



高等医药院校规划教材

供临床医学、预防医学、基础医学、口腔医学、麻醉、医学影像学、药学、  
药物制剂、检验、护理、法医、医学影像技术、医学信息工程等专业使用

# 医学物理学

主编 赵元 叶福丽

YIXUE WULIXUE



科学出版社

高等医药院校规划教材

供临床医学、预防医学、基础医学、口腔医学、麻醉、医学影像学、药学、药物制剂、  
检验、护理、法医、医学影像技术、医学信息工程等专业使用

# 医学物理学

YIXUE WULIXUE

主 编 赵 元 叶福丽  
副主编 鲍 艳 史贵连 范 灼 张 玲  
编 者 (以姓氏笔画为序)  
叶福丽 史贵连 朱 蕤 李义兵  
张 玲 范 灼 赵 元 彭 微  
董秀梅 鲍 艳

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以医学物理学教学大纲为本,总结多年教学改革的经验,汲取国内外有关教材的优点,经精心编写而成。全书共分13章,包括原子核与放射性、激光及其医学应用、X射线、振动与波、声和超声、分子动理论、流体的运动、力学基础、静电场、直流电、磁场与电磁感应、波动光学、几何光学。每章先讲述物理学理论及分析方法,后介绍相关医学应用,将医学内容与对应的物理学理论和方法相结合。

本书适合高等医药院校及综合性大学的临床医学、预防医学、基础医学、口腔医学、麻醉、医学影像学、医学影像技术、药学、药物制剂、检验、护理、法医、医学信息工程等本科专业的教学,也可作为医学专业研究生和相关专业人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

医学物理学 / 赵元,叶福丽主编. —北京:科学出版社,2017.1

全国高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-051319-9

I. 医… II. ①赵… ②叶… III. 医学物理学-医学院校-教材 IV. R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第000286号

责任编辑:池 静 / 责任校对:张凤琴

责任印制:赵 博 / 封面设计:张佩战

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市密东印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:20

字数:474 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前言

《医学物理学》是医药院校的重要基础课程,也是物理学的重要分支学科,是物理学与医学相结合的交叉学科。明确医学物理学的特点,合理组织教学内容,改革教学方法是复合型应用人才素质培养的关键,也是医科大学物理教学改革的关键。为适应现代高等医学教育教学改革和发展的需要,我们在长期的教学研究与实践的基础上,总结多年的教学经验,汲取国内外相关教材的优点编写了本教材。

本教材主要用于高等医药院校及综合性大学的临床医学、预防医学、基础医学、口腔医学、麻醉、医学影像学、药学、药物制剂、检验、护理、法医、医学影像技术医学信息工程等本科专业的教学,也可作为医药院校生命科学等其他相关专业的师生和研究工作者的参考用书。本书共分13章,包括原子核与放射性、激光及其医学应用、X射线、振动与波、声和超声、分子动理论、流体的运动、力学基础、静电场、直流电、磁场与电磁感应、波动光学、几何光学,涵盖了医药专业学生在医学知识学习过程中对物理知识的应用范畴。

本教材紧紧围绕物理学知识在医学中的应用,避免深奥的理论推导,强调各种生活现象和医学现象的解释和应用,更加贴近生活,对医药专业学生对物理知识的理解、对生活中各种物理现象的解释、医学课程学习的融会贯通,尤其临床实践中各种病症的应用有着非常重要的促进作用。本书有利于开阔学生观察的视野,激发学生的学习热情和求知欲望,培养学生分析问题和解决问题的能力,增强学生的探索精神和创新意识,全面提高学生的科学素质。

在编写过程中,我们得到了湖北科技学院生物医学工程学院领导及科学出版社的大力支持和帮助,并得到了同行们许多宝贵的建议,在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,对书中的不足和错误之处恳请读者指正,以便今后逐步完善和提高。

编者

2016年10月

# 目 录

第 1 章 原子核与放射性 .....	(1)
第一节 原子核的基本性质 .....	(1)
一、原子核的组成 .....	(1)
二、原子核的性质 .....	(2)
三、放射性核素和同位素 .....	(2)
四、原子核的结合能 .....	(2)
五、原子核的稳定性 .....	(3)
第二节 放射性核素的衰变类型 .....	(4)
一、 $\alpha$ 衰变 .....	(4)
二、 $\beta$ 衰变和电子俘获 .....	(4)
三、 $\gamma$ 衰变和内转换 .....	(6)
第三节 放射性核素的衰变规律 .....	(6)
一、衰变定律 .....	(6)
二、半衰期和平均寿命 .....	(7)
三、放射性活度 .....	(8)
第四节 射线与物质的相互作用 .....	(9)
一、带电粒子与物质的相互作用 .....	(9)
二、光子与物质的相互作用 .....	(10)
三、中子与物质的相互作用 .....	(11)
第五节 辐射剂量与防护 .....	(13)
一、射线的辐射剂量 .....	(13)
二、射线的生物效应 .....	(15)
三、辐射防护 .....	(17)
第六节 放射性核素的医学应用 .....	(18)
一、示踪原理 .....	(18)
二、放射诊断 .....	(19)
三、放射治疗 .....	(21)
第 2 章 激光及其医学应用 .....	(25)
第一节 激光的产生机制 .....	(25)
一、原子能级及粒子辐射跃迁 .....	(25)
二、产生激光的条件和物质基础 .....	(27)

三、激光器 .....	(29)
第二节 激光的特性 .....	(30)
一、方向性好 .....	(30)
二、亮度高、强度大 .....	(30)
三、单色性好 .....	(31)
四、相干性好 .....	(31)
五、偏振性好 .....	(31)
第三节 激光的生物作用和医学应用 .....	(31)
一、激光的生物作用 .....	(32)
二、激光在基础医学研究中的应用 .....	(33)
三、激光的临床应用 .....	(34)
第四节 激光的危害与防护 .....	(35)
一、激光对眼睛的伤害 .....	(35)
二、激光对皮肤的损害 .....	(36)
三、激光的安全防护 .....	(36)
<b>第3章 X射线 .....</b>	<b>(39)</b>
第一节 X射线的性质 .....	(39)
一、物理效应 .....	(40)
二、化学效应 .....	(41)
三、生物效应 .....	(41)
第二节 X射线的产生及特性 .....	(41)
一、X射线产生装置 .....	(41)
二、X射线的强度和硬度 .....	(43)
第三节 X射线分类 .....	(44)
一、连续X射线谱 .....	(44)
二、标识X射线谱 .....	(46)
第四节 X射线与物质的相互作用 .....	(47)
一、光电效应 .....	(47)
二、康普顿效应 .....	(48)
三、电子对效应 .....	(48)
第五节 X射线的衰减规律 .....	(48)
一、X射线的衰减规律 .....	(49)
二、质量衰减系数的医学应用 .....	(50)
第六节 X射线在医学上的应用 .....	(51)
一、X射线诊断 .....	(51)
二、X射线治疗 .....	(54)
三、X射线的放射损伤 .....	(55)

<b>第 4 章 振动与波</b> .....	(59)
<b>第一节 振动</b> .....	(59)
一、简谐振动 .....	(59)
二、阻尼振动、受迫振动与共振 .....	(64)
<b>第二节 振动的合成</b> .....	(68)
一、两个同方向同频率简谐振动的合成 .....	(68)
二、两个同方向不同频率的简谐振动的合成 .....	(69)
三、两个同频率方向互相垂直简谐振动的合成 .....	(70)
<b>第三节 机械波</b> .....	(72)
一、机械波的形成 .....	(72)
二、波面和波线 .....	(72)
三、波动的特征量 .....	(73)
<b>第四节 简谐波</b> .....	(73)
一、平面简谐波的波函数 .....	(73)
二、波动方程 .....	(75)
<b>第五节 波的能量</b> .....	(76)
一、波的能量和强度 .....	(76)
二、波的衰减 .....	(77)
<b>第六节 波的衍射和干涉</b> .....	(79)
一、惠更斯原理及波的衍射 .....	(79)
二、波的叠加原理及波的干涉 .....	(80)
三、驻波 .....	(81)
<b>第 5 章 声和超声</b> .....	(87)
<b>第一节 声波的基本概念、规律和传播</b> .....	(87)
一、声波的基本概念 .....	(87)
二、声波的传播规律 .....	(91)
三、声波在人耳中的传播 .....	(92)
<b>第二节 多普勒效应与冲击波</b> .....	(94)
一、多普勒效应 .....	(94)
二、冲击波 .....	(96)
<b>第三节 超声波</b> .....	(97)
一、超声波的特性 .....	(97)
二、超声波的产生 .....	(98)
三、超声波的传播规律 .....	(99)
四、超声波对介质的作用 .....	(100)
五、超声波的生物效应 .....	(100)
<b>第四节 声学的医学应用</b> .....	(101)

一、叩诊 .....	(101)
二、听诊器 .....	(102)
三、体外冲击波碎石 .....	(104)
四、超声诊断仪 .....	(105)
<b>第 6 章 分子动理论</b> .....	(112)
<b>第一节 物质的微观结构</b> .....	(112)
一、热运动及分子力 .....	(112)
二、分子热运动的无序性及统计规律性 .....	(113)
三、理想气体的微观模型 .....	(114)
<b>第二节 理想气体分子动理论</b> .....	(114)
一、理想气体状态方程 .....	(114)
二、理想气体的压强公式 .....	(115)
三、理想气体的能量公式 .....	(117)
四、道尔顿分压定律 .....	(119)
<b>第三节 热平衡态的统计分布</b> .....	(120)
一、气体分子的速率分布函数 .....	(120)
二、麦克斯韦速率分布定律 .....	(121)
三、气体分子的平均自由程和平均碰撞频率 .....	(124)
四、玻尔兹曼能量分布定律 .....	(124)
<b>第四节 输运过程</b> .....	(126)
一、热传导 .....	(126)
二、扩散 .....	(127)
三、跨膜运输 .....	(127)
<b>第五节 液体的表面现象</b> .....	(128)
一、表面能和表面张力 .....	(129)
二、弯曲液面的附加压强 .....	(132)
三、毛细现象和气体栓塞 .....	(136)
四、肺泡的吸气和稳定 .....	(138)
<b>第 7 章 流体的运动</b> .....	(141)
<b>第一节 理想流体的流动</b> .....	(141)
一、理想流体的稳定流动 .....	(141)
二、连续性方程 .....	(142)
三、伯努利方程及其应用 .....	(143)
<b>第二节 黏性流体的流动</b> .....	(147)
一、黏性流体的流动状态 .....	(147)
二、牛顿黏滞定律 .....	(148)
三、雷诺数 .....	(150)



四、黏性流体的运动规律 .....	(150)
第三节 血液的流动 .....	(155)
一、心脏做功 .....	(155)
二、循环系统中血流速度的变化 .....	(156)
三、循环系统中重力的作用 .....	(157)
四、循环系统中的血压分布 .....	(158)
五、血液流变学 .....	(159)
<b>第 8 章 力学基础</b> .....	(164)
第一节 刚体的转动 .....	(164)
一、刚体的定轴转动 .....	(164)
二、转动惯量与转动定律 .....	(166)
三、定轴转动的动能定理 .....	(169)
四、角动量和角动量守恒定律 .....	(169)
第二节 刚体的平衡 .....	(171)
第三节 物体的弹性 .....	(171)
一、正应变和正应力 .....	(172)
二、切应变与切应力 .....	(172)
三、体应变与体压强 .....	(173)
第四节 骨骼和肌肉的力学特征 .....	(174)
一、骨的力学特征 .....	(174)
二、肌肉的力学特征 .....	(176)
<b>第 9 章 静电场</b> .....	(179)
第一节 电场及电场强度 .....	(179)
一、电荷及库仑定律 .....	(179)
二、电场及电场强度 .....	(180)
第二节 高斯定理及其应用 .....	(184)
一、电场线和电通量 .....	(184)
二、高斯定理 .....	(185)
三、高斯定理的应用 .....	(186)
第三节 电场力做功及电势 .....	(188)
一、静电场力做功 .....	(188)
二、静电场的环路定理 .....	(190)
三、电势 .....	(191)
四、电势梯度 .....	(193)
第四节 电偶极子及电偶层 .....	(195)
一、电偶极子的电场 .....	(195)
二、电偶层电场的电势 .....	(196)

三、心电原理 .....	(198)
第五节 静电场中的电介质 .....	(201)
一、电介质的电极化 .....	(201)
二、电极化强度 .....	(202)
三、电介质中的静电场 .....	(203)
四、有电介质时的高斯定理 .....	(204)
五、静电场的能量 .....	(206)
<b>第 10 章 直流电</b> .....	(211)
第一节 电流密度 .....	(211)
一、电流 .....	(211)
二、电流密度 .....	(212)
三、金属与电解质的导电性 .....	(214)
第二节 电路的基本定律 .....	(216)
一、欧姆定律 .....	(216)
二、基尔赫夫定律 .....	(217)
三、电路基本定律的应用 .....	(220)
第三节 电容器的充电和放电 .....	(222)
一、RC 电路的充电过程 .....	(222)
二、RC 电路的放电过程 .....	(224)
第四节 生物膜电位 .....	(225)
一、能斯特方程 .....	(225)
二、静息电位 .....	(226)
三、动作电位 .....	(227)
第五节 直流电在医学中的应用 .....	(228)
一、直流电对机体的作用 .....	(228)
二、直流电在医学中的应用 .....	(230)
<b>第 11 章 磁场与电磁感应</b> .....	(233)
第一节 磁场及磁感应强度 .....	(233)
一、磁感应强度 .....	(233)
二、磁感应线 .....	(234)
三、磁通量 .....	(235)
四、磁场的高斯定理 .....	(236)
第二节 毕奥-萨伐尔定律及其应用 .....	(236)
一、毕奥-萨伐尔定律 .....	(236)
二、毕奥-萨伐尔定律的应用 .....	(237)
第三节 安培环路定理及其应用 .....	(239)
一、安培环路定理 .....	(239)

二、安培环路定理的应用 .....	(240)
第四节 磁场对电荷的作用 .....	(241)
一、磁场和电场对带电粒子的作用 .....	(241)
二、磁场对载流导线的作用 .....	(244)
三、磁场对载流线圈的作用 .....	(245)
第五节 磁场中的磁介质 .....	(246)
一、磁介质 .....	(246)
二、磁化强度及磁场强度 .....	(247)
三、超导体 .....	(248)
第六节 电磁感应与电磁波 .....	(250)
一、电磁感应现象 .....	(250)
二、电磁感应定律 .....	(252)
三、动生电动势和感生电动势 .....	(253)
四、位移电流 .....	(255)
五、麦克斯韦方程组积分形式 .....	(256)
六、电磁波 .....	(257)
第七节 磁场的生物效应及其应用 .....	(258)
一、磁场的生物效应 .....	(258)
二、磁场生物效应的应用 .....	(259)
<b>第 12 章 波动光学</b> .....	(264)
第一节 光的干涉 .....	(264)
一、光的叠加原理 .....	(264)
二、光的相干叠加 .....	(264)
三、光程及光程差 .....	(266)
四、杨氏双缝干涉实验 .....	(267)
五、薄膜干涉 .....	(269)
第二节 光的衍射 .....	(271)
一、惠更斯-菲涅耳原理 .....	(271)
二、夫琅禾费单缝衍射 .....	(272)
三、夫琅禾费圆孔衍射 .....	(274)
四、光栅衍射 .....	(276)
第三节 光的偏振 .....	(278)
一、自然光和偏振光 .....	(278)
二、偏振光的获得与检验 .....	(279)
三、布儒斯特定律 .....	(281)
四、光的双折射 .....	(283)
五、偏振光的应用 .....	(284)

<b>第 13 章 几何光学</b> .....	(288)
<b>第一节 几何光学基本定律</b> .....	(288)
一、光的直线传播定律 .....	(288)
二、光的反射定律和折射定律 .....	(289)
三、全反射 .....	(289)
四、光的可逆性原理 .....	(290)
<b>第二节 球面折射</b> .....	(290)
一、单球面折射 .....	(290)
二、单球面反射 .....	(293)
三、共轴球面系统 .....	(294)
<b>第三节 透镜成像</b> .....	(295)
一、薄透镜成像 .....	(295)
二、透镜的像差 .....	(297)
<b>第四节 眼的光学系统</b> .....	(298)
一、眼的光学结构 .....	(298)
二、眼睛的调节 .....	(300)
三、眼睛的分辨本领及视力 .....	(301)
<b>第五节 非正视眼的矫正</b> .....	(302)
一、近视眼及其矫正 .....	(303)
二、远视眼及其矫正 .....	(304)
三、散光眼及其矫正 .....	(305)
四、老视 .....	(305)
<b>参考文献</b> .....	(307)

# 第 1 章 原子核与放射性

## ★教学要求

1. 掌握核素、核力、原子结合能、半衰期、放射性活度的概念。
2. 掌握放射性原子核的衰变类型、衰变规律。
3. 理解原子核的基本性质、射线及光子与物质的相互作用的形式。
4. 了解辐射剂量相关的概念及其安全防护。
5. 了解放射性核素的医学应用。

核物理学是研究原子核的性质、结构及其变化规律的一门分支学科。19 世纪末,贝克勒尔和居里夫妇发现天然放射性,显示出原子核也有其自己的结构,导致人类开始深入探讨原子核的内部组成与结构。核理论与核技术的发展,把人类社会推进到了原子能时代。核物理学的研究涉及两个方面的内容:一是对原子核的结构、核力及核衰变等涉及物质结构的基本问题的研究;二是原子能和放射性的应用。其应用涉及工业、农业、医药等领域。在医学领域的应用逐步形成了核医学、核素显像、磁共振成像、介入放疗等应用技术。

## 第一节 原子核的基本性质

### 一、原子核的组成

自 1932 年英国物理学家查德威克通过实验发现中子后,大量的实验和理论均证明原子核是由质子和中子构成,故将质子(photon)和中子(neutron)统称为核子(nucleon)。质子带有和电子电量等值的正电荷,而中子不带电。中子与质子的质量几乎相等(中子略大一点),且都比电子质量大得多。质子质量为  $1.672\ 623\ 1 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ,中子质量为  $1.674\ 928\ 6 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ,而电子质量只有  $9.109\ 387\ 9 \times 10^{-31}\text{ kg}$ ,可见原子的质量主要取决于原子核内的质子数和中子数,而原子的质量可用质谱仪精确地测定。

原子物理学中用 kg 为单位显然很不方便,所以专用“原子质量单位”来度量原子核的质量,用 u 表示。规定自然界中一个 $^{12}_6\text{C}$ 的中性原子处于基态时静止质量的  $1/12$  为一个原子质量单位,实验测得:

$$1\text{ u} = \frac{1}{12}m_{^{12}\text{C}} = 1.660\ 540\ 2 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

可得质子质量为: 
$$m_p = \frac{1.672\ 623\ 1 \times 10^{-27}}{1.660\ 540\ 2 \times 10^{-27}}\text{ u} = 1.007\ 276\text{ u}$$

中子质量为: 
$$m_n = \frac{1.674\ 928\ 6 \times 10^{-27}}{1.660\ 540\ 2 \times 10^{-27}}\text{ u} = 1.008\ 665\text{ u}$$

## 二、原子核的性质

原子核带的正电量是电子电量的整数倍,即  $Q=Ze$ ,  $Z$  为自然数,称为原子核的电荷数,也就是该元素的原子序数,它和中性原子的核外电子数及核内质子数均相等。用  $A$  表示原子核的质量数,它等于核内的质子数与中子数之和,故原子核内的中子数  $N=A-Z$ ,物理学中用符号  ${}^A_ZX$  标记原子核。

原子核集中了原子 99% 以上的质量,但它却很小。若将原子核看成球体,通过实验可得原子核半径  $R$  的实验公式为:

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (1-1)$$

其中,  $r_0 = 1.20 \times 10^{-15} \text{ m}$  是比例系数,可得原子核的半径只有原子的万分之一。由式(1-1)可以算出原子核的密度为:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3u}{4\pi r_0^3} \approx 2.3 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

各种原子核的密度相同约为  $2.3 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,是铁物质密度的  $10^{13}$  倍,原子核是物质紧密集中的地方。使质子和中子紧密结合在一起的力量是什么呢?研究表明,核子之间存在一种被叫作核力的强作用力,它是一种短程力,只在  $10^{-15} \text{ m}$  的范围内才起作用。

因原子核是个带电系统,全部的正电荷集中于此,且在不停地旋转,所以有角动量,也有磁矩。原子核和原子一样也处在不同的量子化的能量状态,称为核能级,在一定的条件下也可以发生核能级的跃迁。

## 三、放射性核素和同位素

1896 年贝克勒尔在研究荧光矿物质时发现,一些原子能够自发地放出某种射线,即放射性。后来发现所有原子序数大于 83 的天然元素均具有放射性,还可以用人工方法产生自然界原本不存在的放射性元素。

有确定的质子数和质量数的原子核称为核素(nuclide)。具有相同的电荷数而质量数不同的元素,即中子数不同,在周期表中处在相同的位置,并具有相同的化学性质,称为同位素(isotope),各种元素都有各自的同位素,如  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ,  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^5_2\text{He}$ , 碳的同位素有  ${}^{10}_6\text{C}$ ,  ${}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  $\dots$ ,  ${}^{15}_6\text{C}$  等。同位素中结构不稳定能自发放出射线的称为放射性同位素(radioactive isotope);质量数相同而质子数不同的核素称为同量异位素(isobar),如  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  和  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ;电荷数和质量数均相同并处于不同的能量状态的核素称为同质异能素(isomer),如  ${}^{99}_{43}\text{Tc}$  和  ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ ,左上角的  $m$  表示处于激发态的原子核。

## 四、原子核的结合能

核子组成核素,按照一加一等于二的逻辑,原子核的质量应该等于组成它的各个核子的质量之和。但大量事实告诉我们原子核的质量总是小于组成它的核子质量之和。因此,将各个核子质量之和与原子核的质量之差称为质量亏损(mass defect),如某原子核  ${}^A_ZX$ 、质子、中子的质量分别用  $m_x, m_p, m_n$ ,用  $\Delta m$  表示质量亏损,则:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_x \quad (1-2)$$

由爱因斯坦的质能关系  $\Delta E = \Delta mc^2$  可知,质量减少就意味着有能量放出,故核子结合成原子核总是要放出能量的。反过来若要将原子核拆成一个个的核子,就必须从外面吸收能量,即需要外界给它做功。核子结合成原子核放出的能量称为原子核的结合能(binding energy)。由式(1-2)可得结合能的计算公式为:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [Zm_p + Nm_n - m_x]c^2$$

质量亏损  $\Delta m$  若以 u 为单位,以 MeV 为能量单位,则 1u 的质量亏损释放的能量为 931.5MeV,则:

$$\Delta E = 931.5 \Delta m \text{ (MeV)}$$

将原子核拆成单个核子时需要吸收的能量与单个核子结合成原子核时释放的结合能相等。

## 五、原子核的稳定性

原子核的结合能  $\Delta E$  与核子数(即质量数  $A$ )的比值称为平均结合能(specific binding energy),又称比结合能,用  $\epsilon$  表示:

$$\epsilon = \frac{\Delta E}{A}$$

我们用平均结合能来表示原子核的稳定性,其大小可以表示原子核结合的紧密程度。以  $A$  为横坐标,  $\epsilon$  为纵坐标即可得到比结合能曲线,见图 1-1。

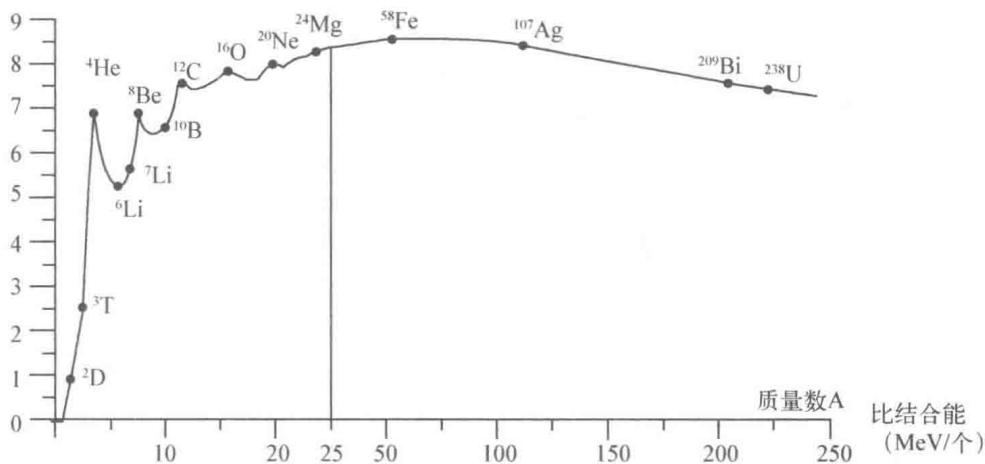


图 1-1 原子核的平均结合能曲线

中等质量  $30 < A < 150$  的原子核的比结合能最大,平均比结合能等于一个常量 8.6MeV,也就是最稳定。实验证明原子核的稳定性还与核内质子数与中子数的奇偶性有关,当核内的质子数和中子数都为偶数时,原子核最稳定。

重核区( $A > 209$ )因质子数增多而使静电斥力迅速增大,使平均结合能减少,核子之间结合变得比较松散,原子核显得不稳定。而天然放射性核素均是原子序数较大的重核,它们能自发衰变而放出射线。核内的质子数与中子数的比例若失调,原子核也不稳定。

[例 1-1] 试计算氦原子核的质量亏损和结合能(氦原子核的质量  $m_{\Lambda}=4.002\ 506\text{u}$ ,  $m_p=1.007\ 276\text{u}$ ,  $m_n=1.008\ 665\text{u}$ )。

解:氦原子核的  $A=4, Z=2$

则质量亏损为:

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m_{\Lambda} = (2 \times 1.007\ 276 + 2 \times 1.008\ 665 - 4.002\ 506)\text{u} = 0.030\ 376\text{u}$$

所以结合能为:  $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.030\ 376 \times 931.5\text{MeV} \approx 28.295\ \text{MeV}$

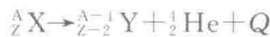
## 第二节 放射性核素的衰变类型

按照原子核的稳定程度可以分为稳定性核素和放射性核素。稳定性核素在无外来因素影响时,不发生核内结构或能级的变化。而放射性核素是不稳定的,容易发生结构或能级的改变,并放射出射线而转变成新的核素,这种现象称为原子核的衰变。放射性核素又分为天然放射性核素和人工放射性核素(或称人造核素)。人造核素主要由反应堆和加速器制备,医用放射性核素均是人造核素,如 $^{99}_{43}\text{Tc}$ 、 $^{131}_{53}\text{I}$ 等。

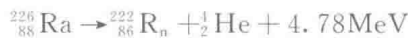
按照放射性核素放出的射线的种类,核衰变可分为 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变和 $\gamma$ 衰变。在所有的衰变过程中原子核的质量、能量、动量、核子数及电荷等均严格遵守基本的守恒定律。

### 一、 $\alpha$ 衰变

放射性核素衰变时释放出 $\alpha$ 射线(即氦原子核 $^4_2\text{He}$ )而变成新的核素的现象称为 $\alpha$ 衰变。 $\alpha$ 衰变过程可表示为:



$^A_Z\text{X}$ 为衰变前的核素,称为母核, $^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ 为衰变后的核素,称为子核。衰变能 $Q$ 被子核和 $\alpha$ 离子共同分享。例如:



此衰变过程中的衰变能绝大部分转化为 $\alpha$ 粒子的动能,而子核所占能量很小。 $\alpha$ 粒子是以很高的速度从母核中飞出,受物质所阻而失去动能之后俘获 2 个电子而变成一个中性氦原子。

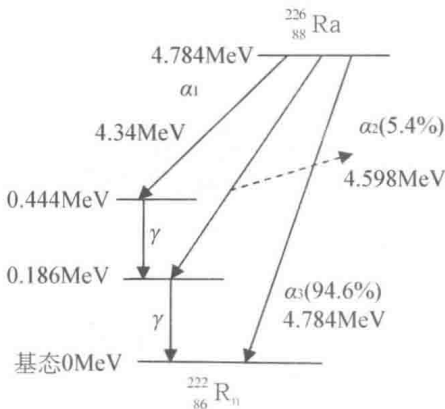


图 1-2 镭核的 $\alpha$ 衰变纲图

### 二、 $\beta$ 衰变和电子俘获

$\beta$ 衰变是指核素衰变时变成另外一种核素,其质量数不变,核的质子数增加或减少一个,周期表中的位置前移或后移一个位置。 $\beta$ 衰变有三种类型: $\beta^-$ 衰变、 $\beta^+$ 衰变和电子俘获(electron capture, EC)。

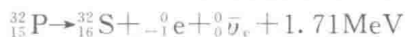


### (一) $\beta^-$ 衰变

$\beta^-$  衰变是指由母核放出电子的一种衰变,其核反应式为:



式中 ${}^0_0 \bar{\nu}_e$  为反中微子,它是在衰变中与 $\beta^-$  粒子同时放出的不带电,静止质量几乎为零的一种粒子,它与其他粒子的相互作用极其微弱,它沿直径穿过地球而能量几乎无损失。如:

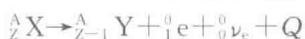


我们知道原子核中没有电子,衰变出的电子从何而来呢? 实验证明是来自于一个中子衰变成一个质子和一个负电子,其反应式为:

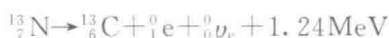


### (二) $\beta^+$ 衰变

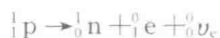
$\beta^+$  衰变是指由母核放出正电子的一种衰变,其核反应式为:



式中 ${}^0_0 \nu_e$  为中微子,是反中微子的反粒子,它常伴随正电子放出。例如:



$\beta^+$  衰变中正电子和 $\beta^-$  衰变中的电子的来源正好相反,是由一个质子衰变为一个中子和一个正电子而来,其反应式为:



正电子很不稳定,被物质阻挡失去动能后可与物质中的电子结合,质量全部损失转变成一对沿相反方向飞行的能量均为 $0.511 \text{MeV}$  的 $\gamma$  光子,这一过程称为湮没辐射。核医学中 PET 就是利用湮没辐射原理制成的核影像学设备。

$\beta^-$  衰变和 $\beta^+$  衰变的结果都是生成三种产物,因此衰变能为三者共有,且 $\beta$  粒子所携带的能量不是分立的,而是连续的,所以 $\beta$  衰变的能谱是连续谱(图 1-3);而 $\alpha$  衰变的产物只有两种,能量不能连续分布,故其能谱是分立的线状谱。

### (三) 电子俘获

电子俘获是指某些放射性核素可以俘获其核外的一个电子使核内的一个质子转化成一个中子,同时放出一个中微子而变成原子序数减一的核素,该过程称为电子俘获。母核俘获的若是 K 层电子就称为 K 层俘获,同理依次为 L 层俘获和 M 层俘获,K 层俘获的概率最大。电子俘获过程可表示为:



例如  ${}^{55}_{26} \text{Fe} + {}^0_{-1} e \rightarrow {}^{55}_{25} \text{Mn} + {}^0_0 \nu_e + 0.231 \text{MeV}$

图 1-4 是 ${}^{55}_{26} \text{Fe}$  的电子俘获衰变图,电子俘获后内层轨道会缺电子,由能量最低原理,外层电子会自发地填补空缺产生标志 X 射线辐射或俄歇电子。当高能级电子向低能跃迁时,多余的能量可能不以 X 射线的形式释放,也可直接传递给同一能级的另一个电子,接受能量的电子脱离轨道而变成自由电子,称为俄歇电子。我们可以通过观测 X 射线或俄歇电子来确定是否发生电子俘获。

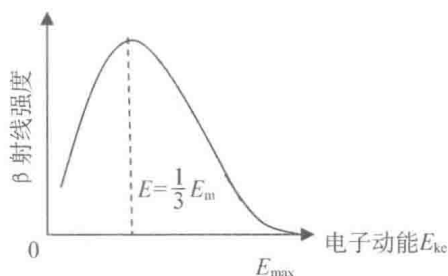


图 1-3  $\beta$  射线的能谱曲线