

# HI-13串列加速器上核结构在束 $\gamma$ 谱学研究： 现状及展望\*

竺礼华<sup>1)</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)  
(深圳大学理学院 深圳 518060)

**摘要** 主要介绍HI-13串列加速器的现状,升级工程BRIF以及计划中的BRIFF-II,在束 $\gamma$ 谱学研究的现状与将来核结构研究的展望.

**关键词** 串列加速器 在束 $\gamma$ 谱学 核结构

## 1 HI-13串列加速器现状<sup>[1]</sup>

HI-13串列加速器是20世纪80年代初从美国引进的一台大型静电式串列加速器,1987年投入正式运行,其头部高压设计最高值为13MV,2001—2002年,串列加速器加速管进行了更新改造,将加速器最高头部电压提高到15MV.目前,该加速器主要用于核数据测量,核反应与核结构基础实验,核技术应用基础及交叉学科等方面的研究.串列加速器平面布置图见图1,包括加速器大厅,一号,二号,三号实验厅及主控制室和物理测量室.加速器的前端为一负离子注入器,可产生元素周期表上从质子到<sup>235</sup>U(惰性气体元素除外)等各种元素的负离子,并将其加速到150keV左右的能量,再注入到串列加速器.

在实验厅1(Hall 1)中,位于右70°(R70)束流管道上的快中子能谱物理实验终端,主要包括常规快中子飞行时间谱仪和非常规快中子飞行时间谱仪,用于测量各种中子能谱,开展次级中子双微分截面测量,(n,x)反应和n-d破裂反应等研究.在R60束流管道上,建有一个直径60cm的裂变,散射靶室,用于近库仑位垒的熔合反应,熔合裂变反应和重离子反应实验研究.建在R50束流管道上的高能 $\gamma$ 射线角分布谱仪,由2个大的NaI(Tl)塑料闪烁体反康谱仪组成,中心NaI(Tl)晶体尺寸分别为 $\phi 20 \times 20$ cm和 $\phi 24 \times 25$ cm,用于探测高能(20MeV) $\gamma$ 射线,外层的塑料闪烁体用于降低康

普顿散射和宇宙射线本底.在该谱仪上主要开展核数据测量,辐射俘获及高温转动核的偶极巨共振研究.

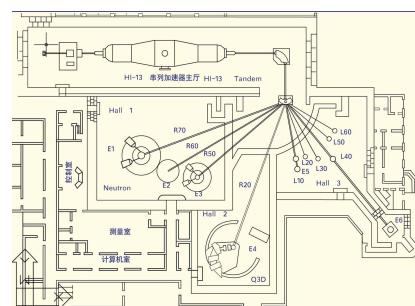


图1 北京HI-13串列加速器平面图

在实验厅2(Hall 2)中,有2条束流管道.一条管道(R20)上建有Q3D磁谱仪,配有一个通用靶室和多种焦面探测器,主要开展的工作有轻粒子核反应,重离子核反应与激发态晕结构,微电子器件单粒子效应等方面的研究.建在另一条管道R30上的原子物理终端,主要开展基于加速器的原子物理学实验研究,包括高离化态离子谱学,高离化态离子能级结构,以及高电荷态离子与原子,分子,电子碰撞过程等方面的研究.

实验厅3(Hall 3)中,在左50°(L50)束流管道上建有我国第一条次级束流线GIRAFFE,可提供<sup>6</sup>He,<sup>7</sup>Be,<sup>8</sup>Li,<sup>11</sup>C,<sup>13</sup>N,<sup>15</sup>O,<sup>17</sup>F等次级束流,流强达到 $10^3$ — $10^5$ 粒子/s,目前在该装置上主要开展放射性核

\*国家自然科学基金(10175090, 10105015, 10375092, 10575133)和国家重点基础研究发展项目(TG2000077405)资助

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn

束物理与核天体物理研究。左 $30^\circ$ (L30)束流管道上,建有用于微电子器件单粒子效应微观机制研究的重离子微束辐照装置,可提供 $2\text{--}100\mu\text{m}$ 束点尺度的束流,束流强度可达到 $1\text{--}1000\text{离子}/\text{s}$ ,定位精度达 $0.5\mu\text{m}$ 。在左 $20^\circ$ (L20)束流线上,建有我国第一条加速器质谱(AMS)即超高灵敏质谱专用管道,它是基于加速器和核探测器技术相结合的一种核分析技术,灵敏度高,对一些核素的测量灵敏度达到同位素丰度比值为 $10^{-15}$ ,核素最低探测器限为 $10^4$ 个原子。在该厅的其他束流线上,还建有用于核技术应用研究的辐照装置。

## 2 在束 $\gamma$ 实验终端

除上面介绍的3个实验厅外,实验厅3东南角外面,位于左 $40^\circ$ (L40)束流线上还建有一个用于在束 $\gamma$ 谱学研究的实验终端。在束 $\gamma$ 谱学是利用高分辨的高纯锗(HPGe)探测器,通过测量核反应过程形成高激发态产物退激过程中发射 $\gamma$ 射线的能谱,角分布,形状等,在角动量,激发能和同位旋等自由度上研究原子核的稳定性及内部精细结构。常采用锗酸铋(BGO)康普顿反符合技术来降低由于康普顿散射引起的连续 $\gamma$ 本底,用多探头来增加级联 $\gamma$ 射线的符合测量效率,从而提高对极低产额原子核的研究能力。目前在该实验终端上由中国原子能科学研究院与国内其他研究所,高校联合建成了含15套带BGO反康的高纯锗探测器阵列(见图2),是目前国内探测器个数最多的 $\gamma$ 探测器阵列,是开展高自旋态原子核结构研究的重要实验终端。高纯锗探测器的效率大部分在30%以上(相对于 $3\times 3$ 英寸NaI),对 $^{60}\text{Co}$ 的1332.5keV $\gamma$ 射线分辨率好于2.2keV。



图2 北京HI-13串列加速器在束 $\gamma$ 实验终端

经过近几年的终端更新改造及完善,在束 $\gamma$ 实验终端得能力得到了很大提升。为了HPGe探测器稳定安全运行,实现了液氮补给的计算机控制。新的真空系统只需1h就可达到加速器要求,非常方便实验过程中靶的更换。新靶室降低了 $\gamma\text{-}\gamma$ 符合测量的本底及偶

然符合,同时方便了束流的对中,束流对中时间由原来的大于8h缩短到30min左右,大大提高了束流时间的利用率。此外,该实验终端上,还有用于反应道选择的带电粒子球和中子过滤器,带电粒子球由24片硅 $\Delta E$ 探测器组成,中子过滤器由6个液闪组成。

目前国内主要有中国原子能科学研究院,兰州近代物理所,吉林大学,清华大学,北京大学,深圳大学和东北师范大学等7家科研院校的研究人员利用此装置,开展了极端条件下(如远离稳定线,极高角动量等)原子核内部精细结构的研究,如原子核手征转动,旋称反转,磁转动,三轴形变,壳效应与集体运动,形状共存,电磁跃迁特性等研究,取得了丰硕的成果。

## 3 串列加速器升级工程(BRIF)及串列实验室综合物理平台(BRIF-II)

串列加速器升级工程(BRIF)主要是在现有北京HI-13串列加速器的前端加一个100MeV的强流质子回旋加速器及在线同位素分离器,在其开关磁铁后面加入4节超导直线加速段。强流质子回旋加速器采用紧凑型结构,它结合了分离扇回旋加速器和交变梯度聚焦回旋加速器两者的优点,可提供100MeV, 200 $\mu\text{A}$ 强流质子束。强流质子回旋加速器提供的质子束及其产生的中子束将用于核数据测量和辐射物理研究,也可以作为产生放射性核束的驱动加速器,并可用于新型放射性同位素的研发。

BRIF的主要目之一是产生不稳定的次级束流(RNB)。来自强流回旋加速器的75—100MeV质子束轰击选定的厚靶,产生所需的放射性核素。放射性核素从靶中热扩散出来,进入离子源被电离。从离子源引出的几十keV放射性正离子束,经电荷交换装置转为负离子束(或直接从离子源中引出负离子),经一级磁分离和纯化,并加速到300keV(以利于与后续加速器匹配),再经二级高质量分辨率的同质异位素分析器进一步纯化,得到高纯度的放射性核束,注入到串列加速器及超导直线增能器中加速。最主要的技术指标是:质量分辨率为 $20000(m/\Delta m)$ ,传输效率对于不同的RNB在1—10%,引出的RNB能量为每电荷态300keV,分离速度为ms。该装置可以提供120多种不稳定核的束流,其中40余种丰质子核束和80余种丰中子核束,强度为 $10^6\text{--}10^{11}\text{粒子}/\text{s}$ ,能量在300keV—17MeV/ $q$ 之间可调。

BRIF装置提供的束流在能量上有所提升,在品种上大大扩展。能够提供70—100MeV可调能量质子

束流, 75—100MeV 单色中子, 并可产生白光快中子源。此外还可提供能量为  $100\text{keV}$ — $17\text{MeV}/q$  的(稳定或不稳定)重离子束流。大大提升了核数据测量, 辐射物理研究, 核物理和交叉学科的基础研究, 核技术应用等方面的研究能力。

为了开展核结构与核反应实验基础研究, BRIF 还存在以下方面的不足: 1) 能量低,  $A > 50$  离子无法超过 Pb 的库仑位垒; 2) 配套的探测器落后, 老旧, 综合测量能力差; 3) 放射性束流的强度弱:  $10^6$ — $10^{11}$  粒子/s; 4) 加速器束流时间紧张, 目前束流申请每年约 10000h, 而加速器实际提供时间只有 4000h。鉴于上述原因, 中国原子能科学研究院计划在现有基础上, 对 BRIF 进行进一步的完善。该计划(BRIF-II)包括: 增建 1 台能量增益为  $17\text{MeV}/q$  的超导加速器, 一套低能常温射频四极加速器和一套交叉手指型漂移管型直线加速器(RFQ/DTL), 以及一套包含大型 $\gamma$ 探测器阵列和大接收角高精度磁谱仪组成的多用途物理实验平台。

超导加速器将位于现有串列加速器的后面, 起到增能器作用, 使得质量数小于 150 的所有离子束超过铅的库仑位垒。RFQ/DTL 与现有串列加速器并行, 接受来自 ECR 离子源的多电荷态重离子束或来自在线同位素分离器的放射性次级离子束, 将其加速到超导直线加速器可接受的速度。增加 RFQ/DTL 的好处是, 一方面超导加速器和串列加速器可以同时独立运行, 提供更多得束流时间; 另一方面放射性次级束流不用通过电荷交换, 可直接以正离子进入 RFQ/DTL 和超导加速器, 提高了次级束流的强度。

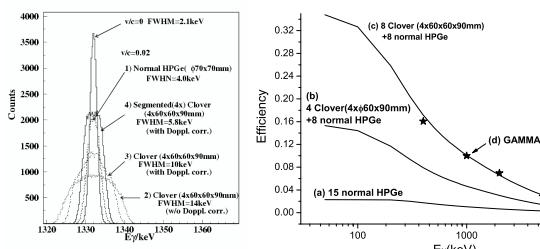


图 3 M-C 模拟的分割式 CLOVER 探测器对多普勒展宽的修正效果(左)以及该探测器阵列的效率(右)

多用途物理实验平台中的 $\gamma$ 探测器阵列将主要由 8—10 台分割式的 CLOVER 高纯锗探测器与 8 台现有的普通高纯锗<sup>[2]</sup>探测器组成, 每台探测器均带 BGO 反康谱仪。图 3 显示了分割式 CLOVER 探测器对多普勒展宽的修正效果以及该探测器阵列的模拟效率。从图中可以看出, 该阵列的探测器效率将与现有 GAMMASPHERE<sup>[3]</sup> 的效率相当, 但由于其对多普勒展宽的修正效果, 它对高速反冲核的 $\gamma$ 射线分辨能力

将优于后者。此外, 该阵列与大接收角高精度磁谱仪组合使用, 将大大提高对稀有事件的探测能力。

通过上述计划, 将使我国的低能核物理基础研究跻身国际先进行列。

## 4 原子能院在束 $\gamma$ 谱学核结构研究展望

串列升级后将为我国核物理界进一步深入开展核结构研究提供重要的实验平台, 可开展的研究有:

### 4.1 丰质子重核(锕系核)结构研究

通过稳定核素的熔合蒸发反应, 大量研究了丰质子侧原子核, 由于受到束流能量, 裂变和探测条件限制等的影响, 丰质子重核(特别是重锕系以上原子核)的结构研究比较困难, 目前高激发态结构信息很少。对这一核区的核结构效应, 如奇异形变与稳定性, 形状驱动效应, 高 K 长寿命同质异能素等进行系统研究, 可以揭示这一核区可能隐含着许多新的物理现象。如  $^{229}\text{Th}$  原子核, 其基态寿命达 7340 年, 另外它存在一个 3.5eV 的同质异能态<sup>[4]</sup>, 是迄今为止发现的能量最低的同质异能态, 最新实验数据显示其寿命只有几天的量级。关于这一同质异能态至今还有很多问题不清楚, 如形成机制, 是否普遍现象等。

### 4.2 丰中子核结构研究

由于无法通过稳定的束靶熔合蒸发反应来生成丰中子原子核, 因此丰中子原子核的高自旋态核结构实验数据很少。对于较轻丰中子核, 通过碎裂反应和多核子转移反应进行了一些实验研究, 如关于中子晕核的研究主要就集中在该核区。中重核区的丰中子核结构研究主要通过  $^{252}\text{Cf}$  的自发裂变以及  $\alpha$  引起的重核裂变来产生<sup>[5]</sup>, 利用多 $\gamma$ 探测器阵列对这一核区的部分丰中子核的低自旋和中等高自旋态进行了伽玛谱学实验, 观测到了一些新的实验现象, 但由于受现有条件的限制, 这一核区丰中子核还远没达到丰中子滴线, 因此还有很多核有待研究。而对于丰中子重核( $A \geq 200$ ), 由于它们既不能通过稳定束熔合反应来形成, 也不能通过裂变产生, 因此对它们的研究很少, 表现在核素图上就是在  $^{208}\text{Pb}$  丰中子处的核素就很少, 直到最近人们才开始用稳定束多核子转移, 深度非弹性, 碎裂反应等方法开展这一核区的高自旋态研究<sup>[6]</sup>。利用串列升级后提供的次级丰中子核束, 系统地开展丰中子核区原子核结构实验研究, 对于探索研究晕核性质, 丰中子壳层能级顺序及新幻数, 中子滴线, 各种形状, 对称性及稳定性, 形状相变等一些新现象是非常重要的。

### 4.3 与超形变有关的核结构研究

原子核的超形变<sup>[7]</sup>是高自旋态核结构研究最近十几年研究的主要成果之一,然而,还有许多问题有待解决:1)超形变态的能级自旋与宇称指定,即超形变态到正常形变态的连接跃迁。目前实验上只有少数几例超形变原子核观测到了这种连接跃迁,主要为单步E1  $\gamma$ 跃迁,另外在轻的超形变核中观测到了从超形变态衰变质子的现象。除了 $\gamma$ 和质子衰变外,超形变态是否存在中子衰变等其他衰变方式呢?目前还没有这方面的实验及理论研究,是值得开展研究的课题。2)超形变态的布居机制及建立在SD上的GDR研究。现有的实验数据显示,布居超形变态的激发能与角动量窗很窄,并且存在入射道效应。目前还没有一个现有理论能够准确预言超形变态的产生截面及激发函数等,因此这方面的研究涉及包含核结构的核反应机制问题。3)三轴超形变,是最近实验的热点,只观测到了几例,并且观测到了原子核的摇摆转动现象,这是一种奇异的运动模式。4)巨超形变的寻找。理论上很早就预言了巨超形变的存在,目前为止实验上仍没有找到巨超形变存在的实验证据,因此也一直是高自旋态核

结构研究的另一个机遇。

### 4.4 奇异形变原子核新运动模式

理论和实验结果都已经显示原子核存在各种奇异的形状,如三轴形变,八极形变等,而各种奇异形状的原子核会呈现出一些新的运动模式。如在三轴形变下,原子核会表现出前面介绍过的摇摆运动和手征转动,这些都是近期将要开展的研究课题。原子核是否存在各种运动模式的共存,将是值得探索的新问题。最近在串列加速器上完成的<sup>106</sup>Ag高自旋态实验研究中,观测到电转动与磁转动两种模式共存的可能实验证据。

### 4.5 滴线附近弱束缚核结构研究

在滴线附近原子核的核子结合能都非常小,在非常弱束缚情况下,原子核的粒子运动和集体运动行为是怎样?通过开展滴线附近弱束缚原子核的低自旋或高自旋态能级测量,衰变测量, $B(E2)$ 值以及 $E(4^+)/E(2^+)$ 测量等,可系统研究极端同位旋条件下原子核的壳效应,n-p对相互作用等。通过对滴线附近原子核GDR测量,可研究集体振动的同位旋依赖性,且GDR精细结构及强度的研究对天体物理也很重要。

### 参考文献(References)

- 1 The User Booklet of Beijing National Tandem Accelerator Laboratory. China Institute of Atomic Energy, 2005 (in Chinese)  
(北京串列加速器核物理国家实验室用户手册. 中国原子能科学研究院, 2005)
- 2 Shepherd S L et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A434**: 373
- 3 Lee I Y. Proc. of Workshop on Gammasphere Physics, World Scientific, Singapore, 1995, 50
- 4 Firestone R B. Table of Isotopes, 8th Edition, Mar. 1996
- 5 Hamilton J H et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**: 635
- 6 Regan P H et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044313
- 7 Twin P J et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 811
- 8 Hamamoto I. Phys. Rev., 2002, **C65**: 044305
- 9 Frauendorf S, MENG J. Nucl. Phys., 1997, **A617**: 131
- 10 HE Chuang-Ye et al. HEP & NP, 2006, **30**: 966 (in Chinese)  
(贺创业等. 高能物理与核物理, 2006, **30**: 966)

## In-Beam $\gamma$ -Ray Nuclear Structure Study in HI-13 Tandem Accelerator: Present and Future<sup>\*</sup>

ZHU Li-Hua<sup>1)</sup>

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(School of science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract** The status of HI-13 tandem accelerator and its upgrading program BRIF and the future plan BRIF-II are briefly described. The in-beam gamma-ray spectroscopy of nuclear structure based on recent and its perspectives on the future equipments has been presented.

**Key words** tandem accelerator, in-beam gamma-ray spectroscopy, nuclear structure

\* Supported by Major State Basic Research Development Program (TG2000077405) and National Natural Science Foundation of China (10175090, 10105015, 10375092, 10575133)

1) E-mail: zhulh@iris.ciae.ac.cn