

放射生物学

(初 稿)

复 旦 大 学 出 版

1959. 12

放射生物學

(初稿)

生物系生物物理學教研組編

復旦大學出版

1959. 12

前 言

这份讲义是在我組 1958—1959 年開設“放射生物学”一課讲稿的基础上，加以适当修改和补充，主要是通过教师集体讲授，分章負責和师生結合的方式进行的。

最近通过总路綫反右傾的学习，大家深深的認識到应该为社会主义建設事业作出更多、更大的貢獻，同时我們也考虑到国内目前还缺乏一本这方面的比較系統、全面的教材，而实际上各方面的需求是很大的。因此，我組同志不揣冒昧，毅然决心把这一工作承担起来，經過大家同心协力的短期苦战，我們总算把这本不象样的东西呈现在讀者們的面前了。

但因限于我們的知識水平和赶付印時間，所以这本东西無論从其内容和形式上看，都是非常不成熟的，也正因为如此，所以这份讲义仅供各兄弟院校內部交流，与此同时，我們还竭誠希望讀者同志們提出批評指正，以供我們今后进一步修訂出版。

最后，还应当說明一点，即本讲义缺少輻射遺傳一章，这是因为我系遺傳教研組，不久将出版一冊“輻射遺傳学”专著，这对于讀者是很方便的，故本书不再另列这一章了。

生物物理教研組

1959 年 12 月

目 录

前 言

第一章 电离辐射的一般概念	1
第一节 各种电离辐射的物理特性	1
I. 带电粒子与物质的相互作用	1
1. β 射线(β -粒子)	2
2. α 射线	4
II. 不带电粒子的辐射	5
III. 电磁波辐射(γ 射线与X射线)	8
第二节 电离辐射引起的原子和分子的电离与激发	13
I. 光化学反应与辐射化学反应的源发与继发作用	14
II. 电离作用	16
III. 激发作用	29
1. 荧光与磷光	22
2. 化学反应	26
3. 内部转换过程	27
4. 分子间的碰撞作用	27
5. 电磁偶联作用	28
6. 电子的传递	28
IV. 电离与激发的原子与分子的能量转变	30
第三节 辐射的剂量与放射性的单位	35
I. 居里	35
II. 伦琴单位	35
III. 等能伦或物理伦琴当量	36
IV. 等效伦或人体伦琴当量	37
V. 照射强度	37
VI. 米伦小时	38
VII. 组织伦琴	38

第二章 水溶液的辐射化学	39
第一节 电离辐射的直接作用与间接作用	39
I. 稀释效应	40
II. 防护效应	42
III. 氧效应	43
IV. 温度效应	43
第二节 水的电离辐射的一般概念	46
第三节 电离水形成的各种活性产物的作用特性	52
I. OH^{\cdot} 自由基的反应特性	52
II. H^{\cdot} 自由基的反应特性	54
III. HO_2^{\cdot} 自由基的反应特性	58
IV. H_2O_2 与有机过氧化物的形成	60
第三章 电离辐射对高分子化合物的作用	65
第一节 辐射对人工合成的高分子化合物的作用	65
I. 对合成的高分子的直接作用	65
1. 交连作用与降解作用	65
2. 能量转移	67
II. 对合成高分子的间接作用	69
第二节 辐射对蛋白质分子的作用	71
I. 对蛋白质的作用	71
II. 对氨基酸的作用	76
第三节 辐射对酶与有关物质的作用	80
I. 对酶的作用	80
II. 对其他氧化还原物质的作用	85
第四节 辐射对核蛋白与核酸的作用	86
I. 对核蛋白的作用	86
II. 对核酸的作用	89

第五节 辐射对拟脂的作用.....	95
第四章 电离辐射生物学作用的原发机制.....	99
第一节 电离辐射对机体作用的基本特点.....	100
第二节 关于电离辐射生物学作用的原发机制的学说—— Barron 的链式学说.....	102
第三节 原发性的“毒素”学说.....	107
第四节 Тарусов 的自身加速链式反应理论.....	112
第五节 Кузин 关于原发作用加强的图示.....	121
I. 物理的加强途径.....	124
II. 化学的加强途径.....	129
III. 生物化学(生物学)的加强途径.....	132
第五章 电离辐射对机体代谢的影响.....	139
第一节 氧的消耗量与基础代谢.....	140
第二节 电离辐射对机体碳水化合物代谢的影响.....	142
I. 肝脏代谢功能的破坏.....	142
II. 糖酵解环的扰乱.....	144
III. 对植物碳水化合物代谢的影响.....	145
第三节 电离辐射对机体脂肪类代谢的影响.....	147
I. 有机过氧化物的产生.....	147
II. 脂肪类的吸收与转移.....	148
III. 肝脏内脂肪类的变化.....	152
第四节 矿物质代谢平衡的失调.....	153
I. 辐射引起动物各器官中金属元素含量的一些变化.....	153
II. 机体接受照射后引起体内电解质的转移.....	154
III. 酸硷平衡的变化.....	155
VI. 血液中矿物质质量的变化.....	155
V. 小结.....	155
第五节 电离辐射对氮素代谢的影响.....	156

I. 机体氦代谢异化过程的加强、合成作用的破坏	156
II. 对抗体形成的影响	164
第六节 电离辐射与核酸代谢	166
I. 組織核蛋白的变化	166
II. 核酸代谢对电离辐射的一般反应	168
1. 辐射处理与器官、組織中核酸含量的变化。DNA与 RNA反应的差异。	168
2. 电离辐射对核酸代谢的可逆的与不可逆的作用	169
III. DNA 及細胞核中去氧核糖核蛋白辐射处理后的效应	171
IV. 关于电离辐射影响核酸代谢作用的途径问题	177
1. 細胞組織生理状况与辐射效应	177
2. 机体中核酸的嘌呤碱及嘧啶碱类在辐射处理后的变化	179
3. 电离辐射与核酸代谢的體系	181
V. 結束語	183
第七节 电离辐射对酶系统的作用	184
I. 电离辐射影响下机体酶系统活性变化的特征	185
II. 个别酶活性变化的特点及其重要性	187
第六章 电离辐射对細胞的作用	191
第一节 电离辐射对細胞的一般影响	191
I. 对細胞分裂的影响	191
II. 对細胞生活力的影响	200
第二节 电离辐射对細胞形态及构造的作用	203
I. 对細胞核和細胞质的作用	203
II. 对染色体的作用	205
第三节 电离辐射引起細胞结构的紊乱与物质代谢的特异化	207
I. 辐射引起的細胞结构的紊乱	207
II. 辐射后的生化变化	209
1. 蛋白质代谢的改变	209
2. 对磷代谢的影响	211
3. 对微生物某些代谢产物的影响	212

III. 辐射对微生物机能变化的影响	213
1. 照射强度与微生物生存率的关系	213
2. 呼吸、发酵及磷酸化作用的变化	214
3. 电离辐射的氧效应	215
IV. 辐射的杀菌作用	216
第七章 电离辐射对多细胞有机体的作用	221
第一节 多细胞有机体对辐射反应的特征	221
I. 穿透性辐射与非穿透性辐射对抗体的影响	221
II. 原发反应与继发反应	222
III. 辐射的局部反应和全身反应的关系	226
IV. 辐射引起的全身反应途径	228
第二节 射线剂量与生物学效应间关系的规律	229
I. 照射剂量与死亡的关系	229
II. 有机体对辐射的敏感性	234
1. 种间(系统发育)敏感性	234
2. 个体发育中的敏感性	236
III. 辐射形式与生物学效应的关系	237
1. 剂量率	238
2. 一次照射与分次照射、急性与慢性照射的比较效应	238
IV. 各种射线的生物学效应的比较	240
第三节 各种因素对辐射效应的影响	244
I. 水的作用	244
II. 温度的作用	245
III. 氧气的的作用	245
VI. 化学物质的作用	247
第四节 辐射损伤的恢复过程	247
第八章 电离辐射对高等动物机体的影响	249
第一节 电离辐射作用于动物机体所引起的病理现象概述	249
第二节 电离辐射对高等动物各器官组织的影响	251
I. 皮肤	251

II. 骨与软骨组织	251
III. 感觉器官——眼	252
IV. 消化道	252
V. 呼吸系统	254
VI. 肾脏	254
VII. 内分泌器官	255
1. 肾上腺	255
2. 甲状腺	256
3. 脑下垂体	257
VIII. 生殖腺	258
第三节 电离辐射引起的血液变化	262
I. 急性放射病时的血液变化	263
1. 原发反应期的血液变化	263
2. 潜伏期血液成分的变化	264
3. 临床症状发展期的血液变化	265
4. 恢复期	267
II. 小剂量慢性作用下的血液变化	268
第四节 电离辐射对造血器官的作用	272
I. 骨髓内的变化	272
II. 淋巴器官	274
III. 脾脏	275
第五节 电离辐射对心脏血管系统的作用	276
I. 辐射对心脏活动的作用	276
II. 辐射对血压的影响	278
III. 血管通透性及毛细血管脆性的改变	278
第九章 电离辐射对神经系统的影响	283
第一节 穿透性辐射对神经系统的影响	284
I. 电离辐射所引起的神经系统形态学变化	284
II. 电离辐射对神经系统的生物化学和生物物理过程的影响	286
III. 电离辐射对神经系统不同部位生理机能的影响	287
1. 电离辐射对大脑皮层机能的影响	287

2. 电离辐射对皮下脑于各部位机能的影响	290
3. 电离辐射对脊髓机能的影响	291
4. 电离辐射对外周神经和感受器机能的影响	292
5. 电离辐射对植物性神经系统及其营养机能的影响	294
第二节 神经系统在机体对电离辐射反应过程中所起的作用	296
I. 神经系统在机体辐射反应过程中的作用	296
II. 神经系统的机能状态对于机体辐射反应的影响	298
第十章 放射病和免疫问题	301
第一节 辐射损伤的原因及其分类	301
I. 急性辐射损伤	301
II. 放射病的种类及其产生条件	302
III. 急性放射病的产生和一般规律	304
IV. 慢性放射病的产生与一般表现	306
V. 放射病的发病机制	307
第二节 辐射烧伤和放射病的临床诊断和治疗	308
I. 辐射烧伤的诊断和治疗	309
II. 急性放射病的临床诊断和治疗	310
III. 慢性放射病的临床诊断和治疗	312
第三节 电离辐射对机体免疫效应的影响	313
I. 电离辐射对机体天然免疫反应的影响	313
1. 感染与非感染因素在放射併发症中所起的作用	313
2. 电离辐射破坏机体天然免疫过程的途径	316
II. 电离辐射对机体人工免疫的影响	318
1. 电离辐射对抗体形成的影响	318
2. 电离辐射对抗体形成影响的机制	319
第十一章 放射性物质在机体内部的作用	323
第一节 放射性物质进入机体的途径	325
第二节 放射性物质在体内的分布问题	326
第三节 放射性物质在体内作用的特点	329

第四节	放射性物质的排除	332
第五节	某些放射性同位素在体内的作用	334
第十二章	电离辐射的防护	345
第一节	最大允许剂量	345
第二节	探测仪和警戒设备	349
第三节	辐射线的防护措施	350
I.	剂量的控制	350
II.	工作时间	350
III.	距离	351
IV.	屏蔽	351
第四节	电离辐射的化学物质防护	352
第五节	化学防护的药物种类及其防护作用	355
I.	含硫胺化合物	355
1.	半胱氨酸	355
2.	半胱胺	357
3.	谷胱甘肽	359
4.	胱胺	359
5.	硫脲	360
6.	巯氨基硫	361
II.	含氮化合物	362
1.	氨基酸及胺类	362
2.	其他含氮化合物	362
III.	氰化物	363
IV.	激素	364
V.	麻醉剂及生物硷	364
VI.	维生素	365
VII.	組織液	365
VIII.	抗生素	366
IX.	一氧化碳	366
参考文献		368

第一章 电离辐射的一般概念

电离辐射与其他射线(如紫外线,红外线与可见光等)的区别在于它具有更高的能量,当与物质起作用时并能引起物质的电离和激发。电离射线通常分为两类,一类称作粒子辐射,包括 α 粒子, β 粒子,质子与中子等,中子与前三种粒子辐射不同,它是不带电的粒子;另一类称作电磁波辐射包括X射线与 γ 射线,这一类的射线在本质上是与紫外线和可见光一样的,都是以光子(光子)形式发射的,只是它们具有更短的波长,因而能量也更大,它们的量子能量比紫外线的量子能量大 10^4 倍以上。

第一节 各种电离辐射的物理特性

I. 带电粒子与物质的相互作用

所有带电粒子,当通过物质与物质相互作用时都逐渐丧失其能量,由于在原子中电子几乎占据全部的体积,而核只占很少的体积,所以带电粒子基本上是与原子和分子中的电子相互作用。当带电粒子飞近原子的电子壳时,可以将原子或分子中的电子击出。原子或分子失去电子,本身则成为带电荷的阳离子,被打击出的电子又可被其他中性原子或分子所捕获,因而形成带负电的阴离子,从中性原子或分子形成离子的过程称之为电离作用,以方程式表示如下:



最初形成的 H_2O^+ 与电子称为一个离子对,所以每个电离动作都产生一个离子对,不同的电离辐射形成一个离子对所需的能量是不同的,一般来说需要几十个电子伏特(eV 或 eB) 所谓一个

电子伏特就是一个电子通过 1 个伏特电位差时所获得的能量,在空气中形成一个离子对则需要 32.5eV 的能量,由于在物质中形成一个离子对只需消耗极少量的能量,所以带有巨大能量的带电粒子,在它射程中可以形成大量的离子对,粒子能量愈大,在其射程中形成的离子对也就愈多。

各种性质不同但具有相同能量的带电粒子,在其射程中形成的离子对数目相同,可是电离密度则不同,所谓电离密度就是指粒子在物质中每行进一 cm 所形成的离子对的数目,电离密度又称之为电离比度,带电粒子的电荷愈大,运动速度愈小,电离密度也就愈大,因为一方面电荷愈大,则粒子可以有较多的电荷与原子或分子的电子起作用;另一方面由于带电粒子运动速度小,则带电粒子接近电子的时间也就愈长,与电子的相互作用也就愈强,因而在物质中单位行程上产生的电离也就愈多。带电粒子在物质中运动时,逐渐消耗其能量,运动速度也渐渐减低,所以电离密度往往随着粒子行进而增长,而在射程末达到最大值,完全吸收带电粒子的能量所需要的吸收物质的最小厚度称为这种粒子在该物质中的射程。

综上所述,带电粒子当其与物质相互作用时,它们是一小部分地逐渐消耗着自己的能量,而沿着它的射程形成大量的离子对,往往在射程末达到最大的电离密度。

1. β 射线(β 粒子)

β 粒子带负电,就是通称的阴电子,其质量约等于质子的 $\frac{1}{1840}$,所以 β 射线就是电子流, β 射线可以从加速器中产生,也可以从放射性同位素蜕变产生, β 射线在物质中穿透的距离决定于它的能,因为 β 射线与 α 射线不同, α 放射性元素发生 α 蜕变时,发射出来的 α 粒子都具有相同的能量,而当放射性元素的 β 蜕变时,则

同一元素的各个原子发射出来的 β 粒子能量是不相同的,可以从零到最大值, β 粒子所以具有这样的特点,有人说是因为当 β 蜕变时随 β 粒子发射出来的还有另一质点称之为中微子,在这种情况下, β 蜕变时从原子核释放的能量便由 β 粒子与中微子共分,由于它们的不均等的能量分布所以可以产生具有不同能量的 β 粒子。同一种放射性元素的核所发射的 β 粒子的平均能量的等于其最大能量的 $\frac{1}{3}$ 。

β 粒子在物质中的射程大约比具有同样能量的 α 粒子的射程大 100—200 倍, β 粒子在空气中的射程是以米来计算的,例如具有 2—3 MeV 的 β 粒子在空气中的射程可达 10—15 米, β 粒子在水中与在组织中的射程是相同的,往往是以毫米计的,例如具有 1.7 MeV P^{32} 的 β 粒子在组织中的射程可达 8 毫米。

(表 1-1) 不同能量的 β 粒子在各种不同物质中的射程。

能 量, MeV,	0.1	0.3	0.6	1.2	2.4	3.0
空 气 (cm)	13	80	200	500	1100	14500
水 (mm)	0.11	0.7	1.7	4.3	9.6	12.5
组织 (mm)	0.046	0.30	0.75	1.75	3.8	4.9

由于 β 粒子比同样能量的 α 粒子所带的电荷要少,而运动速度又较快,所以 β 粒子在其射程中所形成的平均电离密度要比 α 粒子小许多倍, α 粒子在空气中 1cm 射程内可形成几万个离子对,而 β 粒子只形成几十个离子对(50—100),同样理由也说明了 β 粒子的射程比同样能量的 α 粒子的射程要大的原因,因此 β 射线的特点是电离密度小穿透力大(相对 α 射线而言),当然具有不同能量的 β 射线其电离密度与穿透力也是不同的,正如前面已经指出过的,粒子能量愈少,射程也愈小,而电离密度则愈大, β 粒子的电离密度与射程以及与能量的关系列于表 1-2 中。

〔表 1-2〕

粒 子 能 量	在水中的能量消耗 (KeV μ)	电 离 密 度 (离子对/ μ)	水 中 的 射 程
0.1 KeV	33.23	1030	0.003 μ
1. KeV	13.33	380	0.05 μ
10. KeV	2.3	71	2.5 μ
100. KeV	0.42	13	141 μ
1 MeV	0.21	6.3	4.95 mm
3 MeV	0.20	6.3	16.3 mm

2. α 射 綫

α 射綫是带正电的粒子束,也就是氦核,它具有二个单位正电荷,重量比氦核(即质子)大约大4倍,它的质量比电子大7000倍, α 粒子是由少数放射性物质蜕变时产生,如从鐳的蜕变产物中得到的氡(Radan)与钋(Polonium),后者是纯粹的 α 射綫的放射物,前者蜕变时除放射出 α 射綫外,还放射出 β 射綫。

α 射綫具有很大的质量和很高的电荷,可是运动速度很低,粒子很易在物质中停滞。也就是说 α 粒子的电离能力很强而穿透力很弱。 α 粒子在空气中的射程只有几个厘米,而在组织中的射程只有几十个微米,所以一张厚纸也就可以对它进行防护了。可是 α 粒子的电离密度很大, α 粒子在空气中1 cm行程上可形成400,000个离子对,在动物体组织中的电离密度为每微米3000—4500离子对。也就是说 α 粒子在组织中的电离密度比在空气中大770倍,由此说明 α 粒子的能量是很高的,通常是2—8MeV, α 粒子与 β 粒子一样它的电离密度是随能量增大而减少的(见表1-3)对 α 射綫来讲在射程末段的电离密度要比射程起点大两倍。

〔表 1-3〕各种能量的 α 粒子的电离密度

元 素	粒子能量 MeV	每 1 mm 行程消耗 的能量 KeV	在空气中的电离密 度(离子对/1mm)
钍 210	5.3	90	2150
钋 212	5.5	88	2500
镭 A	5.95	82	2350

α 粒子在物质中的行程是直线的(β 射线则是曲折的), 所以由 α 粒子形成的离子是分布在以其行径为轴心的一个狭小的圆柱内, 圆柱的直径大约是 0.1 微米, 在许多情况下被 α 粒子打出的电子, 也能在圆柱外引起电离, 但是电离密度要比圆柱内小得多, 所以 α 粒子所产生的化学变化主要是在沿行径的圆柱内, 由于 α 射线的射程不大, 而离子又集中在行径上, 所以 α 射线造成损伤的范围是很小的, 当然在这个范围内损伤是严重的。

因此 α 射线做为外照射源来讲是不重要的, 因为衣服以及皮肤已足够全部吸收它的射线能量, 但是 α 射线如通过胃肠道或呼吸道进入体内形成内照射源, 情况就完全不同了。由于 α 粒子的十分强烈的电离密度, 可以导致对机体的伤害。

II. 不带电粒子的辐射

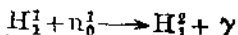
中子是具有一个原子的重量而不带电荷的质点, 由于中子不带电荷, 所以它不能在与带电粒子保持距离情况下与带电粒子相互作用, 而只有当与这些粒子相互发生直接碰撞时, 中子才能将它的能量转移给它们, 但是中子与电子撞击时并不能将能量转移给电子, 中子只有与原子核相撞时, 才能将能量转移给原子核, 中子是由原子核反应堆中产生的, 中子与物质的相互作用有下列四个途径:

弹性碰撞当中子与物质撞击时能从物质中打出一个核来, 这

个被打出的核称之为反冲核，这个带正电荷的核以很大的速度前进，因此在其行径上能使与其相遇的原子都发生电离，中子与粒子相互撞击时，遵守弹性球碰撞的原理，根据力学原理，当小球与一个质量很大的球相撞时，小球只失去一部分能量，如小球与一质量相等的球碰撞时，则小球发生最大的能量丧失，据此，当中子与氦粒——质子——相撞时，就会发生最大的能量丧失，因为中子与质子质量相等，这样的氦粒就称之为反冲质子，由于中子与质子撞击时要失去最大的能量，而与重核相撞时只失去一小部分能量，所以中子很易被许多轻元素物质（如水、石蜡等）吸收，但能自由地通过重元素物质（如铅），所以在实际工作中要减低中子流的强度，往往用水和石蜡就是这个道理，中子当其进行一系列碰撞的结果，能量就逐渐减低，当其能量减低到与气体分子的能量相等时，具有这样能量的中子则称之为热中子（或核中子）。

中子与物质相互作用的第二种形式就是非弹性碰撞，所谓非弹性碰撞即中子穿入核内，交出自己的一部分能量，使核处于激发状态，激发了的核把从中子获得的能量以一个或若干个 γ 量子的形式发射出来，随后进入核内的中子就带着较小的能量从核里飞出，这个反应的特点可以 (n, n) 表示，即打入的是中子，发射出的仍是中子，这种反应通常是快中子撞击在重元素时而产生的。

中子与物质的相互作用的第三种形式称之为辐射性夺取，这个过程是 (n, γ) ，即打入的是中子而放出的是 γ 射线，这个过程是热中子撞击任何重元素时而产生的，也就是说在撞击时，中子被核所吸收，被激发了的核以 γ 量子的形式放出其多余的能量，例如：



由于中子的照射而产生的放射性称之为诱发的放射性。