

MEDICAL PREVENTION AND TREATMENT OF INJURIES
BY NUCLEAR EXPLOSION AND IONIZING RADIATION

主编 闵锐 李雨 潘真

核武器及放射损伤 医学防治学



第二军医大学出版社

核武器及放射损伤 医学防治学

主 编 闵 锐 李 雨 潘 真

副主编 倪 瑾 陈振锋 高 福 李百龙

编 者(按姓氏笔画排序)

王 心 孙 顶 李 雨 李百龙

闵 锐 周传丰 项莺松 赵 芳

姜 昊 倪 瑾 高 福 崔建国

韩 玲 程 赢 蔡建明 潘 真

第二军医大学出版社

内 容 简 介

本书在总结过去军事医学教材《防原医学》教学和实践的基础上,遵照军队院校新近制定的“课程标准”,结合近年来放射生物学理论研究和放射损伤防、诊、救、治的进展,顺应核、放射事故应急医学救援和心理援助的需要,增加和调整了部分章节及内容,其理论性和实用性都较以前的教材有所提高,教学的针对性和目的性更加明确。

全书共 13 章,并有 3 个附录,是一门军事特色鲜明并兼顾民用的医学课程。既可作为部队培养熟悉放射性武器致伤特点、放射损伤发生机制及其医学防护和救治人员的教材,也可作为培养军队和地方放射卫生勤务管理和职业病防治人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核武器及放射损伤医学防治学/闵锐,李雨,潘真主编. —上海:第二军医大学出版社,2008.8

ISBN 978-7-81060-856-5

I. 核… II. ①闵… ②李… ③潘… III. ①核武器—基本知识 ②核武器—放射损伤—防治 IV. TJ91 R827.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086619 号

出 版 人 石进英
责任编辑 高 标 姜 昊

核武器及放射损伤医学防治学

主 编 闵 锐 李 雨 潘 真

第二军医大学出版社出版发行

上海市翔殷路 800 号 邮政编码:200433

发行科电话/传真:021-65493093

全国各地新华书店经销

江苏句容排印厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:453 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 978-7-81060-856-5/T·031,R·665

定价:36.00 元

前 言

《核武器及放射损伤医学防治学》是传授战时核武器、放射性武器使用和平时各种核辐射和电离辐射事故致人员损伤医学防治的一门特色鲜明、军民兼用的军事医学课程。

本教材既可作为部队培养熟悉和了解核武器、放射武器致人员损伤特点,研究放射损伤的发生机制和医学防护手段,掌握放射伤员医学正确救治方法专门人才的教材,也可作为培养军队和地方放射卫生勤务管理和职业病防治人员的参考书。

本教材在总结过去军事医学教材《防原医学》教学和实践的基础上,遵照军队院校新近制定的“课程标准”,结合近年来放射生物学理论研究和放射损伤防、诊、救、治的进展,以及顺应核、放射事故的应急医学救援和心理援助的需要,增加和调整了部分章节及内容,其理论性和实用性都较以前有所提高,教学的针对性有所加强,目的性更加明确。本教材共 13 章及附录,具体内容可由不同专业的教学实际需要选择使用。

本教材在编写过程中参阅了大量同类教材及相关资料。由于编者水平有限,书中难免存在瑕疵,敬请读者多提宝贵意见,以便日后进一步修订完善。

编 者

2008 年 5 月

目 录

第一章 原子核物理基础.....	(1)
第一节 原子核及原子核的转变	(1)
第二节 射线与物质的相互作用	(9)
第三节 辐射量及其单位	(14)
第四节 辐射探测	(16)
第二章 核武器的杀伤作用	(20)
第一节 核武器概述	(20)
第二节 核武器的四种杀伤因素	(28)
第三节 核武器的杀伤作用	(34)
第四节 核武器对舰艇人员的杀伤作用	(43)
第三章 放射性武器、核恐怖袭击以及军事装备的放射 性问题	(48)
第一节 放射性武器和核恐怖袭击	(48)
第二节 军事武器装备的放射性问题	(52)
第四章 电离辐射生物学效应	(59)
第一节 电离辐射对生物大分子的作用	(59)
第二节 电离辐射对细胞的作用	(67)
第三节 组织器官的辐射效应	(76)
第四节 辐射生物学效应的分类和影响因素	(78)
第五节 细胞辐射敏感性的分子基础	(80)
第五章 急性放射病	(88)
第一节 概述	(88)
第二节 骨髓型急性放射病	(89)
第三节 肠型和脑型放射病	(97)
第四节 诊断	(99)
第五节 治疗	(111)

第六章 低剂量电离辐射的生物效应与电离辐射的远期	
生物效应	(123)
第一节 低剂量外照射的生物效应	(123)
第二节 电离辐射的远期生物效应	(127)
第七章 慢性放射病	(130)
第一节 临床表现	(130)
第二节 诊断	(131)
第三节 治疗和预防	(133)
第八章 内照射放射损伤	(135)
第一节 概述	(135)
第二节 临床表现特点	(138)
第三节 诊断	(140)
第四节 预防、急救和治疗	(141)
第五节 贫铀武器的内照射损伤	(144)
第六节 其他常见核素的内照射放射损伤	(147)
第九章 皮肤放射性损伤	(151)
第一节 概述	(151)
第二节 临床表现	(152)
第三节 诊断	(156)
第四节 治疗	(157)
第十章 核爆炸复合伤	(159)
第一节 概述	(159)
第二节 放射性复合伤的病理特点	(161)
第三节 临床表现特点	(162)
第四节 诊断	(165)
第五节 急救与治疗	(166)
第十一章 核武器损伤及核动力舰船的辐射防护	(170)
第一节 核武器的可防性和难防性	(170)
第二节 对瞬时杀伤因素的防护	(171)
第三节 对放射性沾染的防护	(173)
第四节 核动力舰船的辐射防护	(178)

第十二章 电离辐射防护基础	(183)
第一节 放射性防护的任务和目的	(183)
第二节 放射性防护标准	(185)
第三节 放射性防护的主要措施	(189)
第十三章 核辐射事故的医学应急救援	(201)
第一节 核辐射事故概述	(201)
第二节 核辐射事故的医学应急救治	(205)
附录一 本书相关参数	(215)
附录二 各种放射病的诊断、治疗和剂量估算	(222)
附录三 关于健康防护的规定及标准	(249)

第一章 原子核物理基础

第一节 原子核及原子核的转变

一、原子核、核素、同位素

自然界的物质都是由分子组成的。分子由原子组成。原子由带正电的原子核(nucleus)和若干带负电的核外电子(electron)组成。核外电子以极高的速度在不同的轨道上绕着原子核旋转。正常情况下,原子核所带的正电荷数与核外电子所带的负电荷数相等,所以整个原子是电中性的。

1. 原子核

原子核是由带正电的质子(proton)和不带电的中子(neutron)组成,质子和中子统称为核子(nucleon)。不同种类的原子,其原子核组成是不同的。例如,普通氢原子的原子核由一个质子组成(没有中子),而氦原子的原子核则是由 2 个质子和 2 个中子组成。原子核内质子数和中子数的总和称为质量数,通常用符号 A 表示;原子核内的质子数代表核电荷数,称为原子序数,用 Z 表示。原子核内的中子数即为 $A-Z$ 。若以 X 代表某种元素,则 ${}_Z^AX$ 表示元素原子核的组成。根据符号 ${}_Z^AX$,就可以知道原子核内质子和中子组成的情况。如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 表示铀原子核的质量数是 235,含 92 个质子和 143 个中子。

2. 元素

原子核内具有相同电荷数的同一类原子,称为元素(element)。例如,氧分子中的氧原子,水分子中的氧原子,或其他物质中的氧原子,它们都属于同一种类的原子,统称为氧元素。所有物质都是由单个元素或它们的化合物组成。到目前为止发现的元素有 118 种之多,除个别元素外,原子序数 94 以下的,都是天然存在的元素;原子序数 95 以上者,则是人工制造的元素,皆列于元素周期表中。

3. 核素

原子核内质子数、中子数完全相同的一类原子核称为一种核素(nuclide)。核素有放射性和稳定性之分。 ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{239}\text{Pu}$ 等具有放射性的核素称为放射性核素。 ${}^{12}\text{C}$ 和 ${}^{16}\text{O}$ 等不具放射性,称为稳定核素。

4. 同位素

原子核内质子数相同,而中子数不同的核素,彼此称为同位素(isotope)。同位素的化学性质相同,在元素周期表中居同一位置。例如,氢的同位素包括 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ 3 种核素。目前发现的元素虽然有 108 种之多,但这些元素的天然同位素和人造同位素已达 2 000 种以上。其中约 300 种为稳定核素,其余都是不稳定的,即具有放射性的核素。

二、亚原子结构

通过核反应,已经人工合成了 17 种原子序数大于 92 的超铀元素和上千种新的放射性核素。这种研究表明元素仅仅是在一定条件下相对稳定的物质结构单位,并不是永恒不变的。

通过高能 and 超高能射线束和原子核的相互作用,人们发现了上百种短寿命的粒子,即重子、介子、轻子和各种共振态粒子。庞大的粒子家族地发现,把人们对物质世界的研究推进到一个新的阶段,建立了一门新的学科——粒子物理学(也称为高能物理学),给人们展示了一些新的关于核结构亚原子粒子的知识。

亚原子粒子是指比原子还小的粒子。例如:电子、中子、质子、介子、夸克、胶子、光子等亚原子粒子。电子、中子、质子的概念已经被人们熟知,这里分别简述其他几种亚原子粒子的概念。

1. 强子

强子(hadron)是一种亚原子粒子,所有受到强相互作用影响的亚原子粒子都被称为强子。按目前的物理理论强子是由夸克、反夸克和胶子组成的。胶子是量子色动力学中的力子,它将夸克连在一起,强子是这些连接的产物。

按其组成夸克的不同,强子还可以分为:

(1) 重子(baryon) 由3个夸克或3个反夸克组成,它们的自旋总是半数的,也就是说,它们是费米子。它们包括人们比较熟悉的组成原子核的质子和中子和一般鲜为人知的超子(hyperon),比如 Δ 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 和 Ω ,这些超子一般比核子重,而且寿命非常短。

(2) 介子

1) 介子(meson)由一个夸克和一个反夸克组成,它们的自旋是整数的,也就是说,它们是玻色子(boson)。介子有许多种。在高空射线与地球空气相互作用时会产生介子。

2) 介子为质量介于质量轻的基本粒子(如电子)和质量重的基本粒子(如核子)之间的基本粒子。种类较多,性质不稳定,有的带正电,有的带负电,有的不带电,能用来轰击原子核,引起核反应。介子包括 π 介子、 η 介子和 κ 介子。

3) 介子的发现是从核力的研究开始的。两个荷电粒子间的力是由场引起的。从波粒二象性的观点,电磁场是光子。因此,两个荷电粒子之间的作用力是通过光子的交换来实现的。可以这样设想:第一个荷电粒子放出光子被第二个吸收,而第一个荷电粒子的作用和光子同时传到第二个粒子;第二个荷电粒子也放出光子被第一个吸收,如此继续下去。把这种观点应用到核子之间的作用力上去,根据实验测得的核力强度,计算的结果表明,如果核力是由于核子之间交换粒子而产生的话,那么这种粒子的静止质量的大小为电子静止质量的200~300倍。1947年从宇宙射线发现的 π 介子符合这种要求。

现在介子类包括带正负电的以及中性的 π 介子,带正负电的以及中性的 κ 介子,和近来才发现的 η 介子。介子类基本粒子的静质量介于轻子和重子之间,所以取名为介子。

介子的自旋量子数为零。介子和重子都归属于强子。

2. 反粒子

1) 反粒子(antiparticle)是相对于正常粒子而言的,它们的质量、寿命、自旋都与正常粒子相同,但是所有的内部相加性量子数(比如电荷、重子数、奇异数等)都与正常粒子大小相同、符号相反。有一些粒子的所有内部相加性量子数都为0,这样的粒子叫做纯中性粒子,反粒子就是它本身,比如光子、 π^0 介子等。并不是粒子物理学中的每种粒子都有这种意义上的反粒子,中微子就没有反粒子,反中微子的定义与此不同。

2) 反粒子的概念首先是1928年由英国物理学家狄拉克在他的空穴理论中提出的。1932年在宇宙射线中发现了正电子,证实了狄拉克的预言。1956年美国物理学家张伯伦在劳伦斯-伯克利国家实验室发现了反质子。进一步的研究发现,狄拉克的空穴理论对玻色子不适用,因而不能解释所有的粒子和反粒子。根据量子场论,粒子被看作是场的激发态,而反粒子就是这种激发

态对应的复共轭激发态。如果反粒子按照通常粒子那样结合起来就形成了反原子。由反原子构成的物质就是反物质。

3. 夸克

夸克(quark)是一种从理论上提出的构成强子的组成粒子。1964年M.盖耳-曼和G.兹韦克分别独立提出强子的夸克模型。兹韦克将这种组成粒子称之为 Ace(爱斯),盖耳-曼从爱尔兰作家J·乔伊斯的作品《为芬尼根守灵》中的诗句中摘出 quark 一词称呼它。1965年北京基本粒子理论组提出层子模型,将强子的构成部分称为层子,意为它们是更深层次的粒子。按照夸克模型,强子是由夸克组成的,重子由3个夸克组成,介子由1个夸克和1个反夸克组成。夸克的重子数 B 、电荷 Q 和超荷 Y 都是分数。起初盖耳曼等提出的夸克模型中夸克只有3种:上夸克 u 、下夸克 d 和奇异夸克 s ,已能说明当时观测到的强子实验数据。1974年发现 J/ψ 粒子,需要引入第4种粲夸克 c ;1978年发现 γ 粒子,需要引入第5种底夸克 b ;另外理论上认为还应有第6种顶夸克 t ,1994年4月26日,美国费米国家实验室宣布,找到顶夸克存在的证据。 c 、 b 、 t 3种夸克的质量很大($m_c \approx 1.5 \text{ GeV}$, $m_b \approx 4.6 \text{ GeV}$, $m_t \approx 78 \sim 180 \text{ GeV}$),称为重夸克,原有的夸克 u 、 d 、 s 则称为轻夸克。为了说明夸克的自旋统计问题,假设夸克具有色自由度,每一种(味)夸克可处于3种不同的色状态。1973年建立描述夸克之间强相互作用的量子色动力学理论,夸克之间的作用力是由于带有色荷的夸克相互交换胶子而产生的。胶子静质量为零,自旋为1,且带有色荷,胶子之间也有强作用。

实验上未观察到自由状态夸克,也未观察到自由胶子。一种可能的解释是夸克很重,目前所达到的能区还不足以把它们从强子中打出来;另一种可能的解释是认为夸克由于某种原因被囚禁在强子内部,而不可能以自由状态存在,这就是所谓夸克禁闭。解释夸克禁闭的一种看法是色相互作用犹如弦,近距离时相互作用弱,远距离时相互作用增强;夸克分离越远,弦的能量越大;而弦的断裂则产生一对新的相反色荷,也就是说以很高能量量子轰击的结果,要么是不能将强子击开,要么产生出一些强子,因而夸克永远禁闭在强子内部。

4. 轻子

轻子(lepton)不参与强相互作用的自旋为 $1/2$ 的粒子,包括电子、 μ 子、 τ 子和同它们相伴的中微子 γ_e 、 γ_μ 、 γ_τ 以及所有这些粒子的反粒子。在 τ 子未发现之前,这类粒子的成员质量都较轻,故称为轻子。1975年发现 τ 子,其质量为电子的3492倍,称为重轻子。轻子参与弱相互作用和电磁相互作用,在轻子参与的这两种相互作用过程中存在守恒的量子数,称为轻子数,电子数、 μ 轻子数和 τ 轻子数分别守恒。现有的实验精度下,分辨不出轻子的内部结构,轻子的行为类似点粒子。粒子物理中流行的观点认为,轻子和夸克属于物质结构的同一层次。

5. 希格斯玻色子

玻色子希格斯玻色子(higgsboson)粒子物理学标准模型预言的一种自旋为零的玻色子,至今尚未在实验中观察到。它也是标准模型中最后一种未被发现的粒子。

英国物理学家希格斯(Higgs)提出了希格斯机制。在此机制中,希格斯场引起自发对称性破缺,并将质量赋予规范传播子和费米子。希格斯粒子是希格斯场的场量子化激发,它通过自相互作用而获得质量。

自1899年汤姆逊爵士发现电子开始,直至如今,在一个多世纪的时间里,人类一直孜孜不倦地探索着微观世界的奥秘。当1995年3月2日,美国费米实验室向全世界宣布他们发现了顶夸克时,一套称之为标准模型的粒子物理学模型所预言的61个基本粒子中的60个都已经得到了实验数据的支持与验证,看上去标准模型马上就要获得决定性的胜利,对物质微观结构的探索已

经到达了它的尾声,但是仍然有一个粒子,游离在这座辉煌的大厦之外,这就是希格斯粒子,而且就是这个粒子可能会击垮整座大厦。但是也许会为我们揭示出一条全新的探索旅途。

6. 玻色子

玻色子遵从玻色-爱因斯坦统计的微观粒子。玻色子(boson)的自旋为0或整数,例如光子、 π 介子等。由玻色子或偶数个费米子组成的复合粒子的自旋也是0或整数,因而它们也是玻色子,如 α 粒子及一切具有偶数核子的原子核、氢原子及氦原子等。由相同玻色子组成的系统的波函数,对于其中任意两个粒子坐标置换是对称的。大量玻色子组成的系统,在低温下出现超流状态,在粒子物理学的标准模型内都是基本粒子。规范玻色子包括:

- 1) 胶子: 强相互作用的媒介粒子,自旋为1,有8种。
- 2) 光子: 电磁相互作用的媒介粒子,自旋为1,只有1种。
- 3) W玻色子及Z玻色子: 弱相互作用的媒介粒子,自旋为1,有3种。
- 4) 引力子: 引力相互作用的媒介粒子,自旋为2,只有1种。

标准模型预言的另外一种玻色子——希格斯粒子不属于规范玻色子。

三、质量、能量守恒和原子核结合能

质量和能量是物质同时具有的两种属性。在微观世界,质量和能量不可分割,任何质量都与一定数量的能量相联系,任何能量也与一定数量的质量相联系,相互之间可以转换。它们的关系可用下式表示:

$$E = mc^2$$

式中 E 是能量(J), m 是质量(kg), c 是光速(3×10^8 m/s)。

对于微观世界,物质体系中任何质量的改变,必对应着能量的改变,反之亦然。在封闭系统内,质量和能量都是守恒的。

原子核由核子组成。经精确测定,一定数量的质子和一定数量的中子紧密结合组成原子核后,原子核的质量要小于组成前游离质子和中子质量的总和。设 m_A 、 m_p 、 m_n 分别代表核素 ${}_Z^A X$ 的原子核、质子、中子的质量,则:

$$m_A < Zm_p + (A - Z)m_n$$

$$\text{或: } \Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_A$$

Δm 即为质子和中子组成原子核后的质量差额,称为质量亏损(mass defect)。根据质量能量守恒的定律,当质量改变 Δm 时,必定有 ΔE 的能量放出,可由下式算出:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

不同核子结合成原子核的过程需要能量。这种能量称为原子核的结合能(binding energy of nucleus)。原子核的核子若被拆开一定要释放出相应的结合能。原子核的结合能除以原子核的核子数即为核子的平均结合能($\Delta E/A$)。以原子核质量数 A 为横坐标,以核子平均结合能($\Delta E/A$)为纵坐标,绘出不同质量原子核的平均结合能,即得核子平均结合能曲线(图 1-1)。从曲线可以看出,不同质量数的原子核,核子平均结合能不同。核子平均结合能的大小表示原子核结合紧密的程度,平均结合能越大,原子核结合越紧密,亦越稳定。

从图 1-1 可知当原子核发生转变时,核子的平均结合能就会发生变化。原子核由平均结合能小的转变成平均结合能大的原子核时,要向外释放能量,这就是原子核能,简称核能(nuclear

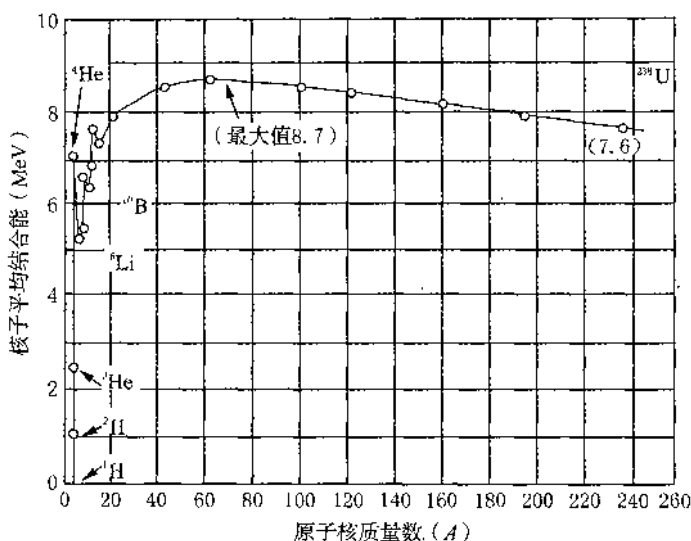


图 1-1 核子平均结合能曲线

energy)。质量数小的轻核和质量数较大的重核,核子的平均结合能均较小,而质量数中等大小核的平均结合能都比较大,这就意味着,在一定条件下,质量数小的轻核聚合或质量数较大的重核裂解都将有能量释放出。

四、原子核的转变

原子核转变时,核素的结构和性质就会发生变化,随之也发生能量的变化。原子核转变的类型有核衰变、核反应、核裂变和核聚变。这些变化,有的是自发的,有的是人工造成的。

(一) 核衰变

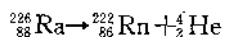
放射性核素的原子核从一种状态转变成另一种状态或转变成另一种核素并自发地放出射线的过程称为核衰变(nuclear decay)。在核衰变过程中,核内可放出以下一种或几种射线,如 γ 射线、 β 射线、 α 射线等。放射性核素放出射线的性质,称为放射性(radioactivity)。核衰变是自发发生的。不同放射性核素衰变的速度不相同,外界因素,如温度、压力、电场等都很难改变放射性核素衰变的性质和速度。

1. 核衰变的类型

核衰变方式有 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变三大类。放出的射线有 α 射线、 β 射线、 γ 射线、X射线和中微子等,极少数的衰变可放出质子、中子等粒子。

(1) α 衰变 从原子核内放出 α 粒子的核衰变称为 α 衰变(alpha decay)。 α 粒子实际上是氦原子核(${}^4_2\text{He}$),它的质量数是4,由2个质子和2个中子组成,带2个单位正电荷。

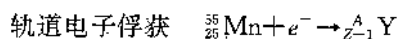
放射性核素衰变后形成的新原子核叫子核。 α 衰变后的子核,在元素周期表上质量数 A 较衰变前的母核降低4位,原子序数 Z 降低2位。例如:



用通式 ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}^4_2\text{He}$ 表示。

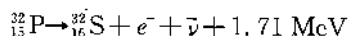
α 衰变多见于原子序数高的放射性核素,衰变时放出的能量,主要转变为发射 α 粒子的动能。

(2) β 衰变 原子核自发地放射出电子或正电子(positron),或俘获一个轨道电子(orbital electron)而发生的转变,统称为 β 衰变(beta decay)。发射电子的称 β^- 衰变,发射正电子的称 β^+ 衰变,俘获轨道电子的称轨道电子俘获。三种类型 β 衰变的通式如下:

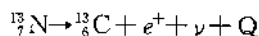


式中 e^- 和 e^+ 分别代表电子和正电子。由上例各式可见,在 β 衰变中,子核与母核的质量数相同,只是电荷数相差1,故子核与母核为同质异位素(isobar)。

β^- 衰变相当于原子核内一个中子转变成一个质子,故子核电荷数增加1。衰变时除发射一个电子外,通常还伴随释放一个反中微子(antineutrino)。衰变能主要由电子(即 β^- 粒子)和反中微子所带走,例如:



β^+ 衰变相当于原子核内一个质子转变成中子,故子核电荷数减1。衰变时发射正电子(即 β^+ 粒子)和中微子,一般发生 β^+ 衰变的都是人造放射性核素,如:



β^- 粒子和 β^+ 粒子都是连续能谱,即衰变时放出的 β^- 和 β^+ 粒子的能量从零到最大值。通常 β 粒子的能量用最大能量和平均能量来表示。例如, ${}^{32}\text{P}$ 衰变释放的 β 粒子最大能量为1.71 MeV,平均能量为0.71 MeV(图1-2)。

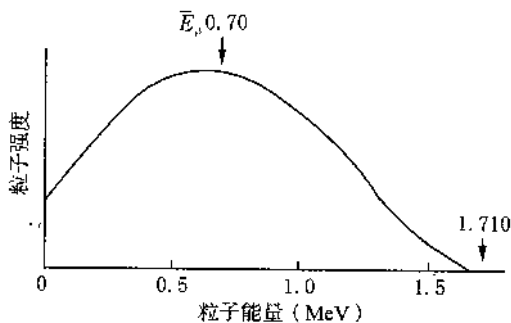
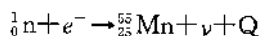
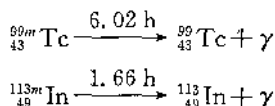


图1-2 ${}^{32}\text{P}$ 的 β 粒子能谱

轨道电子俘获是原子核内一个质子俘获核外一个轨道电子,使之转变成中子,同时放出一个中微子(neutrino),转变后子核的电荷数也减1。这种转变虽然不发射电子,其原子核变化与 β^+ 衰变类似,故将其归入 β 衰变。如:



(3) γ 衰变 γ 衰变多伴随 α 或 β 衰变之后出现。 α 、 β 衰变后,若子核处于较高能级(激发状态),则可通过发射 γ 光子或内转换电子而退激到能量比较低、较稳定的状态。原子核的这种转变过程称 γ 衰变(gamma decay),又称 γ 跃迁(gamma transition)。衰变后子核的质量数和电荷仍与母核一致,只是能量状态发生改变。绝大多数原子核处于激发态的时间很短(10^{-13} s),因而 γ 衰变几乎与 α 或 β 衰变同时发生。若原子核在激发态停留时间较长,致可单独测量出来,则这种 γ 跃迁称为同质异能跃迁(isomeric transition, IT),例如临床常用的 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ${}^{113\text{m}}\text{In}$ 等属此例:



γ 衰变时,有时 γ 光子的能量传递给原子核外的内层电子,使其脱离原来的轨道而发射出,这种电子称内转换电子(internal-conversion electron)。

2. 衰变规律

放射性核素的量随时间的延长而逐渐衰减。但各个原子核的衰变并不是同时发生的,而是有先有后。设由时间 t 至 $t+dt$ 间隔内,衰变掉的原子核数为 $-dN$,则 $-dN$ 与 dt 和在 t 时刻存在的原子核数 N 成正比,即

$$-dN \propto dtN$$

引入比例常数 λ ,可写成等式:

$$-dN/dt = \lambda N$$

设起始的时间为 t_0 , t_0 时的原子核数为 N_0 ,则经过 t 时间衰变,所存留的原子核数 N 经上式推导为:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

由公式可以看出,放射性核素是按时间的负指数函数形式衰减的,这就是放射性核素的衰变定律(law of radioactive decay)。这一公式适用于任何单一放射性核素的衰变,并由此可以求出任何时刻核素衰变后仍存留的原子核数。

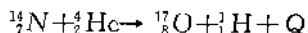
式中的比例常数 λ 为衰变常数(decay constant),是每个原子核在单位时间内衰变的几率。每一种放射性核素都有一个固定的 λ 值,它是表征该放射性核素衰变快慢的物理量。 λ 值大,衰变快;反之,衰变就慢。

表征放射性核素衰变快慢的另一个物理量叫半衰期(half-life-time),是指放射性核素衰变一半所需要的时间,通常用 T 表示。半衰期与衰变常数互成反比,其关系式为:

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda$$

(二) 核反应

原子核由于外来的原因,如带电粒子的轰击,吸收中子或高能光子照射等引起核结构的改变,称为核反应(nuclear reaction)。例如,将 α 放射源放在氮气中时,氮原子核因受 α 粒子的轰击而放出质子,氮原子核(${}_{7}^{14}\text{N}$)则变成为氧原子核(${}_{8}^{17}\text{O}$),这便是核反应,以下式表示:

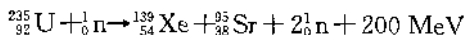


上列反应可简写成为 ${}_{7}^{14}\text{N}(n,p){}_{8}^{17}\text{O}$,也称 α -P反应。

(三) 核裂变和聚变反应

1. 核裂变

某些重核素,如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 和 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 等在中子轰击下,一次裂变可分裂成两块质量相近的核碎片(新的核素),放出2~3个中子和大量的能量,这种反应叫核裂变(nuclear fission)。图1-3是铀原子核裂变示意图。每个铀原子核裂变,释放出约200 MeV的能量,举例如下(图1-3):



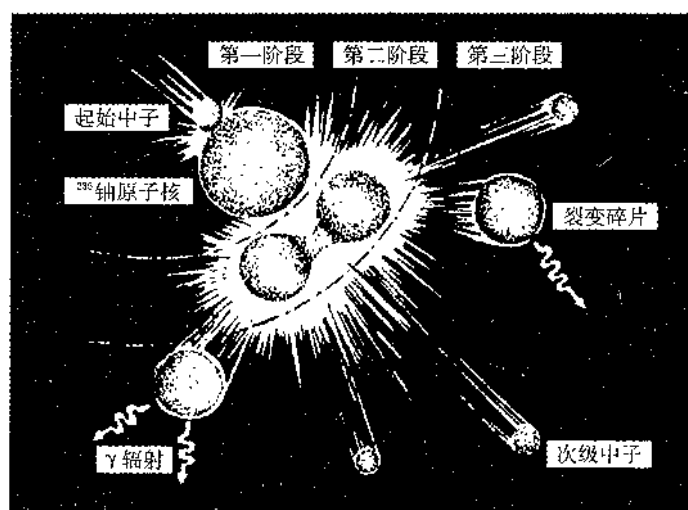


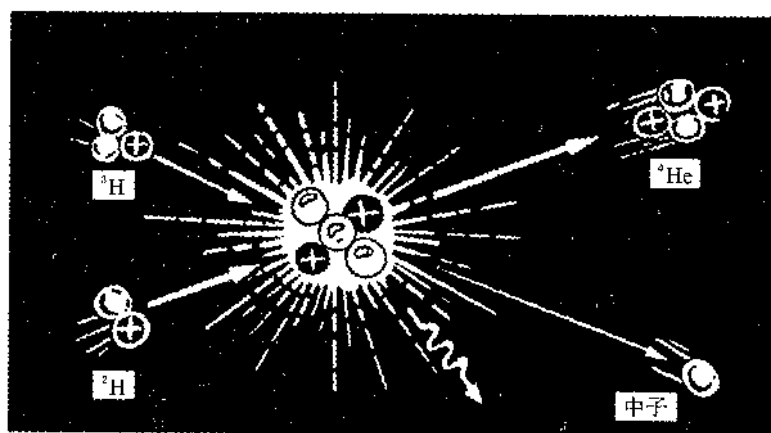
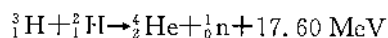
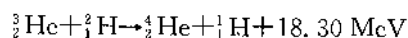
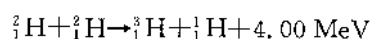
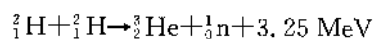
图 1-3 重核裂变

核裂变释放的能量比化学反应释放的化学能要大得多,是目前获取大量核能的主要途径。

2. 核聚变

在几百万至几千万度高温下,质量轻的核素如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^6Li 等原子核运动速度非常之快,可以克服相互之间原子核的排斥力,聚合为中等质量的原子核,一次聚变反应可放出大量能量,这种反应则称为核聚变(nuclear fusion)。图 1-4 是 ^2H 和 ^3H 聚变反应示意图。

核聚变反应必须在高温下进行,故又称热核反应(thermo-nuclear reaction)。下面是 ^2H 和 ^3H 的几种聚变反应(图 1-4):

图 1-4 ^2H 和 ^3H 聚变反应示意图

从以上各式可以看出,每6个 ^2H 参加聚变反应,共放出43.15 MeV的能量,平均每个 ^2H 释放约7.19 MeV的能量,每个核子平均释放3.59 MeV,比 ^{235}U 裂变时每个核子平均释放的能量(200 MeV/235=0.85 MeV)要大4.2倍。所以对相等质量的核装料而言,核聚变可以获得比核裂变更大的能量。

第二节 射线与物质的相互作用

具有一定能量的带电粒子(如正电子、负电子、质子、 α 粒子等)、不带电粒子(中子)和电磁辐射(光子)等,在通过介质时,能直接或间接地引起介质中的原子电离(ionization),这些能引起物质电离的射线统称为电离辐射(ionizing radiation)。电离辐射通过在物质中的电离和激发作用,引起介质分子的结构和功能发生改变,从而产生辐射效应(radiation effect)。电离辐射作用于生物体时,可产生明显的辐射生物学效应(radiation biological effect),这些效应与射线的种类、性质、能量及与生物体作用的方式、生物的状态等因素有关。因此了解电离辐射与物质的相互作用很有必要。

一、电离辐射的主要性质

从核武器防护和放射医学的角度来考虑,常见的电离辐射有 α 射线、 β 射线、 γ 射线和中子。此外,医学上经常使用的还有X射线和高能电子束。X射线与 γ 射线类似,而高能电子束的性质又与 β 射线类似,故我们仅介绍前四者。这四种射线主要是在原子核转变过程中释放出来的,统称为核辐射(nuclear radiation)。

(一) α 射线

也称 α 辐射(α -radiation),是放射性核素核衰变过程中,从原子核内释放出的高速运动的氦核流。其运动速度通常为 $(1\sim 2)\times 10^4$ km/s。 α 射线带有两个单位正电荷,具有很强的电离能力,但穿透能力弱,在介质中的射程(range)很短,空气中只有数厘米,生物组织中只有数十微米,难以穿透皮肤的角质层。因此, α 射线外照射的危害可以不予考虑,但若进入体内作为内照射源时,对生物体的危害很大。

(二) β 射线

也称 β 辐射(β -radiation),是放射性核素衰变时,从原子核内释放出的高速运动的电子流。多数 β 粒子运动速度较大,最大可接近光速。 β 射线的电离能力较 α 射线弱,但穿透能力较 α 射线强,在空气中的最大射程可达数米,在生物组织中为数毫米。故释放 β 射线的核素沾染皮肤时, β 粒子可损伤皮肤层,污染体内时,亦具有很大的危害性。

(三) γ 射线

也称 γ 辐射(γ -radiation),是放射性核素衰变时,原子核从高能级向低能级跃迁释放出的波长极短的一种电磁辐射。 γ 射线不带电,运动速度等于光速,电离能力相对较 α 和 β 射线弱,但穿透能力很强,在空气中可传播至几百米以外,可穿透整个人体生物组织,是造成外照射危害的主要射线之一。

(四) 中子

重原子核裂变、轻原子核聚变及其他许多核反应,都有中子释放。少数核衰变也能释放中子。中子不带电,它的质量略重于质子。按能量不同中子可分为:

(1) 慢中子(包括热中子) 能量在1 keV以下。

(2) 中能中子 能量为 $1\sim 500\text{ keV}$ 。

(3) 快中子 能量为 $0.5\sim 20\text{ MeV}$ 。

(4) 特快中子 能量在 20 MeV 以上。

由于中子不带电,在空气中的自由射程很长,可与 γ 射线相比拟,也是造成外照射危害的主要射线种类。

二、带电粒子与物质相互作用

带电粒子通常指对外显示净电荷的一些基本粒子,如: α 、 β 、 β^+ 、质子等。带电粒子与物质作用通常产生电离、激发、散射、韧致辐射等效应。

1. 电离

带电粒子作用于物质的原子,使原子核外层的电子获得一定的能量,从而克服原子核对其的吸引力,脱离原子核的束缚成为自由电子,原子则因失去一个电子而成为正离子,这个过程称为电离(ionization)。

2. 激发

带电粒子作用于物质的原子,如果电子获得的能量不足以使它脱离原子核的束缚,而只是从电子的内壳层跃迁至外壳层,使整个原子处于更高的能阶状态,这一过程叫做激发(excitation)。处于激发态的原子是不稳定的,它将回到稳定状态,并以辐射的方式向外释放多余的能量。

上述带电粒子与物质作用时,可以直接与核外电子发生静电作用而使原子电离或激发,故称它们为直接电离粒子(direct ionizing particles)。直接作用引起的电离称初级电离(primary ionization),初级电离产生的电子称次级电子。次级电子若有足够能量,在物质中可引起再次电离,称次级电离(secondary ionization)。在带电粒子与物质作用中次级电离占有很重要的地位,可达总电离事件的 50% 以上。

3. 散射

当质量很轻的带电粒子通过介质时,还会受到原子核库仑场的作用,使运动方向发生偏转,称为散射(scattering)。散射的发生与吸收介质的原子序数 Z 成正比。 β 粒子在与原子序数高、较厚的介质作用时,可发生多次散射,部分粒子甚至可发生反向散射。

4. 韧致辐射

高速电子在介质中运动时,受到介质原子核库仑场势垒的阻挡作用而减速,电子的动能转化为辐射能,以 X 射线的形式发射,这种辐射称韧致辐射(bremsstrahlung)。韧致辐射的发生率与电子所作用介质的原子序数 Z 的平方成正比;与电子质量 m 的平方成反比;与入射电子的能量也有关系:对于同一介质,入射电子的能量较高,韧致辐射的发生率较低;当入射电子的能量超过某一临界水平,韧致辐射的发生率升高,成为入射电子在介质中能量损失的主要方式。

三、光子与物质的相互作用

光子通常指 X 射线和 γ 射线。两种射线都是电磁波。前者来源于核外电子的运动,后者来源于原子核的衰变。两者都没有静止质量,不带电,运行速度快。当它们通过物质时,仅形成少量的初级离子,但这些初级离子具有很高的动能,可与物质继续作用产生次级电离,次级电离量占光子与物质电离作用的绝大部分。因此,常把光子及其他不带电粒子(中子等)称为间接电离粒子。

能量在数十个千电子伏(Kev)至几个兆电子伏(MeV)的 X 射线和 γ 射线与物质作用时,主要产生光电效应(photoelectric effect)、康普顿-吴有训效应(Compton-Wu Youxun effect)和对电