放射性同位素的測量

(英国) 丹尼斯·台劳 著

地質出版社

放射性同位素的測量

碩士 博士 电气工程师学会会員
哈瓦尔原子能研究所电子学部部長
(英)丹尼斯·台劳　著
程致中譯

地質出版社
1959·北京

THE MEASUREMENT OF
RADIO ISOTOPES

DENISTAYLOR

1951

本書系英国物理学家，哈瓦尔原子能研究所电子学部部長丹尼斯·台劳博士所著，內容以放射性同位素的測量为中心，闡述分析了有关的理論上的及实际操作上的各个問題。本書的特点是內容極其精練，篇幅虽小而实用参考价值很大。

由于放射性同位素的研究与应用在我国即將迅速大力开展，而且作为一种新的科学研究工具，它对于許多科学技术部門（如生物学、地質学、矿冶学、測量学、医学、农業、机械、紡織、化工、物理及化学等）均有重要的作用。因此，本書可作为上述各部門的科学研究人員、高等学校教师及高年級学生以及厂矿和野外勘測部門的技术人員的重要参考資料。

原書附录与我国讀者关系不大，故予从略。

本書的翻譯由程致中同志担任。

放射性同位素的測量

著　者	丹尼斯·台劳
譯　者	程致中
出版者	地質出版社 北京宣武門外永光寺西街3号 北京市書刊出版業營業許可証出字第[illegible]号
發行者	新华書店
印刷者	崇文印刷厂

印数(京)1—4,800册　1959年4月北京第1版

开本 31″×43″1/32　1959年4月第1次印刷

字数 90000　印張 3 $\frac{7''}{8}$ 揷頁 1

定价 (10) 0.53元

目　录

原　　序

放射性同位素已經作为科学家的一种新的研究工具，而且已在很大的規模上使用着。要使用这种新工具，需要有一些关于放射性同位素的性質及主要特性，以及用来探測与量度它們的方法的知識。这本書打算提供这方面的基本知識。

本書是为非專門人員写的，因此，在扼要叙述了放射性的一些主要現象和技术之后，即概述用来探測和分析放射性物質的最重要的实驗方法。全書着重于有关的物理原理的討論，並注意闡明所介紹的方法和仪器的优点和限制条件。这里，沒有必要来說明計数系統，特別是使用盖革-繆勒計数器作为探測器元件的系統的应用領域。盖革-繆勒計数器仍然是放射性示踪剂研究中的最流行的仪器。但是，也适当地注意到正比和閃爍計数器，这兩种仪器已被日益广泛地使用着。

我应当感激曾帮我校对的我的兩位同事——K. 薩丁敦(K. Saddington)先生和J. F. 霍格(J. F. Hogg)先生。最后，我应当感謝补給部允許我把这本書印出来。

丹尼斯·台劳(Denis Taylor)

1950年9月

第一章 概　　論

自从 F. 約里奥 (F. Joliot) 和伊蘭·居里 (Irene Curie) 發現了人为放射性以来，已經制成了大量的放射性同位素，在現在，已經知道每一种稳定元素的放射性同位素了。这些同位素中，有許多是在迴旋加速器中由質子、氘子和α-粒子的反应制成的，但是主要的，还是在鏈式反应堆中由中子引起的反应制成的。

人为放射性物質已經在放射疗法、放射照相和自动放射照相中得到重要的运用。在放射治疗法方面，在原子堆中由中子引起的反应所制成的放射性鈷(Co^{60})，有胜过鐳的优点，因为它有更近于單色的γ-輻射和更弱得多的β-輻射；对于放射照相，放射鈷也提供了一个極为密集而又很强的輻射源。在哈瓦尔❶的反应堆中，每天产生出几千居里❷的裂变产物，这些裂变产物也可用来作为工業放射照相用的有效的輻射源。

放射性物質的輻射在其他許多方面也很有用。例如，它們可用来电离有靜电荷出現的机器近旁的空气。在造紙、紡織和塑料工業中，由于这种不需要的靜电的作用，材料及操作时間的损失是严重的；而用放射性同位素来除去这些靜电效应，看来具有比現有各方法更好的許多优点。这种原理也用来稳定电花間隙量度 (spark-gap measurements)，在这种量

---

❶英国原子能研究中心所在地。原名 Harwell——譯註。

❷此單位之定义見 § 2.3。

度中，必須使电花間隙內的空气不断地电离。在工業上看来可能应用很广的放射性同位素的另一种用途，則与紙張、塑料板和相似物質的厚度測量有关。在这种情况中，可使用放出能量为0.3百万电子伏特的β粒子的放射性鈣(Ca^{45})。这种鈣放在所測量的物質的一边，而另一边放置一个供探測β粒子用的适当的电子探測器。探測器的示数显然取决于物質的厚度，而在事实上，指示器可刻成适当分度，以直接讀出厚度数。这样，这种方法就可用来連續地校正厚度❶，因而也就可以成为一种極有价値的生产过程控制設备。

但是，或許人为产生的放射性同位素的最重要的用途，是把它們用作"指示剂"或"示踪剂"。这种利用的兴起，系由于下列两个原因，即(1)放射性同位素可放出一种特有的輻射，这种輻射可以探測即使只有很少数量的同位素的存在；(2)活的有机体、化学反应，以及許多物理过程，对于放射性同位素及其相应的稳定物之間的很小的重量差別，是几乎感覚不出的，这就有可能把少量該种放射性同位素与稳定物混合起来，讓它跟踪这种物質，並且在生物过程、化学反应等等中，它除了一种不同——可以放出显示自己的存在的輻射以外，在各方面都和稳定物質表現得一样。例如，放射性鉄(Fe^{55}和Fe^{59})就可加入飞机引擎中，而在潤滑油中出現的放射性鉄的数量，即可作为引擎磨損的一种量度。相似地，放射性磷(P^{32})可被外科医生用来找寻腦腫瘤。腦腫瘤具有比正常的大腦組織大得多的对磷的吸收力，因而如果將含有放射性磷的药剂注射进病人身体中，大部分这种磷將为腫瘤所

❶严格地說，它所測量的是單位面积的質量(質量/單位面积)——这通常是与厚度成正比的。

吸收，而把它的存在告訴給外科医生。根据最近的一个报告，由于使用这种新技术，已成功地进行了十二次以上的脑腫瘤手术。

放射性同位素在研究、医学和工業中还有其他許多用途，但上面談过的例子，已足从証明这种新工具的很大的重要性。要使用这种工具，必須懂得量度放射性同位素的原理，和了解如何使用各种类型的“計数”設备。为此，后面打算談談这方面的基础知識。

第二章 基本概念

2.1. 概言——在关于放射性的各种書籍❶中指出，放射性物質經受了一种原子核蜕变的过程，而衰变率由下列定律給出

$$\frac{dN}{dt}=-\lambda N, \tag{2.1}$$

式中，λ 称为衰变常数。

很明显，这个方程給出 N 值（母体物質經时間 t 后所存留的放射性原子的数目）为

$$N=N_0\exp\{-\lambda t\}. \tag{2.2}$$

这里，N_0 是母体物質在某个任意选定的开始时間所有的原子数目。这个方程由方程（2.1）直接积分而得。

合併这些方程

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)=-N_0\lambda\exp\{-\lambda t\} \tag{2.3}$$

$$=\left(\frac{dN}{dt}\right)_0\exp\{-\lambda t\}. \tag{2.4}$$

从上列方程中，我們可以注意到，衰变率是随时間而成指数地下降的。

通常，对于衰变率的描述，不是用衰变常数 λ，而是用元素的"半衰期"一詞的。半衰期是放射性(activity)$\left(\frac{dN}{dt}\right)_t$

---

❶Rutherford, Chadwick. and Ellis, Radiations from *Radioactive Snbstlaneos*, Camb. Univ. Press,1930.

减为它的最初值的一半所需的时间。如用$T_{\frac{1}{2}}$表示半衰期，则利用方程（2.3），我們可得到

$$\frac{1}{2}\left(\frac{dN}{dt}\right)_0=\left(\frac{dN}{dt}\right)_0\exp\{-\lambda T_{\frac{1}{2}}\}$$

給出

$$\lambda=0.693/T_{\frac{1}{2}} \tag{2.5}$$

利用这个新概念，我們現在可以把方程（2.1）—（2.4）重写一次，而得

$$\frac{dN}{dt}=-0.693\ N/T_{\frac{1}{2}} \tag{2.6}$$

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_t=\left(\frac{dN}{dt}\right)_0\exp\{-0.693t/T_{\frac{1}{2}}\} \tag{2.7}$$

上列方程所用的放射性$\left(\frac{dN}{dt}\right)$是絕对放射性。在实际上，由計算放射性物質在一段时間內所放出的粒子的数目而測出的放射性，比絕对放射性$\frac{dN}{dt}$要小，因为全部粒子只有一部分进入探測設备的灵敏区（sensitive volume）。这一方面是因为通常並不使用具有4π几何形的探測仪器，而另一方面則是因为放出的粒子的一部分在放射源本身及探測仪器的窗子中因吸收和散射而損失了。然而通常可以保証，进入探測單位的灵敏区的粒子的分数，由一个实驗到另一个实驗仍然保持不变，因此我們可写出

$$\frac{dA}{dt}=k\frac{dN}{dt} \tag{2.8}$$

式中，$\frac{dA}{dt}$是所測出的放射性，而k是一常数，它决定于計

数系統的几何效率（geometrical efficienecy）和某些其他参数（这將在后面充分討論）。

我們可把这个概念应用于方程（2.4）中，而得

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_t=\left(\frac{dA}{dt}\right)_0\exp\{-\lambda t\} \tag{2.9}$$

式中，$\left(\frac{dA}{dt}\right)_0$ 和 $\left(\frac{dA}{dt}\right)_t$ 分别为在某个任意选定的时間和时間 t 时所测出的放射性。

方程（2.9）給出了用在某个任意选定的时間的放射性表示的在时間 t 时的放射性。这样，假定一个放射性样品的放射性是在（例如）下午4点鐘测定的，現在需要去和另个在同一天內但是在下午3点鐘进行的测量相比較，这里，就必須确定某个标准时間，並适当地校正放射性。在这个例子中，如果我們取下午3点鐘作标准时間，則第一个测量不需要校正，但在下午4点鐘做的测量，就必須有一个对应于在一小时內放射性的损失的校正。方程（2.9）可供此用。此外，也可以使用普通的放射性衰变圖（圖2.1表明了 C^{11} 的这种圖），这时衰变的校正❶可由檢查而發現。这里，必須注意到，这种衰变圖可用方程（2.7）和（2.8）来繪成，即可用下式繪成

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_t=\left(\frac{dA}{dt}\right)_0\exp\{-0.693\,t/T_{\frac{1}{2}}\} \tag{2.10}$$

式中，$T_{\frac{1}{2}}$ 是各該元素的已知的半衰期。对于前面談过的实

❶在某些情况（如 $I^{130}+I^{131}$）中，所用的是混合的同位素，因此手續是更为复杂的。但是，每一种同位素的數量，可以由根据实驗数据作出的衰变曲綫（見圖2，3）来决定，並需在任何后来的实驗中知道了这些數量后，对每个同位素分别作衰变校正。

驗，第二个量度是在第一个的后一小时进行的。由于这是 C^{11} 的半衰期的一个整数倍，在这种情况中計算是很簡單的，衰变为原来的 $\frac{1}{2}^3$ 即 $\frac{1}{8}$。

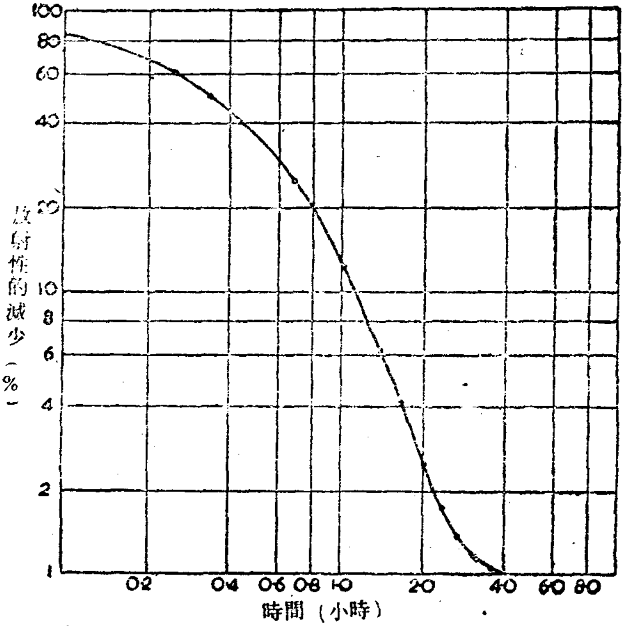

圖 2.1—C^{11}的放射性衰变圖

2.2. 衰变曲綫的考慮——使用方程（2.10），並在其兩边取对数，則得

$$\log\left(\frac{dA}{dt}\right)_t = -\frac{0.693\,t}{T_{\frac{1}{2}}} + \log\left(\frac{dA}{dt}\right)_0 \qquad (2.11)$$

由此，如果我們对一系列的 t 值决定出 $\frac{dA}{dt}$，並作出 $\log\left(\frac{dA}{dt}\right)$ 对 t 的圖，則我們只能在涉及的如果是一种放射性物

質蜕变成一种女体物質时，才能得出一直綫的圖。如果女体物質是放射性的並因而依次蜕变，或者当初的母体放射性元素含有其他放射性元素，則圖將不是一条單純的直綫。在事实上，这种检驗和对放射性同位素的半衰期的确定，时常是核对样品純度的很好的方法。

圖 2.2 表示了一張 Na^{24} 的典型的圖。注意，如果需要知道半衰期的話，只要确定和縱坐标变化了 log 2 相对应的时間間隔就行了（見圖 2.2）。

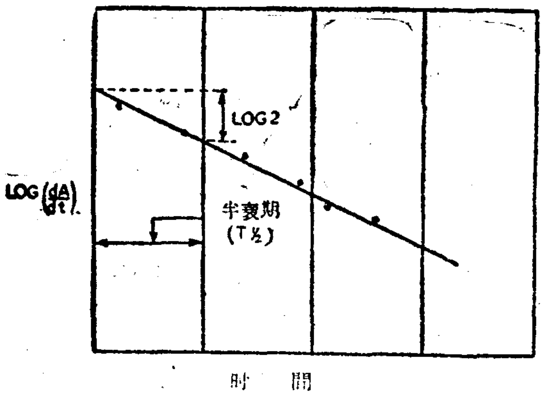

圖 2.2.—Na^{24}的衰变測量

当样品中有兩种或更多的放射性物質存在时，$\log\left(\frac{dA}{dt}\right)_t$ 对 t 的曲綫的斜率，取决于这些物質的半衰期。这样，如果有兩种物質，並得到了如圖 2.3 所示者相似的曲綫，則直綫部分 B 和 C 对应于兩种在場的元素。

在大多数放射分析中，我們对决定放射性物質的濃度感到兴趣（即对在时間 t 时所存在的放射性原子的数目 N 感到兴趣）。引用方程（2.1）和（2.6），我們得到

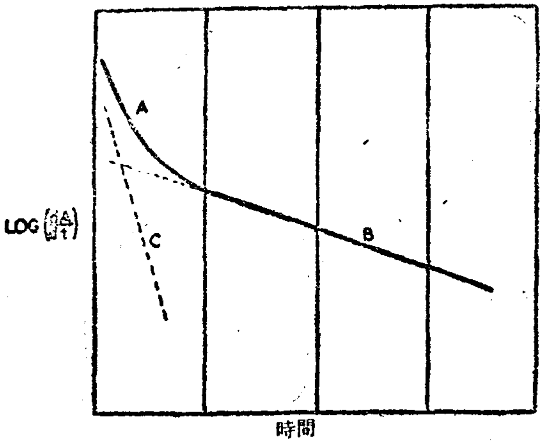

圖 2.3.—兩种同位素的混合的衰变曲綫
(衰变曲綫A是由与兩种同位素相对应的綫性部分B和C組成的)

$$\lambda N = -\frac{dN}{dt} = \frac{0.693N}{T_{\frac{1}{2}}}$$

但由实驗决定出的数值是$\frac{dA}{dt}$，它由方程（2.8），即下式給出

$$\frac{dA}{dt} = \frac{kdN}{dt}.$$

所以
$$\frac{dA}{dt} = -\frac{0.693\ Nk}{T_{\frac{1}{2}}} = k\lambda N. \qquad (2.12)$$

因此，$\frac{dA}{dt}$給出了一个N的直接的和綫性的量度。这个方程乃是測量放射性示踪剂的基础。

在实际上，$\frac{dA}{dt}$时常是由下列方法决定的：算出在一給定的时間內进入探測設备的灵敏区的粒子的数目，並以观察

的时間来除所算出的粒子的数目。粒子在放射性蜕变中的放出，是遵从統計定律的，因而通常需要对一可估計的时間进

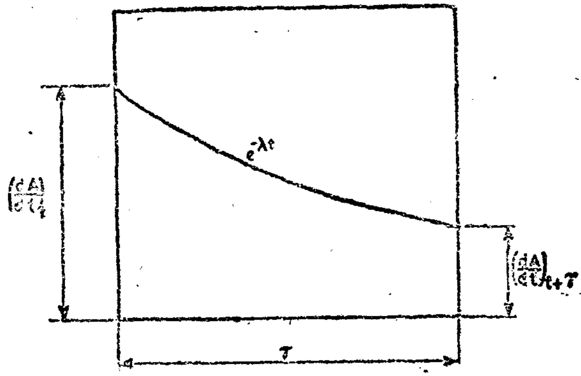

圖 2.4. 一对观察时間內衰变的衰变校正

行計算，以得到$\frac{dA}{dt}$的可靠值。如果观察的时間可以与所用的同位素的半衰期相比，則必須校正所測出的$\frac{dA}{dt}$值，以得到在时間 t 时的正确值。这是因为当量度正在进行时，物質也正在衰变。校正度(degree of correction)的大小，从下述中即可明白。

讓我們設在时間 t 时的放射性为$\left(\frac{dA}{dt}\right)_t$，而在时間 $(t+\tau)$时的放射性是$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{t+\tau}$。此处 τ 是观察的时間。然后利用方程（2.9）得

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{t+\tau}=\left(\frac{dA}{dt}\right)_t \exp\{-\lambda\tau\}.$$

参看圖 2.4，我們現在可以把所測出的放射性——当然，它

是在时間 t 內的放射性的平均值$\left(\text{即}\dfrac{\overline{dA}}{dt}\right)$——和在时間 t 时的确实值（这里即$\left(\dfrac{dA}{dt}\right)_t$）联系起来。

很清楚

$$\left(\frac{\overline{dA}}{dt}\right)=\left(\frac{dA}{dt}\right)_t\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}\exp\{-\lambda t\}dt$$

簡化得

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_t=\left(\frac{\overline{dA}}{dt}\right)\frac{\lambda\tau}{1-\exp\{-\lambda\tau\}}$$

$$=\frac{(\overline{dA}/dt)\,0.693\,\tau/T_{\frac{1}{2}}}{1-\exp\{-0.693\,\tau/T_{\frac{1}{2}}\}} \qquad (2.13)$$

現在，讓我們算出在不同观察时間 τ 內在$\left(\dfrac{dA}{dt}\right)_t$和$\dfrac{\overline{dA}}{dt}$間的差数。从而可給出校正因数（correction factor）的数値。在表 2.1 中，列举了所选出的根据这个公式算出的結果。从这張表中可以看出，如果观察时間 τ 小于 $T_{\frac{1}{2}}$ 的大約 1.5%，則从$\dfrac{\overline{dA}}{dt}$（观察值）得出$\left(\dfrac{dA}{dt}\right)_t$的校正項❶小于 $\frac{1}{2}$%。一般

表 2.1

τ(以 $T_{\frac{1}{2}}$之百分数表之)	校正項之数量(%)
0.5	0.17
1.0	0.34
1.5	0.52
2.0	0.69
5.0	1.73
1.0	3.57

❶如果校正項很小，則完全可以使用一标准时間 $t+\frac{\tau}{2}$，而不考慮校正項。