

高能光子探测和锗酸铋单晶的应用前景

顾以藩

何景棠

一、光子探测的意义

在高能物理实验中,光子探测占有相当重要的地位.以 e^+e^- 碰撞反应而言,曾经发生所谓“能量危机”,即实验发现:终态带电强子所携带的能量仅占总质心能量的一半左右,另外一半左右的能量“不见”了.实际上,余下的能量都被中性粒子所带走.这些中性粒子很大一部分是光子,包括衰变成光子的 π^0 介子和 η 粒子.

因此,探测光子所提供的物理信息是不能忽视的,例如,在粲素家族中有两个长时间未从实验上找到的成员 η_c 和 η'_c 粒子,是通过研究 $J/\psi(3100)$ 和 $\psi'(3685)$ 态的辐射衰变产生的光子能谱被确定下来的.粲介子 F 和 F^* 则是通过对终态 η 粒子的测量(测量它衰变而成的一对光子)来寻找的.

对于光子探测的重视,反映在不断更新的实验装置上.在美国 SLAC 实验室的 SPEAR 对撞机上,经历了 Mark I, Mark II 和 Mark III 三个实验装置的更迭: Mark II 与 Mark I 相比,加大了探测光子的覆盖立体角,光子能量及位置分辨性能都有相应提高;而 Mark IV 则进一步强调了更低能量(≤ 100 MeV)光子的测量以及位置分辨能力.同样,在西德 DESY 实验室 DORIS 对撞机上:新建的 ARGUS 实验装置较原来的 DASP 和 PLUTO 等装置在光子探测性能方面都有显著改进.

二、电磁簇射过程——高能光子探测的物理基础

在高能物理实验中,光子(电子也是一样)的探测通常是通过测量它在物质中产生的电磁簇射来实现的.

我们知道,一个光子在穿经某物质时,与该物质的原子作用,因对产生而转换成正负电子对.所产生的正负电子对又因韧致辐射而产生新的光子.类似的过

程不断重复,次级电子和光子数目不断增加,由此形成了级联簇射.同样,一个电子也可以通过韧致辐射和对产生的交替发生而形成级联簇射.这种由光子或电子引起的簇射过程就称为电磁簇射过程.图 1 是电磁簇射的一个实际例子.这是一个由高能电子引起的簇射过程,是在西欧原子核研究中心 CERN 的弗利昂(CF_3Br)重液泡室中摄得的.从图自下而上可以看到韧致辐射(空白间隔)和电子对产生(留下可见径迹)的交替发生.

电磁簇射经历着发生、发展到停止的过程.电磁簇射发生以后,既向纵向发展,也向横向发展.

从纵向上看,次级电子和光子数目随着通过物质层厚度的增加而不断增加.同时它们的平均能量 E 通过电子产生韧致辐射损失而逐步衰减,其与物质层厚度 X 之间存在着下面的关系:

$$E = E_0 e^{-X/X_0}$$

式中 E_0 是电子初始能量.这个式子包含了这样的内容,即当通过的物质层厚度 X 递增一个 X_0 时,次级电子能量衰减为 $1/e$.因此, X_0 是表征着物质使入射光子或电子能量因辐射损失而衰减的能力的一个特征长度,称为辐射长度.用电磁相互作用理论可以推算出辐射长度是由物质的原子量 A 和原子序数 Z 所决定的.

几种物质的辐射长度如表 1 所示.

表 1

材 料	辐射长度 (cm)
塑料闪烁体	42.9
NaI (Tl)	2.59
铅	0.56
铁	1.76
铝	8.9

图 2 是我们在云南高山宇宙线观测站利用多板云雾室拍摄到的一个高能电磁簇射照片.云雾室的面积是 50 厘米 $\times$ 50 厘米,共用 11 块铅板,每块铅板厚 1.25 厘米,约相当于两个辐射长度.从图中清晰地看到这个电磁簇射从发生、发展到终止的整个过程:它起始于第一块铅板,次级电子数迅速达到最大值,然后慢慢收缩,最后停止在第 11 块铅板中.

从这个图还可以看到电磁簇射在横向上发展的规模.这通常是用莫里衰半径 r_m 这样的特征量来表征

图 1 一个高能电子在弗利昂重液泡室中产生的簇射

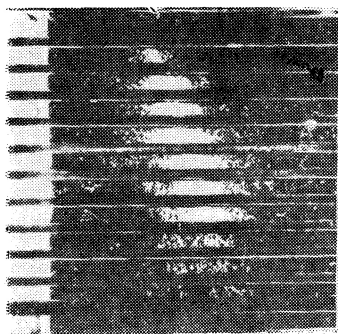


图2 在我国云南高山宇宙线观察站利用多板云雾室拍摄的一个高能电磁簇射

离损失与平均辐射损失正好相等。我们注意到,莫里哀半径是与辐射长度直接成正比的。根据簇射横向发展的情况,可以求出横向分布的重心,就能够确定光子或电子入射的位置。

通过对电磁簇射过程的测量而实现的光子探测器也称为电磁簇射探测器。当前在高能物理实验中广泛使用的电磁簇探测器可以归纳为两大类型:

(1) 取样型。通常由相当数目的大密度吸收体层和计数器层交替叠合组成。图3表示的多板云雾室可以作为取样型电磁簇探测器的一个例子。电磁簇射在吸收体层中发展,由吸收体层间的计数器取样记录。铅的辐射长度短(见表1),价格比较便宜,因此,经常被用作吸收体物质。目前常用的计数器有气体计数器,(有限盖革工作方式,正比工作方式或自猝灭流光工作方式)液氩计数器或塑料闪烁体。由于相当数量的次级电子消失在吸收体之中,计数器记录到的次级电子数只是整个电磁簇射的一部分。这种类型的电磁簇射探测器造价较低,但能量分辨性能往往较差。

(2) 非取样型。通常由整块大量探测材料组成。对比于取样型探测器,它可以看成是连续取样的。它将吸收体和探测器合而为一。它探测整个电磁簇射中产生的所有次级电子。目前采用的探测材料有铅玻璃(次级电子在铅玻璃中产生契伦柯夫辐射而被探测)和碘化钠(铯)(次级电子引起闪烁荧光而被探测)。这种类型的电磁簇射探测器比取样型具有较好的能量分辨性能,但造价要贵得多。

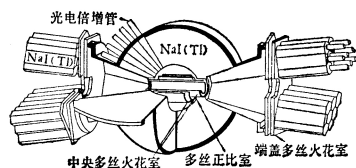


图3 晶体球实验装置示意图

三、采用碘化钠(铯)晶体的电磁簇射探测器

七十年代中电磁簇射探测器方面的一个重要发展

的。它的定义是具有能量等于临界能量 ϵ 的电子通过一个辐射长度的物质层以后的均方根分散:

$$r_m \cong \frac{21 \text{ MeV}}{\epsilon} x_0.$$

临界能量 ϵ 的定义是:当电子达到这个能量时,每 x_0 长度上一个电子的平均电

是大数量的碘化钠(铯)晶体的应用。采用碘化钠(铯)晶体的一个成功之作是1978年底在美国的SLAC的SPEAR对撞机上投入运行的“晶体球”实验装置。如图3所示。这个装置的主体是由672块碘化钠(铯)晶体拼合而成的空心球体。晶体厚度为16个辐射长度。这些晶体分别连接到各自的光电倍增管及电子学系统。在空心球内的径迹室,用来记录带电粒子径迹并且将带电粒子和中性粒子分辨开来。球主体覆盖 4π 立体角的93%;外加端盖部分,可达 4π 立体角的98%。这个装置对光子的能量分辨能力远远胜过现有的铅玻璃、液氩、塑料闪烁体和气体取样等电磁簇射探测器的分辨能力。采用分块拼合的办法,也保证了较好的光子位置分辨能力。“晶体球”对光子的角度分辨达到 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。先进的探测器产生了丰硕的物理成果。“晶体球”装置的这些独特性能使它在三年工作期间在聚物理领域中取得了不少有意义的研究成果,作出了重要的贡献。例如第一次发现了理论预言的 η_c 和 η'_c 粒子,以及找到了两个可能是胶子球的新粒子 $\psi(1440)$ 及 $\theta(1640)$ 。

继晶体球之后,采用大数量的碘化钠(铯)的探测器系统陆续在其它对撞机及加速器上建立起来。美国CORNELL大学CESR对撞机上采用332块碘化钠(铯)晶体和256块铅玻璃作为电磁簇射探测器,主体部分在 γ 谱学研究方面也取得了很好的成绩。

但是碘化钠(铯)作为探测元件有其不足之处。它的化学稳定性差,易于潮解。因此必须采取特殊措施封装保护。这样常常带来使用操作上的不便。此外,随着加速器能量的提高,所研究的光子能量也高,这就要求闪烁晶体具有比碘化钠(铯)更高的阻止本领。

四、后起之秀——锗酸铋单晶

八十年代初,一种原来并不出名的闪烁晶体受到了高能物理实验工作者的注意。这就是锗酸铋单晶。锗酸铋单晶的分子式为 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 简称BGO。

锗酸铋是一种立方晶体,无色透明。它在光子和电子激发下的发光是通过 Bi^{3+} 离子从 $^3\text{P}_1$ 到 $^3\text{S}_0$ 态的电跃迁。表2列举锗酸铋单晶的主要特性。作为比较,同时列出碘化钠(铯)的有关参数。从表2可以看到锗酸铋单晶机械强度好,硬度适中,加工容易又不易磨损;化学稳定性好,不潮解。更可贵的是,它由于平均原子序数高,密度大,因此具有较高的光转换效率与阻止本领,能量分辨性能也好。辐射长度以及莫里哀半径都比碘化钠(铯)的显著小。在采用锗酸铋单晶作电磁簇射探测器时,探测器可以做得相当紧凑。不仅纵向的尺寸缩小,在横方向上,分离两个毗邻光子形成的簇射的角度也将相应缩小,从而可能获得比碘化钠(铯)更好的空间分辨。采用BGO来探测光子,可以探测能量约为10 MeV的低能光子,这是目前其他探测器很难做到的。锗酸铋单晶的折射率高。因此如何将光

表2 BGO 和 NaI(Tl) 特性的比较

	BGO	NaI (Tl)
比重(克/厘米 ³)	7.13	3.67
机械稳定性	坚固	易碎裂
化学稳定性	好	不好
水溶性	不溶	易潮解
发射光最大值处波长	480 nm	420 nm
上升时间	50 ns	50 ns
下降时间	300 ns	250 ns
折射率	2.13	1.85
相对脉冲高度	8~16	100
温度系数	~1.7%/°C	~0.8%/°C
核吸收长度	23 cm	41 cm
相对中子截面	0.25	1
辐射长度 x_0	1.12 cm	2.59 cm
临界能量	10.5 MeV	12.5 MeV
莫里哀半径	2.24 cm	4.4 cm
最小电离损失 $(dE/dx)_{\min}$	~8 MeV/cm	4.8 MeV/cm
对 Cs^{137} 0.67 MeV γ 的能量分辨	4.3%	2.6%

最大可能地引出一个有待解决的技术课题。目前引出到光电倍增管上的脉冲幅度是碘化钠(铯)的8~16%，实际上从锗酸铋能量分辨性能来分析它的光输出应当是更高的。

经过最近几年来的测试研究，锗酸铋在光子探测方面的许多优点得到了普遍的承认。人们认为不久锗酸铋将会完全取代碘化钠(铯)、铅玻璃等材料在高能物理实验中所占的地位。

五、锗酸铋的应用前景。

锗酸铋单晶具有的许多优点使它在电磁簇射探测方面成为很有希望的一种材料。最近一、二年里，几乎在所有正在运行和将要建成的正负电子对撞机上都提出了采用锗酸铋作为电磁簇射探测器的实验方案建议。这些方案带来了以下一些特点：

第一，紧凑。在美国斯坦福直线对撞机的一个方案中，BGO壳层的内半径是40厘米，厚度为20个辐射长度，等于22.4厘米。在西欧原子核研究中心的LEP-3方案中，BGO圆筒的内半径是50厘米，厚度是 $22x_0$ ，等于24.6厘米。由于电磁簇射探测器的尺寸不大，外层的强子量能器和磁铁尺寸也就大大缩小，从而降低了整个探测器的造价。

第二，空间分辨好。在上述斯坦福方案中，整个簇射探测器由10,000块BGO晶体以放射状拼成。每块晶体的前端面是 $1.4\text{ cm} \times 1.4\text{ cm}$ ，后端面是 $2.2\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ ，这样估计可以得到角分辨 $\sigma_{\theta_1} = 6\text{ mrad}$ ，可区分光子对的最小张角是 17 mrad 。

第三，能量分辨好。在LEP3方案中，期望的能量分辨 σ/E 对于1 GeV以上的光子可以好到1%以内。

第四，LEP3方案采用硅光电二极管读出，可以在

强磁场内工作。

中国科学院高能物理研究所的一些科研工作者也提出了一个采用锗酸铋晶体的探测装置方案，建议用于正负电子对撞机，从事聚物理和其它基本粒子物理实验。这个装置在结构上和“晶体球”相似，主要区别在于它的主体是由2688块厚度约为16厘米的锗酸铋晶体拼成的空心球体。和“晶体球”比较，可以期望在这个装置上，获得更好的光子能量分辨及位置分辨性能。从而也能获得改进的重建 π^0 事例的能力。 $(\pi^0$ 不能被直接探测，但可以通过它的衰变产物，即一对光子的测定来重建 π^0 事例)。这些改进预期产生的效果可以从图4看出。图中给出晶体球实验实际测得的 J/ψ 家族辐射跃迁谱和采用分块很细的锗酸铋晶体根据蒙特卡罗模拟计算得到的相应光子能谱。后者无论在讯噪比或者能量分辨上都具有明显改进的效果。

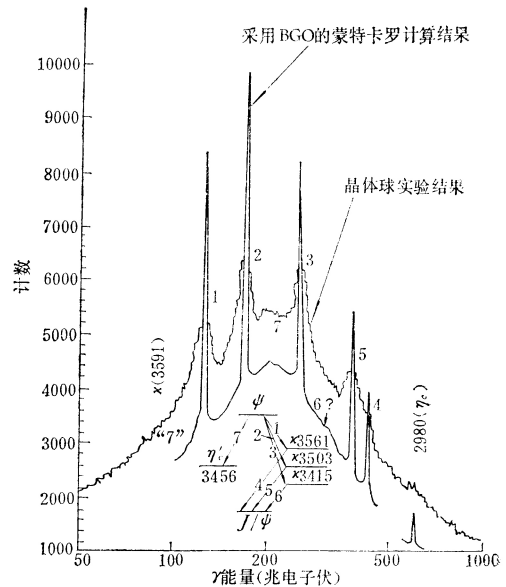


图4 采用分块很细的BGO晶体，根据蒙特卡罗模拟计算得到的粲家族辐射跃迁光子能谱和晶体球实验结果的比较。

高能物理实验工作者对锗酸铋晶体的广泛兴趣，有力地推动了世界范围内这种晶体生产的研究发展工作。当前，锗酸铋晶体在许多领域里受到了重视，应用范围不断扩大，其中包括正电子层析摄影、空间研究、原子核物理以及在工业部门中的应用。这种情况生动地反映在去年十一月在美国举行的国际锗酸铋工作会议上。我国有着非常丰富的锗、铋原料资源；在晶体生长技术方面也有很好的基础，今年我国首先结出了大尺寸优质锗酸铋单晶。充分发挥我国的优势，在生产锗酸铋晶体以及把它应用到高能物理和其它领域方面，我们都是大有可为的。