

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

让射线造福人类



让射线造福人类

目 录

一、 绪言	(1)
二、 人们怎样发现了各种看不见的射线？	(5)
1. 一种用未知数 X 命名的射线	(5)
2. 阴极射线是什么？	(9)
3. 天然放射性是怎样发现的？	(13)
4. 中子射线的发现既复杂又带有戏剧性	(18)
5. 来自天外的宇宙射线	(20)
三、 人们能够用机器造出各种射线吗？	(27)
1. 人工射线源的种类和优点	(27)
2. 高压加速器	(32)
3. 直线加速器	(35)
4. 回旋加速器	(37)
5. 储存环和对撞机	(41)
6. 原子核反应堆	(44)
四、 射线与物质的相互作用	(48)
1. 带电粒子在物质中引起的物理效应	(48)
2. X 射线与 射线与物质的相互作用	(54)
3. 中子与物质的相互作用	(57)
4. 射线的化学效应	(59)
五、 怎样防护射线对人体的伤害？	(64)
1. 射线的生物效应	(65)
2. 影响射线生物效应的因素	(66)
3. 射线生物效应的类型	(69)
4. 与其它对人体致害因素的比较	(70)
5. 射线防护的基本原则	(72)
六、 射线在自动检测和自动监控方面的应用	(74)
1. 特殊条件下的工业生产监测	(75)
2. 材料的射线探伤	(81)
3. 地下探宝	(83)
4. 火灾报警	(88)
七、 射线灭菌消毒	(91)
1. 从一个真实的故事谈起	(91)
2. 射线灭菌消毒的原理和特点	(92)
3. 射线灭菌消毒在医疗上的应用	(94)
4. 射线辐照设备	(95)
5. 食品的射线辐照保鲜	(97)
八、 射线照射引起生物体变异及其在农业上的应用	(103)
1. 射线引起害虫绝育	(103)
2. 射线刺激生物生长	(107)
3. 农作物的辐射育种	(108)
九、 一种新型的长寿电池——放射性同位素电池	(118)
1. 放射性同位素电池是怎样发电的？	(119)

2.在航天领域的应用	(121)
3.在航空和航海的导航等领域中的应用	(122)
4.心脏起搏器的电源	(123)
十、射线用于疾病的临床诊断和治疗	(126)
1.射线诊断	(127)
2.射线治病	(132)
十一、射线在环境保护上的应用	(140)
1.燃烧炉废气的射线净化处理	(140)
2.废水的射线净化处理	(143)
3.用射线清除静电	(146)
十二、射线在材料科学与技术领域中大显神威	(148)
1.射线作为探究材料奥秘的探针	(148)
2.射线束用于新材料的制备合成和表面优化	(158)
3.射线有机合成	(160)
4.固体材料中的离子注入	(167)
5.离子束用于表面涂层制备	(178)
6.硅的中子嬗变掺杂	(183)
结束语	(186)

本书介绍与人类关系非常密切的各种射线的来源、性质及在工、农、医等领域的广泛应用，从富有传奇色彩的 x 射线、阴极射线、中子射线和宇宙射线的发现讲起，接着扼要介绍射线的性质、射线与物质的相互作用以及射线可以对人体造成的伤害和如何对它进行有效的防护等方面的知识，最后着重介绍射线在工业、农业、医学、环保、新材料学领域的应用，阐述射线与人类生活的密切关系和射线可能给人类带来的种种好处。

序

大千世界，五光十色，生态环境，亟待保护；认识空气，饮水思源，万能石油，多彩塑料；南极北极，人迹罕至，皑皑冰原，臭氧空洞；宇宙飞船，飞上蓝天，空中楼阁，并非虚谈；地外文明，尚待探寻，追星逐日，翘首长空；科技发展，日新月异，生生不息，生殖奥秘；小小电脑，能力非凡；信息管理，高速公路；原子电子，各种射线，保鲜治病，造福人类；探求自然，永不停息，弯曲时空，无毛黑洞。

上面这段话，是这套丛书内容的片断，这仅涉及现代科技成果的极小部分，已足令人惊叹，大有“相见恨晚”之感。现在，科学技术对人类社会的影响日益增大，增强人们的科技意识显得越来越重要，我们要学的知识还有很多很多。当然，一个人不可能学得那么多，即使学其中感兴趣的一部分，仍不胜其多。生而有涯，学而无涯，此之谓也。最好的办法是用最少的时间学到最多的知识，开展科学普及工作是有有效的途径之一。

科海茫茫，何处觅知音？科普读物可作“领航员”。这套丛书共分九册：

1. 生生不息——生殖的奥秘
2. 漫游南北极
3. 寻找地球以外智慧生命
4. 探求上帝的秘密——从哥白尼到爱因斯坦
5. 工业化学漫谈
6. 让射线造福人类
7. 飞上蓝天飞向宇宙
8. 电脑与电脑时代
9. 让地球永葆青春

这套丛书的作者是各方面学有专长的教授、副教授或在教授指导下年轻有为的后起之秀，丛书是以初中毕业生的知识水平为基础来编写的。丛书内容翔实，语言流畅，力求生动，说理清楚，层次分明，剪系统性强，并注意反映最新科技成果，有文有图，通俗易懂，丛书各册相对独立，各册的封面勒口上都有内容介绍，供读者选择。

丛书的读者对象是广大的中学生、大学生以及成年的科技爱好者；对学有专长但非本行的专家们或许也是有用的读物；离、退休的老人在休闲时也不妨看看这类小册子，或许使晚年生活多一点乐趣。

这套丛书可使读者增长科技知识，开阔视野；增加对新科技成果的兴趣，热爱大自然；理解科学技术在社会发展中的作用，热爱科学；也有利于养成科学的思想方法、建立正确的世界观；从而提高文化素质，在入门之后，如想在某方面继续深入，也许就不那么难了。当然，进入科技领域并能领会其中的奥秘是不容易的，科技图景远不如戏剧、舞蹈、小说中的艺术形象那样楚楚动人，如泣如诉，情景交融，动人心弦，但对有鉴赏力的人来说，科学技术的魅力并不差，这来源于科技成果的精密、有用、巧妙和神奇的力量。

时至今日，很快将跨入 21 世纪，世界各国都面临科技方面的激烈竞争，挑战与机遇并存，今年二月末，英国一研究所利用无性繁殖方法（或称克隆技术）成功地培育出一只绵羊，取名“多莉”，有母无父，世界轰动，忧喜参半，沸沸扬扬，对此也无须惊慌，人们定会用此新技术为人类的正当利益服务而不许滥用。“多莉”的出世毕竟有非同寻常的意义，不能不引起我们

的充分重视，绝不可掉以轻心，关于克隆技术在这套丛书的《生生不息——生殖的奥秘》分册中有较详细的阐述。

竞争时代，归根到底是人才的竞争，人的素质高低是竞争成败的关键问题之一。据劳动部门提供的资料表明：如果钢铁的初级产品的出厂价是 1，那么，轿车是 5，彩电是 30，电子计算机是 1000，集成电路块、计算机软件是 2000，可见，使产品向高附加值的转变是何等重要，这也是科教兴国的战略决策的重大意义所在。

我国有五千年的文明史，深厚的文化积累和一脉相承的传统，蕴藏着极宝贵的智力资源。激发人们的才情和向上精神，提高民族素质，是将学术成果走向大众化的目标。这套丛书在这方面是一次有益的尝试，相信会取得成功。

丛书并非完美无缺，恳请读者、专家们批评、指正。

中国科学院院士

孙儒泳

97.4.9

一、绪言

在“射线”这个术语之下，包含着许许多多起源、形态和特性各异的对象，组成了一个名副其实的大家族。现在我们所了解的射线的种类已经多得难以胜数。本书所要介绍的射线又叫电离辐射，是那些能够使物质发生激发和电离的射线，包括X射线、放射性物质裂变和衰变时放出的各种粒子和辐射、宇宙射线、粒子加速器产生的各种带电粒子等。这些射线一般都非常非常的小，比原子还要小，看不见、摸不着，就是用最高倍数的电子显微镜也无法直接看到它们。而且它们跑得非常非常的快，比飞机、火箭都要快得多。

这些有着各种奇异特性的射线和人类有着非常密切的关系。我们人类赖以生存的地球上的一切，时时刻刻都处在来自外部和来自内部的各种射线的包围之下。很显然，这个行星上的各种生命形式，包括人类本身，在所有的进化阶段和所有的活动领域，都与射线密切相关。或许人们会发出疑问：为什么人类在长达数千年的历史长河中，却不知射线为何物？而真正从科学上发现射线的存在，才是100年前的事。

100年前，三个伟大的发现相继问世，对科学技术发生了翻天覆地的巨大影响。1895年伦琴发现了X射线；仅仅过了三个月，贝克勒尔发现了天然放射性——铀元素发出了以贝克勒尔命名的奇异射线；

1898年居里夫妇发现两种新的元素镭和钋也能发出贝克勒尔射线，并首先将这种现象命名为“放射性”。A.爱因斯坦称这些伟大发现是“从史前人类发现火以来的整个时期中技术进步的最具革命性的力量”。在当时的短短两三年中，物理学发生了决定性的转变，打开了用微观方法观察原子世界的大门，开创了科学技术的一个新时代。有人认为，这是一个科学上空前光辉的时代，犹如文艺上的“文艺复兴”时代一样。

这些伟大发现对科学技术的影响是全面的和深远的，而最直接的还是以射线为基础的科学技术及其应用。显然，射线的发现和应用是100年来科学技术最伟大的成就之一。

在这本书里，首先要向读者介绍的是人们是怎样发现射线和怎样制造出人工射线源的。希望把充满着机遇、灵感、艰辛和富有戏剧性的过程介绍给大家，相信会从中得到多方面的启示。

科学源于积累，水到自然渠成。就拿前面提到的关于射线的那些伟大发现来说，发现者的机遇、过人的智慧和能力以及为科学而献身的精神无疑起了非常重要的作用，因此这些伟大的科学家理所当然地成为历史上的第一批诺贝尔物理学奖得主。但是，任何的科学发现都需要一定的基础条件，需要有一个从量变到质变的积累过程。试想，如果没有真空技术、感光材料、高压电源等方面的条件，要从科学上发现那些奇异的射线显然是不可能的。因此，我们不应该忘记广大的工人群众所做的贡献，他们为科学发现做了铺路和奠基的工作。作为个人，他们是平凡的，默默无闻的，历史上不会留下他们中的任何人的名字，但是作为一个群体，他们对科学技术的发展与进步做出了不可磨灭的贡献。

本书的第二部分要介绍各种射线在与物质相互作用过程中所表现出来的各种特性，还要介绍射线可能对人类造成的伤害以及如何避免这种伤害。本书力求用浅显易懂的语言讲清这部分包含较多科学术语和规律的内容。然而，在这里具备一些物理学和化学方面的常识还是必要的。对于具备初中以

上文化水平的读者来说，经过一番努力，读懂是没有什么问题的。

人们一开始就从射线的巨大能量和各种奇异的特性中立刻感悟到它们巨大的应用价值，并以极大的热情让这些身手不凡的射线为人类造福，提高人类生产和生活的能力和水平。经过近 100 年的发展，射线的广泛应用已经到了几乎无处不在和无所不能的地步，在工业、农业、医疗和科研等领域发挥着日益重要的作用。因此，本书用了较多的篇幅介绍射线在国民经济各个部门的一些主要的应用。

由于作者学识疏浅，在内容的取舍和问题的把握上，都会存在不少错误和缺点，诚恳希望读者不吝予以指正。

二、人们怎样发现了各种看不见的射线？

1. 一种用未知数 X 命名的射线

今天我们常常会看到这样一种情景：一个甚至连自己的姓名都不会写的老奶奶，当她看到可爱的孙儿站到紧靠电视机屏幕跟前看电视的时候，就会这样对他说：“不要挨那么近，那里射线太强！”并立即将他引开。这位老奶奶对电视机屏幕发出 X 射线的认识，在以下三点上是相当正确的：其一，这种看不见、摸不着的射线确实存在；其二，离射线源（发散性的，如此例中的电视机屏幕）越近，射线越强；其三，这种射线会和人体发生作用，射线太强，会对人体造成伤害。

让我们把时间上溯到上世纪 90 年代初，即使是当时科学界的泰斗，对今天已经妇孺皆知的 X 射线也是一无所知。而打破这种局面的，竟是一次十分偶然和充满神秘色彩的发现。

那是在 1895 年 11 月 8 日，德国物理学家 K.W. 伦琴和往常一样，走进他的实验室，先用一张黑纸把克鲁克斯阴极射线管（图 2.1 所示）包裹起来，放下实验室遮光用的窗帘，实验室里变得漆黑一片。然后他接通克鲁克斯阴极射线管的电源，突然发现离克鲁克斯阴极射线管约 1 米远处的一个荧光屏发出一种他从未看见过的奇异的亮光。当他切断电源以后，那种亮光立即随之消失。反复试验的结果无一例外地印证了上述的发现。伦琴对这种意外的发现感到无比的惊奇和兴奋。这种射线对当时的人们是如此的新奇和不可思议，因此伦琴选用了—个数学上表示未知数的字母“X”把这种奇异的射线命名为 X 射线。伦琴的这一发现，立刻在国际上引起极大的轰动。伦琴发现了 X 射线以后，物理学家和医学界人士争先恐后地开展 X 射线的研究，在国际上形成了一股热潮，在 X 射线发现之后短短的半年时间内，仅是法国科学家在法国科学院的《学报》杂志上就发表了通讯和摘要 135 篇。他的发现对现代科学技术的发展，尤其是对射线科学技术的发展，具有十分重大的意义。人们为了纪念伦琴的这一历史功绩，也将这种射线叫做伦琴射线。由于他的这一重大贡献，1901 年 K.W. 伦琴成为获得诺贝尔物理学奖的第一位科学家。国际放射学会还曾经以伦琴的名字来作为射线剂量的单位。

K.W. 伦琴还对 X 射线进行了系统的研究。他试着在阴极射线管和荧光屏之间放入木板和纺织物，荧光屏仍然在发光，而当他把—块金属板放入时，在荧光屏上能够清晰地看到这块金属板的影子。伦琴还让他的妻子把手放在照相感光板上，然后用 X 射线照射，结果得到了一张清晰的戴着金戒指的手骨骼照片（图 2.2 所示）。这是历史上第一张 X 光照片。当这张珍贵的照片以“物理学教授的新发现”的醒目标题见报后，引起了很大的轰动。以上的实验结果充分证明 X 射线具有极强的穿透能力。同时人们也从这张照片上看到了这种奇异射线在医学上的巨大价值，实际上也可以把这看作为 X 光透视诊断医学的开端。

人们已经知道，当高速运动的电子束（如阴极射线）轰击金属靶时，就会产生 X 射线。通常由阴极射线管产生 X 射线由二部分组成，有一部分具有连续的能谱，另一部分则具有固定的能量。这是因为它们是由两种不同的过程产生的。当快速运动的电子受到靶材料的阻挡而损失能量，所损失的能量

就以连续能量的 X 射线发射出来。这种 X 射线也称为韧致辐射。而当快速电子打掉靶材料原子的内层电子后，留下来的空位立即被较外层电子所填充。这种过程导致了原子能量的减少，所减少的能量以 X 射线发射出来。对于一种元素来说，原子的能量变化是完全确定的，因此这种 X 射线也就具有确定的能量。这种 X 射线的能量与元素有关，因此将这种 X 射线称为特征 X 射线。

2. 阴极射线是什么？

前面我们已经说过，克鲁克斯阴极射线管在伦琴发现 X 射线的过程中起了重要的作用，那么阴极射线是一种什么射线呢？阴极射线是德国物理学家 J. 普吕克尔在 1858 年进行低压气体放电研究的过程中发现的。稍后，英国物理学家克鲁克斯在实验室里研究闪电现象时，也发现了这种射线。当装有 2 个电极的玻璃管里的空气被抽到相当稀薄的时候，在 2 个电极间加上几千伏的电压，这时在阴极对面的玻璃壁上闪烁着绿色的辉光，可是并没有看到从阴极上有什么东西发射出来。这究竟是怎么一回事呢？

这种现象引起许多科学家的浓厚兴趣，进行了很多实验研究。当在阴极和对面玻璃壁之间放置障碍物时，玻璃壁上就会出现障碍物的阴影；若在它们之间放一个可以转动的小叶轮，小叶轮就会转动起来。看来确实从阴极发出一种看不见的射线，而且很像一种粒子流。在人们还没有弄清楚这种射线的庐山真面目之前，只好将它称为“阴极射线”。

关于阴极射线的本质，当时在国际上有两种截然不同的意见。大多数英国物理学家（如 J.J. 汤姆孙）认为阴极射线是一种带电的粒子流，因为它可以被电场或磁场偏转。汤姆孙等英国物理学家由实验中还测得阴极射线速度比光速小 2 个数量级。19 世纪 90 年代初，德国物理学家由实验中得知，阴极射线甚至可以穿透薄金属箔，据此他们认为阴极射线不可能是粒子流。

在阴极射线是不是带电这个问题上，开始时英国物理学家汤姆孙和德国物理学家赫兹做了同样的实验，也观察到同样的结果。我们来听听汤姆孙本人对这一段经历的回忆吧：“我使阴极射线偏转的第一次尝试是使它通过固定在放电管内的 2 个平行板之间的空间，并且在平行金属板之间加上一个电场。结果没有产生任何持续的偏转。”

对于这样一个同样的实验结果，赫兹简单而错误地得出了以下的结论：阴极射线是不带电的。而汤姆孙没有简单从事，他进行了更加深入的分析 and 思考，终于找到了问题的症结所在。他在《回忆与感想》一书中继续回忆说：“偏转之所以没有出现是由于气体存在（压力太高），因此要解决的问题是获得更高度的真空。而这一点说起来比做起来容易得多。”

汤姆孙继续对阴极射线进行深入的研究，1897 年终于完成了他那闻名于世的实验。图 2.3 就是汤姆孙实验中所使用的仪器的简图。

阴极射线由阴极 C 发出，通过狭缝 A 和 B 将阴极射线约束成细束，然后穿过 D、E 之间的空间，最后达到右边带有标尺的荧光屏上进行观察。当 D、E 充电，阴极射线束会向上或向下偏转（方向取决于 D、E 的极性）。汤姆孙根据实验中阴极射线偏转的方向确定出阴极射线是带负电的。然后他又在 D、E 之间换成用通电线圈加上一个方向与简图平面垂直的磁场。磁场也使细束发生向上或向下的偏转（方向与磁场的方向有关）。阴极射线细束在磁场中的偏转方向也证明阴极射线束所带的电荷是负的。接着汤姆孙巧妙地使磁场产生的偏转正好抵消电场所产生的偏转，这样就可以计算出阴极射线细束的速度。然后分别从电场和磁场单独产生的偏转幅度，再计算出细束的电荷与质量的比值（荷质比） e/m 。汤姆孙求得的阴极射线的荷质比 e/m ，比在电解过程中测得的氢离子的荷质比 e_H/m_H 大将近 2000 倍。因此汤姆孙认为阴极射线是由比氢离子小得多的带负电的粒子所组成。他把这种粒子称为“微粒”，所带的电荷（代表电荷的基本单位）称为“电子”。后来人们直接将

组成阴极射线的粒子本身称为“电子”。阴极射线束就是电子束，这是射线大家族中一个非常重要的成员，在现代科学技术中占有重要的地位。

从阴极射线实质的揭示过程，对我们至少有两点极为有益的启示：其一，穷追不舍的探索精神和深入细致的分析与思考的习惯，对于科学技术的发明和发现是何等的重要，古今中外这样的事例俯拾皆是，一切有志于科学技术的人们都要十分注意培养这种基本素质；其二，技术的革新与改进和实验科学的进展是相辅相成的，这样的例证也是不胜枚举的。

3. 天然放射性是怎样发现的？

仅仅在伦琴发现 X 射线还不到 2 个月之后，法国物理学家 A.H. 贝克勒尔在进行萤石发出 X 射线可能性研究的过程中，又发现了一种十分奇异的现象。

1896 年 2 月 26 日，他把一包硫酸铀钾样品放进抽屉，无意之中又将它放在一块未曝光的感光板上。过了几天，当他去取样品时，发现感光板已经被感光。我们来听听贝克勒尔在向法国科学院的报告中是怎样叙述他的发现经过的：“由于几天来太阳不露面，我在三月一日冲洗了底片，心想即使在照片上出现了阴影，它也一定很浅。可是事实适得其反，那阴影看来很深。我立刻想到也许黑暗之中也能产生辐射。”

在那几天中这包样品既未接触过阳光，又未接触过其它任何的能源。因此这种能使感光板感光的奇异射线不是荧光现象，只能被认为是样品自身发射出来的。贝克勒尔本人称这个发现“是非常重要的，是完全出乎意料的”。随后，贝克勒尔又对其它含铀化合物进行实验，结果发现这些化合物都发出同样的射线，即使是这些化合物被熔化或溶解之后也照样发出射线。他还发现，纯铀样品发射这种射线的本领更强。

贝克勒尔的这一新的重要发现更具有翻天覆地的特殊意义。它就像一把打开原子内部奥秘的钥匙，向人们预示着，在过去一直被认为是构成物质最基本单位的原子内部，竟存在着一个异彩纷呈的亚原子粒子的神奇世界。这真是科技史上又一个典型的偶然事件。在这样紧要的关头，科学家个人的机遇、学识、判断力和想象力都是缺一不可的。

P. 居里和 M. 居里夫妇继续贝克勒尔的工作，又发现其它几种元素也和铀一样，能够发出贝克勒尔射线。在异常艰苦的研究工作条件下，他们还发现了镭和钋这两种新元素。M. 居里还将这些元素发射贝克勒尔射线的特性称为放射性。她认为放射性不是一种化学现象，而是一种从原子内部产生的科学现象，因为任何简单的物理过程和化学过程，如加热、冷却、熔化、溶解以及与非放射性元素的化合等等都丝毫不影响给定元素的放射性。

1903 年 12 月，贝克勒尔和居里夫妇因为在贝克勒尔射线——放射性研究上的杰出贡献，共同获得了当年的诺贝尔物理学奖。

与此同时，还有许多其它国家的科学家也在深入进行由以上 3 位杰出物理学家所开创的研究工作，其中做出了最突出贡献的是英国剑桥大学的两位物理学家 J.J. 汤姆孙和他的助手、新西兰人 E. 卢瑟福。汤姆孙的一个最伟大的贡献就是前面已经介绍过的电子的发现，从而揭示了阴极射线的本质，第一个打破了原子是物质最小单位的传统观念。因此杨振宁教授称 J.J. 汤姆孙是“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人”。进而，汤姆孙对原子的结构提出了一种模型。这种模型认为，原子是一个比较大的带正电的球体，而电子就像散布在布丁中的葡萄干那样地均匀镶嵌在原子球内。这就是所谓汤姆孙原子模型。

E. 卢瑟福采用了一种简便而精巧的方法（如图 2.4 所示），对铀元素发出的贝克勒尔射线进行深入一步的研究。一小块铀元素材料被放在一个铅容器的长槽底部，将贝克勒尔射线约束成一细束。照相底版作为射线的探测器。在铅容器长槽的出口处，放置一个方向与图面相垂直的磁场，并将整个系统抽成真空。被贝克勒尔射线感光过的照相底版经冲洗后，发现有 3 个明显的

斑点，一个正对着铅容器的长槽，另外两个则分别置于第一个斑点的两侧。根据贝克勒尔射线在磁场中的偏转方向可以推知：铀元素发出的贝克勒尔射线中有3种射线，即带正电的射线，带负电的射线和不带电的射线。

进一步的研究表明，并不是所有能发出贝克勒尔射线的放射性元素都同时发出这3种射线，有些发射射线，有些发射射线，而射线有时伴随射线发射，有时伴随射线发射。

卢瑟福的另一个重要贡献是完成了著名的卢瑟福散射实验，从而提出了原子结构的卢瑟福模型。图2.5是实验装置的示意图。左边放射源发出的射线从两块厚铅板的中心小孔中穿出而成一小细束，然后向一块薄金箔射去。在金箔的右边放了一块荧光版或照相底版。结果他发现，大多数的射线都一直穿过金箔或仅仅有极微小的偏转，只有少数粒子产生很大的偏转，甚至向后散射。这种现象是汤姆孙原子模型无法解释的，而只能用一种假设来解释，这就是在原子中有一个体积很小而具有几乎全部原子的质量的带正电的核心（称为原子核），而带负电的电子在离原子核很远的地方绕着核心运动。这就是著名的卢瑟福原子模型。不久之后，卢瑟福的学生盖革和马斯顿也提出了这种原子模型的有力实验证据。

4. 中子射线的发现既复杂又带有戏剧性

1920年卢瑟福在一次学术报告中提出了一个重要的构想，认为有可能存在一种中性粒子，它的质量和质子相似。在他的这个构想中，中子已经呼之欲出了，只有待实验的证实了。因此卢瑟福的这个构想实际上已经拉开了发现中子的序幕。1930年德国物理学家玻特和贝克发现，放射性同位素钋发出的射线轰击铍、硼、锂靶时，会产生一种穿透力比射线大得多的射线。他们实际上迈出了发现中子的第一步。两年后，F.约里奥和I.居里（居里夫人的女儿）夫妇在巴黎所做的进一步的实验，有了更进一步的发现。他们发现新产生的射线能够从石蜡中把质子驱赶出来。他们实际上已经从实验上发现了中子，可惜与这一伟大发现失之交臂，正如当时一位物理学家为之叹息的那样：“他们发现了中性质子而居然认不出来。”

这到底是一种什么射线呢？人们最先想到了射线，不幸的是，一切想用射线来解释以上结果的努力都没有成功。人们只好进行新的探索。

1932年英国物理学家J.恰德维克利用一种新的实验技术完成了他的著名的实验。图2.6就是恰德维克发现中子时所用仪器的结构简图。从这个实验中他发现，从铍核中发射出的穿透力很强的粒子不是无质量的，而是具有和质子差不多的质量。早在1920年卢瑟福就曾经讨论过这种粒子，并把它称为中子。随后许多物理学家曾经进行过许多实验来寻找，但都没能找到肯定的证据。恰德维克在发现中子上的贡献，使他荣获1935年的诺贝尔物理学奖。

中子的发现才第一次真正揭开了原子核结构的奥秘。中子的发现，在核物理方面产生了重大而深远的影响。在1930年以前，人们一直认为原子核的总质量仅仅由质子一种粒子所组成。在恰德维克发现中子后不久，德国物理学家海森堡提出了原子核是由质子和中子组成的假说认为原子核既包含质子，也包含中子（氢原子核是唯一的例外），其质量数等于质子和中子质量的总和，原子序数等于质子数目。对中子质量所做的更为精确的测量，显示出它比质子更重一些，质子是 1.67243×10^{-24} 克，中子是 1.6747×10^{-24} 克。

中子在自然界中是不能单独存在的，它是在原子核受到外来粒子轰击时才从原子核中释放出来的，因此中子射线也是一种核射线（核辐射）。自由中子是不稳定的，它会蜕变成一个质子、一个电子和一个中微子。这个过程可以用下面的式子来表示：

n （代表中子） p （代表质子） $+e$ （代表电子） $+v$ （代表中微子）

中微子是一种既无质量又不带电的粒子。在后面我们将要介绍的内容中，我们将会进一步看到，中子射线在物理学上和技术上都非常独特和非常重要的射线。

5. 来自天外的宇宙射线

宇宙射线是来自宇宙深处的各种高能射线的总称，实际上是存在于宇宙空间的各种高能粒子。宇宙射线是在研究大气电导率的过程中偶然发现的。在研究中，人们注意到，在屏蔽良好的静电器中仍能测出微弱的漏电流，因此人们猜测可能有某种至今未知的射线导致空气电离，这种射线应该具有非常强的穿透力。

1911年~1912年，奥地利物理学家 V.F. 赫斯利用气球将高压电离室带到 5000 米以上的高空。结果发现了非常有趣的现象：当离开地面 700 米时，电离度有一些下降，随后，电离度随着气球高度的增加而持续增加。无论白天和黑夜，观测的结果都一样。

究其原因，在地面附近，电离室的电离度主要受地面放射性的影响，随着气球的上升而减弱。而到了 700 米以上的高空，地球以外的射线对电离度的影响起了决定性的作用，随着气球高度的上升而持续增强。因为这种射线来源于地球以外的宇宙空间，因此被称为宇宙射线。

宇宙射线本身就是成分很复杂的许多射线的统称。在进入大气层之前的宇宙射线称为初级宇宙射线，进入大气层之后与大气层中的原子核相互作用而产生的各种粒子则称为次级宇宙射线。在接近海平面的次级宇宙射线又可以分成软性和硬性两部分。软性部分是指那些能够被 10 厘米厚的铅块几乎完全吸收的射线，主要是电子和 β 射线，其余的是硬性部分，可以穿过很厚的物质层，主要是各种介子。这是一个比较笼统的划分，和射线的探测条件还有一定的关系。

宇宙射线的起源和传播是高能天体物理学中的一个重要课题。宇宙射线是各种高能天体演化过程的产物，特别是各种高能天体物理过程的产物。很显然，因为问题本身的复杂性，宇宙射线的起源和传播的研究有许多实际的困难。随着初级宇宙射线观测的进展，人们现有核物理和高能物理知识的不足，也已越来越成为限制人们了解原始宇宙射线的重要原因。一般认为，宇宙射线中高能粒子应起源于天体的高能活动过程，如太阳和其它恒星表面的高能活动，超新星爆发，脉冲星，和活动星系等都可能成为宇宙射线的源头。自本世纪 60 年代以来随着对初级宇宙射线以及射电、X 射线和 γ 射线天文观测的进展，人们对宇宙射线的起源和传播的认识取得很大的进展，并在不断地深入，然而，至今仍未出现比较令人满意的理论模型。而人们对极高能宇宙射线的认识就显得更加不足。

人们对宇宙射线的观测发现，宇宙射线的强度随纬度而变化，赤道附近的强度比高纬度地区的明显降低，这就是所谓宇宙射线的纬度效应。这表明初级宇宙射线带有电荷，电磁场使它们发生偏转。

除了发现纬度效应外，人们还发现了宇宙的东西效应，这就是在同一观测点，来自西方的粒子多于来自东方的。宇宙射线表明初级宇宙射线应带正电荷，在地磁场作用下发生偏转，导致强度的东西不对称。初级宇宙射线主要是各种原子核，观测宇宙射线主要是探测它们的电荷、速度、能量及其含量丰度，以及它们与靶物质的核相互作用过程等。宇宙射线是自然界为我们提供的天然的高能粒子库。宇宙射线除了能量高之外的另一个显著特点是强度低，在每平方厘米面积内只有每分钟几个，而且能量越高的粒子数目越少，适合做一些发现新现象的研究工作。在研究宇宙射线中，威尔孙云室曾经是

非常有用的探测器。如果在云室中加上强磁场，就可以根据带电粒子在磁场中弯曲的情况来确定粒子的动量。如果在云室中加上已知厚度的吸收片，就可以确定粒子的能量损失，同时还可以利用拍摄的照片中粒子的径迹来研究粒子的其它一些特性。

图 2.7 就是物理学家 C.T.R. 威尔孙所发明并加以改进过的云室示意图。威尔孙曾经用它拍摄过很多珍贵的照片。1932 年美国加州理工学院的物理学家 C.P. 安德孙利用威尔孙云室首先发现了正电子。为此，他和宇宙射线的发现者 V.F. 赫斯共享 1936 年的诺贝尔物理学奖。图 2.8 就是他发现正电子时所拍摄的云室照片。

从照片上可以清楚地看出，有一个带电粒子穿过云室。由于在云室内有强磁场，粒子沿着弧形前进。在穿过 5 厘米厚的铅板后，它的速度减慢，因而径迹的曲率增大。因为径迹的上半部的曲率比下半部的大，证明带电粒子的运动方向一定是自下而上的。知道了粒子运动的方向，根据已知的磁场极性，安德孙推断出该粒子带正电。他还根据粒子穿过铅板后曲率改变的幅度推断出该粒子具有和电子一样的质量，并将它命名为正电子。其实，早在 1930 年就已经从理论上预言了正电子的存在。从狄拉克理论可以推导出这样一个结果，即每一种粒子必定有一种电荷共轭粒子或反粒子，它的质量和原来的粒子相同，电荷大小相等符号相反。正电子就是电子的反粒子。

1937 年安德孙又和 S.H. 尼德迈尔一起利用威尔孙云室在宇宙射线中发现了 μ 子。 μ 子是一种比电子重而比质子轻的粒子，可以带正电，也可以带负电。威尔孙云室还帮助物理学家 G.D. 罗彻斯特和 C.C. 巴特拉于 1947 年在宇宙射线中发现了一种新的带 V 字形径迹的粒子。

核乳胶也是物理学家们用来研究宇宙射线的有力工具。他们将它密封在一个盒子中，然后送上高空。当有宇宙射线穿过时，冲洗后粒子的径迹在核乳胶上呈现暗线。根据暗线的长度、曲率和黑度等，就可以计算出造成径迹的粒子的质量、电荷和速度。物理学家们利用核乳胶也在宇宙射线中发现了许多新粒子。1947 年莱蒂斯发现了 π 介子。 π 介子的质量比 μ 子稍大，可以带正电，可以带负电，也可以不带电。1949 年 C.F. 鲍威尔发现了比 π 介子还重的 K 介子。1953 年伯尼特发现了 Λ 粒子...

从以上的这些例子中，我们可以清楚地看到，在近代物理学的发展中，许多新的基本粒子都是首先在宇宙射线中发现的。

通过以上简略的介绍，我们已经认识了射线大家族中的许多重要的成员。很显然，我们不可能在这种小册子里一一列举出这个大家族中的所有成员，而且这个大家族今后也不断会有新的成员加入。

三、人们能够用机器造出各种射线吗？

答案是肯定的。

前面我们介绍的各种射线，既可以依靠天然放射线物质和从宇宙射线中获得，也可以通过各种粒子加速器制造出来。最后我们还要简单介绍一下另外一种能够用来产生射线的机器——原子核反应堆。

1. 人工射线源的种类和优点

天然射线源一般强度比较低，而且难以根据需要任意调节，不能很好满足科技工作的需要。为此，人们探索能够产生强度大、能量高、性能好、容易调节和控制的射线源，研制出各种粒子加速器。

我们知道，许多粒子如电子、质子、 α 粒子等等都是带电的，它们可在电磁场中被加速而获得很高的能量。这种能够使带电粒子在电磁场作用下加速并获得很高能量的机器就是粒子加速器。

粒子加速器有很多种。按粒子最终可获得的能量来分，有低能、中能和高能粒子加速器。粒子的能量单位是电子伏特，通常把带一个电荷的粒子在电场中经过 1 伏特电位差时所获得的能量定为 1 电子伏特，用符号 eV 表示。常用的单位是千电子伏特 (keV)、兆电子伏特 (MeV) 和吉电子伏特 (GeV, 10^9eV)。通常把能量在 100MeV 以下的称为低能粒子加速器，能量在 0.1 ~ 1GeV 之间的称为中能粒子加速器，而能量在 1GeV 以上的称为高能粒子加速器。

按带电粒子所走的轨迹来分，有直线型、圆型和螺旋型。按加速器电场分类，则有利用直流高压电场加速的，利用高频谐振电场加速的和利用磁场变化所产生的感应电场加速的等。按被加速的带电粒子种类来分，则有电子、质子、氦核和各种重元素离子加速器。它们各自都有适用于自己的粒子品种、能量范围以及性能特色。几十年来，它们在相互竞争中不断地发展、完善和更新，同时也在竞争和发展中相互补充。许多大中型的粒子加速器（如重离子加速器和高能加速器）往往采用多种粒子加速器的组合，例如先用直流高压型加速器作预加速器，再用直流谐振式加速器将带电粒子加速到中能，最后再注入到回旋谐振式加速器加速到高能。

带电粒子加速器的研制是在核物理研究的兴趣开始高涨的本世纪 30 年代初开始发展起来的。1932 年世界上第 1 台范德格喇夫加速器（静电加速器），第 1 台考克饶夫-瓦尔顿加速器（高压倍加速器）和第 1 个回旋加速器几乎同时问世。为了将带电粒子加速到能量为几个 MeV，这些粒子加速器的原理和结构是简明而巧妙的。它们打开了加速器研究和开发的道路，成为现代科学技术中一个相当重要的领域。几位著名的研制加速器的先驱者 R.J. 范德格喇夫、J.D. 考克饶夫、E.T.S. 瓦尔顿和 E.O. 劳伦斯后来分别获得了诺贝尔物理学奖。第一批粒子加速器的运行，显示了这种用人工方法制造的粒子射线源的很大的优越性，主要有以下一些：

(1) 天然的射线源一般只能产生有限的几种射线，如中子、 α 射线、 β 射线、 γ 射线等，而粒子加速器所能产生的射线种类要多得多，例如重离子加速器可以产生出从氢到铀的所有元素的离子束。

(2) 由加速器产生的射线束的能量和强度可以根据需要任意选择和精确控制。

(3) 加速器产生的粒子束流强度高、性能好。

(4) 加速器可以根据需要随时运行和停机，停机以后就不再产生射线，便于管理和维修。

随着原子核物理和基本粒子物理研究的不断深入，以及各种科学技术对粒子加速器需求的不断增长，许多科学家进一步提出了很多种新的加速原理和技术，研制成功了一批各具特色的新加速器。

1940年 D.W. 克斯特成功利用电磁感应产生的涡旋电场加速到很高能量的电子感应加速器。1945年 B.U. 韦克斯勒和 E.M. 麦克米伦各自独立提出了谐振加速的自动稳相原理，为高能粒子加速器的发展开辟了道路。二战期间，L.W. 阿尔瓦雷茨和汉森分别研制成功第一台质子驻波直线加速器和电子行波直线加速器，为直线加速器的发展奠定了基础。1956年克斯特提出了一种通过高能粒子束之间的对头碰撞(对撞)来提高粒子束的有效作用能新的建议，从而导致了高能对撞机这种新颖高能加速器的问世。本世纪60年代后期，重离子加速器的发展，使得可加速的粒子从最初的一些轻元素离子发展到元素周期表上的全部天然元素的离子。

人们利用粒子加速器发现了绝大多数的新的超铀元素，合成了上千种新的放射性核素，极大地促进了原子核物理学的发展。高能加速器的发展，以宇宙射线难以比拟的速度发现了上百种基本粒子，包括重子、介子、轻子和各种共振态粒子，大大地促进了基本粒子物理学的形成和发展。近30年来，粒子加速器这种能够产生各种射线的机器，主要是低能粒子加速器，已经远远地超出了原子核物理学和基本粒子物理学的范畴，在半导体、材料科学、表面科学、生物学、医学等其它科技领域如同位素生产、疾病的诊断和治疗、射线消毒与保鲜、材料的辐照改性、粒子束表面分析、离子注入等等发挥着日益重要的作用。

迄今被广泛应用的粒子加速器不下20种，每种加速器都有各自适用的能量范围和粒子种类。为了满足科学技术和实际应用的日益增长的需求，世界各地已先后建造了数以千计的粒子加速器，其中主要是能量在100MeV以下的低能加速器。这许多种粒子加速器在加速原理和构造上可以说是异彩纷呈，各具特色，但是它们在主要组成部分上仍然有许多共同之处。作为一个粒子加速器应该具有以下3个组成部分：

(1) 带电粒子源，如电子枪和离子源等，是粒子加速器的源头，用以提供所需的各种带电粒子。

(2) 真空加速系统，是装有加速电场产生机构的真空室，如加速管、加速枪等，用以向带电粒子施加一定形态的加速电场，同时保证带电粒子在加速的过程中不至于受到空气分子碰撞的影响。

(3) 带电粒子束的导引和聚焦系统，应用某种形式的电磁场来引导和约束被加速的粒子束，使之沿着既定轨道加速和前进。

本书只概要地介绍几种主要加速器的工作原理、特性及其主要应用范围。

2. 高压加速器

这类加速器是使带电粒子通过一个高电势差而获取能量，得到加速。倍压加速器、静电加速器、绝缘心变压器、高频高压发生器、脉冲电子加速器等都属于这类加速器。这些加速器的最高能量可达 30MeV，平均粒子流强度为几十微安到几十毫安。这类加速器既可用于加速电子，也可用于质子、氘核、 α 粒子和其它重元素离子。

高压倍加器

这是最早开始发展起来的一种粒子加速器。它是利用倍压线路原理来提供直流高压电源的。图 3.1 是一个单级倍压线路原理示意图。 V_a 是高压变压器次级电压的幅值。假设整流元件和电容器都是理想元件，并忽略高压变压器的阻抗，变压器次级绕组的次级输出电压 V_{AA} 随时间成正弦变化。又假设开始时电容器 C 和 C' 的电势差均为零，这样在第一个周期结束时，在没有负载的情况下，电容器 C' 上的电势差接近 V_a ，电容器 C 上的电势差接近 $2V_a$ 。这就是单级倍压线路的工作原理。多级倍压线路的工作原理是一样的，只不过过程要复杂一些罢了。大多数高压倍加器的电压在 100 ~ 600kV 之间，最高可达 4MV，主要用于加速电子、质子、氘核和其它粒子。高压在 1 ~ 4MV 的高频高压发生器和绝缘心变压器主要用来提供大功率几十毫安的电子束。

静电加速器

图 3.2 是一个静电加速器的结构简图。我们从物理学上已经了解到，金属导体一旦带了电荷，这些电荷就立即往金属导体的外表面跑。因此，当输电带不断地将电荷传送到空心金属球内壁时，电荷就会积聚到空心金属球的外表面，形成很强的电场，用来加速带电粒子。整个加速器都装在密闭的、充以绝缘介质的高气压容器内。静电加速器的典型的工作电压为 2 ~ 10MV，既可以用来加速电子，也可以加速离子。离子型的静电加速器主要用于离子束表面分析，电子型静电加速器主要用于辐射加工、灭菌消毒等方面。

高压加速器的共同特点是可以加速任何一种带电粒子，而且能量可以平滑地调节。但是这类加速器的最高能量直接受绝缘材料的击穿电压的限制，不可能太高。

3. 直线加速器

直线加速器是最早发明的一种谐振式加速器。1925 年 G.伊辛已经提出了这种加速方法的建议。1928 年 R.维德罗建成了第一台加速离子的直线加速器。二战结束以后，微波技术的发展给直线加速器注入了新的生命，新型的直线加速器才迅速地发展起来，并已经成为现在重要的加速器类型之一。

直线加速器的工作原理如图 3.3 所示。这类加速器的主要部分是排列在圆柱形金属真空管中的一串金属管加速电极。加速电极交替地接到高频交变电源的一极或另一极。带电粒子在通过 2 个加速电极间的缝隙时相继受到加速。由于粒子的速度逐级增加，金属管电极的长度也逐级相应增加，以保证粒子每次通过缝隙时刚好受到加速，也就是说，带电粒子可以被这种谐振加速的方式加速到很高的动能。为了使粒子在不太长的距离内加速到最大能量，也就是说不至于使直线加速器的尺寸过长，高频电场的振幅通常为 $1 \sim 10\text{MV/m}$ 。为此需要使用功率水平很高的高频、微波电源来激励加速腔。由于离子和电子的速度相差悬殊，直线加速器又可分为离子驻波直线加速器和电子行波直线加速器两大基本类型。

直线加速器有哪些主要优点呢，概括起来，主要有以下几点：

- (1) 带电粒子沿着直线运动，粒子的导入和引出都比较方便。
- (2) 束流强度高，脉冲离子束流可达 200 毫安，平均束流可达 50 毫安，而脉冲电子束流可达 20 安以上。
- (3) 粒子的加速能量可以逐级增加，灵活性比较大。

而这类加速器的主要缺点是高频运行的损耗比较大，造价比较高。此外，建造直线加速器需要解决复杂的微波技术问题，对工业基础和技术基础的要求比较高。

4. 回旋加速器

利用直线加速器加速带电粒子时，粒子是沿着一条近于直线的轨道运动和逐级加速的，因此当需要很高的能量时，加速器的直线距离会很长。有什么办法来大幅度地减小加速器的尺寸吗？办法说起来也很简单，如果把直线轨道改成圆形轨道或者螺旋形轨道，一圈一圈地反复加速，这样也可以逐级谐振加速到很高的能量，而加速器的尺寸也可以大大地缩减。

图 3.4 是回旋加速器的工作原理简图。1930 年 E.O. 劳伦斯在直线加速器谐振加速工作原理的启发下，提出了研制回旋加速器的建议。劳伦斯建议在回旋加速器里采用一个轴向磁场，使带电粒子不再沿着直线运动，而沿着近似于平面螺旋线的轨道运动。1931 年建成了第一台回旋加速器，磁极直径约 10 厘米，用 2 千伏的加速电压工作，把氘核加速到 80keV，证实了回旋加速器的工作原理是可行的。在 1932 年又建成了磁极直径为 27 厘米的回旋加速器，可以把质子加速到 1MeV。

回旋加速器的电磁铁的磁极是圆柱形的，两个磁极之间形成接近均匀分布的主导磁场。磁场是恒定的，不随时间而变化。在磁场作用下，带电粒子沿着圆弧轨道运动，粒子能量不断地提高，轨道的曲率半径也不断地提高，运动轨道近似于一条平面螺旋线。

两个磁极之间是真空室。里面装有两个半圆形空盒状的金属电极，通称为“D 形电极”。D 形电极接在高频电源的输出端上，2 个 D 形电极之间的空隙（加速间隙）有高频电场产生。粒子源安装在真空室中心的加速间隙中。D 形电极内部没有高频电场，粒子进入 D 形电极之内就不再被加速，在恒定的主导磁场作用下做圆周运动。只要粒子回旋半圆的时间等于加速电压半周期的奇整数倍，就能够得到谐振加速。用一个表达式可以表示成：

$$T_c = K T_{rt}$$

式中 T_c 是粒子的回旋周期， T_{rt} 是加速电压的周期，K 应该是奇整数。

这类利用轴向磁场使带电粒子做回旋运动，周期性地通过高频电场加速粒子的回旋加速器又可以分为两类：

第一类是没有自动稳相机制的。等时性回旋加速器就是属于这一类。D 形电极间加有频率固定的高频加速电场，粒子能量低时，回旋频率能保持与高频电场谐振，而当能量高时，粒子的回旋频率会随着能量的提高而越来越低于高频电场频率，最终不能再被谐振加速。为了克服这个困难，可以使磁场沿半径方向逐步增加，以保持粒子的回旋频率恒定。然而磁场沿半径方向递增却又导致粒子束流轴向散开。为解决这一矛盾，60 年代初研制成功了扇形聚焦回旋加速器，在磁极上巧妙地装上边界弯曲成螺旋状的扇形铁板，它可以产生沿方位角变化的磁场，即使加速粒子轴向聚焦，又使磁场随半径增大而提高，保证粒子的旋转频率不变，即旋转一周的时间不变，因此被称为等时性回旋加速器。

第二类是有自动稳相机制的。属于这一类型的加速器有：（1）稳相加速器。轴向磁场保持恒定，而使高频加速电场的频率随着粒子回旋频率的降低而同步降低，从而使带电粒子仍能继续被谐振加速。这类加速器又名调频回旋加速器或稳相加速器。采用自动稳相机制以后，在理论上可以将质子加速到无限高的能量，然而由于技术上和经济上的原因，历史上最大的稳相加速

器的能量只达到 700MeV。这一类型的加速器用来加速质子，有的用于加速掺氘核、 α 粒子甚至氮离子。

(2) 电子回旋加速器。又称为微波回旋加速器，专门用于加速电子。这一类型的加速器中，轴向磁场是均匀的，加速电场的频率也是恒定的，而所不同的是让加速间隙位于磁极的一端，电子的轨道为一系列与加速间隙中心线相切的圆。图 2.5 是电子回旋加速器中电子轨道的示意图。电子每回旋一圈，就被加速一次，只要回旋周期等于加速电压周期的整数倍，就有可能进行谐振加速。电子回旋加速器的能量都不是很高，最大的也不过几十 MeV，束流强度为 30 ~ 120 微安，大多数用于医疗和射线剂量学等方面。

(3) 同步加速器。它的主导磁场是随时间改变的以保证带电粒子在恒定轨道上回旋。为此，磁铁做成环形的，可使磁铁重量减轻。加速电场是交变的，其频率随着带电粒子回旋频率的改变而改变，以保证谐振加速。同步加速器既能加速电子，称为电子同步加速器；又能用于加速质子，称为质子同步加速器或同步稳相加速器。用于加速重离子的同步加速器，顾名思义应称为重离子同步加速器。

5. 储存环和对撞机

这是在同步加速器的基础上发展起来的一种超高能加速器。1956年 D.W. 克斯特提出了通过高能粒子束之间的对头碰撞（简称对撞）来提高粒子束的有效作用能的建议，导致了高能对撞机的研制和发展。在粒子加速器应用于基本粒子物理学的很长一段时间里，人们总是用高能粒子去轰击静止靶，进行各种粒子物理学实验研究。如果我们改变一下作用方式，让两个相向运动的高能粒子发生对撞，情况会是怎样的呢？

物理学的原理告诉我们，假如让两个能量各为 $E (> m_0c^2)$ 的相向运动的粒子发生对撞，其作用能大体上相当于一个能量为 $2E^2/m_0c^2$ 粒子去轰击静止靶。原理上的优越性早就为人们所了解，但是技术上的难题却妨碍了它的实际应用，因为一般粒子束的密度要比静止靶物质的密度小得多，对撞粒子的对撞几率太低。为了克服这一难题，60年代以后发展了一种通过积聚大量粒子束团，从而大大地提高其束流密度的装置——储存环。

储存环的原理和结构和同步加速器相似。储存环内的粒子束由高能直线加速器或同步加速器注入，让几百个注入粒子束团积聚成一个或几个束团。注入的时间比较长，一般可达几十分钟。通过专门的高频电场的作用，储存环真空室内积聚的束流强度可达 20 安，寿命可达十几小时。环形真空室的真空度很高，达到 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 托（1 托支持一个毫米汞柱）。高频电场还可以用于小幅度地提高储存环内粒子束的能量和补偿由于电磁辐射引起的能量损失。

用来使高能粒子发生对撞的高能加速器——对撞机，包括一个或几个储存环。电荷相反的高能粒子如电子和正电子，质子和反质子等，可以在同一个储存环中反向回旋而发生对撞。电荷相同的两种粒子束就需要有 2 个交叉着的储存环，每一个储存环储存着一种粒子，并且它们的回旋方向相反。在两个储存环的交叉处让两束方向相反的粒子束发生对撞。

迄今已经建成的对撞机中，绝大多数是电子对撞机。对撞机的优点是可以用造价不算太高的一般高能粒子加速器进行超高能的物理实验。但是它的缺点是只能实现稳定粒子之间的对撞，也不能像加速器那样产生各种次级粒子束。因此对撞机还不能完全替代超高能粒子加速器。

半个世纪以来，粒子加速器的发展取得了非常大的成就，已知的加速器种类超过了 20 种。另据统计资料表明，大约每隔 6~10 年，粒子加速器的能量就提高 10 倍。然而，随着加速器的能量不断提高，加速器的规模也越来越大，造价也越来越高。图 3.6 是从空中拍摄的美国费米国家实验室于 1972 年建成的一台能量为 500GeV 的质子同步高能加速器的照片。加速器的圆形真空跑道管直径长达 2 千米，圆周长 6 千米，照片只照出跑道的一部分，足见其规模之大。

6. 原子核反应堆

除了加速器以外，原子核反应堆也是人们制造出来的一种能够产生射线的机器。

自从 1932 年恰德维克发现了中子以后，科学家们立即意识到他们已经掌握了一把打开原子核神秘宫殿大门的钥匙。因为中子不带电，比较容易打入原子核内部，引起核反应。1938 年德国物理学家 O. 哈恩和 F. 斯特拉斯曼用中子轰击 ^{235}U 时，发现 ^{235}U 裂变为两片，实现了核裂变，同时释放出大量的能量。一个 ^{235}U 核裂变的过程中，还会同时释放出 2~3 个中子。这 2~3 个中子又可以去轰击 2~3 个 ^{235}U 引起核裂变，同时又产生出更多的中子……，这样反复进行下去，可以在瞬间使许多 ^{235}U 发生裂变，释放出惊人的能量和大量的中子和其它射线。这种反应就是所谓的链式反应。图 3.7 是链式核裂变的示意图。

核裂变的发现引起了很大的轰动，并很快将它推向应用。核裂变的应用朝着两个方向发展：一个是用于研制原子弹，这是利用不加控制的链式反应的原理制成的；另一个就是美国科学家研究出了控制连锁反应速度的办法，研制成世界上第一个原子核反应堆。原子核反应堆释放出的大量热能可用于发电，原子核反应堆是原子能发电站的核心部分。原子核反应堆发出大量的中子和其它射线，因此它同时又是一种强大无比的射线源。

原子核反应堆工作时产生了大量的中子、 α 射线、 β 射线、放射性裂变产物，而且许多物质在反应堆中受到中子的照射也会引起核反应，变成能发出各种射线的放射性物质。因此，利用反应堆作为射线源的途径是多种多样的，既可以直接利用反应堆本身作为射线源，也可以间接地利用反应堆产生的各种放射性同位素物质作为射线源。

直接利用反应堆作为射线源一般有两种办法：

(1) 在反应堆中心(活性区)的水平方向或垂直方向开设一些引出射线的孔道，在孔道处直接利用反应堆内的射线。这样引出来的射线强度很高，但是射线种类复杂，能量分散。

(2) 第二种方法是在第一种方法的基础上加屏蔽物对孔道引出的射线进行过滤。如果设法将中子屏蔽掉，只让 β 射线通过，这样就可以得到单一的 β 射线。如果设法将 β 射线屏蔽掉而只让中子通过，就可以得到单一的中子射线。

间接利用反应堆作为射线源也有两种办法：

(1) 利用反应堆的中子与一些稳定同位素发生核反应生成放射性同位素，然后再加工成同位素放射源加以利用，例如我们常见的 ^{60}Co 射线源(简称钴源)就是由 ^{59}Co 稳定同位素在反应堆内经中子辐照后生成的。

(2) 在反应堆上建造一条辐照回路(俗称跑兔装置)。图 3.8 是辐照回路的示意图。选择某些热中子俘获截面大和可以生成半衰期较短的放射性同位素的物质，让它可以在反应堆活性区与辐照室之间循环流动。当它停留在活性区时就转化为放射性同位素；停留在辐照室时，放射性同位素蜕变，发出大量 β 射线。这样不断地反复循环流动，不断地被活化，又不断地放出射线，不断地为我们提供取之不尽的 β 射线源。用这种办法得到的射线源比较单纯，而且利用射线是在辐照室内进行的，不像在反应堆内那样受到很多限制。

四、射线与物质的相互作用

当射线碰到物质时到底会发生哪些现象呢？会产生哪些结果呢？

要回答这个问题，不是几句话可以说清楚的。应该说这是一个比较复杂的问题，不仅与射线的种类、质量、能量、电荷等有关，也与物质的成分、结构、密度等有关。既有各种物理效应，也可能发生一些化学效应和生物效应。射线的物理效应是辐射物理学的研究内容，射线的化学效应和生物效应则分别是辐射化学和辐射生物学的研究内容。我们首先和主要讨论射线的物理效应，然后再简略地介绍射线的化学效应。射线的生物效应放到后面再介绍。

1. 带电粒子在物质中引起的物理效应

电离和激发

当运动的带电粒子与物质相接触的时候，会与物质中原子的核外电子发生静电作用，使核外电子从带电粒子那里获得能量。当所获得的能量足以冲破原子核的束缚力时，核外电子就脱离原子而成为自由电子，原子成了正离子。这种效应就叫做电离。

如果入射的带电粒子只是与原子的核外电子擦边而过，或者已经与其它原子东碰西撞而筋疲力尽，无力使原子的核外电子获得足够的能量去冲破原子核的束缚，而只能在原子内部由较低的能级跳到较高的能级，这种物理效应就称为激发。

这里还要特别提一下次级电离。次级电离顾名思义它不是直接由入射带电粒子引起的，而是由入射粒子在物质中所产生的次级粒子（如由电离产生的正离子和自由电子），如果它们的能量还足够高，以至当它们再与物质中的原子相互作用时还能继续使原子电离，产生正离子和电子。这种物理效应就称为次级电离。以后我们还会看到，不带电的中性粒子也能引起次级电离。据统计， α 粒子通过气体时，所产生的离子对（正离子和自由电子）中，有60%以上是由次级电离产生的。对于 β 粒子或电子，直接电离仅占20%~30%，而70%以上为次级电离。

带电粒子在物质中的电离作用强弱和哪些因素有关呢？研究结果表明，电离作用的强弱与带电粒子的能量和电荷以及物质的密度有关。当带电粒子入射进物质时，初始的速度大，在单位距离上由电离作用而产生的离子对数目比较少。随着带电粒子能量的损失，带电粒子的速度减慢下来，电离作用所产生的离子对数目随之增加。当带电粒子的速度趋近于零时，电离作用所产生的离子对数目最大。带电粒子到达路程的终点时，就在物质中停止下来。带电粒子在物质中所经过的距离称为射程。为什么带电粒子在物质中的电离情况随着离子速度的减慢而增大呢？这是因为当带电粒子速度大时，经过原子的核外电子附近空间的时间短，静电相互作用的时间也就短，核外电子从带电粒子那里获得能量的机会就少，因而电离作用所产生的离子对数目就少。反之，带电粒子的速度小，电离作用就强，产生的离子对就多。

很显然，带电粒子在物质中电离作用的大小也和带电粒子所带的电荷多少有关。比如，同样能量的 α 粒子和 β 粒子都能产生电离效应，但是由于

粒子所带的电荷比 α 粒子少，所以其电离作用就比 α 粒子弱。而它的射程比 α 粒子要长，也就是说，它对物质的穿透能力比 α 粒子强。同样道理，由一种元素产生的带不同电荷的离子，它们在物质中的电离作用也是不一样的。

散射

带电粒子在物质中通过时，还会受到原子核库仑电场的作用而改变运动方向，这种现象就称为散射。前面已经提到过的著名的卢瑟福散射实验就是一个典型的例子。我们假定入射 α 粒子运动的方向都一样，能量也一样，并且垂直入射在厚度为 t ，原子序数为 Z_a ，单位体积的原子数为 N 的物体（散射体）上，经过散射以后 α 粒子将朝着不同的方向运动。 α 粒子沿着不同角度运动的分布情况可以用卢瑟福散射公式表示：

$$n(\theta) = n_0 N t Z_a^2 Z_b^2 e^4 / 16 E^2 \sin^4(\theta/2)$$

式中， n_0 为入射 α 粒子总数， Z_a 为 α 粒子所带的电荷数， E 为 α 粒子的能量， θ 为散射角（与入射方向所成的角度）， $n(\theta)$ 为在散射角附近每单位立体角内被散射的粒子数。这个公式按其本意只适用于 α 粒子散射。其实，对其它带电粒子，只要加进适当的修正因子也同样可以用。如果带电粒子的速度接近光速，则要把公式右边的 E 改用 $mv^2/2$ 来代替， m 和 v 分别为粒子的质量和速度。

从卢瑟福散射公式可以看出，大部分的粒子都集中在散射角很小的空间内。这和卢瑟福实验的结果是一样的。根据公式，散射角大于 90° 的散射是完全可能的，也就是说，入射粒子经散射后将折返回去。这种散射称为反向散射或者背散射。如果入射粒子在物质中经过多次散射时，反向散射特别明显。

这里还需要指出的是，卢瑟福散射公式只适用于单次散射的情况，对于入射带电粒子通过比较薄的散射体时才是近似地正确的。而对于比较厚的物质，入射粒子可以进行多次散射，散射的角分布情况要复杂得多，这里不准备多加讨论。散射可以分为弹性散射和非弹性散射两种。如果散射前入射粒子和散射体原子核的总动能和总动量与散射后的总动能和总动量相等，这种散射就是弹性散射。如果散射前、后的总动能和总动量不相等（散射前的大于散射后的），这种散射就是所谓非弹性散射。

带电粒子被物质散射的情况还和粒子的质量有关。我们举 α 粒子和 β 粒子为例做个简单的说明。 α 粒子和 β 粒子的质量相差几千倍，相对来说， α 粒子很重， β 粒子很轻。因此，当 α 粒子入射物质时，只有当它们非常接近原子核时才会改变其运动的方向，即发生散射。而 β 粒子就不一样，由于它很轻，无论是受到原子核还是核外电子的静电作用都会明显地偏离原来的运动方向。

韧致辐射和契连科夫辐射

如果一个高速运动的 β 粒子（即电子）突然受到物质的阻止，而使它的速度急剧地减缓下来，这时它所损失的能量就会以电磁波的形式释放出来，这就是所谓的韧致辐射。前面已经说过，韧致辐射也是一种 X 射线，一种具有连续能谱的 X 射线。广泛应用的 X 光机就是利用这个效应来产生 X 射线的。

韧致辐射效应随着电子能量的增加而增强。在电子加速器中，用电子束打到钨靶上，当电子能量为 10MeV 时，有 50% 的能量转化为韧致辐射；而当

电子能量达到 100MeV 时，则有 90%的能量转化为韧致辐射。韧致辐射效应的大小也和物质的原子序数有很大的关系，与原子序数 Z 的平方成正比。需要指出的是，其它带电粒子只要能量足够高，也能够产生韧致辐射。

如果电子或其它带电粒子在真空中具有很高的速度（接近光速），那么当它进入折射系数较大的物质时，它的速度有可能大于光在该物质中的速度。在这种情况下，电子或其它带电粒子能量的一部分会转化为可见光或紫外光发射出去。这时候如果观察者对着电子或带电粒子运动的方向，就可以看到发光现象。这种现象是前苏联物理学家契连科夫首先发现的，所以称为契连科夫辐射。

2. X 射线与 γ 射线和物质的相互作用

现在的电子加速器已经能够产生高达 1GeV 的 X 射线,而放射性同位素发射的 γ 射线的能量从几十 keV 到几 MeV。 γ 射线和 X 射线实质上都是电磁波, γ 粒子和 X 粒子都是光子,它们与物质相互作用时所发生的物理效应主要有:光电效应、康普顿效应和电子对效应三种。

光电效应

光子与物质碰撞时,把它的全部能量交给物质原子中的核外电子,电子把所得到的能量的一部分用于克服原子核对它的约束,剩下的能量就作为电子的动能,而光子整个地被物质所吸收。这种效应就是光电效应,在光子能量低时占主导地位。由光电效应生成的自由电子称为光电子。

而当入射的光子能量增高一些,原子内层的核外电子也会被激发出来,同时伴随着 X 射线的发射。由于每一种元素用这种方式产生的 X 射线的能量是一定的,因此把这种 X 射线称为特征 X 射线。测定和分析特征 X 射线就可以对各种元素进行定性和定量的分析,这就是各种 X 射线分析的基础。

康普顿效应

当一个具有足够能量的入射光子打到原子中的一个电子,还可能发生如图 4.1 所示的过程。入射光子和电子之间的相互作用好像我们很常见的 2 个小球之间的弹性碰撞。在碰撞之前入射光子具有能量 hc/λ 和动量 h/λ ,碰撞之后,光子将一部分能量转移给电子后以偏离原来的方向 θ 角度方向散射出去,从光子那里得到能量的电子沿着与光子入射方向成 ϕ 角度运动。散射光子的能量变为 hc/λ' ,动量变为 h/λ' 。这个效应是首先由美国物理学家康普顿发现的,因此称为康普顿效应。

电子对效应

当光子的能量大于 1.022MeV 时,它与物质相互作用时,光子在被物质吸收的同时,会转化为一个电子和一个正电子,就是所谓的电子对。

正电子和电子不同,它极不稳定,寿命只有 $10^{-10} \sim 10^{-7}$ 秒。通过与物质中的电子相结合,再先转化为 2 个光子,这种现象称为正电子湮灭效应,所产生的光子叫做湮没辐射或光化辐射。湮没辐射的特征能量是 0.511MeV。通常当能量大于 1.022MeV 的 γ 射线入射原子序数较高的物质时,很容易探测到这种特征能量为 0.511MeV 的次级辐射——湮没辐射。

光子与物质相互作用时所发生的以上三种效应和光子的能量有关系,当能量较低时,光电效应占主导地位;当能量增加到 200keV 以上时,康普顿-吴有训效应就变得重要起来;当光子的能量进一步增加到大于 1.022MeV 时,电子对效应才开始变得显著起来。而且这三种效应还与物质的原子序数 Z 有关, Z 低时效应小, Z 高时效应强。

3. 中子与物质的相互作用

中子和 X 射线、 γ 射线一样，都不带电。但是，它与物质相互作用，既和带电粒子不同，又和 X 射线、 γ 射线不同，它总是与组成物质的原子核发生作用。中子与物质的相互作用主要有以下三种形式。

散射

中子是不带电的，因此很容易穿过原子的核外电子层而直接与原子核发生碰撞。在碰撞的过程中，中子失去了一部分能量，并偏离了原来的入射方向，折一个角度继续运动，也就是说中子发生了散射，成为散射中子。受碰撞的原子核，因为获得了中子的一部分能量而向另一个方向运动，这就是说原子核发生了反冲，成为反冲核。

中子的散射也有弹性散射与非弹性散射之分。如果碰撞前后中子和原子核的总动能和总动量都保持不变，这种散射就是弹性散射。另外一种情况就是，在中子与原子核碰撞后，使原子核处于激发状态，而激发状态的原子核是不稳定的，当它从激发态回到基态时会放出 γ 光子，因此碰撞前后中子和原子核的总动能不相等（碰撞前的大于碰撞后的），这种碰撞就叫做非弹性散射。

辐射俘获

有时中子打到某种原子的原子核时会被原子核俘获，同时发出一个 γ 光子，原来的原子变成了另一种同位素。这种反应称为辐射俘获，又叫做 (n, γ) 反应，意思是入射一个中子，放出一个 γ 光子。人们常常利用 (n, γ) 反应来生产放射性同位素，例如前面提到的 ^{60}Co 就是利用中子去轰击 ^{59}Co 稳定同位素的辐射俘获效应，使 ^{59}Co 俘获一个中子变成放射性同位素 ^{60}Co ，同时发出一个 γ 光子。这个反应可以写成 $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ ，或写成：



核裂变

用中子轰击某些高原子序数的重原子核时，会使重原子核分裂成 2 个较轻的原子核，同时释放出大量的能量，这种反应就是核裂变。一个 ^{235}U 在中子的轰击下，分裂成 2 种不同元素的原子核，放出 2~3 个中子和大约 200MeV 的能量。这是我们已经介绍过的一个典型的核裂变的例子，是迄今人类利用原子能的主要形式。计算结果表明，1 千克的 ^{235}U 核裂变时所发出的能量等于 2500 吨煤燃烧所释放的能量。

4. 射线的化学效应

化学分子间的结合和离解通常只需要几个到几十个电子伏特。举个例子来说，32.5eV 的能量就可以使生物组织中的几乎任何一个分子产生离解。因此，一个具有 1keV 能量的粒子与物质中的分子相互作用就将引起相当大的化学效应。

分子尤其是生物分子，常常是通过共价键结合的，即原子间通过共同占有原子的价电子而结合在一起组成分子。我们知道，水是生物组织中最重要分子之一。我们就以水为例来说明一下射线的化学效应。图 4.2 就是射线在水中引起化学效应的几种情况。

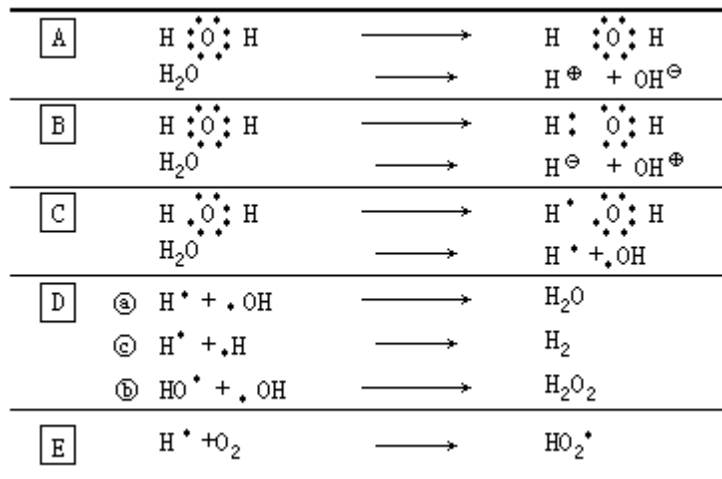


图 4.2 射线在水中引起化学效应的几种情况

(1) 如果化学键按 (A) 和 (B) 分解，便产生 2 个带相反电荷的离子。这些离子的化学性质通常都十分活泼。分子的离解可以直接引起化学效应，而由化学离解产生的化学性质活泼的离子可以进一步与相邻的原子或分子起化学反应，又增加了一种化学效应。

(2) 化学键也可以按 (C) 那样从中间分开。这里的反应产物都不带电，它们都不是离子，而是所谓自由基，至少含有一个不成对的价电子。由于这些不成对的价电子趋向于结成对而形成共价键，因此自由基的化学性质比离子更加活跃，对生物体组织的破坏性更加严重。毫无疑问，大多数的射线的化学效应和生物效应都是由自由基引起的。

(3) 自由基一旦形成就完全有可能与它们周围的自由基发生化学反应如 (D) 所示。(D) 的反应产物是水，这是我们所希望的。(D) c 的生成物是过氧化氢，对生物体有显著的危害。

(4) 最严重的情况是 (E) 中的自由基与氧的结合，其生成物 HO_2^{\cdot} 自由基比过氧化氢对生物体的危害更加严重。

在射线的照射下，化合物分子中的键合情况会发生分化和重新组合，最终使一种物质转变成另一种物质。我们把由于射线照射所引起的这一类化学反应叫做辐射化学效应。人们把射线比作常规化学反应中的催化剂。通过辐射化学反应，人们实现了许多过去无法实现的化学反应获得了新的辐射化学产品。辐射化学效应和传统的化学反应相比，到底有哪些优点呢？概括起来，主要有以下一些：

(1) 不需要加热。我们知道，传统的化学反应的速度和反应时的温度、压力等反应条件有关，而辐射化学效应却可以不用高温和高压，可以在常温常压下，有些甚至可以在低温下进行。这就大大降低了反应条件，可以在一般的设备中实现许多原来需要高温高压设备才能实现的化学反应。尤其是对于那些在高温或常温下不稳定的化合物，是不能采用加热的办法去引发它们的化学反应，因为在加热的过程中往往在人们期望发生的化学反应开始之前，那些化合物就分解了。在这种情况下，采用辐射化学效应就显得非常得心应手。

(2) 不必加催化剂。有些传统的化学反应不仅需要加热，而且还要加催化剂。对于那些放热的化学反应，当它们来不及放热时，催化剂有可能过早分解而导致反应失败。这不仅影响产品质量，甚至可能发生爆炸。辐射化学效应不用加催化剂，自然也就不存在这个问题。此外，由于不添加催化剂，产品中并没有残留的催化剂物质，纯度大大提高。这一点对半导体和医用材料等高纯度产品的制备尤为重要。

(3) 射线具有很强的穿透能力，因此它能够引发某些特殊的化学反应。例如，有些化学反应需要在器壁很厚的高压釜中进行，或需要在固态下进行，那么用射线来“催化”就非常方便。又比如，出于环保安全考虑，规定在某些高分子化合物中的有害单体残留物不得超过某一数量，然而在固态反应中要使单体完全聚合是相当困难的，而射线可以穿透固体，很容易引发其中的残留单体完全聚合。

(4) 催化剂的浓度在化学反应中随着时间的推移而逐渐下降，导致反应速度也随之下落。而利用射线引发的化学反应，可以很容易在反应过程中始终保持射线强度恒定不变，从而使反应速度始终保持恒定。

(5) 辐射化学效应的可控性强。射线照射时化学反应进行；射线照射停止化学反应也随之停止下来。此外，辐射化学效应既可以让全部反应物都参加反应，也可以用加屏蔽物的办法，只让其中的一部分发生反应。这些都是传统的化学反应难以达到的。

五、怎样防护射线对人体的伤害？

射线和世间任何一种有用的东西（如水、火、电、汽车……）一样，既能造福人类，也可能给人类带来危害，甚至夺去生命。最早发现天然放射性的贝克勒尔由于经常把铀盐放在身上而得了皮炎。毕生致力于放射性研究而两度获得诺贝尔奖的居里夫人长期在极端简陋和几乎没有任何防护的条件下进行放射性研究，身体受到射线的严重伤害，最后死于再生障碍性贫血。她的女婿约里奥后来在检查她的实验记录时，发现记录本受到严重的放射性污染。她在家使用过的菜谱书，在她死后 50 年仍带有放射性。20 年代放射性同位素镭被用于夜光表生产，涂表盘的工人常用舌尖去舔沾有镭粉的笔尖，使镭进入体内，积累在骨骼中，那些工人后来几乎全部死于骨癌或贫血。这些惨痛的教训引起人们高度的警觉，加强了怎样有效防护射线对人体的伤害的研究。到了今天，人们已经积累了丰富的知识和经验，完全可以避免类似的不幸事件的发生。

随着射线在工业、农业、医学、科研等领域日益广泛的应用，人们接触射线的机会日益增多，因此人们在享受射线带来的种种好处的同时，对射线可能给人体带来的危害也十分关心。我们在介绍射线的各种应用之前，先了解一下射线对生物体和人体会发生哪些效应？可能造成哪些危害？以及我们应该怎样预防这种危害？

1. 射线的生物效应

大家都知道，细胞是生命最基本的单元。活细胞中最重要的分子是细胞核中的脱氧核糖核酸（DNA）分子，它控制着细胞再生的过程。当 DNA 分子在射线的直接照射下受到破坏时，这种细胞虽然还有可能生存但是不能再分裂，以至于只能一直工作到老死，而没有子细胞来接班。当这些老细胞死亡后，就会影响到由这些细胞组成的生物组织的功能失常，甚至整个组织坏死。如果这些组织是构成生物器官的主要部分，那么整个器官就会过早退化或死亡。这是射线引起的生物效应的第一种情况，即所谓的直接效应。

还有另一种情况，就是所谓的间接效应。当生物体中不占重要地位分子（比如水）在射线照射下分裂成活泼的离子和自由基。通过这些活泼的离子和自由基再去和 DNA 分子发生作用，从而也造成与直接效应相同的后果。

在直接效应中，由于射线的速度很快，射线粒子与 DNA 分子的碰撞并引起 DNA 分子的破坏，几乎是同时发生的。而在间接效应中，由于离子和自由基的扩散速度很慢，在它们还没有对生物体造成伤害以前，可以预先在它们运动的路径上设置一些化学保护剂，用以保护那些重要的分子免受伤害。

2. 影响射线生物效应的因素

影响射线生物效应的因素很多，有物理学因素（如射线的种类和能量、照射剂量、剂量率、照射方式、照射部位等）、生物学因素（如受照射个体的性别、年龄、体质、营养情况、射线敏感性等），甚至受照射者的一些生活习惯（如是否吸烟、喝酒、喝茶等）和社会环境也会对受照射者的射线生物效应有所影响，因此我们在评价射线生物效应时要考虑以下一些因素。

射线生物效应与射线照射剂量的关系

实际上，人们日常生活、学习和工作中无时无刻不在接受各种射线的照射。人类赖以生存的地球就含有许多天然放射性同位素在不停地发出各种射线；我们头顶上的天空中还有宇宙射线，这对生活在高原地区的居民和当人们坐飞机在高空中飞行时还会受到更多一些的宇宙射线的照射；我们一日三餐吃的食物中以及我们人体本身也都含有一些放射性同位素，在我们体内不断地放出射线照射着我们自己的肌体。此外，我们看电视和做 X 光透视检查时也都会受到射线的照射。但是，以上所有这些人接受到的射线总剂量是很小的，对人们的健康不会造成伤害。甚至我们可以说，人类本来就是在这种环境下诞生和发展的，而假设让我们生活在绝对接触不到任何射线的环境里，或许人类反而无法正常生存，就好像“水至清则无鱼”一样。

总之，射线并不是在任何情况和任何剂量下都会对人体造成危害，只有在射线照射超过一定剂量时才能对某些组织和器官造成危害。还要说明的是，虽然照射剂量一样，但是射线的种类和能量不同，所引起的生物效应或危害程度也不一样。

射线生物效应的随机性

由于射线引起的生物效应并不是射线所特有的，而且发生率（占总人数的比例）低，需要通过大群体的调查，经过统计分析才能确定其规律，包括定量和半定量的关系。例如，射线辐照致癌是随机性的，对受照射群体来说有一定的概率，即有一定数量的人会因此而得癌症，但并不是每一个受照射的人都会得癌症。又如，日本的核爆幸存者中，接受 100 拉德以上剂量的人群中，白血病的发病率明显增加，但并不是每一个受 100 拉德以上剂量照射的人都会发生白血病。

射线生物效应有一定的潜伏期

人体各组织的射线生物效应的潜伏期长短也是不同的。还以日本核爆幸存者的统计为例，早期的观察结果主要是白血病发病率较高，随后其它的恶性肿瘤才见增加。因此，有些射线生物效应需要较长时间才能发现。还有一些生物效应的潜伏期可能超过受照射者的寿命，在他们生存期间不一定能被发现。

射线生物效应与受照射者性别及年龄的关系

有一些射线生物效应和受照射者的性别有关，比如，女性的甲状腺癌的发病率比男性高，乳腺癌发病率也是在女性受照射者中才见明显增加。

射线生物效应与受照射者的年龄关系比较密切。由于胚胎和胎儿的组织器官的细胞处于高度分化阶段，少年儿童处于生长发育的旺盛时期，他们的

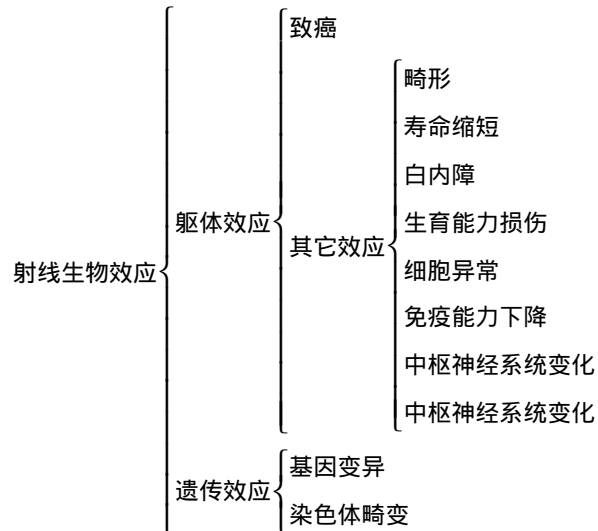
射线敏感性都比成年人高。白血病和癌的发病率都与年龄有关，青少年较高，白血病尤为明显。

3. 射线生物效应的类型

射线对人体的伤害一般可以分为躯体效应和遗传效应。躯体效应是指受照射者本身所产生的效应，从效应出现的时间来考虑又可以分为早期效应和晚期效应。遗传效应是指受照射者后裔所产生的射线生物效应。

射线生物效应的内容在这里用表 5.1 列举如下：

表 5.1 射线生物效应的类型



4. 与其它对人体致害因素的比较

射线对人类可能造成的危害与人类生活环境中的其它致害因素相比，它的危害性怎样呢？这是我们很关心的一个问题。表 5.2 是韦因克等人对各种致害因素对人引起死亡的危险性所做的综合比较。

表 5.2 各种致害因素对人引起死亡的危险性的比较(人/年)

致害因素	危险度(人/年)	致害因素	危险度(人/年)
各种疾病	10^{-2}	火 灾	2×10^{-3}
汽车事故	10^{-4}	触 电	2×10^{-5}
吸 烟	5×10^{-4}	白 血 病	10^{-5}
交通事故	2.5×10^{-4}	甲状腺癌	10^{-6}
自 杀	2×10^{-4}	火力发电公害	4×10^{-6}
大气污染	10^{-4}	自然灾害	2×10^{-6}
工业事故	10^{-4}	原子能工业(平时)	10^{-7}
溺 死	3×10^{-5}	原子能工业(事故)	$10^{-32} \sim 10^{-4}$

原子能工业是人们接受射线而造成伤害最为典型的地方，射线是最主要的致害因素。从表中可以清楚地看出，在平时，原子能工业对人造成危害的概率比其它的致害因素都低，即使是在发生核事故的情况下，其危险度也只是和其它工业事故相当，为 10^{-4} 人/年左右，与汽车事故、吸烟、交通事故、自杀、大气污染这些致害因素的每一项所造成的危险度相近。可见，射线对人的危害性并不比其它的致害因素高，并不特别可怕。

射线并不特别可怕还在于，就像用火要防火灾，用电要防触电一样，只要了解它的规律性，方法得当，并采取必要的防护措施，避免接受过多的射线照射，就不会受到射线的伤害。

5. 射线防护的基本原则

人体受到射线照射的方式有 2 种：体外的射线照射（简称外照射）和射线源进入体内而使人体所受到的照射（简称内照射）。

对外照射的防护的基本原则是避免或尽量减少来自体外的各种射线对人体的照射时间和照射剂量。我们可以采取以下几种办法：

（1）距离防护。就是尽可能远离射线源。

（2）时间防护。就是尽可能减少可能受到射线照射的时间。

（3）屏蔽防护。就是在射线源的周围设置能够吸收或阻挡射线的物体（称为屏蔽物），尽可能减弱射线到达人体时的强度和能量。这里需要指出的是，不同的射线对屏蔽物有不同的要求。对 α 射线和 β 射线，不需要很厚的屏蔽物。而 γ 射线的穿透能力强，要用很厚很重的材料作屏蔽物。最常用的有铝、铁、混凝土等。而对于中子的屏蔽材料则选用对中子吸收能力好的石蜡、硼、水等。

（4）加强剂量监测。保证射线源安全运行，避免各种人为事故的发生。

总之，只要遵循上述各项基本原则和方法，配备必要的防护设备，严格遵守安全操作规程，我们就能够避免射线对人体可能造成的危害，做到“常在河边走，就是不湿鞋”。

六、射线在自动检测和自动监控方面的应用

可以毫不夸张地说，各种射线的发现和应用是本世纪科学技术所取得的最伟大的成就之一。如今，各种射线不仅已经在工、农、商、学、医等各种行业，而且已经在人们日常生活中的衣、食、住、行、文化体育等各个领域里得到了日益广泛的应用，为经济繁荣、科技发展和社会进步发挥着日益重要的作用。

同时，也正因为射线的应用已经是如此的广泛和如此的深入，本书不可能全面而详尽地介绍各种射线的用途，只能选取其中的几个侧面作一些概要的介绍，如为工农业生产创造了许多自动检测和自动控制的新技术；为农业上的培育良种、灭菌保鲜、防病除害等开辟了新途径；为现代测试分析提供了许多新方法，揭示了许多用其它方法难以发现的新现象和新结果；为医学上的诊断和治疗提供了许多精确有效的新手段；为各种新材料的制备、合成和加工增添了许多新技术和新方法...

射线的应用和射线的防护一样都是建立在射线和物质的相互作用的基础之上的，都是利用了相互作用过程中所发生的物理学的、化学的和生物学的效应的结果。比如，过分的射线照射会对人体的正常细胞造成伤害，是我们要极力加以防护的；而用这种照射来杀死有害的癌细胞，则是我们要加以利用的。

1. 特殊条件下的工业生产监测

射线测厚计

过去为了测量轧钢机轧出的钢板的厚度，通常采用的办法是过一段时间就让轧钢机停下来，再由测量员冒着高温用卡尺去度量。很显然这种做法有可能烫伤测量人员，劳动强度大，效率低，而且也反映不了产品的最终厚度。而采用放射性同位素测量仪，不仅可以不用停机来随时准确测量钢板厚度，测量人员再也不用冒着高温和被烫伤的危险，而且可以把测量信号反馈到自动控制系统，自动调节轧机间的距离，实现轧机自动控制和生产的自动化。

放射性同位素测厚仪由放射性同位素源、射线探测器和显示仪表三部分组成，根据其工作原理上的差别，可以分为透射式和反射式两种。透射式测厚仪的工作原理如图 6.1 所示。它的主要特点是放射源和射线探测器分别放置在待测钢板的两侧。放射性同位素发出的射线经过钢板的吸收以后，透过钢板的射线强度大为减弱。钢板越厚，射线被钢板吸收得越多，透射过来的射线强度就越弱；反之，钢板越薄，透射过来的射线强度就越强。这还只是相对的结果，我们想准确测出钢板的厚度值，要首先用测厚计去测若干已知厚度的钢板，作出测厚计显示仪表的读数和钢板厚度之间关系的校准曲线。然后就可以用测厚计去测刚从轧钢机轧出的钢板的厚度，根据显示仪表的读数，就可以随时指示出待测钢板的厚度值。很显然，这种方法是接触式和非破坏性的，不仅省时省事，而且安全可靠。

反射式测厚计的工作原理如图 6.2 所示。它和透射式的主要区别在于射线源和射线探测器在待测物的同一侧。这种射线测厚计最适用于测量各种薄膜和涂层的厚度。而薄膜和涂层厚度的测量在技术上存在一些困难，一般采用破坏性的测量方法，而且所测得的只是平均厚度。反射式测厚计的出现，比较完满地解决了这一难题。如图 6.2 所示，射线源放在铅块的下面，它所放射出来的射线被铅块挡住而无法直接进入探测器——电离室。当用它来测量薄膜厚度时，射线射向薄膜，除了有一部分被薄膜和衬底材料钢板吸收以外，还有一部分经反向散射回来进入探测器。物质散射射线的能力与它的原子序数有关，轻元素的散射能力小，重元素的散射能力大。对于一定衬底材料上一定物质的薄膜与透射式厚度计一样，先用已知厚度的薄膜来校准探测器的读数，作出薄膜厚度与读数关系的校准曲线，然后就可以根据探测器读数来测量出待测的薄膜厚度。用这种方法还可以测量出弯曲表面上薄膜的厚度，这是别的测量方法很难做到的。反射式测厚计在电影胶片感光层厚度检测和控制中的应用，大大提高了电影胶片质量，又可节约银材料，给电影胶片的生产带来很大的经济效益。

射线密度计

前面已经谈过，射线穿透物质以后强度的减弱不仅与物质的厚度有关，而且还与物质的密度有关。因此我们可以将透射式射线厚度计改作成射线密度计去测量物质的密度。比如在化工部门，可以用射线密度计对高温高压高黏度强腐蚀等条件下密封设备中的各种流体的密度（或浓度）进行连续自动的测量和监控。

射线密度计还可以用来测量土壤的密度和河水中泥沙含量，可以测出江

河中各处河水中的泥沙含量及其变化情况。这种方法可以取代过去一直沿用的人工取样、沉淀去水和称重计算等一系列麻烦费事的方法，大大缩减测量时间，减轻人们的劳动强度。

射线物位计

通常，我们都可以看到锅炉边上装一根玻璃管，这就是最简单的一种物位计，用来监测锅炉内的水位，根据连通器的原理，玻璃管内的水位就是锅炉内的水位。因为这种方法简单易行，因此被广泛应用。但是，被测量的若是腐蚀性的液体，一旦玻璃管被腐蚀损坏，就会造成极为严重的后果。如果容器内处于高温高压状态，玻璃管也无法承受。如果容器内装的是胶体状、粉末状或颗粒状的物质时，也不能用这种方法来确定容器内的物质的位置(物位)。

利用与射线测厚计、射线密度计相同的原理，即物质吸收射线的原理，可以制成射线物位计。利用这种新型的物位计，可以很好地解决上述各种特殊条件下的物位测量问题。

根据测量对象和安装方式的不同，射线物位计有几种类型。图 6.3 (a) 中，射线源和射线探测器处于同一水平面上，其高度可以同步变化。当射线源和射线探测器位于物位水平面以下时，由于物质吸收射线的结果，接收到的射线强度较弱。当位于物位水平面以上时接收到的射线强度较强。射线源与射线探测器同步上下移动时，处于某一位置上下射线强度发生突变时，这一位置就是容器内的物位。图 6.3 (b) 中，射线源和射线探测器分别固定安装在容器的底部和顶部。当容器内物位变化时，由于容器内物质对射线的吸收，穿过物料到达射线探测器的射线强度也随之变化。这种射线物位计只适用于测量不太高的物位和密度较小的物料。图 6.3 (c) 是另一种射线物位计。其主要特点是将射线源放在一个特制的浮标里，始终浮在液面上，可以随着液位的变化而上下浮动。由于射线源与探测器的距离不同，探测器接收到的射线强度也不同，我们就可以根据射线强度的变化来确定出容器内液位的变化。

工业高炉中炉料物位的测量，如果用过去沿用的机械探尺来测量时，由于高炉内的温度很高，有时可高达 700 摄氏度以上，机械探尺常常被烧坏。此外，用机械探尺还需要有一套复杂的提升设备。而利用射线物位计就没有这些弊端，而且维护和维修也很方便。由于射线物位计可以对特殊条件下容器中的物位进行非接触式的和连续自动的测量，非常有利于实现生产过程的自动控制。

2. 材料的射线探伤

我们到医院做 X 光透视时，X 光穿透衣服、皮肤和肌肉，把人体内部的骨骼和内脏清晰地显示在荧光屏上。医生根据 X 光透视图像能够发现我们的身体是否有某些病变。我们是不是可以把这种办法应用到金属材料探伤上去，对各种材料制件进行透视，检查出这些材料产品或零部件内部的各种裂缝、气孔、沙眼等缺陷呢？

完全可以，办法和原理实际上都很简单。X 射线穿过密实的、无缺陷的金属层，强度就大大减弱了，如果金属零部件的内部有裂缝、气孔、沙眼和疏松的地方，X 射线比较容易通过，穿过来的射线强度就比较强一些。如果我们在金属零部件的背面放上照相底片，那么在有各种缺陷的地方感光较深，而在没有缺陷的地方感光较浅，这样就可以形象直观地检查出金属零部件内部的各种缺陷和损伤。图 6.4 是金属零部件的 X 射线探伤的原理图。

X 射线的穿透能力有限，一般只能检测厚度为 3 厘米左右的金属件。而且 X 射线探伤设备比较复杂，体积大，使用起来不够方便，价格也比较高。

射线的穿透能力更强，射线源体积小，价格低，使用简便，因此射线已经广泛地应用于工业上的金属探伤。此外，其它一些射线（如中子）也已经应用于各种特殊的材料探伤，如中子照相。

材料的射线探伤法不需要破坏材料，是一种无损的检验技术。而以前用来检测材料的一些方法，如化学分析、机械性能测试和金相分析等都是属于破坏性的试验，要从材料上取下一部分作为样品进行分析。显而易见，这些方法随之而来的另一个缺点就是我们拿去分析的只是材料很小的一部分，其结果并不能代表其余未被检测的材料的情况。而射线探伤方法不仅是一种无损检测方法，而且可以很方便地对整个材料的质量作出评价。

这种方法已经在许多领域得到了广泛的应用。人们用它检查船体、管道、桥梁和机器零部件中的各种损伤和缺陷。考古学家可以用它查明岩石中是否有动植物化石而无需把岩石破碎。机场、车站、海关边防等处的工作人员用它检查行李箱包中是否有武器弹药、毒品和其它各种走私违禁物品，既方便又快捷。

3. 地下探宝

地质勘探是射线技术的又一个用武之地。由于地下的各种放射性同位素本身就是射线源，因此我们可以直接用射线探测器测量某个地区内射线强度变化的情况，估计出该地区范围内放射性同位素矿产资源的分布情况。这是横向分布情况。用同样的方法我们可以根据射线强度随地层深度变化的情况，判断出该地区不同深度地层内放射性同位素矿藏的分布情况。这是纵向分布。我们还可以根据射线与物质相互作用的原理来勘探地下的煤、水、石油、天然气等宝贵的资源。

射线测井找煤

在地质勘探中，有一种常用的方法，先从钻孔中的不同深度取出岩心制成标样，再对这些标样进行各种理化分析，最后根据分析结果绘制成所谓的地层图，以此确定出地下矿藏的分布情况。可以想象这种方法是很费时费事的，速度很慢。另一种办法就是将探测仪器放到钻孔中去，直接取得钻孔内岩层矿藏的信息，这种方法在地质勘探行业中叫做“测井”。

利用 射线测井法找地下煤矿的基本原理如图 6.5 所示。装有 射线源和探测器的测井装置用滑车放进钻孔中，可以沿着钻孔上下移动。射线源发出的 射线向钻孔四周的岩壁轰击。如果周围是煤层，由于煤的密度低，对射线的吸收能力弱，反射回来的 射线就多，探测器接收后输出的讯号就强，在记录仪器上就会看到明显的讯号峰；如果周围是岩石层，由于岩石的密度大吸收的射线就多，反射回来的相对就少，再记录仪器上显示出比较平缓的曲线。

中子测井找石油

中子测井法与 射线测井法的原理基本上是一样的，区别只在于放入钻孔中的是中子源而不是 射线源。当然，前面已经介绍过，中子与物质的相互作用过程也和 射线有所区别，因此其用途也不大一样。

钻孔中的中子源向钻孔四周的岩壁发射速度很高的快中子。这些快中子与岩层物质中的各种原子核发生碰撞，每次碰撞都要损失一部分能量，经过多次碰撞，其速度就大大降低下来而成为慢中子。氢原子核的质量和中子差不多，根据碰撞理论，它对中子的减速所起的作用最大，而其它的各种原子核对中子的减速的作用都比较小。我们知道，快中子由于多次减速成为慢中子以后，很容易被别的原子核俘获而发出 γ 粒子。我们在中子测井装置里还装有一个 射线探测器，用来探测原子核俘获中子后发出来的 γ 粒子。这样我们就可以从 射线探测器的测量数据中判断出是否碰上含氢丰富的石油了。如果找到石油，探测器接收到的 射线强度急剧增加，记录仪上会显示出讯号峰值。如果岩层中没有石油，快中子变成慢中子的过程就要缓慢得多，也就是说它要穿越很深的地层深处才转变成慢中子，再被周围的原子核俘获而放出 γ 粒子。而这些 γ 粒子还要再穿越很厚的地层才能返回到探测器，因此记录下来的 射线强度就很弱。我们根据探测器记录下来的曲线就可以推断出岩层各处含氢量的多少，区分出石油、天然气和水的分布情况来。中子测井法为石油勘探和合理开发油田提供了一种快捷有效的探测技术。

地表 射线测量找水

随着国民经济的发展和社会的进步，人类对地下水的需求日益增长。但是，地下水是埋藏在地表下，存在于岩石的缝隙、溶洞和土层孔隙中的可流动的水。对那些自然降水量少、地表水资源缺乏的干旱地区，地下水对解决人们日常生活和农田灌溉尤为重要。由于地下水深藏在地下，寻找起来比较困难。现在有一种方法，利用地表上的天然放射性物质浓度变化来勘察地下水，为地下水的开发和利用提供了一种新方法。

由于地下水中溶解着较多的铀盐、镭盐等放射性物质，随着地下水沿着断层、破碎带和缝隙处上升、渗透到表土层，使得这些放射性物质在地表附近的土壤中不断析出、吸附、沉淀和扩散，从而使得有地下水处的地表附近的放射性强度增加，一般要增加 1.3~2 倍。这样我们可以用灵敏的射线探测器来探测地表放射性物质释放的射线，根据射线强度变化的情况推断，可能有地下水的区域。在我国的某些干旱缺水地区，已经利用这种方法，结合地形地貌、地质勘察资料来寻找地下水，取得了比较好的结果。

4. 火灾报警

火灾是一种破坏性很大的灾害。高层建筑、仓库、旅馆饭店、石油化工生产车间、火车轮船、森林草地等等的防火问题，尤其受到人们的高度重视。放射性同位素烟雾报警器现在已经广泛地应用于火灾的早期报警。它不分寒暑昼夜，无时无刻地监测着周围的烟火动静，为预防火灾永不停息地工作着。

目前广泛使用的烟雾报警器是由离子感烟式探测器和报警器两部分组成。图 6.6 是离子感烟式探测器的示意图。从原理上说，这种烟雾探测器就是一种电离室，在电离室的两个电极间放上 射线源（如 ^{241}Am 源）。射线源不断地发出 射线，使电离室的两个电极间的空气发生电离，这时如果两极间加上电压，就会产生电流。当被监视的区域的空气中出现燃烧所产生的烟雾时，这些烟雾会进入电离室，电离室中的正、负离子就会很快附着在比它们大上千倍的烟雾颗粒上，因此正负离子在电离室的两极间移动的速度比原来慢多了，而且它们在缓慢移动过程中碰到一起而中和成为中性颗粒的可能性也大多了，从而烟雾探测器电路上的电流就小多了。根据电离室电流减小的情况，报警器就会及时地发出火警信号。

实际使用的烟火报警器中，是将 2 个电离室串联起来组成桥式电路。两个电离室的结构稍有区别，一个是密封的，不让外面的气体进入，另一个则在电离室的室壁四周开了许多小孔，可以让外面的气体自由出入。当电离室周围没有烟雾时，2 个电离室的输出电流一样，差电流为零，电路平衡，无讯号输出。一旦有火情出现，烟雾只能进入没有密封的电离室，而进不去密封的电离室，2 个电离室的输出电流就不一样，电路失去平衡，有讯号输出。当讯号值超过报警器的报警阈值时，报警器就立即发出火灾报警信号。报警阈值的确定，要适用于不同场合的要求，如易燃易爆物仓库中的烟雾报警器的阈值就要定得低一些，也就是烟雾灵敏度很高。而对一般的旅馆和其它允许吸烟的场合，灵敏度就不要太高，否则如果吸烟产生的烟雾也能引起报警，反而会带来麻烦。

人们也许会问，这种报警器里使用了放射性同位素，会不会对人造成危害呢？

这种烟雾报警器使用的 射线源通常是 ^{241}Am 源，源强为 1~10 微居里、 ^{241}Am 源中放射性物质的自然逸出率是非常微小的，对人是相当安全的。现场测定的结果表现，放射性浓度完全符合国家规定的安全标准。此外，经过各种严格的理化试验，证明这种报警器用的 ^{241}Am 源的牢固性、耐磨性、耐腐蚀性、耐高温、耐水气侵蚀等方面的性能也都符合安全标准。因此这种烟雾报警器具有很高的应用价值，不会对人造成任何危害。

七、射线灭菌消毒

1. 从一个真实的故事谈起

十多年前，用现代射线技术为埃及珍藏的古尸木乃伊拉美二世看病的故事轰动了世界。木乃伊拉美二世是世界上最负盛名的木乃伊古尸。拉美二世是古埃及法老，死于公元前 1210 年，享年 90 岁。长眠地下 3000 多年后，于 1881 年被人发现时，还是一具保存极为完整的木乃伊。一直将它陈列在开罗博物馆里供人参观。由于护理不够完善，一直放在有阳光直射的房间里，而且观众络绎不绝，这样就带进了细菌和灰尘，使拉美二世也受到污染，危及木乃伊的“健康”。埃及政府请法国巴黎人类博物馆的专家帮助为木乃伊拉美二世会诊。专家们经过仔细检查，确诊木乃伊拉美二世因细菌感染患严重炎症，必须采取紧急医疗措施来挽救这一世界级的无价珍宝。我们知道，木乃伊是不能打针吃药的，也不能用药水浸泡消毒，常规的治疗方法都难以奏效。最后他们一致决定采用 射线照射达到灭菌消毒的办法，经过精心的治疗，原来感染的 89 种病菌全部消灭，使木乃伊拉美二世完全康复。

这是射线灭菌消毒最生动和最有说服力的成功事例。早在伦琴发现 X 射线之后不久，F. 明克和 S. C. 普列斯科特分别在 1896 年和 1902 年就已发现了 X 射线有消灭病原微生物的能力，并在几年之后获得了专利权。

2. 射线灭菌消毒的原理与特点

为什么射线能够灭菌呢？我们都知道，许多细菌是很怕太阳的，把东西放在阳光下晒一段时间，这是一种最方便的又是不用花钱的灭菌消毒方法。太阳光能够灭菌消毒主要是因为阳光中的紫外线波长短。射线的能量比紫外线高得多，因此它的灭菌能力比紫外线强得多。病菌这种生物体受到射线的照射后，由于电离和激发作用所引起的射线生物效应而丧失活动能力，最终导致死亡。

研究表明，不同种类的微生物和菌株的抗射线的能力是各不相同的，有的相差可能高达 100 倍。射线灭菌需要用多高能量的射线以及采用多大的照射剂量，不仅要看要杀灭的是什么细菌和细菌污染的程度，而且还要看我们希望将细菌消灭到什么程度。国际上，目前大多数国家都建议采用 2.5 兆拉德作为常用的灭菌剂量。实践证明，对于一般医疗用品的消毒灭菌，这个剂量是足够的。

辐射剂量是表示物质吸收射线能量多少的一个物理量。现在最普遍使用的单位是拉德 (rad)。1 拉德等于每克物质吸收射线的能量为 100 尔格。

射线灭菌消毒有哪些优点呢？

首先，射线灭菌消毒过程中的温升可以忽略。我们可以做这样一个计算，即把国际上通用的射线灭菌消毒剂量 2.5 兆拉德换算成能量，大约相当于每克物质吸收 6 卡的热量。而这点热量只能使水的温度升高 6 度，几乎可以忽略不计。因此这种方法特别适合那些耐热性能差的材料（如高分子聚合物、生物体等）的灭菌消毒。

其次，通常用于射线灭菌消毒的是 ^{60}Co 源发出的 γ 射线，它的穿透能力很强，这对于那些造型复杂、比较厚或需要包装后再灭菌消毒的物品是特别有利的。

此外，我们还可以列举出射线灭菌消毒的其它一些优点，例如不会留下有害残留物，不会有二次污染，处理过程节省能源等等。

这里需要指出，经过射线灭菌消毒以后，某些材料的强度可能有所下降，有些有机材料的透明度也会有所下降，这是射线灭菌消毒可能带来的缺点。

3. 射线灭菌消毒在医疗上的应用

射线灭菌消毒的优点在医疗器械的应用上得到了最充分的体现，因此，医疗卫生领域是它的最大用户。例如，外科手术用的缝合肠线是用动物的骨胶原纤维制成的，外科手术用它缝合刀口后会逐渐被人体吸收，无须拆线，很受医护人员的欢迎。但是这种材料容易感染细菌，又不能用高温消毒灭菌，也不宜用化学药品消毒。射线灭菌消毒是一种最理想的方法。现在，在医院里所用的医疗器械中有许多是用高分子聚合物材料制成的。其中有许多也是不耐高温的，因此射线灭菌消毒技术也是很适合这些医疗器械的灭菌消毒的。

其它用金属、玻璃、陶瓷等材料制造的医疗器械，如注射器、针头、手术刀、采血小板、节育环、肾脏透析机等也可以用射线照射来消毒灭菌，效果十分理想。其中的肾脏透析机的结构复杂，渗析膜的孔非常细，采用其它方法消毒相当困难，而用射线照射可以做到无孔不入，里里外外彻底消毒。

在国外，许多大型的医疗器械厂都有自己的射线灭菌装置，另外有许多工厂则利用辐照服务中心的射线灭菌设备。我国有许多城市建立了辐照中心，开展了医疗器械灭菌消毒的工作。

关于食品的灭菌消毒放到后面另行介绍。

4. 射线辐照设备

世界上的第一批用于灭菌消毒的 射线源在英国和法国建成投产。随后许多国家也纷纷发展各种射线辐照设备，特别是美国，发展尤为迅速。

从原则上说，射线辐照设备是相当简单的。通常是以 ^{60}Co 射线源作为该设备的核心部分。在一些特殊场合，也使用电子加速器。被辐照物进出辐照室（放射线源的地方）是利用传送系统自动进行。传送系统可以用传送带或单轨系统。传送路线的选择要使射线能够穿透物品的所有部位，以保证物品接受均匀的照射剂量。

图 7.1 是加拿大的一个 ^{60}Co 射线源辐照设备的示意图。辐照室被厚厚的屏蔽墙所包围，以确保射线源发出的射线全部被阻挡在屏蔽墙之内。射线源不工作的时候下降到安全的贮存位置，通常在水池的底部。严格而周密的报警系统确保正常的辐照一旦中断，射线源立即下降到贮存位置。严格的操作规程绝对保证工作人员进入辐照室时接受不到射线源发出的射线。

5. 食品的射线辐照保鲜

人类为防止食品变质而斗争的历史可能和人类本身的历史一样悠久。全世界由于食品变质所造成的损失是十分惊人的。据联合国粮农组织估计，全世界生产的食品由于变质所造成的损失约占四分之一到三分之一。无疑，这是一个很严重的问题，尤其是当地球上还有许多人仍然处于饥饿和半饥饿状态的今天，情况就变得更加尖锐。人们用来防止食品变质的一些方法，如冷却和加热都收到显著的效果，但它们耗用能源过多，加重了另一个世界性的难题——能源供应的紧张状况。防止食品变质的另一种预防办法就是添加化学添加剂。但是这种办法引出食品中残留化学添加剂的危害问题，有许多重要的毒化学论据强烈反对这种方法。

人们已经成功地将射线灭菌消毒应用于防止食品的腐败变质，并形成了食品的射线保鲜贮藏这一新的行业，世界上已经建立了许多食品射线保鲜贮藏工厂。在美国萨凡纳市有世界上第一个照射散装谷物的射线辐射装置，每小时能够处理 2000 千克左右的散装小麦，最高处理量可达每小时 5000 千克。日本高崎有一个每月可处理 1000 吨食品的射线保鲜贮藏工厂，在土幌建成了每月可处理 10^{60} 吨马铃薯的射线辐照工厂。图 7.2 是建在我国四川的一个 ^{60}Co 射线源辐照装置正在进行粮食辐照保鲜贮藏处理时的照片。

射线在食品保鲜过程中的效应

(1) 微生物学效应。射线照射能杀灭微生物，用不同的剂量可以分别达到杀虫（卵、幼虫和昆虫）、去污染（消除不带芽孢的微生物）和灭菌（消灭所有的微生物）的目的。

(2) 生理学效应。射线辐照能够抑制发芽（如土豆、洋葱、胡萝卜等）和延缓成长和成熟（如水果、蘑菇等）。

(3) 物理学效应。主要表现在渗透性的变化，如蔬菜干燥和缩短烹调时间等。

食品射线辐射保鲜的主要优点

与其它方法相比较，食品的射线保鲜贮藏有哪些优点呢？主要有以下这些：

(1) 它是允许将食品进行包装后再进行处理的唯一的一种方法。这个优点是显而易见的，它可以完全避免食品处理过程中的严重交叉感染问题。

(2) 对于通常可以直接生吃的食品，例如牛肉蛋黄酱、生香肠、牡蛎等，可以保证从生物学的角度来看也是安全的。尤其是对于那些动物性的食品，这种处理是非常必要的，而且不必当心有残留的化学添加剂。

(3) 能源消耗比较低，和冷却法和加热法相比，所需的能源低得多。据美国 70~80 年代统计，在美国食品射线辐照的费用约为 \$ 0.01/千克（每千克只需一美分）。

(4) 人们还发现，射线辐照还可以改善某些食品的品质。例如，射线照射新酒，可以加速它的陈酿和酯化，缩短窖贮时间，提高酒的质量。又如，射线照射可以缩短干菜的烹调时间，增强干果的复水能力，改善大豆的可消化性等等。如马铃薯干经过射线照射以后，所需的烹调时间可以从 20 分钟缩短为 4 分。

所需要的照射剂量

由于照射的对象和目的不同，所需要的辐射剂量是不一样的，大体上有以下三种区别：

(1) 小剂量照射。一般为 1~5 万拉德以下，用于使粮库中的害虫不育或将它们杀死，还可以用于延缓植物的生理变化，达到抑制马铃薯、大蒜头的发芽和延缓番茄、香蕉成熟的目的。

(2) 中等剂量照射。一般为 10 万~100 万拉德之间，照射的目的是大量杀灭腐败性微生物，延长食品的保鲜期，例如肉类、贝类、蛋类、水果、蔬菜等的射线保鲜。

(3) 大剂量照射。一般为 100 万拉德以上，目的是完全灭菌，主要用于动物性食品如肉类、鱼类、贝类、腊肉、罐头食品的射线保藏。

射线技术为食品保鲜贮藏开辟了一条新的途径，引起了世界各国的重视。到 80 年代初，世界上就有 60 个国家从事食品射线保鲜贮藏的研究和开发，建立了 70 个左右的食品辐射工厂，先后被许多国家正式批准公开出售的射线保鲜食品有洋葱、马铃薯、大蒜头、干果、鲜果、蘑菇、龙须菜、可可子、调味品、小麦、草莓、牛肉、猪肉及其制品——兔肉、鸡肉、鳕鱼、虾、宇航员和特殊病人的无菌食品等几十种食品。现在让我们来看两张实物照片。

(1) 图 7.3 是火腿扒：左边是经过照射过的熏制的火腿扒，右边的是未经辐照处理的火腿扒。这张照片是它们一起在室温下放了 9 个月以后拍摄的，可以非常清楚地看出射线保鲜的效果十分明显，左边经过射线保鲜处理的火腿扒仍然保持原来的颜色，和新鲜的火腿扒完全一样；而未经辐照处理过的火腿扒已经变成灰色，显然已经完全变质了。

(2) 图 7.4 是马铃薯照片：右边是经过射线保鲜处理的，左边是没有经过辐照处理的。它们的贮存的条件和时间完全一样，结果没有射线保鲜处理的已经长出很长的幼芽，而经过射线照射的马铃薯和刚收获的没有什么差别，保鲜的效果非常明显。

八、射线照射引起生物体变异及其在农业上的应用

1. 射线引起害虫绝育

人们在与农业上的各种害虫作斗争的过程中，希望有一种巧妙的方法，能够达到消灭害虫的后代，以便最后根绝虫害的目的。

人们从研究射线的生物效应中发现，生物体内不同的细胞对射线的承受能力是不相同的，例如生殖细胞对射线特别敏感，因为生殖细胞是一种正在活跃地分裂的细胞。因此我们可以找到一种辐射剂量，不对其它细胞有严重的损伤，只引起雄性害虫的遗传基因发生变化，引起精子染色体大分子链的断裂，并且错乱地相互搭接，改变了原来的位置和结构，这样就造成生殖细胞发生致死性突变，而害虫的肌体生命和生活能力，特别是交尾能力仍能保持。这种已经丧失生育能力的害虫，在自然界中与其它有正常生育能力的雄虫竞争雌虫。有些害虫（如蚊子、苍蝇）可以与多只雌虫交配，而雌虫终身只交配一次。那些与绝育雄虫交配过的雌虫是不能繁殖后代的，这样，我们一次灭虫就不是只杀灭一只或几只害虫，而是灭绝一群，灭绝一代以至几代的害虫。我们再将这种方法坚持和推广下去，就有可能最后根除这种害虫。

在美国有一种外表很像苍蝇的羊螺旋蝇对幼畜的危害很严重。1950年美国科学家用射线照射羊螺旋蝇，成功地得到了绝育雄性羊螺旋蝇。1952年在面积为3800公顷的萨尼贝尔岛释放了这种不育雄虫，连续几个月后，控制了该岛羊螺旋蝇的繁殖。1954年在面积为480平方千米的库拉索岛上，连续释放了五代不育羊螺旋蝇，结果使得这种害虫在该岛绝迹。1962~1964年用同样的办法，使德克萨斯州和新墨西哥州的羊螺旋蝇根除。1966年整个美国西南部的羊螺旋蝇绝迹。现在全美国已经彻底消灭了羊螺旋蝇。据统计，在美国花在这项工作上的经费约为1千万美元，而灭虫后所带来得经济收益每年就高达2亿美元。

射线治虫技术的基本原则

人们在长期的射线治虫技术的研究和开发中，通过大量的实践，积累了大量的经验，从中总结出以下几条重要的基本原则。

（1）雄虫的射线绝育手术的最佳时间，应当是害虫体细胞与生殖细胞的辐射敏感性差别最大的时期，一般是蛹期的末尾到成虫期的开始这段时间，因为在这期间躯体组织已经分化完成，而生殖腺仍在活跃地进行细胞分裂。

（2）不同害虫的射线绝育手术的辐射剂量是不一样的，一般在2500拉德~25000拉德之间。对于各种害虫的绝育剂量的选择原则是使其生殖细胞变异而保留其肌体生活能力和交配能力。

（3）要使害虫繁殖受到明显的抑制，所释放的不育雄虫的数量必须大大超过自然界中该种害虫群中正常雄虫的数量。为此，应该选择在该种害虫种群数量有明显减少的时候释放，或者与其它方法配合使用，如先用杀虫剂大量杀灭之后再释放不育雄虫，可以受到更好的效果。

射线治虫的优点

射线照射雄性不育治虫法最主要的优点是可以选择性地消灭某一种害虫而不影响其它生物。化学治虫法在人类与害虫作斗争的长期过程中发挥了重

要的作用。但是，由于化学杀虫剂的大量使用，带来了害虫抗药性和环境污染问题日益严重，连续使用导致恶性循环，造成严重后果。而射线照射雄性不育法不会污染环境，只消灭需要消灭的害虫，对植物和各种有益的昆虫和人畜都不会造成危害。

射线灭虫技术本身也是不断发展的。原来认为射线雄性不育法只适用于一生只交配一次的昆虫，后来的研究发现，对那些一生交配几次的昆虫也能够用这种技术进行防治。过去认为只能释放不育的雄性害虫才有效，近来已经有结果表明，释放不育雌性也有效果。

这种防治害虫的新方法特别适用于那些用其它方法很难防治的害虫，用射线不育治虫法则有可能彻底根治，至少可以大大缓和这种虫害。

推广射线治虫技术的关键是绝育雄虫的大量处理和饲养，而且要在大范围内施行，不能一家一户地小打小闹，必须要有统一的规划和组织，才能收到大的效果。

2. 射线刺激生物生长

我们已经知道，在强烈的射线照射下，能抑制生物的生长，使生物受到伤害，甚至死亡。但是在射线的剂量不是很高时，人们已经观察到大量的实验结果，证明射线照射能够刺激生物生长，并且已经应用到农业生产中去。例如，我国辽宁丹东市的科技工作者经过多年的研究、试验和推广，用一定剂量的快中子或⁶⁰Co射线照射后的柞蚕卵，发育长大成的柞蚕结茧大、吐丝多，而且丝质好。

为什么射线能刺激生物生长呢？

经过长期深入系统的研究，人们逐渐搞清楚了。原来动物和植物这些生物体都是由许许多多细胞组成的。细胞在不断地分裂，也就是说，细胞的数量在不断增长，这就是生物生长发育过程的本质。植物的种子或蚕卵在小剂量的射线照射下，细胞会发生一系列物理的、化学的和生理的变化，有可能加速细胞分裂的过程，因此刺激生物的生长发育。

对植物来说，这有可能促进种子的萌发和出苗。这对于那些萌发困难、出苗缓慢和成活率低的树木和珍贵的植物的栽培是特别有意义的。柞蚕卵经过小剂量的射线照射，其生长发育能力增强，生命力旺盛，抵抗不良环境的能力增强，而且柞蚕丝的产量增加，质量提高。与未经射线刺激生长的相比，经过射线照射过的柞蚕一般增产 20%左右，茧丝长度平均增长 50 米~80 米，百粒蚕茧纤维量增加了 108 克。

3. 农作物的辐射育种

因为良种一般都具有产量高、抗病虫害和抗其它自然灾害能力强等优点，因此选育良种是提高农作物产量和质量至关重要的一环，历来受到人们的高度重视。农作物在种植的过程中，由于受到各种外界条件的影响，可能发生某些变异，使得它们的后代在某些方面与其亲代有所不同。我们知道，依靠自然环境条件的变化所引起的自然变异，特别是可以一代一代遗传下去的遗传变异是非常少的，而且其中还有一些我们所不希望的变异，因此用这种办法来培育良种是很不容易的，而且要经历相当漫长的过程。

自古以来人们都在想方设法寻找能够加速育种过程的办法，使它在较短的时间里能够得到我们所希望的优良变异。经过了广大科技工作者长期的探索和积累，创造了许多培育良种的有效办法，例如，选择育种法、杂交育种法和利用杂种优势育种法等，培育了许多优良品种。辐射育种是近几十年来发展起来的一种较新的育种方法。什么是辐射育种？

辐射育种就是利用各种射线（如X射线、 γ 射线、中子等）照射农作物的种子、植株或某些器官和组织，促使它们产生各种变异，再从中选出我们所需要的可遗传的优良变异，经过培育而成为优良的新品种。

辐射育种的历史可以追溯到本世纪的20年代末。在1927年有人用X射线照射玉米，而使玉米发生重大的遗传性变异。1934年有人用X射线培育成烟草新品种，并用于生产。在50年代以前，辐射育种还只是零星的探索。50年代以后，随着各种射线技术的发展，射线源的种类和数量日益增多，辐射育种才比较迅速地开展起来，并且取得了不少成果。据报道，在1970年~1974年短短的几年里，国际上采用辐射育种法培育成功的农作物就达160种。

我国是从1956年开始开展辐射育种的研究和应用的。据不完全统计，各地直接和间接利用辐射育种法，先后培育出100多个农作物优良品种。浙江省培育成功的“原丰早”水稻，是一种早熟高产的优良稻种，比原本稻种早熟45天，增产10%左右。此项成果获国家发明一等奖。山东省用辐射育种法培育的“鲁棉一号”棉花良种，株型紧凑，结铃集中，成铃率高，适应性广，高产稳产，1980年全国推广面积达1000多万亩，增产皮棉25%，1981年获国家科委科技发明一等奖。湖北省培育的“鄂麦六号”小麦良种，比原品种增产20%，抗逆性好，适应性好，成为湖北省的当家小麦品种。辽宁省培育出“铁丰18号”大豆良种，广东省培育的粤油22号花生良种都具有产量高、油分高等优点。黑龙江省的龙辐梁1号高粱良种也是辐射育种的成果，比原品种早熟15天，亩产超千斤，增产20%左右。还有中国农科院用辐射育种法培育的甘油5号油菜良种，比原来的品种增产接近20%。仅仅举出以上几个典型的例子，我们已经可以看出几十年来我国的辐射育种工作取得了多么显著的成果。

图8.1列举了一些适合辐射育种的农作物种类。为什么射线能够诱发农作物的遗传性变异？

前面已经说明育种的前提条件是农作物发生遗传性的变异。当具有很高能量和很强穿透力的射线照射生物体后，可以使细胞里的染色体断裂，使它的位置和结构发生改变，还可以使染色体的基因分子发生变化。众所周知，农作物的各种特性都是由染色体的基因分子决定的。射线能使生物体的染色体基因发生变化，其结果就是导致生物体的特性发生变化。另一方面，射线

还可以引起与细胞质有关的遗传性发生变异，这叫做核外变异。以上就是辐射育种的基本原理。射线是怎样进行育种的？

辐射育种的第一步，和其它育种方法一样，必须选择好合适的原始材料，这是辐射育种成败的关键。选择原始材料的基本原则是选择在当地比较好但还有一二个缺点的品种来作为辐射育种的原始材料。这样才能够比较快地取得比较好的结果。

下一步就是用射线照射选定的原始材料。这里所要做的主要工作是选择射线的种类和照射的剂量。

目前，辐射育种用的最为普遍的是⁶⁰Co 射线源，也有利用核反应堆和其它中子源产生的中子照射农作物的。选定了用什么射线以后，怎样确定合适的照射剂量呢？不同的农作物所需要的照射剂量是不一样的。同样的农作物，不同的品种，不同的生长发育阶段，对射线的反应是不一样的，也就是所谓射线敏感性是不同的。这里一般的原则是，对射线敏感性高的农作物，剂量要适当低一些；反之，对射线敏感性低的，剂量就要高一些。

表 8.1 是主要农作物 射线照射的临界剂量和致死剂量。所谓致死剂量是指经过射线的照射而导致全部植株死亡的照射剂量值，临界剂量是指经过射线照射后，有 40%的植株死亡的照射剂量。目前，对辐射育种的最佳剂量尚未取得一致的看法，因此多采用临界剂量作为辐射育种的最适宜的剂量。

表 8.1 主要农作物对 射线的临界剂量和致死剂量

农作物	处理状态	临界剂量 (千拉德)	致死剂量 (千拉德)
水稻	干种子	20 ~ 35	
	萌芽种子	3 ~ 5	
	秧苗	4 ~ 6	
	幼穗分化期	2 ~ 3	
小麦	干种子	25 ~ 35	50
	幼穗分化期	1 ~ 1.5	
	花粉	2 ~ 4	
大麦	干种子	25 ~ 35	50
高粱	干种子	30	
玉米		15	25
大豆		25	50
蚕豆		10	15
豌豆	干种子	15 ~ 25	25 ~ 50
油菜	干种子	100	160
番茄	干种子	50	100
马铃薯	块茎	5 ~ 10	
洋葱	干种子	50	100
棉花	干种子	50	
花生	干种子	25	50

农作物	处理状态	临界剂量 (千拉德)	致死剂量 (千拉德)
黄麻	干种子	50	
大麻	干种子	25	
烟草	干种子	100	
桑	干种子	10	
苹果	休眠芽	0.5 ~ 7.5	
茶树	苗接穗插条	1 ~ 3	

辐射育种的第三步是变异后代的选育。射线照射所引起的物种变异中有许多是没有多大经济价值的，而只有很少部分是对人类有益的变异。因此我们必须运用各种技术和方法，精心地观察、比较和鉴定，把那些理想的变异一代一代地筛选出来，保留下来，并设法将它们强化和巩固下来。一般经过3~5代就能够培育出一个优良的新品种。

辐射育种有哪些优点？

辐射育种的优点主要有以下一些：

(1) 射线照射诱发的农作物变异率比较高，而且变异的范围比较大。一般射线照射诱发的变异率要比自然变异率高几百倍到上千倍，而且射线照射可以引起染色体基因的改变，产生的变异是多种多样的，能够产生自然界里从来没有过的农作物新类型。例如，有人利用射线照射蓖麻，获得了生长期从270天缩短到120天的特大变异类型。

(2) 能改变农作物品种的单一不良特性，而保持其它优良特性基本不变。各个农作物品种，优点和缺点往往是连锁遗传的。用其它方法一般不容易将这样的连锁性状分割开。而射线照射可以使染色体发生断裂，这就有可能将紧靠在一起的两个连锁基因拆开，再通过染色体的交换和重新组合而获得新的品种类型。例如，前面提到的辐育1号，是以一种高产但晚熟的中粳稻“二九矮1号”为原本材料，利用辐射育种法，使它只克服晚熟的缺点，而保留了高产的优点，成为一种既高产又早熟的新稻种。

(3) 辐射育种引起的变异稳定快，可以大大缩短育种过程。一般辐射育种得到的第二代中出现的优良变异株，第三代就可以基本上稳定下来，在较短的时间里就可以培育出所需要的新品种。而采用其它育种方法，要达到同样的效果，一般需要5年~10年的时间。

(4) 操作简便。只要把种子或植株放在射线源附近照射一会儿就可以了，是十分简便的。随后的育种过程就和其它育种方法基本上没有什么两样。

此外，辐射育种既可以单独使用，也可以和其它育种技术相结合，取长补短，可以取得更好的效果。

太空育种是辐射育种的新发展，利用太空中强烈的超高能宇宙射线和其它特殊太空物理学条件进行农作物种子诱变。1987年8月5日，我国发射第九颗返回式科学试验卫星时，中国科学院遗传所的科学工作者首次将一批青椒、小麦、水稻等种子搭载升入太空，进行在强烈的宇宙射线和失重条件下的太空育种试验。此后，我国已经先后8次利用返回式卫星进行了51种植物300多个品种的太空育种试验。最近的一次搭载是1996年10月下旬升空的我国第17颗返回式卫星，这一批在太空中绕地球239圈，经过强烈宇宙射线照射的种子将由中国科学院农业研究所的专家们进行育种，期望能获得新的

优良品种。

经过将近 10 年的努力，我国在太空育种方面已经取得了显著的成果。第一批搭载的“农垦 58”水稻纯系种子的后代，不仅穗长、粒大，有的一株上竟长出 3~4 个穗，获得了许多矮秆、高产、早熟的优良后代，亩产达到 1200 千克以上。更为可喜的是，能恢复籼稻不育系的粳稻突变体，有的亩产可高达 1500 千克，蛋白质含量增加 8%~20%，生长期平均缩短 10 天。经过太空育种的青椒，当其它未经太空育种的青椒枝叶脱落，一片萧条时，它们却仍然枝繁叶茂，生机勃勃，一个青椒重达 400 克。太空育种的西红柿，平均产量提高 20%以上，病虫害指数减轻 41.7%。

有人作过计算，虽然太空育种的一次性成本比较高，但是它的经济效益和社会效益仍然相当可观，是一项非常有意义的事业，很有发展前途。

九、一种新型的长寿命电池 ——放射性同位素电池

随着现代科学技术的发展，在一些特殊的领域，如遨游太空的宇宙飞船和人造地球卫星，植入人体内的心脏起搏器等，都要求有一种体积小、重量轻和寿命长的电池作为能源，而且在这些领域一般是不允许中途更换和维修的。

电池通常有各种各样的化学电池，如干电池、蓄电池和燃料电池等。但是化学电池的寿命相对来说都太短了，干电池和蓄电池连续使用几小时到几天就完全耗尽，燃料电池的工作寿命最多也只有几十天，显然是不能满足以上那些特殊领域对能源的需要。太阳能电池目前广泛应用在人造地球卫星上。但是从宇宙航行的需要来说，太阳能电池也有它的不足之处。这种不足和它的优点一样，是由于它的能量是由太阳光的能量转换而来，因此它不能在火星以外的星际空间里应用，因为那里的太阳光太弱。它也不能在金星周围那样不透明的大气下工作，也不能在行星背着太阳光的一侧工作。此外，它也不能在离太阳太近的星际空间里应用，因为它耐不了那么高的温度。至于太阳能电池不能用于人体内的心脏起搏器，那是不言而喻得了。那么，我们能不能找到一种适合上述特殊需要的长寿命电池呢？一种新型的长寿命电池——放射性同位素电池应运而生了。

1. 放射性同位素电池是怎样发电的？

放射性同位素发出的射线用于发电的方法很多，最简单的方法就是利用热电偶。本书只介绍这种利用热电偶发电的热电型放射性同位素电池。图 9.1 是这种放射性同位素电池结构的示意图。它的核心部件是放射性同位素热源和半导体温差电偶。吸收体将放射性同位素的射线能量大部分转化为热能，它与周围介质之间的温差通过半导体温差热电偶转变为电势差（温差电动势）。组成半导体热电偶的 P 型半导体元件和 N 型半导体元件就作为电池的两极源源不断地发出电来，给所需要的各种电路供电。

是不是所有的放射性同位素都可以作为电池的热源呢？显然不是，只有适合以下一些条件的放射性同位素才适合用于制造放射性同位素电池的热源：半衰期长（保证电池的长寿命）、功率密度高、放射性危险性小、容易加工和封装等。把这样的放射性同位素做成合适的化合物，再用耐高温的合金材料做成的外壳包装密封好就可供使用了。电池外壳起着辐射屏蔽物和散热器的双重作用。放射性同位素电池常用的放射性同位素有 ^{238}Pu 、 ^{90}Sr 、 ^{244}Cm 等。

放射性同位素电池当然也不是完美无缺的，它的主要缺点是发电效率低，大约只有 10%。目前的价格也还比较昂贵。不过，在我们以下还要详细介绍的许多特殊应用场合，人们并不介意这些缺点，而仍把放射性同位素电池看作是最佳的选择，甚至是唯一的选择。

2. 在航天领域的应用

宇宙航行对电源的要求非常高，除了功率必须满足要求外，还要求体积小、重量轻、寿命长，还要能经受宇航中各种苛刻条件的考验。前面已经说过，在宇航中，放射性同位素电池不受太阳光强弱的影响。而且它也不怕宇航中强烈的宇宙射线的照射，而太阳能电池受到如此强烈的宇宙射线的照射就会失效，甚至完全损坏。因此，放射性同位素电池可以满足各种航天器对电源的长期、安全、可靠供电的要求，被航天界普遍看好和广泛应用。例如，美国发射的阿波罗月球表面试验装置就装有一个功率为 60 瓦的 ^{238}Pu 热电式的放射性同位素电池。在飞往木星的宇宙飞船上也带有四个功率为：30 瓦的放射性同位素电池作电源。美国于 1961 年发射的一颗导航卫星，使用放射性同位素电池作电源，到了 1972 年还能清晰地接收到它发出的讯号。1977 年美国先后发射的“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”宇宙飞船，都各装有一个功率为 450 瓦的 ^{238}Pu 放射性同位素电池。它们飞越木星，完成了对木星的观测。又于 1980 年 11 月和 1981 年 8 月，先后飞过土星。飞船上的各种探测器对土星进行了紧张的探测工作，其中仅“旅行者 2 号”发回的传真照片就有 1 万 8 千多张，首先完成了人类对土星的探秘。完成对土星的观测之后，它们又向更远离太阳的宇宙空间飞去，到跟前去揭开太阳系中最神秘的两个行星——天王星和海王星的面纱。

这些航天器里的仪器、设备都是由电来开动和操作的，飞船的行动都是由电脑指挥的，也是需要供电的。在如此旷日持久的宇宙航天和如此繁重的科学探测，目前还找不到一种比放射性同位素电池更理想的电源。

3. 在航空和航海的导航等领域中的应用

处于深海、远海、急流险滩处的灯塔和导航浮标，如果用放射性同位素电池供电，就可以一劳永逸，再也不用为经常更换电池和维修发电机而大伤脑筋了。地面上有许多终年积雪冻冰的高山地区、遥远荒凉的孤岛、荒无人烟的沙漠，还有南极、北极等，也需要建立气象站和导航站。如果用其它电源的话，更换和维修起来是极其艰难的。如果用放射性同位素作电源的话，就没有这些问题，可以建成自动气象站或自动导航站，可以实现自动记录，自动控制，常年无须更换和维修电源，事情变得非常简单。

还有一些海底设施，如海下声纳，各种海下科学仪器和军事设施，海底油井阀门的开关，海底电缆中继器等，太阳能电池显然是不能胜任的，因为海底里见不到太阳光。化学电池也不顶用，因为它不仅无法承受深海中巨大的压强和腐蚀性，而且化学电池的寿命很短，经常更换电池也是一种难以承受的沉重负担。而采用放射性同位素电池就没有以上种种问题，使用起来得心应手。

4. 心脏起搏器的电源

现代医学的进步，早已能够为一些濒危的心脏病患者施行开胸手术，植入一个用电池驱动的心脏起搏器，使心脏的功能恢复正常。早期所用的电池是化学电池。因为化学电池的寿命短，隔几年就要再施行一次开胸手术，更换已经耗尽了的电池。放射性同位素电池出现以后，情况就大为改观。据报道，70年代初法国有一位年近6旬的妇女，心脏病已经到了几乎停搏的程度，医生经过仔细的诊断，决定为她施行开胸手术，植入一个心脏起搏器，使她恢复健康过上正常人的生活。医生为这位妇女植入的心脏起搏器的电源就是一个 ^{238}Pu 放射性同位素电池。这就可以保证这个心脏起搏器能在体内连续工作10年以上，可以使这位妇女不必再为更换埋在体内已经不能再工作的化学电池而冒着生命危险，忍受极大痛苦，反复进行开胸手术了。用于心脏起搏器的放射性同位素电池的体积非常小，比一节二号电池还小，却能在体内连续工作10年以上。图9.2是一种心脏起搏器中使用的放射性同位素电池的照片，底下的标尺指示出它的尺寸大小。

这种体积小重量轻的长寿命电池已经广泛应用于心脏起搏器中，全世界已经有成千上万的心脏病患者植入了放射性同位素电池驱动的心脏起搏器，挽救了他们的生命，使他们能够重新享受人生的幸福。

十、射线用于疾病的临床诊断和治疗

就在伦琴发现 X 射线的第二年，已经有人将这种具有很强透射能力的神奇射线应用于临床诊断。最初主要是诊断是否骨折及其它一些骨骼的病变。以后逐渐扩展到用它去诊断肺结核和胃溃疡一类的人体内脏器官的病变。本世纪 50 年代以后，随着各种射线源的发现和研制成功，射线在医疗诊治方面的应用更加广泛、更加深入。在射线源方面，不仅继续使用 X 射线，而且应用各种放射性同位素和粒子加速器。这些射线不仅用于诊断（体外的和体内的），而且应用于疾病的治疗。不仅应用于临床，也应用于基础医学研究，几乎覆盖了医学的各个领域，在医学上形成了一门独立的学科——核医学。据报道，在美国这个现代医学水平比较发达的国家，平均每三个就诊患者中就有一人接受射线的治疗或诊断。美国卫生部门还有一条规定，凡是具有 250 张病床以上规模的医院，如果没有核医学科，没有核医学医生和射线诊断治疗设备的是不允许开业的。

1. 射线诊断

对于 X 射线透视诊断，大家都已经十分熟悉了，因为现在它已经成为普通体检和临床治疗的一种常规手段，就好像测体温、量血压一样，非常广泛地应用于内科、外科、口腔科、骨科等的常规检查。因此，本书不需要对这部分的内容再作进一步的介绍，主要介绍放射性同位素用于疾病的诊断的方法和用途。

放射性同位素诊断是一种无痛的灵敏的和安全的临床诊断方法。就其技术细节和用途上的差别，可以分为以下三个方面。

放射性同位素示踪诊断

基本工作原理是这样的：先用口服或注射等办法使微量的某种放射性同位素进入待检查的器官和系统内，再通过射线探测技术测量待检查器官内放射性同位素强度的变化，来判断出该器官功能是否发生病变。例如，我们可以利用甲状腺容易吸收碘的特性，使病人口服 ^{131}I 放射性同位素试剂，再在体外测量甲状腺中 ^{131}I 的放射性强度，最后根据测量的结果可以确定出是否甲状腺亢进（甲亢）或甲状腺功能低下（甲低），确诊率可以达到 90%。又如，通过给病人注射含有 ^{131}I 放射性同位素的邻碘马尿酸，然后测量两个肾脏内 ^{131}I 放射性强度的变化，可以诊断出上尿路梗阻、肾源性高血压、慢性肾炎和肾功能衰竭等各种肾病。

闪烁扫描和 照相

闪烁扫描的基本工作原理如图 10.1 所示。首先也是用口服或注射方法使某种放射性同位素试剂进入患者体内，经过一段时间以后，待放射性同位素被选择性地吸取到人体内待检查的某一器官内之后，再用闪烁扫描仪在体外进行 射线探测，微机将该器官的形状、大小和放射性强度分布打印出来。医生根据探测结果判断出该器官是否有病变以及在什么部位和多大范围发生病变。

射线照相法的基本原理和闪烁扫描相似，区别只在于它是用照相的方法来代替闪烁扫描，一次就把器官的形态拍摄记录下来。如果像拍电影那样连续拍照的话，就可以对这个器官进行动态的观察。这种方法对于心血管疾病进行诊断是特别有意义的。

X 射线计算机断层分析 CT

X 射线透射法和现代计算机相结合，可以得出人体内内脏器官的断层分析的结果，可以对病变部位进行准确的定位。CT 的断层分析是透射性的另一种方法，是利用积累在内脏器官内的放射性同位素进行计算机断层分析（ECT），是发射型的。CT 和 ECT 可以使看清一个脏器的三维（立体）图像或四维（立体图像随时间变化）图像。这种诊断对肿瘤的早期诊断和随后的治疗是特别有利的。图 10.2 是一张神经胶质瘤患者的 CT 像，可以很清楚地看到肿瘤中脑白质的消失。

体外竞争性放射分析

这是本世纪 60 年代开始发展起来的一种超微量分析技术，已经在临床诊断和基础医学研究中得到了广泛的应用。

这种诊断方法是利用标记抗原（用 A^* 表示）和非标记抗原（即人体组织中原有的抗原，用 A 表示）与抗体（用 B 表示）之间的竞争结合作用来测定人体组织中原有抗原的量。所谓标记抗原是指含有放射性同位素的抗原。放射性同位素发射的射线容易被探测出来，就好像被打上标记一样。我们加进去的放射性同位素抗原的量是已知的，用 I 表示；原有的非标记抗原的量是待测的，用 x 表示。我们可以把这种诊断方法的基本原理用下面的式子表示：

$$I A^* + m B \rightleftharpoons m (A^* B) + n A^*$$

$x A + y B \rightleftharpoons y (A B) + z A$ 式中， $A^* B$ 为标记抗原与抗体结合生成的复合物，其数量用 m 表示， $A B$ 为非标记抗原与抗体生成的复合物，其数量用 y 表示。而未与抗体生成复合物的标记和非标记抗原的量分别用 n 、 z 表示。因此我们可以得到下面的关系式：

$$I = m + n$$

$$x = y + z$$

A^* 和 A 与抗体 B 复合的概率是一样的。 A^* 含量 I 是已知的。当人体组织中原来的抗原 A 的含量 x 比较多时，生成的抗原抗体 $A B$ 的量 y 相对来说就大一些，标记抗原抗体 $A^* B$ 的含量 m 就相对小些。因此，测定抗原抗体复合物的放射性强度和剩余抗原的放射性强度的比值 m/n 就可以求出人体组织中的抗原 A 的含量 x 。

这种方法既利用了抗原/抗体之间复合的特异性（定向性），又利用了放射性强度测量的灵敏性和准确性，因此它的分析灵敏度很高，可以达到 $10^{12} \sim 10^{15}$ 克，这是常规的化学分析所无法比拟的。

这只是射线在临床诊断上应用的几个方面，实际上已经得到应用的远不止这些，而且新的方法和新的应用仍在不断涌现。

2. 射线治病

射线治病的基本原理就是根据射线照射对病变细胞的抑制和杀伤作用，来达到治疗某些疑难疾病的目的。射线治病主要用于：

(1) 射线治癌。用放射性同位素 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 等的射线和加速器产生的电子束和离子束来杀死癌细胞。另一种方法是把放射性同位素注入到血液或直接注入到癌组织中去，利用放射性同位素发出的射线直接在癌变组织附近照射，有效地杀死癌细胞。

(2) ^{131}I 不仅可以用于诊断甲状腺功能病变，也可以用它对甲状腺组织的杀伤作用来减少甲状腺激素的合成和分泌，治疗甲状腺功能亢进。用于治疗的放射性强度比诊断时要大得多，不过对人体还是安全的。用 ^{131}I 治疗甲亢的治愈率为 80% ~ 90%。

(3) 用 ^{32}P 治疗真性红细胞增多症。这种病的晚期可能转变为白血病，因此也被称为血液系统的肿瘤。这种病目前尚无根治办法，一般采取放血和药物加以抑制。而采取服用 ^{32}P 试剂的办法，使 ^{32}P 放射性同位素进入骨髓，让它发出的射线进行内照射，用以抑制骨髓的造血功能。这种新方法比单纯放血的效果好得多。有人做过统计，这种病如果不加治疗的话，50%的病人只能存活 1.5 年；用单纯放血治疗，50%的患者可存活 3 年 ~ 8 年；而用 ^{32}P 内照射治疗，50%的患者可以存活 13 年 ~ 15 年。

射线治病的主要应用是治癌，已经成为目前治癌的主要手段之一。射线治癌通常简称放疗。据国内外的统计资料表明，在癌症病人中约有 70% 进行不同程度的放疗，包括单纯放疗，术前、术后和术中的放疗以及与化疗相结合等。有的患者经过放疗后，癌症消失，有许多患者虽未能彻底治愈，但也起到了控制和缓解病情、减轻痛苦和延长寿命的治疗效果，因此放疗已被公认为一种有效的治癌新武器。射线为什么能治癌？

我们在射线与物质的相互作用中已经了解到，射线通过直接效应和间接效应造成细胞中的 DNA 分子的伤害。同样射线对癌细胞的直接效应和间接效应而置癌细胞于死地。在直接效应中，射线直接照射在癌细胞的 DNA 分子上，使它们发生电离，分子断裂，使得癌细胞不能再分裂，也就是不能再繁殖，并最终导致癌细胞的死亡。在射线治癌中，更多的还是间接效应，射线照射引起大量水分子的电离和分解，产生大量活泼的离子和自由基，通过它们再去和癌细胞的 DNA 分子发生作用，导致癌细胞无法再分裂和繁殖，并最终死亡。这就是为什么射线照射可以使癌症缓解以至于治愈的道理。

谈到这里，你们可能会提出这样一个问题：癌细胞是混杂在正常细胞之中的，那么射线照射在杀死癌细胞的同时，会不会损害周围的正常细胞？很显然，这是无法完全避免的，只能设法将这种损害减少到最低程度。

我们知道，不同的细胞对射线的敏感性是不一样的，在同一个组织和器官里，正常细胞和癌细胞对射线的敏感性也是不一样的。大量的临床实践结果还表明，癌细胞对射线的承受能力比健康细胞差得多。这一点对放疗是非常有利的，因为在同样的照射剂量下，对癌细胞的杀伤力要比对健康细胞的损伤大得多，可以保证在有效杀伤癌细胞的同时，把对健康细胞的危害降低到最小程度。

为了进一步保护健康细胞少受射线的伤害，人们还采用了其它一些办法。如服用一种叫做“辐射敏化剂”的药物，可以用更低的辐射剂量达到同

样的治疗效果，从而进一步降低对周围健康细胞的伤害。又如，我们可以尽量使射线集中在癌变部位上照射，根据病灶在体内的不同部位，选择相应的射线种类和能量，这样也能进一步减轻对健康细胞的伤害。人们还在探索其它的新技术和新方法，以便进一步提高射线治癌的效果。

射线治癌的基本方法

对于不同器官和部位的癌症，应采取不同的放疗法。

(1) 射线源埋入体内(简称埋入法)。这种方法适用于那些癌变范围较小、部位较浅又比较容易埋入的部位如颈、舌、扁桃腺、子宫等处的癌症。方法很简单，把放射性同位素直接埋入那些癌变部位，让放射性同位素发出的射线进行内照射治疗。

埋入法又有永久性埋入和临时性埋入之分。对于那些半衰期比较长的放射性同位素如镭、钴、铯等分别做成针状(分别称为镭针、钴针、铯针等)埋入体内，待达到所需的剂量以后再取出来。这就是临时性埋入。对于那些半衰期较短的放射性同位素如 ^{198}Au ，则做成一颗颗像种子一样的射线源(称为籽源)，均匀地埋入癌变部位，用完后不再取出来。这就是永久性埋入，多用于手术无法彻底切除的癌变部位的手术后治疗。

(2) 敷贴式定位照射。对于一些体表上的癌症可以将放射性同位素做成相应形状的射线源(称敷贴器)，敷贴在癌症病灶上，让射线不断地照射癌变部位。放射性同位素常用 ^{90}Sr ，放射出 β 射线，穿透体表深度为几个毫米。用这种方法治疗体表肿瘤如毛细血管瘤和治疗一些慢性皮肤病如神经性皮炎等效果都很显著。

(3) 体外照射。体外照射治癌所用的射线通常有X射线、 γ 射线和高能电子射线等，它们的穿透能力比较强，适用于体内深部癌症的治疗，也适用于骨癌的治疗。医院里最常用的体外照射设备是 ^{60}Co 源治疗仪，俗称“钴炮”。这是一个很形象的名称，好像射向癌症的大炮，“炮弹”就是 ^{60}Co 源发出的射线。“钴炮”的特点是射线的穿透能力强，操作灵活，可以从不同的角度对病人进行照射。

医用加速器也是一种应用十分广泛的体外照射设备。加速器可以提供比“钴炮”能量更高、强度更大和聚焦性更好的 γ 射线，也可以直接利用加速器产生的高能电子射线。用高能电子加速器产生的 γ 射线治癌时，深部组织可以比浅表组织接受更多的能量。这是“钴炮”无法比拟的。用“钴炮”照射，深部癌区的照射剂量仅为皮肤表面的75%，用7MeV的电子加速器产生的 γ 射线照射时，这个数值提高到85%，而用35MeV的电子加速器产生的 γ 射线照射时，这个数值高达250%，也就是说深部癌区的照射剂量是皮肤表面的2.5倍。此外，由于加速器所产生的射线束的聚焦性能好，可以把射线束集中照射在癌区，这样就可以最大限度地减少射线照射对癌区周围健康细胞的影响。这对治疗某些癌症是特别有利的，而这也是“钴炮”难以达到的。

大多数癌组织中含有1%~10%左右的缺氧细胞，这是放疗中的一个顽敌。缺氧细胞对X射线、 γ 射线、电子射线是不敏感的，耐这些射线的能力比足氧细胞强得多，用以上一些射线照射难以彻底根除。而缺氧细胞没有得到根除往往是癌症复发的重要原因。那么，有没有什么办法来攻克这个顽敌呢？有的。人们在用快中子、质子和重离子等射线来治癌的过程中发现，这些射线不仅对癌细胞的杀伤能力强得多，比如，快中子就比 γ 射线强2~3

倍，而且缺氧细胞对这些射线也很敏感。因此这些射线在对癌症，特别是深部癌症的治疗中发挥了独特的优势。

上面提到的各种射线用于放疗时都不同程度存在一个共同的问题，那就是在对深部癌变组织进行治疗时，从体表到癌区之间的健康细胞会受到不同程度的伤害。如果改用负 介子射线进行照射治疗，情况就大大改观。这是由于负 介子通过生物组织时特有的生物效应，即它对生物组织的作用主要集中在它射程的末端，而在它到达末端之前对生物组织所造成的损伤是非常小的。负 介子的这一独特的生物效应在治癌上是特别有意义的。放疗医生唯一所要做的工作就是选择负 介子的能量以保证它的射程末端定位在癌变部位，就可以达到治癌而几乎不损伤它所穿过的健康细胞的目的。据报道，美国的一名晚期直肠癌病人，生命垂危，但在经过 25 天的负 介子照射治疗后竟出现奇迹，垂危的病人康复出院了。据不完全统计，全世界已经有数百名癌症患者接受了负 介子照射治疗（目前这种治疗费用是很昂贵的），取得了神奇的疗效。因此，负 介子射线被认为是癌症放疗最理想的手段。

射线治癌的疗效和优点

目前已经被证明放疗有显著疗效的癌症主要有以下八类：

- （1）消化系统中的舌根癌、扁桃体癌、直肠癌；
- （2）呼吸系统的鼻腔癌、鼻咽癌、喉癌、肺癌；
- （3）泌尿系统的癌症；
- （4）乳腺癌；
- （5）小脑髓母细胞瘤；
- （6）皮肤癌；
- （7）骨网质细胞肉瘤和骨未分化网质细胞肉瘤；
- （8）恶性淋巴瘤和慢性白血病。

需要注意的是，有一些癌症患者是不宜采用放疗的，如有些晚期癌症已经出现恶液质、体腔内积液、脏器穿孔等重症者；某些肝肾衰竭者和一些耐射线照射的癌症（如黑色素瘤）患者都不宜用放疗。

射线治癌最突出的优点就是它的定位性极高，可以将它治疗的部位仅仅局限于癌变部位，射线就像一把“手术刀”直捣癌变组织，而不留刀口，不出血，还能保持整个人体器官的正常功能，例如喉癌患者经过放疗后，声带仍能保持完好，发音讲话正常。又如面部患有癌肿的，经过放疗后可以无损容貌。此外，放疗的反应比化疗轻，疗程结束后恢复也较快。

正因为放疗具有以上那些疗效和突出的优点，因此受到普遍的重视，在人类攻克癌症的斗争中发挥着重要的作用。

十一、射线在环境保护上的应用

随着各国工业化、城市化进程的加速，随着人类社会的生产和生活水平的不断提高，环境污染问题变得日益尖锐，要求净化环境、保护环境的呼声日益高涨。我们知道，环境的主要污染源是工业生产中源源不断排放出来的废水、废气、废渣，它们确实已经对人类的生存造成了巨大威胁和深远影响。

1. 燃烧炉废气的射线净化处理

我们先举两个实例来看看工业废气对人类所造成的危害有多大。

第一个例子发生在工业革命的发源地英国。1952年12月4日到8日，浓雾一直笼罩着首都伦敦，能见度不足10米。大多数的伦敦居民都有胸闷、咳嗽、咽喉痛、呕吐等症状，4天中造成四千多人死亡。这就是当时举世震惊的所谓“伦敦烟雾事件”。过了10年，1962年不幸的事件又重演一次。舆论上要求查清原因，采取有效对策的呼声十分强烈。经过一系列的调查研究，造成这种灾害的原因终于查明。原来是工业和民用锅炉排除的烟尘和SO₂气体与雾中的小水珠混合在一起，严重损害人们的呼吸道，造成呼吸道感染和其它并发症，其中的病情严重和年老体弱者很容易因此而丧命。

第二个实例就发生在我国的东邻日本这个亚洲工业发达国家。随着工业的高度发展，环境污染问题也是他们所面临的一个严重问题。工业废气中的SO₂浓度过高引起居民中毒的很多，最有代表性的是名古屋附近的四日市，该市大气中SO₂浓度超过允许值5倍以上。据1970年统计，已经有数千人因此而中毒，造成严重的气管疾病，被称为“四日市喘息病”。显然，工业中的各种燃烧炉所排放的含有SO₂和氮的氧化物的废气是大气污染的主要根源。按照有关卫生标准规定，在工厂车间里，SO₂的含量不得超过13毫克/米²，氮的氧化物不得超过5毫克/米²。而在居民区，这些有害化合物的含量还要再降低几十倍。

多年来世界各国的科技工作者联手合作，共同探索消除大气中有害化合物污染的有效方法，已经取得了很大的进展。有效的方法很多，本书要介绍的是一种利用射线来治理废气的方法。

这种方法是日本科技工作者发现的，其基本原理如图11.1所示。从图11.1不难看出，这种方法在原理上是非常简单的：用一台电子加速器产生的高能电子束去照射燃烧炉排放出来的废气，只需几分钟的时间就可以除去废气中绝大部分的SO₂和氮的氧化物。这是因为在射线的作用下，废气中的这些有害化合物与废气中的水气和氧气相互作用，生成气溶胶或固体微粒，经过电除尘器收集后，再经烟囱排放出去的废气就这样得到了净化。

2. 废水的射线净化处理

保护水域不受有害物质的污染已经越来越显得迫切。生活在水域中的生物也是需要氧气的，但是在常温常压下每立方米的水中溶解的氧气通常只有15克左右。如果排往自然水域的废液中含有较多的需氧生物体或还原性的化合物，就会很快将自然水域中的氧气消耗尽，从而危及鱼类和其它水生生物的生存。国内外均发生过由于水域中需氧生物体和还原性化合物含量过多而导致鱼类死亡甚至完全灭绝的事故。因此，污水处理的一项重要任务就是把需氧生物体和还原性化合物的含量降低到允许值以下。

人类自身也已经越来越感到缺水的威胁，特别是一些大城市，问题更加严重。在目前条件下解决缺水问题的最经济和最现实的办法还是节约用水和污水处理及其重复利用。对于人类用水来说，污水处理除了降低水中需氧生物体和还原性化合物的含量，而且要将废水中的细菌病毒以及颜色臭味等全部清除。用常规方法处理需要综合采取多种方法才能解决上述各种问题，如用活性污泥生物氧化物去除需氧生物体，用氯气消灭细菌，用活性炭除臭和脱色等等。

人们在治理废水的斗争中，发现射线照射是一种独具特色的好办法。它能使废水中的有害物质发生分解而达到清除的目的。例如，它可以使氰化物、某些有机氯化物、难脱色的染料、有机汞等有害物质经过射线照射以后发生辐射分解而清除。而沿用常规方法是难以清除这些有害物质的。

用微生物处理废水的过程中会产生一种胶体状的活性污泥，它的沉淀性和过滤性都很差。为了清除这种胶体状物质，处理费用大为增加。用射线照射这种活性污泥，可以使它的沉淀速度大大提高，过滤性也明显改善，可以使处理污水的速度大大提高，费用也就随之大大降低。

射线处理污水的另一优点是不会造成二次污染。比如，人们长期以来一直沿用氯气消毒的办法，因为它操作简便，价格低廉。但是这个方法也有严重的缺点，一方面它的消毒作用有局限性，对肠道病毒的效果就不大；另一方面为了消灭大部分的细菌，氯的投放量很高，会对环境产生二次污染。如果水中含有氨时，氯和氨能化合成毒性很强的氯胺，当水中的氯胺浓度达到28毫克/米³时，就足以灭绝鱼类和其它水生生物。而且氯胺还是一种致癌物质。因此用氯气治理污水的办法正在被淘汰。而用射线治理污水，在我们获得清水的同时不会引起二次污染。

三废的射线治理还可以作到以废治废，变废为宝。例如，核电厂报废的核燃料元件长期以来一直戴着“核废料”的帽子。处理它是一件十分费时费力的事，一般是将它严格贮藏起来，让里面的放射性逐渐衰减掉。其实，这些“核废料”是一种巨大的射线源，弃而不用实在是一种很大的浪费。据估计，一个电功率为10万千瓦的核电厂，一年中产生的“核废料”的放射性相当于 4×10^5 居里的钴源，用来处理活性污泥，每天可以处理1500立方米，相当于一个100百万人口的城市每天产生的污水中所含的污泥量。经过射线处理后的污泥还可以用作农田的肥料，真是以废治废，一举两得。目前世界上核电站的总发电能力已经超过 2×10^8 千瓦，用它们的“核废料”来治理三废，其经济效益和社会效益都是非常大的。当然，用“核废料”来治理三废，目前还有一些技术上的难题，尚不能普遍推广，目前建立的一些用于治理三废的“核废料”辐射装置还都只能建立在核电站附近。

为什么射线在治理三废中会有这么大的威力呢？我们可以从前面已经讨论过的射线与物质的相互作用过程中所发生的各种效应找到答案：射线碰到微生物时有灭菌消毒的作用；和高分子化合物相互作用时有降解（生成物的分子量降低）和合成（生成物的分子量提高）的作用；它对水溶液有很强的氧化作用...这就决定了射线具有很强的综合处理三废的能力，正在为环境保护做出自己独特的贡献。

3. 用射线清除静电

现在静电给人们的生产和生活带来许多麻烦，甚至酿成严重的事故，成为现代社会生活中的另一种新的污染。在纺纱机上，化学纤维由于相互摩擦带电后而互相排斥，几股丝很难拈成纤；在印刷机上，受滚筒挤压摩擦的纸张带电后吸附在滚筒上，严重影响正常的印刷，尤其在高速印刷时，这个问题变得十分严重；摄影胶卷在生产过程中由于摩擦带上静电的话，当它经过导辊时会发生火花放电现象，影响胶卷的质量以上那些绝缘材料的绝缘性能越好，摩擦越激烈，产生的静电就越多，电势就越高，引起火花放电的现象就越严重。如果这些现象发生在那些有可燃气体或其它易燃物存在的地方，如炸药厂、塑料厂、面粉厂、纺织厂……，都很容易引起火灾，引起爆炸，造成重大的事故和损失。

那么，怎样消除周围环境中这种有害的静电呢？

人们又一次想到了射线。基本原理和基本方法都是很简单的。在上述那些受到静电严重困扰的地方，人们用放射性同位素 ^{210}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{238}Pu 等制成一种叫做静电消除器的装置。静电消除器可以根据需要作成条形、环形、圆形或其它什么形状，再和风机、风扇或喷嘴组合成离子鼓风机或离子喷嘴，可以很方便把离子送到需要消除静电的地方。放射性同位素发出的射线可以使周围的空气产生电离，生成数量相等的正、负离子，因此绝缘材料上积累的静电可以从周围吸引到足够数量的异性电荷而发生中和，从而消除了静电。基本原理和基本方法都是很简单的。

在有些场合，为了防止工作人员不必要地受到放射性同位素射线的照射，还可以把静电消除器安装在一个特制的通风管道中，放射性同位素发出的射线使流过这个通风管道的空气发生电离，然后再把含有足够数量离子的空气送到需要消除静电的场所，去中和那些绝缘物上的令人讨厌的静电。很显然，这种方法既方便又安全。

十二、射线在材料科学与技术领域中大显神威

在本章里，我们要介绍射线在材料科学领域中的应用，主要有射线作为材料测试分析的探针和射线用于新材料的加工合成及表面处理等。

1. 射线作为探究材料奥秘的探针

为了对材料的化学组分、微观结构和原子价态等进行快速、灵敏和无损的分析，以射线作为探针的各种现代材料分析技术近 20 年来如雨后春笋般相继问世，为现代新材料科学的飞速发展作出了重要的贡献。现代材料分析技术种类繁多，常用的就不下 20 多种。它们虽然特点和用途各异，但是有一个共同的特点，这就是它们都是利用射线束（电子束、离子束、中子束、光子束等）作为探究材料内部奥秘的探针。因为射线束的射程很短，这些探针只能触到材料的表面层，因此这些现代材料分析技术通常称为表面分析技术。

材料的表面在科学技术上的重要性日益受到人们的高度重视，已经形成了一门新兴的边缘学科——表面科学，是当前科学技术研究和发展的重点领域，并且有着广阔的应用领域，人们通过各种方法来优化材料表面的某种或某些特性，或者通过各种薄膜技术在材料上产生新的表面，改善材料和器件的功能。

表面分析技术简介

表面分析技术就是一种研究材料表面的形貌、化学组分、微观结构、原子价态、电子态（又称电子结构）等“指纹”的实验技术，是建立在超高真空、射线束、微弱信号检测、计算机等多种科学技术的基础之上的一门综合性很强的技术，涉及广泛的物理学和化学的知识。显然，本书不可能在这里详细讨论这些表面分析技术的原理和技术特性，对此有需要和有兴趣的读者，可以很容易从有关的专著中得到帮助。

表面分析技术是用一束微观粒子（它们可以是电子、离子、光子、中子等）作为探针利用射线与物质的相互作用来获取材料表面的各种“指纹”的。图 12.1 就是离子束、电子束、和光子束与物质相互作用过程中产生的各种二次粒子的示意图。

从射线与物质的相互作用的角度看，表面分析技术的区别实际上只在于所选取的一次（探针）粒子和二次（探测）粒子的不同。表 11.1 简要列出一些常用的表面分析技术的名称、探针粒子、探测粒子、简称和用途，其中的简称采用英文名称的缩写。

表 11.1 一些常用的表面分析技术

探针粒子	探测粒子	表面分析技术名称	简称	用途
电子	电子	低能电子衍射	LEED	微观结构
电子	电子	反射式高能电子衍射	RHEED	微观结构
电子	电子	俄歇电子能谱	AES	化学组分
电子	电子	透射电子显微镜	TEM	形貌
电子	电子	扫描电子显微镜	SEM	形貌
电子	电子	透射扫描电子显微镜	STEM	形貌

探针粒子	探测粒子	表面分析技术名称	简称	用途
电子	光子	X射线光电子谱	XPS	成分及其化学态
电子	光子	紫外线光电子谱	UPS	分子及固体电子态
电子	光子	同步辐射光电子谱	SRPES	成分、原子及电子态
离子	离子	卢瑟福背散射	RBS	成分、微观结构
离子	离子	离子探针质量分析	IMMA	微区成分分析
离子	离子	二次离子质谱分析	SIMS	成分
离子	光子	离子激发 X 射线谱	IEXS	原子及电子态
离子中子	光子离子	核反应分析	NRA	成分
质子	光子	质子激发 X 荧光分析	PIXE	成分
X 射线	X 射线	X 射线衍射分析	XRD	微观结构
离子	离子	离子散射谱	ISS	成分、微观结构

从表 11.1 中我们可以理解,以射线为探针的材料表面分析技术是一种涉及许多领域、用途十分广泛的先进的现代分析技术,有着传统的光谱分析和化学分析无法比拟的诸多优点。主要的优点有以下这些:

(1) 由于这些表面分析技术一方面利用射线作为深入材料的探针,另一方面又利用射线与物质相互作用过程中产生的带有材料“指纹”的二次粒子作为探测的对象,因此可以从微观(原子级)的尺度上对材料进行分析。

(2) 不仅可用于确定材料的表面形貌和化学组分,而且还可以用于研究材料的原子结构、原子态和电子态。

(3) 可以进行微量分析和微区分析。

(4) 分析灵敏度高。对元素周期表中的大部分元素,可以探测到绝对含量仅 10^{-9} 克的各种元素,甚至可以探测到仅为 10^{-14} 克的含量,这是传统的光谱分析和化学分析方法难以比拟的。

(5) 可分析的元素多。几乎所有元素周期表中的元素都能测定,而且可以同时测出一种材料中的几种和几十种元素。

(6) 可以做到非破坏性分析,即材料样品经分析后可保持完整无损。

(7) 自动化快速分析。

因此,表面分析技术已经被广泛应用于化学、冶金、半导体、生物医学、环保、考古和法医鉴定等领域的材料分析,可以解决许多常规分析方法无法解决的难题。

几个典型的应用实例

表面分析技术的应用是十分广泛的，本书不可能也没有必要一一列举这些应用。在这里，只想举几个著名的应用实例，使大家对表面分析技术在材料的分析测试方面的神奇作用有比较深刻的印象。

《拿破仑死因探秘》

19 世纪威震欧洲的拿破仑兵败滑铁卢后被流放到名叫埃尔巴岛的荒凉小岛上，6 年后在那里去世。关于拿破仑的死因历来众说纷纭，曾经是历史上的一大疑案。直到本世纪 70 年代，英国科学家根据拿破仑死后留下的一些头发，用中子活化法（核反应分析技术的一种）揭开了拿破仑的死因之谜。

他们所采用的方法是先用中子射线照射拿破仑的头发，使头发中的一些微量元素与中子产生核反应而变成放射性同位素，然后用精密的射线探测器测量放射性同位素发出的特征射线，这样就可以确定出头发中的微量元素的种类和含量。

这种分析方法的灵敏度极高，可达到 10^{-7} 克 ~ 10^{-13} 克，比常规分析技术高几个数量级，可以分析出极少量材料中的极微量元素，而且还可以对一根头发的每一小段逐段进行分析。根据反复测量的结果，发现拿破仑死后的头发中含有高浓度的砷，其含量比同时代的正常人高 13 倍；对头发逐段测量结果还表明，离他死期越近，砷含量越高。因此可以判断拿破仑是被砒霜（三氧化二砷）慢性毒死的。

《揭开牛顿死因之谜》

这种现代分析技术还揭开了另一位世界名人英国著名科学家牛顿的死因疑案。

牛顿死于 1927 年。虽然现存的牛顿临死前的一些医案记载着这位世界科学巨匠晚年患有严重的失眠、便秘、记忆力衰退、忧郁等症状，但其真正的死因却无定论。许多专家多年致力于探索牛顿的真正死因，但都告无功而返。

有一次，几位英国科学家从牛顿的遗物中发现了他的两束头发。经中子活化法分析后发现，牛顿头发中含有高浓度的铅、铈和汞等重金属元素。重金属中毒是夺去牛顿生命的罪魁祸首。

牛顿怎样会引起重金属中毒呢？

翻阅牛顿晚年的档案资料，发现牛顿生前从事化学和光学实验时，经常和这些重金属打交道。此外，牛顿还喜欢鉴赏重金属，并有用手抚摸的习惯。另外还发现，牛顿居住的一间房间是用含有有毒的硫化汞漆粉刷的。所有这些导致了牛顿由于过量重金属污染而中毒，最后夺去了他宝贵的生命。

不同的元素被中子活化成不同的放射性同位素，其半衰期和所发射的射线的能量也是不同的，我们可以根据这些特征射线的能量及其强度，就可以确定出材料中到底含有什么元素和有多少含量。这些特征射线好像是元素的“指纹”，所以常被称为“核指纹”。如同每个人的指纹各不相同一样，人们可以根据“核指纹”识别其对应的元素。上面提到的拿破仑头发中的砷和牛顿头发中的铅、铈和汞等重金属元素，就是依据各自的“核指纹”识别出来的，最后确定出他们的死因。

谈到这里，你们一定会对射线的这种神奇作用赞叹不已。让我们再来看一看我国的科技工作者是如何揭开两千年前的古宝剑经久不锈的奥秘。

《两千多年前的古宝剑为何至今不锈？》

1965年我国考古工作者在湖北省挖掘楚墓的过程中，发现了一对虽然已经沉睡地下数千年仍然寒光四射的宝剑。它们的表面刻有精致无比的花纹，尤其是其中的一把在剑身上还刻有“越王勾践自作用剑”八个清晰的字迹。此剑深埋地下两千多年，出土时无半点锈迹，光彩夺目，锋利无比，堪称稀世珍宝。图 12.2 就是越王勾践剑的照片。

1974年在发现和挖掘陕西临潼的秦始皇兵马俑的过程中还出土了三把宝剑，是青铜铸成的。这三把宝剑埋藏的地方位于地下5米~6米，阴冷潮湿，雨水不断渗入，保存条件是很差的。但是经历了两千多年居然不锈不蚀，仍然光洁如初，寒光闪闪，这又是我国古代冶金技术的一大奇迹。

如何揭开这几把两千多年前的古宝剑经久不锈蚀的奥秘，引起国内外科技界的浓厚兴趣。

我国复旦大学的科技工作者利用质子激发X荧光分析(PIXE)方法对越王勾践剑进行了测试分析，发现越王勾践剑是由锡青铜铸成的，铜元素含量占75%，锡含量占25%弱，还有少量的铁和铅。此外还发现剑身上的黑色菱形花纹是经过硫化处理的。我国古代冶金工匠在两千多年前就已经掌握了这种先进的表面处理技术，既增加了花纹的美观，又增强了宝剑的抗腐蚀能力，是一项非常了不起的成就。

对秦始皇兵马俑坑出土的宝剑用电子激发X特征射线分析进行测试的结果发现，宝剑的表面是经过铬盐氧化钝化处理的。这是我国古代冶金学上的又一个非常了不起的发明。这种表面处理技术在西方是从本世纪30年代才陆续申报专利的。

谈到这里，我们一方面为我国古代在冶金学上所取得的辉煌成就感到骄傲，同时也为我国科技工作者利用射线技术揭开古宝剑不锈之谜所做出的成绩感到自豪。

带电粒子(质子、离子、电子等)激发X射线荧光分析是利用加速器产生的带电粒子激发出材料中待测元素的特征X射线，根据测到的这些特征射线的能量和强度，就可以对待测元素进行定性(是什么元素)和定量(多少含量)的分析。

对于品种繁多的材料表面分析技术及其十分广泛的用途来说，上面所举的几个实例可以说只是沧海之一粟。

2. 射线束用于材料的制备合成和表面优化

“巧妇难为无米之炊”这句话非常形象地道出了材料的重要性。众所周知，材料历来是人类生产力和社会进步水平的重要里程碑。历史上的所谓石器时代、青铜时代、铁器时代都是以材料的应用来表征的。

新材料是新的科学技术发展的重要基础和关键。试想，没有半导体材料的工业化生产，就没有现代计算机的迅速发展；没有现代高温高强度结构材料的研制成功，现代宇航工业的腾飞是难以想象的；没有低损耗的光导纤维（简称光纤），便不可能实现光信息的长距离传输，也就不可能有今天迅速发展的光通讯等等。另一方面，在我们的现实生活中，由于材料的性能不能满足要求而造成产品质量低劣，使用寿命短暂，甚至完全报废的事例几乎随处可见，几乎每个人都会有这方面的感触。

各种射线束（离子束、电子束等）在半导体器件和超大规模集成电路、光电子集成、固体工艺和材料科学与工程技术的其它各个领域发挥着日益重要的独特作用。

射线束作为一种高能微观粒子流，既是能量的载体，又是物质的载体。当它们与材料相互作用时，会产生各种物理学上和化学上的效应，从而引起材料在成分、结构和性能方面的一系列变化，也就是说，可以在原来材料的基础上制备出在成分、结构和性能上不同于原来材料的新型材料。

在许多情况下，人们往往只关心材料的表面，希望改善材料表面的某种或某些特性（如增加硬度、耐磨性、耐腐蚀性等），利用射线与材料表面的相互作用过程中所引起的材料表面层成分、结构的变化，来达到改善材料表面特性的目的，这就是所谓的射线束引起的材料表面优化。

目前，射线束用于材料制备合成和表面优化的方法很多，应用的领域也十分广泛。限于篇幅，下面我们仅就固体中的离子注入、射线有机合成、离子束用于薄膜制备和硅的中子嬗变掺杂等方面的应用做些概要的介绍。

3. 射线有机合成

射线有机合成也叫辐射有机合成，是一种新型的有机材料合成技术。根据射线（主要是 射线和电子射线）对材料的化学效应的原理，用射线照射有机合成材料，切断有机分子的链，产生一些新的自由基。这些新产生的自由基的化学性质十分活泼，很容易和其它的分子或基团相结合而生成一种新的有机合成材料。

有机合成材料也叫塑料，是国民经济中一种品种多、用途广、用量大的重要材料。近 30 年来，有机合成材料的发展速度极为迅速，每年以 14% 的速度递增，据统计，在 1976~1986 这十年间，美国的工程塑料增加 3.4 倍，而在同期一些重要的金属材料的增长速度分别为：铜为 50%，铝为 66%，锌为 27%。另据估计，到 90 年代末塑料将占各种运输工具结构材料重量的 70%~80%，到 21 世纪可能占整个国民经济所需结构材料的 70%~85%。

为什么有机合成材料有如此迅速的发展和如此广泛的应用？这是因为有机合成材料有如下一些突出的优点：

（1）原料来源丰富。当前以石油、天然气为主，以后还可以用生物原料，而生物原料是可以再生的，取之不尽。

（2）生产所需的能耗较低。以单位体积的能耗计算，有机合成材料为 100，水泥为 108，玻璃为 201，钢为 1016，铝为 1961。

（3）基建投资少，周期短。

（4）便于成型。可以一次做成各种各样的形状，还可以发泡，也可以做成复合材料，例如现在正在推广应用的刚塑料复合门窗。

射线有机合成属于辐射化学，具有无需加热、无需加催化剂、穿透力强、反应条件恒定和易于控制等优点，生产出来的产品纯度高，可以生产出用常规化学方法无法生产的具有特殊性能的产品。

根据高分子化合物结合方式的不同，射线有机合成可以分为辐射聚合、辐射交联、辐射接枝等。

辐射聚合及其用途

通常的化学聚合工艺需要在高温下进行，液态低分子量单体聚合成固态高分子聚合物时，体积会有明显的收缩。本世纪 70 年代，一种叫做过冷态辐射聚合的新工艺，在摄氏零以下的低温下，经过射线的照射，高黏度的液态低分子量单体聚合成固态高分子聚合物。这种工艺不仅聚合的速度快，反应时间短，产物的分子量高，因而产品的机械强度高，没有体积收缩内应力，光学性质均匀，没有光畸变。

低温辐射聚合为什么会有如此优异的效果呢？这是因为在低温下进行辐射聚合时，液态单体的体积由于热胀冷缩而充分得到收缩，在同样的低温下聚合成固态高分子聚合物时也就不会再发生体积收缩了。

这种先进的工艺对我们是非常有用的，例如用它生产出来的特种光学有机玻璃，可以大量用于生产光学透镜和太阳能收集器的透镜，而用其它方法是很难生产出这种没有光学畸变的透明有机合成材料的。

辐射交联及其用途

射线照射到某些高分子化合物上，可以使高分子链彼此互相结合起来，

这就是辐射交联。例如，原来是线型结构的聚乙烯，经射线照射后分子量之间会联结起来，分子量会增加好多倍，甚至会变成网状立体结构的交联聚乙烯。这种网状立体结构的交联聚乙烯有许多优异的特性。

(1) 耐热性大大提高。普通线状结构的聚乙烯的优点是电绝缘性能好，质轻耐寒，缺点是不耐热，超过 80 摄氏度就开始软化，超过 110 摄氏度就严重变形。辐射交联生成的网状立体结构的交联聚乙烯保持了普通聚乙烯的优点，又克服了它的缺点，耐热性大大提高，不但能经受 130 摄氏度以上的温度，而且机械强度也显著提高，还变得不溶于水。这将带来很大的好处。例如，普通的聚乙烯医用注射管，经过射线照射后，不仅可以灭菌消毒，而且它的耐热性大大提高。又如，用辐射交联生成的网状立体结构的交联聚乙烯做成的电缆，具有较高的耐热性，能承受远距离高压输电过程中发热引起的温升（可达 90 摄氏度左右），而且还具有机械强度高、不易开裂等优点，已经在原子能、航天、化工和海底电缆等领域获得了广泛的应用。图 12.3 就是辐射交联聚乙烯工艺的示意图。

(2) 热收缩特性。一般的材料是热胀冷缩，而辐射交联聚乙烯正好反其道而行之。经过热吹胀和快速冷却定型后的辐射交联聚乙烯膜（或管），再经过加热时就不但不膨胀，反而会收缩，使它恢复到未经热吹胀前的形状。这种奇异的特性就是所谓的“记忆”效应，非常有用。例如，可以将这种辐射交联聚乙烯薄膜用于商品包装，只需用电吹风机的热风吹一下，薄膜收缩后就会裹紧商品，是一种非常实用而美观的商品包装法。图 12.4 是热收缩薄膜用于商品包装的示意图。辐射交联聚乙烯管特别适用于作为电缆、电线、接头套管和一些电子元件的包覆材料，机械强度、密封性和防潮防腐性能都非常理想。又如，辐射交联聚乙烯泡沫塑料的发泡率高，表面均匀光滑，加工性能好，是价廉物美的隔音、隔热、减震和包装材料。

辐射接枝及其用途

在射线照射下，使单体和聚合物或者使两种以上的高分子聚合物结合在一起而变成另一种新的分子量更大的高分子聚合物，这种过程就是辐射接枝。特别有趣的是，人们通过控制射线照射中的参数，既可以使辐射接枝仅局限于高分子聚合物的表面，也可以使之达到聚合物内部的任意深度。

辐射接枝技术同样得到了广泛的应用，例如，某些高分子聚合物（如聚四氟乙烯和聚乙烯）的表面粘接性能和印刷性能非常差。通过辐射接枝，在它们的表面“接枝”上一层薄薄的单体后，就可以轻而易举对它们进行粘接和印刷了。

辐射接枝高分子聚合物在人造器官上的应用特别引起人们的高度重视。人造器官植入人体内，不仅要求能在体内正常工作几十年，起到被置换器官的功能作用，而且要求它们在这段时间内不产生不良反应，不造成人体的不舒服感。为此，用来制造人造器官的生物工程材料除了要经久耐用以外，一方面要和人体组织的比重差不多，使人体不会造成压迫感，另一方面要和人体组织有良好的生物亲和性。高分子聚合物在经久耐用和比重上都是符合要求的，但是它们都是属于疏水性物质，因此就无法与人体组织（水是人体组织的主要组成物质）有生物亲和性。辐射接枝方法可以使这个难题迎刃而解。解决的方法很简单：在疏水性的高分子聚合物主干上用辐射接枝接上亲水性的单体，从而获得了一种新型的高分子聚合物，整体上保持了合适的比重和

经久耐用性，表面又具有良好的亲水性，与人体有良好的生物亲和性。目前世界上已经有不少病人接受了用辐射接枝法制备的医用高分子材料做成的人造器官。人们对这种人造器官在医学上的作用越来越重视，这方面的应用正方兴未艾。

辐射降解及其用途

高分子材料的性能既和分子结构类型有关，也和分子量的大小有直接的关系。

前几种方法有一个共同点，这就是都是使生成高分子聚合物的分子量升高而获得一些新的特性。我们现在往相反的方向设想，如果使某些高分子聚合物的分子量降低，会发生什么结果呢？

在射线的照射下，使高分子聚合物变成另一种分子量更低的聚合物，这种方法就叫做辐射降解。

有“塑料王”之称的聚四氟乙烯的机械性能、耐热性能、密封性能和耐腐蚀性能都是非常杰出的，用它制成的各种零部件不用加润滑剂照样经久耐用，其耐腐蚀性能就连腐蚀性最强的“王水”也对它奈何不得。但是这种材料也有一些严重的缺点，它不能用热压成型的方法进行加工，它的耐辐射能力特别差，在有机合成材料中排名倒数第一，此外，它的边角料和废料不能像其它塑料那样回炉再生。

人们利用聚四氟乙烯耐辐射能力特别差的特点，在射线的照射下，使它由分子量很高的高分子聚合物变成分子量不太高的聚合物，由大块的固体材料变成一种非常细微的粉末。这种粉末称为聚四氟乙烯蜡，可以加到氟油中去调制成油脂。如果不是由辐射降解而是用其它化学降解方法产生的聚四氟乙烯粉末就不能和氟油调和成油脂。

聚四氟乙烯蜡油脂是一种高级润滑材料，既耐高温（在 250 摄氏度也不熔化），又耐低温（在零下 40 摄氏度下也不冻结），而且还具有抗溶剂、耐腐蚀、不燃烧、无味、低毒等优点，广泛应用于许多特殊的环境，在原子能工业、现代特种武器、洲际导弹、人造卫星和宇宙飞船等领域都有重要的用途。

4. 固体材料中的离子注入

什么是离子注入？

首先我们从物理学的角度来看，离子注入是能量在几十到几百千电子伏的离子束与固体材料相互作用过程中的一个物理过程。我们知道，载有能量（载能）的离子束与固体材料相互作用时，会有许多不同的物理过程发生，如电离和激发、入射离子的散射、二次粒子的产生、固体材料成分的溅射等。当载能的离子束入射固体材料后，由于上述种种物理过程而不断损失自己的能量，从而使自己的速度逐渐降低下来并趋近于零，最后在固体材料中停止下来，或者停留在晶体结构的格点上，成为所谓的置换原子，或者停留在格点之间，成为所谓的间隙原子，这个过程就是离子注入。图 12.5 是离子注入的示意图。从技术的角度来看，离子注入是这样一个过程，即用一种叫做离子注入机的小型加速器，首先将某种我们所需要的元素电离成带电的离子并用电场将它们加速到具有几十到几百千电子伏能量的离子束，最后将它们打到固体材料中去。

从材料科学与工程学的角度来看，离子注入是一种改变或改善固体材料表面某种或某些特性的材料表面改性技术。载能的离子束注入到固体材料中去以后，除了会发生上述种种物理效应之外，还可能伴随着发生一些化学效应，从而将引起固体材料表面层（微米量级）的成分、结构和性能的变化。人们可以通过控制离子注入过程中的各种技术参数，来定向地引导固体材料的表面成分、结构和性能发生预期的有利变化，从而达到优化固体材料表面性能，或者获得某种新的优异特性的目的。

以下我们将从材料表面改性的角度，对离子注入的发展过程及其应用作些扼要的说明。

离子注入技术是怎样发展起来的？

早在本世纪 40 年代，人们就开始用离子注入来模拟原子反应堆结构材料的辐射损伤。从 50 年代开始，人们将离子注入作为替代热扩散的一种掺杂新方法应用于半导体材料。到了 60 年代初，已经研制成功磷离子注入硅的大面积浅结二极管，第一次生产出离子注入的半导体器件——核粒子探测器，这标志离子注入在半导体领域的实用化的开始，向人们预示了离子注入引人注目的应用前景。

随后，离子注入的研究和开发在国际上形成热潮，无论在基础研究还是实际应用方面都取得了极大进展，逐步走向成熟。到了 70 年代，离子注入已经成为大规模集成电路和超大规模集成电路研究和生产的关键工艺之一，对现代微电子学和计算机技术的飞速发展作出了重要的贡献。从 70 年代开始，离子注入的应用扩展到了金属、陶瓷等非半导体材料的表面改性，开辟了一种新的独特的材料表面优化方法，经过 80 和 90 年代的发展，已经从实验室研究走向广泛的实际应用。

离子注入有哪些优点？

作为一种材料表面改性技术，离子注入到底有哪些特点和优点呢？概括起来，主要有以下几方面。

(1) 在半导体材料掺杂上,过去采用热扩散工艺,对那些掺杂浓度极低和很浅的陡变结是很难控制的,在制备集成电路上,有严重的横向扩散,限制了集成度的提高,还容易引起高温条件下的热离解和热污染,并难以实现工艺过程的自动化。而离子注入控制的是电参数,可以很方便地控制两个独立的参数离子的能量和剂量(单位面积上注入的离子数),从而可以精确地控制掺杂的浓度和深度,而且掺杂的均匀性和重复性好,横向扩散小,特别有利于大规模集成电路和超大规模集成电路的生产。

(2) 人们常用冶金和热扩散等常规方法将某种或某些元素添加到材料中去,以达到改善材料性能的目的。但是对于各种具体的材料来说,哪些元素可以添加进去,添加到多大的浓度,都要受到热力学规律的限制。而离子注入是借助于电场力将所需的某种元素以离子的形式“注入”到固体材料中去的,不受这种限制。而且也和各种表面涂层技术不同,表面涂层是附着在材料的表面,往往容易脱落,而离子注入是将元素打进材料里面去,在表面层内与原材料中的元素混合或化合在一起,不存在脱落问题。

(3) 离子注入一般在室温附近温度和高真空条件下进行,可以避免那些需要热激活(高温条件)的常规方法带来的不利影响,也不会导致被注入元器件的变形和尺寸精度与表面光洁度的下降,特别适用于化合物半导体材料的掺杂和各种精密零部件的表面优化处理。

(4) 离子注入一般的深度不到1微米,是一种表面技术,是用表面冶金化代替常规的冶金过程,这样不仅可以实现表面刚性(强度)和基体韧性(抗冲击性)的最佳搭配,而且可以节约大量的作为冶金添加元素的稀有金属和贵重金属材料。

离子注入应用举例

(1) 离子注入已经成为大规模集成电路和超大规模集成电路的关键工艺之一。离子注入在半导体工业上的应用是离子注入的实际应用中起步最早、工艺最成熟、应用的最广泛、经济效益和社会效益最显著的一个领域。它已经和细线条加工、计算机辅助设计、材料制备与集成电路设计一起,形成大规模集成电路和超大规模集成电路的五大技术基础(或五大关键工艺)。

美国贝尔实验室和IBM公司在国际上最先进行大规模集成电路和超大规模集成电路的研究和生产,曾处于国际领先地位。日本为了赶超国际先进水平和争夺大规模集成电路和超大规模集成电路的国际市场,在70年代中组织了日立、松下等六大公司,组成一个联合研究集团,开展了离子束等射线技术在超大规模集成电路上的应用的研究和开发。由于发挥了协同研究的优势,很快就赶上美国,于1978年首次研制成功256k存储器,随后又很快生产出512k,到了90年代初集成度已经达到2M以上。

据统计,我国已有100台左右的离子注入机用于大规模集成电路、超高频半导体器件、半导体红外探测器、核辐射探测器和固体激光器等方面的研究和生产。

近年来,用高剂量($10^{17} \sim 10^{18}$ 离子/厘米²)的氧离子注入到硅中去,在硅的里面形成一个SiO₂绝缘埋层,从而获得如图12.6所示的新的半导体材料的研究和开发取得了很大的发展。这种技术有人称它为离子束合成的注氧分隔技术。由于这种半导体材料在制作高速、抗辐射、耐高温电路和新型多功能电路等方面所具有的独特的优越性,被称为21世纪的硅集成电路用半

导体材料，引起人们的高度重视。美国把注氧分隔技术列入 1991 年美国国防部关键技术计划。近年来，在美、欧共同体和日本等国，离子束合成的注氧分隔材料已经进入高技术的实际应用阶段。

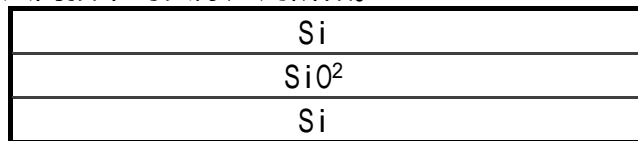


图 12.6 离子束合成的注氧分隔硅材料示意图

(2) 氮离子注入提高钛合金人工关节的使用寿命。钛合金具有强度高、比重轻和耐腐蚀等优点，被誉为“未来的金属”，有着广泛的应用前景。除了应用在航空、航天、化工等领域外，钛合金已成为人工关节的首选材料。这是因为除了上述种种优点之外，钛合金的体积弹性模量接近骨骼，而且还具有优良的生物相容性，植入体内后不会发生排斥反应或凝血反应。但是美中不足的是它的耐磨性和润滑性还不够理想，使用寿命还不够长。有些病人植入钛合金人工关节后，过了若干年后已经磨损得无法再用，不得不重新动手术更换，不仅给患者增加沉重的医疗费负担，而且给患者造成巨大的痛苦。因此，提高钛合金人工关节的使用寿命具有重大的经济价值和社会意义。

美国橡树岭国家实验室和斯贝尔公司，英国的哈威尔原子能研究中心和我国的清华大学相继进行了氮离子注入改善钛合金耐磨性的研究和开发，得到了几乎完全一致的结论：氮离子注入改善钛合金耐磨性的效果十分明显，可高达 100 倍以上，而且磨屑大大减少，用于临床，完全可以做到一次植入后无须更换而很好地工作下去。这一成果很快得到了许多国家医学卫生部门的高度重视并批准氮离子注入钛合金人工关节进入临床应用。美国斯贝尔公司于 1985 年首先进行氮离子注入钛合金人工关节的商业性经营，平均每年处理几千套全关节，到 1989 年~1990 年期间处理了 3 万套~4 万套。图 12.7 是氮离子注入处理过的钛合金人工髓关节照片。(3) 离子注入改善低温制冷机活塞杆的摩擦学性能。图 12.8 是美国斯贝尔公司离子注入处理过的低温制冷机活塞杆的照片。这种元件在工作过程中不允许用常规的润滑剂或固体润滑剂，离子注入工艺是唯一的选择。经过用钛离子注入加碳离子注入后，寿命提高 100 多倍，已经得到推广应用。

(4) 离子注入降低返回式卫星抽气泵的能耗。我国北京师范大学和北京有色金属研究总院协作，把离子注入技术用于返回式卫星传感器抽气泵定子与转子的表面优化处理。图 12.9 是经过钛离子注入后的返回式卫星传感器抽气泵定子与转子的照片。众所周知，降低各种零部件的能量消耗，对航天器来说具有特别重要的意义。在没有离子注入处理之前，抽气泵的能量消耗太大，工作电流达到 6.3 安以上，降低能量消耗的要求非常迫切。经过钛离子注入后的抽气泵，经地面测试，工作电流降低到 4.7 安以下，而且工作也更加稳定可靠，达到了航天部门的要求。离子注入表面优化的传感器抽气泵首次用在 92 年 8 月 9 日发射的返回式科学实验卫星上，取得了空前的成功。人民日报于 1992 年 9 月 5 日在题为《我发射返回式卫星意义重大，各项科学试验取得可喜成果》的文章中引用当时的航空航天部新闻发言人的话，说：“在卫星结构、星上探测设备等方面采用了一系列新技术，因而卫星探测精度有所提高，卫星获取的信息明显增加；卫星的可靠性和灵活性也有较大提高；卫星在轨寿命也由以往的 3 天~8 天延长到 16 天。”有关单位还表示：“节省星上能源消耗是圆满完成重要条件之一，离子注入工艺为卫星发射

成功做出了重要贡献。”这项应用已经得到推广应用。

除此以外，他们还用离子注入使铝型材热挤压模具的寿命提高 30 倍，高速钢切削工具（如麻花钻头、片铣刀、三面刃铣刀等）的使用寿命提高 7~20 倍，受到科技界和工业界的高度重视，并已得到实际的应用。

5. 离子束用于表面涂层制备

随着现代工业和科学技术的发展，表面涂层技术已经成为发展最迅速、应用最广泛和经济效益十分显著的一种表面技术。

表面涂层技术有哪些种类？

表面涂层技术的种类繁多，大体上可以分为化学气相沉积和物理气相沉积两大类。其它的表面涂层技术是这两大类的派生或这两大类的渗透和发展。

化学气相沉积是 19 世纪末开始发展起来的，到了本世纪 50 年代，德国首先用化学气相沉积碳化钛 (TiC) 硬质薄膜获得成功，标志着这项技术进入实用化阶段。随后一批用化学气相沉积生产的 TiC、TiN、Al₂O₃ 硬质表面涂层相继在工业上得到了广泛的应用。日本 80 年代在国际上首先用化学气相沉积生成金刚石薄膜很有发展前途：硬度高可用作耐磨表面涂层；高导热性和高绝缘性可作为超大规模集成电路的基底材料；掺杂后具有半导体性质，是难得的高温半导体。但是，化学气相沉积一般必须在 900 摄氏度 ~ 1000 摄氏度的高温下进行，使它的应用受到一定的限制。物理气相沉积又有真空镀膜、离子溅射沉积和离子镀三种基本形式。

真空镀膜是在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 托真空条件下，用电子束等加热材料使之蒸发成为气相的原子或分子沉积到工件的表面，生成一个新的沉积层。真空镀膜的不足之处是沉积的表面涂层与基体材料的结合力比较差，而且对一些难熔金属的气相沉积也有一定的难度。

离子镀是在真空镀膜的基础上再加上等离子体激活，即在工件上加上 1 千伏 ~ 5 千伏的负电压，通入工作气体(常用氩气)，真空室内的压强由 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 托上升到 $2 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-2}$ 托。在电场作用下，工作气体被电离，产生辉光放电，在工件周围形成一个等离子体区，气相沉积的粒子经过等离子区时，也会被电离成离子，在负电压的作用下加速飞向工件表面，形成表面涂层。

离子溅射沉积是以氩气为工作气体，真空室的压强保持在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 托在靶上加几百到几千伏的负电压，在电场的作用下，工作气体电离成为离子并轰击靶材料，利用溅射效应将靶材料的原子或分子溅射到工件表面上，从而形成表面涂层。

为什么离子镀和离子溅射沉积的效果好？

在离子镀和离子溅射沉积这两种方法中都利用了离子束的作用。这可以得到两方面的好处，一方面，在沉积之前，先用工作气体离子轰击（在电场作用下）工件表面，可以清除表面的有害化合物和表面缺陷，另一方面，涂层元素以离子形式在电场作用下以更大的速度向工件表面沉积，这些都有利于改善表面涂层和工件表面的结合性能。这就是为什么离子镀和离子溅射沉积的表面涂层效果明显好于真空镀膜的缘故。

离子镀和离子溅射沉积的新发展及其应用

近十多年来，表面涂层技术在离子镀和离子溅射沉积的基础上向两个方向发展。

(1) 在离子镀和离子溅射沉积中引入化学过程，这就是在工作气体中掺入适当的反应气体 O_2 、 N_2 、 CH_4 等，经过等离子体的激活电离后成为活泼的氧离子、氮离子、碳离子等，和用来沉积的金属离子起化学反应后生成化合物（如 Al_2O_3 、 TiN 、 TiC 等）沉积层。

(2) 另一个发展方向就是磁控离子溅射和离子束溅射，用以提高沉积速度和表面涂层纯度。磁控离子溅射是在溅射靶附近安装一个垂直于电场的磁场，用以提高溅射靶附近的等离子体密度，从而提高沉积速度。离子束溅射沉积是用经过聚焦的离子束直接打到溅射靶上，使靶材料元素发生溅射而沉积到工件的表面。整个过程是在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 托的真空度下进行。以上两点都有利于减少表面涂层的杂质。因为上面几种溅射沉积方法有可能将一些靶材料以外的杂质也一起沉积到表面涂层中去，而且工作真空度也比离子束溅射沉积低 2~3 个数量级，因此离子束溅射沉积可以最大限度地减少杂质进入表面涂层的可能性。

将离子注入引入表面涂层

用上面的各种方法制备的表面涂层，即使加了离子束的激发和加速，但是终因能量还不够高，表面涂层和基体材料之间还是有明显的界限，基本上没有过渡层，其结合力虽然通过一些方法得到了改善，但终究还是有限的，涂层的剥落仍是一个主要的缺点。为了继续改善表面涂层的结合力问题，人们将离子注入引入表面涂层的过程。用于离子注入的离子束具有高得多的能量，其射程可以穿过表面涂层，引起涂层原子和基体材料原子之间的相互渗透和相互混合，这就是所谓的离子束混合过程。这样就在界面区形成了一个过渡层，大大增强了表面涂层与基体材料之间的结合力。有人把这个过程比喻为“离子束缝合”，离子束好像针线一样，把表面涂层和基体材料牢牢地“缝合”在一起。

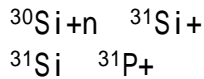
于是有人提出把表面涂层技术和离子注入技术合二为一，即在离子束溅射沉积的基础上，又加进一个能量更高的离子束，成为双离子束沉积技术：一个能量为几个千电子伏的离子束用于溅射沉积，另一个能量为 10 千电子伏 ~ 100 千电子伏的离子束用于离子注入。既可以表面涂层沉积和离子注入同时进行，也可以先进行表面涂层沉积再进行离子注入。根据不同的目的，离子注入的离子，既可以是惰性气体，也可以是反应元素（如硼、碳、氮等）的离子。日本科学家在 80 年代中期用真空镀膜加氮离子注入的方法制成立方氮化硼薄膜，显微硬度达到 2000 以上。我国北京师范大学的科技人员用双离子束沉积技术在 80 年代后期成功地合成了立方氮化硼薄膜，显微硬度达到 4000 以上。这种薄膜用常规的物理气相沉积方法是很难获得的。

6. 硅的中子嬗变掺杂

硅仍然是最主要的半导体材料。单晶硅是集成电路的关键材料，要求大直径、高纯度、高均匀性和高完整度。随着超大规模集成电路的集成度的不断提高，对单晶硅的均匀性和完整度的要求也不断提高。

前面我们已经在固体中的离子注入里讲过，单晶硅的掺杂是超大规模集成电路的五大关键工艺之一。这里我们再介绍一种硅的独特的掺杂方法——中子嬗变掺杂。

中子嬗变掺杂的原理很简单也很独特，是一个名叫 K. 拉克-霍罗维茨在 1951 年提出来的。它与热扩散和离子注入都不一样，不是从外部掺进去的，而是利用核反应堆中的中子，通过选择的核反应，在单晶硅内部中产生出原来不存在的新元素（掺杂元素），从而达到单晶硅掺杂的目的。天然硅是由三种稳定同位素组成，其中 ^{30}Si 占 3.1%。我们的目的就是使 ^{30}Si 在热中子的照射下发生核反应，可以用下面的式子来表示：



在上面的式子中， n 代表中子， γ 代表 γ 粒子， γ 代表 γ 粒子。 ^{30}Si 俘获一个热中子后变成放射性同位素 ^{31}Si ，同时放出一个 γ 粒子。 ^{31}Si 的放射性半衰期为 2.6 小时，它释放出一个 β^- 粒子后就嬗变成稳定同位素 ^{31}P ，这就完成了单晶硅的掺磷过程。

这种独特的掺杂方法到底有哪些优点呢？主要的有以下几点：

(1) 由于 ^{30}Si 在硅中的分布非常均匀和中子有比较大的射程，因此最终生成的稳定同位素 ^{31}P 的分布也就很均匀，即掺杂的均匀性很好，从而可以得到电阻率很均匀的单晶硅。

(2) 通过控制中子通量（单位面积上的中子数）和照射时间，可以准确地控制核反应产物的数量，也就是说可以准确地控制掺杂量。

(3) 掺杂的纯度高，不会产生有害元素的污染。

因此用这种方法可以得到优质的掺杂单晶硅，特别适用于制作高压大功率电子器件。中子嬗变掺杂的单晶硅的缺点是还有残余放射性，这是因为在中子照射的过程中伴随产生的放射性同位素 ^{32}P ，半衰期为 14.3 天。因此在中子照射后需要搁置一段时间（约 70 天）才能去除残余放射性。这可能在某种程度上限制了此项技术的更加广泛的应用。

在国际上是 1974 年就成功地用核反应堆热中子对单晶硅进行中子嬗变掺杂，并开始实现商品化生产。中国原子能科学研究院也从 70 年代后期开始用核反应堆热中子进行单晶硅的中子嬗变掺杂，取得很好的效果。目前，中子嬗变掺杂单晶硅已经成为工业产品，产量逐年增加。

结束语

X 射线、天然放射性和电子等的发现具有划时代的意义。正是这些射线的发现向人们预示着：原来一直被视为物质最小单位的原子里面，竟有着一个神奇无比的微观世界，这吸引和激励了无数科学家投身于探索原子内部奥秘的实验物理和理论物理的研究中去。这些射线的发现对科学技术和人类历史进程所发生的巨大而深刻的影响，是当时谁也想不到的。有人估计，从这些射线发现后的近百年来在科学技术上所取得的成就，无论在数量和质量上都超过这以前人类有史以来所有成果的总和，大大加快了人类历史的进程。

射线既是物质的载体（各种射线是物质结构中的一些不同的层次），又是能量的载体（射线具有很高的能量），当它们与物质相互作用时会产生各种物理学、化学和生物学上的效应。射线与物质相互作用过程中的这些效应是人们研究射线、防御射线和利用射线的基础。有些科学技术从发现到实际应用经过了一段很长的时间，而射线的实际应用可以说从它的发现开始就起步，例如用 X 射线和放射性同位素进行疾病的诊断和治疗。到了今天，射线的应用已经非常的普及和非常的深入，在生产、工作和生活的各个领域给人类带来种种的好处，大大改善了人类的生活，坚定了人类改造自然、改造社会的决心和信心。而且我们完全有理由相信，未来的发展会更加迅速，更加惊人！最后，让我们用英国著名的科学家和哲学家 B. 罗素在本世纪 20 年代说过的一句话作为结语吧：

“归根到底，是科学使得我们这个时代不同于以往的任何时代。科学能为人类创造一个比以往任何时候都要美好的环境。”

图书在版编目 (CIP) 数据

让射线造福人类/林文廉编著.—北京：北京师范大学出版社，1997·11

ISBN 7 - 303 - 04495 - 7

.让... .林... .放射线-普及读物 .0571.32 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 12952 号

北京师范大学出版社出版发行

(100875 北京新街口外大街 19 号)

石家庄市方正计算机公司排版

北京师范大学印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本：850×1168 1/32 印张：6.125 插页：3 字数：97 千

1997 年 11 月北京第 1 版 1997 年 11 月北京第 1 次印刷

印数：1~10 100 册

定价：9.20 元

