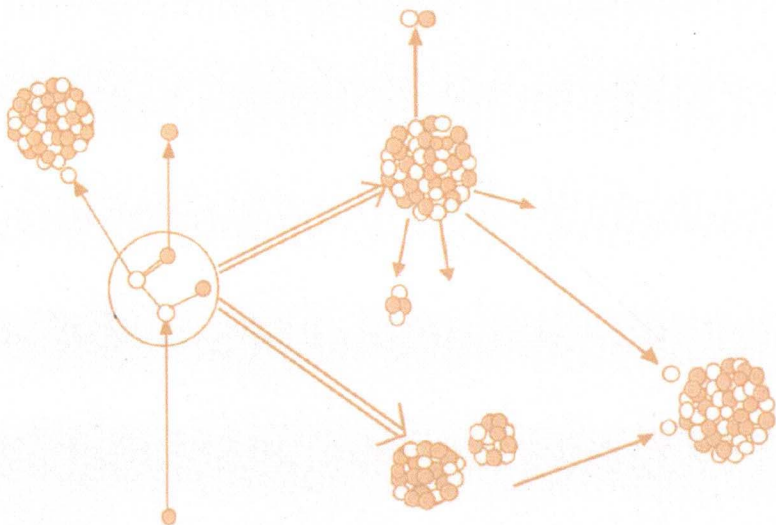


“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材

核能物理与技术概论

► 邱励俭 王相纂 吴 斌 编著



中国科学技术大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材

核能物理与技术概论

Introduction on Nuclear Energy Physics and Technology

邱励俭 王相纂 吴 斌 编著

中国科学技术大学出版社



内 容 简 介

本书介绍了核能物理与技术方面的相关内容,主要在核能利用的框架下,介绍了核能的基本知识和概念、核能的各种产生方式以及核燃料循环等内容。适合作为高等院校相关专业的研究生教材使用,对相关研究人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

核能物理与技术概论/邱励俭,王相綦,吴斌编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-312-02754-3

I. 核… II. ①邱… ②王… ③吴… III. 核物理学—研究生—教材
IV. O571

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 186187 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:22 插页:2 字数:418 千

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升
张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本	史济怀	古继宝	伍小平
刘 斌	刘万东	朱长飞	孙立广
汤书昆	向守平	李曙光	苏 淳
陆夕云	杨金龙	张淑林	陈发来
陈华平	陈初升	陈国良	陈晓非
周学海	胡化凯	胡友秋	俞书勤
侯建国	施蕴渝	郭光灿	郭庆祥
奚宏生	钱逸泰	徐善驾	盛六四
龚兴龙	程福臻	蒋 一	窦贤康
褚家如	滕脉坤	霍剑青	

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

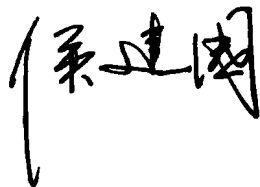
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养

了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养拔尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献。



中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

前 言

核能的发现是 20 世纪物理学的重大事件,从此人类进入原子能时代。物理是科学的基础,而能源又是工业的基础,两者既独立,又相互影响。裂变反应从 1935 年中子被认识开始,经历了发现放射性、中子链式反应、原子弹(原子反应堆)几个过程,最终形成了一代核电能源。由于(铀、钍)资源有限的核燃料问题、(三里岛事故、切尔诺贝利事故引发的)安全问题、核废料(裂变产物、锕系元素)处理问题,公众产生畏“核”情绪,使得世界范围内的核能发展速度有所减缓。日本大海啸导致的福岛核电站危机,促使人们发展安全级别更高的核能系统。显然,从人类能源的长远需要出发,希望能得到恒定长期能源,避免日益严重的“温室效应”的困扰,裂变能源将会继续得到发展,这是毋庸置疑的。

聚变反应 1939 年就被发现,从而揭示了太阳(以及其他恒星)能量产生的奥秘,人们开始关注氢核聚变反应。原子弹爆炸提供了实现聚变反应所需的高温条件,促使氢弹(1952 年)试验成功,人们开始考虑如何控制热核反应,如何实现热核反应,如何才能约束高温等离子体。在磁约束与惯性约束研发中,托卡马克异军突起(在前苏联 T-3 上克服了巨大的宏观稳定性),促使(1985~1990 年在 TFTR、JET、JT-60U 上)等离子体参数达到接近聚变堆的水平,继而提出 ITER 计划(1987~2005 年),多国合作共同建造聚变实验堆来验证科学可行性及部分工程可行性。磁约束聚变的发展之所以经历了这么长的时间,一方面是对约束高温等离子体了解不完整,工程非常复杂,的确不容易。另一方面是在国际合作上往往受到政治上的“牵制”,如 ITER 的“合作”与“选址”就费了 5~6 年时间。若 ITER 建造到 2015 年,再考虑建造 DEMO 验证工程可靠性到 2030 年,聚变能源的商用化到本世纪中叶方有望实现。尽管如此,聚变核能仍然是唯一能永远解决人类能源问题的可能方案。

新中国核科学与技术是在一穷二白的基础上起步的。旧中国有两个核科

研机构,一个是解放前不久南京中央物理研究院刚刚设立的原子核物理实验室,仅有吴有训先生等5名科技人员;另一个是北平研究院镭学研究所基础上成立的原子学研究所,也只有钱三强先生等数名科技人员。新中国成立后,在这两个研究机构的基础上成立了中国科学院近代物理所,首任所长和副所长分别由吴有训先生和钱三强先生担任,1953年10月6日中国科学院决定将近代物理所的部分改名为“中国科学院物理研究所”。

“一五”计划期间,国家确立了(“两弹一星(艇)”)工程为战略目标的)原子能应用为我国核科学与技术的最初发展方向。此后,我国的原子能应用取得了长足的发展:1964年10月16日15时,中国第一颗原子弹在中国西部爆炸试验成功;1966年10月27日,中国第一次导弹核武器试验成功;1967年6月17日,中国第一颗氢弹爆炸试验成功;1969年9月23日,中国进行首次地下核试验;1971年9月,中国第一艘核潜艇成功下水。目前,包括“两弹一星(艇)”)在内的国防力量已经成为我国国家安全、和谐发展、和平崛起的重要保障。1958年新组建的中国科学技术大学围绕“两弹一星(艇)”)设置了原子核物理、原子核工程和放射化学等六个本科专业。此后,中国科学技术大学为国家培养了数千名核类优秀科学技术人才。

改革开放以来,我国的核类事业经历了两个不同的发展阶段。前期主要是以拓展动力堆技术为代表的中国民用核电发展,以及用于粒子物理、原子核物理和多学科研究为代表的大科学装置发展。此期间,国内形成了民用核电国有企业群,形成了以研究院所和大学为主力军的大科学装置工程群。后期,中国核电事业进入了快速发展期,投入运行、在建和计划的核电堆达到44座,电功率额度将达到44.05 GW;我国核技术大科学装置工程向高端水平进军,在聚物理、核质谱与高亮度光源、等离子体物理等方向取得了世界领先的成果。目前,我国在快中子实验堆、高温气冷实验堆、电子冷却重离子环、第三代先进光源、非圆截面全超导托卡马克实验装置上均已取得重大进步,并开展了高功率质子加速器驱动次临界嬗变堆的概念设计研究。近十年来,中国科学技术大学的核科学与技术学科也取得了高速发展,形成了拥有本硕博完整教育体系,具备加速器物理与反应堆物理相结合、核裂变能与核聚变能科学与工程相结合、同步辐射光源与多学科应用相结合的多学科方向科研体系。

本书是在中国科学技术大学研究生通修课程2005年至2011年讲稿基础上整理而成的。其目的是在核能科学与工程统一的框架下,全面地叙述核能的基本知识、概念,尤其对 neutron 输运及其方程、公式及程序,作为统一的整体来

讲授。除了第1章为概述性内容以外,第2章至第6章讲授的内容主要涉及裂变过程,第7章、第8章与第10章讲授的内容主要涉及聚变过程,第9章涉及加速器驱动次临界系统过程,第11章讲授的内容主要涉及核燃料循环过程。因此,本书主要用于研究生教学,也可以用于高年级本科生教学,以及研究及技术人员参考之用。

由于涉及内容庞杂,加之作者水平所限,书中难免存在错漏之处,恳切希望使用此书者在内容或文字上给予指正,以便在未来版本修订中加以完善。

邱励俭 王相綦 吴斌
2012年4月

目 录

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 核能	(1)
1.1 爱因斯坦伟大的预见 $E = mc^2$	(1)
1.2 可资利用核能的种类:裂变能与聚变能	(5)
1.3 核聚变能是解决人类能源需求的主要选择	(8)
1.4 建设 ITER 的目标	(10)
1.5 惯性约束核聚变	(12)
1.6 加速器驱动的次临界核能系统	(15)
参考文献	(16)
第 2 章 中子与核反应	(18)
2.1 中子简介	(18)
2.2 中子与原子核的相互作用	(19)
2.3 中子截面与核反应率	(25)
2.4 核反应率、中子通量密度	(28)
2.5 截面随中子能量的变化	(29)
2.6 共振吸收	(33)
2.7 多普勒效应	(34)
2.8 核裂变过程	(35)
2.9 裂变产物与裂变中子	(37)
2.10 中子的慢化	(38)
2.11 链式反应	(45)

2.12 中子源技术	(47)
参考文献	(51)
第 3 章 中子输运理论、燃耗方程与扩散近似	(52)
3.1 中子输运方程研究的历史	(52)
3.2 输运方程的边界条件	(57)
3.3 近似求解	(58)
3.4 反应堆燃耗理论	(63)
3.5 二维输运燃耗程序 BUDOT 简介	(66)
3.6 裂变反应堆的理论基础——扩散近似	(69)
3.7 双群理论	(74)
3.8 有反射层反应堆的单群扩散理论	(81)
3.9 栅格的非均匀效应及其均匀化处理	(86)
参考文献	(89)
第 4 章 临界系统与次临界系统中的中子行为	(90)
4.1 临界堆、次临界堆中子学理论	(90)
4.2 次临界系统	(98)
4.3 缓发中子份额	(103)
4.4 聚变中子源强扰动对系统的影响	(104)
4.5 次临界堆中子学安全特性	(105)
4.6 聚变驱动次临界堆反应性反馈机理	(106)
4.7 核裂变运行管理与裂变产物中毒(碘坑)	(110)
参考文献	(113)
第 5 章 裂变反应堆	(114)
5.1 裂变反应堆的发展历程	(114)
5.2 裂变反应堆现在面临的主要问题	(116)
5.3 中国核电的发展方向	(119)
5.4 裂变反应堆设计过程	(120)
5.5 压水堆(PWR)裂变电站示例	(129)
5.6 先进轻水堆	(131)
5.7 高温气冷堆 HTGR 示例	(139)
参考文献	(147)

第 6 章 快堆的工作原理及现况	(148)
6.1 快堆概念	(148)
6.2 快堆的安全性考虑	(155)
6.3 快堆的优点和难点	(156)
6.4 快堆的经济性有待验证	(157)
6.5 快堆结构、中间回路	(157)
6.6 快堆前景展望	(160)
6.7 快堆现状	(163)
6.8 中国实验快堆发展	(172)
参考文献	(181)
第 7 章 聚变堆	(182)
7.1 研究核聚变的意义	(182)
7.2 可利用的聚变核反应	(183)
7.3 实现受控核聚变的基本要求	(183)
7.4 受控核聚变研究历程	(185)
7.5 托卡马克的工作原理	(188)
7.6 EAST 介绍	(197)
7.7 ITER 介绍	(200)
7.8 聚变堆设计的方法与步骤	(207)
7.9 CAD 设计与系统设计	(210)
7.10 世界各国聚变商用示范堆的参数比较	(211)
参考文献	(213)
第 8 章 聚变驱动次临界系统(FDS)	(215)
8.1 聚变驱动次临界堆的基本组成	(215)
8.2 聚变驱动次临界堆物理过程	(219)
8.3 聚变驱动次临界堆的特点	(222)
8.4 聚变驱动次临界堆聚变堆芯	(223)
8.5 聚变驱动次临界堆包层	(225)
8.6 计算程序和数据库	(239)
8.7 聚变驱动次临界堆的中子学设计和优化	(242)
8.8 聚变驱动洁净核能动力系统的可行性	(248)

参考文献	(252)
第 9 章 加速器驱动的次临界核能系统	(253)
9.1 加速器驱动的次临界反应堆核能系统	(253)
9.2 工作原理	(256)
9.3 德国 FZK 三束 ADS	(264)
9.4 计划中的 ADS 主要装置及其参数	(266)
9.5 国际上散裂中子源所用加速器运行状态及组成方案	(284)
9.6 中国 ADS 研发与散裂中子源	(285)
参考文献	(288)
第 10 章 惯性约束聚变	(290)
10.1 惯性约束聚变的基本原理	(290)
10.2 靶丸与驱动器	(300)
10.3 快点火惯性约束聚变	(305)
10.4 Z-箍缩	(308)
10.5 前景	(310)
参考文献	(312)
第 11 章 合理的核燃料循环	(313)
11.1 燃料循环	(313)
11.2 嬗变与分离	(325)
11.3 展望——进入 21 世纪的核燃料循环	(335)
参考文献	(339)

第 1 章 核 能

19 世纪末,物质结构的研究开始进入微观领域,此后的几十年内,人类在这方面取得了重大进展,在物理学中建立了研究物质微观结构的三个分支学科:原子物理,原子核物理和粒子物理;发现了微观世界的运动规律,创造了量子力学和量子场论;原子能的释放,为人类社会提供了一种新能源,推动社会进入原子能时代。原子能的释放,是通过原子核反应实现的,是 20 世纪物理学对人类社会的最大贡献之一。人们又称原子能为核能。将核能转化为热能或转化为电能,都要通过核反应堆这样的装置。因此,核能物理与技术研究的对象,总是与各种各样的核反应堆装置有关。而核反应堆相关的物理与技术的研究,涉及领域小到原子核及其核子层次,大到原子与晶体,及各种物质材料的尺度,十分广泛。因此,核能物理与技术范畴,是涉及核反应堆装置的基础课程之一,此课程的基础知识及其深化,涉及包含物理学、生物学与工程学的诸多课程知识。如图 1.1 所示为核能物理与相关技术研究范围。为了满足核事业发展对人才的巨大需求,为了有助于大量非核学科毕业的本科生进入核科学与技术学科攻读研究生学位,我们将课程定位于核能物理与技术概论。课程内容主要涉及当前核电站快速发展的裂变反应堆(压水堆和高温气冷堆),正在研发中的快中子堆,并简单介绍未来的核反应堆(聚变堆、聚变裂变混合堆和加速器驱动的裂变堆)。

1.1 爱因斯坦伟大的预见 $E = mc^2$

原子核主要是由称之为核子的质子和中子构成的。质子和中子,都由更深层次的基本粒子组成。粒子物理学的发展告诉我们,构成物质世界的基本粒子有 12

种:6 种夸克(上、下、奇异、粲、底、顶),3 种带电轻子(电子、缪子和陶子),3 种中微子(电子中微子、缪中微子和陶中微子)。因此,质子和中子是可以相互转化的。而核能物理与技术概论中最基础的知识之一,就是原子核物理的中子物理学。为什么核能有那么巨大的能量?可以经由对爱因斯坦(A. Einstein)提出的质能关系式的认识得到理解。

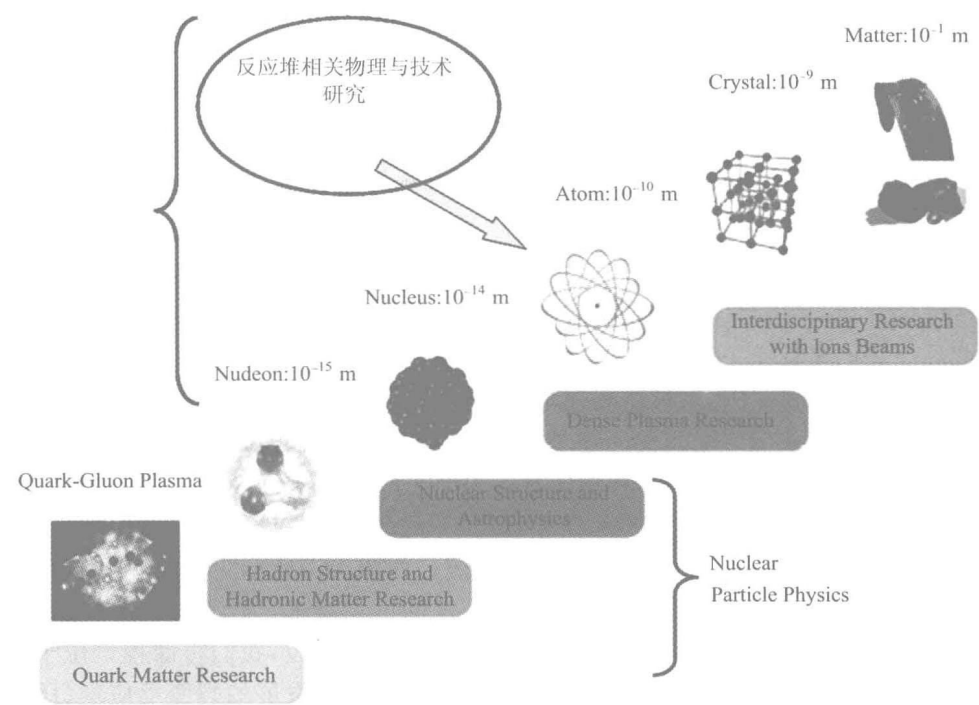


图 1.1 核能物理与相关技术研究的范围

在 20 世纪初古典物理学出现危机的关键时刻,爱因斯坦是推动物理学革命思想的一面光辉旗帜。他提出了狭义相对论和广义相对论,从根本上改变了传统的绝对的时空观念,将时、空、物质和作用力通过对称性统一起来。他提出了质量和能量的关系式 $E = mc^2$ 。它表明,任何物质,当它的质量为 1 g 时,它具有的能量为 $E = 1 \times (3 \times 10^{10})^2$ erg,反之,能量变化为 1 erg 时,它的质量有 $(1 \times 10^{-20})/9$ g 的变化。对氧和碳结合的化学反应来说,其反应前后具有的质量差仅为

$$\Delta m = m_C + m_{O_2} - m_{CO_2} = 7.3 \times 10^{-33} \text{ g}$$

而释放的能量为

$$E = 6.52 \times 10^{-12} \text{ erg}$$

我们知道, $10^7 \text{ erg} = 1 \text{ J}$, 因此, 对氧和碳结合的化学反应, 质能转换获得的能量是很低的。这是因为化学反应主要是原子核外电子之间的相互作用, 这种化学反应释放的能量与核能相比, 是很小的。

根据狭义相对论, 一个质量为 m_0 的物体, 它的总能量为

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.1)$$

当物体的速度 v 远小于光速 c , 即 $v \ll c$ 时, $E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}$ 。人们称 $m_0 c^2$ 为静止能量, 称 $\frac{m_0 v^2}{2}$ 为动能。更严谨的表述, 我们称 m_0 为物体的静止质量, 而称

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

为物体的质量(或运动质量)。

爱因斯坦的质能关系式告诉我们物体的质量与能量之间有确定的对应关系。因此, 我们习惯上可以用能量单位来表述物体的质量。在核能物理中, 单个质子的静止质量, 用静止能量 938.27231 MeV 来表述; 而单个中子的静止质量, 用静止能量 939.56563 MeV 来表述; 当质子与中子存在于原子核内被称为核子时, 单个核子的静止质量, 用静止能量 931.49432 MeV 来表述。失去外层电子的氢离子, 就是单个质子。在质子加速器中, 被加速的带电粒子束, 就是由大量有相同运动规律的质子构成的束流。这样的质子的静止质量, 可以用 938.27231 MeV 来表述。对于失去外层电子的氦离子, 其原子核内有一个质子和一个中子, 此时的质子和中子称为核子, 只能用核子的静止能量 931.49432 MeV 来表述。采用这样的能量量纲的好处是显而易见的: 计算过程变得非常简明。

原子核的核子数通常用符号 A 来表述。当采用碳元素的原子质量的 $1/12$ 为原子质量单位(用符号 u 表示)时, 核子的质量数都非常接近于 1, 由核子组成的原子核的质量数 A 就等于核内质子数 Z 和中子数 N 之和, 即质量数等于核子数。在原子核物理中, 具有相同质子数和不同中子数的核素, 称为同位素; 具有相同中子数和不同质子数的核素, 称为同中子素。其他的核素名称, 就不在此一一介绍了。

实验发现, 原子核的质量总是小于组成它的质子和中子的质量和。例如氢元素与其同位素氘, 氢原子的质量 $m_H = 1.007825 u$, 中子的质量 $m_n = 1.008665 u$, 因此质子与中子的质量和是

$$m_{\text{H}} + m_{\text{n}} = 1.007825(\text{u}) + 1.008665(\text{u}) = 2.016490(\text{u})$$

经实验测定,氘原子的质量 $m_{\text{D}} = 2.014102 \text{ u}$,而氘原子和氢原子都只有一个核外电子,由此可求得一个中子和一个质子在组成氘核后质量发生的变化:

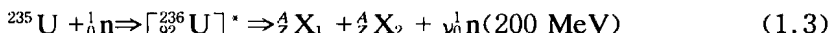
$$(m_{\text{H}} + m_{\text{n}}) - m_{\text{D}} = 2.016490(\text{u}) - 2.014102(\text{u}) = 0.002388(\text{u})$$

这种质量减少的现象同样存在于其他的原子核中,人们将这种现象称作“质量亏损”。核反应前后产生的质量亏损,转化成能量(热能),人们直接利用热能,或者再将热能转化为电能予以利用。原子核反应过程中,一般有相应的能量释放出来,“亏损”的质量 Δm 和释放的能量 ΔE 之间的定量关系就是

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1.2)$$

原子核反应中释放的能量为核能,包括裂变能和聚变能两种。在裂变反应或聚变反应中,反应前后物质的质量有少量的差异,根据 $E = mc^2$,这少量的质量差异能够转化为巨大的能量,从而开辟了一个新的时代——原子能时代。

裂变反应,是指重元素(U、Pu等)的分裂反应,其特点是贫中子、富能量。这样的裂变反应可以用以下反应方程式表示:



贫中子,是指产生的中子能量略低一点;而富能量是指单次裂变反应释放的能量比较高。爱因斯坦的公式又可以表示为

$$E(\text{erg}) = m(\text{amu})c^2 (3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}) = m(\text{amu}) \times 1.49 \times 10^{-3} \quad (1.4)$$

$$E(\text{MeV}) = m(\text{amu}) \times 931 \quad (1.5)$$

式(1.5)中的近似数字 931 表示原子核内核子平均能量近似取作 931 MeV。中子与重元素原子核的裂变反应,例如

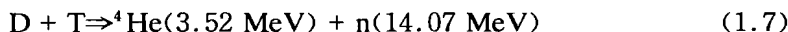


核反应前后的核质量数发生变化:

$^{235}_{92}\text{U}$	235.124	$^{95}_{38}\text{X}$	94.945	
${}^1_0\text{n}$	1.009	$^{139}_{54}\text{Y}$	138.955	
总质量 236.133		$\rightarrow$	$\frac{2 \times \text{n}}{235.918}$	$\frac{2.018}{235.918} = 0.215(\text{amu})$

因此,每次裂变反应释放的能量为 $0.215 \times 931 \approx 200(\text{MeV})$ 。

聚变反应,即轻元素原子核(D、T、He)的聚合反应。相对于裂变反应过程来说,其特点是富中子、贫能量。例如:



富中子,是指产生的中子能量比裂变中子的能量要高;而贫能量,是指单次聚变反