

复合量热计作为超高分辨粒子谱仪

阎 辰

(中国原子能科学研究院)

把原子核辐射直接转化为吸收材料的温升,这种用量热来测量放射性的方法同原子核物理本身的发展几乎有着同样长的历史。早在1903年,皮埃尔·居里(Pierre Curie)就曾用量热计证实了放射性物质产生的微小热量来自辐射吸收^[1]。1927年,C. D. Ellis与A. Worcester又曾用相同的量热测量技术确定了²¹⁰Bi(RaE)发出 β 射线的平均能量为0.337MeV^[2],这使得微量热学成为当时具有重要意义的一项技术。当时测出的 β 射线平均能量0.337 MeV与最大 β 衰变能量1.17MeV间的差异,成为泡利(Pauli)假定中微子存在的关键论据之一。

微量热计可以确定由放射性衰变产生的平均能量通量,这些量热计一般做得大些以便增加加热时间常数,实现对粒子束的平均测量。Anderson在5K温度环境中做了不同的用于精密测量阻止本领与剂量的量热计^[3],这些装置几乎用了十年之久。他使用的无定形碳温度计的灵敏度随温度下降呈指数增加,而量热计各部件间的热辐射相互作用,因辐射功率随 T^4 减少可降低到可忽略的地步。由此,可实现精确的平均测量。

低温量热计的热时间常数以及热容量与量热计的质量成正比。探测灵敏度与量热计质量成反比。在300K温度时,微量热计的灵敏度为 $3 \times 10^{-5} \text{W}^{[4]}$;在1.8K时,则达到 $10^{-9} \text{W}^{[5]}$ 。1974年,T. Ninikoski与F. Udo在他们早期用超低温量热计探测宇宙线事件的实验技术基础上,提出把微量热计做成能分辨单个粒子能量的新型粒子探测器的想法。不少实验室立即对这一有价值的问题着手研究,第一个成功用于X射电天文学上的微量热计探测器是由美国

威斯康星的国家航空和宇宙航行局的合作小组于一年前研制成功的。同时,西欧中心的米兰小组也着手把微量热计用来探测诸如无中微子的双 β 衰变的罕见事件。

我们可对粒子能量在量热计中转换为热量的过程稍加分析。图1给出辐射在吸收体中的能流图。可以看出,粒子进入探测器后,不是所有停止在探测器中的粒子的能量都能变成热量。主要能流可分为两大分支——原子核作用分支 S_n 与电子或弹性散射作用分支 S_e 。前者

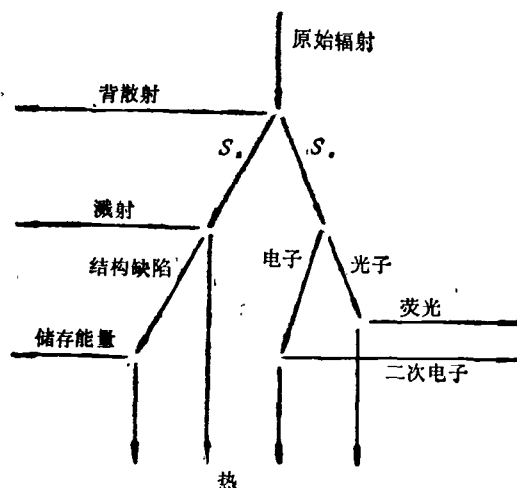


图1 粒子进入量热探测器后的能流图

可能以背散射或溅射方式使部分初始粒子能量从探测器中漏出去,也可能造成探测器材料的永久缺陷,把部分能量贮存在晶格中。后者则可以发射二次电子或发荧光的方式漏失能量。这些过程都对探测器的温升没有贡献,而且漏失能量份额与入射粒子种类和能量有关。同面垒型半导体探测器中的脉冲高度亏损效应相似,漏失能量将使量热探测器的能量响应呈非

线性,但由于漏失能量份额一定,所以对探测器的最终分辨率没有来自能-热转换物理过程的本质性的限制。

法国天体物理实验室的 N. Coron 等人研制出一种用于空间红外探测的复合量热计^[6]。他们把具有较大表面积(5~12.5mm²)的20μm厚的金刚石吸收体很好地热耦合到极小体积(0.008mm³)的单片半导体热敏电阻上。金刚石具有极好的热扩散性能,它能把局部温升瞬时转换为整块吸收体的平均温升,是用作吸收体的理想材料^[7,8]。图2给出这种复合量热探测器的结构。

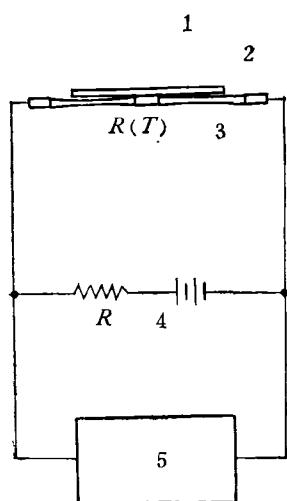


图2 复合量热探测器的结构示意图

图2中1. α源;2. 金刚石吸收体,在1.3K工作温度下,其表面任何一点的平均热化时间都小于60μs;3. 掺杂钷的单片锗电阻型测温计,其表面积为0.1×0.1mm²,用10μm厚的树脂涂层被粘在金刚石吸体的内表面。锗量温计的两根梁同时作为量热探测器的机械支撑与低温冷源的热导体;4. 偏压电源与冷负载电阻;5. 室温下工作的低噪声前置放大器。整个量热探测器内部元件间不采用焊接结合方式以使低频噪声降低到最低水平,并能得到最佳热耦合以得到低热容量。

限制复合量热探测器分辨的主要因素是它自身的噪声^[9,10],分辨率 ΔU_{FWHM} (谱峰半高处

的峰宽)的估算公式为

$$\Delta U_{FWHM} = a \sqrt{8 \ln 2 k_B T^2 c},$$

这里 k_B 为玻耳兹曼常数, T 为氦浴温度(以K为单位), c 为温度为 T 时量热计的比热, a 为与量热计结构有关的系数,一般取 $a = 1-2$ 。 ΔU_{FWHM} 的单位为 eV。图3给出对于不同量热探测器体积,分辨率 ΔU_{FWHM} 与温度的关系。

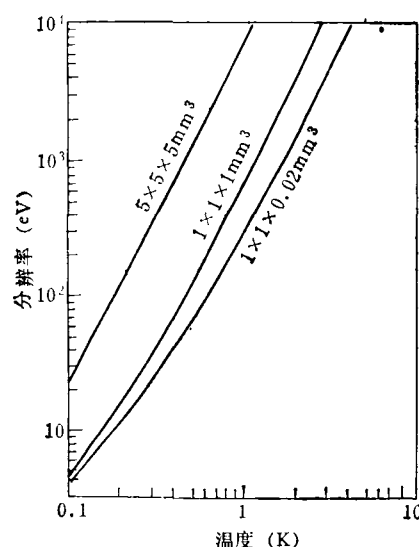


图3 不同体积金刚石吸收体的分辨率与温度的关系

复合量热计的分辨测量是这样进行的:把整个量热探测器装在商用袖珍光学低温恒温浴的真空室中。²³⁹Pu, ²⁴¹Am 与 ²⁴⁴Cm 的混合 α 源放在金刚石吸收体的前方,并保证 α 粒子不会直接打在测温计上。图4给出在1.3K温度下典型的混合源的 α 粒子能谱。为降低噪声,使用了窄带型带通(2-120kHz)增益为2000的低噪声前置放大器。在这种结构的系统内,一个5.5MeV能量的 α 粒子可直接造成1mK的温升。由于金刚石吸收体的厚度还不能阻止²⁴⁴Cm的高能 α 粒子,因此²⁴⁴Cm的 α 峰比低能诸峰略展宽。沟道效应在几个峰的低能一侧均可发生,对展宽也有贡献。

从理论计算可知道,在1.3K下上述 α 粒子谱的分辨率小于1keV;在0.3K下分辨将达

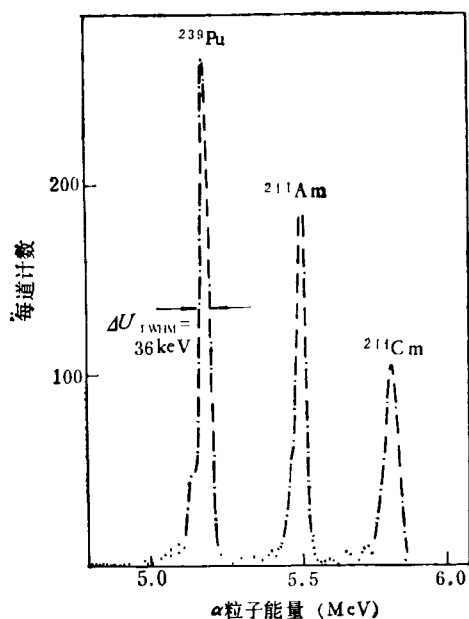


图 4

30eV, 而实际测到的仅达 36keV. 这种偏离主要是来自低温氦浴温度的涨落. 由于测温计的灵敏度随温度剧烈变化, 尽管基线温度变化甚微, 但是已能导致测温计的输出脉冲幅度发生很大变化. 所以, 除去改善测量电子学线路以便与复合量热计达到最佳匹配外, 主要是要改善低温恒温状况. 可期待在改善的低温与电子学条件下, 新的量热探测器的分辨将远远超过半导体探测器. 由于影响量热探测器分辨能力的主要因素是非本征性的, 所以在高分辨测量中有极广阔的应用前景.

就目前所能达到的技术水平而言, 复合量热计的最大计数率仍有限制. 这是由量热探测器各部件间的热耦合问题造成的. 每种材料都好象充有声子气体的盒子, 由于其它材料的不同声学特性阻止声子逾越材料间的边界, 因此造成每一种材料与周围都是隔绝的. 这一问题在 1K 以上的环境中不明显, 但是在甚低温环境中工作时就明显了, 例如在 270 mK 下, 面积为 $3 \times 4\text{mm}^2$ 的硅量温计对 8MeV 的 α 粒子单个热脉冲的时间响应为: 上升时间约 $1.5-2\mu\text{s}$, 延迟时间约 20 ms, 这时最高无堆垒计数率仅

10^3 . 若对探测器热耦合结构加以改造, 则可做到 10^4 .

量热探测器在历史上重现, 还因为它是一种全吸收型的谱仪探测器, 它用直接的能量-热转换突破了几十年来依靠收集电离电荷工作的传统探测器原理. 在原理上, 量热探测器有可能实现对弱电离, 甚至是非电离粒子如慢单极子及天体中微子的探测. 在西欧原子核研究中心, 量热探测器用于研究电子俘获 β 衰变的放射性能谱以测量中微子质量^[11]. 也有人提出直接把氦注到量热探测器中以全吸收方式测量 β 能谱来研究中微子质量^[12]. 量热探测器可以做成任意几何形状甚至于环形, 图 5 就是用于离子束分析的低温环形量热探测器; 也可以做成薄形的能量损失 $(\frac{dE}{dx})$ 探测器, 对轻的重离子能量损失分辨率可小于 1 keV, 性能远较半导体探测器好.

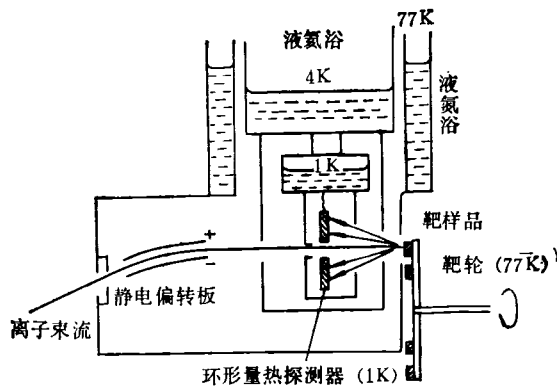


图 5 用于离子束分析的环状量热探测器

总之, 复合低温量热探测器将以全吸收高分辨谱学特性在核物理、原子物理, 固体物理与天体物理几方面得到广泛的应用. 在如中微子静止质量研究的前沿课题中, 人们期待用它独特的优点解决长期来棘手的问题——高分辨本领与高亮度. 毫无疑问, 随着低温技术的日臻完善, 量热探测器将成为一种有独特性能的粒子探测手段.

(下转第 667 页)