

核能发电原理 导论

HENENG FADIAN YUANLI
DAOLUN

陈兴国 著

核能发电原理 导论

HENENG FADIAN YUANLI
DAOLUN

陈兴国 著

 湖南科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

核能发电原理导论 / 陈兴国编著. -- 长沙 : 湖南科学技术出版社, 2010.7

ISBN 978-7-5357-6303-7

I. ①核… II. ①陈… III. ①核能发电 IV.

①TM613

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 129243 号

核能发电原理导论

编 著: 陈兴国

责任编辑: 贾平静 汤伟武

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

印 刷: 长沙瑞和印务有限公司

(印装质量问题请直接与本书厂联系)

厂 址: 长沙市井湾路 4 号

邮 编: 410004

出版日期: 2010 年 7 月第 1 版第 1 次

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 22.25

字 数: 540000

书 号: ISBN 978-7-5357-6303-7

定 价: 38.00 元

(版权所有·翻印必究)



作者简介

陈兴国教授，湖南省长沙市人，1966年毕业于衡阳矿冶工程学院（现南华大学）原子核电子学专业。中国管理科学院特约研究员，入选中国专家大词典，曾负责与参与某实验装置的特大型设备研制工作。是负责该项目四个科研人员之一，该项目获国防科委科研成果三等奖。曾主持“智能模糊电气传动与控制技术”的研究工作。该项目获2002年部级科技进步三等奖。曾参加1996年世界包装组织学术年会，先后发表学术专著三部和学术论文80余篇。

内容提要

本书介绍了原子核裂变、聚合、裂变-聚合的发电原理，并着重阐述了压水堆核电站的发电产生过程、控制方法、运行过程、核辐射防护的基本知识，核聚变形成的条件、等离子的诊断方法。最有意义的是，如果人们能知道怎样实现在受控情况下氘核的聚变，人类将掌握几乎是无穷无尽的能源。

全书内容共八章。第一章：介绍核裂变基础知识，包括放射性与核反应、裂变反应与链式裂变反应；第二章：介绍了受控热核反应，核聚变产生的条件、核聚变形成过程、磁探针等各种等离子体的诊断方法，实现“点火”条件；第三章：讲述核电站一回路和二回路的主要设备和系统，如反应堆、蒸汽发生器、稳压器、堆芯的建立、化学和容积控制系统等；第四章：介绍核反应堆反应性控制方法与运行中反应性的变化；第五章：讲述反应堆标准状态，启动停堆过程中的主要操作过程；第六章：介绍核辐射防护的有关知识；第七章：讲述核能发电在核潜艇、航母远洋航行、宇宙飞船区域供电系统等方面的应用；第八章：探讨核能技术发展远景。

前 言

核能作为一种安全、清洁、经济、可持续发展的发电方式，已经为社会所接受，核能发电也是我国能源战略的组成部分之一，在能源供应总量中的比例正在逐步提高。今后核能发电将在电力工业中占有重要地位。

气候变化作为全球性的热点问题，其实质是争取和维护国家的发展空间与竞争优势。

2009年9月22日，在联合国气候变化峰会上，国家主席胡锦涛指出，中国将进一步加强节能、提高能效工作，大力发展可再生能源和核能，争取到2020年非化石能源占一次能源消费比重达到15%左右。2009年11月25日国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议，研究部署应对气候变化工作，决定到2020年中国单位国内生产总值CO₂排放比2005年下降40%~45%，并在哥本哈根大会上向全世界宣布了这一目标。

到2020年建成7000万kW核电，年发电量为5250亿kW·h时，核电链年排放CO₂0.07亿t，同等电量的煤电链要排放6.8亿t CO₂。发展7000万kW核电替代煤电，一年可以减排CO₂6.73亿t，占2020年全国排放总量的7.9%。可以看出，规模发展核电可以为减排作出积极的贡献，到2030年、2040年及至2050年，我国核电还会进一步大规模发展，其应对气候变化的益处将会更多地显现出来。

据最近几十年对能源的需求量和人口增长速度的分析可知，2005年能源消费量约为 3×10^{13} W (9.3×10^{20} J/年)，到21世纪中期地球上对能源的需求水平至少需 10^{14} W (3.1×10^{21} J/年)，世界煤总储量约为 10^{12} t (3×10^{22} J)，现在对煤的需求量为 $3 \times 10^{19} \sim 4 \times 10^{19}$ J/年，煤的总储量尚可用数百年。但其对环境的污染却是严重的问题，它的利用包含着很大的危害和风险。

确认世界上石油的总储量为 2.15×10^{11} t (9.48×10^{21} J)，除去石油、化工消耗量，估计石油可用到21世纪中期(2040~2050年)。石油作为重要的化工原料，人们不能把化工原料都消耗尽。

天然气储量所含能量与石油储量相当，估计尚可用60多年，核能是相对干净的能源，但现有的反应堆主要是燃料铀-235，核电厂的寿命为40年，2000座电功率为1GW的电厂每年要消耗2000t铀-235，需40万t天然铀，按近期铀价可用的铀储量，只能满足核电十几年的需要。所以从长远观点看，发展以铀-238或钍-232为燃料的堆型是当务之急。如果铀-238和钍-232能得以应用，其所含能量为 6×10^{23} J，比煤所含能量还要大20倍，可供世界对能量的消耗数千年。

再来看看我国的情况，估计我国到2020年，能量消耗量为 $26 \times 10^8 \sim 27 \times 10^8$ t标煤，即 $7.6 \times 10^{19} \sim 7.9 \times 10^{19}$ J。现有石油、天然气、燃料也只能维持30年左右。到2020年装机容量达 11×10^8 kW，如按 7×10^8 kW全用核电计，并以核电消耗铀-235为主，那么我国现有铀资源也足够维持5~6年时间，如果全部用电的10%用核电，估计我国铀资源(5000kt)也只能用半个世纪。可见开发以铀-238或钍-232为燃料的堆型对我国也同样是至

关重要的。

利用聚变能，特别是氘-氚的聚变放能，是人类长久以来的梦想和奋斗目标。氘存在于海水中，是取之不尽，用之不竭的核燃料资源。

可控热核聚变堆多年的研究说明，把原子核约束到一起的主要途径有两种：磁约束和惯性约束。自 20 世纪 50 年代以来，各国已建成多种类型的试验装置 200 多台，向上述目标前进。20 世纪 80 年代以来，一些大型托卡马克装置取得的试验成果证明了这些聚变装置的输出能量能大于输入能量，宣告了磁约束受控热核聚变的科学可行性已被证实。在此基础上，欧盟、美、日、俄四方联合开发的国际热核试验反应堆 ITER 已于 1998 年完成了工程设计，预期在 2020 年前建成，其设计功率为 500MW，等离子体持续时间大于 500s，如果这样一座大功率的聚变核反应堆能如期建成运行，将使聚变发电的工程可行性得到证实。但要走向经济的商用化发电，仍还有一系列技术问题需要解决，国际聚变界认为，从“聚变研究”到“聚变经济”，尚需要 50 年的时间，但前景是光明的。我国已参加 ITER 项目，在前沿科技上与国际开展合作。

以铀-238 或钍-232 作为生产核能的燃料，就可大大提高钍、铀资源的利用率。对于一个堆只需一次性的初始投料中有一定量的钚-239 或铀-233（铀-235）。在以后堆的运行中只消耗铀-238 或钍-232。一次性的初始投料可用现有的低浓铀或热堆乏燃料中的钚，也可利用聚变-裂变混合堆或核爆氘能发电生产初始投料所需的“铀钚”或“钍铀”混合燃料。

目前，全世界核电装机容量已达到 $3.7 \times 10^8 \text{ kW}$ ，运行核电机组为 436 台，另有 44 台在建设中，核能发电量贡献了世界总发电量的 15%，在发达国家中，这一比例更大，美国达到 19%，日本达到 28%，法国甚至达到 77%，而我国核能发电比例仅为 1.9%。

一台百万千瓦级核电机组全年只需要约 30t 核燃料，不排放二氧化碳；而一台百万千瓦级的燃煤机组在同等发电量下每年约消耗 $3 \times 10^6 \text{ t}$ 原煤，排放二氧化碳 $6.5 \times 10^6 \text{ t}$ 。

核电已经迎来了新一轮大规模发展。国际原子能机构预测，到 2030 年世界核电将新增 300 台百万千瓦级机组，贡献 72% 的温室气体减排量。大规模发展核电，将成为开启第四次工业革命——绿色工业革命的先驱。

我国是重视发展核电的。早在 1970 年 2 月 8 日，周恩来总理就批示要发展核电，但是由于种种原因，直到改革开放后，我国才正式开始建设核电站。我国核电比例不到 2%。

反思我国过去核电发展缓慢的原因，除了国家能源政策方面的考虑之外，主要是当时我国从事核技术领导的同志，在及时理解世界主题向“和平与发展”转变，尽快实现核技术的民用化方面前瞻性受局限；过分拘泥于传统的“项目驱动”管理模式，未能及时实现核电建设的产业化运作；同时还有一部分同志，拘泥于部门的眼前小利益，未能深刻理解“发展是硬道理”的道理，造成“一副担架，两个伤员，谁也抬不成”的被动局面。此外，我国在发展核电事业的早期阶段，曾经对堆型选择作过很长时间的技術论证。这也耗费了大量宝贵的时间。

今后，要大力弘扬“两弹一星”精神。1999 年 9 月，党中央、国务院在表彰为研制“两弹一星”作出突出贡献的科技专家大会上，将“两弹一星”精神进一步概括为“热爱祖国、无私奉献，自力更生、艰苦奋斗，大力协同、勇于登攀”，明确指出它是爱国主义、集体主义、社会主义精神和科学精神活生生的体现。没有高于国家利益的企业利益，要把国家全部从事核事业的力量团结起来，从国家利益、民族利益出发去开展工作，加强行政协调，

整合全国资源。“两弹一星”精神是核工业的精神，也是全体核工业人的精神，要努力发扬光大。

核能发电有核裂变、聚合、裂变-聚合的发电形式，核能发电所涉及的学科主要有原子核物理学、理论物理学、普通物理学、核电子学、热工水力学、金属材料、辐射防护、过程控制等多个学科，涉及面广、综合性强。现有教材和专业书籍大多为培养核能专业技术人员所编写，核反应堆物理、热工水力学、核反应堆运行等方面的教材篇幅量大，如何系统地、从核物理基础知识来阐述核电由核裂变、核聚合以及裂变-聚合发电直到工程实现的则较少，目前世界上大多数商用核反应堆是压水堆和沸水堆，而核聚变是准稳环形，因此本书对上述内容来进行阐述。

全书共分为八章，第一章至第七章由陈兴国编写，陈玮老师参与编写第八章，全书由陈兴国进行统稿。

本书在编写过程中，得到了湖南工业大学各级领导和专家的指导与支持，尤其是侯清麟、王汉青等校领导和电气与信息工程学院领导的大力支持。此外，南华大学邹树梁和文格波等校领导也给予了我大力支持，在此表示深深的谢意。

刘建国教授、唐代喜教授在此书的编著过程中，给予极大的支持和帮助，王金辉高级工程师在此书的编写过程中，做了大量的制图和整理工作，在此也表示深深的谢意。

由于时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请广大的读者批评指正。

作者于湖南工业大学电气与信息工程学院

2010年2月

目 录

第一章 核裂变基础知识	(1)
第一节 原子与原子核	(1)
第二节 放射性与核反应	(3)
第三节 原子核反应	(15)
第四节 链式裂变反应	(34)
第二章 受控聚变热核反应	(45)
第一节 受控热核反应的基本原理	(45)
第二节 约束问题	(55)
第三节 等离子体诊断学	(64)
第四节 稳定性问题	(81)
第五节 受控聚变热核反应的实现	(83)
第六节 受控核聚变的研究发展历程	(86)
第七节 聚变能利用的前景与展望	(91)
第八节 聚变裂变混合堆	(92)
第三章 核电站系统和设备	(110)
第一节 压水堆核电站概述	(110)
第二节 一回路系统主要设备	(112)
第三节 二回路系统与主要设备	(156)
第四节 一回路的辅助系统	(156)
第四章 核反应堆控制	(161)
第一节 原子堆的构造及用途	(161)
第二节 核燃料消耗、反应性和中子倍增时间	(164)
第三节 反应性控制方法	(180)
第四节 运行过程中反应性的变化	(199)
第五节 氙和钐效应	(218)
第六节 反应性平衡	(222)
第五章 核电厂的运行	(223)
第一节 核电厂的一般工作原理	(223)
第二节 核电厂运行特点	(230)
第三节 压水堆 (PWR) 核电厂启动和停堆过程	(264)
第六章 核电厂的辐射防护	(271)
第一节 辐射的危害性	(271)

第二节	核电厂放射性来源·····	(279)
第三节	核电厂的安全防护措施·····	(284)
第四节	放射性防护的一些知识·····	(302)
第五节	放射性废物管理·····	(302)
第七章	核电技术的应用·····	(308)
第一节	空间核反应堆·····	(308)
第二节	核动力船应用现状·····	(311)
第三节	军用核反应堆·····	(316)
第四节	核能在区域能源开发中的作用·····	(321)
第五节	核能的其他应用·····	(324)
第八章	核电技术发展远景·····	(328)
第一节	第三代核能系统·····	(328)
第二节	第四代核电技术·····	(333)
第三节	可控核聚变发电·····	(339)
参考文献	·····	(343)

第一章 核裂变基础知识

第一节 原子与原子核

一、原子

原子是构成自然界中各种元素的基本单位。近代物理学认为，原子的中心是一个小而重的原子核，电子则以电子云的形式在原子核周围运动，“电子云”实际上是电子出现的概率分布。原子的体积很小，原子的直径约为 10^{-8}cm （指电子轨道的直径，假定为球形），看不见也摸不到，而原子核在原子中所占的体积也非常小，原子核的直径为 10^{-12}cm ，如果把原子放大到一个大礼堂那么大，原子核也只就像是礼堂中心的一个小芝麻粒。

原子核带正电，每个电子带一个单位负电荷（电量约等于 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ）。原子核带正电荷在数量上等于外围电子所带负电荷的总和。原子呈中性。

二、原子核

原子核是由更小的核子构成的紧密整体，核子分为两类：一类是中子（用符号 n 表示），不带电，呈电中性；另一类是质子，带一个单位正电荷（用符号 P 表示）。带相同电荷的离子靠近时是相互排斥的。带正电荷的质子之所以能够结合原子核中，是因为核子之间还有更大的作用力。这种克服质子与质子之间的电磁斥力而把核子（质子和中子）结合在一起的力称为核力。核力是自然界中除了“万有引力”和“电磁相互作用”之外的第三种相互作用，即“核相互作用”。核力是短程力，只在原子核的尺度上才显现出强吸引力，当核子之间的距离增大到一定程度时，核力就会消失；如果核子之间的距离过小，核力还可以表现为斥力，因此核子不能无限接近。核力和电荷无关，质子、中子之间及质子和中子之间的核力都相等。核力是强相互作用力，可比质子之间的库仑斥力大 100 倍。

除了普通氢原子核只有一个质子外，其他所有物质的原子核既包含质子又包含中子。各种物质原子核中的质子或者中子数目的不同决定了它们原子核特性的不同。

三、质量数和原子序数

因为原子是电中性的，原子核所带的电荷必须与轨道电子所带的总电荷数值相等，符号相反，如果以单个电子的电荷 e 为单位，则原子核的电荷数值就是轨道电子数 Z ， Z 也就是原子序数，任何确定原子序数的方法都能用来测定原子核的电荷。确定原子序数的最简单的方法是化学方法。我们知道，根据各种原子的不同的化学性质，我们可以把它们安排到周期表内的一定的位置上去，这也就确定了它们的原子序数 Z 。事实上，完全依靠化学方法来确定原子序数是有困难的，例如，对于过渡元素而言，由于它们的化学性质互相关似，它们的先后次序就比较难确定，稀土元素的情况更为突出，需要根据它们的相对原子质量来进行排

列。可是，单凭相对原子质量的大小也不能解决问题。例如，按照相对原子质量的大小，K (39.1) 和 Ar (39.9)，Ni (58.7) 和 Co (58.9)，I (126.9) 和 Te (127.6) 这三对元素在周期表中的次序都应加以颠倒。因此，除 $Z \leq 13$ 的轻元素外，一般都不用化学方法来最后确定原子的 Z 值。利用 X 射线或 α 射线的散射，可以更明确地测定 Z 值。原子核中质子与中子的总数 A 称为原子核的质量数，原子核中的质子数也是原子序数。

四、同位素

元素的化学性质由原子核中的质子数决定，而不是由相对原子质量决定。即使核内包含的中子数目不一样，但包含的质子数目相同的原子都认为是同一种元素。将具有相同的质子数，而中子数不同的同一种元素的几种原子，称为同位素。

在人们已知的 100 多种化学元素中，有 1500 多种不同的原子核，其中 300 种是稳定的同位素，1200 种是放射性同位素。

现有的核电站中，铀是重要的元素，其在自然界中至少存在 3 种不同同位素，质量数分别为 234、235、238。其中 ^{238}U 含量最丰富，约为 99.28%， ^{235}U 含量约为 0.71%， ^{234}U 含量非常少。由于同位素的化学性质一致，所以一般不能用化学方法区别各种同位素，只能用物理方法或核物理方法将它们分开。反应堆中所用的核燃料中， ^{235}U 的含量约为 3%，铀的浓缩是通过离心法完成的。

五、核的平均结合能

既然核子是靠核力作用结合在一起形成原子核的，若要把原子核中的核子拉开成分散状态，则需要消耗能量。或者说，若是分散的核子结合成原子核，则会释放出能量，也即核力与电磁斥力的做功之差。这一能量称为结合能。对于确定的原子核，其结合能越大，表明核子结合得越紧密。原子核的结合能与核子数 A 的比值称为平均结合能，相当于是把原子核分离成单个核子时需要每个核子所做的功。平均结合能反映了原子核这个核子系统结合的牢固程度。不同类原子核的平均结合能是不同的。

如果把分散的核子结合在一起组成原子核，会释放出大量的结合能。这些能量是由质量转化而来的，因此原子的实际质量小于组成原子的电子、中子、质子应有的质量之和，这个原子应有的质量和实际质量之差称为质量亏损。亏损的质量转化为能量即为结合能。

爱因斯坦的相对论提出，物质和能量是可以相互转换的，它们是同一事物的不同表现形式，其定量转换关系为

$$E = mc^2 \quad (1-1)$$

式中 E ——能量，J；

m ——质量，kg；

c ——真空中的光速，为 300000000m/s。

千克 (kg) 和焦耳 (J) 是宏观的质量和能量单位，原子的质量很小，在讨论原子的质量时，经常采用相对单位。第一个试图确定相对原子质量的科学家是道尔顿，他把氢的原子量定为 1 作为基准。现在，物理学上把碳-12 ($^{12}_6\text{C}$) 的原子质量 12 作为基准，即把碳-12 原子质量的 $1/12$ 作为一个原子质量单位，有时也写为 amu，1 个原子质量单位 = $1.66053886 \times 10^{-27}$ kg。原子核中质子和中子的质量大体相等，约等于 1，现代准确的测量结果是，质子的质量是 1.007825，中子的质量是 1.008665。如果采用原子质量单位作为质量的单位，

则质能转换关系可以写为

$$E=931m \tag{1-2}$$

式中， E 的单位是兆电子伏特，即 MeV， $1\text{MeV}=1.60217646\times 10^{-13}\text{J}$ 。

质能转换公式可以很好地解释放射性元素辐射出射线，并伴随有质量减轻的现象。例如，铀原子核辐射出能量极大的 γ 射线，同时辐射出高速 α 粒子（氦核）和 β 粒子（电子流），这个过程称为衰变。由于 α 粒子和 β 粒子的速度很高，分别可达光速的 $1/10$ 和 $9/10$ ，因此也具有很高的能量。这些能量也正是由质量亏损转化而来的。

原子核内质子和中子的数目之和称为质量数。质量数不同，原子核的平均结合能有所差别，如图 1-1 所示。平均结合能越大，说明在形成该原子核时，每个核子平均放出的能量越大。大部分原子核的平均结合能在 $7\sim 8.5\text{MeV}$ 之间。由平均结合能曲线，可以看出，质量数较小和较大的原子的平均结合能偏低，而质量数中等的原子的平均结合能偏高。

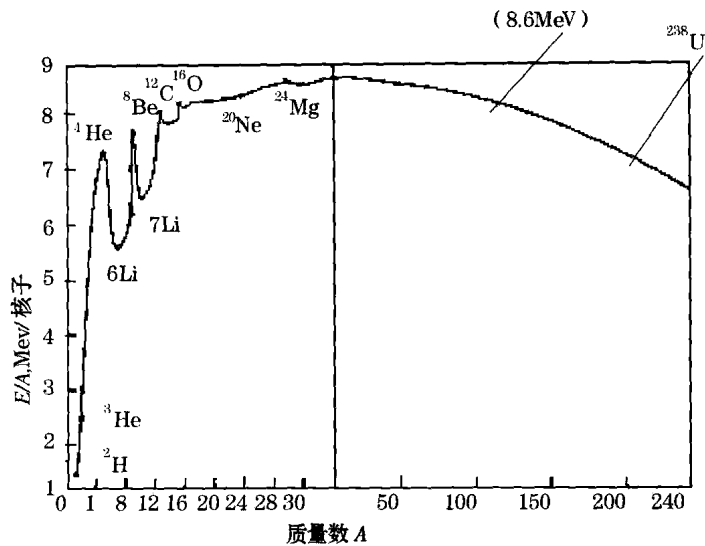


图 1-1 元素的平均结合能

从图 1-1 中还可以看到，除了几个轻核外，其他元素的平均结合能极为接近，质量数在 90 左右的原子核具有最大平均结合能，因此最为稳定。如果将很轻的原子核转变为较重的原子核，则质量亏损比原有的原子核多，增加的质量亏损对应着能量的释放，这就是核聚变反应；同样将很重的原子核分裂成较轻的原子核，同样可以释放出能量，这就是核裂变反应。目前核反应堆中应用的就是核裂变原理。

第二节 放射性与核反应

一、放射性衰变

自然界中不稳定的同位素以一定速率自发地变化，一般放出带电粒子并以辐射形式放出能量，称为放射性衰变。

原子核不受外界影响自发地通过核辐射转化为另一种核的现象，称为放射性，这种原子核叫做放射性核。放射性原子核不稳定的原因在于其内部中子数与质子数的比例超出了一定

的范围。在一定范围之内，原子核是稳定的，否则，不稳定的原子核向着更稳定的方向自发地变化。

放射性原子核所放射的射线除中微子束外，还有 α 放射性原子核所放射的 α 粒子所组成的 α 射线， β 放射性原子核所放射的阳或阴电子所组成的 β 射线，以及 γ 射线和 X 射线。 γ 射线主要是在原子核从激发态跃迁到较低的能态的过程中产生的。属于 β 放射性原子核的。以轨道电子俘获形式衰变的原子核不放射 β 射线，而放射特征 X 射线。

如果我们把所有已知的原子核用质子数 Z 和中子数 N 作为坐标标绘在图上，便可以看到，稳定的轻原子核大致处在 $N=Z$ 的直线上，图 1-2 就很清楚地表明这一点。当质量数 A 增加时，稳定原子核的电子逐渐向这条线的上方中子数加多的方向偏移。这是因为稳定重原子核所含的质子数必须少于中子数，否则，它们所积累的库仑势能便要引起原子核的不稳定。 β^- 和 β^+ 放射性的原子核分别在稳定原子核带的上方和下方。 α 放射性原子核在最上面。显然，它们之间的分界是不鲜明的。

在图 1-2 中稳定原子核限制在一个狭带中，这表示稳定性对于 N 和 Z 的关系或 A 和 Z 的关系有一定的要求，这个关系非常接近于 $N=Z$ ，放射性原子核衰变后所形成的原子核必须处于或接近于稳定区域。如果存在的是后者，就会有一连串的放射性衰变，使最后的产物到达稳定区域。这种情形主要在重原子核和裂变产物中出现，这也就是开始的放射性原子核离开稳定原子核区域较远的情形。从图中还可以清楚地看到放射性原子核多于稳定性原子核的情况。显然，还有一些在图上尚保持空白的放射性原子核可以被发现，新的稳定性原子核被发现的可能性似乎不太大。

二、放射性类型

放射性衰变的主要类型有如下几种：

1. α 蜕变

原子核衰变时放出 α 粒子，核本身转变为另一种新的原子核。 α 粒子是由两个中子和两个质子组成的氦原子核。 α 蜕变也称为 α 射线。 α 射线的电离作用很大，但是它的贯穿能力较弱，在空气中经过 2.6~11cm 的路程就会被吸收。

放射性元素发射出的 α 粒子初速度约为 10^9 cm/s，这相当于几个兆电子伏特的能量。

通过任何物质的时候， α 粒子都将逐渐失去自己的能量，最后要停止下来。在威尔孙云室中，对于不同的放射性元素， α 粒子在空气中（在正常压力下）的轨道痕迹长度约在 2.6~11.5cm 之间。在这样的路程长度上， α 粒子的速度失去较多，以致它不能再使气体电离。对于一定的放射物质，所有路径痕迹的长度差不多相同，这说明从核中抛出时 α 粒子的速度有很大的均匀性。 α 粒子路线长度称为射程。图 1-3 的实线曲线表示通过的路程等于或大于给定的值 R 的 α 粒子数目 n 与 R 之间的关系。显然，直到某一值 $R_{\min}$ 为止，粒子的数目几乎保持恒定。此后通过路程 $R > R_{\min}$ 的粒子数目迅速减少，这表示该放射物质所发射的 α 粒子射程长度在一很小的范围内变化。虚线表示 α 粒子的数目按射程长度的分布。

通过物质的时候， α 粒子所损失的能量主要是由于与电子碰撞。同时在每一碰撞中 α 粒子只损失自己能量的很小一部分。它必须受到许多次的碰撞，才会完全停止下来。射程长度的差异带有涨落的性质，与射程本身长度比较起来是很小的。

射程长度 R 近似地与 α 粒子 v 初速度的立方成正比：

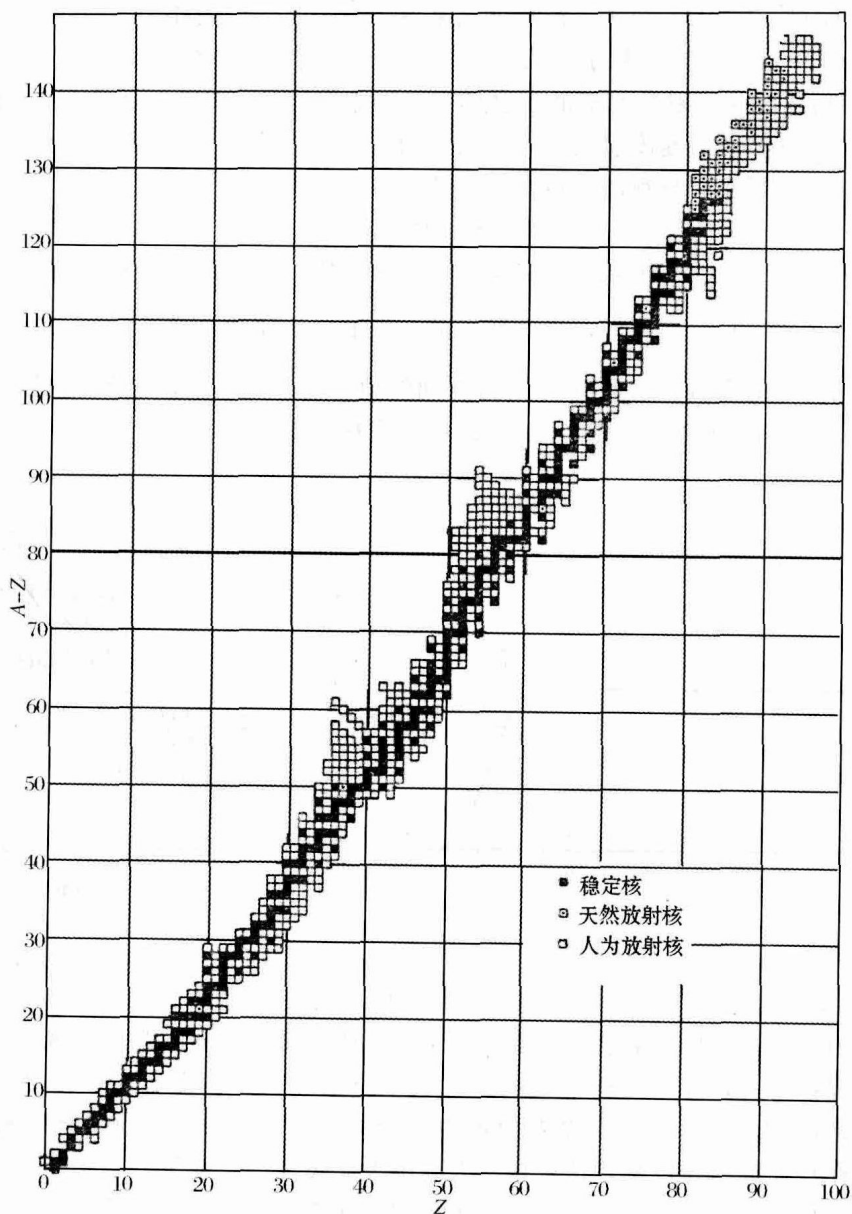


图 1-2 稳定及放射性同位素

Z 是原子序数，即核内的质子数； A 是质量数； $A-Z$ 是核内的中子数

$$R \cong av^3 \quad (1-3)$$

这关系式对于中等速度的 α 粒子是正确的。对于高速度的 α 粒子，射程的增加近似地与 v^4 成正比。

能够由 α 粒子在磁场中的偏转准确地测定 α 粒子的速度。П·Л·卡皮采最先完成了这种测定，他创制出一种特殊的装置，能够在短时间内获得强度很大（几十万奥斯特）的磁场。磁场中的测定表明，一种放射原子一般说来发射出速度彼此稍微不同的几组 α 粒子。每一组内的速度是很均匀的。而且对于一定的放射元素，除了具有正常射程长度的 α 粒子之

外，还有少量的长射程的 α 粒子。例如就镭来说，对于每 100 万个具有 7cm 射程的 α 粒子，约有 28 个具有 9cm 射程的 α 粒子，约有 5 个具有 11cm 射程的粒子。

α 粒子的初速度与放射性元素的半衰期 $T_{\frac{1}{2}}$ 之间存在着一定的关系：半衰期愈小，放射性元素发射出的 α 粒子的速度愈大。在量的方面，这关系可以用所谓盖格-纳塔耳定律表示出来，这定律是根据实验材料的分析而确定的：

$$\ln R = A \ln \lambda + B \tag{1-4}$$

式中 R 为 α 粒子的射程长度， λ 为放射性衰变系数， A 和 B 为常数。因为 $R \cong av^3$ ， $\lambda \cong \frac{1}{\tau}$ ，所以由关系式 (1-4) 可知，半衰期短核发射出快速的 α 粒子。

对于不同的放射系数，常数 B 有稍为不同的值。在图 1-4 中，沿横轴标出 $\ln R$ ，沿纵轴标出 $\ln \lambda + 20$ ；对于不同的放射系数，盖格-纳塔耳定律为平行的直线所表示。

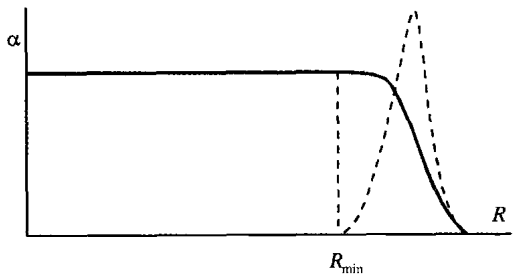


图 1-3 α 粒子射程曲线

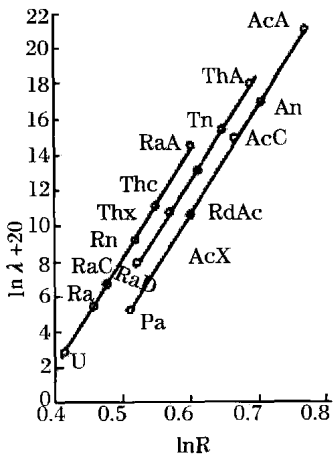


图 1-4 盖格-纳塔耳定律

α 粒子散射实验表明，在 α 粒子与任何原子核之间，直到 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{cm}$ 的距离，都作用着库仑斥力。在被轻核散射的情形下，对于数量级为 10^{-12}cm 的距离，观察到与库仑定律不符合的情况：斥力较库仑定律准确成立的情形下的斥力小。看起来好像是除库仑斥力之外，还出现附加的引力。但是，除极少数的例外情形外， α 粒子同原子核的碰撞都是弹性的，这表示在核周围存在位垒，这位垒最大高度大于飞来的 α 粒子的初动能。同时 α 蜕变过程表示重元素核里存在着 α 粒子。可见原子核内必定存在位阱。核的总位场可用图 1-5 所示的那种形状的曲线表示。这曲线靠外面的部分为双曲线，相当于核外场的库仑性质。

实验结果分析证明，原子核蜕变时抛出 α 粒子的速度，不与经典力学的概念一致。例如在铀的 α 蜕变情形下，实验证明，铀核对 ThC' 所发射是很迅速的，具有 8.8MeV (图 1-6) 能量的 α 粒子的散射，是和库仑定律符合的。可见铀核位垒的极大值高于 8.8MeV，从经典的观点来看，由此得出的结论是：从铀核内抛出的 α 粒子的能量应该大于 8.8MeV (图 1-5)，因为 α 粒子必须克服位垒才能从铀核内飞出来。实际上铀核所发射出的 α 粒子的能量只等于 4MeV。从经典的观点来看这情况是完全不可理解的，但可以用量子力学说明。量子力学中证明基本粒子具有一定的透过位垒的概率。

由量子力学可知，位垒宽度 d 愈小，粒子透过位垒的概率愈大。由图 1-6 可以看出来，位垒宽度 d 在下面的部分较大，在上面的部分较小。如果 α 粒子是在某放射性核内的深能级

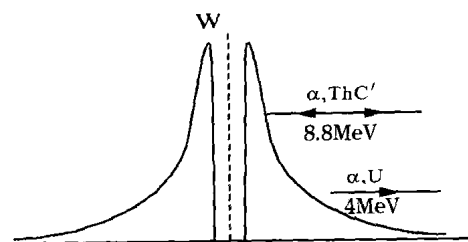


图 1-5 势垒

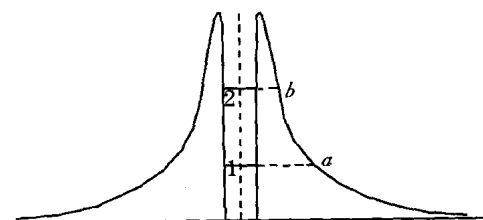


图 1-6 核内 α 粒子的能级

1 中，则它透过位垒的概率很小；这表示这种核有很长的半衰期；但是，如果粒子终究“透过”位垒，则它将在位能曲线上较低的点 a，因而它由于核底排斥力而得到的速度将很小。相反地，如果粒子是在较高的能级 2，则它透过位垒的概率大，因而当它在核外的時候，它所得到的速度也大。这样的核，在它那里 α 粒子是在高能级中，将有较小的半衰期，并将发射出快速的 α 粒子。由此可见，量子论直接引导到由盖格-纳塔耳定律得出的关系。必须准确地知道核的位能曲线的形状，才能够严格地、定量地描述 α 蜕变过程。

2. β 衰变

当原子核内部中子和质子的比例超过稳定的极限时，同位素就会放出电子流和正电子流，称为 β 辐射（或 β 射线）。 β 射线的穿透能力较强，在空气中要穿过几米到十几米的路程才能被吸收。

所谓 β 衰变是这样—个过程，在这个过程中原子核中的一个中子转变成质子，同时放射出一个阴电子，或一个质子转变成中子，同时放射出一个阳电子；有时，也可能是原子核吸收原子的一个轨道电子。

已经由 β 粒子在磁场中的偏转，研究了 β 粒子按速度的分布。这分布为一连续谱所表征： β 粒子以各种能量（从某—定的上限至零）发射出来。图 1-7 中的曲线是关于 RaE 的 β 粒子按能量分布的曲线。一切情形下的分布，都是一条具有一个极大值和在大能值方面有一个明显界限的光滑曲线。

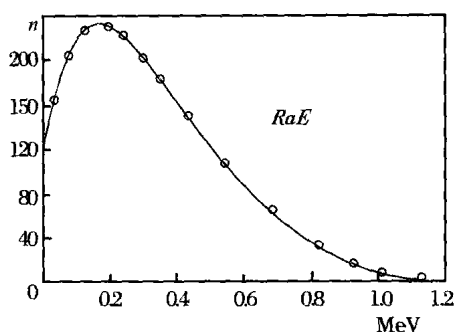


图 1-7 β 粒子按能量的分布曲线

说明 β 粒子的连续谱曾经遇到很大困难。 α 蜕变研究证明了核能够在少数个不连续的能态中。因为在放射系中， α 蜕变与 β 蜕变交替发生，所以在 β 蜕变时也应该放出一定的能量 $W_1, W_2, \dots$ 。由此可知， β 粒子应和 α 粒子—样，形成一个或少数个具有一定速度的组。能够清除这一困难的简单假设，是假定最初—切 β 粒子都以—种能量从核内抛出，这能量等于最大能量。部分能量损失是由于在核外发生并且带有次级性质的过程。但这假设被直接的