



物理学专业基础实验——闪烁体荧光衰减长度测量

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2024 年 5 月 14 日

摘要：塑料闪烁计数器结构简单，时间性能好。一般多用于其它探测器的触发器或飞行时间谱仪的时间基点。因此它已广泛地应用于粒子物理和高能重离子核物理的实验。本实验通过测量塑料闪烁体的荧光衰减长度，进一步理解闪烁计数器的工作方式和特性。

关键词：闪烁体，粒子物理，衰减长度

1 实验目的

1. 了解塑料闪烁计数器的一般结构、性能和应用。
2. 初步了解一种测量长塑料闪烁体技术衰减长度的方法。

2 实验原理 [1]

2.1 工作原理

塑料闪烁计数器结构简单，时间性能好。一般多用于其它探测器的触发器或飞行时间谱仪的时间基点。因此它已广泛地应用于粒子物理和高能重离子核物理的实验，是原子核和粒子物理实验常用的探测器之一。

塑料闪烁体是在苯乙烯溶液中加入对联三苯（第一溶质）和 POPOP（第二溶质）聚合而成。当带电粒子射入塑料闪烁体时，先使苯乙烯分子激发，在猝灭前把激发能转给第一溶质对联三苯分子，其发光衰减时间约为 10^{-9} s。当第一溶质激发态的分子退激时发出的光几乎全部被第二溶质所吸收，后者以同样量级（约 10^{-9} s）的发光衰减时间退激，然而发出光的波长是比前者长的可见光或紫光（350 – 480nm），能与光电倍增管的光阴极光谱响应配合得更好。

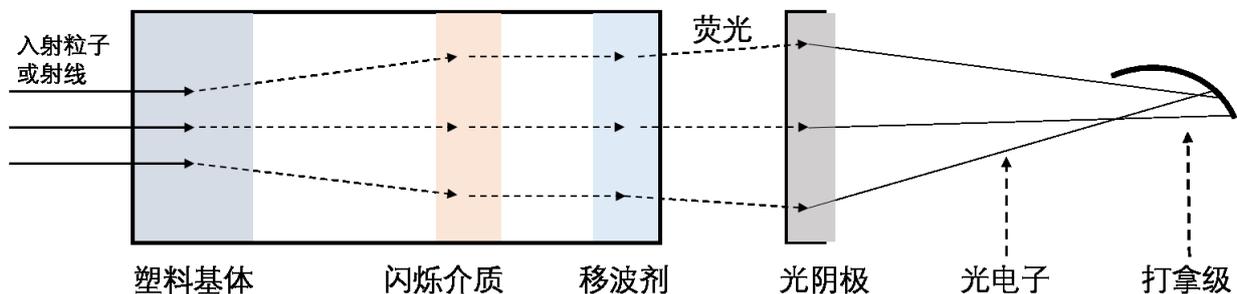


图 1: 塑料闪烁体的一般结构和测量原理

塑料闪烁体的光传输性能不仅依赖闪烁体本身的性质和几何结构，而且与闪烁体表面的抛光程度，包复物的反光情况等都有很大关系。因此塑料闪烁体的技术衰减长度为 50cm – 100cm。



2.2 衰减长度

在塑料闪烁体中，产生的光到达收集光的光电倍增管要经过多次散射。光通过闪烁体和光导的透射率随通过的距离按指数规律衰减。即光强度

$$I = I_0 e^{-\mu x} \Leftrightarrow \ln I = -\mu x + \ln I_0 \quad (1)$$

其中 I_0 为射线在闪烁体中产生的光强度， I 为光在闪烁体中传输了长为 $x(\text{cm})$ 距离的光强度， μ 是光在闪烁体和光导中的吸收系数。通常我们是以吸收系数的倒数 $1/\mu$ 定义为闪烁体的技术衰减长度 (cm^{-1})，也就是当光强度衰减到原强度的 $1/e$ 时的闪烁体长度为技术衰减长度。应该指出，这里所谓技术衰减长度 $1/\mu$ 是对在闪烁体中的各种波长光的有效技术衰减长度，因为实验中我们没有用任何的波长过滤器。这些经塑料闪烁体和光导衰减后的光被光电倍增管的光阴极所收集并转换成光电子，后者经电子倍增后到达阳极，使阳极负载电阻上有个电压脉冲 V 输出。如果从收集光到产生一个输出幅度 V 的电压脉冲的各种过程都是线性的，也就是说输出电压脉冲幅度 V 正比于光阴极所收集到的光子强度 I 即 $V = kI$ 。其中 k 为常数。因此：

$$V = V_0 e^{-\mu x} \Leftrightarrow \ln V = -\mu x + \ln V_0 \quad (2)$$

也就是说，输出电压脉冲幅度随放射源到光阴极的距离 $x(\text{cm})$ 按指数规律变化。

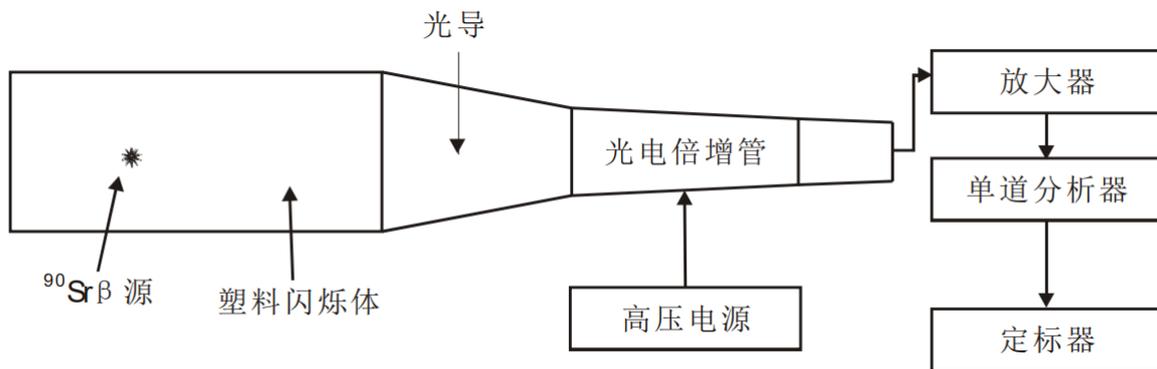


图 2: 长塑料闪烁体技术衰减长度测量装置

有效技术衰减长度的测量方法很多。我们的测量装置方框图为上面的图所示。根据 (2) 式，具体测量方法是采用 $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Yb}$ 的 β 放射源与闪烁体表面保持固定距离，平行于闪烁体移动源，改变源与闪烁体一端（近光阴极一端）的距离 x ，对应不同 x 值相应的测出积分计数为一定值（如减去本底后的纯计数为 5000 个脉冲）的单道分析器的甄别阈值 V ，以 $x(\text{cm})$ 为横坐标，甄别阈值 V 为纵坐标在半对数坐标纸上即可得到光传输性能曲线，直线部分斜率的倒数即为有效技术衰减长度。

3 实验内容

1. 认识塑料闪烁计数器的结构，用示波器观察输出脉冲前沿并与其他探测器作比较。
2. 测量长塑料闪烁体的技术衰减长度。

4 实验装置

单道闪烁能谱仪一套；长塑料闪烁体一块（带探头）； $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Yb}$ 放射源一个；示波器一台。



5 实验步骤

1. 探头检查用黑布将整个闪烁计数器包住，联结仪器，接通电源，经检查无误后方可打开高压电源开关预热 1—2 分钟，打开高压开关（注意此时高压不能调得太高，为什么？），开定标器，逐步掀开黑布，观察本底计数有无明显增加。若无明显增加，说明闪烁计数器光密封性能好。否则，应立即关闭高压，找出漏光部分，用黑胶带重新密封，重新检查漏光，直到整个黑布去掉后本底计数没有明显增加为止。
2. 用脉冲示波器观察并测量光电倍增管输出电压脉冲的前沿。
3. 测量有效技术衰减长度，要求各点的积分计数相对统计误差小于 1.5%，测出不同 x 值所对应的甄别阈值 (V)。

6 实验数据处理

实验过程中，按照要求取距离 x 在 20cm 到 110cm，对每处电压测量取 3 次放射计数和 2 次本底计数。然后用放射计数减去本底计数，控制在 10000 ± 400 。然后对电压测量值和距离作指数拟合。下表记录了原始数据：

表 1: 闪烁体荧光衰减长度原始数据

| $x(\text{cm})$ | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V(\text{V})$ | 4.00 | 3.84 | 3.68 | 3.50 | 3.15 | 2.90 | 2.40 | 2.00 | 1.80 | 1.76 |
| N_{tot1} | 11534 | 11567 | 11051 | 11132 | 11126 | 11545 | 11971 | 12337 | 13150 | 12980 |
| N_{tot2} | 11328 | 11391 | 11263 | 11090 | 11116 | 11369 | 11961 | 12685 | 13093 | 12985 |
| N_{tot3} | 11632 | 11334 | 11529 | 11106 | 11195 | 11395 | 12071 | 12639 | 13068 | 12920 |
| N_{base1} | 1191 | 1261 | 1288 | 1370 | 14433 | 1607 | 1968 | 2265 | 2651 | 2731 |
| N_{base2} | 1172 | 1310 | 1371 | 1306 | 1535 | 1673 | 1981 | 2297 | 2714 | 2711 |

其中放射计数和本底计数之间的差距要求，已经在实验过程中得到控制，记录的数据是符合要求的。于是我们可以对 $\ln V - x$ 图像作线性拟合：

这个拟合给出的解析式为：

$$\ln V = 1.6901 - 0.0103x$$

从而可以读出衰减距离为 $d = 1/0.0103 \approx 97.08\text{cm}$ ，在一般闪烁体范围之内。拟合的相关系数 $r^2 = 0.9534$ ，从图像上看拟合效果一般。

误差原因分析

本实验中我们所使用的放射源是 ^{90}Sr 放射源，该放射源强度较弱，这使得实验容易受到的本底干扰较大。

另外，实验中发现，旁边的仪器开启、人通过仪器侧边时都会对同一条件的实验结果产生可见的影响；另外放置/移除放射源时，放射强度改变需要弛豫时间，这也可能对实验测量产生影响，并且对相对较弱的放射源影响较大，这也是数据偏离直线的可能原因。

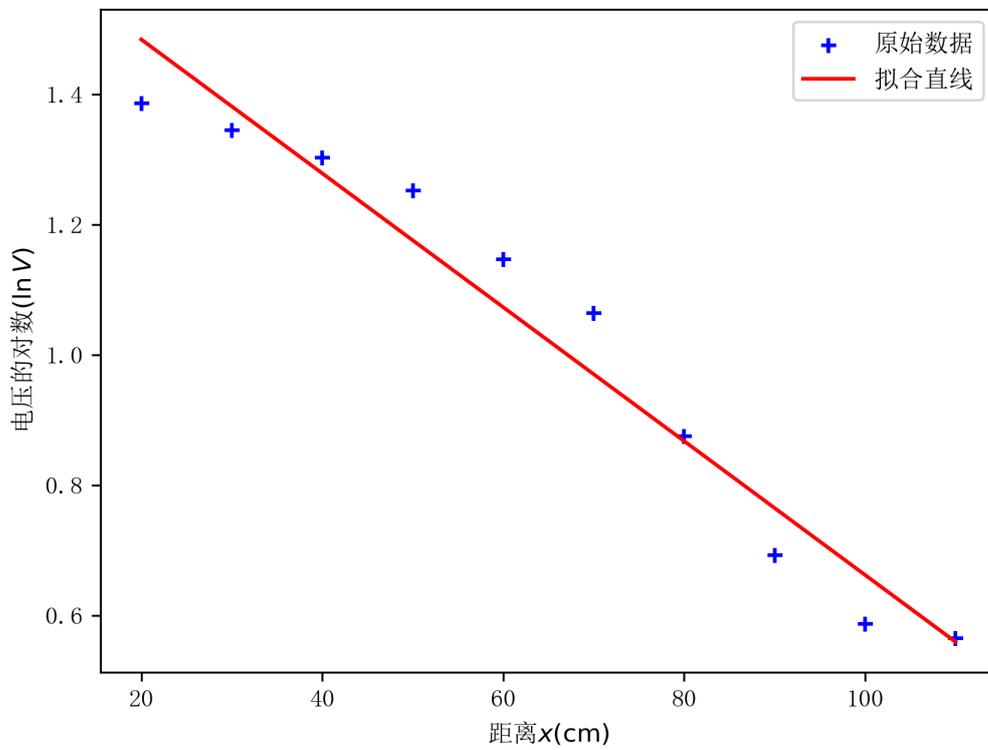


图 3: $\ln V - x$ 图像



7 思考题

7.1 改善闪烁体衰减长度方法

1. 选用真空环境：将闪烁体放置在真空环境中可以减少光在介质中的散射和吸收，从而改善衰减长度。
2. 改善介质和实验条件：选择合适的闪烁体材料和介质，以减小光的散射和吸收。通过查表，可以给出不同类型闪烁体（如有机闪烁体、塑料闪烁体、气体闪烁体等）适应的工作环境（温度、湿度、辐照条件等）。适当调节相关参数可以改善衰减长度。
3. 波长位移剂：在闪烁体中加入“波长位移剂”，它可以吸收闪烁光并再发射波长较长的光。这样，发射光谱将更远离吸收光谱，使得闪烁光在闪烁体中的传输效率更高。

7.2 光导对衰减长度的影响

实验中，通常选取折射率和光阴极窗接近的光导，这样可以使大部分的光可以射到阴极上，避免反射损失。收集到的光子变多，一定程度上可以增大技术衰减长度。

7.3 β 和 α 放射源对测量结果影响

β 粒子相对穿透性更强一些，其在闪烁体中沉积能量损失较小，因此在闪烁体中的电离和激发相对较少。这可能导致较短的技术衰减长度；而 α 粒子穿透性很弱，电离能力强，在闪烁体中的能量沉积较大，会引起更多的电离和激发，从而产生更多的闪烁光，这可能导致较长的技术衰减长度。

当然以上讨论还需要考虑闪烁体类型。如果换用不同类型的闪烁体，在测量结果上的差异在定量上可能有大小之别，但定性上的结论大体相同。

7.4 比较输出电压脉冲前沿大小

G-M 计数管产生的电压脉冲幅度与正离子鞘的总电荷成正比，其测量灵敏度很高，输出电压的前沿脉冲也较大；而 NaI(Tl) 闪烁计数器相对低一些，但灵敏度也较高，输出脉冲相对也大些；塑料闪烁体计数器输出电压脉冲前沿最小，能量分辨率也很差。

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 闪烁体荧光衰减长度测量实验讲义. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20230330/273459f259c9f7c38465155816446f13.pdf> (visited on 04/12/2024).