



普通高等教育地质矿产类规划教材

核方法原理及应用

周蓉生

编著

П. А. 瓦冈诺夫

地质出版社

普通高等教育地质矿产类规划教材

核方法原理及应用

周蓉生 П.А.瓦冈诺夫 编著



地质出版社

(京)新登字085号

内 容 摘 要

本书是中方作者周蓉生副教授与圣·彼得堡大学地质系教授И. А. 瓦冈诺夫, 为我国大学生编写的一本核方法方面的教材。全书分上、下二篇。第一篇讲述了核方法的理论基础, 具有起点高、物理概念严谨, 并将地质、地球物理与地球化学紧密结合的特点; 第二篇核方法的应用部分, 所涉及的方面覆盖了地学各个领域。

本书除作为高等学校教材外, 亦可供科研和生产人员参考。

普通高等教育地质矿产类规划教材

核方法原理及应用

地质矿产部教材编辑室编辑

周蓉生 И. А. 瓦冈诺夫 编著

*

责任编辑: 刘金意 林清溪

地质出版社出版

(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发行

*

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 14.25 字数: 325000
1994年3月北京第一版 • 1994年3月北京第一次印刷

印数: 1—1400册 定价: 6.95元

ISBN 7-116-01496-9/P·1214

前 言

核技术是当代的高新科学技术之一，它在国民经济各领域中的广泛应用是国家现代化的一个重要标志。

核方法是指核技术在地学中应用的各种方法的总称。由于学科发展的种种原因，目前核方法有几种不同的名称：以测定天然放射性元素为目标的称为放射性勘探或放射性法；以测定人工放射性辐射为目的称为核子地球物理或核物探等等。目前国内出版的教材，是按以上两种分类分别编写的。然而，随着核方法的深入发展，其应用领域不断扩大，现有教材已不能全面反映学科发展现状。本教材将天然放射性方法及人工放射性方法合并在一起论述，总称为核方法，从而保持了教材的完整性、系统性。

核方法是应用核辐射及核反应原理，测定地质演化过程中元素的分布规律及含量变化特征，以解决地质理论研究和找矿勘探提出的有关问题的科学。按现有的学科分类，它是应用地球物理学的一个分支学科。但因其测定的直接对象是化学元素，因而可以认为，核方法是地球物理与地球化学两者的边缘学科；或认为核方法具有浓厚的化（学）探（矿）色彩。它的发展是与核物理学、物理学、电子技术、计算机技术、地球物理、地球化学等学科的发展紧密相连的。

核方法形成于半个多世纪以前，当时地质工作者需要快速及有效地普查勘探铀矿床，放射性测量从实验室进入了生产实际，出现了射气测量技术；并研究了地面、汽车、航空及井下的 γ 测量技术及 γ 能谱测量技术。

本世纪40年代初期，由于石油地质工作的需要，出现了中子-伽玛方法，以评价岩石的孔隙度及划分油水界面。它宣告了人工放射性方法的诞生，继而出现了伽玛-伽玛方法、X荧光方法及各类中子方法等等。

经过数十年来广大核方法工作者的努力，国内外的动态已表明：核方法不仅能找寻放射性矿产，而且能用于解决贵金属、稀有、稀土金属乃至非金属的找矿工作，并在基础地质研究、普查油气藏、找基岩地下水、解决工程地质问题等方面逐渐被采用。广而言之，核方法的应用领域已从地球科学扩大到环境科学、材料科学、矿山选冶等部门，并取得明显的效果，受到人们的新的关注。

本教材的中方作者，1989年在原苏联访问期间，研究了正在修订出版的各种版本的核方法教材，认为有关教材有许多可借鉴之处，并与圣·彼得堡大学地质系教授П.А.瓦冈诺夫博士（他参与撰写的原苏联高等学校教科书《核地球物理学原理》获原苏联国家优秀著作奖）商定共同撰写一部教材，供中国大学生、研究生使用。

本教材分为原理篇及应用篇，篇幅各半。原理篇（前六章）重点放在基本理论及基本概念论述，避免繁琐的公式推导。为适应于地质类不同专业的需要，也略去了各种方法的具体操作步骤。应用篇选录了国内外最新发表的应用实例，所涉及的方面几乎覆盖了地学各有关领域。各方法的应用条件及特点在应用篇的不同章节中反复强调，以加深理解。作者试图让读者对核方法的各种方法以及应用的各个领域得到完整的认识。上述的编写意

图是否得以实现、是否臻于完善，尚请读者鉴别。

本教材的第一、五、六、七章由 П. А. 瓦冈诺夫编写。周蓉生编写其余各章及翻译全部俄文原稿，并负责统编全书和选编附录。

在本书编写过程中，章正刚教授校对了俄文译稿；李淑仪、贾文懿教授详细审阅了全部书稿，他们提出了宝贵的意见和建议；魏智如为本书清绘了全部图件。在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，无论在体系确定上，或者在内容选择上均是一种新的尝试，书中欠妥之处在所难免，恳请专家和读者批评指正。来函请寄四川省成都理工学院核工系（邮编 610059）。

作者

一九九三年八月

物理常数

符 号	名 称	值
u (或 $a.m.u.$)	原子质量单位	$1.660 \times 10^{-27} \text{kg}$
c	真空中的光速	$2.99793 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
e	元电荷 (一个质子的电荷)	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
h	普朗克常数	$6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
$\hbar$	玻耳兹曼常数	$1.38066 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
m_e	电子静止质量	$9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$
$m_0 c^2$	电子静止能量	0.511MeV
L	阿伏加德罗常数	$6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
R_∞	里德伯常数	$1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$

符 号 表

符 号	名 称
α	α 粒子
A	质量数; 原子量; 放射性活度
$\text{\AA}$	埃 (10^{-10}m)
A°	灰分
a	运动加速度
a	年
β	β 粒子
β^+	正电子
b	靶恩 = 10^{-28}m^2 , 截面单位
Bq	贝可勒尔, 放射性活度单位 $1 \text{Bq} = 1 \text{s}^{-1}$
cm	厘米
C	平衡系数
Ci	居里 ($1 \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$)
D	扩散系数; 吸收剂量
d	吸收厚度; 距离
ϵ	结合能; 探测效率
E	能量 ($\text{MeV}, \text{keV}, \text{eV}$)
eV	电子伏 ($1.602 \times 10^{-19} \text{J}$)
ϕ	中子通量, 孔隙度
FWHM	半高宽
I'	核能级宽度, 核共振宽度

符 号	名 称
γ	γ 射线
g	克
H、h	高度
h	小时
I	γ 射线照射量率；共振积分截面；计数率
h	波尔兹曼常数
K	K壳层
K	γ 常数；气体放大倍数
K_{ab}	K壳层电子吸收限
keV	千电子伏 (10^3eV)
kg	千克
λ	放射性衰变常数 (s^{-1})；波长；平均自由程(cm)
L	L壳层
L	升，探源距
L_{ab}	L壳层电子吸收限
L_s	慢化长度
L_T	热化长度
L_D	扩散长度
μ	线吸收系数 (cm^{-1})
μ_m	质量吸收系数 ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
M	原子质量
MeV	兆电子伏 (10^6eV)
min	分
m	质量
ν	频率
N	计数率
n	中子
p	质子
P	冲量
q	分支比
R	粒子的射程；半径；距离
r	距离
Σ	宏观平均截面；电子结合能
σ	截面；标准误差
σ_{PH}	光电效应截面
σ_T	汤姆逊效应截面
σ_C	康普顿效应截面
σ_P	形成电子对效应截面

符 号	名 称
σ_e	电子的康普顿散射截面
σ_{el}	中子的弹性散射截面
σ_{uel}	中子的非弹性散射截面
$\sigma(n, \gamma)$	(n, γ) 反应截面
$\sigma(n, a)$	(n, a) 反应截面
$\sigma(n, p)$	(n, p) 反应截面
$\sigma(n, n')$	(n, n') 反应截面
$\sigma(n, 2n)$	$(n, 2n)$ 反应截面
s	秒
θ	同位素丰度
τ	平均寿命
T	半衰期
t_s	慢化时间
t_T	热化时间
t_i	辐照时间
t_c	冷却时间
v	粒子运动速度
W	平均电离电位; 荧光产额, 湿度
w_B	物质B的质量分数(%或‰; 10^{-6}), 亦为元素含量
Ω	立体角
η	射气系数; 灵敏度
ξ	激发效率; 平均对数能量亏损
z_{eff}	有效原子序数

目 录

前言

物理常数及符号表

第一篇 核方法原理

第一章 方法的理论基础

§ 1.1 预备知识	1
§ 1.2 放射性衰变及放射性核素	2
一、衰变类型及衰变规律	2
二、天然放射性核素	5
三、人工放射性核素	5
§ 1.3 带电粒子与物质相互作用	6
一、重带电粒子通过物质	6
二、轻带电粒子通过物质	8
§ 1.4 电磁辐射与物质相互作用	10
一、光电效应	10
二、康普顿效应	12
三、形成电子对效应	13
四、相互作用的总吸收系数	14
五、其它作用过程	14
§ 1.5 中子与物质相互作用	16
一、中子与物质相互作用的一般特征	16
二、弹性散射	18
三、非弹性散射	19
四、中子的倍增反应	20
五、发射带电粒子的反应	20
六、辐射俘获	21
七、中子作用下的核裂变	22
八、快中子在均匀介质中的慢化	23
九、中子的热化	24
十、热中子在均匀介质中的扩散	24
十一、热中子的非稳恒扩散	25
§ 1.6 核辐射探测器	26
一、电离室及气体正比计数管	27
二、闪烁计数器	28
三、半导体探测器	28
四、其它类型探测器	29

§ 1.7 放射性测量中的数理统计学	30
一、放射性测量中的统计分布及统计误差	30
二、平均值	31
三、元素的分析检出限	32
四、测量数据的检验	33
五、相关分析及回归分析	35
§ 1.8 放射性测量常用单位	38
一、国际单位制 (SI) 确定的单位	38
二、暂时保留且与国际单位制并用的单位	39
第二章 天然放射性方法	40
§ 2.1 方法的物理及地质基础	40
一、天然放射性系列及其射线谱	40
二、放射性平衡	42
三、应用天然放射性方法的地质前提	43
§ 2.2 γ 方法	47
一、方法的基本原理	47
二、航空 γ 测量	49
三、地面 γ 测量	50
四、 γ 取样	51
五、 γ 测井	52
§ 2.3 α 方法	53
一、氡在岩层中迁移的有关问题	53
二、氡的瞬时测量	53
三、 α 径迹测量	54
四、钋-210法	54
五、 α 卡法及 α 杯法	54
§ 2.4 其它方法	56
一、活性炭测量	56
二、热释光法	57
第三章 X 荧光方法	58
§ 3.1 方法原理	58
一、X 荧光的产生及特征 X 射线谱的结构	58
二、莫塞莱定律	59
三、X 荧光的激发方式及激发源	60
四、X 荧光的探测及改善能量分辨特性的方案	60
五、散射射线谱分布	63
六、X 荧光方法的基本公式	63
七、基体效应	64
§ 3.2 X 荧光测量	65
一、仪器的探头结构	66
二、工作方法简述	67
三、基体效应校正	68

§ 3.3	X 荧光测井	69
一、	钻孔测量条件及井液对 X 射线的影响	70
二、	X 荧光测井仪探管的结构特点	71
三、	低能区 ($E_K < 20 \text{ keV}$) 的 X 荧光测井	72
四、	中能区 ($20 \leq E_K \leq 50 \text{ keV}$) 的 X 荧光测井	72
五、	高能区 ($E_K > 50 \text{ keV}$) 的 X 荧光测井	74
§ 3.4	X 荧光取样	74
§ 3.5	X 荧光分析中的新方法、新技术简介	75
一、	全反射 X 荧光分析 (TRXF)	75
二、	晶体分光 X 射线谱仪的应用	76
第四章	伽玛-伽玛方法	77
§ 4.1	方法的地质及物理基础	77
一、	岩石的密度	77
二、	有效原子序数	77
三、	伽玛射线通过物质时强度的变化规律	80
四、	伽玛射线通过物质时谱成分的变化	80
§ 4.2	密度 γ - γ 方法	82
一、	窄束 γ 射线吸收法	82
二、	宽束 γ 射线吸收法	83
三、	散射 γ 射线法	83
§ 4.3	选择 γ - γ 方法	85
一、	选择 γ - γ 方法	85
二、	微 γ - γ 测井	87
第五章	γ 共振方法	89
§ 5.1	方法的特点	89
§ 5.2	在矿物学和地球化学中的应用	91
第六章	中子方法	93
§ 6.1	中子-中子方法	93
§ 6.2	中子-伽玛方法	93
一、	方法原理	94
二、	中子-伽玛分析	94
三、	中子-伽玛测井	95
§ 6.3	中子活化方法	96
一、	活化分析方程式	96
二、	中子源	97
三、	中子活化分析	98
四、	野外中子活化测量	102
五、	中子活化测井	103
§ 6.4	伽玛-中子方法	104
一、	野外光中子测铍	104
二、	伽玛-中子测井	105

§ 6.5	脉冲中子方法	106
一、	脉冲中子-中子测井	107
二、	脉冲中子-非弹性散射伽玛测井	110
三、	脉冲中子-伽玛测井	111
四、	脉冲中子活化测井	112
五、	瞬发及缓发中子测井	112
第二篇 核方法在地学研究中的应用		
第七章	核方法在基础地质研究及地球化学研究工作中的应用	114
§ 7.1	地质填图中的应用	114
一、	应用核方法的依据	114
二、	核方法的选择	115
三、	应用放射性测量进行地质填图的实例	115
§ 7.2	测定稀有、稀土元素克拉克值	119
一、	克拉克值及其研究意义	119
二、	稀土元素克拉克值的变化	120
三、	中子活化分析方法是测定稀土微量元素克拉克值的一种最佳方法	122
§ 7.3	研究稀土元素的地球化学特征	124
一、	稀土元素地球化学的一般特征	125
二、	REE 的数据表示法	126
三、	中子活化分析测定稀土元素含量	127
四、	稀土元素在地球化学研究中的应用	128
§ 7.4	研究热液型金-银矿化的特征	129
§ 7.5	研究铂族元素的地球化学特征	133
第八章	核方法在水文地质及工程地质中的应用	138
§ 8.1	利用天然放射性找寻基岩地下水	138
一、	基本原理	138
二、	蓄水构造附近放射性异常的特征	139
三、	放射性方法的选择	139
四、	应用实例	140
§ 8.2	岩石和土壤湿度及密度的测定	142
一、	中子方法测水分	142
二、	γ 法测密度	144
§ 8.3	工程地质及环境地质中的应用	145
一、	工程地质中的应用	145
二、	环境地质中的应用	147
第九章	核方法在油气普查及勘探工作中的应用	148
§ 9.1	油气普查	148
一、	找油气机理的探讨	148
二、	核方法的选择及数据处理原则	150
三、	应用实例	150

§ 9.2 在地层对比及储集层特性研究中的应用	152
一、划分岩性及地层对比	152
二、储集层中粘土分布的研究及计算泥质含量	155
三、油田开采中射孔层位的选择	155
四、生油岩的评价	156
§ 9.3 岩层孔隙度的测定	158
一、密度 γ - γ 测井测定孔隙度	158
二、中子-中子测井测定孔隙度	158
§ 9.4 划分油、气、水界面	159
一、划分气液界面	159
二、划分油水界面	160
第十章 核方法在固体可燃有机岩矿产地质工作中的应用	162
§ 10.1 方法应用的地球物理前提	162
§ 10.2 划分煤及油页岩层位	163
§ 10.3 确定煤层及油页岩层的厚度及结构	165
§ 10.4 确定煤及油页岩的灰分	167
§ 10.5 测定煤中的含硫量	169
第十一章 核方法在金属及非金属矿产普查勘探中的应用	171
§ 11.1 黑色及有色金属矿床	171
一、铁、钛、锰、铬矿床	172
二、钨、钼矿床	174
三、铜、镍矿床	176
四、铅、锌矿床	178
五、锡矿床	179
六、锑、汞矿床	180
七、铝土矿床	181
§ 11.2 稀有、稀土、分散及放射性金属矿产	183
一、铌、钽、锆矿床	183
二、铍矿床	184
三、锂矿床	185
四、放射性金属矿床	186
§ 11.3 贵金属矿产	186
一、金、银矿床	186
二、金伯利岩中的金刚石矿床	192
§ 11.4 非金属矿产	193
一、硼矿床	193
二、磷矿床	195
三、萤石矿床	198
四、钾盐矿床	200
五、重晶石矿床	203
附录一 元素的K吸收限和主要的K系特征X射线	205

第一篇 核方法原理

第一章 方法的理论基础

§ 1.1 预备知识

自然界中的各种物质都是由原子构成，而原子又是由原子核及绕核运行的电子组成。随着科学的发展，人们发现质子和中子是组成原子核的基本粒子，并观察到原子核的质量总是小于组成原子核的质子、中子质量的总和。这种质量的亏损，表示原子核合成时，放出了能量（称之为结合能）以维持原子核的稳定。在原子核内质子数和中子数的比值是有一定规律的，含有过多中子或质子的原子核都是不稳定的。近代物理研究指出：微观粒子系统只能处于一系列不连续的、分立的稳定状态，这些状态分别具有一定的能量，能级就是这种能量状态的标志。通常，稳定的原子核总是处于能量最低状态，称之为“基态”；比基态高的能量状态称为“激发态”。处于激发态的原子核是不稳定的，它往往通过各种方式放出能量从激发态回到基态。

为了下面各节讨论的需要，简单地论述一些基本概念：

α 射线：也称 α 粒子，是从放射性核素中放出的带正电的粒子流。它是氦的原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），带二个正电荷。

β 射线：也称 β 粒子，是从放射性核素中放射出的电子流或正电子流。电子是最早发现的基本粒子，带一个负电荷，用符号 e 表示，正电子也是一种基本粒子，它是电子的反粒子，带一个正电荷，其电量和质量均和电子相同，正电子寿命在 $(1\sim 3)\times 10^{-10}\text{s}$ 之间。

γ 射线：也称 γ 光子，是波长极短（在 10^{-10}m 以下）的电磁波，原子核从较高能级跃迁到较低能级时，常放出 γ 射线。

X射线：它是一种短波长的电磁波，其波长介于 γ 射线和紫外线之间。

同位素：具有相同质子数，不同中子数的同一种元素的原子。

核素：具有确定电荷数（即原子序数 Z ）和中子数（ n ）的原子核所对应的原子。

同质异能素：具有相同质量数和电子数而放射性半衰期不同的原子。

原子核反应：由加速的微观粒子，如质子（ p ）、中子（ n ）、氘核（ d ）、 α 粒子（ α ）或 γ 射线（ γ ），轰击某些物质的原子核（称为靶核）使核的结构发生变化，形成新核，并放出一个或几个粒子的过程。

核反应式一般写为： $X(a,b)Y$ 。式中： X 、 Y 分别为反应前后的核素名称， a 为轰击粒子，如 p 、 n 、 d 、 α 、 γ 等； b 为反应后放出的粒子，如 γ 、 p 、 α 、 d 、 n 等。

如： ${}^{198}\text{Au}(n,\gamma){}^{199}\text{Au}$ ，表示核素 ${}^{198}\text{Au}$ 在中子轰击下生成 ${}^{199}\text{Au}$ ，并放出 γ 射线。

§ 1.2 放射性衰变及放射性核素

一、衰变类型及衰变规律

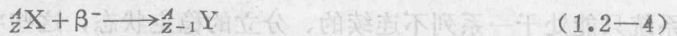
原子核能够自发地发生核结构的变化,同时放射出粒子或电磁辐射的现象,称为核衰变或放射性衰变。核衰变分为以下几种类型:α衰变、β衰变、γ衰变、自发裂变、辐射中子、辐射质子以及发射重核碎片(1984年观察到Ra发射出 ^{14}C 核而发现此类型)等等。下面分别加以讨论。

1. α衰变 原子核放出α粒子(即氦核 ^4_2He)后形成新核,其质量数减少4,核电荷数减少2。用下式表示



式中,X表示母核,Y表示衰变子核,A为原子量,Z为原子序数。

2. β衰变 分为β⁻衰变(放射出电子)、β⁺衰变(放射出正电子)以及电子俘获(原子核从核外电子壳层中俘获一个电子,原子核内的一个质子转换成中子)。分别表示为



双β衰变也属于此类。在这个过程中从核内同时放射出二个β粒子。用下式表示

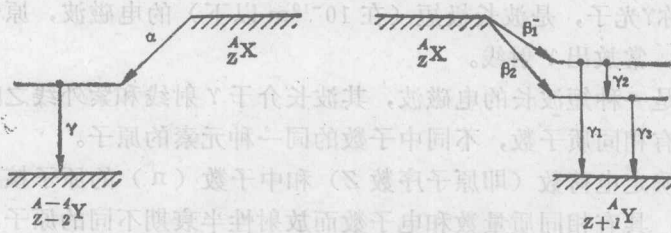


发生双β衰变的几率是极小的,但其半衰期却非常长。

3. γ衰变 包括辐射特征γ射线或发射轨道电子以及内转换正负电子对。

放射性核素在进行α或β衰变之后,形成的子核往往处于激发态,当原子核从激发态向较低能级跃迁时,其多余能量常以下面三种形式释放:

(1) 放出γ射线,称为特征γ射线。其能量取决于核的两个能级之差。见图(1-1)。



图(1-1) α、β、γ衰变示意图

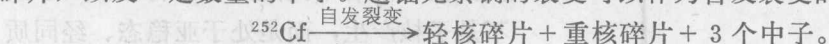
(2) 发射轨道电子,称为内转换电子。受激核将能量传递给K、L或其它壳层的电子,而将其逐出壳层。此时,不再放出γ射线。例如 ^{198}Au 在β衰变后变成 ^{198}Hg ,它处在激发态,其能级能量为411.8keV。这样,部分 ^{198}Au 衰变时放出内转换电子,其能量等于激发态能量 E^* 与电子结合能 ϵ 之差。既然 E^* 和 ϵ 都是量子化的,那么,发射出的轨道电子的能量也能确定。轨道电子的能谱曲线表现为叠加在β衰变连续谱上的锐线。见图(1-2)。

(3) 发射内转换正负电子对。在这种情况下,激发核并不放出γ射线,而是在核场

中将其能量转变成电子和正电子。只有当激发核的能量大于 $2m_e c^2$ 时（即大于 1.02 MeV 时）才能观察到此种过程。（ m_e 为电子的静止质量， c 为光速）。

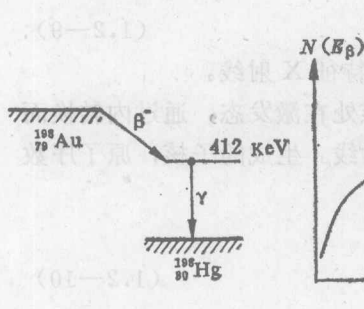
4. 其它衰变

元素周期表中，从钍开始的重核，可以发生自发裂变，而形成二个新的子核（也称为碎片）以及一定数量的中子。超铀元素镅的衰变可以作为自发裂变的典型例子。

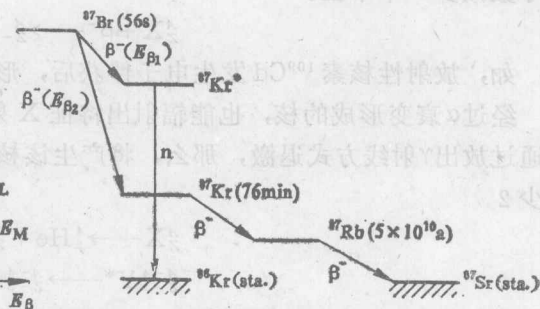


因此， ^{252}Cf 被用来作为中子源。

重核裂变时，可以把缓发中子也理解为它所释放的中子，缓发中子是随着碎片作 β 衰变时放出。图（1—3）是铀的一个典型裂变产物 ^{87}Br 的衰变图。 ^{87}Br 核衰变时伴随放出二种能量的 β 粒子（ E_{β_1} 、 E_{β_2} ），在放出具有较低能量 E_{β_1} 的 β 粒子后， ^{87}Br 转变为 $^{87}\text{Kr}^*$ ，子核 $^{87}\text{Kr}^*$ 处于激发态，放出中子后，退激到 ^{86}Kr 的基态。其中，中子延续发射的时间取决于核素 ^{87}Br 的半衰期（ $T = 56 \text{ s}$ ）。



图（1—2） ^{198}Au 衰变纲图及发射内转换电子能谱



图（1—3）铀裂变产物 ^{87}Br 衰变纲图

某些人造轻核也能放出中子。例如， ^{17}O 吸收一个中子转变成 ^{17}N ，同时放出一个质子。核反应为： $^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}$ 。反应产物 ^{17}N ，将发生以下一系列变化，而放出一个中子。



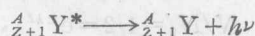
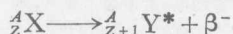
借助于加速器，轰击含有过多中子的核时，可以从一个核中发射2—3个中子。

而用加速粒子轰击中子亏损的核时，则可放出质子。例如， $^{151}\text{Lu} \longrightarrow ^{150}\text{Yb} + p$ 。

发射重碎片是新发现的放射性衰变现象，这一现象是 ^{235}U 系列的一个成员——镅核所特有



这种衰变类型可以认为是介于 α 衰变与自裂变之间的一种特例。 ^{223}Ra 发生这种类型衰变的几率比 ^{223}Ra 作 α 衰变的几率（ $^{223}\text{Ra} \longrightarrow ^{219}\text{Rn} + ^4\text{He}$ ）要小得多。核衰变的同时，经常伴随产生特征X射线。如果在 β 衰变之后，发生内转换，那么，电子壳层上由于转换电子的飞出而出现空穴，外层电子跃迁补充空穴，就导致子核特征X射线的发射。也就是原子序数为 Z 的元素，经过 β 衰变后形成 $Z+1$ 元素，并产生子核的特征X射线，分别表示为



$$(1.2-7)$$