

辐射对活细胞的作用

D. E. 李 著

科学出版社

輻射对活細胞的作用

D. E. 李 著

徐浩 韓儀 合譯

科 学 出 版 社

1 9 6 2

第二版序言

这本书很久以来便已絕版了。在滿足对第二版的需要之时，认为最好使这本在放射生物学某些方面以大胆的方式表现的书以第一版的本来面貌再度出現，它在本书每一頁中都表现出Lea氏的透彻的思想与敏銳的推理。Lea氏在他自备的一本书上所作的文字修正，及某些增补也补入这一版中。这些增添即附录II，并在本文中附标星号(*)以引起讀者的注意。

作为一个物理学家 Lea氏敏銳地注意到作为細胞毒剂的电离輻射的特色，即沿着单一粒子径迹有密集的能量散逸，并且他特別注意探索这一事实对放射生物学的关系。甚至至少可回溯到1941年，在他的著作中便区分了这些概念到底能否应用的生物損害的类型，关于这一方面他在第三章的开头几段中清楚地加以討論。在他論述那些他相信是由于单一电离作用触发的生物学損害的类型时，他有远見認識和承認在一个分子内能量的吸收其散布距离为几个微米，并且承認圍繞生物結構的水相所吸收的能量的效应。

假如 Lea 还活着的話，无疑的这一版将以各种方式增訂，特别是会发展他的观念，即认为物理过程是在水溶液中产生化学变化的基础。

当各种类型的放射生物学损伤的产量逐一地做定量研究之时，便应该追查原发物理过程的量子性质在决定活細胞对輻射的反应中到底起什么作用(假如有这种作用的話)。这本书记录了这种探索如何为一个明快的思想联系于病毒的鈍化，基因的突变，及产生各种类型的染色体結構损伤。这样我相信不論我們在这些現象方面的知識超过 Lea 的时代有多么远，本书对于輻射学的从事者仍有不可磨灭的价值。

我很感謝 J. W. Boag 博士及 J. G. Neary 博士校正出了表

10 中的一个小錯誤, 以及修正 Lea 氏在附录 I 中所作的重迭因子 F_0 。

L. H. Gray

Mount Vernon 医院

Northwood

Middlesex

1954 年 5 月

第一版序言

我写作本书的意图在于阐述X射线及其他电离辐射对活细胞的某些最简单的及最基本的作用。我并不打算全面概述辐射的生物学效应。但是,我倒认为对已经充分了解的辐射作用的机制进行较详尽的讨论会有用处,因为这样的讨论在目前是有益的。

在开始几章里讨论了有关的电离辐射的物理性质和化学效应之后,本书的大部分是讨论辐射对病毒及对高等细胞的染色体和基因的效应。由于前几章的介绍因而能为读者所了解的基础上在最后一章里讨论了辐射对细胞的致死效应。

在写作本书的过程中困难之一是到底该设想读者具有怎样的训练背景。为了使本书在某种程度上能为所有各阶层的读者所接受,我以入门的形式写了物理的那一章,而在我叙述辐射的各种生物学作用之前,先行简单叙述一下有关的有机体的特性及处置的方法,似乎是有其优点的。虽则一般说来这些介绍性的章节是简短的,但我却觉得对辐射的遗传学效应作一较详尽的导引是有其好处的。遗传学家的专门用语是不为一般外行人士所充分理解的,因而很多研究辐射的生物学效应的工作者不能恰如其分地了解遗传学家对这个研究领域已做出的巨大贡献。

辐射对病毒、基因及染色体作用的研究已经到达这样一个阶段,目前的实验主要是定量水平的,因而其解释在某种程度上需要涉及基本数学。当进行这些数学解释时,我尽可能地使推导详尽,并列出行及图表以便实验者按照这一提示的路线解释其结果,而不需要用其他专门的数学工具。

在写作物理一章时,感觉到困难的是,采用适量的关于各种辐射下的组织中的电离的量及其空间分布的数据,这种数据在定量解释辐射的各种生物学作用时是永远都不可缺少的。第一章及附

录中的表是为本书而特殊计算出来的。虽则电离辐射通过物质所牵涉的能量散逸的物理原则已为人所理解，但象表中所列的那种数据还没有象期望中的那样为人们所精确地掌握。当然这些表在有更精确的数据时还是需要修正的。然而我希望这些表能对从事这个领域研究工作的人有所帮助。

假如在过去的十年中我在研究各种辐射的生物学效应中没有能够得到很多朋友和同事的协作时，我就不会有可能写作本书。我几乎不能适当地表达我对这些协作者的谢意。

D. E. L.

Strangeways 实验室

剑桥，1944年7月

目 录

第二版序言	xi
第一版序言	xiii
图版与插图目录	viii
第一章 各种射线的物理性质及剂量测量学	1
电离,激发及“点热”	1
紫外线	3
X射线	6
γ 射线	13
β 射线及阴极射线	17
α 射线	18
质子及中子	20
剂量测量	22
原发电离作用,射程及能量散逸	24
次级电离作用,离子群及 δ 射线	28
单位体积组织内电离粒子的数目及总射程	31
第二章 电离辐射的化学效应及生物学作用的可能机制	35
离子产量	35
气体反应	36
液体和固体	40
溶液	40
水的分解	41
水溶液中的间接作用	43
水溶液中的离子产量	46
水溶液中间接作用的化学机制	48
活性基的空间分布和再化合	49
水溶液中间接作用的动力学	53
二种溶质间的竞争;保护作用	55

在稀溶液中产量的减少,及用浓密的电离辐射	57
射线的直接和间接作用	60
輻射线生物学作用的可能型式	63
细胞的毒害	63
活化水反应	63
对大分子的直接作用	64
电离作用的局部性	64
靶的学说	65
电离效应的传播	65
第三章 靶的学说	67
一次电离型作用的認識	69
存活曲线的形状	69
时间-强度因子	75
对射线类型的依赖性	76
靶的体积与钝化剂量之间的关系	77
次级电离	83
多靶理论	87
α 射线和 γ 射线	89
一次电离的靶的学说的假設	90
简化模型的可用性	95
第四章 射线对病毒的钝化	97
病毒	97
病毒的体积	98
病毒活度的测定	101
病毒照射实验的技术	103
射线对病毒的直接和间接作用	105
病毒钝化是由于一次电离的証明	108
指数存活曲线	108
钝化剂量与强度无关	109
钝化剂量取决于射线的离子密度	110
病毒体积与钝化剂量的关系	112
病毒的状态	119

紫外綫对病毒的鈍化	120
第五章 輻射的遗传效应	122
遗传的机制	122
突变	127
基因的性質以及突变	128
染色体結構变化及位置效应	131
輻射产生的可見突变	134
果蝇的隱性致死突变	138
致死及染色体結構变化之間的关系	147
果蝇的显性致死	153
基因大小的推算	164
宇宙射綫及突变	171
紫外綫的遗传学效应	172
第六章 輻射引起的染色体結構的变化	179
实验材料	179
染色体結構的变化和生理学的变化	181
結構变化的类型	187
染色体断裂	189
染色单体断裂	191
等点断裂	191
染色体自体互換	194
染色单体自体互換	196
互換	196
互換和自体互換的相对頻率	200
断裂在染色体中的位置	203
頻率关系	205
修正因子	208
結構变化的产量对輻射强度的依存关系	213
产量与剂量的依存关系	216
不同波长和不同类型的电离輻射的相对效率	224
在鴨跖草中产生畸变的系数	227
紫外綫引起的結構变化	229

第七章 誘发染色体結構变化的机制.....	231
相信一个断裂是由单一电离粒子引起的理由	232
发生交换的諸断裂在断裂时相距的距离	234
在鴨跖草中再組的断裂的比例	237
鴨跖草畸变的产量与輻射时间的依存关系	246
不同輻射的相对效率	252
等点断裂	259
要点重述	261
第八章 分裂的延迟.....	264
緒論	264
海胆卵第一次卵裂的延迟	266
遭受延迟的分裂阶段	274
正在迅速分裂着的組織	275
細胞体积的增大	281
在引起分裂延迟中不同的輻射的相对效率	283
第九章 致死效应.....	286
分裂带来的死亡	286
分裂时死亡的原因	289
致死突变.....	291
病毒的鈍化	291
細菌的致死作用	295
以致死突变解释細菌的杀死	303
致死型的染色体結構的变化.....	306
黑果蝇	307
鴨跖草	309
大豆的根	312
染色体致死的生理学的变化	313
遗传性的部分不育性	315
要点重述及其应用于一些迅速地分裂的动物的組織	317
附录 I 計算补編.....	321
靶的学說的計算.....	328
沒有明显分界的靶.....	330

締合体积的計算	331
附录 II 本书的訂正和增补	339
突变	339
温度的影响	339
不同細胞中的突变产量	339
显性致死	340
染色体的結構损伤	341
断裂的位置	341
頻率关系	341
修正因子	341
不同阶段的敏感性	343
剂量关系	344
不同类型射綫的相对效率	345
断裂頻率的估計	346
G的另外的推导法	347
細菌	348
強度的效应	348
代謝扰动	349
参考文献	350
参考文献补編	371
名詞索引	373

注意：行文中的星号(*)指参阅附录 II。

图版与插图目录

图版

I. 各种辐射产生的电离作用的分布	11
II. 病毒	100
III. 染色体结构的变化	182
IV. 细菌;病毒;反常分裂图形	293

插图

1. 线性的和指数的剂量关系	38
2. 绝对产量与溶质浓度无关	45
3. 一个活性基与溶质分子每秒碰撞数	54
4. 在低溶质浓度时反应产量降低	58
5. 一次电离作用类型的实验数据作图的方法	70
6. 推测的存活曲线	74
7. “结合体积”计算方法图解	80
8. 以伦为单位的 37% 剂量与以毫微米为单位的靶直径之间的关系	85
9. 以伦为单位的 37% 剂量与分子量之间的关系	86
10. 一种射线 37% 剂量与 γ 射线 37% 剂量之比和靶直径的关系	87
11. 一种射线 37% 剂量与 X 射线 37% 剂量之比和靶的直径的关系	88
12. 没有明显分界的靶	94
13. 射线对植物病毒的钝化	104
14. 钝化剂量取决于蛋白质浓度	106
15. 受照射植物病毒的指数存活曲线	109
16. 受照射动物病毒的指数存活曲线	110

17. 受照射噬菌体的指数存活曲线	111
18. 病毒直径与 X 和 γ 射线钝化剂量的关系	114
19. 病毒直径与 α 射线钝化剂量的关系	116
20. 作为剂量函数的 X 射线诱致的可见突变的比例	137
21. X 射线诱致的伴性隐性致死突变的精子的百分数	139
22. 不同强度对伴性隐性致死的产量	141
23. 用不同射线诱致伴性隐性致死	142
24. 伴性隐性致死的分析	150
25. 受照射过的精子授精的卵的存活率	154
26. 具有染色体巨大结构改变的存活的精子的百分数	160
27. 作为剂量函数的显性致死百分数	160
28. 被照射雄蝇后代性比例的下降	163
29. 诱致突变时各种不同波长的紫外线相对效率	178
30. 在未纵裂的染色体中引起的结构变化	184
31. 在纵裂的染色体中引起的结构变化	185
32. 温度对辐射引起的染色体结构变化产量的影响	209
33. 一定的剂量在鸭跖草的小孢子中所产生的每个细胞 的畸变产量取决于照射的时间	214
34. 每个细胞的断裂数是剂量的函数	218
35. 2 个断裂畸变的产量是剂量的函数	219
36. 正常分裂数的百分率是剂量的函数	223
37. 紫外线引起的每 100 个核缺失产量是波长 2536 Å 的入射能量的函数	230
38. 恒定剂量的 X 射线对鸭跖草小孢子所产生的交换 产量随辐射时间的增加而下降	250
39. 染色体交换是剂量的函数	252
40. 粒子的离子密度和它经过染色单体时引起断裂的 机率之间假定的关系	254
41. 电子经过一个染色单体或经过姊妹染色单体的通路	257
42. 每伦的原发染色单体断裂数在软 X 射线范围内是	

波长的函数	257
43. X射线引起的点纹海胆的卵裂延迟	267
44. 在受精后的不同时间照射受精卵产生的卵裂延迟	268
45. 卵裂延迟是精子所受剂量的函数	269
46. 未受精的点纹海胆卵累积剂量的减少	271
47. 照射后不同时间的有丝分裂活度	276
48. 产生一定的分裂延迟所需的剂量的强度的关系	277
49. 分裂延迟的时间是剂量的函数	279
50. 大肠杆菌分裂的抑制	280
51. 大豆的根尖分裂的抑制	282
52. 有丝分裂数的减少是剂量的函数	284
53. 用恒定的 800 伦剂量于不同时期照射过的花粉的 萌发	287
54. 照射后不同时间分裂和退化的细胞数	288
55. 受照射的细菌的指数存活曲线	297
56. 存活曲线(理论的)	299
57. 用软 X 射线杀死大肠杆菌	302
58. 鸭跖草花粉粒染色体结构的变化与致死效应之间 的关系	311
59. 对称染色体互换引起的遗传性的部分不育性	315
60. 靶的计算图解	329
61. 不同电离密度的电离粒子的相对效率	330

· 第一章 各种射线的物理性质及剂量测量学

电离, 激发及“点热”

我們討論的射线是放射性物质的 α , β 及 γ 辐射, 及 X 射线, 质子及中子。这些可以总称为电离辐射。我們有时也涉及紫外线, 它是一种非电离辐射。由于电离一語將經常使用, 因此我們由解释其意义开始。一个原子由正价的核及围绕它的负价电子组成, 整个原子是中性的。电离辐射的能量散逸的主要方式是当辐射通过一个物体时碰出其通路中所遇到的原子的电子。这样的电离的原子成为正价, 此时称为离子。可能一些具有生物学上重要性的辐射的作用是由于这种电荷的分离, 但在更多的情况下更可能的却是由于电离作用引起的化学变化。因为当一个原子电离时, 则該原子所组成的分子几乎一定会引起化学变化。当人們知道将一个分子变成整体的化学键是由电子组成的, 且此键为所连接的两个原子所共有时, 可以預料到当除去分子中这种连接的电子时, 就会发生离解或其他的化学变化。当除去成键电子以外的电子时預料也可能会发生化学变化, 因为在离子化过程中所牵涉的能量在 10 个电子伏特¹⁾或 10 个以上, 这要看电离的原子及电子放出处所的能量水平超过由分子中移去一个原子所需的能量而定。

辐射在組織內散逸能量的第二种方法是激发。这是指将原子或分子內的电子提高到一个較高能量的水平, 它較之电子的完全

1) 电子伏特 (eV) = 1.602×10^{-19} 尔格, 这是一个其大小适用于单一原子或分子內的能量变化的单位。1 eMV (百万电子伏特) = 10^6 eV; 1 ekV (千电子伏特) = 10^3 eV。每分子 1 eV = 23.05 公斤-卡每克分子。例如說 C-H 键的解开的能量是 91 仟卡每克分子, 这就是說解开单键需要的能量約为千个电子伏特。

本书中之 eMV 通常写作 McV, 或譯为兆电子伏; ekV 通常写作 keV, 或譯为千电子伏——譯者注。

发射是稍为和缓的过程。紫外线正象电离辐射一样亦能引起激发，其效率并不亚于X射线所造成的离子化作用所引起的化学变化。然而有许多佐证表明对于分解大型的有机分子，激发较之电离效应差得多¹⁾。

不论电离辐射及紫外线的射线的生物学效应方面都有计量的数据，特别在病毒的钝化作用及细菌的致死当中尤其如此，但紫外线的激发较之电离作用效率低得多。因此当我们考虑电离辐射时，当与电离作用相比较便可以忽略作为一种生物效应因子的激发的作用。

在电离作用的过程中由一个原子放出的电子最后总会连到另一个原子上，因此使得别的原子成为负离子。当涉及电离作用的物理测量时，正及负离子是同等重要的，因此人们常常说产生所谓离子对。但是由于一个电子附着另一原子以形成负离子所牵涉的能量甚至较激发所牵涉的能量还小，因此似乎忽略负离子的形成作为一种生物学上重要的因子是无碍大局的。因此当我们提到电离作用时我们指放出电子而形成正离子。这些放出的电子在放出热能及最后附着到其他原子上以前可能有足够的能量进行电离化作用，而且这种次级电离作用是重要的并将在以后讨论。但是仍然是正离子而非负离子具有生物学重要性。

几乎一切辐射在组织中所散逸的能量最终都退降变为热能。例如 10^5 伦琴剂量的辐射足够使温度上升约 0.25°C 。大剂量辐射只引起小幅度的温度上升说明不宜于用温度变化来解释电离辐射的生物学效应，象短波无线电波那样，后者温度的上升是大部分生物学效应的原因。在另一方面看来，由于能量散逸具有高度的区域化的特性，因此最终能使整个组织温度上升 0.25°C 的能量，其实只局限于占比例颇小的原子上，因此可以认为使这些原子产生巨大的温度上升。这是所谓点热学说的基础²⁾。认为电离作用如一热点的观念不如认为原子电离后使得它所组成的分子发生化学变

1) 参见 Jordan, P. (1938a)。

2) Dessauer, F. (1923)。

化的观念那样令人满意。然而当电离及激发能量退降成热能之过程中，必须常常记住这种可能性，即某些靠近高密度电离区域的分子，虽则其本身并未电离，但仍遭受到化学变化¹⁾。

紫外綫

在定量的試驗中必須采用单色紫外綫，因为每个单位的能量的生物学有效性随着波长有很大变化，特別在 3000 Å 以上生物效应是极低的。能量的物理学測量常常以入射到被照射的物体上的每平方厘米的尔格数来計量。假如我們照射很小的物体象細菌或病毒，且在照射时能制备出一种不含有能吸收能量的杂质的非吸收性介質作成的悬液时，有一个令人满意的方法是用厚度相当深或浓度很高的攪拌着的悬液以便完全吸收入射的紫外綫。因此全部入射的能量或者可用被悬浮的微生物总数去除，或者可以用悬浮液中原生質的总量去除，所吸收的能量或以每个立方微米的尔格数表示。

在另外一种情况时，我們可以采用相当薄的一层照射材料，仅吸收入射的輻射的很小的一部分。假如我們知道被照射材料的吸收系数，或者更理想的是知道我們相信能发生生物学效应的那一部分的吸收系数，則我們便能計算出这一部分吸收的能量的值，它以每立方厘米的尔格数表示。假若 I 是以尔格/厘米² 为单位的入射强度， ρ 是以克/厘米³ 为单位的吸收性物質的密度，而 μ 是以厘米⁻¹ 为单位的吸收系数，其关系是：

$$\mu = \frac{1}{x} \log_e \frac{I_0}{I} = \frac{2.3}{x} \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

在这里 I 是穿过 x 厘米厚液层所发送的强度， I_0 是初始的强度，因此 μI 是以尔格/厘米³ 为单位的吸收的能量，而 $(\mu/\rho)I$ 是以尔格/克为单位的吸收的能量。假如不能避免过量吸收时(象我們在照射雄果蝇的精子时所遇到的那种情况)，这种情况或者是由于被照射材料过厚，或者是由于有其他干扰的組織，在这种情况下除非

1) Jordan, P. (1938c).