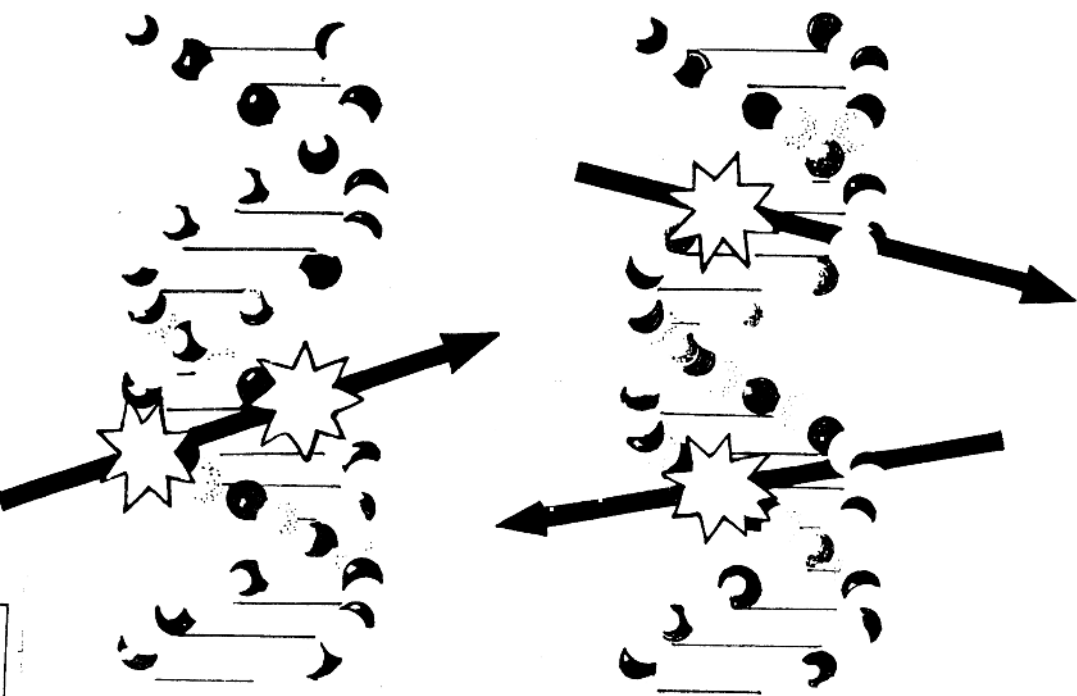


# 放射生物学

(供放射治疗、放射诊断和核医学用)



## 内 容 简 介

本书对各种射线的物理特性、射线与物质的相互作用及其能量吸收作了扼要的描述;以丰富的实验材料论述了放射生物学的基本概念和原理以及最新研究方法;概括地介绍了放射治疗的最新进展。为了放射诊断和核医学工作者的需要,作者对辐射的远后生物效应进行了详细讨论,同时对射线和核医学的应用给人类带来的利弊作了充分估计,各章附有主要参考文献,书末附有本书涉及到的专业名词的英汉对照索引,目录中还为不同的读者对象标出了必读章节。本书内容丰富,取材新颖,理论与实践密切结合,深入浅出,迄今仍为各国放射学工作者的主要参考书。

本书实为放射治疗、核医学、放射诊断和辐射防护等医务工作者以及从事肿瘤放射生物学教学和研究人员的良好益友,同时可供各高等院校生物系和高等医学院校师生教学参考。

Radiobiology For The Radiologist

Second Edition

Eric J. Hall

Harper & Row Publishers, Inc., 1978

## 放 射 生 物 学

(供放射治疗、放射诊断和核医学用)

(美) E. J. 霍尔 著

王顺宝 李冬华

沈瑜 胡逸民 译

黄一蓉 糜福顺

谷铎之 沈瑜 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

顺义县小店印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本787×1092 1/16·印张22.5·字数550千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数1—1870·统一书号: 15175·792

定价: 5.75元

## 译者的话

目前,恶性肿瘤已成为我国死因前三位的重大疾病之一。据不完全统计,肿瘤患者中接受不同程度放射治疗的病人约占全部肿瘤病人的70%左右,可见放射治疗在肿瘤治疗中占有极其重要的位置。放射生物学、放射物理学、临床肿瘤学和放射剂量学被认为是临床放射治疗学的四大支柱,而放射生物学则是临床放射治疗学的理论基础。如果说七十年代放射治疗的进步和发展主要归功于放射物理学和放射剂量学的话,那么,今后进一步提高恶性肿瘤放射治疗效果将主要取决于放射生物学的研究成果。然而,肿瘤放射生物学的研究在我国还是近几年的事,大大落后于目前放射治疗的水平和需求。当前广大放射学工作者和肿瘤放射生物学工作者正缺少一部好的、可供参考的放射生物学专著。为此,我们翻译了Eric J. Hall这本《放射生物学》,献给广大放射学工作者。

1978年第二版的《放射生物学》共分21章,主要内容是:对各种射线的物理特性、射线与物质的相互作用及其能量吸收作了简明扼要的描述;借助丰富的实验材料详细地论述了放射生物学的基本概念和原理以及放射生物学最新的研究方法;概括地介绍了放射治疗的最新进展,并对新的放射治疗设施作了客观的评价和展望;最后作者对射线的远后生物效应进行了详细的讨论,如辐射致癌,辐射遗传,射线对寿命的影响等。同时对放射诊断和核医学给人类带来的利弊也作了充分估计。各章附有主要参考文献目录,便于读者深入阅读和研究。该书内容丰富,取材新颖,理论与实践密切相结合,深入浅出,至今仍然受到各国放射学工作者的推崇。我们希望该书中译本能成为我国从事放射治疗、核医学、放射诊断和放射卫生防护等的医务工作者及从事肿瘤、放射生物学教学和研究人员的良好益友;也为各高等院校生物系和高等医学院校师生提供一本指导性教学参考书。

本书翻译过程中承蒙中国医学科学院肿瘤研究所照相室罗永志同志翻拍全书的照片,谨致谢意。

由于水平有限,译文必有不妥,甚至错误之处,敬希读者批评指正。

译者

1985年元月 北京

## 第一版 前 言

如同以前许多书以讲义为基础一样，本书出自一组 1969、1970 和 1971 年秋季在纽约 Columbia-Presbyterian 医学中心所作的讲课笔记。听课的主要是哥伦比亚的有关学校、医院以及市内和周围地区其他研究所的放射学工作者。

要设计一种放射生物学课程有两种办法可供选择：一种是作为一个实验工作者在自己专长的几个题目方面作长而有深度的论述；另一种是对放射学家感兴趣的整个领域作全面的评述而深度较浅。前一种对讲课者来说要简单得多，而且在各方面更易令人满意。然而这将对那些有抱负的放射学家没有什么用处，因为他们如果听那样的课则只是在极少的问题上学得很多，而不能了解放射生物学的全貌。因此我在原始稿里和本书内选择了包括适合于放射学的放射生物学的全部内容，我努力避免只讲我已从事多年并感兴趣的题目，同时我试图用极大的热情从我能搜集到的资料中论述那些我并不特别专长或没有个人经验的领域。

本书是为放射学家写的，尤其是为那些目的明确有探索思想，或是为通过考试而选择放射学的生物学基础的放射学家们写的。它可以作为生命科学研究生的教科书，也可作为那些只集中注意他们自己感兴趣的研究领域的研究人员复习放射生物学之用。如果本书尚能起到这些作用，作者将感到无比欣慰，但本书首要的目的是想作为放射学学生的一本教科书。

放射学不是一门单一的学科。诊断学家和治疗学家有不同的兴趣，有时他们走到一起似乎仅仅是因为历史因素和方便，使他们在物理学或放射生物学方面接受共同的课程。本书的大部分内容将考虑并希望使所有的放射学家都感兴趣。特别向放射诊断学家推荐涉及辐射事故、晚期效应及对胚胎和胎儿照射的第十一、十二和十三章。有几章特别是第八、九、十五和十六章是专门针对放射治疗讲的，因此诊断学家可以省略不看，也不至于影响内容的连续性。

再谈一些关于参考文献的问题。作者估计本书的观点符合科学文献中的看法，为了阅读方便，本教科书没有直接引用大量的文献，而是在每章后面选编了一些，供那些想深入了解该课题的读者参考。

感谢我过去在牛津的同事们以及现在在哥伦比亚的同事们。因为正是在与他们日常的切磋、争论和讨论中形成了一些看法，有一些观点也受到了检验。

最后我要向经常听我讲课的男女青年们致谢，他们的求知精神迫使我在每次走上讲台前必须努力钻研并仔细思考。每当一批批学生变得成熟并聪明起来时，我因在他们的成长中出过微小的力量而感受到作为一个教师的满足和愉快。

E. J. H. 1972年7月于纽约

(沈瑜译)

## 第二版 前 言

第二版主要根据本书初版使用过程中教师及学生提出的批评和意见作出修改。最重要的改变就是对本书作了重新编排,以便对放射治疗、放射诊断和核医学的读者各自关心的问题分别加以叙述。

人们希望所有放射学工作者,不论其专长在哪一方面,都会对放射生物学的各个方面感兴趣,因为放射生物学终究是一个内容有限范围相当狭窄的领域,读完它也不需要花太长的时间。然而鉴于大学时间比较紧张,尤其对那些准备出国的人员,其中有很多人宁可只将注意力集中于与他们专业有直接关系的放射生物学部分。因此,将每章都标上了适于放射诊断、核医学或放射治疗的记号。

为了符合放射诊断及核医学工作者的需要,本版大大扩展了辐射致癌和小剂量照射的遗传学效应部分。当然这的确是极其重要的。此外增加了在有代表性的操作中与所接受的辐射剂量有关的新材料,并试图对危害与利益进行一些讨论。本书对放射诊断的有关章节,是按照北美放射学会工作组的建议进行标记的。

从放射治疗工作者角度考虑,在新版中最明显的改变有下列四个方面。首先,关于高LET的讨论是最新的内容。第二,对在第一版中仅作为新发展而简单提到的乏氧细胞增敏剂,由于在这一领域的迅速发展,所以做了较详细的讨论。第三,扩大了关于人体肿瘤动力学的讨论并且都是最新的材料。第四,增加了加温治疗的章节。

一些印刷上和事实上的明显错误已经纠正,感谢向我指出错误的许多同事和朋友。因第二版不能比第一版在篇幅上增加太多,从一开始就排除了为顾及全书完整性而要罗列的每个新内容和在重写本书时将它们加进去的极强烈的诱惑。结果为了腾出版面加进新的和激发兴趣的内容,在新版内去掉或压缩了一些内容。

E. J. H. 于纽约

(沈瑜 译)

# 目 录

译者的话

第一版前言

第二版前言

第 一 章	X射线吸收物理学 (DNT)*	( 1 )
第 二 章	中子、 $\pi$ 介子和重离子物理学 (T)	( 9 )
第 三 章	细胞存活曲线 (DNT)	( 21 )
第 四 章	正常组织的剂量-效应关系 (DNT)	( 44 )
第 五 章	氧效应 (DNT)	( 53 )
第 六 章	传能线密度与相对生物效应 (T)	( 62 )
第 七 章	有丝分裂细胞周期中细胞周期年龄和放射敏感性 (DNT)	( 75 )
第 八 章	致死、潜在致死和亚致死放射损伤及剂量率效应 (DNT)	( 87 )
第 九 章	影响辐射效应的化学物质和药物 (DNT)	( 115 )
第 十 章	组织的敏感性 (DNT)	( 131 )
第 十 一 章	急性全身放射效应 (DNT)	( 136 )
第 十 二 章	实体瘤与再氧合 (T)	( 144 )
第 十 三 章	细胞、组织和肿瘤动力学 (T)	( 162 )
第 十 四 章	放射治疗中的时间、剂量和分次 (T)	( 183 )
第 十 五 章	新的放射治疗设备 (T)	( 202 )
第 十 六 章	加温治疗 (T)	( 225 )
第 十 七 章	放射性白内障的形成 (DNT)	( 243 )
第 十 八 章	远后效应: 非特异性寿命缩短和辐射致癌 (DNT)	( 248 )
第 十 九 章	远后效应: 遗传变异 (DNT)	( 267 )
第 二 十 章	对胚胎及胎儿的影响 (DNT)	( 276 )
第 二 十 一 章	放射诊断学和核医学: 利益和危害 (DN)	( 285 )
索引		( 311 )

\* D表示与放射诊断有关。

N表示与核医学有关。

T表示与放射治疗有关。

# 第一章

## X 射线吸收物理学

### (THE PHYSICS OF X-RAY ABSORPTION)

#### 电离辐射的种类

(Types of Ionizing Radiations)

电磁辐射

(Electromagnetic Radiations)

粒子辐射

(Particulate Radiation)

#### X 射线吸收

(Absorption of X-Rays)

#### 辐射的直接作用和间接作用

(Direct and Indirect Action of Radiation)

放射生物学是研究电离辐射对生物作用的科学，因此，必然要涉及到放射物理学的一些内容。本章的目的是以简略的文字，尽可能少的数学，概述各类电离辐射的物理特性以及它们被吸收的过程。

## 电离辐射的种类

生物介质吸收了射线的能量以后产生激发或电离。介质中原子或分子中的电子因吸收射线能量，升到较高的能级，但电子仍然没有脱离原子或分子，此种现象叫做原子或分子的激发；如果射线有足够的能量，使一个或多个轨道电子脱离原子或分子而射出，此种现象叫做原子或分子的电离。引起电离的射线叫做电离辐射。电离辐射的一个重要特点就是能够在局部释放很大的能量，每个电离事件的能量损失约为33eV，该能量足以破坏很强的化学键，例如碳原子（C=C）的化学键的能量只有4.9eV。

为了方便，通常将电离辐射分为电磁辐射和粒子辐射两类，下面分别对它们进行讨论。

## 电 磁 辐 射

直到最近几年，大多数放射生物学试验仍然用X或 $\gamma$ 射线。X和 $\gamma$ 射线都是电磁辐射，它们在本质上或物理特性上没有什么差别，X射线、 $\gamma$ 射线只表示它们产生的方式不同。X射线是从核外产生的，而 $\gamma$ 射线是从核内产生的。事实上，X射线是用一种电子装置产生的。在这种电子装置中，电子被加速到高能，然后轰击靶（靶材料通常为钨或金）而产生X射线。电子运动的动能的一部分转换成了X射线。而 $\gamma$ 射线是由放射性核素发射的，当不稳定的核分裂或衰变，变成稳定的核时，多余的能量以 $\gamma$ 射线方式放出。在以后的讨论中，我们将X射线和 $\gamma$ 射线当作完全等同的射线。

X射线具有两种不同的物理特性。首先，X射线可认为是一种电磁波，互相垂直的电场和磁场，随时间变化，形成向前运动的电磁波，就象石子落入水中，在池塘水面形成水浪波一样。电磁波的速度为 $c$ ，在真空中取值为 $3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相邻波峰间的距离 $\lambda$ 称为波长，每秒钟通过某一点的波的数目叫做频率 $\nu$ 。频率与波长的乘积等于波速，即 $\lambda \cdot \nu = c$ 。为便于理解，我们以人的步行为例，将人步行时每步的距离比作波长，人每分钟走的步数比作频率，则步长乘以步数就等于人每分钟行走的距离，即步行速度。

除了X射线外，无线电波、雷达波、热辐射、可见光等都是电磁辐射，它们具有相同的波速 $c$ ，但频率和波长彼此不同。为加深理解，我们仍以步行为例，设一群人步行，他们的身有高有矮，以同样的步行速度一块儿向前走。个子高的人，因每步走的距离大，但每分钟走的步数少；相反，个子矮的人，因每步行走的距离小，为了保持与个子高的人一样的速度，必



须增加每分钟行走的步数。无线电波的波长约为300m，而可见光的波长只有五十万分之一厘米 ( $5 \times 10^{-5} \text{cm}$ )；典型的X射线的波长约为亿分之一厘米 ( $10^{-8} \text{cm}$ )。

另一方面，X射线也可认为是一种光子流 (Photons)或量子流。每一个光量子的能量等于  $h\nu$ ，此处  $h$  为普朗克常数 (Planck's constant)， $\nu$  就是我们所说的频率，如果射线的波长较长、频率较低，则单个光量子的能量较小；相反，若波长较短、频率较高，则单个光量子的能量较大。光子能量 (keV) \* 与波长 (Å) \*\* 之间有如下的关系：

$$\lambda (\text{Å}) = \frac{12.4}{E (\text{keV})}$$

例如：波长为  $\frac{1}{10} \text{Å}$  的X射线，其光子能量为124keV。

放射生物学中将X射线看成光子流是非常重要的。X射线在生物介质中被吸收时，X射线能量沉积在组织和细胞中。能量沉积以分立的形式不均匀地分布于组织中，某些细胞吸收较多的能量，而另一些细胞吸收的能量却很少。X射线的能量被分成大的能量集团，每个集团的大小足以破坏化学键，引起生物学变化的一系列后果。非电离辐射和电离辐射间的主要差别在于它们的能量集团的范围大小，而不是它们所具有的能量多少。一个简单的计算可以说明这一点，从以下可以看到，当人类接受大约700rad \*\*\* X射线的全身剂量时绝大多数人将会死亡。但是若设每个人平均身重70kg (标准人)，上述X射线的剂量只相当于100cal的能量吸收，也可以从另外方面说明这种能量的吸收相当少，若转换成热量计算，上述剂量仅使体温升高0.002°C，这种温度升高一点也不会产生危害。另外，若将人的X射线致死剂量所具有的能量与机械能或做功相比，相当于将人从地面上举18英寸所做的功。

热能或机械能被同等地、均匀地吸收，而且需要很大的能量才能使生物体产生损伤。但对X射线来说，产生生物体的损伤不需要太多的能量，而且损伤的程度依赖于个别能量集团的范围。就生物效应来说，当光子的能量超过124eV，即光子波长小于  $10^{-6} \text{cm}$  时，电磁辐射才被认为是电离辐射。

## 粒 子 辐 射

用作生物学试验，且已用于或将用于放射治疗的其它类型的辐射有电子、质子、 $\alpha$ 粒子、中子、负 $\pi$ 介子和带电重离子等。其中有些粒子还可能用于诊断放射学中，但目前还不成熟。

电子 (Electrons)：电子是一种小的带负电荷的粒子。利用电子装置，如电子感应加

\* keV (千电子伏) 是一种能量单位，表示一个电子受到1千伏电压加速后所具有的能量， $1 \text{keV} = 1.6 \times 10^{-9} \text{erg}$

\*\* Å (埃) 是一种长度单位， $1 \text{Å} = 10^{-8} \text{cm}$

\*\*\* 电离辐射量可用伦琴 (R) 或拉德 (rad) 表示。伦琴是照射量单位，表示X射线对空气的电离能力。拉德是吸收剂量的专用单位， $1 \text{rad} = 100 \text{erg}$ 。对于X和Y射线，在水或软组织中，1R近似等于1rad的吸收剂量。到1985年，将用戈瑞 (Gray) 代替拉德作为吸收剂量单位，1戈瑞 (Gy) = 100拉德 (rad)。

速器,可以将电子加速到高能量,达到接近光速的速度。

**质子 (Protons):**质子是带正电荷的粒子,质量较大,约为电子质量的2000倍。因为质子的质量大,需要比较复杂的、更加昂贵的设备才能将质子加速到有用的能量范围。

**$\alpha$ 粒子 (Alpha particles):** $\alpha$ 粒子是氦原子核,由两个质子和两个中子紧密结合而成。因氦核带正电荷,因此可以利用类似加速质子的大的电子装置将 $\alpha$ 粒子加速;某些放射性核素衰变时,也发射 $\alpha$ 粒子。

**中子 (Neutrons):**中子具有和质子相同的质量,但不带电。因中子为电中性,不能用电子装置将中子加速。当一个带电粒子,如氘核,加速到较高能量并轰击适当的靶材料时,可产生中子。(氘核(deuteron)是重氢的原子核,由一个质子和一个中子紧密结合而成。)当重的放射性原子裂变(fission)(分裂成两个较小的原子)时,也可以发射中子。

**负 $\pi$ 介子 (Negative- $\pi$ -mesons):**负 $\pi$ 介子带负电荷,质量约为电子质量的273倍。产生负 $\pi$ 介子的过程很复杂,需要有同步回旋加速器或直线加速器,将质子加速到400—800MeV。目前只有少量这样的设备被考虑用来作放射治疗的临床试验。

**带电重离子 (Heavy charged ions):**带电重离子系指氮、碳、硼、氟、氩等原子被剥掉或部分剥掉外围电子后的带正电荷的原子核。只有将这些重离子加速到几十亿电子伏时才具有临床用途,这只有在为数很少的几个实验室才能实现。

## X射线吸收

所有射线分为直接电离辐射和间接电离辐射。前述所有带电粒子均为直接电离(Directly ionizing)辐射,这意味着,若入射粒子的动能足够大,它们就可以直接破坏吸收介质的原子结构,引起生物和化学的变化。而电磁辐射X射线为间接电离(Indirectly ionizing)辐射,它们不能直接引起生物和化学的变化,但它们通过介质时,损失自己的能量,产生快速运动的带电粒子。在诊断和治疗中,X射线最常用,而且人们对X射线的效应都很感兴趣,因此需要对X射线的吸收有个比较深刻的了解。

X射线被吸收的过程决定于X射线本身的能量和吸收介质的化学成份,在任何辐射物理的教科书中对X射线的吸收都有详细的叙述。详细了解能量吸收过程非常重要,因为能量吸收是放射诊断和治疗的基础。能量较高时,如治疗用的 $^{60}\text{Co}$ 和直线加速器,康普顿过程(Compton process)占主要形式,X射线光子与吸收介质原子轨道上的一个轨道电子发生作用,而且在康普顿过程中,光子通常与所谓“自由”电子发生作用,即只与那些束缚能量比入射光子能量小得多的电子发生作用。在康普顿过程中,光子将一部分能量传给电子,自己携带剩余的能量偏离入射方向继续前进(图1-1)。康普顿过程作用的结果产生了一个快速运动的电子和一个能量较低的散射

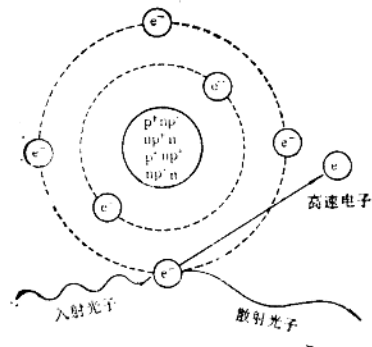


图1-1 康普顿过程X射线被吸收。入射光子与吸收介质的一个原子的外层束缚能量低的电子作用,光子的一部分能量传给电子,能量减少,偏离入射方向,继续前进。

光子,后者继续与介质原子发生作用。每次作用的结果,光子能量有时损失较多,有时损失很少,而能量损失率一般在0—80%之间变化。事实上,当一束X射线通过组织介质时,很多光子与很多介质原子同时作用,按统计学的观点,各种能量损失都有。

射线对生物体作用的结果,产生了大量的快速运动的电子,其中许多电子能够使吸收介质的其它原子电离,破坏不可缺少的化学键,造成一系列的后果,最终表现为生物损伤。

对放射诊断范围内的X射线,可同时发生康普顿吸收和光电吸收。在高能量端时,康普顿吸收占主要地位;在低能量端时,光电吸收占主要地位。在光电吸收(photoelectric process)过程中(图1-2),X射线光子与吸收介质的原子的束缚电子(如K、

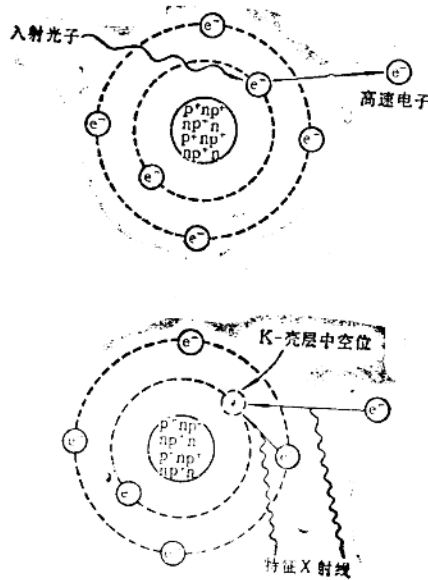


图1-2 X或γ射线光电吸收过程图解。光子与原子吸收体的轨道束缚电子作用,光子放出全部能量,电子被击出,携带大部分光子能量击出电子。留下的空位被外层轨道电子或自由电子填充,发射特征X射线,其能量等于两轨道能级之差。对组织来说,这些X射线能量很低。

L、M壳层电子)作用,光子将其全部能量传递给电子。光子的一部分能量用来克服电子的结合能,使其离开轨道;另一部分能量转换成电子的动能(KE),由下式表示:

$$KE = h\nu - E_B$$

此处 $h\nu$ 是入射光子的能量, $E_B$ 是轨道电子的结合能。原子壳层上留下的空位由该原子的较外层电子或其它电子来填充。电子从一个壳层进入另一个壳层,表示能量状态发生改变。因电子带负电荷,电子从结合能低的能级进入结合能高的能级,表示电子位能减少。这种能量的变化伴随着特征X射线的发射。特征X射线的能量很低,一般只有0.5keV,对软组织没有什么生物学意义。

康普顿吸收和光电吸收过程在一些方面彼此不同,正是这种不同造成X射线对诊断和治疗的不同应用。对康普顿吸收,质量吸收系数与吸收介质的原子序数无关。但是,光电

吸收的质量吸收系数随原子序数( $Z$ )<sup>\*</sup>变化迅速,近似与 $Z^3$ 成正比。

为放射诊断用, X射线的能量一般选在光电吸收占主要地位的范围内。由于光电吸收的质量吸收系数随 $Z$ 变化,所以,骨内因含有钙等高原子序数的元素而对X射线有较大的吸收。这种高原子序数的吸收差别是形成清晰影象的基本原因之一。而对放射治疗,却主张用高能(兆伏)范围的光子,因为在此能量范围内,康普顿吸收占绝对优势。因此,高能光子在骨中、肌肉和软组织的吸收剂量近似相同,不会造成骨中与软组织中不同的不必要的吸收剂量,但低能X射线,骨吸收是一个严重的问题。

各种吸收过程之间的差别对放射诊断学具有实际价值,但对放射生物学意义不大。不论吸收过程是光电吸收,还是康普顿吸收,光子的大部分能量都被转换成了快速运动电子的动能。

### 辐射的直接作用和间接作用\*\*

虽然在放射生物学中已经进行了大量的研究,但仍存在一个疑点,即在哺乳动物细胞中,如何确定一个关键的或致命的靶结构,只有它们受到损伤之后,才能使细胞致死。虽然细胞膜是很重要的物质,但几乎可以肯定,染色体的DNA是最关键的靶分子。本章目

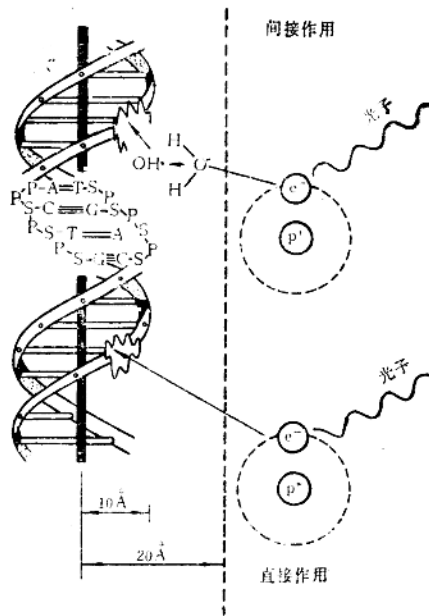


图1-3 辐射的直接作用和间接作用说明,图中示意说明DNA结构,字母S、P、A、T、G、C分别表示糖、磷酸、腺嘌呤、胸腺嘧啶、鸟嘌呤、胞嘧啶。直接作用: X射线被吸收后产生的次级电子与DNA作用产生效应。间接作用: 次级电子不与DNA直接作用,与水分子作用形成 $\text{OH}\cdot$ 基,该 $\text{OH}\cdot$ 基再与DNA作用,造成DNA损伤,但只有在半径为 $20\text{\AA}$ 的圆柱体内的自由基才能与DNA作用。对稀疏电离辐射来说,如X射线,间接作用是主要的。

\*  $Z$ : 原子序数,定义为原子核中正电荷数,即核中质子数。

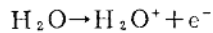
\*\* 一方面必须区分直接电离和间接电离辐射,另一方面也必须区分辐射的直接作用和间接作用,这一点非常重要。

的，不是去鉴定关键靶分子，但要求人们能理解到，在一个细胞内，存在好几个靶部位，只有它们受到损伤之后，该细胞才能被杀死。

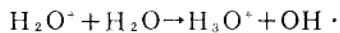
当X射线、γ射线、带电粒子或不带电粒子，在生物介质中被吸收时，射线有可能直接与细胞中关键靶子作用，靶分子的原子本身可被电离或被激发，导致一系列后果，引起生物学变化。这就是所谓的辐射的直接作用，如图1-3所示。高LET射线，如中子、α粒子等，主要是直接作用。

另外，射线也可以与细胞中的其它原子或分子（特别是水分子）作用，产生自由基，这些自由基可以扩散一定的范围，足以达到并破坏靶分子结构。这就是所谓的间接作用（Indirect action）。所谓自由基是一个自由的原子或分子，它们携带一个不配对的或奇数的轨道电子。这个轨道电子不仅绕原子核旋转，而且绕着它自己的轴作顺时针或逆时针方向的自旋运动。在一个原子或分子中，若轨道电子数平衡，则自旋是配对的，也就是说，有一个顺时针方向的电子自旋，必然有一个逆时针方向的电子自旋与之对应。这样，不论原子或分子是电中性的或是带电的，由于电子自旋的平衡，使得原子或分子的化学性质保持高度稳定。但是，在原子或分子中，若轨道电子数为奇数时（即有一个不平衡电子时），没有一个反向自旋的电子与它对应，则该电子成为不配对电子。同样，不论原子或分子是否是电中性的或是带电的，这种不配对状态，造成了原子或分子具有高度的化学活性。

细胞中80%是水，因此，为简单起见，我们讨论一下辐射与水分子作用的情况。当X射线、γ射线或带电粒子如电子或质子，与水作用时，水分子被电离，由下述方程表示：

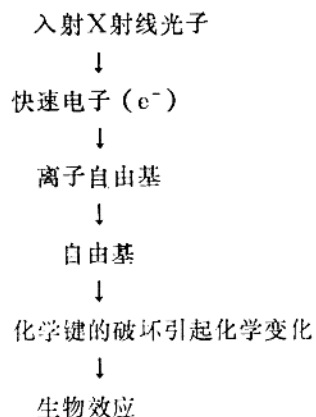


$\text{H}_2\text{O}^+$ 是一个“离子自由基”。所谓离子（ion）是指失去一个轨道电子的带电原子，而自由基（free radical）系指在原子外层轨道上含有一个不配对的电子，其结果，使原子具有高度的活性。 $\text{H}_2\text{O}^+$ 既带电又有一个不配对的电子，所以它既是一个离子，又是一个自由基。离子自由基的寿命极短，约为 $10^{-19}\text{s}$ 。它们很快衰变成不带电的自由基，但它们仍然有一个不配对的电子。在水中，离子自由基与另外一个水分子作用，形成高活性的氢氧自由基 $\text{OH}\cdot$ ：



氢氧自由基 $\text{OH}\cdot$ 带有9个电子，因此有一个电子是不配对的。氢氧自由基具有高度活性，可以扩散一定距离，达到细胞中的一个关键靶分子。据认为，这种自由基可以从直径大约为20Å大小的圆柱范围扩散到DNA中去。据统计，X射线对哺乳动物细胞的DNA的损伤，75%是由于氢氧自由基 $\text{OH}\cdot$ 所致，这种间接作用示如图1-3中。

事实上，即使对水，情况也比这复杂得多，而当吸收介质由多种生物介质构成时，情况还要复杂。对X射线的间接作用，从入射光子被吸收直到最后产生生物损伤，整个过程可表述如下：



上述各种事件过程中，作用时间的长短差别很大。离子自由基的寿命大约为  $10^{-13}$ s，自由基的寿命大约为  $10^{-5}$ s，而由化学键破坏到最后形成可见的生物效应，根据反应过程的情况，其时间可达数天、数月、甚至数年。

（胡逸民 译）

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Goodwin PN, Quimby EH, Morgan RH: *Physical Foundations of Radiology*. New York, Harper & Row, 1970
- [ 2 ] Johns HE, Cunningham JR: *The Physics of Radiology*. Springfield, IL, CC Thomas, 1969

## 第二章

### 中子、 $\pi$ 介子和重离子物理学

(THE PHYSICS OF NEUTRON,  
PI-MESONS, AND HEAVY IONS)

#### 中 子

(Neutrons)

中子产生

(Neutron Production)

中子的吸收

(Absorption of Neutrons)

#### 负 $\pi$ 介子

(Negative PI-Mesons)

介子产生

(Production of Pions)

介子的吸收

(Absorption of Pions)

#### 重 离 子

(Heavy Ions)

重离子产生

(Heavy Ion Production)

重离子的吸收

(Absorption of Heavy Ions)

**重粒子与光子的比较**

(Contrast between Heavy Particles and Photons)

**直接作用和间接作用**

(Direct and Indirect Action)



# 中 子

中子替代X射线用于肿瘤的放射治疗，主要依据它的生物学特点，本书第十五章将对这个问题进行讨论。中子（Neutrons）是一种粒子，其质量和质子的相等，并且不带电。由于不带电，中子本身不能直接被加速。

## 中子产生

有三种快中子源可供实际使用。

**裂变中子**（Fission neutrons）：在反应堆中， $^{235}\text{U}$ 裂变可产生能量范围宽的中子。裂变中子的能谱平均大约为1MeV左右，图2-1示裂变中子的典型能谱。可以将裂变中子束通过一个适当的引出窗口引出来。由于裂变中子的能量低，穿透力不够，不能供放射治疗使用。某些原子核，如 $^{252}\text{Cf}$ （Californium-252），发生自发裂变并放出中子和 $\gamma$ 射线的混合束。密封的 $^{252}\text{Cf}$ 中子源是首次能得到的可携带的中子源，并作为镭的替代物作腔内和组织间放射治疗。

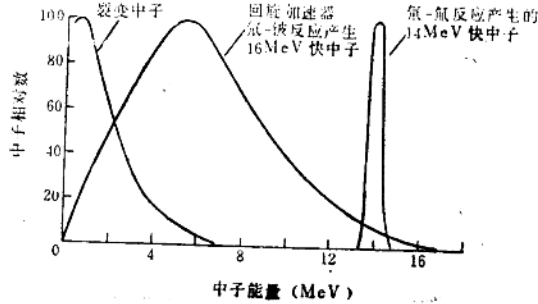


图2-1 三种常见的放射源产生的快中子能谱。裂变中子有一个宽范围的能量，中值能量大约为1 MeV，回旋加速器产生的中子，16 MeV氦核轰击铍靶，产生中子，能量从零到入射氦核的能量，平均能量近似为6MeV。14MeV  $\text{d}^+\text{-T}$ 中子，由加速器的氦核轰击氚靶产生，单能，14或15MeV，与氦核的入射方向有关。

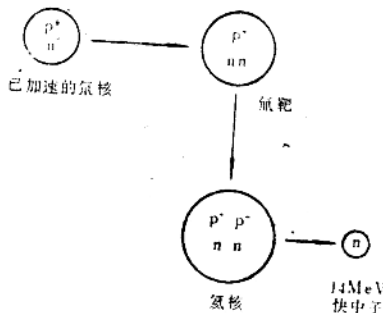


图2-2 氘-氚( $\text{d}^+\text{-T}$ )反应产生14MeV中子。氦核被加速到大约300kV，然后轰击氦靶上，氦核含有一个质子和一个中子，当它与氦核作用时，质子被“剥离”掉，并发射出中子。中子能量为14MeV，比入射的氦核能量大得多，因为氦核受轰击后变成氦核，氦核的结合能比氦核小得多，多余的能量由中子携出。