

RIBLL 中的 TOF 测量

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

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 描述了一种为兰州放射性核束流线(RIBLL)研制的时间拾取装置. 次级束引起闪烁薄膜发光, 椭球面镜聚焦, 光电倍增管读出, CAMAC TDC记录次级束的飞行时间. 其时间分辨可以达到140ps, 计数率可以达到 10^8 pps.

关键词 RIBLL 椭球面镜聚焦 飞行时间(TOF)

1 引言

自80年代中期以来,以弹核碎裂为基础,采用磁偏转-降能器-磁偏转、在飞行中鉴别和分离放射性核束的奇异核次级束流线装置,先后在国际上各大核物理实验室建成并投入运行,如法国GANIL的LISE^[1],美国MSU的A1200^[2],日本RIKEN的RIPS^[3],德国GSI的FRS^[4]. 中国科学院近代物理研究所于1997年建成了兰州重离子放射性核束流线装置(RIBLL). 该装置各项指标都达到了世界先进水平,1997年底已投入使用,并完成了第一批放射性核束引起次级反应的物理实验.

放射性核束物理是当今核物理研究的三大前沿领域之一. 放射性核束装置为放射性核束物理研究,如核反应和核结构研究,提供了崭新的不可替代的高水平实验手段. 放射性核束物理研究不仅可以检验和发展现有的原子核理论,而且极大地拓广了原子核物理研究,使之达到滴线核区域. 放射性核束物理也极大地促进了核应用科学、核天体物理、凝聚态物理、固体物理、材料科学等相关科学的发展,并为一些相关交叉学科提供了许多新的生长点.

RIBLL的建成并顺利投入使用,将为我国放射性核束物理研究跻身于世界先进行列提供良好的物质条件.

2 RIB的 $B\rho$ - ΔE - $B\rho$ -TOF分离原理

从次级束(RIB)的产生机制看,放射性核次级束流研究装置可以分为两类:同位素在

线分离型 (ISOL) 和弹核碎裂型 (PF). RIBLL 是属于 PF 型, 这种类型的装置产生的 RIB 寿命短 ($\sim \mu\text{s}$)、能量高, 可直接用于次级核反应. 从 Goldhaber 的统计模型理论^[5], 炮弹碎片的速度接近炮弹的速度, 而碎片能量为

$$E_f = \frac{A_f}{A_p} E_p, \quad (1)$$

其中 A_f, E_f 为碎片的质量和能量, A_p, E_p 为炮弹的质量和能量.

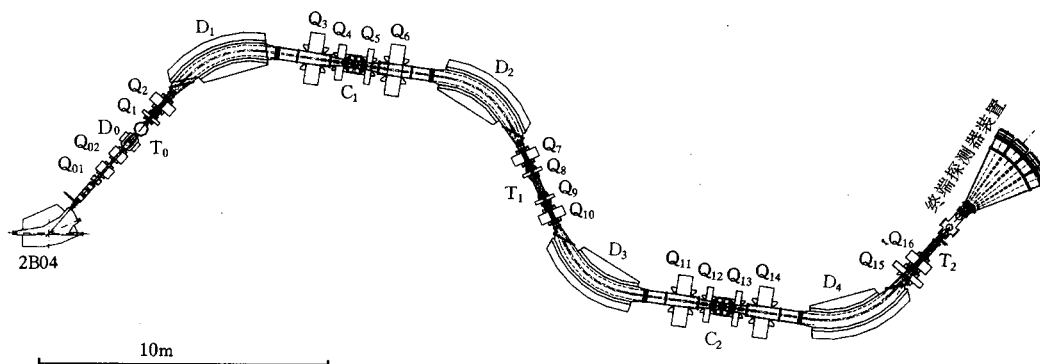


图 1 RIBLL 结构示意图

Q 为四极透镜, D 为二极透镜, T 表示聚焦点, C 表示色散点.

RIBLL 是双消色差 (位置和动量) 放射性核束流装置. 其结构为 $Q_{01} Q_{02} D_0 - T_0 - Q_1 Q_2 D_1 Q_3 Q_4 - C_1 - Q_5 Q_6 D_2 Q_7 Q_8 - T_1 - Q_9 Q_{10} D_3 Q_{11} Q_{12} - C_2 - Q_{13} Q_{14} D_4 Q_{15} Q_{16} - T_2$ 模式. 图 1 是 RIBLL 的结构示意图. RIBLL 是采用 $B\rho - \Delta E - B\rho - \text{TOF}$ 方法实现对 RIB 的鉴别和分离的, 这是离子光学和反应运动学联合分离方式. 由 HIRFL-SSC 提供的初级中能重离子束流, 轰击初级靶, 使得炮弹碎裂. 初级束、炮弹碎片和前方向发射的其它反应产物同时进入 RIBLL, 二极磁铁 D_1 按设定的 $(B\rho)_1$ 值, 选择一组 A/Z 相同的放射性核素通过, 即按关系式

$$B\rho = \frac{Av}{Z} \frac{U}{c^2} \quad (2)$$

选择 RIB 的. 式中 A 为核素的质量数, Z 为核电荷数, v 为核子速度, $U = 931.502 \times 10^6 \text{ eV}$, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$. 因为 v 接近炮弹速度, $B\rho$ 基本正比于 A/Z . 通过 D_1 的离子, 在色散点 C_1 穿过精心设计的消色差楔型降能器, 损失不同能量. 消色差楔型降能器选择符合下面关系式

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \quad (3)$$

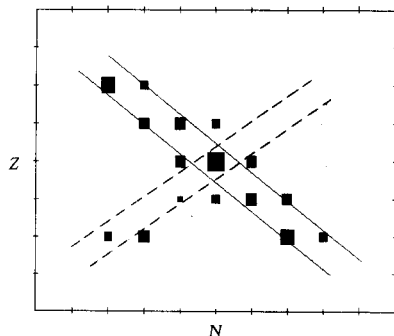


图 2 RIBLL 两次光学选择示意图

方块代表一种放射性核素, 虚线-降能器选择, 实线-磁刚度选择.

的离子. 然后, 二极磁铁 D_2 按设定的 $(B\rho)_2$ 值对被

降能器选择的离子再进行一次选择. 图 2 为 RIBLL 两次选择示意图.

对于较轻的炮弹碎裂产生的 RIB, 经这样两次光学选择, 可以得到很纯的放射性核束. 但对于重炮弹碎裂的 RIB, 由于动量离散、电荷没有全剥离和次级反应产物存在等影响, 这样的选择通常只能得到伴随有临近核素污染的放射性核束. 根据反应运动学特点, 以事件方式记录经过光学选择的离子的飞行时间 (TOF), 就可以清楚的鉴别和分离想要的任何 RIB. 这样选择的 RIB, 根据实验设计, 在聚焦点 T_1 (或在聚焦点 T_2) 轰击次级靶, 发生次级反应, 开展放射性核束物理各种实验研究.

LISE、A1200、RIPS、FRS 和 RIBLL, 都是采用这种离子光学和反应运动学联合的 RIB 鉴别和分离技术, 即 $B\rho-\Delta E-B\rho$ -TOF 分离技术.

3 RIBLL 的 TOF 测量装置

RIBLL 全长为 38.520m (T_0 —探测器最远点). T_0 — T_1 长度为 17.000m, T_1 — T_2 长度为 16.690m, T_0 — T_2 长度为 33.690m. 按照设计, RIBLL 是反对称双消色差结构. 它有以下多种运行模式:

(1) 高分辨模式. 在高分辨模式中, RIB 在 T_0 — T_1 段被 RIBLL 的 D_1 、 D_2 磁刚度和 C_1 的降能器选择, 再进入 T_1 — T_2 段被 D_3 、 D_4 和 C_2 的降能器选择. 结果 RIB 的强度降低, 纯度提高. 在 T_1 和 T_2 处分别安放 RIB 飞行时间探测器, 测量粒子在 T_1 — T_2 段路程的 TOF, 就可以实现离子光学和反应运动学联合分离技术, 得到最好分辨的 RIB. 次级靶位于 T_2 处, RIB 在 T_2 处发生次级反应, 次级反应产物在 T_2 处被测量.

(2) 中分辨高流强模式. 在这种运行模式中, RIBLL 的前后两段处于不同的工作状态. T_0 — T_1 段与 (1) 模式功能相同, RIB 在这段被 D_1 、 D_2 和 C_1 的降能器选择. T_1 — T_2 仅作为 RIB 的传输段, 让 T_0 — T_1 段选择的 RIB 通过, 不再使用降能器选择, 结果使得 RIB 强度被保持, 分辨率中. RIB 粒子的 TOF 测量同 (1) 模式, 因此, 仍然可以采用离子光学和反应运动学联合分离技术, 改善分离质量. 同样, RIB 在 T_2 的次级靶上引起次级反应, 反应产物在 T_2 处被测量.

(3) RIB + 磁谱仪模式. 这种模式中, T_0 — T_1 段与 (1)、(2) 模式功能相同, RIB 被 D_1 、 D_2 和 C_1 的降能器选择. 次级靶被放置在 T_1 , T_1 — T_2 段以磁谱仪方式工作. 通过设置不同的 $B\rho$, 实现选择不同的次级反应产物. RIB 的 TOF 测量需要在 T_0 — T_1 段完成.

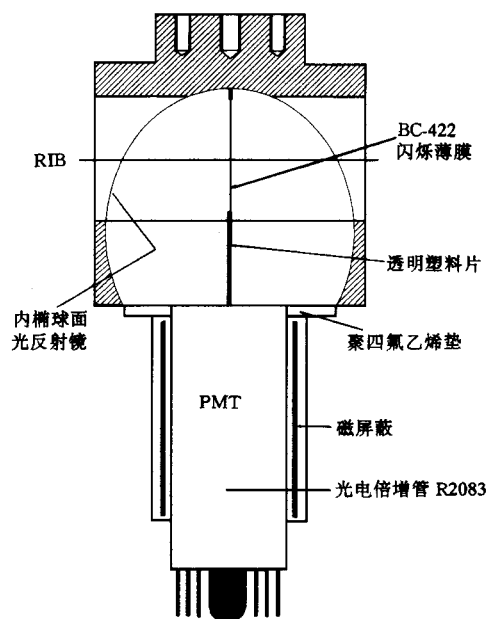


图3 RIBLL时间拾取探测器装置

由于 RIBLL 的反应运动学分析需要,我们发展了一种高时间分辨、高计数率能力、低探测阈、耐辐照的时间拾取探测器装置^[6](图 3)。该时间探测器的核心是内表面为椭球面的铝制光反射器。椭球面方程为 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$, 其中 $a = b = 65.0\text{mm}$, $c = 75.8\text{mm}$ 。内表面精心抛光,它的一个焦点安放着面积为 $45\text{mm} \times 45\text{mm}$, 厚度为 $50\text{--}100\mu\text{m}$ 的塑料闪烁薄膜 BC-422, 光电倍增管 R2083 的光阴极中心处于椭球面的另一个焦点上。当 RIB 离子垂直穿过闪烁膜时,引起闪烁膜发光。根据椭球面的光学特性: 1) 在椭球面一个焦点附近产生的光子,经椭球面一次反射后,都被聚焦在另一个焦点附近区域。可以使用光阴极面积小的光电倍增管(PMT),降低暗电流,减低本底,提高收集效率和降低探测阈; 2) 经椭球面一次反射的所有光子,路径长度相等。这样到达 PMT 光阴极的光子时间离散小,时间分辨高; 3) 光子被聚焦在 PMT 光阴极中心及附近很小区域,由它们在光阴极上产生的光电子,渡越到阳极时间离散小,改善与 PMT 光阴极位置相关的时间分辨。BC-422 闪烁膜发射波长 425nm , 衰变时间常数为 2.1ns , 光输出为蒽晶体的 64% 。可见,BC-422 发光效率高,时间响应快。R2083 光倍管波长范围 $300\text{--}650\text{nm}$, 上升时间 0.7ns , 电流放大倍数为 2.5×10^6 , 它与 BC-422 匹配很好。

在 RIBLL 中使用两个时间拾取器记录 RIB 粒子通过 T_1 的时间 t_1 和通过 T_2 的时间 t_2 , 经恒分甄别器(CFD)甄别、成型、延迟,送入 CAMAC 时间幅度变换器(TDC),得到 RIB 离子从 $T_1\text{--}T_2$ 的飞行时间 $t_2\text{--}t_1$ 。

这种时间拾取装置的时间分辨可以达到约 140ps 。在 10^8pps 离子强度辐照下,仍能正常工作,对中能 RIB 的探测效率约 100% 。它的结构简单,性能稳定,价格低廉,容易操作,是 RIBLL 理想的 TOF 探测器。

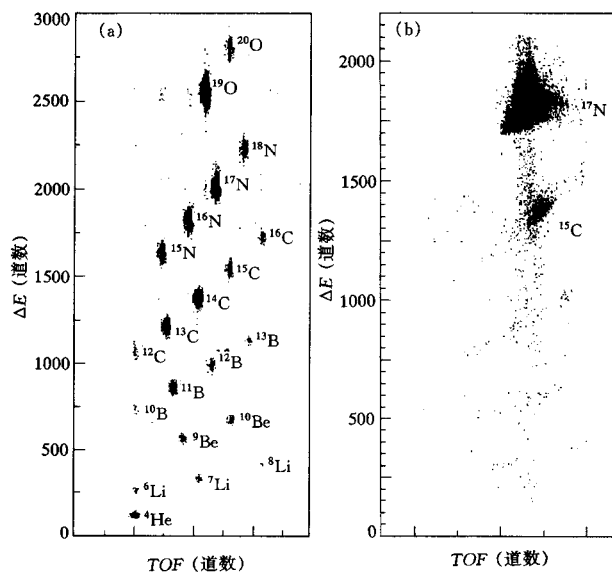
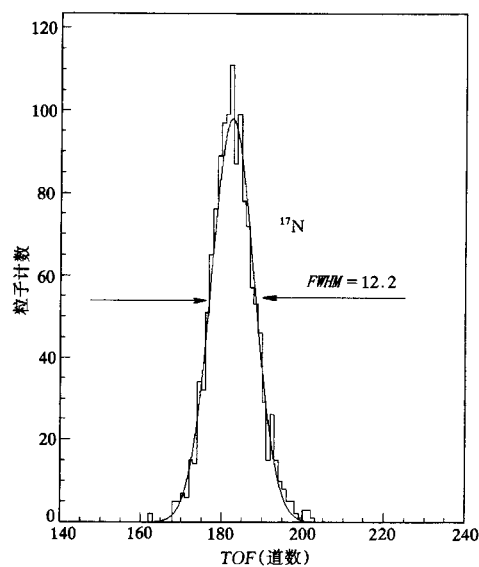


图 4 $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + \text{Be}$ 靶 RIB 的 $\Delta E\text{--TOF}$ 图

图5 ^{17}N 的飞行时间谱

4 结果与讨论

图 4(a)给出 $60\text{MeV/u } ^{18}\text{O}$ 轰击 Be 靶, 仅经 RIBLL 的 $B\rho$ 分离得到的放射性核素分布图. $B\rho$ 值是按 ^{17}N 的 A/Z 设置的, 由于动量色散等因素, 许多核素都被选择. 图 4(b) 是经 $B\rho-\Delta E-B\rho$ -TOF 分离的 RIB 分布图. 很明显, 我们使用 RIBLL 的离子光学和反应运动学联合鉴别分离技术, 得到了高纯度的放射性核束 ^{17}N .

图 5 是在图 4(a) 上对时间和 ΔE 加窗得到的 ^{17}N 的时间谱. 扣除动量分散等因素, 可以算出它的时间分辨约为 140ps .

参 考 文 献

- 1 Anne R, Bazin D, Muller 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., 1992, **B70**:298
- 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 Goldhaber A S. Phys. Lett., 1974, **B53**:306
- 6 Zhao Youxiong, Zhan Wenlong, Guo Zhongyan et al. Nucl. Instr. Meth., 1995, **A355**:464

TOF Measurement in RIBLL

Li Jiaying Zhan Wenlong Guo Zhongyan Sun Zhiyu Xiao Guoqing
Wang Jinchuan Meng Xiangwei Jiang Shanhong Qin Lijun
Zhang Wansheng Wang Quanjin

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

Abstract In this paper we present a timing pickup detector used at Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL). It has low detection threshold and is radiation-resistant. The photons induced by radioactive beam ions passing through a thin plastic-scintillator foil, emit from the foil center corresponding to one focus point of a aluminum ellipsoidal mirror and are reflected to another focus point at which the cathode of a photomultiplier tube locates. The readout pulse signals were sent into a CAMAC's TDC module. A time resolution of about 140ps is achieved and the counting rate up to 10^8 pps is allowed.

Key words RIBLL, ellipsoidal mirror focusing, time of flight (TOF)