

高等学校試用教科书

鈾矿床放射性勘探

上册

〔放射性物探专业用〕

白 弟 著

只限学校内部使用



中国工业出版社

前 言

这本教材是为高等学校放射性物探专业编写的，全书分上下两册出版。

上册包括：放射性勘探方法的理论基础，放射性单位和辐射防护，放射性测量仪器以及放射性分析等内容。下册叙述铀矿床的找矿、勘探和开采阶段的各种放射性勘探方法和实例。不同物探方法综合应用找铀矿的例子也做了简略的介绍。估计这些内容对于进行铀矿床上的物探工作都是必须的。

在铀矿床的放射性勘探工作中，地质知识是极为重要的。经验一再指出，地质工作和物探工作必须很好配合才能得到理想的效果。所以铀矿地质对每一位物探人员都是绝对必须的基本理论知识。限于书的篇幅，并考虑在校同学均有专门课程讲授这些内容，所以铀矿地质知识在本书中未加编写，仅列有标题，有关内容读者可参考其他书籍。

这本教材的编写工作是相当仓促的。因为时间紧迫，人手少，水平又不高，所以不论是内容的选择，章节的安排，词句的推敲或是联系实际等方面都做得不够。个别地方还可能有错误。这一切编者诚恳地希望读者能提出批评指正，以便今后改正。

编者

1961.6于北京

目 录

第一部分 放射性勘探方法的物理
及地质基础

第一章 放射性概论	3
§ 1.1 放射性现象	3
§ 1.2 放射性系列 放射性元素	5
§ 1.3 放射性元素蜕变的基本定律	21
§ 1.4 两种或多种放射性元素的蜕变 积累规律	22
§ 1.5 钍 (Rn) 及钍射气 (Tn) 的 短寿蜕变产物的积累和蜕变	30
第二章 射线与物质相互作用	36
§ 2.1 α -粒子与物质相互作用	36
§ 2.2 β -粒子与物质相互作用	38
§ 2.3 β -射线在物质中的衰减	41
§ 2.4 γ -射线与物质相互作用	43
§ 2.5 γ -射线在物质中的衰减	56
第三章 铀矿地质 (从略)	66

第二部分 放射性单位及
放射性辐射的防护

第四章 放射性单位	67
§ 4.1 放射性物质的数量和浓度的测 量单位	67
§ 4.2 测量射线剂量和剂量率的单位	68
§ 4.3 标准源	72
第五章 放射性辐射的防护	73
§ 5.1 放射性辐射的生物作用	73
§ 5.2 放射性辐射的防护	76
§ 5.3 从事放射性工作的劳动卫生	79

第三部分 放射性测量仪器

第六章 放射性测量仪器的探测元件	82
§ 6.1 放射性测量方法一般介绍	82
§ 6.2 气体的电离	83
§ 6.3 电离室	86
§ 6.4 验电器和静电计	91
§ 6.5 计数管	101
§ 6.6 闪烁计数器	114
§ 6.7 晶体计数器	126

第七章 放射性测量仪器常用的电子

学线路

§ 7.1 引言	127
§ 7.2 放射性测量仪器常用电子学线路 (探测元件的连接电路 猝熄电路 放大 器 鉴别器整形线路及脉冲振幅分析器 进位线路 驱动电路 计数率电路 符合及反符合电路 高压电源)	128

第八章 地质工作中常用的放射性测

量仪器

§ 8.1 携带式辐射仪	158
§ 8.2 γ -测井辐射仪	168
§ 8.3 航空 γ -辐射仪及汽车 γ -辐射仪	173
§ 8.4 实验室用放射性测量仪器	177
§ 8.5 选矿辐射仪	188
§ 8.6 辐射仪的标定	194
§ 8.7 辐射仪的维修	196

第九章 放射性测量的统计学

§ 9.1 放射性现象的统计规律 泊松分 布 高斯分布	198
§ 9.2 标准误差和可能误差	200
§ 9.3 考虑本底计数时精度的计算	204
§ 9.4 计数仪器的检查	206
§ 9.5 计数率计的统计学 辐射仪的灵 敏阈	209

第四部分 放射性分析

第十章 放射性分析

§ 10.1 放射性元素的含量和射线强度 的基本关系	212
§ 10.2 不平衡铀矿样品中铀钍含量的 分析	219
§ 10.3 放射性分析精度的估计	234
§ 10.4 射气系数的测定	242
§ 10.5 铀钍矿样品中铀、钍、钍含量 的分析	249
§ 10.6 液态样品中钍和钍的分别测定	259
§ 10.7 其他问题	262

第一部分 放射性勘探方法的 物理及地质基础

第一章 放射性概論

§1.1 放射性现象

某些元素的原子核能够自发蜕变。蜕变时，伴随着放出射线。蜕变后，原来元素的原子核变成另一种元素的原子核。这种现象叫做放射性现象。

放射性元素最先是在原子序数高于82的元素中发现的，以后在周期表中部元素中也发现了放射性元素，如铀、钍、钷等。现在已经知道，在周期表中所有元素都有放射性同位素，但这些元素必须经过人工照射后，才显示出放射性的能力。这些元素叫做人工放射性同位素。开始所指的放射性元素叫做天然放射性元素。

放射性元素蜕变时放出的射线，是由三种不同种类的射线组成的： α -射线、 β -射线和 γ -射线。

α -射线由一束运动的粒子流组成， α -粒子带两个正电荷，它的原子量为4.00389，大约等于氢原子的4倍，它是氦的原子核。

β -粒子是一群高速运动的电子，它的质量等于 9.107×10^{-28} 克。

γ -射线是一种波长极短的电磁波，波长范围为 $1.2 \times 10^{-8} \sim 3.9 \times 10^{-11}$ 厘米。

此外，在原子核蜕变时还放出中子、质子和正电子等。这些粒子的发射只在人工放射性同位素蜕变时才见到。表1.1列出了各种粒子的物理常数：

表 1.1

粒子形式	质量m (克)	电荷e (CGSE)	e/m	速度V (厘米/秒)	v/c	能量E (Kev)
α -粒子	6.644×10^{-24}	9.604×10^{-10}	1.45×10^{14}	$1.4 \sim 2.25 \times 10^9$	$0.47 \sim 0.07$	$4190 \sim 10,500$
β -粒子	9.107×10^{-28}	-4.802×10^{-10}	5.274×10^{17}	$0 \sim 2.97 \times 10^{10}$	$0.0 \sim 0.99$	3117
正电子	9.107×10^{-28}	$+4.802 \times 10^{-10}$	5.274×10^{17}			
中子	1.6746×10^{-24}	0				
质子	1.6724×10^{-24}	$+4.802 \times 10^{-10}$	2.87×10^{14}			

原子蜕变时放出 α -粒子，叫做 α -蜕变；放出 β -粒子的蜕变叫做 β -蜕变； γ -射线通常是在 α -蜕变和 β -蜕变时放出来的。

关于 α -蜕变、 β -蜕变的物理实质在核子物理学中有详细讨论。放射性勘探课程中不详细研究蜕变的物理实质，而是研究原子核放出来的射线与物质相互作用的性质，利用这些性质来解释地质勘探中的实际问题。

下面简单地讨论与地质勘探工作有关的或者解释地质作用时有用的一些性质。

1. 放射性射线穿透物质的能力以及射线的射程：射线在物质中行驶的路程叫做射程。射线在物质中的射程愈长，则其穿透能力也就愈大；射程愈短则反之。由实验知道， α -、 β -、 γ -射线在物质中的射程是不同的。例如在空气中， α -射线的射程是2.7~8.6厘米， β -射线的射程是4~130厘米， γ -射线的射程最大，达到100~200米。

由此可見 α -射線的穿透力最弱， γ -射線的穿透力最強。它們之間的比值大致是 $\alpha:\beta:\gamma=1:100:10000$ 。在固体中射線的射程大大減小，如一張紙或者0.004~0.005厘米厚的鋁箔可以完全吸收 α -射線。 β -射線的穿透力較大，需要0.5厘米厚的鋁板才能將它擋住，唯獨 γ -射線有着極大的穿透力，將它完全擋住，需50~60厘米厚的鋁板。

各種射線具有不同穿透力的性質，已廣泛地應用到放射性測量中去了。利用這種性質，可在不同種類射線組成的射線束中測量單種射線。由於 γ -射線穿透能力大，測量 γ -射線就可以找尋被埋藏着的盲礦體。

2. α -、 β -、 γ -射線的電離作用：射線通過物質時，可以把部份能量傳遞給原子中的束縛電子，使它從電子殼層中逸出，成為自由電子，這時原子變成帶正電的離子，這種作用叫做電離作用。電離作用的大小對於不同的粒子是不同的， α -粒子的電離作用最強， β -粒子的電離作用次之， γ -射線的電離作用最弱。在空氣中，一厘米的路程上所产生的離子數： α -粒子大約產生 4×10^4 對； β -粒子只能產生40~7600對； γ -射線平均產生1.5對離子。它們之間在單位路程上電離本領的比例大致為： $\alpha:\beta:\gamma=10000:100:1$ 。

在固体或液体中，射線也具有同樣的本領。由於固体或液体分子間的復合力大，因此電離現象不如氣體中顯著。

射線的電離特性在放射性勘探中應用得最為廣泛，幾乎所有探測射線的儀器都是應用這個特性，如：靜電計；計數管；乳劑技術等記錄射線的裝置。在一定的條件下，由於射線產生的電離電流的大小，計數管記錄的脈沖數的多少，與放射性物質的含量成正比，所以利用這個性質可以進一步確定放射性物質的含量，同時可以按乳劑感光情況，研究放射性元素在岩石礦物標本中的分布。

利用 β -和 γ -射線強度測定放射性元素含量的方法在生產中已廣泛地使用。

3. 放射性物質放出熱量：放射性物質附近的溫度比周圍要高的現象早就被皮埃爾·居里發現了，經過仔細的測量和計算，他肯定了每克鐳每小時可以放出136小卡的熱量，這個發現震動了當時的世界，也使得居里夫婦自己不安起來。這樣大的能量可以看出人類幸福光明的遠景，但是又想到人類的敗類可能會盜竊他們的科學發現而為禍於人類。

以後進行精密的實驗和計算證明，1克鐳每小時放出138卡熱量。

放射性物質能使它周圍溫度增高的原因，是由於射線的動能被周圍物質吸收後轉化為熱能。射線中熱效應最大的是 α -粒子，在鈾鐳系中，由 α -粒子產生的熱量占整個系列輻射產生熱量的89%； γ -射線的熱效應次之，占總熱量的6.5%； β -射線的熱效應最小，僅占總熱量的4.5%。

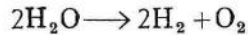
放射性蛻變所產生的熱量對於地球的动力活動和構造運動有極重要的影響。

利用這個特性，近年來有人想利用地熱測量來找尋放射性礦床，美國曾做了這種試驗，據報導得到的結果是良好的。它探測得較深。可是某些人研究認為放射性礦床放出的熱量是很小的，不可能用儀器找到，對於美國所報導的例子值得懷疑。關於這一方面的資料我們知道得還不多，有必要從理論和實際試驗中去進一步研究。

4. 射線能激起許多物質特別是鹼金屬鹽和鹼土金屬鹽（碘化鈉、硫化鋅等）的磷光和螢光。磷光和螢光的現象現在廣泛地應用它來研究射線，利用螢光體記錄射線（因

幾计数器)的灵敏度較计数管要高,附加一定装置以后,还可以研究 γ -射綫的能譜。

5. 射綫能够引起物质的化学反应和其他变化:射綫通过物质时使原子电离或与原子核发生弹性碰撞,給予原子核一个反冲能量,这些作用便促进了化学反应。例如射綫对水的分解:



这种作用的结果,会使有机物組織破坏,造成細胞死亡,因而无必要时应尽量避免射綫照射,尤其是强烈照射。

另外,有使玻璃器皿染色的作用,以及在自然界可以看到的黑云母、白云母、电气石及其他一些硅酸盐矿物的显著染色等現象。染色带的外形近于环状,带中顏色不同,形成所謂多色环。矿物晶体中放射性物质愈多,矿物的年齡愈长,則环的顏色也愈深。多色环的数目决定于放射性元素的起始性质,如果是釷的包裹物,可見到四个染色环,鈾的包裹物見到五个染色环。染色环的半径相当于各种元素的 α -射綫的射程。以前曾利用多色环的强度确定地质年齡,由于过分不准,現在已經不用了。

此外,还可以見到射綫使石英变烟色,螢石变紫等現象。这些現象也可以作为找鈾矿的标志。

§ 1.2 放射性系列 放射性元素

上面已提到天然放射性元素极大部分是序数大于82的元素,在自然界中許多天然放射性元素常常在同一块矿石中可以看到,例如U、Po、Ra等。研究这些元素的共生关系,发现它們原来是同一个元素蜕变产生的。起始的那个元素我們叫它是母元素,其他許多蜕变产物称作女元素。母元素和它的女元素組成一个族,叫做放射性系。現在已經发现有四种放射性系列,即鈾(U)系、釷(Th)系、錒(AcU)系和鐳系。其中鐳系是用人工方法得到的。其他三个系存在于自然界。

1. 鈾系(或称鈾—鐳系):鈾系中的母元素为 ${}_{92}\text{U}^{238}$,它的半衰期为 4.51×10^9 年,經過 α -蜕变变成 UX_1 。 UX_1 的半衰期很短,它經過 β -蜕变变成 UX_2 。 UX_2 是 P_a 的同位素。 UX_2 的蜕变比較特殊,其大部分原子放出 β -粒子轉变为 $\text{U} \text{ II}$,而其中有一小部分(占0.15%)原子核則放出 γ -射綫产生新元素UZ。UZ和 UX_2 的原子量原子序数均相同,但是核能量状态不同。 UX_2 放出的 β -粒子能量可以达到2.32Mev,而UZ的 β -粒子的能量只在0—1.17Mev的范围内。UZ的寿命比 UX_2 也要长得多。具有相同的原子量和原子序数但原子核的能量状态不同的元素叫做“同质异能”素。无论是 UX_2 或UZ都是通过 β -蜕变成 ${}_{92}\text{U} \text{ II}^{234}$,U II的寿命很长。以后发生一连串 α -蜕变:首先是U II轉变为Th的同位素 I_0 , I_0 又变成Ra,Ra又变成Rn(Rn是气体),Rn蜕变为Po的同位素RaA,RaA发生双重蜕变,原子的大部分(99.97%)放出 α -粒子轉变为RaB(Pb的同位素),极少一部份(占全部原子的0.03%)以 β -蜕变的形式轉变为 ${}_{85}\text{At}^{218}$,这是不久以前发现的元素,寿命比較短,几秒钟后以 α -蜕变的形式变成RnC。RaC的极大部分是由RaB变的。RaC的半衰期是19.75分钟,它又有分叉蜕变現象。其中占全部原子数的99.96%,經過 β -蜕变后变成RaC',仅仅0.04%的原子变为RaC*,RaC*的半衰期很短,为 1.5×10^{-4} 秒。最后RaC'經過 α -蜕变,RaC*經過 β -蜕变都变成RaD。RaA、RaB、RaC、RaC'及RaC*,它們的寿命都很短,我們称之为Rn的短寿放射性沉

表 1·2 鈾系射綫譜

輻射体	α -射綫			β -射綫			γ -射綫		
	百次蛻变的粒子数 n	能 量 (Mev) E	相 对 强 度 $\frac{nE}{\Sigma nE}$ (%)	百次蛻变的粒子数 n	能 量 (Mev) E	相 对 强 度 $\frac{nE}{\Sigma nE}$ (%)	一次蛻变的量子数 n	能 量 (Mev) E	相 对 强 度 $\frac{nE}{\Sigma nE}$ (%)
U I	100	4.15	9.7	—	—	—	—	—	—
UX ₁	—	—	—	80	0.205	2.9	0.2	0.093	1.0
	—	—	—	20	0.112		0.045	0.180	0.4
UX ₂	—	—	—	94.85	2.32	36.1	0.05	0.8	0.7
	—	—	—	5	1.52		0.002	0.6	—
UZ	—	—	—	0.13	0.45	≈ 0	—	—	—
	—	—	—	0.02	1.2	≈ 0	—	—	—
U II	100	4.71	11.0	—	—	—	—	—	—
I _o	100	4.68	11.0	—	—	—	0.11	0.068	≈ 0
	—	—	—	—	—	—	0.01	0.19	≈ 0
鈾組总和	300	—	31.7	200	—	39.0	0.384	—	2.1
Ra	100	4.61	10.8	—	—	—	0.012	0.134	≈ 0
Rn	100	5.49	12.9	—	—	—	—	—	—
RaA	99.96	6.00	14.1	—	—	—	—	—	—
RaB	—	—	—	100	0.65	10.3	0.115	0.241	14.3
	—	—	—	—	—	—	0.258	0.294	
	—	—	—	—	—	—	0.450	0.350	
RaC	0.04	5.33	≈ 0	23	3.17	31.7	0.658	0.607	83.6
	—	—	—	77	1.65		0.065	0.766	
	—	—	—	—	—		0.067	0.933	
	—	—	—	—	—		0.206	1.120	
	—	—	—	—	—		0.063	1.238	
	—	—	—	—	—		0.064	1.379	
	—	—	—	—	—		0.258	1.761	
	—	—	—	—	—		0.074	2.198	
	—	—	—	—	—		0.020	2.420	
RaC'	100	7.68	18.0	—	—	—	—	—	—
RaC''	—	—	—	0.04	1.80	≈ 0	—	—	—
RaD	—	—	—	100	0.292	0.5	—	—	—
RaE	$5 \cdot 10^{-5}$	4.77	≈ 0	100	1.17	18.5	—	—	—
RaF	100	5.30	12.5	—	—	—	—	—	—
鐳組总和	500	—	68.3	400	—	61.0	2.31	—	97.9
鈾系总和	800	—	100	600	—	100	2.56	—	100

Mev能量的 α -粒子，而Ra放出4.61Mev能量的 α -粒子，鈾系中能量最大的 α -粒子是由RaC'放出的，它的能量是7.68Mev。鈾系有8个主要 α 輻射体，它們是U I、U II、I_o、Ra、Ra、RaA、RaC'和RaF。系列中鈾組元素放出的 α -射綫强度占鈾系总强度的

表 1·3 鈾系射綫譜

輻射体	α -射綫			β -射綫			γ -射綫		
	百次蛻变的粒子数 n	能量 (Mev) E	相对强度 $\frac{nE}{\Sigma nE}(\%)$	百次蛻变的粒子数 n	能量 (Mev) E	相对强度 $\frac{nE}{\Sigma nE}(\%)$	每次蛻变的量子数 n	能量 (Mev) E	相对强度 $\frac{nE}{\Sigma nE}(\%)$
Th	100	3.90	10.4	—	—	—	—	—	—
MSTh ₁	—	—	—	100	0.053	1.3	—	—	—
MSTh ₂	—	—	—	100	15.5	38.0	1	0.40	39.3
	—	—	—	—	—	—	1	0.93	
RaTh	100	5.35	14.5	—	—	—	0.23	0.084	0.5
ThX	100	5.66	15.3	—	—	—	—	—	—
Tn	100	6.28	17.0	—	—	—	—	—	—
ThA	100	6.77	18.3	—	—	—	—	—	—
ThB	—	—	—	88	0.355	9.3	0.83	0.24	6.4
	—	—	—	12	0.589		—	—	—
ThC	33.7	6.09	5.6	66.3	2.22	36.6	0.7	0.01	21.5
	—	—	—	—	—	—	0.22	0.26	
	—	—	—	—	—	—	0.011	0.33	
	—	—	—	—	—	—	0.01	0.45	
	—	—	—	—	—	—	0.185	0.72	
	—	—	—	—	—	—	0.160	0.83	
	—	—	—	—	—	—	0.055	1.03	
	—	—	—	—	—	—	0.045	1.34	
	—	—	—	—	—	—	0.07	1.61	
	—	—	—	—	—	—	0.07	1.81	
ThC'	66.3	10.54	18.9	—	—	—	—	—	32.3
	—	—	—	33.7	1.79	14.8	0.34	0.58	
ThC''	—	—	—	—	—	—	0.34	2.62	—
鈾系总和	600	—	100	400	—	100	5.14	—	100

31.7%、鐳組占68.3%。

表1·2告訴我們鈾系中的 β -射綫的能量在0.029到3.17Mev之間，其中以RaC放出的 β -射綫的能量最大。鈾系有4个主要 β -輻射体，它們是UX₂、RaB、RaC和RaE。系列中鈾組元素放出的 β -射綫强度占总强度的39%，鐳組占61%。如果只記錄高能量的 β -粒子，例如記錄大于1Mev的 β -粒子，就可以发现鈾組的 β -射綫强度与鐳組的 β -射綫强度几乎相等。图1·2(a)上，用方块大小表示出鈾鈾系中各輻射体的 β -譜，它的高度表示 β -射綫的最大能量，它的面积表示其相对强度 $\left(\frac{nE}{\Sigma nE}\right)$ 。

图1·3(a)表示出鈾鈾的 β -譜分布图，纵坐标表示蛻变百次的粒子数，横坐标表示 β -粒子的能量。

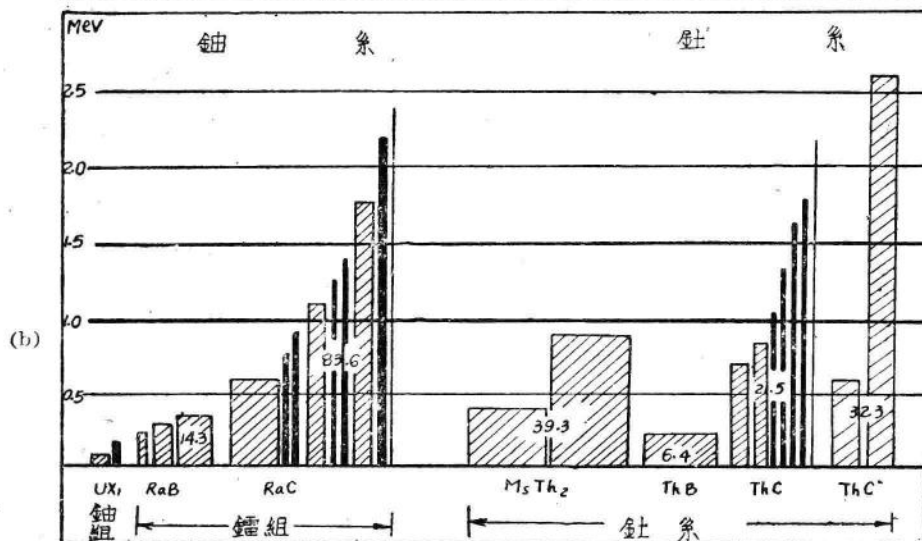
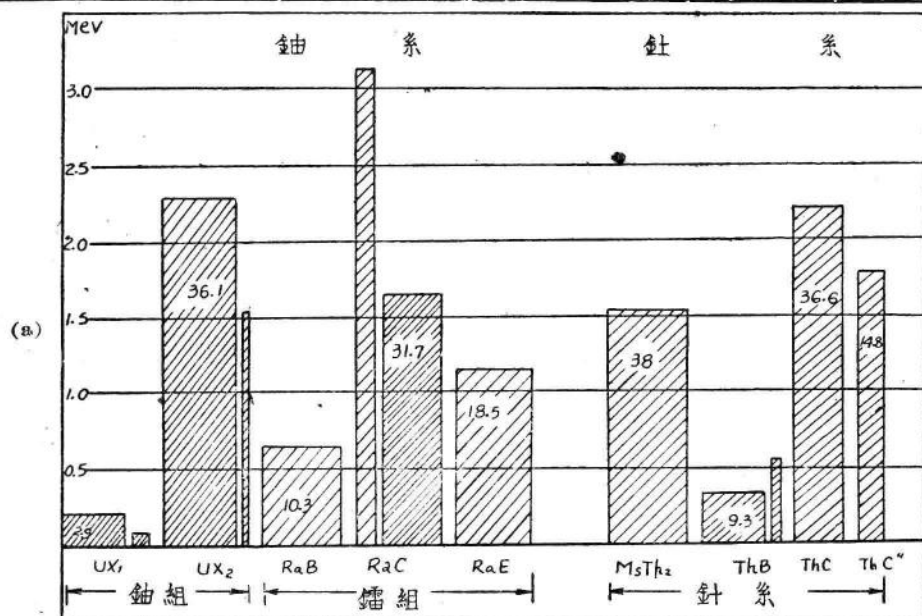
同样在图1·2(b)，1·3(b)上繪出鈾鈾系的 γ -射綫譜。

表1.4 錒鈾系射綫譜

輻射体	α -射綫		β -射綫		γ -射綫	
	百次蛻变的粒	能 量	百次蛻变的粒	能 量	每次蛻变的量	能 量
	子数 n	(Mev) E	子数 n	(Mev) E	子数 n (%)	(Mev) E
AcU	4.2	4.20	—	—	≈ 0	0.094
	85.6	4.393	—	—	85.6	0.184
	10.2	4.58	—	—	4.2	0.386
UY	—	—	45	0.093	93.6	0.022
	—	—	11	0.216	4.0	0.059
	—	—	44	0.302	49	0.085
Pa	3	4.66	—	—		0.038
	11	4.720	—	—		0.200
	3	4.838	—	—		0.259
	25	4.938	—	—		0.331
	47	5.002	—	—		0.383
	11	5.042	—	—		
Ac	15	4.60	—	—		0.3
	85	4.95	—	—		
RaAc	2.5	5.672	—	—		0.029
	15	5.717	—	—		0.051
	4	5.742	—	—		
	20	5.764	—	—		0.149
	2.5	5.868	—	—		
	4.0	5.966	—	—		0.253
	25	5.988	—	—		0.273
	4.0	6.017	—	—		
	21	5.815	—	—		
	21	5.922	—	—		0.353
AcK	—	—	100	1.200		0.095
AcX	3	5.419	—	—		0.147
	2	5.487	—	—		0.267
	9	5.528	—	—		0.322
	24	5.596	—	—		
	53	5.704	—	—		
	9	5.730	—	—		
An	12	6.437			13	0.266
	15	6.559				
	69	6.824			12	0.392
AcA	100	7.365				
At	5×10^{-4}	8.00				
AcB			20	0.571	1.0	0.065
			80	1.40		
					6.0	0.404
					6.0	0.425
					1.0	0.764
					13	0.829

續表

輻射體	α -射綫		β -射綫		γ -射綫	
	百次蛻变的粒	能 量	百次蛻变的粒	能 量	每次蛻变的量	能 量
	子数 n	(Mev) E	子数 n	(Mev) E	子数 n (%)	(Mev) E
AcC	82.6	6.621				
	17.4	6.274			17.4	0.347
AcC'	0.48	6.57				0.54
	0.57	6.50				0.87
	98.88	7.43				
	0.07	6.34				
AcC''			0.5	0.630	0.5	0.87
			99.5	1.50		

图 1.2 鈾釷系 β , γ 譜分布图(a) β 譜分布; (b) γ 譜分布

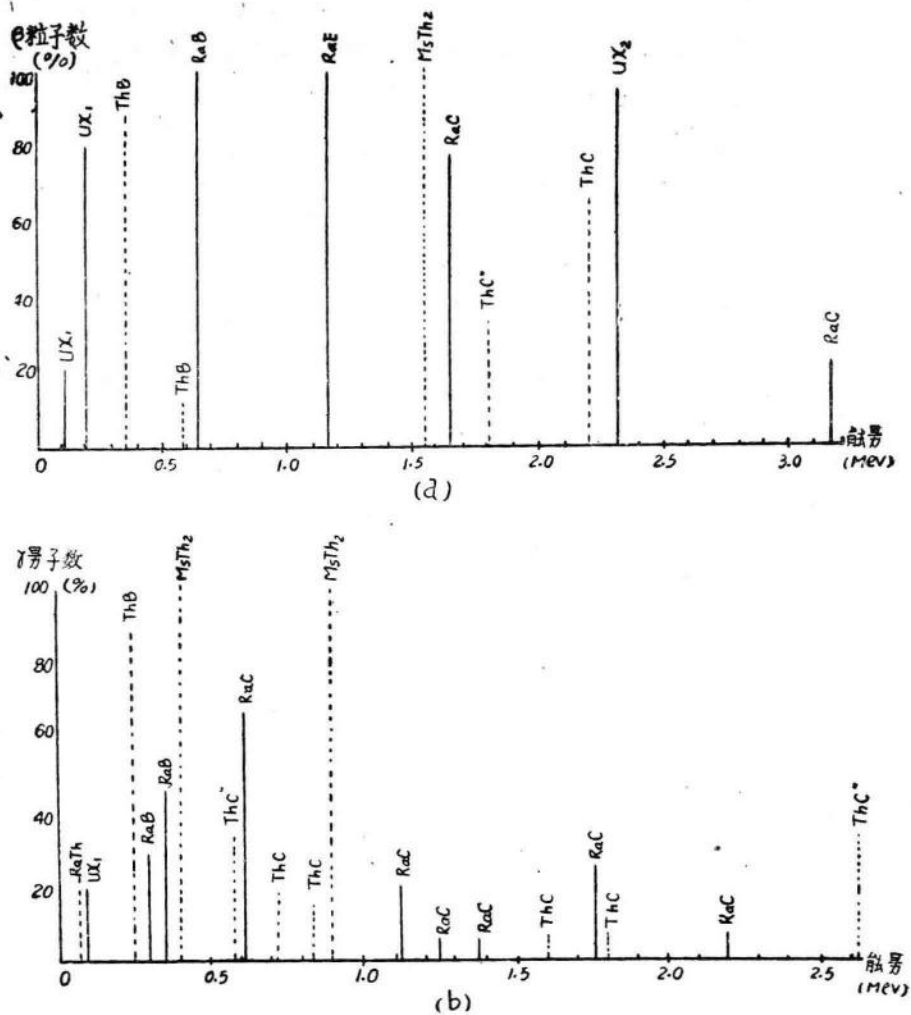


图 1.3 铀钍β, γ谱分布图

(a) β谱分布; (b) γ谱分布

——铀系;钍系

从图1.2 (b) 及图1.3 (b) 中可以看出γ-射线的一些情况, 其中较强(量子数多)的能谱有0.093、0.294、0.35、0.607、1.12及1.76 (MeV) 等6条。主要γ辐射体有2个, 即RaB与RaC。铀组γ-射线强度仅占铀系总强度的2.1%, 并且都是一些软成分(如0.093MeV), 而钍组却占97.9%, 这说明铀系中的γ-射线几乎都是钍组放出来的, 特别是大于1 MeV的硬γ-射线全部是钍组放出来的。

以上分析导出了一个极重要的结论, 因为我们在野外找铀矿时通常是采用测量γ-射线的方法, 由上述可知γ-射线强度主要取决于Ra组。因此找矿时所发现的γ-射线强度的增高(或称γ异常)直接取决于Ra量的多少, 而不取决于铀的量。虽然我们不知道Ra是U蜕变生成的, Ra量的多少直接与U量有关, 可是由于U和Ra的地球化学性质不同, 往往发现U和Ra迁移的现象。例如, 在氧化作用强烈的环境下, U容易被酸溶解带走, 而

Ra被溶解的量极少,这时就发生了 τ -强度很高,但U并不富;另外在还原的环境下Ra被带走,而U溶解得很少,或搬运的U在此还原而沉淀,这时就出现了相反的现象, U虽富,但 τ 强度不高。

由此看出,在野外找矿时发现了异常,不能仅仅根据 τ -射线强度来估计矿床的远景,同时也不应该任意放弃 τ -射线强度不太高的异常,应该进行综合的研究,例如在异常上测量 β -射线的强度。表1·2中告诉我们钍组和镭组的 β -射线强度是相差不大的,如果我们发现了虽然 τ -射线强度不高,而 β -射线强度很高的异常时,就应加以注意,并分析样品,以决定放射性物质是钍还是其它放射性元素。

钍 系

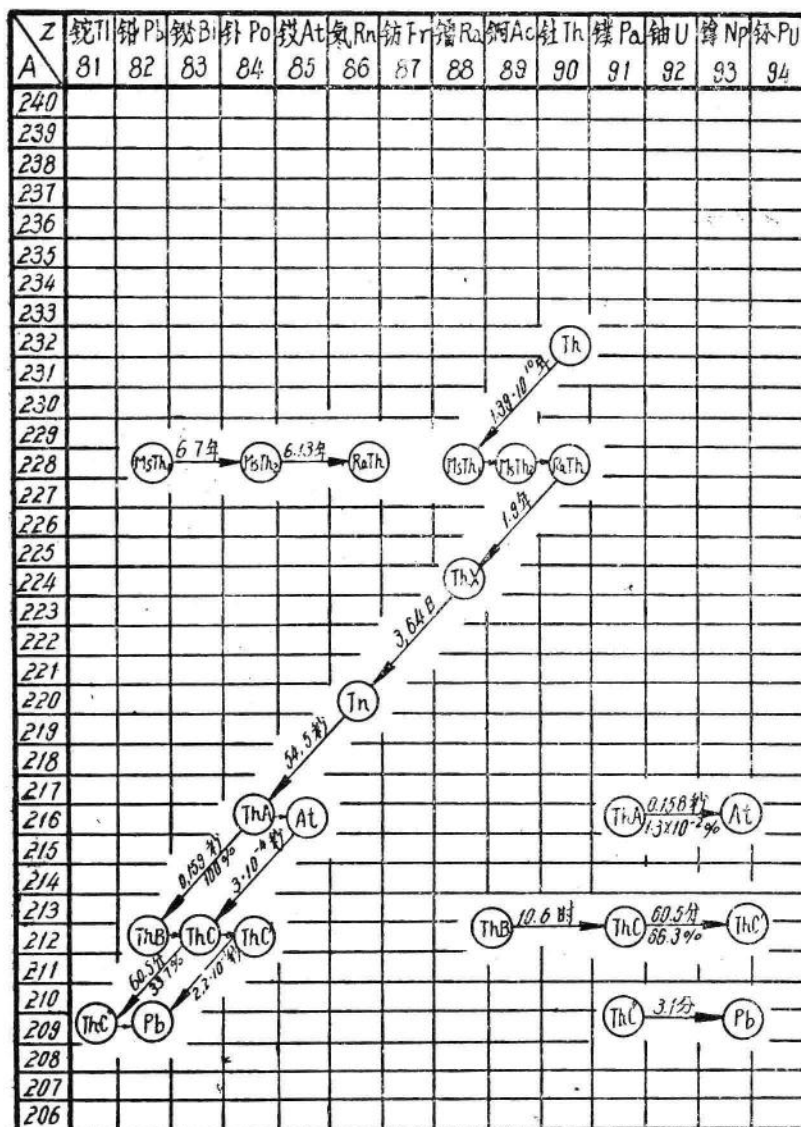


图 1·4 钍系蜕变图

在研究異常時，務必要觀察地質特點，一定要仔細研究地質特點後，才能對異常作出評價。任何脫離地質的放射性測量工作都不能得到有益的結果。

2. 釷系：釷系的起始元素是 ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ，半衰期為 1.39×10^{10} 年，它的蛻變產物有 MsTh_1 、 MsTh_2 、 RaTh ……。蛻變圖與鈾系類似，如圖1.4所示。釷系中女元素的壽命一般比鈾系女元素壽命短。

釷系的 α -輻射體， β -輻射體和 γ -輻射體的能譜示於表1.6及圖1.2和圖1.3。釷系 α -輻射射線的能量在5.35到10.54MeV之間，其中以 ThC' 放出的 α -粒子能量最大。釷系有7個主要 α -輻射體，即 Th 、 RaTh 、 ThX 、 Tn 、 ThA 、 ThC 及 ThC' 。釷系的 β -射線能量在0.05到2.22MeV之間，其中以 ThC 能量最大。主要 β -輻射體有4個，即 MsTh_2 、 ThB 、 ThC 和 ThC' 。主要 γ -輻射體有4個，即 MsTh_2 、 ThB 、 ThC 、 ThC' ，它們的能量分別為0.40與0.93；0.24；0.72和0.83；0.58與2.62MeV。從上述材料中可以看出，釷系的射線譜與鈾系有所不同，利用這些差別可以分析 Th 、 U 混合樣品中 Th 與 U 的含量。例如，釷系最硬射線是2.62MeV，而鈾系則是1.76MeV，因此測定1.8MeV以上射線強度即可單獨求出釷含量。再如，在乳劑技術（放射性照像）中，測量10.54MeV的 α -射線數目也可單獨求出釷含量（因鈾系最大 α -射線能量只有7.68MeV）。

3. 錒系：最初認為錒是這個系的起始元素，故稱為錒系。現在知道，鈾的同位素 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 是它的起始元素，錒系蛻變圖如圖1.5所示。

錒系經常與鈾系伴生，這是因為錒鈾（ AcU ）經常與鈾（ U ）伴生的緣故，通常岩石中鈾與錒鈾的比例是140:1，即錒鈾量經常占鈾的0.7%。從這可以看出，錒鈾量遠遠少於鈾的量。不僅如此，從放射性射線強度來看，一克岩石中錒系的 α -射線強度占鈾系強度的5%，而 γ -射線強度則只占鈾系的1.25%，錒系的 γ -射線又都是一些1MeV以下的軟射線（表1.7），所以一般情況下是可以不考慮錒鈾系射線的影響的。

比較三個天然放射系，可以看出它們之間有如下一些共同特點：

1. 起始元素的半衰期很長，在 10^8 — 10^{10} 年之間，正因為這個緣故三個系列才能在自然界存在。同時，雖然它們在連續不斷地蛻變，但是它們的量實際上減少甚微，甚至是看不到減少的。

2. 每個系列都有一個氣態元素，它們的原子序為86，是氫的同位素，通常稱它們為射氣。鈾系的射氣是氫（ Rn ），半衰期 $T_{\text{Rn}}=3.825$ 天，釷系的射氣稱釷射氣（ Tn ），半衰期 $T_{\text{Tn}}=54.5$ 秒，錒系的射氣稱錒射氣（ An ），半衰期 $T_{\text{An}}=3.92$ 秒。

3. 三個系列的射氣的蛻變產物稱之謂放射性沉淀物，對鈾系說，氫的蛻變產物 RaA 、 RaB 、 RaC 、 RaC' 、 RaC'' 的壽命很短，稱氫的短壽蛻變產物，它能附着在各處，故又稱氫的短壽放射性沉淀物，而氫的蛻變產物 RaD 、 RaE 、 RaF 相對來說半衰期較長（如 $T_{\text{RaD}}=22$ 年），故稱謂氫的長壽放射性沉淀物。釷系和錒系的射氣的蛻變產物都是短壽命的。

4. 三個系列的射氣的蛻變產物A和產物C都可經二個分支蛻變，如 RaA 主要以 α 方式蛻變（蛻變率接近100%），其次以 β 方式蛻變（蛻變率占 $3 \cdot 10^{-2}\%$ ，即 β 蛻變量占 α 、 β 蛻變总量的 $3 \cdot 10^{-2}\%$ ）。伴隨着產物C的蛻變有強烈的 γ 輻射，因此，產物C是三個系列中的主要 γ 輻射體。

5. 系列中產物 C' 是最大能量的 α -輻射體，它們的蛻變產物D是鉛的同位素，其中只有 RaD 具有放射性。

銅 系

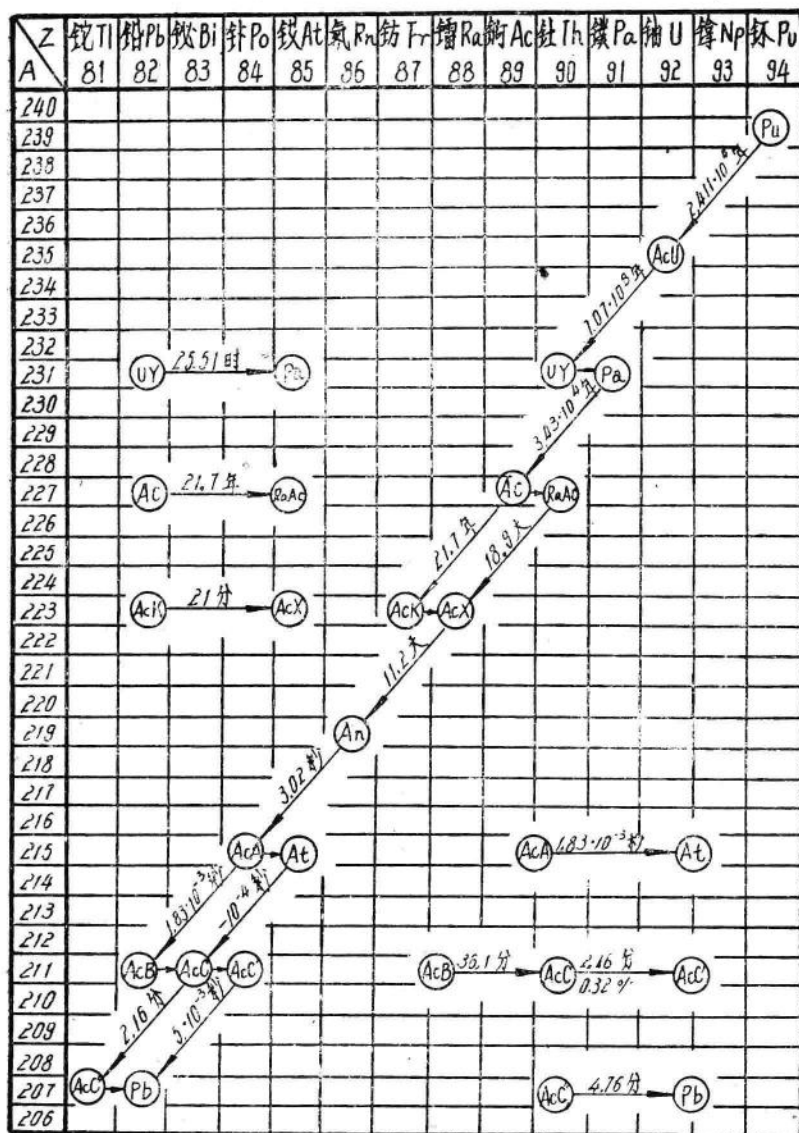


图 1·5 銅系蜕变图

6. 各系都以鉛的非放射性同位素告終，它們的原子量对应于鈾系、銅系和釷系分別為206、207和208。

7. 各系中元素的质量都服从一定的規律、釷系服从 $4n$ 、鈾系为 $4n+2$ 、銅系为 $4n+3$ 。

从上述第七点看来，似乎还应当有 $4n+1$ 系，1935年居里发现确实存在有这个系列。这系列中长寿元素是錒，故名錒系。

鐳 系

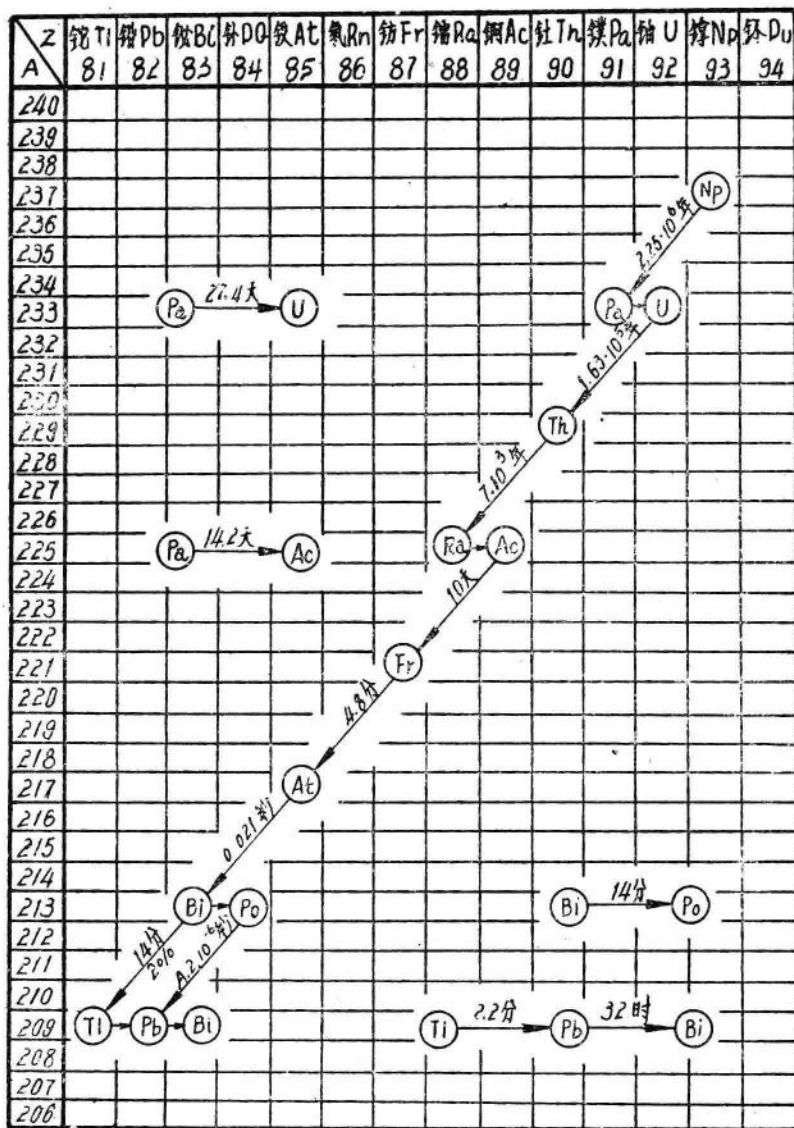


图 1.6 鐳系系统变图

${}_{93}\text{Np}^{232}$ 的原子序数大于铀的序数 (92)，把它划作超铀元素类。

第四系元素是借助于各种核子反应得到的，因为系列中没有一个元素的寿命能与地球的年龄相比，所以自然界并无它们的天然元素存在。研究鐳系后，知道鐳系有数个可能的起始元素：如 ${}_{90}\text{Th}^{233}$ 、 ${}_{92}\text{Th}^{230}$ 、 ${}_{94}\text{Pu}^{241}$ 、 ${}_{96}\text{Cm}^{241}$ 。我们不研究其他细节，只指出一点，系列中铀同位素 ${}_{92}\text{U}^{233}$ ，它与 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 同样有俘获中子后分裂为两个碎片并放出能量的性质。它不仅可以用超铀元素转变的方式得到，而且可以从钍的同位素 Th^{233} 经过双重 β -蜕变得到。 ${}_{90}\text{Th}^{233}$ 是用中子轰击 Th^{232} (钍系的起始元素) 得到

的。它的半衰期很长，可以保存很久。它可作为原子燃料。

其次，我們简单地討論一下自然放射性系列中主要的放射性同位素的特性。討論时按照化学性质来分类：

(1) 鈾 (序数92) 金属鈾按照化学活动性与鉄相似，在空气中很易氧化，并易溶于酸。自然界鈾的同位素有三个：

U I (238) $T_{UI} = 4.49 \times 10^9$ 年

U II (234) $T_{UII} = 2.522 \times 10^5$ 年

AcU (235) $T_{AcU} = 7.13 \times 10^8$ 年

它們在自然界的分布是按以下的比例：

$$U I : U II : AcU = 1 : \frac{1}{1700} : \frac{1}{140}。$$

从矿石中刚提出来的 U_3O_8 是 α -輻射源，当經過約一年的時間，U 与 UX_1 、 UX_2 、 UZ 达到平衡。 UX_1 、 UX_2 、 UZ 都为 β -輻射体。这时样品可认为是稳定的 β -輻射源。 ${}_{92}U^{238}$ 經過中子轟击后，經過二次 β -蛻变，变成錒的同位素 ${}_{94}Pu^{239}$ 、 ${}_{94}Pu^{239}$ 和 ${}_{92}U^{235}$ 有相同的性质，能吸收任何能量的中子后发生核分裂，并放出三个中子，可作为原子原料。

AcU 元素前面已經讲过，它不属于鈾系，而属于錒系的起始元素，但它永远与 U^{238} 生在一起。

AcU 的原子核是最早利用作为原子原料的。

(2) Ra (序数88) 有四个同位素：

Ra (226) $T_{Ra} = 1590$ 年

MsTh (228) $T_{MsTh} = 6.7$ 年

AcX (223) $T_{AcX} = 11.4$ 日

ThX (224) $T_{ThX} = 3.64$ 日

为数不多的鐳广泛地分布在自然界，不同的岩石中常常含有不同数量的鐳，可是浓度皆很少。鐳在自然界分布的特点以及它的短寿命蛻变产物均有着高的放射性，使得我們能够利用 γ -射綫来划分岩石。

鐳蛻变的結果形成气体产物——氡。把 Ra 放在封閉的容器中大約經過 40 天，鐳就与氡达到平衡，这时可把它作为 γ -射綫的标准源。比較标准源和样品的 γ -射綫强度可以确定样品中的 Ra 含量。

MsTh₁ 放出軟 γ -射綫，且强度不大。但是，MsTh₁ 的蛻变产物 MsTh₂ 以及以后的短寿衰变产物中的某些元素 (ThC、ThC*) 有着极高的放射性，因此封閉的 MsTh₁ 往往作为工业上的 γ -輻射源和标准源。应用 MsTh₁ 作为标准源时應該注意到 MsTh₁ 源的制作時間，因为 MsTh₁ 的半衰期不长，为 6.7 年，它的强度随時間而变化，从制成开始强度不断增加，大約經過三年，强度达到极大值，以后便一直减小。

(3) 氡 (Rn) 原子序数86，有三个同位素：

Rn (222) $T_{Rn} = 3.825$ 日

Tn (270) $T_{Tn} = 54.5$ 秒

An (219) $T_{An} = 3.92$ 秒