

高等医药院校教材
(供医学、儿科、口腔、卫生专业用)

核医学与放射防护

第二版

周·申 主 编
谭天秋 副主编

人民卫生出版社

编写说明

本教材是根据卫生部在1981年召开的全国高等医学院校医学专业教材编审委员会会议确定的任务，参照1981年卫生部修订的五年制医学专业教学计划规定的本门课程教学时数编写的。

依据卫生部修订的教学计划，将原来的核医学课程改成了核医学与放射防护，因此本教材的内容包括了核医学与放射防护的基础知识、基本理论和基本技能三个部分。

参加编写本教材的，除编审委员外，尚有王浩丹、莫廷树、郝宏明和戴铁成四位同志。

在整个编写过程，我们得到了山东医学院、四川医学院和中国医科大学各级领导的关怀和支持。武汉医学院核医学教研室叶维新主任、湖南医学院核医学教研室郭肖南主任以及一些兄弟院校的同道，对编写本教材提出了不少宝贵意见。中国医科大学放射卫生教研室刘文白、牛荣久副主任参加了放射防护部分初稿的编写工作。山东医学院杨跃山、中国医科大学王序、四川医学院梁正路等同志为本教材绘制了插图。以上兄弟单位的大力支持和同志们的辛勤劳动，对保证本教材的质量起了很好的作用，谨此致谢。

由于我们的水平所限，教材不足和错误之处在所难免，深望各院校在使用时结合教学中的经验提出意见。

编 者

1983年4月于济南

目 录

绪论	1
第一章 核医学与放射防护的基础知识	3
第一节 核物理基本知识	3
第二节 辐射量与单位	11
第三节 放射性药物	15
第四节 辐射测量仪器	18
核医学	
第二章 脏器功能检查	28
第一节 概述	28
第二节 甲状腺吸 ¹³¹ 碘功能测定	33
第三节 邻 ¹³¹ 碘马尿酸钠肾图	38
第四节 心脏射血分数及室壁运动测定	44
第五节 ⁵¹ 铬红细胞寿命和破坏场所的测定	46
第三章 脏器显象	49
第一节 概述	49
第二节 脑、脑池和脑室	51
第三节 唾液腺	60
第四节 甲状腺	63
第五节 肺	70
第六节 心脏和大血管	77
第七节 肝、胆	86
第八节 胰腺	102
第九节 肾脏	104
第十节 肾上腺	112
第十一节 骨	114
第十二节 血池	116
第四章 体外竞争性放射分析	120
第一节 概述	120
第二节 血清甲胎蛋白放射火箭电泳自显影	126
第三节 乙型肝炎表面抗原固相放射免疫测定	129
第四节 血清总甲状腺素测定 (CPBA 法)	130
第五节 三碘甲状腺原氨酸树脂吸附试验	132
第六节 血浆胰岛素的放射免疫测定	133
第七节 血浆皮质醇测定 (CPBA 法)	135
第八节 环磷酸腺苷 (cAMP) 的放射免疫测定	139
第五章 放射性核素治疗	141
第一节 ¹³¹ 碘治疗甲状腺功能亢进症	141

第二节	^{131}I 治疗甲状腺癌转移灶	144
第三节	^{32}P 治疗真性红细胞增多症	145
第四节	放射性胶体腔内治疗	146
放射防护		149
第六章	电离辐射的生物效应	149
第一节	辐射生物效应的分类和影响因素	149
第二节	辐射生物效应的作用机理	151
第三节	细胞及亚细胞效应	152
第四节	躯体整体效应	155
第五节	躯体局部效应	158
第六节	远期效应	159
第七章	放射防护标准及基本原则	163
第一节	作用于人体的电离辐射源	163
第二节	辐射防护标准	165
第三节	放射防护的基本方法	169
第八章	医用电离辐射的防护	178
第一节	医疗照射的防护	178
第二节	医用X、 γ 射线封闭源的防护	180
第三节	医用开放源的防护	182
附录一	常用放射性核素主要物理常数	187
附录二	通用放射性核素衰变计算表	189
附录三	儿科应用核医学检查须知	191

绪 论

核医学与放射防护是1981年卫生部修订的五年制医学专业教学计划中规定开设的一门必修课。从专业的发展史看,核医学与放射防护关系紧密、内容有着内在联系,但随着医学的进步和专业的发展,目前已分别成为两个独立的学科。

本教材简要的介绍了这两个专业的基础知识、基本理论和基本技能。全书共分八章,三个部分,第一部分阐述了核医学与放射防护的基础知识,内容包括核物理的基本知识、辐射量与单位、放射性药物和辐射测量仪器。第二部分介绍了核医学的基本理论和基本技能,内容包括放射性核素在临床上常用的一些诊断和治疗方法,例如脏器功能检查、脏器显象、体外竞争性放射分析以及放射性核素治疗等。第三部分简要的介绍了放射防护的基本理论和基本技能,内容包括电离辐射的生物效应、放射防护的标准和基本原则,以及医用电离辐射的防护等。鉴于 γ 射线远距离治疗及加速器治疗,在国内均归放射治疗的范围;加以放射性核素治疗是指将放射性药物引入体内的治疗而言,为此有关 γ 射线远距离治疗、加速器治疗以及 β 射线敷贴治疗的内容均未列入本教材的内容。

核医学着重研究放射性核素及核射线的医学应用和它的理论基础,内容包括放射性核素在临床诊断、治疗和医学研究中的应用知识和技能,它不仅为临床医学、基础医学和预防医学的研究开辟了新途径,而且为分子生物学、遗传工程、免疫学等新学科的发展,以及研究机体在生理和病理情况下某些物质的动力学、脏器或系统的功能解剖学,以及对认识生命现象的本质、探讨疾病的病因和药物的作用原理都有重要作用。核医学体现了医学科学的发展水平,成了医学科学现代化的重要标识之一。

放射防护是放射卫生学的重要内容。它是依据电离辐射的生物效应对机体可能产生的危害,着重研究放射防护的标准和措施,放射防护对保障放射工作者和居民的健康,保护环境,促进核医学、放射学和原子能科学技术的发展都有重要意义。

我国的核医学与放射防护工作是从1956年开始的,并作为我国原子能科学技术中的一个重要部分,二十多年来得到了党和国家的重视,发展极其迅速。核医学与放射防护工作,不仅在全国各省市自治区先后普及,而且应用放射性核素的医院和医学科研单位逐年增多。医用放射性核素、标记化合物和一些放射性药物,不仅国内基本自给,而且品种逐年增加;供临床诊断和放射防护用的各种放射性探测仪和检查仪器,国内也已成批生产,质量不断提高。与此同时,国家还组织了有关部门研制和颁发了符合我国国情的放射防护规定和一系列放射性工作的管理办法,有利的促进了核医学与放射防护的发展。目前我国核医学在临床上开展的诊治项目和技术水平,有些已与国外接近。甲状腺、肝、脑、肾脏等脏器的功能检查和显象已成为临床上公认的常规检查方法。国外60年代开始出现,至今仍在迅速发展的体外竞争性放射分析,也已在我国各省市广泛应用,如甲胎蛋白放射火箭电泳,已成为原发性肝细胞癌早期诊断的重要检查方法;绒毛膜促性腺激素的测定已用于妊娠的早期诊断和计划生育的研究。在基础医学方面,目前国内不少单位已建立了液体闪烁测量和放射自显影技术,直接的用于基础医学的一些科学研究中,有的高等医学院校的基础医学专业教研室,已开始将这类方法纳入到实验教学

中,使医学生能够熟悉这一技术,保证了教学质量。近年来核医学与放射防护的专业学术活动,也日趋活跃,在1980年分别成立了我国的核医学学会、放射医学与防护学会和辐射防护学会。1981年创办了中华核医学杂志、放射医学与防护杂志和辐射防护杂志,加强了国际学术交流,促进了国内专业的发展。

就国外核医学的发展看,一些科学技术比较先进的国家对这一专业也比较重视,有的国家的一些医院,目前几乎每三个就诊的病人中就有一个病人应用放射性核素诊治。虽然多数国家已建立了这一专业,但在专业设置上并非一致,有的成为独立的学科,有的归属在放射科或临床生理科等等。至于专业学术活动则普遍比较重视,国际性的核医学学术会议不断召开,促进了相互交流。当前核医学的发展已趋向专业化,如已有核肝脏病学、核神经病学、核心脏病学、核内分泌学、老年核医学以及儿科核医学等。

核医学所以能够成为医学科学现代化的重要标识之一,是由于它具有以下特点:①能够反映组织器官的整体或局部功能;②能够进行动态的观察;③能够简便、安全、无损伤的诊断疾病;④能够进行超微量的测量,灵敏度可达 $10^{-12}\sim 10^{-15}\text{g}$;⑤能够用于医学科学的各个学科和专业。

核医学在促进医学科学的发展同时,随着电子学、核物理、电子计算机及其他新技术的进步,在核医学的基本技术上也得到了迅速的发展,主要表现在:

1. 核显象技术正在不断改进和提高,更加满足临床核医学的需要,提高了诊断的效果。

2. 体外竞争性放射分析的应用更加广泛,目前正在沿着操作技术自动化和样品质量规格化的方向发展。

3. 活化分析开始被应用于基础医学、临床医学和预防医学的研究。近年来带电粒子活化分析特别是质子激发X线发射分析得到迅速发展。

4. 稳定性核素的应用有了很大进展,随着核磁共振、质谱仪等技术的发展,加以稳定性核素的生产较前加多,为应用稳定性核素创造了条件。它的特点是:①无毒性,可用于体内代谢率、某些成分更新率的测定;②无放射性,不会发生辐射损伤,比较安全;③比较稳定,不发生衰变。

5. 液体闪烁测量和放射自显影技术越来越受到一些专业的重视,在基础医学的研究中更加广泛的被应用。

由以上看出,核医学与放射防护基本知识和基本技能的普及与提高,对医学科学的发展有直接的关系,在现代医学中核医学占有重要地位。作为高等医学院校医学专业的学生,学习本专业的目的是:在了解核医学与放射防护基础知识的基础上,熟悉放射性核素在临床诊断、治疗和医学研究中应用的原理和方法,掌握目前在临床上常用的一些放射性核素诊断技术的分析要点和放射性核素治疗原则,并概括地了解电离辐射的生物效应,掌握医用放射防护的基本知识,为今后工作中进一步学习和应用这一专业知识和技能打下基础。

(山东医学院 周 申)

第一章 核医学与放射防护的基础知识

第一节 核物理基本知识

一、核素、同位素和同质异能素

(一) **核素 (nuclide)** 凡核内具有一定质子数 Z 、质量数 A (或中子数 N) 以及一定能量状态的原子, 即称为核素 (有的文献, 仅把具有一定 Z 和 A 的原子定义为一种核素, 不考虑核能态的差别)。核的 Z 、 A 和能态三者相同的, 则属于同种核素。核素常用符号 A_ZX 来表示, 其中 X 为化学元素符号, Z 为原子序数, A 为质量数。通常 Z 可以省略不写, 因为它可由元素符号 X 来确定。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{C}$ 和 ${}^{14}\text{C}$ 分别为八种不同核素 (图 1-1)。目前人们已掌握 2000 多种天然和人工核素, 分别

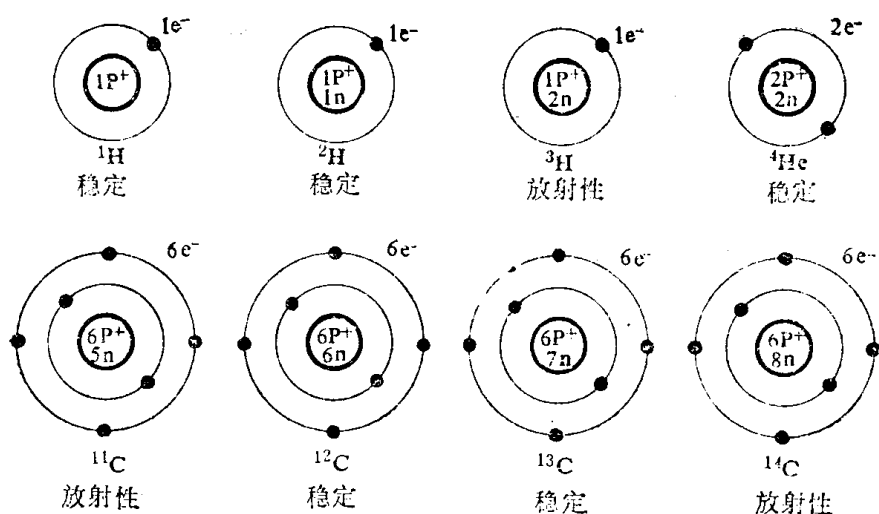


图 1-1 核素示意图

属于 100 多种元素。各种核素的质子和中子组成如图 1-2 所示。

(二) **同位素 (isotope)** 核内含有相同质子数的原子, 属于同一种元素; 同一种元素的原子, 可能是不同的核素; 凡质子数 Z 相同而中子数 N 或质量数 A 不同的核素, 称为同位素。它们在元素周期表上处于同一位置。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 互称同位素。每种元素都有几种或几十种天然和人工同位素, 如 ${}^1\text{H}$ 有三种, ${}^{12}\text{C}$ 有 10 种, ${}^{131}\text{I}$ 有 39 种同位素。

(三) **同质异能素 (isomer)** 凡原子核的质子数和中子数相同而能量状态不同的核素称为同质异能素。一般在核素的质量数符号 A 的后面加一字母 m , 表示处于较高能态或亚稳态, 如 ${}^{99m}\text{Tc}$ (${}^{99m}\text{Tc}$), 其与 ${}^{99}\text{Tc}$ (${}^{99}\text{Tc}$) 互称同质异能素。到 1975 年为止, 已发现半衰期大于 0.1 秒的同质异能素有 400 多种。

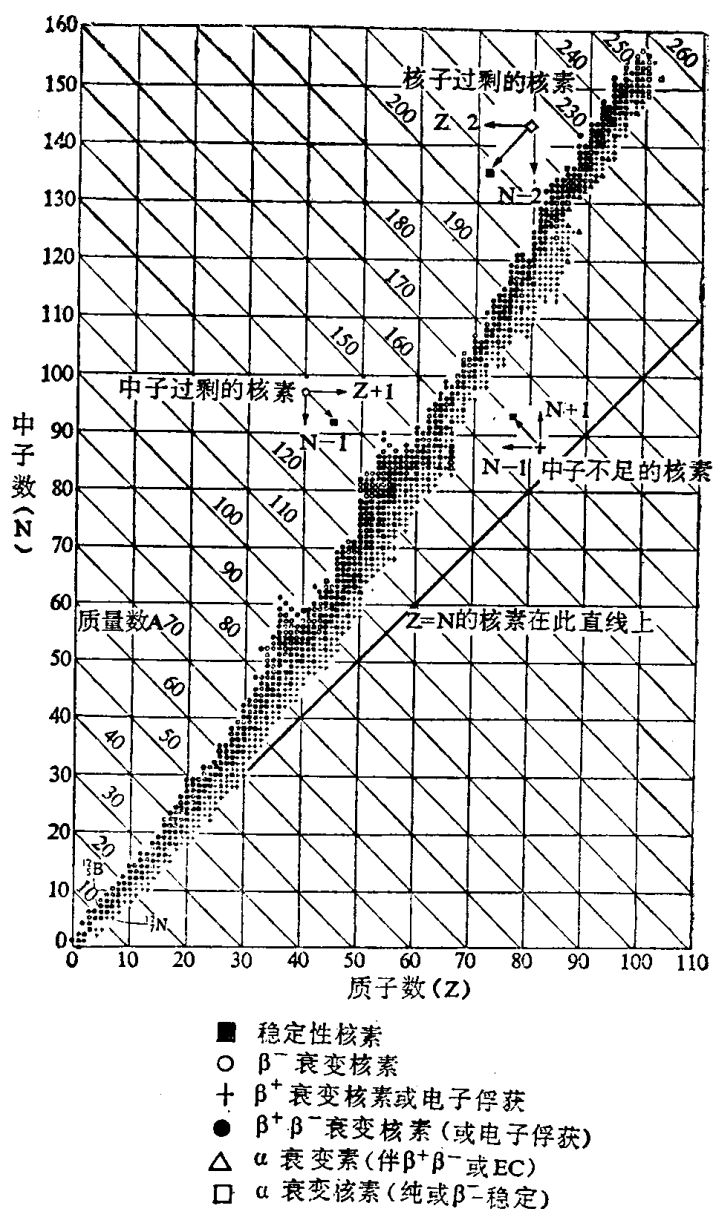


图 1-2 核素一览图
(各种核素的质子和中子组成图)

二、放射性核素与核衰变

(一) 稳定性核素和放射性核素 在已发现的近 2000 种核素中，稳定性核素仅有 274 种，属于 81 种元素，而不稳定的核素有 1700 多种。不稳定核素能自发地放出某种射线而转变为别种核素，又称为放射性核素 (radionuclide) 这种核转化过程，称为放射性核衰变 (decay)。由图 1-2 可见，稳定性核素 (图中标“-”者) 的核子即质子和中子的总数有一定限度，而且中子数和质子数保持一定的比例关系($N/Z = 1 \sim 1.5$)。如果核子总数过多，或者其中子数过剩或不足，则核便不稳定。核子总数过多的核素 (图中标“△”者) 常放射 α 粒子 (即 ${}^4_2\text{He}$ 核) 向稳定性核素方向转化，称为 α 衰变。中子过剩的核素 (图 1-2 中位于稳定核素曲线上侧标“○”者) 放射 β^- 粒子，即电子 (${}_{-1}^0\text{e}$) 转化为 $Z+1, N-1$ 的核素，称为 β^- 衰变。中子不足的核素 (图 1-2 中位于稳定核素曲线下方，标“+”者) 其中有的放射 β^+ 粒子，即正电子 (${}_{+1}^0\text{e}$)，称为 β^+ 衰变；

有的从核外掠入一个电子，称为电子俘获 (EC:electron capture)。这两种衰变都使核的 $Z-1$ 而 $N+1$ ，也向稳定核素方向转化。

经过上述 α 或 β 衰变后的子核，多数要出现能量较高的激发态或亚稳态，当它们回到能量较低的基态时，将多余的能量以光子的形式放出，称为 γ 射线，这种变化过程称为 γ 跃迁或 γ 衰变。放射性核素以上述五种衰变方式不断向稳定性核素转化，有些核素还兼有几种衰变方式，各有不同几率 (%)。核素的衰变方式及其有关参数可查表而知，一些常用的放射性核素的主要物理常数见附录一。各种核衰变过程概括如图 1-3。

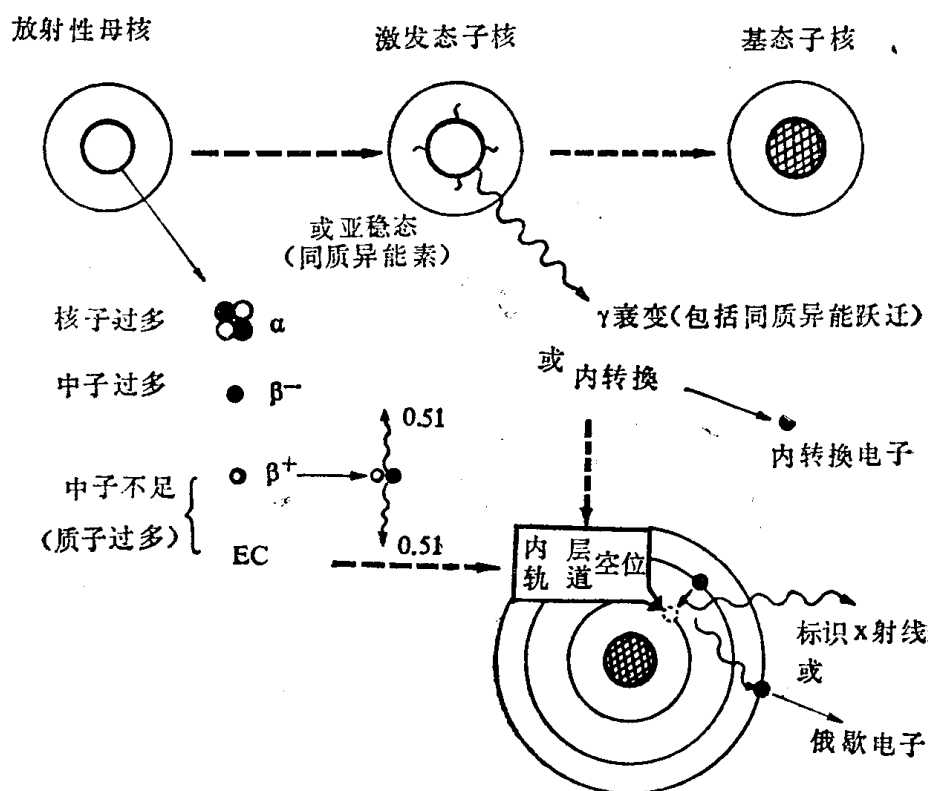
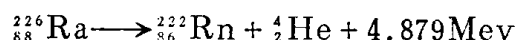
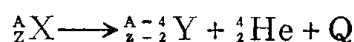


图 1-3 核衰变示意图

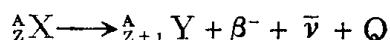
(二) 衰变公式和衰变图 各种核衰变过程可用公式表示，也可用图解方式来描述，前者称为衰变公式，后者称为衰变图。各种衰变公式和衰变图如图 1-4 所示。式中 X 代表母核， Y 代表子核。

1. α 衰变，母核放出一个 α 粒子 (${}^4_2\text{He}$ 核)，失去 2 个质子和 2 个中子，因而 Z 减 2 而 A 减 4 (图 1-4a)。



Q 代表衰变能，主要分配给 α 粒子和伴生的 γ 光子。 α 粒子的能谱是不连续的，系单能线谱。

2. β^- 衰变，母核放出一个 β^- 粒子，可看作核内有一个中子转变为质子，因此，子核的 Z 加 1 而 N 减 1，但 A 不变 (图 1-4b)。



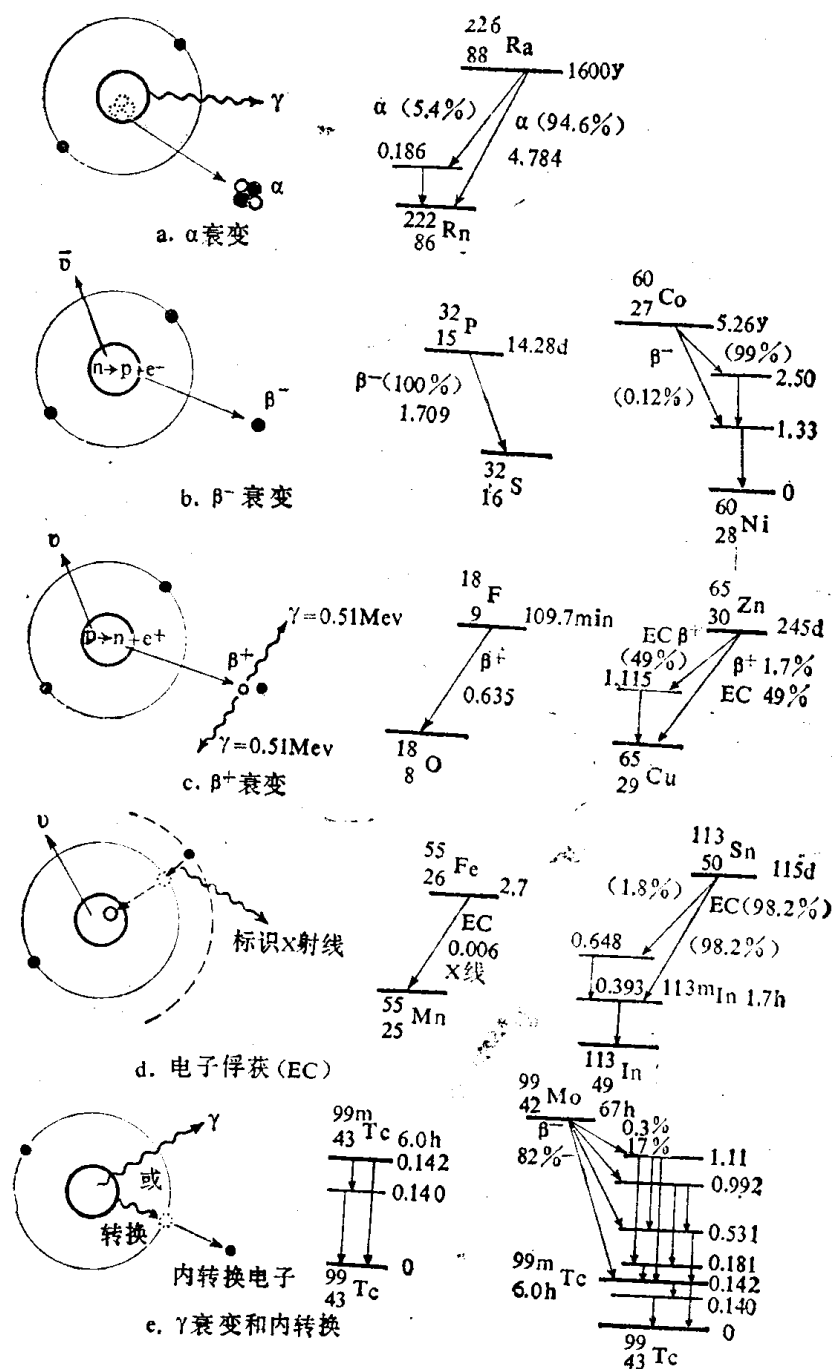
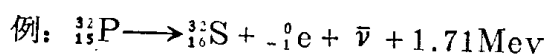
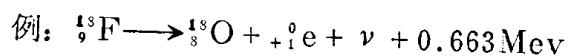
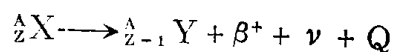


图 1-4 核衰变模式和衰变图



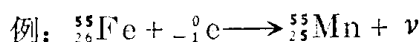
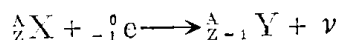
$\bar{\nu}$ 为反中微子, 它是静止质量近似为零的中性粒子。由于衰变能 Q 随机分配给 β^- 和 $\bar{\nu}$, 因此它们的能量分布都是由 0 到 Q 的连续能谱, 其最大能量 $E = Q$ 。

3. β^+ 衰变, 母核放出一个 β^+ 粒子 (${}_{+1}^0\text{e}$), 可看作核内有一个质子转变为中子, 因而子核的质子数 Z 减 1 而中子数 $N + 1$, 但质量数 A 不变 (图 1-4c)。



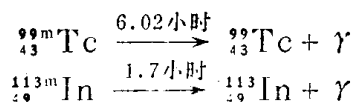
ν 为中微子, 亦为静止质量为零的中性粒子。 β^+ 粒子也是连续能谱。

4. 电子俘获, 母核在衰变时不放出粒子, 而由核外捕获一个K或L壳层电子, 使核内一个质子变成中子, 因而核的 $Z - 1$ 、 $N + 1$ 而 A 不变 (图 1-4d)。



此过程核内虽不发射粒子, 由于核外内层轨道缺少电子, 外层电子向内层补充, 其多余的能量将以光子形式放出, 称为“标识X射线”。也有时不放X射线, 而把过剩的能量传给更外层的电子, 使它成为自由电子射出, 称为“俄歇电子”(Auger electron), 因此, 电子俘获过程可以测到单能的X射线。

5. γ 衰变和内转换 (internal conversion) 从放射性核素的原子核内放出 γ 射线的衰变叫 γ 衰变。 γ 射线是处于激发态的原子核跃迁到基态或较低能级时所发射的一种电磁辐射或光子流 ($h\nu$)。多数 α 和 β 衰变能产生激发态的子核, 因而伴有 γ 衰变。大多数子核处在激发态的时间很短 (一般 $\sim 10^{-13}$ 秒), 因此很难把子核的 γ 衰变由母核的 α 或 β 衰变中分离开来, 并测出其各自的半衰期。但有些子核在激发态停留的时间较长, 可以把 γ 衰变的半衰期测出来。这种半衰期较长的激发态核素或亚稳态核素就是其基态核素的同质异能素。同质异能素是纯 γ 衰变的放射性核素, 例如



γ 衰变的模式如图 1-4e 所示。

核能级的跃迁有时并不发射 γ 射线, 而把激发能直接传给核外壳层电子, 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, 这种电子称为内转换电子。内转换电子的能量呈单色性, 和 β 射线的连续能谱截然不同。当K或L层电子受内转换放射出之后, 留下的空轨道将继续产生标识X射线或俄歇电子。

三、放射性衰变规律

核的衰变, 就单个核来说, 何时衰变是偶然无规律的。但对含有大量放射性核的群体进行研究, 发现其衰变遵循一种普遍的衰减规律。即各种放射性核素的群体 (样品), 其总放射核的数目 N 都随时间 t 按指数规律衰减, 函数曲线如图 1-5, 6 所示, 在半对数坐标上是一条直线。

这种规律的特点是: 对于同种核素, 在相同的时间间隔 dt 内, 母核衰变掉的分数的 $\frac{dN}{N}$ 是恒定的, 即:

$$\frac{dN}{N} / dt = \lambda \quad (1)$$

λ 为常数, 其值取决于核素的种类, 称为放射性核素的衰变常数 (decay Constant)。它反映该种核素衰变的快慢。式(1)可以写成:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2)$$

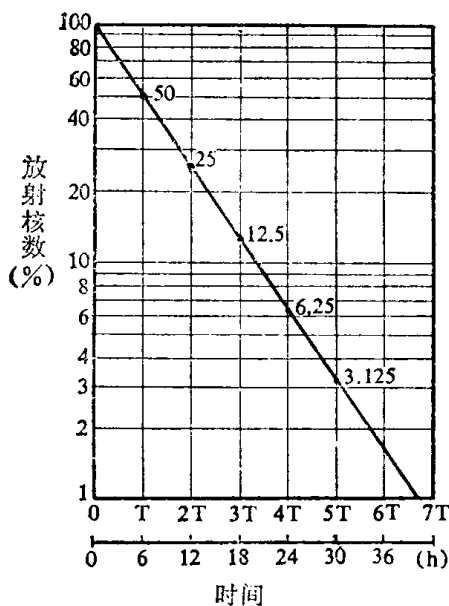


图 1-5 (半对数坐标)

^{99m}Tc 衰变曲线

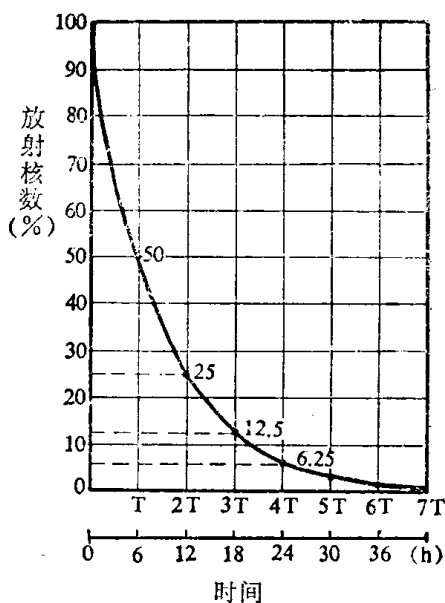


图 1-6 (普通坐标)

^{99m}Tc 衰变曲线

式中 $\frac{dN}{dt}$ 称为该样品的放射性活度 (A)，代表样品单位时间内衰变的核数，由(2)式可见，样品的活度 A 与总放射核数 N 成正比，比例常数就是 λ 。式(2)又可写成：

$$dN = -\lambda N dt \quad (3)$$

对上式进行积分，便可得到：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中 N_0 为 $t = 0$ 时即初始时的放射核数。

将式(4)代入(2)，可得样品活度 A 的指数表达式：

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

式中 $A_0 = \lambda N_0$ 为 $t = 0$ 时即初始时样品的活度。

由(4)和(5)两式可见，样品的放射核数 N 和放射性活度 A 都是时间 t 的负指数函数，衰变的快慢取决于它的 λ 值。

在实际工作中少用 λ 值，而常用物理半衰期 (physical half life, $T_{1/2}$)，即放射性核素的核数由于衰变而减少到原来的半数所需要的时间。按此定义，由式(4)可以推得 $T_{1/2}$ 和 λ 的关系，即：

$$\lambda T_{1/2} = 0.693 \text{ 或 } \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

引入半衰期 $T_{1/2}$ 后，(5)式可以写成：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (6)$$

核医学与放射防护中还用生物半衰期和有效半衰期。生物半衰期 (T_b) 系指生物体内的放射性核素由于生物代谢从体内排除到原来的半数所需要的时间。有效半衰期

(T_e) 指放射性核素由于生物代谢和放射性衰变的共同作用, 减少到原来的半数所需要的时间。即:

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b \quad (7)$$

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b} \quad (8)$$

$$T_e = \frac{T_{1/2} \cdot T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad (9)$$

在国际单位制中, 放射性活度的单位为秒⁻¹, 其专用名为贝可 (Bq), 1 贝可表示放射性核素在一秒内发生一次核跃迁, 即 $1\text{Bq} = 1\text{S}^{-1}$ 。

放射性活度 A 的旧有专用单位为居里 (Ci), $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。其派生单位有毫居里 (mCi) 和微居里 (μCi)。

已知放射性活度 A_0 , 欲计算某时刻 t 时的活度 A, 只要知道 $e^{-\frac{0.693}{T}t}$ 的值, 乘以 A_0 便可求出。求 $e^{-\frac{0.693}{T}t}$ 值可用电子计算器, 亦可查 e^{-x} 数学用表。在核医学与放射防护中多采用查表法。

四、电离辐射与物质的相互作用

能直接或间接对被作用物质产生电离作用的基本粒子流, 统称为电离辐射 (ionizing radiation)。电离辐射分为直接电离粒子 (directly ionizing particles) 和间接电离粒子 (indirectly ionizing particles)。 α 、 β 粒子, 电子和质子等带电粒子属于前者; X、 γ 射线和中子等不带电粒子属于后者。

(一) 带电粒子与物质的相互作用

1. 电离与激发 (ionization and excitation) 高速带电粒子穿过物质时, 由于静电作用, 它可以使物质中原子的核外电子由较低能级的稳定轨道跳到较高能级的轨道上 (如图 1-7(1)), 或完全摆脱原子核的束缚而成为自由电子 (如图 1-7(2))。前一种作用

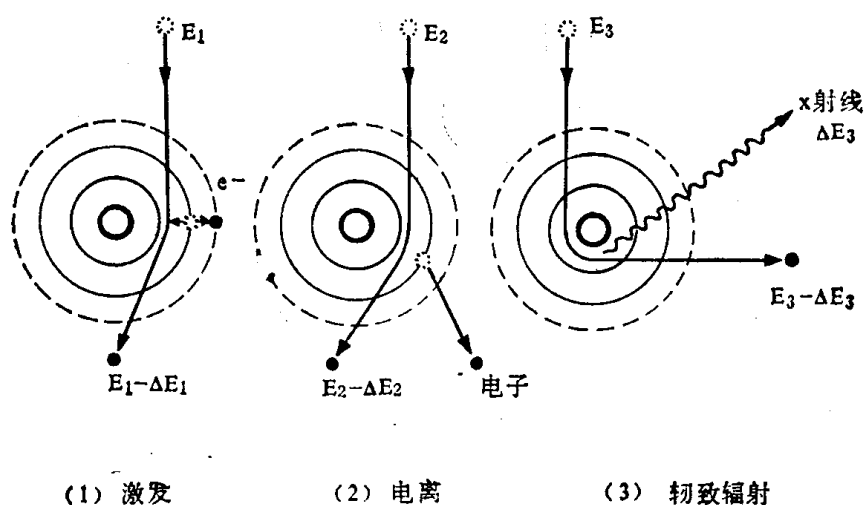


图 1-7 带电粒子与物质的相互作用

叫激发, 后一种作用叫电离。由带电粒子直接电离的自由电子, 具有一定动能, 能进一

步使其他原子电离或激发。带电粒子在物质中由于电离和激发所损失的能量叫做电离损失。在其单位长度路径上产生的电离离子对数，叫做电离密度。单位长度路径上的能量损失，叫做传能线密度 (linear energy transfer: LET)。LET 值与入射粒子的电荷、能量以及被作用物质的性质有关。对于同种被作用物质， α 粒子的 LET 值远大于 β 粒子，因此 α 粒子的射程较短，很容易被物质吸收；而 β 粒子的射程比较长，吸收厚度比 α 粒子大。在相同吸收能量下， α 粒子的生物学效应也相对比 β 粒子为大，常称 α 射线为高 LET 辐射， β 射线为低 LET 辐射。

2. 轫致辐射 (Bremsstrahlung) 当高速带电粒子穿过原子核电场时，它将受到阻滞，运动方向发生变化，同时其一部分动能转化为光子放出，这种光子叫做轫致辐射 (如图 1-7(3))，其能量分布是连续的。带电粒子的这种能量损失叫做辐射损失。这也是连续 X 线产生的主要机制。粒子能量越高，被作用物质的原子序数 Z 越大，这种辐射损失的几率越大。因此在防护 β 射线时，为避免轫致辐射，屏蔽材料用有机玻璃和铝等低 Z 材料比用铅、铁等高 Z 材料为好。可是在制造 X 线管时，为提高 X 射线的发射效率，被照射的靶材料大多采用高 Z 的钨靶。

3. 湮没辐射 (或光化辐射) β^+ 粒子与物质相互作用并完全丧失其动能后，便与物质中的自由电子相结合，转化为方向相反，能量各为 0.51 Mev 的两个光子，这种辐射称为湮没辐射或光化辐射。

4. 带电粒子的射程 带电粒子在物质中沿着最初入射方向所能穿行的最大直线距离称为带电粒子的射程。 α 、 β 粒子在空气及人体组织中的射程可在文献中查到。

(二) X、 γ 射线与物质的相互作用 X 和 γ 射线光子通过物质时，主要有以下三种作用过程，其发生几率随入射光子能量 E_γ 和物质的原子序数 Z 的不同而变化。

1. 光电效应 光子和原子的 K 或 L 壳层电子相互作用，把其全部能量交给电子，使它脱离原子而运动，称这种电子为光电子，这种过程叫做光电效应，如图 1-8(1) 所示。

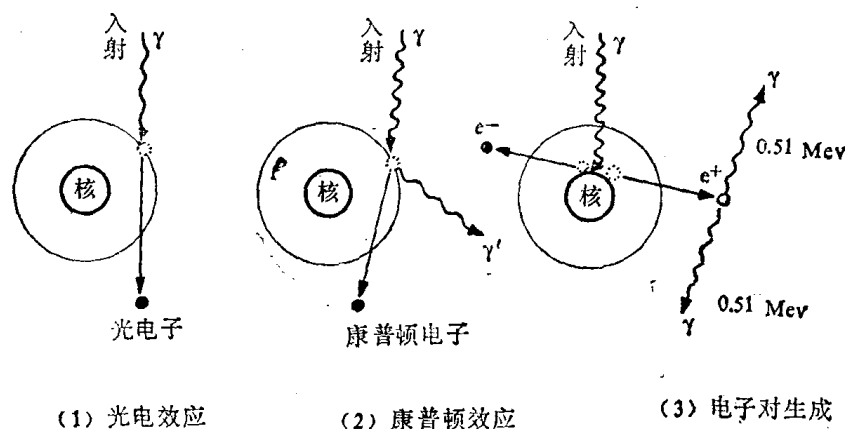


图 1-8 X、 γ 射线与物质的相互作用

光子的能量 E_γ 越低，物质的原子序数 Z 越大，发生光电效应的几率 μ_τ 就越大，近似有 $\mu_\tau \propto N \frac{Z^4}{E_\gamma^{3.5}}$ 关系。其中 N 为每立方厘米吸收物质中的原子数。因此，在屏蔽低能 γ 光子时，用高 Z 物质较低 Z 物质节省重量。

2. 康普顿-吴有训效应 光子和原子中的一个电子发生弹性碰撞，光子仅将其一部

分能量传给电子使其脱离原子而运动,此电子称为康普顿电子。光子本身能量减少,改变运动方向射出,称之为康普顿散射光子,如图(1-8(2))所示。这种过程的几率 μ_0 随原子序数 Z 的变化较小,而近似与物质的密度 ρ 成正比,与光子能量 E_γ 成反比。有

$$\mu_0 \propto \frac{NZ}{E_\gamma} \approx \frac{\rho}{2E_\gamma} \text{ 关系。}$$

3. 电子对生成效应 光子能量大于两个电子的静止能量 1.02MeV 时,光子可能在原子核电场的作用下,转化成为一对正、负电子,如图1-8(3)所示。这种过程发生的几率 μ_K 随原子序数 Z 和光子能量 E_γ 的增加而增大,近似有 $\mu_K \propto N \cdot Z^2 \cdot \ln E_\gamma$ 的关系。

(三) 中子与物质的相互作用 中子不带电,主要与原子核发生作用,其方式有弹性散射和核反应等。

1. 弹性散射 中子将一部分能量传给被碰撞的原子核,使它脱开壳层电子而运动,称为反冲核。反冲核能使物质电离与激发,其电离密度和LET值与 α 粒子相似。

中子与氢核碰撞形成反冲质子,因其质量与中子相近,反冲得到的能量较大,故中子很容易被含氢多的物质(如水、石蜡)减速而吸收,这在防护上有意义。

2. 核反应 中子穿入原子核,然后放出 γ 、 α 、 p 等射线,形成新核,这种过程叫核反应。新核如果是放射性核素,可继续衰变,放射粒子,这种现象叫做感生放射性。例如: ${}^1_0\text{n} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p$,这是中子核反应。生成的 ${}^{14}_6\text{C}$ 是一种放射性核素,它以 ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$ 方式按一定的半衰期衰变,这就是感生放射性。其结果是产生带电粒子或 γ 射线,继续使物质电离或激发。

(中国医科大学 戴铁成)

第二节 辐射量与单位

自从1925年国际辐射单位与测量委员会(ICRU)成立,1927年发表第一份报告书,提出伦琴单位以来,到1980年发表第33号报告书,提出了38种辐射量及其单位,使辐射量及其单位日臻完善。

ICRU在1974年提出建议,要在若干年后取消辐射量的专用单位,代之以SI单位(国际制单位),在尚未取消专用单位的这若干年过渡时期内,新旧单位可以并用。

常用的辐射量有四类:①度量放射源的量 例如放射性活度(A)、衰变常数(λ)和半衰期($T_{1/2}$)等。②度量辐射场的量 例如粒子注量(ϕ)、照射量(X)等。③表征辐射与物质相互作用的量 例如传能线密度(LET)和吸收剂量(D)等。④辐射防护专用的量 例如剂量当量(H)和品质因数(Q)等。

一、X、 γ 射线的照射量(exposure)

(一) 照射量 是直接度量X、 γ 光子对空气电离能力的量,它可以间接反映X、 γ 辐射场的强弱,是度量辐射场的一种物理量,以 X 表示。其定义是:在空气中的某点上,X或 γ 射线在质量为 dm 的小体积元中,与原子相互作用释出的所有次级电子,在空气中完全被阻止所产生的正负离子对中某一种符号的总电荷 dQ ,与该质量 dm 之比,如图1-9所示。其表达式为:

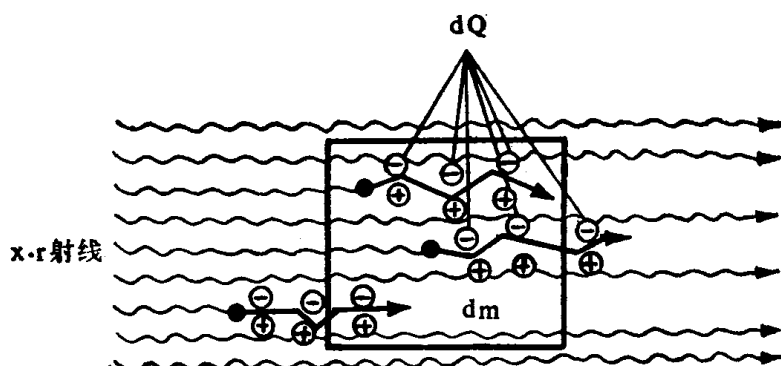


图 1-9 照射量示意图

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

照射量的 SI 单位为库仑·千克⁻¹ (C·kg⁻¹)

旧有专用单位为“伦琴”(R), 其派生单位有毫伦琴 (mR), 微伦琴 (μR) 等。

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$$

$$1mR = 2.58 \times 10^{-7} C \cdot kg^{-1}$$

$$1\mu R = 2.58 \times 10^{-10} C \cdot kg^{-1}$$

(二) 照射量率 (exposure rate) 是单位时间内的照射量, 用 $\dot{X}$ 表示, 即:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

其 SI 单位为库仑/千克·秒 (C·kg⁻¹·s⁻¹)

专用单位为伦琴/分 (R/min)、毫伦琴/小时 (mR/h) 等。

照射量 X 仅适用于能量在 10Kev~3Mev 范围内的 X、γ 射线。

二、吸收剂量(absorbed dose)

(一) 任何被照物质每单位质量所吸收的任何电离辐射的平均能量称为吸收剂量 (D), 即:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

式中 dE 是质量为 dm 的被照射物质中吸收之电离辐射能量。

吸收剂量的 SI 单位为焦耳·千克⁻¹ (J·kg⁻¹) 其专名为“戈瑞”(Gy)。

旧有专用单位为“拉德”(rad), 其派生单位有毫拉德 (mrad), 微拉德 (μrad) 等。

$$1rad = 100 \text{ 尔格} \cdot \text{克}^{-1}$$

因此,

$$1rad = 0.01Gy \text{ 或 } 1Gy = 100rad$$

(二) 吸收剂量率 (absorbed dose rate) $\dot{D}$ 为单位时间内的吸收剂量, 即

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}。$$

其单位为戈瑞/秒 (Gy/S) 或毫拉德/小时 (mrad/h) 拉德/分 (rad/min) 等。

三、剂量当量(dose equivalent)

在辐射防护上,表示辐射所致的有害效应发生几率或危害程度的物理量就是剂量当量。单纯用吸收剂量不能予示生物效应的程度,因当辐射类型及照射条件发生变化时,即使受到相同数量的吸收剂量照射,其所致的生物效应无论其严重程度还是其发生几率皆不相同。剂量当量就是用适当的修正因数对吸收剂量进行加权,从而可使修正后的吸收剂量能更好地反映辐射对机体的危害程度。

剂量当量的定义是:在组织中所关心的某点上D、Q和N这三个量的乘积,用H表示。其中D是吸收剂量,Q是品质因数,N是其他任何修正因数的积,即:

$$H = Q \cdot N \cdot D$$

Q是与辐射品质有关的修正因数,可通过它来反映不同类型辐射诱发损伤的几率或严重程度。品质因数Q值如表 1-1 所示。

表 1-1 不同种类辐射的品质因数

辐 射 种 类	品 质 因 数
X射线、γ射线、电子或正电子	1
中子, 能量<10Kev	3
中子, 能量>10Kev	10
质子	10
α粒子	20
裂变碎片、反冲核	20

修正因数N是对吸收剂量D的空间分布(全身照射、局部照射、均匀照射、非均匀照射)和时间分布(吸收剂量率、吸收剂量率的分次给予)等所做出的那些修正因数的乘积,目前国际放射防护委员会(ICRP)建议 N=1。

剂量当量的 SI 单位专名为“西沃特”(Sv)

$$1\text{Sv} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (1 \text{ 焦耳} \cdot \text{千克}^{-1})$$

旧有专用单位为“雷姆”(rem)

$$1\text{rem} = 0.01\text{Sv}$$

单位时间内的剂量当量称为剂量当量率,用 $\dot{H}$ 表示,即: $\dot{H} = \frac{dH}{dt}$

$\dot{H}$ 的单位为 Sv/S 或 rem/S。

表 1-2 列出常用辐射量新旧单位对照关系。