

龚德荫 编 潘自强 审

原子能出版社

DIANJI FUSHE YU REN

电离辐射与人

57

内 容 简 介

本书从天然放射性的发现开始,深入浅出地介绍了电离辐射的性质,粒子加速器、核反应堆和人工放射性同位素等人工电离辐射源,电离辐射在工业、农业、医学及科学研究等各个领域中的应用,电离辐射的照射方式及照射途径,电离辐射对人体的伤害,电离辐射的防护及核工业的安全评价等有关知识。书中阐述了电离辐射与人类生活的密切关系以及应用电离辐射给人类带来的利益,并着重指出,尽管电离辐射对人体有某些伤害,但只要认识了它的性质,掌握了它的防护规律,就可以把它的危害降到可合理达到的尽可能低的水平。几十年来核工业的实践证明了核工业是相当安全和清洁的工业。

本书是一本通俗读物,可供具有中等文化水平的广大读者及非本专业的一般科技工作者阅读。

电离辐射与人

龚德荫 编

潘自强 审

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

开本781×1092 1/32 印张3.375字数73千字

1988年8月北京第一版·1988年8月北京第一次印刷

印数1—870

ISBN 7-5022-0105-X

TL·43 定价: 1.00元

目 录

一、绪言	1
二、自然界中的电离辐射	2
1. 物质放射性的发现	2
2. 电离辐射是如何从物质中发射出来的	4
3. 电离辐射防护中常用的量和单位	8
4. 电离辐射的性质	10
5. 自然界中的电离辐射	16
三、人工电离辐射	20
1. 为揭示微观世界奥秘而发展起来的粒子加速器	20
2. 利用核能造福人类的核电厂	25
3. 威力巨大的“核爆炸”	33
4. 人工放射性同位素	37
四、神通广大的电离辐射	42
1. 五花八门的工业应用	42
2. 从鲁棉一号谈起	46
3. 一门新兴的医学——核医学	50
4. 在科研工作中大显身手的示踪原子	53
5. 电离辐射在测量和分析中的应用	57
6. 以废治废，变废为宝	
电离辐射在环境保护方面的应用	60
五、电离辐射的照射及对人体的伤害	64
1. 电离辐射的照射	64
2. 放射性流出物在自然界中的迁移及其对人的照射途径	66
3. 放射性物质在人体内的迁移	69
4. 电离辐射对人体的作用机理	72

5. 电离辐射的非随机性效应.....	75
6. 电离辐射的随机性效应.....	77
7. 照射可被防止, 损伤可以治疗.....	80
六、电离辐射的防护及核工业的安全评价.....	82
1. 辐射防护的三个基本原则.....	82
2. 防止外照射的三项基本措施.....	86
3. 防止核电厂放射性物质泄漏的多重屏障.....	89
4. 减少放射性物质排出的三废处理.....	91
5. 人工辐射的照射比天然辐射的小很多.....	93
6. 核电厂是一种比较安全和清洁的工厂.....	98
七、结束语	101

一、绪 言

电离辐射过去曾称为致电离辐射，即能导致物质激发和电离的辐射。这类辐射包括X光机发出的X射线，加速器加速的带电粒子以及放射性物质裂变和衰变时放出的微粒和辐射。电离辐射能和物质中的原子作用，使物质发生一些物理化学变化。例如，它可使物质发热，发光，使一种原子变为另一种原子，使一种分子变为另一种分子等等。因此电离辐射在工业、农业、医学和科学研究等各个领域得到广泛的应用，给人类带来了巨大利益。但是，电离辐射和生物体作用时，也能使细胞、组织和器官受到损伤，对人也有不利的一面。如X射线在医学上的应用曾挽救了千百万人的生命，而过量的X射线照射又影响人们的健康。实际上这样的情况在人类的生产活动中是经常碰到的，高度工业化提高了人们的物质生活水平，但却需要解决环境污染问题；化学农药的普遍应用提高了粮食的产量，却影响了生态平衡；亚音速飞机减少了人们旅途之苦，而一次飞机失事会夺去上百人的生命。这些事例说明一个问题，当人们要获得某一种利益时总是要付出一些代价的。任何一件事情，有有利的一面，也有不利的一面。人们的主观能动性就在于权衡它的利弊，仅当某种活动的利益大于它的危害时，才值得从事这种活动。另外，人们的主观能动性还在于认识这种活动中潜在的危害，并把这种危害降到尽可能低的水平。本书的目的就在于使读者了解电离辐射给人类带来的巨大的利益及其潜在的危害，了解人们为降低这种危害所采取的各种防护措施，以及这

些防护措施的效果，并使读者了解这样一个基本情况，即人工电离辐射对人类的照射比天然辐射对人类的照射还要低，特别是核电厂所致对人类的照射是微不足道的。我们完全应当更充分地利用电离辐射来造福人类。

二、自然界中的电离辐射

1. 物质放射性的发现

从我们生活所在的地球形成那天开始，在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。尽管人类已经由野蛮进化到文明，发明了蒸汽机，使用上电力，但是直到上个世纪末，人类对其周围物质的放射性质仍一无所知，因为它看不见，摸不着，也没有发现它对生物体和人类的发育、成长有任何不利的影响。

1895年，伦琴在研究阴极射线产生的荧光现象时，发现了X射线。伦琴发现这种射线可以穿透用硬纸板做成的盒子而使外边的荧光物质发出荧光，还可以穿透黑纸使里面的胶片感光。也就是说，这种射线具有贯穿能力，可以穿透一些不透光的物质。以后又发现，这种射线能使空气导电，即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，而且学会用人工方法来产生这种电离辐射。一时间在全世界很多实验室都着手研究这种辐射的性质，并很快把这种辐射用于医学上的诊断和治疗。由于伦琴这一伟大贡献，在很长一段时间内人们曾用“伦琴”这一名字作为X和γ射线照射量的单位。

就在伦琴发现X射线的第二年，1896年贝可勒尔发现了铀的放射性。当时贝可勒尔正在研究X射线与硫酸铀酰钾盐发光性能之间的关系。他曾把包在黑纸内的胶片和铀盐放在一起在太阳下照射，发现铀盐也放出一种能穿透黑纸使胶片感光的射线，而且这种射线还能穿透铝片和铜片。但是他开始认为这种射线是由于阳光的照射才从铀盐内发射出来的。1896年2月26和27日两天连续阴天，他把制好的样品（铀盐和包在黑纸内的胶片）放在抽屉内，28日天空又没出太阳，3月1日他把胶片显影，他原以为成象一定很模糊，但事实正好相反，成象非常清晰。以后他又进行了一些试验，终于认识到铀盐无需阳光照射自身会发射一种射线，这种射线同样可以使空气电离，使胶片感光。但是，它和X射线不一样，不是阴极射线打到靶物质上发出的，而是从一种物质，即从铀中发出的。这是人类第一次发现物质的放射性。为了纪念贝可勒尔这一伟大贡献，人们今天用“贝可勒尔”这一名字作为放射性物质活度的单位。

在此以后的几年里，人们又先后发现了其他重元素，如钍、钋、镭、锕等都具有放射性，都能发出射线。同时，人们根据这些射线在磁场内偏转的情况，发现这些射线共有三种，并用头三个希腊字母分别把它们称作 α 射线、 β 射线和 γ 射线。它们所带的电荷不同（包括电荷的符号和数量），质量不同，贯穿物质的本领和使空气电离的能力也不同。1903年居里夫人在其博士论文中给出了一个后人经常引用的图形（见图1）来描述这三种射线。射线从放在铅凹槽里的放射性物质射出，磁场垂直于纸面向外。 α 射线带正电，在磁场作用下向右偏转，但因质量大，偏转较小。 β^- 射线（下文将要谈到， β 射线有两种，一种带负电，称之为 β^- 射线，一

种带正电，称之为 β^+ 射线。人们开始发现的 β 射线是 β^- 射线)带负电，向左偏转，因为质量小，偏转较大。 γ 射线不带电，所以在磁场中不发生偏转。

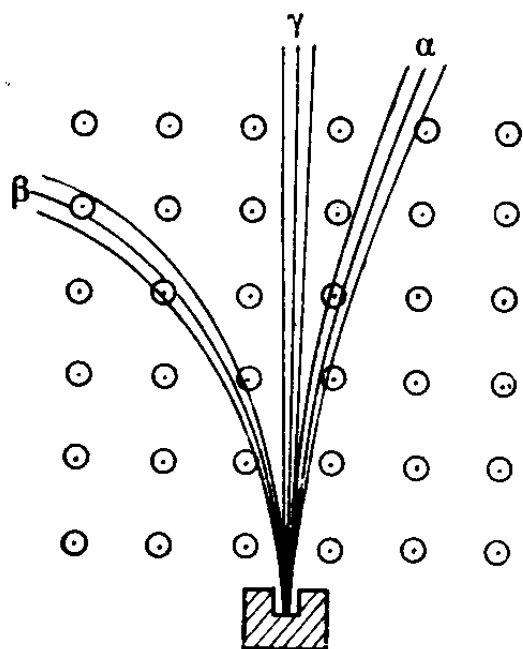


图1 α 射线、 β 射线和 γ 射线在磁场中的偏转

物质放射性的发现使人们进入一个新的时代，一切近代物理和核能的开发，都是在它的基础上建立起来的。

2. 电离辐射是如何从物质中发射出来的

电离辐射的发现使人们对于原子结构的认识进入一个新时代。在此之前，汤姆逊曾提出一个原子模型，他把原子看作一个带正电的均匀体，而电子则象西瓜子那样分布在这均匀体之内，整个原子是中性的。今天看来，他这个模型当然是错误的。但是，他把原子分成带正电的均匀体和带负电的电子两部分，在当时也是一种进步的看法。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，他又和盖革、马斯登一起试验，发现 α 粒子在穿透金属时，大约有两万分之一的 α 粒子的散射角大于 90° ，即向

后方散射。根据这些试验，1911年卢瑟福提出了一个原子结构的新模型。卢瑟福认为，原子内部象一个太阳系，原子核带正电，象太阳那样位于太阳系的中心，而电子则象行星一样在自己的轨道上绕原子核飞行。这样一个模型可以很好地解释卢瑟福的试验（见图2）。当 α 粒子远离原子核通过时， α 粒子只和核外电子作用，因为 α 粒子的质量为电子的7000多倍，所以它和电子作用后自己的飞行方向基本上不改变。当 α 粒子从原子核（其质量和 α 粒子的质量差不多甚至更大）附近经过时，将受到带正电的原子核的排斥力而偏离自己原来的飞行方向。而当 α 粒子正好碰上原子核时，它就会向后方散射回来。就这样卢瑟福用天然放射性同位素的 α 辐射揭示了人们用肉眼看不到的原子的内部结构。

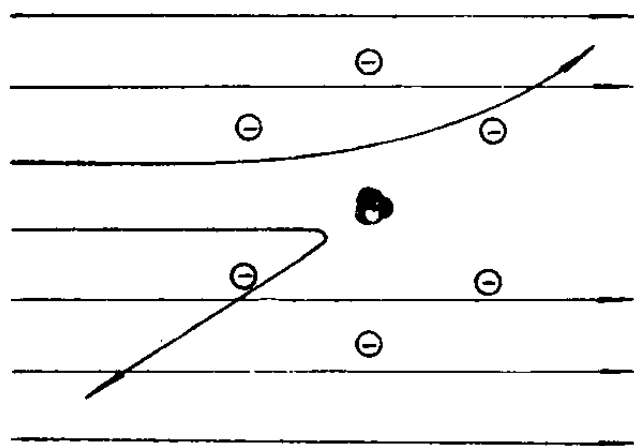


图2 卢瑟福对 α 粒子被物质散射的解释

现在我们知道，原子是由一个带正电的原子核和周围几层带负电的轨道电子组成的。原子核内含有质子和中子，质子带一个电子电量的正电荷，中子不带电，核内的质子数和周围的电子数正好相等，所以整个原子呈中性。

原子核内的质子数 Z 称作原子序数，它决定着一个元素的化学性质，元素周期表就是按照原子序数排列的。但是某

一元素的原子，其核内的中子数 N 不一定相同， Z 值相同但 N 值不同的一些原子称为这种元素的同位素。因为它们在周期表中占据同一位置。如果其中某个同位素是放射性的，这个同位素就称为这个元素的放射性同位素。例如氢元素就有三个同位素，氢的原子核只有一个质子，氘的原子核内有一个质子和一个中子，氚的原子核内有一个质子和两个中子。氚是氢元素的一个放射性同位素。为了用元素的化学符号表示同位素，在其化学符号的左上角加一个数字表示它的核子数(即中子数加质子数)，在其化学符号的左下角加一数字表示它的质子数。如上述氢的三个同位素符号的写法就是 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 和 ${}^3_1\text{H}$ 。

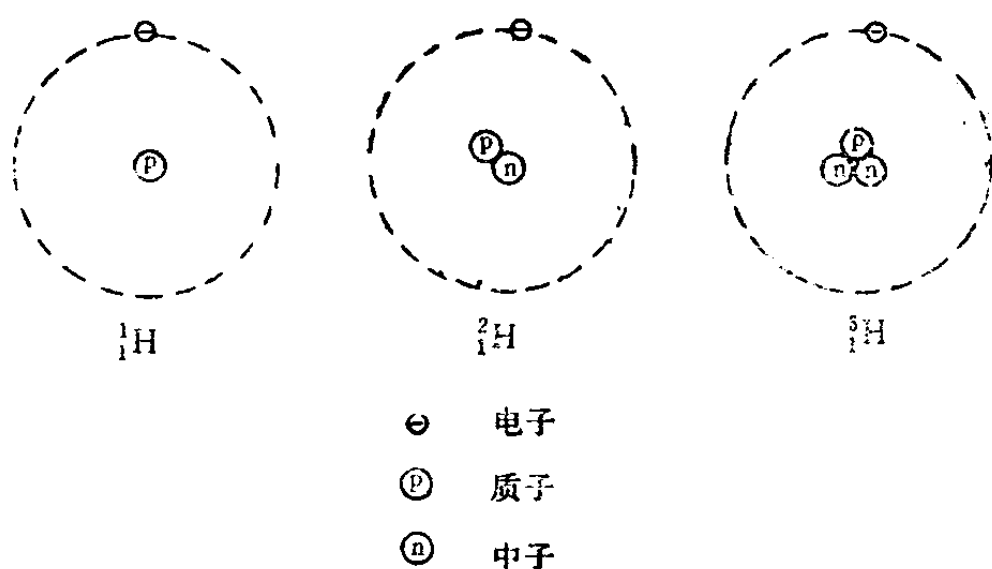


图3 氢的三个同位素的原子模型

对于某一稳定同位素，其原子核内的中子数和质子数有一个大致确定的比值，如对于轻的元素，这个比值大致为1；对于重的元素，这个比值大致为1.5。偏离这个比值，核素就不稳定。中子数较多时，一个中子会变成一个质子，并放出一个 β^- 粒子(少数同位素也可能直接放出一个中子)，

以降低中子数和质子数的比值。质子数偏多时，一个质子会变成一个中子，并放出一个 β^+ 粒子，或者从内层轨道上捕获一个电子使质子变成中子，以提高中子数和质子数的比值。原子核从内层轨道捕获一个电子后，内层轨道上留下一个空位，当外层电子来填充这一空位时，会放出一条具有一定能量的特征X射线。人们通过测量特征X射线，可以间接了解核的电子俘获衰变。

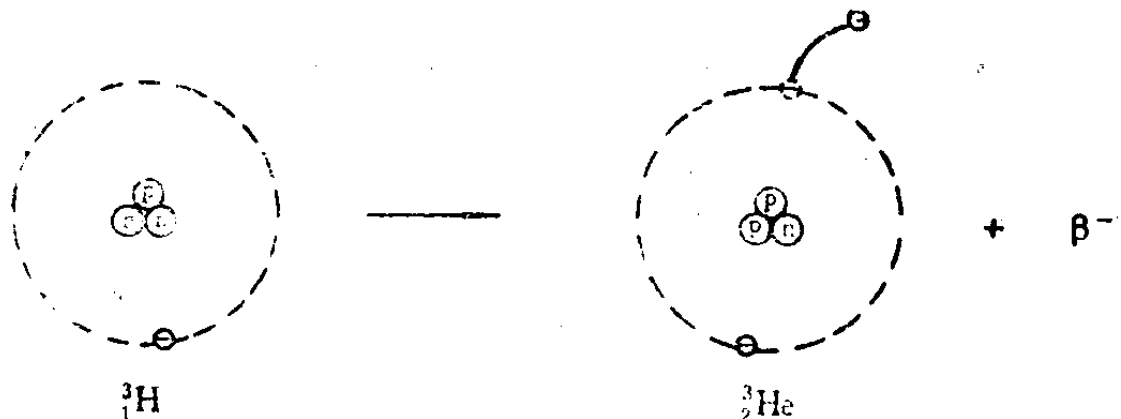


图4 β^- 衰变的模型

氚核内的一个中子变成一个质子并放出一个 β^- 粒子，这样氚核就变成了氦核，它再吸收一个自由电子后变成氦原子。

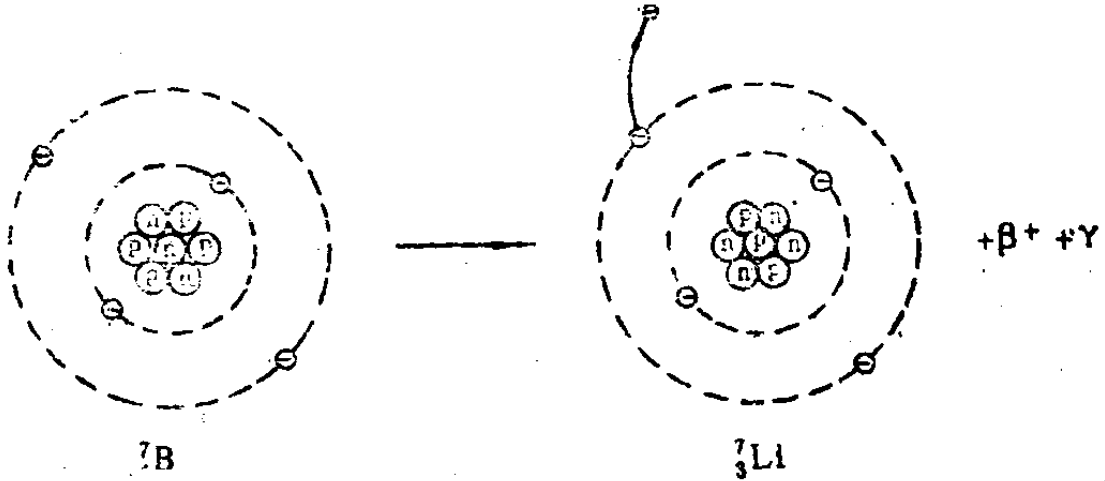


图5 β^+ 衰变的模型

${}^7_4\text{B}$ 核内的一个质子变成一个中子并放出一个 β^+ 粒子，这样铍核就变成了锂核。它放出一个外围电子后变成锂原子。

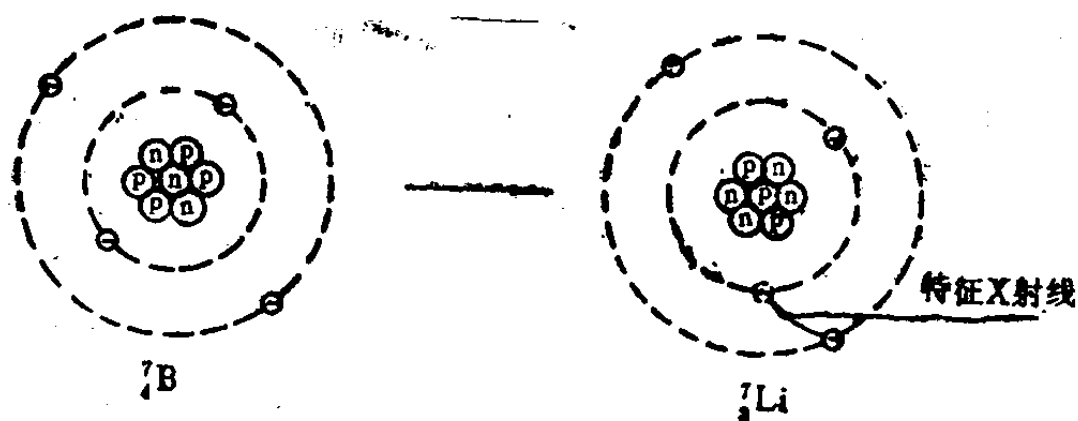


图6 电子俘获的模型

${}^7_4\text{Be}$ 核从内层轨道俘获一个电子，使一个质子变成一个中子，这样铍核也变成了锂核。当外层轨道电子填充内层轨道上的空位时，把多余的能量以特征X射线的形式释放出来。

对于一些重元素，由于核内的中子、质子很多，有时几个中子和质子结合在一起从核内放出，也就是说放出一个小的原子核。前边所说的 α 粒子就是一个氦原子的核，它由两个质子和两个中子组成。最近又发现从重核内还会放出 ${}^{14}_6\text{C}$ 的核，它是由六个质子和八个中子组成的。不少重核还可以自发地分裂为两个质量差不多的核，如 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 可以自发分裂为 ${}^{91}_{36}\text{Kr}$ 和 ${}^{144}_{56}\text{Ba}$ 两个核，同时放出二个中子。我们称这种过程为自发裂变。

一个核放出 β^- 、 β^+ 或 α 粒子后，核内的质子数变了，这个核就不是原来元素的原子核，而是一个新元素的原子核了。这种新核多半处于激发态，当它由激发态回到基态时，会以 γ 射线的形式把多余的能量放出来（见图5）。也有少数的核，经一次衰变就到达基态，不放出 γ 射线。 ${}^3_1\text{H}$ 就是这样，它一次衰变后变成的氦核处于基态，没有 γ 射线放出来。

3. 电离辐射防护中常用的量和单位

为了能定量地研究电离辐射及其作用，有必要在这里介

绍几个常用的量和单位。这些量和单位都有自己的演变过程。我国在1983年颁发的《中华人民共和国计量管理条例》是以新的国际单位制为依据的，目前正在推广实行。但老的单位还会在一些书刊中碰到，所以这里把新老单位对照起来一起介绍。

描述物质放射性强弱的量称之为活度或放射性活度。它的老单位是居里 (Ci)，是以发现镭元素的居里夫人的名字命名的。它的定义是每秒钟发生 3.7×10^{10} 核衰变，大约相当于1克镭的活度。新的单位是贝可 (勒尔)，符号为Bq，是以发现物质放射性的贝可勒尔的名字命名的。它的定义是每秒钟发生一次核跃迁 (包括核衰变)。所以 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

描述物体能量的国际单位是焦耳 (J)。但是拿这个量来量度电离辐射却显得太大了。在这里常用的单位是电子伏 (eV)，它的定义是一个电子通过电势差为1伏的电场时所获得的能量。它和焦耳的关系是 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。在电离辐射中最常用的单位是兆电子伏 (MeV)， $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ 。我们常见的 α 、 β 、 γ 辐射，其能量多在这一能量附近。

描述X和 γ 射线在空气中电离能力的量称为照射量，它的老单位是伦琴 (R)，是以发现X射线的伦琴的名字命名的。它的定义是在1.293毫克的空气中 (标准状态下1立方厘米的空气中) 产生1静电单位电量 (1静电单位 = $1/3 \times 10^{-9}$ 库仑 (C))。新的单位没有专用的单位名称，以库仑每千克 (C/kg) 为单位。新老单位之间的关系是 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 。

描述物质吸收电离辐射能量的量是吸收剂量，它的定义

是电离辐射授与单位质量物质的能量。它的老单位是拉德 (rad)，相当于授与1克物质 1×10^{-5} 焦耳的能量。新的单位是戈瑞 (Gy)，是以创立空腔电离理论的戈瑞的名字命名的。它相当于授与1千克物质1焦耳的能量。新老单位的关系是 $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ 。

电离辐射对人体的作用，除与它授与人体组织的能量即吸收剂量有关外，还与射线的生物效应等有关，例如，某一射线在组织内很短路程上能产生很多的离子对，那么它对人体组织的损伤就要大些。所以在相同吸收剂量下，快中子、 α 粒子对人体组织的损伤就要比X、 γ 或电子的损伤大好几倍。为了描述这种作用，引入一个新的量——剂量当量，它等于吸收剂量和描述不同射线生物效应的系数的乘积。它的老单位是雷姆 (rem)，新单位是希沃特，简称希 (Sv)，两者之间的关系是 $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ 。

为了明确起见，现把这几个量和单位列表如下：

表1 辐射防护中常用的量和单位

物理量	老单位	新单位	换算关系
活度	居里 (Ci)	贝可 (Bq)	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
照射量	伦琴 (R)	库仑/千克 (C/kg)	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
吸收剂量	拉德 (rad)	戈瑞 (Gy)	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
剂量当量	雷姆 (rem)	希 (Sv)	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

4. 电离辐射的性质

X射线被发现之后很快就用于临床医学，开始用于诊断骨折，以后又用于诊断脏器疾病，如诊断肺结核和胃溃疡，

这些应用无疑是正确的，一直到今天，我们还在应用它。但在当时也有人用X射线来治疗疾病。如本世纪初，在英国曾有14000多人用大剂量X射线治疗脊椎疼痛，据说疗效还很好。但他们当中有70多人死于白血病。而在正常人中，白血病的发病率不过万分之二，看来用大剂量X射线来治病需要慎重考虑。所以，不论从电离辐射的应用角度来看，还是从电离辐射的防护角度来看，深刻了解电离辐射的性质都是很必要的。

电离辐射的性质主要表现为电离辐射的种类，电离辐射的能量以及与这两者有关的电离辐射与物质的作用，再者就是发出电离辐射的放射性核素的半衰期。

常见的电离辐射有 α 射线， β 射线，X射线和 γ 射线以及中子等几种。 α 射线是由两个中子和两个质子组成的，也就是说它是氦的原子核。它的质量大约为4个原子质量单位，带有两个电子电量的正电荷，因为质量大，所以飞行速度较慢，大约为 10^4 千米/秒。因此当它穿过物质时，与沿途周围原子作用的时间较长，传递给周围原子的能量较多，所以它的电离（和激发）能力最强，在空气中每厘米路程上平均产生几万个离子对（开始时，能量较高，飞行速度较快，在单位路程上产生的离子对较少，而在能量消耗将尽时，飞行速度慢了，在单位路程上产生的离子对也多了），产生一个离子对大约需要35电子伏的能量，所以对于能量为5兆电子伏的 α 粒子，在空气中的射程只有几厘米，用一张纸就可以把它挡住，连人体的皮肤也穿不透，不会对人产生外照射。对于发射 α 粒子的放射性物质，只有吃进、吸入或通过伤口进入人体内时，才对人有害。

β 粒子是从核内发射出来的高速电子，质量很小，只有

原子质量单位的 $1/1840$ ，所以飞行速度很快，接近光速。由于速度快，与沿途周围原子的作用时间短，电离能力较弱，在空气中每厘米路程上平均只产生几百个离子对，所以它在空气中能飞行几米远的距离，有一定的穿透能力，能穿透皮肤对人体产生作用。不过它还是比较容易被阻止的，只要几厘米厚的水层就可以了。它对人既可产生外照射，也可产生内照射。

X、 γ 射线是一种高能电磁波，和可见光同属一类，但其能量要比可见光高几个量级（见图7）。X、 γ 射线不带电，不能直接使物质的原子电离，但是它和原子作用时，会把全部或部分能量传给电子，从原子中放出一个快速飞行的电子，这个电子和 β 粒子一样，会使物质的原子电离或激发。X、 γ 射线的电离能力最弱，在空气中每厘米路程上平均只产生几个离子对，所以它的穿透本领最强，几百米的空气，也不能把它全部挡住，还会有百分之几的射线透射出来。屏蔽X、 γ 射线需要用几十厘米到几米厚的水层或混凝土墙，或者是几厘米到几十厘米厚的铁板或铅块。X、 γ 射线对人体的作用主要是外照射。

中子不带电，所以也不能直接使原子电离。快中子和物质的作用主要是和原子核碰撞而减速，经过多次碰撞最后变成热中子（即和物质的原子处于热平衡状态下的中子），然后热中子被原子核俘获，并放出能量不同的 γ 射线。当然，在快中子减速过程中，也可能与物质的原子核产生各种核反应（如从核中打出一个质子）而被吸收。轻的原子核容易使快中子减速，这好象我们用一个乒乓球分别和两个轻重不同球碰撞。乒乓球和重的钢球相碰时，钢球几乎不动，乒乓球将会弹到一旁，继续运动，速度减小很少。而乒乓球和另一个

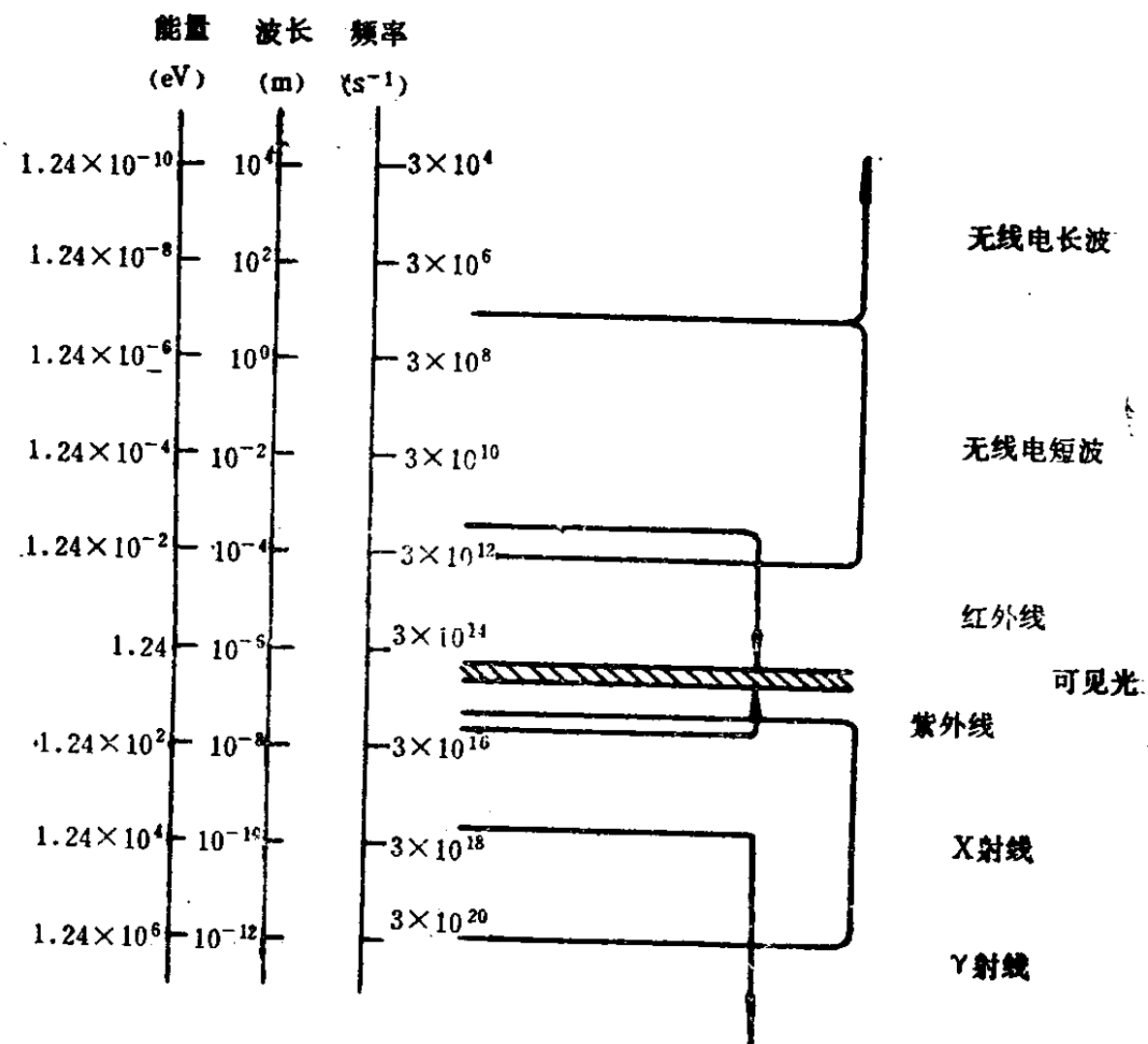


图 7 电磁波的波长及能量

乒乓球相撞，原来的乒乓球可以把全部或大部分能量传给另一个球，而自己停止或减速下来。有人作过计算，能量为2兆电子伏特的快中子，平均和氢核碰撞18次就可减速为热中子，和氧核要碰撞150次才能变成热中子，而和铀核则要碰撞2172次才行。所以，要想挡住快中子，最好用轻物质。但是，热中子在被俘获后又会放出γ射线，而屏蔽γ射线，最好用重物质。由于这些情况，所以防护中子常用钢、水夹层屏蔽或用混凝土屏蔽。快中子与机体的作用，主要是从碳氢化合物中把氢核（即质子）打出去。质子的质量和电荷都和α粒子同属一量级，所以它和α粒子一样，会使物质的原子电