

原子能知识丛书



人体与辐射

原子能知识丛书

人 体 与 辐 射

〔美〕诺曼·A·弗里格里奥 著

张关铭 译

原子能出版社

人体与辐射

〔美〕诺曼·A·弗里格里奥 著

张关铭 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国大街8号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $2\frac{1}{2}$ ·字数 54 千字

1981年8月第一版·1981年8月第一次印刷

印数001—3000·统一书号：15175·341

定价：0.29元

出 版 说 明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人来说还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书（Understanding the Atom Series）。这套丛书取材广泛，内容丰富，语言生动，深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

在科学技术急速发展的今天，书中引用的有些材料稍嫌过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

目 录

一、基本法则·····	(1)
二、辐射化学和辐射物理学的浅说·····	(2)
三、本底和前景——辐射线的来源·····	(27)
四、老鼠、人或一些生物和医学·····	(35)
五、奇妙的辐射人体效应·····	(46)
六、好了，那么该怎么办呢？·····	(68)
结束语·····	(74)

一、基本法则

1.10 鉴于“研究人类最适宜的方法是取材于人”^{*}，我们在探讨辐射效应时，尽量偏重于人体方面。遗憾的是（或者说，幸运的是）人们大多还是用动物作为实验对象。因此，我们只好从射线对细胞以及各种哺乳动物的作用的试验中，偶尔也从用细菌或其他植物作试验的结果中来获取所需的大部分资料。此外，利用人类自身的偶然事件或事故也可获得射线与人体相互作用的资料。在此我们不讨论辐射对人们子孙后代的影响（遗传效应）^{**}，而着重讨论辐射对人体的效应。我们所介绍的不只是一般科学的一面（放射生物学），同时也将涉及到应用科学的一面（放射学）。

在一些科学的探讨上，用一些专门术语或复杂词句来说明一个简单概念的艺术是难能可贵的。它不仅能帮助我们加深印象，而且能将一些独特的科学概念在许多交谈的人们中留下印记。例如，“氯化钠”在化学家的心目中就会联想起离子、立方晶体和类似的其他东西的印象。而“盐”是很容易使人联想起淡而无味的汤。

在任何情况下，我们都力求最少地使用专门术语，同时将首次出现的术语用黑体字注明。

* 这句话是亚历山大·波普（Alexander Pope）在1734年说的。

** 在本丛书的另一小册子《辐射对遗传的影响》中详细叙述。

放射生物学并不像物理学是一门历史悠久的或经长期考验的学科。因此,在该领域内,假说多于定律。为使读者能更好地理解,我们将选择一些与辐射对人体的效应有关的题材加以阐述。在此,我们特别选择了DNA-LET理论。目前它是最为流行的理论,而且它能使你把握未来科学发展的重点。

为使读者便于查阅文中有关概念的所在段落,我们将它们在讨论中出现的段落以章节表明清楚。例如“4.31”表示第四章第31节。

有些对物理不太熟悉的读者,可能在读第二章时觉得不太好懂。在此情况下,可先从第三章开始读起,然后再回过头来读第一章。

二、辐射化学和辐射物理学的浅说

2.1 辐射类型

2.10 辐射并不像凯撒统治下的高鲁人那样具有统一性,它可分为电离和激发两种类型。尽管“激发”在其他领域里是多么的重要,但这里我们主要关心的是电离辐射。原因很简单,因为对人体内各种原子的电离作用(或使其分裂成若干带电碎片)不仅是对原子的电离问题,而且会使人体内原来井然有序的组织产生很大的破坏。

辐射是以一小束一小束通常称为粒子的形式释放出来的。虽然在某些场合,这些粒子能以颤动的云雾给出一张较

好的图片，但这里我们可以将粒子想像为一些简单的极其微小的球体。这些小球亦可分成两类：带电的和中性的。带电粒子又可分为带正电荷（+）（质子、 α 粒子、正电子）或负电荷（-）（电子）。带不同符号电荷（如+-或-+）的粒子彼此会相互吸引；而带相同符号（如++或--）电荷的粒子则彼此相互排斥。这些带电粒子只能穿透很薄的物质（包括组织）。当带电粒子撞击到物质表面附近时，它们的能量都损耗在迅速推拉质子和电子的过程中。经过很短路程，这些粒子就全都精疲力尽了。这种作用好比一个磁力很强的磁铁球滚入一堆钢球里——突然将负电子从平时（中性）分子体中迅速猛拉开，使分子呈现电离（带电）状态。空气中的分子因受高能粒子作用而产生电离的现象，参见图 1。

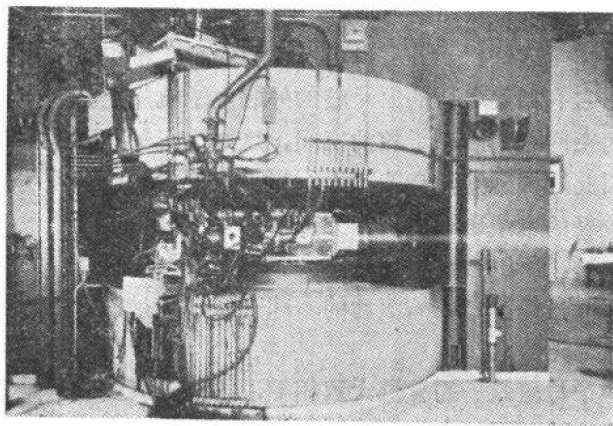


图 1 在阿贡国立实验室里用 60 英寸回旋加速器引出一束高能粒子使空气中的分子产生电离。这种电离作用能在空气中产生白光，如同“霓虹灯”中氮的电离而生成的白光一样

2.11 中性粒子（主要是中子和光子*）不带电荷。它靠直接碰撞产生电离能力。就像在球台上打台球一样，当打出的台球与另一台球完全碰撞时，就有足够的能量产生电离，如果打偏了就不能产生电离。然而分子中的粒子间的距离相当大，如同宇宙间的星球间的距离一样，使中性“台球”碰撞落空机会远比击中机会大。所以中性粒子在能量完全损耗之前，比带电粒子走得更远。

2.12 对射线的真正性质尚未了解以前，成束流的氦核（两个质子和两个中子结合在一起）被称为 α 射线；电子或正电子束称为 β 射线；放射性元素衰变过程中产生的高能光子束称为 γ 射线；由电子撞击重金属靶所产生的较低能的混合光子束称为X射线。高能中子和质子束几年前已产生出来，但还未进行专门的命名。

2.13 这些粒子各有自己所喜爱的靶。带电粒子大多选择在与它有相等电荷的原子核的外层电子轨道上。因为电子占有的空间远大于原子核的空间，这好比行星环绕太阳一样，因此这种碰撞机会就很大。光子也要找自己喜爱的靶，它与较轻的电子碰撞，由于光子本身很“轻”（几乎没有什么重量），所以碰撞机会也很大。光子若撞击到重原子核上，那就很像蜜蜂去撞滚动的木球一样，结果蜜蜂被弹回去而木球毫无影响。

中子与氢原子的质量大致相等，故氢核（质子）是中子所喜爱的靶。因此含水(H_2O)较多的活组织，受到中子撞击

*光子常称为辐射量子（一小束）。这样就可显示出它不同于其他粒子，它的行为像球形物一样，但是更像一团能云。

后，破坏很重。其他一些核也受到一些损坏，但核越重受到的损坏越小——蜜蜂与滚动木球便是一例。因为中子不带电，故通过电子云时，虽产生一些扰动，但并不带来太大损害，如同棒球穿过浓雾一般。

2.14 这些粒子的能量损耗完后，其结果是各不相同的。电子和质子经多次碰撞，速度减慢，直到能够与其附近的分子产生化学反应为止。例如，质子最后不是变成氢原子（H），就是变成普通水中的氢离子*（ H_3O^+ ）。

正电子的速度减慢几乎与电子一样，但最后它并不处于静止状态，而是被另一个电子所俘获。这一对电子在“自杀”的过程中变成两个光子，此过程称为湮没。光子最后被完全吸收，通常以热能形式释放出来。

中子在此过程中被原子核俘获后，便产生新的而又较重的原子核，这种较重的原子核通常是不稳定的。这些不稳定的原子核就被认为具有放射性（2.8）。它们能放出光子（或）带电粒子，直到最终变成一个新的稳定的原子核。

2.15 辐射粒子如同子弹一样，除非速度很快，即除非它们具有动能，否则作用很小。在物理学上，为方便起见，粒子的能量通常以电子伏特（eV）为单位，它表示一个电子从电压为1伏特的电池中的负极移动到正极所获得的能量。对于更高能量的粒子**，则用千电子伏特（keV）和兆

*更确切地说是水合氢离子。这是氢离子 H^+ 直接与 H_2O 反应所生成的 H_3O^+ ！

** 1 电子伏特 = 1.6×10^{-12} 尔格 = 1.6×10^{-14} 焦耳 = 3.82×10^{-20} 卡。一个氢原子完全转变成能量，按照爱因斯坦方程 $E=mc^2$ ，可产生 924 兆电子伏特能量。

电子伏特 (MeV) 表示。按一般标准, 现在的 1 兆电子伏特的能量并不高。将 1 克水的水温升高 1°C 就需 2.62×10^{13} 兆电子伏特的能量。可是这些粒子的数目很大。例如 1 克氢含有 6×10^{23} 个以上的电子。每个粒子的能量虽很小, 但如此大量的粒子加起来, 其总能量就相当大了。然而还有一点需要提出的, 化学分子间的结合只需几个电子伏特的能量, 故有 1 千电子伏特的粒子去碰撞分子将引起相当大的化学破坏*。

2.2 化学效应

2.20 分子, 尤其是生物分子, 常是通过电子对 (共价) 键结合在一起的。从图 2 中, 我们可以发现最普通的生物分子——水, 受电离辐射而引起分解的情形。如果键按图 2 (A) 或 (B) 分解, 便产生两个离子 (带电荷的化学碎片)。这些离子的化学性质通常十分活泼。生物体中分子的分解破坏了生物体的生物化学规律, 而离子的进一步反应又破坏了与其相邻近的分子, 这样就又增加了一种破坏。

2.21 键也可以从中间分开, 如图 2 (C) 所示。在此种情况, 产物并不带电, 所以它不是离子。我们称它们为**自由基**, 因为它们至少含有一个不成对的电子。它们与普通的化学分子式的基 (CH_3 —、 C_6H_5 —等) 相类似。由于这些“自由”电子趋于成对和形成共价键, 故自由基的性质比离子更活泼, 对组织的破坏也就更大。毫无疑问, 大多数辐射生物化学效应都是由自由基引起的。

这些基一旦形成后, 就完全可能与周围的其他基发生反

* 32.5 电子伏特的能量就可使活组织中的几乎任何一个分子产生电离。

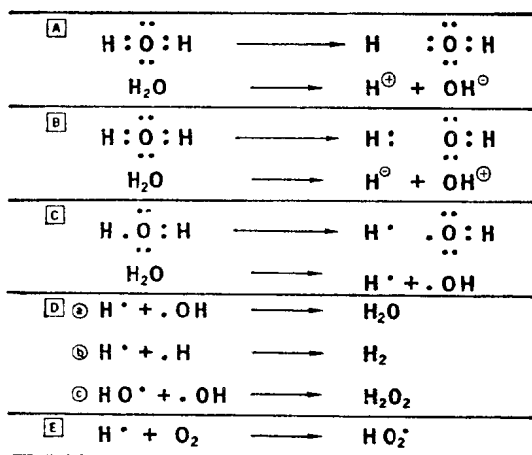


图2 电离辐射的化学效应

应，如图 2 (D) 所示。如果按 (Da) 过程重新形成原来的分子，那就再好不过，因为这时对分子并没有什么影响。如按 (Db) 形成氢，虽不是我们所希望的，但其结果损害不大，因体内容许一些氢分子的存在。但是在 (Dc) 过程中形成的过氧化氢 (H_2O_2)，对人体健康有显著危害。事实上，过氧化氢的化学毒害在许多方面与放射病相类似。

最严重的是自由基与氧的结合，如图 2 (E)，生成的 HO_2 基似乎比过氧化氢更令人讨厌。实验结果证明，一个有正常含氧量的细胞，对 γ 射线的敏感性要比暂时失去氧的细胞高三倍左右，这可能是由于形成了 HO_2 的缘故。不含氧的细胞形成的 HO_2 少，所以由此受到的损害也就减少。

2.3 直接效应和间接效应

2.30 分子受辐射的损伤有两种可能性。第一种称为直

接效应，即在生物学上占重要地位的分子受到入射粒子的直接撞击后，分裂成生物学上无用的碎片。活细胞中最重要的分子可能是细胞核中的DNA（脱氧核糖核酸）分子，它控制着细胞再生的过程*。当DNA分子受到直接破坏时，则细胞虽能生存但不能分裂。以致这些细胞一直工作到老死，还不能产生接替其工作的子细胞。当这些老细胞死亡后，由于没有接替它们工作的新细胞，致使受照射的组织功能失常，直至死亡。如果这些临死组织是器官中的主要部分，且正好不能替换，那么整个器官就过早地退化和死亡。

2.31 当不重要的分子(如水)被分裂成活泼的离子或基时，便产生了**间接效应**。如果这些活泼的碎片与核中DNA那样的重要分子反应时，其损伤将与直接碰撞效应一样。在直接作用过程中，由于粒子的本身速度接近于光速，故碰撞和破坏两者，可说是同时发生的。在间接作用过程中，由于离子和基扩散很慢，可在它们的路径上放置一些化学保护剂，使最重要分子免于受到损害。此情况有些像象棋比赛一样，兵、象等往往用来阻挡对方的进攻，以保护将（帅）的安全，这就是所谓**间接效应**。可是，若棒球直接扔在将（帅）上，那由兵等构筑的坚固防线也起不了什么保护作用了，这就是所谓**直接作用**。

2.4 传能线密度 (Linear Energy Transter)

2.40 当带电粒子以高速穿过组织时，每一次与部分原子的碰撞，时间都很短，如同子弹射入稀疏的树林中与树叶和树枝相碰撞一样。每次碰撞大约损耗100电子伏特的能量，

*此过程在本丛书的《放射性同位素和生命过程》一书中有详细的叙述。

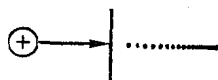
同时，约有10个自由基和离子留在一小簇的后面，此称一个刺点（spur）。

2.41 电子和正电子，由于太轻，很容易被完全反弹回去，它们的刺点径迹也是很规律的。1兆电子伏特电子的刺点径迹如下图所示：



这种情形是，这些粒子以原始“ β 射线”的形式碰撞组织，或是由光子（由原始X射线或 γ 射线束产生）与电子碰撞产生的次级“ β 射线”碰撞在组织上，如图3A.1和3A.2所示。

质子和 α 粒子较重，不太容易反弹回去。它们好比炮弹，而电子和正电子好比子弹，因而遗留下短而稠密的刺点径迹。1兆电子伏特质子的径迹如下所示：



这种情形，可能是由于原入射的质子产生，也可能是由于入射快中子所产生的次级粒子所形成，如图3B.1和3B.2所示。

2.42 这种情况有两个特点很重要：（a）在给定能量损失情况下（如1兆电子伏特），电子穿越的距离就比质子大，故电子刺点间的间距较大；（b）任何粒子到达自身径迹的末端时，间距减小。

通常，刺点的间距随着粒子质量的增加而减小；随着粒子所带电荷的增加而减小；随着粒子能量的减少而减小。

2.43 在放射生物学中，粒子可以根据它们的平均传能线密度（LET）进行比较。平均传能线密度是表示一个粒子

辐射在组织中的LET

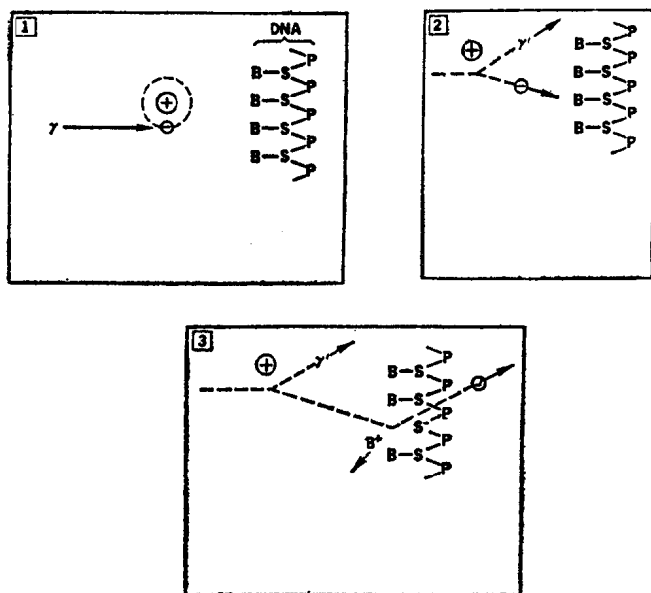


图 3 A 直接作用：电子、X射线或 γ 射线（在低LET值）

① 入射光子 (γ) 与组织内原子的一个轨道电子 ($-$) 的碰撞。DNA 分子 (BSP, BSP...) 就在附近。图中所示的结构符号为大 DNA 分子之一部分，B——基；S——糖（脱氧核糖）；P——磷。

② 光子不是以碰撞形式传给电子能量而使自己成为低能光子 (γ')。这个高能电子以高速逸出，并与 DNA 分子中的部分亚分子碰撞。

③ DNA 分子中部分价键被电离作用分解成两个带电碎片 (B^+ 和 S^-)，从而破坏了 DNA 分子。电子损失了一小部分能量变成 ($-'$)。

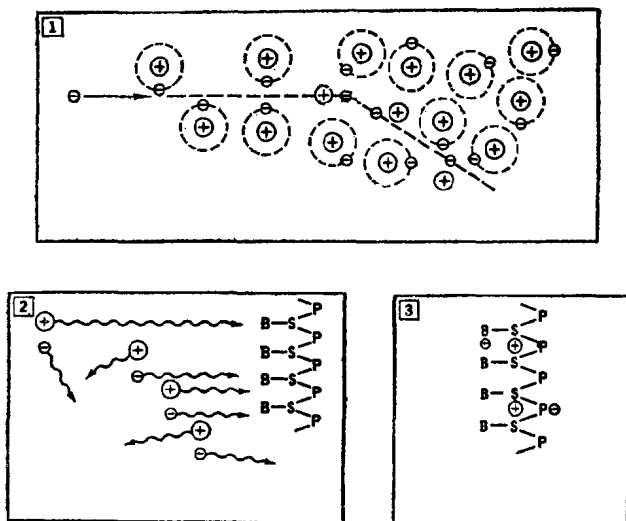
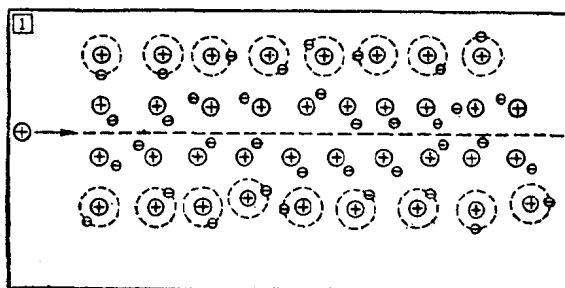


图3B 间接作用：电子、X射线或 γ 射线（在低LET值）

①入射电子（ e^- ）（不论是初级 β 射线，还是由X射线或 γ 射线所产生的次级电子），在组织的原子间来回弹跳，从而使一些原子产生电离。

②这些被电离的原子到处乱撞，有许多便与附近的DNA分子产生反应，其他一些漂移走的原子最终又与另外的分子进行结合。

③电离的原子与DNA分子反应，改变了分子的化学性质，成为对细胞不能起很大作用的分子。



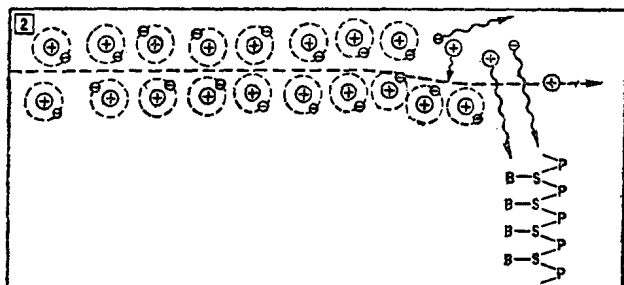


图3C 间接作用：质子或快中子（在高LET值）

①入射质子（+）（不论是初级质子束还是由快中子束所产生的次级粒子），在其运动过程中，电离了附近组织的每一个分子。

②由于这些电离的原子很靠近，故大部分很快地结合在一起，只有一小部分漂移得较远的才与DNA反应，并改变其化学性质。

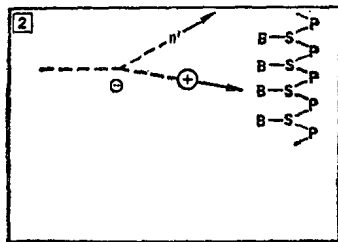
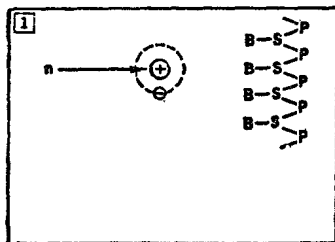
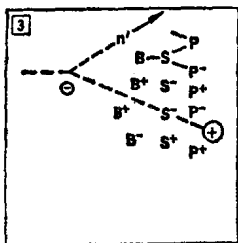


图3D 直接作用：质子或快中子（在高LET值）

①入射中子（n）与组织中的氢原子核（+）碰撞。DNA分子就在附近，但未受影响。

②当中子把部分能量传递给氢核（质子）后，就成为较低能量的中子（n'），这个获得能量的高能质子与DNA分子碰撞时，因为DNA比电子大得多，故与DNA的许多部分发生碰撞的机会就多，因而使DNA大遭损伤。



③被电离的DNA分子虽彼此分开，但质子仍在继续运动，不过能量也随着降低（+'）。