



压水堆核电站操纵人员基础理论培训系列教材

核反应堆物理

Nuclear Reactor Physics

李泽华 编著



原子能出版社

压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材

核反应堆物理

Nuclear Reactor Physics

李泽华 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆物理 / 李泽华编著. —北京:原子能出版社,
2010. 1
(压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材)
ISBN 978-7-5022-4794-2
I. 核… II. 李… III. 反应堆物理学 IV. TL32
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012579 号

内 容 简 介

本书主要介绍核反应堆物理的基础理论知识。全书共分八章,包括反应堆的核物理基础、中子的慢化和扩散、核反应堆临界理论、反应性随时间的变化、温度效应和反应性控制、核反应堆动力学、堆芯燃料管理和反应堆启动中的物理问题等。

本书是压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材之一,也可供从事核电工程的相关技术人员及高等院校核工程专业的师生参考。

核反应堆物理

策 划 刘 朔 张 琳
出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 张 琳
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 15.125 字 数 374 千字
版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-4794-2
印 数 1—2500 定 价 65.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>
发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com
版权所有 侵权必究

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

编 委 会

主 任：王乃彦

副主任：李和香 李济民 肖 武

顾 问：邵向业 罗璋琳 李文焱 郑福裕 浦胜娣

委 员：（按姓氏拼音顺序排列）

丁云峰 顾颖宾 郭文琪 韩延德 郝老迷

黄兴蓉 李和香 李吉根 李济民 李文焱

李泽华 刘国发 罗璋琳 浦胜娣 阮於珍

邵向业 王 略 王乃彦 夏延龄 肖 武

阎克智 俞尔俊 臧希年 赵郁森 郑福裕

周一东

编委会办公室

主 任：肖 武

成 员：章 超 高小林 梁超梅 周 萍 宋 慧

樊 勤 付 冉

《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》

校审专家

(按姓氏拼音顺序排列)

一审专家:

高秀清	高永春	李文焱	李永章	刘耕国
罗璋琳	彭木彰	浦胜娣	吴炳祥	夏益华
张培升	赵兆颐			

二审专家:

陈 跃	付卫彬	黄志军	蒋祖跃	李守平
马明泽	毛正宥	潘泽飞	唐锡文	王瑞正
魏 挺	薛峻峰	杨 炜	朱晓斌	

统审专家:

曹述栋	丁卫东	丁云峰	宫广臣	苟 峰
顾颖宾	郭利民	何小剑	黄世强	廖伟明
刘志勇	马明泽	毛正宥	缪亚民	戚屯锋
苏圣兵	孙光弟	王晓航	魏国良	吴 放
吴 岗	杨昭刚	俞卓平	张福宝	张志雄
周卫红				

前 言

核电厂操纵人员的素质关系到核电厂的安全运营,而培训工作是保证人员素质的基本环节之一。为适应当前我国大力发展核电的形势,保证核电厂操纵人员的培训质量,使基础理论培训满足国家核安全法规与行业规定的要求,便于对培训过程实施统一规范的管理,国家主管部门决定编写一套适用于核电厂操纵人员的基础理论培训教材——《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》。鉴于核工业研究生部在近20年的核电基础理论培训中,积累了丰富的教学及管理经验,具有稳定的师资队伍和较完整的教材体系,故由核工业研究生部具体承担教材编写的组织工作。

为了编好操纵人员培训教材,核工业研究生部牵头组织长期从事核电培训的专家、教授进行认真分析和讨论,根据我国现有堆型的特点,从压水堆核电厂入手,由核电厂、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家共同参与编写。这套教材共十二册,包括《核反应堆物理》、《核反应堆热工水力学》、《核电厂辐射防护》、《核电厂材料》、《核电厂通用机械设备》、《核电厂水化学》、《核电厂电气原理与设备》、《核电厂核蒸汽供应系统》、《核电厂蒸汽动力转换系统》、《核电厂仪表与控制》、《核电厂核安全》、《核电厂运行概论》。这套教材内容以核电厂相关专业的基本概念、基本原理及基础知识为主,可为操纵人员下一步培训打下良好的理论基础。

本套教材是经过充分准备、精心组织而完成的。首先,根据核电厂操纵人员的培训目标,按照《核电厂操纵人员的执照考核标准》(EJ/T 1043—2004)的相关内容和要求进行课程设置、制定教材编写原则、明确每种教材应涵盖的内容;在总结以往教学经验的基础上,充分征求各核电厂专家的意见,形成了内容完整、要求明确的教材编写大纲。其次,聘请既有较高的专业水平又有较强的实际工作能力和丰富的教学

经验的专家担任本套教材的编者,并为编者提供教材编写技巧、《著作权法》等相关知识的讲座和模拟机现场观摩学习;编者根据教材编写原则和大纲编写具体内容,力求做到既符合学员的认知规律又贴近核电站的实际。再次,请理论功底扎实、教学经验丰富的教授、专家根据教学原则对教材内容的准确性、系统性等进行审查,并广泛征求任课教师的意见;同时请经验丰富的核电站专家结合实际进行审查。编者根据上述意见对教材进行认真修改后,再征求各方意见,最终由操纵人员资格审查委员会审定。

本套教材中《核电站电气原理与设备》由江苏核电有限公司具有丰富实际工作经验的专家编写。其余的各分册由核工业研究生部多年从事核电培训教学工作、教学及实践经验丰富的教授、专家编写。

在本套教材的编审过程中,核工业研究生部的任课教师们认真参与教材的编审和研讨;江苏核电有限公司专门成立“电气教材编写专项组”,精心组织编审;各核电站积极推荐审稿专家,提供编写教材所需资料;核电秦山联营有限公司组织一线人员与编者进行对口交流,创造条件为编者提供模拟机现场演示与讲解;各核电站、核动力运行研究所、操纵人员资格审查委员会等单位的专家们认真审稿,提出许多宝贵意见;原子能出版社自始至终给予通力合作,提前介入指导,缩短了出版周期。

本套教材的编制出版,凝聚着编、审、校、印及组织管理人员的大量心血,同时得到各相关单位的大力支持和热情帮助,在此深表谢意!

编委会

2010年11月

编者的话

《核反应堆物理》是根据核电基础理论培训教材编写大纲要求,在广泛听取核电专家意见的基础上编写的,是《压水堆核电厂操纵人员基础理论培训系列教材》之一,也可供核电厂相关人员参考。

本书根据《核动力厂运行安全规定》(HAF103)和《核电厂人员的配备、招聘、培训和授权》(HAD103/05)的要求,内容以基础理论知识、基本概念和基本原理为主,涵盖了《核电厂操纵人员的执照考核》标准(EJ/T 1043—2004)附录A.1.4~A.1.14的内容。

本书以核工业研究生部核电厂操纵人员培训讲义《反应堆物理》为基础,结合任课老师的教学实践作了修改和补充。在编写上,尽量从原理上着重讲清楚基本概念,并注意联系实际,将这些基本概念与核电厂的运行实际相结合。在内容选择和安排上,为便于读者理解,力求做到由浅入深,尽量避免艰深的理论和繁杂的公式推导,做到既重点突出,又具有一定的全面性、系统性。

全书共分8章。前3章介绍了反应堆稳态物理,包括了反应堆物理相关的原子核物理基础知识、中子在反应堆内的运动规律以及反应堆临界的基本知识和理论。后5章主要介绍运行中反应堆物理特性的变化,为反应堆的安全运行提供有关知识。第4章介绍反应性随时间的变化,包括裂变产物的中毒效应和燃料的燃耗效应。第5章介绍反应性的温度效应和反应性的控制。第6章介绍了以点堆模型为基础的反应堆动力学。最后两章介绍了燃料管理和反应堆物理启动的相关知识。

在编写的过程中,邵向业教授对初稿提出了建议和意见,罗璋琳、毛正宥、潘泽飞等专家审校了全文,在此表示诚挚的谢意。

书中如有不妥之处,恳请批评指正。

编者

2010年11月

目 录

第 1 章 反应堆的核物理基础	(1)
1.1 物质的组成	(1)
1.1.1 原子核的组成	(1)
1.1.2 同位素	(2)
1.2 原子核的衰变	(3)
1.2.1 核力	(3)
1.2.2 衰变类型	(4)
1.2.3 衰变规律	(5)
1.3 结合能与原子核的稳定性	(8)
1.3.1 质量亏损	(8)
1.3.2 结合能和比结合能	(9)
1.3.3 原子核的稳定性与核能	(11)
1.4 中子与原子核的相互作用	(12)
1.4.1 中子	(12)
1.4.2 中子-核反应	(13)
1.4.3 中子与原子核的作用机制	(13)
1.4.4 中子散射	(15)
1.4.5 中子吸收	(16)
1.5 核截面和核反应率	(18)
1.5.1 微观截面	(18)
1.5.2 宏观截面与平均自由程	(19)
1.5.3 中子通量密度、核反应率和平均截面	(22)
1.5.4 截面随中子能量的变化	(24)
1.5.5 核数据库	(27)
1.6 核反应的共振现象	(28)
1.6.1 共振截面	(28)
1.6.2 多普勒效应	(29)
1.7 核裂变反应	(30)
1.7.1 核裂变机理	(30)
1.7.2 裂变截面	(31)
1.7.3 裂变产物	(33)
1.7.4 裂变中子	(35)

1.7.5	裂变能量的释放、反应堆功率与中子通量密度的关系	(38)
1.7.6	衰变热	(40)
	复习题	(43)
第2章	中子慢化和扩散	(44)
2.1	链式裂变反应	(44)
2.1.1	热中子反应堆内的中子循环	(44)
2.1.2	自持链式裂变反应的临界条件	(47)
2.2	中子的慢化	(48)
2.2.1	弹性碰撞理论	(49)
2.2.2	平均对数能降	(53)
2.2.3	无限均匀介质内中子慢化能谱	(54)
2.2.4	连续慢化年龄近似	(56)
2.2.5	中子年龄和慢化长度的统计意义	(57)
2.2.6	慢化剂的性质	(60)
2.3	中子的扩散	(60)
2.3.1	概述	(60)
2.3.2	斐克定律	(61)
2.3.3	中子的泄漏	(63)
2.3.4	中子扩散方程	(64)
2.3.5	扩散方程的边界条件	(65)
2.3.6	扩散方程的简单输运修正	(66)
2.3.7	点源产生的单速中子扩散	(66)
2.3.8	扩散长度、徙动面积和徙动长度	(68)
	复习题	(70)
第3章	核反应堆临界理论	(71)
3.1	均匀裸堆的单群理论	(71)
3.1.1	单群扩散方程	(71)
3.1.2	平板裸堆	(72)
3.1.3	有限高圆柱形均匀裸堆	(73)
3.1.4	单群临界方程与临界条件	(76)
3.1.5	中子通量密度分布不均匀系数	(79)
3.1.6	单群修正模型	(80)
3.2	有反射层的均匀堆	(83)
3.2.1	反射层作用	(83)
3.2.2	反射层节省	(84)

3.2.3	反射层对中子通量密度分布的影响	(85)
3.2.4	反照率	(87)
3.3	分群扩散理论	(88)
3.3.1	分群扩散理论和多群中子扩散方程	(88)
3.3.2	群常数	(89)
3.3.3	两群扩散方程	(90)
3.3.4	两群扩散方程的解	(91)
3.4	非均匀反应堆	(95)
3.4.1	栅格的非均匀效应	(95)
3.4.2	无限增殖因数的分析	(97)
3.5	PWR 中子通量密度分布的展平	(99)
	复习题	(100)
第4章	反应性随时间变化	(102)
4.1	反应性的定义和单位	(102)
4.2	裂变产物的中毒	(103)
4.2.1	毒物对反应性的影响	(103)
4.2.2	^{135}Xe 的中毒	(104)
4.2.3	^{149}Sm 的毒性效应	(114)
4.2.4	其他裂变产物的中毒	(117)
4.3	燃料的燃耗效应	(118)
4.3.1	物理过程	(118)
4.3.2	燃耗深度	(120)
4.3.3	反应性随燃耗深度的变化和堆芯寿期	(121)
4.4	核燃料的转换与增殖	(122)
	复习题	(125)
第5章	温度效应和反应性控制	(126)
5.1	反应性的温度效应	(126)
5.1.1	反应性温度系数及其对核反应堆稳定性的影响	(126)
5.1.2	燃料反应性温度系数	(128)
5.1.3	慢化剂反应性温度系数	(132)
5.1.4	慢化剂压力系数	(136)
5.1.5	空泡系数和流量系数	(136)
5.1.6	功率系数和功率亏损	(137)
5.2	反应性控制任务	(138)
5.2.1	反应性控制中所用的几个物理量	(139)

5.2.2	反应性控制原理	(140)
5.3	控制棒控制	(141)
5.3.1	控制棒控制特点	(141)
5.3.2	控制棒材料	(141)
5.3.3	控制棒价值、积分价值和微分价值	(144)
5.3.4	控制棒插入深度对堆芯功率分布的影响	(146)
5.3.5	控制棒的干涉效应	(147)
5.3.6	“卡棒”准则	(147)
5.3.7	控制棒提升过程中的重叠	(148)
5.4	可燃毒物控制	(149)
5.4.1	控制特点	(149)
5.4.2	可燃毒物材料	(149)
5.4.3	可燃毒物的布置	(150)
5.5	化学补偿控制	(152)
5.5.1	控制特点	(152)
5.5.2	硼微分价值	(154)
5.5.3	硼的稀释和硼化	(155)
	复习题	(157)

第 6 章	核反应堆动力学	(158)
6.1	中子动力学基础	(158)
6.1.1	中子寿命	(158)
6.1.2	只考虑瞬发中子的中子动力学行为	(160)
6.1.3	缓发中子效应	(161)
6.1.4	反应堆周期及其测量	(163)
6.1.5	启动率	(165)
6.2	点堆动力学	(167)
6.2.1	基本方程	(167)
6.2.2	方程的讨论	(170)
6.3	小反应性阶跃变化时点堆动力学特征	(171)
6.3.1	有外源的稳定态	(171)
6.3.2	反应性小阶跃变化时的中子密度响应(多组缓发中子)	(173)
6.3.3	反应性小阶跃变化时的中子密度响应(单组缓发中子近似)	(177)
6.4	反应性线性引入时中子密度的响应	(181)
6.5	倒时方程	(186)
6.6	瞬发临界	(186)
6.7	反应性测量的动力学方法	(188)

6.7.1	渐近周期测定	(188)
6.7.2	落棒法	(188)
6.7.3	逆动态法	(188)
6.8	反应堆动态的空间效应	(189)
	复习题	(190)
第7章	核燃料循环和堆芯燃料管理概述	(191)
7.1	核燃料循环	(191)
7.2	堆芯燃料管理	(193)
7.2.1	基本物理量	(193)
7.2.2	换料方式概述	(194)
7.2.3	压水堆装料换料布置方式	(195)
7.3	压水堆换料的优化研究	(200)
7.3.1	堆芯燃料管理计算	(201)
7.3.2	堆芯燃料管理要达到的目的	(202)
7.3.3	优化中的约束条件	(203)
7.3.4	优化问题的特点	(203)
7.3.5	研究发展中的优化方法	(203)
	复习题	(204)
第8章	反应堆启动中的若干物理问题	(205)
8.1	反应堆的物理启动	(205)
8.1.1	物理启动试验的目的和任务	(205)
8.1.2	法规要求	(206)
8.2	临界试验	(206)
8.2.1	原理与方法	(206)
8.2.2	临界点的判断	(209)
8.2.3	中子源	(210)
8.2.4	临界试验中的安全要求	(211)
8.3	停堆后的再启动	(212)
8.3.1	冷启动	(212)
8.3.2	热启动	(213)
	复习题	(213)
附录	(214)
附录 I	国际单位制(SI)	(214)
附录 II	物理常数	(214)

附录 III	换算因数.....	(214)
附录 IV	元素和一些分子的截面以及核参数.....	(215)
附录 V	非 $1/v$ 修正因数	(218)
附录 VI	一些有用的数学公式.....	(218)
附录 VII	贝塞尔函数.....	(219)
索引	(222)
参考文献	(227)

第 1 章 反应堆的核物理基础

反应堆是利用易裂变材料,产生可控的、自持的、链式裂变反应的装置。裂变的同时,释放大量的核能、新的核素以及次级中子。

反应堆中有燃料、慢化剂、结构材料和控制材料等。反应堆一旦运行,堆内中子要与这些材料的原子核发生各种类型的相互作用,产生新核,发生一系列的放射性衰变现象。因此,反应堆是一个强大的各种粒子(中子、 α 粒子、 β 粒子和 γ 粒子)的辐照场。同时,反应堆的运行是建立在中子与堆内物质相互作用的基础上。

本章将介绍与反应堆有关的原子核物理基础知识,主要是中子物理学基础知识。

首先,对物质的组成、原子核衰变、结合能与原子核的稳定性作一简单介绍。然后,介绍中子与原子核的各种核反应及其规律。最后,对核裂变的机理作了介绍,并给出了反应堆热功率与中子通量密度的关系以及衰变热的计算公式。

1.1 物质的组成

宇宙中任何物质都是由一百多种元素形成的原子组成。原子是保持物质化学性质的最小粒子,但原子并不是物质组成的最基本的单位,原子作为客观实体存在,它的半径是一亿分之一厘米(10^{-10} m),但原子并不是不可再分的最小微粒。今天人类对原子的认识:原子又是由原子核(原子的核心)及核外电子组成,原子核的半径约为 10^{-15} m,原子核与核外的电子形成一个“小太阳系”。

1.1.1 原子核的组成

原子由原子核和核周围的电子组成。原子核带正电,电子带负电。由于原子核所带的正电荷和电子所带的负电荷的绝对值相等,因而原子是电中性的。原子核直径仅是原子直径的万分之一,但原子的质量几乎全部集中在原子核之中。

原子核由质子和中子组成,质子带一个单位的正电荷,其电量等于电子电荷的电量。这种粒子实际上就是氢原子的原子核,也就是去掉其唯一电子的氢原子。中子不带电。原子核中的质子和中子统称核子。核子的质量用原子质量单位表示,记作 u(unit 的缩写)。自 1960 年 1 月 1 日起,国际物理学会议规定,1 个原子质量单位(u)定义是中性的 ^{12}C 原子质量的 1/12。质子、中子和电子的质量分别为

$$m_p = 1.007\ 277\ \text{u}$$

$$m_n = 1.008\ 665\ \text{u}$$

$$m_e = 0.000\ 549\ \text{u}$$

$1\ \text{u} = (1.660\ 565\ 5 \pm 0.000\ 008\ 6) \times 10^{-27}\ \text{kg}$ 。用 kg 为单位来表示这些粒子的质量,则

$$m_p = 1.672\ 648 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

$$m_n = 1.674\ 954 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

$$m_e = 9.109\ 53 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

由此可见,中子稍重于质子。同时由于电子的质量很轻,所以整个原子的质量几乎就是原子核中质子和中子的质量之和。

设某一原子核由 Z 个质子和 N 个中子组成, Z 和 N 分别表示该元素的原子序数和原子核内的中子数。原子核内核子(即中子和质子)的总数等于 $Z+N=A$,此处 A 为该原子核的质量数。 Z, N, A 皆为正整数。

1.1.2 同位素

元素的化学性质取决于该元素的原子序数(即原子核中的质子数)。这是因为物质的化学性质取决于核周围的(轨道)电子,而其电子的数目必须等于原子核中的质子数,因为整个原子是电中性的。因此,只要原子核内包含同样数量的质子数,即具有相同的原子序数,即使其质量数不同(原子核内具有不同的中子数),其化学性质基本上也是相同,但它们的核特性常常具有明显的差别。这些含相同质子数和不同质量数的原子核的元素叫做同位素。大多数元素都有几种同位素,它们在化学性质方面一般无法区别,但却具有不同的核特性。

具有 A 个核子, Z 个质子的原子核常用 ${}_Z^A X$ 来表示,其中 X 为元素的符号。例如, ${}_{92}^{235} \text{U}$ 表示该铀原子核内有 92 个质子,235 个核子(质子和中子总数)。显然,原子核内有 $235-92=143$ 个中子。 ${}_{92}^{238} \text{U}$ 原子核内也有 92 个质子,但共有 238 个核子(质子和中子总数)。因而其原子核内的中子数为 $238-92=146$ 个。它们在元素周期表中占有同一个位置。由于在元素 X 的表示中,其质量数 A 隐含了其原子序数 Z ,经常只写成 ${}^A X$,例如 ${}_{92}^{235} \text{U}$ 也可写成 ${}^{235} \text{U}$ 。在热中子的轰击下 ${}^{235} \text{U}$ 原子核能分裂成 2 个碎片,同时释放出大量的能量,它们被称为易裂变物质,既可用于核反应堆的燃料,也可用作核武器的装料。而在热中子的轰击下, ${}^{238} \text{U}$ 不能产生裂变反应,它俘获中子后生成 ${}^{239} \text{U}$,经过 2 次 β^- 衰变而转化为 ${}^{239} \text{Pu}$,而 ${}^{239} \text{Pu}$ 却是另一种很重要的裂变物质。 ${}_{92}^{238} \text{U}$ 被称为可裂变物质,因为在大于 1.1 MeV 能量的中子轰击下, ${}_{92}^{238} \text{U}$ 能发生裂变反应, ${}_{92}^{238} \text{U}$ 有时也称为可转换物质。由此可见, ${}^{235} \text{U}$ 和 ${}^{238} \text{U}$ 具有不同的核特性,但是它们的化学性质却极为相似。

目前,铀是能通过裂变释放核能的最重要的元素之一。它在自然界中至少存在着 3 种同位素,它们的质量数分别为 234,235 和 238。表 1-1 给出了天然铀中存在的 3 种同位素丰度(所谓丰度是指某一同位素在其所属的天然元素中占的原子数百分比)以及它们的质量。

表 1-1 天然铀同位素成分

质量数	丰度/%	同位素质量
234	0.005 5	234.041 0
235	0.720	235.043 9
238	99.274	238.050 8

氢有 3 种同位素,氕(${}^1 \text{H}$)、氘(${}^2 \text{H}[\text{D}]$)和氚(${}^3 \text{H}[\text{T}]$)。自然界中只存在 ${}^1 \text{H}$ 、 ${}^2 \text{H}$ 两种同位素,它们的丰度分别为 99.985 2%和 0.014 8%。我们常称 ${}^1 \text{H}$ 为氢。氘和氧可化合成重水(D_2O),可以用作反应堆的慢化剂和冷却剂。例如加拿大的 CANDU 反应堆,其慢化剂和冷却剂都是重水。氚在自然界含量极微,但可通过核反应人工制取,氚也可用作武器的装料。

氧有 8 种同位素,其中在自然界常见的只有 ^{16}O 、 ^{17}O 和 ^{18}O 是稳定的,相应的丰度分别为 99.756%、0.039%和 0.205%。另外 5 种同位素不稳定,其中 ^{13}O 、 ^{14}O 和 ^{15}O 3 种要发生 β^+ 衰变,它们的半衰期分别为 0.008 7 s、70.43 s 和 122 s。另外两种为 ^{19}O 和 ^{20}O ,要进行 β^- 衰变,它们的半衰期分别为 26.9 s 和 13.57 s。

核素指具有特定原子序数(即质子数)、质量数(即核子数)和核能态,而且其平均寿命长到足以被观察到的一类原子。核素种类繁多,通常包括 4 大类:同位素、同核异能素、同中子素和同量异位素。核素用 ${}^A_Z\text{X}_N$ 符号表示,与同位素符号相比,多了一个中子数 N 。所以核素不是同位素的同义词。

1.2 原子核的衰变

到目前为止,自然界共发现 114 种元素约 2 000 种核素中,其中只有 274 种为稳定核素,其余都为不稳定的核素。所谓不稳定,指这些核要进行自发放射性衰变,放出 β^\pm 、 α 、 γ 射线、质子或中子(n)。

从钋(原子序数 84)开始的高原子量元素,例如 ${}_{88}\text{Ra}$ 、 ${}_{90}\text{Th}$ 和 ${}_{92}\text{U}$,则全部由不稳定的放射性核素所组成,这部分核素也称为天然放射性核素。

除了上面提到的放射性物质以外,在最近几年中还制造了已知元素的人造放射性同位素。这些人工制造出来的元素,都是不稳定的,这部分核素也称为人工放射性核素。

所谓放射性,就是原子核自发地发射各种射线的现象,即原子核不受外界影响自发地通过核辐射(即放出 β^\pm 、 α 、 γ 射线、质子和中子等其他粒子)而衰变的现象。

1.2.1 核力

在原子核中,质子和质子之间存在着静电斥力,核子(质子和中子的总称)之间还存在着一种引力,我们称之为核力。核力具有以下一些特性。

1. 核力的近程性

核子间只有在极短距离时才有核力的作用,其作用距离为飞米(fm, $1\text{ fm} = 1 \times 10^{-15}\text{ m}$)数量级。当核子间距离在 0.8~2.0 fm 范围时,核力呈现较强的吸引力,核力比库仑力增加更为迅速;而核子间距离小于 0.4 fm 时,核力表现为斥力;但当距离超过 4~5 fm 时,核力就急剧减小为零。

2. 核力的饱和性

原子核中每个核子只与它邻近的有限数目的核子发生相互作用,而不与核内所有的其他核子都发生相互作用。

3. 核力与电荷无关性

质子-质子、中子-中子和质子-中子的核力大致相等,与电荷无关。

4. 核力是强相互作用力

质子间的库仑斥力反比于距离的平方,原子核内质子之间的距离如此之短,但质子竟然能克服库仑斥力而紧密地结合在一起,这是由于核力的强作用。事实表明,核力约比库仑力