

# 重离子物理实验中的塑料闪烁探测器

王 柄 冯恩普 沈文庆

(中国科学院近代物理研究所)

重介绍塑料闪烁探测器在重离子物理实验中的使用情况。

## 一、引 言

塑料闪烁体的光衰减时间短, 有较高的光产额, 允许以高计数率探测粒子, 在制作工艺上很容易加工成不同的形状和体积, 并且成本低廉。由于以上一系列特性, 使它在各种闪烁体中具有突出的地位, 因此广泛应用于高能物理和核物理。就探测的粒子种类来说, 可探测带电粒子、 $\gamma$ 射线及快中子; 可测量粒子的强度、能量、时间、位置等物理量。

在重离子物理实验中使用的探测器, 早期以半导体为主。随着探测粒子种类的增多, 半导体探测器对较重的离子表现出严重的脉冲幅度亏损, 对较高剂量粒子存在辐照损伤效应; 在制作技术上, 厚度、形状、有效面积等方面的指标越来越难以满足实验要求, 而且成本很高。由于气体探测器没有上述缺点, 从七十年代起它在重离子物理实验中逐渐成为主要的探测器之一。特别是在每核子10MeV能区附近十分有效。然而, 随着中能(20—100MeV/u)加速器的建成及使用, 气体探测器由于它对高能较轻粒子的阻止本领低而不能满足探测的要求。这自然地使人们联想到既能很好地阻止高能轻粒子, 又有一系列其他优良性能的塑料闪烁体。在中能重离子实验中, 由于可利用的炮弹种类多、入射能量较高, 使得开放的反应道增多, 出射粒子种类增多、多重性增高、动态范围变宽, 从而需要进行多参数、大立体角测量。这些要求促进了塑料闪烁探测器的发展及其在重离子物理实验中的广泛应用。本文将着

## 二、塑料闪烁体的基本特性

目前现有的塑料闪烁体(如NE102A, NE104, NE110, NE111A, pilotu, pilotF等)都属于快闪烁体, 光衰减时间常数在2—3ns的范围或更短, 光输出(相对蒽晶体)在55%—68%的范围。光衰减长度除NE111A较短(只有8cm)外, 其他都大于100cm。这些塑料闪烁体的产品在国际上主要由英国的NE公司(Nuclear Enterprises)提供, 我国也生产类似性能的产品。最近, NE公司又推出一种新型的塑料闪烁体NE115。它是目

表 1 塑料闪烁体NE102A 和 NE115性能比较

闪 烁 体	NE102A	NE 115
光输出(对蒽)	65%	35%
光衰减时间常数(ns)	2.4	225±20
光衰减长度(cm)	250	18
光谱峰位(nm)	423	395
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.032	1.032
折射系数	1.581	1.582
氢碳原子数比	1.104	1.108
电子数目( $\times 10^{23}$ / cm <sup>3</sup> )	3.39	3.37
C 原子数目( $\times 10^{22}$ / cm <sup>3</sup> )	4.78	4.78
H 原子数目( $\times 10^{22}$ / cm <sup>3</sup> )	5.28	5.25

前唯一的慢塑料闪烁体，其光衰减时间要比上述快塑料闪烁体慢两个数量级<sup>[1]</sup>。做为比较把NE115和常用快塑料NE102A的性能列于表1中。

由表1可知，NE 115的光衰减时间与NE 102A相比要慢近100倍，几乎和无机晶体NaI (Tl)的光衰减时间(230ns)相同。但NE115的光输出偏低，仅是蒽晶体的35%，光衰减长度过短。但由于NE115是一种慢塑料闪烁体，使它在重离子物理中有特殊的使用价值。

### 三、塑料闪烁探测器的测量方法和构形

塑料闪烁探测器的基本测量原理和组成部件与其他闪烁探测器一样，都是被探测粒子进入闪烁体损失能量，产生荧光，光子通过光导传输到光电倍增管光阴极上打出光电子，经光电倍增管倍增后输出一个足够大的电脉冲信号，后接电子学线路对脉冲信号进行分析。

由于重离子反应的特点，与其相应的测量方法和探测器的构造得到了进一步的发展。塑料闪烁体可以根据实验的不同要求做成不同的形状以及和其他探测器进行灵活组合。

#### (一)时间测量

利用塑料闪烁体(NE115除外)光衰减时间短、光输运时间短等特点，配合时间性能好的光电倍增管，可以给出快上升时间的脉冲，以此来确定时间。

常用的快塑料闪烁体(如NE102A)配合快的光电倍增管和快定时电子学，时间分辨可达300ps或更好。

单纯作为时间测量用的闪烁探测器，一般用厚度在10微米以下的塑料闪烁体薄膜。它主要作为重离子飞行时间谱仪中的起始时间探测器<sup>[2,3]</sup>。它的基本结构是在金属抛物面反射镜的焦点上安放一块塑料闪烁体薄膜，

该薄膜的中心与离子飞行管道的中心重合，整个装置位于飞行管道的前端。核反应中的出射粒子穿透薄膜并在其中损失一小部分能量后继续飞行而到达停阻探测器，并给出停止时间信号。薄膜中受激发射的光子通过抛物面反射镜后被平行地反射到下面相连接的光电倍增管阴极上，便得到了零时间信号。这种装置的优点是结构简单，操作方便，缺点是时间分辨性能不是很好(最好约500ps)。由于微通道板和平行板雪崩探测器技术的发展，闪烁薄膜作为零时间探测器已被它们取而代之。

用塑料闪烁体做停阻时间测量时，一般结合有能量或其他参量的测量。最常用的是 $\Delta E$ 探测器同时给出时间信号，用飞行时间法进行粒子鉴别。

#### (二)位置测量

塑料闪烁体的定位常用两种方法：1.根据光信号传输到探测器两端的时间不同来定位(光在闪烁体和真空中的传播速率一定)。这种方法的分辨限于2—3cm，常用于长线度的探测器，典型地用于高能物理实验，在重离子物理中也逐渐被采用；2.根据探测器每端收集到的光强比例不同，再考虑光在闪烁体中传播时光强随距离的指数衰减来定位<sup>[4]</sup>。用这种方法得到的位置分辨和能量有关，能量高时位置分辨好。分辨最好可达4 mm<sup>[4]</sup>。

用于位置测量的塑料闪烁体一般用NE 102A等快塑料做成薄的正方形，长条形，环带型。通常也提取 $\Delta E$ 能量信号。

用于中、高能重离子反应的多单元探测器正在迅速发展之中。它是用多个单元紧密拼凑而成。围绕靶心形成一个大立体角探测器。其中每个单元对应一个确定的立体角范围，即确定了粒子的空间坐标。从而完成了该粒子的位置测量。

#### (三)能量测量

塑料闪烁体是通过测量光输出的大小来确定粒子在闪烁体内损失的能量大小的。但

光输出对能量响应的非线性比较严重,尤其对低能或较重的离子。这个问题迄今还没有从理论或实验上得到完全解决。实验上常用 Birks<sup>[5]</sup>用单原子淬灭机制得到的关系:

$$dE/dx = S(dE/dx) / (1 + kB \, dE/dx)$$

其中k是淬灭参数, S是绝对发光效率, B是把电离、激发密度与dE/dx 联系起来的一个常数。

作为能量测量用的塑料闪烁探测器可以是测量能损 $\Delta E$ 或测量总能量E的。根据被测离子种类和能量范围的不同可以灵活选择 $\Delta E$ 或E探测器的厚度。前者一般在1mm—1cm范围,后者厚度可以在很大范围内变化。

#### (四) 粒子鉴别

重离子反应中使用塑料闪烁探测器进行粒子鉴别的方法主要有三种: 1.  $\Delta E$ —E方法,即用穿透型 $\Delta E$ 探测器和阻止型E探测器鉴别电荷Z及质量数A; 2. TOF—E方法,即用飞行时间和阻止型E探测器鉴别A; 3. TOF— $\Delta E$ 方法,即用飞行时间和穿透型 $\Delta E$ 探测器鉴别Z。

$\Delta E$ —E方法是最常用的粒子鉴别手段。根据被测粒子种类和能量的不同要求,用塑料闪烁体可以进行多种方式的组合装配。

##### a) 以探测高能轻粒子为主的类型

由于高能轻粒子穿透本领强,用塑料闪烁体做 $\Delta E$ 或E探测器较为有利,不仅仅因为塑料闪烁体的厚度选择范围很大,从性能、经济方面也是可取的。值得重视的一种巧妙的组合方式是: $\Delta E$ 和E探测器分别用快塑料闪烁体和慢塑料闪烁体(NE115)做为材料用硅胶耦合在一起。由于两者衰减时间不同,采用脉冲形状甄别技术可以用同一光电倍增管得到 $\Delta E$ 、E两种信号。有时也用无机晶体(如CsI(Te))和快塑料进行这种组合。常把这种探测器称作“phoswich”<sup>[6,7]</sup>即“光迭层探测器”。

##### b) 以探测碎片为主的类型

重离子反应中类弹碎片或较轻类靶碎片,由于其穿透本领比轻粒子小得多,通常仍

用电离室做 $\Delta E$ 探测器,在电离室后端加塑料闪烁体或半导体做E探测器构成 $\Delta E$ —E望远镜。

##### c) 多迭层探测器类型

这类探测器是上述两种类型的结合,即轻粒子及碎片同时被测量的一种结构。如电离室(或半导体探测器)与phoswich的结合——电离室(或半导体探测器)与phoswich中的薄片构成一组 $\Delta E$ —E碎片探测器,而电离室和phoswich中的薄片一起作为 $\Delta E$ 探测器又和phoswich中厚的部分构成一组轻粒子 $\Delta E$ —E望远镜。

以上所述的 $\Delta E$ —E探测器可以归纳为表2所列的几种类型。

表2 塑料闪烁体迭层探测器组合方式

探测对象	$\Delta E$ —E探测器组合方式
轻 粒 子	塑料闪烁体+塑料闪烁体
	晶体+塑料闪烁体
	半导体+塑料闪烁体
碎 片	电离室+塑料闪烁体
	半导体+塑料闪烁体
轻 粒 子 + 碎 片	电离室+塑料闪烁体+塑料闪烁体
	电离室+半导体+塑料闪烁体
	电离室+塑料闪烁体+晶体

TOF—E方法中,做为E探测器的快塑料闪烁体本身可以给出时间信号和能量信号,达到粒子鉴别的目的。上述的phoswich也可以给出时间信号,利用TOF—E方法和 $\Delta E$ —E方法联合测量,以便更好地鉴别粒子。

TOF— $\Delta E$ 方法是一种比较新颖的方法。它是利用公式 $Z^2 \propto \frac{L^2 \Delta E}{TOF^2}$  (L为飞行距离)进行核电荷数Z鉴别的。 $\Delta E$ 探测器一般用塑料

薄片,同时给出时间信号和能损 $\Delta E$ 信号。

#### 四、重离子物理实验中的典型塑料闪烁探测器

##### (一)HIPOPOT(Heavy Ion Particle Observation Pot)

HIPOPOT是一个典型的多迭层塑料闪烁探测器<sup>[8,9]</sup>,它是由联邦德国Darmstadt的GSI实验室制作的。其结构见图1。其主体由电离室和塑料闪烁体phoswich构成。其中,phoswich由1mm的塑料闪烁体NE102A薄片和厚度为3cm的慢塑料闪烁体NE115组成,通过光导与光电倍增管相联结。在最前端装有平行板雪崩室(PPAC)作为时间测量探测器。有效探测直径为75mm。其电离室的两

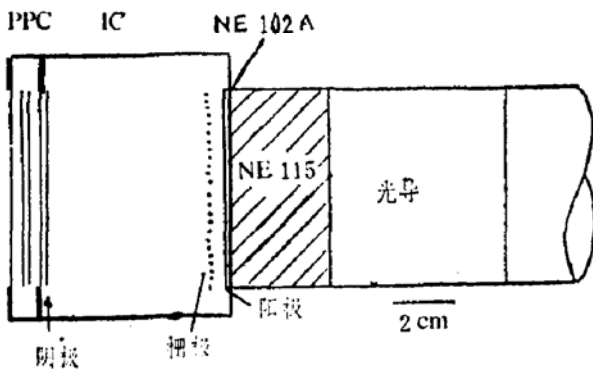


图1. HIPOPOT

个电极是用镀银的Mylar膜(1.5 $\mu$ 厚)构成,电极之间的距离为6cm。距离阳极5mm处有一个屏蔽栅极,它是由直径20 $\mu$ 的铜——钼丝组成,丝距为1mm,其屏蔽效率为92%。以75mbar的异丁烷做为工作气体,对5.5MeV的 $\alpha$ 粒子,得到5%的能量分辨;其电离室和后面的NE102A闪烁体薄片组成的碎片探测器,在14.9MeV/u  $^{209}\text{Bi}$ 轰击Au靶的检验性能的实验中,可分辨出34种不同元素。

后面的phoswich的输出信号由不同时间的触发门分别选出来自NE102A的快信号和来自NE115的慢信号,从而构成探测轻粒子的 $\Delta E$ —E探测器。试验结果表明,可以清楚地分辨出p, d, t及 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 等轻粒子。

该探测器的雪崩室的电极距离为2mm,

可以达到500ns的时间分辨。这与该实验室UNILAC加速器的束流微观结构是同一量级。

由上述结果可见,HIPOPOT是重离子物理实验中一种十分有效的探测器。其结构简单、组成单元齐全、性能优良、使用方便的特点,说明它是塑料闪烁探测器的典型代表之一。

利用多个这样的探测器可组成一个探测器阵列,做为大立体角探测系统使用。

##### (二)MEQ系统

法国奥赛(Orsay)核物理研究所为适应中能重离子物理研究的需要,建造了一台以大面积位置灵敏电离室为主体的MEQ探测系统<sup>[10]</sup>。如图2所示,其平面张角为30°,阴极沿方位角分割成八块,因而相当于八个电离室。在电离室后部装有八个塑料闪烁体 $\Delta E$ —E探测器,与八个小电离室分别一一对应。 $\Delta E$ 探测器用5mm厚的NE102A, E探测器用厚100mm的NE102A。每块作用面积

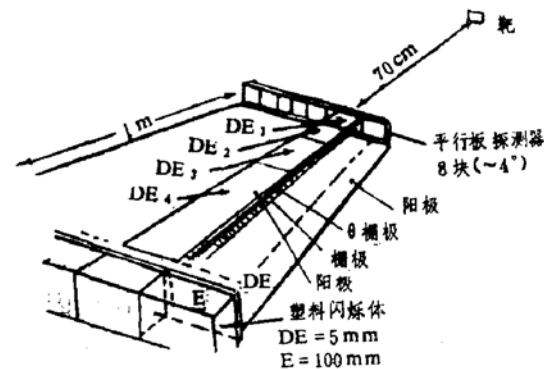


图2. Orsay MEQ系统

为12 $\times$ 9cm<sup>2</sup>,可阻止120 MeV的质子。由于 $\Delta E$ , E两部分用同种材料,光输出需要各有一套光电倍增管系统读出,共用十六个光电倍增管系统。该探测器在Orsay的同步回旋加速器及PM串列加速器上进行试验,对27 MeV/u Ar轰击Ag的实验结果表明,上述塑料闪烁探测器对20—200 MeV的轻粒子,可以清楚地鉴别出p, d, t及 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 等同位素;电离室和5mm的塑料构成的 $\Delta E$ —E探测器,可以鉴别到电荷数Z=13。由此可见对中能重离子实验中产生的复杂碎片及高能粒子多

重性来说,它是一种足够好的探测手段。

### (三)塑料多单元探测器 (Plastic Multidetector)

在重离子反应的中能区,由于粒子多重性的增加,单举测量已不能对反应机制给出令人满意的说明。因此轻粒子与其他重产物的符合测量就显得十分重要。为此法国Caen的GANIL实验中心设计了一个塑料多单元探测器<sup>[11]</sup>。如图3所示。它巧妙地利用该实验中心直径为3.2米靶室NAUTILUS前方向(束流方向)的真空盖板作为支架支撑96个探测器单元。全部单元能复盖 $3^{\circ}$ — $30^{\circ}$ 之间的角度范围(对束流而言),出平面角度为全方位角。各单元的材料全部用2mm的NE102A薄片。最里面的两个环分别有八片闪烁体,其他分别由16片闪烁体并成。每一片的边缘用直角形有机玻璃光导通过真空盖板耦合到外面的光电倍增管系统。这种结构节省了很多空间位置,有利于其他碎片探测器的安排,以便进行符合测量。该探测器用于粒子多重性测量或用TOF— $\Delta E$ 方法鉴别粒子,核电荷可分辨到 $Z = 8$ 。

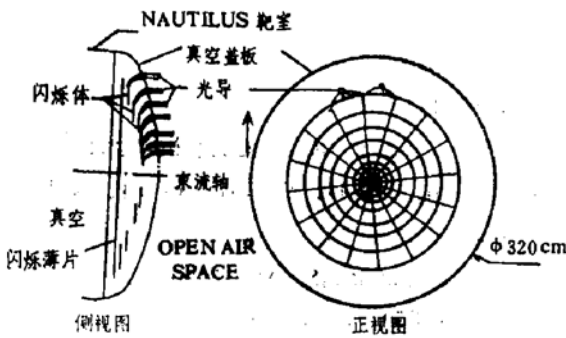


图3.GANIL多单元塑料闪烁探测器

### (四)Hodoscope

中能重离子反应有时需要尽可能大立体角的探测系统。GSI的Hodoscope探测器<sup>[12]</sup>是典型的一例,其基本结构见图4。它由三部分组成。

#### a) LIH(轻离子Hodoscope)

它是由厚度为10mm的塑料闪烁体NE102A包围靶子组成的大立体角( $1.8\pi$ sr)探测器系统,用以探测轻粒子。在它的里面有

十个梯形的平行板雪崩室,用来探测裂变碎片等较重的带电粒子。

#### b)ZDO(外围 $0^{\circ}$ Hodoscope)

这是一个覆盖 $6.5^{\circ}$ — $20^{\circ}$ (相对束流方向)范围的phoswich阵列。共三层,每层12个梯形phoswich单元,每个单元由2mm厚的 $\text{CaF}_2$ 晶体和100mm厚的NE102A塑料闪烁体构成。其粒子鉴别的能量阈对质子为23 MeV。

#### c)ZDI(内环 $0^{\circ}$ Hodoscope)

这是一个覆盖前角方向 $2^{\circ}$ 到 $6.5^{\circ}$ 的 $\Delta E$ 探测器阵列,它由三层共18片5mm厚的NE102A塑料闪烁体构成。用于擦边角以内出射的轻粒子和轻碎片的探测。这些产物的速度接近束流速度,用一个能损 $\Delta E$ 信号就足以定出其质量数A。ZDI和ZDO一起构成前方向轻粒子和轻碎片探测器。

该实验装置在西欧核子中心用于84MeV/U  $^{18}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ 等束流轰击 $^{58,64}\text{Ni}$ 及 $^{197}\text{Au}$ 等靶的实验,研究了中能区重离子反应相转变,运动源发射等课题。

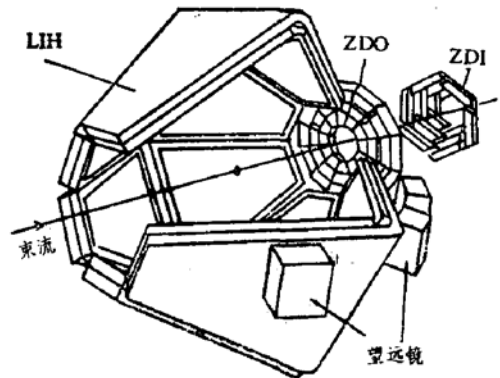


图4.Hodoscope结构图

### (五)塑料球和塑料墙

在中能以至相对论能区,为研究核物质的极端状态以及态方程等理论,需要尽可能测量反应的相关事件,即进行全范围测量。这促进了 $4\pi$ 探测器的发展。以LBL实验室为例,除带有位置灵敏的塑料盒子<sup>[13,14]</sup>外又制作了塑料球<sup>[16]</sup>,其结构见图5。它基本上采用了SLAC的晶体球设计模式<sup>[18]</sup>。总共有815个单元,每个单元都是前端为正三角形的棱台体。用4mm厚的 $\text{CaF}(\text{Eu})$ 晶体和360

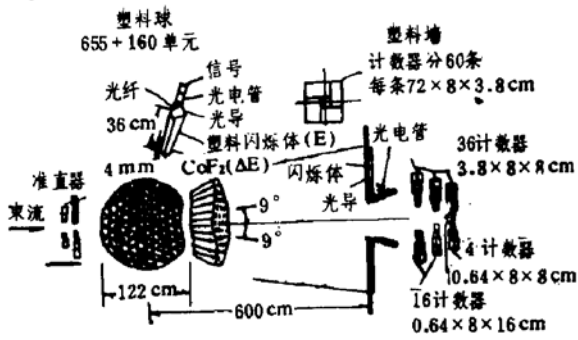


图5. LBL塑料球和塑料墙

mm的快塑料闪烁体组成,该球体包围了相对于束流方向 $10^{\circ}$ — $100^{\circ}$ 的发射角范围。球体的内腔半径为25.4cm,外径为61.4cm。可以阻止240MeV的质子。 $0^{\circ}$ 到 $10^{\circ}$ 的范围放有塑料墙,材料用pilot F。其覆盖面积为 $192\text{cm} \times 192\text{cm}$ ,以探测前角 $\pi$ 介子、H、He同位素及碎片Li、Be、B等,试验结果表明可鉴别到电荷数 $Z=10$ 的粒子。塑料球可以鉴别出p、d、t等轻粒子及 $\pi$ 介子。

塑料球探测技术使得相应核电子学和数据获取系统得到了发展<sup>[17]</sup>,现在以phoswich为单元组装大立体角探测系统的技术正受到许多重离子物理实验室的重视,但随之而来的是庞大的经费开支。

## 五、结 论

综上所述,由于塑料闪烁体的许多优点和技术上的成熟性,使得塑料闪烁探测器在重离子物理实验中有十分乐观的应用前景。

我国正在建造的HIRFL重离子加速器的一部分物理实验终端将采用塑料闪烁探测技术。以80cm大面积位置灵敏电离室<sup>[18]</sup>为例,

它的后端装有塑料闪烁探测器以有效地探测较高能量的带电粒子。为进行符合测量,以研究粒子多重性,还将制作若干多迭层探测器以及类似于前角Hodoscope的装置。

## 参考文献

- 1) M. Bantel et al, N. I. M 226(1984)394
- 2) C. K. Gelbke, N. I. M 95(1971)397
- 3) T. M. Cormier, N. I. M 119(1974)145
- 4) H. R. Schmidt, M. Bantel et al, LBL —19096
- 5) J. B. Birks, Proc. Phys. Soc, A64(1951) 875
- 6) D. H. Wilkinton, Rev. Sci. Inst 23 (1952)414
- 7) H. H. Gutbrod, N. P. A400(1983)343C
- 8) M. Gnirs et al, GSI Scientific Report —1985, P304
- 9) J. Wessles et al, GSI Scientific Report —1985, P303
- 10) D. Gardes et al, N. I. M A247 (1986) 347
- 11) G. Bizard et al, N. I. M A244 (1986) 483
- 12) GSI Nachrichten 5—86
- 13) H. R. Schmidt et al, N. I. M A 242 (1985)111
- 14) S. Wald, Phys. Rev. C32(1985)894
- 15) A. Baden, H. H. Guidrod et al, N.I. M 203(1982)189
- 16) J. C. Tompkins., SLAC Report No.224
- 17) AN —39 Ball Detector Electronics for Nuclear Physics, LeCroy
- 18) 沈文庆等,中国科学院近代物理所年报1985年第121页