

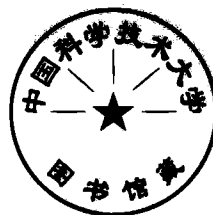
放射性勘探方法

成都地质学院三系

原子能出版社

放射性勘探方法

成都地质学院三系



原子能出版社

内 容 简 介

本书较系统地叙述了铀矿床普查与勘探阶段的各种放射性勘探方法。全书共十五章并有附录。内容包括基本理论、 γ 测量、射气测量、径迹测量、数据处理、 γ 测井、辐射取样和放射性分析等章节。

本书插图较多，叙述比较通俗易懂，尽量做到理论联系实际，注意反映当前新技术和新方法。可作为高等院校放射性物探专业的教材，也可供有关物探人员参考。

放 射 性 勘 探 方 法

成 都 地 质 学 院 三 系

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $28^{1/2}$ ·字数 675 千字

1978年12月北京第一版·1978年12月北京第一次印刷

印数001—6300 · 定价：2.60元

统一书号：15175·132

前 言

随着我国地质勘探事业的蓬勃发展，在铀矿床放射性勘探工作中，许多新技术和新方法正得到越来越广泛的应用。例如，各种放射性数据的电算处理、野外 γ 能谱测量、径迹测量……等等，在找矿工作中都获得了良好效果，使铀矿床放射性勘探出现了崭新的面貌。

为了适应飞速发展的形势，根据生产部门的意见和我们教学过程中发现的问题，对原书(《铀矿床放射性勘探》)进行了比较重大的修改。增添了径迹测量、航空伽玛测量、数据的电算处理和地质基础等部分。对原有内容也进行了适当的调整和增删，重视基础知识，注意理论联系实际，避免不必要的数学推导，以利阅读。

参加本书编写工作的有：李运祓、赵元洪、童纯涵、陈岚、华荣洲、刘彝君、周蓉生、石柏慎、洪英棠、王德荫等。

在编写过程中，得到北京三所和许多兄弟单位的大力支持和关怀，提供了许多实际资料。北京703航测队还参加了《航空伽玛测量》的编写工作。我们表示衷心感谢。

由于我们受思想水平、理论知识和实践经验的限制，错误和不当之处，一定不少。热烈欢迎阅读和使用本书的同志提出宝贵意见。

1977.3

目 录

第一部分 放射性勘探的基本知识

第 一 章	放射性概论	
§1.1	原子和原子核	3
§1.2	放射性衰变	6
§1.3	放射性系列	9
§1.4	天然放射性元素的射线谱	18
§1.5	放射性元素衰变的基本规律	27
§1.6	两种和多种放射性元素的衰减、积累规律	29
§1.7	衰变积累规律的应用	34
§1.8	中子及人工放射性	39
第 二 章	射线与物质的相互作用	
§2.1	α 粒子与物质的相互作用	42
§2.2	β 粒子与物质的相互作用	45
§2.3	β 射线在物质中的衰减	47
§2.4	γ 射线与物质的相互作用	51
§2.5	γ 射线在物质中的衰减	61
§2.6	γ 射线通过物质时谱成分的变化	65
第 三 章	放射性测量中常用的单位、标准源和防护	
§3.1	放射性测量中常用的单位	78
§3.2	标准源	83
§3.3	防护知识简述	84

第二部分 放射性普查

第 四 章	放射性普查的地质基础	
§4.1	放射性元素在自然界的分布	89
§4.2	铀、钍的地球化学性质和铀矿床的形成	93
§4.3	铀矿的分散晕及分散流	101
§4.4	放射性普查概述	105
第 五 章	航空伽玛测量	
§5.1	航空伽玛测量基本原理	107
§5.2	航空伽玛能谱测量	120
§5.3	航测工作方法	127
§5.4	航空伽玛测量结果解释及应用实例	134
第 六 章	地面伽玛测量	
§6.1	地面伽玛强度和测量立体角及覆盖层厚度的关系	140

§6.2	地面伽玛测量工作方法	143
§6.3	地面伽玛能谱测量	153
§6.4	伽玛编录	162
§6.5	仪器的“三性”检查	163
第 七 章	射气测量	
§7.1	射气的性质、射气晕的形成	172
§7.2	射气分布的理论计算	175
§7.3	射气测量工作的进行	187
§7.4	射气测量的资料整理	193
§7.5	影响射气异常的一些因素	195
§7.6	射气异常的处理与评价	197
第 八 章	径迹测量	
§8.1	固体径迹探测器的性质	207
§8.2	径迹测量找铀矿的工作方法	211
§8.3	径迹测量找矿的效果	217
§8.4	径迹测量找矿某些问题的讨论	220
第 九 章	地球化学找矿	
§9.1	铀的地球化学找矿方法	226
§9.2	地化样品中微量铀元素分析方法	237
§9.3	资料整理和成果解释	239
第 十 章	放射性普查数据的处理	
§10.1	观测数据的分布特性, 正常值及异常值的确定	243
§10.2	相关分析在普查找矿中的应用	251
§10.3	趋势面分析	258
§10.4	判别分析	269

第三部分 放射性勘探

第十一章	伽玛测井	
§11.1	沿钻孔轴线伽玛射线强度	281
§11.2	矿层厚度的确定	289
§11.3	根据伽玛测井曲线确定矿石中的铀含量	292
§11.4	伽玛测井换算系数 A 及其测定方法	295
§11.5	铁套管、水(或泥浆)吸收伽玛射线的校正	299
§11.6	有效平衡系数的校正	301
§11.7	伽玛测井的影响因素	303
§11.8	伽玛测井工作及质量评价	306
§11.9	伽玛能谱测井	312
§11.10	伽玛测井结果的电子计算机解释	317
第十二章	辐射取样	

§12.1	伽玛取样的基本原理	327
§12.2	确定矿层铀含量和厚度的方法	330
§12.3	伽玛取样的换算系数	333
§12.4	伽玛取样的工作方法	338
§12.5	伽玛取样的影响因素	342
§12.6	炮眼伽玛取样	343
§12.7	β - γ 综合取样	344
§12.8	伽玛能谱取样	348
第十三章 参数测定		
§13.1	辐射法测定矿石的体重	352
§13.2	铀矿石放射性平衡的研究	368
§13.3	射气系数的野外测定方法	376
第十四章 放射性分析		
§14.1	放射性分析的基本原则	382
§14.2	根据 β - γ 射线强度确定样品中的铀、镭含量	384
§14.3	测定镭含量和射气系数	396
§14.4	铀钍矿样品中铀、镭、钍含量的分析	399
§14.5	放射性分析中的统计误差及分析精度的估计	409
§14.6	放射性分析的质量检查	416
§14.7	其他分析方法简介	418
第十五章 应用物、化探综合找矿方法, 普查铀矿床实例		
附录一、常用物理常数		438
附录二、氡衰变表		439
附录三、几种物质的 γ 射线质量衰减系数($\frac{\mu}{\rho}$)表		441
附录四、几种物质的密度		442
附录五、几种常用同位素的 γ 常数 ($K\gamma$) 和半衰期 (T) 表		443
附录六、 α 、 β 、 γ 射线标准源		444
附录七、粉末和液体标准源		445
附录八、 e^{-x} , $\Phi(x)$ 和 $F(x)$ 函数表		446
附录九、 $G(x, y, u)$ 函数表		449
主要参考文献		450

第 一 部 分

放射性勘探的基本知识

第一章 放射性概论

§1.1 原子和原子核

一、原 子

现在已经发现的化学元素有106种。自然界存在的形态万千的各种物质，如空气、水、煤、铁、石油等等，均由这些元素所组成。

构成这些元素的最基本的单位称为原子。原子是在化学反应过程中保持元素化学性质的最小粒子。

原子很小，它的直径只有 10^{-8} 厘米左右，原子的质量也很小。氢原子质量为 1.6733×10^{-24} 克；铀原子的质量为 3.951×10^{-22} 克。

原子虽然很小，但原子是可分的，在这样微小的原子内部，存在着复杂的结构并不停地运动着。

原子的中心有一个核心，称为原子核；外围有一定数目的电子（称为束缚电子或轨道电子）围绕原子核运动。原子核的直径比起原子的直径来小得多，为 10^{-13} — 10^{-12} 厘米数量级，但是却集中了原子的绝大部分质量。以最简单的氢原子为例，它由氢原子核和一个束缚电子组成，见图1.1。电子的质量为 9.1×10^{-28} 克，氢核的质量为 1.67×10^{-24} 克，二者的比值近似为1/1840。

对于复杂的原子这个比值还要小些。例如，铀原子92个电子的总质量和铀核质量的比只有1/4717。

原子核带正电荷，束缚电子带负电荷，原子核和束缚电子之间以电磁场联系着。由于原子核带的电荷与束缚电子的电荷电量相等，符号相反，因此原子本身不显电性。每一种元素的原子，它的核所带的电荷数是固定不变的（因而束缚电子数也是固定的），元素周期表的次序即以此为根据排列，称为原子序数，以 Z 表示，例如：

氢： $Z = 1$

氦： $Z = 2$

铀： $Z = 92$

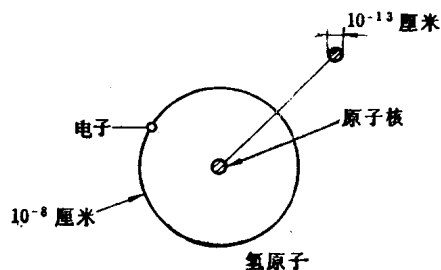


图1.1 氢原子的结构示意图

要正确了解束缚电子围绕原子核运动的规律，应该掌握量子力学的理论；而为了便于形象地说明问题，可以用“壳层”和“运动轨道”的概念来描述。绕核运动的电子，按其距核的远近可分成好几个层，而每一层上运动的电子又可划分为若干个运动轨道，每个轨道上最多只能有两个电子。靠核最近的称为K层，能量最低；次之称为L层，再远为M层、N层等等。各个层上的电子数目有一个限度，K层最多只能有两个电子，L层为8个，M

层为18个……。

束缚电子可以吸收外来的能量，从能量较低的轨道跃迁至能量较高的轨道，这种现象称为原子的激发。

当吸收的能量很大，使得轨道上的电子能够脱出原子核的吸引而自由运动时，则称为电离。这时原子因失去部分电子而显电性，称为离子。

二、原子核

直径为 10^{-13} — 10^{-12} 厘米数量级的原子核，是由更小的粒子——质子和中子——组成。

1. 质子 通常以符号“p”表示，它带的电荷量和电子带的电荷量相等，但符号相反。它的质量为 1.6726×10^{-24} 克，是电子的1840倍。原子核所带的电荷数由质子的数目决定，因此原子序数 Z 就表明了原子核中质子的数目。

2. 中子 通常以符号“n”表示，中子不带电，质量为 1.6749×10^{-24} 克，比质子略为重一些。中子一般束缚在原子核中，不能独立地稳定存在，只是在原子核受到外来粒子的轰击而引起变化时，才从核里释放出来。

中子和质子统称为核子，原子核内质子和中子之和称为核子数。如以 N 表示中子数，以 A 表示核子数，显然 $A = Z + N$ 。后面将要提到，通常又把 A 叫做质量数。

中子和质子的数目构成了原子核的主要特征，于是我们可以用下面简单的符号来表示原子核。



X ——元素的化学符号

例如，氢原子核只由一个质子组成，铀原子核由92个质子和 146 个中子组成，它们可分别表示为



因为元素的化学符号表明了元素在周期表中的位置，可以直接查出 Z ，所以有时也省略左下角的符号，而表示为



3. 核力 由质子和中子组成原子核，中子不带电，质子带正电。在电学中我们知道，带电物体具有“同性相斥”的性质，那么质子与质子间距离那样近，斥力那样大，为什么质子能紧密地结合在原子核里而不散开呢？原来在原子核内，除了质子之间有静电斥力之外，在中子与中子、质子与质子、中子与质子之间还有一种很强的作用力，称为核力，它使核子互相吸引在一起。核力的特点是作用力强而力程短，只在 10^{-13} 厘米范围里才有作用，超过这个范围，核力的作用就微不足道了。

质子、中子、电子是原子结构中的基本粒子，基本粒子是不是构成物质最小的极限呢？列宁在《唯物主义与经验批判主义》中预言：“电子和原子一样，也是不可穷尽的”。辩证唯物主义认为，基本粒子不是构成物质最小的极限，而应把它们看作是和分子、原子、原子核一样的一个新的层次，它们各自都包含着新的矛盾，有各自的内部结构和特性。

三、能级与能谱

1. 原子的能级 原子中束缚电子绕核运动有一定的轨道，相应原子处于一定的能量状态。每种原子束缚电子的数目和可能的运动轨道都是一定的，因此每一原子只能在一

定的、不连续的一系列稳定状态中,这一系列稳定状态,可用相应的一组能量 W_i 来表征,称为原子的能级。

处于稳定状态的原子,不放出能量。当原子由较高的能级 W_L 过渡到较低的能级 W_K 时,相应的能量变化 $\Delta W = W_L - W_K$,便以发射光子的形式释放出来。

$$h\nu = W_L - W_K, \quad \nu = \frac{W_L - W_K}{h}$$

式中 h ——普朗克常数,等于 6.6262×10^{-27} 尔格·秒;

ν ——光子的频率;

$h\nu$ ——光子的能量。

可见,光子的频率完全由能级之差决定。

将某种原子发射的各种频率的光子按波长排列起来(也就是按能量排列),便构成了该种原子的发射光谱。原子的光谱也就是原子的能谱。

在原子光谱中,可以分为两个类型:第一,价电子在外部壳层各轨道之间跳跃时所产生的光谱称为光学光谱。例如,若价电子原来位于 N 层,当它在 N, O, P, Q……等外部壳层之间跳跃时,就发生光学光谱。这种外部跳跃,原子的能量变化较小,发出的光频率较低,一般在可见光区或其附近。地质工作中用来分析岩矿元素的光谱分析,就是利用这一部分。第二,电子在 K, L, M……等壳层中间跳跃时,所产生的光谱称为线状伦琴光谱,这时原子的能量变化大,发射的光子频率高。线状伦琴光谱由内壳层电子的跳跃所引起,而内壳层电子离核很近,所以这种光谱与原子核电荷之间有密切关系,称为标识伦琴射线(特征 X 射线)。近年来迅速发展的 X 射线荧光分析,便是利用这种射线进行分析鉴定工作的。

2. 核能级 组成原子核的中子和质子,也是在运动变化之中。运动状态不同,相应的能量状态也不同。目前对于原子核的结构,虽然还不像原子的结构那样了解得很清楚,但是原子核如同原子一样有不同的能级,能级之间发生跃迁,辐射光子等,却早已为实验所证实,并且许多原子核的能级也已经用实验方法确定出来了。

一个原子核最低的那种能量状态叫“基态”,比基态高的能量状态称为“激发态”。激发态包括第一激发能级,第二激发能级……等等。形象地表示如图1.2。

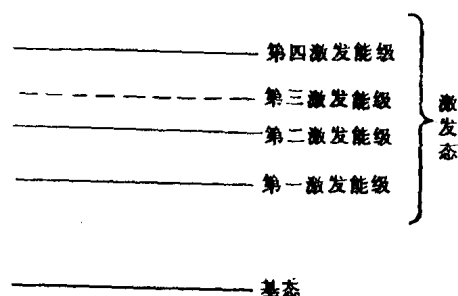


图1.2 核能级示意图

如果原子核的运动状态处在激发态的某个能级上,这种状态是不稳定的,它往往通过放出光子从激发态回到基态。核能级变化放出的光子,波长很短、能量很大,核物理中把这种光子称为 γ 光子或 γ 射线。某种原子核发射的各种能量 γ 光子的集合,便是该种核的 γ 能谱,这是放射性勘探中经常利用的。

四、“原子质量单位”

用克来表示质子、中子、电子、原子等的质量,单位太大,使用很不方便,于是采用

了“用原子称原子”的办法。现在是把碳原子的质量作为标准。将 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 作为质量单位,称为原子质量单位,以字母“amu”表示。于是 ^{12}C 原子的质量是 12amu , $1\text{amu} = 1.660531 \times 10^{-24}$ 克,其它原子的质量可以同 ^{12}C 的原子质量来作比较。按照原子质量单位,质子、中子、电子的质量分别为:质子为 1.007276 ;中子为 1.008665 ;电子为 5.4859×10^{-4} ,可以看出质子和中子的质量非常接近于1。

由于原子核是由一定数目的质子和中子组成,而原子核的质量粗略地说等于它所包含的质子和中子质量之和,所以每种原子核的质量用“原子质量单位”表示非常接近于一个整数,这个整数正好就是原子核的核子数 A ,因此 A 又叫做质量数。

核物理中常用电子伏(eV)作为能量单位,1电子伏等于一个电子经过电位差为一伏特的电场所获得的能量。

1 电子伏 = 1.602×10^{-12} 尔格

1 千电子伏 = 10^3 电子伏, 1 兆电子伏 = 10^6 电子伏。

§1.2 放 射 性 衰 变

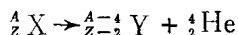
自然界中,有一些元素的原子核能够自发地发生变化,由一个元素的原子核,变为另一个元素的原子核,变化时伴随放出射线,这种现象称为放射性衰变,这些元素称作放射性元素。放射性元素最初是在原子序数大于82的重元素(铀、镭、钍、钷)中发现的,以后在某些原子量不大的元素(钾、铷等)中也发现有放射性的同位素。现在已经知道,元素周期表中所有元素都有放射性的同位素,不过这些放射性同位素大部分不是天然的,而是用核反应方法得到的。凡用人工方法得到的放射性同位素叫做人工放射性同位素,在自然界存在的放射性同位素,称为天然放射性元素。

下面简单介绍一下核衰变的几种类型。

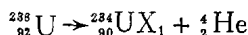
一、 α 衰变

不稳定的核自发地放出 α 粒子而变成另一个核,称为 α 衰变。 α 衰变时从原子核放出的 α 粒子实际上就是氦原子核(^4_2He),由二个中子和二个质子组成,带二个正电荷。

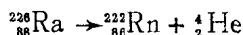
放射性同位素在 α 衰变之后,它的原子质量数 A 降低4个单位,原子序数 Z 降低二个单位,若以 X 代表母元素, Y 代表衰变子体,则 α 衰变可用下式表示:



$^{238}_{92}\text{U}$ 经过 α 衰变,变成 $^{234}_{90}\text{U}$,其表示式可写为:



同一种放射性元素放出的 α 粒子能量是一定的。有的元素放出单一能量的 α 射线,有的元素放出几种不同能量的 α 射线。当 α 衰变不只放出一种能量的 α 射线时,伴随有 γ 射线放出。例如:镭($^{226}_{88}\text{Ra}$) α 衰变后变成氡($^{222}_{86}\text{Rn}$),

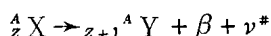


镭放出两种不同能量的 α 射线,一种是能量为4.785兆电子伏的 α 粒子(占总强度的95.0%),形成的氡核处于基态。另一种是能量为4.602兆电子伏的 α 粒子(占总强度的5.0%),而形成的氡核处于激发状态,然后很快跃迁到基态而放出0.183兆电子伏的 γ 射

线 (见图1.3)。

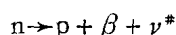
二、 β 衰变

放射性元素 β 衰变时放出的 β 粒子, 实际上就是电子, 它的静止质量等于电子质量, 带有一个负电荷。因为 β 粒子的质量比核的质量小很多很多, 所以 β 衰变前后母体与子体的质量数相同, 但子体原子序数提高一位。 β 衰变可用下式表示:



式中 ν^* 代表中微子, 是质量十分微小 (电子质量的1/2000) 的中性粒子。

β 衰变是母体核中一个中子 (n) 转变成一个质子 (p) 的结果可用下式表示:



β 衰变时放出的能量被衰变后的生成物 (即子体)、 β 粒子及中微子共同带走。由于三个粒子发射方向所成的角度是任意的, 所以带走的能量也是不固定的。子体核的质量远远大于 β 粒子及中微子, 相比之下, 它带走的动能可以忽略不计, 因而 β 衰变放出的能量在 β 粒子和中微子之间分配。实际测到的 β 射线谱如图1.4, 从图中可以看到: (1) β 粒子的能量可以由零到最大值, 形成一个连续能谱。(2) 能谱曲线有个最大的能量 E_0 , 一般图表上所给的 β 粒子能量都是指 β 粒子最大能量 E_0 。(3) 能量约为 $\frac{1}{3}E_0$ 的 β 粒子强度有一极大值。

图1.5列出了 ${}^{137}\text{Cs}$ 的 β 衰变图。

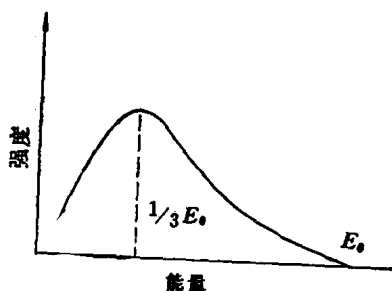


图1.4 β 粒子的能量分布曲线

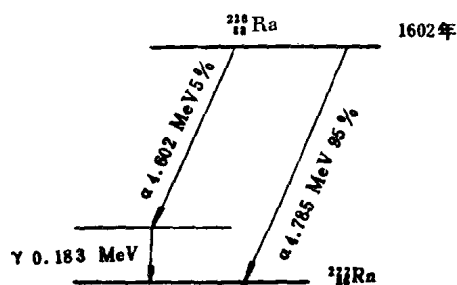


图1.3 镭的 α 衰变图

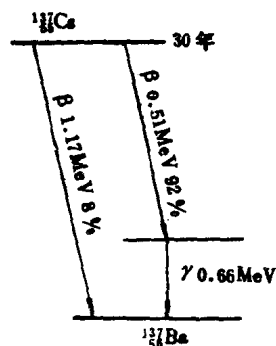
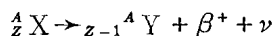


图1.5 ${}^{137}\text{Cs}$ 的 β 衰变图

β 衰变时, 往往放出 γ 射线, 其原因是 β 衰变后形成的子体元素原子核处于激发状态, 原子核由激发状态回到基态时放出 γ 射线。有的元素放出几组不同能量的 β 射线, 子体原子核有几种不同能量激发状态, 因而伴随 β 衰变产生几种能量的 γ 射线, γ 射线是子体原子核不同能级跃迁产生的, 其能量是能级之差值。与 α 衰变时放出的 γ 射线相比, β 衰变放出的 γ 射线强度大得多, 天然放射性元素放出的几组主要的 γ 射线几乎都是伴随 β 衰变产生的。

三、 β^+ 衰变

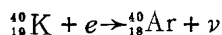
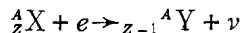
天然放射性元素只见到 β 衰变, β^+ 衰变只是在人工放射性同位素衰变时才有。 β^+ 衰变时放出 β^+ 粒子 (又称正电子或阳电子), 是一种质量和电子相等, 但带一正电荷的粒子。 β^+ 衰变可以看作是核里的一个质子转变成为中子而放出 β^+ 粒子和中微子。元素作 β^+ 衰变时母体和子体具有相同的原子质量数 A , 而子体原子序数则少了一位, 其表示式如下:



β^+ 粒子的能谱也是连续的。 β^+ 粒子被介质阻止而丧失动能时, 它将和介质中的电子相结合, 而辐射二个方向相反、能量为 0.51 兆电子伏的光子, 此种辐射称为阳电子湮没辐射 (光化辐射)。在 β^+ 衰变时, 也伴随放出 γ 射线。

四、电子俘获

电子俘获是指原子核俘获了一个轨道电子, 使核里的质子转变成中子和放出中微子, 产生的子体原子核的原子序数减少一, 质量数不变, 表示式如下:



因为 K 层电子靠近核, K 电子被俘获的几率比其他壳层电子都大 (自 L 层吸收电子的可能性比 K 层小 100 倍左右), 所以这种衰变也叫做 K 电子俘获 (简称 K 俘获)。电子俘获只放出一个中微子, 所以中微子的能量是单一的。

电子俘获后, 新形成的子体原子的 K 层电子产生了空位, 这个空位由外层电子 (如 L 层电子) 来充填, 当能级较高的轨道电子 (如 L 层电子) 可能跃迁充填 K 层电子空位时, 多余能量以特征 X 射线放出; 这个多余的能量也可以传给 L 层电子使之成为自由电子, 所谓俄歇即电子, 它的能量也是单一的。有的电子俘获后形成的子体处于激发状态而放出 γ 射线。

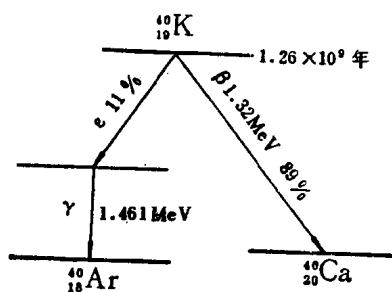


图 1.6 ${}^{40}\text{K}$ 衰变图

有许多种放射性同位素同时具有 β^+ 衰变和电子俘获衰变, 有少数元素同时具有 β 衰变和电子俘获。例如自然界中分布较广、在放射性测量工作中经常要遇到的 ${}^{40}\text{K}$, 就同时有 β 衰变及电子俘获 (见图 1.6), ${}^{40}\text{K}$ 有 89% 经 β 衰变而形成 ${}^{40}\text{Ca}$, 有 11% 经电子俘获放出 γ 射线而形成 ${}^{40}\text{Ar}$ 。 ${}^{40}\text{Ca}$ 及 ${}^{40}\text{Ar}$ 均是稳定同位素。

从以上几种衰变方式, 自然地会想到这样的问题, 原子核发生 β 和 β^+ 衰变时, 放出的正负电子是从哪里来的? 发生 K 俘获后, K 层的这个电子又到那里去了呢? 不能认为中子是由质子与电子组成的复杂粒子, 同样也不能认为质子是由中子与正电子组成的。发生上面几种衰变时, 不是放出 (或保存) 现存的粒子, 而是在 $n \rightleftharpoons p$ 转化时新的粒子产生 (或原来的粒子 “消失” 了)。这种情况与原子放出光子相似, 在放出光子的时候, 不是放出在原子中现存的光子, 而是由于被激发电子的能量转变为辐射时所产生的光子。

五、同质异能跃迁

前面已讨论了在 α 衰变、 β 衰变和电子俘获时通常都伴随放出 γ 射线， γ 射线是原子核由激发态回到基态时，不同能级跃迁而产生的。

一般情况下原子核激发状态存在时间十分短（一般为 10^{-13} 秒），差不多马上跃迁到基态而放出 γ 射线，不能作为独立的核素。有的衰变子体原子核的激发状态存在时间较长（半衰期大于0.1秒），则可作为独立的核素。它衰变时放出 γ 射线而形成新的核素（同质异能素）。这种衰变方式称为同质异能跃迁。同质异能素（同核异能素）是具有相同质量和相同电荷的原子核，而其半衰期则有明显差异。例如天然放射性元素系列中，镤（ ^{231}Pa ）就有一对同质异能素—UX₂和UZ。UX₂以99.85%进行 β 衰变，变成U II半衰期为1.17分。UX₂有0.15%的核先放出 γ 射线（0.396MeV）变成UZ，UZ又作 β 衰变而成U II，UZ的半衰期是6.7小时。 ^{231}Pa 的衰变图见图1.7。

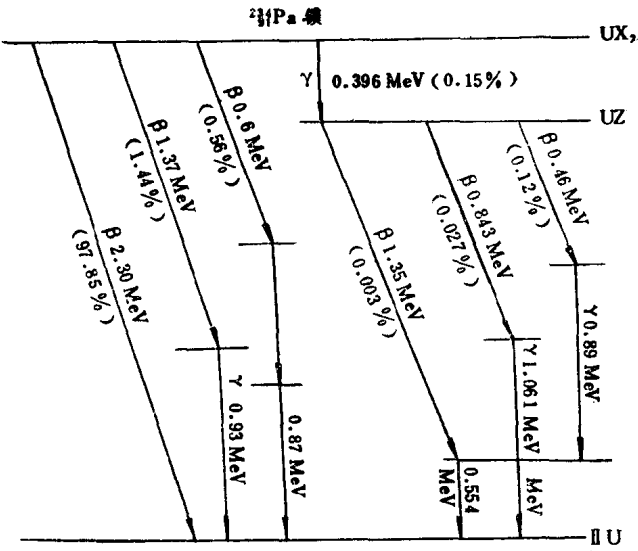


图1.7 ^{231}Pa 的衰变图

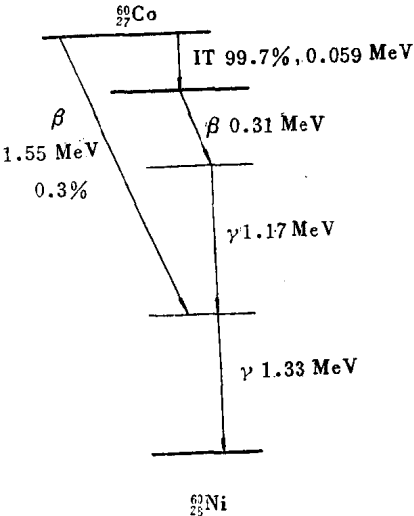


图1.8 ^{60}Co 衰变图

人工放射性元素中同质异能素较多，例如 ^{60}Co ，其衰变图见图1.8。

激发状态的原子核回到基态时，还可以发射内转换电子，而不放出 γ 射线。原子核从高能级跃迁到低能级，多余能量使壳层电子（K 层或 L 层）脱离原来轨道，形成单能内转换电子。在发生内能转换时，不放出 γ 光子。

§1.3 放射性系列

在自然界存在的铀矿石中，常常同时含有镭、钍、钋、铋等元素的同位素。研究这些元素的共生原因，发现这些放射性元素相继衰变形成系列。系列中有个起始的元素，经过放射性衰变，变成一个新的元素常称衰变子体，这个元素仍是不稳定的，继续进行放射性衰变，直到生成稳定同位素为止。

自然界里有三个放射性系列，即铀 (U) 系，钍 (Th) 系和锕铀 (AcU) 系。用人工方法能得到镎 (Np) 系。放射性系列中元素的原子序数都大于81。

除上述成系列的天然放射性元素外，还有 180 多种原子序数中等，不成系列的天然放射性元素存在于自然界，它们经过一次衰变后即成稳定元素，如钾⁴⁰K，铷⁸⁷Rb 等，在这里选择部分元素附带介绍一下。

一、铀系 (或称铀-镭系)

铀系的起始元素为²³⁸U，它的半衰期为 4.47×10^6 年，经过 α 衰变后变成 UX₁ (²³⁴Th)。UX₁ 为钍的同位素，它经 β 衰变而成 UX₂，UX₂ 为镤的同位素，它有二种衰变方式，其大部分原子核经 β 衰变而成 UII (²³⁴U)，其中有一小部分 (占0.15%) 的原子核先放出 γ 射线成 UZ。UZ 与 UX₂ 为一对同质异能素。UZ 再经 β 衰变而成 UII。UII 的半衰期很长，UII 以后是一连串的 α 衰变，先衰变成 Io (²³⁰Th)，Io 经 α 衰变成 Ra，Ra 衰变成气体放射性元素 Rn。Rn 经 α 衰变成 RaA (²¹⁸Po)，RaA 有二种衰变方式，其大部分 (99.97%) 经 α 衰变而成 RaB (²¹⁴Pb)，极少部分 (0.03%) 以 β 衰变的形式衰变为²¹⁴At。At 的寿命很短，半衰期为 2 秒以 α 衰变的形式变成 RaC (²¹⁴Bi)。RaC 的极大部分是由 RaB 经 β 衰变而成的，RaC 半衰期为 19.7 分，它的绝大部分 (99.96%) 经 β 衰变而成 RaC' (²¹⁴Po)，RaC' 的半衰期极短，它经 α 衰变而成 RaD (²¹⁰Pb)，极少部分 RaC (0.04%) 经 α 衰变成 RaC'' (²¹⁰Tl)，RaC'' 的半衰期为 1.32 分，它经 β 衰变也变成 RaD。RaA，RaB，RaC，RaC' 及 RaC'' 它们的寿命都很短，称它们为 Rn 的短寿放射性子体。RaD 为 Pb 的同位素，它的半衰期为 22 年，经 β 衰变方式变成 RaE (²¹⁰Bi)，RaE 经 β 衰变成 RaF (²¹⁰Po)，最后 RaF 以 α 衰变方式衰变成 Pb 的稳定同位素 RaG (²⁰⁶Pb)。因为 RaD，RaE，RaF 的寿命比较长，所以称它们为 Rn 的长寿放射性子体。整个系列的衰变如图 1.9 所示，衰变常数和半衰期列于表 1.1。