



核能利用与核材料

周明胜 田民波 俞冀阳 编著

清华大学出版社

核能利用与核材料

周明胜 田民波 俞冀阳 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

《核能利用与核材料》是为工程物理系本科生“核材料系列课程”编写的教材之一,内容包括核物理与核辐射基础、核能基础、核能利用和核材料、核电厂主要设备及核材料等4章。本书作为本科低年级入门教材,可用于概论课和生产实习使用。

第1章核物理与核辐射基础,从原子模型和卢瑟福散射实验谈起,讨论核子与核力,核反应与化学反应的区别,质量亏损与核能,裂变、衰变和聚变,核燃料与核能,放射线,放射线的危害,吸收剂量与当量剂量,放射线的屏蔽与防护;第2章核能基础,介绍可控链式反应和反应堆,核燃料及核燃料再循环,反应堆类型,反应堆的调节和控制,核事故和核安全,放射性废物处理;第3章核能利用和核材料,讲述了核爆炸和核反应堆的原理,讨论铀浓缩,核反应堆的种类及其结构,热中子堆中铀的使用,快中子增殖堆,核反应堆用材料,核聚变和聚变能的应用;第4章核电厂主要设备及核材料,介绍中外核电发展历史和现状,核岛和常规岛,反应堆材料辐照损伤,核电压力容器及压力容器用钢,核反应堆的四道安全屏蔽,核电厂的主要设备。作为简论,涉及核能利用与核材料的方方面面。

本书尝试采用通俗易懂、图文并茂的编写方式,着力突出重点、理清思路,强调基本概念和基本原理,着重核材料的应用和创新,注重提高同学分析问题和解决问题的能力,力求达到较好的教学效果。

本书对从事反应堆材料和反应堆设计、研究、运行、生产和教学以及其他相关核工程和材料专业的科技人员、本科生、研究生都具有参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

核能利用与核材料 / 周明胜, 田民波, 俞冀阳编著. — 北京: 清华大学出版社, 2016
ISBN 978-7-302-45283-6

I. ①核… II. ①周… ②田… ③俞… III. ①核能-综合利用②核工程-工程材料 IV. ①TL

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第257782号

责任编辑: 袁 琦

封面设计: 常雪影

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 沈 露

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者: 北京密云胶印厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 210mm × 297mm

印 张: 8.75

字 数: 438千字

版 次: 2016年12月第1版

印 次: 2016年12月第1次印刷

定 价: 45.00元

产品编号: 069035-01

前言

本书是为工程物理系本科生“核材料系列课程”编写的教材。该系列教材包括《核能利用与核材料》《材料学导论》《核材料与应用》《核材料的腐蚀》等。

本书包括4章：第1章核物理与核辐射基础，从原子模型和卢瑟福散射实验谈起，讨论核子与核力，核反应与化学反应的区别，质量亏损与核能，裂变、衰变和聚变，核燃料与核能，放射线，放射线的危害，吸收剂量与当量剂量，放射线的屏蔽与防护；第2章核能基础，介绍可控链式反应和反应堆，核燃料及核燃料再循环，反应堆类型，反应堆的调节和控制，核事故和核安全，放射性废物处理；第3章核能利用中的核材料，讲述了核爆炸和核反应堆的原理，讨论铀浓缩，核反应堆的种类及其结构，热中子堆中铀的使用，快中子增殖堆，核反应堆用材料，核聚变和聚变能的应用；第4章核电厂主要设备及核材料，介绍中外核电发展历史和现状，核岛和常规岛，反应堆材料辐照损伤，核电压力容器及压力容器用钢，核反应堆的四道安全屏蔽，核电厂的主要设备。作为简论，涉及核能利用与核材料的方方面面。

目前，对“核材料”这个名词没有统一的看法和定义。有的人认为它是用于核科学和核工程的材料总称；有的人认为它是专指裂变反应堆和聚变反应堆所用材料；还有的把它定义为裂变材料和聚变材料的总称，即与核燃料的概念相似。

广义的核材料是核工业及核科学研究中所专用的材料的总称，也可以把核材料归结为核能材料或核工业所用材料的总称。

核燃料是指能产生核裂变或核聚变反应并释放出巨大核能的物质。核燃料可分为裂变燃料和聚变燃料（或称热核燃料）两大类。裂变燃料主要指易裂变核素如铀235、钚239和铀233等。此外，由于铀238和钍232是能够转换成易裂变核素的重要原料，且其本身在一定条件下也可以产生裂变，所以习惯上也称其为核燃料。聚变燃料包含氢的同位素氘、氚，锂6和其化合物等。

核工程材料是指反应堆及核燃料循环和核技术中用的各种特殊材料，如反应堆结构材料、元件包壳材料、反应堆控制材料、慢化剂、冷却剂、屏蔽材料等。例如特种铝合金、锆合金、铍、低合金高强度钢、特种不锈钢、高温镍基合金、特种石墨、特种陶瓷、半导体及高分子材料等。

材料科学与工程包括四个基本要素，即材料的成分、材料的组织和结构、材料的制备与加工、材料的性能和应用特性，一般形象地将四要素表示为四面体的四个顶点。这是理解材料科学与工程问题的总纲。核材料的研制和应用，核材料在服役过程中受到的影响，核材料的时效、老化、失效乃至核事故的分析等，当然也涵盖在这四个要素之中。显然，整个核工程和核材料领域都离不开材料科学与工程的基础知识。

一个核反应堆，它的核心是一个能量密度很高的热源。处在那里的材料自然会面临高温、高温度梯度、高热流、高速流场的作用，这本身已构成很特殊的问题。但是，在这以外最特殊的因素当属材料的核性能和中子的作用。反应堆材料所面临的工况比迄今为止我们遇到的任何工程所面临的条件还要复杂得多，因此人们说：“The importance of behavior of the reactor materials can not be over-emphasized”，意思是说，反应堆材料问题的重要性无论怎样强调也不过分。

《核材料与应用》《核材料的腐蚀》将针对核工程材料的特殊问题，包括材料的核特性、辐照、腐蚀、高温环境等进行论述。只有掌握这些，才能将材料科学的知识升华为核材料科学的水平。

材料科学与工程已经是一个很综合的领域，再结合到“物理工程”里的特点，这就需要跨学科地学习和交叉融汇，这当然不是一两门课程所能奏效的。

基于上述特殊服役环境，核材料具有以下特点：①种类繁多，不可替代；②服役环境恶劣；③性能要求极高；④易老化失效；⑤一旦失效，后果严重；⑥服役结束后，处理、处置困难。“核材料系列课程”要侧重这些内容来讲授。

为此，“核材料系列课程”主要针对以下问题进行讨论：①是什么，②为什么，③怎么加工制造，④有什么用，⑤怎么使用，⑥服役中会发生什么变化，⑦如何提高性能。《材料学导论》主要涉及①、②、③、⑥；《核材料与应用》主要涉及③、④、⑤、⑦。

本书在每章之下采用“节节清”的论述方式，左文右图，图文对照，并给出“本节重点”。内容丰富，重点突出；层次分明，思路清晰；选材新颖，强调应用；纲举目张，脉络清楚。

本课程既不是海阔天空的漫谈，也不是基础理论课程的压缩。在内容上避免深、难、偏、窄、玄，强调浅、宽、新、活、鲜。在占有大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍各类材料的新进展、新性能、新应用，力求深入浅出，通俗易懂，千方百计地使知识新起来、动起来、活起来，做到有声有色，栩栩如生。

本书的编写受到清华大学工程物理系教学指导委员会的指导并得到工程物理系的资助，在此表示衷心感谢。

本书对从事反应堆材料和反应堆设计、研究、运行、生产和教学以及其他相关材料专业的科技人员、本科生、研究生都有参考价值。

由于作者水平有限，不妥或谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者
2016年8月于清华园

目 录

第 1 章 核物理与核辐射基础

1.1	原子模型	2
1.1.1	关于原子——古典原子论和四元素论	
1.1.2	原子模型——原子有核还是无核	
1.1.3	关于原子核——带正电的原子核为什么不分崩离析	
1.1.4	原子核的大小——坐镇原子中心的原子核	
1.2	卢瑟福散射实验	4
1.2.1	卢瑟福——实验证明原子核的存在	
1.2.2	关于电子——带负电荷的粒子	
1.2.3	正电子——带正电荷的电子	
1.2.4	加速器——产生高能粒子的有效手段	
1.3	核子与核力	6
1.3.1	中子——不带电荷的粒子	
1.3.2	原子序数和质量数——对元素加以区别的原子序数	
1.3.3	介子——汤川秀树预言的粒子	
1.3.4	幻数（魔法数）——中子数和质子数的微妙平衡	
1.4	核反应与化学反应	8
1.4.1	核反应——使核发生变化的反应	
1.4.2	核裂变的发现——铀 235 核裂变为两块	
1.4.3	原子核的结合能——为什么核子能紧密相处	
1.4.4	质量亏损和能量——狭义相对论	
1.5	质量亏损与核能	10
1.5.1	核裂变能量——高能量的发生	
1.5.2	化学能与核能——二者来源不同且数值差异极大	
1.5.3	核裂变产物是如何产生的——高放射性水平的核废物	
1.5.4	同位素——化学性质相同但质量数不同	
1.6	裂变、衰变和聚变	12
1.6.1	阈值反应——进屋必须跨过门坎	
1.6.2	半衰期——元素的衰变存在规则性	
1.6.3	隧道效应——原子具有穿墙术	
1.6.4	核聚变与核裂变的区别——轻核聚合与重核分裂	
1.7	核燃料与核能	14
1.7.1	铀——大可不必“谈铀色变”	
1.7.2	钚——既有武器级又有反应堆级	
1.7.3	超铀元素——应用领域也很广泛，不可替代的元素	
1.7.4	氡（超重氢）——混凝土也能透过	
1.8	放射线	16
1.8.1	放射线的种类——来自宇宙的放射线	
1.8.2	放射线和放射性——放射能力即为辐射源强度	
1.8.3	由放射线而产生的能量——物质中的能量	
1.8.4	放射线对身体的影响——对 DNA 造成损伤的放射线	
1.9	放射线的危害	18
1.9.1	放射当量剂量和对健康的影响——100mSv 以上即影响健康	
1.9.2	戈瑞和希沃特——吸收剂量和当量剂量的单位	
1.9.3	ICRP 的建议和推荐——放射线利用的向导	
1.9.4	X 射线与 γ 射线的不同——穿透力极强的放射线	
1.10	吸收剂量与当量剂量	20
1.10.1	X 射线及 γ 射线与电子的反应——电子的弹子房	
1.10.2	天然放射性——日常生活中的放射线	

1.10.3	放射线防护——为保护人类的健康和安全	
1.10.4	放射性活度, 吸收剂量和当量剂量——对食品等的限制值	
1.11	放射线的屏蔽与防护	22
1.11.1	辐射屏蔽材料——屏蔽材料依射线不同而异	
1.11.2	放射线测量仪的工作原理——利用放射线产生的效应	
1.11.3	超铀元素的应用——Am-241 用于离子式烟雾探测器	
1.11.4	居里夫人——杰出的女科学家及核科学家一家人	
	定义及名词术语汇编	
	思考题及练习题	
	参考文献	

第2章 核能基础

2.1	反应堆是利用核能的有效手段	26
2.1.1	反应堆中发生的核裂变——如何获得核裂变能	
2.1.2	中子能量与核裂变——热中子更容易引发核裂变	
2.1.3	极高密度的能源——来自于爱因斯坦方程 $E=mc^2$ 的巨大能量输出	
2.1.4	链式反应——产生核能的反应	
2.2	如何实现可控链式反应	28
2.2.1	原子弹和核反应堆的差别——反应堆要绝对确保不发生核爆炸	
2.2.2	临界——中子吸收和中子生成之间的平衡	
2.2.3	中子的减速——慢中子容易引发核裂变	
2.2.4	慢化剂和冷却剂——水可以“双肩挑”	
2.3	核燃料及核燃料再循环	30
2.3.1	核燃料——核能之源	
2.3.2	核燃料是如何制造出来的——从矿石到黄饼, 再经同位素分离	
2.3.3	核燃料的后处理——燃料的再循环	
2.3.4	核燃料循环——核资源的再利用	
2.4	反应堆类型 (1)	32
2.4.1	反应堆的种类——形式决定于目的	
2.4.2	中子能谱与反应堆——表征反应堆特性的指标	
2.4.3	轻水堆——水既做慢化剂又做冷却剂	
2.4.4	改良型轻水堆——更安全、更经济的反应堆	
2.5	反应堆类型 (2)	34
2.5.1	气冷堆——到高温气冷堆已历三世	
2.5.2	钚热堆——目前最有效的核燃料再循环法	
2.5.3	快中子堆——“快”意味着中子的能量高	
2.5.4	核燃料的燃耗——已“燃烧”的量	
2.6	反应堆的调节和控制	36
2.6.1	反应堆的控制——中子数量是关键所在	
2.6.2	反应性的平衡——有各种各样的反应性	
2.6.3	负的反应性反馈——反应堆本身就应具备的控制机构	
2.6.4	核能世界中的第一次——芝加哥 1 号堆和美国在日本投下的两颗原子弹	
2.7	核事故 (1)	38
2.7.1	共同培育核电发展的良好舆论环境	
2.7.2	核事故分级标准——核事故从 0~7 级	
2.7.3	美国三哩岛核事故——历史上最早的核电厂事故	
2.7.4	前苏联切尔诺贝利核事故——核污染无国界	
2.8	核事故 (2)	40
2.8.1	“文殊”二次回路的钠泄漏事故——安全隐患必须防微杜渐	
2.8.2	JCO 临界事故——日本最早的临界事故	
2.8.3	“3·11”东日本大地震福岛核电厂事故——是天灾还是人祸	
2.8.4	反应堆的紧急停堆——插入安全棒	

2.9	核事故 (3)	42
2.9.1	冷却用电源的确保——重大事故引发电源的丧失	
2.9.2	堆芯熔化, 氢爆炸——过热导致堆芯熔化	
2.9.3	衰变热——反应堆的余热	
2.9.4	千万不能发生再临界——必须确保控制系统的健全性	
2.10	重大核事故后对核安全提出更严格的要求	44
2.10.1	核安全的定义	
2.10.2	核事故所带来的危害及影响	
2.10.3	修订核安全法规, 完善核监管制度——核安全政策	
2.10.4	中国的核安全观	
2.11	如何保证核安全	46
2.11.1	防止核劫持——如何防劫防盗	
2.11.2	核电厂从选址到运行——许可证制度	
2.11.3	核电厂的人员许可证——操纵员和高级操纵员	
2.11.4	安全审查和定期检查——重点确认“停堆”“冷却”“包容”三个关键环节	
2.12	放射性废物处理	48
2.12.1	反应堆周围的核监测——对辐射剂量和剂量的变化进行监测	
2.12.2	放射性废物——需要特殊处理的核垃圾	
2.12.3	反应堆的退役——必须做到善始善终	
2.12.4	反应堆的退役不能一蹴而就	
2.13	中国的核废料如何处理与处置	50
2.13.1	放射性废弃物的来源及其特征	
2.13.2	放射性废弃物处置原则	
2.13.3	放射性废物的处理流程	
2.13.4	放射性废物的处理和处置方法	
	定义及名词术语汇编	
	思考题及练习题	
	参考文献	

第 3 章 核能利用中的核材料

3.1	核爆炸和核反应堆的原理	54
3.1.1	天然的核反应堆	
3.1.2	核爆炸原理	
3.1.3	核反应堆原理	
3.1.4	核能利用现状	
3.2	铀浓缩	56
3.2.1	铀的富集度与临界质量	
3.2.2	铀浓缩法 (1) ——气体扩散法	
3.2.3	铀浓缩法 (2) ——离心分离法	
3.2.4	铀浓缩法 (3) ——原子激光法	
3.2.5	铀浓缩法 (4) ——分子激光法	
3.3	核反应堆的种类及其结构	58
3.3.1	核反应堆的种类	
3.3.2	压水堆	
3.3.3	沸水堆	
3.3.4	轻水堆的安全性	
3.4	热中子堆中钚的使用	60
3.4.1	钚热堆的原理	
3.4.2	MOX 核材料	
3.4.3	两种核燃料的使用对比	
3.4.4	采用 MOX 核材料的好处	

3.5	快中子增殖堆	62
3.5.1	热中子堆和快中子堆	
3.5.2	快中子增殖堆与轻水堆的比较	
3.5.3	利用快中子增殖堆实现钚燃料的增殖	
3.5.4	快中子增殖堆的结构	
3.6	核反应堆用材料	64
3.6.1	中子慢化材料	
3.6.2	中子吸收材料	
3.6.3	包壳材料和其他结构材料	
3.6.4	结构材料的辐照损伤	
3.7	压水堆和沸水堆用的燃料组件	66
3.7.1	压水堆燃料组件	
3.7.2	燃料元件棒	
3.7.3	UO ₂ 燃料芯块	
3.7.4	沸水堆燃料组件	
3.8	核电厂的结构部件及所用材料	68
3.8.1	核电厂的主要部件及功能	
3.8.2	各类反应堆的主要部件用材料	
3.9	压水堆核电厂结构及所用材料	70
3.9.1	第一道安全屏障：燃料芯块二氧化铀陶瓷晶体（核燃料）	
3.9.2	第二道安全屏障：燃料包壳	
3.9.3	第三道安全屏障：压力容器和一次回路压力边界	
3.9.4	第四道安全屏障：安全壳	
3.10	核反应堆用石墨	72
3.10.1	天然石墨和人造石墨	
3.10.2	高密度、高强度、高纯度的“三高”石墨	
3.10.3	核反应堆用石墨的生产工艺	
3.10.4	核石墨的应用	
3.11	核燃料循环	74
3.11.1	核燃料的循环路径	
3.11.2	核燃料棒的构造	
3.11.3	核燃料棒的后处理工程	
3.11.4	核燃料棒的安全隐患	
3.12	辐射能和放射线	76
3.12.1	辐射能和放射线的定义	
3.12.2	放射性核素	
3.12.3	放射线对人的危害	
3.13	“3·11”东日本大地震福岛核电厂事故分析	78
3.13.1	强地震紧急停堆后所有水冷系统失灵	
3.13.2	核余热及衰变产生的热量足以使燃料元件熔化	
3.13.3	高温熔体穿透压力壳	
3.13.4	高放射性核燃料透过压力壳泄漏到地面、海水乃至空气中	
3.14	典型核电厂事故分析	80
3.14.1	国际核事故分级	
3.14.2	美国三哩岛核事故	
3.14.3	前苏联切尔诺贝利核事故	
3.15	严重事故——燃料熔化	82
3.15.1	何谓严重事故	
3.15.2	衰变热使温度上升——失水事故	
3.15.3	燃料熔化引起堆芯内部重新配置	
3.15.4	形成“残渣床”和熔池	
3.16	极严重的核事故——燃料泄漏	84
3.16.1	“跑离”升温或“熔断”升温	
3.16.2	堆芯熔化	
3.16.3	燃料泄漏	

3.17 核聚变和聚变能的应用	86
3.17.1 自然的太阳和人造太阳	
3.17.2 核聚变发电属于“常闭型”	
3.17.3 激光惯性约束核聚变	
3.18 托克马克装置的主体结构及所用材料	88
3.18.1 磁惯性约束核聚变	
3.18.2 托克马克聚变堆对第一壁材料的要求	
3.18.3 核聚变既涉及又惠及广泛的技术领域	
3.18.4 核聚变反应堆的结构和聚变能应用前景	
定义及名词术语汇编	
思考题及练习题	
参考文献	

第 4 章 核电厂主要设备及核材料

4.1 世界核电发展历史和现状	92
4.1.1 核能的开端与核电的产生	
4.1.2 从第一代到第四代核电机组	
4.1.3 世界核电发展现状	
4.1.4 世界核电发展归于理性	
4.2 中国核电发展后来者居上 (1)	94
4.2.1 中国核电产业从无到有	
4.2.2 中国的核能核工业发展简况	
4.2.3 中国核电发展的四个阶段	
4.2.4 国家核电核工业发展的组织架构	
4.3 中国核电发展后来者居上 (2)	96
4.3.1 中国的核电——后来居上，发展最快	
4.3.2 中国的第三代核电	
4.3.3 中国核电着眼海上	
4.3.4 加强国际核安全体系，推进全球核安全治理——推进核安全国际合作	
4.4 不同堆型各有所长 (1)	98
4.4.1 压水堆——历史悠久，技术成熟	
4.4.2 沸水堆——压水堆的“孪生姐妹”	
4.4.3 重水堆——重水作慢化剂，天然铀作燃料	
4.4.4 超临界水冷堆——功率密度和热效率更高	
4.5 不同堆型各有所长 (2)	100
4.5.1 高温气冷堆	
4.5.2 快中子增殖堆的结构	
4.5.3 快中子增殖堆的发展状况	
4.6 压水堆电厂的结构和原理	102
4.6.1 典型的压水堆电厂外貌和核电厂的组成	
4.6.2 压水堆核电厂原理	
4.6.3 核岛（反应堆厂房）和常规岛（汽轮机厂房）	
4.6.4 燃料厂房和其他厂房	
4.7 各类核材料的选材原则	106
4.7.1 选择核材料的首要标准——满足功能要求	
4.7.2 核燃料为什么选择二氧化铀而非铀合金	
4.7.3 燃料包壳为什么选择锆合金	
4.7.4 作为结构材料的不锈钢和高镍合金	
4.8 核电压力容器用钢的选材及演化历史	108
4.8.1 核电压力容器用钢的演化历史	
4.8.2 SA508 系列钢中的化学成分和力学性能	

4.9	SA508 系列钢中的主要元素及其作用	110
4.9.1	对核电压力容器用钢的性能要求	
4.9.2	SA508 系列钢中的主要元素及其作用	
4.10	核反应堆压力容器及蒸汽发生器的制造	112
4.10.1	核反应堆压力容器	
4.10.2	压水堆核电厂核岛部分的大型锻件	
4.10.3	SA508-3 钢的组织与热处理	
4.11	核压力容器的辐照损伤	114
4.11.1	压力容器钢辐照脆化	
4.11.2	辐照脆化机制	
4.11.3	高强度低合金钢大型锻件中的氢脆现象	
4.12	核燃料组件和控制棒组件	116
4.12.1	上部堆内构件和下部堆内构件	
4.12.2	核燃料组件的组成及装料	
4.12.3	控制棒组件及其驱动机构	
4.12.4	材料在核安全中的重要作用	
4.13	反应堆的四道安全屏障	118
4.13.1	反应堆的四道安全屏障	
4.13.2	由 UO_2 粉末制作二氧化铀陶瓷核燃料芯块	
4.13.3	作为燃料包壳管的锆合金	
4.14	核电厂的主要设备	120
4.14.1	反应堆冷却剂泵	
4.14.2	蒸汽发生器和稳压器	
4.14.3	核电厂用汽轮机和发电机	
4.14.4	AP1000 机组采用的非能动安全系统	
4.15	高铁和核电——“一带一路”的两根支柱	122
4.15.1	2030 年核电装机容量将达到 1.5 亿 kW	
4.15.2	高铁与核电是输出战略的两个支柱	
4.15.3	“中国制造 2025”关于核电产业发展方针	
4.15.4	在海外，到 2020 年要完成中国造核电厂 6~8 座	
4.16	中国核电进军英国和阿根廷	124
4.16.1	中国广核集团向英国三个核电厂出资，布拉德韦尔采用“华龙一号”	
4.16.2	与英国、欧洲大陆签署多项合作协议	
4.16.3	中国核工业集团与阿根廷签署建设“华龙一号”合同	
4.16.4	以罗马尼亚为据点，展开向欧洲的核电技术服务	
4.17	与法、美等国进一步合作	126
4.17.1	与法国共同实施后处理计划	
4.17.2	与法国共同开拓世界核能市场	
4.17.3	更新核能合作协议，美、中延续蜜月期	
4.17.4	形影相吊的日本	

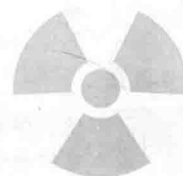
定义及名词术语汇编

思考题及练习题

参考文献

第 1 章

核物理与核辐射基础



1.1 原子模型

1.1.1 关于原子——古典原子论和四元素论

为了介绍核能,作为必备的知识,先对“原子的结构”做简要说明。

英语单词“atom”源于希腊词“ATOMS”,后者是公元前400年前后最早由希腊哲学家德谟克里特斯(Democritus, 460BC—370BC)及伊壁鸠鲁(Epicurus, 341BC—270BC)使用的。他们将无论在形状上还是种类上都不能再细分的微粒命名为ATOMS,并提出世界是由ATOMS及其间的空虚空间所组成的古典原子论。

这种古典原子论那时并未被实验所证实,其意义在于哲学上。尽管古代原子论与现在的原子论相近,但在当时却遭到希腊哲学家亚里士多德(Aristoteles, 384BC—322BC)的反对,他认为,物质是由火、水、空气、土这四种元素组成的。

此后,法国学者拉瓦锡(Antoine Lavoisier, 1743—1794)发现了氧,并证明空气是氧气与氮气的混合物。据此,流行了2000多年以上的亚里士多德的四元素论被否定。进入17世纪,随着气体化学反应的完善与精细化,英国学者道尔顿(John Dalton, 1766—1844)发表了近代原子论。该原子论认为,原子是由化学方法不能再分的物质的小微粒,而化学反应是各种不同的原子或结合或分离的现象。

进入19世纪,电子(电荷的最小单位)被发现,人们进而提出有核的原子模型:原子是原子核周围有若干电子围绕其运动的构造模型。

1.1.2 原子模型——原子有核还是无核

现在关于原子的模型,即电子围绕原子核运动的有核原子模型,已成为常识。但20世纪初,人们还不相信原子核的存在,主张无核原子模型的科学家大有人在,两种观点的交锋十分激烈。所谓有核原子模型是指,原子的正电荷集中于原子中心一个特定位置的模型,而无核原子模型是指,原子整体均带正电荷的模型。

有核原子模型被判为优胜的证据,是英国物理学家卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)于1911—1913年所进行的 α 粒子(一种带正电荷的粒子)散射实验。卢瑟福将 α 粒子射入金的薄板及氮气中,观察 α 粒子受金及氮气原子的作用是如何被背散射的。卢瑟福正是借由这一实验对原子中正电荷的分布进行观察的。

实验的结果是,几乎所有的 α 粒子相对于入射方向都以 $2^\circ\sim 3^\circ$ 的小角度被散射。但其中也观察到极少量的散射角超过 90° 的 α 粒子。 α 粒子之所以被散射,是由于带正电荷的粒子之间的库仑斥力所造成的。为产生超过 90° 的大角度散射(背散射), α 粒子必须与原子所带的所有正电荷都极为靠近,这样才能受到如此大的库仑排斥力。若是无核原子模型, α 粒子只能与一部分正电荷靠近,不可能产生如此大的库仑排斥力。据此,卢瑟福指出,在原子中,存在质量占原子的大部分,且带正电荷的核(原子核)。至此,实验结果为长期的争论打上了休止符。正是卢瑟福所提出的原子核中,蕴藏着核能的秘密。

1.1.3 关于原子核——带正电的原子核为什么不分崩离析

卢瑟福 α 粒子散射实验中发现的背散射现象以无可辩驳的事实证明了原子核的存在,又根据此后的研究确认,原子核是由更小的基本粒子集合而成的,称这种基本粒子为核子。但是,若认为这种核子仅是同一种具有特定质量和电荷量的基本粒子,就会出现矛盾。以碳(C)和铀(U)为例,若按质量对比,铀是碳的约20倍,但按电荷量比,铀仅为碳的约15倍。理论和实验都证明,核子中包括两种质量几乎相同的基本粒子,一种是带一个基本正电荷的质子,另一种是不带电荷的中子。据此,上述矛盾迎刃而解。原子核正是这两种核子相结合而成的。

在核子中由于质子带正电荷,质子与质子之间必然受到库仑排斥力的作用。可以想象,为了使多个质子作为一个核而结合在一起,必然有足以克服库仑斥力的很强的结合力起作用。这种力便是核力。核力是在大约 $2.1\times 10^{-13}\text{cm}$ 近距离范围内起作用的短程力,在质子与质子间、中子与中子间、质子与中子间同样作用。核力是借由介子而产生的力,关于介子请见1.3.3节。

若仅是质子间的核力,由于有库仑斥力的相反作用,不足以使原子核稳定存在。但是,若核中一定程度地存在中子,则核力变强,即使有库仑排斥力的作用,仍能使核子结合在一起。这便是带正电的原子核为什么不被库仑斥力所分离的原因。

1.1.4 原子核的大小——坐镇原子中心的原子核

一般教材和参考书中给出的原子结构模型如图所示:原子核位于原子的中心,核周围有多个电子在不同轨道上旋转。那么,原子核的尺寸大概是多少呢?

在讨论原子核的尺寸之前,先看看原子的大小。若取出一个原子,其大小(每种原子的大小不同)大约为1cm的亿分之一($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$),1亿个原子排成一列,正好为1cm长。

若将原子的大小想象为一个棒球场的边长,则原子核的大小仅相当于一个比棒球更小,直径为1cm的小石子,由此可以想象原子中原子核所占的体积有多么小。若从原子与原子结合成分子的观点看,原子核的大小与原子核间距离的关系,犹如地面上的人看天空中飞行的客机。但是,如此小的原子核却占据了原子质量的绝大部分,而且还对电子轨道起控制作用。由于原子核坐镇原子中心,起到原子核心的作用,称其为原子核名副其实。

即使原子核如此之小,它却占据了原子几乎所有的质量。借由核反应使其质量发生变化,便可以向外发出与其质量亏损相当的巨大能量,这便是我们可以利用的核能。

本节重点

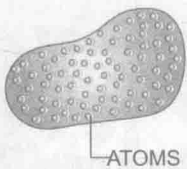
- (1) 是哪位科学家,用什么实验确定原子是有核的?
- (2) 带正电的原子核为什么不分崩离析?
- (3) 原子和原子核的大小各为多少?

古典原子论和四元素论

古典原子论概要



德谟克里特斯 伊壁鸠鲁
(两人提出的原子论与今天的原子论接近)



物质是由称作 ATOMS 的微粒及其间的空虚空间所构成。



火 水 空气 土

物质是由火、水、空气、土这四种元素构成的。

《四元素论与今天的原子论相差甚远，却长时间被人们深信不疑。》



亚里士多德



道尔顿



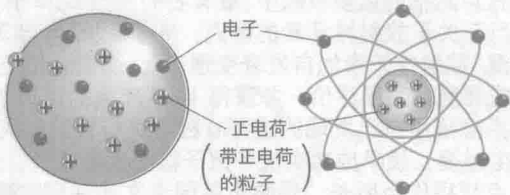
物质是由通过化学方法不能细分的原子结合在一起而形成的。

《现在的原子论的基础》

1

原子无核还是有核

原子模型



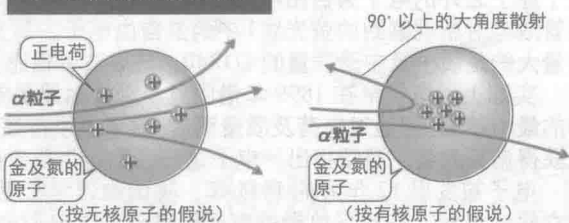
无核原子模型

正电荷分散于原子的整体而存在(“枣糕”模型)。

有核原子模型

正电荷集中于原子的中心而存在。

卢瑟福的散射实验

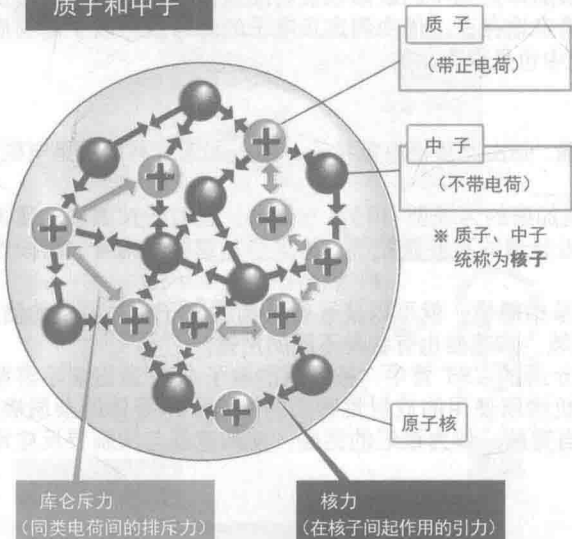


卢瑟福利用 α 粒子照射原子，观测到 90° 以上的大角度散射，从而由实验证明有核原子模型的正确性。

2

原子核中带正电的质子为什么能结合到一起？

质子和中子



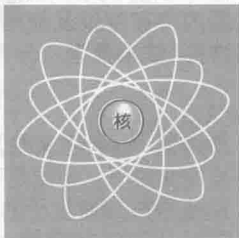
如果只有库仑斥力，原子核肯定四分五裂。正是核力使核子结合成原子核。

3

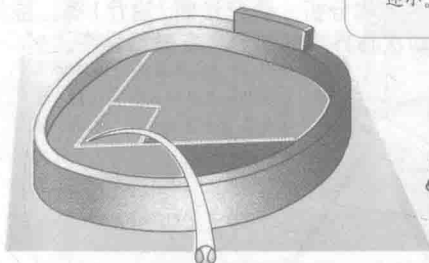
原子核的大小可比做棒球场中的一个棒球

原子核的大小

尽管常用图中所示的模型表示原子的结构，但原子核要比图中所示小得多



若原子整体的大小比做棒球场，则原子核的尺寸比棒球还小。



※ 原子核的大小大约为 1cm 的 1 万亿分之一



4

1.2 卢瑟福散射实验

1.2.1 卢瑟福——实验证明原子核的存在

卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937), 是一位出生于新西兰(当时属英国)的物理学家, 由于其在核物理学方面的巨大贡献, 被称为“核物理学之父”。

在卢瑟福的诸多贡献中, 最有名的当数 1.1.2 节谈到的 α 粒子的背散射实验。但是, 卢瑟福在进行此实验的 1911 年以前, 就进行了关于放射性元素的研究, 并于 1902 年与苏戴(Frederick Soddy)博士同时提出: 辐射能是由于原子核衰变而产生的所谓“放射性元素的自发衰变理论”。同时, 他还发现原子核衰变所产生 α 粒子(α 射线)就是氦(He)原子核。卢瑟福的研究成果受到高度评价, 并获得 1908 年度的诺贝尔化学奖。

卢瑟福用自己发现的这种 α 粒子进行背散射实验, 进一步确认了原子核的存在。而且在 1919 年, 借由 α 粒子与氮原子发生碰撞, 最早成功实现了原子核的人工变换, 这是最早实现的人工核反应。

卢瑟福作为所长, 受聘于英国卡文迪许研究所。在卢瑟福的精心组织下, 研究所专门从事原子核的实验研究, 并形成由世界各国研究人员组成的国际性的核物理学中心。由于卢瑟福的指导, 从卡文迪许研究所产生了许多世界级的优秀研究工作者, 并对 20 世纪初核物理学的飞跃发展做出了巨大贡献。

1.2.2 关于电子——带负电荷的粒子

电子与原子核一样, 也是构成原子的要素之一, 但电子在原子之外也能存在。尽管称位于原子中的电子为束缚电子, 位于原子之外的电子为自由电子, 以便加以区别, 但二者却是同一种粒子。参与化学反应的是束缚电子, 而阴极射线(真空管放电时所观察到的荧光)中的是自由电子。后文将要详细说明的被称为 β 射线的放射线, 实际上也是电子。电子的质量大约是质子及中子质量的 $1/1840$, 与后二者相比, 是相当轻的粒子; 但电子所带电荷大小与质子相同, 只是前者为负。

实际上, 电子早在 1899 年借由显示阴极射线是电子流的实验而被发现。在此之前, 尽管知道电荷中存在不能继续分割的最小单位, 但通过电荷及质量测量, 显示电子存在的是英国物理学家汤姆逊(Joseph John Thomson, 1856—1940), 为此, 他获得诺贝尔奖。顺便指出, 电子这一名称作为负电荷的最小单元而广泛使用, 是此后的事。

电子被发现 12 年后的 1911 年, 美国物理学家密立根(Robert Millikan, 1868—1953)精确地计算出电子电荷的大小。密立根注意到, 在水平放置的电极间移动的带电荷的油滴的速度, 与其电荷的大小成正比, 通过变更电荷的大小, 反复进行速度测定, 最终计算出电荷大小的单位, 即电子电荷。

1.2.3 正电子——带正电荷的电子

所谓电子, 如前节所述, 通常是指带负电荷的基本粒子。但是, 在电子中确有带正电荷的粒子存在, 称其为正电子(positron)。正电子与电子相比, 所带电荷的极性相反, 但电荷的绝对值相等, 二者是具有相同质量的粒子。

英国物理学家狄拉克(Paul Dirac, 1902—1984)于 1928 年预言了正电子的存在, 由美国物理学家安德森(Carl David Anderson, 1905—1991)于 1932 年从宇宙射线(从宇宙射入地球的粒子)中发现。正电子之所以不能轻易被看到, 是由于正电子并不与其他粒子相结合构成原子及物质, 而且正电子与负电子相结合, 作为粒子就会湮灭(电子对湮灭)所致。

现在, 不仅发现了发射正电子的物质, 而且利用加速器(下节详细说明)也能产生正负电子对(电子对产生)。这一反应, 作为借由核裂变取出核能反应的逆反应, 而受到关注。

除了核能领域, 利用正电子湮灭技术还能很容易获得关于物质晶体结构中的缺陷以及物质表面构造等信息。这是由于物质内存在空位及缺陷时, 正电子被这些位置所捕获而能比较稳定地存在。借由测定正电子的寿命就可以了解物质的缺陷结构(缺陷类型、分布等)。如此说来, 正电子在材料物性研究中也是很有用的。

1.2.4 加速器——产生高能粒子的有效手段

加速器, 顾名思义是加速粒子的装置, 利用电磁力给粒子以能量, 并由此获得高能粒子。由于加速所利用的是电磁力, 作为被加速粒子, 必须是带电粒子, 包括电子、质子、离子等。

加速器按加速粒子的轨道形状可分为两类: 使粒子按直线轨道加速的为线型(串列)加速器; 使粒子按圆形轨道加速的为圆型(回旋)加速器。单独使用这些加速器并不能获得具有接近光速的高能量粒子。将这些加速器相结合, 阶段性地获得高速粒子的加速器也是有的, 不过这样的设备相当庞杂。

利用加速器可以得到高能粒子, 通过使这种高能粒子与原子核相碰撞, 就可以获得有关构成原子核的粒子的信息。因此, 加速器在核物理学中起着极为重要的作用。当然, 在其他领域, 加速器也有各种不同的用途。

其中, 生活中最常见的应用要数老式电视机的 CRT 管。在显示屏的 CRT 管中, 被加速的电子(束)轰击显示屏背面的发光面, 使其产生荧光。另外, 加速器的其他用途还包括医疗机构所使用的放射性物质的制造、半导体的杂质掺杂、无损检测、物质的结构分析、医疗诊断(治疗)等, 应用领域是相当宽的。作为最近的话题, 使加速器与次临界反应堆相结合的加速器驱动次临界堆的研究也在进行之中。

本节重点

- (1) 简述卢瑟福在核物理学中的主要贡献。
- (2) 何谓正电子? 正电子为什么难以轻易被看到?
- (3) 加速器有哪些类型? 指出各自的原理和应用。

核物理学之父

卢瑟福

出生于新西兰的物理学家，在英国的卡文迪许实验室从事核物理学研究。由于在研究放射性及α粒子等方面受到高度评价而获得诺贝尔奖。



卢瑟福的弟子和高徒

卢瑟福培养出以波尔和查德韦克为代表的众多著名核物理学家。由于卢瑟福的杰出贡献而被称为“核物理学之父”。



波尔

利用量子论阐明原子模型的物理学家。



查德韦克

发现中子的物理学家。

1

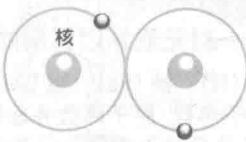
电子有束缚电子和自由电子之分

电子的属性



所谓电子，是在原子核周围旋转并带负电荷的粒子。其电荷大小与质子所带电荷相同，但质量仅为质子质量的1/1840，是较轻的一种基本粒子。

束缚电子和自由电子



《束缚电子》



《自由电子》

绕原子核旋转的是束缚电子。参与化学反应的通常是外层束缚电子。

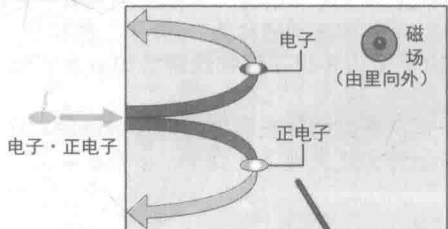


从原子核周围飞出的电子是自由电子。从荧光灯中便有电子从电极飞出，并在电路中流动。

2

带正电荷的电子——正电子

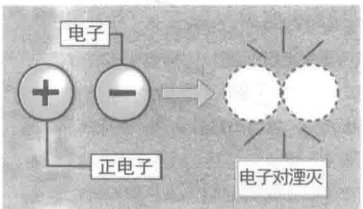
正电子



正电子具有与电子相同的质量，但二者的电荷符号正好相反，因此，在磁场中会以相反的方向运动。



电子对湮灭

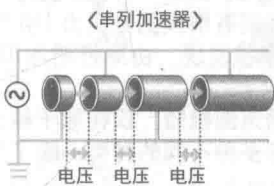


正电子一旦与电子结合便会消失，称此为电子对湮灭。这就是正电子不容易被发现的原因。

3

使带电粒子加速的加速器

串列加速器和回旋加速器



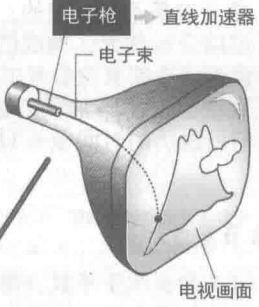
带电粒子在各个金属圆筒间所加电压的作用下，受电场力作用而不断被加速。



在磁场作用下做圆周运动的带电粒子，在加有电压的电极间多次通过而不断被加速。

日常生活中的加速器

电子显像设备用布劳恩管中的电子枪就是一个直线（串列）加速器。被加速的电子在显示屏荧光面上扫描，将电视信号显示出电视画面。



4

1.3 核子与核力

1.3.1 中子——不带电荷的粒子

1932年英国物理学家查德威克(J.Chadwick, 1891—1974), 通过使氦(He)的原子核与铍(Be)的原子核碰撞, 发现了与质子同时发射出来的中子。

构成原子核的粒子是质子和中子。由于质子带正电荷(与正电子所带相同的电荷), 在电场力及磁场力的作用下, 可以使其行进方向发生弯曲; 而中子是不带电荷的“中性”粒子, 即使在电场力及磁场力的作用下, 也不会弯曲而保持直线方向。如同1.1.3节所讲到的, 质子间的库仑斥力有使原子核分崩离析的趋势, 但中子强化核力, 具有平衡库仑力使原子核稳定的作用。

中子与带电荷的粒子相比, 更容易进入到带正电的原子核中, 因此, 具有与原子核发生反应的性质。中子与原子核反应的结果, 有可能使被中子碰撞的原子核发生分裂(核裂变), 此时, 原子核中的中子会有几个飞出。通过有效地利用这种中子, 就有可能使核裂变连续地发生。这种连续发生的核裂变现象称为链式核裂变反应。在反应堆内, 通过控制中子数量, 就可以维持链式核裂变反应持续进行。另外, 中子还能用于无损检测(称为中子射线照相术), 与X射线照相相比, 前者可以获得更鲜明的图像。

顺便指出, 由于中子不带电荷, 因此对中子本身的检测较难。一般是利用中子与原子核发生反应时所发生的荷电粒子, 进行中子检测。

1.3.2 原子序数和质量数——对元素加以区别的原子序数

在元素中, 有氧(O)、氢(H)、铁(Fe)、铝(Al)、铀(U)等100余种, 每种元素冠以序号加以区别。例如, 8号为氧, 92号为铀等。这种序号称为原子序数, 原子序数并非随意规定, 而是遵守严格规则。原子序数与原子核中所含的质子数相同。换句话说, 如果原子核中质子数目发生变化, 元素的名称也要变化。氧的原子核中有8个质子, 如果变成7个则变成氮, 变成6则为碳。

原子核中不仅有质子, 还含有中子。以氧为例, 原子核中存在的中子的数目有8个、9个、10个三种情况, 无论哪种都是氧, 在特性上只有细微差别。因此, 为了对这些加以区别, 引入了“质量数”这一数值。所谓质量数, 是构成原子核的质子数和中子数之和。这样, 氧就有质量数分别是16、17、18的三种。本书中, 将“质量数235的铀”记作“铀235”(U-235)。到19世纪中期前后, 许多元素被发现。俄罗斯化学家门捷列夫[Дмитрий Иванович Менделеев (Dmitrij Lvanovich Mendelejev), 1834—1907]在对这些元素按原子序数排列时, 注意到被称为周期性的性质在元素中表现出来, 并将所有元素排列在一个体系的表中, 称其为元素周期表, 最早的周期表于1869年发表。在该表中, 尽管还存在几个空白位置——为性质特定, 但仍未被发现的元素所预留, 但这些元素此后均陆续按预言被发现。

1.3.3 介子——汤川秀树预言的粒子

介子这一名称的由来是其质量介于核子质量与电子质量之间。介子的质量大致为质子及中子质量的 $1/10$, 为电子质量的200倍左右。

但是, 如1.1.3节所述, 原子核是由质子和中子构成的。读者自然会问, 为什么在原子核这么小的“块体”中, 质子和中子会稳定地在一起存在呢? 由原子核稳定存在的事实可以想象, 在质子和中子之间, 肯定有某种比质子间作用的电场排斥力(库仑力)更大的相互吸引力的作用。

因此, 汤川秀树(H. Yukawa, 1907—1981)认为, 原子核中的质子和中子还具有内部结构, 可能受到具有一定质量的粒子的“取离”作用, 从而相互间有很大的吸引力(核力)作用, 并在1935年预言, 存在这种被称为“ π 介子”的粒子。此后, π 介子于1947年从宇宙射线中被发现, 由此证明汤川秀树预言的正确性。由于汤川秀树在核物理领域的巨大贡献, 他获得了1949年的诺贝尔物理学奖。

由于介子产生的力, 作用范围极短, 仅在原子核大小的范围内起作用。这与电磁力等长程作用力形成鲜明对比。

现在, 人们已知道介子有多种不同的种类, 除了汤川秀树预言的 π 介子之外, 还发现了 η 介子、 ω 介子等。

1.3.4 幻数(魔法数)——中子数和质子数的微妙平衡

原子核是由若干个质子和中子构成的, 但在构成原子核的质子或者中子的数目, 特别是在2、8、14、20、28、50、82、126的情况下, 对应的原子核呈现出相对的稳定性。这些数被称为幻数(魔法数)。核子存在幻数的具体物质实例有: 质子数、中子数均为2的氦(He), 二者数目均为8的氧(O), 二者数目均为20的钙(Ca)等。

所谓幻数(魔法数)是指“致使原子核处于稳定的质子数或中子数”。经比较发现, 大部分由相同的质子数与中子数构成的原子核, 在各个原子序数段都是稳定的。也就是说, 上面举出的氦、氧、钙都具有稳定的原子核。

原子核是不是稳定的, 可根据从原子核中分离其构成要素(称为核子)所需要的能量(称为核子的结合能)的大小来判断。该结合能越大, 构成的原子核越稳定。能说明幻数的原子核的模型是有的, 但其内容需要高深的物理学知识, 有兴趣的读者请查阅有关参考书。

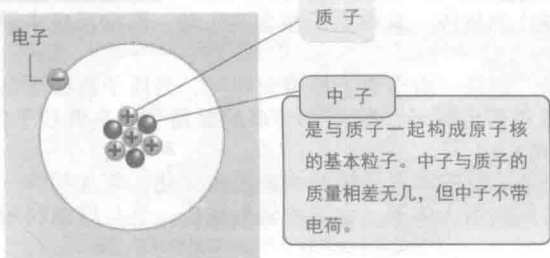
顺便指出, 16这一幻数于2000年初被发现, 这一幻数仅存在于中子数比质子数多很多的原子核中, 它是基于原子核裂变前所经历的时间极长(原子核是稳定的)这一事实而发现的。

本节重点

- (1) 指出原子序数、质量数、相对原子质量的意义。
- (2) 何谓介子, 介子起什么作用?
- (3) 举例说明幻数(魔法数)所代表的意义。

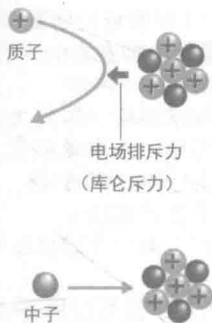
不带电荷的粒子

中子的特征



容易与原子核发生反应的中子

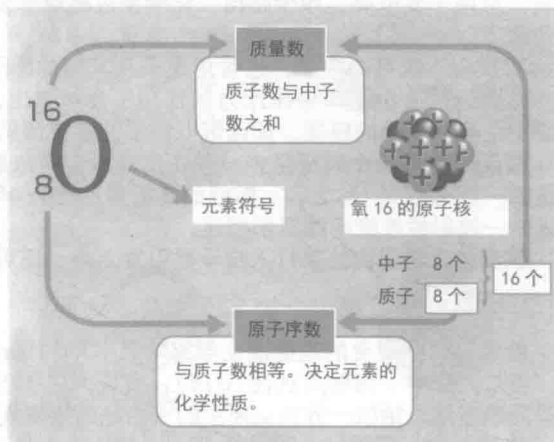
由于质子受到原子核电场排斥力的作用，因此难以引发核反应；而中子不受库仑排斥力的作用，因此容易引发核反应。



1

原子的标记

质子数与中子数之和

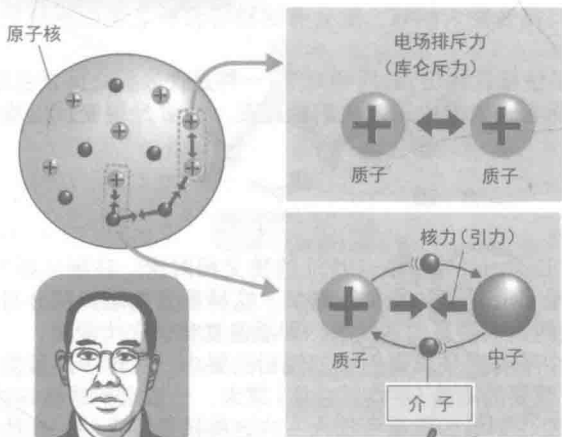


若写作 O (氧)，其质子数为 8 是确定的，图中所示原子表示质量数为 16 的氧，通常标记为 氧 16 (O-16)。

2

使核子彼此相互结合的介子

介子使核力发生作用



汤川秀树

借由称作介子的粒子在质子和中子、中子和中子间起作用，产生称之为核力的引力，使核子相互结合成核。



3

取幻数(魔法数)的核

稳定的核



基于核结构上的理由，质子数或中子数取 2、8、20 的核是稳定的。称这种数为幻数——“魔法数”。此外，16、28、82、126 也都是幻数。

幻数核素种类很多

例如 幻数 [20]

核子数	原子核
中子 19	—
质子 19	钾 40、41
中子 20	硫 36、氯 37、氩 38、钾 39
质子 20	钙 40、42、43、44、46、48
中子 21	—
质子 21	钪 45

由于中子数或质子数取 20 的核是稳定的，因此这种核素种类也多；与中子数或质子数取 19 (只有两种元素) 或 21 (只有一种元素) 的核相比，取 20 的核共有 10 种核素存在。

4