

放射生物学

放射与放疗学者读本

中文翻译版

原著 Eric J. Hall Amato J. Giaccia

主审 殷蔚伯 龚诒芬

主译 卢 铀 刘青杰

Radiobiology for the Radiologist

原书第7版



科学出版社

中文翻译版

放射生物学

放射与放疗学者读本

Radiobiology for the Radiologist

原书第7版



原著 Eric J. Hall Amato J. Giaccia

主审 殷蔚伯 龚诒芬

主译 卢铀 刘青杰

科学出版社

图字: 01-2014-7926 号

内 容 简 介

本书是美国哥伦比亚大学 Eric J. Hall 和斯坦福大学 Amato J. Giaccia 两位教授合著的《放射生物学——放射与放疗学者读本》第 7 版的中译本。本专著已有多种语言版本, 在欧美等国被视为放射学家的“圣经”, 也是放射生物学研究者、肿瘤放疗医师或专科住院医师的必修教科书。书中用深入浅出的语言详细介绍了整个放射生物学领域的知识, 内容包括辐射的物理化学基础、放射生物学基本概念、生物效应的分子基础、风险评估、辐射防护、肿瘤放疗基础、肿瘤生物学基本理论、肿瘤乏氧、肿瘤动力学、化学治疗等。在第 6 版的基础上, 本书特别增加了一些新的章节内容, 如辐射恐怖袭击和分子影像。此外, 还增加了一些临床试验治疗方法, 如放疗后的再次治疗和热疗。

本书适宜于放射医学相关各领域从业人员, 特别是放射诊断学、放射肿瘤学、核医学、肿瘤放疗学、放射生物学基础、放射病临床、放射防护等领域的医疗、教学、科研人员及相关学科的研究生, 也可作为各领域工作者进行放射医学相关知识培训的重要教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

放射生物学: 放射与放疗学者读本: 第 7 版 / (美) 霍尔 (Hall, E. J.) 等著; 卢铀等译. —北京: 科学出版社, 2015.10

书名原名: Radiobiology for the Radiologist

ISBN 978-7-03-046041-7

I. 放… II. ①霍… ②卢… III. 放射生物学 IV. Q691

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 244691 号

责任编辑: 杨小玲 / 责任校对: 李 影

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 吴朝洪

Eric J. Hall, Amato J. Giaccia.: Radiobiology for the Radiologist, 7e

ISBN 978-1-60831-193-4

Copyright © 2012 by Lippincott Williams & Wilkins, a Wolters Kluwer business. All rights reserved.

This is a Chinese translation published by arrangement with Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer Health, Inc., USA.

本书限中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾) 销售。

本书封面贴有 Wolters Kluwer Health 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书中提到了一些药物的适应证、不良反应和剂量, 它们可能需要根据实际情况进行调整。读者须仔细阅读药品包装盒内的使用说明书, 并遵照医嘱使用, 本书的作者、译者、编辑、出版者和销售商对相应的后果不承担任何法律责任。

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张: 34

字数: 826 000

定价: 280.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《放射生物学——放射与放疗学者读本》
(第7版) 翻译人员名单

主 审 殷蔚伯 龚诒芬

主 译 卢 铀 刘青杰

副主译 谢丛华 刘 强

译者专家委员会 (按姓氏汉语拼音排序)

陈 明	陈德清	高 玲	龚守良
龚诒芬	李峰生	刘 慧	刘 强
刘建香	刘青杰	卢 铀	孙全富
孙新臣	陶祖范	田 梅	田 野
童 建	拓 飞	王 阁	谢丛华
邢力刚	薛建新	曾昭冲	章 真



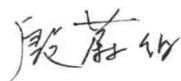
《放射生物学——放射与放疗学者读本》 (第7版) 中文版序

放射生物学是从事放射医学研究和肿瘤放射治疗工作的重要专业基础。由美国哥伦比亚大学的 Eric J. Hall 教授与斯坦福大学的 Amato J. Giaccia 教授合著的 *Radiobiology for the Radiologist* 是放射生物学的一部经典专著, 历经 40 多年, 随着放射生物学研究进展不断更新, 于 2012 年出版了第 7 版。该专著在欧美等国被视为放射生物学研究者、肿瘤放疗医师或专科住院医师培训学习的主要教材。

目前 *Radiobiology for the Radiologist* 在全世界已出版了多种语言译本, 但国内尚没有中文翻译版。应该感谢的是, 在龚诒芬教授的积极沟通协调下, Eric J. Hall 教授、Amato J. Giaccia 教授及 Tom K. Hei 教授为该书中文翻译版的工作提供了大力支持与便利。由卢铀、刘青杰、谢丛华、刘强教授组织联合了国内 20 多位教授组成的翻译团队通力合作, 本着认真负责、科学严谨的态度, 顺利地完成了该专著的

翻译工作。在翻译过程中, 对所发现的一些图文标示与论述句子疑问, 与原著作者及时沟通、辨析, 达成了共识, 使原著作者感受到我国放射生物学和放射肿瘤治疗学领域专家严谨负责的态度。最后, 感谢翻译团队的诸多年轻学者所做出的贡献, 以及薛建新、高玲、仝瑞占为大量图表与文字所做的编校工作。

相信, 科学出版社出版的该专著中译本《放射生物学——放射与放疗学者读本》将极大地方便我国放射专业领域的工作者及研究者, 特别是年轻一代医学生、住院医师及研究生, 他们通过本书可以系统地了解放射生物学经典理论与研究进展, 定会受益匪浅。



中国医学科学院肿瘤医院

2015 年 4 月于北京

推 荐 序

Eric J. Hall 教授出生于英国威尔士南部的 Abertillery, 求学于牛津大学并获得博士学位。1968 年夏天, 他作为英国牛津丘吉尔医院 (Churchill Hospital) 的首席物理学家, 来到美国纽约哥伦比亚大学担任放射学教授。除了从事放疗相关研究工作外, 他从 1969 年秋天开始为放射学和放疗科住院医师授课。1972 年出版的《放射生物学》是以他的授课提纲为基础撰写而成的。时至今日, 该书历经了 6 次改版, 并被翻译成日文、韩文和繁体中文等。2006 年第 6 版出版时, 斯坦福大学的 Amato J. Giaccia 博士开始作为该书的共同作者参与修订。40 多年来, 《放射生物学》已经成为每位美国放射学家的必修教科书和“圣经”, 也是放疗科医生通过放射生物学专业考试并获取职业执照的必备教材。

1982 年冬天, Eric J. Hall 教授邀请我到哥伦比亚大学进行工作面试。很幸运, 在当天晚上我便获聘。这便是我们迄今 32 年既是良师益友、又是合作伙伴的友谊的开始。1997 年, 借北京召开国际放射肿瘤学大会的机会, 我安排了 Eric J. Hall 教授及夫人 Bernice 的首次中国之行。从那时起, 将他的著作译为简体中文版、回馈中国大陆放射学家的想法便越来越迫切。

从 20 世纪 30 年代起, 在许多放射学先驱 (包括梁铎、谢志光、吴桓兴等) 的带领下, 中国放射诊断学和放射肿瘤学有了长足的进展。我衷心期望这本《放射生物学——放射与放疗学者读本》简体中文版的出版, 能够让放射学相关领域的年轻一代医学生和住院医师从中受益。

最后, 不管原著多么经典, 任何教科书的译本质量主要取决于翻译本身。在我的两位大陆著名放射学家朋友——龚诒芬教授 (中国人民解放军军事医学科学院放射与辐射医学研究所) 和殷蔚伯教授 (中国医学科学院肿瘤医院放射肿瘤学系) 的帮助下, 翻译小组由国内多名放射生物学和放射肿瘤治疗学领域的优秀学者组成。经过他们的努力, 完成了内容准确、精湛、忠于原文的第 7 版简体中文版译本。

黑国庆

美国哥伦比亚大学放射肿瘤学教授和副主席

辐射研究中心副主任

环境卫生学教授

中国科学院合肥物质研究院特聘教授

中国苏州大学放射医学与防护学院讲座教授

2015 年 4 月 10 日

简体中文版序

我们兴奋地介绍《放射生物学——放射与放疗学者读本》的简体中文版，它实现了我们多年来的愿望。许多来自中国的学生和博士后研究人员曾在我们哥伦比亚大学和斯坦福大学的实验室工作多年，取得了出色的科学研究成果，然后回国任职。正是在他们的直接鼓励下，本书得以翻译成简体中文并出版。我们感谢翻译、出版本书的中国朋友和同事们，特别要感谢龚诒芬教授，通过与我们的密切联系，她对本书的翻译和出版做出了特殊的贡献。

知识和思想是没有国界的，而且必须跨越国界自由交流，才能使公众尤其是我们的病人受益。本书的多个英文版本由于适合了放射诊断学和放射肿瘤学的发展，获得了令人振奋的成功。物理学家和工程师已在这两个领域研发出了许多的新设备，而放射生物学的重要性就在于提供关键理论和基础概念，使得图像捕获技术能够用于临床治疗。放射学家“轻用影像”，因为他们知道，尽管CT是一种非凡的成像装置，但辐射剂量会带来健康风险。经过两代放射生物学家的努力，放射肿瘤学家现在通常会考虑诸如治疗率、乏氧、 α/β 比值和分子医学等因素的影响。

1972年的第1版仅仅是薄薄的一册。随着

我们在放射生物学效应方面知识的飞速增长，后续的版本中不断增加新的主题并删除过时的内容。近期的版本中有两个最大的改变，第一，Giaccia博士加入了第6版主编，以满足迅速增长的分子生物学研究的需求；第二，在第7版中采用了彩图，从而改进了视觉效果。

本书最初是作为放射科或放射肿瘤科医生和进修学员的讲义。如果它能作为健康科学领域研究生的教材，甚至作为基础科学领域研究人员或资深医生的参考专著，作者将感到双倍的快乐。最后，我们要感谢哥伦比亚大学和斯坦福大学选择我们课程的学生，以及参加美国放射肿瘤学会（ASTRO）和北美放射学会（RSNA）进修课程的学员。他们的探索精神促使我们尽力跟踪最新的动态资料，而他们对不断增长的信息选择性获取的需求，教会我们如何简明扼要地提炼重要的科学知识。

Eric J. Hall

纽约哥伦比亚大学

Amato J. Giaccia

加利福尼亚斯坦福大学

（童建译）

第7版前言

第7版是自本书出版以来变动最大的一版。在第6版的基础上采用了彩图，改进了视觉效果。与此同时，保持了与第6版相同的编排格式，即将全书分为两个部分。第一部分共17章，包括放射生物学绪论和面向放射诊断学与核医学医生的完整课程。采用北美放射学会（RSNA）放射生物学教学大纲的编写格式，内容涵盖了近年来美国放射学会针对放射诊断学医生的笔试考题知识范围。第二部分共11章，内容更为深入，适用于放射肿瘤学医生。

我们生活在一个激动人心、同时也面临风险的时代。核恐怖的威胁时隐时现。如果此类事件发生，将需要具有辐射科学背景的专业人员对暴露个体进行处理。基于这个原因，增加了新的一章辐射恐怖袭击（第14章）。

鉴于分子影像技术在临床上的快速应用，增加了分子影像基础一章，介绍CAT扫描和PET成像的新进展，以及这些技术的基本生物学原理（第15章）。

此外，还增加了一章大多数教科书中没有的内容，即放射治疗复治（第24章）。最近的临床实验表明热疗是一种有效的潜在治疗方法，其详尽的资料被列入第28章。对本书的其他章节也作了修订和更新，以反映最新的观点和进展。

在增加一些新章节的同时，也删除了第6

版中的一些章节。如基因治疗和预测分析两章，因未能获得早先预期的进展而没有继续列入第7版。放射生物学分子技术一章也被删除，因为我们觉得这些分子技术的基本原理可以在本书其他有关章节中进行介绍，而且该章内容与放射诊断或放射治疗医生的相关性也不明确。

本书介绍的内容代表了科学文献中的广泛共识。为了便于连续性阅读，和以前几版一样，第7版的文本页面仍然采用无障碍格式，对脚注或原始出版物用数字标注，以避免对一般读者来说太过详尽的细节。另外，在每章的结尾列有读者希望进一步查阅的广泛而全面的参考资料。

我们将新的第7版本推荐给放射学、核医学和放射肿瘤学的医生，本书专门为他们编写。如果同时它也用作生命科学领域的研究生教材，甚至是基础科学研究人员或资深放射肿瘤学家的放射生物学参考专著，作者将感到双倍的快乐。

Eric J. Hall

纽约哥伦比亚大学

Amato J. Giaccia

加利福尼亚斯坦福大学

2010年10月

（童建译）

第 1 版前言

像许多其他教材一样，本书的内容由一套讲义发展而来。早在 1969 年、1970 年和 1971 年的秋季，在纽约哥伦比亚长老会医学中心曾举办了一系列的讲座，听众主要包括哥伦比亚大学、附属学校和医院的放射科医生，以及纽约市内和周围社会机构的相关人员。

规划一门放射生物学的课程需要在两种考虑之间做出选择。一种是只在少数几个有个人专长的领域进行详尽细致的讲解，另一种是对放射科医生感兴趣的所有领域作深入浅出的介绍。前者对于大学讲师而言轻松自如，但对于渴望知识更新的放射科医生来说，更需要对放射生物学的整体内容作宏观的了解。因此，本书采用了原始讲座的内容框架，它覆盖了与放射学相关的整个放射生物学的知识领域。对于我感兴趣并为之贡献大半生的学科领域，我尽量避免宗教式的传布，同时对于并非我专长或熟悉的学科领域，也尽可能收集和纳入最新的科学知识。

本书专为放射科医师设计和编写，特别是为那些具有不断进取精神，或因需要通过考试的实际目标而选择放射生物学基础课程的放射科医生。它也可以作为生命科学领域的研究生教材，或作为其他专业领域研究人员的放射生物学参考专著。这当然是作者的理想目标，但本书最重要的功能，还是作为放射学专业学生的教材。

放射学并不是一个单一的学科。从事诊断和治疗的放射科医生对知识侧面的需求并不完全相同。事实上，他们同时选择物理学或放射生物学的原因，常常是由于课程设置的历史和便利等方面的因素。本书的大部分内容会引起所有放射科医生的关注和兴趣。第 11~13 章有关辐射事故、迟发效应和胚胎与胎儿照射的内容特别适合放射诊断医生；第 8、9、15 和 16 章专门为放射治疗医生设置，放射诊断医生可以忽略这些章节但并不影响整书内容的连续性。

参考材料以字母顺序排列。作者认为本书介绍的内容代表了科学文献中共同的认识。为了便于连续性阅读，文本没有大量直接引用文献，而是选择在各章末尾列出读者希望进一步查阅的参考资料。

希望借本书感谢我以前在牛津和现在在哥伦比亚的同事，与他们的日常讨论和激烈争论是本书框架和观点形成的基础。

最后，要感谢选择参加我课程的年轻学生。他们的探索性询问促使我不断学习和认真授课。每当看到学生们的知识增长和理念成熟，我感到作为一个教师的满足和喜悦。他们的成长是对我努力的一种回报。

Eric J. Hall

1972 年 7 月于纽约

(童建译)

致 谢

感谢许多朋友和同事慷慨许可本书复制他们已发表著作中的图表和插图。

尽管作者对本书的内容负有最终的责任，但仍然要感谢对那些曾对本书章节给过专业支持和宝贵建议的朋友。随着本书不断的再版，这些朋友的名单变得越来越长，他们是：

Ged Adams, Philip Alderson, Sally Amundson, Joel Bedford, Roger Berry, Max Boone, Victor Bond, David Brenner, J. Martin Brown, Ed Bump, Denise Chan, Julie Choi, James Cox, Nicholas Denko, Bill Dewey, Mark Dewhirst, Frank Ellis, Peter Esser, Stan Field, Greg Freyer, Charles Geard, Eugene Gerner, Julian Gibbs, George Hahn, Simon Hall, Ester Hammond, Tom Hei, Robert Kallman, Richard Kolesnick, Adam Krieg, Dennis Leeper, Howard Lieberman, Philip Lorio, Edmund Malaise, Gillies McKenna, Mortimer Mendelsohn, George Merriam, Noelle Metting, Jim Mitchell, Anthony Nias, Ray Oliver, Stanley Order, Tej Pandita, Marianne Powell, Simon Powell, Julian Preston, Elaine Ron, Harald Rossi, Robert Rugh, Chang Song, Fiona Stewart, Robert Sutherland, Roy Tishler, Len Tolmach, Liz Travis, Lou

Wagner, John Ward, Barry Winston, Rod Withers 和 Basil Worgul。特别要感谢 Dr. Ted Graves 博士对第 14 章分子成像的建设性构思和 Elizabeth Repasky 博士对第 28 章热疗的修改。他们的帮助使本书增色不少。

本书前几版的主要教学对象包括哥伦比亚大学和斯坦福大学放射学、放射肿瘤学和核医学的医生，以及 ASTRO 和 RSNA 进修课程的学生。他们的敏锐思维和探索询问不断促使我们改进。他们对放射生物学和医学继续教育知识的渴望一直是激励我们总结提高的动力。

由衷感谢美国能源部、国家癌症研究所和国家航空航天局对我们及本书涉及的其他研究工作者的慷慨支持。

我们尤其感谢 Sharon Clarke 女士，她在格式编辑和文字校对方面做了大量的工作。出版商 Ryan Shaw 指导了每个阶段的工作并帮助更新了许多图表。

最后，感谢我们的妻子 Bernice Hall 和 Jeanne Giaccia，她们是本书得以出版的最为耐心的鼓励者。

(童建译)

目 录

《放射生物学——放射与放疗学者读本》(第7版)中文版序

推荐序

简体中文版序

第7版前言

第1版前言

致谢

第一部分

适合于放射诊断学、核医学和肿瘤放疗学的学生阅读

第1章 辐射吸收的物理和化学基础	3
第2章 DNA和染色体损伤及修复的分子机制	11
第3章 细胞存活曲线	31
第4章 有丝分裂周期中的辐射敏感性和细胞分期	49
第5章 分割照射和剂量率效应	61
第6章 氧效应和再氧合	79
第7章 传能线密度及相对生物效能	95
第8章 急性辐射综合征	105
第9章 辐射防护剂	119
第10章 辐射致癌	125
第11章 辐射的遗传效应	149
第12章 电离辐射对胚胎和胎儿的影响	163
第13章 放射性白内障	176
第14章 辐射恐怖袭击	181
第15章 分子影像	189
第16章 诊断放射学、介入放射学与心脏病学和核医学的剂量及风险	208
第17章 辐射防护	238

第二部分

适合于肿瘤放疗学的学生阅读

第18章 肿瘤生物学	257
------------	-----

第 19 章 正常组织模型的剂量 - 反应关系	287
第 20 章 正常组织的临床反应	310
第 21 章 实验肿瘤模型及其分析方法	337
第 22 章 细胞、组织和肿瘤动力学	352
第 23 章 放射治疗中的时间、剂量和分割	371
第 24 章 放疗后的再次治疗：可能性及风险	391
第 25 章 其他放疗模式	399
第 26 章 肿瘤乏氧的生物学及其应用	412
第 27 章 从放射生物学家的角度审视化学治疗药物	429
第 28 章 热疗	462
专业名词	482
中文索引	519

SECTION I

第一部分

适合于放射诊断学、核医学和肿瘤
放疗学的学生阅读

第一节 电离辐射的类型

- 一、电磁辐射
- 二、粒子辐射

第二节 X射线的吸收

第三节 辐射的直接作用和间接作用

第四节 中子、质子和重离子的吸收

本章知识要点

参考文献

1895年，德国物理学家威尔姆·康拉德·伦琴（Wilhelm Conrad Röntgen）发现了一种气体放线管中发出的新射线，该射线能够使置于避光容器中的感光胶片变黑。在1895年12月的报告中他首次将这些射线称为“X射线（X-ray）”，其中X代表“未知的”。在一次公开演讲时，为了展示X射线的特性，伦琴请瑞士著名解剖学家鲁道夫·艾伯特·克里克（Rudolf Albert von Kölliker）将他的手放在射线束下，第一次得到了公开拍下的X射线照片（图1-1）。

1896年1月23日出版的《柳叶刀》杂志报道了X射线的首次医学应用。在此报道中，X射线被用来定位酗酒水手脊椎上的刀片，在X射线定位下移除刀片后该水手的瘫痪得以改善。这种新技术很快传遍欧洲和美国，放射诊断学随之诞生。对于谁最先将X射线用于治疗还有争议。1896年，奥地利外科医生利奥波德·弗罗德（Leopold Freund），比维也纳医学会更早证明了X射线照射使毛痣消失的情况。1896年安东尼·亨利·贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel）发现了铀化合物具有放射活性，2年后皮埃尔·居里和玛丽·居里夫妇分离出放射活性元素钋和镭。在随后几年内，镭被用于肿瘤的治疗。

最早记录放射生物效应的是贝克勒尔，他无意中将装镭的容器遗留在自己的马甲口袋里。2周后他的皮肤出现红斑，然后产生溃疡并且

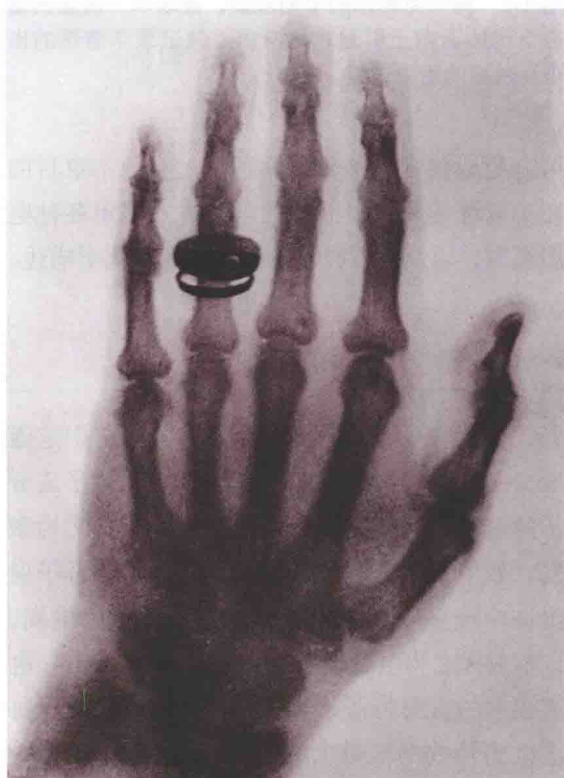


图1-1 1896年1月，在发现X射线仅几个月后，第一张活体射线成像照片问世（由德国 Würzburg 伦琴博物馆提供）

用了几周才治愈。据说皮埃尔·居里在1901年重复了这个实验，故意用镭在自己的前臂上引起“烧伤”（图1-2）。20世纪初，从这些早期发现开始，放射生物学研究被开启。

放射生物学（radiobiology）是研究电离辐射对生物体作用的学科。因此，放射生物学不



图 1-2 据贝克勒尔的早期观察，皮埃尔·居里用镭在自己的前臂上引起辐射溃疡。他记录了溃疡的出现和随后的治愈过程

可避免地包含一些辐射物理学过程。本章目的在于以综述和最少涉及数学的方式展示各种电离辐射，以及辐射吸收过程的物理和化学描述。

■ 第一节 电离辐射的类型

辐射在生物材料中的能量吸收可以引起激发 (excitation) 或电离 (ionization)。原子或分子的电子跃迁到高能态而不射出电子称之为激发。如果辐射具有足够的能量使原子或分子射出一个或多个轨道电子，此过程被称为电离，该辐射称之为电离辐射 (ionizing radiation)。电离辐射的重要特征是大量能量的局部释放，每次电离释放的能量大约是 33 eV，足够破坏一个强化学键。例如，C=C 键含有的能量是 4.9 eV。为了方便起见，通常将电离辐射分为电磁辐射和粒子辐射。

一、电磁辐射

生物系统的大多数实验都涉及两种类型的电磁辐射 (electromagnetic radiation)：X 射线或 γ 射线。X 射线和 γ 射线在本质或特性上是相同的，两者名称的差别是因为产生途径不同：X 射线产生于原子核外部； γ 射线产生于

原子核内部，实际上这意味着通过电子装置可以产生 X 射线。这样的电子装置能够加速电子使其到达高能态，然后通常用钨靶或金靶突然中止高能电子，电子的部分能量 (动能) 便转化为 X 射线。反过来， γ 射线产生于放射性核素。当不稳定的原子核裂变直至稳定状态时释放多余的能量转化为 γ 射线。地球上来自岩石的天然本底辐射也包括 γ 射线。本章中关于 X 射线的所有阐述同样适用于 γ 射线。

可以从两种不同的观点来理解 X 射线。第一种观点，可以认为 X 射线是电磁波。磁场和电场在互成直角的平面上，随时间变化，以像波浪一样的方式移动。这就像往池塘中抛下一块石头后水面泛起的涟漪。电磁波的移动速度用 c 表示，真空中 c 的值等于 3×10^{10} cm/s。相邻波峰间的距离为波长，用 λ 表示。每秒通过固定点的波数为频率，用 ν 表示。频率乘以波长得出波速，即 $\lambda\nu = c$ 。

做个普遍且简单的类比，波长就像人走路时的步幅，每分钟的步数便是频率。步幅的长度乘以每分钟的步数得出人走路的速度。

与 X 射线一样，无线电波、雷达、热辐射及可见光都是电磁辐射。它们具有同样的速度 c ，但具有不同的波长，因此频率也不同。延伸之前的类比，不同的辐射就像一群人，身材高矮不同，所有人以同样的速度行走。身材高的人步幅长但每分钟步频少，为了能跟上速度，步幅短的矮个子就得增加步频数。无线电波的相邻波峰间的距离 (波长) 是 300 m，可见光的波长大约是 5×10^{-5} cm，X 射线的波长大约是 10^{-8} cm。X 射线和 γ 射线处于电磁波谱末端的短波范围 (图 1-3)。

第二种观点，认为 X 射线是光子流或能量束。每个能量束包含的能量等于 $h\nu$ ，其中 h 是普朗克常数 (Planck's constant)， ν 是频率。如果一种辐射是长波长及低频率，则每个光子的能量就很小。相反地，如果一种辐射具有短波长和高频率，则每个光子的能量就很大。光子