

物理教学表演

第七册

原子结构和核过程

K. II. 雅科夫列夫著

張季达等譯

高等教育出版社

物 理 教 学 表 演

第 七 册

原子結構和核过程

Л. И. 雅科夫列夫著

張 季 达 等 译

高 等 教 育 出 版 社

本书系根据苏联国立物理数学书籍出版社 (Физматгиз) 1959 年出版的 А. Б. 蒙洛塞也夫斯基 (А. Б. Млодзеевский) 教授主编的“物理教学表演”第九册译出。可供高等学校和中等学校物理教师以及实验室工作人员参考。

原书共分九册, 内容是分子物理与热力学 (第一册)、液体与气体力学 (第二册)、磁学 (第三册)、几何光学 (第四册)、物理光学 (第五册)、电学 (第六册)、振动与波 (第七册)、普通力学 (第八册) 及原子结构和核过程 (第九册)。

译本分七册出版, 除将原书第四、五两册合为第四册, 原第六册改为第五册, 原第七、八两册合为第六册, 原第九册改为第七册外, 其余各册的册次与原书同。

本册由皖南大学物理系张季达等译。

物理教学表演

第七册

[苏] K. И. 雅可夫列夫著

张季达等译

北京市书刊出版业营业许可证出字第 119 号

高等教育出版社出版 (北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13010·1169 开本 890×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 $3\frac{10}{16}$

字数 74,000 印数 0,001—0,100 定价 (5) 0.38

1965 年 2 月第 1 版 1965 年 2 月北京第 1 次印刷

原 序

物理教学表演的最后一册——本册专讲“原子结构和核过程”这一部分。早在本世纪初，A. И. 索科洛夫教授就在苏联国立莫斯科大学物理研究所对放射现象开始了系统的研究，1912年，他创立并装备了放射实验室作为教学和科学研究之用。那时就出版了供该实验室实习生用的指导书（К. П. Яковлев: “放射性专门实验”，莫斯科，1913年）。在四十年代里，Д. В. 斯科贝尔琴在国立莫斯科大学物理系组织了“原子核和放射性”教研室，不久即改为国立莫斯科大学核物理科学研究所。因此，国立莫斯科大学物理系多年来无论在研究放射性现象的实验室工作方面，或者在挑选和装置数目日渐增多的新的教学表演方面，都逐渐积累了丰富的经验。现在，在讲授物理的这一部分的同时，可以作很多各式各样的表演。在本书里只写了一些主要的表演，但也已有几十个。如果核物理是作为普通物理的一部分来讲授，由于学时很少，要作完这些表演是不可能的。必需的教学表演的挑选和表演次序，决定于课程的时数、特点及讲课人作表演的技巧和经验。

所描述的大量的表演按原子物理和核物理的各个问题分配是很不均匀的。“中子和核反应”部分内容特别少。虽然在这一部分的三个表演中描述了好几个不同的实验，但它们差不多都是只演示了中子的性质，因此对核反应的描述是不够的。遗憾的是，物理课有关这一部分的表演的挑选是很困难的，首先因为这些表演是全新的，它们之中的大部分还处于试验阶段，而在教学实践中通过考验的表演是很少的。此外，某些表演需要很贵重的，不容易得到的材料或设备，在另一些情况下，需要放射性很强的放射性制剂，

以致不能在教室里使用它們。由于上述这些原因，这一部分的表演很少，它們主要取自实验室的实验，其中有些是根据可靠的文献写成的。

本书中所叙述的表演，包括了在国立莫斯科大学物理研究室中所做过的以及在讲授普通物理教程时所多次表演过的全部教学表演。同时还包括了一些在教学实践中是新的表演，这些表演描述得較詳細。此外，应注意到表演中所用的仪器和制剂不能現成得到，它們只能由物理研究室制作——在这些情况下，除了描述表演外，还要特別从实验室技术方面作一些具体的說明。

物理数学副博士，一級科学研究员 И. В. 埃斯图林(Эстулин)参加了本书的編写，他写的是：发光計数器和第 2、第 3 及第 32 表演。此外，第七章“中子和核反应”是 И. В. 埃斯图林和我合写的。現在，我利用这一机会，对 И. В. 埃斯图林在編写本书时給我的帮助和他在审閱手稿时提出的一系列宝贵的意見表示感謝。

国立莫斯科大学物理研究室的工作人員、С. И. 伍薩金(Усагин)助教和一級实验員 В. С. 叶戈洛夫(Егоров)积极参加了安装和試驗表演方面的工作，在此我对他們表示衷心的感謝。

К. П. 雅科夫列夫

国立莫斯科大学物理研究室

1958 年 7 月

目 录

原序.....	v
---------	---

I. 緒 論

1. 表演所必需的放射性制剂.....	1
1. 强制剂 2. 弱制剂	
2. 表演式静电計和电离粒子計数器.....	3
1. 静电計 2. 盖革計数管 3. 发光計数器	
4. 計数装置	
3. 静电計和計数器的电源.....	19
1. 札姆邦干电池 2. 原子电池 3. 电子管整流器	
4. 用輻射源工作时的防护措施.....	23
文献介紹	

II. 原子結構

1. 倫琴射綫的散射.....	29
2. γ 量子的康普頓散射.....	30
3. 光电效应和康普頓效应.....	33
4. 沿圓軌道运动时的稳定組态.....	36
5. α 粒子散射的实驗模型.....	40

III. 放射性輻射的一般性质

6. 放射性輻射的发光作用.....	41
7. 放射性輻射的化学作用.....	44
8. 放射性輻射的电离作用.....	45
9. 放射性輻射的热作用.....	46

IV. 天然放射性

10. 天然放射性物质的相对放射性强度.....	48
11. 鉀和銣的放射性.....	50

12. 由鈾分出鈾X	51
13. 鐳D的制取	53
14. 鐳E的制取	54
15. 釷的制取	55
16. 鐳射气(氡)的制取	56
17. 鐳射气(氡)的液化	58
18. 鐳射气(氡)的蜕变	60
19. 鐳的放射性沉淀物的蜕变	63

V. α 、 β 和 γ 射綫的性质

20. α 、 β 和 γ 射綫的区分	66
21. 放射性钟	69
22. 固体对 α 射綫的吸收	70
23. α 粒子在空气中的射程	72
24. 固体对 β 射綫的吸收	74
25. 固体对 γ 射綫的吸收	76
26. β 射綫在电场中的偏轉	77
27. β 射綫在磁场中的偏轉	80

VI. 单个电离粒子的观察方法

28. 閃爍鏡	83
29. 威耳孙云室	84
30. 电离粒子的水計数器	91
31. 使用气体放电計数器记录各种輻射	93
32. 由正比区向盖革区过渡时气体放电式計数管的工作情况	93
33. 宇宙射綫	95

VII. 中子和核反应

34. 中子的获得、记录 and 某些性质	98
35. 核反应(p, α) 和 (n, α)	105
36. 人工放射性	107

I. 緒 論

1. 表演所必需的放射性制剂

要做本书中的表演，在物理研究室中必須有大量的各种不同的放射性制剂。其中一部分可以从苏联国营试剂商店«Союзреактив»购买成品，而另一部分必須在物理研究室中制作。有些制剂制成后可以长期应用，有些則要求經常更新，而在很多情况下，必須在表演前現制。在叙述有关的表演时，給出了在制作放射性制剂时可能有用的一些具体指示。在大多数情况下，所介紹的方法和实验技术都是过去充分研究过，而且經過多年的实际应用被证明是正确的。对于最近研究出的最新的現象，也在书中介紹了一些最容易作的方法。

全部表演所用的放射性制剂假定可以分为强制剂和弱制剂。

今后我們把放射性强度小于 0.1—0.2 毫居里，并且輻射中大部分是軟成分的放射性制剂算作弱制剂。其余的放射性制剂算作强制剂，儲藏和使用强制剂时必須严格遵守特殊的防护規程(參見 23 頁)。使用弱制剂时不要求特別的防护，但保存时則應該把它們放在保險柜中。即使它們的量是不大的，即每个不超过 20—30 克时，也應該如此。如果要做下面的实验表演，物理研究室中最好儲备下列放射性制剂。

1. 强制剂

1) 鐳制剂。把一定量的鐳盐放在小鉛管(或細頸玻璃瓶)中，封焊起来就成为鐳制剂，放射性强度或鐳的含量應該标明。因为 α 粒子和軟 β 射綫为管壁所吸收，这种制剂仅放出 γ 射綫和一些硬 β 射綫。必須备有两个这样的制剂：放射性强度为 5—6 毫居里

的較強的制劑和放射性強度為 0.1—0.2 毫居里的較弱的制劑。後者可用来制取放射性強度約為 0.2—0.1 毫居里和約為 1 微居里的兩種鐳的溶液，這些溶液是製備弱氡源所必需的（參見 56 頁）。這兩種溶液的體積各約為 700 厘米³，裝在容積為 1 升的雙口瓶或厚壁燒瓶中，瓶口用帶有玻璃活塞的橡皮塞塞緊。為了防護起見，將裝溶液的瓶固定在支座上，支座放在塗有搪瓷的金屬容器中，然後一起儲放到保險櫃內。

2) 為了表演“放射性鐘”（參見 69 頁），需要將放射性強度為 25—30 毫居里的很強的鐳制劑封焊在玻璃管中，管壁要相當薄，以使 β 射綫通過它而幾乎不減弱。在管的下端應焊接鉑絲，把驗電器的箔就粘在鉑絲上。這種制劑可能要專門訂購才能弄到。現在，採用人工放射性同位素後，放射性鐘的製作就簡單得多了。這在相應的表演中將有所敘述。

3) 鐳射氣(氡)的制劑。強的氡制劑應利用射氣設備來製作，使用這些設備時要求非常謹慎。因此這種制劑只能從製造它們的專門機構中得到。但是弱的氡制劑可在物理研究室中，或甚至直接在上課時製作。因為鐳射氣的半衰期為 3.825 天，所以，必須在表演前不久製作氡制劑。

應該注意，在陳旧的鐳射氣制劑中，逐漸積累了大量的衰變產物，其中的 RaD、RaE 和 RaF（釷）也可以用來進行表演（參見 53 頁及以後）。

4) 僅僅具有 α 射綫或 β 射綫或 γ 射綫的制劑。這幾種制劑利用天然放射性物質（例如：RaE 和 RaF）或人工放射性物質都可制取。目前，大量製造出來的放射性同位素可以通過蘇聯國營試劑商店得到。要做下述全部表演，有四种放射性同位素就够了：磷 32 (P^{32} , β 射綫源，半衰期 $T=14.07$ 天)，鈷 60 (Co^{60} , γ 射綫源， $T=5.26$ 年)，汞 203 (Hg^{203} , β 和 γ 射綫源， $T=43.5$ 天) 和釷 210

(Po^{210} , α 射綫源, $T=138.3$ 天)。这些制剂的放射性强度一般都将相应表演的叙述中指明;在大多数情况下,强度都是很小的。

5) 中子源可以通过上述机构买到成品。由于中子具有很强的生物效应,应该使用放射性强度尽可能小的中子源,而且不应超过表演中指明的极限值。在使用和保存中子源时都必须无条件严格遵守全部防护規程(参見 23 頁)。

2. 弱制剂 含鈾、釷和錒的矿物和矿石,以及这些元素的化合物(氧化物,盐类)都是弱放射性物质。它們是:

- 1) 鈾的氧化物和它的任何盐类,例如硝酸鈾;金屬鈾也在內。
- 2) 含釷的矿物,例如独居石(含 Th 大約 18%)或釷石(含 Th 大約 45%)。
- 3) 任何种类的錒盐;也可以用放射性錒。
- 4) 两三块含錒量不同的鈾矿石。在下表中我們列出了大量鈾矿物中的几种,除了名称而外,还給出其中含鈾和錒的百分比。

矿 物	U, %	Ra, %
鈾釷矿	63.89	2.10×10^{-5}
钷鈾矿	54.90	1.81×10^{-5}
銅鈾云母	48.66	1.70×10^{-5}
瀝青鈾矿	46.11	1.48×10^{-5}
高岭土	28.70	1.07×10^{-5}
方釷石	18.60	0.66×10^{-5}
鉀钷鈾矿	16.00	0.375×10^{-5}
脂鉛鈾矿	12.20	0.31×10^{-5}
鈾钷矿	8.80	0.295×10^{-5}

为了表演使用,儲备很少的弱放射性物质就够了(每种約 30 克)。

2. 表演式静电計和电离粒子計数器

静电計和带电粒子計数器是表演核物理各种問題的主要仪

器。大多數表演既可用靜電計也可用計數器，但須注意兩種方法的重要差別。用靜電計能夠連續地觀察放射過程，而用計數器則只能發現單個粒子或輻射量子。此外，用投影式靜電計時，即使在很大的教室中也能使所有觀眾都能同樣清楚地看到表演。而計數器（特別是小計數器）的動作通常只有前幾排觀眾看得清楚。因此有時出於這些考慮常用靜電計，即使在有些情況下，用計數器表演較為方便而且也足夠清楚。關於這些問題在表演的描述中均有說明。

現在有很多類型的靜電計和計數器，它們的用途、靈敏度和構造形式等都不相同。因此必須對它們預先作一些說明。

1. 靜電計 一般的表演式靜電計（參考物理教學表演第五冊）靈敏度很小，因此只有在用足夠強的放射性制劑表演時才應用它們。但是有許多表演是用弱放射性制劑進行的，此時須用靈敏度很高的靜電計。實驗室用的儀器，如象限靜電計或弦綫靜電計，只在很少情況下參見 11 頁可在教室中使用，一般不得不使用箔式靜電計，此時應尽可能增加它們的靈敏度。為此可以應用壓得極薄的箔片，同時減少儀器的電容。這種用於教室表演的靈敏的箔式靜電計，以後在有關的表演中將有所描述。

在靈敏的靜電計中，即使應用最可靠的絕緣體，也總要發生明顯的自然漏電（本底漏電），這種漏電是由於兩種主要原因引起的：絕緣體的導電性和周圍空氣的導電性。表演時周圍空氣的導電性可能顯著地增加，特別是在教室中放有無保護箱的強放射性制劑的情況下更是如此。此外，有時還可能在靜電計或電離室（參見 57 頁）中出現放射性污染的痕跡。因為表演時是不考慮自然漏電的，所以必須使它与被觀察的效應比較起來是很小的。因此，在講課前準備、安裝及觀察表演時，必須檢查靜電計的自然漏電，並在表演時注意漏電的大小。

为此可在每次表演之前,使靜電計带电后,在 20—30 秒鐘内,注意它的讀数,只有确信讀数恒定时,方可进行表演。

如果自然漏电大得不正常,那就必須首先尽可能消除放射性制剂对仪器的任何作用。这样做过以后,如果自然漏电仍然大得不正常,那就必須假定仪器中有放射性污染存在,利用带电粒子計数器不难予以确定。只有仔細清洗仪器,才可以清除放射性污染。通常清洗只限于电离室,而这操作仍是費时的,因为必須在仔細地进行机械清洗后,还要用蒸餾水冲洗仪器,然后放在干燥室中烘干。因此應該多准备几套靜電計和附带的电离室,而且定期地檢查它們的自然漏电。

2. 盖革計数管 以前只用来記錄 α 粒子的盖革計数管是一个具有細金屬絲状内电极的圓柱形电容器。这个电容器接在电压約为 1000 伏的伽伐尼电池的电路中,并与灵敏靜電計相連。单个 α 粒子在电容器中产生的电离足以使靜電計的箔片迅速偏轉(顫动)。

这种直接对带电粒子計数的簡單仪器,后来为新的仪器所代替,虽然在新仪器中,对盖革計数管作了某些改变,但其必要組成部分仍然和原来的盖革計数管一样。在近代的計数裝置中,在每一个粒子作用下,在計数管中产生的脉冲,先用电子管放大,然后用下法之一显示出来:用耳朵听揚声器中的彈指声,或使小灯泡发生瞬息閃光,或使机械計数器动作,最后,也可以接到电子射綫示波器上。

計数器本身也有了改进。如果輻射能够在气体中引起电离,或在磷光体中发光,則現代的計数器就不仅可以記錄 α 射綫,而且还可以記錄所有其他的輻射。此外,还詳細地研究了各种类型的計数器和它們工作的各种条件,这使我們能够只記錄其中任何一种輻射,也就是說,或者記錄 α 射綫,或者 β 射綫,或者量子,其原理

主要是根据各种辐射具有相差很大的电离本领和贯穿本领。如果需要詳細介紹計数器的这些性质，可以把它們作为几个特殊的表演題材(表演 31 和 32)。

适宜于記錄所有主要辐射类型的計数管，例如 MC-4, MC-6, AC-1, AC-2, TM-20 等等类型都有現貨出售。个别型号的中子計数管也已制成(參見 103 頁)。

如果用物理研究室的材料作盖革計数管，或檢驗它們的工作情况，那末遵循下面的建議或許是有益的：

1. 在結構方面必須考虑两个基本要求：第一，用来研究易被吸收的辐射(例如 α 射线)的計数管的某一部分应有足够薄的壁(窗)，以使辐射可以射入計数管内部而减弱不多；第二，用来研究电离本领比較弱的辐射(γ 射线)的計数管，应该对电离本领較强的辐射(α 和 β 射线)作可靠的隔离。

2. 可以用不同的单一气体或混合气体充入計数管。利用惰性气体，例如将氦气、氖气、氩气充入計数管可以得到較好的結果；也可以用氮气和氢气以及如氦气、氖气与氢气的混合气体。同时应该注意，对表演用的計数管的要求較低，在这种計数管中利用空气就可以了，但空气必須預先干燥。

在空气中加进少量的酒精蒸汽，对于計数管的工作能够起良好的作用，在利用惰性气体时也常要这样做。計数管中气体的压强可以在大約 7 厘米到 20 厘米汞柱高的較寬的範圍內变动。

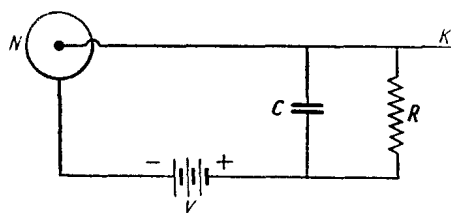


图 1

3. 使用計数管时(对各种辐射皆同)，应把它接入电路，将电源电压 V ，电阻 R 和計数管 N 串联起来(图 1)，而且在絕大多数情况下，正电压应接在計

数管的内电极(絲)上。在电路中与电阻并联的是电容 C ，它是由电路中全部分布电容组成的。 K 点接到第一级串联放大器的电子管栅极上。计数管中产生脉冲后，它的絲极上的电压按指数规律恢复；脉冲的持续时间由 RC 值决定。

4. 计数管的工作电压可以在几百伏到几千伏范围内变化。根据加在计数管上的电压，可将它的工作分为三个区域(参见 98 頁)。

a) 低压区 如果加在计数管上的电压不大(数量级 200—300 伏)，那末在某一电离粒子作用下，计数管中产生的电子将以不足以产生碰撞电离的速度向絲极运动。此时计数管的絲极上电压的变化 ΔV 可用近似公式表示：

$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C} = 1.60 \times 10^{-17} \frac{n}{C}, \quad (1)$$

式中 Δq 是由于计数管中的电离而在絲极上出现的电荷， C 为系统的电容(用微微法拉表示)，包括絲极的电容和第一级串联放大器的电子管的栅极电容， n 为到达絲极的电子数。如果不考虑离子的复合作用和正离子的空间电荷影响，数目 n 可以认为等于在电离粒子作用下形成的电子数。如果 n 的值不大，而且计数管中的全部过程在 10^{-8} 秒左右时间内完成，那么这两个因素的影响实际上不显著。

6) 正比区 增加计数管上的电压，直到开始发生碰撞电离的程度时，计数管中的放电将具有雪崩的特性，此时这个现象的全部特征将表现出来。因此公式(1)变成

$$\Delta V = 1.60 \times 10^{-17} \frac{An}{C}, \quad (2)$$

上式中的量 A 称为气体放大系数， A 值可随电压、计数管的几何形状、气体的种类和充气的程度等因素而在很大范围内变化。但在

一定条件下, A 保持恒定值, 此时計数管产生的脉冲电压 ΔV 与由初級电离形成的离子数 n 成正比。 A 保持恒定的电压区域, 称为正比区。

В) 盖革区 进一步增加計数管上的电压, 就开始观察到 A 与初級电离 n 的大小有关, 当 n 增加时, A 值开始减小。因此出現这样的电压区域, 在这区域中, 絲极上脉冲的大小实际上具有相同的数值, 而与开始电离时产生的离子数 n 无关。这个区域称为盖革区。虽然由一个区域过渡到另一个区域不存在明显的界限, 但仍然必須指出, 同一个計数管可以因加到它上面的电压不同而完全不同地工作着。因此, 只要改变同一个計数管的工作条件, 就可以使它只記錄 α 射綫, 或 β 射綫, 或同时記錄 α 射綫和 β 射綫。盖革計数管的这种性质可以成为特殊的表演題材(參見 93 頁)。

5. 下面介紹两种表演用盖革計数管:

а) 針状电极計数管 图 2 是这种計数管的剖面图。一个黃銅圓柱 G , 它的一端有一个嵌紧的絕緣底盘, 底盘上固定有一根黃銅棒 S , 棒端裝有針状电极 Z , 底盘上还裝有一根帶活塞的抽气用的玻璃管 P 。圓柱 G 的另一端盖有中央帶孔的黃銅墊圈, 孔上粘

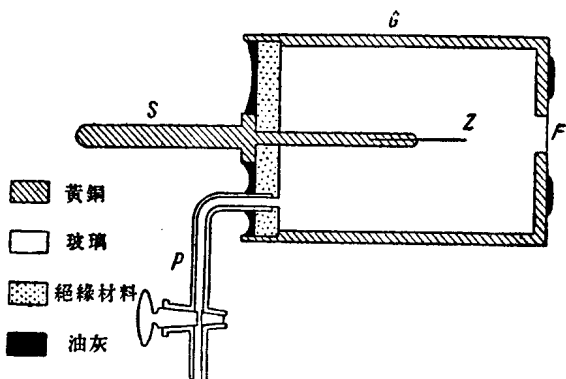


图 2

一很薄的鋁箔 F ；也可以用玻璃或賽璐珞制成的薄膜代替鋁箔。这些薄膜的厚度不应超过 0.01 毫米，以使 α 射綫可以穿入計数管内。可以用胶紙板或电木作絕緣材料(底盘)，建議不要用硬橡胶。所有的金屬接头都应该很好地焊牢。必須特別注意針状电极 Z 。通常針状电极是用直徑为 0.1—0.2 毫米的鉑絲或鉬絲制成，它的一端固定在棒 S 上。这种計数管能記錄所有的进入到电极前面的一个圓錐形区域里的电离粒子。这个区域的大小与計数管上的电压有关。

6) 帶有金屬絲的圓柱型蓋革計数管这种計数管的型式很多，它的用途特別广。圓柱型計数管的型式之一如图 3 所示。圓柱 B

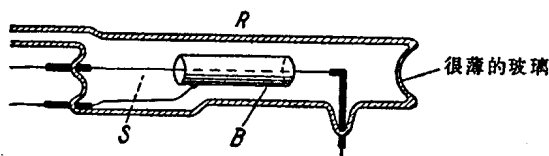


图 3

和絲极 S 固定在薄壁玻璃管 R 里面，管的一端有一个供抽气用的带有活塞的小管。在管的另一端作成凹形或凸形，壁的厚度做成很薄(不超过 0.01 毫米)，它可用简单的玻璃吹制方法作成。制作圓柱 B 的材料可以用紫銅、黃銅或鋁的薄壁管；也可以用这些金屬制的密网卷成圓筒。絲极可用很細的金屬絲来作，通常用鎢絲，也可用鉑絲、铁絲和鎳絲。絲的直徑是决定計数管工作电压的因素之一：为了降低电压必須尽可能减小絲的直徑，因此常常应用直徑为 0.075 毫米以下的金屬絲。計数管抽气时，建議將絲灼热，这样就能很有效地清除在金屬絲上污染表面的吸留气体和灰尘等等。这种带玻璃外壳的圓柱型計数管很适宜于表演。它可以用来进行有关 α 、 β 和 γ 射綫的實驗。應該使 α 射綫和 β 射綫对准玻璃管的薄壁的一端射入計数管， γ 射綫(以及很硬的 β 射綫)則能够

穿过管 R 的側壁进入計数管。

6. 如果計数管小心地准备且細心地操作，則可以研究它的計数特性曲綫，这个曲綫表明：单位時間內計数管記錄的粒子数 n 如何随着加在它上面的电压而变化(参見 93 頁)。为此，必須有标准輻射源，例如鈾的放射性制剂，它應該裝置在离計数管恒定的距离上，对于 α 射綫鈾 210 所应取的距离約为 1.5 厘米。計数管的脉冲可用揚声器和放大器变成声音再用耳朵来听，或在帶有前級放大的电子射綫示波器的屏上来观察，但最好是使用輸出端装有机械計数器的計数裝置。如果在装好仪器和放妥放射性制剂之后，逐漸提高計数管上的电压，那么从某一固定的电压 V_1 开始(图 4)，計数管就会开始出现少量脉冲。这个点 V_1 决定了所謂閾电压。繼續提高电压，就会观察到脉冲数很快地增长，这样持續到某一电压 V_2 为止。此后脉冲数在某一电压区間(V_2 — V_3)保持不变，直到由于自发放电，脉冲又开始迅速增长时为止。 V_2 和 V_3 之間的电压区間叫做計数区間或計数特性曲綫的坪。测量时要尽可能地把計数管上的电压調节到 V_2 和 V_3 的中央；对性能良好的計数管，这个区間可以寬达数百伏。但同时必須指出，也常常有必要在正比区工作。

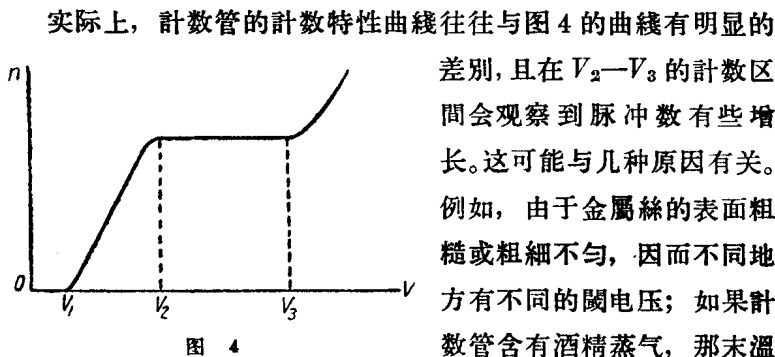


图 4