

在放射性束装置上进行新核素鉴别及其衰变性质的研究*

杨永锋 刘军辉

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 综述了近年来在放射束装置上进行新核素鉴别及其衰变性质研究取得的一些成果, 并简要介绍了即将在兰州放射性束装置上开展的奇异核衰变性质的研究工作.

关键词 放射束装置 新核素 衰变性质

分类号 O571.3

1 引言

1951 年, Copenhagen 小组^[1]首次在在线同位素分离器(ISOL)上产生了低能放射性束流, 此后这种技术一直用于远离稳定线核的研究. 1979 年 Berkeley 的 G Westfall 等^[2]首次得到由中高能重离子(212 MeV/u ⁴⁸Ca)弹核碎裂反应产生的、用磁谱仪进行快速质量和元素分离的中高能放射性束流, 并鉴别出了 14 种新核素. 此后随着 GANIL 的 LISE 以及 RIKEN 的 RIPS、GSI 的 FRS 和 MSU 的 A1200 等基于中高能弹核碎裂反应的放射束装置的建成, 为奇异核的研究提供了另一种有力的工具.

在基于中高能弹核碎裂反应的放射束装置上进行奇异核研究具有以下优点: (1) 弹碎片高度前冲, 放射性束装置对其有较高的接收效率. (2) 碎片全剥离, 避免了分析不同的电荷态而带来的不便. (3) 可由 $B\rho\text{-}\Delta E\text{-TOF}$ 方法对所研究核素进行清楚的鉴别. (4) 可研究核素的寿命仅受其在放射性束装置中飞行时间的限制, 一般为几百 ns. 所以 LISE 建成后, 对每一种束流都鉴别出了大量新核素, 对其中产额较大的也通过 β 延发 γ 、带电粒子和中子等进行了衰变性质的研究, 使得对奇异核的研究在中子滴线和质子滴线方向得到了很大的扩展. 此后的 RIPS、

FRS、A1200 等放射束装置建成后, 加速了一些丰中子和缺中子束流(如 ⁴⁸Ca、³⁶S、⁵⁸Ni、^{78,86}Kr、⁹²Mo 和 ¹⁰⁶Cd 等)的产生, 分别鉴别了一些新核素. 近年来各实验室通过提高主束流强度、加速以前未在放射束装置使用过的较重的丰中子和缺中子束流(如 ¹¹²Sn、¹²⁴Xe 和 ²³⁸U 等)以及提高探测系统的灵敏度, 使奇异核的研究又取得了较大的进展. 例如, 1994 年 GANIL 和 GSI 鉴别了长期以来核科学家一直都在试图合成的双幻核 ¹⁰⁰Sn^[3, 4], 1995 年 GSI 鉴别了 ⁷⁸Ni^[5], 1997 年 GANIL 确定 ²⁸O 为非结合核^[6], 1996 年 GSI 鉴别出了 ⁴⁹Ni, 接近了双幻核 ⁴⁸Ni^[7]. GSI 使用 FRS 从 ²³⁸U 的裂变碎片中鉴别出了 100 个以上的新核素^[8].

本文将简要介绍近几年来在放射束装置上进行奇异核研究取得的一些进展以及我们拟在兰州放射束装置(RIBLL)上开展的奇异核研究工作.

2 缺中子核研究

2.1 $T_z = -7/2$ 核 ⁴⁵Fe 和 ⁴⁹Ni 的首次观测^[7]

GSI 的 B Blank 等人使用 600 MeV/u 的 ⁵⁸Ni 束流, 在 FRS 上首次观测了两个 $T_z = -7/2$ 的核 ⁴⁵Fe 和 ⁴⁹Ni, 以及 $T_z = -3$ 的核 ⁴²Cr, 但没有观测到 ³⁸Ti ($T_z = -3$). 本实验的意义

* 收稿日期: 1999-03-2.

在于:

(1) 表明⁴⁵Fe 和⁴⁹Ni 很可能是仅有的两个可以从实验上观测的 $T_z = -7/2$ 核, 因为轻和重的 $T_z = -7/2$ 核⁴¹Cr 和⁵³Zn 预计的半衰期小于 10^{-13} s. ⁴²Cr 为第 4 个 $T_z = -3$ 的核, 其余 3 个分别为²²Si、⁴⁶Fe 和⁵⁰Ni, 也有可能仅有以上这 4 个是可从实验上观测的 $T_z = -3$ 的核. 另外, ⁴⁵Fe、⁴⁹Ni 和⁴²Cr 的寿命大于几百 ns, 而³⁸Ti 的寿命小于几百 ns. 本实验还表明, 在放射性束装置上观测的双幻核⁴⁸Ni 和⁴⁸Ca 也许是唯一的双幻核的镜象核, 这对研究镜对称有重要意义.

(2) ⁴⁵Fe 的观测为研究双质子衰变模式提供了最好的目标核. 30 年前已从理论上预言了双质子衰变, 对研究对关联有重要意义. 双质子衰变可能是发射²He, 也有可能是发射两个空间非关联的质子. 从能量上来说, 双质子衰变先驱核不能发射单个质子. 到目前为止, 只对⁶Be 和¹²O 核观测到双质子衰变^[9], 但这两个核的双质子衰变能远高于库仑位垒, 其半衰期小于 10^{-21} s. 此外, 测量

结果表明两个质子为相继发射的两步过程. Brown 的新理论^[10] 预言, ³⁹Ti、⁴⁵Fe 和 ⁴⁸Ni 为最好的双质子衰变核, 其半衰期在 $1 \mu\text{s} \sim 150 \text{ ms}$ 之间. 已证明³⁹Ti β 衰变为主要衰变模式, 而⁴⁸Ni 在本次实验未被观测到.

(3) 此研究为确定本质量区质子滴线提供了依据, 没有观测到超过⁴⁰Se、⁴⁶Mn 和⁵⁰Co 的奇 Z 核, 说明以上几个奇 Z 核素已达到质子滴线.

(4) ⁴⁵Fe 和⁴⁹Ni 比相同质量数的稳定核多 7 个质子, 这为研究迄今尚未观测到的衰变模式 $\beta_4\text{p}$ 、 $\beta_5\text{p}$ 和 $\beta_2\text{p}\alpha$ 等提供了条件.

2.2 ⁷⁸Kr 碎裂产生的新核素和天体物理 rp 过程的终结点^[11]

GANIL 在 LISE 上使用 73 MeV/u ⁷⁸Kr 束流鉴别出天体物理学家很感兴趣的 5 个新核素: ⁶⁰Ga、⁶⁴As、^{69,70}Kr 和⁷⁴Sr, 但没有观测到⁶⁹Br ($T_{1/2} < 100 \text{ ns}$). 这一事实改变了对这一区域 rp 过程的认识. 现在认为 ⁶⁸Se 为 rp 过程的终结点, ⁶⁰Ga 和⁶⁴As 的观测为这一区

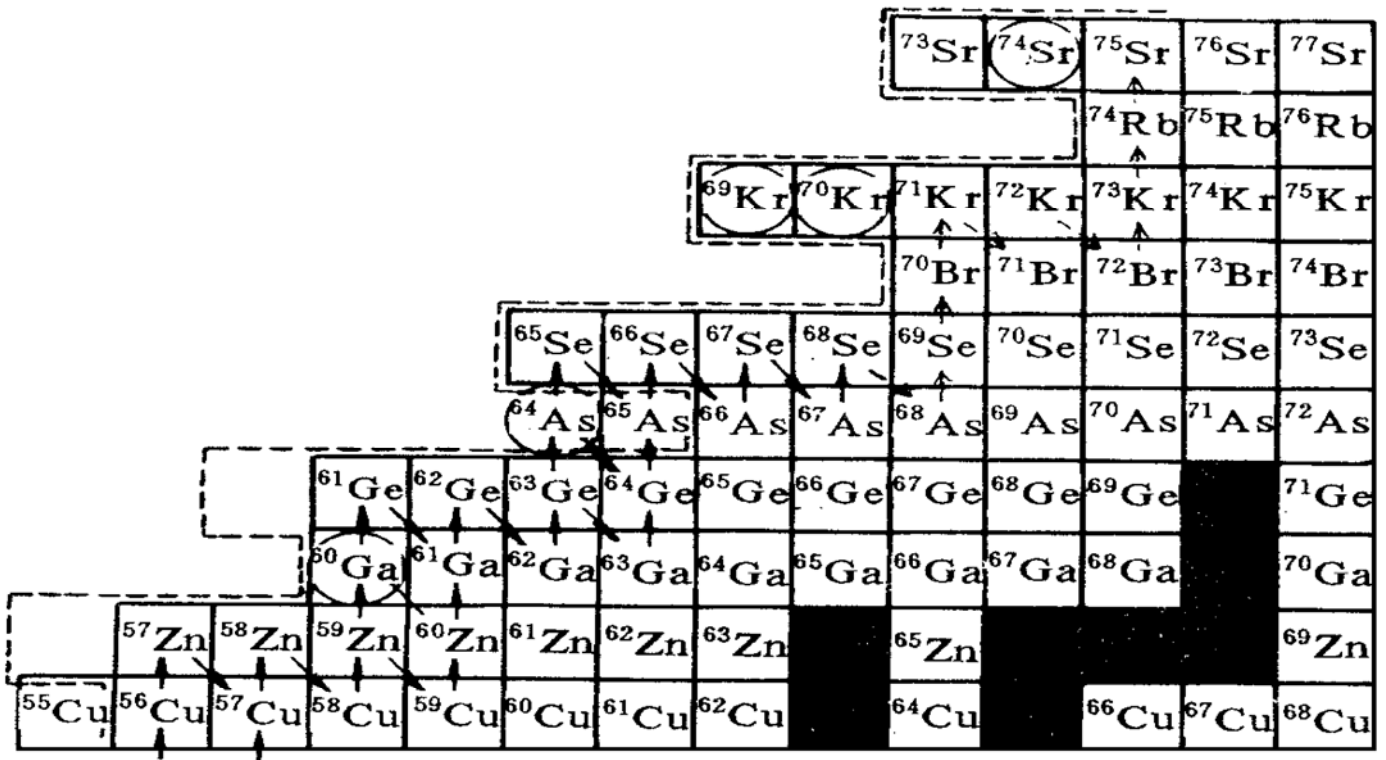


图 1 Cu 至 Sr 区 RP 过程的路径^[11]

圆圈内的为首次鉴别的新核素, — 为理论预言的质子滴线.

域的 rp 过程提供了新的分支. 图 1 给出了本实验观测确定的在终结点⁶⁸Se 附近 rp 过程的可能路径, 超过⁶⁸Se, 核素的合成通过慢质子俘获过程向更高质量区拓展.

近年来还在 $A \approx 100$ 区鉴别出^{94,95}Ag、^{92,93}Pd、^{90,91,92,93}Rh、⁸⁸Ru^[12]、^{103,104}Sb、⁹⁸In、⁹¹Pd、⁸⁹Rh、⁸⁷Ru^[13] 及¹⁰⁰Sn^[3, 4] 等缺中子核新核素, 研究了^{22,23,24}Si、²²Al^[14]、^{36,37}Ca^[15, 16] 和^{40,41}Ti^[17] 等核的 β 延发质子衰变和 γ 衰变特性.

3 丰中子核研究

3.1 $Z \approx 10$ 区新核素的鉴别和半衰期测量^[6, 18-20]

GANIL 和 RIKEN 使用³⁶S、⁴⁸Ca、⁵⁰Ti 和⁴⁰Ar 等束流, 在 $Z \approx 10$ 区得到了以下结

果: 证明²⁸O 和³³Ne 为粒子不稳定核; 鉴别了³¹Ne、^{37,38}Mg 和^{40,41}Al 5 个新核素; 测量了¹⁹B、²²C、²³N、^{27,29}F 和²⁹⁻³²Ne 的 β 衰变半衰期.

以上研究, 使得人们对轻丰中子滴线核的认识又深入了一步, 测量到的 β 衰变半衰期与壳模型计算在考虑基态为球形 sd 壳和形变 fp 壳侵入态混合时的结果一致^[6].

3.2 从²³⁸U 的裂变碎片中鉴别新核素^[8]

GSI 在 FRS 上首次对 750 MeV/u ²³⁸U 束流产生的裂变碎片进行了分离和鉴别, 得到了以下结果: (1) 鉴别出 100 个以上的新核素, 包括双幻核⁷⁸Ni. (2) 所鉴别的新核素在两个质量区达到了 r 过程的路径(图 2), 对理解 r 过程有重要意义. (3) ²³⁸U 裂变是除了弹核碎裂之外提供次级束的又一途径, 其提供

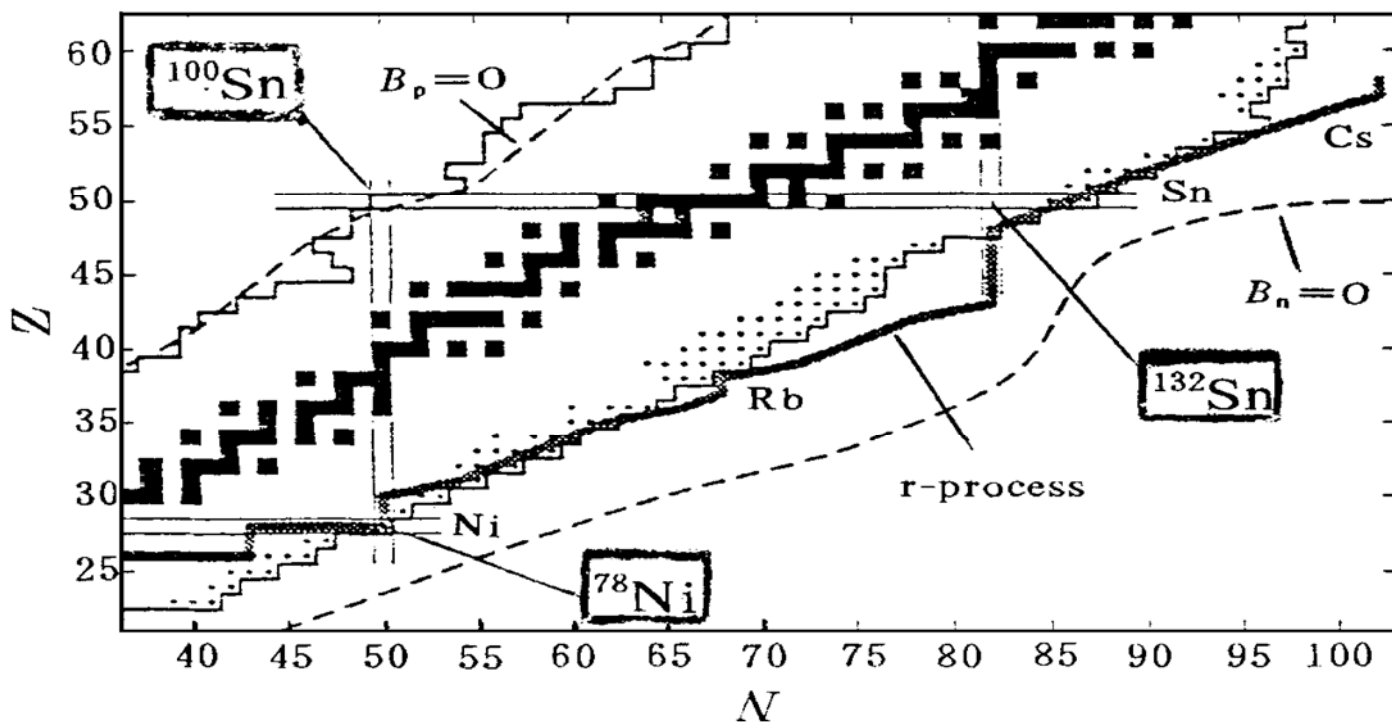


图 2 从²³⁸U 裂变碎片中鉴别出的新核素在核素图中所处的位置

• 为鉴别出的新核素.

的丰中子束流可以通过注入探测器测量其半衰期, 注入 ESR 进行质量测量, 其发散度和速度分布也适用于核反应研究. 此外, GANIL 和 GSI 还使用⁶⁵Cu 和⁸⁶Kr 束流, 进行了 Ti 至 Ni 丰中子核素合成和衰变性质的

研究^[21, 22], GSI 使用²³⁸U 束流在 $A = 210$ 区鉴别了 6 个新核素^[23].

4 同质异能态研究

寻找同质异能态并研究其衰变性质一直

是核结构研究的主要内容之一, 它为检验和发展核结构模型提供了非常关键的数据. 自 1995 年以来, GANIL 使用 ^{112}Sn 、 ^{106}Cd 、 ^{92}Mo 、 ^{86}Kr 、 ^{78}Kr 、 ^{40}Ar 和 ^{36}S 束流, GSI 使用 ^{238}U 束流分别在其放射束装置 LISE 和 FRS 上, 采用碎片注入和 γ 射线关联方法, 在十多次实验中鉴别出约 30 种新的同质异能态, 建立了它们的主要衰变纲图, 并发现了 20 多种新同质异能态可能存在的证据^[23].

4.1 技术路线

放射性束装置可对碎片进行清楚无误的 A 和 Z 鉴别, 当碎片注入接收片或半导体探测器后, 数据获取系统开放大约 100 μs , 进行 γ 射线测量, γ 探测器为高效率的 Ge、NaI 或 BGO 阵列, γ 射线的能量、 γ 射线和注入碎片之间的时间差以及碎片鉴别信号被记录下来. γ 本底主要为自然本底、碎片在接收片或探测器中反应产生的瞬发 γ 射线以及以前注入碎片的 β 延发 γ 射线. 采用注入碎片和 γ 射线 μs 量级关联方法可以大大地降低以上本底. 这种方法适合的同质异能态半衰期范围为几百 ns 至几十 μs . 对于通过内转换电子而衰变的同质异能态, 由于碎片在传输过程中为全剥离, 使得其半衰期比有电子时长, 这时可研究同质的异能态半衰期可降至几十 ns. 例如, GANIL 最近观测了半衰期为 35 ns 的同质异能态 $^{74\text{m}}\text{Kr}$.

4.2 缺中子同质异能态

首次使用上述方法研究同质异能态的实验是 GANIL 采用 63 MeV/u ^{112}Sn 束流进行的, 鉴别了同质异能态 $^{94\text{m}}\text{Pd}$ 和 $^{96\text{m}}\text{Ag}$, 并测量了其半衰期和 γ 跃迁, 给出了同质异能态 $^{98\text{m}}\text{Cd}$ 、 $^{102\text{m}}\text{Sn}$ 和 $^{80\text{m}}\text{Y}$ 存在的证据. 此后用其它缺中子束流又进行的一系列实验, 到目前为止已鉴别出 $^{66\text{m}1, \text{m}2}\text{As}$ 、 $^{74\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{80\text{m}}\text{Y}$ 、 $^{84\text{m}}\text{Nb}$ 、 $^{86\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{94\text{m}}\text{Pd}$ 、 $^{96\text{m}}\text{Ag}$ 和 $^{98\text{m}}\text{Cd}$ 等缺中子同质异能态, 其中 $^{66\text{m}1, \text{m}2}\text{As}$ 和 $^{96\text{m}}\text{Ag}$ 的激发能高于预言的质子结合能.

4.3 丰中子同质异能态

$^{32\text{m}}\text{Al}$ 为第一个采用上述方法得到的丰中子同质异能态, 由这一同质异能态就证明了壳模型参数外推时的不可靠性. 其后, GANIL 使用 60 MeV/u ^{86}Kr 束流在 $Z=20\sim 34$ 区域鉴别出 16 个新的丰中子同质异能态, 并给出了二十多个丰中子同质异能态可能存在的证据. GSI 使用 1 GeV/u ^{238}U 束流在 $Z=82$ 区域鉴别出 4 个丰中子同质异能态^[23].

使用注入碎片和 γ 射线 μs 量级关联方法进行的同质异能态的观测已经使壳模型计算参数在双幻核 ^{100}Sn 和 ^{78}Ni 附近得以改进. 中能弹核碎裂反应产生的同质异能态和基态产额比约为 40%, 根据在放射束装置上可得到的同质异能态产额, 可以使用同质异能态束流进行全反应截面的研究, 从而使研究这些同质异能态的物质分布成为可能.

5 即将在 RIBLL 上开展的工作

中科院近物所“八五”以来一直从事新核素的合成及其衰变性质的研究, 现在也希望在 RIBLL 上进行这方面的工作. 拟在 RIBLL 上开展的工作有以下几个方面.

(1) 缺中子核的 β 延发 p 和 γ 测量

较轻缺中子核的 β 延发 p 谱为分立谱, 可以用来建立其衰变纲图. 从测量到的延发 p 和 γ 谱还可以得到其 Gamow-Teller 强度函数 $B(GT)$, 从而与壳模型计算进行比较. 此外, rp 过程接近质子滴线, 所以开展质子滴线核的衰变性质研究对理解 rp 过程有重要意义.

(2) 丰中子核的 β 衰变半衰期及 β 延发 n 和 γ 测量

丰中子 $Z=12\sim 21$ 区, 还有大量已鉴别出的核素, 其半衰期未知, 希望采用碎片注入和 β 粒子关联方法^[24] 测量这一区域核素的半衰期, 随着中科院近物所高效率中子和 γ 探测器的建立, 也希望在丰中子区进行一些 β 延发 n 和 γ 测量方面的工作.

(3) 新同质异能态的鉴别及其衰变性质研究

希望采用与 GANIL 相同的方法, 在核

素图上的大范围内进行新同质异能态的鉴别工作或对已知的一些同质异能态的衰变性质作进一步研究.

参 考 文 献

- 1 Kofoed-Hansen O, Nielsen K O. Short-lived Krypton Isotopes and Their Daughter Substance. *Phys Rev*, 1951, 82: 96~ 97
- 2 Westfall G, Symons T J M, Greiner D E *et al.* Production of Neutron-rich Nuclides by Fragmentation of 212 MeV/amu ^{48}Ca . *Phys Rev Lett*, 1979, 43: 1859~ 1862
- 3 Lewitowicz M, Anne R, Auger G *et al.* Identification of the Doubly-magic Nucleus ^{100}Sn in the Reaction of $^{112}\text{Sn} + \text{nat Ni}$ at 63 MeV/nucleon. *Phys Lett*, 1994, B332: 20~ 24
- 4 Schneider R, Friese J, Reinhold J *et al.* Production and Identification of ^{100}Sn . *Z Phys*, 1994, A348: 241~ 242
- 5 Bernas M. First Observation of the Doubly Magic Nucleus ^{78}Ni . *Nachrichten GSI 11- 95*, 15~ 18
- 6 Tarasov O, Allatt R, Angelique J C *et al.* Search for ^{28}O and Study of Neutron-rich Nuclei near the $N = 20$ Shell Closure. *Phys Lett*, 1997, B409: 64~ 70
- 7 Blank B, Czajkowski S, Davi F *et al.* First Observation of the $T_z = - 7/2$ Nuclei ^{45}Fe and ^{49}Ni . *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 2 893~ 2 896
- 8 Bernas M, Armbruster P, Czajkowski S *et al.* Identification of More Than 100 New Isotopes from ^{238}U Projectile Fission and Beams of Neutron-rich Nuclei at BRENDA. *Nucl Phys*, 1997, A616: 352c~ 362c
- 9 Kryger R A, Azhari A, Hellstrom M *et al.* Two-proton Emission from the Ground State of ^{12}O . *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 860~ 863
- 10 Brown B A. Diproton Decay of Nuclei on the Proton Drip Line. *Phys Rev*, 1991, C43: R1 513~ 1 517
- 11 Blank B, Andriamonje S, Czajkowski S *et al.* New Isotopes from ^{78}Kr Fragmentation and the Ending Point of the Astrophysical Rapid-proton-capture Process. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 4 611~ 4 614
- 12 Hencheck M, Boyd R N, Hellstrom M *et al.* Identification of New Nuclei near the Proton Drip Line. *Phys Rev*, 1994, C50: 2 219~ 2 221
- 13 Rykaczewski K, Ann R, Auger G *et al.* Identification of New Nuclei at and beyond the Proton Drip-line near the Doubly-magic Nucleus ^{100}Sn . *Phys Rev*, 1995, C52: R2 310~ 2 313
- 14 Czajkowski S, Andriamonje S, Blank B *et al.* Beta-p, - 2p, - alpha Spectroscopy of $^{22, 23, 24}\text{Si}$ and ^{22}Al . *Nucl Phys*, 1997, A616: 278c~ 285c
- 15 Trinder W, Adelberger E G, Brown B A *et al.* Gamow-Teller Strength in the β -decay of ^{36}Ca . *Phys Lett*, 1995, B348: 331~ 335
- 16 Trinder W, Adelberger E G, Janas Z *et al.* β -decay of ^{37}Ca . *Phys Lett*, 1995, B249: 267~ 271
- 17 Trinder W, Anne R, Lewitowicz M *et al.* ^{40}Ti β -decay and the Neutrino Capture Cross Section of ^{40}Ar . *Phys Lett*, 1997: B415: 211~ 216
- 18 Yoneda K, Aoi N, Iwasaki H *et al.* Measurements of Half Lives and Neutron Emission Probabilities of the Neutron Drip Line Nuclei ^{19}B , ^{22}C , and ^{23}N . *RIKEN Accel Prog Rep*, 1998, 31: 73~ 73
- 19 Notani M, Aoi N, Fukuda N *et al.* Lifetime Measurements of $^{31, 32}\text{Ne}$. *RIKEN Accel Prog Rep*, 1998, 31: 74~ 74
- 20 Sakurai H, Aoi A, Beaumel D *et al.* Search for New Neutron-rich Nuclei with a 70 A MeV ^{48}Ca Beam. *Nucl Phys*, 1997, A616: 311c ~ 315c
- 21 Dorfler T, Schmidt-Ott W D, Hild T *et al.* Neutron-rich Isotopes $^{54- 57}\text{Ti}$. *Phys Rev*, 1996, C54: 2 894~ 2 903
- 22 Ameil F, Bernas M, Armbruster P *et al.* β -decay Half-lives of Very Neutron-rich Isotopes of Elements from Ti to Ni. *Eur Phys J*, 1998, A1: 275~ 283
- 23 Rykaczewski K, Grzywacz R, Lewitowicz M *et al.* New μs -isomers and Isomeric Beams. *Nucl Phys*, 1998, A630: 307c~ 315c
- 24 Czajkowski S, Bernas M, Armbruster P *et al.* Separation and Implantation of Relativistic ^{86}Kr Fragments at the FRS; Half-life Measurement by Ion- β Time Correlation. *Z Phys*, 1994, A348: 267~ 272

(上接第152页)

New Isotope Identification and Decay Property Studies on Radioactive Nuclear Beam Facilities

Yang Yongfeng Liu Junhui

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

Abstract The progresses of new isotope identification and decay property studies on radioactive nuclear beam facilities are reviewed. Studies of the decay properties of exotic nuclei that will be performed at RIBLL are briefly introduced.

Key words radioactive nuclear beam facility new isotope decay property

Classifying number 0571.3