

# 超导薄膜粒子探测器

濮 焕 顺  
张 英 平

在核物理与粒子物理学中,探测一种粒子或辐射,要靠它们与物质的相互作用,并且通常用物理的方法验证这种作用。如果以相互作用机制来分类,探测器大致有以下几种:

粒子在物质中直接或间接产生电离。很多探测器都利用这种机制。例如,直接收集电离粒子的电离室,经过气体放大的多丝室;测量径迹的泡室,测量能量的液氙室;核乳胶及半导体探测器等。

粒子穿过介质时,使介质中的原子或分子激发。收集退激发放出的光,构成了另一大类探测器。例如,广泛应用的气体、液体、固体闪烁计数器,都利用了这种机制。

电子或光子通过物质而相互转化。利用这种机制的探测器有电磁簇射计数器、微通道计数器等。

粒子穿过介质时,引起介质的瞬时极化。介质在退极化时会放出辐射,检测这种辐射构成了另一类探测器。例如,利用透明

介质的契伦科夫计数器,利用多层薄膜的穿越辐射探测器都属此类。

还有当粒子穿过晶体时,其运动轨道会受到晶格点阵间电磁场的扰动,从而放出辐射。据此,制成了所谓道辐射探测器。粒子通过宏观电磁场时,其运动轨道会弯曲,对弯曲程度的检测,构成了电磁谱仪等等。

总之,粒子或辐射与物质的相互作用,不管最后产生哪种效应,都可用来测定粒子本身。那么,超导体的超导态,是物质的一种状态。当粒子或辐射打上超导体时,要沉积能量,要破坏构成超导电流的库伯对,而且拆散一个库伯对只要  $10^{-3} \text{ eV}$  的能量。这种极其灵敏的新机制、新效应,同样可用来探测粒子或辐射本身。

我们用下图来说明超导薄膜是怎样探测粒子的。通常薄膜在某种衬底上制成,设薄膜宽度为  $W$ ,临界电流为  $I_c$ ,临界电流密度为  $J_c$ 。所用工作电流及相应的电流密度分别为  $I$  和  $J$ 。膜处在超导态时,  $I < I_c$ ,  $J < J_c$ 。若有一个粒子垂直于膜面穿过薄膜,粒子在膜中沉积能量,这些能量会拆散形成超导电流的库伯对。于是,在围绕入射点的半径为  $r_c$  的柱体内,  $I > I_c$ , 柱

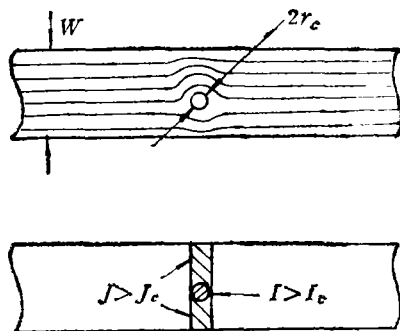


图 超导薄膜探测粒子原理图。  
(a): 粒子入射后的电流分布。(b): 粒子在超导膜中形成一个宽度为  $2r_c$  的失超带。

体进入常态。因为柱体有了电阻,电流就被迫绕过此柱体靠边流动(见图 a)。这样,此柱体区和膜边缘之间的电流密度增大,使得此处的  $J > J_c$ , 结果造成  $2r_c$  长的一段膜的整个断面进入常态。有了电阻,膜的两端就产生了电位差。因为整个膜处在低温系统中,常

表 1 与粒子物理实验中常用探测器的主要性能的典型值比较

| 探测器类型 | 定位精度 (rms)                 | 时间分辨率                | 死时间                   |
|-------|----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 泡室    | $\pm 75 \mu\text{m}$       | $\sim 1 \text{ ms}$  | $\sim 1/20 \text{ s}$ |
| 流光室   | $\pm 300 \mu\text{m}$      | $\sim 2 \mu\text{s}$ | $\sim 100 \text{ ms}$ |
| 光学火花室 | $\pm 200 \mu\text{m}$      | $\sim 2 \mu\text{s}$ | $\sim 10 \text{ ms}$  |
| 正比室   | $> \pm 300 \mu\text{m}$    | $\sim 50 \text{ ns}$ | $\sim 200 \text{ ns}$ |
| 漂移室   | $\pm 50 - 300 \mu\text{m}$ | $\sim 2 \text{ ns}$  | $\sim 100 \text{ ns}$ |
| 超导薄膜  | $\pm 2.5 \mu\text{m}$      | $\sim 3 \text{ ns}$  | $\sim 100 \text{ ns}$ |

态区会从衬底进行热交换,重新回到超导态。到此,膜的这个断面就完成了瞬时失超的循环,并给出一个电压脉冲。换言之,每得到一个电压脉冲,即可查知一个入射粒子的存在。

目前,超导薄膜粒子探测器还处在研制阶段,应用仅限于低  $T_c$  范围。由于低温系统液氮的昂贵,致使它的应用受到限制。但其性能优异,是其它探测器无法替代的。与粒子物理常用探测器性能比较见表 1。

现将超导薄膜粒子探测器与半导体探测器作一比较(见表 2)。两者都是固体探测器,主要用于低能核物理实验中。但用超导薄膜作为粒子探测器,在主要性能上(目前除噪声外)优于硅面垒半导体探测器。从表 2 可知,无论是位置分辨、时间分辨、能量分辨、运转阈,还是耐辐照性能,超导薄膜探测器都比硅半导体探测器优越。原则上,硅探测器能测的,超导薄膜也能测。所以不需要列出超导薄膜探测器的种种可能应用。这里只提出几项超导薄膜可以测而其它探测器不能测或测不好的工作。

日珥是一种非常壮观和艳丽的太阳活动现象。如果把太阳看作是个以炽热等离子体为燃料的熊熊火球,日珥就是从这个大火球中往外穿出来的鲜红火舌,它是等离子体在强而复杂的太阳黑子磁场中运动而形成的。

日珥形状千姿百态,有像浮云、喷泉、龙卷的,有环状、弧状、蘑菇状的,有如篱笆一片,或如一丝孤烟,乃至悬浮在空中状的,犹似朵朵绚丽花朵,变化万端,蔚为奇观。

日珥大小不一,一般长一二十万公里,高数万公里,少数日珥则被黑子强磁场的弧状磁力线高耸于色球之上的日冕低层之中,达数十万公里。封面照片中的巨大日珥高约40万公里,是用太阳单色光照相机通过电离氢304 Å谱线拍得的太阳紫外照片。

根据其形态和运动等特征,日珥主要可分为宁静、活动和爆发的三大类。宁静日珥可存在好几十天,而爆发日珥可一下子从色球以超过250公里/秒的速度

上升,高度蓦地超过百万公里。日珥的数目、面积乃至所处的日面纬度,则与黑子数有着密切关系。

研究日珥谱线,得出其温度大体在7000K左右,电子密度约 $10^{10}$ — $10^{11}$ 个/(厘米)<sup>3</sup>,其运动速度约5公里/秒。由于其亮度较弱,主要由氢组成的这些庞然大物,只有在日全食时才能看到。

日珥出现在日冕中,被认为是个很有意思的现象。日冕温度高达百万度以上,相比之下,日珥只能算是“冰冷”的物质,为什么温度如此悬殊的两种物质,能在同一个地区“长期共存”呢?有人认为磁场在这里起了决定性作用,磁力线好比是“无形”的卫士那样,它把日珥包住,不

让日冕高温侵袭进去。显然,事情不可能这么简单而应该复杂得多。

这以及包括日珥中复杂的精细结构等这类有趣的现象,为太阳物理的研究提出了颇有启发的重要课题。

## 封面说明

# 日珥

卞德培

表2 与硅面垒半导体探测器的主要性能的典型值比较

|       | 硅面垒半导体探测器                                                        | 超导薄膜                                                             |
|-------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 灵敏区厚度 | >300 Å                                                           | 1000—3000 Å                                                      |
| 噪声    | ~10 μV                                                           | ~100 μV                                                          |
| 能量分辨率 | ~KeV                                                             | ~40 eV                                                           |
| 时间分辨率 | ~100 ns                                                          | ~3 ns                                                            |
| 定位精度  | ±25 μm                                                           | ±2.5 μm                                                          |
| 运转阈能  | ~KeV                                                             | ~20 eV                                                           |
| 耐辐照性  | ≤10 <sup>11</sup> 快中子/cm <sup>2</sup><br>~10 <sup>13</sup> meV/g | ≤10 <sup>19</sup> 快中子/cm <sup>2</sup><br>~10 <sup>16</sup> meV/g |

超导膜探测器位置分辨好,可用作高精度位置灵敏探测器。具有微米级精度的X-Y超导粒子探测器已经设计出来。如果把它用到工业或医学中的X射线或γ-射线成像,其意义是可想而知的。

上述高精度位置灵敏探测器,也可用作粒子物理实验中的顶点探测器。顶点探测器还要求时间分辨率好和耐辐照。故用超导薄膜作顶点探测器比用硅条作,不但精度高,而且寿命比硅条长1000倍,有人已经为将来的超导超级对撞机(SSC),提出了超导膜顶点探测器的方案。

超导薄膜粒子探测器的能量分辨率好、运转阈低的特点,使它能在许多精密测量中发挥特殊的作用。

如现在热门的中微子质量问题,用Si(Li)测<sup>3</sup>H的β衰变,因能量分辨率的限制,目前只能定到 $M_{\nu} < 18$  eV。换用超导薄膜,应该能测出更小的上限。又如天文学中的黑物质,是另一个悬而未决的大问题。黑物质粒子散射时的反冲能约为16 eV—50 keV,超导薄膜探测器很适合测这种粒子。

其它高精度的测量,如低能量的核反冲,X-射线衍射,同步辐射光以及超冷中子等等,超导薄膜探测器都能发挥重要的作用,不再一一细说。

因液氦昂贵,低温系统麻烦,超导薄膜探测器的应用,多数还停留在方案设计阶段。我们相信,随着高T<sub>c</sub>薄膜的出现及其性能的不断提

## 简讯

### 本刊第二届编委会成立

(本刊讯)据本刊记者报道,《现代物理知识》第二届编委会成立。主任:黄涛;副主任:郁忠强、李国栋、吴思诚;委员:王龙、卞毓麟、叶云秀、叶春堂、历光烈、吴思诚、陆柱国、汪雪瑛、李士、郁忠强、李国栋、张肇西、聂玉昕、蒋树声、谭树杰、黄涛、谢治成、程鹏翥、崔砚生。