



放射分析 物理导论

FANGSHEFENXI WULI DAOLUN

〔比〕G.德康尼恩克

原子能出版社

53.8313

780

放射分析物理导论

〔比〕 G. 德康尼恩克 著

董 廼 生 译
柴 之 芳

原 能 出 版 社

内 容 简 介

本书叙述了借助半导体探测器、利用低能带电粒子等引起的核反应作进行材料分析的方法。全书分六章,前三章着重叙述核反应机理,后三章着重分析应用。内容简明扼要,条理清楚,并有例题和实例说明,书后附有可供使用的数据表。本书可供物理、化学、生物和冶金等方面的科技工作者使用,也可供高等学校有关专业师生参考。

Introduction to Radioanalytical

Physics

by G. Deconninck

1978

放射分析物理导论

〔比〕G.德康尼恩克 著

董廼生 译
柴之芳

责任编辑 崔廷荣

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)▲

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $7\frac{1}{8}$ ·字数 204 千字

1985年7月第一版·1985年7月第一次印刷

印数1—2500·统一书号: 15175·552

定价: 1.80元

前 言

对大多数读者来说,放射分析方法也许指的就是中子活化分析法或放射性示踪法,这是因为这些技术随着核反应堆的出现,已获得了广泛使用。然而,由带电粒子或高能光子引起的核反应虽然早就被认为是元素分析的可行方法,但是由于工艺上的原因,这些技术并未得到充分的发展。只是在近十年间,才有市售的高分辨率的带电粒子和光子固体探测器。核方法的应用范围由于这些新谱仪的出现才得到相当大地扩展。目前已可以利用从低能加速器出来的粒子进行薄层的非破坏性研究、深度剖面分析、表面扫描以及示踪分析。也可以在高能电子束的强韧致辐射场中使样品活化来进行痕量元素的体分析。这些核方法成了一种很有前途的分析工具,可用来补充和扩大其它物理分析方法的应用范围。

现在已有许多论述中子活化分析的教科书,但有关用其它核方法的书却很少。这本书的目的是向读者初步介绍除中子活化以外的放射分析方法的物理原理。本书对核反应机制、带电粒子束与物质的作用以及元素分析中的实用公式作了论述,书中还包括了已被解决的一些实际问题。

每章的内容是按照被探测的辐射类型而确定的,即X射线、由非弹性散射而产生的带电粒子、瞬发或缓发核反应产生的 γ 射线以及核反应中生成的粒子。所有这些技术的共同点是:用带电粒子轰击,或者在强 γ 射线束中照射被分析的样品。存在于样品中的元素的反应产物特征,或者在轰击过程中被探测——即瞬发法;或者在轰击后测量——即缓发法。

第一章论述核反应的原理,即运动学、核反应机理和截面,并尽可能给出反应截面的实用公式。第二章论述粒子束和物质的

相互作用，给出了减速过程的实用公式，并专门讨论了在深度剖面分析中起主要作用的离散效应的计算。还讨论了粒子束与物质作用而产生的特征 X 射线，这种特征 X 射线可用来作元素分析。重带电粒子的背散射，现在已是一种作重原子表面分析的相当成熟的技术，这种技术的原理以及典型应用在第三章中讨论。各类核反应，即由低能质子引起的共振反应、 γ 射线散射、以及由高能粒子或光子轰击而产生的长寿命同位素的残留放射性，最终均放出 γ 射线。可以利用这些反应作表面分析和体分析、深度剖面分析和痕量元素分析，第四章对此作了讨论。在第五章中进一步讨论了通过解由低能入射粒子引起的核反应所产生的特征粒子谱，来测定轻元素的浓度剖面分布。这是一种正在发展的技术。第六章概述了核反应作为一种分析工具而可能具有的使用范围以及在各学科中已经进行研究的一些实例。

放射分析方法的范围很广。作者的意图在于为阐明奠定这些方法的物理原理提供一本概念清楚、表达简洁的课本，并对每种情况都推导出了实用公式，但是在分析方法的技术方面只简单地提了一下，因此，象仪器设备、数据处理以及和其它分析方法的比较均未叙述，这些将放在今后出版的教科书中处理。

“放射分析物理导论”一书被编写成可供具有各种不同科学基础知识的科学工作者（如工程师、物理学家、生物学家、化学家和冶金学家等）使用的一本教科书。除了要具备一些有关放射性的基础知识外，并不要求对核子科学事先有所了解。

如果说本书有某些独创之处，则完全是由于作者在过去十四年教学生涯中积累了宝贵经验之故，作者曾在卢万 (Louvain) 大学讲授核反应，在那慕尔 (Namur) 大学和格勒诺布尔 (Grenoble) 大学讲授应用核反应。可以期望，这本教科书将以较少的篇幅使读者更好地了解活化分析的原理，并能够帮助培养那些打算利用放射活化法作为手段去研究生物、化学、工程以及工业问题的科学工作者。

目 录

第一章 核反应	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 运动学及其推论	(2)
1.2.1 运动学关系式	(2)
1.2.2 粒子探测	(8)
1.2.3 粒子谱	(10)
1.3 核反应分类	(12)
1.3.1 弹性散射	(12)
1.3.2 非弹性散射	(13)
1.3.3 重排碰撞	(13)
1.3.4 多体反应	(14)
1.3.5 光核反应	(14)
1.3.6 辐射俘获	(15)
1.4 反应机理	(15)
1.5 核反应截面	(16)
1.5.1 定义	(16)
1.5.2 带电粒子的弹性散射	(18)
1.5.3 共振	(21)
1.5.4 粒子蒸发	(25)
1.5.5 激发函数	(30)
低能	(30)
高能	(31)
1.5.6 裂变反应	(34)
1.5.7 光致粒子反应	(36)
参考文献	(38)
第二章 带电粒子束和固体样品的相互作用	(40)

2.1 带电粒子轰击后的电离	(40)
2.2 带电粒子轰击后的X射线发射	(42)
2.2.1 X射线发射	(42)
2.2.2 利用带电粒子引起的X荧光作元素分析	(45)
2.2.3 次级电子	(47)
2.3 带电粒子在物质中的能量损失	(48)
2.3.1 引言	(48)
2.3.2 阻止本领参数	(48)
2.3.3 化合和聚合效应	(52)
2.3.4 带电粒子射程	(53)
2.3.5 能量离散	(56)
2.4 沟道效应	(64)
参考文献	(67)
第三章 用带电粒子弹性散射作分析	(69)
3.1 引言	(69)
3.2 运动学	(71)
3.2.1 散射粒子的能量	(71)
3.2.2 坐标系的转换	(74)
3.2.3 质量分辨本领	(75)
3.2.4 粒子谱	(78)
3.3 弹性散射截面	(79)
3.3.1 卢瑟福散射	(79)
3.3.2 低能下限	(80)
3.3.3 重离子的高能上限	(81)
3.3.4 质子散射	(83)
3.4 固体样品的背散射	(83)
3.4.1 引言	(83)
3.4.2 散射产额的计算	(84)
3.4.3 能量展宽	(90)
3.5 用背散射进行元素分析	(95)
3.5.1 化学计量学	(95)

3.5.2	薄层分析	(97)
3.5.3	深度剖面测量	(99)
3.5.4	阻止本领的测量	(101)
3.5.5	能量离散的测量	(101)
3.5.6	共振反应及其应用	(102)
3.5.7	单晶体分析中的沟道效应	(104)
3.5.8	背散射测量的最佳束流特性	(106)
	(a) 入射粒子的选择	(106)
	(b) 束流尺寸	(106)
	(c) 靶效应	(107)
	(d) 加速器	(107)
	参考文献	(108)
第四章	通过探测 γ 射线进行分析	(110)
4.1	核反应的 γ 射线	(110)
4.1.1	瞬发方法	(110)
4.1.2	缓发方法	(112)
4.2	运动效应	(113)
4.2.1	反冲效应	(113)
4.2.2	多普勒效应	(115)
4.2.3	热运动	(115)
4.2.4	核反应反冲	(116)
4.3	核反应机理	(121)
4.3.1	共振反应	(121)
	(a) 质子俘获	(121)
	(b) 其它反应	(123)
4.3.2	非共振截面(重核)	(125)
4.3.3	光核反应	(126)
	(a) 汤姆逊散射	(126)
	(b) 荧光散射	(126)
	(c) 同质异能态的 γ 射线	(127)
	(d) 光核粒子反应	(128)

4.4	轰击厚样品的瞬发 γ 射线产额	(130)
4.4.1	厚靶的激发产额	(130)
4.4.2	非共振截面	(132)
4.4.3	宽共振	(132)
4.4.4	窄共振	(133)
4.4.5	实用公式	(134)
4.4.6	乘积 $\Gamma\sigma$ 的实验测定	(138)
4.5	通过探测瞬发 γ 射线进行元素分析	(139)
4.5.1	用带电粒子轰击产生的瞬发 γ 射线	(139)
(a)	在极薄层 (100—2000埃) 中的轻原子浓度的测定	(139)
(b)	薄层中的浓度测定 (低 Z)	(141)
(c)	薄层的厚度测定	(142)
(d)	薄层中痕量轻原子的总含量测定	(143)
(e)	薄层中痕量重原子的总含量测定	(143)
(f)	厚层分析	(144)
(g)	轻元素的深度剖面分布测定	(145)
(h)	实验限制	(148)
4.5.2	用 γ 射线的核共振散射作分析	(149)
4.6	用缓发方法作元素分析	(150)
4.6.1	带电粒子活化	(150)
(a)	同位素的产生	(150)
(b)	剩余放射性的测量	(153)
(c)	照射装置	(154)
(d)	应用	(156)
4.6.2	光子活化, 同质异能亚稳态	(157)
4.6.3	(γ, n) , (γ, p) 光子活化反应	(158)
参考文献		(160)
第五章 用带电粒子和中子谱作分析		(163)
5.1	引言	(163)
5.2	反应截面	(163)
5.2.1	重排碰撞	(163)

5.2.2	割裂反应	(164)
5.2.3	(p, n) 反应	(166)
5.3	重排碰撞运动学	(167)
5.3.1	运动学公式	(167)
5.3.2	结论	(169)
5.4	粒子谱	(172)
5.4.1	带电粒子	(172)
(a)	探测器	(172)
(b)	吸收体	(174)
5.4.2	中子发射	(176)
(a)	快中子谱	(176)
(b)	热中子探测	(178)
5.5	固体样品的轰击	(179)
5.5.1	带电粒子	(179)
(a)	几何布置	(179)
(b)	薄层	(180)
(c)	通用公式	(181)
(d)	简单近似	(183)
(e)	离散效应	(184)
5.5.2	中子	(186)
(a)	热中子	(186)
(b)	快中子	(187)
5.6	分析上的应用	(188)
5.6.1	薄层 ($x < 1$ 微米) 的总重量	(188)
5.6.2	深度剖面分析 ($1 < x \leq 10$ 微米)	(189)
5.6.3	用共振(p, α) 反应作剖面分布分析	(191)
5.6.4	用(p, n) 反应作深度剖面分布分析	(192)
5.6.5	沾污问题	(193)
	参考文献	(193)
第六章 核反应的分析应用		(195)
6.1	引言	(195)

6.2	灵敏度	(196)
6.3	用缓发法测定轻元素	(196)
6.3.1	带电粒子活化	(196)
6.3.2	光子活化	(197)
6.4	用探测瞬发辐射测定轻元素	(199)
6.5	重元素	(209)
6.5.1	瞬发核反应	(209)
6.5.2	背散射	(209)
6.5.3	X 射线荧光	(209)
6.5.4	光核反应	(209)
6.5.5	带电粒子活化(缓发法)	(210)
6.5.6	γ 射线散射	(210)
6.5.7	同质异能态激发	(210)
6.5.8	示例	(210)
6.6	典型应用	(212)
6.6.1	生物样品	(212)
6.6.2	半导体材料分析	(214)
6.6.3	冶金学上的应用	(214)
6.6.4	表面层的化学计量测定	(217)
6.6.5	质子微束	(218)
6.6.6	进展	(219)
	参考文献	(220)
	附表	(224)

第一章 核 反 应

1.1 引 言

低能核反应的研究构成了核物理和亚核物理中的一个重要部分，它涉及到该课题中许多不同的内容。高速离子与固体样品作用时，在入射粒子与嵌入固体物质中的被假定处于静止状态的核之间发生核反应。这时可能发生两种事件，一种是入射粒子完全被核偏转，即弹性散射；另一种是重排核物质，留下一个或两个物理状态经过变动的反应参加物。

控制上述过程的基本参数是入射粒子（常称为轰击粒子）的速度，它与另一个比较容易测得的量（即能量）有关，在非相对论近似中，该关系式为：

$$V \cong 1.384 \sqrt{\frac{E}{A}} 10^9 \text{厘米/秒} \quad (1)$$

式中， V 是速度； E 是能量（兆电子伏）； A 是入射粒子的原子质量数。

最常用的轰击粒子是质子（ $p, A=1$ ）、氘子（ $d, A=2$ ）、 ^3He 离子（ $t, A=3$ ）、 ^4He 离子（ $\alpha, A=4$ ）和重离子，因为它们容易产生和加速。

所考虑的速度范围大致是 $3 \times 10^8 < V < 3 \times 10^9$ 厘米·秒⁻¹，这相当于低能核反应的范围，对这类反应的机理已了解得比较清楚了。此外，还有大量的实验数据，这是由于利用比较廉价的标准设备，便可容易地产生并探测这个能区内的离子的缘故。

有两类核反应可考虑用于分析：核活化和瞬发核反应。核活

化、尤指中子活化，几乎从核时代初期起就已被利用。因此，现有大量关于这方面的文献，见诸于评述性文章和教科书中。鉴于这个理由，本书中只简要地提一下核活化。

瞬发核反应的应用是比较近年的事，且仍在发展之中。使用这种技术需要熟悉截面行为、粒子与物质的运动学及其相互作用。

如果产物的辐射是带电粒子，则其能量、属性和偏转角中所包含的信息就会与被轰击样品的性质（化学组成、杂质浓度的深度分布、同位素组成等）有关。

本章将叙述用于解释核反应产生的粒子谱，以及在某些情况下用来预言这类谱的一些主要方法。这里有两个主要特点：

(1) 比较简单的、也许是最有用的特点来自这样一个事实，即经典力学对反应产物能量有一个所谓的“运动学限制”。

(2) 反应速率和反应产物的角分布受作用核之间的物理作用的控制。虽然目前核物理对这些现象还并不详细了解，但仍可给出确定的一般性规则和平均性质，从而可用来预言许多场合中的核反应截面。

1.2 运动学及其推论

1.2.1 运动学关系式

最常见的核反应是两体反应，可用符号方程式表示为：

$$a + A \longrightarrow B + b \quad (2)$$

这个关系式也可记为 $A(a, b)B$ ， a 是轰击粒子； A 是靶核，假定在实验室参考系中处于静止状态； b 是轻的反应产物； B 是重的反应产物。因此，方程式(2)的两边代表了作用前后的物理状况。

对于原子碰撞和核碰撞，常用的参考系有两个：实验室系和质心系。图1.1(a)描述的是实验室参考系中的一次碰撞。轰击粒

子的质量为 m_a ，打在靶 A 上，A 的质量为 m_A ，且是静止的。质量为 m_b 的产物 b 以 ψ 角被放出，质量为 m_B 的产物 B 以 ξ 角被放出。假定 $m_B > m_b$ ，称 B 为重产物。质心系是以最简单的方式描述相互作用的参考系。坐标原点是碰撞粒子的质心 G。粒子 b 以相对于入射方向呈 θ 角的方向被放出，B 则呈 $(\pi - \theta)$ 角被放出。当然，核散射数据可以用任何一种坐标系列出，入射粒子能量常用实验室系给出，而角坐标则以质心系给出。马里恩 (Marion) 和杨 (Young)^[1] 以表格形式列出了这两个系统之间的转换公式。

核反应中，总能量保持守恒：

$$E_a = E_b + E_B + Q \quad (3)$$

式中， E_a 是轰击粒子的实验室能量（有时称为加速能量）； E_b 和 E_B 是反应产物的实验室能量。这里 Q 是能量平衡值，通常用方

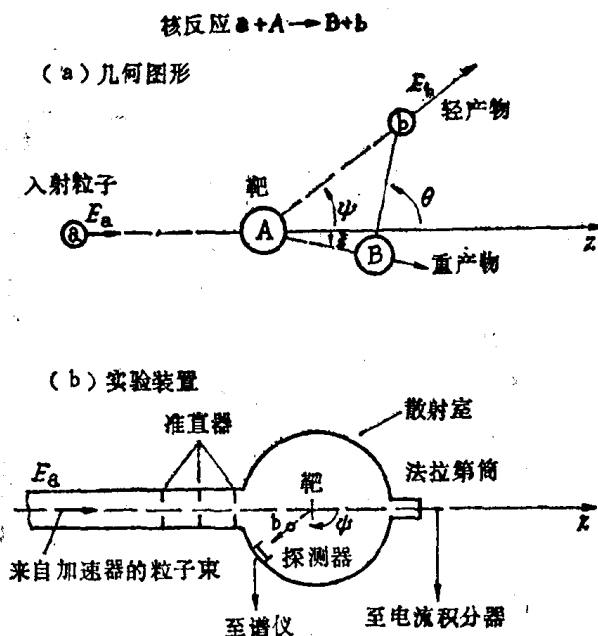


图1.1 (a)实验室坐标系和质心参考坐标系；(b)利用探测带电粒子的瞬发核反应的实验安排

程式(3)中的其它几个量来表示, 单位为兆电子伏或千电子伏, 由下式给出:

$$Q = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2 \quad \text{兆电子伏} \quad (4)$$

上述计算中使用原子质量单位(a. m. u.)。于是, m_a 为中性原子a的质量(包括它的所有电子)。因此能量平衡计算中实际上不用核质量。可用下式将质量转换为兆电子伏:

$$1 \text{ a. m. u.} = 931.478 \text{ 兆电子伏}/c^2$$

现已有完整的反应 Q 值表^[2,3]。

若 Q 是正值, 则称该反应是放能的, 在核反应中获得动能。

若 Q 是负值, 则称该反应是吸能的, 并对入射粒子有一个阈能, 在此阈能之下, 反应不能发生, 该阈能总是大于 $|Q|$ 。

实验室系中的能量 E_a 和质心系中的能量 E' 之间的对应关系由经典力学给出:

$$E'_a = \frac{m_A}{m_a + m_A} E_a \quad (5)$$

但式中的粒子质量是核质量, 为简化起见, 一般用质量数代替实际质量。从能量守恒和动量守恒, 可计算出轻产物b的能量 E_b , E_b 与发射角 ψ 有关。非相对论的计算结果^[4]为

$$E_b^{1/2} = \frac{(m_a m_b E_a)^{1/2} \cos \psi}{m_b + m_B} \pm \frac{\{m_a m_b E_a \cos^2 \psi + (m_b + m_B)[m_B Q + (m_B - m_a)E_a]\}^{1/2}}{m_b + m_B} \quad (6)$$

上式为两体核反应的运动学公式。

对放热反应, $m_a < m_B$, 能量 E_b 是 ψ 的单值函数, 能量随 ψ 增加而减小。式(6)中, $E_b^{1/2}$ 必须是正的, 且括号前只允许用正号[见图1.2(a)]。

对重反应产物能量 $E_B^{1/2}$ 可获得类似的表达式, 只要将方程式(6)中的符号 b 和 B 互换, 并用 ζ 替换 ψ 就行。该表达式将在第

四章式(21)中用到。

对吸热反应，有一个阈能 $E_{\text{阈}}$ ，由下式给出：

$$E_{\text{阈}} = -Q \frac{m_B + m_b}{m_B + m_b - m_a} \quad (7)$$

该条件对于使根号中的表达式保持为正值是必不可少的。在阈能之下 ($E_a < E_{\text{阈}}$)，反应不可能发生。达到阈能时，粒子以 0° 角射出，随着入射能量的增加，观测到粒子的发射呈渐渐加宽的锥体状（发射角 ψ 有一个最大值 $\psi_{\text{最大}}$ ），直到锥体夹角 $2\psi_{\text{最大}}$ 达 180° 。方程式(6)示出 E_b 可能有两个值，这与括号前的正负号相对应 [图1.2(b)]。

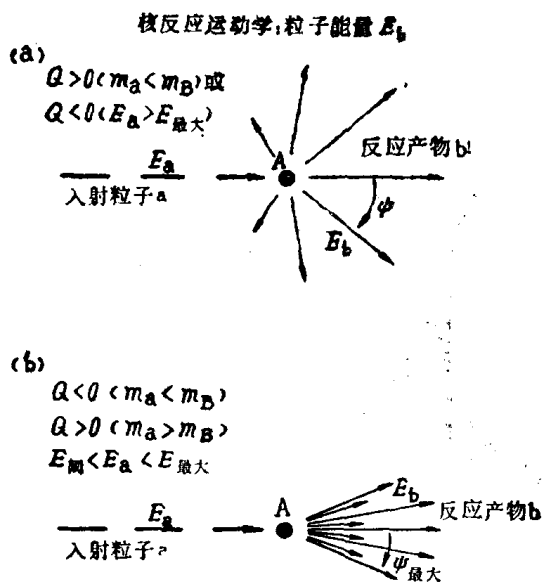


图1.2 产物b的能量与发射角 ψ 的函数关系。能量 E_b 与表示发射方向的箭号长度成比例

(a)反应产物以各个方向被放出，在正前角($\psi \cong 0^\circ$)处，能量为最大；在反向角($\psi \cong 180^\circ$)处，能量为最小；(b)只在向前方向 ($\psi \leq \psi_{\text{最大}}$) 放出反应产物；对应于每个角度 ψ ，可观测到两组能量

只有当

$$m_B Q + (m_B - m_a) E_a < 0 \quad (8)$$

或

$$E_a < \frac{-m_B Q}{m_B - m_a} = E_{\text{最大}}, \quad (9)$$

时才能允许用正负两个符号。

当

$$E_{\text{阈}} < E_a < E_{\text{最大}} \quad (10)$$

时，观测到两组能量不同的粒子，且发射角处于如图 1.2 (b) 所示的限制范围内。

$$0 < \psi < \psi_{\text{最大}} \quad (11)$$

式中的 $\psi_{\text{最大}}$ 由下式算出：

$$m_a m_b E_a \cos^2 \psi_{\text{最大}} + (m_B + m_b) [m_B Q + (m_B - m_a) E_a] = 0$$

或

$$\cos^2 \psi_{\text{最大}} = \frac{-(m_B + m_b) [m_B Q + (m_B - m_a) E_a]}{m_a m_b E_a} \quad (\psi_{\text{最大}} < 90^\circ) \quad (12)$$

若 $E > E_{\text{最大}}$ ，则与放热反应 [图 1.2 (a)] 相同，能量是单值的。

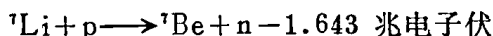
图 1.3 列出了对应于 E_b 的单值解和双值解的能量图解。

若 $Q > 0$ ($m_a < m_A$) 或 $Q < 0$ ，但 $E_a > E_{\text{最大}}$ ，则与每个 ψ 值相对应，有一个并且也只有一个能量值 E_b 。

若 $Q < 0$ 且 $m_a < m_B$ ，或 $Q > 0$ 且 $m_a > m_B$ ，以及 $E_{\text{阈}} < E_a < E_{\text{最大}}$ ，则与每个 ψ 值对应的能量值 E_b 有两个，并且发射角 ψ 被限制为： $\psi \leq \psi_{\text{最大}}$ 。

例 1.

用下列核反应分析锂及产生中子：



该反应是吸热的 ($Q = -1.643$ 兆电子伏)，有一个阈能 $E_{\text{阈}}$ ，由式 (7) 给出。

因为