

Е.А. 馬尔科夫斯基

Б.А. 莫甫昌 合著

В.И. 斯捷青科

放射性同位素 在金属研究中的应用

冶金工业出版社

75
467

放射性同位素在金屬 研究中的应用

Е. А. 馬尔科夫斯基

Б. А. 莫甫昌 合著

В. И. 斯捷青科

高 薩 譯

冶金工业出版社

— 2 —

Е.А. Марковский, В.А. Мовчан
В.И. Степенко

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОНЫ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТАЛЛОВ
Гостехиздат УССР Киев, 1956

放射性同位素在金属研究中的应用

高 謹 譯

— * —

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 093 号

冶金工业出版社印刷厂印 新华书店发行

— * —

1960年1月北京第一版

1960年1月北京第一次印刷

印 数 4,012 册

开本 850×1168 • 1/32 • 58,000字 • 印张 $2\frac{16}{32}$ • 插页 4

— * —

统一书号 15062 • 2030 定价 0.39 元

內 容 提 要

本書簡短地敘述了在研究合金的化学不均勻性、金屬与爐渣的反应过程、測定高爐耐火磚耗損、研究金屬的耐磨性以及測定金屬鍍層的質量和研究元素在金屬中的扩散过程时，应用放射性指示剂——示踪原子——的基本問題。此外也探討了采用了 γ -綫放射性同位素作为放射源进行金屬探伤的問題，以及操作放射性同位素的安全技术和組織工作的問題。

本書供工厂實驗室和科学研究所的广大工程技术工作者閱讀。

目 录

序 言.....	1
放射性元素的性質与获得.....	2
放射性同位素在金属探伤法中的应用.....	15
放射性同位素在冶金中的应用.....	24
放射性同位素在金属表面研究中的应用.....	37
放射性同位素在研究金属扩散过程中的应用.....	53
使用放射性同位素的組織工作和安全技术.....	59

序 言

苏联第一个原子能工业发电站的开始发电証明，我們时代最伟大的科学发现——原子能——已被苏联人民应用于和平建設。

为了发展工业生产和研究自然現象，苏联科学家和工程师們利用稳定的和人工放射性同位素，在許多科学和技术部門进行了大量的研究。

苏联共产党第二十次代表大会关于 1956—1960 年苏联发展国民經济第六个五年計划的指示中指出，在工业、农业和医药卫生，特别是在产品质量檢驗、生产过程的管理和这些过程的自动調节以及診斷和治疗各种疾病的过程中，必須大力发展进一步利用放射性輻射的工作。在科学研究工作中广泛采用示踪原子。大量增加剂量仪、射綫測量仪以及檢驗和控制仪表的生产。

在書中作者试图簡要地叙述有关研究金屬时使用放射性同位素的基本原理。

第一篇由工程师斯捷青科 (В. И. Стеценко) 写成，二、三、五篇由技术科学副博士莫甫昌 (Б. А. Мовчан) 执笔，第四篇由工程师斯捷青科和馬尔科夫斯基 (Е. А. Марковский) 共同撰写，第六篇由馬尔科夫斯基完成。

对于这本小册子有什么意見請寄至基輔市紅軍街11号乌克兰苏維埃社会主义共和国国立技术出版社。

放射性元素的性質与获得

原子构造。环绕我們的一切物質的分子皆由原子組成，原子是基本粒子构成的复杂系統。各种元素的原子結構各不相同，但某些共同特性却为一切原子所固有。每个原子由带正电荷的中心部分——核与带負电荷并聚集在所謂电子壳层上的电子构成。

原子質量的基本部分集中在核上。与原子相比較，核的体积很小。

除氢原子外，所有元素的核都由被特殊核力所保持的質子和中子組成。質子是带正电荷的基本質点，中子不带电荷。質子的質量接近中子的質量。核中質子与中子总数称为質量数，以字母 A 表示之。

核的电荷决定于質子数并与电子的总电荷相抵消，因此在正常状况原子带电中性。

同一元素的原子核具有相同数量的質子(核的原子序数 Z)，即相当于該元素在門捷列夫周期表(見附录)中排列号数的相同的电荷数。但是同一元素原子核的中子数却可能不同。

原子核中子数不同的同一元素的变种称为**同位素**。某同位素核的中子数等于 $A-Z$ 。例如，普通的氢的同位素具有由一个質子构成的核。另外一些熟知的氢的同位素的核中含有：氘—1个中子；氚—2个中子。尽管所有同位素具有化学上的同一性，但是氘几乎两倍而氚几乎三倍于普通氢的重量。

元素的核电荷与質量数以指数表示。例如，普通氢的同位素、氘和氚相应地标记为 H_1^1 、 H_1^2 、 H_1^3 或 ${}_1H^1$ 、 ${}_1H^2$ 、 ${}_1H^3$ ，上部指数代表質量数，下部指数代表核电荷数。常常由于核电荷等于門捷列夫周期表上元素排列的号数，因此核电荷的指数被省略，因为从元素符号即可知道核电荷数。

但也有这样的情况，不同元素的原子具有相同的重量，換言

之原子具有不同的質子数和相等的質量数。这些彼此化学性質不同的元素称为異位素。

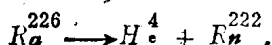
大家也知道，其核具有相等的电荷与質量数的两种不同物質称为同質異能素。

許多元素具有几种稳定性同位素，但某些元素，如鈷在自然状态下只有一种同位素。除稳定性同位素外，所有元素尚有不稳定性同位素，它們的核自发地轉变为其他元素的原子核。这样的同位素称为放射性同位素。

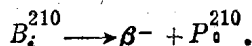
放射性。1896年法国物理学家貝克勒发现了天然放射性現象，就是位于門捷列夫周期表末尾的某些元素显示自发放出射綫的能力，此射綫能影响被黑紙包裹的帶感光乳胶的底板。

研究这些射綫的性質証明，鈾、釷、鐳以及其他重元素的核是不稳定的，它們不断衰变，放出 α -粒子（氦原子核）、 β -粒子（电子）或伴随出現 γ -射綫（波长比伦琴射綫短的电磁波）。能够进行这种轉化的原子称为放射性原子，而在原子中所进行的轉化称为放射性轉化。

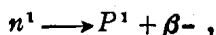
当释放 α -質点时，放射性原子核的正电荷减少2单位，元素在周期系統中的位置也发生改变。鐳变成氡可作为这种轉变的例子：



某些放射性核在衰变时放出 β -粒子。例如，当鈷衰变时其核中减少一个中子而增加一个質子，結果变成鈷：



释放 β -粒子是由于中子轉变为質子：



放出 γ -綫时，原子核只丧失能量，但其組成不变。

单位時間內衰变数与总原子核数成正比：

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

式中 N ——經過時間 t 时的原子数；
 N_0 ——起始瞬間 ($t=0$) 时原子数；
 λ ——衰变常数；
 e ——自然对数的底。

每个放射性元素具有自己的衰变常数值。衰变速度决定于半衰期 T ，即現存原子衰变一半所經過的时间。

衰变常数 λ 与半衰期 T 間存在以下关系：

$$\lambda = \frac{0.693}{T} \quad (2)$$

放射性元素的重要特征是它的放射性。单位時間內衰变原子数称为某元素的放射性 (a)。放射性单位为居里 (1C)，即在一秒內产生 3.7×10^{10} 次衰变的放射性物質的数量。由此单位导出：毫居里 (mC) 和微居里 (μC)，分別等于每秒 3.7×10^7 和 3.7×10^4 次衰变。有时采用“罗瑟福”作为单位，1“罗瑟福”相当于每秒 10^6 次衰变 ($1 mC = 37$ 罗瑟福)。

放射源放射性随时间的减少由下式决定：

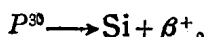
$$a = \lambda \cdot N = \lambda N_0 e^{\frac{-0.693 \cdot t}{T}} \quad (3)$$

采用放射性配制的可能与放射性辐射能有关，采用1电子伏特 (eV) 为放射能单位。电子在通过电位差为1伏特的电场时获得1电子伏特的能量。实际上最常用的为其导出单位：1百万电子伏特 (MeV)，等于 10^6 电子伏特。在实用上很重要的数值为比放射性，即单位重量的放射性物質所具有的放射性 (毫居里/克)。

研究自然放射性导致20世紀最重要发现之一，即人工放射性的发现。1934年約里奥·居里夫妇发表了一篇通报 [6]，通报中指出以 α -粒子照射鋁放出带正电荷的电子，因而称为正电子。停止照射之后，仍繼續释放正电子，但随时间而减弱。研究这种现象使人想起在 α -粒子的作用下发生放射性转变。当 α -粒

子作用于硼和镁时，也发现类似现象。

实验已证明，铝转变为磷可按下式反应进行：



这样就确定可以用人工方法创造放射性元素。但是人工放射性元素的获得效率很低，并只适用于由小能量的 α -粒子引起轻元素的核转变。为了增加粒子的能量，利用各种加速器，例如回旋加速器、电子回旋加速器、同步加速器以及宇宙加速器。借助这些装置也可引起重元素的人工放射性。

采用氢原子核——质子、重氢同位素（氘）原子核——氘核以及 γ -量子或光子来作用于各种元素的原子核。中子和氘核对于获得人工放射性元素具有很大意义。在原子反应堆中铀（ U^{235} ）核的裂变反应为强大的中子源。

此外，在原子反应堆中由于所谓铀衰变的裂片获得位于元素周期系中间部分的大量放射性元素。当反应堆（原子锅炉）工作时所释放的中子，为获得位于周期系开始部分的大量放射性元素提供可能。

当 U^{235} 裂变时得到的重要长半衰期同位素有： Sr^{90} 、 Sr^{90} 、 V^{51} 、 Zr^{95} 、 Nb^{95} 、 Tc^{99} 、 Te^{127} 、 Te^{129} 、 Ce^{141} 、 Ce^{144} 。在铀核反应堆中用中子照射物质而产生的最重要的同位素有： N^{24} 、 P^{32} 、 S^{35} 、 K^{42} 、 Ca^{45} 、 Sc^{46} 、 Cr^{51} 、 Fe^{55} 、 Fe^{59} 、 Co^{60} 、 Ni^{59} 、 Cu^{64} 、 Zn^{65} 、 Se^{75} 、 Sr^{90} 、 Zr^{95} 、 Mo^{99} 、 Ag^{110} 、 Cd^{115} 、 In^{114} 、 Sn^{113} 、 Sn^{123} 、 Sb^{124} 、 Te^{127} 、 Te^{129} 、 Te^{131} 、 Cs^{134} 、 Ce^{141} 、 Ce^{143} 、 W^{185} 、 Bi^{210} [17]。

某种同位素的采用决定于研究方法和研究方向。通常将一定成分的放射性同位素加入被研究的对象中。例如，利用硫—35（ S^{35} ）研究硫在金属中的分布，采用钨—185（ W^{185} ）测定切削工具的耗损。

另外，在选择同位素时必须考虑其半衰期，否则在长期试验

中由于短半衰期同位素射綫的变化而确定修正量是比较复杂的。

同时也应考虑同位素射綫能量和放射粒子的数量，因为操作較硬的射綫要很好地提供安全技术条件才是比较便利的。

选择同位素的一般規則是沒有的，在每一具体場合研究者考虑到所需同位素数量实验性地选择和使用这种或那种同位素。

在研究金屬和金屬的某些物理性質时常常采用的同位素特性列入表 1。

射綫的測量。在数量上測定放射性是根据測定放射性物質的射綫在气体环境中所引起的电离效应。

表 1

同位素	符 号	半衰期	可能的比放射 性 (毫居里/克)	射綫能量 (百万 电子伏特)		密 度 (克/厘米 ³)	熔化温度 (度)
				β	γ		
碳.....	C ¹⁴	5600年	100	0.15	—	1.2—1.9	—
硫.....	S ³⁵	87.1天	—	0.16	—	2.00	100
鈣.....	Ca ⁴⁵	152 天	7	0.25	—	1.46—1.57	850
鎢.....	W ¹⁸⁵	73.2天	10	0.43	—	19.35	3400
磷.....	P ³²	14.3天	70	1.70	—	2.50—2.70	558
鋇.....	Sr ⁸⁹	54.5天	0.2	1.50	—	2.63	770
鉻.....	Cr ⁵¹	26.5天	70	—	0.33	7.10	1800—1900
鋅.....	Zn ⁶⁵	250 天	6.8	0.32	0.12	7.10	419
錳.....	Mn ⁵⁴	310 天	—	—	0.83	7.06—7.42	1250
鈷.....	Co ⁶⁰	5.3 年	800	0.31	1.33	8.65—8.79	1480
鉄.....	Fe ⁵⁹	45.5天	0.15	0.46	1.30	7.80	1535
銀.....	Ag ¹¹⁰	270 天	17	1.30	1.51	10.50	960
銻.....	Sb ¹²⁴	60天	33	3.04	1.70	5.60—5.90	630
銻.....	In ¹¹⁴	48.5天	200	1.98	1.26	7.30	156.4
銻.....	Ce ¹⁴¹	28.0天	90	0.56	0.14	6.70—7.00	777

带电粒子穿过气体时形成由重的正离子和負电子組成的离子对。若被电离的气体处在两个电极之間，并向电极上施加电压，則形成的正离子和电子将向电极运动；正离子聚在阴极，負离子趋向阳极，并且聚集的电荷决定于施加的电压。

測定由这种方式得到的电荷是放射性测量的基本問題。測量射綫的全部裝置可以看做是某些基本儀器的變形。而這些儀器實質上也不是別的，而是由帶電極的空氣室並被稱為電離室的儀器的變形，電離室的模型如圖 1 所示。在通常條件下，電極間的气体是絕緣物，並且電路幾乎沒有電流。電離室中由宇宙射綫引起的部分電流的存在稱為本底。

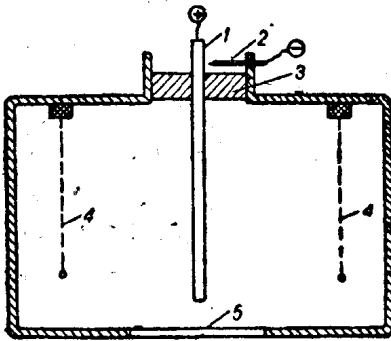


圖 1 電離室示意圖

1—中央電極；2—接地尖端；3—絕緣體；
4—金屬網；5—小窗

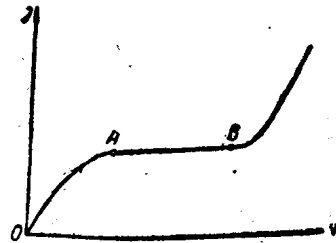


圖 2 電離室伏特-安培曲綫
(計數管特性曲綫)

當離子在射綫作用下運動時，在電離室電路中形成電流，根據電流的強度可以判斷氣體中形成的離子數，並判斷引起電離的射綫強度。如上所述，當電離輻射強度變化時電離電流的大小決定於施加在電離室電極上的電壓，即存在圖 2 所示的電離室的伏特-安培特性曲綫。

在進行測量時要盡量使電離室在飽和條件（綫段 AB ）下工作。在此綫段條件下工作時，電流強度將與射綫強度成正比。

借助弦綫靜電計或特殊的無線電電路測定電離室電路中的電流強度。普通的檢流計對於 $0.1 \cdot 10^{-10}$ 安培以下的電離電流並不靈敏。實際上無線電電路是最方便也是最廣泛採用的。某些稱為直流放大器的無線電電路裝有可測定平均電離電流的儀表（微安

計)。另外一些仪器具有电动机机械計数器，可以記下无綫电电路所产生的与电离电流成正比的电流脉冲数。

借助示踪原子法进行研究时基本上采用 β -和 γ -射綫。根据射綫的类型利用各种构造的电离室（盖格計数管的变形），图3所示为各种盖格計数管的外形。

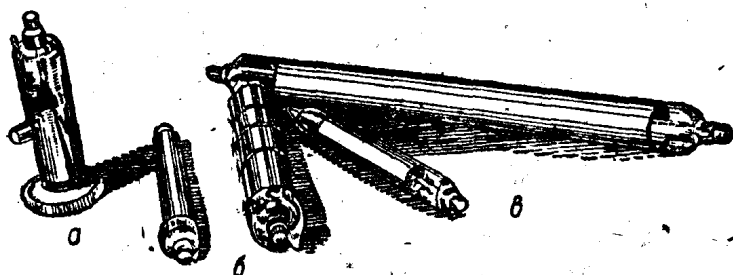


图3 盖格計数管的外形

a—供测量小能量的 β -射綫；b—供测量 β -射綫；c—供测量 γ -射綫

β -粒子計数管（图3，b）通常具有厚0.1毫米的鋁壁，以避免电子的显著吸收。但这样的計数管对低于0.25百万电子伏特能量的 β -射綫是不适合的。在此情况下采用在端面具有薄云母窗（2—10毫克/厘米²）的鐘罩形計数管（图3，a）。

β -計数管也可以記錄 γ -綫。但当存在 γ -綫时更加有效的是带有厚壁的計数管（图3，c）。为了測量 γ -綫，可以将 β -計数管包复附加的鋁圓筒，以便全部吸收 β -射綫。附加圓筒的厚度决定于粒子質量并要考虑吸收系数。

借助計数管进行測量需要特殊的計数装置：間接計数器和直接計数器〔13〕。間接計数器用联接于电子綫路中机械計数器記錄放射性值（脉冲数），电子綫路将脉冲数减少到使机械計数器能够运轉的程度（Б型装置）。采用直接計数綫路（“Филака”型、“Ирис”型等）可以在微安計上直接記錄脉冲数，并能进行照像和自动描記。

Б型放射测量装置(图4)由以下基本部分构成: 计数管、输入部件—БГС、间接计数装置 ПС-64、电动机机械计数器(号码机)以及高压整流器 BCЭ-2500。

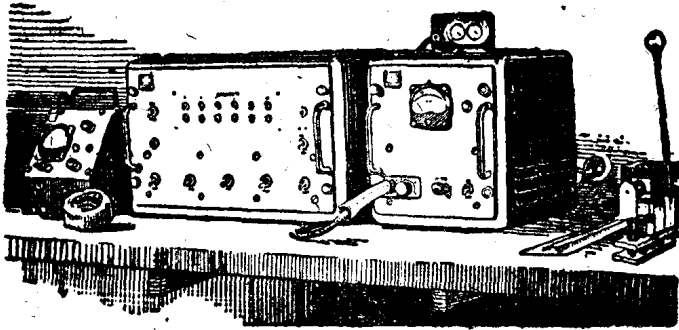


图 4 Б型装置外形

采用秒表测定计数速率。输入部件 БГС供由计数管收到脉冲的初级放大之用，而间接计数装置 ПС-64造成脉冲的最终放大。借助仪器 ПС-64可以分辨出彼此间隔达 50 微秒的脉冲。为了测定高强度的射线，仪器中装有特殊的无线电电路，可以将机械计数器的计数速率降低到 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 和 $\frac{1}{16}$ ，当然最好不要记录每秒 1000 次以上的脉冲。

采用具有电压稳定器的高压整流器在盖格计数管的两电极间造成必须的电位差。

“Фиалка”型装置由 БФ型发送器、БТ型计数指示仪和 ВВ型高压整流器构成(图5)。

БТ型计数指示仪可以记录 4 个范围的射线放射性：每分 0—2000, 0—6000, 0—20000 以及 0—60000 脉冲。对于小 10 倍的脉冲也可进行计数。为了准确测量每秒达 100 脉冲的放射性，在仪器上安装带机械计数器的 СБ-1М型补充线路。

БФ型发送器由 3 个并联的 МС-11 型气体计数管和猝灭线

路构成。計管数的电压由高压稳定整流器供給。

在“Фиалка”型仪器上可以联接自动記錄装置，例如联接
到計数指示仪上的МСШПР—054型檢流計。

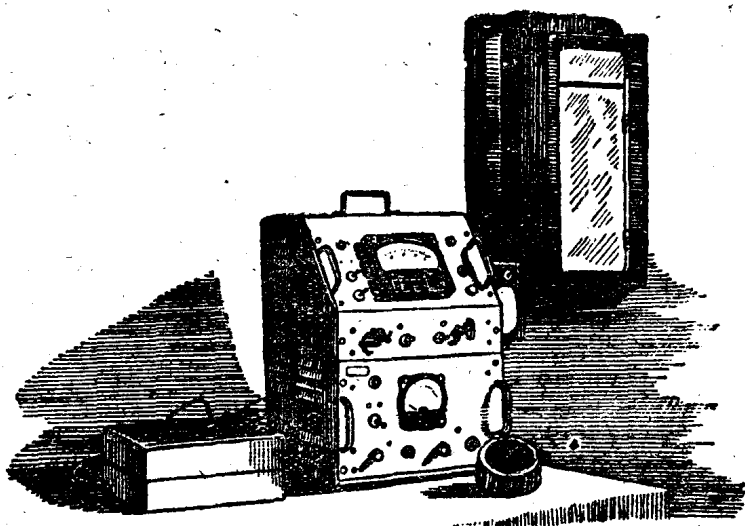


图 5 带自动記錄器（右方）的“Фиалка”型装置的外观

根据計数管型号采用計数管說明書标明的工作电压，但必須
檢驗計数管的特性曲綫，即检查飽和工作条件和管子的合格性。
为此要在計数管附近放置放射源并測定計数速率与电压的关系。
然后繪制特性曲綫（图 2），并找出飽和区域（坪 AB ）。坪的
斜度不应超过 100 伏特規定电压的 5—7%，坪值不应小于 50—
80 伏特。必須定期檢驗計数管效率。通常在較长时间的預热仪器
之后开始測量。

重要的是，要在相同的几何条件下进行样品放射性的測量，
因为放射源对計数管位置的极小改变都会产生誤差。当使用計数
器时应考虑一系列影响測量結果的因素，并加进以下的改正：准
許時間、本底、指标的再現性、立体角、同位素的衰变、吸收、
自減弱以及反散射。

准許時間的校正是这样引起的，在通过脉冲的很短間隔內，計数管不感受新粒子（死時間）。准許時間值（ τ ）随系統的不同而各異，甚至在同一系統也可发生改变。通常采用計数管的 τ -常数在 $3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$ 的範圍內。更精确的死時間由下式确定：

$$\tau = 2 \frac{N_A + N_B - N_{AB} - N_0}{(N_A + N_B) \times N_{AB}}, \quad (4)$$

式中 N_A —— τ -源 A 的計数速率；

N_B —— τ -源 B 的計数速率；

N_{AB} —— A 和 B 同时存在时的計数速率；

N_0 —— 本底的計数速率。

当計数頻率达每分 3000 脉冲时，采用換算为在 1—2 % 範圍內的大校正倍数，并省略公式（4）。

精确的計数速度由下式确定：

$$N_0 = \frac{N}{1 - N\tau}.$$

加进准許時間的校正以后必須从測量結果中減去計数管本底的計数速率。房間和设备等的放射性污染会影响宇宙射綫所造成的本底。本底妨碍弱放射性的准确測量，将被測样品置于特制鉛室中可以減少本底。根据采用的实验方法而应用各种形状的小室（垂直的、水平的）。厚度 5 厘米的鉛防护层能将宇宙綫造成的本底約減弱到 $\frac{1}{3}$ ，而对于放射性污染放出之 γ -射綫則可減弱很多。

随時間改变的計数管效率也影响測量的准确性。这就需要引入借助恒定放射源（标准样品）所确定的相应的校正。

进行定量（絕對）測量时要考虑立体角的校正，因为射源向四面八方发射的射綫只有一部分落入計数管。

对于圆柱形計数管应按下式計算相对立体角：

$$\omega = \frac{1}{180} \arcsin \frac{R}{h}, \quad (5)$$

对于鐘罩形計数管：

$$\omega = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}} \right), \quad (6)$$

式中 h ——点源至計数管有效容积的距离 (毫米, 见图 6) ;
 R ——阴极的内半径 (毫米)。

有时以具有很粗阴极的計数管对某种 γ -射线光谱进行绝对测量时, 或为了全部吸收 β -射线而屏蔽計数管时, 考虑到計数管壁的吸收射线, 引入系数 K ;

$$K = e^{-2\mu t}, \quad (7)$$

式中 t ——計数管阴极厚度 (厘米);
 μ —— β -射线的线性减弱系数 (见表 4);

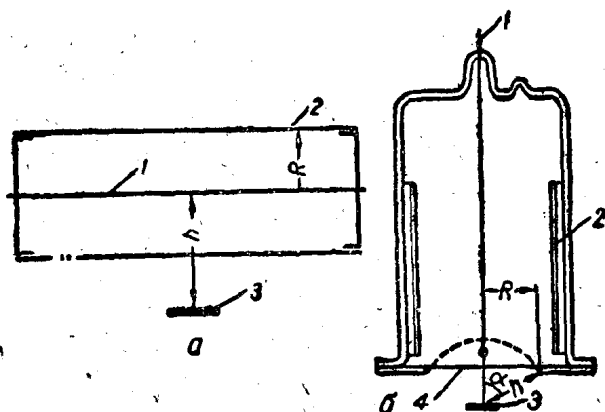


图 6 测定相对立体角的示意图

a—圆筒形計数器; b—鐘罩形計数器;

1, 2—电极; 3—放射性样品; 4—小窗口。

γ -射线的吸收系数由下式計算:

$$K = 2 \frac{t_{90} \Phi}{d^{1/2}}, \quad (8)$$