

# 一种大有可为的闪烁晶体—— $\text{BaF}_2$

高能所仪器室  $\text{BaF}_2$  研究小组

在核射线实验测量中，或是在核物理技术成果的推广应用中，射线探测器都是十分重要的工具。对于一个核作用事例，如果知道了它的能量、时间和位置，就可以确定这个事例的特点。通常进行上述诸参量的探测，分别使用量能器、时间谱仪和位置灵敏探测器来完成。那么有没有一种探测器同时兼有以上几方面的功能呢？有！能够担此重任者， $\text{BaF}_2$  就是其一。

## 一、研究氟化钡的历史和现状

氟化钡 ( $\text{BaF}_2$ ) 是一种无机高纯闪烁晶体。在七十年代初期，曾经由 Farukhi 等人研究过。它相对于碘化钠(铊激活) ( $\text{NaI}(\text{Tl})$ ) 的脉冲幅度为 10%；发射光谱峰值位于  $325\text{nm}$  处；荧光衰减时间常数为  $0.63\mu\text{s}$ ；低溶、耐潮；对  $\gamma$  射线的吸收大大地超过了碘化钠晶体。在八十年代初期，出现了另一种高纯度的闪烁晶体——锗酸铋 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )，简称 BGO。它的最突出的特点是对  $\gamma$  射线的吸收本领大。因此，曾经吸引了物理工作者很大的兴趣。于是，人们争相购买 BGO 制做  $\gamma$  射线探测器。但实验中发现 BGO 有很强的辐照效应，在强子流的轰击下，一些主要的性能难以恢复。在一九八二年，对  $\text{BaF}_2$  的研究有了突破。由法国 LETI 实验室的 M. LAVAL 小组发现在  $\text{BaF}_2$  的荧光光谱中有两个峰值。一个峰位于  $310\text{nm}$  处，荧光衰减时间常数为  $620\text{ns}$ ；一个峰位于  $225\text{nm}$  处，荧光衰减时间常数为  $0.6\text{ns}$ 。前者为慢成分，后者为快成分。快、慢两种成分的强度比为  $1:4$ 。 $\text{BaF}_2$  相对于  $\text{NaI}(\text{Tl})$  的脉冲幅度达 20% 左右。如图 1 所示。

$\text{BaF}_2$  晶体有以下几个特点：

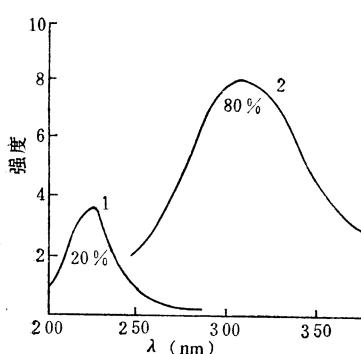


图 1  $\text{BaF}_2$  晶体荧光发射曲线  
<1> 快成分；<2> 慢成分

1. 很好的能量分辨特性，对  $^{137}\text{Cs}$  放射源的  $662\text{keV}$   $\gamma$  射线的能量分辨率为 10%；
2. 非常好的时间分辨特性，对  $^{60}\text{Co}$  放射源的  $\gamma$  射线的时间分辨率为  $112\text{ps}$ ；

3. 密度为  $4.9\text{g/cm}^3$ ，对  $\gamma$  射线的探测效率是碘化钠的 1.3 倍；

4. 透明度好，在从远紫外直到红外的很宽的波谱范围内，它都有很好的透过特性。

低溶、耐潮、价格低廉、容易和光电倍增管(石英窗)匹配，在实验中以很高的精确度给出能量的、空间的和时间的多维信息，这是极为难能可贵的。

因此， $\text{BaF}_2$  晶体在核物理、高能物理、 $\gamma$  射线天文学和核医学等领域中有着广阔的应用前景。

在高能物理实验中所用的闪烁晶体，通常以吨为单位计算，用量是相当可观的。因此，一种闪烁晶体有无生命力，除了它的物理性能以外，价格也是一个重要的因素。目前，在国际市场上，加工成的抛光的闪烁晶体  $\text{BaF}_2$  每立方厘米售价为 6 美元，而 BGO 为 16 美元。这是指小块晶体而言的。当体积增大时，二者的比价变化很大，例如，体积为  $\phi 130 \times 26(\text{mm})$  的两块晶体， $\text{BaF}_2$  的价格为 BGO 的四分之一。生成 BGO 的主要原料是  $\text{Ge}_2\text{O}_3$ ，每立方厘米为 1.42 美元；而生成  $\text{BaF}_2$  晶体的原料粉末每立方厘米仅 0.018 美元。所以， $\text{BaF}_2$  晶体的价格有着下降的潜力。

## 二、 $\text{BaF}_2$ 在高能物理中的应用

在粒子物理中发生的各类反应，其终态差不多都有光子产生。如在  $e^+e^-$  碰撞的反应产物中， $\gamma$  射线几乎带走了一半的能量。 $\gamma$  射线探测器在粒子物理实验中有着特别重要的意义。随着物理实验技术的发展，在世界各大加速器实验室里，经常进行着探测器的更新换代。

近一年来，用  $\text{BaF}_2$  晶体探测高能粒子的报道增加了。如 CERN 实验室的 G. CHARPAK 小组的时间投影室和契伦科夫成像环，D. F. ANDERSON 小组的低压计数器等。图 2 是用  $\phi 130 \times 26(\text{mm})$  的  $\text{BaF}_2$  晶体耦合到 TMAE 塑料阴极的低压计数器示意图。选用 TMAE 塑料阴极的原因是因为它具有很低的电离电位，其阈值为  $5.4\text{eV}$ ，对  $\text{BaF}_2$  晶体的荧光量子效率大。在  $20^\circ\text{C}$  时，室内压力为  $0.35\text{Torr}$ ，可以工作在很高的计数率下。晶体的上表面涂一薄层铝粉以增加荧光的收集效率。晶体的下表面具有 90% 的透明网孔，使其产生的荧光能顺利地到达光阴极上。在光阴极上产生的光电子经过  $8\text{mm}$  的漂移室空间，在阴极与阳极之间的  $3\text{mm}$  空间内雪崩倍增，最后在阳极被收集记录。

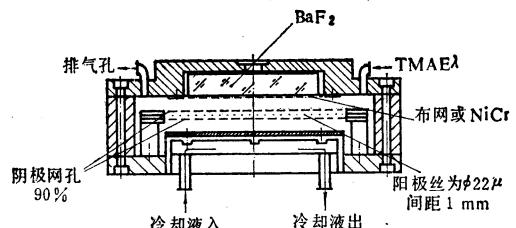


图 2 国产  $\text{BaF}_2$  晶体透射率曲线 ( $\phi 24 \times 5$ )

上述低压多丝计数器对  $940\text{MeV}$  的质子能量分辨率为  $28.5\%$ ，对  $350\text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子的时间分辨率为  $540\text{ps}$ 。如果用来记录带电强子，可以工作在  $10^5$  粒子/秒情况下。

### 三、 $\text{BaF}_2$ 在 $\gamma$ 射线天文学中的应用

一般认为，在某些天体上，经常进行着各种高能物理的反应过程。在某些脉冲星方向上，也曾多次观察到有规律的高能  $\gamma$  射线流。脉冲星可能是宇宙射线的一个来源。除脉冲星以外，类星体、超新星爆发都可能是宇宙射线的重要来源。星体内部发生的高能过程，可以通过传播到地球附近来的  $\gamma$  射线来研究。因此，探测宇宙  $\gamma$  射线，对于研究天体的起源、演化规律以及星体内部所发生的各种过程等都是非常必要的。

探测宇宙  $\gamma$  射线的方法很多，根据射线的不同能区可以有不同的探测方法。主要的有  $\gamma$  射线望远镜；大气契伦科夫计数器；电磁簇射量能器和飞行时间谱仪等。就其功能来说， $\text{BaF}_2$  晶体在这一领域中有着广阔的应用前景。

### 四、 $\text{BaF}_2$ 在核医学中的应用

在国外， $\text{BaF}_2$  与多丝正比室耦合，与契伦科夫计数器配合组成的环状成像系统，已有不少报道。用计算机控制的  $\gamma$  射线层析诊断系统（简称 CT），已有二十多年的发展历史。在美国，大约有二十几个部门从事正电子发射型的 CT 研究和开发，政府投资两千多万美元。华盛顿大学已经研制了七代  $\gamma$  射线层析诊断系统。前五代，完全采用碘化钠晶体探头，在理想情况下，空间位置分辨可达  $8\text{mm}$ 。第六、七两代中，采用了氟化铯 ( $\text{CsF}$ ) 晶体探头和飞行时间技术。临床实践证明，飞行时间技术使  $\gamma$  射线层析系统的位置分辨和成像质量都有显著提高。据透露，他们在下一代 CT 系统中将全部采用  $\text{BaF}_2$  晶体，预计空间位置分辨可达  $5\text{mm}$  以下。

正电子飞行时间 CT 是  $\gamma$  射线层析系统的后起之秀，法国 LETI 实验室用  $\text{BaF}_2$  和  $\text{CsF}$  两种晶体探头，采用了飞行时间技术，研制了世界第一台正电子发射型全身层析系统。在不低于  $7\text{mm}$  的空间位置分辨下，每完成一次扫描成像仅需 40 秒钟。而一般的  $\gamma$  射线层

析系统完成上述过程则需 20 分钟。

LETI 全身层析系统共用了 384 个探头。探头架为内径  $\phi 920\text{mm}$  的四个同心圆环，每个圆环上均匀地排列着 96 个探头。每 8 个探头分为一组，同一环上共有 12 组。每一组探测器可以和对面的五组进合符合，相迭的中央部分为  $\phi 460\text{mm}$  的成像区域，每层相同位置上的探测器组通过固定在框架上的匹配头与编码、符合、预处理等电子线路连接。如图 3 所示。LETI 实验室在开始研制时，在一个环上用了 96 个  $\text{BaF}_2$  探头，其余三个环上用了相同数量的  $\text{CsF}$  探头。最后临床应用时，他们又把  $\text{CsF}$  全部换成了  $\text{BaF}_2$ ，据透露，他们在下一代层析系统中将全部采用  $\text{BaF}_2$  探头，每个环面上准备排列 192 个探头以提高定位精度。

综上所述，在  $\gamma$  射线层析诊断系统中， $\text{BaF}_2$  晶体有取代其它晶体的趋势。在粒子物理实验中，D. F. ANDERSON 等人也曾提出用  $\text{BaF}_2$  取代 BGO 的建议，作为一种多功能的廉价闪烁体，它的应用前景是乐观的。

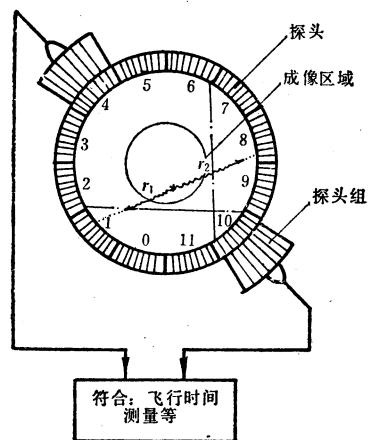


图 3 LETI 全身层析系统探头环示意图

北京人工晶体研究所已经制成了  $\text{BaF}_2$  晶体，它对  $^{137}\text{Cs}$  放射源的  $662\text{keV}$   $\gamma$  射线的能量分辨率为  $12.1\%$ ，对  $^{60}\text{Co}$  放射源的  $\gamma$  射线的时间分辨率为  $196\text{ps}$ ，已经进入了国际先进水平的行列。当然，作为一种闪烁晶体， $\text{BaF}_2$  也有不足之处，它的发射光谱位于紫外区域，用石英窗口的光电倍增管才能研究和利用。要开发利用  $\text{BaF}_2$  晶体，还必须解决一些如材料、技术和方法等方面的问题。但是，可以预料， $\text{BaF}_2$  的开发和利用必将推动高能物理探测技术、核医学和天文观测技术等方面的发展也将为材料科学和紫外区光谱技术的研究提出一个新的课题。