

②214—217

放射性核束的库仑激发*

潘强岩

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

0571.21
0571.1
0571.3

摘要 综述了利用中、高能放射性核束的库仑激发方法研究位于 $N=20$ 和 28 主壳隙附近的丰中子核结构所取得的进展. 系统的实验结果清晰地表明, 在离开 β 稳定线区域时 $N=20$ 主壳隙突然消失和 $N=28$ 主壳隙的减弱过程. 提出了利用兰州放射性束流线开展双幻核 ^{28}Ni 附近核素的低位能级核结构研究的构想.

关键词 库仑激发 丰中子远离核 壳结构效应 兰州放射性束流线
分类号 O571.21

放射性核束

80年代前,除了用重核的自发和诱发裂变方法外,没有其它更有效的手段产生丰中子区域的核素,特别是对于轻区域的丰中子核.例如,常用的熔合蒸发反应是生成 $80 \leq A \leq 200$ 缺中子核素的最有效手段,但很难找到合适的弹、靶组合产生远离的丰中子核.即使利用转移反应也只能产生离开 β 稳定线 1、2 个核子的丰中子核.以 Berkley 开创性的工作^[1]为开端,基于中、高能弹核碎裂和在飞行中鉴别和分离放射性核素的基础上,先后于 80 年代末期和 90 年代初分别在法国 GANIL^[2,3]、德国 GSI^[4,5]、美国 MSU^[6]、日本 RIKEN^[7]和中国 IMP 均建成了中、高能弹核碎裂型放射性束流装置,有效地克服了产生丰中子远离核的困难.近十年来,在这些放射性束流装置上利用中能 ^{36}Ar 、 ^{40}Ca 、 ^{54}Fe 、 ^{58}Ni 、 ^{78}Kr 和 ^{92}Mo 等缺中子核和 ^{40}Ar 、 ^{48}Ca 、 ^{64}Ni 、 ^{65}Cu 和 ^{86}Kr 等丰中子核的弹核碎裂反应迅速地鉴别了轻质量区域的质子和中子滴线核,为利用放射性束开展滴线核结构的研究奠定了基础.如何有效地利用这些装置更好地开展放射性束核物理这一前沿领域的研究工作,已成为人们关注的问题.本文在综述了对远离核的低位能态核

结构研究的基础上,提出了利用兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL)开展对丰中子核低位能态结构研究的构想.

库仑激发是布居原子核低位能态最有效的手段之一.当弹核穿过靶核的库仑场并从中获得能量时,可被激发到激发态.处于激发态的弹核随之通过 γ (单 γ 或 γ 级联)退激过程重新回到基态.因此,利用 γ 探测装置记录弹核退激的 γ 射线,就可以对其核结构进行研究.从测得的 γ 能谱中可提取原子核的基态形状、同质异能态和能级的 Nilsson 组态等核结构信息.

由于库仑激发反应截面大,中、高能束流适合进行此类反应的实验研究.早在 70 年代末期,曾用量子力学的微扰方法对这一反应过程作过理论上的处理^[8].图 1 给出了 $^{208}\text{Pb}[^{32}\text{Mg}, ^{32}\text{Mg}^*(2^+)]^{208}\text{Pb}$ 反应微分截面的计算结果^[9].其中库仑激发占总截面的 90% 以上,核反应过程小于 10%.同另一种类型[用同位素分离器(ISOL)所产生]的放射性核束相比较,中、高能放射性核束的另一大优点是束流能量高,因而可通过增加靶厚来增大产额.表 1 列出了这两种不同形式的放射性核束用于库仑激发实验时所具有的特

收稿日期:1999-04-15.

* 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心'99 首次学术讨论会论文.

征. 显而易见, 就探测灵敏度而言, 中、高能弹核碎裂型比 ISOL 型高 1 000 倍.

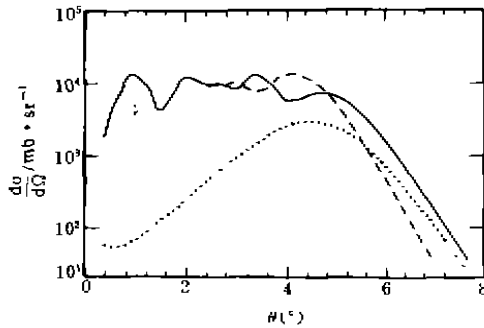


图 1 $^{208}\text{Pb} + ^{32}\text{Mg}, ^{32}\text{Mg}^*(2^+) \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ 反应微分截面的角分布^[9]

--- 为库仑激发, ... 为核反应, — 为总截面.

由于越远离 β 稳定线核的生成产额越小, 加之中、高能束流的强度也较小, 因此就需要有高效率的 γ 探测阵列. 因为高密度

的 NaI(Tl) 晶体对 γ 探测效率高和价格便宜, 自然就成为首选材料. 从表 1 可知, γ 射线是从高速 ($\beta = v/c \approx 40\% \sim 50\%$) 飞行的原子核 (退激) 发射出来的, 多普勒移动 [$E_\gamma(\text{实验}) = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} E_{\gamma_0}$] 严重, 必须对测得的能谱作多普勒能移的修正. 这就要求 NaI(Tl) 探测器是位置灵敏的, 同时要对原子核的飞行方向及能量进行测定. 图 2 给出了拟在 RIBLL 上开展库仑激发实验的装置布局. 位于靶子 (一般为 ^{208}Pb 或 ^{197}Au 材料) 前面的两个位置灵敏雪崩式计数器 (PPAC) 分别用于测定从放射性核束装置引出的原子核的纵向和横向位置, 从而确定其飞行方向. 原子核的动能由位于靶子后面的塑料闪烁体探测器给出. 由围绕靶子四周的位置灵敏 NaI(Tl) 探测器阵列记录所发射的 γ 射线. 若阵列由 50 个 NaI(Tl) 单元构成, 上述装置就具有对流强为 ≥ 20 ions/s 的次级束开展核结构研究的能力.

表 1 两种不同类型的放射性核束的特征比较

	ISOL	弹核碎裂
束流能量 $E / (\text{MeV} \cdot \text{u}^{-1})$	几个	40~200
$\beta = v/c$	~ 0.08	0.30~0.50
多普勒移动	小	大
靶的典型厚度 $d / (\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.50	500
激发截面 σ / mb	100	100
计数率维持在 10/h 时所需要的流强 $I / (\text{ions} \cdot \text{s}^{-1})$	20 000	20

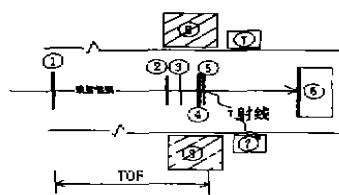


图 2 在 RIBLL 上开展库仑激发实验的装置布局

在放射性束流线上第一个用库仑激发方法开展对奇异核的低位能态核结构研究的实验是于 1995 年 3 月在法国 GANIL 完成

的^[10]. 他们用 ^{18}O 的碎裂生产 $A < 14$ 核素并研究了 $^6, ^8\text{He}$ 、 $^{11, 12, 14}\text{Be}$ 和 ^{11}B 等核的第一激发态. 后来, 日本 RIKEN^[9, 11] 和美国 MSU^[12~15] 用 NaI(Tl) 探测器阵列对 $N = 20$ 和 28 的丰中子区域的核进行了系统的测量, 在远离核中发现了一些有意义的、奇特的核结构现象. 迄今, 共有 19 个原子核用库仑激发方法作过低位能态测量: $^6, ^8\text{He}$ 、 $^{11, 12, 14}\text{Be}$ 、 $^{30, 32}\text{Mg}$ 、 $^{32, 34, 36, 38}\text{Si}$ 、 $^{38, 40, 42, 44}\text{S}$ 、 $^{40, 44, 46}\text{Ar}$ 和 ^{56}Ni . 图 3 给出了实验测到的位于 $N = 20$ 和 28 主壳隙上的偶偶核 2^+ 能级能量. 系统的实验结果表明: $N = 20$ 主壳隙在

$Z \leq 12$ 时突然消失, $N = 28$ 主壳隙在 $Z \leq 18$ 时明显减弱. 理论上^[6, 17]认为当远离至³²Mg₁₈和³⁰Ne₁₈时, 原子核基态的形状发生了突变.

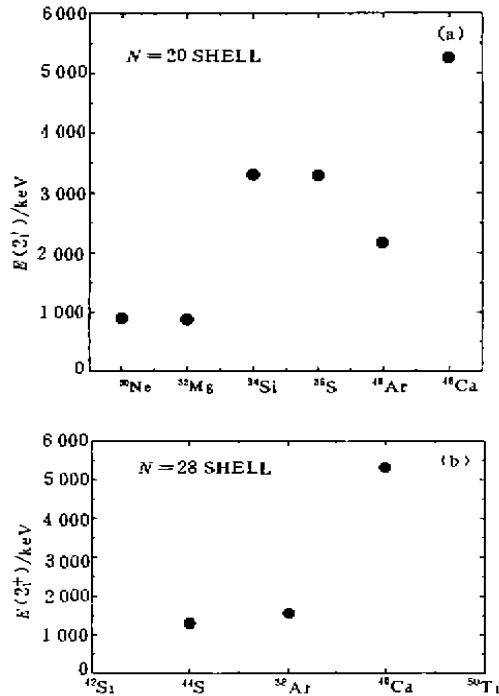


图 3 位于 $N = 20$ 和 28 主壳隙上的偶偶 2^+ 核态的能量

即从近球型突变成大形变 ($\beta_2 \approx 0.5$), 从而导致了 $\nu f_{7/2}$ 轨道的侵入, 使 $N = 20$ 主壳隙消失. 实验结果也直接证实了³²Mg₁₈和³⁰Ne₁₈的基态具有很大的四极形变. 从测得的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 跃迁的 γ 积分记数, 就可得到与约化四极形变参数 β_2 直接相联系的约化跃迁几率

$$B(E2; 0^+_{gs} \rightarrow 2^+_1) (\beta_2 = \frac{4\pi}{3ZeR^2} \sqrt{B[E(2^+_1)]})$$

对于偶偶核, 2^+ 能级能量与 β_2 的直接关系为 $E(2^+_1) = \frac{3\hbar^2}{J} = \frac{1224}{\langle \beta^2 \rangle \cdot A^{7/3}}$. 以³²Mg₁₈为例, 测得的 $|\beta_2| = 0.522$. 如此大的形变可与高自旋超形变相比拟. 这究竟是什么效应引起核的低位能态大形变组态, 仍是目前悬而未决的问题.

RIBLL 为探索远离核库仑激发提供了必要的条件. 目前, 双幻核²⁸Ni₅₀附近核素均已合成, 但对这些核的激发态性质的了解却十分少, 有一些元素的很长同位素链的激发态还是空白. 利用 HIRFL 的⁶⁶Kr, ⁹⁶Zr, ¹⁰⁰Mu 等中能束流的弹核碎裂产生该区域的核素, 并用 RIBLL 引出目标核进行库仑激发实验, 用一套高效率的 NaI(Tl) 晶体 γ 探测阵列测定这些核的低位能态, 就可以进行一些有意义的、有特色的实验. 例如, $Z = 28$ 和 $N = 50$ 主壳隙在中子滴线上的行为、远离核的基态形状和新的同质异能态以及它们的系统性等.

总之, RIBLL 的建成并投入实验为开展放射性核束的库仑激发研究提供了必要的实验手段, 关于这方面的工作在国外也刚刚开始并在 $N = 20$ 和 28 区域已系统性地取得了有意义的结果. 为此, 应尽快在 RIBLL 上建立一套高效率的 NaI(Tl) 晶体 γ 探测阵列, 以测定丰中子远离核的低位能态, 系统地研究壳结构效应在远离 β 稳定线区域的体现行为, 特别是最能体现这一效应的双幻核²⁸Ni₅₀附近的核素.

参 考 文 献

- Westfall G D, Symons T J M, Greiner D E *et al.* Production of Neutron-rich Nuclides by Fragmentation of 212-MeV/amu ⁴⁸Ca. *Phys Rev Lett*, 1979, 43, 1859~1862
- Anne R, Bazin D, Mueuer A C *et al.* The Achromatic Spectrometer LISE at GANIL. *Nucl Instrum and Methods*, 1987, A257, 215~232; Anne R and Mueller A C. LISE3: A magnetic spectrometer-wien filter combination for secondary radioactive beam production. *Nucl Instrum and Methods*, 1992, B70, 276~285
- Mueller A C, Anne R. Production and Studies with Secondary Radioactive Ion Beams at LISE. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1991, B56/57, 559~563
- Geissel H, Armbruster P, Behr K H *et al.* The GSI Projectile Fragment Separator (FSR): A versatile magnetic system for relativistic heavy ions. *Nucl Instrum*

- Methods Phys Res, 1992, B70: 286~297
- 5 Magel A, Geissel H, Voss B *et al.* First Spatial Isotopic Separation of Relativistic Uranium Projectile Fragments. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1994, B94: 548~554
 - 6 Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen Jr J A *et al.* The A1 200 Projectile Fragment Separator. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1991, B56: 1106~1110
 - 7 Kubo T, Ishihara M, Inabe N *et al.* The RIKEN Radioactive Beam Facility. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1992, B70: 309~319
 - 8 Wüthrich A, Alder K. Relativistic Coulomb Excitation. Nucl Phys, 1979, A319: 518~532
 - 9 Motobayashi T, Ikeda Y, Ando Y *et al.* Large Deformation of the Neutron-rich Nucleus ^{26}Mg from Intermediate-energy Coulomb Excitation. Phys Lett, 1995, B346: 9~14
 - 10 Anne R. Projectile Coulomb Excitation with Fast Radioactive Beams. Z Phys, 1995, A352: 397~401
 - 11 Nakamura T, Motobayashi T, Ando Y *et al.* Coulomb Excitation of ^{13}Be . Phys Lett, 1995, B394: 11~15
 - 12 Scheit H, Glasmacher T, Brown B A *et al.* New Region of Deformation: The neutron-rich sulfur isotopes. Phys Rev Lett, 1996, 77: 3967~3970
 - 13 Faerber M, Chromik M J, Glasmacher T *et al.* Coulomb Excitation of the One-neutron Halo Nucleus ^{13}Be . Phys Rev, 1997, C56: R1~R4
 - 14 Jibbotson R W, Glasmacher T, Brown B A *et al.* Quadrupole Collectivity in $^{32, 34, 36, 38}\text{S}$ and the $N=20$ Shell Closure. Phys Rev Lett, 1998, 80: 2081~2084
 - 15 Glasmacher T, Brown B A, Chromik M J *et al.* Collectivity in ^{44}S . Phys Lett, 1997, B395: 163~168; Glasmacher T. Low-lying States of Exotic Nuclei. Nucl Phys, 1998, A630: 278c~284c
 - 16 Campi X, Floard H, Kerman *et al.* Shape Transition in Neutron Rich Sodium Isotopes. Nucl Phys, 1975, A251: 193~205
 - 17 Werner T R, Sheikh J A, Nazarewicz W *et al.* Shape Coexistence around $^{48}\text{S}_{28}$: The deformed $N=28$ region. Phys Lett, 1994, B333: 303~309

Study of Coulomb Excitation with Radioactive Ion Beams

Pan Qiangyan

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

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

Abstract The study of coulomb excitation of the neutron-rich nuclei around $N=20$ and 28 shell closure with radioactive ion beam at intermediate energy is reviewed. The systematics of the measured energy of the 2_1^+ state shows that the $N=20$ shell closure in neutron-rich isotopes with $Z \leq 12$ disappears suddenly and $N=28$ shell closure appears to be weak for ^{44}S . The coulomb excitation studies of the exotic nuclei around the double magic $^{78}\text{N}_{150}$ at RIBLL are proposed.

Key words coulomb excitation neutron-rich exotic nucleus shell closure

Classifying number O571.21