

粒子探测实验中的分辨时间问题

复旦大学物理系 文恒

摘要: 粒子物理实验中的一个重要环节是对粒子进行探测, 在这个过程中不可避免地就会牵涉到实验仪器对粒子的响应, 即分辨时间。本文对盖革-米勒计数器和 NaI 单晶 γ 能谱仪两个实验中的分辨时间进行了探讨, 并作出一些具有普适性的结论。

关键词: 分辨时间; 盖革-米勒计数器; NaI 单晶 γ 能谱仪; 双源法

粒子物理是物理学的一个重要分支。实验是粒子物理学的一个重要组成部分, 只有通过实验, 才能研究粒子本身及其与物质相互作用的特性。实验的第一步就是对粒子进行探测, 进行探测的实验系统对粒子的响应会对实验结果产生重要影响, 因此在进行实验时, 有必要对这种响应进行了解, 以确定合适的实验条件, 获得理想的实验结果。

一、理论

以盖革-米勒计数器为例, 它的分辨时间源于入射粒子进入探测器后激发次级电子过程中同时产生的正离子。由于大多数次级电子都产生于阳极附近, 所以阳极附近的正离子就形成一个鞘。考虑到正离子的质量远大于电子, 其运动速度较慢, 因此在一定时间内导致这个正离子鞘和阳极之间的电场变弱, 此时入射粒子激发的次级电子或者无法到达阳极, 或者产生的脉冲幅度太小, 导致探测器不能记录这一粒子, 从而产生漏记。一个粒子入射之后会产生漏记的这段时间即探测器的分辨时间。

这一分辨时间在实验上是可测的。设单位时间内共有 m 个粒子被记录, 探测器的分辨时间为 τ , 则单位时间内总共有 $m\tau$ 的时间会发生漏记。若设单位时间内入射的粒子数为 n , 则在 $m\tau$ 时间内共有 $nm\tau$ 个粒子入射, 它们都会被漏记。显然有

$$nm\tau + m = n \quad (1)$$

采用两个放射源 A 和 B, 记同时放置两个源时测得的计数率为 m_{AB} , 则由上述关系可得

$$n_A = \frac{m_A}{1 - m_A\tau}, n_B = \frac{m_B}{1 - m_B\tau}, n_{AB} = \frac{m_{AB}}{1 - m_{AB}\tau} = n_A + n_B \quad (2)$$

可以通过上式解出 τ , 由于分辨时间一般都很短, 所以忽略 τ^2 项, 得到

$$\tau = \frac{m_A + m_B - m_{AB}}{2m_A m_B} \quad (3)$$

即探测器对粒子响应的分辨时间。测量过程中要求源 A 和源 B 的位置在各次测量中严格不变。同时为了消除由于两个源不对称带来的误差, 测量中需要将源 A 和源 B 的位置交换后再进行一组测量, 交换时 also 需要注意保持源放置的位置严格不变。

注意到双源法测量分辨时间并不依赖于盖革-米勒计数器产生分辨时间的机制。只要探测系统存在分辨时间, 原则上都可以采用双源法对其进行测量。在此基础上, 可以对 NaI 单晶 γ 能谱仪的分辨时间进行测量。

二、结果

利用 ^{204}Tl 放射源测量得到盖革-米勒计数器的分辨时间为负值;

利用 ^{137}Cs 放射源测量得到盖革-米勒计数器的分辨时间 $\tau = 0.3406\text{ms}$, 不确定度 $\Delta\tau = 0.0906\text{ms}$;

利用 ^{137}Cs 放射源测量得到 NaI 单晶 γ 能谱仪的分辨时间为负值。

三、 讨论

实验中出现测得的分辨时间为负值的情况是违背物理常识的，考察分别使用 ^{204}Tl 和 ^{137}Cs 放射源测得的计数率如表 1:

表 1 不同放射源的计数率

测量位置		^{204}Tl 放射源 (测量时间 300s)		^{137}Cs 放射源 (测量时间 10s)	
左	右	计数值	净计数率	计数值	净计数率
源 A	/	879	2.65	1664	166.4
源 A	源 B	2223	7.13	3419	341.9
/	源 B	1294	4.03	2002	200.2
源 B	/	1266	3.94	1897	189.7
源 B	源 A	2209	7.08	3395	339.5
/	源 A	963	2.93	1698	169.8
/	/	85	/	0	/

如果认定使用 ^{137}Cs 放射源测得的分辨时间在数量级上是正确的，即分辨时间 $\tau \sim 10^{-4}\text{s}$ ，则由(3)式可得对于 ^{204}Tl 放射源，有

$$m_A + m_B - m_{AB} = 2m_A m_B \tau \sim 10^{-3}\text{s}^{-1}$$

由于 $m_A + m_B - m_{AB}$ 的物理意义是同时对放射源 A 和 B 进行测量相对分别对它们进行测量所产生的漏记率，所以上式表明，探测器的分辨时间要求这种漏记率达到 10^{-3}s 量级，换言之，即要求在几百秒内，相对分别对放射源进行测量的计数值之和而言，同时测量所产生的计数值只产生了 1 次漏记。考虑到统计涨落，这是几乎做不到的。它的物理实质是分辨时间较短且计数率较低的情况下，探测器几乎不产生漏记，这时是无法通过准确测量漏记值来获得分辨时间的。因此，由于 ^{204}Tl 源的强度较低，所以测得的分辨时间为负值。^[4]

而对于 ^{137}Cs 源，有

$$m_A + m_B - m_{AB} = 2m_A m_B \tau \sim 10\text{s}^{-1}$$

即每秒产生 10 次漏记，这样一个漏记率相对统计涨落是比较可观的，因此利用 ^{137}Cs 源测得的分辨时间在量级上应该是准确的，但是由于统计涨落造成的相对误差仍然产生影响，实验中的相对误差大约是 2.5%，计数率的误差实际上在 1s^{-1} 量级，所以造成测得分辨时间的不确定度比较大。

对于 NaI 单晶 γ 能谱仪， ^{137}Cs 源测得的分辨时间也是负值，这说明探测器的分辨时间要小于 10^{-4}s ，大概在 $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{s}$ 的量级。与盖革-米勒计数器仅产生漏记的效果不同，由于 γ 能谱仪最终输出的计数值是对应到能量上的，因此这种漏记会对整个能谱产生影响。入射粒子的能量全部转换成光电子，这并不受到分辨时间的影响，然而相邻两个入射粒子所产生的光电子发生交叠之后，探测器只输出一个脉冲，其幅度为两个粒子分别产生的脉冲之和。因此对于能谱最直观的影响就是在能量超出光电峰的区域出现计数

表 2 源的强度产生的影响

源的数量	净计数率	能量高于光电峰区域净计数值
1	900s^{-1}	160
4	3900s^{-1}	2130

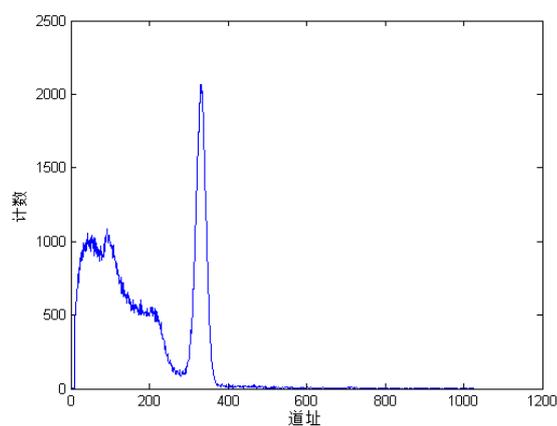
值。在保持测量时间为 200s 不变的前提下，分别对 1 个 ^{137}Cs 源和强度接近的 4 个 ^{137}Cs 源产生的 γ

射线进行测量得到如表 2 的结果。注意到在 4 个源时，能量超出光电峰区域的计数值高出只有 1 个源时一个量级，这说明随着单位时间内入射粒子数的增加，连续两个入射粒子的时间间隔会变小，产生的光电子产生交叠的情况也会随之增多。

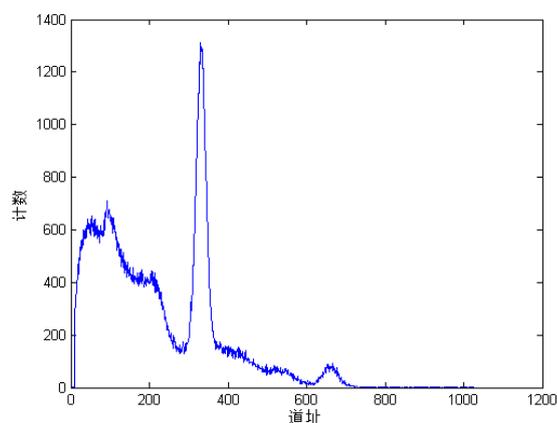
这里有一个概率问题，即相邻两个入射粒子产生的光电子发生交叠的概率是多少。在源比较弱时，这个概率是非常小的，在上面的测量中超出光电峰能量的计数值只占总计数值的不到 0.3%，因此对能谱的影响是比较小的。但是当放射源强到一定程度之后，这种影响就会变得非常可观。例如，设源的强度使 20% 的入射粒子都同下一个入射的粒子产生交叠，则总共产生交叠的粒子数占总粒子数的 40%。利用计算机对其结果进行简单模拟^[2]，能谱图发生如图 1 所示的变化。注意到在图 1(b)中光电峰的右边区域出现了比较可观的计数值，而在光电峰位的两倍处，即 650 道址附近出现了一个峰。这个峰的产生是因为有大量入射粒子产生的光电子都形成了光电峰，这些粒子互相交叠时，探测器记录到的能量即光电峰能量的两倍。

在粒子探测实验中了解分辨时间的重要意义恰在于此。如果不对源的强度加以控制，对于过强的源，就可能产生图 1(b)所示的情况，图像中出现不明来源的峰。而图 1 仅仅是两个入射粒子产生的光电子发生交叠的情况，实际上当两个入射粒子发生交叠的概率增大到一定程度之后，三个甚至更多的入射粒子也会发生交叠，这时图像的复杂性将大大增加，对实验结果和分析造成非常大的负面影响。

因此在粒子探测实验中对分辨时间进行测量是非常必要的。测量的目的并不是要具体知道分辨时间的大小，而是确定如何根据探测系统的分辨时间来控制粒子源的强度。实验上很难控制探测系统的分辨时间，但是控制粒子源强度的方法有很多，包括改变粒子源与探测器的距离、采取屏蔽措施等。测量分辨时间的主要手段可以采用双源法，因为双源法完全是唯象的测量方法，它并不关注分辨时间本身产生的机制，只要探测系统存在分辨时间，原则上就可以使用强度合适的源对其进行测量。但是从实用角度来看，并不一定需要知道分辨时间的确切值，因为从上面的分析可以看出，对于无法准确测出分辨时间的放射源，其本身强度就不足以使探测器产生可观的漏记，因此使用探测器对其进行测量所产生的漏记影响是非常小的。所以一旦使用双源法测得的分辨时间明显不合理，而测量过程和仪器都没有问题，即可安全地使用探测器对源进行测量，测量分辨时间的根本目的已经达到了，更强的源反而可能会带来安全问题。相反，在可以较为准确地测得分辨时间的情况下，需要格外注意对源的



(a)



(b)

图 1 分辨时间对 γ 能谱产生的影响
(a)为实验测得的 γ 能谱，(b)为在(a)的基础上模拟得到的 γ 能谱

强度控制，以免分辨时间对实验结果产生较大负面影响。

四、 结论

在涉及对粒子进行探测的实验中，分辨时间是探测系统的一个重要特性，如果入射粒子的强度超出探测系统的分辨能力，则得到的实验结果可能会产生较大偏差。因此在进行实验前有必要对分辨时间进行测量。如果实验本身对探测时间的确切值并没有要求，则只需要确定入射粒子的强度能够匹配探测系统的分辨时间即可。在测量方式的选择上，双源法具有较强的普适性，而且对于是否匹配这一问题的判断较为直观。

五、 附注

[1] 实际上，放射源的强度过低并不足以造成测得的分辨时间为负，而测得数据的 $m_A + m_B - m_{AB}$ 值即便考虑统计涨落，其绝对值仍然过大，这是由于所使用的放射源是一个圆形面源，其均匀性并不好，实验过程中交换源的位置时，只能尽量做到保持其圆心位置不变，但是角度仍然会发生变化，从而引入新的误差，而导致出现这样的实验结果。另一方面，计数率导致测得的分辨时间产生很大偏差，一种表现是测得的分辨时间为负，另一种表现则是测得的分辨时间远远超出实际值，这种偏差是量级上的。

[2] 模拟的方式是提出图 1(a)中不高于光电峰区域内每个道址计数值的 40%，取整后将其按道址大小升序展开为道址序列（比如第 1 道址的计数值为 1，第 2 道址的计数值为 3，则展开后的序列变成 1,2,2,2,...），为这个序列中的每个数赋上一个随机编号，再将序列按照随机编号的大小升序排序，然后从中间分开成为两组序列，将两组序列并列放置，一一相加得到一组新的序列，再统计新序列中每一个道址出现的次数，按道址加到最开始剩余的 60% 计数值上去，即得到图 1(b)。显然图 1(b)中的总计数值大约是图 1(a)总计数值的 80%。

参考文献

1. 复旦大学近代物理实验补充讲义
2. 杨福家 等.《原子核物理》第二版, 复旦大学出版社, 2006 年.
3. 戴道宣, 戴乐山.《近代物理实验》第二版, 高等教育出版社, 2006 年.