

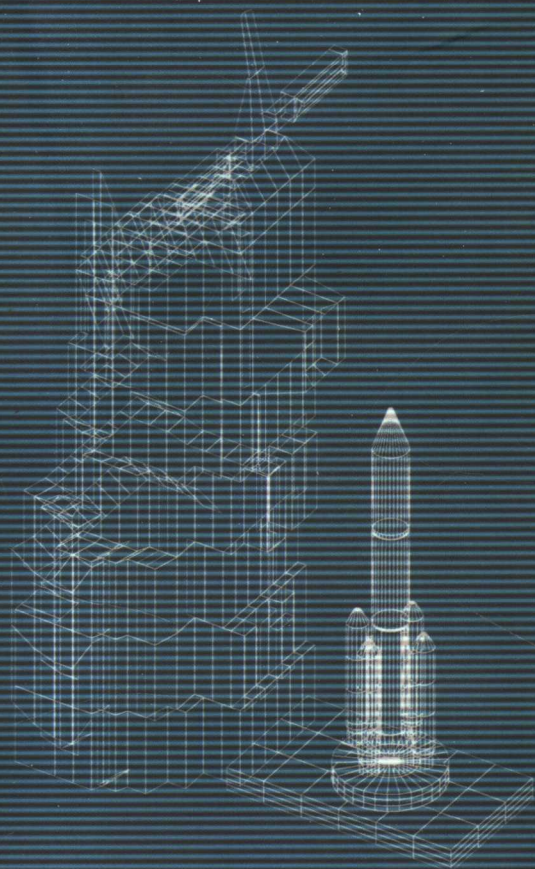
核科学与技术



国防科工委
「十五」
规划
教材

核科学概论

●刘庆成 贾宝山 万骏 编著



哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社



国防科工委“十五”规划教材 核科学与技术

·核科学与技术训练系列教材·

核科学概论

刘庆成 贾宝山 万骏 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 北京航空航天大学出版社

内容简介

本书主要包括核科学基础知识,核技术在地学、工业、农业、医学和卫生等方面的应用,核分析技术,核电和核武器知识,核废料处理,辐射防护及监测技术。

本书可作为高等院校核技术与工程专业、勘查技术与工程专业、地球科学专业、环境工程专业和水文与水资源专业的教材。也可供核医学,辐射剂量学,辐射防护,环境保护,核安全等专业技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核科学概论/刘庆成,贾宝山,万骏编著. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2004

ISBN 7-81073-627-2

I.核… II.①刘…②贾…③万… III.核技术-概论
IV.TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 112800 号

核科学概论

刘庆成 贾宝山 万 骏 编著

责任编辑 罗东明

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈工程大学 11 号楼

发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001

新华书店经销

黑龙江省教育厅印刷厂印刷

开本:787×960 1/16

印张:19.25 字数:405 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—1 000 册

ISBN 7-81073-627-2 定价:27.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编 委:王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光祜
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天器为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科



技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

本书是根据国防科工委重点教材建设规划、核科学与技术评审小组审定的编写提纲编写的。

本书是作者在过去多年的教学实践基础上,研究和吸收国内外资料编写而成。编写过程中,贯彻了“教育要面向现代化、面向世界、面向未来”的方针,从培养高级专门人才的需要出发,注意了教材的科学性、启发性。全书内容包括八章:第1章扼要介绍了核科学基本知识,主要介绍了核衰变规律与天然放射性衰变系列;第2章射线与物质相互作用,主要介绍了带电粒子与物质相互作用和 γ 射线与物质作用的三种主要方式;第3章核探测技术及应用,重点介绍了核探测技术在矿产勘查中的应用,扼要阐述了核技术方法在工业、农业及医学领域的应用情况;第4章核分析方法,主要介绍了分析放射性核素铀、钚的核物理分析方法,简要述说了X射线荧光分析、中子活化分析以及离子束分析方法;第5章核电站,阐述了核反应堆的主要类型和工作原理,核电站工作流程,核电发展现状与发展趋势;第6章核武器,简要介绍了聚变核武器、裂变核武器的原理和结构以及中子弹和贫铀弹;第7章核废物地质处置,阐述了核废物的分类方法和核废物产生的途径,介绍了核废物地质处置方法原理;第8章辐射防护与辐射环境监测,扼要介绍了辐射防护基本知识、环境辐射监测和评价方法。

核科学概论一书可作为核科学与技术学科各专业以及核地质学科各专业的专业课程教材,亦可作为环境工程等专业的教学参考书。

本书由东华理工学院和清华大学组织具有丰富教学、科研经验的教师编写。其中,第1章、第2章由刘庆成教授编写;第5章、第6章由贾宝山教授编写;第4章、第8章由万骏副教授编写;第7章由张展适教授编写;第3章由刘庆成教授和杨亚新教授共同编写;全书由刘庆成教授统稿。核科学是当前一个十分活跃的研究领域,新的研究成果与资料不断涌现,应用领域也在不断拓展;鉴于此,欲在本书中将有关材料完整地、十分准确地反映出来,实非作者能力所及,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。



本书编写过程中,得到了国防科工委人事教育司的大力支持,得到了东华理工学院和清华大学工程物理系、哈尔滨工程大学出版社的支持和帮助。作者在此向他们表示衷心的感谢。

编 者
2004 年 8 月

目 录

第1章 核科学基础知识	1
1.1 原子与原子核	1
1.2 核衰变	3
1.3 天然放射性核素	10
1.4 放射性核素衰变规律	14
思考题	21
第2章 射线与物质相互作用	22
2.1 带电粒子与物质相互作用	23
2.2 X、 γ 射线与物质相互作用	34
2.3 X、 γ 射线在物质中的衰减	44
2.4 γ 射线仪器谱	46
2.5 中子与物质的相互作用及衰减规律	55
2.6 辐射探测器原理简介	58
思考题	62
第3章 核探测技术及应用	63
3.1 核探测技术在地学中的应用	63
3.2 核探测技术在工业中的应用	97
3.3 核技术在农业中的应用	109
3.4 核技术在医学中的应用	115
思考题	119
第4章 核分析方法	121
4.1 概述	121
4.2 核物理分析	124
4.3 X射线荧光分析	135
4.4 中子活化分析	139
4.5 离子束分析技术	145
思考题	153
第5章 核电站	154
5.1 核反应堆原理与类型	154
5.2 压水堆核电站	162
5.3 其他重要类型核电站	171



5.4 我国核电的发展	186
思考题	193
第6章 核武器	194
6.1 核武器概述	194
6.2 裂变核武器——原子弹	197
6.3 聚变核武器——氢弹	200
6.4 第三代表性核武器——中子弹	204
6.5 放射性非核武器——贫铀弹	210
思考题	214
第7章 核废物地质处置	215
7.1 核废物分类	215
7.2 核废物的来源	218
7.3 核废物的管理	223
7.4 核废物地质处置	225
7.5 中国核废物处置研究进展与展望	249
思考题	255
第8章 辐射防护与辐射环境监测	256
8.1 辐射剂量学基本知识	256
8.2 辐射对人体的危害	259
8.3 辐射防护的基本原则与防护标准	268
8.4 环境辐射监测	273
8.5 辐射环境影响评价方法	288
思考题	295
参考文献	297

第 1 章 核科学基础知识

1.1 原子与原子核

1.1.1 原子

原子是构成自然界各种元素的最基本单位,由原子核和核外轨道电子(又称束缚电子或绕行电子)组成。原子的体积很小,直径只有 10^{-8} cm,原子的质量也很小,如氢原子的质量为 $1.673\ 56 \times 10^{-24}$ g,而核质量占原子质量的 99% 以上。原子的中心为原子核,它的直径比原子的直径小很多。

原子核带正电荷,束缚电子带负电荷,两者所带电荷相等,符号相反,因此,原子本身呈中性。束缚电子按一定的轨道绕原子核运动,当原子吸收外来能量,使轨道电子脱离原子核的吸引而自由运动时,原子便失去电子而显电性,成为正离子。

1.1.2 原子核的组成及其基本性质

1. 原子核的组成

1932 年查德维克(James Chadwick)发现中子后,随即伊凡宁科(А. А. ИВАНЕНКО)和海森堡(Heisenberg)各自独立地提出了中子及质子作为基本组分的核模型,即核的中子-质子模型。该模型已为大量实验事实证明是正确的,并成为原子核结构研究的基础。

原子核由质子和中子构成。质子和中子统称为核子,质子和中子是核子的两种不同状态。在数值上,质子数 Z 等于原子序数和核电荷数。质量数 A 就等于核子数;中子数为 $N = A - Z$ 。

基于原子核的中子-质子模型,通常把质量数为 A ,质子数为 Z ,中子数为 N 的某种原子核或原子,记作 ${}^A_Z\text{X}$,X 为元素符号,也可以简写为 ${}^A\text{X}$ 。例如,铀-238 记作 ${}^{238}_{92}\text{U}$,也可以简写为 ${}^{238}\text{U}$ 。

根据原子核所含的质子数、中子数及核的能量状态,原子核有以下分类。

核素(Nuclide):核内具有相同的质子数、中子数和核能态的同一类原子,称为核素。例如, ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{234}_{92}\text{U}$, ${}^{90}_{38}\text{Sr}$, ${}^{91}_{39}\text{Y}$, ${}^{60\text{m}}_{27}\text{Co}$, ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 等都是各自独立的核素。

同位素(Isotope):具有相同的质子数(原子序数),而质量数不同的一类核素,它们在元素周期表上处于相同的位置。例如, ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{234}_{92}\text{U}$ 。

同量异位素(Isobars):具有相同的核子数(A)而质子数(Z)不同的核素,称为同量异位素。



例如, ${}_{81}^{210}\text{Tl}$, ${}_{82}^{210}\text{Pb}$, ${}_{83}^{210}\text{Bi}$, ${}_{84}^{210}\text{Po}$ 。

同质异能素(Isomers):具有相同质量数(A)和相同质子数(Z)而核能态有明显差别的核素,称为同质异能素。例如, ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ 和 ${}_{91}^{234m}\text{Pa}$, ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 和 ${}_{27}^{60m}\text{Co}$ 。同质异能素又称为同核异能素。

原子核的荷电性是原子核的基本特性之一。原子序数为 Z 的原子核,核内有 Z 个质子,核外有 Z 个电子。核内质子所带的总电荷为正电荷。常用电子电量(e)作为电荷基本单位,故原子核正电荷 $q = +Ze$,原子序数等于原子核的电荷数。它是原子核的重要参数之一。原子核所形成的库仑场的大小与核电荷数 Z 有密切关系。至今,已知元素的核电荷数 Z 在 1 至 109 范围内变化。

2. 核能级

原子核的能级是原子核能量状态的标志,原子核的不同能量状态就是原子核的能级。通常原子核处于最低能量状态,称为基态。当原子核受某种射线(快速粒子或光子)的轰击或进行核衰变时,产生的子核都可能处于较高能量态,原子核处于较高能量状态称为激发态。一个原子核可具有许多能级,能级是分立不等间隔的。不同核素具有自己各不相同的核能级。

1.1.3 原子核的结合能

1. 质能联系定律

质量和能量是物质同时具有的两个属性,任何具有一定质量的物体必然与一定的能量相联系。根据相对论观点,物体质量的大小决定于该物体的运动状态,若物体静止($v=0$)时的质量为 m_0 ,则运动速度为 v 时该物体所具有的质量 m 为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1.1.1)$$

式中, c 为光速,当 $v=0$ 时, $m = m_0$;当物体运动速度增大时,其质量也随之增大,物体运动速度接近光速时,其质量变化相当显著,例如,当 $v = 0.98c$ 时,则 $m = 5m_0$ 。具有一定质量 m 的物体,其相应的能量 E 由相对论公式描述为

$$E = mc^2 \quad (1.1.2)$$

此式称为质能关系式,或称质能联系定律。式中 E 以焦耳为单位, m 以千克为单位, $c = 2.997\,924\,580 \times 10^8 \text{ m/s}$,为真空中的光速。

根据质能联系定律,可知与 1 g 物质相联系的能量为

$$E = 10^{-3} \text{ kg} \times (2.997\,924\,580 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 8.987551781 \times 10^{13} \text{ J}$$

可见 1 g 物质的内部蕴藏着很大的能量。

2. 原子核的质量亏损和结合能

原子核由质子和中子组成,而核素的原子是由该核素的原子核与电子组成的。实验证明,所有核素的原子质量都比组成它的原子核和电子的质量总和小,这个差值称为原子质量亏损。



实验发现,所有的原子核的质量亏损都是正值,这表明当自由核子结合成原子核时放出能量,这种能量称为原子核的结合能。当结合能小的核变成结合能大的核时,就会释放出能量。获得能量的途径有两个:一是重核分裂成两个或多个中等质量的核,如原子弹,原子反应堆;另一个是轻核聚变成中等质量的核,如氢弹。所以,所谓原子能,实际上主要指原子核结合能发生变化时释放的能量。

1.1.4 稳定核素和不稳定核素

核素可分为稳定核素和不稳定核素(具有放射性)两类,已发现的天然稳定核素只有 270 余种,而放射性核素约有 2 500 种,其中绝大部分是人工制造的,在原子能工业和一般工、农、医、资源勘探和科学研究中应用的放射性核素有 250 种。

原子序数 $Z \leq 82$ 的核元素,每种核素都有一个或几个稳定同位素(除铊和钽外); $Z \geq 83$ 的核素只有放射性核素, $Z > 92$ 的核素称作超铀核素。

1.2 核衰变

一种核素的原子核能自发地放出某种射线(粒子)而转变为另一种核素的原子核或另一种能量状态的原子核,这个过程称为核衰变(也称为放射性衰变)。这种核素称为放射性核素。原子核的衰变方式主要有 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变(γ 跃迁)。

1.2.1 α 衰变

放射性核素的原子核自发地放射出 α 粒子而转变成另一种核素的原子核的过程叫 α 衰变。放出的 α 射线(α 粒子)是高速运动的氦原子核(${}^4_2\text{He}$),它由两个中子和两个质子组成,带两个正电荷。天然 α 放射性核素绝大部分属于 $Z > 82$ 的核素。

放射性核素经 α 衰变后,它的质量数 A 降低 4 个单位,原子序数 Z 降低 2 个单位,若以 X 表示母核核素, Y 表示子核核素,则 α 衰变式可表示为

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + \alpha + Q_\alpha \quad (1.2.1)$$

式中, Q_α 代表衰变能,它是母核在衰变过程中所放出的能量,即 α 粒子的动能与子核反冲能之和。

由于绝大多数天然 α 放射性核素均属于 $Z > 82$ 的核素,子核质量比 α 粒子质量大很多,因此,绝大部分衰变能由 α 粒子携带,子核以反冲动能形式仅携带了很小部分的能量。

实验发现,大多数 α 衰变的核素都放出几组不同能量的 α 粒子,而各组 α 粒子能量 E_α 都分别对应着不同的衰变能 Q 。同种核素的原子核进行 α 衰变时,放出不同的衰变能,这就使子核处于不同的能量状态。实验表明,核素的 α 射线谱是分立的,这说明原子核的能量状态是分立的,即原子核有不同的能级。研究 α 射线谱,可以获得核能级数据,从而得到核内部结构的



信息。

处于激发态的核若以放射出 γ 光子的形式退激,则 γ 光子能量等于退激前后核能级之差,而各核能级之差等于相应的各 α 衰变能之差。自然界除了少数几个单能的 α 放射性核素外,其余的伴随 α 衰变时一般都会辐射 γ 射线。

常用衰变纲图来表示原子核各种衰变(跃迁)的初始过程。一个完整的衰变纲图包括核素的所有衰变方式,它们的分支比、辐射能量、放出射线的次序以及任何一个中间态可测的半衰期等,见图 1-1。

1.2.2 β 衰变

放射性核素的原子核自发地放出粒子或俘获一个轨道电子而变成另一种核素的原子核的过程称为 β 衰变。 β 衰变分为 β^- 衰变、 β^+ 衰变、轨道电子俘获(EC)三种形式。

1. β^- 衰变

原子核自发地放射出 β^- 粒子,变成另一种核素的原子核,这种物理过程称为 β^- 衰变。新生成的核素原子序数增加 1,而质量数不变。

β^- 粒子,也称 β 射线。它是来自原子核内部的高速运动的电子,其最大速度可接近光速。原子核进行 β^- 衰变放出 β^- 粒子的同时,还放出反中微子(记作 $\bar{\nu}$)。反中微子是中微子的反粒子,是一种静止质量几乎为零的中性粒子。 β^- 衰变的本质是核内一个中子变为一个质子的过程,该过程可表示为

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (1.2.2)$$

β^- 衰变式可写成

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e + \bar{\nu} + Q_{\beta^-} \quad (1.2.3)$$

式中, ${}_Z^AX$, ${}_{Z+1}^AY$, ${}_{-1}^0e$, $\bar{\nu}$ 分别代表母核、子核、 β^- 粒子、反中微子; Q_{β^-} 代表 β^- 衰变能,并以动能形式由子核、 β^- 粒子和中微子三种衰变产物分配。

因三种产物发射的方向及构成的角度可以是任意的,所以每种产物所带走的能量是不固定的。因为子核质量比 β^- 粒子质量大几倍乃至几十万倍,而且中微子静止质量为零,所以子核携带的能量极微小,衰变能基本上由中微子和 β^- 粒子携带。所以 β^- 粒子是连续能谱。在连续谱曲线中的 $E_{\beta^-} \approx \frac{1}{3} Q_{\beta^-}$ 处有一最大强度值。

应指出,一般图表给出的 β^- 射线的能量是指一组 β^- 射线的最大能量 E_m 。有些核素由母核基态经 β^- 衰变到子核基态时,只有一组 β^- 射线放出,且没有 γ 射线伴随,如 ${}^{204}_{81}\text{Tl}$, ${}^{35}_{17}\text{Cl}$, ${}^{33}_{15}\text{P}$, ${}^{14}_6\text{C}$ 等。有许多核素进行衰变时可放出几组能量不同的 β^- 射线,每组 β^- 射线的最大能量 E_m

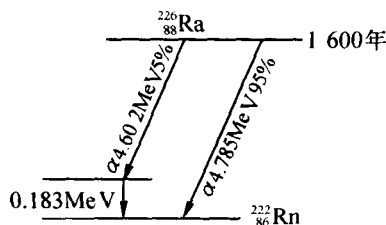


图 1-1 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变纲图



都分别对应子核的一个能级;除基态外,任何激发态能级,都会发生 γ 辐射而使子核退激,因而伴随这种 β^- 衰变常有 γ 射线放出。如 $^{135}_{53}\text{I}$, $^{60}_{27}\text{Co}$ 及 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 等。 $^{40}_{19}\text{K}$ 的衰变纲图见图1-2, 89%的 $^{40}_{19}\text{K}$ 经 β^- 衰变生成 $^{40}_{20}\text{Ca}$, 11%经轨道电子俘获方式衰变并放出 γ 射线而生成 $^{40}_{18}\text{Ar}$ 。

2. β^+ 衰变

放射性原子核自发地放出 β^+ 粒子变成另一种核素原子核的过程称为 β^+ 衰变。经 β^+ 衰变生成的子核与母核有相同的质量数,但原子序数减少1。

β^+ 粒子带一个正电荷,其静止质量与电子质量相同。它极不稳定,瞬间便转化为光子(一般放出两个能量为0.511 MeV而方向相反的光子)。此过程称为正(阳)电子湮灭。

β^+ 衰变时在放出 β^+ 粒子的同时还放出中微子,记为 ν ,它的静止质量几乎为零。中微子与反中微子的质量、电荷、自旋、磁矩均相同。

β^+ 衰变的实质是核内一个质子转变为一个中子的跃迁过程。在该过程中产生一个正电子和一个中微子,可以用下式表示为

$$P \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (1.2.4)$$

天然放射性核素中没有发现 β^+ 衰变体,只在人工放射性核素中存在 β^+ 衰变。 β^+ 衰变式可写成

$$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + ^0_{+1}\text{e} + \nu + Q_{\beta^+} \quad (1.2.5)$$

式中, ^A_ZX , $^A_{Z-1}\text{Y}$, $^0_{+1}\text{e}$, ν 分别表示母核、子核、 β^+ 粒子、中微子; Q_{β^+} 表示 β^+ 衰变能。

β^+ 衰变产物有三个:子核、 β^+ 粒子、中微子。衰变能 Q_{β^+} 被这三者携带。因为子核、 β^+ 粒子、中微子运动方向间的夹角是任意的,因而能量也不固定。又因为子核质量较 β^+ 粒子大许多,故子核携带的能量极少。所以 β^+ 与 β^- 衰变的能谱类似, β^+ 射线能谱也是连续谱。与 β^- 谱不同的是:(1) β^+ 能谱曲线的最大强度对应于 $0.4E_m$;(2)衰变能 Q_{β^+} 不是母核与子核静止质量能之差,而是这一差值减去 $2m_0c^2$ 。 β^+ 衰变纲图如图1-3所示。

3. 电子俘获(EC)

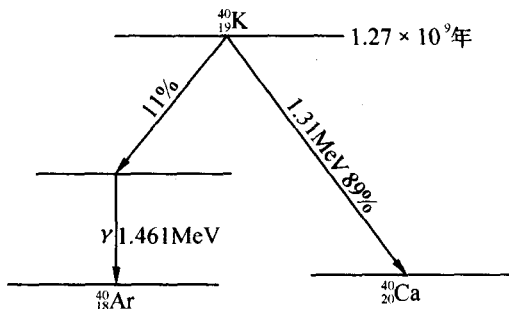


图1-2 $^{40}_{19}\text{K}$ 衰变纲图

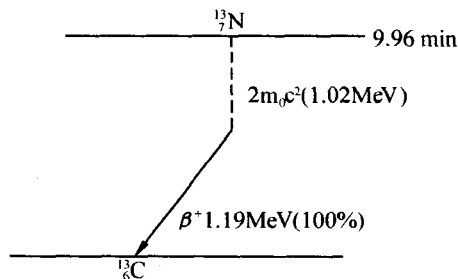


图1-3 $^{13}_7\text{N}$ 的衰变纲图



电子俘获也称轨道电子俘获,即原子核俘获一个轨道电子,使核内的一个质子转变成一个中子并放出中微子的过程。原子核发生电子俘获后子核原子序数 Z 减少 1,生成母核的同量异位素原子核。用公式可表示为

$$P + {}^0_{-1}e \rightarrow n + \nu \quad (1.2.6)$$

如果 K 层电子被俘获则称 K 俘获,如果 L 层电子被俘获则称 L 俘获……以此类推。但以 K 层电子被俘获的几率最大(比 L 俘获几率大 100 倍),因此也常把电子俘获统称为 K 俘获。

电子俘获衰变式可写成

$${}_Z^AX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu + Q_k \quad (1.2.7)$$

式中, ${}_Z^AX$, ${}_{Z-1}^AY$, ${}^0_{-1}e$, ν 分别代表母核、子核、轨道电子和中微子; Q_k 表示电子俘获衰变能。

有些核素能同时发生 β^+ , β^- , EC 三种衰变,如 ${}^{64}_{29}\text{Cu}$, ${}^{106}_{47}\text{Ag}$, ${}^{108}_{47}\text{Ag}$, ${}^{196}_{79}\text{Au}$, 也有些核素能同时发生 α , β 两种衰变,如 ${}^{241}_{94}\text{Pu}$, ${}^{215}_{84}\text{Po}$, ${}^{216}_{84}\text{Po}$ 。

因为电子俘获衰变产物只有子核及中微子,故衰变能几乎完全由中微子带走,因而在 EC 衰变(轨道电子俘获)中放出的中微子能谱是单色的,且 $E_\nu \approx Q_k$ 。

EC 衰变纲图如图 1-2(${}^{40}_{19}\text{K}$ 衰变纲图)所示。以向左下斜线表示 EC 衰变。若子核处于激发态,则退激时发出 γ 射线。电子俘获后,因内壳层缺少一个轨道电子,原子处于激发态,激发态的原子不稳定,将以放出标识(特征)X 射线或俄歇(Auger)电子方式退激。以 K 层电子被核俘获为例(因 K 层俘获发生几率最大),当 K 层因电子被俘而出现一空穴后,较高能级壳层(例如 L 层)的一个电子跃迁到 K 层空穴,多余能量则以两种可能途径释放。一是以 X 射线形式放出,称标识 X 射线,因为它只与元素的原子序数有关,所以 X 射线能量的大小决定于两电子壳层结合能之差,即 $h\nu = W_K - M_L$ (h 为普朗克常数, ν 为 X 射线频率, W_K 为 K 层电子结合能, M_L 为 L 层电子结合能),故为单色;另一途径是将多余能量 $h\nu$ 传给同层或更高层电子,使其获得能量脱离原子核束缚而成为自由电子,称为俄歇电子。俄歇电子的能量应为 $h\nu$ 与俄歇电子所在层电子结合能之差。可见,俄歇电子也是单能的。

因为中微子不易被观测到,所以,只要观测到特征 X 射线或俄歇电子,就可知有电子俘获发生,只要测知 X 射线或俄歇电子能量就可知有发生电子俘获的核素。一般地说,轻元素发射俄歇电子的几率较重元素大。

1.2.3 γ 跃迁和内转换

处于激发态的原子核不稳定,它通过直接退激或级联退激回到基态。退激方式有 γ 跃迁(放出 γ 光子)和内转换(放出内转换电子)。原子核处于激发状态的寿命一般都极短暂,多为 $10^{-13}\text{s} \sim 10^{-14}\text{s}$ 。有些原子核激发态维持时间较长,其寿命可用仪器测出,因而可作为独立核素。这类具有相同质量数和相同原子序数而能量状态有明显差别的核素,称为同质异能素。

1. γ 跃迁



激发态的原子核不稳定,通过放出 γ 光子的形式,向较低激发态或基态跃迁的过程称作 γ 跃迁,也称 γ 衰变。同质异能素间的 γ 跃迁称为同质异能跃迁。

同质异能跃迁可表示为



例如, ${}^{60m}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$ ($E_\gamma = 1.33 \text{ MeV}, 1.17 \text{ MeV}$)。

γ 衰变能 Q_γ 就是原子核进行 γ 衰变前后两能级之差,即

$$Q_\gamma = E_n - E_i \quad (1.2.9)$$

式中, E_n, E_i 分别表示原子核在 γ 衰变前、后的能级。

因为 Q_γ 是核能级差,所以 γ 光子能量 E_γ 是单色(单能)的。事实上,借助测定 γ 光子能量可以了解核能级状况。多数核素,在衰变时可能发射不止一种能量的 γ 射线,如 ${}^{60m}_{27}\text{Co}$ 等,但不论有多少能量的 γ 射线,其能量都是不连续的,因而 γ 能谱是线状谱(分立谱)。

2. 内转换

内转换是激发态的原子核与壳层电子发生电磁相互作用,把原子核激发能直接传给核外某壳层一电子(以 K 层电子几率最大),使其脱离原子核的束缚而成为自由电子。这种物理过程叫做内转换,记作 IC 。释放的电子称为内转换电子。

内转换电子的能量 E_e 就是原子核发生跃迁前、后两能级的级差 ΔE 与核外电子结合能 W_i 之差值,即

$$E_e = E_n - E_i - W_i = \Delta E - W_i \quad (1.2.10)$$

因为核能级、电子结合能都是某个定值,所以内转换电子的能量也是某个定值,即能量 E_e 是单色的。这与 β 射线谱是连续的有极大区别。通过内转换电子的测定也可测知原子核能级。

3. 穆斯堡尔效应

穆斯堡尔 1958 年发现,将发射 γ 光子的原子核和吸收 γ 光子的原子核分别置入固体晶体,使其尽可能固定,与晶体形成一个整体,因而发射 γ 光子或吸收 γ 光子时的反冲体不是一个原子核,而是整个晶体,故反冲能极小。此无反冲共振散射(吸收)现象被称为穆斯堡尔效应。

处于激发态的原子核进行 γ 跃迁时,原子核的反冲动能 E_R 与 E_γ 比较,可以忽略不计。若将 E_R 与核能级宽度比较,则是不可忽视的能量。

核的激发能级有一定宽度, γ 跃迁时放出的 γ 射线能量也有一定的展宽,称之为 γ 谱的自然展宽。原则上,通过测量 γ 射线的自然展宽可以测定激发能级的宽度。但若直接观测 γ 射线的自然宽度,则要求 γ 谱仪的能量分辨率极高。目前尚不可能直接观测,只能间接观测。方法之一是测量 γ 射线共振吸收。

当入射 γ 射线的能量等于原子核激发能级的能量时,就会发生 γ 射线的共振吸收。但是,