

# 等离子体物理

郑春开 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

# 等离子体物理

郑春开 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理/郑春开编著. —北京:北京大学出版社,2009.7

ISBN 978-7-301-15473-1

I. 等… II. 郑… III. 等离子体物理学 IV. O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114434 号

### 书 名: 等离子体物理

著作责任者: 郑春开 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-15473-1/O·0781

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子邮箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

经 销 者: 新华书店

730mm×980mm 16 开本 13.75 印张 262 千字

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容.

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

## 内 容 简 介

本书比较系统地介绍了等离子体物理的基本概念、基本原理和描述问题及处理问题的方法. 书中着重突出物理概念和物理原理, 也有必要的数学描述和推导. 全书共 7 章, 内容包括: 聚变能利用和研究进展、等离子体基本性质及相关概念、单粒子轨道理论、磁流体力学、等离子体波、库仑碰撞与输运过程和动理学方程简介. 这些内容都是从事核聚变和等离子体物理及相关学科研究人员所必需的, 也是进一步学习核聚变与等离子体物理及相关学科专业课程的重要基础. 为教学使用和学生学习方便, 本书编有附录和习题, 供查阅选用.

本书适合于核聚变、等离子体物理、空间物理以及基础和应用等离子体物理方向的高年级本科生、研究生和研究人员使用.

## 前 言

受控热核聚变研究旨在探索新能源,因此它是当代备受世人瞩目的重大研究课题.半个多世纪以来,经过世界各国科学家的努力探索,磁约束核聚变装置(托卡马克)现在已进入能源开发工程的实验阶段.特别是2006年11月21日,中国、欧盟、美国、俄罗斯、日本、韩国和印度七方代表在巴黎正式签署了《国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)联合实施协定》.这标志着 ITER 计划进入了正式实施和开工建设阶段.

为满足核聚变研究发展的新形势和我国参加 ITER 国际合作计划的需要,大力培养核聚变和等离子体物理人才是一项非常紧迫的任务.为此,北京大学决定在物理学院恢复、重建等离子体物理学科,2009年1月6日北京大学研究生院正式批准在物理学一级学科下设立等离子体物理二级学科博士点.为国家能源发展战略、空间研究与开发以及参加 ITER 国际合作计划培养高素质人才.

早在1959年秋,北京大学原子能系(后来改称技术物理系)在系主任、我国著名核科学家胡济民先生领导下,就着手筹建核聚变和等离子体物理学科,并积极与原子能所(现中国原子能研究院)14室开展合作,加速学校核聚变和等离子体物理学科建设.胡济民先生与理论物理学家、原子能所14室主任王承书先生共同指导,在14室组织我国第一批参加核聚变研究的年青科技人员,学习等离子体物理,为我国培养了第一批核聚变和等离子体物理研究人才,并积极开展核聚变研究工作.作者也有幸与原子能所14室年青科技人员一起,在胡济民、王承书两位物理学家(后来都当选中科院院士)关怀、指导下,共同学习等离子体物理,开展核聚变研究工作.

1963年胡济民先生率先在北京大学技术物理系讲授等离子体物理课,同时招收了等离子体物理研究生,为我国培养输送了一批早期从事核聚变研究的人才.在20世纪60—70年代,北京大学地球物理系的空间物理专业和物理系的理论物理专业也开辟了等离子体物理研究方向,为我国等离子体物理研究和人才培养也做出了重要贡献.近半个世纪,北京大学技术物理系、物理系和地球物理系,为我国核聚变与等离子体物理事业,培养了大量优秀人才,其中许多人成为我国核聚变、等离子体物理、空间物理研究学术带头人或院所的领导.

现在我们又面临开发、研究、发展核聚变能源的机遇和挑战.因此,在北京大学重新组织力量、恢复和发展等离子体物理学科十分必要,重新开设等离子体物理课

程也势在必行。

为恢复、重建等离子体物理学科,2006年北京物理学学院重新开设等离子体物理课程,作者也为此重新上岗,在物理学学院为研究生和高年级本科生讲授等离子体物理课.为了使这门课程有一本合适的教材,作者在过去十多年讲授等离子体物理讲稿的基础上,结合过去40多年的研究工作经验和核聚变与等离子体物理研究的新进展,并参考有关书籍、资料,于2006年夏编写了一本《等离子体物理》讲义,以应教学急需.本书就是根据这三年来教学实践中使用的讲义,在其基础上进行补充、修改而成的.

本教材主要介绍等离子体物理学的基本概念、基本原理和描述问题及处理问题的方法,对重要的磁约束核聚变装置的原理也做了简要说明.书中着重突出物理概念和物理原理,也有必要的数学描述和推导.主要内容包括:聚变能利用和研究进展、等离子体基本性质及相关概念、单粒子轨道理论、磁流体力学、等离子体波、库仑碰撞与输运过程和动理学方程简介.这些内容都是从事核聚变研究人员所必需的,也是进一步学习核聚变与等离子体物理学科其他课程的重要基础.有关等离子体的稳定性、湍流、等离子体加热与非感应电流驱动,以及与装置类型结合比较紧密的粒子注入、边缘等离子体物理等都未涉及.这是因为本课程主要是面向等离子体物理学科(包括核聚变、空间物理等)研究生和物理类高年级本科生,起到引导入门的作用,为他们进一步学习本学科其他专业课程打好基础,也为开展核聚变研究提供知识背景.学习本课程后,本学科还会有相应的专业课或专题讲座,其中会详细介绍以上提到的本书未涉及的内容.

本书适合于核聚变、等离子体物理、空间物理以及基础和应等离子体物理方向的高年级本科生、研究生和研究人员使用.

为了教学使用和学生方便,本书编有附录和习题,供查阅和选用.

在本书编写过程中,获得与中国核工业西南物理研究院石秉仁教授有益的交流和讨论,也得到北京大学物理学学院等离子体物理与核聚变研究所王晓刚教授、肖池阶教授、雷亦安博士等的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢.

本书由北京大学教材建设委员会作为新兴学科课程教材建设立项,也被北京大学物理学学院列入纪念2013年北大物理学科建立100周年的研究生重点教材计划项目,作者对北京大学教材建设委员会和北京大学物理学学院的大力支持表示感谢.

由于作者学识有限,书中不当和错误之处在所难免,望读者和同行批评指正.

郑春开

2009年5月于北京大学物理学学院

# 目 录

<b>第 1 章 聚变能利用和研究进展</b> .....	(1)
1.1 聚变反应和聚变能 .....	(1)
1. 聚变反应的发现 .....	(1)
2. 聚变的燃料资源丰富 .....	(2)
3. 聚变反应是巨大太阳能的来源 .....	(2)
1.2 聚变能利用原理 .....	(3)
1. 聚变能利用的困难 .....	(3)
2. 受控热核反应条件——劳森判据与点火条件 .....	(4)
1.3 实现受控热核反应的途径 .....	(7)
1. 磁约束——利用磁场约束等离子体 .....	(7)
2. 惯性约束——激光核聚变 .....	(8)
1.4 磁约束原理及其发展历史 .....	(8)
1. 磁镜装置 .....	(8)
2. 环形磁场装置 .....	(9)
3. 托卡马克装置进展 .....	(11)
1.5 惯性约束——激光核聚变 .....	(14)
1. 激光核聚变发展历史 .....	(14)
2. 激光核聚变基本原理 .....	(14)
3. 激光核聚变劳森判据 .....	(15)
4. 惯性约束激光核聚变的研究进展 .....	(16)
1.6 国际热核试验堆(ITER)计划 .....	(17)
1. ITER 计划形成的历史过程 .....	(17)
2. ITER 计划目标和主要设计参数 .....	(19)
<b>第 2 章 等离子体基本性质及相关概念</b> .....	(20)
2.1 等离子体与等离子体物理学 .....	(20)
1. 等离子体 .....	(20)
2. 等离子体物理学 .....	(20)
2.2 等离子体的基本性质 .....	(21)
1. 电荷屏蔽现象与等离子体准电中性 .....	(21)
2. 等离子体振荡与等离子体振荡频率 .....	(24)
3. 等离子体的碰撞 .....	(26)
4. 等离子体的定义 .....	(28)

5. 等离子体辐射 .....	(28)
2.3 等离子体参量与分类 .....	(30)
1. 等离子体参量 .....	(30)
2. 等离子体分类 .....	(31)
2.4 等离子体的描述方法 .....	(34)
1. 单粒子轨道描述法 .....	(34)
2. 磁流体描述法 .....	(34)
3. 统计描述法 .....	(35)
4. 粒子模拟法 .....	(35)
<b>第3章 单粒子轨道理论 .....</b>	<b>(36)</b>
3.1 带电粒子在均匀恒定磁场中的运动 .....	(36)
3.2 电场引起的漂移 .....	(39)
1. 电场引起的漂移 .....	(39)
2. 其他外力引起的漂移 .....	(41)
3.3 带电粒子在缓慢变化的电场中的运动 .....	(41)
3.4 带电粒子在不均匀磁场中的漂移 .....	(43)
1. 梯度漂移 .....	(43)
2. 曲率漂移 .....	(45)
3.5 浸渐不变量及其应用 .....	(46)
1. 磁矩不变性与磁镜约束原理 .....	(46)
2. 磁镜约束原理 .....	(48)
3. 纵向不变量 $J$ 与费米加速 .....	(49)
4. 地球辐射带与磁通不变量 .....	(51)
3.6 带电粒子在环形磁场中的运动 .....	(53)
1. 带电粒子在简单环形磁场中的漂移 .....	(53)
2. 磁场的旋转变换 .....	(53)
3. 托卡马克装置磁场位形和约束原理 .....	(54)
<b>第4章 磁流体力学 .....</b>	<b>(61)</b>
4.1 速度矩及矩方程 .....	(61)
1. 速度矩 .....	(61)
2. 速度矩方程 .....	(63)
4.2 等离子体的双流体力学方程 .....	(64)
1. 连续性方程 .....	(65)
2. 运动方程 .....	(65)
3. 能量方程 .....	(65)
4. 等离子体双流体力学方程组 .....	(67)
4.3 磁(单)流体力学方程 .....	(69)
1. 磁流体力学方程 .....	(70)



2. 理想磁流体力学方程 .....	(74)
3. 磁流体描述的适用条件 .....	(74)
4.4 磁压强与磁应力 .....	(75)
4.5 磁场的冻结与扩散 .....	(77)
1. 磁场的冻结 .....	(77)
2. 磁场的扩散 .....	(79)
3. 横越磁场扩散与博姆扩散 .....	(80)
4.6 磁流体平衡与箍缩效应 .....	(81)
1. 磁流体平衡 .....	(81)
2. 箍缩效应 .....	(83)
4.7 广义欧姆定律与等离子体电导率 .....	(86)
1. 广义欧姆定律 .....	(86)
2. 等离子体电导率 .....	(88)
<b>第 5 章 等离子体波 .....</b>	<b>(91)</b>
5.1 波的描述和若干基本概念 .....	(91)
1. 简谐波的描述 .....	(91)
2. 波的相速度和群速度 .....	(92)
3. 色散关系 .....	(93)
4. 波的偏振 .....	(93)
5.2 电子静电振荡与电子静电波 .....	(94)
1. 电子静电振荡 .....	(94)
2. 电子静电波 .....	(96)
3. 离子声波与离子静电波 .....	(99)
5.3 垂直于磁场的静电波 .....	(103)
1. 高混杂静电振荡与高混杂波 .....	(104)
2. 低混杂静电振荡与低混杂波 .....	(105)
5.4 电磁波在等离子体中的传播 .....	(107)
5.5 垂直于磁场的高频电磁波 .....	(111)
1. 寻常波( $E_1 \parallel B_0$ ) .....	(111)
2. 非寻常波( $E_1 \perp B_0$ ) .....	(111)
5.6 平行于磁场的高频电磁波 .....	(114)
5.7 磁流体力学波 .....	(118)
1. 磁声波 .....	(119)
2. 阿尔文波 .....	(120)
3. 有限电导率时阿尔文波的衰减 .....	(121)
5.8 波与粒子相互作用,朗道阻尼与朗道增长 .....	(123)

<b>第 6 章 库仑碰撞与输运过程</b> .....	(127)
6.1 等离子体的输运方程组 .....	(127)
6.2 库仑碰撞 .....	(129)
1. 二体碰撞化为单体问题 .....	(129)
2. 库仑碰撞偏转角 .....	(129)
3. 碰撞微分截面 .....	(131)
6.3 平均动量变化率与平均能量变化率 .....	(132)
1. 二体碰撞近似 .....	(132)
2. 二体碰撞的动量传递和动能传递 .....	(133)
3. 平均动量变化率和平均动能变化率 .....	(134)
4. 电子-离子碰撞时间与碰撞频率 .....	(136)
5. 等离子体中小角度散射(远碰撞)起主要作用 .....	(137)
6.4 等离子体动量弛豫时间与碰撞频率 .....	(138)
1. 平均动量变化率与平均能量变化率的计算 .....	(138)
2. 动量弛豫时间与碰撞频率 .....	(140)
6.5 高能带电粒子束的慢化与等离子体加热 .....	(145)
6.6 等离子体的能量弛豫与温度平衡时间 .....	(148)
6.7 等离子体电导率和电子逃逸 .....	(151)
1. 无磁场时电导率 .....	(151)
2. 有磁场时电导率 .....	(152)
3. 电子逃逸 .....	(153)
4. 电子摩擦阻力及电导率的修正 .....	(155)
6.8 横越磁场的扩散 .....	(155)
1. 无规行走方法讨论粒子扩散 .....	(155)
2. 输运方程研究粒子扩散 .....	(158)
3. 同类粒子碰撞不会引起横越磁场扩散 .....	(160)
4. 双极扩散 .....	(162)
6.9 环形磁场的经典扩散 .....	(163)
<b>第 7 章 动理学方程简介</b> .....	(170)
7.1 动理学方程 .....	(170)
7.2 BGK 方程(或 Krook 碰撞项) .....	(172)
1. 粒子流和扩散系数 .....	(173)
2. 电流及其粒子流迁移率 .....	(173)
3. 黏性张量和黏性系数 .....	(174)
4. 热流矢量和热传导系数 .....	(175)
7.3 玻尔兹曼方程 .....	(176)
7.4 朗道方程 .....	(178)
7.5 福克-普朗克方程 .....	(181)

---

7.6 罗生布鲁斯势碰撞项 .....	(183)
7.7 弗拉索夫方程 .....	(184)
<b>附录</b> .....	(186)
<b>习题</b> .....	(199)
<b>主要参考书</b> .....	(206)

# 第 1 章 聚变能利用和研究进展

本章先介绍聚变反应、聚变能利用原理、聚变能利用条件、实现聚变能利用的途径、方法和当前研究的进展,为学习等离子体物理提供一个背景和讨论的平台.然后介绍等离子体的性质、特点和研究方法.

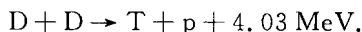
## 1.1 聚变反应和聚变能

### 1. 聚变反应的发现

19 世纪末,放射性发现之后,太阳能的来源很快地被揭开.英国化学家和物理学家阿斯顿(Aston)利用摄谱仪进行同位素研究,他在实验中发现,氦-4 质量比组成氦的 2 个质子、2 个中子的质量之和大约小 1%(质量亏损).这一质量亏损的结果为实现核聚变并释放能量提供了实验依据.同一时期,卢瑟福也提出,能量足够大的轻核碰撞后,可能发生聚变反应.

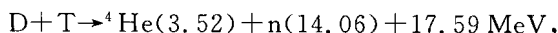
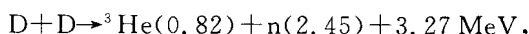
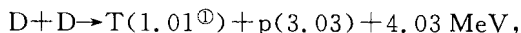
1929 年英国的阿特金森(R. de Atkinson)和奥地利的胡特斯曼(F. G. Houterman)证明氢原子聚变为氦的可能性,并认为太阳上进行的就是这种轻核聚变反应.

1932 年美国化学家尤里(Urey)发现氢同位素氘(重氢,用 D 表示),为此,1934 年他获得诺贝尔化学奖.1934 年,澳大利亚物理学家奥利芬特(Oliphant)用氘轰击氘,生成一种具有放射性的新同位素氚(超重氢,用 T 表示),实现了第一个 DD 核聚变反应:



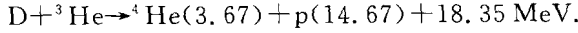
1942 年美国普渡大学的施莱伯(Schreiber)和金(King),首次实现了 DT 反应.轻核聚变反应出现质量亏损,根据爱因斯坦质能关系式,聚变反应释放的能量称聚变能.

迄今最重要的聚变反应是:

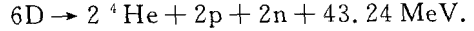


---

① 表示该反应产物具有的能量为 1.01 MeV,下同.



式中 D 是氘核(重氢)、T 是氚核(超重氢)。以上反应的总效果是：



平均到每核子，聚变能比裂变能大 4 倍。需要指出，DD 聚变反应有两种反应式，它们的反应截面差不多，而 DT 聚变反应的截面比 DD 反应约大 100 倍(见图 1.1.1)。

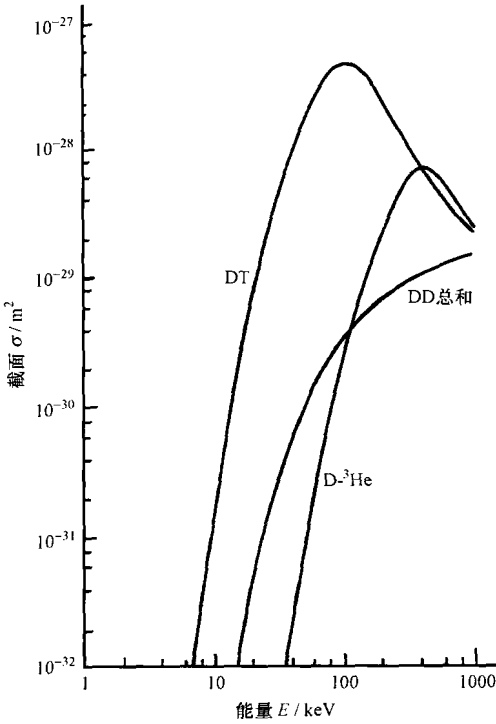
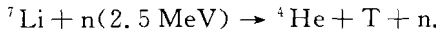


图 1.1.1 聚变反应截面与粒子间相对运动能量的关系

### 2. 聚变的燃料资源丰富

聚变燃料氘的资源非常丰富，在海水的氢中，氘(D)约占 1/6700，每升海水中含氘 33 mg。可以采用电解方法直接从海水中提取氘，其费用与聚变电能生产的其他费用相比是微不足道的。全球的海水中氘的总量为 35 万亿吨，而每升海水中的氘产生的聚变能相当于 300 升汽油燃烧释放的能量。因此，海水中的氘产生的聚变能可供人类用上几亿年！

氦在自然界不存在，但可以依靠锂来生产。利用中子轰击锂产生氦：



注意，用<sup>7</sup>Li 生产氦是吸能反应，需要 2.5 MeV 以上能量的中子，这样 DD 反应产生的中子不能用来造氦，DT 反应产生的中子有足够能量与<sup>7</sup>Li 反应生产氦。

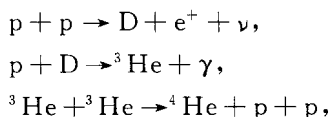
因此，DT 反应的另一主要燃料是锂。地球上的锂很丰富，我国可采的锂有数百万吨。聚变反应产生 1 万亿度电只需 100 吨锂。

氦-3 也是遥远将来可用的聚变的燃料。氦-3 在地球上不存在，但月球上很丰富，约有 50~500 万吨，有人畅想，通过登月，以月球车运回。每 1000 吨氦-3 可发电万亿度。

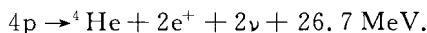
### 3. 聚变反应是巨大太阳能的来源

宇宙中的能量来源，主要是核聚变能。巨大的太阳能的基础，是消耗了 4 个质

子而形成氦原子核并放出 26.7 MeV 能量的反应,为:

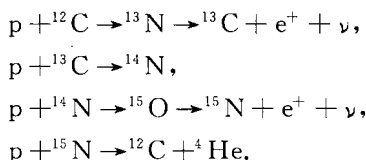


总效果:



这种聚变反应循环称“质子循环”。

宇宙中还有另一种聚变反应循环,称“碳循环”:



总效果与“质子循环”一样,也是消耗 4 个质子转变为 1 个氦原子核,而 ${}^{12}\text{C}$ 像是一种催化剂。完成一个碳循环放出的能量也是 26.7 MeV。

因为太阳中心温度( $1.4 \times 10^7 \text{ K}$ )不太高,产生聚变反应主要是“质子循环”(占 96%)。“质子循环”每核子释放的聚变能比 ${}^{235}\text{U}$ 每核子裂变能大 8 倍。对于温度比太阳更高、而且更重的恒星,碳循环过程是主要的。

太阳的聚变反应,每天要“燃烧”50 亿吨( $5 \times 10^{16} \text{ kg}$ )氢,因太阳质量比地球的大很多(约为地球的 33 万倍),因此太阳上含的氢足以稳定燃烧几十亿年!

虽然地球只接受总太阳能的 5 万亿分之一,份额很小,但太阳降落到地球上的功率却很大,约  $1.4 \text{ kW/m}^2$ ,太阳投向地球的能量为整个地球所使用的总能量的 10 万倍,因此太阳能的利用前景也非常广阔。

## 1.2 聚变能利用原理

聚变能可以说是一种无比巨大的能源,但要实现聚变能利用是极其困难的。

### 1. 聚变能利用的困难

实现聚变能利用,其难度远较裂变能大得多,这是因为引起聚变反应的两个核都带正电,要使两个核接近,必须克服库仑排斥力,才可引起聚变反应。最初,人们设想的可能方法有三种:

(1) 用加速器加速氘核,用高速的氘核轰击含氘的固体靶,引起核聚变。

1934 年就是用这种方法在实验室实现了 DD 核聚变,但从能源角度看,这是得不偿失的。因为当加速的氘核向固体靶靠近的过程中,首先会引起固体靶中的中性

原子发生电离而损失大量能量,最后只有极少量的氘核引起聚变,这样产生的聚变能量远不能抵偿加速氘核所消耗的能量.

(2) 用两束高能氘核对撞实现核聚变.

两束氘核对撞,几乎是完全透明的,引起聚变反应的几率很小,因此这种方法也难以获得净能量输出.

(3) 受控热核反应.

设想将一团氘气体放在容器中,加热使其达到足够高的温度(1 亿度(K),或更高),形成氘核和电子组成的完全电离气体,称“等离子体”.如果能将这种高温的电离气体约束在容器中足够长的时间,就可以依靠高速热运动氘核的动能,使氘核之间频繁地发生相互碰撞,引发大量的聚变反应并释放强大的聚变能.这种引发聚变反应的方法称“受控热核反应”.半个多世纪以来,磁约束核聚变研究就是按这一思路进行的.

## 2. 受控热核反应条件——劳森判据与点火条件

现在先简单说明动力温度及其单位:等离子体物理中都采用以能量为单位的动力温度  $T = kT_k$ ,这里  $k$  为玻尔兹曼常量, $T_k$ 是以开尔文(K)为单位的通常温度,动力温度单位常用电子伏(eV)或千电子伏(keV).1 eV 相当于 11 600 K,1 keV 相当于  $1.16 \times 10^7$  (即约为 1 千万)K.

(1) 劳森判据

实现受控热核反应,并使其可作为能源,要求聚变反应达到自持,而且还应有净能量输出,这是需要满足一定条件的.在热核反应过程中会产生聚变能,同时处于高温的等离子体也会通过多种途径不断散失能量.因此,需要考虑热核聚变反应过程中维持能量平衡的问题.

1957 年,英国的劳森(J. D. Lawson)计算了高温聚变等离子体能量平衡关系,导出了在热核聚变反应堆中,实现能量平衡使聚变反应自持的必要条件是:等离子体密度与约束时间的乘积要大于某一给定值,这个条件称为劳森判据.

假定等离子体的密度为  $n$ ,温度为  $T$ ,高温等离子体的约束时间为  $\tau$ , $\tau$  的意义为,高温等离子体如果不从外部获得能量,由于各种能量损失,等离子体最终将从高温降到室温所维持的时间,所以  $\tau$  也称能量约束时间.若要维持能量平衡,可将聚变堆输出的总功率(包括聚变反应功率和能量损失功率)加以收集,然后以效率  $\eta$  转变为电能,回授给等离子体,以维持能量得失相当,使聚变堆持续工作,即达到聚变反应自持状态.这时等离子体的温度、密度、能量约束时间需要满足一定条件.

现以氘氚各半的等离子体为例,即  $n_D = n_T = n/2$ ,计算高温等离子体能量平衡

关系.

单位体积 DT 反应产生的聚变功率

$$P_r = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E, \quad (1.2.1)$$

式中  $\sigma$  为反应截面,  $\langle \sigma v \rangle$  为反应率系数,  $E$  为每次 DT 反应释放的能量. 图 1.2.1 为反应率系数随离子动力温度的变化曲线. 由图的曲线可以看出, DT 反应率系数比 DD 反应的要大很多, 显然 DT 反应更容易发生, 条件也相对要求得低一些.

单位体积等离子体损失功率

$$P_L = P_b + 3nT/\tau, \quad (1.2.2)$$

式中右方第 1 项  $P_b$  为韧致辐射损失. 在等离子体中, 主要的辐射损失是电子受离子作用做加速运动而产生的韧致辐射, 这种辐射一般不会被等离子体吸收, 几乎全部穿透到等离子体外. 第 2 项  $3nT/\tau$  是其他各种途径的损失功率 (包括热传导、粒子从等离子体中逃逸等带走的能量), 其中  $3nT$  为单位体积等离子体的热能, 这是因为单位体积中 D, T 离子和电子共计  $2n$  个, 假定电子和离子的温度相同, 每个粒子的平均热运动能量为  $(3T/2)$ , 这里的  $T$  就是等离子体的动力温度,  $\tau$  为能量约束时间.

用电动力学方法可以估算电子的韧致辐射损失功率密度 (电子温度在  $8 \sim 20$  keV):

$$P_b = 4.9 \times 10^{-37} Z^2 n_i n_e T_e^{1/2} \text{ (W/m}^3 \cdot \text{s)} = \alpha n^2 T_e^{1/2} \text{ (W/m}^3 \cdot \text{s)},$$

其中  $T = T_e$  为电子动力温度, 以 keV 为单位, 取  $Z=1, n_i = n_e = n, n$  以  $\text{m}^{-3}$  为单位,  $\alpha = 4.9 \times 10^{-37}$ .

等离子体释放的总功率密度

$$P = P_r + P_L = n^2 (\langle \sigma v \rangle E / 4 + \alpha T^{1/2}) + 3nT/\tau. \quad (1.2.3)$$

现在把等离子体释放的总功率密度  $P$ , 以效率  $\eta$  转变为电能, 则输出电功率密度为  $\eta P$ , 将这一输出电功率密度  $\eta P$  回授给等离子体, 如果回授的电功率密度  $\eta P$  正好补偿等离子体的损失功率密度  $P_L$ , 就能保持能量得失相当, 等离子体维持原来高温, 继续进行聚变反应, 达到聚变反应自持状态. 如果输出电功率密度  $\eta P$  大

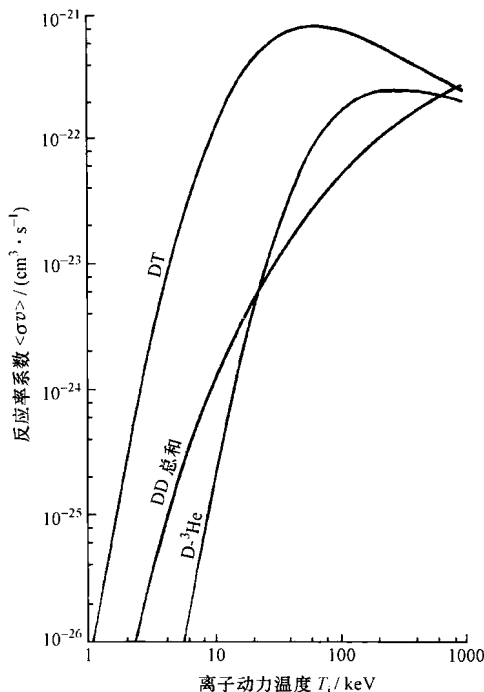


图 1.2.1 反应率系数随离子动力温度的变化



于损失功率密度  $P_L$ , 则有能量的净输出. 因此, 聚变堆的能量平衡或自持条件为

$$\eta P \geq P_L. \quad (1.2.4)$$

将(1.2.2)、(1.2.3)代入(1.2.4), 由此可以得到劳森判据

$$n\tau \geq 3T / \{ [\eta / (1 - \eta)] \langle \sigma v \rangle E / 4 - \alpha T^{1/2} \}. \quad (1.2.5)$$

因为  $\langle \sigma v \rangle$  只是温度  $T$  的函数, 所以(1.2.5)式右方是等离子体动力温度  $T$  的函数, 当等离子体达到聚变温度后, 可以由此计算 DT 反应能量得失相当时, 等离子体密度和约束时间的乘积  $n\tau$  应满足的条件. 与推导(1.2.5)式相类似, 也可导得 DD 反应的劳森判据和计算乘积  $n\tau$  应满足的条件. 利用(1.2.5)式计算  $n\tau$  乘积时, 应先假定能量转换效率  $\eta$  值(一般  $\eta$  取  $1/2 \sim 1/3$ ), 这样才可以计算得到劳森判据. 在计算时, (1.2.5) 式的分母必须大于 0, 即

$$[\eta / (1 - \eta)] \langle \sigma v \rangle E / 4 - \alpha T^{1/2} > 0. \quad (1.2.6)$$

由(1.2.6)式等于 0 可以得到一个临界温度  $T_c$ ,  $T_c$  也就是能量得失相当时的最低温度. 选取  $T > T_c$  的不同温度值代入(1.2.5)式, 可得  $n\tau$  值与动力温度  $T$  的关系曲线. 选取  $\eta = 1/3$ , 其结果如图 1.2.2 虚线所示. 劳森判据一般取为:

DT 反应:

$$T_c > 5 \text{ keV}, \quad n\tau \geq 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s};$$

DD 反应

$$T_c > 100 \text{ keV}, \quad n\tau \geq 10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}.$$

对于 DT 反应, 在等离子体温度大约 30 keV 附近  $n\tau$  有一极小值. 对于 DD 反应,  $n\tau$  取极小值的等离子体温度大约在 100 keV. 满足劳森判据, 只说明能量得失相当, 没有多余的聚变功率输出. 但实现劳森判据毕竟是核聚变研究追求的第一阶段目标.

## (2) 点火条件

现在使用较多的是点火条件. 在强磁场约束的 DT 聚变堆中, DT 反应产生带正电的  $\alpha$  粒子, 被磁场约束在聚变堆的等离子体中.  $\alpha$  粒子聚变反应得到的能量  $P_\alpha$  (3.52 MeV) 占全部聚变反应能量 (17.59 MeV) 的  $1/5$ ; 直接利用  $\alpha$  粒子聚变能量加热等离子体(自加热效应), 补充等离子体的辐射和热能损失, 使等离子体保持原来高温状态, 继续进行聚变反应, 这样不需要外界回授能量或加热, 聚变堆就能达到自持反应条件(即“自持燃烧”),

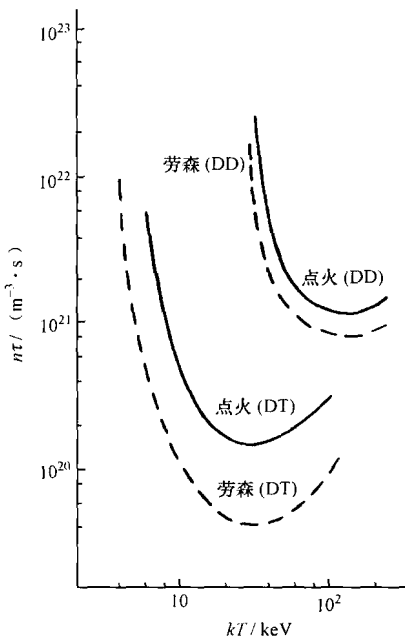


图 1.2.2 劳森判据和点火条件随等离子体动力温度的变化