长 (64.5s), 这两个核也不可能是所观察到的新质子活性的来源。至于质子束流与靶室中其它材料发生反应的可能性,质子与入射窗钽、慢化室中的铜以及添加剂氯化钠,都不可能产生具有质子放射性的产物。最后, 1.10MeV 质子活性是否来自 $^{36}\text{Ar}(p, n)$ 反应中的 ^{36}K (尽管在 Ne 中的 ^{36}Ar 杂质仅为 $3 \times 10^{-2}\text{p.p.m.}$)? 回答也是否定的。因为 $^{36}\text{Ar}(p, n)$ 反应阈能为 13.96MeV, 如果 ^{36}K 确实在反应中产生, 在 35.5MeV 及 29.0MeV 束流轰击下都应看到此 1.10 质子活性, 且在 29.0MeV 情况下, 由于反应截面最大, 此质子活性应该更强, 这都与我们的实验事实不符; 而且 ^{36}K 的半衰期为 342ms, 显然与目前的结果不一致。而对于 ^{19}Na , 其 $Q_\beta - B_p = 4.77\text{MeV}$, 显然具有 β 延迟发射质子的可能性。实验中, 测到 ^{19}Na 的产生截面为 0.85 微巴, 它与 ALICE 的计算值在一个数量级内符合, 这也说明: 我们的实验结果是合理的和可信的。

综上所述,我们认为,在束流能量为 35.5MeV 的 $p + \text{Ne}$ 反应中,产生 1.10MeV 质子活性的原子核只能是 ^{19}Na 。

需要指出的是,在质子本底谱中,在 1.07MeV 处观察到一个峰。经分析,它是 ^{40}Sc 的 β 延迟质子衰变的贡献,而 ^{40}Sc 是由质子束流与 NaCl 添加剂中的 Ca 杂质的相互作用产生的。测到此质子活性的半衰期为 $192 \pm 10\text{ms}$, 这与 ^{40}Sc 已知的半衰期范围一

致。实验中, 调节转盘速度, 有效地抑制了该本底峰的干扰, 并据本底谱计数, 准确扣除了该本底的影响。本实验并测得 ^{19}Na 超允许跃迁分支比为 0.43%, 据此, 我们提出 ^{19}Na 的衰变纲图如图 5 所示。图中也提出了可能的 ^{19}Na β 延迟 α 衰变。由于存在很强的 α 本底, 本实验中无法观察到这一衰变。

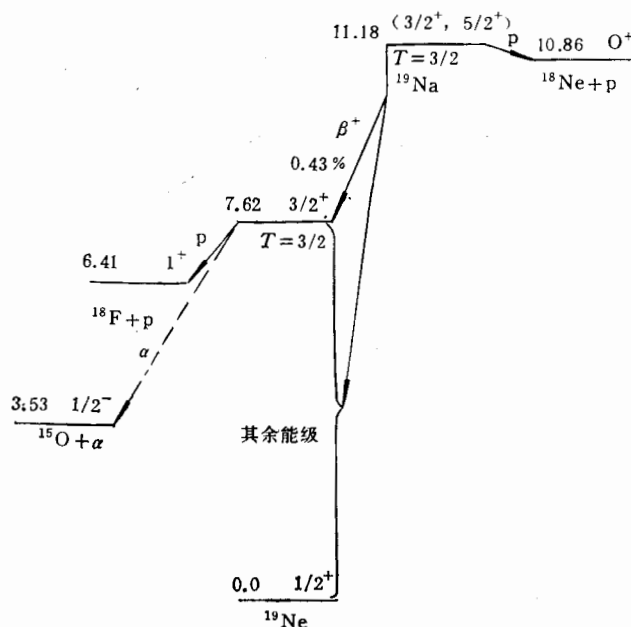


图 5 提出的 ^{19}Na 衰变纲图

4 结 论

在 $^{20}\text{Ne}(p, 2n)^{19}\text{Na}$ 反应中产生了质子滴线核 ^{19}Na , 在本工作中首次观察到该滴线核的 β 延迟质子衰变, 测定了 ^{19}Na β 衰变半衰期为 $47 \pm 20\text{ms}$, 其 β 延迟质子能量为 $1.10 \pm 0.08\text{MeV}$ 。它相应于 ^{19}Na 基态到 ^{19}Ne 的 7.62MeV 激发态 ($T = 3/2$, 是 ^{19}Na 基态的同位旋相似态) 的超允许 β 跃迁和由此激发态到 ^{18}F 基态的级联质子衰变。

我们对高能物理所质子直线加速器室的大力支持与合作, 特别是高效率地提供质子束流表示感谢。并感谢本所探测器组为我们研制许多具有良好性能的金硅面垒半导体探测器。

参 考 文 献

- [1] R. A. Gough, R. G. Sertro, Joseph Cerny, *Phys. Rev. Lett.*, 28(1972) 510.
- [2] M. Wiescher, J. Gorres, B. Sherrill, M. Mohar, et al., *Nucl. Phys.*, A484(1988) 90.
- [3] J. Aysto, X. J. Xu, D. M. Moltz et al., *Phys. Rev.*, C32(1985) 1700.
- [4] J. Aysto, J. Honkaen, K. Vierient et al., *Phys. Lett.*, 110B(1982) 437.
- [5] G. T. Ewan, E. Hagberg, J. C. Hardy et al., *Nucl. Phys.*, A343(1980) 109.
- [6] C. L. Woods, W. N. Catford, L. K. Fifield, N. A. Orr, *Nucl. Phys.*, A484(1988) 145.

- [7] P. Pougheon, J. C. Jacmart, E. Quinion et al., *Z. Phys.*, **A327**(1987) 17.
[8] W. Benenson, A. Guichard, E. Kashy et al., *Phys. Lett.*, **58B**(1975) 46.
[9] R. Anne, S. E. Arnell, R. Bimbot, H. Emling et al., *Phys. Lett.*, **250B**(1990) 19.
[10] 胡志强、徐晓冀, 原子能科学和技术, **28**(1994)396.
[11] D. F. Torgerson, K. Wien, Y. Fares et al., *Phys. Rev.*, **C8**(1973) 161.
[12] F. AJZENBERG-SELOVE, *Nucl. Phys.*, **A475**(1987) 1.
[13] CHART OF THE NUCLIDES 1988, 1992, Takayoshi Horiguchi, Takahiro Tachibana, Tsutomu Tamura.

First Observation of β -delayed Proton Decay of the Proton Drip Line Nuclide ^{19}Na

Xu Xiaoji Ma Ruichang Huang Wenxue Hu Zhiqiang Guo Junsheng
Guo Yingxiang Xu Lianlian Liu Hongye Luo Yixiao

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

Wang Shuhong, Kong Dengming, Qiao Jimin

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Received 24 November 1994

Abstract

^{19}Na , a nuclide on proton drip line, was studied by $^{20}\text{Ne}(p, 2n)^{19}\text{Na}$ reaction. Experiment was performed on the proton linear accelerator at Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences. The new decay mode of β -delayed proton decay was observed for the first time. The half-life of ^{19}Na was determined to be 47 ± 20 ms and its proton energy was measured to be 1.10 ± 0.08 MeV which is corresponding to super-allowed beta transition of ^{19}Na to excited state of 7.62MeV, the isospin analog state with $T = 3/2$ in ^{19}Ne , and subsequent proton emission to the ground state of ^{18}F .

Key words proton decay, β -delayed, precursor drip line nuclei.