

放射生物学机制

第一卷

普通原理

科学出版社

统一书号: 13031·2351

定价: [科七] 2.40 元

本社书号: 3555·13-10

放射生物学机制

第一卷 普通原理

M. 埃列拉 A. 福斯白格 編

放射生物学翻译小组 译

科学出版社

1966

M. Errera and A. Forssberg (Ed.)
MECHANISMS IN RADIOBIOLOGY
VOL. I. GENERAL PRINCIPLES
Academic Press, 1961

內 容 簡 介

本书是瑞典、英、美等国放射生物学工作者合作执笔的专著。作者們搜集了有关放射生物学的文献,綜述了輻射作用的物理原理、靶子学說和生物分子的輻射效应,介绍了与生物学有关的放射化学和輻射的生物化学损伤,闡述了輻射对细胞和遺傳的效应,还介绍了以輻射诱发突变作为植物育种的方法。本书对于从事于放射生物学工作者、医学工作者、作物育种工作者有一定的参考价值。

放 射 生 物 学 机 制

第一卷 普通原理

〔比〕 M. 埃列拉 〔瑞典〕 A. 福斯伯格 編

放射生物学翻譯小組 译

*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 137 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1966 年 6 月 第一版

开本: 850×1168 1/32

1966 年 6 月第一次印刷

印张: 16 7/8

印数: 1-1,400

字数: 445,000

統一书号: 13031·2351

本社书号: 3555·13-10

定价: [科七] 2.40 元

序 言

自本世紀开始以来，在放射生物学的領域内进行了积极的研究工作。在早期，病理学者与物理学者們已經对其中許多基础方面加以重視，主要是与在医学中的 X 射綫疗法的应用，以及从而引起的在研究这些射綫的生物学作用上的需要有联系。H. G. Müller 的关于輻射可以誘发突变的发现，为正确而定量的研究开拓了一个新的領域。在第二次世界大战后不久，D. E. Lea 首先作了有成效的尝试，把放射生物学的知識汇合成为一幅内容广博的图景。

从那时起我們就看到了在放射物理学、化学和生物学方面的研究工作有了巨大的扩展，这种发展更由于原子能科学的迅速发展而得到进一步促进。在放射化学反应以及能量傳遞的机制等方面現在了解得清楚多了。各种用 α 粒子、中子等照射生物学单元的精确方法，也已对在各种細胞結構的效应上，以及基因的作用、細胞分裂和細胞分化的机制上，取得更为明确的概念。

放射生物学的发展是随着整个生物学的进展而并进的，在这方面已經积累了大量的資料，远非一人之力所能尽述。因此感到有必要依靠有經驗的科学家来集体写一部内容广泛的著作，作为学生們有用的手册，并作为对深入研究工作提供情报的一部参考书。

第一卷内容包括輻射效应的物理和化学各方面以及在活体和离体所产生的生化变化。对細胞效应的論述，特別着重在电子显微镜下所見到的細胞损伤。至于在游离活細胞上的輻射效应以及輻射遺傳学方面，主要是从作用的原理和机制的观点来論述的。在第二卷中，討論了輻射对主要是哺乳动物的胚胎和成年有机体的效应。有几章則专論在照射过的有机体中的免疫过程，保护剂

和敏化剂的作用的机制，以及促进照射过的哺乳动物复原的实验可能性。

編者深感难于把放射生物学及其有关的学科整个领域全都涉及。此外，在计划写本书的初期到最后写这篇序言之間的一段时间内，科学又有了迅速的进展。在过去几年中，順磁共振的测量技术已經发展到可以作为一种确定自由基的重要工具之用。有一些題目，例如細菌的遺傳和有关溶菌性的問題，都不包括在本书之內，因为在这方面有不少評述性的文章可查。其他还有一些更实用的問題，例如有关內部輻射源的問題，鉴于它們在性质上頗为专门，因此也只略予提及。

[比] M. 埃列拉 [瑞典] A. 福斯白格
1961 年 4 月于布魯塞尔及斯德哥尔摩

目 录

序 言	(iii)
第一章 第一部分 輻射作用的物理原理	
..... F. Hutchinson 和 E. Pollard	(1)
一、緒論	(1)
二、快速带电粒子	(5)
三、輻射剂量測定法	(37)
四、X 射綫和 γ 射綫	(44)
五、中子	(60)
六、輻射源	(65)
参考文献	(73)
第一章 第二部分 靶子学說和生物分子的輻射效应	
..... F. Hutchinson 和 E. Pollard	(78)
一、靶子学說	(78)
二、电离輻射对生物分子的直接效应	(91)
参考文献	(100)
第二章 放射化学	E. J. Hart 和 R. L. Platzman (103)
一、緒論	(103)
二、基本的过程	(108)
三、放射化学的概观	(137)
四、水的放射化学	(185)
五、无机物水溶液的放射化学	(212)
六、有机物水溶液的放射化学	(237)
参考文献	(263)
第三章 整体和离体的生物化学损伤	
..... M. G. Ord 和 L. A. Stocken	(276)

一、緒論	(276)
二、整體和離體條件下酶和輔酶的敏感性	(280)
三、糖代謝	(291)
四、三磷酸腺苷的產生	(301)
五、合成代謝過程	(305)
六、電解質分布和細胞通透性	(335)
七、晚期的生物化學影響	(337)
八、結論和摘要	(338)
九、補遺	(341)
參考文獻	(345)
第四章 細胞學上的效應	T. N. Tahmisian (359)
一、緒論	(359)
二、輻射對細胞核的作用	(360)
三、輻射對細胞質的作用	(366)
四、輻射損傷的生物學基礎	(377)
參考文獻	(378)
第五章 對亞細胞結構和自由生活的細胞的效應	T. Alper (381)
一、緒論	(381)
二、輻射的致死效應：概說	(382)
三、亞細胞結構的致死效應	(388)
四、在複製過程中的效應	(401)
五、電離輻射對細胞的致死和遺傳效應：輻射敏感性的改變	(408)
六、對於細胞的致死和遺傳效應的可能機制	(437)
參考文獻	(444)
第六章 輻射遺傳	S. Wolff (451)
一、緒論	(451)
二、遺傳效應的類型	(452)
三、慢中子的效應	(477)

四、宇宙綫和其他自然輻射誘发突变·····	(477)
五、靶子理論中的基因大小·····	(478)
六、显性致死·····	(478)
七、紫外綫輻射的遺傳效应·····	(481)
八、X 射綫誘致突变基因的改变·····	(484)
九、氧效应·····	(493)
十、多倍体对輻射誘发突变形成的影响·····	(499)
十一、結束語·····	(502)
参考文献·····	(503)
第七章 誘发突变作为植物育种的方法·····	
····· Å. Gustafsson	(509)
一、历史背景·····	(509)
二、自发突变可能性·····	(511)
三、誘变剂和突变过程·····	(513)
四、突变和生活力·····	(519)
五、提要 and 結論·····	(526)
参考文献·····	(527)

第一章 第一部分 輻射作用的物理原理

F. Hutchinson 和 E. Pollard

(耶魯大學 Josiah Willard Gibbs 研究所, 生物物理研究室)

目 次

一、緒論..... (1)	(二) X 和 γ 射線的射束的性質 (50)
二、快速帶電粒子..... (5)	(三) 在 X 或 γ 射束中能量釋 放的分布..... (54)
(一) 能量損耗率..... (5)	五、中子..... (60)
(二) 射程與能量的關係..... (18)	(一) 中子與物質間的相互作用 (60)
(三) 在徑迹中能量釋放的分布 (24)	(二) 在一束中子射束中組織所 受的劑量..... (63)
(四) 在帶電粒子射束中能量釋 放的分布..... (35)	六、輻射源..... (65)
三、輻射劑量測定法..... (37)	(一) 放射性同位素的性質..... (65)
(一) 電離法..... (37)	(二) 在放射性同位素中的輻射 過程..... (67)
(二) 能量吸收..... (39)	(三) 用作外輻照的放射性源..... (69)
(三) 各種輻射單位的比較..... (40)	(四) 用作內輻照的放射性源..... (70)
(四) 其他度量劑量的方法..... (42)	(五) 放射性自滅..... (73)
四、X 射線和 γ 射線..... (44)	參考文獻..... (73)
(一) 光子與物質間的基本相互 作用..... (44)	

一、緒 論

自從 1895 年 Roentgen 發現 X 射線, 1896 年 Becquerel 發現鈾的放射性這兩種主要的電離輻射來源以來, 到現在已有六十餘年。可是關於輻射的生物學作用的精確理論還沒有建立起來, 這是由於生命的形式及其過程的複雜性, 以及電離輻射本身的複雜性所致。

目前大體說來, 重要的輻射類型有五種: 快電子, 快正離子, 高

能电磁辐射,紫外綫(原子能范围的电磁辐射),以及中子。所有这五类辐射几乎都是由相互作用密切相联的,結果便出现了在表现上颇为复杂的一个物理系统,使得那些比较简单的方面隐而不显。

从放射生物学的观点来看,对辐射的看法实际上要比物理学家的看法来得简单些。有许多重要的过程在生物学作用上并不十分重要。因此在本章中我们企图突出那些对生物学家有最大价值的辐射作用部分,而不是去把全部有关辐射的材料加以总结。有不少其他总结性的文献^[1-10],各有其本身特殊的目的。

放射生物学的物理过程分在三个重要的宽广领域中。第一个涉及 X 射线和 γ 射线与物质间的相互作用的性质,其中包括从电磁辐射能量到快电子能量以及继续从快电子能量到在原子中电子能量的传递过程。第二个领域涉及紫外射线的作用和吸收的性质,其中包括在分子能级间相当细致的转移,以及结果所产生的还不能解释的吸收现象。第三个领域是在中子和原子核之间的相互作用,以及结果所产生的反冲原子核,原子核反应和电磁辐射的产物。随着宇宙航行的出现,有可能发展出第四个领域:即能量极大并多倍电离化的初级宇宙射线粒子的作用,这种粒子在宇宙空间的强度尚未分晓,而其生物学作用如何,有待于测定。

X 射线和 γ 射线的吸收过程在本世纪的整个时期中都有人继续不断地加以研究。在 Roentgen 的初次报导中,他描述了关于不同物质的透明度的细致研究工作结果,指出密度是确定 X 射线的贯穿性的主要因素,但不是个唯一的因素。早期的研究工作由于受到管子硬度的变化,以及缺乏对射线强度作良好的定量测量的设备的影响而复杂化。虽然如此,到了 1902 年就已经有吸收系数表发表出来,并且在光线吸收中已经习用的那个指数吸收关系公式也被用上了。至于 X 射线(不论是连续辐射还是标识辐射)的习性的阐明,光电吸收、Compton 散射和电子偶形成等现象,以及在任一个这些过程中所产生的次级电子所致的能量损耗的性质等与近代的原子知识密切相关的详细发展史在这里只能从略。只在下一段文章里把所涉及的现象作一个简短的描述。其中描写的

某些过程,后面还要加以詳述,其他的則請参考更加專門的書籍。

能量高的电磁輻射可以由两种主要的方式发生。第一种方式是由在原子本身中或者在原子核中的两个能級間的轉移,前者称为標識 X 射綫,后者称为 γ 射綫。第二种方式是由电子的減速,一般是在一个靶子上的減速(虽然在电子回旋加速器或同步加速器中仅仅依靠圆周运动加速也能产生輻射)。輻射在波长方面并不是匀一的,而是包含統計分布的光子的聚集,其中所具的最大能量等于原电子的能量。这种輻射乃是連續輻射,或軋致輻射。全部各种輻射的类别所不同的只是頻率上的不同。 γ 射綫具有高达每秒 10^{22} 周的頻率,从 250 千电子伏的 X 射綫管发出的 X 射綫大約具有每秒 5×10^{19} 周的頻率。在 X 射綫管中,輻射是由已經在一个电场中获有能量的电子,突然停止在一个靶子上而产生的。这样就使靶子的原子受到分裂,从而激发出標識 X 射綫,并且还产生連續輻射。 γ 射綫則是由放射性元素的衰变,使那放射性元素由于放射性的初級粒子发射而处于激发状态中,从而产生的。 γ 射綫同標識 X 射綫一样,也具有离散的頻率。

当这种高频电磁輻射自己碰到了物质时,它就和吸收体的原子亚結構起相互作用。由于量子物理学定律只涉及到概率,因此在原子与輻射間每一次相遇的习性中,必須有一个强烈的机会的因素。这表明在吸收的指数习性中,并且可以用数学方法描述如下:設吸收元素(或者是电子,或者是原子,視吸收的方式而定)的数目为每单位体积 n 个, S 为描述在每元素中吸收过程用的一个参量, x 是穿透的深度。这样,假如有 N 个光子射到一块单位面积上,并且有 $-dN$ 个从射束中吸收掉的話,則吸收的部分分数 $-dN/N$, 等于所暴露的原子吸收的部分面积。在一个深度增量 dx 和单位面积中,这就是 $nS dx$, 因此,

$$-\frac{dN}{N} = nS dx$$

或者說,如果光子在开始时的数目是 N_0 , 在穿过深度 x 后射出的数目是 N , 則

$$\ln \frac{N}{N_0} = -nSx \quad (1)$$

或

$$\frac{N}{N_0} = e^{-nSx}$$

参量 S 称为“截面”，式 (1) 是一种可以描述很多种类的吸收过程的有用方法。更为常遇的形式是把它化成：

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\mu x} \quad (2)$$

其中 μ 是线性吸收系数。从上式变化出来的各种形式都有。Johns 和 Laughlin^[2] 对它们作过很好的描述。

对 X 射线而论，由式 (1) 度量的截面乃是至少两种甚至三种过程的组合。这三种过程是：光电吸收过程，Compton 散射过程，以及电子偶形成过程。在第四。(一) 节中对这三种过程还要作简明的描述。它们是相互独立的，意味着我们可以写出：

$$S = S_{\text{光电}} + S_{\text{compt}} + S_{\text{电子偶}}$$

其中 $S_{\text{光电}}$ ， S_{compt} ， $S_{\text{电子偶}}$ 分别是归属于这三种过程的截面。这三种相互作用的方法所产生的结果都是使光能传递为电子能。因此，在与物质相互作用的过程中所关注的，并不简单地包含在这三种效应中。而快电子的作用，确实具有胜过其他一切的重要性。

那些次级快电子，在它们的行程中通过由它们所产生的电场与原子相互作用。用较为寻常的话来讲，它们相互碰撞。如同以后还要指出的，如果那些电子具有较低的能量，能量就要释放得更加频繁一些。这有个重要的后果，那就是当电子放慢下来时，吸收过程便愈来愈有效。平均而论，每碰撞一次只使电子的能量减少一丁点儿。因此在使电子停止以前，需经许多次的碰撞。象这样一种过程，使得每个电子的射程，或贯穿的深度，多少是有一定的。因此，我们所描述的整个过程，是一种把能量传递给具有有限射程的电子的过程，并服从指数吸收定律。在本章后文中还要对整个现象予以相当细致的讨论。

1932 年 Chadwick 对中子的发现以及随后原子核物理学的迅

速发展,在放射生物学的领域中引入了一个完全不同的因素。中子排它性地只同原子核相互作用,而且由于原子核的物理面积是异乎寻常地微小,使得对中子的吸收作用相对而論也很微弱。可是它具有随机性的特征,因此也服从指数吸收关系。不过那截面却取决于在中子与原子核間核力的相互作用。这种力是很大的,但在距离上却很有限。这使得許多原子核对中子散射來說,其截面很接近于原子核本身的截面。所包括的碰撞有两种类型:一种是在碰撞中能量和动量是守恒的,中子和原子核仅仅彼此反冲而已。另一种是在碰撞中发生各种不同精細程度的核反应,結果使带电粒子和 γ 射綫发射出来。不論是哪一类,其主要的效应是把核能量傳遞給快速的粒子、电子、碰射出来的核碎片、或者撞出的原子核。这种原子核使被它們所碰撞的物质产生强度极大的电离作用。因此整个吸收过程仍然是能量从入射輻射傳遞給在靶子中运动着的快速带电粒子的过程。

在星際空間尚未知的复杂体系中,全部各种类型的电离原子都会形成并得到加速。它們形成了初級宇宙輻射,从这些种輻射,可能在电离原子的分布中,反映出在宇宙中各种元素的相对丰度。这些种輻射包含有质子、碳原子核、氧原子核、鉄原子核等等許多种类的电离原子。它們所拥有的能量高达 10^{15} 电子伏以上,大約要比人类迄今所能作出的成就还高出百万倍。象这种粒子,它們本身是极密地电离化的,而且在物质中也产生最为复杂的級联轉移,結果发生一大簇众多粒子和輻射的混合,称为“簇射”。这样看来,宇宙航行的問題很可能为放射生物学家提出一个比任何其他輻射类型要大得多的最大課題。大家的注意力已开始集中到这个新的課題上面来。

二、快速带电粒子

(一) 能量損耗率

这个術語是指一快速的带电粒子在物质中运动时損耗能量的

一切方式。还有一个与此很相似的术语，即綫性能量傳遞，或 LET，乃是指能量直接傳遞給阻止物质中的原子的部分^[1]，但是輻射損耗不計在內，这种輻射損耗在相对論性的能量上有特殊的重要性。

1. 基本理論

一条关于非相对論性的能量傳遞的簡單理論，可以通过作以下的考虑而获得之：一个具质量 M ，带电荷 Z ，拥有能量 E ，并有速度 V 的入射粒子，在一团电子云中运动，暫且把这些电子当作是不与原子結合的。从經典的 Rutherford 散射公式^[9]，就能推算出，每单位体积如有 nz 个电子，其中 n 是每单位体积內的原子数目， z 是每原子上的电子数目，則在每单位长度的行程內能量介乎 w 与 $w+dw$ 間的反冲电子的数目給定为：

$$\frac{2\pi Z^2 e^4}{mV^2} nz \frac{dw}{w^2} \quad (3)$$

其中 e 和 m 分别是一个电子所带的电荷及其质量。

对这个过程而論，能量損耗率 $-dE/dx$ 因此給定为：

$$-\frac{dE}{dx} \sim \frac{2\pi Z^2 e^4}{mV^2} \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{wdw}{w^2} = \frac{2\pi Z^2 e^4}{mV^2} \ln \frac{w_{\max}}{w_{\min}} \quad (4)$$

其中 $w_{\min}$ 和 $w_{\max}$ 是可能傳遞的最小能量和最大能量。但因为那些电子实际上是結合在原子中的，最小能量傳遞的数量級于是跟在阻止物质中电子的平均电离势 I 相若。入射的如为重粒子，例如是质子，則 $w_{\max}$ 是在仍然使动量守恒的情况下所能傳遞的最大能量。一位对入射重粒子的观测者会看到一个电子以速度 V 进来，然后經迎头碰撞后，朝相反方向仍以速度 V 出去，在电子速度上的淨变化为 $2V$ 。由于一个重粒子的速度在同电子碰撞后变动很小，电子速度的实际变化仍同样是 $2V$ ，导致出有 $2mV^2$ 的能量傳遞，并且对重粒子而論，

$$-\frac{dE}{dx} \sim \frac{2\pi e^4 Z^2}{mV^2} \ln \frac{2mV^2}{I} \quad (5)$$

对电子来說，在入射电子中的能量可能全部傳遞給一个原子

上的电子,可是,由于在电子間不能区别之故,經過碰撞后出来的較快的电子被认为是那入射电子,其 $w_{\max}$ 应是 $E/2=1/4mV^2$, 导出以下为电子用的近似公式:

$$-\frac{dE}{dx} \sim \frac{2\pi e^4 V^2}{mV^2} \ln \frac{mV^2}{4I} \quad (6)$$

这个估計量虽然在数量級上是对的,但它并没有恰当地計入那些可以与原子上电子的結合能相比的大量能量傳遞. 这些傳遞的机制可以通过考虑在粒子徑迹的一边的由这个带电粒子在某一原子上所产生的电场討論之. 这个电场是依赖于时间的,从零逐漸上升,到当粒子經過距該原子最近处时达于最大值,然后又逐漸降低到零. 如果粒子运动得足够地快,这个电脉冲的各个 Fourier 分量将在那原子吸收电磁輻射的頻率范圍中拥有相当大的强度. 这个过程显著地增加了总的能量耗散率. 以上观点最早为 Fermi^[12] 所采用,后来由 Gaunt^[13] 多少深入地研究过.

Bethe^[14] 和 Bloch^[15] 作过詳細的計算. 經添上相对論性的校正之后,能量損耗率就可以写成^[6]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{mV^2} nB \quad (7)$$

其中 B 称为阻止数,它对不同的入射粒子有不同的形式. 对重粒子來說,它是:

$$B = z \left[\ln \frac{2mV^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \quad (7a)$$

对电子來說,它是:

$$\begin{aligned} B = z \left\{ \ln \frac{mV^2}{2I} \sqrt{\frac{e}{2}} + \frac{1}{2} \left[\ln 4 \frac{1-\sqrt{1-\beta^2}}{\beta^2(1-\beta^2)^{3/2}} \right. \right. \\ \left. \left. - (2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2) \ln 2 - \beta^2 + \frac{1}{8} (1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \right\} \\ = \frac{z}{2} \left[\ln \frac{mV^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2) \ln 2 \right. \\ \left. + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} (1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (7b) \end{aligned}$$

其中

$$\beta \equiv \frac{V}{c}$$

式(7b)的第一种形式较方便, 因为当 β^2 趋于零时, 在方括弧中的量也趋于零。

把 I 以各种原子参量表出的理论计算并没有取得很大成功, 最好用实验的方法来定 I 。在表 1-1 中列出了好些由实验定出的 I 值。

表 1-1 I 的实验值

元 素	化 学 状 态	I (电子伏)	参 考 文 献
H	饱和的化合物	15.5	[16]
	不饱和的化合物	13.0	[16]
C	饱和的化合物	69.3	[16]
	不饱和的化合物	67.2	[16]
N	分子	76.3	[16]
	胺	89.4	[16]
	在环状化合物中	68.8	[16]
O	—O—	88.5	[16]
	=O	79.8	[16]
	分子	88.3	[16]
Al	金属	163	[16a]
Cu	金属	378	[16a]
Au	金属	1136	[16a]

当缺乏适当的数据时, 对一种元素的 I 值可以用下面 Bloch^[15] 所提出的关系公式估计之:

$$I = 13.5z \text{ 电子伏} \quad (7c)$$

其中 z 是该元素的原子序数(也可参阅文献[16a])。

许多年前 Bragg^[17] 提出了一条定律, 现在这条定律就用他的姓命名, 其中说一元素的阻止本领与它的化学组合的状态无关。例如在水中的阻止本领等于在含两份氢和一份氧的混合物中的阻止本领。在表 1-1 中能见到: 对那些轻的元素来说, 同一元素在不同的化学组合中的 I 值具有度量得出的差异。这样看来, 那 Bragg