

放射性粒子 近距离治疗肿瘤

主编 王俊杰 唐劲天 黎功



亞

北京医科大学出版社

115384

放射性粒子近距离治疗肿瘤

主编 王俊杰 唐劲天 黎 功

编者 (按姓氏笔画为序)

马力文	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	副主任医师
王文学	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	教授
王俊杰	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	副主任医师
庄永志	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	硕士研究生
朱京丽	中日友好医院放射治疗科	副主任医师
张占春	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	副主任医师
杨 光	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	硕士研究生
金护申	上海医科大学中山医院	副主任医师
杨建良	中国医学科学院肿瘤医院	主治医师
贾廷珍	北京大学第三医院肿瘤治疗中心	教授
徐怀德	亚洲 [中国] 医药卫生中心	教授
贾 惊	中日友好医院放射治疗科	主治医师
唐劲天	中日友好医院临床医学研究所	教授
康静波	海军总医院放射治疗科	副主任医师
黎 功	山东省滨州地区人民医院放射治疗中心	副主任医师

北京医科大学出版社

FANGSHEXING LIZI JINJULI ZHILIAO ZHONGLIU

图书在版编目 (CIP) 数据

放射性粒子近距离治疗肿瘤/王俊杰, 唐劲天, 黎功
主编. —北京: 北京医科大学出版社, 2001.9
ISBN 7-81071-232-2

I. 放… II. ①王… ②唐… ③黎… III. 肿瘤-短
距离-放射疗法 IV. R730.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 066145 号

北京医科大学出版社出版发行

(100083 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内)

责任编辑: 刘鼎新 王凤廷

责任校对: 翁晓军

责任印制: 郭桂兰

山东省莱芜市圣龙印务书刊有限责任公司印刷 新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.75 字数: 344 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷 印数: 1-3000 册

定价: 29.50 元

版权所有 不得翻印

序

恶性肿瘤已成为严重威胁人类健康的疾病，全球每年约有 500 万人死于癌症。在我国的大城市中，恶性肿瘤已成为死亡的首位病因。尽管医学发展日新月异、一日千里，但恶性肿瘤总的治愈率仍徘徊在 45% 左右，因此，肿瘤的研究和治疗任重而道远。

放射治疗是恶性肿瘤治疗的三大重要手段之一。自 1895 年伦琴发现 X 线以后的短短百年里，放射治疗经过了 40 年代的深部 X 线治疗机、50 年代的⁶⁰Co 治疗机和 70 年代的加速器历程，目前已成为肿瘤治疗不可缺少的手段。今天放疗已发展到 CT 模拟定位、计算机三维治疗计划系统和立体定向适形放疗，真正实现了肿瘤靶区的剂量最高、周围正常组织的剂量最小的理念。随着放射治疗基础理论的发展和放疗技术的进步，放射治疗已从单纯外放疗发展为后装治疗、立体定向放射外科、术中放疗和组织间近距离放疗等门类齐全的独立学科。

常规放疗、后装治疗、立体定向放射外科和术中放疗等技术在国内外已得到迅速普及和发展，并有许多著作介绍这些技术，而放射性粒子近距离治疗肿瘤还没有专著。王俊杰、唐劲天和黎功三位青年学者撰写的《放射性粒子近距离治疗肿瘤》一书，率先向国内学者系统介绍了放射性粒子近距离治疗的理论基础和临床应用。此书的出版将对我国顺利开展粒子治疗起到很好的推动、促进和帮助作用，并为肿瘤外科、放疗科和超声诊断医师学习这一先进技术提供了一本较好的参考书。

值此《放射性粒子近距离治疗肿瘤》一书出版之际，谨表祝贺，并希望此书能够推动放射性粒子治疗在我国的开展。

于金明

2001 年 4 月 6 日

前言

肿瘤术后或放疗后局部复发是临床医生面临的棘手难题。脑瘤和头颈部癌由于其特殊的解剖部位而无法再行手术切除;外放疗后由于晚期的组织损伤也不适于再放疗;胸部肿瘤、腹腔肿瘤、盆腔肿瘤的术后残留和复发以及局部淋巴转移等,均给临床治疗带来很大的困难。

放射治疗包括外放疗和内放疗两种方式。内放疗又称近距离治疗或组织间放疗。内放疗是指通过后装治疗机,将放射源运送到肿瘤靶区进行治疗,作用一定时间后,放射源自动退回机器内,因此,内放疗又称后装治疗。

20 世纪初,国外学者率先提出另一种内放疗模式,即在术中将放射性粒子直接永久种植到肿瘤体内和(或)肿瘤周围,通过放射性粒子衰变、释放出来的射线杀伤肿瘤细胞。但是由于当时生产的放射性核素均释放高能光子、放射防护颇难处理和没有相应的治疗计划系统,使临床应用受到很大限制。80 年代后期,国外在放射性粒子源生产技术上获得重大突破,如 ^{198}Au 、 ^{125}I 和 ^{103}Pd 等释放低能射线的放射性粒子研制成功,B 超、CT 引导下精确定位系统和计算机三维治疗计划系统的出现,使放射性粒子种植治疗保证肿瘤局部剂量最高,周围正常组织损失最小,显示了广阔的应用前景。粒子近距离放疗所用 ^{125}I 和 ^{103}Pd 粒子源的能量非常低,临床应用时易于防护,操作人员穿铅衣和戴铅眼镜,或利用一个 1cm 厚的有机玻璃防护屏即能防护,目前 ^{125}I 粒子源的生产已经实现国产化。粒子种植所需设备体积非常小、不需要特殊占地、设计简单、造价低廉、操作方便。患者治疗可在术中进行、也可在门诊进行,缩短了住院时间。需要借助超声引导的,可在超声诊室内进行,与超声引导下的穿刺类似。门诊治疗的患者,治疗后即可出院。

粒子种植治疗的特点包括:①操作简便、创伤小;②操作人员易于防护;③造价低廉。国外报道对头颈部、腹腔、盆腔肿瘤术后、放疗后复发者的治疗和术中无法切除肿瘤如脑瘤、胰腺癌和胆管癌等的治疗明显优于其他治疗手段。尤其是对鼻咽癌放疗后复发者,粒子种植治疗是最有效的手段之一。对早期前列腺癌患者的治疗与手术的疗效相当,而且并发症的发生率明显低于手术。美国西雅图医院每年用 ^{125}I 粒子治疗前列腺癌 400 多例,成为早期前列腺癌的标准治疗。2000 年 2 月泰国率先在亚洲开展粒子治疗前列腺癌,2000 年 5 月韩国也开展了粒子治疗前列腺癌。

1998 年我们就捕捉到这一国际前沿课题,历时 3 年多的时间,收集并整理了国外 200 多篇文献,与国外有关学者进行了长期的交流与探讨,为将这一技术引入我国进行了充分的准备和论证。1998 年的冬天,我和黎功医师多次往返中国原子能研究院,探讨粒子源国产化的可行性。在此期间,香港玛丽医院的蔡德江医师和美国 SSGI 公司 Roger Kao 物理师给予我们无偿的指导和帮助,在此衷心向给予我们帮助的师长和同道表示真诚的谢意。3 年多的时间,国内已经有多家公司研制成功放射性粒子、粒子治疗计划系统和相关辅助设备,为这一技术在我国的应用和推广做了大量的工作。本书编写过程中得到上海亚医商贸有限公司徐怀德董事长的大力支持,在此表示感谢。谨以此书献给那些默默为祖国放疗事业发展而埋头奋斗的人们!

王俊杰

2001 年 5 月 8 日

目 录

第一章 放射性粒子近距离治疗肿瘤的物理学基础	(1)
一、概述	(1)
二、放射性核素的衰变种类和衰变规律	(1)
三、射线与物质的相互作用	(6)
四、放射性活度的单位	(9)
五、放射性核素的生产	(10)
六、放射性粒子近距离治疗常用核素	(12)
七、近距离治疗粒子源的特征	(18)
八、放射性粒子近距离治疗的治疗计划系统	(19)
第二章 放射性粒子近距离治疗的生物学基础	(21)
第一节 放射性粒子近距离治疗的体内和体外实验研究	(21)
一、细胞存活曲线研究	(21)
二、放射性粒子近距离治疗的相对生物效应	(22)
三、放射性粒子近距离治疗对细胞增殖的影响	(24)
第二节 剂量率的影响	(25)
一、影响剂量率效应的因素	(25)
二、剂量率效应的临床应用	(26)
三、永久粒子种植治疗	(27)
第三节 时间、剂量、分次数学模型：放射性粒子治疗的线性二次模式	(27)
第四节 ^{125}I 粒子源近距离治疗的时间 - 剂量 - 体积考虑	(32)
第三章 近距离放射性粒子的研制与生产	(36)
一、放射源的制造方法	(36)
二、放射源的生产现状	(37)
三、各种治疗粒子源的规格	(39)
第四章 放射性粒子插植治疗脑肿瘤	(46)
一、概述	(46)
二、后装治疗技术简介	(47)
三、脑肿瘤的临床特点	(49)
四、脑肿瘤放射性粒子插植的治疗方法	(54)
五、放射性粒子插植治疗的效果	(60)
六、放射性粒子插植治疗的注意事项	(61)
第五章 放射性粒子组织间种植治疗脑肿瘤	(66)
一、放射性粒子近距离治疗的特点	(66)
二、恶性脑胶质瘤放射性粒子近距离治疗	(68)
三、低分级脑胶质瘤放射性粒子近距离治疗	(71)

四、原发脑胶质瘤粒子近距离治疗	(72)
五、恶性脑胶质瘤复发后粒子近距离治疗	(75)
六、脑转移瘤粒子近距离治疗	(80)
七、原发性Ⅲ级脑胶质瘤粒子近距离治疗	(80)
八、儿童脑肿瘤粒子近距离治疗	(80)
九、粒子近距离治疗的并发症	(81)
十、结语	(82)
第六章 放射性粒子近距离治疗头颈部肿瘤	(85)
第一节 放射性粒子近距离治疗鼻咽癌	(85)
一、鼻咽癌的治疗	(85)
二、鼻咽癌的近距离治疗	(85)
第二节 放射性粒子近距离治疗口腔癌与口咽癌	(89)
一、粒子种植治疗技术	(89)
二、粒子种植与外放疗的结合	(90)
三、临床应用	(91)
四、粒子种植治疗的并发症	(93)
五、防护安全	(94)
第三节 放射性粒子近距离治疗口底癌	(94)
一、粒子种植治疗技术	(94)
二、临床应用	(95)
三、并发症	(96)
四、重复癌	(96)
五、金粒子种植治疗的安全性	(96)
第四节 放射性粒子近距离治疗头颈部癌	(97)
一、放射性粒子种植治疗的技术流程	(97)
二、粒子种植治疗头颈部癌的临床应用和并发症	(97)
三、放射性粒子治疗晚期头颈部癌	(97)
第七章 放射性粒子近距离治疗原发眼部肿瘤	(100)
一、简介	(100)
二、眼的解剖学	(100)
三、脉络膜黑色素瘤	(101)
四、视网膜母细胞瘤	(103)
五、粒子近距离治疗的物理学	(105)
六、粒子种植治疗技术流程	(108)
第八章 放射性粒子近距离治疗胸部肿瘤	(112)
第一节 肺 癌	(112)
一、发病特点	(112)
二、肺癌治疗的近况	(112)
三、胸部放射性粒子种植治疗的起源和发展	(113)
四、肺癌放射性粒子种植治疗的适应证	(113)

五、粒子种植技术	(115)
六、治疗结果	(117)
七、肺上沟癌	(119)
八、并发症	(119)
九、随访	(119)
十、结语	(119)
第二节 乳腺癌	(119)
第九章 放射性粒子近距离治疗腹部肿瘤	(123)
第一节 放射性粒子近距离治疗胰腺癌	(123)
一、流行病学和病因	(123)
二、胰腺的实用解剖	(123)
三、胰腺的生理	(124)
四、病理及分期	(124)
五、胰腺癌的临床特征	(125)
六、胰腺癌的实验室与影像学检查	(127)
七、胰腺癌的诊断	(128)
八、胰腺癌的治疗	(128)
九、展望	(132)
第二节 放射性核素介入治疗肝癌	(133)
一、肝癌治疗	(133)
二、放射性微球栓塞内照射	(136)
第十章 放射性粒子近距离治疗盆腔肿瘤	(146)
第一节 放射性粒子种植治疗前列腺癌	(146)
一、前列腺癌的流行病学	(146)
二、前列腺的解剖和生理功能	(146)
三、前列腺癌的症状和体征	(146)
四、前列腺癌的病因学	(147)
五、前列腺癌的诊断	(147)
六、肿瘤分级	(147)
七、肿瘤分期	(148)
八、治疗选择	(148)
九、放射性粒子近距离治疗的临床应用	(148)
十、前列腺癌的粒子种植治疗	(150)
十一、放射性粒子种植治疗前列腺癌的技术流程	(152)
十二、放射性粒子种植治疗前列腺癌的疗效	(156)
第二节 大肠癌术后复发和肝转移的放射性粒子近距离治疗	(157)
一、直肠癌术后盆腔复发的治疗	(157)
二、大肠癌肝转移的放射性粒子近距离种植治疗	(159)
三、其他治疗手段	(163)
第十一章 ¹²⁵ I 粒子治疗肿瘤的临床经验	(170)

一、临床资料·····	(170)
二、粒子治疗的原理·····	(172)
三、粒子治疗的适应证·····	(172)
四、粒子治疗的优势·····	(173)
五、经皮穿刺肿瘤植入放射性粒子·····	(173)
六、影响组织间植入 ¹²⁵ I放射性粒子治疗恶性肿瘤的因素·····	(173)
七、组织间植入 ¹²⁵ I放射性粒子治疗恶性肿瘤的并发症及预防·····	(174)
八、展望·····	(175)
第十二章 放射性粒子近距离治疗丢失、迁移和对正常组织的损伤·····	(176)
一、放射性粒子丢失和迁移·····	(176)
二、放射性粒子对正常组织的损伤·····	(180)
第十三章 放射性粒子近距离治疗的放射防护·····	(184)
一、放射性粒子近距离放疗的物理学基础·····	(184)
二、射线与物质的相互作用及其防护·····	(186)
三、放射性工作场所的有关防护规定·····	(187)
四、放射防护的目的和基本原则·····	(187)
五、我国现行放射防护标准剂量限值·····	(188)
六、外照射防护基本原则·····	(189)
七、放射工作人员的健康管理·····	(189)
八、放射性核素源的运输、贮存和保管·····	(190)
九、放射性废物的处理·····	(191)
第十四章 1999年美国西雅图放射性粒子近距离治疗年会论文摘译·····	(192)
附录·····	(204)

第一章 放射性粒子近距离治疗肿瘤的物理学基础

一、概述

1896 年，法国物理学家亨利·贝可勒尔（H. Becquerel）在研究各种物质的磷光时，发现铀盐能够发出人眼看不见的、穿透力强的射线。1898 年居里夫妇发现了²¹⁰钋和放射性比铀强几百万倍的²²⁶镭。

某些核素的原子核能够自发地衰变释放出 α 、 β 等粒子的性质称为放射性。具有这种特性的核素称为放射性核素。放射核素分为天然的和人工的两种，到目前为止，已经发现的放射性核素近 2000 种，其中绝大多数是人工放射性核素。

放射性核素的原子核自发释放出 α 、 β 等粒子而转变为另一种核素的原子核的过程，称为核衰变。放射性衰变是放射性核素的本身特性。放射性核素的衰变既有自身的特殊性又有共同的规律性。放射性核素根据释放的射线种类，分为 α 衰变、 β 衰变（包括 β^+ 衰变、电子俘获）和 γ 衰变。

射线应用于肿瘤治疗已有 100 多年的历史，由于放疗设备的改进和对放射物理学的了解，加之肿瘤学、放射生物学的研究进展，放射治疗已成为恶性肿瘤的主要手段之一。目前在恶性肿瘤治疗中约有 70% 左右患者需要借助放射治疗达到根治和（或）姑息的目的。

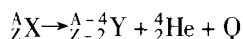
放射治疗使用的放射源主要有三种：①放射性核素释放的 α 、 β 、 γ 线；②X 线机和各种加速器产生的不同能量的 X 线；③各种加速器产生的电子束、质子束、中子束、负 π 介子和其他重粒子束等。

二、放射性核素的衰变种类和衰变规律

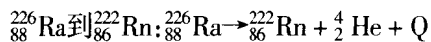
如果一个原子能够自发地衰变释放射线，那么这种核素就称为放射性核素（radioactive nuclide）。放射性核素分为天然和人工两种，已经发现的放射性核素有 2500 种，其中绝大部分是人工放射性核素。目前有 10 余种用于临床近距离治疗。在描述放射性核素衰变的等式中所用符号为 A_ZX ，其中下角 Z 指的是元素 X 的原子序数，上角 A 指的是原子的质量（质子和中子的总和）。一种元素可以有几种不同存在形式的同位素，这主要取决于原子核内中子数的不同。根据核素释放射线的种类，核衰变分为：① α 衰变；② β 衰变（包括 β^+ 衰变、电子俘获）和③ γ 衰变。

（一） α 衰变（ α decay）

放射性核素原子核衰变时释放 α 粒子而变为另一种核素原子核的过程称为 α 衰变。 α 衰变后的核素，质量数减少 4，原子序数减少 2， α 粒子是高速运动的氦原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），由 2 个质子和 2 个中子组成，所带电荷为 $2e$ ，质量为氦核的质量。通常把衰变前的原子核称为母核或母体，衰变后的原子核称为子核或子体。这一衰变过程可以描述为如下等式：



典型的例子是镭衰变：



其中 Q 为衰变能，即母核衰变成子核时所释放的能量，而被子核和 α 粒子共同分得。

通常用图解的方式表示一种放射性核素的衰变过程，称为核衰变的能级图，或衰变图。在 α 衰变图中母核基态的位置一般位于子核的右上角。图 1-1 是 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图，当发生 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变时，94.6% 的 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变到 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的基态，而放出能量为 4.784 MeV 的一组 α 射线。5.4% 的 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变到 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的激发态而释放能量为 4.598 MeV 的另一组 α 射线， $^{226}_{88}\text{Ra}$ 从激发态跃迁到基态时释放出能量为 0.186 MeV 的 γ 射线。同时也提示 α 衰变的核素常放出不止一种能量的 α 粒子并伴有 γ 射线。

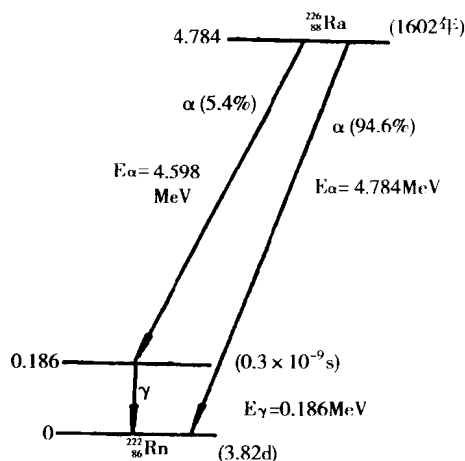


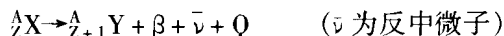
图 1-1 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

(二) β 衰变 (β decay)

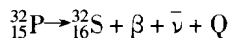
β^- 和 β^+ 衰变及电子俘获这三种类型的衰变过程，有许多规律是一样的，通常称为 β 衰变。

1. β^- 衰变 放射性核素的原子核放射出 β^- 粒子而转变为原子序数相差 1 而质量数相同的核素，这一过程称为 β^- 衰变。对 β 粒子进行荷质比的测量发现，它是高速运动的电子。 β 粒子的速度通常比 α 粒子大，最大可接近光速。从核衰变中所放射出的 β 粒子，被物质阻止后成为自由电子，它和一般的电子没有什么区别。

这一作用包括一个中子转变成一个质子和一个电子。这一衰变过程可描述为如下等式：



常见的例子为 ^{32}P 衰变为稳定的 ^{32}S ：



有些放射性核素只释放 β 粒子，而没有伴随 γ 射线，如 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 等。同时也有许多 β 衰变的放射性核素放射 β 粒子时往往伴随 γ 射线，如 ^{72}Zn 、 ^{60}Co 。某些放射性核素的 β 衰变可能释放出两组或两组以上能量的 β 粒子，如 ^{137}Cs 。有的放射性核素放出的 β 粒子的能量多达四到五组，如 ^{72}Zn 、 ^{134}Ba 和 ^{239}Pu 等。

β 衰变图谱中的母核位置通常在子核的左上角， β 衰变以向右下斜箭头表示，图 1-2 中 β 粒子的能量均指最大能量。

^{137}Cs 和 ^{60}Co 的 β 衰变图如图 1-3 和图 1-4 所示。垂直向下的箭头表示伴随的 γ 射线。

2. β^+ 衰变 (β^+ decay) 放射性核素的原子核放射出正电子而变为原子序数减 1 的原子

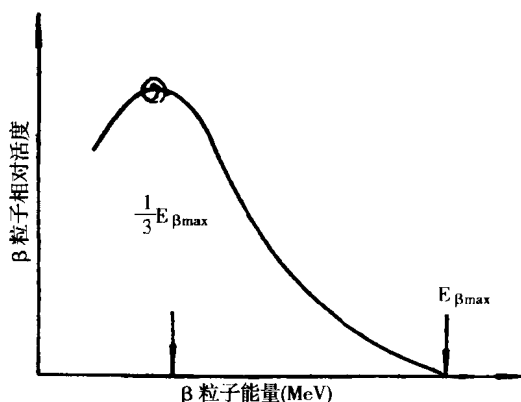


图 1-2 β 粒子的能谱曲线

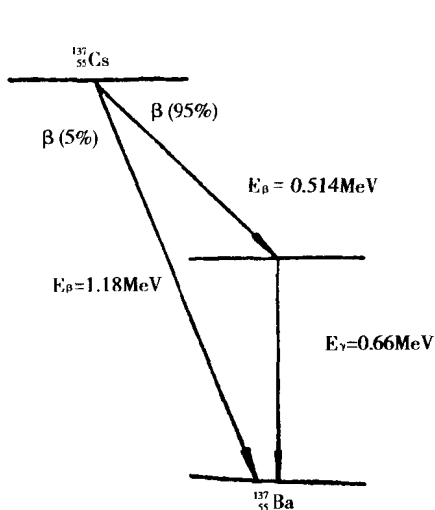


图 1-3 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 的 β 衰变图

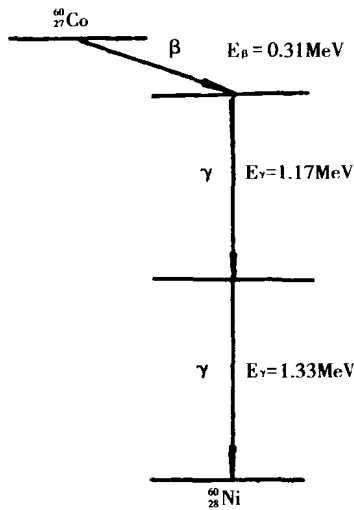


图 1-4 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的 β 衰变图

核，这一过程称为 β^+ 衰变。组成 β^+ 的粒子就是正电子（或阳电子）。它是一种质量和电子相等而带有一个单位正电荷的粒子。天然存在的放射性核素没有发生 β^+ 衰变的，这种衰变类型的核素都是人工放射性核素。这一作用过程是一个质子转变为一个中子和一个正电子。发生 β^+ 衰变的子核与母核具有相同的核质量数 A ，但原子序数减少 1。因此 β^+ 衰变可以看成是原子核内有一个质子转变成中子，同时释放出正电子和中微子的结果。

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \bar{\nu} \quad (\bar{\nu} \text{ 为中微子})$$

这一衰变可以描述为：

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \beta^+ + \bar{\nu} + Q$$

典型的例子是 ^{13}N 衰变为稳定的 ^{13}C ：

$${}^7_{13}\text{N} \rightarrow {}^6_{13}\text{C} + \beta^+ + \bar{\nu} + Q$$

正电子只能在极短的时间内存在，当被物质阻止而失去能量时，它将和电子相结合而转化为电磁辐射，这一过程叫做电子对的湮没。正负电子对的湮没可转化为一个、两个或三个光子，但是转化为两个光子的几率最大，两个光子的能量相当于电子的静止质量 0.511MeV 。

图 1-5 表示 ^{13}N 的 β^+ 衰变图。 ^{13}N 经过 β^+ 衰变到 ^{13}C 的基态，实验测得 $E_{\beta^+}^+ = 1.19\text{MeV}$ 。但是由于 β^+ 衰变一定要在母核的原子质量比子核的原子质量大 $2m_e$ 时才发生，所以 ^{13}N 和 ^{13}C 原子核基态的能量差为：

$$E_{\beta^+}^+ + 2m_e c^2 = 1.19 + 1.02 = 2.21\text{MeV}$$

图 1-5 中以垂直的虚线表示 $2m_e c^2$ 的能量差，向左下角斜线表示 β^+ 衰变。由于母核的原子序数比子核的原子序数大 1，因此在 β^+ 衰变图谱中，母核位于子核的右上角。

(四) 电子俘获 (electron capture)

放射性核素的原子核俘获一个内层电子使其和核中一个质子作用转变成一个中子，这一过程叫做电子俘获。如果原子核俘获一个 K 层电子而变

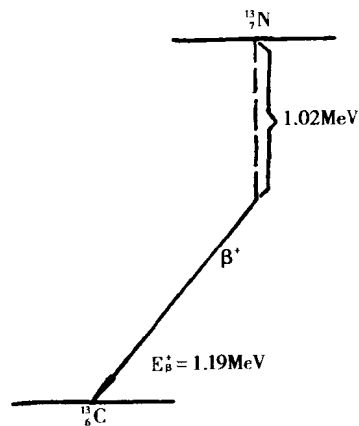
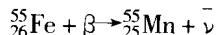


图 1-5 $^{13}_7\text{N}$ 的 β^+ 衰变图

成为原子序数减 1 的核，这一过程叫做 K 俘获。如果原子核俘获一个 L 层电子就叫做 L 俘获等等。因为 K 层电子最靠近原子核，因此发生 K 俘获的几率比其他壳层电子俘获几率大，所以电子俘获又叫 K 电子俘获。在发生电子俘获的核衰变中，原子核质量数不变，而原子序数减少 1。这一衰变过程可以描述为如下等式：

$${}_Z^AX + \beta \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \bar{\nu} \quad (\nu \text{ 为中微子})$$

典型的例子是 ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ 衰变为稳定的 ${}^{55}_{25}\text{Mn}$ ：



发生电子俘获衰变时，核内只放出中微子，除了有些核素因核处于激发态而放出 γ 射线达到稳定状态外，核内并没有放出其他任何易于探测的射线。但是相应的原子有次级辐射发生时，这种次级辐射可供探测。

由于内层轨道上的电子被俘获，外层轨道上的电子将不断地跃迁到内层轨道上补充空位，并且连续不断的释放特征 X 线。

β^- 、 β^+ 和电子俘获的衰变过程都是发生在同量异位素之间的衰变。由于在衰变过程中有电子或正电子从核内释放，或有电子从核外被俘获，母核和子核质量数都没有变化，只是核电荷数（质子数）改变。表明凡是原子序数相邻的同量异位素都是稳定的，他们会通过 β^- 或 β^+ 衰变和电子俘获衰变到最稳定的原子核，而原子序数相差为 2 个单位的同量异位素则可同时稳定。与某种元素的稳定核素相比较，当核内中子过多时，则可通过 β^- 衰变而将中子转变成质子，当核内质子过多时，则又会通过 β^+ 衰变或电子俘获将质子转变成中子。有些原子核仅能发生电子俘获，如 ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ ；有些原子核能同时发生 β^+ 衰变和电子俘获，如 ${}^{64}_{28}\text{Ni}$ ；也有些原子核能同时发生 β^- 衰变和 K 俘获，如 ${}^{60}_{29}\text{Cu}$ 、 ${}^{106}_{47}\text{Ag}$ 、 ${}^{108}_{47}\text{Ag}$ 等。

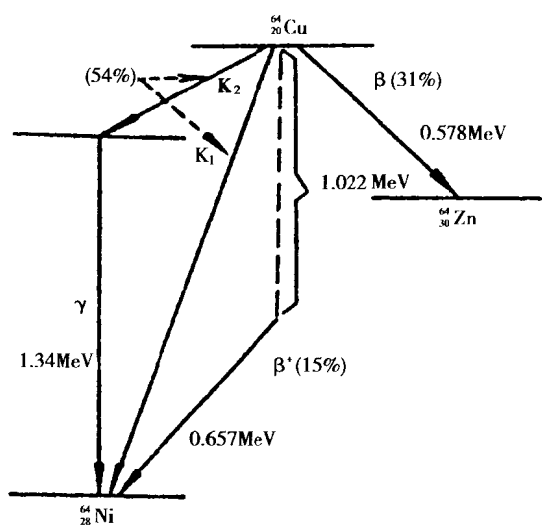
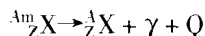


图 1-6 ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ 的 β^+ 、 β^- 衰变和 K 俘获衰变示意图

(五) γ 衰变和内转换

1. γ 衰变 从放射性核素的原子核释放 γ 射线的衰变称为 γ 衰变。 γ 射线是处于激发态的原子核跃迁到基态或者较低能态时所发射的，它是一种电磁辐射。由于受快速粒子的轰击或吸收光子，可使原子核处于激发态，各种类型的核衰变也可以产生激发态的子核。当这种激发态的原子核向较低能态或基态过渡时就放出 γ 光子，这种过程又称为 γ 跃迁。在大多数情况下，子核处在激发态的时间十分短暂（一般 $\approx 10^{-13}\text{s}$ ），几乎立即就跃迁到较低能态或基态并放出 γ 射线。在这样的过程中，放射 β 射线（或其他射线）和 γ 射线虽然是两个阶段的衰变，但是实际上很难把他们分开并测出其半衰期。有些核衰变，子核在激发态停留的时间比较长，因而能把 γ 衰变的半衰期测出来。这种跃迁对于核的原子序数和原子质量数都没有影响，所以又叫同质异能跃迁。

在 γ 衰变过程中，原子核的质量数和原子序数都没有改变，只有原子核的能量状态发生了变化。 γ 衰变可用下式表示



多数核素在衰变过程中可能发射不止一种能量的 γ 射线，例如， ${}^{60}\text{Co}$ 衰变时释放两种能量不同的 γ 射线，而 ${}^{131}\text{I}$ 衰变时可释放出 4 种不同能量的 γ 射线。

2. 内转换 处在激发态的原子核向较低能态或基态跃迁时，可以通过发射外电子的方式来完成。原子核把激发能直接交给核外某一个电子，使它脱离原子核的束缚而成为自由电子，这种过程称为内转换。被发射的核外电子称为内转换电子，主要是 K 电子，也有 L 电子或其他壳层的电子。

因为核的能级是一定的，所以内转换电子的能量 E_e 也是单色的，这和 β 射线的连续能谱有很大区别。有许多放射性原子核的内转换电子是与 β 射线混合在一起的。图 1-7 是 ${}^{198}\text{Au}$ 的 β 能谱。

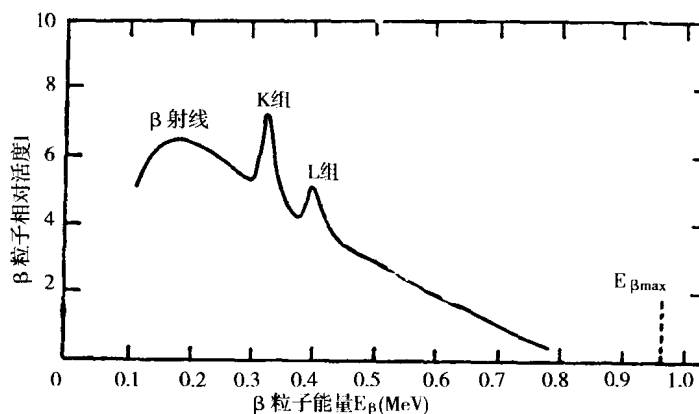


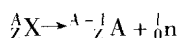
图 1-7 ${}^{198}\text{Au}$ 的 β 和内转换能谱

内转换发生后，在原子的 K 层或 L 层会留下空位，因此，还会有特征 X 线或俄歇电子发射，这与电子俘获后的情形一样。放射 γ 射线和内转换电子是核从激发态跃迁到较低能态或基态的两种可能方式。通常用内转换系数 α 来表示内转换和 γ 跃迁相对几率大小。处于激发态的原子核向低能态或基态跃迁时，如果原子核的激发能 $E > 1.02\text{MeV}$ （两个电子的静止质量能），原子核还可直接发射一对正负电子而回到基态，这种内转换叫电子对内转换。

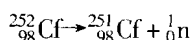
处于激发态的原子核，当激发能大于 1.02MeV 时，有可能通过 γ 辐射、内转换和电子对内转换三种过程而跃迁到较低能态或基态。

(六) 中子衰变 (neutron decay)

当放射性核素衰变时释放一个中子，叫中子衰变。在医学上利用中子射线进行肿瘤的治疗。这一衰变过程可以描述为如下等式：



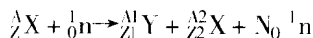
典型的例子是铀 (${}^{252}\text{Cf}$) 衰变为 ${}^{251}\text{Cf}$ ：



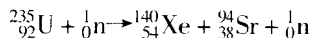
(七) 裂变 (fission)

当重原子核自发地或吸收一个中子后分裂叫做裂变。在原子核裂变过程中产生许多裂变

产物，同时在这一反应过程中伴有中子产生，进而可能发生连锁反应。这一过程可以描述为如下等式：



在这里 $Z = Z_1 + Z_2$ ； $A = A_1 + A_2 + N_0$ 。典型的例子是：



三、射线与物质的相互作用

放射性核素衰变和各种核反应装置所产生的电离辐射分为两大类，即直接电离辐射和间接电离辐射。直接电离辐射发射的是带电粒子，如电子、质子、 α 粒子等，与物质碰撞时可使后者电离。间接电离辐射发射的是不带电的粒子，如光子（X、 γ 线）、中子等，与物质相互作用时释放直接电离粒子或引起核反应，如光子与物质作用时可产生次级电子；中子与物质相互作用时可产生次级带电粒子，如质子、 α 粒子和反冲核，这些次级电子和带电粒子可使物质发生电离。电离作用包括：①射线对 DNA 分子链的直接作用引起单链断裂、双链断裂，高线性能量传递（LET）射线以直接作用为主；②间接作用，射线对机体内水分子的电离作用，产生自由基。自由基（ $\text{H}^\cdot$ ， $\text{OH}^\cdot$ ）是指原子外层轨道上有不成对的电子或分子，其性质高度活泼，寿命只有 10^{-5}s 。

自由基与生物大分子相互作用，引起损伤。低 LET 射线对生物体的作用以间接作用为主，其作用主要依赖于氧的存在。这也正是临床应用射线杀伤肿瘤细胞的生物学基础。

原子核转变时伴随释放各种射线，大体分为三类：①由带电粒子组成的射线，如由正电子或负电子组成的 β 射线，由氦原子核组成的 α 射线等；②由电磁波组成的 γ 射线和 X 线；③由中性粒子如中子组成的射线。

（一）光子与物质的相互作用

当光子穿越介质时，将其能量传递给介质并失去自身能量。光子与物质作用时趋于在一次碰撞中失去大部分或全部能量，并且通过所产生的次级电子引起物质原子的电离和激发。

不同的放射性核素放出的光子能量相差很大，一般在几千电子伏（KeV）到几兆电子伏（MeV）。这样能量范围内的光子主要通过三种方式将能量转移给被碰撞物质：①光电效应；②康普顿散射和③电子对的产生。

当光子能量较低时，光电效应起主导作用；光子能量大于 1MeV 时，康普顿效应占优势；电子对的产生则在光子能量超过 1.02MeV 时发生，能量越大，电子对的产生效应越显著。

1. 光电效应（photoelectric effect） 当一个光子与原子相碰撞时，如果将其全部能量交给一个壳层电子，使其脱离原子而运动，光子本身被吸收，这样的效应称为光电效应。光电效应释放出来的电子主要是 K 壳层电子，也可是 L 壳层电子或其他壳层电子，它们统称为光电子。作用过程如图 1-8 所示。

光电效应发生的几率与原子序数的关系十分密切。对于原子序数（Z）高的物质，光电效应发生的几率较大；对于原子序数小的物质，则不易发生光电效应；光电效应发生的几率还随入射光子的能量增加而逐渐下降。

2. 康普顿散射（compton scattering） 当入射光子和原子中的一个电子发生弹性碰撞，光子只将自己的一部分能量传递给电子，电子则从原子空间以与光子的初始运动方向成一定

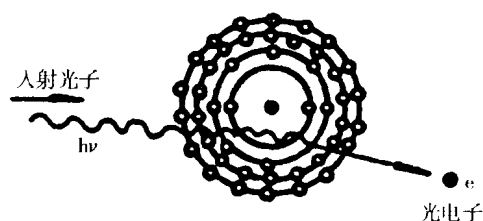


图 1-8 光电效应示意图

的角度的方向射出，与此同时光子本身则改变了频率并朝着与自己初始运动方向成一定角度的方向射出（图 1-9）。

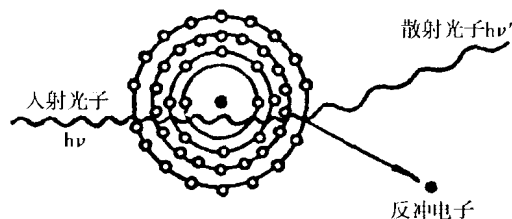


图 1-9 康普顿散射示意图

康普顿散射发生的几率与物质的原子序数呈正比，而且随入射光子能量的增加而减小。康普顿散射一般只涉及外壳层电子，除轻元素外，不会产生可观的 K 或 L 的 X 射线。

3. 电子对的产生 (electron pair production)

当光子能量大于两个电子的静止质量（即大于 1.02 MeV）时，在原子核库仑静电场的作用下，入射光子的能量可能全部被吸收而产生一对电子——一个正电子和一个负电子（图 1-10）。

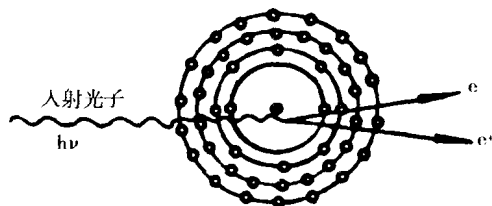


图 1-10 电子对产生的示意图

能量 $2m_0c^2$ 是这个过程的阈能。如果入射光子的能量超过 1.02 MeV 时，多余的能量将转化为正负电子的动能，它们的关系是：

$$E_{e^+} + E_{e^-} = (h\nu - 1.02) \text{ MeV}$$

等式中 E_{e^+} 代表正电子的动能， E_{e^-} 代表负电子的动能。就正电子和负电子来说，能量从零到 $(h\nu - 2m_0c^2)$ 都有，它们之间的能量分配是任意的。

电子对效应产生的一对正、负电子，在吸收物质中将逐渐损失能量。负电子最终停止在物质中成为自由电子。正电子耗尽自己的能量后与物质中的自由电子发生如下过程：

$$e^+ + e^- = 2h\nu$$

这个过程称为正电子的湮没。在正电子的湮没过程放出的两个运动方向相反的光子称为湮没辐射。湮没辐射的特征能量是 0.51 MeV。

光子与物质的三种相互作用方式都与光子的能量和物质的原子序数有关。不同能量的光

子通过原子序数不同的物质时，三种效应的作用几率相差很大。图 1-11 给出了这三种效应与光子能量和高原子序数的关系。由图 1-11 见对于低能量的光子（能量小于 0.5MeV）和高原子序数的吸收物质，光电效应占优势；电子对效应主要发生在高能光子（能量大于 1.02MeV）和高原子序数的物质；对于能量在 1~4 兆电子伏特的光子，康普顿散射占优势，而且与物质的原子序数几乎无关。

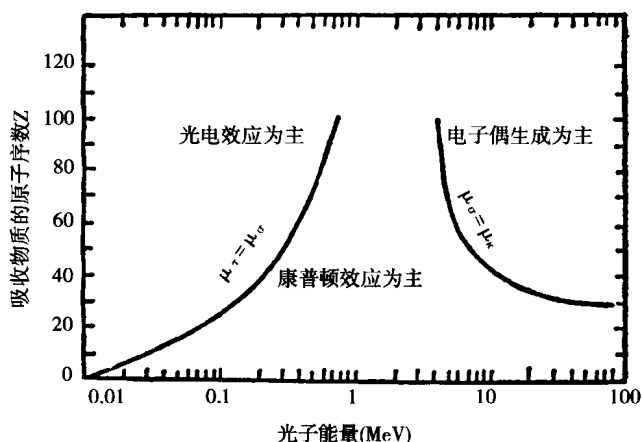


图 1-11 光子三种效应与光子能量的关系

(二) 电子与物质的相互作用

快速运动的电子与物质相互作用有以下三种主要作用方式：①非弹性碰撞；②韧致辐射；③弹性碰撞。

1. 电离和激发 (ionization and excitation) 当快速运动的电子通过物质时其速度将慢慢减低而损失能量。电子损失能量主要是引起物质原子的电离和激发。电离和激发作用是入射电子与物质原子的壳层电子之间的非弹性碰撞的结果。在非弹性碰撞时，由于入射电子与物质原子的壳层电子之间的静电库仑作用，壳层电子获得能量。如果壳层电子获得的能量足够大，它便克服原子核的束缚而脱离出来，物质的原子序数被分离成一个自由电子和一个正离子组成的离子对。带电粒子形成一对离子所消耗的平均能量为平均电离能。电子在空气中每产生一对离子约消耗 32.5eV（电子伏特）的能量。如果壳层电子获得的能量不足以使它脱离原子核的束缚而成为自由电子，那么只能从能量低的轨道跃迁到能量较高的轨道上去，这个过程就是原子的激发。处于激发态的原子是不稳定的，总要自发地回到原来的基态，这一现象称为原子的退激。原子退激时，多余的能量将以光子的形式释放出来。

入射电子产生的电离称为直接电离，在直接电离中产生的电子称为次级电子。如果次级电子具有足够的能量，还可使其他原子继续产生电离，这一过程称为次级电离。电子在物质中通过单位长度路径时，由于电离和激发而导致的能量损失称为电离损失率或传能线密度。电子的电离损失率或传能线密度取决与入射电子的能量，并与吸收物质的原子密度 N 和原子序数 Z 成正比。

2. 韧致辐射 (bremsstrahlung) 当快速运动的电子通过物质时，由于原子核库仑场的作用使其速度突然降低，电子的能量一部分或全部转化为连续能量的电磁辐射，这就是韧致辐射。产生韧致辐射的能量从零连续到粒子的最大动能。电子在物质中通过单位长度路径时，由于韧致辐射而损失的能量叫做辐射损失率，辐射损失率与吸收物质的原子序数的平方成正