

X射线和 γ 射线防护手册

(诊断与科研用)

苏森龄 编著

贵州人民出版社

X射线和 γ 射线防护手册

(诊断与科研用)

苏 森 龄 编 著

贵 州 人 民 出 版 社

责任编辑 夏同珩
技术设计 陈雷
封面设计 钱大喜

X射线和 γ 射线防护手册

(诊断与科研用)

苏森龄 编著

贵州人民出版社出版

(贵阳市延安中路5号)

贵州新华印刷厂印刷 贵州省新华书店发行

787×1092毫米 16开本 11印张 插页1 258千字

1982年11月第1版 1982年11月第1次印刷

印数1—2,000

书号: 14115·67 定价: 1.25元

E-671/36
05

几点说明

1. 本书采用从基础到实践的编写方法。各种防护设计实例，力求简单扼要，且有代表性，读者可仿照进行计算。

2. 有关畜牧兽医、工业探伤及使用辐射的科研部门的防护资料，主要是根据国际辐射防护委员会近年来的有关文件，结合对国内部分科研部门考察的资料整理的。

3. 根据工作量设计了几种放射科的设计图样，供读者参考或选用。

4. 图表中数值，部分是移植国外资料，选用时与原著资料作过核对，才进行简化绘制；有些则系根据几位作者的材料比较算出的，未能逐一列出作者姓名与出处，特向原作者致谢与致歉。

5. 文中有些资料系直接引自国际辐射防护委员会的建议，结合国内情况作了增删，仅供参考。

6. 在进行建筑物的防护设计时，若采用图表中数值计算防护物的厚度，请特别注意到所选用资料的原作者进行测量的条件，如所用的测量仪器、灵敏度、相关能量（能量响应）、X射线装置（半波、脉冲高压或全波整流）以及球管靶材、角度、原始过滤和测量用体模、滤过板、照射野、宽与狭束等。由于各家所用条件不尽相同，故按所援引的各种图表数值算出的防护物厚度之间会有一定的差异，在计算时应充分考虑到。所幸其间的差值一般多只在一个半价层左右，此时宜选用所计算出的厚度大的防护物较为保险。

7. 名词解释选择在文中提到或有关的原子物理学名词，其解释力求明确；排列秩序则按汉语拼音字母排列。

8. 常数与转换因数只选用最常用的，而且为了节约篇幅，一般只选用一种关系；如只选由立方厘米换算成加仑的因数，并需了解由加仑换算成立方厘米时，可只取前述因数的倒数值，即为所求数值。

前 言

人类历来就受着电离辐射的影响，首先是受宇宙辐射的影响。天然辐射作用于性腺和骨髓的剂量每年约为50毫拉德；其次是由镭²²⁶、钍²³²、铀²³⁵及它们的子体和钾⁴⁰、碳¹⁴等微量长寿命的放射性元素或同位素所造成的影响，它们作用于人体的剂量每年约为50~1000毫拉德。各种天然辐射产生的总照射剂量全年约在100毫拉德以上。

事物均有两重性。原子能技术的发展既为人类作出了重大的贡献，同时又给人类带来一定的难以克服的危害，甚至可以毁灭世界文明。核武器试验，使大量放射性物质进入同温层，进而污染自然环境，其中铯⁹⁰、铯¹³⁷等长寿命放射性同位素就一直危害着人类及其后代的健康。

另外电视（观众每年可受到500~2000毫拉德剂量的照射）、鞋型选配装置（每年最高剂量可达10毫拉德）、夜光表等也是影响人类健康的一个不容忽视的因素。

尤其值得注意的是自X射线等电离辐射用于临床医学与科研以来，为近代医学及各项研究工作作出了不可估量的贡献。但由于缺乏防护知识，各有关部门滥用电离辐射的现象仍十分严重，往往给有关职业人员及有关病人造成不可恢复的损害。

但是在充分了解了电离辐射的物理特征及其损害的病理生理机制的情况下，采取相应的防护措施，这些医源性或职业性损害是可以有效的预防或降低到最低限度的。我们希望通过这本小册子能引起各方面使用辐射技术的人员的注意，作到将辐射技术合理地使用到诊断与科研工作中去，为早日实现四个现代化、为中华民族的繁荣和昌盛添砖加瓦。但由于编者在专业等各方面的知识十分肤浅，挂一漏万，希望读者及各位专门家多提宝贵意见。

此外，本书在编校过程中蒙北京医学院汪绍训教授和范炎主任技师、首都医院胡懋华教授、医学科学院刘玉清教授以及北京医疗器械所陈玉仁教授等审阅，提出了许多宝贵意见；在图表绘制和缮写上得到了俞志刚、何朝恕、武渝生、王兆敏、陈兴华等同志的协助和支持，在此一并致谢。

编 著 者

目 录

第一章 辐射物理学基础	(1)
一、物质结构	(1)
1.元素〔1〕 2.原子〔1〕	
二、周期表	(1)
三、放射性	(2)
四、韧致辐射	(3)
五、X射线发生的原理和性质	(4)
1.X射线与 γ 射线〔5〕 2.光子的能量〔6〕 3.单能辐射〔6〕 4.线状能谱〔6〕 5.连续能谱〔6〕 6.电离辐射的能量与质〔6〕 7.电离辐射的量〔6〕 8.辐射强度与减弱〔7〕	
六、辐射的吸收	(7)
1.光电吸收〔7〕 2.康普顿-吴有训效应〔9〕 3.不相干散射〔10〕 4.对子产生〔10〕	
七、X(?)射线在物质中的作用	(11)
1.物理作用〔12〕 2.化学作用〔12〕 3.生物作用〔12〕	
第二章 辐射防护用剂量学基础	(13)
一、概述	(13)
二、辐射防护用剂量学及其目的	(13)
1.目的〔13〕 2.剂量学〔13〕	
三、传能线密度、吸收剂量和生物效应间的关系	(16)
1.传能线密度(LET)〔16〕 2.二次电子射程与电离密度的关系〔17〕 3.宽束的吸收〔18〕 4.吸收剂量(D)〔18〕 5.拉德(Rad)〔18〕 6.戈(瑞)(Gy)〔18〕 7.剂量当量(De)〔18〕 8.相对生物效应(RBE)〔19〕 9.品质因素(Q _f)〔19〕 10.SI单位(国际标准单位)〔19〕 11.瑞普(rap)〔19〕	
四、居民的遗传有效剂量	(20)
五、最大允许剂量 (MPD)	(20)
六、积分剂量	(21)
七、累积剂量	(21)
八、放射源与辐射剂量率的关系	(21)
1.X射线剂量〔21〕 2.X射线照射剂量与滤过板的关系〔26〕 3.辐射照射剂量与距离的关系〔27〕	
九、剂量当量的测定	(27)
一〇、剂量场的测量	(28)
一一、环境剂量场分布的测量	(40)
一二、分析剂量场测量结果时应注意的事项	(40)

一三、个人剂量监测·····	(41)
第三章 慢性辐射损伤的生物学基础 ·····	(42)
一、概述·····	(42)
二、电离辐射的生物学作用·····	(42)
三、电离辐射的生物学作用特征·····	(43)
四、电离辐射的生物学作用机制·····	(43)
五、辐射对人体的效应·····	(43)
1.早发效应(近期效应)[43] 2.晚发效应(远期效应)[44] 3.阈值剂量[44] 4.本体(躯体)效应(Somatic effect)[44] 5.遗传效应(Genetic effect)[44] 6.Bergonie-Tribondeau律[44] 7.电离辐射所致的细胞损害[44] 8.剂量-存活曲线[44]	
六、辐射损伤的生物化学指标·····	(45)
1.概述[45] 2.辐射对脱氧核糖核酸(DNA)及脱氧胞嘧啶核苷代谢的影响[45] 3.辐射对其它重要的生物化学反应的影响[45]	
七、小剂量长期照射的晚期和潜伏效应·····	(45)
1.小剂量辐射的效应[45] 2.间接或继发效应[46] 3.潜伏效应的显露[46] 4.剂量时间因子对血象的影响[46]	
八、小剂量辐射长期照射对血液系统的影响·····	(46)
1.辐射对骨髓的影响[47] 2.辐射照射后的骨髓的再生[47] 3.局部照射对外周血液的影响[47] 4.小剂量辐射长期照射对外周血中白细胞数量的影响[47]	
九、辐射对染色体的作用和染色体分析在诊断辐射损伤中的应用·····	(48)
1.概述[48] 2.自然畸变率[49] 3.慢性、分次和既往照射对染色体畸变的影响[49]	
一〇、慢性小剂量辐射长期照射对机体其它系统的影响·····	(49)
1.神经系统[50] 2.视分析器[50] 3.内分泌系统[50] 4.酶系统[50] 5.免疫系统[50] 6.心血管系统[50] 7.出血与凝血机制[50] 8.消化系统[50] 9.骨骼系统[50] 10.性腺[50] 11.皮肤、指甲、毛发[51]	
一一、辐射的遗传效应·····	(51)
第四章 诊断与科研用X射线和γ射线的防护设计与计算 ·····	(52)
一、概述·····	(52)
二、诊断用X射线和γ射线的防护·····	(53)
三、半价层与分价层·····	(53)
四、原射线的防护·····	(57)
五、防护物质·····	(71)
六、X射线防护物的铅当量·····	(72)
七、减弱倍数及其与半价层的关系·····	(76)
八、用减弱倍数计算原射线防护物厚度的方法·····	(77)
〔附：内插法〕·····	(79)
九、辐射穿透率·····	(79)
一〇、利用辐射穿透率计算防护物厚度的方法·····	(80)
一一、X射线原射线防护墙厚度的简易计算方法(直接用工作量	

毫安·分/周计算防护物厚度的方法)	(85)
一、5% 减弱厚度	(87)
一三、用 5% 减弱厚度计算防护物厚度的方法	(89)
一四、辐射在物质中的减弱	(89)
一五、利用辐射在物质中的减弱率计算防护物的厚度	(90)
一六、 γ 辐射源的原射线穿透率	(91)
一七、 γ 辐射防护的计算	(91)
1.用穿透率计算 γ 辐射防护物厚度的方法[91] 2.用指数减弱公式计算防护物的方法[94]	
一八、在计算防御有效射线的防护物厚度时应注意的事项	(95)
一九、各种防御辐射用防护物厚度计算方法的评价	(96)
二〇、漏射线的防护	(97)
二一、散射辐射的防护	(97)
1.散射射线所产生的剂量[97] 2.反向散射率[100] 3.散射辐射的剂量[102] 4.散射辐射能量的简易计算方法[102] 5.空气散射[103] 6.散射辐射防护的计算[103] 7.用减弱率计算散射辐射防护物的方法[103] 8.直接用工作量毫安·分/周计算散射辐射防护物厚度的方法[105] 9.计算散射辐射防护物厚度时应注意的事项[107]	
二二、X 射线诊断室的设计方案	(107)
二三、隔室透视	(112)
第五章 对诊断与科研用辐射进行防护设计及操作的建议	(115)
一、一般建议	(115)
二、关于专用设备的有关建议	(118)
三、医用辐射的防护建议	(118)
1.X 射线透视时的防护建议[120] 2.X 射线照片时的防护建议[122] 3.荧光照相时的防护建议[123] 4.荧光增强器检查时的防护建议[123] 5.牙科照相时的防护建议[124]	
四、病人的防护	(125)
1.X 射线诊断过程中对患者防护的建议[129] 2.透视时对患者防护的建议[129] 3.X 射线照片时对患者防护的建议[130] 4.牙科照相时对患者防护的建议[131] 5.用于医学科学研究目的时对患者防护的建议[131]	
第六章 畜用辐射诊断时工作人员的防护	(132)
一、一般要求	(132)
二、X 射线用于诊断畜病	(132)
第七章 工业探伤与科研用辐射的防护	(134)
一、一般要求	(134)
二、封闭式装置	(134)
三、开放式装置	(134)
四、工业用 X 射线机	(135)
五、工业用 γ 辐射源	(135)
六、长期存贮	(135)

七、暂时存贮	(135)
八、携带及使用	(136)
九、工业透视	(136)
一〇、工业测量类设备的防护	(136)
一一、X射线分析设备的防护	(137)
一二、辐射用于其他目的时的防护	(138)
1.辐射用于科学研究时的防护建议〔138〕 2.辐射用于教学时的防护建议〔138〕 3.使用 其他辐射源时的防护建议〔139〕 4.其他可能的辐射源的防护建议〔139〕	
一三、维修工作中的防护建议	(139)
第八章 辐射防护的保健制度	(141)
一、领导部门的责任	(141)
二、职业人员的体格检查	(141)
三、不适于从事放射工作的人员	(142)
四、血液学监督	(142)
五、血液学检查及注意事项	(143)
六、解释“常规”血液学检查结果时的注意事项	(143)
七、需继续观察的情况	(144)
八、剂量监督	(144)
1.工作人员剂量监督〔145〕 2.个别人员的剂量监督〔145〕	
九、记录保存	(145)
第九章 电离辐射的最大允许剂量标准	(146)
一、概述	(146)
二、特殊或意外事件时的极限剂量	(148)
附录	(150)
一、名词解释	(150)
二、常用数学符号	(157)
三、希腊字母表	(158)
四、常数与换算因数	(158)
五、常用公式	(165)
六、常用铅板重量	(167)
七、其它薄板单位面积的质量	(167)
八、杂项	(167)
主要参考文献	(168)

第一章 辐射物理学基础

本章着重介绍物质结构、辐射物理基础、X射线的发生原理和性质，以及辐射能量传递给生物体的方式。

一、物质结构

物质系由原子或由原子组成的分子所构成。单纯由一种元素组成的物质叫单质；由多种元素构成的物质叫化合物。人体系由碳、氢、氧、氮及少量其它元素所构成。

1. 元素

一般指化学元素。同一元素的原子具有相同的核电荷数。不论它们以单质或以化合物形式存在，它们的核电荷数不变。相同元素的原子组成单质，不同元素的原子相互化合而成化合物（某元素能与某些元素按一定比例化合，组成地球上所有的物质）。现在已确知的元素有103种，其中一部分是人工制得的放射性元素。

2. 原子

原子是用化学方法不能再分解的最小粒子，它由电子、原子核组成。氢原子核带正电荷，其外周有一个带负电荷的电子，核与电子间借库仑力相作用，使电子绕核作圆周运动。不同原子的核是由一定数目的核子即质子与中子组成。核外具有与质子数目相等的电子，且各在一定轨道上快速运行，构成原子壳层。原子一般只有 10^{-8} 厘米大小，而原子核则只介于 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米之间，但它却几乎集中了原子的全部质量（除外层电子外）。原子质量数以原子中的核子数表示，如铀²³⁵即铀原子核内有235个核子。元素的性质因电子、质子、中子的数目与排列不同而异，其化学性质则由最外层轨道上的电子数决定。

二、周期表

门捷列夫于1868年发现单质及元素化合物的形成和性质均与其元素的原子量及原子核的电荷值具有周期性的关系。据此，将元素按原子量增长的秩序排列成若干横列——周期；同时将化学性质相似的元素上下排列成纵行——族，构成周期表。周期表包括9个族和7个周期，最后一个周期尚未结束。某一元素可以根据它的性质来决定它在表中所占的位置；同时，表中的每一格又均有一定性质的元素与之相对应（表1，即元素周期表）。

原子序数(Z)为元素在周期表中位置的序号，即核阳电荷的整数值，等于核内质子数或中性原子的核外电子数。 Z 相同的原子，化学性质相同，但中子数则不一定相等，后者即为同位素。如₅₃碘¹³¹即为₅₃碘¹²⁷的同位素，其原子序数(Z)均为53，核子数则分别为131及127，即二者核内质子数均为53，而中子数则分别为78及74。

三、放 射 性

放射性为不稳定原子核所具有的能自发放出 α 、 β 、 γ 射线和中子、质子等或通过电子俘获等方式进行蜕变特性。天然存在的放射性同位素能自发放出射线的特性，称为“天然放射性”。而通过核反应，由人工制造出来的放射性同位素的放射性，称“人工放射性”。

1896年，法国物理学家贝克莱 (Becquerel, A.H.) 发现放射性，并证实它不因一般物理、化学影响而发生改变。

自然界中的镭²²⁶、钍²³²及铀²³⁵和它们的产物可放射 α 粒子或 β 粒子及 γ 射线而发生一系列蜕变。 α 粒子为氦的原子核，带2个正电荷； β 粒子为一束快速飞行的电子流，带负电

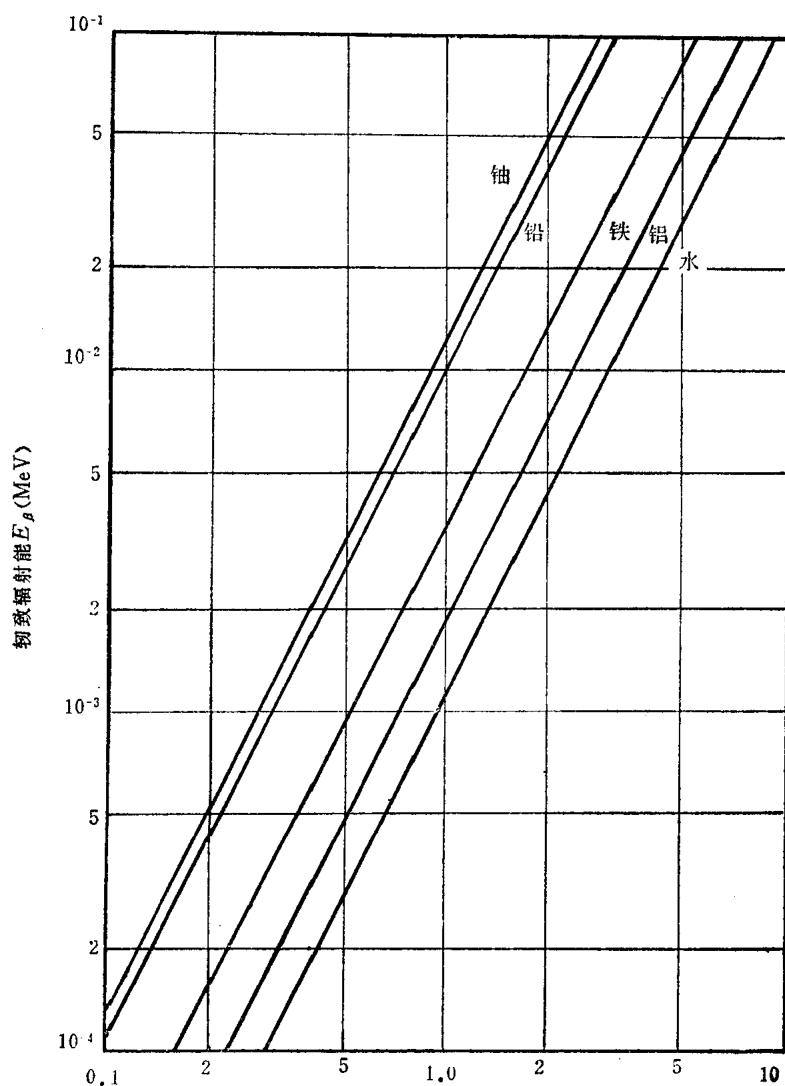


图1 β 粒子为不同物质阻尼时的总轫致辐射能
 E_0 为 β 能谱中的最大能量 E_0 (MeV)

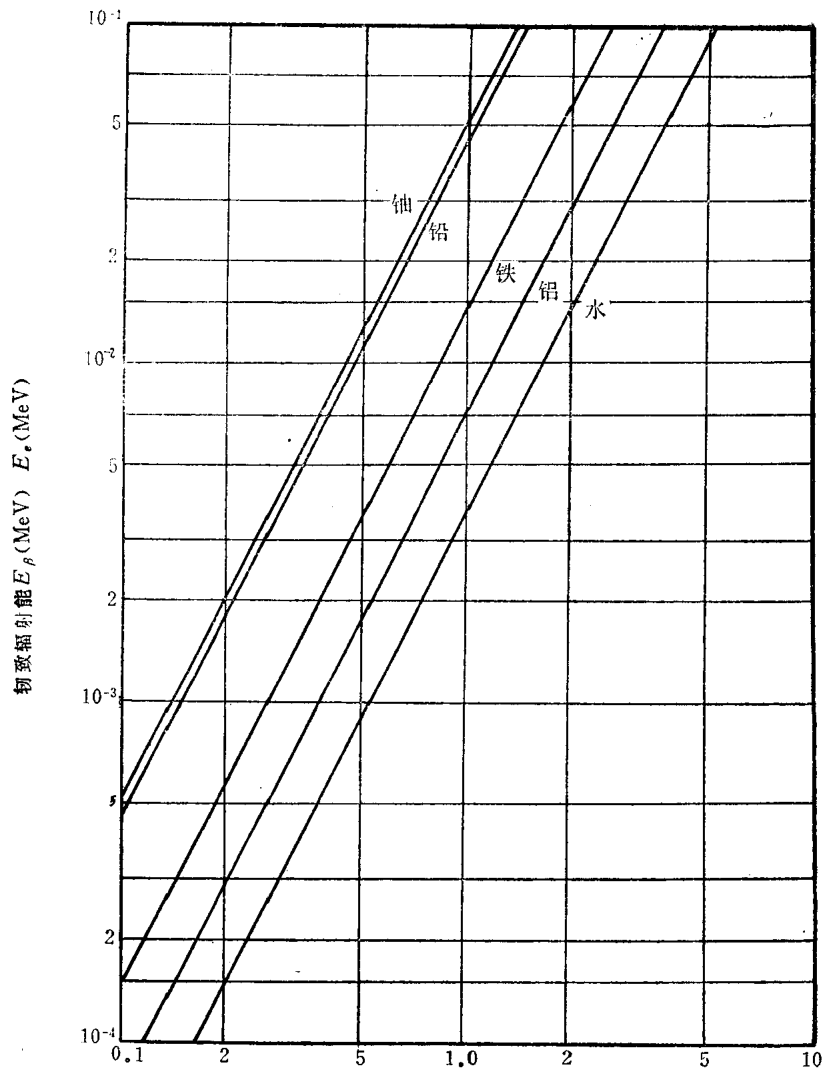


图2 单能电子为不同物质阻尼时产生的总轭致辐射能 E_{β} 为电子原来的能量

荷， γ 射线则为具有极高能量的量子流，不带电荷，为电磁辐射。前二种叫微粒发射，而 γ 射线则为电磁辐射。

四、轭致辐射

具有高能量的带电粒子或被加速的电子为靶材的原子核场所阻尼或受其它带电粒子（通常为核）所反冲而突然减速时，有一部分动能转变成电磁辐射，即称为轭致辐射。由于电子等所受的阻尼或反冲的程度不同及带电粒子的能量不同，因此轭致辐射的能量分布自 $0 \sim E_{\text{最大}}$ 。X射线为轭致辐射的一种，但通常轭致辐射一词多用于表征放射性物质的 β 辐射被阻尼时发出的电磁辐射。轭致辐射的总量随吸收 β 粒子的物质及 β 粒子的能量不同而变化。从吸收物辐射出的轭致辐射比率与吸收物的性质及 β 辐射源和吸收物的几何关系有关。

图1～3示 β 粒子、电子为不同物质阻尼时产生的轭致辐射及能量。

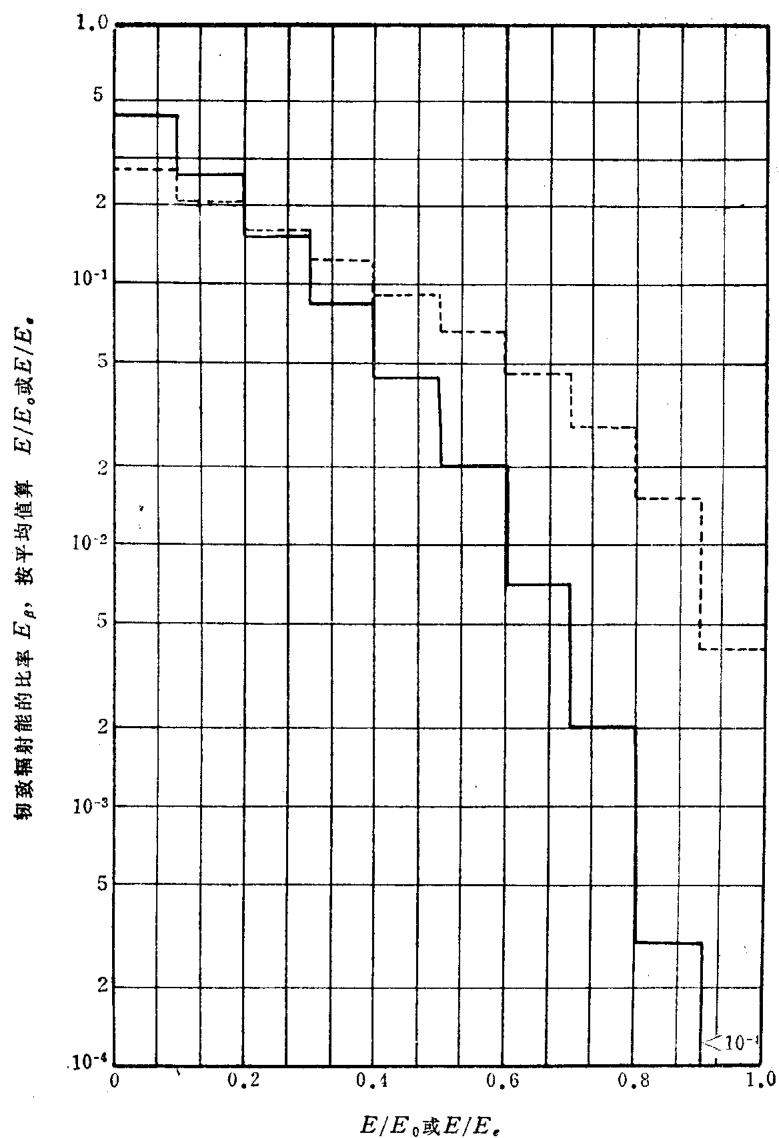


图3 β 粒子或单能电子被阻尼时产生的轫致辐射的能谱
实线表示已知的 β 粒子能量； 虚线表示单能电子；
 E_0 为 β 能谱最大能量； E_e 为电子初始能量

五、X射线发生的原理和性质

1895年德国物理学家伦琴(W.C.Röntgen)首先发现了X射线。

X射线机主要由球管(又称X射线管)、高压发生器、整流器、灯丝加热装置及操纵系统等构成。球管是发生X射线的主要部件,由灯丝(阴极)与靶(阳极)组成(图4)。

由X射线管发生的X射线,包括两种成分,即连续辐射(轫致辐射)和标识辐射(特征放射)。在灯丝加热后,其外层空间将产生大量自由电子云,若同时在X射线管两极间加以

高电压，自由电子在靶的正高压电场作用下，以极高速度撞向靶，为靶材原子核场所阻尼而减速，遂将电子的部分能量（约为电子总能量的0.2%）转换成X射线发射，故X射线本身亦为轫致辐射的一种。由于高速电子可于核场的不同距离处通过，因而释放出的能量不同，致使X射线呈一连续能谱，即为一束波长不同的混合线束。两极间能量越大，则所产生的X射线的波长越短；能量越大，射线越硬，穿透力越强，质越好。X射线光子能量的最大值取决于靶的加速电压V，即：

$$h\nu_{\text{最大}} = eV$$

其相应的最短波长为：

$$\lambda_{\text{最小}} = \frac{12.4}{KV}$$

能谱中波长长的部分叫软射线，易为物质所吸收，在诊断上无意义，且为散射线的主要来源。极间电流（管电流）越大，X射线量越多，其中软性成分也越多。当靶物质的原子序数（Z）越高时，由于经加速的电子撞击轨道上电子的机会越多，X射线量也随着增加。

此外，原子外层的电子是靠它与核的库仑力而维系于固有轨道上，当外周电子越远离原子核时，它与核的结合能越小（位能能级高），易受外力所影响而被击出原有轨道（受激），甚至脱离原子（电离）；内层轨道电子由于与核的结合能大（位能能级低），除非外力很大，否则不易脱离原有轨道。一旦内层电子被击出，其空位就被高能级轨道上的电子所填补（跃迁），剩余的能量将以标识（特征）X射线的形式辐射出来，原子始恢复原来的状态（稳态）。

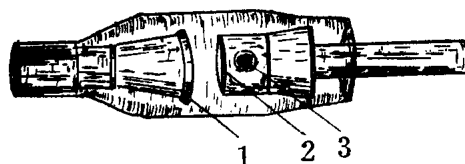


图4 X射线球管结构示意图
(固定阳极式)

1. 阴极及灯丝聚焦器 2. 阳极靶
3. 阳极上X射线输出孔

不同元素原子的电子数目虽不同，但均依一定规律排列而构成不同壳层，最多可有七层。因而标识X射线随不同物质的不同壳层及填补的电子的来源而异，可分为某物质的K、L、M等种标识X射线；每种又可分为 α 、 β 、 γ 等细类，如 K_{α} 、 K_{β} 等。由于击出某壳层电子需一定能量，故标识X射线需在一定的高压下才能发生，其数值几与原子序数的平方成正比，而与管电流及电子加速的速度无关。

1. X射线与 γ 射线

X射线与 γ 射线均系电磁辐射，具有与可见光、紫外线等相同的一般特性。如光的直线传播、反射、折射、散射和绕射等，速度亦与可见光同，并遵循其一般规律。

此外，X射线与 γ 射线也是具有一定能量的粒子（光子）。它们通过物质时，借能量转移而引起物质的电离、吸收、散射或诱发标识X射线等现象。它们与可见光等类辐射不同处仅仅在于光子能量较高，一般在千电子伏特~百万电子伏特(KeV~MeV)水平，而可见光的光子则只在电子伏特(eV)的水平。

至于X射线与 γ 射线的区别则在于X射线比 γ 射线的波长长而频率低，二者的范围可以相互重迭，即有X射线型的 γ 射线及在 γ 射线区的硬X射线，其基本作用或效应无本质上的区别。诊断用的X射线波长在1~0.1埃(Å)之间，而 γ 射线则为 10^{-3} Å左右。此外，X射线

系韧致辐射的一种，系由核外发射的连续能谱辐射； γ 射线则系原子核蜕变时的能量发射，由核内发射，用以处理核反应中过多的能量，为单能辐射。

2. 光子的能量

光子具有一定的能量，因而能对物质做功。如光电效应、电离作用、热效应等。

光子的能量以电子伏特(eV)表示。如能量 E_γ 为 1 兆电子伏特(MeV)的 γ 射线，表明这时光子的能量为 1 兆电子伏特。

3. 单能辐射

由相同能量的光子组成的辐射流即为单能辐射。自然界中较少见，多见于人工放射性同位素，如铯¹³⁷蜕变成钡¹³⁷时，后者放射0.663MeV的 γ 射线。

4. 线状能谱

由能量不同，但彼此却完全一致的光子($h\nu_1$ 、 $h\nu_2$ 、 $h\nu_3$ 等)所组成的辐射谱，亦即一些单能谱线的组合，称为线状能谱。大多数天然的与人工放射性同位素的 γ 射线以及原子的标识X射线多具有线状能谱，钴⁶⁰的射线谱即系由能量为1.17及1.33MeV的 γ 射线所组成(图5)。

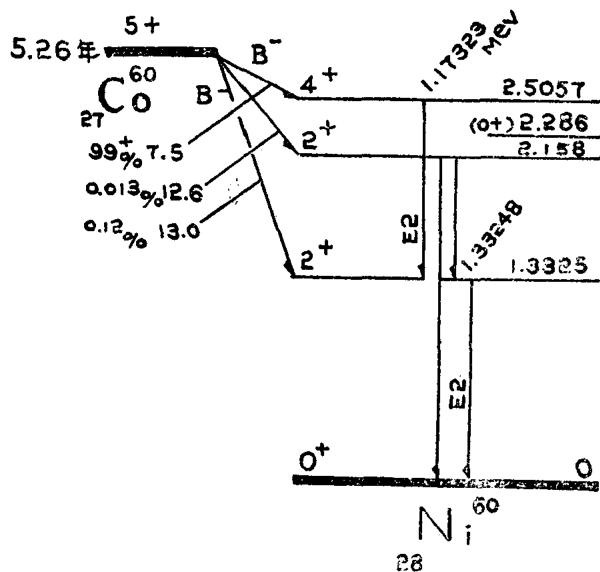


图5 钴⁶⁰的核蜕变图
示不同能级的单能辐射构成的线状能谱

5. 连续能谱

波长连续分布的辐射谱(或光谱)，即由零至某一最大值($E_{\text{最大}}$)的光子组成的辐射谱，如韧致辐射的射线谱。

6. 电离辐射的能量与质

诊断上常用X射线球管两极间的峰值电压(即最高的峰值电压KVP)来表示X射线的质。因为管电压增加时，电子的速度亦增加，所产生的X射线的穿透力也相应增加。但由于整流装置的效能和滤过板的吸收效应以及X射线的能量分布等不同，再加上管电压增高时，X射线管的输出量亦随着增加。因此，管电压只能概略反映X射线的质，而不能精确代表X射

线的平均能量。

γ 射线的能量则等于核反应后，产物核受激，自高能级跃迁至低能级时，两能级间的能量差，故呈单一谱线。其能量一般以 MeV 表示。

电离辐射能量常以 $h\nu$ 表示，即 $E = h\nu$ 。式中 h 为普朗克常数， ν 为辐射的频率(赫/秒)。可见，当能量越高时，电离辐射的频率越高，波长就越短。所以，有时也用波长当量来表征射线的质。此外，在实际应用中，常用半价层的值来表征电离辐射的质，即表示电离辐射在成分已知的物质中的穿透能力。

7. 电离辐射的量

同向或近似同向的电磁辐射或粒子流称为光束；单位时间内光子的流量称光通量；而与光束垂直的单位面积上的光通量则称为光子流密度或光密度。从剂量学的角度考虑，X射线或 γ 射线的量应以光子流密度来测量。但由于诊断实践中难以对X射线的量进行测量，遂间接的以X射线管电流毫安(mA)与X射线照射的时间(S)的乘积，即毫安·秒(MAS)来表示X射线的量。 γ 射线的量则常用“居里小时”、“毫居里小时”或“毫克镭当量小时”等方法表示。

8. 辐射强度与减弱

辐射强度指光子单位时间内通过吸收体单位阵面时交换的能量值，或等于每秒通过1平方厘米阵面上的光子能量。如 γ 辐射流系由同一能量的 γ 量子所组成，则辐射强度 E 为：

$$E = IE_{\gamma}$$

式中 $I = 1$ 秒钟内通过1平方厘米阵面上的 γ 量子数，

$E_{\gamma} = \gamma$ 量子能量。

辐射通过厚度为 x 的介质层时，由于散射与吸收，其强度 E_x 将减弱，此时：

$$E_x = E_0 e^{-\mu x}$$

$E_0 =$ 射线进入介质前的强度； $\mu =$ 该能量的射线在介质中的总虚吸收系数。

这时的射线强度为：

$$E = IE_0 e^{-\mu x}$$

六、辐射的吸收

电离辐射作用于生物体后，被吸收的能量中97%转变为热能，而3%的能量则以引起化学变化的形式积蓄起来。引起温升的能量为“单位质量吸收的能量”，从热学角度考虑，这是一个很微小的量。

由于被物质吸收的结果，使入射辐射的能量减弱。若物质的厚度越大，密度越高，而且入射线的波长越长时，则吸收现象越明显，辐射的减弱也越显著。

辐射通过物质时，一般可产生下述几种现象：

1. 光电吸收

光子与原子壳层的电子碰撞时，将全部能量用于击出轨道电子，并赋予它以一定动能，形成光电子。光电子的动能等于入射光子能量减去电子在壳层轨道上的结合能。在低能量的光子，如低于0.2MeV，且作用于原子序数(Z)高的物质时，光电吸收占主要作用。每个原子的光电吸收系数大致与原子序数的四次方成正比，而与光子能量的立方成反比。当光子能量低于0.2MeV时，光电子在骨骼中的释放要比在软组织中高得多。光电子的射出方向是随入射线束的能量而改变的。当电离辐射能量($h\nu$)小时，几乎与之相垂直；而 $h\nu$ 大时，则几乎与入射线束方向相同，成为前向光电子。同时，自由电子补充空位时，产生的标识X射线称为荧光辐射；被撞击的原子对光子能量的吸收叫实际吸收。图6~7为 γ 射线在水与铅等物质中的质量吸收系数。图8中A为光电吸收模式图。

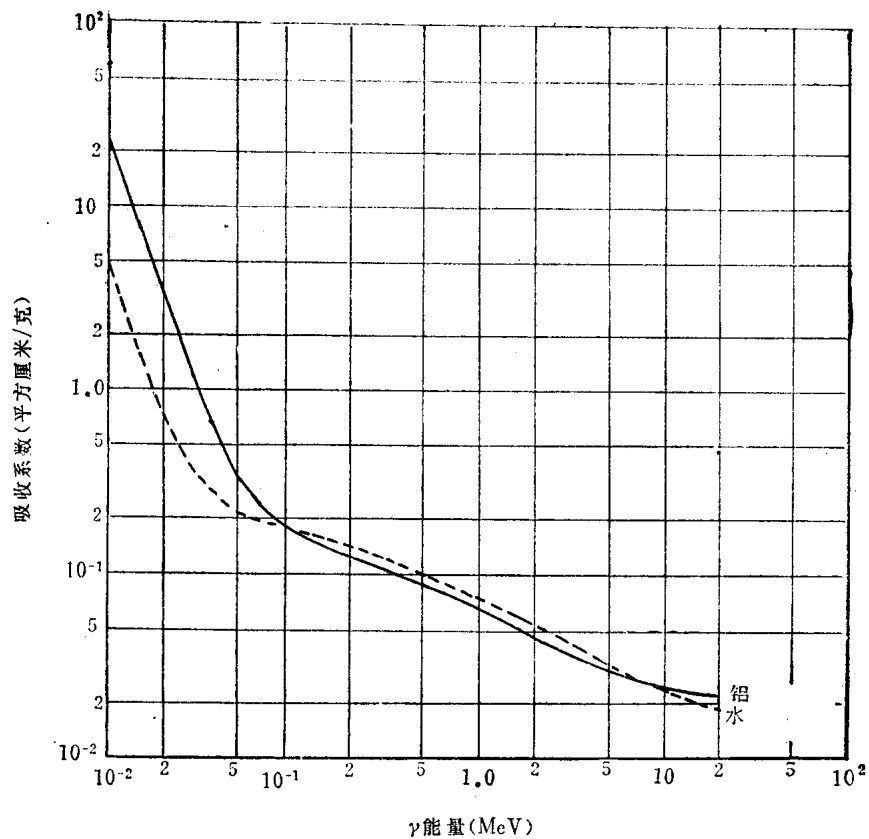


图6 γ 射线在水及铝中的吸收系数

图7 γ 射线在铍、铁及铝中的质量吸收系数

