

$N=Z$ 原子核性质的研究*

邢 正^{1, 2, 3} 吴兴举^{1, 2, 3} 徐进章^{1, 2} 陈呈冀^{1, 2, 3}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2 (兰州大学现代物理系 兰州 730000)

3 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4 (六安师范专科学校物理系 安徽六安 237012)

摘 要 论述了 $N=Z$ 核实验和理论研究的历史和现状, $N=Z$ 是研究 $T=0$ 对关联最好的核区, 实验表明 $T=0$ 的 $n-p$ 对关联起着重要作用, 理论研究必须同时包括 $T=0$ 和 $T=1$ 的对关联, 研究它们之间竞争及相变.

关键词 原子核结构 同位旋 对关联

分类号 O571.21

1 引言

对关联是核结构研究的重要课题, 它对原子核的性质有重大影响. $N=Z$ 核由于中子、质子填充同样轨道, 导致壳效应增强, 是观测同位旋 $T=0$ $n-p$ 关联的最好核区. 由于 $n-p$ 对凝聚可能产生新的集体运动模式, 对 $T=1$ 的对关联(主要是 $p-p$ 、 $n-n$ 对关联)进行了广泛的研究. 对关联存在的直接实验证据是在原子核一系列性质上都表现出奇偶差, 例如原子核质量及丰度的奇偶差、能谱的奇偶差和转动惯量的奇偶差等, 而转动惯量的减少以及回弯现象是核内存在超流相的关键信号. 有关 $T=0$ 对关联还尚待进一步研究. 原则上说, Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) 方法可同时处理 $T=1$ 和 $T=0$ 的对关联, Bogolyubov 变换的一些必要推广经 Goswami^[1]、Goodman^[2] 的努力也已完成. 文献[2]把能隙方程推广到同位旋空间, 这样, 核子之间的对关联不仅包括处于时间反演轨道上的核子对($\alpha-\bar{\alpha}$ 成对方式)之间的 $T=0$ 和 $T=1$ 对关联, 同时还包括处于空间全同轨道上的核子对($\alpha-\alpha$ 成对方式)之间的 T

$=0$ 对关联, 文献[3]进一步把这些公式应用到原子核的转动. 应该指出, 早期的研究工作已认识到 $n-p$ 对关联的重要性, 但是 $T=0$ 和 $T=1$ 对相(Pairing phase)是分别计算的, 因而无法研究两种对相之间的竞争和相变.

由于大型高效探测设备的建立以及放射性核束的迅速进展, 1994年 GSI 和 GANIL 分别独立合成和鉴别了 ^{100}Sn , 1996年完成了对其质量的测量. 这是已知的最重的 $N=Z$ 双幻核, 已经接近质子滴线, 使得研究沿 $N=Z$ 线 $n-p$ 对关联变得更为重要. 例如, (1) 原子核的高速转动对不同的对关联模式 ($T=0$ 和 $T=1$) 的影响, 它们之间的相变; (2) $n-p$ 对关联对滴线核稳定性的影响; (3) $n-p$ 对关联对质子滴线位置的影响; (4) 什么是 $n-p$ 对关联的实验指印(Fingerprint); (5) $n-p$ 对关联的基本构件是什么? (6) $n-p$ 对关联是否能形成静的对凝聚; (7) $n-p$ 对关联对 β 衰变、氦核转移反应、原子核高自旋态以及核物质性质的影响等.

本文的目的是介绍 $N=Z$ 核的研究现状, 探讨在兰州重离子加速器放射性束装置

收稿日期: 1999-06-19.

* 国家自然科学基金(项目号19575025)和核工业科学基金(项目号 Y7197AY103)共同资助.

(HIRFL-RIBLL) 和冷却储存环 (HIRFL-CSR) 上开展这一课题的可能性.

2 n-p 对关联的实验基础

2.1 n-p 相互作用经验值^[4]

从结合能可以提取 n-p 相互作用强度, 即最后一个质子和最后一个中子之间的相互作用

$$\begin{aligned} &\delta V_{pn}(Z+1, N+1) \\ &= \frac{1}{4} \{ [B(Z+2, N+2) - \\ &\quad B(Z+2, N)] - \\ &\quad [B(Z, N+2) - \\ &\quad B(Z, N)] \}, \end{aligned} \tag{1}$$

这里, B 是实验测得的偶偶核的(负)结合能, 这一表达式显然抵消了 p-p、n-n 相互作用以及来自平均场的贡献. 对绝大多数 $N=Z$ 核, $|\delta V_{pn}|$ 是相邻的 $N \neq Z$ 核的两倍或更多, 其大小在 1.4~6 MeV 之间, 因此在 $N=Z$ 核, 形成一个奇点, 图1(a)给出部分实验值. 为了检验奇点出现的原因, 可以利用简单壳模型进行计算. 图1(b)给出了一个例子, 剩余作用采用最简单的表面 δ 相互作用, 当只有 $T=1$ 相互作用时, 在 $N=Z$ 不出现奇点, 仅当同时包括 $T=0$ 和 $T=1$ 的相互作用时, 才能给出同实验相符的结果, 当 $N=Z$ 时, 由于 $T=0$ 的剩余相互作用使 $|\delta V_{pn}|$ 最大, 出现奇点.

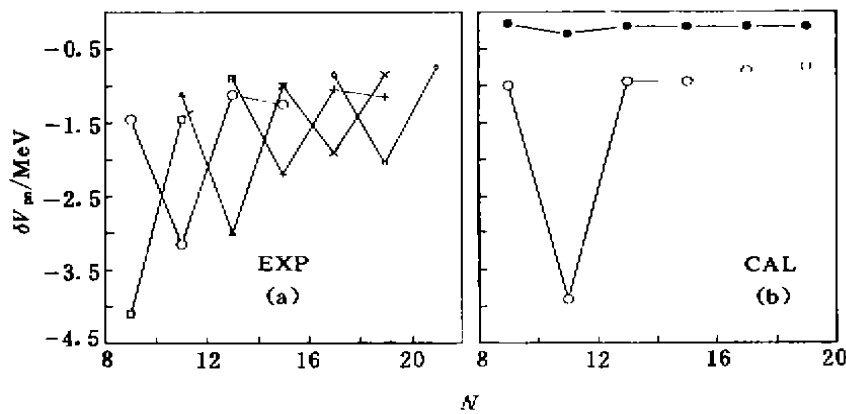


图1 (a) $Z=9\sim 19$ 由实验结合能提取的 δV_{pn} ; (b) $Z=11, Z=9\sim 19$ 壳模型计算的 δV_{pn} .^[4]
 $\square Z=9, \cdot Z=11, \blacktriangle Z=13, + Z=15, \times Z=17, \diamond Z=19$. \bullet 相应于 $V_{T=0}=1.6$ MeV, $V_{T=1}=0.8$ MeV; \circ 相应于 $V_{T=0}=0, V_{T=1}=0.8$ MeV.

2.2 $N=Z$ 核集体性质的演化

(1) 四极形变

在 $Z=38$ 以上的 $N=Z$ 核, 由于布居截面很小, 对 ^{80}Zr 、 ^{84}Mo 只测出了两个激发态, 而 ^{88}Ru 以上则完全未知. 图2给出了 $Z=32\sim 42$ 之间 $N=Z$ 偶偶核的部分能级图, 由 Grodzins 关系

$$\beta_2^2 = 1228 / [A^{7/3} E(2_1^+)]$$

可以估计出由 ^{64}Ge 到 ^{76}Sr 、 ^{80}Zr , 其四极形变 β_2 由 0.08 增加到 0.40, 而 ^{84}Mo 又减小为 0.30. 可见四极形变在 ^{76}Sr 和 ^{80}Zr 达到最大, 而从 ^{84}Mo 以后应该逐渐减小, 到 ^{100}Sn 变为球形. 由于 ^{76}Sr 、 ^{80}Zr 、 ^{84}Mo 已远离稳定线, Grodzins 关系是否仍然正确还需进一步证实, 从实验上研究 $N=Z=44$ ^{88}Ru 的性质就显得非常必要.

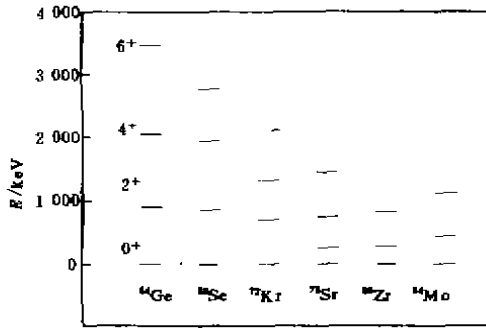


图2 $Z=32\sim 42$ $N=Z$ 偶核 Yrast 能级^[5]

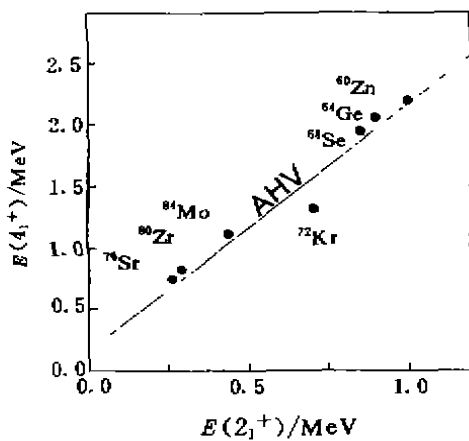


图3 $Z=30\sim 42$ $N=Z$ 偶核 $E(4_1^+)$ 和 $E(2_1^+)$ 之间的关系

● 为实验值, — 为集体偶偶核非谐振子(AHV)值.

(2) $E(4_1^+)$ 和 $E(2_1^+)$ 之间的关联

$\tau_4 \equiv E(4_1^+)/E(2_1^+)$ 是原子核集体性的另一特征量, 随着 $E(2_1^+)$ 和 $E(4_1^+)$ 减小, τ_4 增加, 原子核集体性增加. 通常认为 $\tau_4 \approx 2.0\sim 2.2$ 为振动核, $\tau_4 \approx 2.5\sim 3.0$ 为过渡核. 而 $\tau_4 \approx 3.3$ 为转动核. 对 ^{76}Sr 、 ^{80}Zr 有 $\tau_4 \approx 2.86$, 而 ^{84}Mo $\tau_4 \approx 2.52$ 为典型的过渡核. 最近对 ^{84}Mo 利用行列式对称性投影变分法(VAMPIR)计算的 $\tau_4 = 3.15$, 同实验值有明显的矛盾^[5]. 另外由文献[6], 对 $Z=38\sim 82$, $2.05 < \tau_4 < 3.15$ 的集体偶偶核, 其能谱可以用一普适的非谐振子(AHV)来描述,

$$E(4_1^+) = 2E(2_1^+) + 0.156 \text{ MeV} . \quad (3)$$

对绝大多数已知偶偶核, 其偏差小于5%, 散布于直线两边. 图3给出了 $Z=30\sim 42$, $N=Z$ 偶偶核 $E(4_1^+)$ 和 $E(2_1^+)$ 之间的关系, 除 ^{72}Kr (由于形状共存, 见下)外, 所有 $N=Z$ 核的实验值, 系统地偏向一边, 表明 $N=Z$ 核具有特殊性, 这种特殊性可能来自 n-p 之间的关联.

2.3 带交叉频率的推迟

图4给出了 $^{72, 74, 76}\text{Kr}$ 实验 Routhian 和转动频率的关系, 并同推转模型的计算进行了比较. 对 $^{74, 76}\text{Kr}$ 由于 $\pi g_{9/2}$, $\nu g_{9/2}$ 的顺排引起了带交叉, 带交叉频率 $\hbar\omega_c \approx 0.65 \text{ MeV}$. 理论值(长椭球形变)很好地重复了实验值, 而对 $N=Z=36$ 的 ^{72}Kr 核, 4个 $g_{9/2}$ 准粒子顺排使集体性减小, 四极形变减小, 因此理论

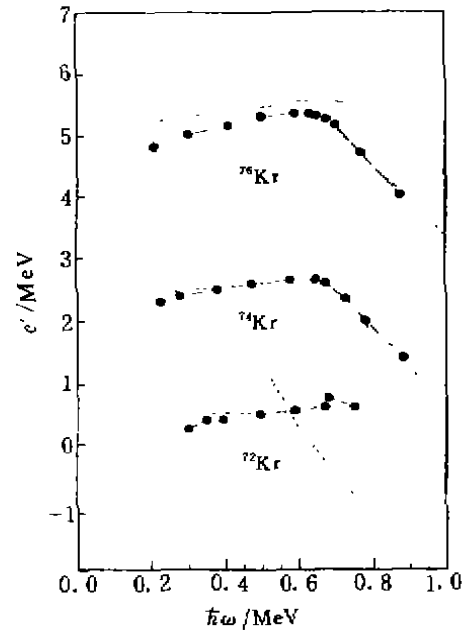


图4 $^{72, 74, 76}\text{Kr}$ 实验和理论 Routhian 同转动频率之间的关系^[7]

● 为实验值, — 采用长椭球形变, 对 $^{72, 74, 76}\text{Kr}$ β_2 分别为 0.43、0.39 和 0.39; ... 为扁椭球形, β_2 分别为 0.35、0.35 和 0.29; —·— 是 S 带计算结果, β_2 分别为 0.30、0.28 和 0.26.

预言带交叉频率为 $\hbar\omega_c \approx 0.5 \text{ MeV}$ ，而观测的带交叉频率 $\hbar\omega_c \approx 0.75 \text{ MeV}$ ，大大推迟。同样的理论为什么对 $N=Z$ 核就不能解释实验值，这可能是由于 $N=Z$ 核必须考虑 $T=0$ 的对关联。如何定量考虑这一影响是一个值得研究的问题。此外，图4中还清楚表明在低频时 ^{72}Kr 为扁椭球形，而高频时则为长椭球形。

3 理论研究的进展

最近 Satula 等^[8]引入推转平均场同时包括 $T=0$ 和 $T=1$ 的成对方式，采用粒子数投影研究了 n-p 对关联的基本性质以及 $T=0$ 和 $T=1$ 对相之间竞争。为了定量进行比较，必须知道对力强度。p-p 和 n-n 对力强度可由拟合奇偶质量差来得到，但 n-p 对力强度并不清楚。对 $N \approx Z$ 核，由同位旋对称，假定对力强度 $G_{pp(nn)}^{T=1} \approx G_{np}^{T=1}$ ，而对 $T=0$ 的 n-p 对力引入参数 $\chi^{T=0}$ ，

$$\begin{aligned} \chi^{T=0} &= G_{np}^{T=0} / G_{np}^{T=1}, \\ G_{np}^{T=1} &= (G_{nn}^{T=1} + G_{pp}^{T=1}) / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

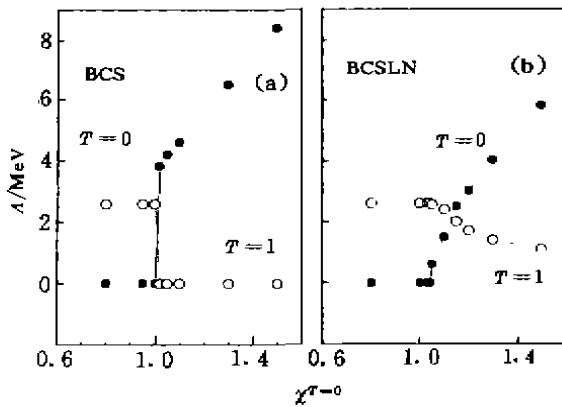


图5 $N=Z$ 核能隙和参数 $\chi^{T=0}$ 之间关系
(a)未用粒子数投影，(b)用了粒子数投影^[1]。

因此参数 $\chi^{T=0}$ 表示 $T=0$ 的 n-p 对力和 $T=1$ 的 n-p 对力强度之比，是 $T=0$ 对力强度的相对值，而 $T=1$ 的 n-p 对力强度定义为 n-n 和 p-p 对力强度的平均值。图5给出了在 $\hbar\omega = 0$ 时， $N=Z$ 核能隙 Δ 和参数 $\chi^{T=0}$ 之间的

关系，图(a)采用 BCS 近似，图(b)采用 Lipkin-Nogami 方法，对粒子数投影恢复其对称性。由图可见采用 BCS 近似，在 $\chi^{T=0} < 1$ (即 $G_{np}^{T=0} < G_{np}^{T=1}$) 时， $T=1$ 对能量上优于 $T=0$ 对；在 $\chi^{T=0} = 1$ ($G_{np}^{T=0} = G_{np}^{T=1}$) 时，是高度简并的；而 $\chi^{T=0} > 1$ ($G_{np}^{T=0} > G_{np}^{T=1}$) 的区域相应于纯的 $T=0$ 的 n-p 对相。因此 $T=0$ 对和 $T=1$ 对之间的突然相变是 BCS 近似的普遍特征，即只存在一种对关联模式。但是若采用粒子数投影后，结果就相当不同，为了激活 $T=0$ 的 n-p 对相，对力强度的临界值要更大， $\chi_{\text{crit}}^{T=0} \approx 1.1$ 。在 $\chi^{T=0} > \chi_{\text{crit}}^{T=0}$ 时， $T=0$ 的 n-p 对关联同 $T=1$ 对关联共存，粒子数投影使 $T=0$ 和 $T=1$ 对的突然相变变得较为平缓。

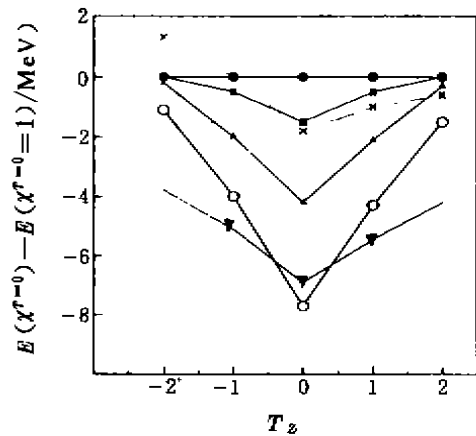


图6 $T=0$ 对关联对 Cr 同位素附加结合能的影响^[1]

● $\chi^{T=0} = 1.1$, □ $\chi^{T=0} = 1.2$, ▲ $\chi^{T=0} = 1.3$,
○ $\chi^{T=0} = 1.4$, ▼ WET, × ETF.

为了说明 $T=0$ n-p 对关联仅在 $N=Z$ 附近一个小区域起作用，图6计算了 $T_z=0$ 附近 Cr 同位素由 $T=0$ 对关联引起的附加结合能，对参数 $\chi^{T=0}$ 分别取 1.1、1.2、1.3 和 1.4，WET 是 Wigner 能量项，而 ETF 是推广的 Thomas-Fermi 模型计算的结果，因此 $T=0$ n-p 对关联可能是 Wigner 能量项的微观来源，这里 $T=0$ 对力强度 $G^{T=0} \approx 1.2 G^{T=1}$ 。

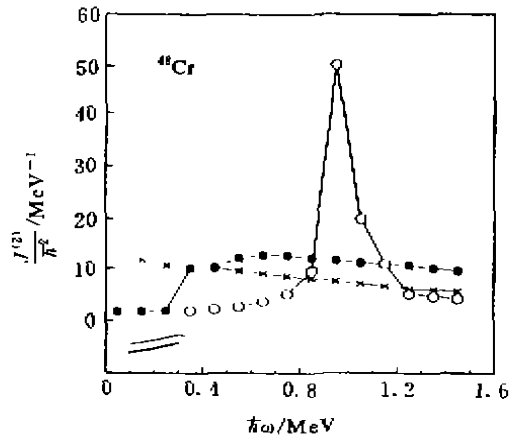


图7 ^{48}Cr 动力学转动惯量同转动频率的关系
 ○ 只有 $T=1$, $T=\pm 1$ 对力; ● 同时包括 $T=0$, $T=1$ 对; × 表示不考虑对力^[6].

为了研究转动对相变的影响, 图7给出了计算的 ^{48}Cr 动力学转动惯量同 $\hbar\omega$ 的关系, 其中实心圆表示同时考虑 $T=0$ 和 $T=1$ 对的结果, 在 $\hbar\omega=0$ 时, $T=0$ 对力相对强度 $\chi^{T=0} < \chi_{\text{crit}}^{T=0}$, 因此 $T=0$ 对力并不起作用, 只有 $T=1$ 对起作用, 然而在某一转动频率 $\hbar\omega_{\text{crit}}$ 时, $T=0$ 对被激活, 造成 $J^{(2)}$ 突然增加, 这也是一种相变. 这一效应可以看作由于Coriolis力和离心力使准粒子沿转动轴顺排, 这种顺排减弱了 $T=1$ 对关联, 而增强了 $T=0$ 的n-

p对关联. 在 $T=0$ 相, 角动量由n-p对沿转动轴逐渐光滑顺排而形成, 而不必拆对, 因此角动量的构成完全不同于 $T=1$ 相. 随着转动频率的增加, $T=0$ 的对关联趋于饱和. 应该注意, $T=0$ 相总是同 $T=1$ 的p-p和n-n对相共存, 然而 $T=0$ 的n-p对关联对动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 的影响是较为复杂的. 在 $T=0$ 对关联出现时核的转动有点类似于刚体, 但在大的转动频率时, $J^{(2)}$ 比刚体转动惯量要大得多.

4 小结

由于大型高效探测设备的建立和放射性核束的发展, 使沿 $N=Z$ 线研究n-p对关联变得更为重要. 实验中观测到的n-p相互作用的经验值、集体性质的演化和带交叉频率的推迟等现象都表明, $T=0$ 的n-p对关联起着重要的作用, 然而仍然缺乏明确的实验指印. 另一方面, 理论工作也未充分进行, 虽然原则上说HFB方法可同时处理 $T=0$ 和 $T=1$ 的对关联, 但是 $T=0$ 的n-p对到底起什么作用, $T=0$ 和 $T=1$ 对的相互竞争和相变知道得也不多, 无论如何, 恢复粒子数守恒在理论处理中是重要的.

参 考 文 献

- Goswami A. Treatment of Neutron-proton Correlations. Nucl Phys, 1964, 60(2); 228~240
- Goodman A L. Generalized Gap Equations and the Coherence of the α - α pair Field. Nucl Phys, 1972, A186(3); 475~492
- Nichols K, Sorensen R A. Cranked HFB Calculations for ^{32}S and ^{36}Ar . Nucl Phys, 1978, A309(1, 2); 45~58
- Brenner D S, Wesselborg C, Casten R F *et al.* Empirical p-n Interactions; global trends, configuration sensitivity and $N=Z$ enhancements. Phys Lett, 1990, B243(1, 2); 1~6
- Bucurescu D, Alvarez C R, Ur C A *et al.* Evolution of Collectivity Along the $N=Z$ Line. The ^{44}Mo Nucleus. Phys Rev, 1997, C56(5); 2497~2501
- Casten R F, Zamfir N V, Brenner D S. Universal Anharmonic Vibrator Description of Nuclei and Critical Nuclear Phase Transitions. Phys Rev Lett, 1993, 71(2); 227~230
- Angelis G, Fahlander C, Gadea A *et al.* $T=0$ Pairing Correlations and Band Crossing Phenomena in $N=Z$ Nuclei. Nucl Phys, 1998, A630; 426c~433c
- Satula W, Wyss R. Competition between $T=0$ and $T=1$ Pairing in Proton-rich Nuclei. Phys Lett, 1997, B393(1, 2); 1~6

Study of Nuclei with $N=Z$

Xing Zheng^{1,2,3} Wu Xingju^{1,2,4} Xu Jinzhang^{1,2} Chen Xingqu^{1,2,3}

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000)

2 (Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

3 (Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

4 (Physics Department, Liuan Teacher's College, Liuan, Anhui 237012)

Abstract The history and current status of the study of $N=Z$ nuclei are reviewed. $T=0$ n-p pairing correlation is expected to play an important role in the structure of the nuclei along $N=Z$ line. Both $T=0$ and $T=1$ pairing modes should be included in the theoretical models. Phenomena like possible competition and phase transition between different pairing modes are becoming important issues in nuclear structure.

Key words nuclear structure isospin pairing correlation

Classifying number O571.21

(上接第180页)

13 Ren Zhongzhou, Chen Baoqiu, Ma Zhongyu *et al.* One-proton Halo in ^{26}P and Two-proton Halo in ^{27}S . *Phys Rev*, 1996, C53, R572~575

14 Brown B A, Hansen P G. Proton Halos in the $1s0d$ Shell. *Phys Lett*, 1996, B381, 391~396

15 Chen B Q, Ma Z Y, Gruemmer F *et al.* Relativistic Mean Field Theory Study of Proton Halos in the $2s1d$

Shell. *J Phys, G: Nucl and Part Phys*, 1998, 24, 97~105

16 Navin A, Bazin D, Brown B A *et al.* Spectroscopy of Radioactive Beams from Single-nucleon Knockout Reactions: Application to the sd Shell Nuclei ^{25}Al and $^{20,27,28}\text{P}$. *Phys Rev Lett*, 1998, 81, 5 089~5 092

Study of Exotic Nuclei

Ma Zhongyu Chen Baoqiu

(Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000)

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract We briefly present the physical aspects in the study of exotic nuclei with radioactive nuclear beams and introduce the main theoretical methods, models and present status. A few theoretical problems, such as pairing, coupling to the continuum, shell effects, spin-orbit interactions and proton halos, are discussed.

Key words exotic nuclei paring correlation spin-orbit interaction proton halo

Classifying number O571.22