

光纤在RIBLL束流诊断中的应用*

孙志宇·詹文龙·郭忠言·肖国青·江山红·李加兴
王金川·孟祥伟·张万生·秦礼军·王全进

摘要·介绍了BCF-12光纤的特性,着重描述了以BCF-12光纤为主体,用光电倍增管读出的束流诊断元件的结构、特性及其在兰州放射性离子次级束流装置RIBLL上的应用。

关键词·光纤,束流诊断,放射性核素次级束流线

Use of scintillation fibers for diagnosis of RIBLL

SUN Zhiyu · ZHAN Wenlong · GUO Zhongyan · XIAO Guoqing · JIANG Shanhong · LI
Jiaxin · WANG Jinchuan · MENG Xiangwei · ZHANG Wanshen · QIN Lijun · WANG Quanjun
(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract

· · The characteristics of scintillation fiber BCF-12 and the beam diagnosis units using BCF-12 fibers and PMT for reading out was introduced. Emphasis was laid on describing its structure, character and applications in the radioactive ion beam line in Lanzhou (RIBLL).

Key words · Scintillation fiber, Beam diagnosis, Radioactive ion beam line

· · · 随着加速器技术和粒子探测技术的发展,世界上一些主要的核物理实验室先后都在建立各具特色的放射性离子次级束流线装置^[1-4]。放射性离子次级束流线为核物理研究提供了种类繁多的放射性炮弹,使核物理研究能够拓广到中子滴线和质子滴线区域。对这些核奇异性质的研究可检验原有的核模型核理论,丰富核数据,发展新的核物理实验技术和理论,为重离子核物理研究开辟了新的广阔前景。放射性束物理已成为核物理研究的最热门课题之一。为了开展我国放射性束物理的研究,在中国科学院和国家科委的支持下,兰州放射性离子次级束流线(RIBLL)于1997年7月顺利建成并投入运行。

· · 同初级束流相比,RIBLL所能提供的束流具有流强小和流强变化范围大等特点。在相同的初级束流条件下,随所选次级核素的不同,流强可从每秒一个粒子($\sim 1 \times 10^{-12}$)变化到每秒 10^8 个粒子($\sim 10^{-4}$)。除了流强的测量外,及时测量束流的位置和剖面的大小,对于指导束流的调节和放射性离子次级束流(RIB)的分离也有重要意义。因此RIBLL需要一种位置灵敏,能够在高计数率及大计数率跨度条件下工作且简单可靠,耐辐照能力强的探测器用于束流诊断。传统用于束流诊断的法拉第筒及多丝探测器等诊断元件仅提供束流的粗略信息,却难以应用于小束流的诊断。快塑料闪烁体具有良好的时间分辨和高计数率,在核物理实验中快塑料闪烁体薄膜被大量应用于获取时间信号。对于次级束流,由于束流强度的减小,使得对束流的直接测量成为可

能。但快塑料闪烁体探测器中用于与光电倍增管耦合的光导或光反射罩形状奇特,加工困难,而且其位置分辨能力也不够理想,这些都极大地限制了它的使用。我们用塑料光纤代替闪烁体薄膜,研制成功了有高精度分辨的诊断元件并用于RIBLL的调试过程中,取得了良好的效果。

1 · BCF-12光纤的特性

· · 使用的光纤BCF-12是美国Bicron公司的标准产品,其结构如图1所示。光纤由以聚苯乙烯(polystyrene)为主体的快塑料闪烁体(折射率 $n=1.60$)构成,光学反射层为该公司标准覆盖材料PMMA(分子式 $C_5H_8O_2$, $n=1.49$),厚度小于光纤尺寸的4%。在反射层以外,还覆盖有一层厚度为 $10-15\mu m$ 的外部吸收层以防止外部光子的干扰。表1列出了BCF-12的一些主要性能参数^[5]。入射带电粒子穿过光纤时,塑料闪烁体受激发光,所发光子通过全反射方式(全反射角 68.6°)在光纤内传输,衰减长度 $2.2m$ 。信号衰减时间短($2.7ns$),使其能够工作在高计数率条件下。而 $435nm$ 的发射光谱波长峰值也可与光电倍增管良好匹配,加上优良的机械性能,使光纤可以起到闪烁体和光导的双重作用。因而利用快时间响应光电倍增管读出的光纤探测器对于次级束流诊断是合适的。

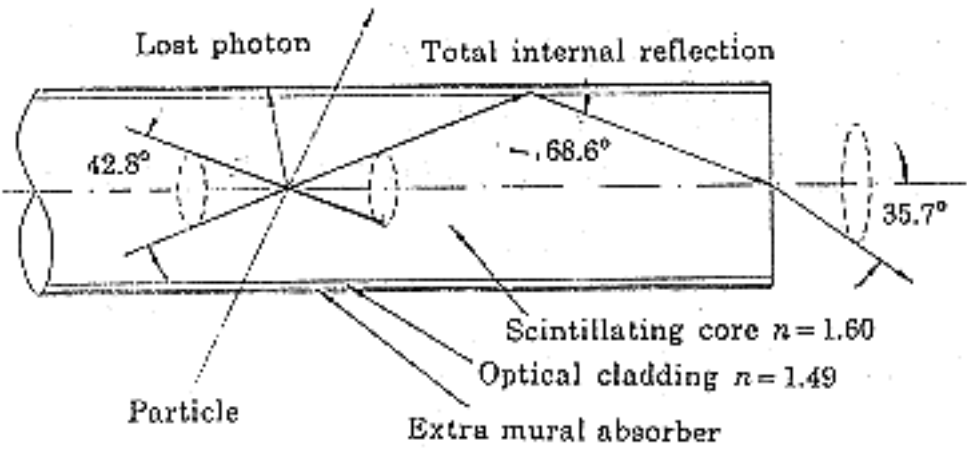


图1 · 光纤发光传输原理示意图
Fig.1 Structure of scintillating fiber

表1 · Bicron BCF-12主要性能参数
Table 1 The main characteristics of Bicron BCF-12

光纤型号 Model	光波波长 λ/nm	衰减时间 t/ns	衰减长度 L/m	光子产额 Y/MeV	基体密度 $\rho/g\cdot cm^{-3}$	收集效率 $\varepsilon/\%$
BCF-12	435	2.7	2.2	~8000	1.05	~4.4

2 · 应用于RIBLL的光纤诊断元件

· · RIBLL是坐标和动量双消色差的放射性离子束流装置。其总体结构为 $Q_{01}Q_{02}D_0-T_0-Q_1Q_2D_1Q_3Q_4-C_1-Q_5Q_6D_2Q_7Q_8-T_1-Q_9Q_{10}D_3Q_{11}Q_{12}-C_2-Q_{13}Q_{14}D_4Q_{15}Q_{16}-T_2$ 模式(图2)。图2中, Q

为四极透镜,D为二极透镜,T表示聚焦点,而C表示色散点。 T_0-C_1 与 C_1-T_1 以及 T_1-C_2 与 C_2-T_2 段是分别对称的,而 T_0-T_1 与 T_1-T_2 段是反对称的。这种结构有利于消除邻近核素的污染,提高RIB的纯度。为了调整RIB轨道位置、色散、聚焦和消色差情况,在 $T_0T_1T_2S_1$ 和 S_2 区域放置各种束流诊断元件,测量RIB的强度、位置、横截面尺寸和密度分布,以指导调整参数,得到最佳RIB。考虑到RIBLL主要应用于中能重离子物理研究,其所产生的次级粒子都具有较高的能量。且以C、H粒子为主的塑料闪烁体对重离子的阻止能力低,故厚度较薄的塑料光纤对束流强度几乎不产生影响。基于此,我们研制了以光纤为主体的多种探测器,并应用于束流诊断。下面将简述它们的结构和应用。

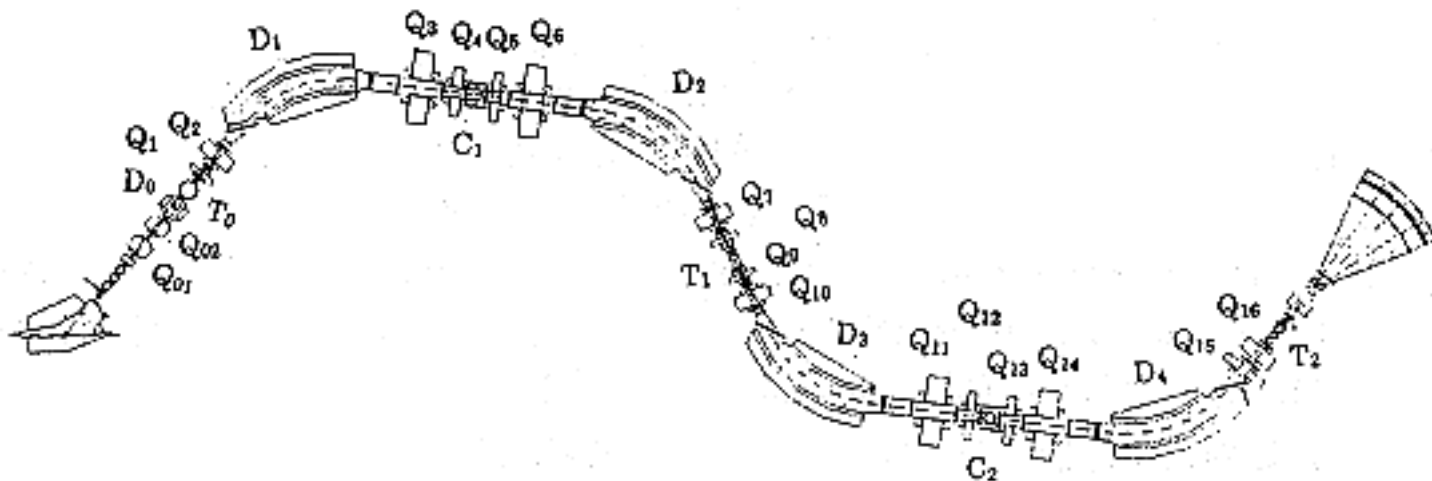


图2 · RIBLL总体设计图
Fig.2 · f003 Layout of RIBLL

2.1 · 束流监视器

HIRFL-SSC提供的初级中能重离子束流,经 Q_{01} 和 Q_{02} 强聚焦后,轰击位于 T_0 的初级反应靶,通过弹核碎裂反应产生RIB。在 T_0 的出口,放置如图3所示的束流监视器,通过测量束流的对称性,以确定束流走向,指导调整束流轴向与RIBLL几何中心重合。

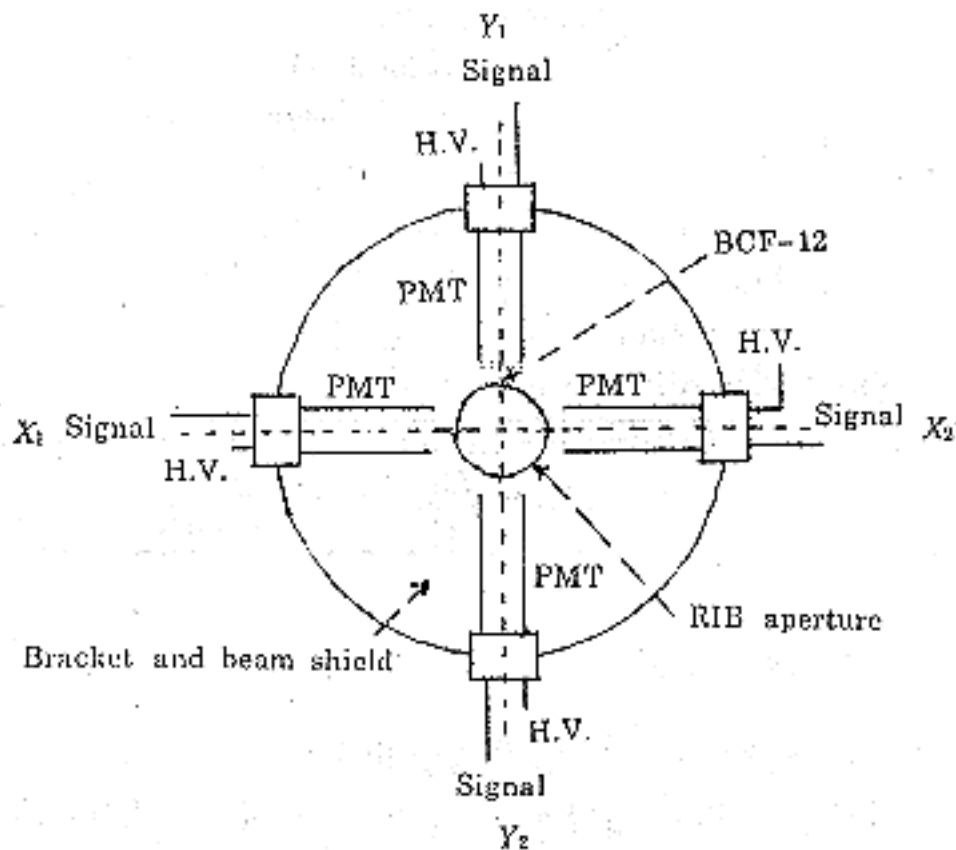


图3·束流监视器结构示意图
Fig.3 Structure of the beam monitor

· · 该探测器是基于出射碎片对于束流轴线的空间对称性,通过测量大角度散射粒子来判断束流的走向。4根光纤上下左右($Y_1 Y_2 X_1 X_2$)对称放置在中间开孔的铝制圆盘上,孔中心与RIBLL轴线重合。圆盘厚度2cm,起到为光纤和光电倍增管(PMT)屏蔽束流及支撑固定的作用。光纤截面为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的方形,每根光纤的一端伸出孔边缘5mm(长度可调,按计数率确定),另一端与光电倍增管R1213直接耦合。PMT的输出信号经恒分甄别器(CFD)甄别成形后,送到快定标器计数。根据4个定标器 Y_1 、 Y_2 、 X_1 、 X_2 的计数率的对称性,来判定束流的走向。实践表明,这种束流监视器具有抗干扰、耐辐照、高计数率和使用简便等优点。

2.2·束流断面扫描器

在RIBLL的第一散焦点 C_1 处,束流包络处于最大值, $X \times Y = 200\text{mm} \times 100\text{mm}$,加上多种RIB混杂,使次级束流的强度大为提高。而在此处,我们只关心RIB粒子沿水平方向的分布,因此我们设计了一个束流断面扫描器以获取束流在水平方向的大范围分布,其结构和电子学框图如图4所示。一根 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 方形截面光纤横跨在2cm厚的铝制支架上,并与X方向垂直,支架为光纤非直线部分和光电倍增管提供屏蔽和支撑作用。光纤的两端直接与光电倍增管R1213耦合,通过采用双端读出和符合技术以减小干扰。两个R1213的输出信号 t_2 和 t_1 分别通过恒分甄别器CFD的甄别、成形后进入快符合单元CO,符合输出到定标器,给出与光纤位置相对应的RIB束流计数。整个扫描器可在步进电机驱动下,沿水平方向精确移动(移动速度 5mm/s ,位置误差 $\pm 0.05\text{mm}$)。随着扫描器的移动,就得到了计数-X位置的RIB沿水平方向的分布图。整个系统由计算机控制,可随时对束流水平分布给予监测。

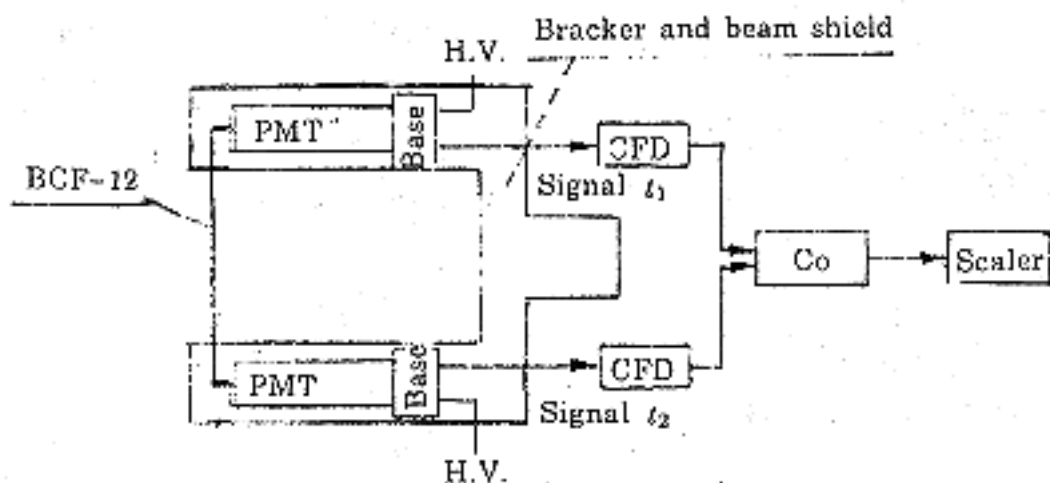


图4 · 束流扫描器结构示意图
Fig.4 Structure of the beam scanner

2.3 · 二维束流断面探测器

束流调节需要知道束流的断面信息。在RIBLL的第一聚焦点 T_1 处,由于束流包络减小到约 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$,故对探测器的位置分辨提出了较高的要求。我们设计的二维束流断面探测器由两个单维位置灵敏探测器(图5)紧密相叠而成,其光纤走向互相垂直。截面为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的方形光纤沿水平方向连续弯绕,中间部分平行紧密排列构成一光纤段阵列,RIB轴线垂直通过光纤平面中心。光纤弯折部分等长,其曲率半径应保证光子的全反射传输。光纤两端直接与R1213耦合。由于光纤弯折部分及PMT被铝制支架所屏蔽,故只有暴露于RIB孔道内的光纤段阵列可能发生点火。因而两个R1213所产生的时间信号 t_1 和 t_2 经CFD甄别、成形后送到CAMAC时间-数字变换器(TDC)所产生的时间差 $t_2 - t_1$ 为一不连续的分立谱。谱中的峰与阵列中的光纤段一一对应。因而从 $t_2 - t_1$ 可以确定该事件中点火的光纤段的位置,从而确定入射粒子的单维位置。由于两根光纤段之间的弯折部分较长,使得对后端电子学分辨能力的要求大为降低,其位置分辨能力(0.5mm)仅由光纤的几何尺寸决定。RIBLL产生的RIB粒子能量较高,其在光纤材料中的射程远大于单层光纤的厚度。故任一入射粒子必然在两层探测器都发生点火,从而可唯一确定粒子的空间位置。

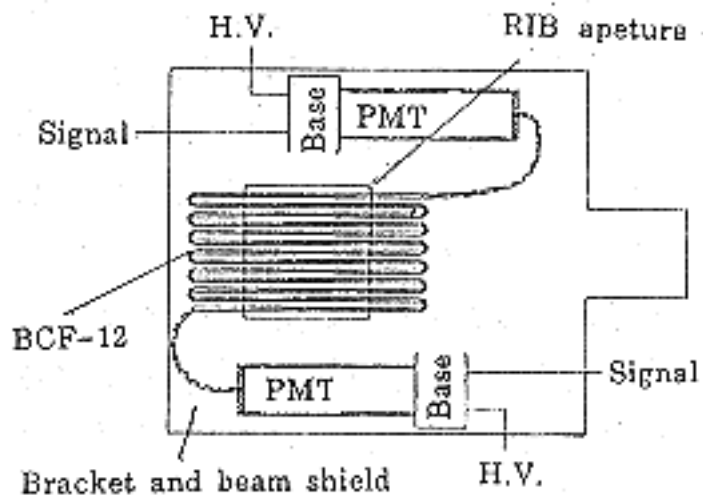


图5 · 双维RIB断面探测器 (单维)

Fig.5 2-D RIB section detector (1-D)

2.4 · 一维束流断面探测器

在RIBLL的第二散焦点 C_2 处,由于RIB的纯化,束流强度大为减弱。因而我们采用由多根光纤沿X方向平行排列而成的一维束流断面探测器(图6)。由于所用光纤为 $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 方形截面,故其紧密排列可覆盖整个束流包络,RIBLL轴线垂直通过光纤平面中心。光纤两端集束状耦合到光电倍增管R5600U的光阴极上,两个PMT的阳极信号 t_1 、 t_2 经CFD甄别成形并进入CAMAC TDC,信号时间差 $t_1 - t_2$ 就表示了RIB离子在该平面的X位置。相对于断面扫描器,其所需测量时间大为缩短。相对于大尺寸的散焦点束流包络,其相对位置分辨(约5%)基本可以满足我们的需要。

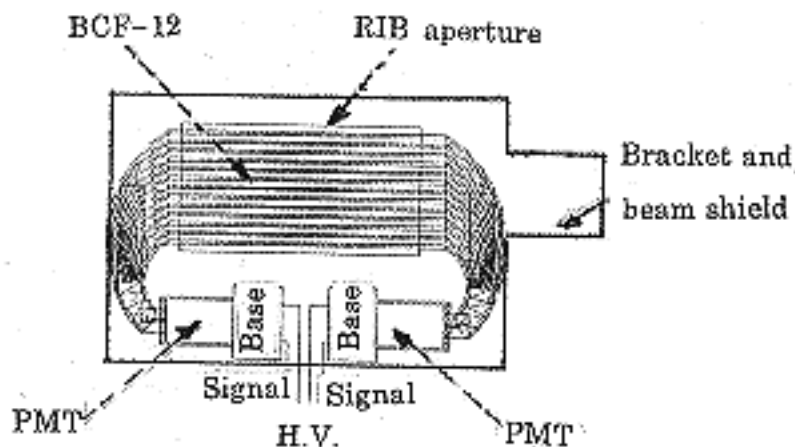


图6 · 一维RIB断面探测器

Fig.6 1-D RIB section detector

3 · 结果和讨论

· 较薄的塑料闪烁体材料虽然对束流强度没有大的影响,但其对粒子能量,RIB纯度的影响不

可忽略。故我们所研制的各种以塑料光纤为主体的束流诊断探测器(除束流监视探测器外)全部由步进电机驱动,平时处于离线状态,仅在测量过程中进入束流通道内。其整个过程由计算机控制在线实现。

· · 这些束流诊断探测器已成功地应用于RIBLL,并在先后进行的利用 ^{20}Ne 产生丰质子同位素和利用 ^{18}O 产生丰中子同位素的在线调试过程中发挥了巨大作用。

· · 图7为经RIBLL分离后,在 C_1 处使用断面扫描器获取的 ^{19}Ne (80MeV/u $^{20}\text{Ne}+^9\text{Be}$)(a)和 ^{17}N (60MeV/u $^{18}\text{O}+^9\text{Be}$)(b)次级束的束流剖面水平分布谱。从中可以确定束流分布的水平中心,指导我们对磁元件的调整。实验表明,这些探测器具有较快的响应时间和较好的分辨能力。图7(c)是上述探测器测到的 ^{17}N 束流中心随磁场变化的移动,图中两条曲线对应磁场差别小于0.15%。

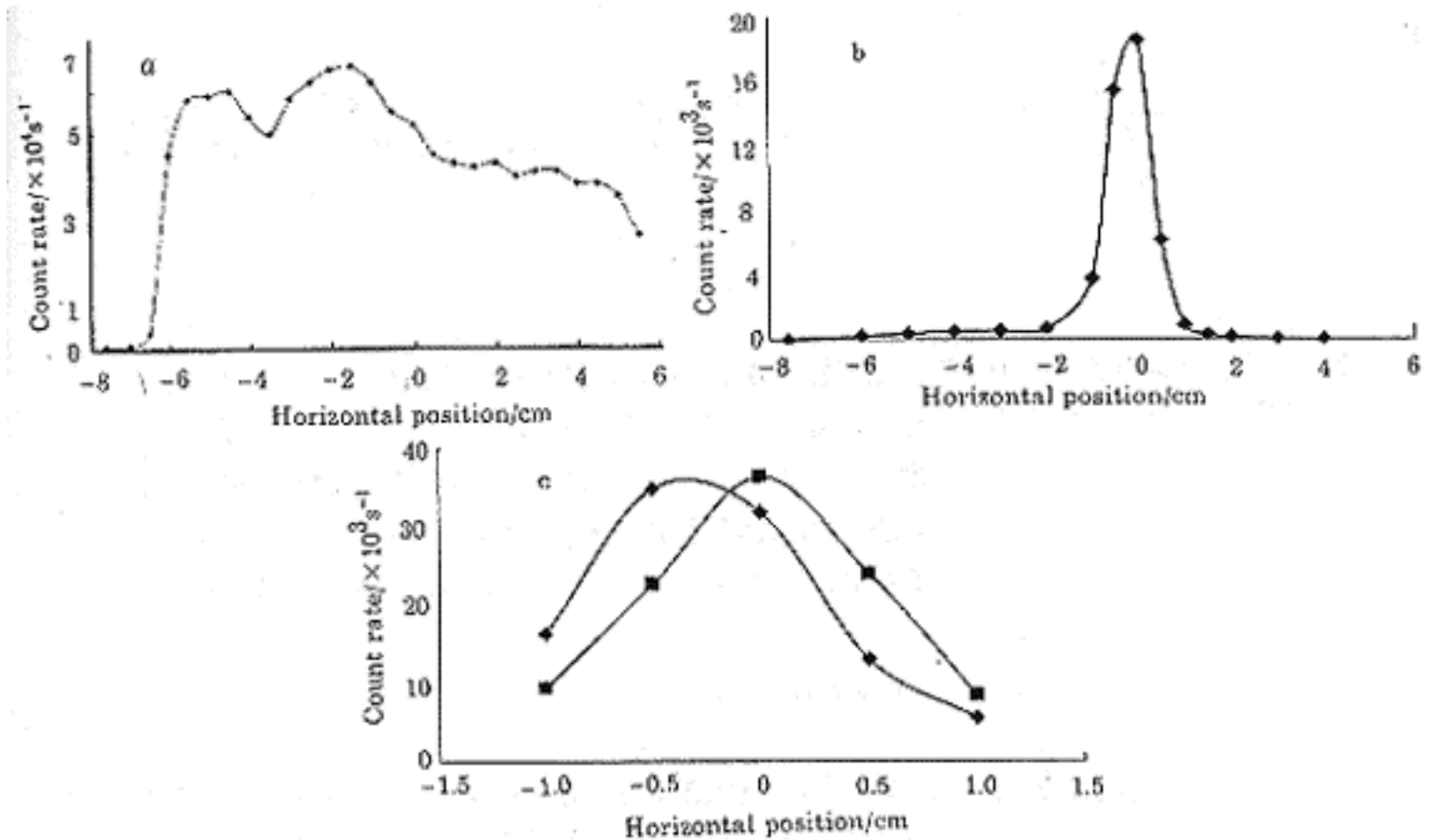


图7 · C_1 处束流剖面水平分布谱

(a) ^{19}Ne 的水平分布,(b) ^{17}N 的水平分布,(c)不同磁场条件下 ^{17}N 的水平分布

Fig.7 Spectrum of beam horizontal distribution in C_1

(a) ^{19}Ne , (b) ^{17}N , (c) ^{17}N in different magnetic field

在近60天的RIBLL在线调试及实验过程中,我们研制的各种束流诊断探测器始终处于较好的工作状态,表明其具有较高的稳定性、可靠性和耐辐照能力。它可以在 10^{-12} - 10^{-4} 的流强跨度下正常工作,这是气体探测器和半导体探测器无法比拟的。

· · 由于条件所限,在研制这些探测器时,我们简单采用了单阳极光电倍增管及其阵列,使探测器结构复杂,可靠性下降。下一步计划采用多阳极光电倍增管作为光纤读出元件并改进数据获取

系统,以简化系统结构,提高响应速度,全面提升探测器性能,更好地满足RIBLL束流诊断的需要。

* 中国科学院和国家科技部资助项目

作者单位:孙志宇·詹文龙·郭忠言·肖国青·江山红·李加兴·王金川·孟祥伟·张万生
· 秦礼军·王全进(中国科学院近代物理研究所·兰州·730000)

参考文献

- 1 Anne R, Bazin D, Mueller A C,*et al.* Nucl Instr Meth, 1987,A257:215
- 2 Sherrill B M, Morrissey D J, Nolen J A,*et al.* Nucl Instr Meth, 1991,B56/57:1106
- 3 Kubo T, Ishihara M, Inabe N,*et al.* Nucl Instr Meth, 1992,B70:309
- 4 Geissel H, Armbruster P, Behr K H,*et al.* Nucl Instr Meth, 1992,B70:286
- 5 BICRON Scintillation Products, 1996

收稿日期·1998-03-26,修回日期·1998-06-08