

## 引 言

核物理实验技术的应用范围极为广范，除应用于核物理、原子分子物理研究外，还广泛应用于固体物理、材料科学、化学、生物学、地质、考古、天体物理等科学研究领域。随着对核辐射与物质相互作用规律日益深入的了解，核技术在一系列科学研究领域，如固体性质、表面杂质分析、离子注入、辐射损伤、探伤和测厚、诊断和治疗肿瘤等都得到了日益广范的应用。现代核技术几乎已渗透到国民经济的每个方面，在农业、医学、航天、能源、地矿、化工和电子等领域对人类社会产生了很高的经济效益和社会效益。

核物理实验的主要任务是测量和分析核衰变时辐射的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $X$ 、 $\gamma$ 射线和中子的强度、能量、电荷以及它们的时空特性。各种核辐射粒子是人的感观所不能直接察觉到的微观粒子，因此，必须借助于各种射线探测器。探测核辐射粒子的基本原理是基于它们与物质的相互作用规律。核物理实验中最常用的探测器，根据工作原理的不同可以分成气体探测器(利用核辐射粒子在气体中产生的电离效应)，闪烁探测器(利用核辐射粒子在闪烁体中产生的发光效应)和半导体探测器(利用核辐射粒子在半导体中产生的电子-空穴对)。

在这一部分中，有G-M计数器和核衰变的统计规律、闪烁谱仪测定 $\gamma$ 射线的能谱两个实验，通过这两个实验可了解一些基本的核物理测量方法和核物理实验数据的处理方法。这部分实验还包括核物理中重要的实验方法和分析技术，如符合法测量放射源活度、穆斯堡尔效应和正电子湮灭寿命谱的测定等，通过这些实验可以了解核实验技术在现代科学技术领域中的一些应用。

注意！在核物理实验中要注意辐射安全。射线可以使人体生物分子受到损伤和破坏，因此它对人体是有害的。但在小剂量下，人体能通过自身的新陈代谢过程使损伤修复。在日常生活中，天然本底（地球辐射和宇宙辐射）对人体的辐射量是1毫希沃特/年，而在教学实验过程中，人体受到的辐射量将不多于0.01毫希沃特。尽管如此，在核物理实验中还是要采取必要的防护措施，如射线屏蔽、远离放射源等。

## G-M计数器及核衰变的统计规律

目前已发现的核素(包括自然存在和人工生产的)有二千多种，其中绝大多数是不稳定的，这些不稳定的核素会自发地发射各种射线。如何探测这些射线呢？通过这个实验，你将学习掌握一种简单有效的探测射线的方法：用G-M计数器来探测 $\gamma$ 射线。

在这个实验里，还要研究反映核衰变随机性的一些统计分布规律，为此需要获取大量的数据，要进行繁杂的计算处理，这对你来说可能是枯燥无味的，但若你把思绪沉浸在数据里，相信你是会有收获的。这里仅指出一点，对于统计分布，尤其是正态分布的深入了解，具有普遍意义，因为在各种实验中，一般测量值都服从正态分布。

## 实验原理

### 一、G-M计数器

G-M计数器是核辐射测量中最基本的气体探测器之一,它主要用来测量 $\gamma$ 射线和 $\beta$ 射线的强度,也可用于测量 $\alpha$ 射线和X射线。它具有结构简单,使用方便,造价低廉的特点。G-M计数器通常由G-M计数管、高压电源及定标器等组成,如图2-1-1所示。G-M计数管在射线作用下可以产生电脉冲,高压电源提供计数管的工作电压,而定标器则用来记录计数管输出的脉冲数。

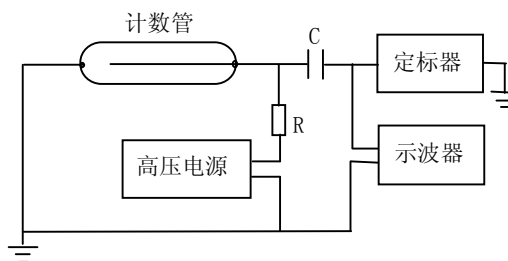
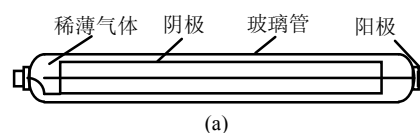


图2-1-1 G-M计数器

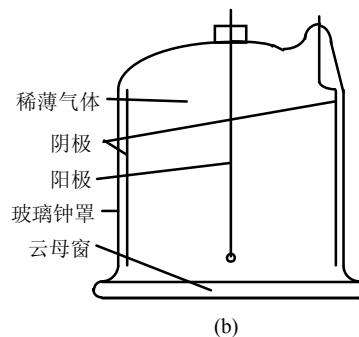
G-M计数管按用途分为 $\gamma$ 计数管, $\beta$ 计数管等。常见的是圆管形 $\gamma$ 计数管(图2-1-2(a))和钟罩形 $\beta$ 计数管(图2-1-2(b))。尽管形状各异,但其阳极均为细金属丝,阴极为外圆筒,管内充有一定的惰性气体(如氩气、氖气)。



(a)

#### 1. 气体的电离和放大

入射带电粒子穿过气体时,与气体分子的轨道电子发生库仑碰撞,使气体分子电离而产生电子—正离子对。其中一些电离电子能量较大,还可以使气体分子进一步电离。前一过程产生的电子—正离子对数称为原电离,后一过程产生的电子—正离子对数称为次电离,两者之和称为总电离。实验证明,在很宽的能量范围内,总电离与入射粒子的能量成正比关系。



(b)

图2-1-2 G-M计数管

气体分子电离后,可能发生以下几种情况:一是电子和正离子从大密度处向小密度处扩散;二是电子被中性分子俘获形成负离子;三是正负离子复合形成中性分子。此外,当有外加电场时,电子(或负离子)与正离子会被电场拉开,沿电场方向漂移。气体探测器主要是利用最后一种情况进行工作,在外加电场作用下收集电荷,形成所需要的电信号。

在气体电离空间加进两个电极,并保持一定的电位差。在恒定强度的辐射照射下收集到的电荷与外加电压的关系如图2-1-3的曲线所示。图中两曲线分别表示 $\alpha$ 粒子和 $\beta$ 粒子的情况。曲线明显地分为五个区段。区域I称为复合区,该区内的电离电流随电压增加而增大,离子复合则逐渐减小。最后复合逐渐消失,曲线趋向饱和。区域II称为电离室区,该区内电场较强,复合可忽略不计,入射粒子产生的离子对几乎全部被收集,因此继续升高电压,电离电流几乎不再增加,形成一个坪区。工作于该区的气体探测器称为电离室。区域III称为正比区,该区内电离电流又开始迅速增加,这是由于电场相当强,次电离倍增,这时收集到的离子对数比原电离产生的要大得多,这种现象称为气体放大。倍增系数称为气体放大系数,它随电压增大而增大,但外加电压固定时气体放大系数是一常数,即电离电流与原电离成正比。工作在此区的气体探测器称为正比计数管。区域IV为有限正比区,当电场强度大到一定程度时,由于放大后的次级离子数足够多,电离电荷所产生的电场抵

消一部分外加电场，即所谓空间电荷效应，这时气体放大系数不是恒定的，而与原电离有关。区域V为G-M区，进入该区后，离子倍增更加猛烈，空间电荷效应越来越强，此时电离电流强度不再与原电离有关，反映在曲线上是 $\alpha$ 和 $\beta$ 两根曲线重合，并且随电压的变化较小。工作在该区的气体探测器是G-M计数管。如果再继续增大电压，则进入连续放电区。

## 2. G-M计数管的工作原理

用G-M计数管作测量时，计数管两电极间加以几百至一千多伏高压，于是在两极间产生一个柱对称电场，愈靠近阳极，电场愈强。当射线进入计数管内，将引起管内气体电离， $\alpha$ 、 $\beta$ 射线直接引起气体电离， $\gamma$ 射线则主要利用与阴极相互作用产生的光电子、康普顿电子等来引起气体电离。由于气体的电离，在管内产生了大量的电子-正离子对，这些电子-正离子对在计数管两极间的电场作用下，分别向正、负两极运动。电子在电场作用下，加速向阳极运动，并在很短的时间内可能得到很大的动能，这些电子又会与气体分子碰撞引起气体分子的电离，产生新的电子-正离子对，使电子增殖。电子的这种链式增殖会很快地相继发展下去，从而使电子在阳极附近的极小区域( $\sim 0.1$ 毫米)内产生爆发性增殖，这称为电子雪崩。在此同时，也有大量的气体分子受到电子碰撞被激发，这些受激发的气体分子退激及离子复合时均会放出大量的光子，这些光子会在计数管阴极和气体分子上打出光电子来，光电子在电场作用下同样会产生新的电子雪崩。依此类推，计数管被一个入射粒子触发后就会不断地产生雪崩过程，很快地( $\sim 10^{-7}$ 秒)导致全管放电。

经过多次雪崩后，在阳极丝周围形成了大量的离子对，由于电子的漂移速度较快(约 $10^4$ 米/秒)，电子很快被阳极收集，而正离子由于质量大，向阴极运动速度慢(漂移速度约10米/秒)而滞留在阳极丝附近，形成了一个圆筒形的空间电荷区，称为正离子鞘。随着正离子鞘的形成和增厚，阳极附近的电场将逐渐减弱，最后导致雪崩过程的停止。此后，正离子鞘在电场作用下向阴极运动。

计数管的两极间具有一定的电容，加上高电压就使两极带有一定量的电荷。随着电子和正离子鞘向两极运动，两极上的电荷量减小，阳极电位降低，于是高压电源通过电阻R向计数管充电，使阳极电位得到恢复，从而在阳极上得到一个负电压脉冲。此脉冲的幅度只决定于正离子鞘的总电荷，而与入射粒子引起的初始离子对数目无关。换言之，在一定的外加电压下，不论射线在计数管内打出多少正负离子对，最后形成的正离子鞘总是一样的。因此，G-M计数管不能区分不同种类，不同能量的粒子，只要射入的粒子引起电离，就可以被记录。

随着正离子鞘在电场作用下向阴极的移动，在输出电路中形成一个脉冲信号。然而整个过程并未到此结束。当正离子鞘向阴极逐渐靠近，阳极附近的电场又逐渐恢复，而正离子到达阴极时，它具有一定的动能，能从阴极打出电子，这种电子经过电场加速又会引起计数管的放电而输出另一个脉冲。如果不采取措施加以制止，上述过程会反复进行，结果是一个入射粒子将产生一连串的脉冲信号，从而使计数管无法再记录第二个入射粒子。

为了使第一次放电后不再引起下一次放电，需要在计数管的工作气体中加入少量能使

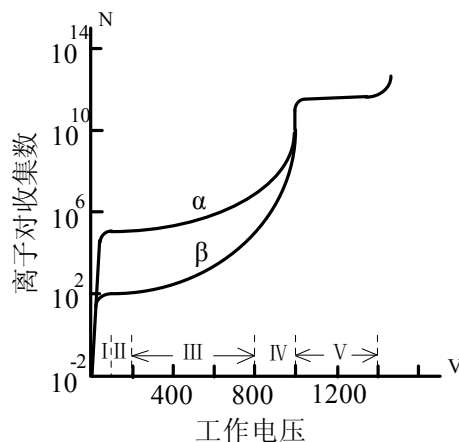


图2-1-3 离子收集曲线

放电猝熄的其它气体,如有机气体乙醇、乙醚(含量约10~20%)和卤素气体氯、溴(含量约0.1~1%)等。猝熄气体的分子具有多原子结构,其电离电位比惰性气体分子低。当第一次放电后形成的正离子鞘向阴极运动时,与猝熄气体分子相碰撞,很容易使后者电离,惰性气体离子吸收其放出的电子而成为中性的分子。于是到达阴极时几乎全是猝熄气体的正离子,它们在阴极上吸收电子后,不再打出电子,所吸收的能量将消耗于其自身离解,成为小分子。于是,第二次放电被猝熄。G-M计数管按其所充猝熄气体的性质,可以分为有机管和卤素管两类。

### 3. G-M计数管的工作特性

G-M计数管的工作特性,一般由坪曲线、分辨时间、探测效率和寿命等因素决定。

#### (1) 坪曲线

在进入G-M计数管的射线粒子数不变的情况下,计数管的计数率 $n$ (单位时间内的计数)与工作电压 $V$ 的关系曲线称为G-M计数管的坪曲线,如图2-1-4所示。坪曲线的主要参数有:起始电压、坪长和坪斜。

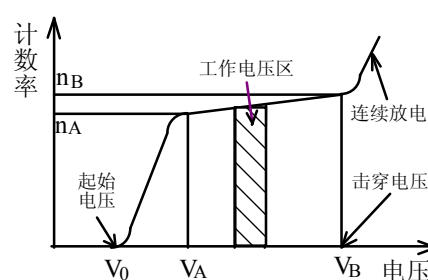


图2-1-4 G-M计数管的坪曲线

当外加电压较小时,计数管并不计数,因为此时阳极附近的场强还不足以引起雪崩过程,放电脉冲很小,不能触发定标器。当电压增加到某一数值 $V_0$ 时,定标器开始计数。 $V_0$ 称为起始电压或阈电压,它的值与管内惰性气体的成分和压力,猝熄气体的含量及阳极丝的直径等有关,一般有机管约为800~1000伏,卤素管约为300~600伏。随着电压的升高,计数率迅速增大,这是因为这时计数管输出的脉冲幅度受离子复合、气体放大倍数和雪崩次数涨落等影响有大有小,只有幅度高的脉冲才能被定标器记录下来,随着电压升高,脉冲幅度也增大,这样就有更多的脉冲被记录,因而记数率随电压升高而增加。从 $V_A$ 开始继续增加电压到 $V_B$ ,在这范围内,入射粒子只要电离一个气体分子,就会引起计数管全管放电,脉冲的出现不再与初始离子对数有关。电压的变化只改变脉冲大小并不增加脉冲个数,所以计数率基本保持不变。曲线的这一段称为坪区,对应的电压差 $V_B - V_A$ 叫坪长,坪越长,计数管的性能越好。计数管的工作电压通常选在距离坪的起端三分之一到二分之一坪长之间的地方,以减少高压漂移对计数的影响。

在坪区,计数率随电压升高略有增加,表现为坪有一定的坡度。为表征坡度的大小,定义坪斜

$$T = \frac{n_B - n_A}{\frac{n_A + n_B}{2} (V_B - V_A)} \times 100\% \quad (2-1-1)$$

坪斜以%/百伏或%/伏为单位。坪斜形成的主要原因是由于计数管灵敏体积随工作电压上升而增大(末端效应)及猝熄不完全造成的假性计数随工作电压上升而增多。有机管的坪斜约小于5%/100伏,卤素管的坪斜约小于10%/100伏。

当工作电压超过 $V_B$ 继续升高时,计数率将急剧上升,这时计数管已进入“连续放电区”。计数管经过一次连续放电,就会使猝熄气体大量分解。使用时,要小心避免发生连续放电。升高电压时,应该特别注意其计数情况,如发现计数率剧增,要立刻降低电压!

## (2)死时间、恢复时间和分辨时间

如前所述,入射粒子进入计数管引起放电后,形成了正离子鞘,使阳极周围的电场削弱,终止了放电。这时,若再有粒子进入就不能引起放电,直到正离子鞘移出强场区,场强恢复到足以维持放电的强度为止。这段时间称为死时间 $t_D$ 。经过死时间后,雪崩区的场强逐渐恢复,但是在正离子完全被收集之前是不能达到正常值的。这期间,粒子进入计数管所产生的脉冲幅度要低于正常幅度,直到正离子全部被收集后才完全恢复,这段时间称为恢复时间 $t_R$ 。死时间和恢复时间的大小可以用示波器观测。如图2-1-5。

在实用上更有意义的是计数系统(从计数管到定标器所有线路的总称)的分辨时间。定标器有一定的触发阈 $V_d$ ,脉冲幅度必须大于 $V_d$ 才能被记录,因此从第一个脉冲开始到第二个脉冲幅度恢复到 $V_d$ 的时间 $\tau$ 内,进入计数管的粒子均无法记录下来, $\tau$ 称为计数系统的分辨时间。显然,分辨时间与定标器甄别阈的选择有关,且 $t_D < \tau < t_D + t_R$ 。对于灵敏度足够高的定标器,有 $\tau \sim t_D$ ,这时可用计数管的死时间近似地作为计数系统的分辨时间。分辨时间还与计数管两极上的电压 $V$ 和负载电阻 $R$ 有关,负载电阻 $R$ 增大则 $\tau$ 增大,电压 $V$ 增大则 $\tau$ 减小。一般情况下,G-M计数管的分辨时间在 $100 \mu s \sim 400 \mu s$ 之间。由于分辨时间较长,故G-M计数管不能进行快速计数。

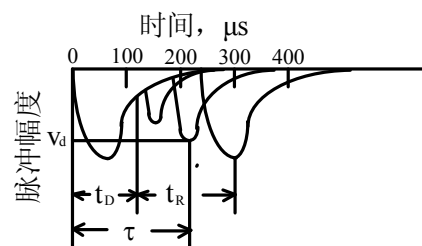


图2-1-5 观察G-M管死时间和恢复时间的示波图

由于存在分辨时间 $\tau$ ,每次计数后的 $\tau$ 时间内进入计数管的射线粒子就会被漏计,从而影响测量的准确性,对此可进行如下修正。若单位时间内共计数 $n$ 次,每次计数后有 $\tau$ 时间漏计,则单位时间内有 $n\tau$ 时间漏计。设没有漏计情况下单位时间内的计数应为 $n_0$ ,则 $n\tau$ 时间内应有计数 $n_0 n \tau$ ,也就是说单位时间内漏计数 $n_0 - n = n_0 n \tau$ ,于是得到计数率修正公式

$$n_0 = \frac{n}{1 - n\tau} \quad (2-1-2)$$

## (3)探测效率

探测效率是指一个射线粒子进入计数管后被计数的几率。对于G-M计数管来说,只要射线粒子在管内产生了电离就能被计数,所以探测效率就是射线粒子引起电离的几率。探测效率与计数管的结构和材料有关,也与射线的种类和能量有关。带电粒子能直接引起电离,所以探测效率高,通常在98%以上。而 $\gamma$ 射线不带电,不能直接产生电离,它要通过与计数管管壁、气体分子碰撞产生光电子、康普顿电子等才能引起电离,所以探测效率较低,通常在1%左右。

## (4)寿命和温度范围

计数管每计数一次,就有部分猝熄气体分子被分解(每次约 $10^{10}$ 个),从而失去猝熄作用,所以G-M计数管有一定的寿命。在正常条件下,有机管约为 $10^8 \sim 10^9$ 次计数。卤素气体分解后有可能重新复合,因此尽管含量少,但计数寿命可达 $10^9 \sim 10^{10}$ 次计数。

G-M计数管必须在一定温度范围内才能正常工作。温度太低时,部分猝熄气体会凝聚,使猝熄作用减弱,坪长缩短直至完全丧失猝熄能力而连续放电。一般有机管的工作温度约

为0~40℃，卤素管约为-10~50℃。

## 二、核衰变统计规律与放射性测量的统计误差

在任何一个核辐射测量中，即使所有的测量条件都是稳定的，如源的放射性活度、源的位置、源与探测器间的距离，探测器的工作电压等都保持不变，若多次记录探测器在相同时间间隔中所测到的粒子数目，我们会发现，每次测到的计数并不完全相同，而是围绕某个平均值上下涨落，这种现象就是放射性核衰变的统计特性，它是微观粒子运动过程中的一种规律性现象，是放射性原子核衰变的随机性引起的。

### 1. 核衰变的统计规律

放射性原子核的衰变过程是相互独立，彼此无关的，每个核什么时候衰变纯属偶然。但实验表明，对大量核而言，其衰变遵从指数规律 $e^{-\lambda t}$ 衰减， $\lambda$ 称为衰变常数，它与放射源的半衰期 $T$ 之间满足关系： $\lambda = \ln 2/T$ 。

对于随机现象最基本的统计规律是二项式分布。设在 $t=0$ 时，放射性核总数为 $N_0$ ，在 $t$ 时间内将有一部分核发生衰变，任何一个核在 $t$ 时间内衰变的概率为 $1-e^{-\lambda t}$ ，不衰变的概率为 $e^{-\lambda t}$ ，则在 $t$ 时间内有 $N$ 个核发生衰变的几率为

$$P(N) = \frac{N_0!}{(N_0 - N)! N!} (1 - e^{-\lambda t})^N (e^{-\lambda t})^{N_0 - N} \quad (2-1-3)$$

实际使用时，二项式分布很不便于计算。由于对放射性原子核来说， $N_0$ 总是一个很大的数目，在这种情况下，二项式分布可以简化为泊松分布或正态分布。

### 2. 泊松分布与正态分布

当 $N_0 \gg 1$ ，且测量时间 $t$ 远小于放射源的半衰期 $T$ ，即 $\lambda t \ll 1$ （例如 $N_0 > 100$ ， $\lambda t < 0.01$ ）时，二项式分布可简化为泊松分布，即

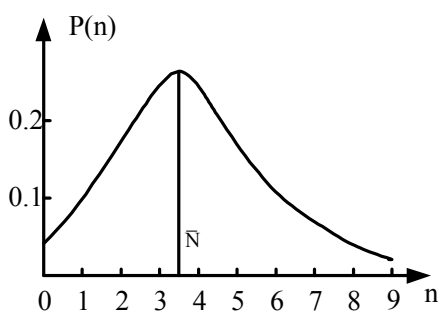


图2-1-6  $\bar{N}=3.5$  的泊松分布

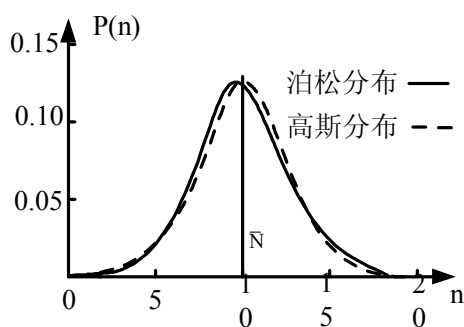


图2-1-7  $\bar{N}=10$  的泊松分布和高斯分布

$$P(N) = \frac{\bar{N}^N \cdot e^{-\bar{N}}}{N!} \quad (2-1-4)$$

泊松分布给出了对满足一定条件的放射性核素进行多次重复测量，其计数的平均值为 $\bar{N}$ 时，计数 $N$ 的测量出现的几率。图2-1-6画出了当 $\bar{N} = 3.5$ 时的泊松分布曲线。

当 $\bar{N} \gg 1$ （例如 $\bar{N} \gg 20$ ）时，泊松分布实际应用很不方便，这时可简化为正态分布（又

称高斯分布)，即

$$P(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{N}}} e^{-\frac{(\bar{N}-N)^2}{2\bar{N}}} \quad (2-1-5)$$

图2-1-7列出了 $\bar{N}=10$ 时泊松分布与正态分布的图形，可见它们已经很相近了。正态分布是二项式分布的一种极限情况，它在核辐射测量中尤为重要，因为在大多数情况下都可采用正态分布来分析计数的统计误差。

### 3. 放射性测量中统计误差的表示

由于放射性衰变存在统计涨落，当我们在相同的条件下对衰变作重复测量时，测得的计数并不相同，而是在某个平均值 $\bar{N}$ 附近形成一个分布曲线，这样的分布曲线当 $\bar{N}$ 的值较小时是泊松分布，当 $\bar{N}$ 的值较大时，泊松分布可以用正态分布来代替。通常把 $\bar{N}$ 看作测量的最可几值，把涨落带来的误差称为统计误差，它的大小用标准误差来描述。

为了得出统计分布平均数 $\bar{N}$ ，严格说必须作无限多次的测量，这事实上是不可能的。实际测量中总是按一定的精度要求进行有限次测量。通常在作核衰变计数测量时，将一次测量值 $N$ 当作平均值，而 $\sqrt{N}$ 称为标准误差，测量结果记为 $N \pm \sqrt{N}$ ，其相对标准误差为

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2-1-6)$$

相对标准误差直接反映出测量的精度，显然核衰变测量的统计误差决定于测量的总计数 $N$ 的大小，计数 $N$ 越大，测量的绝对误差越大而相对误差却越小，测量的精确度就越高。

计数测量的结果，经常要用计数率 $\bar{n}$ （单位时间内计数）来表示，这样测量结果可以写成 $\bar{n} \pm \sqrt{\bar{n}/t}$ ，相对标准误差为 $1/\sqrt{nt}$ 。显然，测量时间越长，总计数越大，测量的精确度越高。

若在完全相同的条件下，重复 $K$ 次测量，每次测量时间 $t$ 相同，则平均计数为

$$\bar{N} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K N_i \quad (2-1-7)$$

标准误差为 $\sqrt{\bar{N}/K}$ ，测量结果可表示为 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}/K}$ ，相对标准误差为 $1/\sqrt{KN}$ 。

用计数率表示，则平均计数率为

$$\bar{n} = \frac{1}{Kt} \sum_{i=1}^K N_i \quad (2-1-8)$$

测量结果表示为 $\bar{n} \pm \sqrt{\bar{n}/Kt}$ ，相对标准误差为 $1/\sqrt{Knt}$ 。

显然，在单次测量中延长测量时间和在多次测量中增加测量次数，都可以提高测量精确度，当总计数相等时，其效果一样。一般在核辐射测量中，根据误差的要求，来确定一次测量所需用的时间或总计数。

### 三、放射性测量中数据分布规律的检验

有时，需要对放射性测量的数据进行分布规律的检验，以确定数据的可靠性，同时可

以帮助检查测量仪器和测量条件是否正常和稳定，从而帮助分析和判断在测量中除统计误差外是否还在其它的系统误差和偶然误差因素。

数据分布规律检验的基本做法是比较测量数据应有的一种理论分布和实测数据分布之间的差异，然后从某个概率意义上说明这种差异是否显著。差异显著，则否定原来的理论分布，从而说明测得的数据中存在问题。反之，则接受理论分布，认为测量数据正常。

### 1. 频率直方图检验法

频率直方图可以形象地表明数据的分布状况。通过将频率直方图与理论分布曲线相比较，可以定性判断测量数据分布是否合理，以及是否存在其它不可忽略的偶然误差因素。

当把实验上测得的一组数据 $N_i (i=1, 2, \dots, k)$ 与正态分布比较时，首先求出其平均值 $\bar{N}$ 和标准误差 $\sigma$ ，

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i \\ \sigma &= \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2}\end{aligned}\quad (2-1-9)$$

然后对测量数据 $N_i$ 按下述区间来分组，各区间的分界点为

$$\bar{N} \pm \frac{1}{4}\sigma, \bar{N} \pm \frac{3}{4}\sigma, \bar{N} \pm \frac{5}{4}\sigma, \dots$$

各区间的中间值为

$$\bar{N}, \bar{N} \pm \frac{1}{2}\sigma, \bar{N} \pm \sigma, \bar{N} \pm \frac{3}{2}\sigma, \dots$$

统计测量结果出现在各区间内的次数 $k_i$ 或频率 $k_i / k$ ，以次数 $k_i$ 或频率 $k_i / k$ 作为纵坐标，以各区间的中间值为横坐标，就可以作出频率直方图。将所得到的频率直方图与以平均值为 $\bar{N}$ 、标准误差为 $\sqrt{\bar{N}}$ 的正态分布曲线相比较，就可对实验数据的分布作出定性判断。

当 $\bar{N}$ 值较小，把实验数据与泊松分布比较时，统计测量值取每一个可能值(正整数)出现的频率，画出频率直方图，然后与平均值为 $\bar{N}$ 的泊松分布比较。

### 2. $\chi^2$ 检验法

利用频率直方图可以对一组实验数据的分布得到一个感性的认识，而 $\chi^2$ 检验法则提供一种较精确的判别准则。

设对某一放射源进行了几次重复测量，并对测量值进行分组，分组序号用 $j$ 表示， $j=1, 2, \dots, h$ 。统计每个分组区间中实际观测到的次数，并用 $f_j$ 表示， $f_j$ 称为实际频数。每个分组区间中按理论分布应得的出现次数为 $nP_j$ ， $nP_j$ 称为理论频数，这里 $P_j$ 是测量值按理论分布落在第 $j$ 个分组区间中的几率，计算 $P_j$ 时往往需要知道理论分布的某些参数(例如 $\bar{N}$ ， $\sigma$ )，它们一般要根据测量值得求。显然，实际频数 $f_j$ 与理论频数 $nP_j$ 之间会有差异，一般说来，若测量值符合所设的理论分布，则这种差异不显著，反之则差异显著。令

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^h \frac{(f_j - nP_j)^2}{nP_j} \quad (2-1-10)$$



在数理统计中可以证明 $\chi^2$ 统计量近似地服从 $\chi^2$ 分布，且其自由度为 $h-r-1$ ，这里 $r$ 是在计算理论频数时所用的参数个数。对于泊松分布有一个参数 $\bar{N}$ ，则 $r=1$ ，对于正态分布有两个参数 $\bar{N}$ ， $\sigma$ ，则 $r=2$ 。统计量 $\chi^2$ 可以用来衡量测量值分布与理论分布之间有无明显的差异。比较方法是先选取一个任意给定的小概率 $\alpha$ ，称为显著性水平，由 $\chi^2$ 分布表查出相应的 $\chi^2_{\alpha}$ 值，比较计算量 $\chi^2$ 和 $\chi^2_{\alpha}$ 的大小来判断拒绝或接受理论分布。若

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha}(h-r-1) \quad (2-1-11)$$

则在显著水平 $\alpha$ 下接受理论分布，若(2-1-11)式中不等号反向，则认为测量值分布不符合理论分布。

使用 $\chi^2$ 检验时，测量值个数 $n$ 要足够大( $n>50$ )和 $nP_j$ 不太小( $nP_j>5$ )。若 $nP_j$ 中有小于5次的，则需将某些分组区间适当地合并。

下面以一个实例说明 $\chi^2$ 检验的应用。

〔例〕在相同时间间隔内测得粒子计数，共测量100次，数据如下：

139, 149, 151, 135, 137, 140, 142, 108, 127, 129, 132, 119, 142, 130, 128, 137, 142, 123, 138, 135, 144, 137, 154, 123, 118, 119, 149, 133, 129, 146, 144, 149, 125, 130, 151, 133, 125, 135, 127, 127, 128, 108, 159, 116, 125, 139, 123, 119, 151, 133, 151, 122, 126, 132, 143, 119, 129, 140, 140, 119, 124, 141, 117, 134, 131, 116, 126, 127, 141, 136, 147, 115, 117, 141, 134, 107, 125, 147, 137, 135, 127, 124, 133, 143, 153, 144, 124, 138, 132, 148, 129, 141, 133, 152, 137, 147, 126, 143, 151, 139

用 $\chi^2$ 检验法确定测量值分布是否服从正态分布，取 $\alpha=0.05$ ，计算结果列成表格。

几点说明：

①数据中最小的为107，最大的为159，为简化计算，将这100个数据等间隔分组。根据经验，当计数值个数多于50时，以分10~25组为宜，并且应使每组至少包含一个数据。为使分组明确，各组的分界值要定在测量值单位的1/2上。本例中数据分成11组，组距为5。

②为便于用标准正态分布表计算 $nP_j$ ，应先作变换 $u=(N-\bar{N})/\sigma$ ，化 $N$ 为标准正态变量 $u$ ，算出各组组限(注意第一组下限为 $-\infty$ ，末组上限是 $+\infty$ )，借助标准正态分布表可算出 $nP_j$ 。

③用极大似然法估计参数 $\bar{N}$ 和 $\sigma^2$ ，即利用组中值 $N_j$ 和实际频数 $f_j$ 计算 $\bar{N}$ 和 $\sigma^2$

$$\bar{N} = \frac{\sum N_j f_j}{\sum f_j} \quad \sigma = \sqrt{\bar{N}}$$

因为 $\chi^2_{0.05}(9-2-1) = 12.59 > 2.98$ ，所以可以认为这组数据符合正态分布。

组限	组中值 $H_j$	$f_j$	$u$ 的组限	$nP_j$	$\frac{(f_j - nP_j)^2}{nP_j}$

105.5~110.5	108	3	$-\infty \sim -2.00$	2.28	
110.5~115.5	113	1	$-2.00 \sim -1.57$	3.54	0.569
115.5~120.5	118	10	$-1.57 \sim -1.14$	6.89	1.40
120.5~125.5	123	11	$-1.14 \sim -0.709$	11.2	0.00357
125.5~130.5	128	16	$-0.709 \sim -0.278$	15.1	0.0536
130.5~135.5	133	15	$-0.278 \sim 0.156$	17.4	0.331
135.5~140.5	138	14	$0.156 \sim 0.588$	15.9	0.227
140.5~145.5	143	13	$0.588 \sim 1.02$	12.4	0.0290
145.5~150.5	148	8	$1.02 \sim 1.45$	8.04	0.000199
150.5~155.5	153	8	$1.45 \sim 1.89$	4.41	
155.5~160.5	158	1	$1.89 \sim +\infty$	2.94	0.370
$\Sigma$		100			2.98

### 实验装置

实验装置方框图见图2-1-1，它包括：G-M计数管、直流高压稳压电源、定标器、示波器和放射源一只。计数管和放射源已置于铅室内。定标器的工作原理和使用方法简介如下。

#### (1) 定标器的工作原理

定标器是核物理实验中的基本仪器之一，其作用是记录在设定时间内的脉冲数，并把测量结果用数字显示出来。它主要由输入电路、计数显示系统、定时系统和控制系统组成（见图2-1-8）。

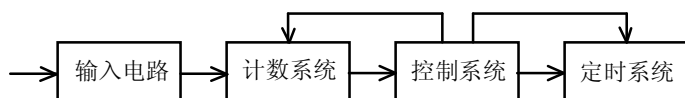


图2-1-8 定标器原理框图

输入电路包括衰减器、射极跟随器、甄别器和倒向成形放大器等，其作用是将进入定标器的脉冲信号波形改造成极性和幅度都满足计数系统要求的脉冲，并将幅度较小的杂乱讯号如噪声等甄别掉，甄别器的甄别阈可由仪器面板上的“甄别阈”电位器调节。计数系统由计数门、十进制计数器、译码显示器组成，它在控制系统的控制下有秩序地完成脉冲的记录和显示任务。定时系统包括时钟信号发生器、定时门和分频电路等，其作用是提供测量时间的定时控制。

控制系统工作状态分自动、半自动、手动三种。在手动状态，操作者按“计数”开关，控制单元发出开门信号同时开启计数门与定时门，计数系统开始记录输入的脉冲数目。当按下“停止”钮时，控制单元发出关门信号，同时关闭计数门和定时门。显示系统将这段时间记录的计数显示出来。在手动状态，计数时间由操作者控制，进行下一次测量之前需按“复位”纽。在半自动状态，操作者预先选定时间，按下“计数”开关后，定时系统有时钟信号进入分频电路，测量时间等于选定时间时，分频电路送出定时信号，控制单元发出关门信号，使计数停止并显示。在此工作状态，准备下次测量需按“复位”纽。在自动

状态，操作与半自动相同，只是分频电路送入控制单元的定时信号除给计数系统关门外，还经延迟后送入复位电路，自动复位并开始下次测量。

#### (2)定标器的使用方法：

①定标器自检：接通电源后，各数码管应亮。将“工作选择”置于“自检”档，并选用“自动”工作状态，按一次计数后，即可用不同的时间间隔来检查各单元的计数。若仪器可自动计数，自动停止，自动复位，并且显示的计数值与说明书上规定的值相一致，则说明仪器工作正常。

②外给脉冲检查：把仪器的信号输入插孔用电缆和外部信号源连接，“工作选择”置于“工作”档，选用“手动”工作状态，按一下“计数”，数码管应有计数。调节“甄别阈”旋钮，当阈电压低于外给脉冲时，仪器应正常计数，高于外给脉冲时，仪器应不计数。

③若定标器正常，则可将其与其它仪器相配进行测量。测量中要选择合适的甄别阈，太低则外界干扰大，会造成虚假计数，太高则会提高探测器的阈电压及工作电压，甚至造成测量误差。此外，还要注意输入极性的选择，G-M计数管和闪烁探头的输出均为负脉冲，所以“输入极性”应选“—”。

### 实验内容及方法提示

#### 1. 测量G-M计数管的坪曲线

先熟悉实验装置，尤其要熟悉定标器的使用方法。测量坪曲线时，要缓慢增加电压，先找到阈电压，然后按一定的电压间隔测量计数，直至坪区终止。注意：当接近坪区尾部时尤其要当心，计数率有显著增大时，应立即降低高压(为什么？)。应根据实验要求的精度，正确选择测量时间。根据测量数据，画出坪曲线，确定阈电压、坪长、坪斜和适宜的工作电压范围。

#### 2. 用示波器观测G-M计数管的死时间，恢复时间和测量系统的分辨时间。

将高压慢慢上升到G-M计数管的起始电压 $V_0$ ，从示波器上读出此时的脉冲幅度，即定标器的甄别阈 $V_d$ 。将高压上升到工作电压，调节示波器，以获得较稳定的图形，从示波器上读出死时间 $t_D$ ，恢复时间 $t_R$ 和测量系统的分辨时间 $\tau$ 。改变工作电压，观察脉冲波形的变化，记录现象并予以分析。

#### 3. 验证正态分布

调整放射源与计数管的位置，使在选定的测量时间内平均计数大于100，重复测量计数200次。用 $\chi^2$ 检验法检验计数值是否符合正态分布。

#### 4. 验证泊松分布

在没有放射源情况下，用本底计数来验证泊松分布。先对本底作较长时间的测量，根据所得本底计数率的大小，选择一个测量时间，使每次测量得到的平均值在3-5之间。固定测量时间，重复测量计数500次以上。用频率直方图和 $\chi^2$ 检验法检验计数值是否符合泊松分布。

#### 5. 观测测量时间、测量次数对计数率标准误差的影响。

### 实验思考题

1. G-M计数管输出脉冲的多少和大小与放射源的种类、能量和强度以及工作电压有何关系？
2. 测定G-M计数管的坪曲线是在固定的定标器甄别电压下进行的。如果提高甄别电压，起始电压和坪曲线将发生什么变化？
3. 验证泊松分布时，为何选取平均计数在3~5之间？如果用放射源来验证泊松分布，则对放射源的半衰期有何要求？

### 参考文献

1. 复旦大学、清华大学、北京大学合编，原子核物理实验方法（上册），原子能出版社(1985)。
2. 浙江大学编，概率论与数理统计，高等教育出版社（1979）。