

放射诊断放射防护手册

FANGSHE ZHENDUAN FANGSHE FANGHU SHOUCHE

主编 陈岩 刘永 师振祥



河北科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

放射诊断放射防护手册/陈岩, 刘永, 师振祥主编
-- 石家庄: 河北科学技术出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5375 - 7328 - 3

I. ①放… II. ①陈…②刘…③师… III. ①放射诊断—手册②辐射防护—手册 IV. ①R814 - 62②TL7 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 254647 号

放射诊断放射防护手册

陈岩 刘永 师振祥 主编

出版发行 河北科学技术出版社

地 址 石家庄市友谊北大街 330 号 (邮编: 050061)

印 刷 石家庄市西焦印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 18.25

字 数 300 千字

版 次 2014 年 11 月第 1 版

2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

编写人员

主 编：陈 岩 刘 永 师振祥
副主编：牛庆国 刘国强 李小鹏 李 鹏
 孟月杰 江丽红 赵焕云 侯瑞鸿
编 委：陈 岩 刘 永 师振祥 牛庆国
 刘国强 李小鹏 李 鹏 孟月杰
 江丽红 赵焕云 侯瑞鸿 汤志强
 王有成 张 雨 梁志苓 朱兰英
 谷一龙

序 言

提起放射性，大多数人都感到比较抽象、陌生和恐惧。其实自然界本身就存在着放射性，也就是通常所说的辐射照射。人类并不是从发现放射性和广泛应用原子能之后才受到辐射照射的，而是一直生活在天然电离辐射的环境中。地壳里含有大量的放射性物质，水、土壤、农作物中含有放射性物质，空气中也含有气化的放射性气体及放射性尘埃。宇宙每时每刻都在向地球发射着宇宙射线。人类就是生活在这样一个充满放射性（辐射照射）的环境中。

1895年，物理学家伦琴发现了X射线。随着人们对X射线特性认知的不断深入，X射线很快被应用于医学诊断和治疗。随着科学技术的进步和原子能技术与射线装置的应用，医用辐射在临床的应用也越来越广泛，在防病治病，保障人民健康方面发挥了其他技术难以替代的巨大作用。但是，射线是一把双刃剑。它在不断带给我们新技术和财富的同时，如果用之不当，管理不善，忽视对它的防护，就会影响人类身体健康，危及环境安全，甚至导致严重放射事故，造成人员伤亡和重大财产损失。鉴于放射性危害的特殊性及其后果的社会影响，放射防护与辐射安全历来受到国际社会的高度关注。

近些年，随着我国医疗卫生事业的快速发展，各医疗机构拥有的放射诊断和治疗设备的数量迅猛增长，诊断和治疗水平的显著提高，越来越多的人被动或主动地接受着放射诊疗带来的益处及风险。随之而来的放射线的双刃剑效应日益凸显，放射线过度检查与滥用、放射防护不到位和放射防护管理不善等原因导致的放射事件也越来越受到社会的广泛关注。

为了全面贯彻执行《职业病防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射诊疗管理规定》等一系列法律、法规，提高各类放射工作人员对辐射安全重要性的认识，使他们增强防护意识、掌握防护技术，最大限度地减少不必要的照射，避免放射事故的发生，从而保障放射从业人员、受检者和公众的身体健康和安全，石家庄市职业病防治院的专家和学者牵头编写了《放射诊断放射防护手册》一书。此书从核辐射物理学、放射防护剂量学及电离辐射生物学的基础知识谈起，综合国家对射线装置安全和防护的具体要求，结合自身在放射防护管理、放射防护检测与评价、放射工作人员职业

健康监护等方面积累的丰富经验，深入浅出地解答了放射诊断放射防护工作中遇到的实际问题和处置原则，适用于各医疗机构放射工作管理人员、放射诊疗工作人员和接受放射诊疗的患者阅读。希望本书的出版对相关工作人员正确理解和执行放射防护法律法规有所裨益，对普及社会公众的放射诊疗知识和放射防护知识发挥积极的作用。

本书由于涉及的内容较多，编写人员知识水平有限，因此难免存在不足，敬请读者提出宝贵意见，以便我们改进。

编 者

2014 年 8 月

目 录

第一章 核辐射物理学基础	(1)
第一节 放射性的发现	(1)
第二节 核辐射物理基础	(2)
第三节 原子核的基本性质	(4)
第四节 放射性衰变	(6)
第五节 射线与物质的相互作用	(8)
第六节 电离辐射源	(17)
第二章 放射防护剂量学基础	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 剂量学基准物理量	(23)
第三节 放射防护量	(28)
第四节 外照射检测的实用量	(33)
第五节 与群体相关的放射防护量	(35)
第三章 电离辐射生物学作用	(37)
第一节 基本概念	(37)
第二节 电离辐射对生物体作用	(39)
第三节 电离辐射对生物大分子的损伤	(45)
第四节 电离辐射对细胞的影响	(47)
第五节 职业性放射性疾病的诊断	(50)
第四章 放射防护原则的应用	(63)
第一节 放射防护的目的	(63)
第二节 放射防护三原则	(64)
第三节 放射防护原则的应用	(66)
第五章 放射诊疗的外照射防护	(73)
第一节 防护的方法	(73)
第二节 屏蔽材料	(77)
第三节 医用 X 射线诊断的防护	(80)

第四节	X 射线计算机断层摄影(CT)的防护	(92)
第五节	介入放射学辐射防护	(95)
第六章	放射防护管理	(104)
第一节	放射防护法律体系	(104)
第二节	放射防护标准	(111)
第三节	放射防护管理	(118)
第四节	放射工作人员健康管理	(121)
第五节	放射事故应急	(123)
第六节	放射诊断的质量控制	(128)
第七章	个人监测和评价	(138)
第一节	外照射个人监测	(138)
第二节	个人剂量评价	(142)
第三节	职业照射的记录	(143)
第八章	职业健康监护	(145)
第一节	职业照射	(145)
第二节	辐射致癌危险	(155)
第三节	放射防护与教育培训	(157)
第四节	职业健康监护	(165)
第五节	职业健康监护的法律依据	(169)
第六节	放射工作人员职业健康检查	(176)
第七节	职业健康监护档案管理	(182)
第八节	过量照射人员的医学处理	(184)
第九章	放射诊疗建设项目职业病危害放射防护评价	(189)
第一节	法律依据	(189)
第二节	建设项目放射防护评价所需的资料	(198)
附录一	放射诊疗管理规定	(213)
附录二	放射工作人员职业健康管理办法	(223)
附录三	医用 X 射线诊断放射防护要求	(230)
附录四	医用 X 射线诊断受检者放射卫生防护标准	(248)
附录五	医用诊断 X 射线个人防护材料及用品标准	(262)
附录六	医用诊断 X 射线防护玻璃板标准	(275)
主要参考文献		(282)

第一章 核辐射物理学基础

第一节 放射性的发现

从地球形成那天起，我们人类生活和居住的这个星球上就存在着多种放射性核素。直到 19 世纪末，人类对于核素的放射性仍一无所知，因为辐射无色、无味、无臭，人体无法直接感应，使得大家对于它有莫名的恐惧感。

实际上，我们生活中始终伴随有辐射：例如，太阳中就有这类辐射，也就是人们常说的宇宙射线；土壤、岩石、水、植物、动物中也都存在放射性，这些造成了地球的陆地辐射；在我们吃的食品中都含有⁴⁰K，⁴⁰K 就有放射性。现代医学、农业和工业已离不开核技术的应用，可以说放射性为现代文明做出了重要的贡献。人类在一百多年前发现放射性以来，就尝试应用于许多领域，如 X 线照射、农产品保鲜与飞机结构检测等，带给了我们许多的方便。事实上日常生活中已经少不了放射性的应用。

一、X 射线

1895 年，物理学家伦琴在用真空放电管做实验时发现：如果放电电压足够高，真空放电管的阳极靶会发出一种人的肉眼看不见的射线。这种射线能使荧光物质发光，并且具有穿透能力，能使包在黑纸内的照相底片感光，因不知其名，故称为 X 射线，俗称 X 光。以后又发现，X 射线会使空气电离而导电。伦琴的发现使人类第一次认识到电离辐射。由于伦琴这一伟大贡献，很长一段时间内人们用“伦琴”作为 X 和 γ 射线照射量的单位。

二、放射性

1896 年以前，人们并不认识原子的结构，认为原子是不能再分割的，是构成物质世界的最小单位。第一次动摇这种观念的是 1896 年的一项重大科学发现——法国物理学家贝克勒尔在研究铀矿物质的荧光现象时，发现铀盐自身会发射一种穿透力很强的不可见射线，这种射线可以使空气电离，使胶片感光。这一发现改变了原子是物质不可分割的最小单位的认识。从此，自然

科学从原子时代进入了原子核时代。为了纪念贝克勒尔这一伟大贡献，人们用“贝克勒尔”（Bq）作为放射性物质活度的单位。

三、人工放射性

1897 年以后，科学家们已经证实电子是原子的组成部分。原子是电中性的，因此，原子中还应包含带正电荷的物质，以补偿电子所带的负电荷。1911 年，卢瑟福用镭发射的 α 粒子束轰击金属薄膜，发现存在大角度 α 粒子散射，从此证明放射性可以人工产生。这就是著名的卢瑟福散射实验。

目前人类已经发现近 3000 种核素，天然的有 300 多个，其中稳定核素 270 多个，放射性核素 30 多个，其余 2600 多个核素都是人工合成的放射性核素。

四、原子的内部结构

1897 年以后，科学家们已经证实电子是原子的组成部分，使人们对原子结构的认识进入一个新的时代。1906 年卢瑟福发现， α 射线穿透薄的金属片时，有被散射的现象。在以后的几年里，他又和学生一起实验，发现 α 粒子在穿透金属时，绝大多数偏转的角度很小，只有少数 α 粒子的偏转角较大，约 $1/80000$ 的 α 粒子的偏转角大于 90° ，有的接近 180° ，这样的散射称为反散射。这就是 1911 年卢瑟福完成的著名的 α 粒子散射实验，并在实验的基础上提出了原子的核式模型，奠定了现代原子模型的基础。卢瑟福认为，原子内部像一个太阳系，原子核带正电，像太阳那样位于太阳系的中心，而电子像行星一样在自己的轨道上绕原子核飞行。

五、辐射是什么

辐射，像光一样，是一种能量，如 X 射线等的电磁波，又如 β 射线等的高速粒子流。通常我们依它们能量的高低或电离物质的能力，分成非电离辐射和电离辐射两大类。非电离辐射：指能量低无法使物质产生电离的辐射，例如太阳光、灯光、红外线、微波、无线电波、雷达波等。电离辐射：指能量高，能使物质产生电离作用的辐射，如 X 射线、 β 射线。

第二节 核辐射物理基础

宇宙由物质和能量组成，二者可以互相转化，并且都存在多种形态。物

质与能量构成世间万物，包括可见的与不可见的。物质具有确定的形态、形状和尺寸，能量虽然具有不同的形态（种类）却没有形状与尺寸。标志物质的量是质量。物质由原子组成，原子由电子与原子核组成，原子核又由核子（中子和质子）组成，核子又由夸克组成。物质是否无限可分是一个有趣的科学问题，人类始终坚持不懈地从更深层次探索物质的组成。

辐射是以运动形式（即波或运动粒子）向周围空间或物质传播的能量，如声辐射、热辐射、电磁辐射、 α 辐射、 β 辐射、中子辐射等。辐射由一个物体发射，同时由另外的物体接受。辐射具有两种形式：

（1）粒子辐射指以运动粒子形式传播的能量，如高速运动的电子、质子、中子、 α 粒子等，它们都有质量，多数都具有电荷，它们的速度大小取决于它们的动能。粒子辐射一般来源于放射性衰变、宇宙射线、核反应、加速器等。

（2）电磁辐射一般指以电磁波形式传播的能量，其速度恒定为光速，电磁波本身没有质量和电荷，常见的电磁辐射有无线电波、可见光、热辐射、 γ 辐射等等。电磁辐射的能量 E 与电磁波的频率 ν 或波长 λ 存在如下关系：

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

h 为 Planck 常数。

电磁辐射同时具有波动性质和粒子性质，核物理与粒子物理领域，所涉及的电磁辐射能量都很高，一般在 keV、MeV、GeV 甚至 TeV 量级。习惯上将电磁辐射称为光子。

正因为微观粒子具有波粒二象性，射线与粒子概念等同，平常所说射线或粒子包括中子、质子、X 射线与 γ 射线等。

按照发射体来源，辐射可以分为核辐射、原子辐射、宇宙辐射等。

按照产生手段，辐射又可以分为天然辐射、人工辐射等。

按照电荷情况和粒子性质，辐射又可以分为：

带电粒子辐射如： p 、 a 、 e^\pm 、 π^\pm 、 μ^\pm 等；

中性粒子辐射如： n 、 ν 等；

电磁辐射如： γ 射线和 X 射线、可见光、无线电波和射频等。

按照能量高低，辐射可以分为电离辐射与非电离辐射。

电离是指原子的核外电子脱离原子的束缚成为自由电子的过程。原子的电离能一般只有几个 eV，X、 γ 射线与一般粒子辐射的能量都能够使原子发生电离，它们都是电离辐射。电离辐射就是通过与物质的相互作用能够直接或间接地使物质的原子、分子电离的辐射；有时简称为“辐射”或“射线”，

“辐射”有时也称为“放射”。

第三节 原子核的基本性质

原子核的基本性质是指原子核整体的静态性质，如原子核的质量、电荷、尺寸、自旋、磁矩、结合能、统计性质等，这里只介绍原子核的质量、放射性和活度等基本性质。

一、原子核质量

原子核的质量无法直接测量，通常都是通过测定原子质量来推知原子核的质量。原子的质量很微小，通常不以克（g）或千克（kg）做单位，而是采用原子质量单位（u），一个原子质量单位定义如下：

$$1\text{u} = {}^{12}\text{C} \text{ 原子质量的 } \frac{1}{12}$$

原子质量单位与国际单位 g 的关系为：

$$1\text{u} = \frac{12}{N_A} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{6.022142 \times 10^{23}} \text{g} = 1.6605387 \times 10^{-24} \text{g}$$

式中 N_A 为阿伏加德罗常数。核物理中通常用电子伏特（eV）作为能量单位。1eV 是一个电子在真空中通过 1V 电位差所获得的动能。1eV = $1.60217646 \times 10^{-19} \text{J}$ 。千电子伏特（KeV）、兆电子伏特（MeV）和吉电子伏特（GeV）等也是常用的能量单位。1u = 931.494013MeV/ c^2 。另外，为简便起见，也常用能量单位表示质量，如 1u = 931.494013MeV。中子与质子的质量分别为：

$$m_n = 1.67492716 \times 10^{-24} \text{g} = 939.565330 \text{MeV},$$

$$m_p = 1.67262158 \times 10^{-24} \text{g} = 938.271998 \text{MeV}。$$

中子的质量略大于质子的质量，这也是中子可以衰变为质子的主要原因。电子的质量

$m_e = 9.10938188 \times 10^{-28} \text{g} = 0.510998902 \text{MeV}$ ，仅是中子或质子质量的 1/1800。

二、原子核的放射性

在磁场中研究原子核发出的射线的性质时，发现不同的原子核发出的射线在磁场中偏转方向不同。一种射线在磁场中的偏转方向与带正电的离子流

的偏转方向相同；另一种射线与带负电的离子流的偏转方向相同；第三种射线则不发生任何偏转，继续沿着直线方向前进。这三种射线分别叫做 α 射线， β 射线和 γ 射线。

进一步的研究证明：

(1) α 射线是由高速运动的氦原子核（又称 α 粒子）组成的，所以它在磁场中的偏转方向与正离子流相同。它的电离作用大，贯穿本领小。它在空气中的射程只有几个厘米。

(2) β 射线是高速运动的电子流，它的电离作用较小，贯穿本领较大。它在空气中的射程因其能量的不同而有较大差异，一般为几米。

(3) γ 射线是波长很短的电磁波，所以它在磁场中不发生偏转。它具有间接电离作用，贯穿本领很大。它在空气中的射程通常为几百米。

现在知道，有许多原子核都能自发地发射某种射线。有的发射 α 射线，有的发射 β 射线，有的发射 γ 射线，有的在发射 α 射线或 β 射线的同时也发射 γ 射线，有的三种射线均发射。此外，原子核还有发射正电子、质子、中子、重离子等其他粒子以及自发裂变的情况。由于原子核自发的变化而放射出各种射线的现象，称为原子核的放射性。能自发地放射各种射线的核素，叫放射性核素。实验证明，对放射性核素加温、加压或加电磁场，都不能抑制或显著改变其放射性。除了原子核的放射性，现在已被广泛应用的还有射线装置，它们主要有 X 射线机、粒子加速器、中子发生器等。有时把含有放射性核素的装置也称为射线装置。

三、放射性活度

原子核自发地放射出射线后，原子核本身就从一种核素转变成另一种核素，这种过程就叫做原子核的衰变，又叫放射性衰变。在给定时刻，处在特定能态的一定量的某种放射性核素的放射性活度 A 是该核素从该能态发生自发核跃迁数的期望值除以该时间间隔而得的商。即单位时间内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。通常用 A 表示。

在国际单位制中，放射性的单位为“贝克勒尔”，简称贝克，符号 Bq。1Bq 等于放射性物质在 1 秒钟内有 1 个原子核发生衰变。其表达式如下：

$$1\text{Bq} = 1 \text{ 次衰变/秒}$$

早期的放射性单位叫居里 (Ci)。它早期的定义是：1 克 ^{226}Ra 所具有的放射性活度。后来规定，居里与贝克的关系如下：

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$$

单位居里是采用国际单位制前使用的放射性活度的旧专用单位，但在早期的文献中经常可以看到。

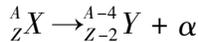
第四节 放射性衰变

放射性衰变是指原子自发地发生核的结构转变或内部能量变化并放出射线的现象。根据放出射线种类的不同，放射性衰变可以分为 α 衰变、 β 衰变和 γ 跃迁等不同类型的。放射性核素遵循指数衰变规律。

一、放射性衰变的类型

1. α 衰变

有些放射性元素衰变时同时放出结合在一起的两个质子和两个中子，即 α 粒子，叫做 α 衰变。经过 α 衰变以后，子核的质量数比母核减少 4，原子序数减少 2。其衰变式如下：

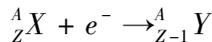
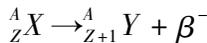
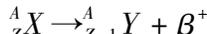


其中，X 为母核，Y 为子核，A 为质量数，Z 为原子序数。

α 衰变一般发生于重的不稳定核素中，原子序数大于 82 的天然放射性核素易发生此种衰变。

2. β 衰变

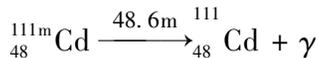
不稳定原子核通过放出 β 粒子或俘获核外的轨道电子转变为另一原子核的现象，原子核的 β 衰变有三种类型。它们是 β^+ 衰变、 β^- 衰变和电子俘获。其表达式分别为：



在 β 衰变中，子核与母核的质量数相同，只是原子序数变化 1 个单位。不同放射性核素的 β 衰变方式不同，有的放射性核素只放出一种 β 射线，有的放射性核素放出多种 β 射线，或伴随有不同能量的 γ 射线。

3. γ 跃迁

处于激发态的原子核通过放出 γ 射线或内转换电子到较低能态的过程，叫做 γ 跃迁，也叫 γ 衰变或 γ 退激。 γ 射线一般是伴随 α 或 β 衰变产生的，也有同核异能态的原子核向基态退激时发射 γ 射线的情形。如



原子核由高能态自发地向低能态的跃迁也可以通过发射核外电子的方式来完成，这一过程叫内转换，此时不发射 γ 射线。

γ 跃迁不会导致核素质量数和原子序数的变化，只是原子核内部能量状态发生了改变。

γ 射线是从原子核内放射出的电磁波，X 射线也是电磁波，两者区别在于产生方式不同，X 射线是在原子核外产生的。

二、放射性核素的衰变规律

1. 放射性核素的衰变常数

某种放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率叫做该核素的衰变常数，符号为 λ ，它的单位为 1/秒。显然， λ 的大小决定了放射性核素衰变的快慢，它只与核素的种类有关。因此，它是放射性原子核的特征量，也就是说，它是由放射性核素本身的性质决定的，与放射性核素有确定的对应关系。

2. 指数衰减规律

对于确定的放射性核素，可以有一种或多种衰变方式。对于具有同一种衰变方式的原子核，其衰变的时刻也是各不相同的，即它们的衰变是独立地随机发生的。很显然，原子核的衰变数量与原子核的衰变常数成正比，与 t 时刻的原子核数量成正比，也与时间间隔成正比；在数学上可以表示为：

$$dN = -\lambda N dt$$

式中， t 为时间； N 是这类原子核在时刻 t 时的数量； λ 为衰变常数； dt 表示微小的时间间隔； dN 是在 dt 时间间隔内发生衰变的原子核数。对上式经过变换后求积分，可以得到：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 为起始时刻 ($t = 0$) 原子核的数量。上式表明，某种原子核在时刻 t 的数量与其起始时刻 ($t = 0$) 的数量之间存在着指数衰减的关系，即这种原子核的数量由于衰变而按指数规律减少，这就是放射性核素指数衰减规律。

3. 半衰期

根据 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 不难计算，某种原子核的数量减少一半所需要的时间

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$T_{1/2}$ 就称为这种放射性核素的半衰期。不同核素的半衰期可以相差很大，有的可以达到 10^{10} 年以上，有的可以远小于 1 秒。

同样可以计算,这种原子核从原来的数量到全部衰变掉,每个原子核的平均寿命(T)为

$$T = \frac{1}{\lambda}$$

显然,某种放射性核素的平均寿命等于它的衰变常数的倒数;这从衰变常数的定义也可以直接导出。

第五节 射线与物质的相互作用

一、射线与物质的相互作用过程

X射线和 γ 射线均为电磁辐射,具有光波和粒子两种性质。所以又叫“光子”我们可做如下形象的描述,即X射线或 γ 射线是从射线装置或放射源发出的一粒粒不连续的光子流,它不带电(中性),具有很强的贯穿物质的本领,在真空中以光速 c ($c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿直线传播。光子的能量 ε 为:

$$\varepsilon = h\nu$$

式中, $h = 6.67 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 称为普朗克常数; ν 为光子频率(Hz)。由于X或 γ 射线的本质相同,决定了它们与物质相互作用的过程也相同。当X或 γ 射线通过物质时,将可能与原子的轨道电子、原子核、带电粒子的电场以及原子核的库仑场发生相互作用。作用的结果将可能发生光子的吸收、弹性散射和非弹性散射。发生吸收时,光子能量将全部变为其他形式的能;而弹性散射仅改变光子的传播方向;非弹性散射不仅改变光子的传播方向,同时也部分地吸收了光子的能量。

在光子能量为0.01~10兆电子伏(MeV)这个常见的能量范围内,X、 γ 射线与物质的相互作用主要表现为光电效应、康普顿效应和电子对生成三种效应,而其他作用造成的能量损失很小,均为次要过程。

(一) 光电效应

X、 γ 射线(光子)照射物质时,入射光子作用于原子的内壳层电子(束缚电子),把全部能量交给该电子,使其克服结合能而离开原子,称为光电子,而光子自身消失。(图1-1)。光电子的动能(E)等于入射光子能量($h\nu$)减去该电子在原子中的结合能(A),即: $E = h\nu - A$ 。

式中: h 为普朗克常数, ν 为光子频率。

当光子能量低于轨道电子结合能时,光电效应不可能发生。实验证明,当光

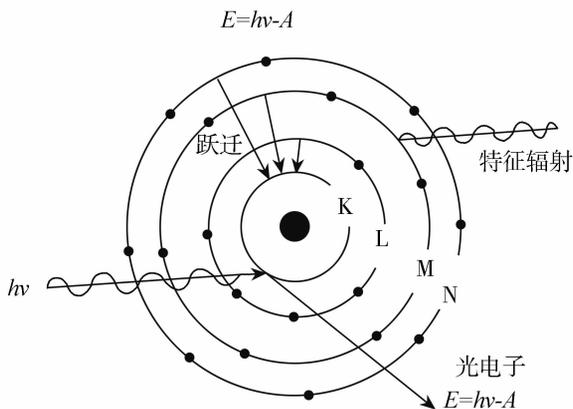


图 1-1 光电效应

子能量等于或稍大于 K 层电子结合能时, 则有 80% 以上的光电效应发生在 K 层。可见, 光电效应最容易发生在结合能较大的原子内壳层中。

光电效应的发生几率与原子序数 Z 和入射光子能量 $h\nu$, 大致存在如下关系:

$$\text{光电效应几率} \propto Z^4 / (h\nu)^3$$

可见, 低能光子在高 Z 物质中发生光电效应的几率最大, 反之则小。

释出光电子的原子呈不稳定的激发态, 外层电子很快跃入填充其空位, 同时释放出等于跃迁前后两能级之差的特征 X 射线。特征 X 射线光子在离开原子前, 还可能将外层电子击脱, 此电子称为“俄歇电子”。在光电效应中可产生上述 3 种产物, 即负粒子 (光电子、俄歇电子)、正粒子 (失去电子的原子) 和特征辐射。X 或 γ 射线在屏蔽材料中, 发生光电效应的几率越大, 则被吸收的射线就越多, 显然, 其屏蔽效果就越好。

(二) 康普顿效应

康普顿效应是 X 或 γ 射线 (光子) 的能量被部分地吸收而产生散射的过程。当能量为 $h\nu$ 的入射光子, 与结合能很小的原子外壳层电子 (与入射光子能量相比可看作自由电子) 发生碰撞 (图 1-2), 光子把部分能量传给电子, 其自身能量减少, 并沿与入射方向成 θ 角的方向射出, 成为散射光子; 获得能量的外层电子在与入射方向成 ϕ 角的方向射出, 成为反冲电子。若忽略占份额很小的结合能, 则入射光子的能量 ($h\nu$), 应等于散射光子的能量 ($h\nu'$) 与反冲电子动能之和。这个作用过程称为康普顿效应, 也叫康普顿散射。

康普顿效应可以想象为两个球的碰撞, 一个是入射光子, 另一个是自由电子。碰撞时若光子从电子边上擦过, 则光子偏转角度很小, 反冲电子获得

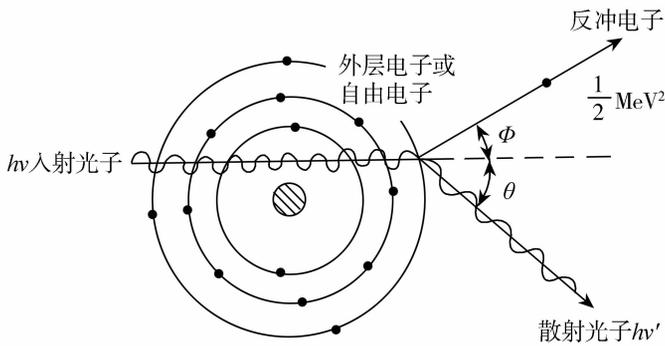


图 1-2 康普顿效应

的动能也很少，这时散射光子保留了大部分能量；如果碰撞更直接些，光子偏转角度增大，损失的能量增多；正向碰撞时，反冲电子获得的能量最多，这时反向折回的散射光子仍保留一定的能量。表 1-1 列出不同偏转角度的散射光子能量。

表 1-1 各种偏转角度下散射光子的能量

入射光子能量 (KeV)	光子偏转角度			
	30°	60°	90°	180°
25	24.9	24.4	24	23
50	49.6	47.8	46	42
75	74.3	70.0	66	58
100	98.5	91.0	84	72
150	146.0	131.0	116	95

由表 1-1 中数据可见，散射光子仍带有大部分能量。康普顿效应是 X 或 γ 射线在屏蔽材料中产生散射线的主要来源，在屏蔽防护中应引起充分重视。

对于能量为 0.8 ~ 4MeV 的 γ 、X 射线，康普顿效应占主导地位。康普顿效应的发生几率与原子序数 Z 及光子能量 $h\nu$ ，大致存在如下关系：

$$\text{康普顿效应发生几率} \propto Z/h\nu$$

(三) 电子对生成

一个具有足够能量的光子 ($h\nu \geq 1.02\text{MeV}$)，在行近靶原子核时，突然消失，