

文章编号: 1007-4627(2004)02-0073-05

重离子物理和交叉学科研究及 CSR 工程进展*

靳根明

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 综述了近年来中国科学院近代物理研究所在新核素合成研究、同位旋效应研究、高自旋态性质研究及交叉学科研究方面取得的进展, 简述了国家重大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环(CSR)的主要设计改进、建设内容以及近期各系统的建设进展。

关键词: 超重新核素合成; 同位旋效应; 高自旋态; 交叉学科; 重离子冷却储存环

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 超重新核素合成

自从 1992 年开始在中国科学院近代物理研究所合成第一个新核素以来, 我所的科研人员在不同的核区, 包括轻质量区、中等质量区、轻稀土区及重丰中子核区和超铀核区已合成和研究了²⁵P, ⁶⁵Se, ¹²¹Ce, ¹²⁵Nd, ¹²⁸Pm, ¹²⁹Sm, ^{135, 137}Gd, ¹³⁹Tb, ¹³⁹Dy, ¹⁴²Ho, ¹⁴⁹Yb, ¹⁷⁵Er, ^{185, 186}Hf, ¹⁹⁷Os, ^{208, 209}Hg, ^{237, 238}Th, ²³⁹Pa 和 ²³⁵Am 22 个新核素, 并测得了它们的半衰期和衰变性质^[1-5]. 特别是近两年来, 在现有条件的基础上, 经过技术上的改进和物理思想上的提高, 新核素的合成跨进了超重核区, 合成了 105 号和 107 号元素的一个新核素²⁵⁹Db 和 ²⁶⁵Bh.

超重元素的合成和研究是人们探索原子核存在极限的一个重要方向^[6, 7], 目前已合成到 116 号元素, 但 113 还未被直接合成. 对超重元素的探索在我国才刚刚起步. 在 2000 年, 我们利用兰州重离子加速器提供的 132 MeV 的²²Ne 束流轰击 1.70 mg/cm² 的²⁴³Am 靶, 利用 He 喷射传输靶室及改进的传输收集和探测系统对反应产物进行收集测量, 结果观测到了半衰期 $T_{1/2} = (0.51 \pm 0.16)$ s、衰变能为 9.47 MeV 的 α 粒子, 通过分析认为它是新同位素²⁵⁹Db 的衰变. 其 α 衰变能为 $N=152$ 子壳的存在提供了新的证据^[8]. 2003 年, 经过技术上进一步的改进和提高, 我们又通过²⁶Mg+²⁴³Am 反应, 进行了合成超重新核素²⁶⁵Bh 的实验研究^[9]. 利用一种特

殊的母子核步进模式测量了上述反应产物的 α - α 关联, 逐个记录了感兴趣能区的 α 衰变. 通过离线处理, 总共观测到 8 个新的 α 衰变关联事件, 与其相关的子体的 α 能量为 (8.93 ± 0.04) MeV, $T_{1/2} = 1.7^{+0.79}_{-0.49}$ s, 这与²⁶¹Db 的衰变性质一致. 同时指定了 8 个新的 α 衰变是来自²⁶⁵Bh, 其衰变 α 能量为 (9.24 ± 0.05) MeV, $T_{1/2} = 0.94^{+0.70}_{-0.31}$ s. 这一初步结果表明, 我们已合成了超重新核素²⁶⁵Bh^[10].

与此同时, β 缓发裂变早在 20 世纪 60 年代就已预言, 但实验上一直没有正式观测到这一衰变模式的事例. 2000 年我们通过¹⁸O+²³²Th \rightarrow ²³⁰Ra $\xrightarrow{\beta^-}$ ²³⁰Ac 反应生成了 β^- 缓发裂变先驱核²³⁰Ac, 并利用碎片径迹探测器对其进行了长时间的探测. 结果发现了两例裂变事件, 确定它们是来自于²³⁰Ac 的 β^- 缓发裂变, 计算出其 β^- 缓发裂变的几率为 1.19×10^8 . 这一结果成为首次在实验上观察到理论预言的 β^- 缓发裂变事例^[11].

2 晕核结构的实验

自从兰州重离子放射性束流线(RIBLL)建成以来, 不仅对一些与天体核反应相关的核素, 如²⁰Na, ²³Al 等的衰变性质进行了研究^[12, 13], 同时重点通过反应截面的测量探索了那些具有晕结构或中子皮结构的原子核的性质. 例如通过对⁶Li, ⁷Be, ⁸B, ⁹C

收稿日期: 2004 - 04 - 08

* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-No7)

作者简介: 靳根明(1943-), 男(汉族), 河南许昌人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理及其相关交叉学科研究.

几个同中子核与 Si 反应截面的测量, 表明⁸B 和⁹C 两个核的核半径比起⁷Be 和⁶Li 来说, 有非常大的增加. 按照正常的判据, 我们认为这两个核都具有质子晕结构^[14]. 在对¹²N, ¹⁷Ne, ¹⁷F, ²³Al 和 ²⁷P 的结构研究中, 发现¹²N, ²³Al 和²⁷P 等核都具有质子晕结构, 而¹⁷F 具有质子皮的结构. 尽管有人认为¹⁷Ne 是质子晕核, 但我们的实验数据表明, ¹⁷Ne 的半径没有明显的增大^[15].

3 中能重离子碰撞中的同位旋效应

同位旋指的是组成原子核的中子数 N 与质子数 Z 之间的关系, 即 $(N-Z)/(N+Z)$. 对于同一种元素, 随中子数的变化, 不仅其结构及静态性质有很大的差异, 而且在发生核反应时, 其碰撞动力学性质也有很大的区别, 从而引起反应产物的特征, 例如出射粒子(碎片)的中质比、多重性和发射时间等有明显的区别. 我们不仅从理论上通过建立同位旋相关的 QMD 模型对中能重离子碰撞中的同位旋效应^[16-19]进行了研究, 而且还用^{36, 40}Ar + ^{112, 124}Sn 及 ⁴⁰Ar + ^{58, 64}Ni 等不同中质比的反应系统, 对中能重离子碰撞中的同位旋效应进行了初步的实验研究^[20-23]. 实验结果表明, 在实验室系 20° 出射粒子的中质比与系统的同位旋有非常明显的关系: 丰中子系统出射的轻元素(如 He, Li, Be, …)中, 丰中子同位素的比例远大于缺中子的比例. 在分析大角度产物的同位素能谱温度时, 还发现热核系统的能谱温度与发射粒子的同位素(即中质比)有关. 例如对丰中子系统, 由³He 能谱提取的核温度比利用⁶He 提取的核温度要高. 而对缺中子系统则相反. 其原因是在不同反应系统中, 不同中质比的粒子在碰撞的不同时段发射. 对缺中子系统而言, 丰中子粒子只能在碰撞的早期阶段发射, 而缺中子粒子则在碰撞后期发射的仍然比较多, 即其发射时间拖的较长, 因此, 利用其能谱提取的核温度就比较低. 在丰中子碰撞系统中情况则相反. 在对³⁶Ar + ^{112, 124}Sn 碰撞系统中发射复杂碎片的发射时标研究中观测到, 低相对动量碎片的发射时标有较明显的区别. 对丰中子靶系统, $3 \leq Z \leq 5$ 复杂碎片的平均发射时标约 120 fm/c, 而对缺中子系统, 复杂碎片的平均发射时标约 150 fm/c. 这是否意味着丰中子系统由于大量中子的早期发射从而冷却得较快, 还有待进一步探讨.

在对⁴⁰Ar + ^{58, 64}Ni 碰撞系统的测量中观察到, 丰中子系统中发射 α 粒子的多重性明显地高于缺中子系统发射的. 而发射复杂碎片的多重性, 丰中子系统比缺中子系统更早地达到饱和值且较快地下降, 这与理论的预言是一致的, 主要原因在于轻粒子发射, 特别是 α 粒子发射的竞争(见图 1).

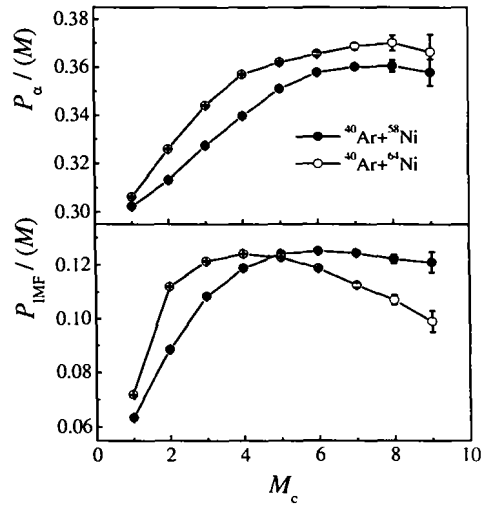


图 1 发射 α 粒子和复杂碎片几率随带电粒子多重性的变化

4 奇-奇核高自旋态结构

多年来, 我们对 $A \approx 160-180$ 区的核, 特别是奇-奇核的高自旋态结构性质进行了较为深入的研究, 并着重对这一质量区的原子核出现的旋称反转现象进行了系统探讨. 我们新发现了一批出现旋称反转的核, 例如, ¹⁷⁰Ta, ^{172, 174}Ra, ^{176, 178, 180}Ir 和 ^{182, 184}Au 等, 结合已有的数据, 从而获得了一些系统性的规律^[24]: ①在 $69 \leq Z \leq 79, 93 \leq N \leq 103$ 核区的奇-奇核中, $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中似乎都存在低自旋旋称反转; ②在同位素/同中素链中, 旋称交叉点自旋随减少/增加两个中子/质子而降低; ③旋称交叉点自旋随 Z (或 N) 的变化与 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 中相反, 在 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中交叉点自旋值随减少/增加两个中子/质子会增加 $2-3\hbar$; ④在 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中, 交叉点自旋变化的规律性不如在 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中那么强. 最近, 为了从实验上证实 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 转动带的旋称反转, 我们又针对双奇核¹⁸⁴Au 重新进行了在束 γ 谱学研究^[25]. 不仅在 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 两个半退耦带中观测到低自旋旋称反转, 还在这两个带的高自旋处发现了第二旋称反转的迹象(见图 2). 是否在高自旋处存在第二次旋称反转,

作,高质量地完成了 35 kV, 5 A 和 350 kV, 3 A 的两台电子冷却装置,并在现场安装了 35 kV 5 A 的一台电子冷却装置,其特点如下:采用 3 分离螺旋管线圈,有利于螺旋管磁场的精确调整;特殊设计了电子枪,使其能产生空心电子束;在电子收集部分采用了静电偏转板代替磁偏转板,提高了电子束的收集效率.该电子冷却装置不仅达到设计指标,还在世界上首次调出空心电子束流,这对提高重离子束的冷却效率,减少束流损失非常有利.

CSRm 的各种磁铁,包括二极铁^[50]、四极透镜、校正磁铁、切割磁铁等,都已加工完成,测试结果表明其性能都达到甚至超过设计要求,同时还

发展了新的磁场测试技术.磁铁电源^[51]设计中利用了开关、斩波和硅整流等技术,设计出了高精度、大功率直流和脉冲电源,满足了整个 CSR 设计要求.测试结果表明,电源都达到了设计指标,例如二极铁电源的长期稳定度达 10^{-5} (570 A),纹波小至 10^{-6} — 10^{-7} (几百 Hz),两循环之间的不重复度接近 3.2×10^{-5} .

另外,高频加速腔也已完成,达到设计要求,束流测量和诊断设备都基本加工完成并进行了测试,控制系统正在加紧研制.CSRm 于 2004 年 3 月完成安装.希望在 2004 年对 CSRm 进行在束调试,同时计划在 2004 年底以前完成 CSRe 的安装.

参 考 文 献:

- [1] 罗亦孝. 原子核物理评论, 1999, 16(2): 69.
- [2] 杨维凡, 袁双贵. 原子核物理评论, 1999, 16(2): 80.
- [3] 张立, 赵进华, 胡青元等. 原子核物理评论, 1999, 16(2): 131.
- [4] 谢元祥, 徐树威, 李占奎等. 高能物理与核物理, 2000, 24: 719; 高能物理与核物理, 2001, 25: 198.
- [5] 肖国青, 詹文龙, 郭忠言等. 原子核物理评论, 2000, 17(4): 259; 陈立新, 肖国青, 郭忠言等. 原子核物理评论, 2003, 20(4): 231.
- [6] 靳根明. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 71; 徐珊珊, 周小红, 肖国青等. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 76.
- [7] 李文飞, 李剑峰等. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 111.
- [8] Gai Z G, Qin Z, Fan H M, *et al.* Eur Phys J, 2001, A10: 21.
- [9] 郭俊盛, 甘再国等. 原子核物理评论, 2003, 20(2): 96.
- [10] 甘再国, 秦芝, 范红梅等. 高能物理与核物理, 2004, 28: 332.
- [11] 袁双贵, 杨维凡等. 高能物理与核物理, 2000, 24: 1 193.
- [12] 王宏伟, 靳根明, 吴和宇等. 高能物理与核物理, 2001, 25: 971; 高能物理与核物理, 2002, 26: 1 117.
- [13] 王宏伟, 靳根明, 吴和宇等. 原子核物理评论, 2002, 19(1): 13.
- [14] 王全进, 詹文龙等. 高能物理与核物理, 2001, 25: 1 165.
- [15] 李加兴, 郭忠言, 詹文龙等. 高能物理与核物理, 2002, 26: 683.
- [16] 张丰收, 李文飞, 靳根明等. 物理学进展, 2001, 21(4): 469.
- [17] 刘建业, 赵强, 左维等. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 21.
- [18] 刘建业, 郭文军等. 原子核物理评论, 2001, 18(4): 276.
- [19] 郭文军, 刘建业等. 高能物理与核物理, 2003, 27: 897.
- [20] Xiao Zhigang, Jin Genming, Wu Heyu, *et al.* Chinese Physics Letter, 2001, 18(8): 1 037.
- [21] Wu Heyu, Xiao Zhigang, Jin Genming, *et al.* Phys Lett, 2002, B538: 39.
- [22] 胡荣江, 吴和宇, 靳根明等. 高能物理与核物理, 2003, 27: 990.
- [23] 胡荣江, 吴和宇, 诸永泰等. 高能物理与核物理, 2004, 28: 152.
- [24] Zhang Y H, Oshima M, Toh Y, *et al.* Phys Rev, 2003, C68: 054313.
- [25] Zhang Y H. 5th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium. Fukouka, Japan. 2004, 3.
- [26] 柳敏良, 张玉虎, 周小红等. 高能物理与核物理, 2002, 26: 354.
- [27] 靳根明, 金运范. 原子核物理评论, 2000, 17(2): 127; 王志光, 金运范, 侯明东. 原子核物理评论, 2000, 17(2): 100.
- [28] 卫增泉, 颜红梅, 梁剑平等. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 38.
- [29] 李文建, 周光明, 卫增泉等. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 42.
- [30] 李强, 颜红梅, 李文建等. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 48.
- [31] 周光明, 李文建, 高清祥等. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 52.
- [32] 李文建, 郭红云等. 原子核物理评论, 2003, 20(4): 281.
- [33] 王菊芳, 李文建. 原子核物理评论, 2004, 21(1): 48.
- [34] 李强, 卫增泉, 李文建等. 原子核物理评论, 2001, 18(2): 109.
- [35] 宋明涛, 詹文龙, 魏宝文等. 原子核物理评论, 2001, 18(2): 116.
- [36] 马秋峰, 靳根明, 李文建等. 高能物理与核物理, 2003, 27: 932.
- [37] 袁世斌, 卫增泉. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 56; Chinese Science Bulletin, 2002, 47(8): 672.
- [38] 梁剑平, 卫增泉, 张力荣等. 中兽医医药杂志, 2000, 19(2): 8.
- [39] 朱智勇, 金运范等. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 129.
- [40] 侯明东. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 146.
- [41] 王志光, 金运范. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 152.
- [42] 肖国青. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 159.
- [43] 张崇宏. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 50.
- [44] 王瑛, 朱智勇, 孙友梅等. 原子核物理评论, 2004, 21(1): 43.
- [45] 王志光, 金运范等. 原子核物理评论, 2000, 17(3): 1 190.
- [46] Wang Z G, Zhao Z M, Song Y, *et al.* Nucl Instr and Meth 2004, B218: 472.
- [47] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文等. 原子核物理评论, 2001, 18(1): 35.
- [48] 杨晓东, Perkhomchuk V V, 赵红卫等. 高能物理与核物理, 2003, 27: 726.
- [49] 杨晓东, 宋明涛等. 原子核物理评论, 2001, 18(2): 105.
- [50] 马力祯, 袁平, 何源等. 原子核物理评论, 2003, 20(4): 247.
- [51] 高大庆, 王有云等. 原子核物理评论, 2002, 19(1): 52.

(下转第 106 页)

Statistical Separability and the Impossibility of the Superluminal Quantum Communication*

Zhang Qi-ren

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: We analyse the relation and the difference between the quantum correlation of two points in space and the communication between them. The statistical separability of two points in the space is defined and proven. From this statistical separability, we prove that the superluminal quantum communication between different points is impossible. To emphasize the compatibility between the quantum theory and the relativity, we write the von Neumann equation of density operator evolution in the multi-time form.

Key words: statistical separability; quantum communication; multi-time formulation

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10075004)

(上接第 76 页)

Progress of Scientific Researches and Project of CSR in IMP*

JIN Gen-ming

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

Abstract: The article reviews the recent progress of the scientific researches including synthesis of new nuclides, investigations of the isospin effects in heavy ion collisions, studies of the nuclear structure in high spin states and the applications of heavy ion beams to other scientific researches, such as biology and material science. It also gives a brief introduction of the development of the design and progress of the new project of heavy ion cooling storage ring (CSR) of Lanzhou.

Key words: superheavy new nuclide synthesis; isospin effect; high spin state; disciplinary; cooling storage ring

* **Foundation item:** Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX-SW-No7)