

医用放射物理学

〔加拿大〕H. E. 庄士著

医用放射物理学

〔加拿大〕H. E. 庄 士 著

王金善 石关荣 朱世亮 刘泰福 祝軼白 合译

上海科学技术出版社

THE PHYSICS OF RADIOLOGY

Harold Elford Johns

Charles C Thomas, Publisher, 1961

医用放射物理学

王金善 石关荣 朱世亮 刘泰福 祝映白 合译

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/18 印张 30 12/18 插页 4 排版字数 722,000

1965 年 8 月第 1 版 1965 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—2,000

统一书号 14119·1201 定价(科七) 4.90 元

內 容 提 要

本书为“放射治疗物理学”原著的第二版，内容增加了放射诊断和同位素在诊断上应用的物理基础，因此改名为“医用放射物理学”。此外，对核物理学的基础、高能量治疗机、人体組織內的吸收剂量、旋轉治疗、放射防护及放射治疗的生物学原理等，都分章詳細討論。为了适应现代放射治疗的趋向，内容中比較強調吸收剂量的观点及高能量放射綫的应用，尤其是鈷⁶⁰外放射。

书中除用大量图表說明之外，又通过例題的計算来明确其論点的实际应用，可供放射科医师及放射学研究者参考。附录中所包括的資料，如深度剂量表、旋轉治疗剂量表、等剂量曲綫图、吸收系数等，亦都具有实用价值。

原 序

本书为1953年出版的《放射治疗物理学》之第二版，其内容經扩大，包括放射诊断学与同位素在诊断上的应用，因此改名为《放射物理学》。写作本书之目的在于使学生和医生对放射学的基本物理原理打下基础。书内有許多資料和概念对放射物理学家也是有用的。

本书内不討論基本电学与力学，因为在許多物理教科书中都可以找到这些内容。全书中主要着重在放射綫的光子能量观念，而不是它的波长观念。书中关于一束X射綫如何将其能量轉給組織的方法有詳細的敘述，并且強調了組織内的能量吸收观念。

全书中应用了以拉德(rad)为单位的能量吸收这个新观念，并且始終对伦琴和拉德加以区别。由詳細的計算題說明如何从伦琴照射剂量得到拉德吸收剂量。X射綫、鐳及同位素的剂量全部以拉德为基础来表示。

由于目前广泛应用超高压及同位素远距离照射机，本书也詳細地討論了这些高能量机。重点放在1~3百万电子伏特范围的放射綫，因为200千伏的放射綫将被高能量射綫所代替。书中有一章专题討論照射野結合临床应用，其中有許多图解說明鈷⁶⁰，铯¹³⁷及其他高能量放射綫的应用。此外还有一章专门关于旋轉治疗的討論。

因为目前所重視的是高能量放射綫，所以必須詳細敘述关于测量这类放射綫的困难。剂量計方面的詳細資料对放射物理学家亦可能有用。

鐳疗剂量学基本上是根据曼彻斯特方法，仅作了少許改变，使之能够以拉德表示剂量。

由于大家对放射危害很关心，因此对于放射防护作了詳細討論。有一章簡略介紹放射生物学这个正在发展的領域，而将重点放在細胞方面的放射生物学的最近成就。

为了提高本书的实用价值，另增添了一个内容丰富的附录。第一部分包括对放射物理学家有用的吸收系数及有关題目。第二部分为各种放射綫以不同焦点皮肤距离应用的圓形和矩形照射野的深度剂量数据及少数200千伏X射綫、铯¹³⁷和鈷⁶⁰的等剂量曲綫。(下略)

Harold E. Johns

目 录

第一章 物质的结构及放射 1

第一节	原子	1
第二节	原子核	1
第三节	基本粒子	4
第四节	核外结构	5
第五节	分子结构和键	7
第六节	原子的能级	8
第七节	核能级	9
第八节	电磁辐射	10
第九节	辐射的量子性	11
第十节	电磁谱	12
第十一节	能量的放射	13

第二章 X射线的产生及其性质 15

第一节	X射线管	15
第二节	简单的自整流X射线电路	16
第三节	阳极的结构	20
第四节	X射线诊断管	20
第五节	治疗管	23
第六节	用整流器的X射线电路	24
第七节	整流管与X射线管的比较	25
第八节	全波整流	27
第九节	Villard 倍压电路	28
第十节	X射线的产生	29
第十一节	电子相互作用	30
第十二节	标识放射	34
第十三节	连续放射或韧致放射	36
第十四节	X射线的角形分布	38

第三章 核物理学基础 41

第一节	天然放射性	41
第二节	人工放射性	41

第三节	质量和能量	42
第四节	质量与速度	44
第五节	衰变常数与半衰期	46
第六节	同位素图表	49
第七节	α 衰变	51
第八节	β 衰变	52
第九节	β 负衰变	53
第十节	β 正衰变	55
第十一节	电子俘获(K 俘获)	56
第十二节	γ 射线及内部转换	57
第十三节	同质异能跃迁	58
第十四节	放射性同位素所产生的能量 吸收	58
第十五节	衰变系	59
第十六节	核的裂变	60
第十七节	核的聚变	63
第十八节	放射性的量("强度")	64
第十九节	同位素的激活	64
第二十节	放射性的增长	67

第四章 高能量及远距离治疗机 69

第一节	引 言	69
第二节	回旋加速器	70
第三节	电子加速器	71
第四节	电子同步加速器	74
第五节	质子同步加速器	75
第六节	范德格喇夫发电机	76
第七节	共振变压器	77
第八节	直线加速器	78
第九节	核反应堆	79
第十节	同位素治疗机	84
第十一节	钴 ⁶⁰ 照射机	89
第十二节	铯照射机	91
第十三节	高能量治疗机的标准	92

第五章 放射綫的吸收.....95

第一节 能量的遞降.....95

第二节 表观直綫吸收系数.....96

第三节 α 射綫的吸收.....97

第四节 半价层.....99

第五节 质量、电子及原子的吸收系数.....100

第六节 光电吸收.....103

第七节 α 射綫的散射.....106

第八节 康普頓散射.....107

第九节 康普頓碰撞中所吸收及散射的能量.....107

第十节 电子偶的产生.....110

第十一节 总吸收系数.....112

第十二节 总眞实吸收系数.....114

第十三节 各种吸收的相对重要性.....114

第六章 放射綫的吸收(續).....118

第一节 引言.....118

第二节 光电效应.....118

第三节 湯姆遜散射.....118

第四节 康普頓散射(克萊因-仁科系数).....120

第五节 康普頓电子的能量分配.....124

第六节 电子偶及三重态系数.....126

第七节 电子偶产生中电子的能量分配.....128

第八节 不同过程的能量吸收.....129

第九节 相干与不相干散射.....130

第十节 多发性过程(事例经历).....131

第十一节 吸收系数表.....134

第七章 放射綫的測量(照射剂量,伦琴).....137

第一节 引言.....137

第二节 伦琴与拉德(rad).....137

第三节 伦琴.....139

第四节 标准电离室.....140

第五节 使用标准电离室的注意事項.....141

第六节 指形电离室.....145

第七节 电容电离室.....148

第八节 微絲靜电計(Victoreen 剂量仪).....153

第九节 电子管靜电計(Baldwin Farmer 靜电計).....155

第十节 积分剂量仪(Baldwin Farmer 次标准剂量仪).....157

第十一节 直流放大器.....159

第十二节 振簧靜电計.....161

第十三节 离子收集效率.....163

第十四节 监测器.....166

第十五节 測定照射剂量仪器的总结.....167

第十六节 α 射綫机的校准.....167

第十七节 总 結.....171

第八章 α 射綫的性质(半价层).....174

第一节 性 质.....174

第二节 半价层的測定.....174

第三节 滤 板.....177

第四节 等值电压与等值波长.....179

第五节 原发 α 射綫綫譜分布.....180

第六节 測量的原射綫的綫譜分布.....183

第七节 散射綫的綫譜分布.....184

第九章 吸收剂量.....190

第一节 引 言.....190

第二节 Bragg-Gray 学說.....190

第三节 阻止本领比率(S).....192

第三节 A 求得应用于 Bragg-Gray 公式的平均阻止本领比率的方法.....194

第四节 使用以伦琴校准的电离室确定 α 或 γ 射綫在組織或其他物质內的吸收剂量.....195

第五节 无校准的剂量計时确定吸收剂量的方法.....197

第六节 衰减校正.....198

第七节 电子平衡.....200

第八节 未达电子平衡时的吸收剂量.....203

第九节	高能放射线的吸收剂量测定	204
第十节	量热器	207
第十一节	吸收剂量计算方法的总结	208
第十章	X射线与散射媒质的相互作用	211
第一节	人体模型	211
第二节	表面反向散射的定义	211
第三节	表面反向散射的改变	213
第四节	百分深度剂量	218
第五节	深度剂量: 深度和光子能量的影响	219
第六节	深度剂量: 面积的影响	221
第七节	散射函数	223
第八节	深度剂量: 矩形照射野	225
第九节	深度剂量: 源皮距离的影响	228
第十节	深度剂量表	230
第十一节	等剂量曲线	232
第十二节	等剂量曲线的对比	234
第十三节	制作等剂量曲线的方法	239
第十四节	高能电子的深度剂量分布	242
第十五节	总结	243
第十一章	照射野在临床应用上的结合	248
第一节	引言	248
第二节	积分剂量	249
第三节	相对照射野	252
第四节	相对野的结合	254
第五节	斜野——内野	261
第六节	三野照射法	262
第七节	射线束定向	264
第八节	无填充物时的校正	268
第九节	特殊照射野	271
第十节	空间分布	274
第十一节	积分剂量	277
第十二节	全身放射	278
第十三节	治疗的计划和记录	280

第十二章	旋转治疗	283
第一节	旋转治疗的种类	283
第二节	肿瘤-空气比率	284
第三节	计算旋转治疗的肿瘤剂量	288
第四节	旋转等剂量分布	290
第五节	皮肤剂量	296
第六节	固定野与旋转治疗的比较	298
第七节	对人体不均匀性的肿瘤剂量校正	300
第八节	固定野治疗中的肿瘤剂量校正	302
第九节	旋转治疗中对人体不均匀性的校正	304
第十三章	生物体内的能量吸收	310
第一节	引言	310
第二节	每伦琴的能通量	310
第三节	γ 射线发射体的剂量率	313
第四节	生物体内的能量吸收	315
第五节	骨对深度剂量曲线的影响	317
第六节	骨髓内的能量吸收	321
第十四章	镭和镭疗剂量	327
第一节	引言	327
第二节	镭的放射系	327
第三节	放射平衡	328
第四节	镭及其放射性沉淀物的 γ 射线谱	329
第五节	镭和氢源的强度	330
第六节	镭源的构造和保管	330
第七节	镭和氢源的照射剂量率	333
第八节	发射剂量——氢的衰变	334
第九节	氢的生成及其放射性沉淀物	335
第十节	镭疗剂量	336
第十一节	表面施用器	336
第十二节	间质平面插植	340
第十三节	容积插植	342
第十四节	直线源	343
第十五节	镭插植法的放射摄影控制	347
第十六节	计算镭疗剂量的临床例题	350

第十七节	鐳的等剂量曲线	357
第十八节	子宫癌	358
第十九节	应用人工同位素的治疗方法	360
第二十节	β 射线施用器	365
第二十一节	总 结	367

第十五章 同位素的临床应用371

第一节	引 言	371
第二节	盖革计数器	371
第三节	闪烁计数器	375
第四节	同位素计数的统计学	378
第五节	定标器和效率表	381
第六节	分辨时间与计数遗漏	383
第七节	同位素在诊断上的应用	384
第八节	同位素扫描	387
第九节	内用同位素的剂量学	393
第十节	在诊断操作中所照射的剂量	399

第十六章 放射诊断的物理学原理403

第一节	引 言	403
第二节	放射诊断的胶片	404
第三节	增感屏	408
第四节	滤线器	412
第五节	对比度和密度的控制	415
第六节	影响X射线影像的因素	418
第七节	荧光透视	419
第八节	影像亮度增强器	423
第九节	荧光摄影	425
第十节	特种技术	426
第十一节	放射诊断中的病人剂量	428

第十七章 放射防护436

第一节	引 言	436
第二节	本底放射	436

第三节	放射生物当量	437
第四节	防护规则	438
第五节	防护障壁	440
第六节	对X射线机原射线防护障壁的 计算	444
第七节	同位素治疗机的防护障壁	446
第八节	对散射线的防护	447
第九节	对漏出射线的防护	449
第十节	典型的防护要求	451
第十一节	对小量镭、钴及铀源的放射 线的防护	451
第十二节	对摄入同位素的防护	452
第十三节	放射鉴定	455
第十四节	在放射性同位素部门的防护	456
第十五节	对工作人员的监视性测量	457

第十八章 放射生物学459

第一节	引 言	459
第二节	带电粒子的历程	460
第三节	即时的放射化学效应	463
第四节	生存曲线	466
第五节	靶学说	470
第六节	氧效应	472
第七节	细胞放射伤害后的征象	474
第八节	全身效应	477
第九节	皮肤的放射效应	479
第十节	肿瘤组织及正常组织	480
第十一节	分割照射法	481
第十二节	影响治疗比率的因素	483
第十三节	结 论	485

附 录489

附录A	489
附录B	489

第一章 物质的結構及放射

第一节 原 子

所有物质均由原子組成。在写作本书时已知有 101 种原子(譯者按:目前已知有 103 种)。每一原子均由核及电子所組成,其核小而紧密,半径約为 10^{-12} 厘米。核周围是按軌道运动的电子云,电子在半径約 10^{-8} 厘米的一些軌道上运行。与核相比,电子的质量很小,但是由于它們的弥散性,所以占据着很大的空間。也就这样决定着原子的大小。一群原子由少数紧密的点(核)組成,而其余被电子所占据的空間实际上是空虚的。可以用这样的譬喻來說明:假如一个原子扩大到“占据”一个房間那么大,則其核处于房間的中心而据有針尖那么大的一点空間。由于所謂固体物质的这种空虚性,因此一个高能电子或原子核可很容易地穿过許多原子后才与一原子的任何部分相碰撞。

原子間的差別在于它們核的結構和电子数量及其排列上的不同。原子中的电子数被指称为原子序数,以 Z 代表之。 Z 值从最简单原子(氢)的 1 起到迄今已发现的最复杂原子的 101(鐳)止(譯者按:目前已发现的还有 102 鐳和 103 鐳)。原子的化学性质由其原子序数所决定。现将輕原子类中的几个原子列举于表 I-1 中。表中第一列为元素,第二列是代表元素的符号,第三列为原子序数 Z 。要了解此表的其余部分,必須先探索核的結構。

表 I-1 若干輕元素的原子序数、原子量及质量数

元 素	符 号	原 子 序 数 (Z)	原 子 量 (A)	稳定同位素的质量数 (A)	不稳定同位素的质量数 (A)
氢	H	1	1.0080	1, 2	3
氦	He	2	4.003	3, 4	5, 6
锂	Li	3	6.940	6, 7	5, 8, 9
鈹	Be	4	9.02	9	7, 8, 10
硼	B	5	10.82	10, 11	8, 9, 12
碳	C	6	12.010	12, 13	10, 11, 14, 15
氮	N	7	14.008	14, 15	12, 13, 16, 17
氧	O	8	16.0000	16, 17, 18	14, 15, 19

第二节 原 子 核

核被高速粒子轰击时,能裂变为其組成部分。当发生碎裂时,显示出核内有二种

重要的基本粒子——质子和中子。它们都可称为核子。质子带有正电荷，其大小与电子所带的电荷相等，可是符号相反，而中子没有电荷。质子与中子的质量差不多相等，它是电子质量的 1900 倍。因为整个原子是电性中和的，所以核外有一个电子在核内必定有一个质子与之相应。原子序数 Z 是核内质子数，同样也就是核外的电子数。

原子的质量数是核内质子和中子的总数。质量数通常以符号 A 代表之。精密的物理测量已证明大多数纯元素是由许多具有相同的核外结构但核质量不同的原子类相混合而成的；就是说，有不同的质量数。由具有相同的质子数而中子数不同的核所组成的原子，叫做同位素。由于同位素有同样多的电子数，所以它们具有相同的化学性质，相互间不能用化学方法来分离。由于它们有不同的质量，故而有可能用物理仪器如质谱仪将它们分离。此仪器的作用是取决于核的质量的。

同位素可以是稳定的，也可以是不稳定的。不稳定的同位素系由质子数与中子数不平衡的核所组成。这种不平衡的状况终将导致一个粒子被逐出，从而使核由一种形式改变为另一种型式。逐出这样的粒子的过程就称为蜕变，而核会不断地逐出粒子，直到成为一稳定的同位素为止。周期表中头几个元素的少数稳定和同位素列举于表 I-1 中，我们看到氢有二个稳定的同位素和一个不稳定的同位素。它们的质量数是 1, 2 和 3。氦有二个稳定的同位素，质量数是 3 和 4。还有二个不稳定的同位素，质量数是 5 和 6。锂有二个稳定的和三个不稳定的同位素，前者的质量数是 6 和 7，后者是 5, 8 和 9。

质量数 A (列举于表 I-1 中) 表示核中粒子数。原子质量是以氧的同位素之一的质量(质量数 16)为标准来确定的，后者之数值被任意地指定为 16.00000。因为这个同位素有 16 个粒子(8 个质子和 8 个中子)，而质子与中子的质量又几乎相等，所以每个粒子的质量在这样一种标度上几乎是 1。这意味着所有原子质量趋近于整数，并等于质量数。例如，氢的二个同位素的原子质量是 1.008145 和 2.014740，它们很接近于质量数 1 和 2。原子质量不能把它的质量组成部分的质量加起来计算。例如，重氢的原子质量是 2.014740，就稍少于其组成部分质量的总和 2.017131。在所有情况下，整个核的质量总是少于其组成部分的质量总和。此差数愈大，核的稳定性也就愈大。有关此稳定性的计算将于第三章中进行。

用于化学上并以 A 表示的原子量，是以氧的三个同位素(质量数 16, 17, 18)混合体的质量 as 标准的，它正是 16.00000。因此，物理标度和化学标度就少许有差异，化学标度上的重量在 10,000 份中大约要小 2.7 份。在大多数情况下，化学上的原子量几乎是整数，因为通常是一种同位素远较其他任何一种为丰富。例如，自然界中之氢是以质量数 1 (99.985%) 和质量数 2 (0.015%) 的混合物形式而存在的，其原子量在物理标度上是 1.0083，而在化学标度上是 1.0080。硼则是质量数 10 和 11 的同位素以 18.8% 和 81.2% 的比例相混合而成，其原子量就不接近整数(10.82)。在表 I-1 的第四行中列举着化学标度的几个原子量。

现在将就几个重要的同位素予以较详尽的讨论。

氢的同位素

氢的同位素已知者有三种,以 ${}_1\text{H}^1$ 、 ${}_1\text{H}^2$ 和 ${}_1\text{H}^3$ 代表之。化学符号前下方的注号指 Z , 即核内的质子数。化学符号后上方的注号指出质量数 A , 就是核内的粒子数。这些同位素的若干性质列举于表 1-2 中。

表 1-2 氢及氧的同位素

元 素 符 号	质 子 数	中 子 数	质 量 数 (A)	性 质	核 名 称	相应原子的 名称
氢 $Z=1$ $\begin{cases} {}_1\text{H}^1 \\ {}_1\text{H}^2 \\ {}_1\text{H}^3 \end{cases}$	1	0	1	稳 定	质 子	氢
	1	1	2	稳 定	氘 核	氘(重氢)
	1	2	3	放 射 性	氚 核	氚
氧 $Z=2$ $\begin{cases} {}_2\text{He}^3 \\ {}_2\text{He}^4 \\ {}_2\text{He}^5 \\ {}_2\text{He}^6 \end{cases}$	2	1	3	稳 定	α	
	2	2	4	稳 定		
	2	3	5	放 射 性		
	2	4	6	放 射 性		

含有一个质子与一个中子的 ${}_1\text{H}^2$ 核, 在核蜕变实验中是很重要的。它被指称为氘核。由一氘核和一电子所组成的原子叫做重氢或氘。 ${}_1\text{H}^1$ 和 ${}_1\text{H}^2$ 是稳定的, 以 99.985% 和 0.015% 的相对比例混合而存在于自然界中。 ${}_1\text{H}^3$ 叫做氚, 它具有放射性, 并且要转变为一种氢的同位素。

氧的同位素

氧有四种已知的同位素, ${}_2\text{He}^3$, ${}_2\text{He}^4$, ${}_2\text{He}^5$ 和 ${}_2\text{He}^6$, 头二个是稳定的, 而后二个是有放射性的。 ${}_2\text{He}^4$ 是氧的主要组成部分, 在核蜕变实验中是被广泛应用的, 它称为 α 粒子, ${}_2\text{He}^5$ 和 ${}_2\text{He}^6$ 蜕变为锂的同位素。如前所述, 元素符号左下方的数字表示原子序数, 右上方的数字指质量数。

磷的同位素 ${}_{15}\text{P}^{28}$, ${}_{15}\text{P}^{29}$, ${}_{15}\text{P}^{30}$, ${}_{15}\text{P}^{31}$, ${}_{15}\text{P}^{32}$, ${}_{15}\text{P}^{33}$, ${}_{15}\text{P}^{34}$ 。

${}_{15}\text{P}^{31}$ 是磷的唯一稳定的同位素, 其核含有 15 个质子和 16 个中子。其他的同位素都是放射性的。 ${}_{15}\text{P}^{32}$ 已广泛地应用于诊断与治疗。

钴的同位素 ${}_{27}\text{Co}^{54}$, ${}_{27}\text{Co}^{55}$, ${}_{27}\text{Co}^{56}$, ${}_{27}\text{Co}^{57}$, ${}_{27}\text{Co}^{58}$, ${}_{27}\text{Co}^{59}$, ${}_{27}\text{Co}^{60}$, ${}_{27}\text{Co}^{61}$, ${}_{27}\text{Co}^{62}$ 。

${}_{27}\text{Co}^{59}$ 是钴的同位素中唯一稳定的同位素, 它含有 27 个质子和 32 个中子。其余的同位素通过种种不同方式而蜕变成铁和镍的同位素, ${}_{27}\text{Co}^{60}$ 在射线束治疗机中已代替了镅作为 γ 射线放射源。

通常, 随着原子序数的增大, 已知的同位素及稳定的同位素的数目就随着增多。例如, 自然界存在之锡系由 10 个稳定同位素混合而成。至少有 13 个锡的放射性同位素已被发现。

有同样质量数 (A) 但原子序数 (Z) 不同的元素叫做同量异位素。 ${}_{26}\text{Fe}^{57}$ 和 ${}_{27}\text{Co}^{57}$ 是质量数为 57 的同量异位素。因为它们有不同的核外电子数, 因此有不同的化学性质, 所以能用化学方法使之分离。关于核的更进一步的细节将于第三章中讨论之。

第三节 基本粒子

在上一节中,我们看到核是由质子和中子组成的。然而在核蜕变的实验中,已发现了一些其他的“粒子”,这些“粒子”在表 I-3 中已简单地予以描述。从放射生物学观点来看,列举于表的第一部分者是重要的粒子,粒子的质量是以氧原子(质量数16)为标准而定的,后者的值被任意地指定为 16.0000。粒子的电荷是按质子的电荷为单位而定的,质子是 4.80×10^{-10} 静电单位^①。自从 1945 年以来,随着极大高能机器的发展,已发现许多新粒子,并且每年还在继续发现。这些粒子中的少数几个列举于表 I-3b 中。在表的这一部分中,质量是从电子的质量为单位而确定的,后者以 m_e 指示之。所有这些粒子都是不稳定的,都要按指出的方式而蜕变为他种形式。

表 I-3 基本粒子的性质

粒 子	质 量	电 荷	性 质
质 子 p	1.007597	+1	质子是氢原子的核,氢原子由核内 1 质子及核外 1 电子所组成。中性原子的质量是 $1.007597 + 0.000548 = 1.008145$ 质量单位。质子是所有原子核的基本粒子之一。
中 子 n	1.008986	0	中子是所有原子核的另一基本粒子。中子质量与质子质量几乎相等。因为中子是不带电荷之粒子,所以很难阻止它也不易发现。
电 子 e, e^- 或 β^-	0.000548	-1	电子质量与质子比较起来,非常小。自然界中电子甚多。任何一原子其核外均含有电子。电子易于发现。电子有时称为负电子(negatron)或 β 粒子,以 e, e^- 或 β^- 代表之。
正电子 e^+ 或 β^+	0.000548	+1	正电子质量与电子一样,但带正电荷。正电子只有当运动时才能存在于自然界中。运动缓慢或静止的正电子,立刻就与一个电子结合,以二条 γ 射线的形式产生放射(见下图),正电子以 e^+ 或 β^+ 代表之,称为 β 正粒子。
光 子 hn 或 γ 射线 γ	0	0	严格的说,光子并非粒子,只是以光速(3×10^{10} 厘米/秒,或 186,000 哩/每秒)运行的一束能量。在许多相互作用中,它的作用似粒子。第一章第八节及第一章第九节中将详细予以讨论,光子几乎可交换地称为量子或 γ 射线,以符号 hn 或 γ 代表之。
中微子 ν	少于电子质量的 1/2000	0	中微子是极小的粒子,实际上无质量,无电荷。因此,在实验上一向很难察觉。近来已观察到它与质子按下式相互作用而形成中子及正电子 $\nu + p \rightarrow n + \beta^+$ 中微子原来是从理论见解出发而引用进来的,以帮助解释 β 衰变(第三章)。

^① 电荷之静电单位(esu)系二个这样的电荷相距 1 厘米时,将以 1 达因的力互相排斥。达因的重量约为 1/980 克。

表 I-8b

Mu 介子			Mu 介子既可带正电荷,也可带负电荷,质量是电子质量的207倍。它們是由于高能粒子与物质相互作用而間接产生的。它們不稳定,且按下式自发地蜕变为电子与中微子
μ^+	207 m_0	+1	$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu$
μ^-	207 m_0	-1	$\mu^- \rightarrow e^- + 2\nu$
Pi 介子			粒子的平均寿命是 2.15×10^{-8} 秒。
π^+	273 m_0	+1	Pi 介子可带一正电荷,可带一负电荷,也可为中性。它們是高能量子或光子轰击物质时产生的。带电的 π 介子按下式蜕变为 μ 介子与中微子
π^-	273 m_0	-1	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
π^0	265 m_0	0	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$
			平均寿命是 2.5×10^{-8} 秒。电中性介子蜕变为二光子
			$\pi^0 \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$
			平均寿命 10^{-15} 秒。
K 介子	約1000 m_0	± 1 或 0	这些介子蜕变为 μ 介子及 π 介子。
超介子	約2000 m_0	± 1 或 0	这些介子蜕变为质子及 π 介子。
反质子	与质子质量同	-1	反质子质量与质子相同,但带负电,其寿命很短,因为它与质子相互作用而湮没。很可能,在宇宙中某些地方,存在着由反质子、中子和正电子所組成的原子,而同我們这里原子是由质子、中子和电子組成的体系相类似。

第四节 核 外 结 构

討論X射綫和它們对原子的作用时,我們要了解原子的核外结构,那就是象行星样的电子在核外的布置情况。

氢是最简单的原子,它是由原子核及繞核旋轉的一个电子所組成的(图 I-1)。核以其正电荷吸引带负电荷的电子,并且使它約束在一定的軌道上运动,犹如地球环繞太阳运行一样。所有氢的同位素不管它核內粒子数是多少,都有这样外围电子的简单布置。氢是其次一个最简单的原子,它有二个电子,在同一軌道上运行,但自旋的方向相反(图 I-1)。这种电子构型是很稳定的,因此不可能使氢与其他物质相互发生化学作用。氢的化学活性就由于它要再获得 1 个电子以达到氢的强力稳定性。

鋰有三个电子(图 I-1)。第三个电子必須在第一軌道外面的一个軌道上,因为內层軌道上的二个电子已完全充滿此一軌道或壳层。其理由在本討論中是不明显的,但可从量子力学理論和 Pauli 的不相容原理(Pauli exclusion principle) 而得到闡明。最內的軌道或者壳层指称为 K 层,这是原先在 X 射綫研究中提出的术语。其次各层,依次为 L, M, N 层等等。因为鋰有三个电子,第三个电子是单独的处于 L 层上,致使鋰有很大的化学活性。一般說,原子的最外层軌道如完全被电子填满,則就具有最大的稳定性。如不被填满,則它就有和任何能供应其額外电子的元素相互作用的傾向。反之,如具有过剩的电子,則就要与任何能带走此过剩电子的元素起反应。

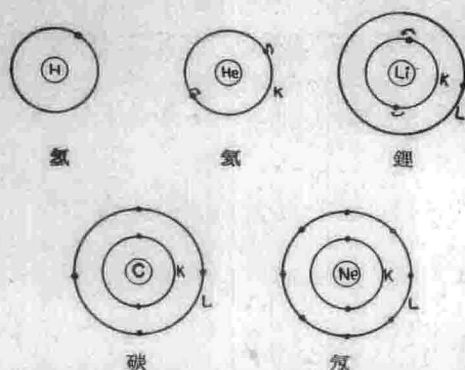


图 I-1 表示氢、氦、锂、碳及氖的电子结构的示意图

周期表中 Z 值由低而高时, L 层逐渐地被电子填满而成氦 ($Z=2$), 它有二个电子在 L 层上; 其次是硼 ($Z=5$), 有三个电子。再次是碳 ($Z=6$) 有四个电子, 氮 ($Z=7$) 有五个电子, 氧 ($Z=8$) 有六个电子, 氟 ($Z=9$) 有七个电子, 最后是氖 ($Z=10$) 有八个电子。 L 层不再能容纳更多的电子。图 I-1 为碳和氖原子核外结构的简图。

氟由于其外层轨道已填满之故, 是一种惰性气体, 不能使之发生化学作用。可是碳由于它能放走四个电子或取得四个电子而趋于稳定, 故能形成许多化合物, 氧还差二个电子才能填满外层轨道, 它将“试图”获得二个电子。碳和氧结合而成 CO_2 , 在此情况下, 碳和二氧原子共享四个外层电子, 如图 I-3 所示。氟只差一个电子就可填满外层轨道, 故非常活泼。钠 ($Z=11$) 由填满的 K 层和 L 层及只有一个电子的 M 层形成, 因之可与任何能摄取一个电子的原子相互作用。所以钠和氟会发生反应而形成稳定的化合物, 氟在结构上与氖相似, 其 M 层上有一空穴, 能与钠结合, 如图 I-2 所示。

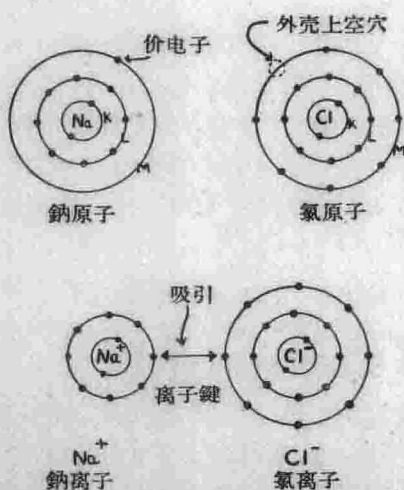


图 I-2 说明钠及氯的原子结构。当钠及氯放置在一起时, 钠的单价电子就转移到氯原子上去, 填补其 M 层上的空穴, 从而形成正钠离子及负氯离子。此诸离子借静电吸引作用而保持在一起, 此键称为离子键。

Z之数值逐渐增大,核外结构就愈来愈复杂化,M层被填满,而后N层,余可类推。当达到满壳层时化学性质会再度重现。例如氢,氦,锂,铍等等,当每一壳层被填满后就相继出现。同样,碱性元素铷,钠,钾等等,当最外层上仅有一电子时会相继出现。通常化学性质和化合价决定于其最外层未填满轨道上的电子数。

第五节 分子结构和键

原子结合而成分子,可用原子的电子结构来解释。原子凭借它们共有外层的价电子而结合成分子,因而这些原子的外层轨道就倾向于被填满。原子凭借三种重要类型的键而结合在一起,形成分子;就是离子键,共价键和氢键。离子键在图 I-2 中说明。钠将其M层上的单个电子永久地给予氯,后者在其M层上有单个空穴。这样一来,钠就成为正离子(Na^+),而氯成为负离子(Cl^-)。这意味着由于少了一个电子,而带电的钠原子与外层轨道上有一个单电子的电荷中性的钠原子相比,它是处于较为优越的状态。固态的氯化钠是由离子点阵组成的。此点阵是正钠离子和负氯离子配置成有规则的立方结构,且以其正负离子的静电吸引而互相结合。此种形式的键叫做离子键。如将 NaCl 放在水中,则二种离子间的吸引力就为水所减弱,钠离子和氯离子自由地通过溶液,使此溶液成为氯化钠溶液,并成为一个导体。

共价键在图 I-3 中说明,它将二个氢原子和一个氧原子保持在一起而形成水。a 和 b 二电子可认为是被氧和氢所共有。此二电子中的任何一个,以一段时间围绕氢核运行,另一段时间围绕氧核运行。凭借此种共有机制,氧和氢就都有了填满的轨道。

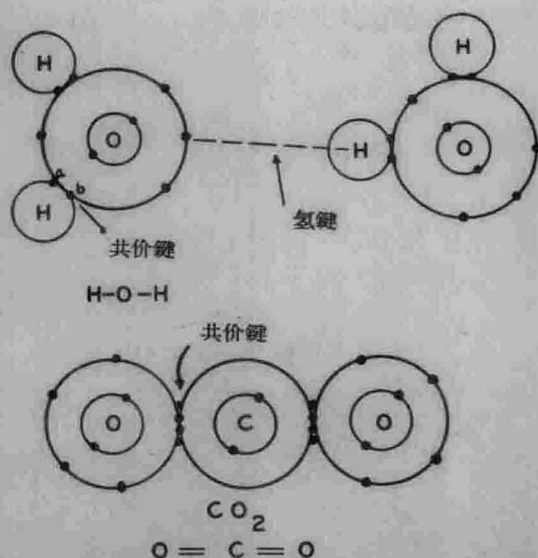


图 I-3 说明二个氢原子和一个氧原子结合而成水分子,水分子借氢键而连结的情形。图的下一部分描绘 CO_2 的结构。在此,碳与每个氧原子共有着二对电子,此为双共价键的例子。

道,而此种共有机制就形成了吸引力或者键,这就叫做共价键。在这一情况下,每一氢原子和氧原子共有一对电子,而氧原子和分子就以 $H-O-H$ 表示,其中每一根线指示共有一对电子。 CO_2 分子以类似的方式形成,只是碳原子与每一氧原子共有二对电子,其分子以 $O=C=O$ 表示。双线指示共有着二对电子的共价键。在这些化合物中,氢有一价,因此划一根线,氧二价,划二根线,碳四价,划四根线。每一根线表示共有一对电子。

第三种键叫氢键,在图 I-3 中说明。氢和氧间共有的二电子 a 和 b,在每一轨道上都要运行一部分时间,但是因为氧是负电性的,它倾向于吸引电子,所以绕氧运行的时间较多些,平均说来,氧稍带有负电荷,而氢稍带有正电荷。因此,一分子水中的氢要吸引另一分子水中的氧,此二个分子会被一弱键所保持在一起,这就叫做氢键。可以如此想象:一个氢原子被邻近的二个氧原子共有,此种共有过程组成氢键。因此,一个容器中的全部水分子可以看作是联合在一起而成为一个异常巨大的分子。类似的现象也见于氮化合物。蛋白质分子中兼含有许多氮和氧原子,这些长链状分子是被氢键联结在一起的。

第六节 原子的能级

虽然一个电子可被支配在一特定的轨道上,但是这种轨道的概念未免太简单化了。实际上,电子并不限于一个轨道上,它有处于任何地方的一定可能性。然而最

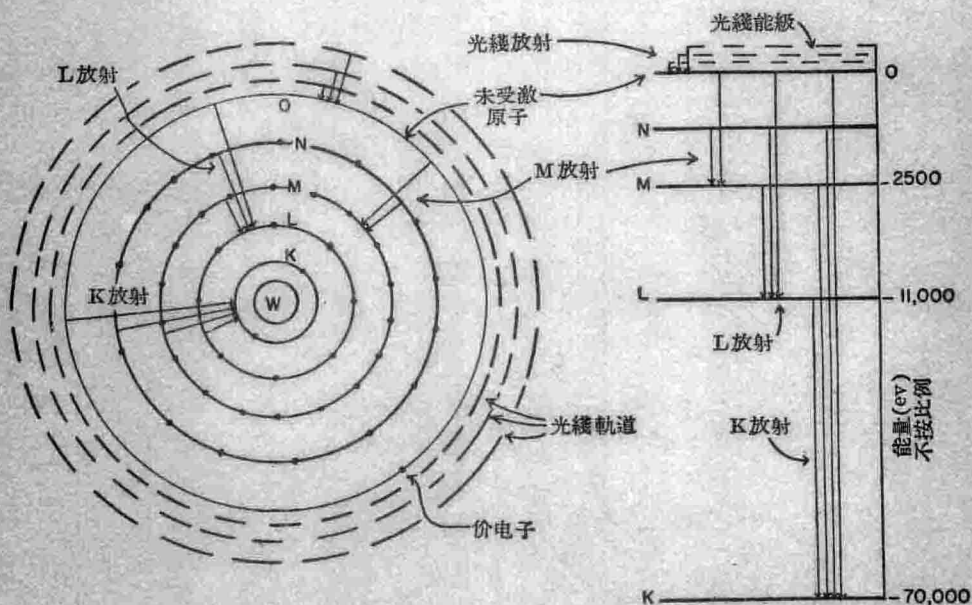


图 I-4 左侧是汞原子的电子轨道示意图,右侧示其能级。以 eV 数表示的能量标度并没有按比例。X射线通过电子向 K、L 及 M 层跃迁而引起。光线放射是由价电子从光线轨道向 O 层跃迁而引起的。