

文章编号: 1007- 4627(2000)04-0259-03

质子滴线区新核素²⁵P 的鉴别*

肖国青, 詹文龙, 郭忠言, 孙志宇, 李家兴, 王金川, 王全进
孟祥伟, 江山红, 宁振江, 王猛, 陈志强, 王建丰
王建松, 田文栋, 王武生, 毛瑞士, 靳根明

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在兰州放射性束流装置 RIBLL 上, 利用磁刚度 $B\rho$ 、飞行时间 t_{TOF} 和多重望远镜 $\Delta E - E$ 联合探测方法测量了 $^{69} \text{MeV/u } ^{36}\text{Ar}$ 轰击 Be 靶产生的 P 同位素碎片的同位素分布, 并与 EPAX 经验公式的计算结果进行了比较, 在质子滴线区首次鉴别出了新核素²⁵P.

关键词: 新核素; P 同位素分布; 质子滴线

中图分类号: O571.2 文献标识码: A

1 引言

近年来, 人们特别关注质子滴线附近 P 同位素核素的研究。这主要有两个方面的原因, 一是 P 同位素的质子滴线位置还没有最后确定^[1], 以往的实验所鉴别到的 P 同位素链中同位旋最高的丰质子核素是²⁶P; 另一个是相对论平均场理论(RMF)^[2, 3]、壳模型^[4]和非相对论理论模型 Skyrme-Hartree-Fock(SHF)^[5]都预言了²⁶⁻²⁸P 丰质子核中单质子晕的存在, 并且与中子密度分布相比, 质子密度分布的尾巴随中子数的减小而逐渐增大。文献[2]中的计算结果还表明, ²⁵P 也是单质子晕候选核, 它的质子密度分布比²⁶P 核还要向外延展。因此, 如果从实验上能够判定²⁵P 的存在, 不仅能确定 P 同位素的滴线位置, 而且还会促使人们从实验上去验证 P 同位素的第4个质子晕核, 这对于系统地研究质子晕的形成机制具有特别重要的意义。

最近, Navin 等^[6]利用逆运动学敲出反应与退激 γ 进行符合的实验测量方法, 发现²⁶⁻²⁸P 核剥掉 $2s_{1/2}$ 态的质子后, 其剩余核具有窄的纵向动量宽度, 从实验上证实了²⁶⁻²⁸P 为质子晕核的理论预言^[2-5]。说明上述几种理论模型都可推广到用于描述远离稳定线核的性质。

2 实验方法

利用 HIRFL 提供的 69 MeV/u 的 $^{36}\text{Ar}^{17+}$ 作为初级束流轰击 ^9Be 靶(1 mm 厚), 其弹核碎裂反应产物由 RIBLL^[7, 8]进行收集、分离和鉴别。实验中初级束流的平均流强约为 20 enA。对于次级产物的鉴别采用了 $B\rho - t_{\text{TOF}} - \Delta E - E$ 联合鉴别方法, 该方法利用了 4 个 57° 的二极磁铁、17 m 长的飞行时间距离和 0° 角多重望远镜探测器系统, 因而具有很好的鉴别本领, 其质量分辨达到了 400。多重望远镜系统由厚度分别为 150, 150, 700 和 $2\ 000 \mu\text{m}$ 叠在一起的 4 片 ORTEC 全耗尽金硅面垒探测器(能量分辨为 0.8%)所组成, 灵敏面积为 150 mm^2 。在探测器前加有内径为 $\Phi 8 \text{ mm}$ 的铅制光栏, 以限制粒子进入探测器的入射角度。为了保证粒子沿束流的中心轨道传输, 并使得次级束的流强减弱至硅探测器所允许的范围内, 将位于第一焦平面处的狭缝开口在水平方向对称地设置为 $\pm 0.5 \text{ mm}$, 此时所对应的动量接收度为 0.24%, 降低动量接收度可以降低本底和提高粒子的鉴别能力。实验前, 利用 LISE 程序计算了²⁵P 的生成截面和产额, 并优化了 RIBLL 的磁铁设置参数。实验中, RIBLL 的 t_{TOF} 时间信号和硅探测器的定时信号所生成的符合信号被用来作为

* 收稿日期: 2000-11-20

* 基金项目: 国家杰出青年基金(19825115); 国家自然科学基金资助项目(19804012); 国家重点基金项目(19735010); 中国科学院九五重大基金项目; 中国科学院青年实验室基金; 973国家重点基础研究发展项目(G2000077401, G2000077404)

作者简介: 肖国青(1962-), 男(汉族), 河北承德人, 研究员, 从事核物理及原子物理研究。

获取系统的开门信号。获取率约为每秒 500 个事件，实验数据采集时间为 5 天。

3 结果和讨论

文献[1, 2]用 RMF 和 SHF 计算了²⁵P 最外层价质子的分离能，表 1 列出了计算结果。可以看出，不同的理论计算方法给出的结果相差很大。而滴线区核素，特别是晕核候选核的单质子分离能一般都较小，这样就很难根据理论来判定滴线区核素的存在，如双幻核⁴⁸Ni 曾被所有的理论都预言为非束缚核，但最后被实验鉴别出了它的存在^[9]。

表 1 理论计算的单质子分离能 S_p/MeV

核素	RMF TM 2	RMF NL-SH	SHF
²⁵ P	- 0.325	- 0.016	0.7

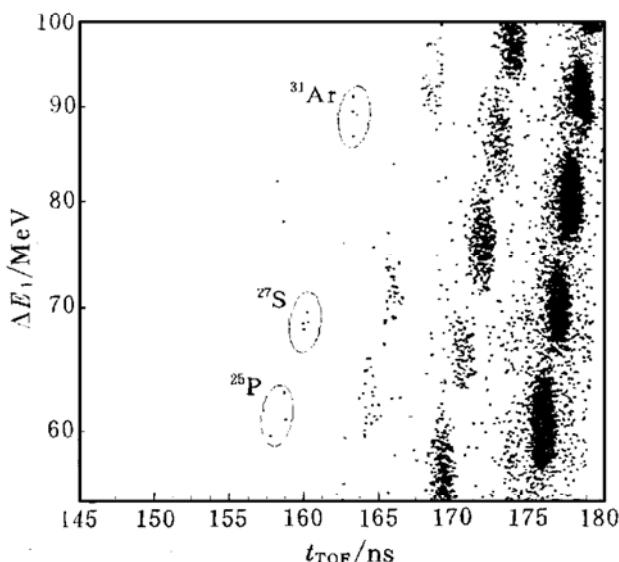


图 1 质子滴线区核素的双维关联图

图 1 给出了 P、S 和 Ar 等同位素位于质子滴线区的核素在第一片硅探测器中的能损 ΔE 与飞行时间 t_{TOF} 的双维关联散点图，其中³¹Ar 和²⁷S 是以前实验已观察到的 Ar 和 S 同位素链中最丰质子的核素。在现有的其它放射性束流装置上，由于凭借的实验方法不同和装置的性能所限，尚未见到有关²⁵P 的实验结果和数据的报道。从图中可以看出，我们在 $\Delta E - t_{\text{TOF}}$ 双维谱中²⁵P 的位置处测到了 3 个事件点，并且在后面的探测器上也看到了与此关联的事件点，所测得的²⁵P 在探测器中的能损与计算值相符。由于 RIBLL 具有相当好的鉴别能力，使得周围核素的本底干扰非常小，特别适合于用来开展质子滴

线区新核素的鉴别研究。

在 69 MeV/u 的能量下，重离子碰撞的反应机制较为复杂，它包含平均场、泡利阻塞和两体碰撞多个因素的共同作用。³⁶Ar 炮弹轰击铍靶后产生出的弹核碎片和拾取了少数核子的类弹碎片以接近炮弹的速度向前发射，共有原子序数从 1 到 20 的 100 多种核素被 RIBLL 装置分离、鉴别，并输送到探测靶室。实验测得的 P 同位素碎片的飞行时间谱如图 2 所示。可见，与弹核³⁶Ar 具有相同 N/Z 中质比的同位素³⁰P 的产额最高，显示出记忆效应，表明了同位素产额与弹核同位旋的相关性。为了获得更丰质子的核素，选择 N/Z 中质比低的炮弹较为有利。

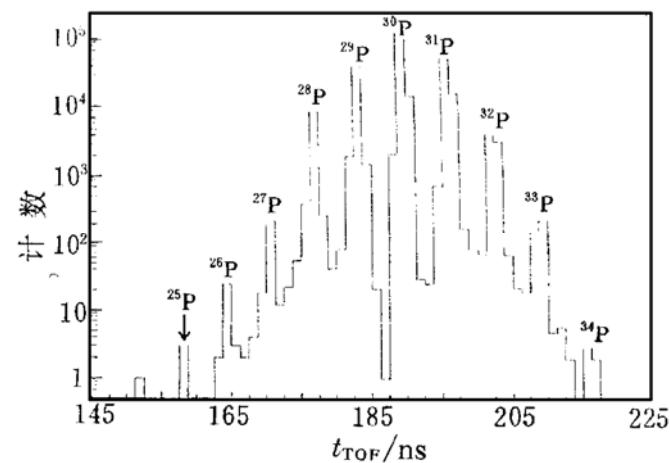


图 2 P 同位素碎片的飞行时间谱

图 3 给出了本次实验测量和 EPAX 经验公式^[10]计算出的 P 同位素碎片强度 (I) 随质量的分布。从图上可以看出，实验和计算结果在丰中子核素一边符合得较好。这与文献[11]中用 1 GeV/u 的⁴⁰Ar 轰击铍靶所得出的结果相一致，但文献[11]中没有对丰质子核素一边进行比较。图 3 显示出实验测得的丰质子核素的产额要比经验公式的计算结果低，如果只进行相对比较的话，两个结果的²⁶P/²⁵P 同位素比值是一致的。根据²⁶P/²⁵P 同位素比值和生成截

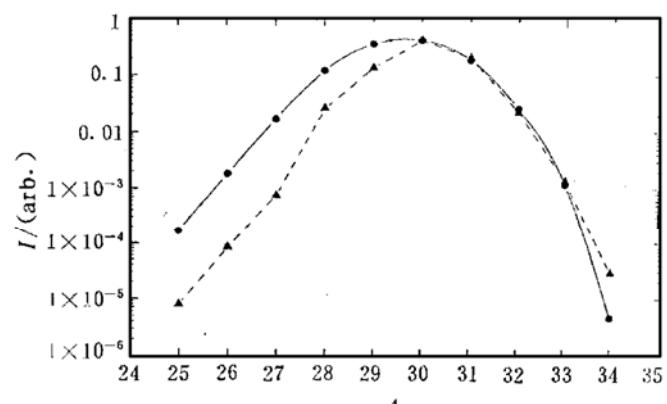


图 3 P 同位素碎片强度 (I) 随质量分布

— EPAX 经验公式计算值，— 实验测量值。

面比值提取出的²⁵P的半衰期寿命小于1 ms. EPAX 经验公式是从高能实验数据拟合得来的, 在高能时碎片蒸发中子的几率较高, 因而使得丰质子核素的产额相对增加和变宽. 另外, 靶核⁹Be 的中质比高于弹核³⁶Ar, 这也会造成丰质子核素产额的相对降低, 因此增加炮弹的入射能量和选择丰质子的靶子将会有利于提高 质子滴线区核素的产额.

参 考 文 献:

- [1] Cole B J. Proton and Two-proton Drip Lines in the sd Shell [J]. Phys Rev, 1998, C58: 2 831– 2 839.
- [2] Chen B Q, Ma Z Y, Gruemmer F et al. Relativistic Mean-field Theory Study of Proton Halos in the 2s1d Shell [J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 1998, 24: 97– 105.
- [3] Ren Zhongzhou, Mittig W, Sarazin F. Relativistic Mean-field Study on Proton Skins and Proton Halos in Exotic Nuclei [J]. Nucl Phys, 1999, A652: 250– 270.
- [4] Brown B A, Hansen P G. Proton Halos in the 1s0d Shell [J]. Phys Lett, 1996, B381: 391– 396.
- [5] Ren Zhongzhou, Chen Baoqiu, Ma Zhongyu et al. One-proton Halo in ²⁶P and Two-proton Halo in S [J]. Phys Rev, 1996, C53: R572– R575.
- [6] Navin A, Bazin D, Brown B A et al. Spectroscopy of Radioactive Beams from Single-nucleon Knockout Reactions: Application to the sd shell nuclei ²⁵Al and ^{26,27,28}P [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81: 5 089– 5 092.
- [7] 詹文龙, 郭忠言, 刘冠华等. 兰州放射性束流线 [J]. 中国科学, 1999, A29: 77– 84; 詹文龙, 郭忠言. 兰州放射性核束流线 [J]. 原子核物理评论, 1999, 16(4): 218– 223.
- [8] 肖国青, 詹文龙, 郭忠言. RIBLL 的状态及开展的部分实验结果 [J]. 原子核物理评论, 1999, 16(3): 145– 147.
- [9] Blank B, chartier M, Czajkowski S et al. Discovery of Doubly Magic ⁴⁸Ni [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84: 1 116– 1 119.
- [10] Sueggerer K, Blank B. Modified Empirical Parametrization of Fragmentation Cross Sections [J]. Phys Rev, 2000, C61: 034607-1– 034607-10.
- [11] Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L et al. Production Cross-section of Light Neutron-rich Nuclei from ⁴⁰Ar Fragmentation at about 1 GeV/nucleon [J]. Nucl Phys, 2000, A673: 411– 422.

4 结论

实验测量了69 MeV/u ³⁶Ar 弹核碎裂产生的P同位素碎片的质量分布, 并与经验公式 EPAX 的计算结果进行了比较. 对于丰中子核素, EPAX 与实验结果符合得较好; 但对于丰质子区, EPAX 计算的同位素产额比实验结果高出一个量级. 在实验上首次鉴别了理论预言的质子晕候选核²⁵P 新核素.

Identification of New Nuclide ²⁵P in Region of Proton Drip Line*

XIAO Guo-qing, ZHAN Wen-long, GUO Zhong-yan, SUN Zhi-yu, LI Jia-xing, WANG Jin-chuan, WANG Quan-jin, MENG Xiang-wei, JIANG Shan-hong, NING Zhen-jiang, WANG Meng, CHEN Zhi-qiang, WANG Jian-feng, WANG Jian-song, TIAN Wen-dong, WANG Wu-sheng, MAO Rui-shi, JIN Gen-ming

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

Abstract: The mass distribution of the phosphor fragments induced by projectile fragmentation reaction of 69 MeV/u ³⁶Ar + ⁹Be was measured at the projectile-fragment separator RIBLL at IMP. The fragment products were identified by determining the magnetic rigidity $B\beta$, the time of flight t_{TOF} and their energy loss ΔE . The experimental isotope distribution was compared to the result of the empirical parameterization EPAX. Three events for the new nuclide ²⁵P in the region of proton drip line were found in experiment of five days.

Key words: new nuclide; mass distribution of phosphor isotopes; proton drip line

* Foundation item: National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar (19825115); NSFC(19804012); National Major State Fund (19735010); 95 Major State Fund of the Chinese Academy of Science: Young Laboratory of the Chinese Academy of Science; 973 National Major State Basic Research and Development (G200077401, G200077407)