

RIBLL1 终端实验装置

郭忠言 詹文龙 周建群 赵有雄 王金川
罗永锋 刘冠华 雷怀宏 张万生 祁中 林源根

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-04-07 收稿, 1995-10-09 收修改稿

摘 要

描述了一套 HIRFL 的放射性核次级束流引起反应测量的实验装置, 它由 RIB 鉴别、测量系统、次级靶控制系统和次级反应产物鉴别、测量系统组成。高增益分组延迟线读出、重心定位 PPAC, 横向场 IC, 椭球面镜聚焦、PMT 读出、闪烁薄膜时间拾取器, 双叠层纵向场阳极分条读出 IC, PMT 矩阵读出 $x-y$ 位置灵敏 Phoswich 闪烁探测器, 康普顿抑制 HpGe γ 探测器等单元是这套装置的基本部件。目前, 该装置已安装在兰州重离子加速器 RIBLL1 终端。性能测试和实验研究正在进行。

关键词 分组延迟线, 椭球面聚焦, PMT 矩阵, 分条阳极 IC.

1 引 言

八十年代中期以来, 远离 β 稳定线非稳定核的产生、衰变等特性研究, 放射性核次级束流引起的核反应机制研究成为中能和高能重离子核物理的热点。根据理论预言, 大约有 6000 至 8000 种寿命长于 μs 级的远离 β 稳定线的放射性核素, 而稳定核素及在 β 稳定线附近的核素约 270 种。在此之前, 核物理大量的实验数据、诸多理论模型、定理、定律, 都是针对稳定核和接近 β 稳定线核素。这些实验数据和理论解释对滴线附近的核素是否有效? 滴线核自身有何规律? 类似问题亟待人们去探索研究。自 1985 年 Tanihata 等人的丰中子奇异核先驱实验^[1]以来, 国际上绝大多数重离子核物理实验室都相继建成了放射性核次级束流线, 如 LISE (GANIL)^[2,3], A1200(MSU)^[4,5], RIPS (REKIN)^[6,7], FRS (GSI)^[8,9]等。利用弹核碎裂(PF)机制和在飞行中分离方法成批地产生及鉴别出大量滴线附近的新核素^[10-14], 并发现了新的衰变方式。兰州重离子加速器国家实验室的中能重离子放射性核次级束流线 RIBLL1 (Radioactive Isotope Beam Line in Lanzhou, phase-1) 于 1994 年建成并完成了两个实验^[15]。产生并鉴别出 49 种放射性核素。为了开展包括奇异核的产生、衰变、反应机制等特性的更广泛的实验研究, 我们研建了 RIBLL1 终端实验装置。这是一套具有同时测量入射次级束流和次级反应产物 x, y, Z, A, E, t 等参数, 高分辨、高灵敏、大动态范围、大立体角、零度探测器装置。它将在放射性核的鉴别、衰变特性和结构研究及 RIB 引起的反应机制研究中起重要作用。

2 设计与结构

图1是RIBLL1终端实验装置布局图。它由次级靶前探测系统,次级靶及控制系统和次级靶后探测系统构成。靶前探测系统包括TOF1探测器,双维位置灵敏PPAC,横向场气体电离室等探测器。靶后探测系统由Si ΔE 穿透探测器,双叠层,分条阳极,大面积纵向场电离室,TOF2,光电倍增管矩阵读出的大面积Phoswich探测器。次级靶由计算机通过步进电机自动控制相对束流的位置和角度。两套反康普顿 γ 谱仪对称放置于次级靶的两侧($\theta_{lab} = \pm 90^\circ$),覆盖 $\sim 2\pi$ 立体角。图1给出实验装置各部分的详细描述。

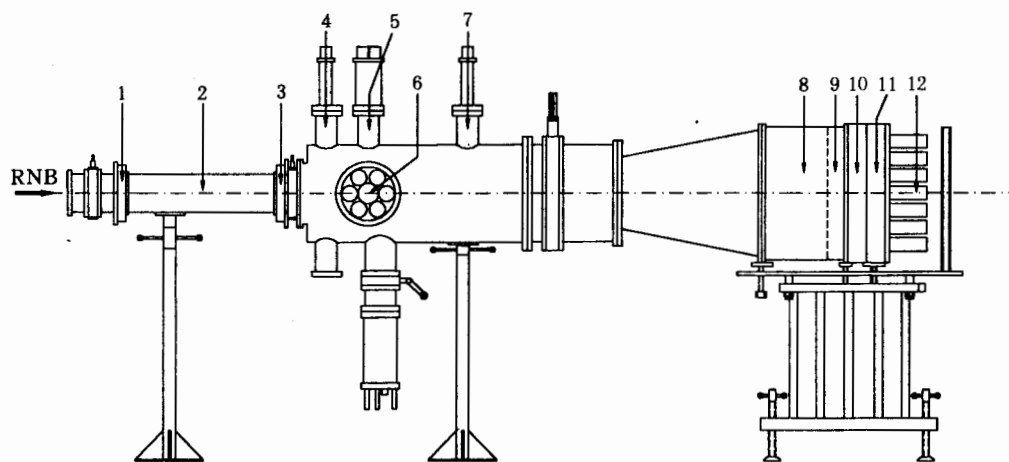


图1 RIBLL1 终端实验装置布局图

1. x, y 双维位置灵敏 PPAC1, 2. 横向场气体电离室, 3. x, y 双维位置灵敏 PPAC2,
4. TOF 停止时间探测器, 5. 次级靶及控制系统, 6. 反康普顿 γ 谱仪,
7. Si ΔE 全耗尽探测器, 8. 纵向场双叠层气体电离室, 9. BC418+BC444 夹层快慢闪烁探测器,
10. 光导, 11. 光电倍增管矩阵支架, 12. 光电倍增管矩阵.

2.1 次级反应靶控制系统

次级靶控制系统由自动控制计算机、步进电机驱动电源、步进电机、传动机构、靶架等部件构成。次级反应靶安放在铜制靶架上,控制靶架升降和角度转动通过计算机控制步进电机实现。这是一套真空密封控制装置。以前通常采用威尔逊密封技术或金属软管密封技术。威尔逊密封技术因摩擦力大,造成的应力也大,这导致转动和进动误差大。软管密封技术转角和进动范围小,应力大。因此,我们采用磁耦合真空传动技术。将一块高磁场强度的圆柱型永久磁铁固定在步进电机的转轴上,另一块高场强永久磁铁被加工成中空圆柱型,置于真空室中,并与电机上的磁铁紧密耦合。当电机带动磁铁旋转时,在真空中与之耦合的磁铁带动靶架进动或旋转。这种真空传动装置的优点是,转动范围大($0^\circ - 360^\circ$),进动范围也大,且精度高,无应力,准确可靠,真空密封问题也很好

解决。这种磁耦合真空传动技术不仅被用于转靶系统,而且也用于放射性核次级束流线的降能器、狭缝、法拉第筒、初级靶、起始时间探测器、停止时间探测器等部件的控制。步进电机为每厘米 1000 步,即 $0.01\text{mm}/\text{步}$ 。进动行程范围 $\sim 20\text{cm}$,由限位开关控制。

2.2 双维位置灵敏平行板雪崩室

传统的双维位置灵敏 PPAC 是由阳极、 x 极、 y 极、入射窗和出射窗构成。为了探测中能轻带电粒子,在传统的 PPAC 上增加了两个电极。PPAC 有效面积为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$,中间阴极由 $1.5\mu\text{m}$ 厚双面镀金 Mylar 膜制成,工作时加负电压。 x 极和 y 极由镀金钨丝构成,丝直径 $25\mu\text{m}$,间隔 2mm 。每个平面的丝被分成六组;组内的丝用延迟电缆连接,两端通过低阻抗接地并读出组内位置信号。两个阳极由 $1.5\mu\text{m}$ 厚单面镀金 Mylar 膜制成。窗为 $6\mu\text{m}$ 厚 Mylar 膜,被直径 $300\mu\text{m}$,间隔 10mm 不锈钢丝网支撑。各平面之间间隔为 3mm 。工作气体为正庚烷, 10mb 气压。检验测量时,阳极加 $+650\text{V}$ 电压,阴极加 -650V 电压。由于较传统双维位置灵敏 PPAC 增加了两个电极,在丝与阴极之间产生的原初电子经正比放大,漂移到丝极附近产生雪崩,最后在阳极附近又经正比放大,获得了高增益。因此,提高了中能轻带电粒子的探测效率。分组延迟电缆读出加上重心法确定位置。用 ^{241}Am α 源测得 x, y 方向位置分辨 ($FWHM$) 分别为 1.48mm 和 1.50mm 。

2.3 横向电场电离室

横向场电离室尺寸是 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 600\text{mm}$,入射面积与 PPAC 同。它的阳极和阴极由 3mm 厚印刷电路板制成。Frisch 栅为 $25\mu\text{m}$ 直径镀金钨丝,间隔 1mm 平面。均压环的两侧部分由刻条印刷电路板做成,铜条宽 1mm ,间距 5mm 。环的前后部分为 $50\mu\text{m}$ 镀金钨丝,环间连 $10\text{M}\Omega$ 电阻。入射窗、出射窗与 PPAC 同。工作气体为 450mb P10 ($90\%\text{Ar}+10\%\text{CH}_4$)。当工作气压 $p=300\text{mb}$,阴极电压 $V_k=600\text{V}$,阳极电压 $V_A=200\text{V}$ 时,对 $\text{Thc}-\text{Thc}'$ 8.785MeV α 源分辨 ($FWHM$) 为 3.5% 。

2.4 时间拾取探测器

时间拾取探测器位于次级靶前。它是次级束流 TOF 的停止时间探测器。同时又作为次级反应产物 TOF 测量的起始时间探测器。它是闪烁薄膜发光,用椭球面聚焦,光电倍增管读出的时间拾取系统^[6]。图 2 画出了它的结构。厚度 $8-20\mu\text{m}$ NE102A 有机闪烁薄膜,其中心置于 Al 制的内空椭球 ($a=22.0\text{mm}$, $b=23.4\text{mm}$ 的旋转椭球面)的一个焦点上,光电倍增管 (XP2020Q) 光阴极中心位于椭球的

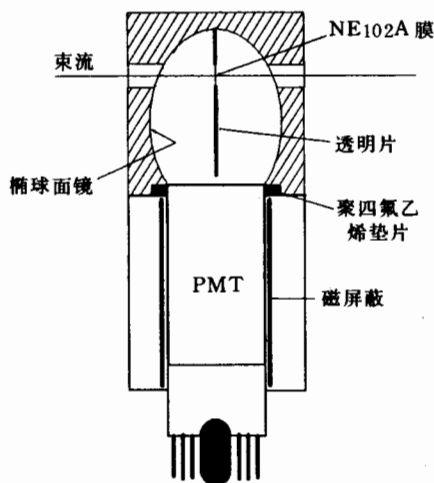


图2 椭球镜面聚焦,光电倍增管读出,闪烁薄膜时间拾取探测器

另一焦点上. 椭球表面由数控机床按程序加工并经过精心抛光, 表面处理. 根据椭球的几何特征, 这样的聚光结构使得入射粒子在闪烁薄膜上激发的光子通过一次反射到达光倍增管光阴极的路径长度相等, 即光程离散小. 入射于闪烁膜中心附近区域粒子引发的光子经反射后, 聚焦于光电倍增管光阴极中心附近很小区域. 使得较小尺寸的光倍增管可以使用. 而且光子在光倍增管内部的行程离散变小. 椭球镜面聚焦的这些优点大大提高了探测器的时间分辨和探测效率. 我们用这套系统得到 $FWHM \sim 140\text{ps}$ 的时间分辨. 实践证明, 这是高时间分辨、高探测效率、低成本、使用简便、性能可靠的较理想的探测器.

2.5 大入射窗阳极分条双叠层纵向电场电离室

大入射窗阳极分条双叠层纵向电场电离室有效面积为 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$, 它有一个入射窗, 一个公共阴极, 各自由一个阳极, Frisch 栅构成, 图 3 是它的示意图. 阳极距 Frisch 栅 10mm , 阴极距 Frisch 栅 140mm . 阴极和 Frisch 栅均由直径 $25\mu\text{m}$ 镀金钨丝做成, 丝的间距 1mm . 阳极是分条镀 Al 厚度 $1.5\mu\text{m}$ Mylar 膜, 条的宽度 56mm , 间隔 1mm , 两个阳极条相互垂直. 这样结构的电离室既提高了计数率, 也提供了小角度符合测量的机会. 大面积电离室窗是该电离室制作的难点. 它是高真空靶室与气体电离室的隔离屏. 既不能漏气, 又得承受 ~ 2 吨的压力. 这样大压力的窗, 目前为止, 还未发现有人报道. 我们用 23mm 厚, $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ Al 板, 加工成 $56\text{mm} \times 56\text{mm}$ 方孔网格阵列, 孔的间隔 3mm . 两个方向布上 $\phi 300\mu\text{m}$, 间隔 10mm 的不锈钢丝, 用环氧树脂将 $4\mu\text{m}$ 镀 Al Mylar 膜粘在布丝面上. 这样, 窗可以承受 $\sim 700\text{mb}$ 的气压. 用 P10 工作气体, $p = 650\text{mb}$, $V_K = 660\text{V}$, $V_A = 220\text{V}$, 对 $\text{Thc} - \text{Thc}'$ 8.785MeV α 粒子能量分辨 ($FWHM$) $\sim 2.5\%$.

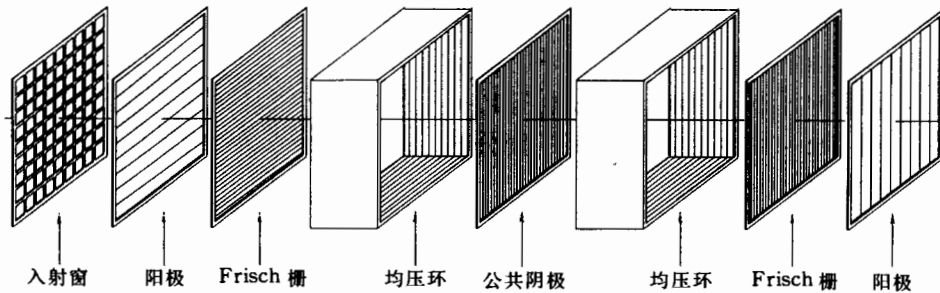


图3 双叠层、阳极分条读出、大面积电离室结构示意图

2.6 大面积位置灵敏闪烁探测器

大面积双维位置灵敏闪烁探测器位于纵向场电离室的出口, 灵敏面积是 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$. 它由 1mm 厚快塑料闪烁体 BC418, 80mm 厚慢闪烁体 BC444, 80mm 厚高透明有机玻璃光导, 100mm 厚加工成的光电倍增管光磁屏蔽低碳钢板和 49 个光电倍增管 GDB-49 构成. 闪烁体和光导四周用黑色胶带包裹, 钢板上加工出 $7 \times 7 \phi 56\text{mm}$ 圆孔, 圆孔中心距 71.8mm , 49 个 GDB-49 光电倍增管就座落在这些孔里. 探测器的草

图在图4中给出. 快慢闪烁体用硅胶耦合, 构成 Phoswich, 测量入射粒子的电荷 Z 和能量 E . 入射粒子空间位置由接近入射粒子径迹的光电管探测到的光分布重心确定. 即

$$R = \frac{\sum PH(i) \times r(i)}{\sum PH(i)}$$

其中 $PH(i)$ 是第 i 个光电倍增管的脉冲高度, $r(i)$ 是该管的位置. 在闪烁探测器与光导以及光导与光电倍增管光阴极之间留有小的空隙, 这使得发射角小于全反射角的闪烁光才能被光电倍增管接收. 反射光则被包有黑胶带的闪烁器边缘和光导边缘吸收. 只有面对粒子径迹的一定锥角内的光电倍增管被点火, 这降低了距离大于两个光电倍增管粒子双重点火的几率. 每个光电倍增管用高导磁率材料包裹. 光阴极附近置一发光二极管, 用于校正能量与跟踪监测光电倍增管增益漂移.

BC418 快闪烁体具有好的时间特性, 为次级反应产物的 TOF 测量提供高分辨的停止时间信号.

2.7 康普顿抑制 γ 谱仪

康普顿抑制 γ 谱仪有两套, 对称置于次级靶两侧, 与束流轴线成 90° , 覆盖近 2π 立体角. 每一套由 6 个 $BaF_2 + PMT$ 包围一个 $HpGe$ (ORTEC GEM series) γ 探测器构成. 对 $1.33MeV$ ^{60}Co $HpGe$ 能量分辨 ($FWHM$) 是 $1.95keV$. 这套谱仪可用于奇异核衰变特性在线测量和生成的远离核的核结构研究.

3 初步结果和讨论

由于放射性核次级束流强较初级束流低几个量级, 次级反应产物相应也低. 这需要探测器系统有大立体角, 高计数能力, 高探测效率. 从放射性同位素束流线上用 $B\rho$, ΔE 和 TOF 分离选择次级束流的特点, 次级靶前探测器系统要有好的 Z , A , t , x , y 分辨. 高增益 $x-y$ 位置灵敏 PPAC, 横向场 IC, TOF, 结合降能器和磁偏转, 可以实现次级束流的分离和测量. 对次级反应产物衰变特性和核结构研究, 要求出射产物探测器系统也有好的 Z , A , t , x , y 分辨. 中、高能重离子引起的弹核碎裂产物前冲于 0° 附近很小锥角内. 因此, 探测器系统设计应该且必须包括测量 0° 附近空间反应产物. 我们的大面积阳极分条 IC, 二维位置灵敏 Phoswich 闪烁探测器就是针对这种情况设计的. 它们对次级靶的张角 $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ 均为 $5^\circ - 15^\circ$, 它可以测量 90% 以上的反应产物. 也由于次级束流流强低, 我们才设计了高增益 PPAC, 提高对很高能量相对轻的次级束流的探测效率. 椭球面聚焦、PMT 读出的 NE102A 薄膜时间拾取探测器已成功的用于 RIBLL1 的检验实验 $^{18}O(50 MeV/u) + Be$, $^{40}Ar(25 MeV/u) + Be$ 和反应机制研究实验 $^{40}Ar(25 MeV/u) + ^{197}Au$, ^{115}In , ^{27}Al , ^{58}Ni , 时间分辨达 $\Delta t \sim 140 ps$. 采用栅格结构支撑 $4\mu m$ 厚 Mylar 膜的

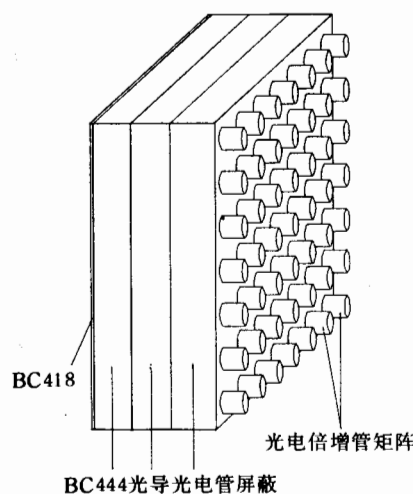


图4 用光电倍增管矩阵读出的 $x-y$ 位置灵敏闪烁探测器

500mm × 500mm 大面积入射窗承受了~700mb 气压. 为制作大面积气体电离室积累了经验.

最近我们用 50 MeV /u ^{18}O 轰击 Be 靶, 经 RIBLL1 分离掉主束, 用次级束轰击 Si 靶, 检验该实验装置的性能. 图 5 是测得的同位素分布. 显然, $Z=2$ 到 $Z=6$ 元素的同位素被清楚分辨.

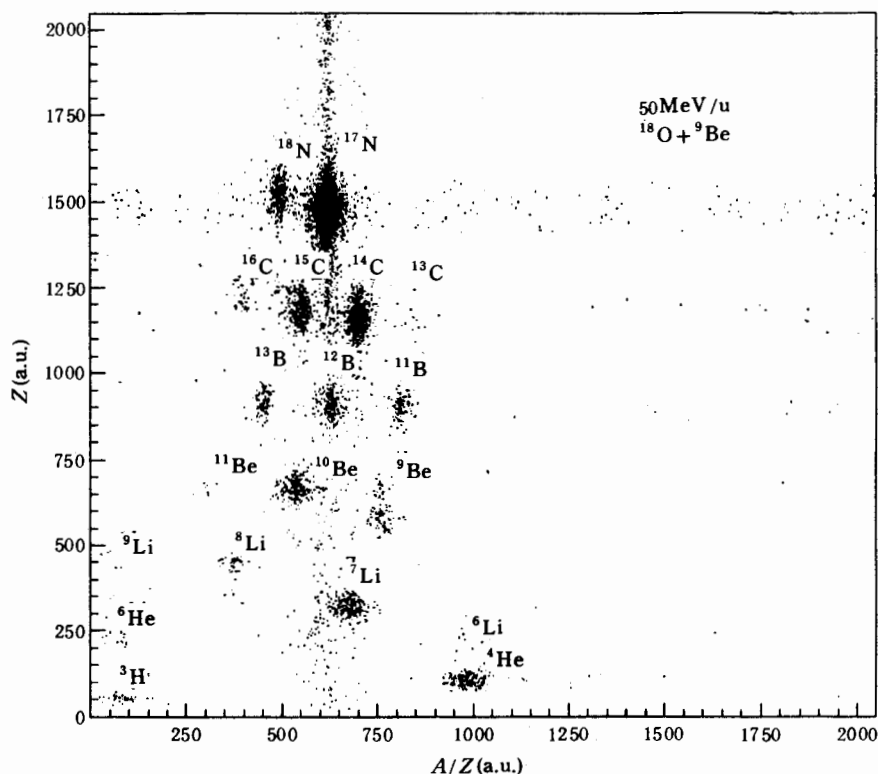


图 5 Z 和 A/Z 关联散布图

大面积二维位置灵敏 Phoswich 闪烁探测器是制作大立体角, 探测能量很高相对轻带电粒子的理想候选. 这样的探测器立体角大, 死区小, 制作、使用容易, 成本低, 有很好的性能价格比.

参 考 文 献

- [1] I. Tanihata *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 2676.
- [2] R. Anne *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A257** (1987) 215.
- [3] A. C. Mueller *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **B56/57** (1991) 559.
- [4] B. M. Sherrill *et al.*, *Proc. 1st Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams* (1989) p72.
- [5] B. M. Sherrill *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **B56/57** (1991) 1106.
- [6] T. Kubo *et al.*, *Proc. 1st 2nd Conf. on Radioactive Nuclear Beams* (1990) p563.
- [7] M. Ishihara *et al.*, *RI beam factory advisor's meeting* (Sept. 1994).

- [8] H. Geissel *et al.*, GSI Report GSI-89-30 (1989).
- [9] H. Geissel *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **B70** (1992) 286.
- [10] Guillemaud-Mueller *et al.*, *Z. Phys.*, **A322** (1985) 415.
- [11] F. Pougheon *et al.*, *Europhys. Lett.*, **2** (1986) 505.
- [12] D. Guillemaud-Mueller *et al.*, P GANIL 88 — 14.
- [13] D. J. Morrissey *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A538** (1992) 333c.
- [14] M. Weber *et al.*, GSI-91-49 preprint.
- [15] Zhan Wenlong *et al.*, Radioactive ion beam at HIRFL, 3rd IN2P3-RIKEN Symp. on Heavy Ion Collision Oct. (1994).
- [16] Zhao Youxiong *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A355** (1995) 464.

Experimental Setup at RIBLL 1

Guo Zhongyan Zhan Wenlong Zhou Jianqun Zhao Youxiong
Wang Jinchuan Luo Yongfeng Liu Guanhua Lei Huaihong
Zhang Wansheng Qi Zhong Lin Yuangen

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

Received 7 April 1995, Revised 9 October 1995

Abstract

RIBLL 1 experimental setup consists of RIB identification system, secondary target control system and secondary reaction products measurement system. The high gain x - y position sensitive PPAC with delay cable grouped readout, the scintillation foil time pickup detector focusing with ellipsoidal surface, the traverse field IC, the large area two dimensional position sensitive scintillatillator with PMT matrix readout, the Compton suppressed HpGe γ -ray detectors and twin longitudinal field IC are major components. This setup has been installed at RIBLL 1. The performance measurements and test experiments are in progress.

Key words delay cable grouped, focusing with ellipsoidal surface, PMT matrix, IC with anode striped.