



科学器材试用教材

仪器仪表部分

第十一分册

核子仪器

中国科学院技术条件及进出口局
中国科学院干部进修学院

共5-6

前 言

中共中央[1981]10号文件指出，科学院要抓好科研工作的基本建设。抓好器材工作，改善实验手段，是科研工作基本性建设的一个重要组成部分。

为建设一支具有高度文化知识和管理技术的科学器材队伍，适应科技现代化的需要，我院委托浙江大学、成都科技大学，西安光机所等单位编写了这套器材干部学习材料。定名为《科学器材试用教材》。全书书分为：仪器仪表、机械电工、材料、电子测量仪器、科学器材供应与管理五部分。其中：

仪器仪表：包括科学仪器与工业自动仪表，十五个分册，由黄邦达同志主编；

机械电工：包括机械设备和电工器材，两个分册，由赵沔、李全铭二同志主编；

材料：包括金属材料和非金属材料，九个分册，由佟锦川、胡仲培二同志主编；

电子测量仪器：由吴景渊、孙焕根二同志主编；

科学器材供应与管理：由陈东还同志主编。

此教材是根据器材工作的特点和我院常用的科学器材编写的。着重介绍科学器材的基本结构、原理、性能、参数、用途、使用维护技术及国内外发展动态。内容力求深入浅出，通俗易懂。

本教材适合具有一定工作经验的在职器材干部学习，也可作为培训具有高中文化程度的年青的器材干部的试用教材，还可供从事科研、生产、教学等部门实验、计划、管理干部学习参考。

在当今科学发展的情况下，科学器材日新月异，更新的速度也随之加速。此教材仅选择当今科学研究常用的仪器、设备和材料，今后将随着科学技术的发展不断地充实提高。

在教材编写过程中，得到了浙江大学，成都科技大学，厦门大学等单位的大力支持，谨致以衷心的感谢。向所有参加教材编写、修改及讨论工作的教师，科研和器材人员表示衷心的感谢。

这套教材是按照科学器材工作的要求和特点组织编写的，由于缺乏经验，不足之处在所难免，希望读者提出宝贵意见。

中国科学院技术条件及进出口局

中国科学院干部进修学院

一九八二年六月廿六日

引言

这一篇包括用来探测核射线的探测器和处理、分析核信号的电子学仪器两部分。它们是用来观察原子世界和核世界的工具。

核射线，或称核粒子，例如电子、质子、中子、 α 粒子、 γ 射线(即光子)，这样一些涉及到原子内部的极小微粒。电子的质量只有 9.1×10^{-28} 克；质子和中子大一些，大约是电子的一千八百倍，但也只有 1.7×10^{-24} 克。这是一些除了用特殊设计的仪器外，根本无法用肉眼观察到的小颗粒。

有史以来，人们就在努力探索着物质结构的奥秘。早在公元前四世纪，古希腊的德谟克里特(Democritus)就猜测，世界万物是由原子组成的。原子一词的希腊文atomos就是不可分割的意思。尔后经过一千多年的物理的和化学的各种科学实验，这个猜想才成为科学的学说。

那么原子又是由什么组成的呢？它们真的不能再分割了吗？科学家们顽强地继续探索着。1895年，伦琴(Röntgen)发现X射线。下一年贝克勒尔(Becquerel)发现了铀的放射性；之后是汤姆生(J. Thomson)发现电子，1898年居里(Curie)夫妇从铀矿中发现放射性元素镭和钋，这一系列发现揭开了近代物理发展的序幕；原子是可以再分割的。由于放射性能使一种元素变为另一种元素，人们立刻把注意力集中到原子的内部。到了本世纪三十年代后，由于加速器的制造和不断向高能方面发展，设计的探测器也越来越灵敏和精确，并且计算机也参与了实验的控制和对实验结果的数据分析，使人们在向原子、原子核更深一个层次的探索中取得了巨大的进展，各种新奇的粒子层出不穷地出现。这不仅使人们认识了一个奇妙的微观新世界，而且核科学研究中的每一项新成就，都直接为其它学科的发展和社会经济的发展带来了巨大的利益。首先，小小的原子核内隐藏着巨大的能量，一克铀 235 全部裂变释放出来的能量相当于2.5吨煤燃烧所放的热；用作能源，十几吨核燃料抵得过几百万吨的优质煤；用作武器，一公斤铀 235 就可以做成具有2万吨炸药威力的原子弹。其次，核科学已经创造了一系列崭新的应用技术手段，例如核磁共振，同位素示踪技术，穆斯堡尔效应，电子辐射，活化分析， γ 照相等，对于物质结构，凝聚态物理，生物学、天体物理、地学、考古、医学、农业等各门学科技术的发展，都是有利的促进。

因此可以说，几十年来，研究核粒子的原子能科学技术和高能物理，一直处在现代物理发展最前沿最活跃的地位上。当然，这门科学的发展和它的应用，有赖于对核粒子本身的一些性质的精确测量，例如粒子的种类、数目、它的动量、能量、寿命、路径等等，这就要靠核探测器和核电子仪器。因为核粒子太小，原子的直径大约是 10^{-8} 厘米，而核粒子比它还要小几百万倍，而且是无色无味，需要特殊的“眼睛”和测量手段。这就是本篇要介绍的核子分析仪器。

目 录

引 言

第一章 射线探测器..... (1)

第一节 带电粒子的探测..... (1)

第二节 γ 射线和X射线的探测..... (2)

第三节 中子的探测..... (5)

第四节 气体探测器..... (6)

1. 气体电离室..... (8)

2. 正比计数管..... (11)

3. GM计数管..... (12)

4. 多丝正比室和多丝漂移室..... (13)

第五节 闪烁探测器..... (17)

第六节 半导体探测器..... (26)

第二章 核子插件仪器 (NIM系统)..... (33)

引 言..... (33)

第一节 NIM标准..... (34)

第二节 前置放大器..... (36)

第三节 主放大器..... (41)

第四节 计数电路..... (44)

第五节 脉冲幅度测量仪器..... (47)

第六节 时间分析仪器..... (51)

第七节 电源..... (56)

第八节 测试和刻度仪器..... (57)

第三章 多道脉冲幅度分析器..... (61)

第一节 多道分析器的工作原理..... (61)

1. 模数变换器..... (62)

2. 存储器..... (65)

第二节 多道分析器的主要功能..... (66)

1. 数据获取功能..... (66)

2. 多道分析器的数据处理..... (68)

3. 多道分析器的数据输出..... (68)

第三节	多道分析器产品介绍.....	(69)
第四章	CAMAC仪器系统.....	(71)
第一节	什么是CAMAC.....	(71)
第二节	机箱和插件.....	(72)
第三节	机箱控制器和机箱通道.....	(73)
第四节	几种机箱控制器.....	(76)
第五节	分支通道和分支驱动器.....	(78)
第五章	测量系统和仪器.....	(81)
第一节	计数测量系统.....	(81)
第二节	能谱测量系统.....	(81)
第三节	时间测量系统.....	(83)
第四节	医用核仪器.....	(84)
第五节	射线监测仪器.....	(86)
附 录	国内外主要的核仪器厂家和公司.....	(91)
编后记		(92)

第一章 射线探测器

根据射线的带电性质，可以把它们分成这样三类：

1. 带电粒子，例如 p 、 α 、 d 、 T 、 π^+ 、 μ 、 e^+ 等；
2. 中性粒子，例如 n 、 ν 、 π^0 、 k^0 等；
3. 电磁辐射，例如 γ 射线， x 射线。

表（1—1）列出了几种射线的性质。

表（1—1）几种常用射线的性质

粒子名称	符 号	电 荷	静 止 质 量	平 均 寿 命
质 子	p	1	1.672×10^{-24} 克	稳 定
中 子	n	0	1.675×10^{-24} 克	918年
电 子	β	-1	9.109×10^{-28} 克	稳 定
氘 核	d	+1	3.342×10^{-24} 克	稳 定
氚 核	t	+1	5.005×10^{-24} 克	17.69年
α 粒 子	α	+2	6.647×10^{-24} 克	稳 定
γ 光 子	γ	0	0	稳 定
X 射 线	X	0	0	稳 定

射线探测的基本原理，就是利用射线穿过物质时，将与物质发生某种作用，例如使气体或半导体中的原子电离，使感光物质感光，使荧光物质发光等，并留下作用的“痕迹”。作用形式不同，就产生了不同类型的探测器。

第一节 带电粒子的探测

带电粒子穿过物质时，将与原子核外的电子发生电磁相互作用，通常称为碰撞。碰撞的结果是粒子损失能量而电子则得到能量。

在碰撞中获得能量的电子可能挣脱原子核的束缚，游离出来成为自由电子，失去电子的原子变为带正电的离子，这就是电离。入射粒子经过千万次甚至上亿次的碰撞后才把能量消耗完毕。同时在它的路径上留下了相当数量的正负电荷对。

如果用适当的方法，以这些电荷为核心形成较大的颗粒，例如在云雾室中形成云雾状的痕迹，在气泡室中形成可见的气泡，就能观察到入射粒子的径迹。这类探测器叫径迹探测器。

如果用电场把这些电荷收集起来，（有时还通过介质放大）并变成电信号，那就是气体探测器和半导体探测器的工作原理。

若原子中的电子在碰撞中获得的能量不够大，不能产生电离，但得到能量的电子跳到了较高的能级上去，这叫原子的受激。受激状态的原子是不稳定的，电子会自然退回到原来的能级上去，在退激过程中放出光子。可以用光电倍增管把它们收集起来，形成电信号，这就是闪烁计数器的工作原理。

射线产生的电离或激发，也可以使某些物质起化学的或其它性质的变化，例如使照相底板上的溴化银颗粒感光，经过显影处理后，显示出粒子的经迹来，这就是原子核乳胶和 x 光胶片探测器的工作原理。

总之，利用射线与物质的各种不同作用方式，可以制造出多种多样的探测器来，现在已经使用的不下几十种，新的探测器还不断地在出现着。我们主要介绍商品化了的几种。

第二节 γ 射线和 x 射线的探测

γ 射线和 x 射线都是一种电磁波，或称光子。它们的区别只是： x 射线是由原子核外的电子，在由高能级向低能级的跃迁中发出的，所以能量较低，一般小于 100keV ；而 γ 射线是伴随原子核内的粒子能级变化产生的，一般能量较高，可达几个 MeV 。由于它们不带电，不能直接使物质电离或激发。但是当它们通过物质时，可产生光电效应，康普顿效应或正负电子对，这三种作用都是在物质中产生了电子，即产生了带电的粒子，于是可用通常的带电粒子探测方法加以测量。

一、光电效应

光电效应又可称为光致电离，是电影，电视等新技术的基础。光子能够把束缚在原子中的电子打出来，成为自由电子，光子本身则消失了。电子的能量等于入射光子的能量减去电子在原子中的束缚能。用公式表示为：

$$E_e = E_\gamma - E_i \quad (1-1)$$

式中， E_γ 是入射光子的能量，

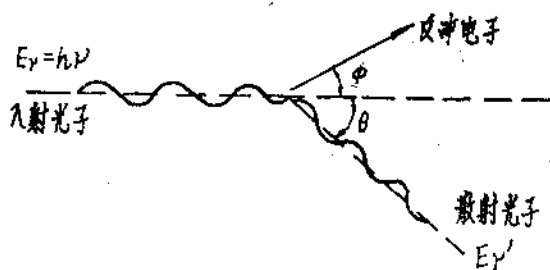
E_i 是电子在第 i 个能级上的结合能。

光电作用的几率同所用介质的原子序数 Z 有关，与 Z^5 成正比。而且主要是在低能区，即 γ 射线能量小于 0.3MeV 的能区中发生。

二、康普顿散射

在康普顿散射中， γ 光子与原子核外的电子发生碰撞，损失掉一部分能量给电子，使它脱离原子散射出去；散射光子的能量和运动方向都发生变化，如同一个台球碰上另一个台球时相互弹开一样。图 (1-2-1) 是康普顿散射的示意图。

图中， E_γ 、 E'_γ 分别表示入射光子和散射光子的能量， θ 是它们之间的夹角， E_e 表示出射电子的能量。



图(1—2—1) 康普顿散射示意图

根据弹性碰撞的动量和能量守恒关系，容易算出出射电子和散射光子的能量是：

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'} = E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1-2)$$

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (1-3)$$

式中， m 是电子的质量， c 是光的速度， $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒

容易看出，当 $\theta = 180^\circ$ ，即对头碰时，散射电子得到的能量最大。

同时，随着入射光子能量的增加，电子获得的能量也增加，当 $E_\gamma \gg mc^2 = 0.51 \text{ Mev}$ 时， E_e 达到了最大值：

$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{2E_\gamma}} = E_\gamma \quad (1-4)$$

三、电子对产生

当 γ 射线能量大于 1.02 Mev 时，它能产生正负电子对。正电子是电子的反粒子，质量同电子一样，电荷量也一样，不过符号相反，结果是，光子消失，它的能量中的 $2mc^2$ （等于 1.02 Mev ）用于产生正负电子对，其余部分变为所产生电子对的动能，记为 E_e^- ， E_e^+ ，即

$$E_\gamma = 2mc^2 + E_e^- + E_e^+ \quad (1-5)$$

产生电子对的几率，在 $E_\gamma < 1.02 \text{ Mev}$ 时为 0，随着 E_γ 增加而线性增加，到高能区，则按指数规律增加，写成公式就是：

$$\text{当 } E_\gamma \gtrsim 1.02 \text{ Mev 时, } \mu_{\text{电子对}} \sim E^2 E_\gamma \quad (1-6)$$

$$E_\gamma \gg 1.02 \text{ Mev 时, } \mu_{\text{电子对}} \sim E^2 \ln E_\gamma \quad (1-7)$$

总之， γ 射线通过这三种方式与物质发生作用，损失能量，本身也消失或被散射到别

的方向上去，因此入射的 γ 束流强度就变小。通常用吸收系数或截面来表示这些过程发生的几率，分别记为 $\mu_{\text{光电}}$ 、 $\mu_{\text{康普顿}}$ 和 $\mu_{\text{电子对}}$ 。 γ 射线强度的衰减规律可写为：

$$\frac{dn}{n} = -\mu dx \quad (1-8)$$

它表示射线通过厚度为 dx 的材料后，损失的粒子数与入射粒子数的关系， μ 称为线性吸收系数。将(1-8)式积分可得：

$$n = n_0 e^{-\mu x} \quad (1-9)$$

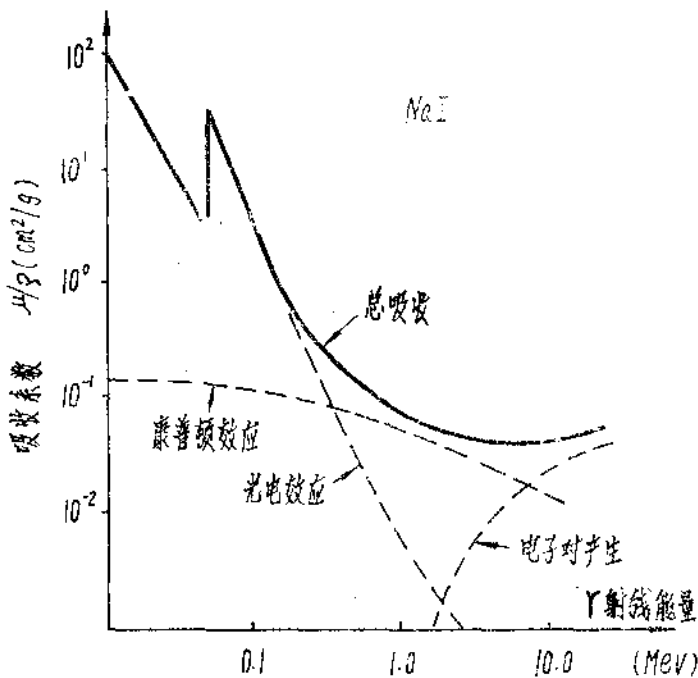
或
$$n = n_0 e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho x)} \quad (1-10)$$

式中 n_0 是初始入射束流的强度， n 是经过厚度为 x 的材料后的强度， ρ 是材料的密度，单位是克/厘米³(g/cm^3)。

(1-10)式是在射线物理中常用的表示束流衰减规律的公式。 μ/ρ 称为质量吸收系数，单位是厘米²/克(cm^2/g)，而 ρx 称为质量厚度，单位是 g/cm^2 ，它同吸收物质的密度和物理状态无关。

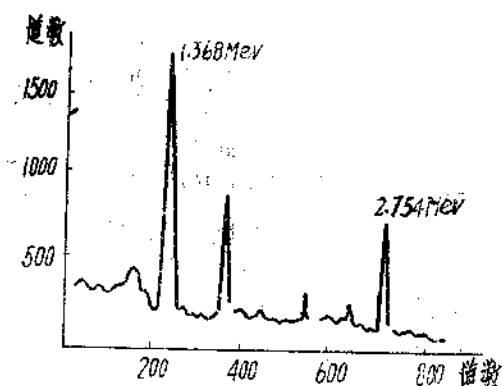
图(1-2-2)(1)表示了在碘化钠中，质量吸收系数随 γ 射线能量变化的关系。总的吸收系数是三种作用的吸收系数的总和。

由图可见，在低能段，光电效应占优势，并随能量增加迅速减小；在中能段则以康普顿效应为主，到能量大于1.02 MeV后，电子对效应显著增加，成为优势。



图(1-2-2) 在碘化钠中吸收与能量的关系

由于这三种作用同时并存, 每种作用都会在 γ 射线的能谱图中形成峰值, 再加上其它一些因素, 因此测得的 γ 能谱是十分复杂的图形。图(1—2—3)⁽¹⁾所示的是用锗锂探测器[Ge(Li)]测得的 ^{24}Na 的两个 γ 射线——它们的能量分别为1.369 Mev和2.754 Mev——的能谱在主峰之外还有几个小峰, 这些峰的意义都可以根据作用过程给出明确的解释。对于一个包含着几种放射性元素的混合物, 通过对它的 γ 能谱的分析, 也可以知道这种混合物的成分, 各自的强度等等。所以 γ 能谱分析是分析放射性元素的十分有用的新技术。



图(1—2—3) ^{24}Na 的 γ 射线能谱图

第三节 中子的探测

习惯上, 人们根据中子的能量范围不同, 将它分为这样几类: 慢中子, (能量小于1 keV) 中能中子, (能量大于1 keV但小于100 keV), 能量大于100 keV的称快中子。

中子也是不带电的, 不能直接由电磁作用产生电离或激发, 但可以利用某些次级过程, 用中子来产生带电粒子, 从而转化成对带电粒子的测量。中子探测器就是在普通形式的探测器中加进一些能与中子发生作用的材料制成的。常用的有这样几种用中子产生带电粒子的方法。

一、核反冲法

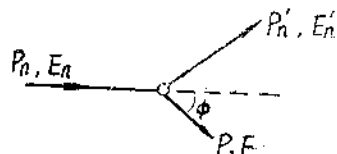
快中子打到原子核上, 与原子核发生弹性碰撞, 测量反冲核的能量和数目, 就可以间接得到中子的能量和通量。

反冲核的能量很容易根据图(1—3—1)计算出来。

其中 P_n , P_n' 表示入射中子和散射中子的动量, 它们的能量记为 E_n 和 E_n'

P 是反冲核的动量, ϕ 是反冲核与入射中子方向间的夹角。

利用能量和动量守恒关系得到:



图(1—3—1) 反冲现象示意图

$$E_n = E_n' + E \quad (1-11)$$

$$P_n'^2 = P_n^2 + P^2 - 2P_n P \cos \varphi \quad (1-12)$$

消去 P_n' (也就是 E_n' , $E_n' = \frac{P_n'^2}{2m}$) 即得到

$$E = E_n \frac{4mM}{(m+M)^2} \cos^2 \varphi \quad (1-13)$$

其中 m 是中子质量, M 是反冲核的质量

当 $M=m$ 时, $E = E_n \cos^2 \varphi$ 此时

若 $\varphi=0$, $E=E_n$, 反冲核的能量最大。

质量接近中子的原子核是氢核 (即质子)。中子与质子碰撞时, 质子得到的能量最大。所以如果在计数管内充上氢气或氘, 反冲质子或 α 粒子就可以在室内引起电离。有机晶体和塑料闪烁体内, 都含有大量氢原子, 可以利用中子碰撞产生的质子使材料发光, 做成中子闪烁计数器。

二、核反应法:

利用中子引起的核反应可以产生质子, α 粒子或裂变碎片, 通过对这些带电粒子的测量来探测中子。用得最多的是下面这个反应:



三氟化硼正比计数管和硼电离室就是例子。管内充有三氟化硼气体, 管内发生的就是上述反应。

也可以用氦 (He) 气, 它利用下述反应



硼和氦对快中子的作用截面小, 所以先要对中子进行慢化, 可以用水、石蜡或塑作慢化剂。

中子可以使某些重元素的原子核发生裂变反应, 产生的裂变碎片是带电的。常被选作裂变反应的材料是 ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, 和 ${}^{233}\text{U}$ 。例如后面要介绍的裂变电离室, 就是在电离室内的一个电极上涂上 ${}^{235}\text{U}$ 做成的。

有些原子俘获中子后, 变成长寿命的 β 或 γ 放射性同位素, 例如由反应 ${}^{115}\text{In} + n \rightarrow {}^{116}\text{In}$, 生成的 ${}^{116}\text{In}$ 是 β 放射性的, 半衰期 54 分钟, 通过对 β 的测量, 可以间接测出中子的通量。

第四节 气体探测器

气体电离室包括电离室、正比计数管、GM 计数管、以及 1968 年后发展起来的作为位置灵敏探测的多丝正比室和多丝漂移室等。

首先介绍应用最广泛的前面三种。

它们基本上都是一个充有气体的金属圆筒，以它为阴极，加上负高压；中间有一根加上正电压的阳极丝。当有射线穿过时，气体原子电离产生正负电荷对。入射粒子产生一对正负电荷所消耗的能量叫气体的电离能，记为 ω 。 ω 同气体种类和粒子种类有关。

几种常用气体的电离能如表（1—2）所示。表中的电离电位 I_0 是指为使电子脱离原子核束缚所需的能量。电离能 ω 比电离电位 I_0 要大些，是由于入射粒子产生一个电荷对所消耗的能量，除用于电离外，还用于气体分子的激发。

表（1—2）常用气体的电离能和电离比位表^{〔2〕}

气 体	电离电位 I_0 (ev)	平均电离能 ω (ev)	
		α (5.3 Mev)	β
氢 H_2	15.4	36.3	36.3
氦 He	24.6	42.7	42.3
氮 N_2	15.5	36.6	35.0
氧 O_2	12.2	32.5	30.9
氖 Ne	21.6	36.8	36.6
氩 Ar	15.8	26.4	26.4
氪 Kr	14.0	24.1	24.2
氙 Xe	12.1	21.9	22.0
二氧化碳 CO_2	13.7	34.5	32.9
甲烷 CH_4	13.1	29.2	27.3
空 气		35.5	34.0

这样，能量为 E 的射线就能产生 $N_0 = E/\omega$ 个电离电荷对。

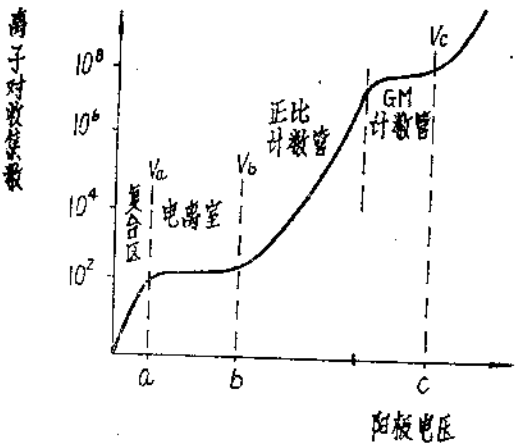
外加电压的作用，是把电离产生的正负电荷分开，并在电极上收集起来。外加电压值不同，电荷的收集方式也不同的，因此气体探测器又分为电离室，正比计数管和GM计数管三类。

图（1—4—1）画出了收集到的电荷数，随外加电压变化的情况，并标出了三种探测器各自的工作电压区。

在0— a 段，电压很低，电离产生的正负电荷，会由于复合而消失。这是复合区，没有使用价值。

电压升高到 a — b 段时，电离产生的 N_0 对电荷全被收集起来，这是电离室的工作区。

电压升高到大于 V_b 之后，电子



图（1—4—1） 离子对收集数与阳极电压

在向阳极漂移的途中,受到电场加速,能量增加,可以把气体原子中的电子打出来,这叫次级电离。次级电离产生的电子又受到加速,再产生次级电离,这样一而二,二而四,……引起雪崩式的电离过程,产生大量的电离电荷对。

最后收集到的电荷数 N 比初级电离产生的 N_0 大很多, $N=MN_0$, M 称气体放大倍数,是 $10\sim 10^4$ 的量级。

虽然经过放大,但因 M 是个常数, N 正比于 N_0 ,所以工作在这个电压区的叫正比计数管。

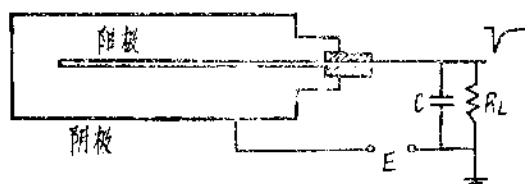
外加电压更高之后,除了上述碰撞电离产生的雪崩过程外,还有光子—光电子产生的雪崩过程。原来在碰撞电离过程中,还有一些气体原子受到激发,在退激过程中放出光子,光子打在阴极上产生光电子,光电子在运动中又受到加速,打出新的电子。由于光子向各个方向发射,所以光电子在阴极上到处产生,即放电过程在整个管内发生。这样最后收集到的电荷数就同原始电离数目完全无关;任何一个粒子入射,都输出一个同样大小的电脉冲。这就是GM计数管的工作原理。

当外加电压超过 V_0 后,进入了连续放电区,不能再用作射线的探测了。

下面具体介绍这些探测器

一、气体电离室

电离室工作在饱和区,外加电压在几十到上百伏的范围。有圆柱型、平板型,球形的几种。一个圆柱型电离室和它的供电方式示于图(1—4—2)



图(1—4—2) 圆柱型电离室示意图

室内一般充氩、氦等惰性气体,有时还掺一点多原子气体,如甲烷、二氧化碳等。

电离室输出信号很小。根据 $N_0=E/\omega$ 式,设 $\omega=35\text{ev}$,能量为 5.3Mev 的 α 粒子可产生 $N_0=5.3\times 10^6/35=1.5\times 10^5$ 个离子对。假定输出端电容 $C=10\text{pf}$,全部电荷收集起来,也只能产生 $V=\frac{Q}{C}=\frac{N_0e}{C}=1.5\times 10^5\times 1.6\times 10^{-19}/10\times 10^{-12}=2.4\text{mv}$ 的信号电压。必须经过高增益,低噪声的放大器放大后,才能记录和分析。因此在能谱测量中,已被性能好得多的半导体探测器所取代。

但电离室结构简单,工作电压较低,有两类电离室还是被广泛应用着。

一种是测量中子通量用的裂变电离室。在它的板极表面上涂一层裂变物质,常用的是 ^{235}U ,也有用 ^{238}U , ^{239}Pu 和 ^{232}Th 的。入射的中子与裂变物质发生核反应,产生两块动能很大的裂变碎片,使室内气体强烈电离,从而产生较大的脉冲信号。表(1—3)(2)列出了国产裂变室的性能。裂变室主要用在反应堆控制方面。

表(1—3)几种裂变室的性能

型 号	机 械 性 能				材		料	电 气 性 能			典 型 工 作						
	长度 mm	外径 mm	灵敏 长度 mm	重量 kg	电极 结构	外壳		电极	中子 灵敏 材料	涂层 厚度 mg/ cm ²	涂层 面积 cm ²	集电极对 地电阻 (Ω)≥	集电极对 地电容 (pf)	工作 电压 V	坪 区 (V)	最大计 算 率 (c/S1)	灵敏度 c/s/n (cm ² s)
LBS—1	1500	85+1	140	3.0	片状	不锈钢	铝	²³⁵ U	1.7	1000	1×10 ⁸	440	500	300—700	1×10 ⁵	0.5	300
LBS—2	670	50+1	380	2.5	片状	不锈钢	铝	²³⁵ U	1.7	1000	1×10 ⁸	350	500	300—700	1×10 ⁵	0.5	120
LBS—3	680	50+1	240	2.1	圆筒	不锈钢	铝	²³⁵ U	1.7	1000	1×10 ⁸	350	500	300—700	1×10 ⁵	0.5	120
LBS—4—1	330	20+1	100	0.13	圆筒	铝	铝	²³⁵ U	0.8	44	1×10 ⁸	30	500	300—700	1×10 ⁵	5×10 ⁻³	75
LBS—4—2	280	20+1	30	0.1	圆筒	铝	铝	²³⁵ U	0.2	15	1×10 ⁸	20	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻³	75
LBS—4—3	280	20+1	30	0.1	圆筒	铝	铝	²³⁵ U	0.02	15	1×10 ⁸	20	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁴	75
LBS—4—4	250	20+1	5	0.09	圆筒	铝	铝	²³⁵ U	0.001	2.2	1×10 ⁸	15	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁶	75
LBS—4—5	330	20+1	100	0.13	圆筒	铝	铝	²³⁸ U	1.5	44	1×10 ⁸	30	500	300—700	1×10 ⁵	5×10 ⁻⁶ (十只)	75
LBS—5—1	1000	6+1	10	0.2	圆筒	不锈钢	镍	²³⁵ U	1	1.6	1×10 ⁸	70	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁴	75
LBS—5—2	1000	6+1	10	0.2	圆筒	不锈钢	镍	²³⁸ U	1	1.6	1×10 ⁸	70	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁷ (十只)	75
LBS—5—3	1000	6+1	10	0.2	圆筒	不锈钢	镍	²³⁹ U	1	1.6	1×10 ⁸	70	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁴	75
LBS—5—4	1000	6+1	10	0.2	圆筒	不锈钢	镍	²³² Th	1	1.6	1×10 ⁸	70	500	300—700	1×10 ⁵	1×10 ⁻⁷	75

注：所有裂变室内充A₁+20%甲烷，充气压为2—3个大气压。

另一种是电流电离室，它不是记录单个粒子产生的电离电荷，而是测量大量入射粒子所产生的平均电离电流。

设 n 为每秒进入电离室的粒子数，每个粒子在室内消耗的能量为 E ，气体的电离能为 ω ，那么粒子所产生的平均电离电流就是

$$I = Ne = n \cdot \frac{E}{\omega} \cdot e \quad (1-16)$$

其数值在 $10^{-8}A$ 到 $10^{-10}A$ 之间，由射线的强度和能量决定。例如假定入射的是 α 粒子，能量为 $5.3MeV$ ，强度为一个微居里（居里是放射性强度的单位，在一秒钟内发生 3.7×10^{10} 次衰变称一居里）即 $n = 3.7 \times 10^4$ 个/秒，则

$$I = 3.7 \times 10^4 \times 5.3 \times 10^6 / 35 \times 1.6 \times 10^{-19} = 8.9 \times 10^{-10} A \quad (1-17)$$

这样微小的电流不能用普通的电流表而只能用特殊设计的静电计。比如西安电子仪器厂生产的 $FJ-356$ 型动电容静电计，测量范围为 $1 \times 10^{-14} \sim 3 \times 10^{-5}$ 安培， $FJ-2700$ 型场效应管静电计，测量范围为 $3 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-7}$ 安培，仪器的灵敏度很高，达 3×10^{-17} 安培。

电流电离室常用来确定粒束或放射源的强度，特别是束流强度很大，其它脉冲式探测器无法测量的场合，如在原子能反应堆中。也广泛应用在剂量仪器中，做成了各种可携带式的剂量仪和剂量笔。例如西安厂生产的 $FJ-2005$ 型环境 γ 辐射监测仪， $EJ-365$ 型 X 射线剂量仪等。

在工业用同位素仪表中，例如测量金属镀层厚度的 β 测厚仪，测量纸张、橡皮，塑料厚度的厚度计中，也大多用它作探头。

表(1-4)⁽²⁾是国产的中子电离室(BZD型)和 γ 电离室(DL型)的参数性能简表。

表(1-4)北京某厂生产的中子电离室(BZD型)和 γ 电离室(DL型)

性能指标		BZD-1	BZD-2	BDZ-3	DL-1	DL-2	DL-3
机械性能	外径(mm)	85	50	50	32	32	32
	长度(mm)	330	650	650	270	320	420
	灵敏长度(mm)	200	370	370	50	100	200
	重量(kg)	2.7	2.5	2.7			
	电极结构	片状	片状	片状	圆筒	圆筒	圆筒
材 料	外 壳	不锈钢	不锈钢	不锈钢	不锈钢	不锈钢	不锈钢
	电 极	不锈钢	不锈钢	不锈钢	镍	镍	镍
	绝缘子	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3
	中子灵敏材料	^{10}B	^{10}B	^{10}B	/	/	/
	涂层厚度(mg/cm^2)	1	1	1	/	/	/
	涂层面积(cm^2)	1600	1600	1600	/	/	/
	充 气	$He + 2\%N_2$	$He + 2\%N_2$	$He + 2\%N_2$	Ar	Ar	Ar
	充气压(atm)	6	6	6	3.2~3.5	3.2~3.5	3.2~3.5

电气性能	集电极对地电阻(Ω)	$>10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^{12}$	$>10^{12}$
	集电极对地电容(pF)	<1250	<1250	<1250	<1250	<1250	<1250
典型工作	最高工作温度($^{\circ}C$)	120	120	120	105	105	105
	工作电压(V)	± 500	± 500	± 500	250	250	250
	坪区(V)	300~800	300~800	300~800	300~800	200~800	200~800
	通量范围:						
	热中子(nV)	$10^3 \sim 10^{10}$	$10^3 \sim 10^{10}$	$10^3 \sim 10^{10}$	/	/	/
	$\gamma(\mu r/s)$	/	/	/	$0 \sim 27 \times 10^6$	$0 \sim 27 \times 10^6$	$0 \sim 27 \times 10^6$
	灵敏度:						
	热中子($A/\mu V$)	$>2 \times 10^{-14}$	$>2 \times 10^{-14}$	$>2 \times 10^{-14}$	/	/	/
	$\gamma(A/r/H)$	/	/	/	5×10^{-14}	1×10^{-13}	2×10^{-13}
	γ 补偿灵敏度($A/r/H$)	$\leq 1.5 \times 10^{-11}$	$\leq 1.5 \times 10^{-12}$	$\leq 1.5 \times 10^{-12}$	/	/	/

二、正比计数管

由于有气体放大作用,正比计数管能输出比电离室的幅度大几千倍的脉冲,同时又保持了与原始电离电荷数目 N_0 成正比的关系,所以既能作粒子计数探测,又能作能谱测量,特别适用于对电离能力弱的 β 射线和X射线的测量。

有各种形状和尺寸的正比计数管:圆柱形或扁平盒形的。可以是密封的或流气式的。若粒子源在室外,正比管上要装入射窗,形状有圆形,长方形甚至狭缝,常用的窗材料是云母和铍。铍窗可以做到 $10 \sim 20 \mu m$ 的厚度,以探测很低能量的X射线。探测 $1Kev$ 以下的射线则用有机膜,例如 $4 \mu m$ 厚的聚脂薄膜。

室内充的气体类型视探测对象决定。对于带电粒子和 γ 射线,常用甲烷(或氩气)和二氧化碳混合气体,或氩气、甲烷和异丁烷的混合气。对于能量较高的X射线,加有氦或氙气可以提高探测效率。

正比计数管的能量分辨率,对 ^{55}Fe 的 $5.9Kev$ X射线,典型值是18%到20%,好的甚至已达14.2%,比 $NaI(Tl)$ 闪烁探测器好三倍。

目前应用最多的商品化产品是 BF_3 (三氟化硼)正比计数器,它是用作中子测量的。室内充有 BF_3 气体,入射中子与 ^{10}B 发生核反应而产生 α 粒子和 7Li ,这些粒子在计数器内引起电离,经气体放大所给出电压脉冲输出。

北京核仪器厂生产的 BF_3 正比计数管的参数性能见表(1—5)(a),表(1—5)(b)是该厂的快中子正比计数管。

表(1—5)(a) BF_3 正比计数管

型 号	外 径 mm	总 长 mm	热中子 灵敏度 CPS/nV	最小坪长 V	最大坪斜 %/100V	最大电容 Pf	耐 γ 辐 射强度 $\mu R/S$	工作温度 $^{\circ}C$
SZJ1	27	236	3	500	1	5	2×10^3	-20~120
SZJ2	27	600	8	500	1	7	1×10^4	-20~120
SZJ4	27	426	7	500	1	5	2×10^3	-20~120
SZJ6	50	350	25	300	1	5	2×10^3	-20~120

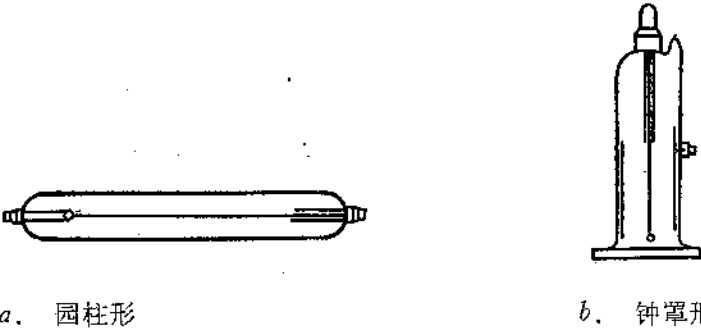
表(1—5)(b)快中子正比计数管

型号	外径 mm	总长 mm	最小快中子 灵敏度 CPM/MPL	最大慢中子 灵敏度 CPS/100MPL	最大 γ 射线 灵敏度 CPS/200MPL	备注:
ZJ401	38	280	40	1	1	MPL—最大允许水平 CPM—每分钟计数 CPS—每秒计数
ZJ402	38	440	80	2	1.5	
ZJ403	38	600	120	3	3	

三、GM计数管

GM计数管内的气体放大倍数很高,只要入射粒子产生一个离子对,就能在室内引起放电并输出很大幅度的脉冲,无需进一步的放大就可以记录下来。显然它不能用作能谱测量。由于它的探测效率高(对带电粒子接近100%)附属电路简单,对高压电源的稳定性要求不高,有各种形状和尺寸的管子以供选择,所以在涉及计数测量的地方用得很广泛。例如同位素强度测量,剂量监测,及厚度仪,料位计等工业用同位素仪表中。

GM计数管有钟罩和园柱形的两种结构如图(1-4-3)所示。中心是细的阳极丝,阴极是管壳内的金属圆筒。由于工作电压很高,室内电场很强,当入射粒子产生的雪崩过程结



图(1—4—3) GM计数管