

高等学校教材
供医学检验专业用

检验核医学

主 编 孟庆勇 黄定德



人民卫生出版社

高等学校教材

供医学检验专业用

检验核医学

主 编 孟庆勇 黄定德

主 审 程绍钧

编 委 (以姓氏笔画为序)

王明华 (贵阳医学院)	李险峰 (山西医科大学)
牛发良 (河北北方学院)	肖 欢 (广东医学院)
卢汉平 (中山大学)	陈 昱 (福建医科大学)
兰晓莉 (华中科技大学)	孟庆勇 (广东医学院)
吕中伟 (同济大学)	秦永德 (新疆医科大学)
刘长江 (江苏大学)	徐美奕 (广东医学院)
闫 平 (北京大学)	黄定德 (第三军医大学)
江旭峰 (上海交通大学)	彭志平 (重庆医科大学)
孙俊杰 (蚌埠医学院)	程光亮 (蚌埠医学院)
李贵平 (南方医科大学)	

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

检验核医学/孟庆勇等主编. —北京:人民卫生出版社,
2008. 8

ISBN 978 - 7 - 117 - 10290 - 2

I. 检… II. 孟… III. 原子医学 - 医学检验
IV. R817.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 080913 号

孟庆勇 黄定德 主 编

黄定德 审 主

(中国医学科学院) 委 编

(北京大学西山) 孙剑李

(清华大学) 李国玉

(清华大学) 袁 肖

(清华大学) 肖定平

(清华大学) 星 湖

(清华大学) 平 阳

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

(清华大学) 袁定德

(清华大学) 薛 强

检验核医学

主 编: 孟庆勇 黄定德

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-67616688)

地 址: 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

邮 编: 100078

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

印 刷: 北京汇林印务有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.75

字 数: 372 千字

版 次: 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978 - 7 - 117 - 10290 - 2/R · 10291

定 价: 33.00 元

版权所有, 侵权必究, 打击盗版举报电话: 010-87613394

(凡属印装质量问题请与本社销售部联系退换)

前 言

《检验核医学》这本教材自问世以来,经历了1989年、1993年和1999年三次编写过程,它凝聚了蒋慧权、王鼎年、闵长庚、程绍钧和余裕民主编及其他编委的知识、智慧和汗水。由于他们的辛勤耕耘和不懈努力,这本教材越编越好。在全国高等医学院校医学检验专业开设“检验核医学”和相关课程的院校中,绝大部分院校都采用了该教材。实践证明《检验核医学》不仅是医学检验普通本科生的优秀教科书,而且在成人和研究生的教学方面也发挥了非常重要的作用。检验核医学是一门综合性学科,它包含了核物理、核化学、核药学、临床医学、医学检验等内容。随着各学科的发展,检验核医学无论从理论基础还是技术应用都有了很大的进步,为了使學生尽快熟悉和掌握新的知识,我们在前几次编写该书的基础上,吸收新的理论和技术重新组织编写了本书。

该教材注重将实验核医学技术应用于医学检验领域,并力求解决实际问题。根据临床医学对疾病诊断、治疗、预防和健康评价的需要,我们对教材内容的选择原则不仅坚持三基(基本理论、基本知识、基本技能)和五性(思想性、科学性、先进性、启发性、实用性),而且在选择检验核医学方法和技术时,实行全面和重点相结合。全面是指编写检验核医学的综合核技术,即将放射性核素示踪技术、放射免疫分析、免疫放射分析、酶的放射分析和受体的放射配体结合分析等体外放射分析技术作为主要内容编入书中,同时增加了非放射性核素标记技术和稳定核素分析等内容,使学生通过教师的讲授或自学能全面了解检验核医学所涉及的核与非核技术;而将当今检验核医学常用的示踪技术和放射免疫分析等作为重点内容。全书分为十章,其中第一至第七章主要介绍涉及放射性核素的方法,第八章和第九章是与非放射性核素相关的技术,第十章属于临床应用。

为了使學生更好的预习、学习和复习相关内容,大部分章节附有思考题。核物理基础知识用形象的图片解读重点内容,辐射防护章节增加了最新的法律法规,放射性测量介绍了新的仪器和设备,放射性核素示踪技术增加了新的方法。放射性核素标记技术和体外放射分析分别出现了非放射性核素标记技术和稳定核素分析的参考内容,有助于学生对比学习。数据分析与质量控制单独建章叙述,减少了各章节的重复内容。临床应用一章基本上是以人体的各系统为基础独立建节,但考虑到肿瘤标志物的特殊性,所以将肿瘤标志物从各系统中抽出来设节。参与本书的编写人员均来自教学第一线,他们将多年来的教学实践经验和学科发展的现状融入教材,提高了教材的质量。

本教材主要供高等医学院校医学检验专业本科生和研究生教学使用,兼顾成人本科生和高职高专学生使用,也可供从事医学检验专业的教师和临床工作者以及相关人员参考。

在全体编委的共同努力下,我们力求完美、开拓创新,努力做到概念准确、语言流畅、保证质量,但是缺点和错误在所难免,殷切期望阅读和使用该书的专家、教师、学生和读者给予批评指正,我们将不断改进和完善。

本教材得到人民卫生出版社、广东医学院和其他参编院校领导和老师的大力支持,在此表示衷心的感谢!

目 录

绪论	1
第一章 核物理基础知识	3
第一节 核素及其相关概念	3
一、原子核	3
二、核素	4
三、放射性核素与稳定性核素	4
第二节 核衰变	4
一、 α 衰变	4
二、 β 衰变	5
三、 γ 衰变	7
四、 α 、 β 、 γ 三种射线的本质	7
第三节 放射性衰变的基本规律	8
一、衰变常数与衰变公式	8
二、放射量	9
三、放射量校正	10
第四节 射线与物质的相互作用	11
一、带电粒子与物质的相互作用	11
二、 γ 射线与物质的相互作用	13
思考题	15
第二章 电离辐射防护基本知识	16
第一节 电离辐射生物效应	16
一、辐射生物效应发生机制	16
二、辐射生物效应分类	17
三、影响辐射生物效应的主要因素	17
第二节 常用辐射量	18
一、照射量	18
二、吸收剂量	19
三、比释动能	19
四、当量剂量	19
五、有效剂量	20
第三节 放射卫生防护	21
一、放射卫生防护基本法规	21

二、外照射防护	23
三、内照射防护	24
四、放射性废物处理	25
思考题	26
第三章 放射性测量	27
第一节 放射性测量概述	27
一、放射性测量的基本概念	27
二、放射性测量的分类	28
三、影响样品放射性测量的常见因素	29
第二节 放射性测量仪器	30
一、射线探测器	30
二、后续电子学线路	31
三、仪器最佳工作条件的选择	32
四、常用放射性测量仪器	33
第三节 放射性样品的测量	35
一、 γ 射线的测量	35
二、高能 β 射线的测量	36
三、低能 β 射线的测量	36
第四节 放射性测量的统计误差	40
一、放射性测量的误差来源	40
二、放射性测量的统计误差	40
三、放射性测量统计误差的控制	42
思考题	44
第四章 放射性核素标记化合物	45
第一节 概述	45
一、放射性核素标记技术和放射性核素标记化合物的含义	45
二、放射性核素标记化合物	45
第二节 蛋白质(多肽)的放射性碘标记	46
一、蛋白质或多肽的放射性碘标记技术	47
二、核酸的放射性碘标记技术	47
第三节 放射性标记化合物的纯化与鉴定	48
一、标记化合物的提纯	48
二、标记化合物的鉴定和质量控制	51
三、标记化合物的辐射自分解与对策	52
思考题	53
第五章 放射性核素示踪技术	54
第一节 放射性核素示踪技术的原理及特点	54

一、放射性核素示踪技术的基本原理	54
二、技术特点	55
三、实验的基本类型	56
四、要注意的几个方法学问题	56
第二节 放射性核素稀释法	58
一、放射性核素稀释法的原理	58
二、方法分类	58
三、应用放射性核素稀释法的必要条件	60
四、放射性核素稀释法的应用	61
第三节 物质转化的示踪技术	62
一、参入实验基本原理	62
二、主要参数	62
三、参入实验的类型	63
四、基本方法和基本要求	63
五、参入实验实例	64
第四节 放射自显影技术	65
一、基本原理	66
二、放射自显影的类型及基本方法	68
三、影响放射性自显影质量的常见因素	70
第五节 核酸探针标记技术	71
一、核酸探针的种类	71
二、核酸探针的标记	72
思考题	74
第六章 体外放射分析	75
第一节 放射免疫分析	75
一、放射免疫分析原理	75
二、剂量反应曲线	78
三、放射免疫分析方法学	81
第二节 免疫放射分析	89
一、基本原理	90
二、免疫放射分析方法学	90
三、免疫放射分析的特点	92
四、剂量反应曲线	95
第三节 受体的放射配基结合分析	96
一、受体性质概述	97
二、基本原理	101
三、方法流程和基本条件	105
第四节 酶的放射分析	107
一、基本原理与特点	108

二、基本方法	109
三、利用酶促反应的其他放射分析法	113
思考题	115
第七章 体外放射分析的数据处理与实验室质量管理	116
第一节 体外放射分析的数据处理	116
一、放射免疫分析和免疫放射分析剂量反应曲线的处理	116
二、受体放射性配体结合分析的数据处理	124
第二节 实验室质量管理概述	126
一、质量管理基本定义	126
二、实验室误差分类及来源	127
三、质量控制与质控样品	128
第三节 质量控制指标	130
一、灵敏度	130
二、精密度	130
三、偏倚和准确度	130
四、特异性	133
五、稳定性	133
六、临床有效性	134
第四节 实验室内部质量控制	135
一、批内误差分析	135
二、批间重现性评价	138
三、实施方法及数据管理	141
第五节 实验室间的外部质量评价	142
思考题	143
第八章 非放射性核素标记体外免疫分析技术	144
第一节 酶联免疫分析	144
一、酶联免疫分析的原理	144
二、酶联免疫吸附分析法的类型	145
三、必备试剂	147
四、质量控制	149
五、进展	150
第二节 发光免疫分析技术	151
一、化学发光免疫分析	151
二、电化学发光免疫分析	155
三、发光免疫分析技术进展	157
第三节 荧光免疫分析	157
一、荧光、荧光效率及荧光猝灭	158
二、荧光物质	158

三、荧光免疫分析的原理和常见技术	159
四、时间分辨荧光免疫技术	160
五、荧光偏振免疫测定	163
思考题	164
第九章 稳定核素分析	165
第一节 稳定核素及其标记物的制备	165
一、稳定核素的相关概念	165
二、稳定核素标记物的制备	167
第二节 稳定核素及其标记物的测量	167
一、发射光谱法	168
二、红外光谱法	168
三、核磁共振法	169
四、活化分析法	169
五、激光光谱分析法	170
六、质谱分析法	171
七、气体同位素比值质谱分析法	172
八、有机质谱分析法	174
第三节 稳定同位素在生物医学中的应用	177
一、 $^{13}\text{CO}_2$ 呼气试验	177
二、稳定同位素稀释法	180
思考题	180
第十章 检验核医学的临床应用	181
第一节 下丘脑-垂体-甲状腺轴相关检测指标	181
一、甲状腺激素与促甲状腺激素	181
二、反三碘甲腺原氨酸	182
三、甲状腺球蛋白	183
四、甲状腺自身抗体	184
五、甲状腺结合球蛋白	185
六、促甲状腺激素释放激素	185
第二节 肾上腺激素相关检测指标	186
一、皮质醇	186
二、醛固酮	187
三、促肾上腺皮质激素	188
四、儿茶酚胺	189
第三节 下丘脑-垂体-性腺轴相关检测指标	190
一、雄激素	190
二、雌激素	191
三、孕激素(孕酮)	193

四、胎盘激素	194
五、垂体激素	195
第四节 钙磷代谢激素	199
一、甲状旁腺素	199
二、降钙素	200
三、1,25-二羟维生素 D ₃	201
四、骨钙素	201
第五节 消化系统相关检测指标	202
一、胰腺相关激素检测指标	202
二、胃肠激素	206
三、肝脏检测指标	209
第六节 心血管系统相关测定指标	212
一、心房钠尿肽	212
二、内皮素	213
三、前列环素、血栓素 A ₂	214
四、心肌肌钙蛋白 T	215
第七节 泌尿系统相关测定指标	215
一、肾脏排泄功能检测	216
二、肾脏内分泌功能检测	217
第八节 血液系统相关检测指标	218
一、叶酸与维生素 B ₁₂	218
二、血清铁蛋白	219
三、血小板相关 IgG	219
第九节 肿瘤标志物	220
一、蛋白类肿瘤标志物	220
二、糖脂类肿瘤抗原	222
三、酶类肿瘤标志物	223
四、激素类肿瘤标志物	224
第十节 其他	224
一、细胞因子和免疫球蛋白	224
二、药物浓度检测	225
附录	227
附录一 中华人民共和国法定计量单位	227
附录二 常用核素数据表	228
附录三 通用放射性核素衰变因子 ($e^{-\lambda t}$) 表	229
英汉对照词汇	230
主要参考文献	241

绪 论

检验核医学(laboratory nuclear medicine)是将实验核医学的相关核技术应用于医学检验领域,观察微量生物活性物质运动转化规律的一门交叉学科。因此,检验核医学既是实验核医学的一个分支,也是检验医学的重要组成部分。它的主要内容是应用核素示踪和体外放射分析方法分别对机体的功能状态和体内的微量物质进行超微量分析,以揭示该物质在生理或病理状态下的代谢规律,为疾病的诊断、治疗、预后和病因研究等提供科学依据。

1896年法国物理学家贝可勒尔(Henri Becquerel)发现了天然铀的放射性,奠定了放射自显影技术的基础。1923年物理化学家赫维塞(Hevesy)在研究生物体内的磷代谢途径时,使用了示踪剂 ^{32}P ,开启了示踪技术的先河。1959年Berson和Yalow在研究血浆中低浓度的胰岛素时,创建了放射免疫分析,后来逐渐建立了免疫放射分析、酶的放射分析和受体的放射配体结合分析等多种体外放射分析技术,使测定复杂样品中的生物活性物质既灵敏、特异,又简便、快速。放射免疫分析不仅引起生物活性物质分析技术的一场革命,而且为检验核医学的崛起奠定了基础。特别是在20世纪70年代,由于射线探测仪器的成熟和进步,电子计算机应用的普及,使体外放射分析的数据处理能力和质量控制水平等均得以显著提高。科学技术的进步促进了检验核医学的内容不断丰富,为学科的形成和日趋成熟创造了条件。在此基础上,也延伸出化学发光和酶联免疫等多种非放射免疫分析技术。

检验核医学利用核素示踪和放射免疫分析的原理和方法研究机体的生理、生物化学、功能结构的变化和病理过程,主要包括核素标记技术、示踪技术、体外放射分析技术、放射自显影技术、非放射性标记技术和稳定核素分析等。通过这些技术,人们可以在生理情况下,从分子水平静态地和动态地研究各种物质在机体中的代谢规律,阐明物质在体内和细胞内的代谢过程。检验核医学涉及核物理学、核仪器学、放射剂量学、放射化学、放射生物学、放射卫生学、分子生物学、生物化学、生理学、免疫学、肿瘤学、药理学等学科的知识 and 内容,它们与检验核医学互相促进和发展,不仅丰富了检验核医学的内容,而且使检验核医学的技术和方法广泛应用于内分泌学、生物化学、药理学、肿瘤学、免疫学、生殖生理学、分子生物学和临床医学等学科,尤其是内分泌学、生殖生理学、肿瘤学等与检验核医学的关系极为密切。由于绝大多数的内分泌激素、生殖激素、肿瘤标志物在体内正常含量很低,它们的体内含量微弱变化或存在与否都会导致机体的功能发生改变。尽早发现它们的变

化对于疾病的早期诊断、治疗方案的拟定、疗效观察和疾病的预后评价等具有重要意义。检验核医学以其超微量分析的灵敏度、高度的特异性和简便快速的方法领先于其他定量分析方法。此外,检验核医学的放射性核素示踪技术对于物质的体内分布、代谢、转化规律揭示、功能酶活性测定、核酸序列分析、受体的生化和药理特性研究等问题的阐明都是不可缺少的。在极毒药物的药代动力学分析与作用靶点的定位研究中更是唯核素示踪技术不可。

自然科学的发展史反复证明,科学发展中各学科之间的交叉渗透,促进了各学科的发展进步。检验核医学也不例外,自奠基之日起,就不断吸收各学科的精华,在丰富自身的同时,也为医学的进步做出了贡献。学习的目的在于应用,作为医学检验医师,岗位职责要求其既要掌握专业基本理论和熟练的基本技能,还应了解专业科学的临床应用知识。在校学习期间,学生要为今后在工作岗位上更好地为患者服务打好学业基础。为此,本教材依据培养医学检验医师的目标,在突出与医学检验密切相关的核技术前提下,强化了其临床应用内容,以适应培养高层次医学检验人才的教学要求。

检验核医学的形成和发展,不仅开拓了医学检验的应用领域,而且与医学和其他科学的最新成就一起使医学检验技术发生了划时代的变化,成为医学检验技术现代化的重要标志之一。

第一章

核物理基础知识

第一节 核素及其相关概念

一、原子核

(一) 原子的结构

宇宙万物都是由原子(atom)组成的。原子又是由处于中心位置、体积小、质量大的原子核和绕核运行、数量不等、质量和体积更小的电子构成(图1-1)。

(二) 原子核的组成

原子核由质子(proton, p)和中子(neutron, n)组成。

1. 核子 在核力的聚合作用下,数量不等的质子和中子形成不同种类的原子核,质子和中子统称为核子。核子的质量用原子质量单位(atomic mass unit, amu)表示,1 amu相当于 ^{12}C 原子质量的1/12。质子为1.007276 amu,中子的质量是1.008665 amu,中子比质子略重。科学界定义1 amu为1个质量数,而质量 <1 amu的粒子质量数规定为0。因此,质子和中子的质量数均为1,电子的质量为0.00548588 amu,其质量数为0,原子核的质量数等于质子数和中子数之和,用A表示。

2. 原子核的带电性 质子具有正电性,1个质子的电荷量为1e电荷,1e=4.8028×10⁻¹⁰静电单位。核内有几个质子,则其正电荷量就是几个e,用Z表示。Z又称原子序数,代表该原子在元素周期表中的排列序号。中子不带电,是电中性的核子。

3. 原子核的能量状态 原子核除了质量和电性的基本特性外,还有能量状态特征,分为基本能量状态(简称基态)和高能状态(又称激发态),用m表示激发态(excited state)。

4. 原子核的符号 为了能够简便和直观地了解原子核,人们用符号 ^A_ZX 和 $^{Am}_Z\text{X}$ 分别描述处于基态和激发态的原子核。X代表某种原子核的名称,也是原子和元素的名称。例如:氢元素的原子核、原子、元素的符号都是H; $^{99m}_{43}\text{Tc}$ 则表示处于激发态的锝原子核。

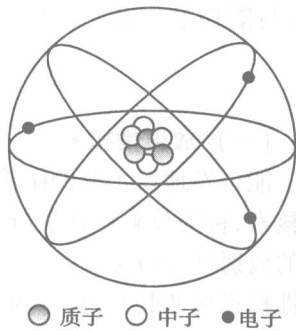


图1-1 原子结构模式图

二、核 素

(一) 核素

原子核内质子数相等的一类核,称为元素(element)。例: ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 的核内均含有 1 个质子($Z=1$),它们属于一种元素,命名为氢,符号为 H; ${}^{11}_6\text{C}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 原子核内均含有 6 个质子($Z=6$),它们属于一种元素,命名为碳,用符号 C 表示; ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 、 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 也属于一种元素,因为它们的质子数相等($Z=43$),命名为锝,符号为 Tc。因此,从核的结构和能态上看,组成同一种元素的各个原子核是不同的。原子核内质子数相等、中子数相同、能量状态一致的一类核,称为核素,例如上述的 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 是氢元素的三种核素。所以,一种元素由数量不等的多种核素组成,自然界中的元素有百余种,核素却有两千多种。

(二) 同质异能素

原子核内质子数相等,中子数相同,但所处的能态不一致的核素,互称同质异能素(isomer)。例如 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 属同质($p=43, n=56, A=99$)异能(前者处于基态,后者处于激发态)素。同质异能素是同位素的一种特殊形式。

(三) 同位素

同种元素的核素之间互称同位素。即原子核内质子数相等、中子数不同或能量状态不一致的核素,互称为同位素(isotope)。因为它们的 Z 相等,在元素周期表中同属一个位置,所以称为同位素。例: ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 互称为同位素; ${}^{11}_6\text{C}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 也互称为同位素; ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 与 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 也互称为同位素。

三、放射性核素与稳定性核素

(一) 放射性核素

能自发地发生核的结构或(和)能量状态的改变,生成另一种核素,并释放某种粒子的核素,称为放射性核素(radioactive nuclide)。放射性核素所具有的这种性质,称为原子核的放射性(radioactivity)。在两千多种核素中,约有一千七百多种属于放射性核素。放射性核素按照其来源,分为天然放射性核素和人工放射性核素。

(二) 稳定性核素

不具有放射性或发生核衰变几率极小的核素,称为稳定性核素(stable nuclide),也称为非放射性核素。必须强调的是,稳定是相对于放射性而言的,也就是说在当今的科学技术水平下,某种核素的变化极不明显时(通常以半衰期大于 10^{15} 年为界)被视为稳定。

第二节 核 衰 变

放射性核素的原子核自发地发生结构或(和)能态的改变,生成另一种核素,并释放某种粒子的过程,称为放射性衰变(radioactive decay),简称为核衰变(nuclear decay)。常见的核衰变分为 α 、 β 、 γ 衰变三种类型。

一、 α 衰变

释放 α 粒子的核衰变称为 α 衰变(alpha decay)。这种衰变方式主要发生在原子序

数大于82的核素。核衰变的母核(${}^A_Z\text{X}$)失去2个质子和2个中子而形成 α 粒子和子核(${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$)。所以, α 粒子的本质是氦原子核,它是带有2个单位正电荷、质量数为4的带电粒子(图1-2)。

α 衰变的通式为: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He} + Q$
母核 子核 α 粒子 衰变能

例如: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha + Q$ ($Q = 4.937 \text{ MeV}$)

α 粒子的速度约为光速的1/10,在空气中的射程约为3~8 cm,在水中和机体中的射程只有0.06~0.16 mm。因其射程短,穿透力弱,一张纸就可阻挡 α 粒子。

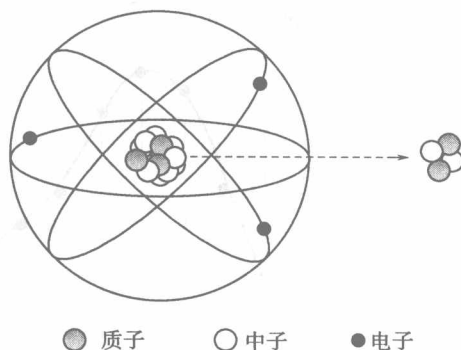


图1-2 α 衰变模式图

二、 β 衰变

原子核放出或获得电子而形成的核衰变,称为 β 衰变(beta decay)。此类核衰变属于n、p之间的转移,以维持核内合理的n/p比值,核衰变后子核的原子序数增加或减少,但子核的质量数不变。 β 衰变包括三种方式,即 β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获。

(一) β^- 衰变

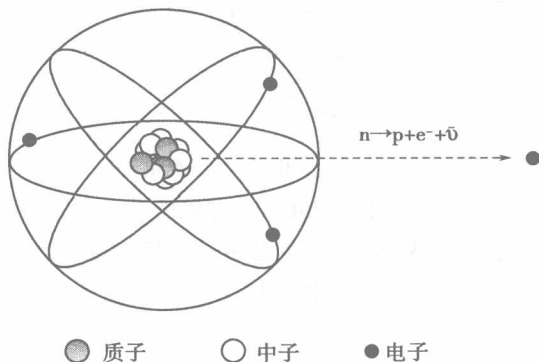


图1-3 β^- 衰变模式图

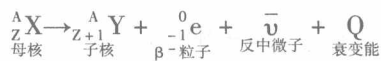
例如: ${}^{32}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu} + Q$ ($Q = 1.71 \text{ MeV}$)

β^- 衰变释放 β^- 粒子的同时,还释放一个电中性、质量比电子更小的基本粒子,称为反中微子(anti-neutrino),用符号 $\bar{\nu}$ 表示。因此,衰变能 Q 成为 e^- 和 $\bar{\nu}$ 共享的能量。由于能量分配的随机性,导致同种放射性核素衰变所放出的各个 β^- 粒子携带的能量不相等,有的可以多至与 Q 相等,有的却少至近于零, β^- 粒子能量在0~ Q 之间,形成一个连续能谱。例如:将 ${}^3\text{H}$ 的各个 β^- 粒子能量从小到大描绘出来(图1-4),结果发现 ${}^3\text{H}$ 的 β^- 粒子能量大多数约等于 $Q/3$ 值,相当于分布曲线的峰位能量。

β^- 粒子的穿透能力较 α 粒子强,在空气中的射程比 α 粒子长,但电离能力较 α 粒子弱,能被铝箔或机体组织所吸收。

释放1个单位负电荷、质量数为0的轻粒子的过程,称为 β^- 衰变(β^- decay, negatron decay)。这种粒子的本质是电子(${}^0_{-1}\text{e}$),也称为 β^- 粒子(β^- particle)。这种衰变方式主要发生在核内中子相对过剩的核素,发生 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 的转变。当过剩的中子转化为质子时,核结构更稳定(图1-3)。

β^- 衰变的通式为:



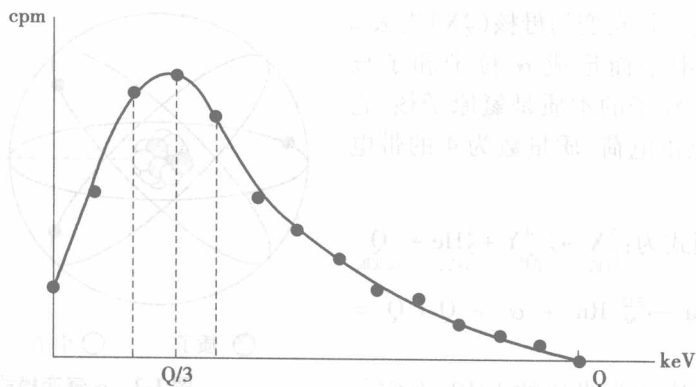


图 1-4 ^3H 能谱曲线示意图

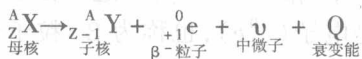
keV: 千电子伏特, 表示电子具有的能量;

cpm: 每分钟计数, 间接表示电子数的量

(二) β^+ 衰变

原子核释放 1 个单位正电荷、质量为 0 的轻粒子的过程, 称为 β^+ 衰变 (β^+ decay, positron decay)。这种粒子的本质是正电子 ($^0_{+1}\text{e}$), 也称为 β^+ 粒子 (positron)。这种衰变方式主要发生在核内中子相对不足的核素, 发生 $p \rightarrow n + e^+$ 的转变。当质子转化为中子时, 核结构更稳定 (图 1-5)。

β^+ 衰变的通式为:



例如: $^{18}_9\text{F} \rightarrow ^{18}_8\text{O} + \beta^+ + \bar{\nu} + Q$ ($Q = 0.66 \text{ MeV}$)

由于 Q 被 β^+ 和 $\bar{\nu}$ 随机分配, β^+ 粒子的能量与 β^- 粒子一样也是一个连续能谱。天然放射性核素不发生 β^+ 衰变, 只有人工放射性核素衰变时才能发生 β^+ 衰变。

(三) 电子俘获

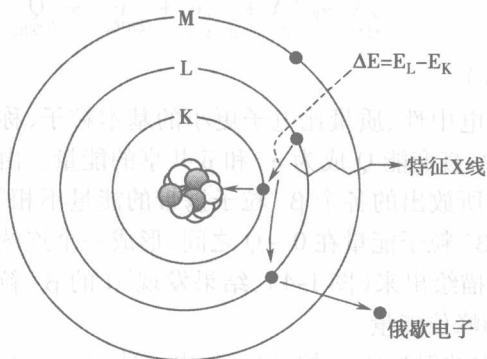


图 1-6 电子俘获模式图

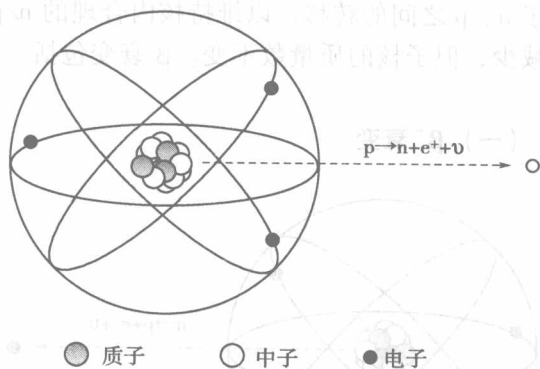


图 1-5 β^+ 衰变模式图

当核内中子数相对不足时, 还可以从原子核外最内层 (K 层) 的轨道上俘获一个电子进入核内, 使核内一个质子转化为一个中子, 发生 $p + e \rightarrow n + \nu$ 的转变, 使核内中子增加, 质子减少, 达到核结构的稳定, 这种衰变方式称为电子俘获 (electron capture decay, EC, 图 1-6)。

从图 1-6 可以看出, 由于 K 层电子被原子核俘获而出现空位, 此时较高能级的壳层电子 (L 层) 立即补位。电子由高能级

移至低能级而出现的多余能量($\Delta E = E_L - E_K$)有两种可能的结局:

1. ΔE 以电磁波形式释放—该电磁波的波长,频率属于 X 射线。因为对特指的原子,其 ΔE 是固定值,由该种原子的性质决定,所以这种 X 射线称为特征 X 射线。

2. ΔE 转移给另一个壳层电子 ΔE 的部分能量用于克服轨道电子的势垒,使该电子脱离原子核的约束,成为自由电子而被发射; ΔE 的另一部分能量则作为该自由电子的动能,人们给这种电子取名为俄歇电子(Auger electron)。

EC 的衰变通式为:



例如: ${}^{55}_{26} \text{Fe} + {}^0_{-1} e \rightarrow {}^{55}_{25} \text{Mn} + \nu + Q (Q = 0.231 \text{ MeV})$

三、 γ 衰变

经过 α 或 β 衰变生成的子核往往处于激发态,并很快退激(一步或多步)到基态,多余的能量以 γ 光子形式释放,这种衰变形式称为 γ 衰变(γ decay)。在 γ 衰变的过程中,子核的 Z 和 A 均不变,所以称为同质异能跃迁,简称 γ 跃迁(γ transition,图 1-7)。

衰变的通式为:



例如:



$$\downarrow E_\gamma = 1.17 \text{ MeV}$$



$$\downarrow E_\gamma = 1.33 \text{ MeV}$$

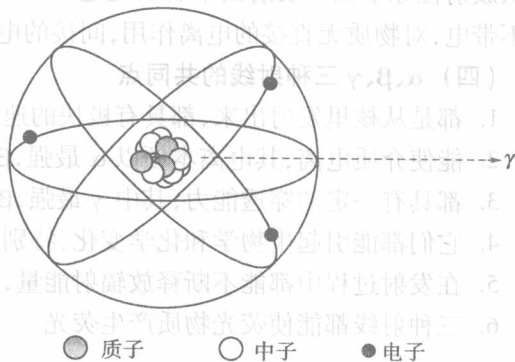


图 1-7 γ 衰变模式图

也有的激发态核并不马上退激,可以维持一段时间再按自身的衰变速度进行退激发射 γ 射线。例如: ${}^{99m}\text{Tc}$ 的半衰期约为 6.02 小时。激发态的核还可以将能量转移给原子的核外电子(主要是 K 电子),使其被发射出去,激发的核得以退激至基态,这种电子称为内转换电子(conversion electron)。

γ 射线是从原子核内释放的波长短($10^{-8} \sim 10^{-11} \text{ cm}$)、频率高的电离辐射,穿透力强,电离能力弱,在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。

四、 α 、 β 、 γ 三种射线的本质

科学家们对 α 、 β 、 γ 三种射线进行了深入的研究,认识了它们各自具有的特殊本质(图 1-8)。

(一) α 射线

卢瑟福用实验证实了 α 粒子是带正电荷的高速运动的粒子流。其带电量为 $2e^+$,质量为 4.002775 amu ,质量数 $A=4$,由 2 个质子和 2 个中子组成,其实质是氦原子核(${}^4_2\text{He}$)。 α