

电离辐射防护知识

DYANLIFUSHEFANGHUZHISHI

● 李培英 牛庆国 陈岩 主编



河北科学技术出版社

《电离辐射防护知识》编辑委员会

主 编	李培英	牛庆国	陈 岩	
副主编	王冬玉	杨丽莉	白 净	李聪璞
	高丽惠	孙 浩	刘 永	刘兵海
	张书娥	魏丽珍	索嗣英	
编 委 (以姓氏笔划为序)				
	王冬玉	牛庆国	白 净	孙 浩
	李培英	李聪璞	刘 永	刘兵海
	杨丽莉	陈 岩	张书娥	高丽惠
	魏丽珍	索嗣英		

前 言

随着科学技术的飞速发展，原子能技术和射线装置广泛应用，给人类疾病的诊断和治疗带来了巨大的裨益。但是，在应用放射性同位素和射线装置的过程中，辐射既能造福于人类，同样也会造成危害，如果不注意防护，就会危害环境，对人体造成辐射损伤，甚至危害子孙后代。为了保障放射从业人员、受检者和公众的身体健康和安全，提高人口素质，构建和谐社会，必须做好放射卫生工作。

自从第二次世界大战日本人民受到原子弹辐射危害以来，人们对辐射损伤特别敏感。尤其是近年来，前苏联切尔诺贝利核电站事故、美国三里岛核电站事故和2006年12月俄罗斯前特工利特维年科由于受到放射性元素钋-210辐射死于英国伦敦并造成150多人受到超剂量照射事件，引起了世界各国对核与放射事故的高度关注。我国虽然未发生核事故，但是放射事故屡有发生，我国政府为了加大对放射工作的监管，近年来陆续发布实施了《中华人民共和国职业病防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射事故管理规定》、《放射诊疗管理规定》、《放射工作人员职业健康管理暂行办法》等一系列法律、法规、规章及88项放射卫生标准和监测规范，使我国的放射卫生防护工作由原来的行政管理逐步走向法制化管理，这些法律、法规、规章标准及规范的实施必将对强化放射卫生管理，开创放射卫生防护新局面起到积极的推动作用。

为了宣传、贯彻这些法律、法规、规章和标准，我

们编写了《电离辐射防护知识》，内容包括：辐射防护基础知识、外照射的防护、个人剂量的监测、法律法规等内容，作为培训放射工作人员防护知识的教材。本书深入浅出，通俗易懂，强调实用性，不仅是放射工作人员必读教材，也是放射卫生管理人员、卫生行政人员的有益参考书。这本书的出版必将对我省宣传、贯彻放射卫生法律、法规，推动放射卫生工作起到积极作用。

由于时间仓促，加之作者水平所限，可能存在一些缺点和疏漏，欢迎各位读者批评指正。

编 者

2008 年 4 月

目 录

第一章 辐射物理学基础理论

第一节	放射性的发现	3
第二节	核辐射物理基础	5
第三节	原子核的基本性质	6
第四节	放射性核素的衰变	9
第五节	电离辐射与物质的相互作用	12
第六节	电离辐射源	25

第二章 放射防护剂量学基础

第一节	概述	30
第二节	剂量学基准物理量	33
第三节	放射防护量	39
第四节	外照射监测的实用量	45
第五节	内照射危害评价的待积量	48
第六节	与群体相关的放射防护量	49

第三章 辐射生物学效应

第一节	基本概念	50
第二节	电离辐射对生物体作用的基本原理	53
第三节	电离辐射对生物大分子的损伤	59
第四节	电离辐射的细胞效应	62
第五节	放射性疾病的诊断与管理	66

第四章 放射防护应遵守的原则

第一节	放射防护的目的	73
-----	---------------	----

第二节	放射防护三原则	74
第三节	放射防护三原则的应用	77

第五章 辐射源的外照射防护

第一节	防护的措施	85
第二节	屏蔽材料	88
第三节	医用 X 射线机的防护	96
第四节	X 射线计算机断层摄影 (CT) 的防护	106
第五节	介入放射学辐射防护	111

第六章 临床核医学的防护

第一节	核医学诊断的防护	119
第二节	核医学治疗的防护	126

第七章 个人监测和评价

第一节	外照射个人监测	139
第二节	内照射个人监测	144
第三节	皮肤污染的个人监测	147
第四节	个人剂量评价	151
第五节	职业照射的记录	152
第六节	我国有关法规对个人监测管理的要求	153

附 录

附录一	中华人民共和国卫生部令 第 46 号《放射诊疗管理规定》	157
附录二	中华人民共和国卫生部令 第 55 号《放射工作人员职业健康管理办法》	173

第一章 辐射物理学基础理论

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物质。各种生物就是在这些放射性物质发出的电离辐射照射下发生和演变的,人类也是在这样一种环境下从猿进化为人的。尽管人类已经由原始社会进化到文明社会,但是直到19世纪末,人类对于周围物质的放射性质仍一无所知,因为人类的感官对放射性无法感知,看不见,摸不着,短时间内也没有发现它对生物体和人类的发育生长有什么不利的影响。

一、X射线的发现

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,伦琴把它叫做X射线。以后又发现,这种射线具有使物质电离的能力。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、放射性的发现

1896年以前,人们并不认识原子的结构,所有的人都认为原子是不能再分割的,认为原子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——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”的名字作为放射性物质活度的单位。

三、人工放射性的发现

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、原子内部结构的发现

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。

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 粒子及其他更重的粒子,它们都有质量,除中子以外都具有电荷,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像性,射线与粒子概念等同,平常所说射线或粒子指称中子、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 、 D 、 T 、 α 、 e^+ 、 π^+ 、 μ^+ 等。

中性粒子辐射如: n 、 ν 等。

电磁辐射如: γ 或 X 射线、可见光、无线电波和射频等。

按照能量大小,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。原子的电离能一般只有几个 eV,一般粒子辐射与 X/ γ 射线的能量都能够使原子发生电离,它们都是电离辐射。通常所说的“辐射”仅指高能电磁辐射和粒子辐射。这种狭义的“辐射”又称为“射线”或核辐射。需要指出的是,实际应用中,电离辐射专指核辐射,而电磁辐射专指无线电波和射频波等低能电磁辐射,不包含 X/ γ 射线,后者则划归到核辐射的范畴。

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：

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

式中 N_A 为阿伏伽德罗常数。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。 $1\text{ eV} = 1.60217646 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。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。这样， $1\text{ u} = 931.494013 \text{ MeV}/c^2$ 。另外，为简便起见，也常用能量单位表示质量，如 $1\text{ u} = 931.494013 \text{ MeV}$ 。这样，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

在磁场中研究这种射线的性质时，证明它是由三种成分组成的。其中一个成分在磁场中的偏转方向与带正电的离子流的偏转方向相同；另一个成分与带负电的离子流的偏转方向相同；第三个成分则不发生任何偏转，继续沿着直线方向前进。这三种射线成分分别叫做 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。一定量的放射性核素在一个很短的时间间隔内发生的核衰变数除以该时间间隔叫做放射性活度（GB4960-85），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“贝可勒尔”，简称贝可，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，居里与贝可的关系如下：

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

单位居里现在已经废除，但在早期的文献中经常可以看到。

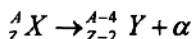
第四节 放射性核素的衰变

一、放射性衰变的种类

在放射性的衰变中，发生衰变的原子核叫母核，衰变后所产生的核叫子核。放射性原子核的衰变主要有三种类型，它们分别叫做 α 衰变、 β 衰变和 γ 跃迁。

1. α 衰变

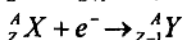
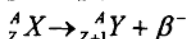
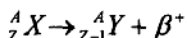
原子核自发地放射出 α 粒子而发生的转变, 叫做 α 衰变。经过 α 衰变以后, 子核的质量数比母核减少 4, 原子序数减少 2。其衰变式如下:



其中, X 为母核, Y 为子核, A 为质量数, Z 为原子序数。

2. β 衰变

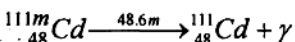
原子核的 β 衰变有三种形式。它们是 β^+ 衰变、 β^- 衰变和电子俘获。其表达式分别为:



在 β 衰变中, 子核与母核的质量数相同, 只是原子序数相差 1。它们是相邻的同量异位素。

3. γ 跃迁

原子核通过放射 γ 射线由高能态自发地向低能态跃迁, 叫做 γ 跃迁, 也叫 γ 衰变。 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。

二、放射性核素的衰变规律

1. 放射性核素的衰变常数

放射性核素在单位时间内发生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 电离辐射与物质的相互作用

一、电离辐射与物质的相互作用过程

X 或 γ 射线在空间传播中突出表现为波动性, 而在与物质发生相互作用时又突出表现为粒子性。我们可做如下形象的描述, 即 X 或 γ 射线是从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介子场发生相互作用。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 $0.01 \sim 10$ 兆电子伏 (MeV) 这个最常见的能量范围内, 其主要相互作用为光电效应, 康普顿效应和电子对效应三个过程, 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

该过程中, X 或 γ 光子主要与原子的内壳层电子发生作用, 入射光子整个地被原子吸收, 继而从原子壳层中击出一个电子, 称为光电子(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

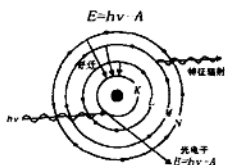


图 1-1 光电效应

当光子能量低于轨道电子结合能量时, 光电效应不可能发生。实验证明, 当光子能量等于或稍大于 K 层电子结合能量时, 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