

高等学校教学用书

铀矿床放射性找矿勘探

吴至善 徐毅 等编

只限学校内部使用



中国工业出版社

本书拟为放射性地质专业“放射性物探专业”的教科书。根据地质工作者的实际需要，在书的内容上偏重于实际工作的作法及结果解释，同时对必要的理论也作了阐述。书的内容可分三大部分：（1）基本理论：在这一部分里讲述了放射性蜕变、积累、射线与物质作用等规律，这是放射性物探工作的数理基础。（2）仪器：着重讲述了 ИГР、СГ-1М 的工作原理、正确的使用方法及维护等，同时对盖革计数管也作了较多的阐述。（3）工作方法：这一部分包括：地面 γ 测量法、航空 γ 测量法、射气测量、室内分析、 γ 测井、辐射取样、快速分析与分选、地球化学找矿及综合应用等。对每一个方法讲了原理、工作方法、结果整理及解释等几部分。

编写时，力求满足高等学校教材的要求，但限于我们的水平，时间紧迫，实际材料缺乏，一定有很多不妥之处，希读者提出宝贵意见。

本书的编写得到有关院校及有关单位的大力协助，脱稿后，请徐式朴、李秀季两位同志校阅，在此深致谢意。

铀矿床放射性找矿勘探

吴至善 徐毅 等编

*

中国科学院原子核科学委员会编委会编辑

中国工业出版社出版（北京牡丹园西 10 号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第 110 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{3}{8}$ · 插页 1 · 字数 220,000

1963 年 12 月北京第一版 · 1963 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—0,669 · 定价(10-5) 1.25 元

*

统一书号: K15165 · 2034(核委-26)

緒 論

鈾矿床的放射性找矿勘探是一种地球物理勘探方法。它的物理前提是岩石中或矿石中的放射性元素在蜕变时，放出 α 、 β 、 γ 射线，利用专门的仪器——辐射仪、射气仪等可以测量出射线的强度，借以发现放射性矿床并确定矿石中放射性元素的含量。作为寻找与勘探放射性矿床(主要是鈾矿床，其次是钍矿床)的有力手段——放射性测量——来说，它的产生与发展是与原子能的发现及其利用紧密联在一起的，在第二次世界大战以后，鈾矿的勘探工作发展得很快，至今仅经过十几年的时间，它已发展成为一门系统的科学，已有一套自己的理论、仪器和工作方法。但它仍是一门新的科学，还存在着很多问题，需要继续努力解决，使它日臻完善。

放射性物探的最大缺点是探测深度小。 γ 法的探测深度只有60~70厘米。考虑到矿床风化时会形成分散量，探测深度可加深到2米。射气法是一种探测深度较大的方法，在一般情况下它可以发现5~10米浮土以下的矿体。不过总的来说，如何加深放射性测量的探测深度，以寻找盲矿体，还是发展这个方法的一重大任务。目前有人提出过一些深部找矿法。如：热法、河底沉积物法、植物法、非放射性气体法等。但目前还都处在实验阶段，以后还应作更多的工作。

对于寻找放射性矿床来说，地质工作与物探工作密切地配合有着更为重要的意义。其理由是这样的：如上面谈到的，放射性物探探测深度是很浅的，这就要求工作者具有更多的地质知识，合理地选择测区，布置测网；对所得结果结合地质情况进行解释、推断，正确地处理异常。同样地，地质工作也离不开物探工作。因放射性物质的含量是非常少的，如对鈾来说，一般岩石的含量为 $10^{-4}\%$ ，矿石的含量一般也只有千分之几。这样的矿石，我们

用肉眼是不能把它們区分出来的。特别是对于沉积矿床來說，多数場合下看不到矿物，这时矿石与不含矿的該种普通岩石肉眼看去完全一样，必須用放射性仪器才能发现它們及确定其含量。因此，一个放射性地质工作者，他也应该具有相当多的放射性物探方面的知識。

根据地质工作者的实际需要，对放射性地质专业的学生提出学习本課的要求如下：

1. 在理論基础方面，要求掌握放射性物探工作最基本的理論根据和数理基础，从而了解到这项工作是寻找鈾矿的有力工具。

2. 在仪器方面，要求对放射性物探在普查、勘探和室内分析工作中所采用的各种类型的仪器有所了解，能够正确地使用最常用的輻射仪，并熟悉其工作性能。至于仪器檢修工作，对地质专业学生來說尚属于次要課題。

3. 在工作方法方面，要求比較正确地掌握放射性物探野外工作方法（包括仪器的相应选择）的应用条件和范围，从而能較合理地选择和布置物探工作，具备比較正确的应用和解釋物探結果的知識。

根据上述要求，本教材包括相应的三大部分：

1. 放射性的基本知識；
2. 放射性測量仪器；
3. 各种野外普查、勘探方法及室内分析方法。

放射性物探是一門新兴的科学，在原子能发现以后它的发展更加迅速了。在我国，随着社会主义經濟建設的发展，要求原子能工业也必須迅速成长。为此，也必須大力开展放射性矿床的找矿与勘探工作。这正是摆在我們面前的任务。通过本課的学习，帮助大家在今后的实际工作中能够把物探与地质密切地結合起来，以便为祖国多、快、好、省地寻找鈾矿床，滿足原子能工业的需要。

目 录

緒 論

第一章	放射性的基本知識	1
§ 1	放射現象及射綫性質	1
§ 2	放射性元素、放射系	3
§ 3	蛻變規律和积累規律	5
§ 4	射綫能譜	29
§ 5	α 射綫与物质作用	31
§ 6	β 射綫与物质作用	34
§ 7	γ 射綫与物质作用	36
§ 8	α 、 β 、 γ 射綫的相对强度	44
§ 9	单位及标准源	46
附	放射性防护	49
第二章	仪器	56
§ 1	气体电离	56
§ 2	游离室及靜电計	61
§ 3	盖革計数管	66
§ 4	閃爍計数器	76
§ 5	常用輻射仪	79
第三章	地面 γ 法	95
§ 1	γ 法的原理及一般概述	95
§ 2	自然底数的測量及仪器的标定	101
§ 3	γ 測量的工作方法	107
§ 4	結果整理	119
第四章	航空 γ 測量	125
§ 1	基本知識	125
§ 2	航測的实际工作	130
§ 3	結果整理与結果解釋	134
§ 4	地面檢查	137
§ 5	汽車 γ 測量	139
第五章	射气測量	140
§ 1	射气場的形成	140
§ 2	野外工作方法	146
§ 3	异常的綜合測量	154
§ 4	結果整理	157

§ 5	結果解釋	160
§ 6	異常揭露	162
第六章	样品分析	163
§ 1	α 法	163
§ 2	β 法	164
§ 3	γ 法	167
§ 4	β - γ 綜合分析 法	168
§ 5	水中錳、氮含量之測定	171
§ 6	射气系数之測定	174
附:	分析結果精度評價	179
第七章	γ 測井	182
§ 1	理論基础	182
§ 2	測井的工作方法	187
§ 3	結果整理	189
§ 4	結果解釋	191
第八章	γ 編录及輻射取样	204
§ 1	γ 編录	204
§ 2	輻射取样的基础知識	207
§ 3	工作方法	211
§ 4	結果解釋	214
§ 5	影响輻射取样的因素及精度評價	216
第九章	采掘矿石的放射性快速分析与自动分选	218
§ 1	矿石采掘中的快速分析	218
§ 2	放射性矿石的自动分选	228
§ 3	矿石损失与貧化的防止办法	232
第十章	鈾矿地球化学找矿法	234
§ 1	分散暈和分散流的形成	234
§ 2	鈾量測量	235
§ 3	生物地球化学找矿法	237
§ 4	鈾矿地球化学找矿的室內分析方法	239
§ 5	結果整理和解釋	244
第十一章	地球物理方法綜合应用的概述	247
§ 1	在普查勘探阶段应用物探方法的順序及其綜合应用	247
§ 2	实例	250
附录		258
参考文献		262

第一章 放射性的基本知識

§ 1 放射現象及射綫性質

从周期表上我們可以看出，随着原子序数的增加，原子核的中子数与质子数之比也逐漸增加，它从 1:1 增加到 1.56:1。当原子核质量太大，中子数过多时，核的稳定性降低，有变成另一种較輕、較稳定的原子核趋势。这种由一种核变成另一种核的現象，称为“蜕变”，原子核的这种性质叫做放射性。放射性是一种自发的、原子核内部的反应，它与核外电子的状态没有关系。因此，無論这种元素是以什么样的化合物出現，实验証明，它的放射性都很少改变。物理条件的改变对放射性也几乎无影响。

天然存在的、能自发蜕变的元素，叫天然放射性元素。它們主要是原子序数 (z) 大于 80 的重元素。此外，周期表中间部分的某些元素，如：鉀、銣、釷等也有天然放射性同位素。原子核蜕变时，从核內放出带电粒子及电磁波。根据粒子性质不同，可以把它們分成 α 粒子和 β 粒子（通常称为 α 射綫和 β 射綫），与其相应的蜕变叫 α 蜕变和 β 蜕变。在 α 或 β 蜕变过程中，有些还能放出电磁波，这种电磁波叫 γ 量子或 γ 射綫。

α 射綫是一种高速运动的正电粒子，其质量为 4，电量为两个正电单位，实际上它是氦的原子核，它的初速度約在 1.4×10^9 厘米/秒到 2.2×10^9 厘米/秒之間，与其相应的能量为 2~8 兆电子伏。 β 射綫是高速运动着的电子，速度比 α 射綫还要高 10 倍，接近于光速，它的质量很小，电量为一个負电单位。根据現代原子物理理論，原子核內沒有电子存在，而认为 β 射綫的放出，是由于核中的中子轉变成质子的結果。原子核在进行 α 或 β 蜕变时，新产生的元素的原子核可能处在激发状态，当由激发状态回到正常状态时，以 γ 量子的形式，放出多余的能量。不同元素蜕

变时放出 γ 射线的能量不同，一般为几千电子伏。它的波长很小，约为 $1.2 \times 10^{-8} \sim 3.9 \times 10^{-11}$ 厘米。当上述三种射线通过磁场时， α 、 β 射线由于带电而发生偏转，并且两者的偏转方向相反； γ 射线由于不带电，不发生偏转，如图(1.1)。图上的磁场方向，垂直于图面向下。

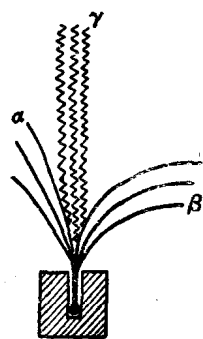
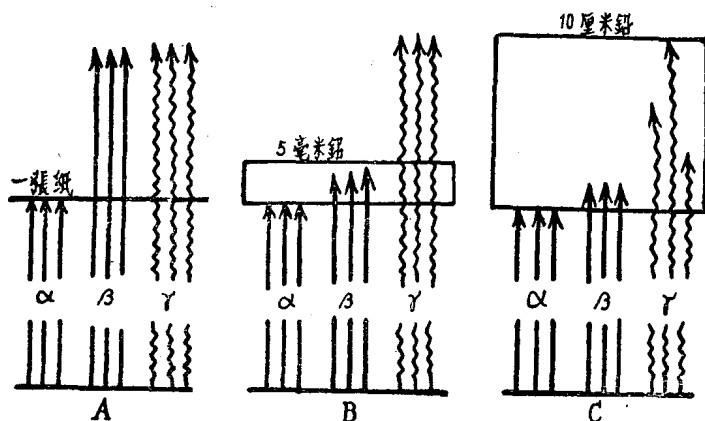


图 1.1

放射性射线与物质作用时发生一些现象。就其主要的几项分别述之：

一、穿透作用 α 、 β 、 γ 射线的穿透能力之比约为1:100:10000，一张纸可完全吸收 α 射线，它在岩石中的射程约为30微米；0.5厘米厚的铝板可完全吸收 β 射线；而 γ 射线在一般的岩石中，可穿透50~60厘米，它在空气中的射程可达数百米。这三种射线的穿透能力，示意于图(1.2)。根据射线穿透能力的不同，可利用不同厚度的物质使某种射线被吸收，只放出我们需要的射线。

图1.2 α 、 β 、 γ 射线穿透能力示意图

二、游离作用 α 、 β 、 γ 射线的游离能力（在单位路程上产生的离子对数）之比约为10000:100:1。 α 射线在1厘米的空

气中約形成 4×10^4 对离子， β 射綫可形成 41~7600 对， γ 射綫形成的离子对数不超过 1.5 对。射綫的游离作用是很重要的，現在常用的放射性仪器（如靜电計、一般的輻射仪等），就是根据这一作用来測定放射性强度。

三、螢光作用 射綫射到某些物质上（如硫化鋅 ZnS 、碘化鈉 NaI 等），能激起螢光或磷光。螢光的强弱与射綫强度有关。根据射綫的这一作用，設計和制成了閃爍仪器。

四、感光作用 射綫像日光一样，可以使碘化銀（ AgI ）分解，而使照像底片感光。感光的程度与放射性强度及“曝光”時間的长短有关。因此，可以用放射性照像法研究矿物的結構。

五、化学作用 物质在射綫作用下，可以引起化学变化。这一作用表現在很多方面，如：对有机体的作用，可使有机体組織的分子游离，而造成細胞的死亡。所以应避免放射性的照射，特别是强烈的照射。此外，通过射綫的化学作用，可引起一些物质变色或褪色，如：白云石、方解石和长石变紅；石英变黑；螢石变黑紫；炭质岩石褪色等等。这些現象是找矿的良好标记。

六、伴随放射性現象会产生热量 这是因为射綫被物质吸收时射綫能变成热能。这个热能会使含放射性物质的岩石自身和其周圍物质的溫度升高。一克鐳每小时放出的热量为 138 小卡。目前有人提出一种新的找矿方法——“微热方法”。

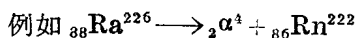
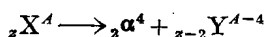
§ 2 放射性元素、放射系

自然界中原子序数从 81（鉍 Tl ）到 92（鈾 U ）的元素都具有放射性。但經過研究发现，其中許多放射性同位素，都是某一个放射性元素不断連續蛻变的中间产物。如詳細的說，就是一个长寿命的放射性元素（称母体元素），經蛻变产生一种子体元素，这种子体元素可能也具有放射性，因而又蛻变产生第二代子体元素。如此下去直到变成非放射性的同位素为止。由母体元素及其形成的这一串子体元素便构成了一个放射系。在天然放射性元素中有三个这样的系，以相应的母体元素来命名，它們是：鈾（ ${}_{92}\text{U}^{238}$ ）

系、錒鈾(${}_{92}\text{AcU}^{235}$)系及釷(${}_{90}\text{Th}^{232}$)系(見圖 1.3)及附表(1.1、1.2、1.3)。

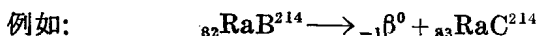
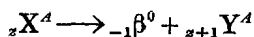
原子核的蛻變，遵守總能量數和總質量數守恒規律。新產生的元素，在週期表中不在位於母體元素原有的位置，而是位於其前或其后（與蛻變種類有關），我們稱它為“位移定則”。

一、位移定則 α 蛻變時，子體元素原子核（Y）的質量應比母體元素原子核（X）的質量減少 4，原子序數減少 2，可用下式表示：



因此子體元素在週期表中應位於母體元素的前兩位。

β 蛻變時，子體元素原子核的質量與母體元素的相同，但原子序數加 1。可寫成：



這時，子體元素在週期表中的位置，應在母體元素的後一位。

從上述定則我們可以看出，同一系的諸放射性同位素，其質量數之差應為“4”的倍數。並且它們的質量數可用一通式來表示：鈾(${}_{92}\text{U}^{238}$)系為 $4n+2$ ；錒鈾(${}_{92}\text{AcU}^{235}$)系為 $4n+3$ ；釷系(${}_{90}\text{Th}^{232}$)為 $4n$ 。式中 n 為正整數，對不同的系 n 的起止值不同，對鈾系來說 n 在 59~51 之間變化，對釷系來說則在 58~52 之間變化。從公式的排列組合形式來看，還應當有一符合 $4n+1$ 的系存在。這一系的存在，不過它是由人工產生的。該系中壽命最長的元素為鐳(${}_{93}\text{Np}^{235}$)，所以稱為鐳系。

二、放射系的特點 自然界存在的三個放射系，有其共同的特點：

(一) 母體元素是長壽命的。因此，至今在自然界中還有這些系的存在。鐳系可能就是由於母體元素蛻變較快（半衰期為 2.20×10^6 年），所以在自然界中已經不存在了。

(二) 每系中間有一惰性氣體元素。鈾系中的惰性氣體氦。

(Rn) 是鐳的蜕变产物。氦气对放射性物探找矿具有极重要的意义, 射气测量就是通过测定氦气浓度的大小来寻找铀矿床的。在室内可通过测量氦气浓度来确定水中和岩石中的鐳含量。钍系的气态元素是钍射气 (Tn)。目前, 钍射气应用于找矿的实际意义还不不大。镭钍系的气态元素是镭射气 (An), 在找矿工作中没有实用意义。

(三) 气态元素后为一串短寿命元素。

(四) 最后的稳定同位素皆为铅 (Pb) 的同位素。

以上三个系, 对我们最有意义的是铀系, 其次是钍系。镭钍是铀的一种同位素, 在天然铀中它占铀总量的0.712%。

三、不成系的放射性元素 在自然界中除上述三个系的50多种放射性元素外, 还有180多种不成系的放射性元素。它们蜕变产生的子体元素是稳定的同位素, 因此不能成为放射系列。在这些元素中比较有实用意义的有: $^{19}\text{K}^{40}$ (钾), $^{62}\text{Sm}^{147}$ (钐), $^{49}\text{In}^{113}$ (铟), $^{57}\text{La}^{138}$ (镧) 等, 其中 $^{19}\text{K}^{40}$ 的实用意义较大。 $^{19}\text{K}^{40}$ 是钾的一种同位素, 占其总量的0.012%。它能放出 β 射线和 γ 射线。由于某些岩石, 特别是碱性岩石及含有大量腐植质的地段, 含钾较高, 它往往对测量造成干扰。不成系的放射性元素列在表(1.4)中。

§ 3 蜕变规律和积累规律

一、放射性元素的蜕变定律 放射性元素的蜕变, 是一种自发的原子核内部反应。一个原子在某一段时间内蜕变与否, 与该原子所处的化学和物理条件无关, 与其周围有无其它原子的存在无关; 它服从于或然率的规律。对于大量的原子来说, 在单位时间内蜕变的原子数与当时现存的原子数成正比, 可用下式表示:

$$\frac{dN}{dt} \propto N \text{ 或 } \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

式中 dN —— dt 时间内蜕变的原子数;

N ——当时时间为 t 时的原子数;

λ ——比例常数, 称为“蜕变常数”。



图1.3 A 鈾-鐳系

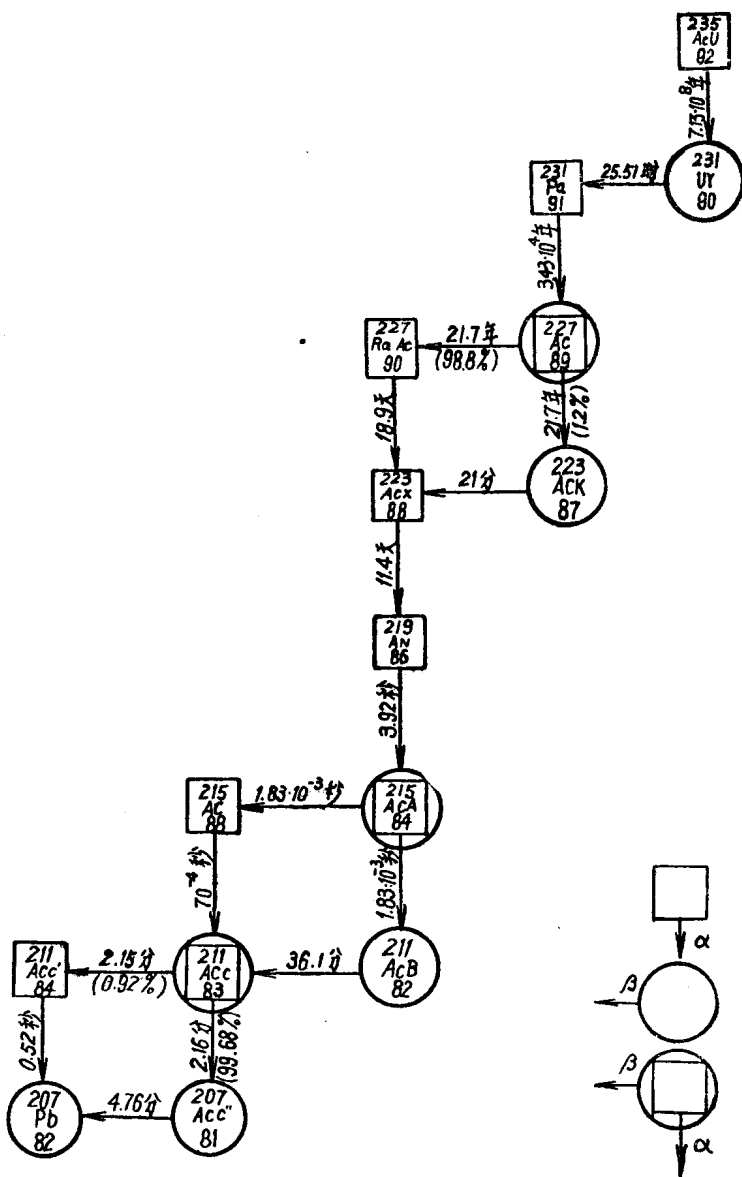


图1.3C 钍-铀系

表1.1 鈾 鐳 系

放射性同位素名称	符 号	半 衰 期 ($T_{1/2}$)	蜕 变 常 数 λ (秒 $^{-1}$)	蜕 变 类 型	能 量 (兆电子伏)		α 粒子在 空气中 射程 (厘米) 在760 毫米汞柱 (克/厘米 2)	β 粒子在 铝中的最 大射程	与UI=1处 于平衡的 重 量 数
					粒 子	γ 射线			
鈾 I UI	${}_{92}\text{U}^{238}$	4.498×10^9 年	4.883×10^{-18}	α	4.132 (22%) 4.180 (78%)		2.64 2.685		1
鈾 X_1 UX $_1$	${}_{90}\text{Th}^{234}$	24.101 天	3.32874×10^{-7}	β γ	0.103 (34%) 0.193 (56%)	0.043 0.047 0.0904		0.015 0.040	1.44×10^{-11}
鈾 X_2 (X $_2$)	${}_{91}\text{Pa}^{234}$	1.14 分	1.01×10^{-2}	β γ	0.600 (7%) 1.500 (13%) 2.320 (80%)	0.782 0.817 0.396		0.200 0.67 1.03	4.77×10^{-16}
鈾 Z UZ	${}_{91}\text{Pa}^{234}$	6.7 小时	2.87×10^{-5}	β γ	0.45 (90%) 1.2 (10%)	0.810 0.845 0.877		0.13 0.51	2.51×10^{-16}
鈾 II UII	${}_{92}\text{U}^{234}$	2.475×10^5 年	8.874×10^{-14}	α	4.716 (26%) 4.763 (74%)	0.050 0.117	3.212 3.260		5.41×10^{-5}
鐳 JO	${}_{90}\text{Th}^{230}$	8.3×10^4 年	2.65×10^{-13}	α γ	4.61 (25%) 4.682 (75%)	0.150 0.210 0.254	3.104 3.177		1.78×10^{-5}
鐳 Ka	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1590 年	1.3814×10^{-11}	α γ	4.589 (5.7%) 4.777 (94.3%)	0.188	3.083 3.274		3.36×10^{-7}
氡 Rn	${}_{86}\text{Em}^{222}$	3.825 天	2.0974×10^{-6}	α	5.482		4.036		2.17×10^{-12}

續表 1.1

放射性同位素名称	符 号	半 衰 期 ($T_{1/2}$)	蜕 变 常 数 λ (秒 $^{-1}$)	蜕 变 类 型	能 量 (兆电子伏)		α 粒子在 空气中 射程 (厘 米) 在 760 毫米汞柱	β 粒子在 铝中的最 大射程 (克/厘米 2)	与 $UI=1$ 处 于平衡的 重 量 数
					粒 子	γ 射线			
鐳 A RaA	$^{84}\text{Po}^{218}$	3.05分	3.788×10^{-3}	α (99.96%) β (0.04%)	(α) 5.996		4.838		1.18×10^{-15}
鐳 At	$^{85}\text{At}^{218}$	2.0秒	33.0	α	7.79		7.027		0.136×10^{-18}
鐳 B RaB	$^{82}\text{Pb}^{214}$	26.8分	4.310×10^{-4}	β γ	0.350 0.670 0.726 0.779	0.053 0.242 0.320 0.295 0.352		0.095 0.240 0.260 0.280	1.02×10^{-14}
鐳 C RaC	$^{83}\text{Bi}^{214}$	19.7分	5.864×10^{-4}	α (0.04%) β (99.96%)	α { 5.33 5.44 (55%) 5.51 (45%) β { 1.65 (23%) 3.17 (77%)	0.0625 0.1911 0.505 0.609 0.769 0.935 1.22 1.241 1.419 1.766		3.865 3.993 4.062 0.76 1.60	0.75×10^{-14}
鐳 C' RaC'	$^{84}\text{Po}^{214}$	1.55×10^{-4} 秒	4.47×10^3	α	7.6802		6.869		9.84×10^{-22}

镭C' RaC'	$_{81}\text{Pb}^{210}$	13.2分	8.752×10^{-3}	β	1.800			0.84	1.97×10^{-19}
镭D RaD	$_{82}\text{Pb}^{210}$	22年	9.98×10^{-11}	β γ	0.0167	0.0078 0.0161 0.0232 0.0307 0.0467		0.0062 0.0051	4.32×10^{-9}
镭E RaE	$_{83}\text{Bi}^{210}$	4.989天	1.608×10^{-6}	β	1.17			0.50	2.68×10^{-12}
钋 (RaF)	$_{84}\text{Po}^{210}$	140天	5.73×10^{-8}	α	4.5($10^{-3}\%$) 5.298	0.084 0.804	2.994 3.830		7.54×10^{-11}
铅 (RaG)	$_{84}\text{Pb}^{206}$	—	稳定						

表1.2 钍系

放射性同 位素名称	符 号	半衰期 ($T_{1/2}$)	蜕变常数 λ (秒 $^{-1}$)	蜕变类型	能量(兆电子伏)		α 粒子在 一个大气 压的空气 中的射程 (厘米)	β 粒子在 铝中的最 大射程 (克/厘米 2)	与Th=1处 于平衡的 重量
					粒	子			
钍 Th	$_{90}\text{Th}^{232}$	1.389 $\times 10^{10}$ 年	1.5813×10^{-18}	α	3.905(20%) 3.98(80%)		2.436 2.503		1
新钍1 MsTh ₁	$_{88}\text{Ra}^{228}$	6.7年	3.28×10^{-9}	β γ	0.053	0.03		0.0043	7.74×10^{-10}