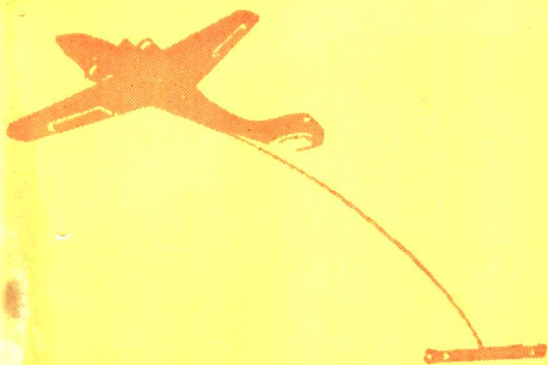


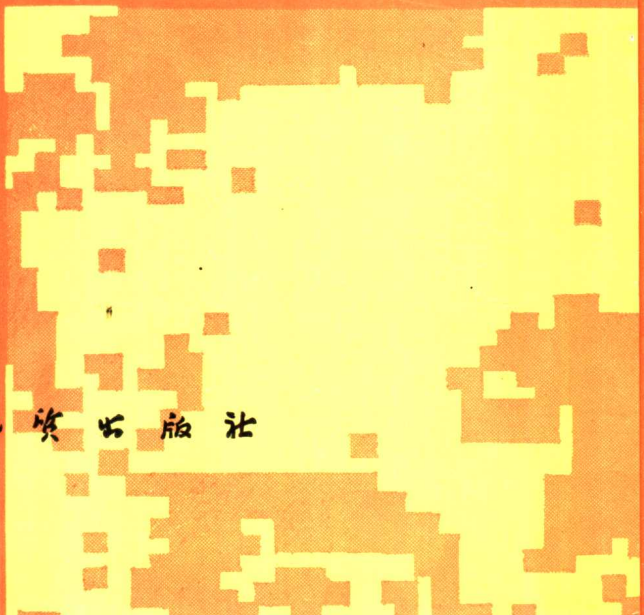
1 : 5 万遥感物探化探应用研究丛书

放射性勘查工作手册

贾文懿 等著



地质出版社



1:5万遥感物探化探应用研究丛书

放射性勘查工作手册

贾文懿 唐 红
方 方 苗 放 著
葛 君 伟

期

地质出版社

(京)新登字 085 号

1:5 万遥感物探化探应用研究丛书

放射性勘查工作手册

贾文懿 等著

*

责任编辑:陈军中

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: 850×1168¹/₃₂ 印张: 4.5625 字数: 116000

1993 年 5 月北京第一版·1993 年 5 月北京第一次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 3.75 元

ISBN 7-116-01228-1/P·1036

前 言

本书为地质矿产部“七五”期间(1986—1990年)重点科技攻关项目“1:5万区域地质调查遥感地球物理地球化学方法应用研究”下属专题“伽马能谱测量等放射性方法解决填图和水文地质问题的研究”的部分成果^①。撰写本书的目的是介绍相应研究成果,以利推广应用。

大家知道,放射性现象是1896年发现的。本世纪初,开始应用放射性方法解决地学方面的问题,如测定样品的地质年代,探讨地热的来源等等。40年代,因研制核武器,铀矿需要量大增,放射性方法成为找铀矿的主要技术,并得到迅速发展。由于这一历史背景,使铀矿及放射性方法均处于特殊状态,加上“核恐惧”的思想,使放射性勘查方法的应用受到不同程度的限制。近年来,随着核技术的发展,放射性勘查方法愈来愈多地用于解决非铀矿地质问题,从而受到人们新的注意。

放射性方法是勘探地球物理中的一个分支学科,它能测定许多化学元素,具有一些化探的色彩。放射性方法,包括天然放射性方法和人工放射性方法,多具有仪器轻便、方法简单、成本低、工效高等特点,能在浮土覆盖厚,地形、地物变化较大,电磁干扰严重,振动及噪声显著的城镇或山区工作。在许多不利的条件下,常能提供一些有用的信息,可以弥补其他方法之不足。综合应用不同物探方法,能够取得最佳效果。

过去,放射性方法主要用于铀矿地质工作,随着技术的提高和方法的改进,以及认识的转变,该方法经济、实用、安全的特点逐渐得到发挥。目前,放射性方法用于地质填图,找水,解决

① 成都地质学院,伽马能谱测量等放射性方法解决填图和水文地质问题的研究,地质矿产部“七五”科技攻关研究成果报告,1990

水文地质、工程地质、环境地质中的某些问题，找寻油气田，勘查非放射性矿产，测定样品的元素种类及含量，测定岩样的地质年代、密度、湿度，预报地震等非铀矿地质领域，都取得了不同程度的进展。70年代，国外航空伽马能谱测量在填图工作中取得的效果，是一明显例子。80年代，我国物探工作者利用 α 卡法、 α 杯法在我国找寻基岩地下水等工作中取得了良好的效益，为放射性方法解决非铀矿地质问题开创了新的起点，引起了人们的兴趣与注意。

值得指出的是，无论在国内或国外，放射性方法用于填图等非铀矿地质工作都是近期才取得明显成效的，方法技术尚需不断改进和完善。

和解决铀矿地质问题不同，解决填图、找水等非铀矿地质问题时，处理的放射性异常具有以下主要不同之处：

1. 非铀矿地质现象形成的放射性异常幅度微弱：非铀矿地质现象形成的放射性异常，多因岩性差异，岩相不同，构造破碎带存在，地球化学作用，地下水作用等因素引起，放射性异常的幅度远小于铀矿形成的。就 γ 测量而言，铀矿形成的放射性异常与背景值之比可达数十或数百倍以上，而非铀矿地质现象异常峰值约为背景值的百分之几十或1—2倍。前者无需高精度测量即可发现，后者则必须高精度测量才能测到。

2. 非铀矿地质现象形成的放射性异常性质复杂：找铀矿时，钍和钾均为干扰因素，测量时常予摒弃。解决非铀矿地质问题时，既希望有铀的信息，又希望获得钍和钾的资料，研究其间的关系常能提供有意义的地质线索，为成果解释提供有价值的根据。

针对解决非铀矿地质问题的特点，“七五”期间，对有关放射性方法在以下各方面开展了研究工作并取得了相应进展，主要是：①提高测量方法的灵敏度；②提高测量的精度；③进行多参数的放射性测量；④进行数据的自动采集、传输、处理、成图成像，人机交互解释及综合应用。

实践表明，放射性方法是一种解决非铀矿地质问题的有效技术，是可以应用推广的。限于篇幅，本书仅从实际应用方面对有关技术予以简介，用作推广应用时参考。方法的基本原理及详细讨论，请参阅有关文献。

撰写本书的作者为成都地质学院贾文懿，唐红，方方，苗放和葛君伟同志。

在完成科研任务及撰写本书过程中，得到了许多单位和同志们的指导与帮助，成稿后承蒙李淑仪同志审阅并提出宝贵意见，特向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥或差错之处，恳请读者给予批评指正。

目 录

前言

第一章 放射性的一些基本知识	1
§ 1.1 放射性现象.....	1
§ 1.2 射线的能谱.....	6
§ 1.3 氦气的运移.....	8
§ 1.4 放射性测量的精度.....	9
§ 1.5 放射性测量的背景与异常.....	13
§ 1.6 放射性测量常用单位.....	15
§ 1.7 放射性防护常识.....	17
第二章 应用放射性方法进行填图等工作的地质基础	20
§ 2.1 放射性元素的地球化学特点.....	20
§ 2.2 放射性元素在岩石中的分布.....	22
§ 2.3 放射性元素在成矿过程中的再分配.....	24
§ 2.4 放射性元素在表生带的迁移.....	24
第三章 放射性勘探仪器的选用	26
§ 3.1 概述.....	26
§ 3.2 核辐射探测.....	27
§ 3.3 放射性仪器的选用原则.....	30
§ 3.4 常用放射性勘探仪器举例.....	30
§ 3.5 仪器的调节及标定.....	37
§ 3.6 仪器的检查及维护.....	39
第四章 放射性勘探方法及选用原则	41
§ 4.1 概述.....	41
§ 4.2 地面 γ 总量测量.....	43
§ 4.3 地面 γ 能谱测量.....	51
§ 4.4 α 杯法及 α 卡法.....	59

§ 4.5	Po-210 测量	63
§ 4.6	土壤样品的 Ra 量测量	65
§ 4.7	活性炭测量	66
§ 4.8	X 荧光测量	68
§ 4.9	中子活化测量	71
§ 4.10	其他放射性方法	72
§ 4.11	放射性方法的选用原则及工作程序	73
第五章	测量数据的采集及处理	78
§ 5.1	概述	78
§ 5.2	数据的采集	79
§ 5.3	数据的现场处理及成图	82
§ 5.4	数据的存储及传输	85
§ 5.5	一些补充知识	87
§ 5.6	数据的室内处理	88
§ 5.7	资料的成图成象	94
第六章	资料解释	98
§ 6.1	概述	98
§ 6.2	野外现场的解释工作	99
§ 6.3	室内的解释工作	101
§ 6.4	综合研究	112
§ 6.5	利用地面放射性测量工作站对资料进行 人机交互解释	112
第七章	应用举例	117
§ 7.1	概述	117
§ 7.2	地质填图的实例	117
§ 7.3	找寻金属矿床实例	125
§ 7.4	找寻地下水的实例	130
§ 7.5	其他	132
结束语		136
主要参考文献		138

第一章 放射性的一些基本知识

放射性方法是以原子核物理为基础的一种物探方法，在讨论有关技术之前先介绍一些放射性的基本知识。

§ 1.1 放射性现象

1. 放射性核素

放射性现象就是不稳定的核素自发地放出粒子或 γ 射线，或在轨道电子俘获后放出X射线，或发生自发裂变的过程。

我们知道，原子由原子核和围绕其运动的电子组成，原子核由质子和中子构成。通常用 ${}_Z^AX$ 表示核素，X为元素的化学符号；A为质量数，等于质子与中子的总和；Z为原子序数。元素氢有三个同位素氢、氘、氚，可分别记作 ${}_1^1\text{H}$ （氢）、 ${}_1^2\text{H}$ （氘）、 ${}_1^3\text{H}$ （氚），它们是三种不同的核素。同位素和核素是有区别的，不能混用。

从构成万物的近百种元素来看，已经发现了1400多种核素。其中二百多种核素是稳定的，而其余一千多种核素是不稳定的。在这些不稳定的核素中只有60多种是天然放射性核素，主要存在于 $Z > 83$ 的元素里；其余为人工放射性核素。

天然放射性核素发生衰变时，能放出 α 、 β 或 γ 射线。放射性方法探测的主要对象铀、钍等发生衰变时会产生一系列的放射性核素，成为一个放射性系列，如图1.1所示。从图中可以看出， ${}_{92}^{238}\text{U}$ （为简单起见，写成 ${}^{238}\text{U}$ 等等）是一个长寿命放射性核素，半衰期为 4.51×10^9 a，经过 α 衰变变成 ${}^{234}\text{Th}$ （旧名 UX_1 ）。 ${}^{234}\text{Th}$ 的半衰期为24.1 d，经 β 衰变变成 ${}^{234}\text{Pa}$ （旧名 UX_2 ）。再经过多次衰变变成镭的同位素 ${}^{226}\text{Ra}$ ，这个核素很重要， ${}^{226}\text{Ra}$ 的

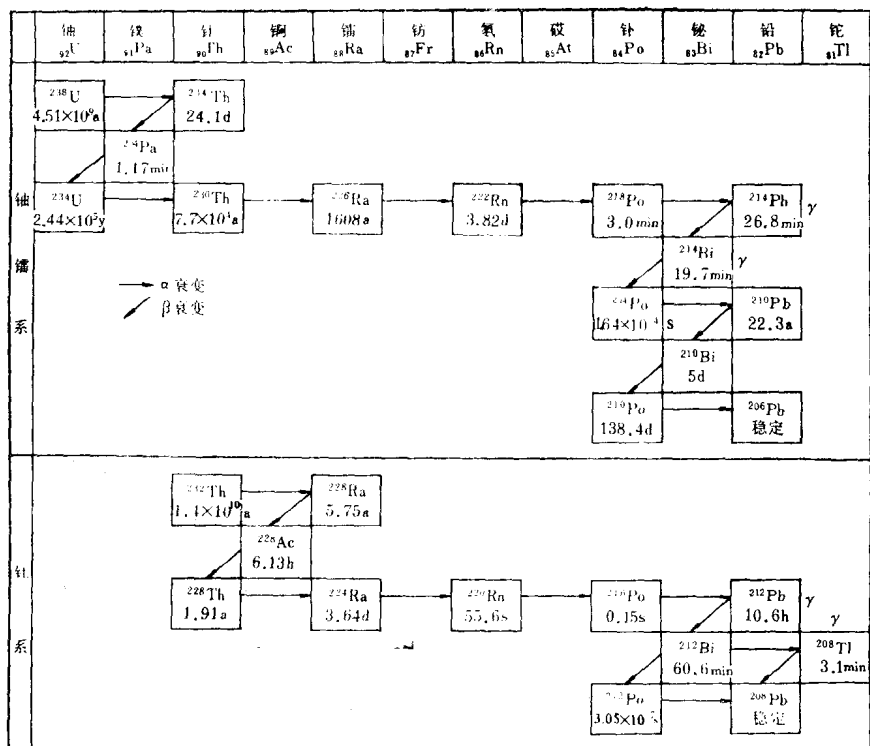


图 1.1 自然界存在的铀、钍放射性系列

a, y—年; d—天; min—分; s—秒

半衰期为 1602 a，它经 α 衰变变成 ^{222}Rn 。 ^{222}Rn 是惰性气体，半衰期为 3.825 d，在放射性方法里将扮演重要角色。 ^{222}Rn 之后，又经一系列衰变，包括三个 Po 的同位素，到稳定的核素 ^{206}Pb 而终止。起始核素 ^{238}U 为母核素或母体，它的衰变产物叫子核素或子体。 α 、 β 衰变分别用箭头标明， γ 衰变通常随着 β 衰变（或 α 衰变）发生的， ^{214}Bi 和 ^{214}Pb 是重要的 γ 辐射体，应予以注意。

自然界中， ^{40}K 是一个重要的天然放射性核素，其半衰期为 $1.3 \times 10^9 \text{a}$ ，有两个途径衰变，如图 1.2 所示。 ^{40}K 衰变时，大约每 100 次 β 衰变，可放出 15 个 1.46 MeV 的 γ 光子。

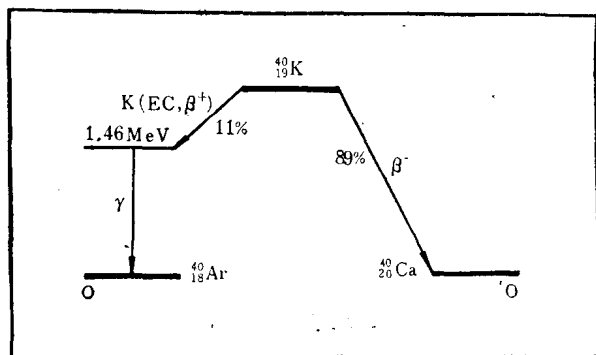


图 1.2 $^{40}_{19}\text{K}$ 的衰变图

放射性核素自发地衰变，一般不受温度、压力等因素的影响，但它并不是在某一瞬间全部都发生衰变，而是按指数规律逐渐衰变的，即

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中， N 为时刻 t 时的放射性原子核数目； N_0 为 $t = 0$ 时，即初始时刻存在的放射性原子核数目； λ 为衰变常数，随放射性核素不同而不同，其物理意义是单位时间内一个原子核发生衰变的几率， λ 大则衰变速率快。通常也用半衰期 $T_{1/2}$ 来表示衰变的速率或放射性核素的寿命，半衰期就是放射性核素原有原子衰变一半所需要的时间。例如， ^{222}Rn 的半衰期为 3.8 d，若原有 1000 万个原子，经过 3.8 d 则剩下一半，约有 500 万个原子，再经过 3.8 d，又余下一半，约 250 万个。可以证明，要经历 $10T_{1/2}$ ，原有的原子才剩下 1/1000 左右，这时可近似认为该核素衰变完了。 λ 与 $T_{1/2}$ 有以下关系：

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

放射性系中有一系列放射性核素存在。前一个核素会产生后面的，后面的核素又衰变下去，如此积累衰变，会出现一个核素既有积累又有衰变的情况。可以证明，各核素衰变率 λN 相等，即：

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n$$

需要 $10T_{1/2\text{max}}$ 的时间， $T_{1/2\text{max}}$ 为系列中寿命最长的放射性子体

之半衰期。此时，称整个系列处于放射性平衡。例如，铀系列达到平衡需要 2.44×10^6 a；不考虑 ^{210}Pb 及其子体时， ^{226}Ra 以后一系列核素达到平衡需要 38 d。

由于铀和镭的地球化学性质差别很大，所以 ^{238}U 与 ^{226}Ra 之间的重量关系往往不是 $\text{U}/\text{Ra} = 2.9 \times 10^6$ ，即 $\lambda_1 N_1 \neq \lambda_2 N_2$ ，放射性平衡被破坏。大于这个比例叫偏铀，反之叫偏镭。

铀镭平衡时，在铀系的 γ 辐射中， ^{214}Bi 放出的 γ 射线相对强度占整个系列的 85%； ^{214}Pb 约占 13%，即铀系中 98% 的 γ 射线是由 ^{238}U 的子体 ^{214}Bi 和 ^{214}Pb 产生的。因此，野外测量到的 γ 射线是 ^{238}U 的八代和九代子体贡献的，而并非 ^{238}U 产生的。

为清楚起见，将铀镭平衡时，各核素放出的 α 、 β 、 γ 射线相对强弱列于表 1.1。由表可见，镭以后各核素的贡献都是主要的。

表 1.1 铀系中铀组及镭组放出的 α 、 β 、 γ 射线
所占比例（铀镭平衡时）

同 位 素		α 射线相对 强弱 (%)	β 射线相对 强弱 (%)	γ 射线相对 强弱 (%)
铀 组	^{238}U	9.8		0.5
	^{234}Th		2.7	1
	^{234}Pa		38.3	0.6
	^{234}U	11.1		~0
	^{230}Th	10.9		~0
	铀组总和	31.8	41	2.1
镭 组	^{226}Ra	11.1		~0
	^{222}Rn	12.8		~0
	^{218}Po	14.0		
	^{214}Pb		11.5	12.4
	^{214}Bi	~0	27.6	85.5
	^{214}Po	17.9		
	^{210}Pb		0.4	~0
	^{210}Bi		19.5	
	^{210}Po	12.4		
	镭组总和	68.2	59	97.9

2. 射线与物质相互作用

(1) α 射线是由 α 粒子组成的。 α 粒子是快速运动的氦核 (${}^4_2\text{He}$)，所带正电荷电量是电子的 2 倍，质量约为质子的 4 倍。 α 粒子是在 α 衰变时放射出来的。由于 α 粒子质量较大，故其速度比光速低得多。

α 粒子通过物质时，主要是与原子的轨道电子相互作用，使物质电离或激发。带电的 α 粒子与束缚电子作弹性碰撞，由于其间静电作用力，能使束缚电子得到加速，离开轨道变成自由电子，叫做电离。若束缚电子获得的能量不够大，则不能变成自由电子，只是激发到更高的能级上去，这是激发现象。 α 粒子也可引起核反应，如 (α, n) 反应，可以产生中子。

α 粒子的电离能力很强，但穿透物质能力很弱，在空气里射程只有 3—10 cm，通常一张纸就可以挡住。 α 粒子运行的轨迹是直线。

(2) β 射线是由 β 粒子束组成， β 粒子为带一个负电荷的高速运动电子，其速度可以接近光速。天然放射性核素在 β 衰变时放出 β 粒子。

β 粒子通过物质时，主要有电离、激发、弹性散射和韧致辐射等现象。弹性散射将引起 β 粒子运动方向发生变化，使其实际运行的路程比穿透的射程要大几倍。韧致辐射是 β 粒子被物质阻止，其速度突然降低，一部分动能以电磁波的形式辐射出去的效应。

β 粒子行走的轨迹不是直线，而是弯曲折线。在空气中，其射程约为 1.2 m；在铝中约为 0.6 cm；不到 1 cm 厚的岩层就可把 β 射线全部吸收。

(3) γ 射线和 X 射线都是波长很短的电磁波，是一种光子。不同的是， γ 射线是原子核从激发态变化到基态时放出的，X 射线是原子的轨道电子退激过程中或韧致辐射时放出的电磁波。

γ 射线和 X 射线既是电磁波，所以和光有同样的传播速度。

γ 射线不带电，与物质相互作用过程不同于 α 、 β 等带电粒子。 γ 射线通过物质时主要有三种过程，光电效应、康普顿效应和形成电子对效应。

γ 射线也能与原子核相互作用发生核反应，叫光核反应，例如 (γ, n) 反应，能产生中子。

就天然放射性核素放出的 γ 射线而言，其能量有限，与岩石作用时，主要发生康普顿效应，并与物质的原子序数成正比关系。

γ 射线在空气中可以穿透数百公尺，在岩石中也有 1 m 左右的射程。

(4) 中子不带电荷，质量数为 1。用带电粒子（如 α 粒子）或 γ 光子轰击原子核，当其发生核反应时，可以产生中子。自由中子的半衰期约为 12 min。

中子可按能量分级，能量大于 0.1 MeV 的常叫快中子；小于 100 eV 的可叫慢中子；热中子的能量为 0.025 eV，与介质的分子动能相似，处于热运动状态。能量不同的中子通过物质时，各有特点。快中子经过物质减速作用，可以转化为慢中子。

由于中子不带电，通过物质时不受原子核的作用，所以能量很低的热中子也可穿过原子核，发生反应。中子通过物质时主要发生散射和俘获反应。

§ 1.2 射线的能谱

一定的放射性核素辐射出的射线能量是一定的，借此可以区分不同的核素。

天然放射性核素放出的 α 粒子能量约为 4—10 MeV。 ^{222}Rn 放出的 α 粒子能量约为 5.48 MeV； ^{212}Po 放出的 α 粒子能量约为 10.54 MeV。 α 粒子在能谱方面的差异，可以用来区分不同的放射性核素。

放射性核素在 β 衰变时放出 β 粒子，其能量一般小于15 MeV，能量分布是连续的，可在较大范围内变化，这和 α 粒子不相同。

天然放射性核素辐射出的 γ 射线能量约在几十千电子伏到几个百万电子伏之间，因核素不同而异。 γ 能谱测量正是根据 γ 射线能量的差异来测定不同核素的。用能量分辨率不同的仪器测出的能谱曲线是有差异的。能量分辨率 W 指仪器能区分两种不同能量的粒子的最小间隔，如图1.3所示。

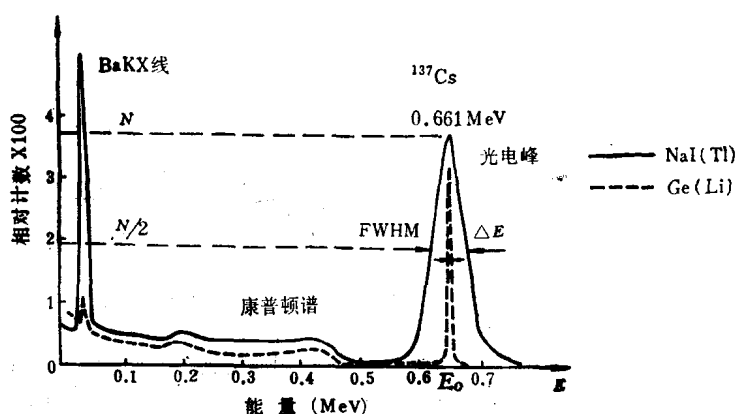


图 1.3 能量分辨率不同的核辐射探测器测得的 γ 谱线

$$W = \frac{\Delta E}{E_0}$$

式中， E_0 为 γ 射线的能量， ΔE 为最大计数值 N 的 $1/2$ 处对应的能量值，又叫FWHM，简称半宽度。 ΔE 越窄，能量分辨率越好。

图1.4是铀、钍、钾辐射出的 γ 射线能谱曲线。由于以下一些原因使测出的 γ 谱线与原始情况有差别：①测量仪器的能量分辨率不好。②光电效应、康普顿效应和形成电子对效应使谱线复杂化。

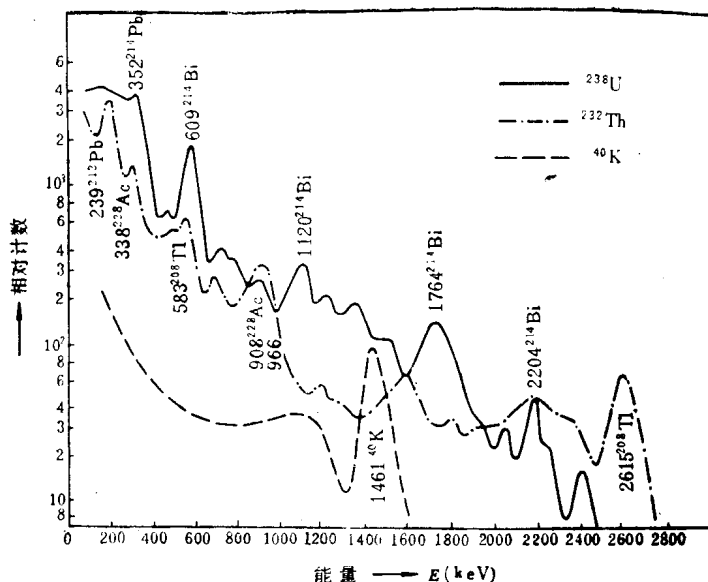


图 1.4 用 NaI(Tl) 测出的铀、钍、钾 γ 能谱曲线

从图上仍可看出铀、钍、钾三者的能谱是不同的。

需要强调，铀系中的核素 ^{214}Bi 的 γ 辐射贡献突出；钍系中的核素 ^{208}Tl 的 γ 射线能量特别，具有最大值，为 2.615 MeV；钾的贡献是 ^{40}K 产生的 γ 射线，其能量为 1.46 MeV。不同的核素辐射出的 γ 射线能量不同。

^{137}Cs 是常用的人工放射性核素，半衰期为 32 a，当其 β 衰变时辐射出能量为 0.66 MeV 的 γ 射线，常用作 γ 能谱测量时的能量标准。

^{241}Am 也是常用的人工放射性核素，半衰期 433 a，常用作 γ 辐射源和 α 辐射源，其能量分别为 60 keV 和 5.4 MeV。

§ 1.3 氦气的运移

氦在放射性测量中具有重要的意义，这是因为：

① 氡的子核素（子体）是铀系、钍系的主要 α 、 β 、 γ 辐射体；

② 氡为惰性气体，比重很大，但有明显的向上垂直运移能力；

③ 探测氡及其子体的方法简易。

前已述及（表1.1），铀系的 γ 辐射，绝大部分来自 ^{222}Rn 的子体 ^{214}Bi 和 ^{214}Pb ；近 60% 的 β 辐射来自 ^{222}Rn 的子体；57% 的 α 辐射来自 ^{222}Rn 及其子体。可见，应用天然放射性方法测量到的辐射现象大部分是氡及其子体的效应，并不是 ^{238}U 本身的辐射。

与传统的观点不同，新近实验发现，氡的比重虽大，但其向上运移能力很强；和横向运动相比，氡的垂向运移能力也强。这些新的实验结果表明，氡的运移不仅有扩散作用，还有其他一些运移规律。

不仅氡，而且氡的子体或其他重元素，如铀、钍等也有类似现象。因此，不能只以氡的最长半衰期为 3.85 d 来考虑问题。

这些现象表明，氡等的运移不能只用扩散、对流等已有认识来阐述。氡的运移距离远超过扩散理论给出的运移距离。实验结果是，氡及其子体等的运移距离远超过经典数据 10 m，达到百米以上，因而氡等元素能反映深部的地质信息。

测量氡及其子体，常采用 α 测量。此时，测量本底较低，有利发现其异常，获得较佳结果。 α 测量方法易行，是常用的测氡技术。

§ 1.4 放射性测量的精度

进行放射性测量时，会明显地觉察到仪器给出的数据是不稳定的。测量条件未变，但结果却很不一致。例如，第一次测量，每分钟计数为 5 次，而以后的计数却变成了每分钟为 3、6、7、0、4、……，前后读数存在很大差异。这是进行长度、重量等