

文章编号: 1007-4627(2003)04-0231-04

P 同位素的质子滴线核研究*

陈立新, 肖国青, 郭忠言, 詹文龙, 李加兴, 孙志宇, 王武生,

王 猛, 陈志强, 胡正国, 白 洁, 李 琛, 毛瑞士

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 研究了在相对论平均场近似下 P 同位素的滴线核的性质, 首先在理论上探讨了²⁵P 作为 P 的滴线核存在的可能性及其可能具有的质子晕结构, 然后给出了在兰州放射性束流装置上²⁵P 的实验鉴别结果.

关键词: 质子晕; 相对论平均场; 滴线核

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

放射性束流装置的建立使人们得以大量开展对远离 β 稳定线核素的研究, 这方面的实验已经发现了一些没有预期到的新现象, 证实了晕核的存在^[1-3]. 理论和实验上对质子晕核做了大量的研究工作, 并取得了显著的成果, 建立了核芯加价核子的两体(一个价核子)或三体(两个价核子)晕核结构模型.⁸B 已经是得到普遍认可的质子晕核. 近来, 利用相对论平均场(RMF)模型对质子晕核的研究表明,²⁶P 和²⁷P 分别是具有一个和两个价质子的质子晕核^[4, 5], 实验观测也证实了这一点^[6]. 然而对 P 的质子滴线核到现在还没有取得共识^[7], 故人们对²⁵P 的理论与实验研究给予特别的关注^[8]. 我们研究了在 RMF 理论模型下 P 的质子滴线核的性质, 从理论上分析了²⁵P 存在的可能性及其可能具有的晕结构, 同时还计算了 S 和 Si 质子滴线附近核的性质, 以作为理论上的比较.

RMF^[9, 10]理论是近来广泛用于描述核基态特性的理论之一, 它是在量子场论的基础上建立起来的核多体理论. RMF 模型被证明是一个非常成功的描述核特性的简明工具, 对核的一些基态特性联系实际, 如束缚能、单粒子能级、核电荷分布及核物质密度分布等, 都能较好的描述. RMF 模型也被广泛地应用于核结构研究并且取得了很大的成功,

它的计算结果和已有的实验数据符合得相当好. RMF 理论模型的出发点是一个包括了核子和 σ , ω , ρ 介子、光子场及其相互作用的拉氏量, 核子间的相互作用通过交换 σ , ω , ρ 介子和光子来实现. 详细描述见文献^[9, 10]. 运用 Euler-Lagrange 方程, 从拉氏密度可以得到核子的 Dirac 方程及介子场和电磁场的运动方程. 通过求解这些方程, 就可以得到核的一些基态特性. 但目前几乎不可能对这些非线性量子场方程做精确求解, 所以在计算处理时采用 RMF 近似. 对有限核物质引入相关的对称性, 如时间反演对称性及电荷守恒, 来简化处理. 在 RMF 计算中忽略了反粒子的贡献及所谓的无海近似. 经简化后就可以求解核子的 Dirac 方程和介子场的 Klein-Gordon 方程^[9, 10], 从而能得出核的一些基态特性, 如束缚能和核物质密度分布.

本文第 2 部分将给出我们利用 RMF 模型计算所得的结果并做相应的分析, 第 3 部分是在 RIBLL 实验装置上所获得的结果. 第 4 部分为结论.

2 RMF 模型计算结果

RMF 模型经不断的发展完善, 在理论处理上已发展了多套计算参数, 本文主要采用 NL-SH 参数^[11]. NL-SH 参数值分别为:

收稿日期: 2003 - 06 - 23; 修改日期: 2003 - 07 - 11

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401); 国家杰出青年基金资助项目(19825115); 国家自然科学基金资助项目(10105011, 10205019)

作者简介: 陈立新(1976-), 男(汉族), 安徽望江人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究.

$$\begin{aligned}
 M &= 939.0 \text{ MeV}; m_\sigma = 526.059 \text{ MeV}; \\
 m_\omega &= 783.0 \text{ MeV}; m_\rho = 763.0 \text{ MeV}; \\
 g_\sigma &= 10.443 6; g_\omega = 12.955 1; g_\rho = 4.382 8; \\
 g_2 &= -6.909 9 \text{ fm}^{-1}; g_3 = -15.833 7.
 \end{aligned}$$

表 1 列出了用 NL-SH 计算的 RMF 结果, 其中 B 为核的束缚能, S_{1p} 和 S_{2p} 分别为一个质子和两个质子的分离能, R_p , R_n 和 $R_p - R_n$ 分别为质子、中子均方根半径及其差值. 表中还给出了外层核子的均方半径. 在计算中, 对关联由 Moller-Nix 公式处理. 从表 1 中可以看出, ^{25}P 的一个质子分离能非常小, 其处在 $2s_{1/2}$ 壳层的一个质子与核芯结合得非常松散, 该壳层核子分布有一个异常增大的均方半径 (22.01 fm^2), 远大于 R_p 的平方 ($\approx 10 \text{ fm}^2$), 表明价

核子弥散在核芯之外. 而其 $1d_{5/2}$ 壳层均方半径仅为 11.96 fm^2 , 其间的距离之大只能从晕结构来获得合理的解释. 从质子和中子均方根半径之差亦可看出: ^{27}P , ^{26}P 和 ^{25}P 的 $R_p - R_n$ 值依次增大, 说明 ^{25}P 的质子分布有一个大的弥散. 已知道 ^{26}P 和 ^{27}P 分别是具有一个和两个价质子的质子晕核, 所以 ^{25}P 极有可能是具有一个价质子的质子晕核. 图 1 给出了 ^{25}P 质子、中子及价核子等的密度分布, 曲线 halo 为价核子的密度分布. 该分布图与 ^{26}P 及 ^{27}P 的同种分布图^[4-6] 有着类似的特征. 从图中可以很清楚地看到质子和中子分布半径的差异及从价核子的密度分布中看到晕的存在证据. 图 2 是 Si, P 和 S 的靠近质子滴线核素的质子分离能图.

表 1 利用 NL-SH 计算的 RMF 结果

核素	B/MeV	S_{1p}/MeV	S_{2p}/MeV	R_p/fm	R_n/fm	$R_p - R_n/\text{fm}$	$\overline{R^2}_{1d_{5/2}}/\text{fm}^2$	$\overline{R^2}_{2s_{1/2}}/\text{fm}^2$
^{22}Si	135.39	0.84	2.08	3.08	2.57	0.51	12.91	
^{23}Si	150.48	2.83	5.77	3.03	2.65	0.38	12.23	
^{24}Si	165.44	4.81	9.91	2.99	2.71	0.28	11.78	
^{25}Si	181.91	6.12	13.01	2.97	2.77	0.20	11.46	
^{26}Si	197.59	7.83	16.33	2.95	2.82	0.13	11.22	
^{27}Si	214.57	9.37	19.53	2.94	2.86	0.08	11.04	
^{28}Si	231.22	10.95	22.73	2.93	2.90	0.03	10.90	
^{25}P	165.52	0.08	4.89	3.16	2.73	0.43	11.96	22.01
^{26}P	182.66	0.75	6.87	3.11	2.78	0.33	11.63	19.71
^{27}P	199.13	1.54	9.37	3.08	2.83	0.25	11.39	18.20
^{28}P	216.91	2.34	11.71	3.06	2.87	0.19	11.21	17.15
^{29}P	234.39	3.17	14.12	3.04	2.91	0.15	11.07	16.33
^{30}P	244.59	4.64	18.88	3.04	3.00	0.04	11.18	15.37
^{26}S	165.62	0.10	0.18	3.29	2.74	0.55	12.14	21.82
^{27}S	183.38	0.72	1.37	3.23	2.80	0.43	11.81	19.73
^{28}S	200.69	1.56	3.10	3.19	2.85	0.34	11.57	18.33
^{29}S	219.17	2.26	4.6	3.16	2.89	0.27	11.38	17.32
^{30}S	237.47	3.08	6.25	3.14	2.93	0.21	11.23	16.54
^{31}S	247.83	3.24	7.88	3.13	3.02	0.11	11.38	15.50
^{32}S	261.20	6.13	12.45	3.13	3.08	0.05	11.45	14.85

质子晕核结构之所以一度受到质疑的原因在于人们认为库仑位垒会妨碍质子晕的形成. 为此让我们来仔细考察一下在 RMF 近似下 ^{25}P 中核势的分布, 特别是在核表面处核势的变化. 图 3 给出了

用 NL-SH 计算所得的 ^{25}P 中的介子势分布. 我们知道 σ 介子势提供的是核子间中程吸引作用, ω 介子势提供的是短程排斥作用. 图中列出了库仑势、 ρ 介子势、 $\sigma + \omega$ 势及总的核势分布. 从图 3 中可看

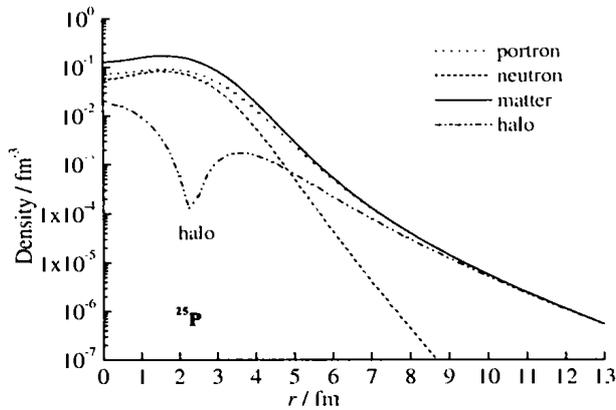


图 1 ²⁵P 中的质子、中子和价核子(曲线 halo)密度分布

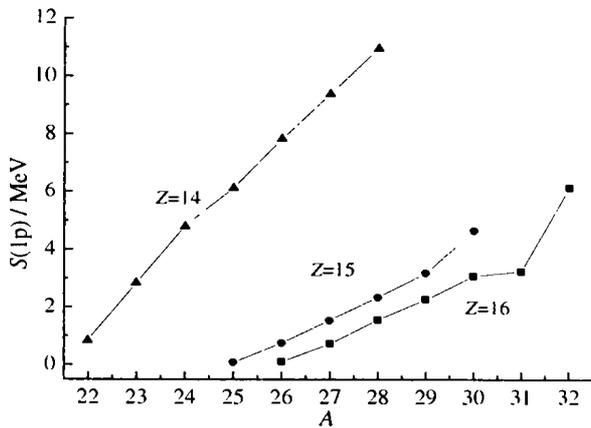


图 2 Si, P 和 S 丰质子区同位素的最后一个质子的分离能

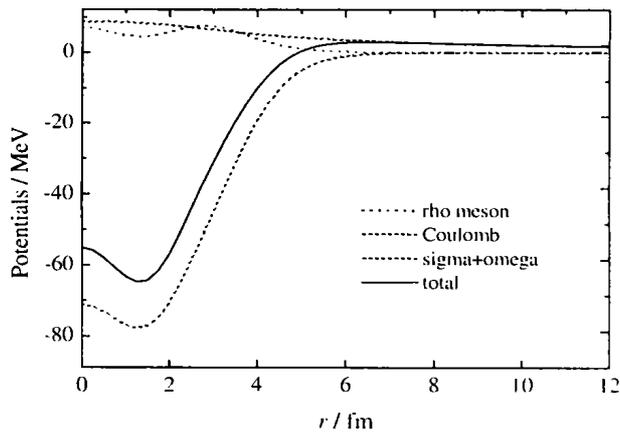


图 3 ²⁵P 中的介子势 (计算参数 NL-SH)

出, 在 r 较大(约大于 6 fm)处总核势将主要取决于库仑势的大小, 而在核内部($r < 6$ fm)处, 总核势主要表现为吸引 $\sigma + \omega$ 势. 前面已知 ²⁵P 的晕核子的均方半径为 22.01 fm², 对应的均方根半径为 4.69 fm, 在 $r = 4.69$ fm 处, 从图 3 可看出其总核势主要

表现为吸引 $\sigma + \omega$ 势, 在接近 6 fm 处库仑排斥作用开始强于吸引势作用, 这时将出现库仑位垒. 由于 ²⁵P 的晕核子出现在库仑势处于次要地位的区域, 库仑位垒并不妨碍 ²⁵P 中质子晕的出现.

3 实验结果

在兰州放射性束流装置(RIBLL)上, 利用磁刚度 $B\rho$ 和飞行时间 t_{TOF} 及多重望远镜 $\Delta E-E$ 联合探测方法测量了 69 MeV/u ³⁶Ar 轰击 Be 靶(厚度 1 mm)产生的 P 同位素碎片分布, 在质子滴线区首次鉴别出了新核素 ²⁵P^[12]. 利用 HIRFL 提供的 69 MeV/u 的 ³⁶Ar¹⁷⁺ 作为初级束轰击 ⁹Be 靶, 在 RIBLL 上进行弹核碎裂反应产物的收集、分离和鉴别. 次级产物的鉴别采用了 4 个 57° 二极磁铁 + 17 m 长的飞行距离 + 0° 角多重望远镜探测系统, 该探测系统具有很高的质量分辨能力. 图 4 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} 的双维关联图. 从图中可以看出, 在双维谱中 ²⁵P 的位置处存在 3 个事件点, 并且在后面的探测器上也看到了与此相关联的事件点. 由于 RIBLL 的鉴别能力相当强, 我们认为这个结果是可靠的.

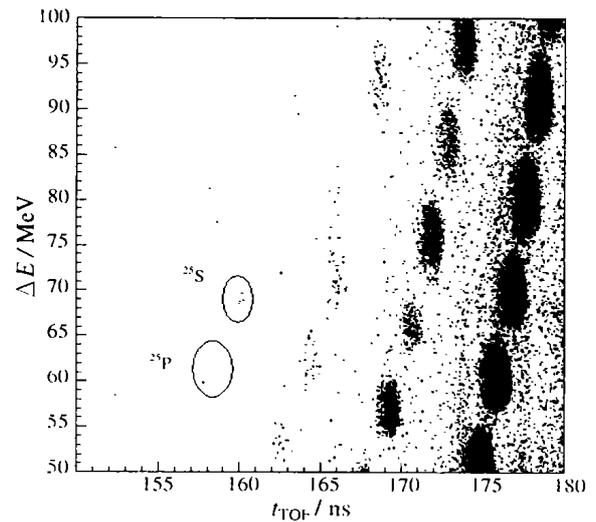


图 4 质子滴线区核素的双维关联图

4 结论

RMF 理论经过多年的运用已被证明是一个对核基态特性描述很成功的模型. 本文通过对 $Z = 15$ 附近丰质子核的计算, 在理论上描述了质子晕核的

一些特性. RMF 模型计算结果表明, ^{25}P 也是具有一个价质子的质子晕核. 同时我们利用 RIBLL 装

置首次在实验上鉴别出了 ^{25}P , 这是在 P 同位素滴线核的确定上作出的最新研究成果.

参 考 文 献:

- [1] Lalazissis G A, Raman S. Proton Drip-line Nuclei in Relativistic Mean-field Theory[J]. Phys Rev, 1998, **C58**(3): 1 467.
- [2] Zhukov M V. Existence of Proton Halos Near the Drip Line [J]. Phys Rev, 1995, **C52**(6): 3 505.
- [3] Morlock R, Kunz R, Mayer A, *et al.* Halo Properties of the First $1/2^+$ State in ^{17}F from the $^{16}\text{O}(p, \gamma)^{17}\text{F}$ Reaction[J]. Phys Rev Lett, 1997, **79**(20): 3 837.
- [4] Ren Zhongzhou, Mittig W, Sarazin F. Relativistic Mean-field Study on Proton Skin and Proton Halos in Exotic Nuclei[J]. Nucl Phys, 1999, **A652**: 250.
- [5] Ren Zhongzhou, Chen Baoqiu, Ma Zhongyu, *et al.* One-proton Halo in ^{26}P and Two-proton Halo in ^{27}S [J]. Phys Rev, 1996, **C53**: 2 572.
- [6] Navin A, Bazin D, Brown B A, *et al.* Spectroscopy of Relativistic Beams from Single-nucleon Knockout Reactions: Application to the *sd* shell nuclei ^{25}Al and $^{26, 27, 28}\text{P}$ [J]. Phys Rev Lett, 1998, **81**(23): 5 089.
- [7] Cole B J. Proton and Two-proton Drip Lines in the *sd* Shell [J]. Phys Rev, 1998, **C58**(5): 2 831.
- [8] Chen B Q, Grimmer F, Krewald S, *et al.* Relativistic Mean-field Theory Study of Proton Halos in the $2s1d$ Shell[J]. J Phys, 1998, **G24**: 97.
- [9] Gambhir Y K, Ring P. Relativistic Mean Field Theory for Finite Nuclei[J]. Ann Phys, 1990, **198**: 132.
- [10] Reinhard P G. The Relativistic Mean-field Description of Nuclei and Nuclear Dynamics[J]. Rep Prog Phys, 1989, **52**: 439.
- [11] Sharma M M, Nagarajan M A, Ring P. Rho Meson Coupling in the Relativistic Mean Field Theory and Description of Exotic Nuclei[J]. Phys Lett, 1993, **B312**: 377.
- [12] 肖国青, 詹文龙, 郭忠言等. 质子滴线区新核素 ^{25}P 的鉴别 [J]. 原子核物理评论, 2000, **17**(4): 259.

Study of Proton Dripline of P Isotope*

CHEN Li-xin, XIAO Guo-qing, GUO Zhong-yan, ZHAN Wen-long, LI Jia-xin,

SUN Zhi-yu, WANG Wu-shen, WANG Meng, CHEN Zhi-qiang,

HU Zhen-guo, BAI Jie, LI Chen, MAO Rui-shi

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

Abstract: Great progress was made on the study of P isotope both in theory and in experiments, but the final conclusion about the dripline of P isotope has not been made. In this article the properties of P isotope was studied in the frame work of relativistic mean field (RMF). First the probability of ^{25}P as the dripline nuclei of P isotope and the proton halo structure of ^{25}P was discussed, and then the RIBLL experiential result of ^{25}P is presented.

Key words: proton halo; relativistic mean field; dripline nuclei

* **Foundation item:** Major State Basic Development Program (G2000077401); National Natural Fund for Distinguished Young Scholar (19825115); National Natural Science Foundation of China(10105011, 10205019)