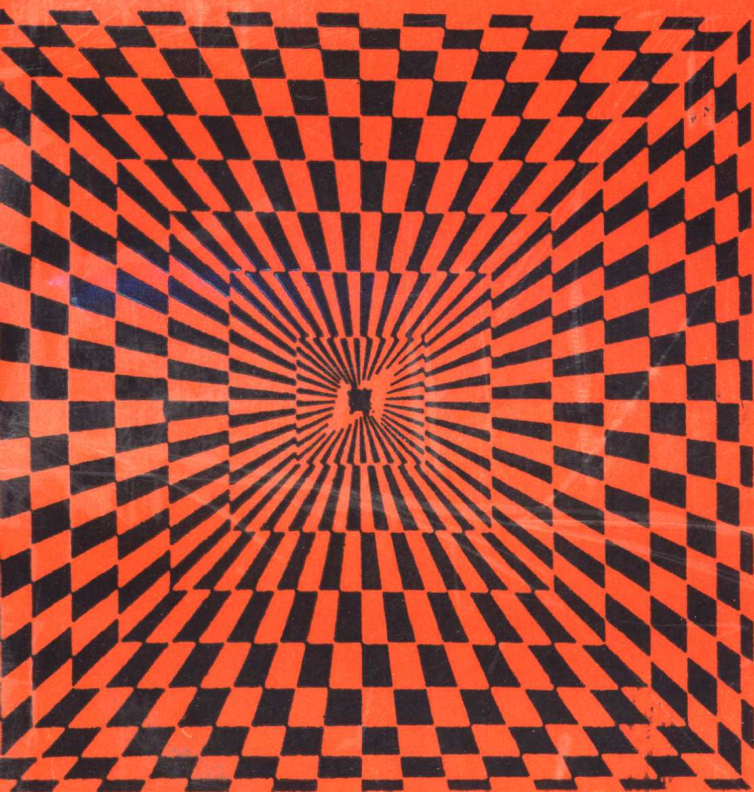

核聚变原理

朱士尧 编著



中国科学技术大学出版社

核 聚 变 原 理

朱士尧 编著

中国科学技术大学出版社

1992·合肥

内 容 简 介

本书系统地阐述了核聚变基本原理。全书共八章。前五章内容包括：核聚变基本概念和发展历史，聚变装置中的磁场位形，磁约束等离子体的基本性质，聚变等离子体的加热原理，等离子体与器壁的相互作用。第六章至第八章以托卡马克为重点，具体讨论了各种聚变实验装置，包括托卡马克、磁镜、仿星器、反向场箍缩以及 FRC 位形的物理原理，介绍了这些装置近年来的进展情况和主要的前沿课题。本书材料翔实，概念清楚，物理图像清晰，文字流畅易懂。

本书可作为大学物理系、核工程系相应专业的高年级学生和研究生的教科书。对于从事核聚变和等离子体物理研究的科研人员、工程技术人员也有参考价值，是一本较好的入门书。

(皖) 新登字 08 号

核聚变原理

朱士尧 编著

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路 96 号 邮编：230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本：850×1168/32 印张：16.75 字数：433 千

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数：1—1200册

ISBN7-312-00357-5/O·115 定价：5.40元

前 言

核聚变研究是当代自然科学中一项具有重大意义的前沿研究领域。它的目标是要在地球上创造像太阳内部那样的极端高温条件，释放巨大的核聚变能量，为人类提供取之不尽、用之不竭的新能源。经过40余年的艰苦探索，核聚变研究已经取得了令人瞩目的重要进展，近年内将实现聚变点火，可望在为期不远的世纪之交建成世界上第一座试验性聚变反应堆。这将会在人类科学史上写下极其光辉的一页。

本书是国内目前第一本系统阐述核聚变基本原理的书籍。这是作者根据近几年在中国科学技术大学给等离子体专业研究生讲授“核聚变原理”课程的讲义基础上充实发展起来的。书中着重阐明重要的基本概念；给出清晰的物理图像；介绍当前国际上最新重要进展和重要的前沿课题；还列出了大量有价值的参考文献，为读者深入研究提供方便。因此，本书不仅适合于用作相应专业的研究生和大学高年级学生的教材，而且对于从事高温等离子体物理和核聚变研究，包括从事等离子体实验、等离子体诊断、等离子体装置技术、聚变堆概念设计和工艺研究的广大科研人员、工程技术人员也有重要参考价值，是一本较好的入门书。

本书是从一个实验等离子体物理学工作者的角度出发编写的，阐述等离子体理论问题的篇幅较少。全书共8章，具体安排如下。第一章是预备知识，介绍核聚变基本概念，回顾核聚变研究的发展历史。第二章讨论磁约束等离子体中各种磁场位形。第三章研究磁约束等离子体基本性质。这是核聚变研究的物理基础，无疑是非常重要的，内容亦相当丰富。鉴于国内前些年已经出版过系统论述等离子体物理基本原理的书籍，为了节省篇幅，

避免重复，又要保持相对的完整性，因此本章简明扼要地讨论了粒子轨道理论、磁流体平衡、等离子体波和不稳定性等重要问题。第四章介绍等离子体辅助加热的原理和技术，重点讨论高能中性粒子束注入加热技术和射频波加热方法。第五章讨论等离子体与器壁的相互作用，这部分内容在核聚变研究中占有相当重要的地位。从第六章开始介绍各种核聚变装置的物理原理。托卡马克无疑是本书的讨论重点，因为它发展最快，取得了重大进展，有希望首先建成聚变反应堆，因此专门讨论托卡马克的第六章所占篇幅比较大。第七章讨论磁镜，重点阐述先进的串列磁镜概念。第八章介绍其它磁约束装置，包括仿星器、反向场箍缩装置(RFP)、场反向位形(FRC)，以及球马克位形。

有两个问题要说明一下，其一，激光核聚变研究近年来取得了令人刮目相看的重要进展，有着光辉的前景；其二，随着聚变研究不断取得重要进展，关于聚变反应堆的概念设计以及相应的聚变堆工艺问题的研究越来越受到重视。鉴于篇幅限制，本书实难包容这两部分重要内容，望读者见谅。希望今后能有这些方面的专门著作问世。

作者在编著过程中不仅参阅了大量文献资料，还得益于本人几年前在美国威斯康星大学(University of Wisconsin-Madison)进修时著名的J. D. Callen教授讲授的研究生课程“Plasma Confinement and Heating”，在此表示衷心感谢。本书的编写曾经得到项志遴教授的关怀和中国等离子体研究会的支持，为此向他们表示深切谢意。

朱士尧
1990年5月

目 录

前言	(1)
第一章 核聚变基本概念和发展历史	(1)
1.1 原子核的结合能	(1)
1.2 聚变反应	(4)
1.2.1 聚变能源及其优点	(5)
1.2.2 核聚变与等离子体的关系	(7)
1.3 劳逊判据	(9)
1.3.1 聚变反应速率和功率密度	(9)
1.3.2 功率平衡	(12)
1.3.3 劳逊判据	(14)
1.4 磁约束概念	(17)
1.4.1 磁约束基本原理	(18)
1.4.2 磁约束聚变装置的分类	(20)
1.5 聚变能源的展望	(22)
1.6 核聚变研究的发展历史	(25)
1.6.1 几种主要聚变装置的发明	(26)
1.6.2 初期的过高期望和激烈的国际竞争	(33)
1.6.3 解密和研究重点的转移	(35)
1.6.4 研究托卡马克的热潮	(38)
参考文献	(42)
第二章 聚变装置中的磁场位形	(45)
2.1 磁场与电流的关系	(45)
2.2 磁场空间分布的描述	(49)
2.3 磁面和磁面坐标	(55)

2.4	聚变研究中的几种主要的磁场位形	(57)
2.4.1	载流圆线圈的磁场	(58)
2.4.2	托卡马克磁场位形	(59)
2.4.3	磁镜场	(66)
2.4.4	仿星器磁场	(74)
	参考文献	(78)
第三章	磁约束等离子体的基本性质	(81)
3.1	等离子体的基本概念	(82)
3.1.1	等离子体的定义	(82)
3.1.2	德拜屏蔽	(85)
3.1.3	等离子体频率	(88)
3.1.4	等离子体中的碰撞	(90)
3.1.5	等离子体的描述方法	(96)
3.2	带电粒子在磁场中的运动	(100)
3.2.1	带电粒子在均匀磁场中的运动	(101)
3.2.2	带电粒子在非均匀磁场中的运动	(104)
3.2.3	带电粒子在磁镜场中的运动	(117)
3.2.4	托卡马克磁场位形中的粒子轨道	(127)
3.3	磁约束等离子体位形的平衡	(135)
3.3.1	平衡方程	(135)
3.3.2	柱对称位形的平衡	(138)
3.3.3	Grad-Shafranov 方程	(140)
3.3.4	托卡马克的平衡	(145)
3.4	磁流体不稳定性	(149)
3.4.1	瑞利-泰勒不稳定性	(150)
3.4.2	能量原理	(154)
3.4.3	交换不稳定性	(160)
3.4.4	气球模不稳定性	(164)
3.4.5	扭曲不稳定性	(166)

3.4.6	电阻对不稳定性的影响	(173)
3.5	等离子体中的波	(177)
3.5.1	磁流体力学波	(178)
3.5.2	沿磁场方向传播的高频电磁波	(183)
3.5.3	在垂直于磁场方向传播的高频电磁波	(186)
	参考文献	(188)
第四章	聚变等离子体的加热原理	(192)
4.1	聚变点火对辅助加热功率的要求	(192)
4.2	欧姆加热	(195)
4.3	中性粒子束注入加热方法(NBI)	(197)
4.3.1	等离子体对中性束性能的要求	(197)
4.3.2	中性束注入系统	(199)
4.3.3	中性束在等离子体中的传播	(207)
4.3.4	负离子源	(212)
4.4	射频加热的物理原理	(216)
4.4.1	波在等离子体中的传播以及波与粒子的相互作用	(217)
4.4.2	无碰撞能量吸收机制	(220)
4.4.3	射频波加热的频率范围	(226)
4.5	电子回旋共振加热(ECRH)	(228)
4.5.1	电子回旋波的传播及可接近性问题	(228)
4.5.2	ECRH实验研究概况	(233)
4.6	低混杂波共振加热(LHRH)	(239)
4.6.1	低混杂波在等离子体中传播的线性理论	(239)
4.6.2	低混杂波加热技术及实验结果	(246)
4.7	离子回旋频率范围内的共振加热(ICRF)	(251)
4.7.1	少数类离子的基频共振和背景离子的二次谐波共振	(251)
4.7.2	ICRF的天线发射系统	(254)

4.7.3	ICRF 的实验情况	(258)
4.8	阿尔芬波加热 (AWH)	(260)
4.8.1	阿尔芬波的共振连续谱	(261)
4.8.2	阿尔芬波加热的动力学描述	(264)
4.8.3	实验研究概况	(270)
	参考文献	(272)
第五章	等离子体与器壁的相互作用	(280)
5.1	等离子体边界层的原子过程	(281)
5.1.1	等离子体边界层的特点	(281)
5.1.2	边界层的杂质返流现象	(283)
5.1.3	边界层等离子体中的原子分子过程	(284)
5.2	朝向器壁的粒子流	(290)
5.3	真空室表面现象	(292)
5.3.1	背散射	(293)
5.3.2	吸附和解吸	(293)
5.3.3	溅射	(295)
5.3.4	单极弧	(297)
5.3.5	蒸发和热震	(299)
5.3.6	起泡和爆皮	(299)
5.4	杂质对等离子体的影响	(300)
5.4.1	杂质辐射	(300)
5.4.2	杂质对聚变反应的影响	(303)
5.5	杂质的控制	(305)
5.5.1	限制器	(306)
5.5.2	偏滤器	(307)
5.5.3	器壁的表面处理和状态优化	(310)
a)	预处理	(310)
b)	烘烤	(310)
c)	脉冲放电清洗	(311)

d) 辉光放电清洗·····	(313)
e) 放电清洗的表面化学过程·····	(314)
f) 钛吸附清洗技术·····	(316)
参考文献·····	(317)
第六章 托卡马克 ·····	(321)
6.1 概述·····	(321)
6.2 托卡马克基本原理·····	(323)
6.2.1 托卡马克装置的基本结构·····	(323)
6.2.2 托卡马克等离子体的产生·····	(325)
6.2.3 逃逸电子现象·····	(326)
6.2.4 等离子体参数的径向分布·····	(330)
6.3 托卡马克等离子体的磁流体行为·····	(332)
6.3.1 磁岛·····	(333)
6.3.2 Mirnov 振荡·····	(336)
6.3.3 锯齿振荡·····	(338)
6.3.4 破裂不稳定性·····	(343)
6.4 托卡马克等离子体的约束特性·····	(346)
6.4.1 新经典输运·····	(346)
a) 碰撞区的输运性质·····	(347)
b) 香蕉区的输运性质·····	(350)
c) 平台区的输运性质·····	(351)
6.4.2 托卡马克的定标律·····	(353)
6.4.3 辅助加热时的约束特性——L 模和H 模·····	(354)
6.4.4 自举电流·····	(356)
6.5 托卡马克中的涨落现象和反常输运·····	(357)
6.5.1 反常输运现象·····	(357)
6.5.2 托卡马克中微观涨落的测量·····	(359)
a) 利用电磁波散射测量密度涨落·····	(359)
b) 利用探针测量涨落·····	(361)

c)托卡马克中微观涨落测量结果概述.....	(362)
6.5.3 托卡马克中反常输运和微观扰动的理论模式	(364)
6.6 电流驱动.....	(366)
6.6.1 Fokker-Planck 方程.....	(367)
6.6.2 低混杂波电流驱动.....	(370)
6.6.3 阿尔芬波电流驱动.....	(378)
6.6.4 中性注入电流驱动.....	(379)
6.7 主要的托卡马克实验装置概况.....	(381)
6.7.1 T-3.....	(382)
6.7.2 ST.....	(383)
6.7.3 JFT-2.....	(385)
6.7.4 Alcator.....	(386)
6.7.5 TFR.....	(387)
6.7.6 DITE.....	(388)
6.7.7 PLT.....	(390)
6.7.8 T-10.....	(391)
6.7.9 ISX.....	(392)
6.7.10 FT.....	(393)
6.7.11 Doublet- III.....	(394)
6.7.12 ASDEX.....	(395)
6.7.13 TFTR.....	(397)
6.7.14 JET.....	(398)
6.7.15 JT-60.....	(400)
参考文献.....	(401)
第七章 磁镜	(410)
7.1 磁镜概念的发展演化过程.....	(410)
7.1.1 初期的磁镜概念.....	(410)
7.1.2 磁阱概念.....	(414)

7.1.3	双极势与标准磁镜	(417)
7.1.4	串列磁镜	(425)
7.1.5	其它形式的磁镜装置	(431)
7.2	磁镜中的粒子约束	(434)
7.2.1	磁矩绝热不变量	(435)
7.2.2	第二绝热不变量 J	(437)
7.3	磁镜中的不稳定性	(438)
7.3.1	MHD 不稳定性	(438)
7.3.2	高密度静电微观不稳定性——DGH 模	(441)
7.3.3	高频对流损失锥微观不稳定性——HFCLC 模	(442)
7.3.4	漂移回旋损失锥不稳定性——DCLC 模	(444)
7.3.5	阿尔芬离子回旋不稳定性——AIC 模	(447)
7.4	磁镜装置实验概况	(448)
7.4.1	2X II B 以及温等离子体的致稳作用	(448)
7.4.2	串列磁镜: TMX-U, GAMMA-10, TARA	(451)
7.4.3	串列磁镜装置的主要实验进展	(454)
	参考文献	(458)
第八章	其它磁约束装置	(464)
8.1	仿星器	(464)
8.1.1	仿星器位形的建立	(465)
8.1.2	仿星器的变型: 扭曲器和螺旋器	(467)
8.1.3	仿星器中等离子体的运动规律	(470)
8.1.4	实验进展概况	(474)
8.2	反向场箍缩 (RFP)	(481)
8.2.1	Zeta 装置与 RFP 位形的发现	(481)
8.2.2	RFP 位形的特点和形成的方法	(484)
8.2.3	RFP 的物理基础	(487)

8.2.4 RFP 装置实验研究概况.....	(490)
8.3 场反向位形 (FRC)	(492)
8.3.1 场反向电子环.....	(493)
8.3.2 场反向磁镜(FRM)	(494)
8.3.3 场反向角向箍缩.....	(497)
8.4 球马克位形 (Spheromaks)	(502)
参考文献.....	(506)
附录一、矢量运算公式.....	(513)
附录二、物理常数.....	(514)
附录三、等离子体基本参量.....	(515)
1. 长度.....	(515)
2. 频率.....	(517)
3. 速度.....	(518)
4. 碰撞时间.....	(518)
附录四、聚变反应.....	(520)

第一章 核聚变基本概念 和发展历史

1.1 原子核的结合能

研究核聚变能源的出发点是原子核的结合能。众所周知，原子核是由 Z 个质子和 $(A - Z)$ 个中子组成的系统。 Z 是核电荷数， A 是核质量数。实验表明，原子核的质量小于组成它的 Z 个质子与 $(A - Z)$ 个中子的质量和。通常，把差值

$$[Zm_p + (A - Z)m_n] - m_N = \Delta m \quad (1.1)$$

称为质量亏损，其中 m_p 、 m_n 和 m_N 分别是质子、中子和原子核的质量。根据爱因斯坦相对论的质能关系，把 $E = \Delta mc^2$ 定义为原子核的结合能。这个定义告诉我们，原子核的结合能是由彼此分离的核子形成原子核时所放出的能量，也是把原子核分离成单个核子需要对原子核所做的功。

不同核素原子核含有核子的数量、种类不同，它们的结合能也不同。由于核子数越多，结合能一般就越大，所以核结合能反映不出核素原子核里核子间结合的强弱，为此就需要引进核子平均结合能的概念。定义

$$\varepsilon = \frac{E}{A} \quad (1.2)$$

为核子平均结合能，也叫比结合能。它的意义是把原子核的全部核子彼此分离平均需对每个核子所作的功。因此，核子平均结合能的大小，反映了核子间结合的强弱，即反映了原子核这一核子系统结合的牢固程度。也常把核子平均结合能所反映的原子核的

这一性质叫做原子核的稳定性（即是否容易被分解）。图 1.1 画出了各种核素的平均结合能^[1]。横座标是原子核质量数，纵坐标是每个核子的平均结合能，单位是 MeV。由于质量数小于 30 的原子核平均结合能变化起伏较大，为了清晰起见，图中横坐标以 $A = 30$ 为界，左右两区的标尺比例不同。

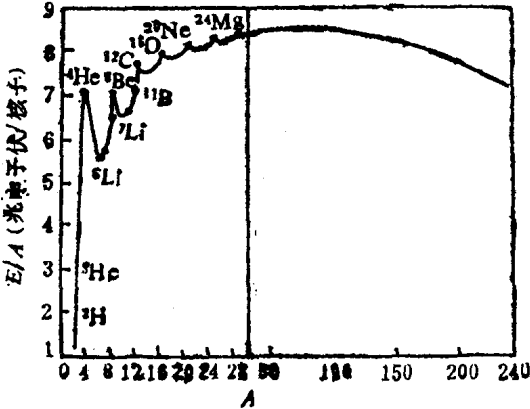


图 1.1 核子平均结合能

从图中可以看出平均结合能有如下特点：

(1) 在中等质量数 ($A = 40-120$ 之间) 的那些原子核中，核子的平均结合能较大，在 8.6MeV 上下。质量数在上述范围之上或之下的原子核中，核子的平均结合能都比较小。例如 ²³⁸U 的核子平均结合能是 7.5MeV 。

(2) 质量数在 30 以上的原子核中，核子的平均结合能 (E/A) 变化不大，这就是说原子核的结合能 E 与质量数 A 差不多成正比。这个事实说明了核力的饱和性。

(3) 在质量数小于 30 的原子核中，核子的平均结合能显示出随质量数有周期性变化的规律，最大值落在 A 等于 4 (即 2 个质子和 2 个中子) 的倍数上。这些元素的核结构比较稳定。

1938 年底，哈恩 (O. Hahn) 和斯特拉斯曼 (F. Strassmann) 进行了用中子撞击铀的实验，发现有钡 ($Z = 56$) 的

产生。他们据此认为铀核发生了裂变，分裂为两块碎片。裂变的过程是被轰击的原子核先吸收中子，形成复核，然后裂开。裂变碎块含中子过多，是不稳定的，所以裂开后即刻放出几个中子。并发现铀的不同的同位素裂变情况又有所不同。 ^{238}U 需要能量大于 1.1MeV 的快中子轰击才能发生裂变， ^{235}U 只要能量在 0.03MeV 左右的慢中子即所谓热中子的轰击便能发生裂变。下式表示慢中子轰击 ^{235}U 发生裂变的过程



式中 X 和 Y 代表质量不等的两个碎块。 ^{235}U 的裂变产物的质量数分布在一个较宽的范围内。最高质量数出现在 $A=96$ 和 $A=140$ 左右。

根据结合能的概念，我们可以估计上述裂变现象会释放出很大的能量。 ^{235}U 吸收中子后形成复核的质量 $A=236$ ，从图1.1中可看到，这时每个核子的平均结合能是 7.6MeV ，而在 $A=118$ 附近，每个核子的平均结合能是 8.5MeV 。根据这些数据，对 ^{235}U 分裂为质量相等的两个原子核并达到稳定状态，一共释放出多少能量可以作如下估计：

$$E = 2 \times \frac{236}{2} \times 8.5 - 236 \times 7.6 = 210\text{MeV}.$$

这些能量包括了裂变碎块的动能，中子的动能， γ 射线和 β 射线的能量等。

在元素周期表中部，即中等 A 值的原子核中，核子的平均结合能大，所以重核裂变成中等 A 值的原子核时，要释放能量。这便是开发和利用核能的理论依据。一克任意物质的能量为 $mc^2 = 9 \times 10^{13}$ 焦耳，一克铀发生裂变反应便可释放能量 9×10^{10} 焦耳。这大约比燃烧一克煤释放的能量 2.9×10^4 焦耳多300万倍。通过链式反应过程可以实现自持核裂变。每次裂变放出二至三个中子，如果其中一个中子去诱发另一个铀核发生裂变，那么这个过程便能自持下去。满足这个条件的装置叫核反应堆。1942年冬，

著名物理学家E·费米 (E·Fermi) 在美国芝加哥大学校园内的一个球场上建成世界上第一个核反应堆。在那里人们树立了一块青铜纪念碑来纪念近代物理史上具有重大历史意义的事件。上面写着：“1942年12月2日，人类在这里实现了第一次自持链式核反应，从此便开始了把核能有控制地释放出来的新时代。”

从五十年代开始，许多国家开始建造以核反应堆为基础的核电站。目前全世界投入运行的核电站已有三百座左右，还有许多正在建造之中。在许多国家核电站提供的动力在整个能源结构中占有相当重要的比重。可以预料，在二十一世纪，核能将在世界能源舞台上起到越来越重要的作用。

从图 1.1 的结合能曲线中，我们还看到另一种特点，即质量数 A 很小的原子核的平均结合能也要比质量数 A 为中等值的原子核的平均结合能小。由此可以进行十分自然的推理：质量数很小的两个适当的原子核在一定条件下重新组合成一个质量数较大的原子核，也会释放出能量，这就是人类利用核能的另一重要途径即核聚变的理论依据。

1.2 聚变反应

最早从实验中发现聚变反应可以释放能量的是 F·阿斯顿 (F. W. Aston)。他于 1919 年测量了 ${}^4\text{He}$ 的原子质量和 ${}^1\text{H}$ 原子的质量。他认为 ${}^4\text{He}$ 是由 4 个 ${}^1\text{H}$ 组成的，可是他发现 ${}^4\text{He}$ 的质量比 4 个 ${}^1\text{H}$ 的质量之和大约少 1% 左右。利用爱因斯坦的质能关系公式计算表明，这些质量差正好是在聚合成 ${}^4\text{He}$ 过程中释放的能量。1929 年，有人提出太阳中产生能量的过程就是质子的聚变反应^[1]：

