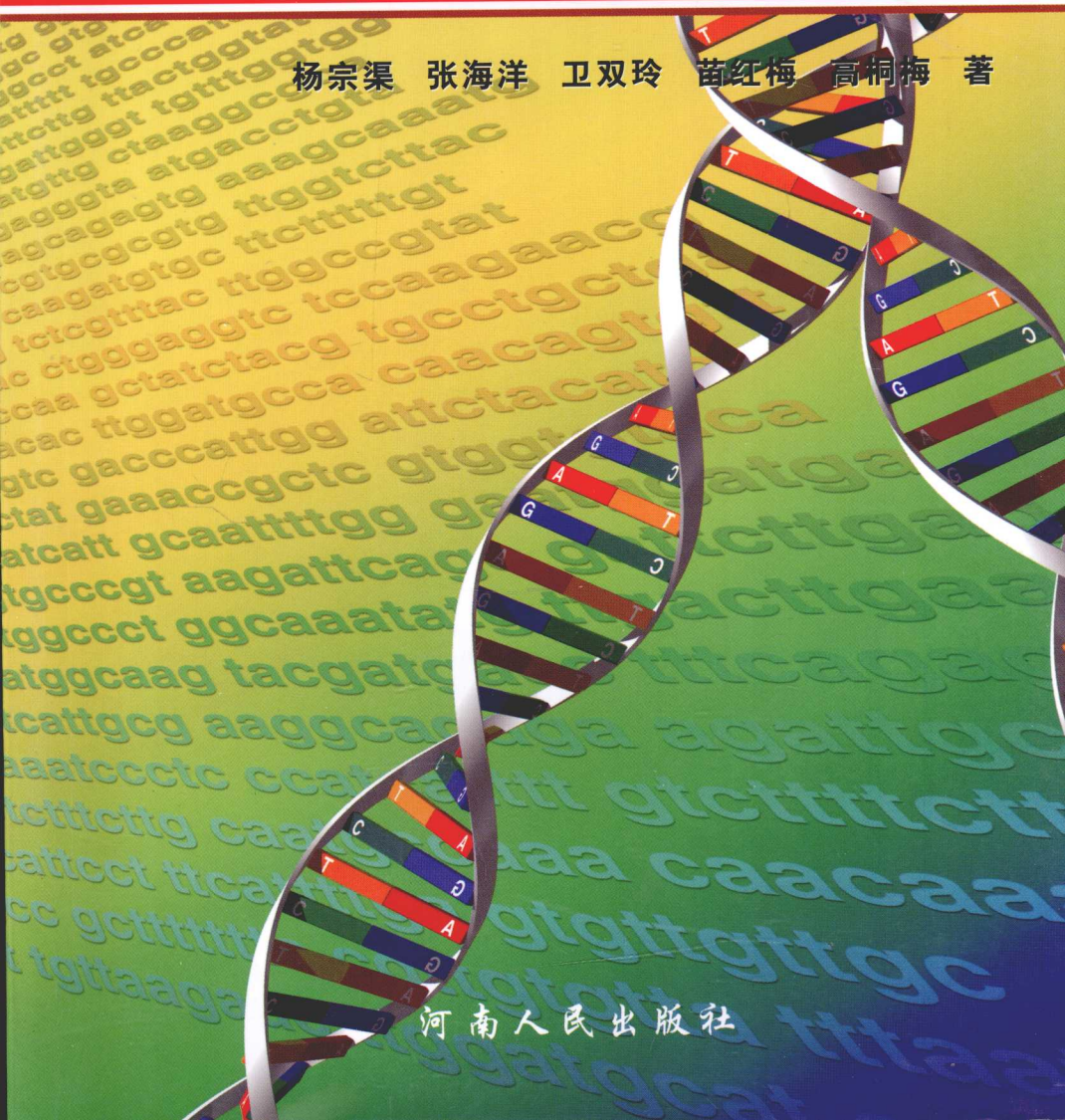


辐射生物学原理 及其应用

杨宗渠 张海洋 卫双玲 苗红梅 高桐梅 著



河南人民出版社

辐射生物学原理及其应用

杨宗渠 张海洋 卫双玲 苗红梅 高桐梅 著

河南人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

辐射生物学原理及其应用/杨宗渠等著. — 郑州:河南人民出版社, 2009. 8
ISBN 978 - 7 - 215 - 06923 - 7

I. 辐… II. 杨… III. 放射生物学—高等学校—教材
IV. Q691

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 089095 号

河南人民出版社出版发行

(地址:郑州市经五路 66 号 邮政编码:450002 电话:65788036)

新华书店经销 河南文达印刷公司印刷

开本 890 毫米×1240 毫米 1/32 印张 11.5

字数 310 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

内 容 提 要

本书是根据国内外有关文献资料和作者的部分研究成果编写而成。

本书系统地阐述了辐射生物学原理及其在植物辐射诱变育种和食品辐射保藏中的应用。全书共分三篇，内容包括：辐射生物学效应的原初过程、辐射化学基础、辐射对核酸的影响和辐射的细胞学效应，植物辐射诱变的理论与技术，食品辐射保藏的生物学效应及辐照工艺。

本书可供从事辐射生物学、遗传育种学、食品保鲜等应用研究的人员参考，对大专院校有关专业的师生也有一定参考价值。

前言

在 1895 年 Roentgen 发现 X 射线和 1896 年 Becquerel 发现天然放射性之后,核辐射的生物学效应立即引起了科学家们的关注。随着核辐射在医学、农业、核科研等方面应用的发展,辐射生物学在 20 世纪初期就逐渐形成为一门独立的学科。辐射生物学是核技术与生物学相结合产生的一门综合性很强的边缘学科,主要研究辐射对生物体的作用规律和机理,观察不同质的射线照射后的各种生物效应及不同内、外因素对生物效应的影响,范围涉及射线对生物体作用的原初反应及其以后一系列的物理、化学和生物学方面的改变。近年,物理学、化学、生理学、生物化学、生物物理学等相关学科,特别是分子生物学、分子遗传学和生物工程学的发展,对辐射生物学的发展起到了重大的推动作用,使这门基础学科取得了重要进展,并渗透到农业科学的许多研究领域,在改造传统农业、促进农业可持续发展中发挥着越来越重要的作用。

辐射诱变育种和辐射保藏是以辐射生物学为理论基础发展起来的应用技术,经过半个世纪的发展,形成了较为完整的技术体系,有关研究成果的应用产生了巨大的经济效益、社会效益和生态效益。辐射诱变育种已成为植物遗传改良中一种独特的技术手段,至 2002 年年底,我国利用辐射诱变或与其他育种技术相结合,在 40 余种植物上累计育成品种 630 多个,超过世界各国辐射诱变育成品种总数的 1/4,年种植面积约占我国各类作物种植面积的 10%,每年为国家增产粮棉油 $3.3 \times 10^9 \sim 4.0 \times 10^9 \text{kg}$ 。IAEA 原副总干事来华参观后说,中国在诱变育种上所取得的成绩是世界领先的。食品辐射保藏为农民增收、农产品增效、提高食品安全性和改善品质提供了新的技术方法,农产品辐照加

工已从简单的辐照保鲜向多用途、深层次发展,如延迟成熟或生理生长、抑制发芽、延长货架期、除虫、灭菌及微生物控制、检疫病虫害控制、为病人提供无菌食品等,年产值达数十亿元。FAO/IAEA 联合处原食品辐照和环境保护科负责人 P.Loakaranu 指出,中国是核大国,也是食品辐照保鲜技术的应用大国。2004 年,IAEA 在《中国增加对 IAEA 发展和安全主动性的支持》一文中指出:中国用世界 7% 的耕地养活着世界 60 多亿人口中的近 1/4,在这一成就中,核科学和技术包括诱变育种、核素示踪技术以及食品辐照加工,将继续发挥至关重要的作用。

为了适应辐射生物学研究工作的需要,提高我国辐射诱变育种和辐射保藏研究与应用水平,作者参阅了国内外相关文献,结合自己二十余年的相关研究成果,撰写了此书。本书共分 3 篇 18 章,第一篇为辐射生物学原理,包括辐射生物学的物理和化学基础,细胞存活曲线与靶学说;辐射对核酸的影响,DNA 损伤与修复和辐射的细胞学效应;第二篇介绍植物辐射诱变育种,包括植物的辐射敏感性,辐射后代的生理损伤与突变体的形成,辐射诱发的植物性状变异及其遗传特点,植物的辐射诱变技术和突变体选择的程序与方法;第三篇为食品辐照保藏,阐述食品辐照装置,辐射对食品的生物化学效应和生物学效应,辐照食品的卫生安全性及食品辐照工艺。本书可供农业大专院校、科研单位和从事植物辐射诱变育种和食品辐照保藏的科技人员参考。

本书的出版,由国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助,得到了河南省芝麻研究中心和郑州师范高等专科学校等单位的大力支持,在此一并表示诚挚的谢意。

限于著者的学识水平,本书内容错漏之处在所难免,敬请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2009 年 3 月

目 录

第一篇 辐射生物学原理	1
第一章 概述	1
第二章 辐射生物学的物理和化学基础	7
第三章 细胞存活曲线与靶学说	44
第四章 辐射对核酸的影响	54
第五章 DNA 损伤与修复	67
第六章 辐射的细胞学效应	95
第二篇 植物辐射诱变育种	114
第一章 植物辐射诱变育种简史、成就和发展	114
第二章 植物的辐射敏感性	125
第三章 辐射后代的生理损伤与突变体的形成	139
第四章 辐射诱发的植物性状变异及其遗传特点	150
第五章 植物的辐射诱变技术	166
第六章 突变体选择的程序与方法	191

第三篇 食品辐射保藏	216
第一章 食品辐射保藏的发展现状与前景	216
第二章 食品辐照装置	227
第三章 辐射对食品的生物化学效应	233
第四章 食品的辐射生物学效应	260
第五章 辐照食品的卫生安全性	295
第六章 食品的辐照工艺	308
参考文献	326

第一篇 辐射生物学原理

第一章 概 述

辐射生物学是研究电离辐射生物效应的学科。电离辐射是高能辐射,当它与物质相作用时,能形成电离。与其他低能辐射(如可见光、紫外光、电磁波和微波等)相比,它的作用要强烈得多。辐射生物学专门研究高能辐射(主要包括 X 射线、 γ 射线、 α 射线、 β 射线、中子等)对生物体的作用规律和机制。

辐射生物学是一门边缘学科,它涉及物理学、化学以及几乎整个生物学的各个领域。研究辐射生物效应可以从不同的角度和在不同的水平上进行,可以从物理学角度研究生物体对辐射能的吸收过程,也可从化学方面研究辐射能导致的生物大分子结构的破坏和功能的钝化,当然,更多的还是从生物学角度的研究,它可以在分子水平、亚显微水平、细胞水平以及整体水平上进行研究。所涉及的研究对象,从病毒直至哺乳动物和高等植物,几乎无所不包。

一、辐射生物学发展历史和任务

地球上存在天然放射性。在生命的形成以及生物从低等到高等的整个进化过程中,射线始终作为所有生物机体的环境因子而存在。这种放射性强度极低的天然放射性以及它对生物体可能引起的影响,一直未被人们所注意。

人们有意识地去研究射线的生物学效应是在 1895 年 Roentgen 发现 X 射线和 1896 年 Becquerel 发现放射性现象以及 Curie 分离出镭元素以后。实际上,第一个观察到射线生物学效应的就是 Becquerel 本人,一块镭制备物放在他自己上衣口袋里而引起皮肤红肿,其形状与制备物形状相似而且很不容易恢复,从而引起了 he 及其他人的注意。许多科学

家出于好奇,经常用 X 射线透视自己的手而引起皮肤上的变化。1899 年开始用 X 射线治疗皮肤癌,但后来又发现,X 射线还能导致皮肤癌。所有这一切引起了大家的兴趣,从而开始了辐射生物学研究。初期阶段研究的特点是着重于辐射生物效应的形态学描述,积累了大量的实验资料。同时,随着人们接触放射性和射线机会的增加,就更加加强了这方面研究的迫切性,特别是在放射病的研究上更为突出。这个阶段的研究属于定性辐射生物学时期。

20 世纪 20 年代开始了定量辐射生物学时期。促使定量研究的主要原因是射线遗传效应的发现和物理学,特别是量子力学的发展。上个时期研究中获得的规律性的现象,特别是剂量效应曲线,用量子力学的概念得到了合理的解释。许多物理学家参与了这方面的研究,作出了卓越的贡献。在 1946 和 1947 年期间,Lea、Timofeeff—Ressovsky 和 Zimmer 等人在大量研究基础上写出了专著,建立了直接作用和间接作用学说,提出了靶理论,完成了射线生物效应的基本理论研究,使辐射生物学成为一门独立的科学。Muller(1927)在果蝇和 Stadler(1928)在玉米、大麦上发现 X 射线诱发的遗传效应属于“全或无”事件,为辐射生物学的定量研究提供了最适当的方法。此外,1942 年建立起第一个原子反应堆以后,就具有了比 X 射线更方便和更强大的放射源,无疑对辐射生物学的发展起了推动作用。1953 年以后开始了分子辐射生物学时期。Crick 和 Watson 的 DNA 模型的建立促进了分子生物学的发展,对辐射生物学的发展也不例外,使它进入了分子水平的研究阶段。世界上的生物从低等到高等千差万别,但是在分子水平上可以找到它们之间的共同基础。对辐射生物效应的研究也只有在分子水平才能解释其最基本的现象,建立更普遍的理论体系。分子辐射生物学的任务是研究导致生物高分子损伤的物理过程和化学过程以及从分子变化的角度来说明辐射的生物学效应。目前,已有许多证据表明,DNA 是生物的靶分子,它对生物的极其不同的辐射敏感性起着决定性的作用。辐射生物学中长期存在的一些问题,在分子水平上得到了合理的解释。

辐射生物学不仅是生物学的一个分支,而且也是整个原子能科学的一个组成部分。辐射生物学作为一门独立的学科,有它本身完整的理论

体系,它提出了一系列需要回答的问题,其中最主要的是辐射生物效应的原发过程,亦即辐射能作用于生物机体后一秒钟内所发生的那些过程。近年对辐射作用的原发过程的研究虽然有了较大的进展,但对它的了解不能说是已经圆满地解决了。目前,对这个问题研究的最大障碍是来自实验技术上的困难。

辐射生物学是原子能科学的一个组成部分,它是作为核技术在理、工、农、医等方面广泛应用的一个重要基础,也是作为在原子能事业发展过程中人们对放射线进行防护的一个重要基础。这两个重要基础都要建立在人们对辐射生物学效应的深入研究上。所以,可以说辐射生物学的研究有助于促进整个原子能事业的发展。

原子能在农业上的应用极其广泛,它涉及大农业的各个领域,而且已经对生产作出了很大的贡献。原子能对农业生产的贡献包括:培育优良品种,改进栽培措施;防治和防御各种自然灾害,使种植业和饲养业稳产高产,保证质量,使农畜产品达到较高的利用效率。而这些方面的应用都以辐射生物学作为其理论基础。随着辐射生物学研究的进展,原子能在农业上的应用会向深度和广度发展。反过来,应用的发展也向辐射生物学提出了一些亟待解决的问题,促进辐射生物学研究的深入发展。

二、辐射生物学效应的发生过程

生物机体从吸收辐射能到表现出最终的生物效应(如死亡、突变、生长抑制、各种病变等)需要经过一个发展过程。在辐射生物学研究历史中,许多研究者试图用图解的办法来描绘这个发展过程。辐射生物学作用的时相阶段,把整个发展过程区分为四个阶段,即:物理阶段、物理—化学阶段、化学阶段和生物学阶段。

物理阶段 能量从辐射传递到生物物质,并呈极度不均匀的空间分布,导致分子的激发和电离。这些辐射的原初产物极不稳定,会迅速地与其邻近分子相碰撞而产生反应活跃的次级产物。辐射能的吸收有两个途径,即通过生物分子的直接吸收和通过“环境”的间接吸收。这是两种极其不同的途径,在辐射生物学研究具有重要意义。

物理—化学阶段 经过一次反应或连续的多次反应形成原初的分

子损伤和扩散的自由基,并通过能量的重排最后达到热平衡状态。

化学阶段 一些活产物(主要是自由基)继续互相反应并和它们周围的生物分子反应,形成生物自由基,通过进一步的继发反应,生物分子发生变化。

生物学阶段 发生变化的生物分子通过机体的代谢作用,使损伤得以“扩大”,从而表现出可见的生物损伤。

辐射生物学作用的时间范围至少要跨越 26 个数量级。但是,这个时间范围只是在数量级上的估计,它的特征是每个阶段比它的下一阶段的时间要短,而每个阶段的真正持续时间主要依赖于受照射的系统。例如,在干燥系统中,由于分子内能量传递引起原初损伤的位置变化,以及所产生的生物自由基的各种反应,可以延长到几分钟或几小时。又如在液氮温度下的照射系统,这个时间范围可延长到几天甚至几个星期。对于不同种类的生物,在生物阶段所需的持续时间也有很大差别,越是简单的生物持续时间越短,而高等生物的持续时间就长得得多。

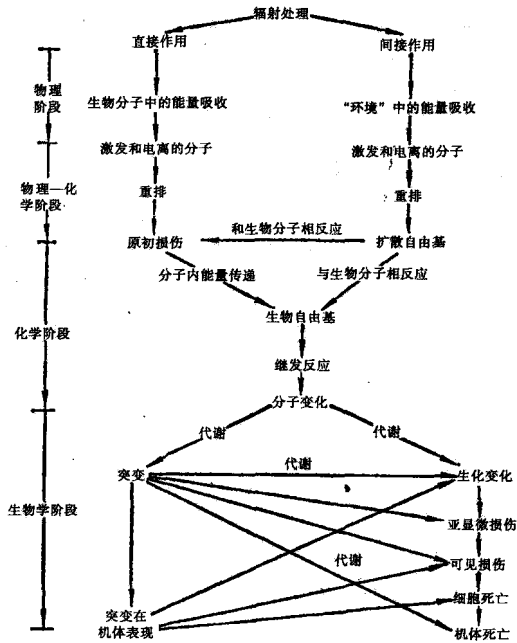


图 1-1-1 辐射作用的时相阶段

对于辐射生物学作用的四个发展阶段,应注意下列几个问题:

(1)生物分子的损伤是导致最终生物效应(如致死、突变等)的中心环节。机体在吸收辐射能量后,经历物理、物理—化学和化学阶段的反应,其结果是造成生物分子的损伤,由此再进一步发展成为可见的生物学损伤。当然其中重要的是那些生物大分子的损伤,而核酸的损伤则处于中心地位。分子生物学的进展和辐射生物学研究本身都证明了这个看法的正确性。近代分子生物学研究表明,在形形色色的生物体之间在分子水平上的差别不如宏观的(即细胞和组织)差别来得显著。由DNA的碱基对次序所决定的遗传密码在生物界的普遍性就是一个很好的证明。从分子水平可以对生物的普遍原理作出合理的解释。同样可以认为,分子辐射生物学所占的地位,相似于分子生物学在整个生物学中所占的位置。只有从分子水平才能合理地说明辐射生物效应的本质。

(2)机体代谢是由分子损伤发展到最终生物效应的必经之路。由分子损伤到最终生物效应之间的每个步骤,都是通过代谢来完成的。代谢在机体中是个有序过程,在时间和空间上都是有序的。辐射只要使其中一个环节受到损伤,就会使代谢过程产生紊乱或中断,从而显现出某种生物效应。在辐射生物学研究的早期,就已注意到代谢在辐射生物效应发展中的重要作用。这也就是辐射生物效应与辐射化学反应的根本区别。

(3)最终生物效应是辐射损伤与修复的统一。在辐射损伤的整个发展过程中,始终存在着修复过程。在辐射生物学研究早期,对修复过程的重要性没有引起重视,普遍承认辐射生物效应的不可逆性。近年的研究证明,修复在辐射生物效应的发展中占有重要地位,突变的产生就是由于DNA损伤后错误修复的结果,对修复的研究不但有助于阐明辐射生物学中的基本问题,而且还可能在解释生命活动的基本进程中起积极作用。

(4)关于辐射生物效应发展过程中物理阶段、物理—化学阶段和化学阶段的研究主要是在模拟系统上进行的。由于实验技术和测量方法上的原因,目前还很难对生物机体(尤其是高等生物)在这几个阶段所产生的过程进行直接的观察和测量,多数只能采用生物大分子的水溶液系统。有时还需要在极低温度下进行工作。在这方面,电子自旋共振(ESR)

技术具有特殊的重要性,借助于这个方法,能够测量原初自由基的产生。对于受损伤分子的定性和定量的分析,可以采用一些常规的技术,如测定黏度、沉降率和吸收光谱等。用模拟的实验结果来解释整体的生物效应需要持比较慎重的态度。

各个发展阶段的所有反应步骤一向被认为是辐射生物学研究的全部内容,彻底阐明这些反应步骤是辐射生物学研究的最终目的。

三、辐射生物学效应的基本特点

电离辐射属高能辐射,在与生物机体的作用方式上不同于其他辐射,也不同于化学药物,它具有一些明显的特点,其中最突出的特点是无阈值和高效率。人们早就注意到,电离辐射的剂量效应曲线与化学药剂的剂量效应曲线之间有着很大的差异。其中最重要的是药物作用存在一个阈值剂量,在阈值剂量以下就观察不到致死效应。当药物剂量提高到这个阈值限度以上,死亡率也就急剧上升。而曲线的斜率取决于所研究的生物系统中耐药性的变差。辐射的剂量效应曲线通过坐标原点,即便在很小的剂量作用下也会表现出一般效应,表明不存在阈值剂量。曲线随着辐射剂量的增加而逐渐升高。

辐射生物效应的另一个重要特点是辐射能量的高效率。有机体吸收较少的辐射能量却能产生极其严重的后果。人的半致死剂量(LD_{50})为 3~5Gy,仅能使体温上升千分之一度,约等于热致死能量的 $1/10^5 \sim 1/10^4$,从能量观点来看,辐射致死效率要比热高出 $10^4 \sim 10^5$ 倍。根据辐射物理和辐射化学的基本知识可以知道, $5 \times 10^5 R$ 照射量可在 $1 \mu g$ 组织中产生 10^6 个离子,而 $1 \mu g$ 的组织中具有 10^{11} 个原子,可见在 $5 \times 10^5 R$ 这样高的照射量下仅能使很少一部分的原子和分子产生变化,但是, $5 \times 10^5 R$ 几乎可以使任何生物死亡。为什么较少的原发损伤的原子和分子能导致机体的死亡呢?这主要与射线的作用方式,能量的分布以及机体本身的特点有关。

第二章 辐射生物学的物理和化学基础

一、辐射生物学的物理基础

德国物理学家 Roentgen 在做电子管实验时,发现一种人眼看不见,但具有很强穿透能力的射线,所以就记录为“X”射线,后来进一步研究得知它是由高速电子打在阳极上产生的,这就是现在射线装置的雏形。此后,Becquerel 又发现了天然元素自发发射的射线,能使暗盒内的胶片感光,这即天然放射性的发现。经过一个世纪的发展,放射性已广泛地应用到工农业生产、日常生活等方面。

放射性是一个重要的物质特性。它是指具有一定能量的波粒两相性束流。量子力学及核物理中,将只具有能量(动态质量)而不具有静止质量的能束,如 X 射线、 γ 射线等也视为量子,即光子。光子辐射实质上是电磁波的一部分,它在光谱中的位置处于高频端,即紫外线以上。能引起物质电离的放射性束流,被称为电离辐射。常见的电离辐射有: α 、 β 、 γ 、X、中子、质子、电子、介子等。电离辐射可分为天然辐射和人工辐射两大类。来自天然辐射源的电离辐射称为天然电离辐射,来自人工辐射源或加工过的天然辐射源的电离辐射称为人工辐射。

原子构成了物质的世界,自然界中一切物质都是由原子组成的。原子是用化学方法不能再分的最小单位。具有相同质子数的同一类原子被称为元素。到目前为止,人类已发现了 109 种元素,它们按一定的特性被排成所谓门捷列夫周期表。

但是原子并不是物质的最终不能再分的最小单位。到 19 世纪末期,由于 X 射线、放射性和电子这三大发现,认识到原子有一个复杂的结构。1911 年,英国物理学家卢瑟福提出了原子壳层模型,认为原子质量绝大部分集中在一个带有正电荷而直径仅为 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{m}$ 的原子核中。另外,有与核内正电荷数相同的电子,在离原子核 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{m}$ 的区域内,按一定规律排列,并在轨道上运动。原子的直径为 10^{-10}m 数量级,原

子核的直径约为 10^{-15}m 数量级,它只占原子体积的几千亿分之一,可它的质量占整个原子质量的 99.9% 以上。

原子中的每个电子都有它自己的固定轨道,若干个轨道组成一个壳层。最靠近核的壳层称为 K 壳层,由内向外依次为 K、L、M、N、O、P、Q 壳层。每一壳层中可容纳的电子数目是有限的。不同壳层上的电子所具有的能量是不同的。处于 K 壳层上的电子能量最低,越往外面的壳层,其电子的能量越高。在正常情况下,原子中的电子总是先占据能量较低的轨道。当然,这种轨道只是一种形象的名称,实际上电子的运动很复杂,与宏观的轨道不同。在没有外来的能量干扰的正常情况下,这些电子在轨道上运动时,既不吸收也不放出能量,此时原子处于稳定的基态。

原子核由质子和中子组成,通常把质子和中子统称为核子。核子之间由被称为核能的强相互作用的基本力约束在一起,它们具有自己的能级势垒和自旋磁矩,分离它们或聚合它们都需要一定的能量,在有些情况下分离或聚合它们又会发生连锁反应,核能和核爆炸就是利用了它们的这一特性。

质子的质量相当于氢原子核,静止质量为 1.00782504u (u 是原子质量单位的符号, $1\text{u}=1.6605402\times 10^{-27}\text{kg}$)。质子有一个单位的正电荷 ($1.60217733\times 10^{-19}\text{C}$)。中子是不带电的中性粒子,其质量与质子近似相等,它的静止质量为 1.008664904u 。根据原子核所带正电荷的电量,可以确定核内的质子数。核内质子数用符号 Z 表示,称为核电荷数,亦即元素在周期表中的原子序数。各种元素的原子中,正常情况下,核内质子数和核外电子数相等,故整个原子呈电中性。

有些原子核自身很不稳定,尤其是核子数较多的重核,它们会自发地发射核子(包括光子),而转变成另一种核素或改变自己的能态。具有这种性质的核素被称为放射性同位素。现在知道,有许多天然的和人工生产的核素都能自发地发射各种射线。有的发射 α 射线,有的发射 β 射线,有的发射 α 或 β 射线的同时也发射 γ 射线,有的 3 种射线均有。此外,还有发射正电子、质子、中子等其他粒子的。原来,放射性现象是由原子核的变化引起的,与核外电子状态无关。

一种原子核自发发射出粒子而改变性质的过程叫做核衰变。放射性
与原子核衰变密切相关。衰变形式包括：

(1) α 衰变 原子核自发地放射出 α 粒子而发生转变，叫做 α 衰变。在 α 衰变中，衰变后的剩余核(通常叫子核)与衰变前的原子核(通常叫母核)相比，电荷数减少 2，质量数减少 4。

(2) β 衰变 原子核自发地放射出电子或正电子或俘获一个轨道电子而发生的转变，统称为 β 衰变。细分之，放出电子的称为 β^- 衰变，放出正电子的称为 β^+ 衰变，俘获轨道电子的称为轨道电子俘获。在 β 衰变中，子核与母核的质量数相同，只是电荷数相差 1。 β^- 衰变相当于原子核中的一个中子变成了质子； β^+ 衰变和轨道电子俘获相当于原子核的一个质子变成了中子。

(3) γ 跃迁 α 和 β 衰变的子核往往处于激发态，处于激发态的原子核要向基态跃迁，这种跃迁称为 γ 跃迁。在 γ 跃迁中通常要放出 γ 射线。因此， γ 射线的自发放射一般是伴随 α 或 β 射线产生的。例如，放射源 ^{60}Co 既具有 β 放射性，也具有 γ 放射性。这是由于放射性原子核 ^{60}Co 首先经 β 衰变至 ^{60}Ni 的激发态，然后当激发态跃迁到基态时会放射出 γ 射线来， γ 跃迁与 α 或 β 衰变不同，不会导致核素的变化，而只改变原子核的能量状态。因此， γ 跃迁的子核和母核，其电荷数和质量数均相同，只是内部状态不同而已。

(一) 辐射的种类

由于近代核技术的发展，用于辐射生物研究的射线种类逐渐增多，现在分别对常用的辐射种类进行简单的介绍。

1. X 射线

X 射线又称阴极射线，是一种电磁辐射，它不带电荷，是一种中性射线，波长为 $10^{-10}\sim 10^{-5}\text{cm}$ 。这种射线是由 X 光机产生的，在高度真空的情况下，高速运动的电子打到一个靶(钨或钼)上，电子运动受阻后放出的电磁波。一般在照射生物材料时，采用高的工作电压和适当的吸收软辐射的滤片，可以得到穿透力强、与 γ 辐射相似的 X 射线。还应把以千伏为单位的峰值电压(kVP)、电流毫安数(mA)、滤片类型与厚度、管与靶的距离、剂量及剂量率记载下来，以便于实验中进行比较。