

用于中能重离子反应测量的塑料 闪烁探测器阵列*

祁 中 郭忠言 詹文龙 刘冠华 周建群 张万生
王金川 林源根 诸永泰 徐瑚珊 谢元祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-05-27收稿

摘 要

描述了用于中能(10—100MeV/u)重离子核反应前角度($5^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$)测量的36单元 phoswich 闪烁探测器阵列. 每个 phoswich 探测器单元由1mm厚的快塑料闪烁体 NE102A 和 100mm 厚的慢塑料闪烁体 NE115 组成, 用传统的快、慢门控制的 QDC 积分方法, 对 $Z=1-20$ 范围的碎片得到了好的粒子鉴别, 其粒子分辨能力 $Z/\Delta Z \sim 45$.

关键词 中能重离子, 闪烁探测器阵列, 粒子鉴别.

1 引 言

核反应机制是中能(10—100MeV / u)重离子核反应实验研究中最重要课题之一. 出射粒子的类型、时间、空间、能量等分布都与特定的反应机制紧密相关, 弄清各种反应机制的特征, 探测鉴别反应系统全部产物, 分清它们的来源是核物理学家的愿望. 但是, 设计研制这样的探测器装置几乎是不可能的, 人们只能根据实际实验条件, 研制准全粒子探测器系统, 如 GANIL 的 Indra^[1]、MSU 的 Miniball^[2]、GSI 的 Fopi^[3]等 4π 带电粒子探测器.

全粒子中能重离子加速器为重离子核反应提供种类繁多的炮弹, 可组成的反应系统千差万别. 中能是位于平均场起主要作用的低能区和核子-核子相互作用支配的高能区之间的过渡区, 这里各种反应机制交叉、重叠、并存, 出射粒子极其复杂, 反应产物种类(Z, A), 能量(E), 空间分布(R, θ, ϕ), 时间分布(t)和演变广泛而且复杂, 不能用单一类型的探测器探测鉴别所有的粒子. 前角度是高计数率高能量区, 必须使用快时间响应, 大动态范围的塑料闪烁 phoswich 探测器望远镜; 大角度平衡发射粒子和类靶产物探测, 常常采用气体电离室(IC)与 Si 半导体组成的碎片望远镜; 而对于类弹、类靶产物并存的中角区,

* 国家自然科学基金资助.

使用 IC + Si + CsI(Tl) 闪烁晶体构成的对数密度探测器望远镜会得到最佳结果^[4,5]。

本文报道了一个 36 单元塑料闪烁体 phoswich 探测器望远镜阵列。它是中国科学院近代物理研究所和兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)计划研建的 4π 探测器的组成部分, 目前安装在 HIRFL 的通用反应靶室终端 TR4 的 1.5m 直径靶室内。进行小角度非平衡发射粒子的探测和进行碎片-碎片小角度关联研究。

2 探测器结构及原理

塑料闪烁探测器由于其时间响应快、发光光谱($\sim 400\text{nm}$)与光电倍增管很好匹配、抗辐射、容易加工成各种形状和尺寸、价格便宜、结构简单, 所以是理想的很小角度探测器。

2.1 基本结构

该塑料闪烁体 phoswich 探测器阵列由 36 个单元构成, 以束流方向为轴环形分布, 距靶心 257mm。共分三环, 分别覆盖实验室锥角 $5^\circ-10^\circ$, $10^\circ-15^\circ$, $15^\circ-20^\circ$ 。每环分为 12 个单元, 每单元覆盖 $\Delta\phi = 30^\circ$ (ϕ 在和束流垂直的平面内), 共计覆盖 360° 。各个单元之间紧密排列, 死角区小, 其结构如图 1 所示。

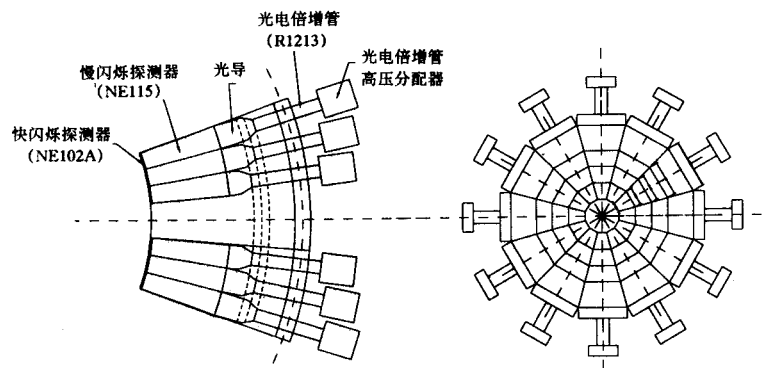


图 1 36 单元阵列探测器结构图

每个 phoswich 探测器由 1mm 厚的快塑料闪烁体 NE102A、100mm 厚的慢塑料闪烁体 NE115、光导和 Hamamatsu R1213 光电倍增管(PMT)构成。NE102A 衰减时间常数为 2.4ns, NE115 衰减时间常数为 225ns, R1213 的上升时间为 1.9ns。由于它们有快的时间响应, 所以非常适用在前角度方向进行高计数率的测量。

由于闪烁体后端面与光电管光阴极端面尺寸形状相差很大, 选用光导过渡^[6]。为了能获得较高的光子传输效率, 光导设计用 Monte-Carlo 方法模拟了光子在闪烁体及光导中的输运过程, 通过计算确定最佳形状和尺寸。光导选用航空有机玻璃, 在高精密程控机床上加工成圆锥体形状, 再按 NE115 后端面尺寸切割抛光。三环上光导的长度分别为

2.8、3.6、4.4cm, 前端面梯形与 NE115 匹配, 后端面圆形与 R1213 光阴极匹配。

塑料闪烁体发光效率低于 NaI(Tl) 和 CsI(Tl) 晶体, 为增大信号的输出, 减小电子学线路的复杂性, 选用倍增倍数较大的光电倍增管 R1213. 设计光电管管座时, 选择的工作电流既要保证光电管信号输出有一定动态范围又要使功率耗散尽可能小, 使光电管在高真空靶室内长时间稳定地工作. 光电倍增管和管座的外壳选用 $\phi 20\text{mm}$ 的软铁管加工, 并做发蓝处理, 用来避光和屏蔽电磁场。

为减少光子在传输过程中在界面之间引起的折射和全反射, NE102A、NE115 和光导之间用 BC-600 光耦合胶粘接, 光导与 R1213 光阴极之间用硅胶耦合. NE102A 前表面用 $1.5\mu\text{m}$ 厚的铝箔覆盖, NE102A、NE115、光导周围用 $10\mu\text{m}$ 厚的铝箔包裹, 以减少光的损失和避光。

2.2 鉴别原理

光电倍增管阳极输出脉冲中含有快、慢两种不同衰减成份. 首先将该信号分成 3 路, 两路分别进入 CAMAC QDC (电荷数码变换器) 做电荷积分. 第 3 路信号经 CFD (恒分甄别器) 成形, GG (门和延迟产生器) 延迟成形, 提供快、慢门信号. QDC 电荷积分时间间隔由快、慢门控制. 这样就得到粒子在 NE102A 薄片中的能量损失 ΔE 和在 phoswich 中的剩余能量 E , 通过 Bethe-Bloch 公式 $\Delta E \cdot E \propto MZ^2$ 鉴别粒子. 与 ΔE 和 E 对应的光输出 ΔL 和 L 分别为:

$$\Delta L = \int^{\Delta t_{\text{fast}}} (L_{\text{fast}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{fast}}}} + L_{\text{slow}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{slow}}}}) dt, \quad (1)$$

$$L = \int^{\Delta t_{\text{slow}}} (L_{\text{fast}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{fast}}}} + L_{\text{slow}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{slow}}}}) dt, \quad (2)$$

式中 Δt_{fast} 、 Δt_{slow} 分别为快、慢门持续时间, L_{fast} 和 L_{slow} 分别为快、慢两种成份的发光效率, $\tau_{\text{fast}} = 2.4\text{ns}$, $\tau_{\text{slow}} = 225\text{ns}$, 分别为快、慢两种成份的光衰减时间常数。

根据 Birks 的半经验公式, dE/dx , E 与 dL/dx , L 之间对应关系为:

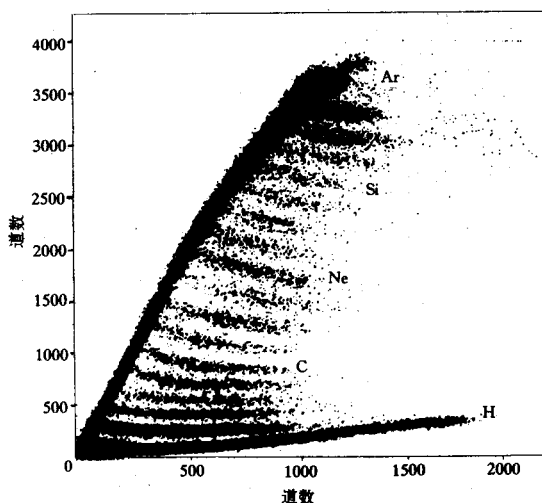
$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + kb \frac{dE}{dx}}, \quad (3)$$

$$L = \int_0^x \frac{dL}{dx} \cdot dx, \quad (4)$$

其中 S 由材料的绝对发光效率和光电管光阴极的收集效率决定, dE/dx 为单位路径上的能损, kb 为猝灭系数, x 为粒子在闪烁体中的路径长度. 在实验上, E 和 L 对应关系由已知能量的粒子来刻度。

3 探测器单元的实验测量

在 HIRFL 上对该阵列的探测器单元进行了调试测量, 实验中所用的电子学框图见文

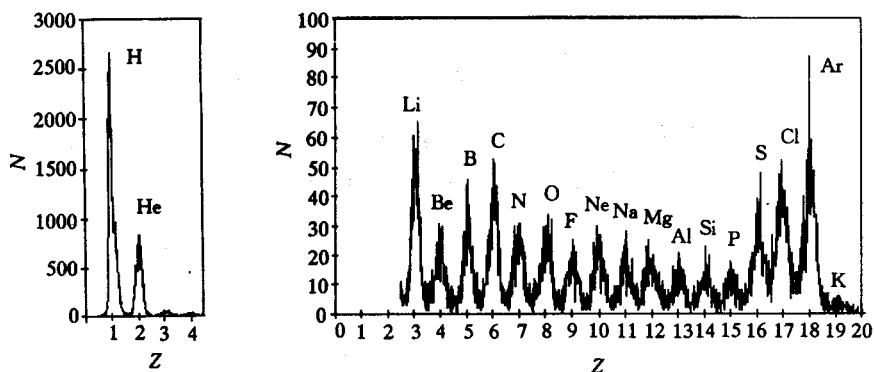
图2 $\Delta E-E$ 的两维散布图

18 时计数很高为弹性散射的产物, Z 大于 18 的 K、Ga 为转移反应的产物. 从元素分布谱推得探测器的元素分辨 $Z/\Delta Z \sim 45$.

献 [7].

在 30MeV/u 的 $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ 反应测量中, 探测器单元安排在距靶心 257mm 处, 实验室极角 $2^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$, $\phi = 10^\circ$, 光电管工作电压为 -1600V . 快门的宽度选为 30ns , 延迟时间为 0, 慢门选取 300ns , 延迟时间为 60ns . ΔE 和 E 信号以事件列表方式记录在磁带上. 图 2 为测得的 $\Delta E-E$ 的两维散布图.

离线分析处理时, 先将记录在磁带上的 Juhu 格式数据转换成 KVI 数据处理程序 Pax 格式. 对两维散布图进行曲线拟合, 线性化处理, 加窗筛选, 投影在 Z 轴上, 便得到了元素的 Z 分布图. 图 3 为 $\Delta E-E$ 在 Z 轴投影的元素分辨图. 元素从 $Z=1-20$ 被清楚地分开, Z 等于

图3 $\Delta E-E$ 在 Z 轴投影的元素分辨图

4 结果与讨论

塑料闪烁 phoswich 探测器阵列的建成为核反应机制更深层次的研究提供了手段. 从实验结果可以看出该探测器的电子学线路简单, 有好的粒子鉴别能力, 能量动态范围宽, 适合于在前角度高计数率环境下测量. 这是其它任何种类探测器无法代替的. 但下面的情况应具体考虑:

(1) 元素分辨决定于 ΔE , 探测阈也取决于 ΔE , NE102A 太厚时会阻止住较重的碎片和能量较低的粒子, 太薄又使粒子鉴别能力变差, ΔE 的厚度应根据实验要求仔细确定.

(2) 在 QDC 积分快成份时其中混有少量慢成份, 从而对元素分辨有一定的影响. 由于快、慢门的宽度不同, 所以混入快、慢成份的比例也不同, 其快成份中混入慢成份的比例为:

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\Delta t_{\text{fast}}} e^{-t/\tau_{\text{slow}}} dt}{\int_0^{\Delta t_{\text{fast}}} e^{-t/\tau_{\text{fast}}} dt}, \quad (5)$$

慢成份中混入快成份的比例为:

$$\eta_2 = \frac{\int_0^{\Delta t_{\text{slow}}} e^{-t/\tau_{\text{fast}}} dt}{\int_0^{\Delta t_{\text{slow}}} e^{-t/\tau_{\text{slow}}} dt}. \quad (6)$$

实验中根据快闪烁体衰变时间常数 τ_{fast} 、慢闪烁体衰变时间常数 τ_{slow} 和粒子分辨效果选定.

(3) 塑料闪烁体光输出对能量响应存在非线性, 光输出的能量响应曲线即探测器的能量刻度较气体电离室、半导体探测器复杂, 最好用加速器提供的已知粒子能量来校正.

参 考 文 献

- [1] Borderie, The Indra 4π Detector: Some Faces of the Physics Program, Proceedings of the International Conference on New Nuclear Physics With Advanced Techniques, p.297.
- [2] De Souza *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A295**(1990)109.
- [3] Hildenbrand, F. Rami, The 4π -Detector at SISESR: Present Status and First Results, Proceedings of the International Conference on New Nuclear Physics With Advanced Techniques, p.285.
- [4] J. C. Steckmeyer *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A361**(1995)472.
- [5] Schimidt *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A242**(1985)111.
- [6] T. Masson, *Nucl. Instr. Meth.*, **141**(1977)251.

A Scintillant Multidetector for Measurement in Heavy Ion Reactions at Intermediate Energy

Qi Zhong Guo Zhongyan Zhan Wenlong Liu Guanhua
Zhou Jianqun Zhang Wansheng Wang Jinchuan Lin Yuangen
Zhu Yongtai Xu Hushan Xie Yuanxiang

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

Received 27 May 1996

Abstract

A 36-unit scintillant multidetector system was built for measurement of charged particles at forward direction ($5^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$) in heavy ion reactions of intermediate energy (10–100MeV). Each phoswich is composed of 1mm thick scintillator NE102A and 100mm thick slow scintillator NE115. A good particle identification was achieved from atomic number $Z=1$ up to $Z=20$ using QDC method. The resolution power $Z/\Delta Z$ reaches to ~ 45 .

Key words intermediate energy heavy ions, scintillation detector array, particle identification.