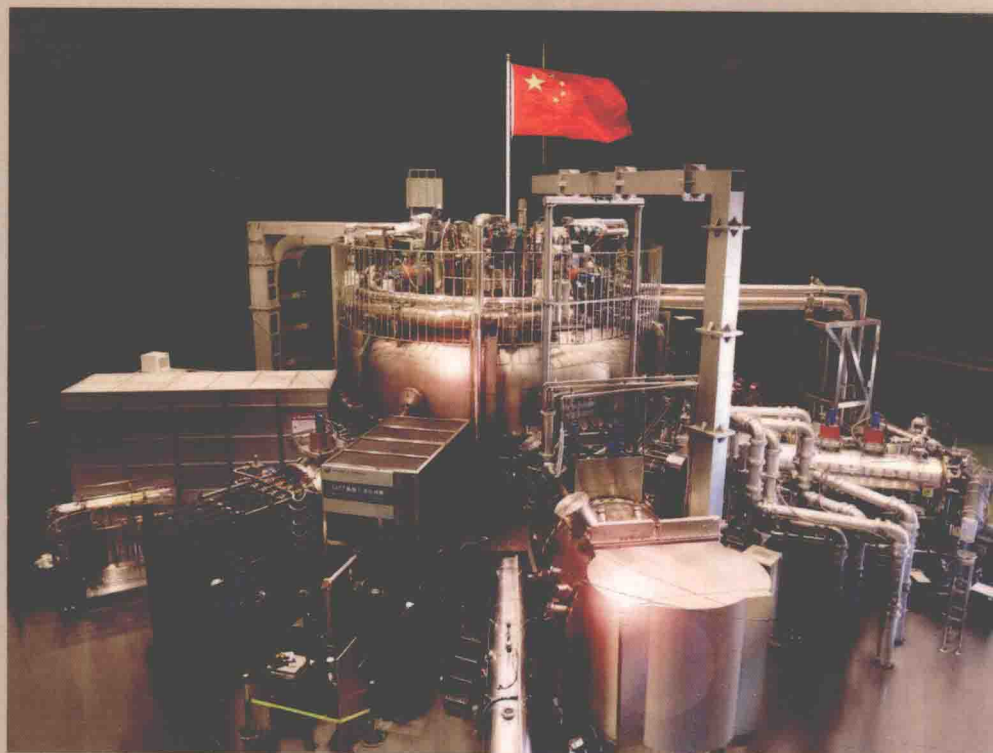




磁约束等离子体 实验物理

王 龙/著

Experimental Physics of Magnetic
Confinement Plasmas



科学出版社

磁约束等离子体实验物理

王 龙 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍以实现受控核聚变为目的的环形等离子体装置的基本原理和研究方法,也适用于一般的磁约束等离子体装置。内容包括聚变研究概观、磁约束聚变装置的类型、主要工程问题、等离子体诊断及数据处理、环形等离子体的基本物理性质、宏观不稳定性、微观不稳定性及输运、辅助加热及边界区物理。着重基本概念的陈述、物理意义的阐发和实验方法的探讨,并介绍一些前沿领域的热点问题和研究现状。

本书适合作为相关专业本科或研究生阶段的教材,也可供这一研究领域的人员特别是从事实验研究的人员学习入门知识时使用,还可供对这一很快发展的领域有兴趣的人士参阅。

图书在版编目(CIP)数据

磁约束等离子体实验物理/王龙著. —北京:科学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-03-056574-7

I. ①磁… II. ①王… III. ①磁约束-等离子体约束-实验-研究
IV. O532-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 028920 号

责任编辑:钱 俊/责任校对:邹慧卿
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2018 年 2 月第一次印刷 印张:33 插页:2

字数:650 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

等离子体物理学是研究等离子体的形成和演化规律及其与其他物质相互作用的学科,属物理学分支学科。同其他物理学分支学科相比,等离子体物理学的发展在很大程度上是由目标驱动的,特别是磁约束等离子体物理更是如此,它更多地是由人类开发和利用磁约束核聚变能源的探索研究直接推动而得以迅速发展的。

王龙老师是我国杰出的等离子体实验物理学家,1967年自中国科学院物理研究所研究生毕业后,就一直从事等离子体物理特别是磁约束等离子体物理领域的科学研究,并在该领域作出过重要贡献。他曾作为主要的建设者之一,参与完成我国第一台托卡马克 CT-6 磁约束聚变实验装置的建设。在他的主持下,CT-6 托卡马克在近 30 年的实验研究中,产出了一系列原创性成果,并因此培养出一大批磁约束等离子体物理方面的专业人才。他还一直致力于推动我国磁约束核聚变科学研究的发展。作为世界上首个全超导托卡马克装置“东方超环”(EAST)的科技委成员,他长期关心、支持 EAST 装置的技术发展、科研进展和人才培养,并为之筹谋、建言献策;作为国家磁约束核聚变能研发专项的资深专家,他几乎参加了每一个重要项目的立项、评审和验收。他和俞昌旋院士是公认的评审要求最严格的专家,从不放过任何瑕疵。他严谨治学、精益求精的作风不但值得我们学习,也为从事磁约束聚变研究的后来者树立了榜样。

王龙老师不仅长期工作在磁约束聚变科研一线,而且也热心于等离子体实验物理专门人才的培养。他先后在华中科技大学、北京大学、四川大学、中国科学技术大学、核工业西南物理研究院和中国科学院等离子体物理研究所等单位开课讲学,传授等离子体物理实验的经验和知识,积极为我国培养下一代等离子体实验物理人才。他所讲授的课程实验内容丰富、物理图像清晰且易于实践,深受大家喜爱,也因此获得了学生们的好评和尊敬。

我本人在读研究生时就听过王龙老师讲课,也算是王龙老师的学生。后来,有幸与他一起在磁约束聚变研究领域共事,对他的科学造诣、丰厚学养、治学精神愈发了解,也由此愈发敬佩。近期听闻王龙老师要在研究生授课讲义的基础上编撰《磁约束等离子体实验物理》一书,我感到十分高兴。长期以来,我国磁约束等离子体物理方面的教学一直缺乏实验物理相关教材,使得我国等离子体物理专业的本科和研究生教育受到一定程度的影响。由王龙老师主笔撰写这一类教材,对当下等离子体物理的学科发展、人才培养无疑是大有裨益的,也必将对我国等离子体物理特别是磁约束等离子体实验物理的发展产生积极而深远的影响。

在过去的十年中,我国磁约束聚变的发展迅速,特别是随着我国参加 ITER 计划,国内磁约束聚变在理论与数值模拟、物理实验、聚变工程以及人才培养方面都取得了长足的进步。EAST 装置在稳态高性能等离子体物理、HL-2A 在边缘等离子体物理研究等方面都取得很多原创性的成果。ITER 建设进展顺利,我国自己的中国聚变工程实验堆开始工程设计,在不远的将来即将开始燃烧等离子体物理的实验研究。从现在起更加全面系统地培养未来高水平的实验物理人才迫在眉睫,高水平的教材至关重要。

《磁约束等离子体实验物理》一书由王龙老师对他长期从事磁约束等离子体实验物理研究和教学进行总结和精炼而成。全书共 10 章。第 1~6 章是磁约束等离子体物理基础知识,系统阐述以托卡马克为主的磁约束聚变实验装置的原理、基础过程和实验进展等;第 7~10 章主要讲述部分磁约束聚变实验装置的重要研究领域和方向,包括宏观磁流体稳定性和微观湍流输运、辅助加热和电流驱动以及等离子体与壁的相互作用等。以大量研究材料和实践案例客观展现该领域的进展和各种前沿探索,结构清晰、内容全面,深入浅出、实用性强,具有很强的可读性和参考价值。

作为一个已先期看过此书的读者,我乐于向大家推荐这本理论联系实际的“实战参考书”。它不仅可以作为高等院校相关的教学用书,也适用于从事磁约束等离子体实验物理的研究人员作为参考。衷心希望读者能够通过这本书掌握磁约束等离子体物理相关的基本知识和研究方法,同时又能融会贯通前辈们的思想精华和实践经验,在科学研究中收获自己的累累硕果。

李建刚

2017 年 10 月

前 言

本书是作者在华中科技大学和北京大学给研究生开课时所用讲义的基础上写成的,也曾四川大学和核工业西南物理研究院讲授。课程本意是给予刚进入磁约束聚变领域从事实验研究的学生和其他人员提供一些基本知识和研究方法。因为目前磁约束聚变研究的主要方向仍是以托卡马克为代表的环形系统,所以讲义内容以托卡马克为主。但很多内容也适用于一般的磁约束聚变装置。

本书第 1~6 章为基础知识,也包括等离子体平衡在内。第 7~10 章主要讲述一些研究领域,包括宏观和微观问题、辅助加热和电流驱动以及边界区问题。

因为本书内容属于基础专业知识,各章后面所列参考文献主要是一些容易获得的总结性文章,以供对有关问题作进一步的了解。为与阅读文献衔接,在引入一些专有名词时,注明了英文译法。

俞昌旋院士、袁宝山教授曾审阅过本书一些章节,并提出宝贵修改意见。原讲义在北京大学讲授时,郑春开教授、王晓钢教授、肖持阶教授曾给予了很大支持和鼓励,李湘庆老师纠正了原讲义中的一些错误。2015 年严龙文教授曾使用本书第 8 章内容作为等离子体物理暑期学习班教材,也做了一些纠正和补充。中国科学院等离子体物理研究所、核工业西南物理研究院、中国科学技术大学、清华大学等单位 and 同行提供了不少原始数据和资料。在几个单位讲授本书时,不少老师和同学也对本书内容提出很多修改意见。本书出版时,李建刚院士、段旭如教授、刘万东教授、李定教授亦给予很大鼓励。在此一并致谢。

作者感谢中国科学院等离子体物理研究所在本书出版上给予的支持。

因为本领域涉及面广,内容庞杂,发展迅速,以作者之浅陋,本不足当此任,勉强草就,自觉汗颜,不妥之处,在所难免,望海内有识之士指教,俟后修改。

王 龙

2017 年 4 月

目 录

序言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 能源需求	1
1.2 热核聚变反应	3
1.3 实现聚变反应的条件	11
1.4 带电粒子在磁场中的运动	13
1.5 磁约束聚变和惯性约束聚变	18
1.6 磁约束聚变研究的历史	23
阅读文献	31
第 2 章 磁约束聚变装置的类型	32
2.1 磁约束聚变装置的分类	32
2.2 托卡马克	33
2.3 球形环	38
2.4 仿星器	42
2.5 磁镜	46
2.6 箍缩类装置	53
2.7 紧凑环	59
2.8 内环装置	63
2.9 原理性实验装置	65
2.10 中小型装置的作用	69
阅读文献	70
第 3 章 磁约束聚变工程	72
3.1 环向磁体	73
3.2 极向场系统	80
3.3 磁体和电源	91
3.4 被动导体	98
3.5 真空室	102
3.6 排灰	111
3.7 加料	118
3.8 射频系统	124
3.9 中性粒子束注入	130
3.10 击穿和预电离	132

阅读文献	135
附录	135
第 4 章 环形等离子体的基本物理性质	138
4.1 等离子体平衡	138
4.2 环形等离子体位形	140
4.3 粒子在环形装置中的运动	147
4.4 Grad-Shafranov 方程	161
4.5 真空磁场和平衡性质	167
4.6 等离子体电路	175
4.7 Pfirsch-Schlüter 电流	179
阅读文献	182
第 5 章 等离子体诊断	183
5.1 概述	183
5.2 磁测量	186
5.3 静电探针	195
5.4 等离子体的辐射探测	207
5.5 折射和反射测量	233
5.6 电磁波散射测量	241
5.7 粒子测量	254
阅读文献	261
第 6 章 诊断的数据处理	262
6.1 图像重建	262
6.2 模式分析	273
6.3 涨落的功率谱测量	280
6.4 湍流信号的非线性性质分析	287
6.5 非线性物理的研究方法	299
阅读文献	303
第 7 章 磁流体不稳定性	305
7.1 概论	305
7.2 理想磁流体不稳定性	308
7.3 非理想磁流体不稳定性	317
7.4 边缘区的不稳定性	327
7.5 高能粒子产生的不稳定性	335
7.6 密度极限和先进模式	340
7.7 破裂及有关现象	350
阅读文献	360
第 8 章 输运和约束	362
8.1 一般实验研究	362

8.2	输运系数模型和实验定标律	374
8.3	改善约束模	382
8.4	微观不稳定性	396
8.5	雷诺协强和 L-H 模转换	410
8.6	带状流	415
8.7	轮廓刚性和大尺度结构	421
8.8	粒子输运和矩输运	432
	阅读文献	438
第 9 章	辅助加热和非感应电流驱动	440
9.1	引言	440
9.2	中性粒子束注入	442
9.3	冷等离子体波	448
9.4	射频加热和电流驱动	456
9.5	电子回旋波	462
9.6	离子回旋波段的加热	469
9.7	低杂波电流驱动	475
9.8	阿尔文波加热	479
9.9	非感应电流启动	481
	阅读文献	484
第 10 章	边界区物理	485
10.1	删削层	485
10.2	偏滤器	488
10.3	等离子体和壁相互作用	492
10.4	原子分子过程	502
	阅读文献	503
	中英文名词索引	504
	实验装置索引	511
	彩图	

第1章 引言

1.1 能源需求

1. 世界能源需求的预测

受控热核聚变研究来源于人类对能源的需求。历史上，特别是在近代，人类的生产和生活主要依赖化石能源（煤、石油、天然气）。然而 20 世纪以来，人口的急剧增加、生产的发展和生活水平的不断提高，使得不能再生的化石能源正面临枯竭。目前各种能源的储量（折合成能量）和根据目前消耗水平所估计的可用时间如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 各种能源储量和可用年数

能源	储量/(10^9J)	可用时间 (目前耗能水平)/年
石油	1.2×10^{13}	40
天然气	1.4×10^{13}	50
煤	1.0×10^{14}	300
铀 235(裂变堆)	10^{13}	30
铀 238、钍 232(增殖堆)	10^{16}	3×10^4
锂 (用于 DT 聚变堆)	10^{19}	3×10^7

图 1-1-1 为根据国际能源署 2005 年数据绘制的 2050 年前全世界对能源消耗量的预计 (Li Jiangang et al., Nucl. Fusion, 50(2010) 014005)。其中能耗单位 1 吨标准煤 (TCE) 的能量为 $2.9271\times 10^{10}\text{J}$ 。可再生能源指水能、风能、太阳能等。

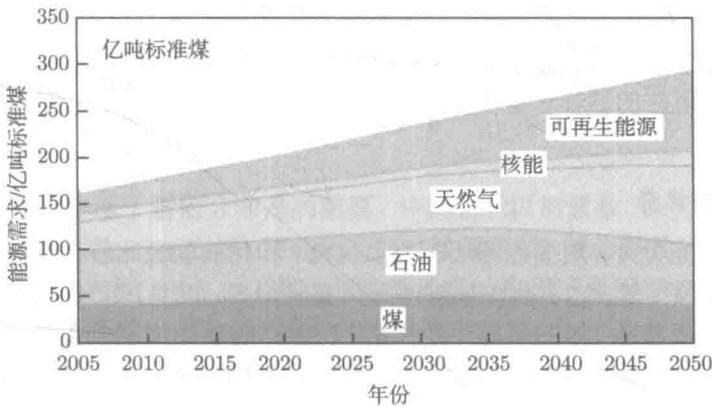


图 1-1-1 全世界一次能源需求以及组成部分的预计

我国能源的生产和消费也存在类似前景。根据预测，我国将在 2050 年基本实现现代化，人均生产总值达到中等发达国家水平。这时的能源需求大约为 2005 年的 3 倍。而我国的石油产量将在 2020~2030 年达到峰值，然后逐年下降。天然气产量在 2030 年后将很快增长，

在 2050 年达到峰值。届时在能源结构中,石油、天然气和水电以外的大约 80% 的能源供给必须主要由煤和核能承担。我国煤的储量丰富,可基本满足 21 世纪的需求,但受到运输能力和环境污染的限制。燃煤引起的二氧化碳排放已成国际政治问题,尚无很好的解决方法。

2. 核能的发展

鉴于能源状况和前景的分析,无论我国还是世界各国必须重点发展核能。裂变能源已成为相对成熟的技术,但有开采价值的裂变燃料的储量也是有限的。在天然铀中,可进行链式反应的铀 235 只占很少数量(相对丰度,即原子百分数, ^{235}U 为 0.720%。此外还有 ^{234}U 占 0.005%。其余 99.275% 为 ^{238}U)。单纯以铀 235 为燃料的裂变堆只能提供几十年的能量消耗。

然而,有较丰富储量的铀 238 和钍 232 可接受中子反应分别生成可作为裂变燃料的钚 239 和铀 233。前一反应是铀 238 和中子反应生成铀 239,铀 239 经两次 β 衰变后得到钚 239。后一反应是钍 232 和中子反应生成钍 233,钍 233 经两次 β 衰变后得到铀 233。



其中, Np 和 Pa 分别为元素镎和镤。利用铀 235 反应的中子产生上述反应以增殖核燃料的反应堆称**增殖堆**(breeder reactor)。利用铀 235 反应的堆一般用经慢化的热中子产生链式反应。在这样的堆中,如用天然铀做燃料,也可产生少量增殖反应,使能量利用率达到 1%。而在增殖堆中,由于裂变反应产生的中子数和入射中子能量有关,直接使用裂变反应产生的快中子产生增殖反应较为有利,故在其中不用慢化剂,称为**快中子堆**(fast neutron reactor)或简称**快堆**,燃料利用效率可达 40%。经数十年研究,增殖堆目前在技术上臻于成熟,已建成多台原型快堆和大型示范性快堆,正在向商业化发展。我国第一个实验快堆于 2009 年在中国原子能科学研究院建成,其热功率 65MW,电功率 20MW,2014 年实现满功率运行。

我国在 21 世纪初期的核能发展战略是首先发展**热中子堆**(thermal neutron reactor),下一步发展快中子增殖堆,预计在 2020~2030 年进入商用。和国际同步,在 21 世纪中叶开始发展聚变堆。按照现在的估计和世界范围内能源结构的设想,在 21 世纪后半叶聚变商业堆将成为现实。

3. 聚变能源的优势

除去燃料储备充分外,聚变能源还有很多优点。和化石能源比较,聚变能源对空气无任何污染。和裂变能源比较,它引起的放射性污染要轻得多,而且,它不可能产生大规模不可控能量释放的超临界事故(如三里岛、切尔诺贝利那样的事件)。我们把提供 10^9W 功率(典型电厂规模)的聚变能源电站和燃煤电站一天所消耗的燃料和产生的废料比较列于表 1-1-2,从表中就可以看出聚变能源的优越性,其中 ^6Li 用于产生 T_2 。

表 1-1-2 煤和 DT 聚变典型电厂一天所耗费燃料和产生废料的对比

	煤	DT 聚变
燃料	9000 吨煤	0.5 千克 D_2 , 1.5 千克 ^6Li (0.7 千克 T_2)
废料	30000 吨 CO_2 , 600 吨 SO_2 , 90 吨 NO_2	2 千克 ^4He

至于对环境的长期影响，可以参看图 1-1-2 (J. Jacquinot, Nucl. Fusion, 50(2010) 014001) 表示的裂变和聚变反应堆关闭后放射性的逐年变化的相对值，以煤灰所含放射性物质的数据作为参考。其中一些细的曲线指不同的燃料循环 (裂变) 和不同的结构材料 (聚变)。我们可以看到，聚变堆关闭后的放射性远远低于裂变堆，在 100 年内就可接近煤灰的水平。

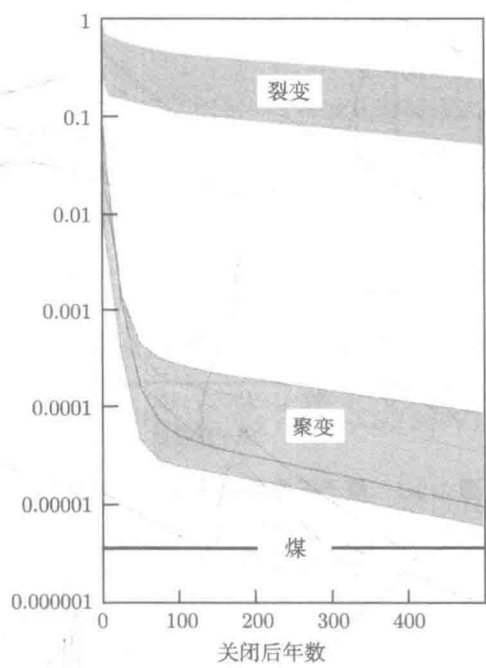


图 1-1-2 裂变和聚变堆关闭后放射性的逐年变化 (以煤灰数据为参考值)

1.2 热核聚变反应

核能源来自不同元素的核子 (组成核的质子和中子) 有不同的平均结合能，或平均质量 (图 1-2-1)。这个图的纵轴用质子质量 ($m_p = 1.67 \times 10^{-24} \text{g}$) 作单位，按照 $E=mc^2$ 的质能转换公式，相当于 938MeV 的能量。

这一平均结合能按原子量的分布是两端高，中间低，以质量数 60 为界。如果平均质量高的低原子量原子核 (图 1-2-1 左端) 聚合成高质量数原子核，就会释放出部分核能。这一过程为聚变反应。相反，在图 1-2-1 的右端，平均质量高的高原子量原子核发生分裂，形成原子量低的原子核，也会释放出部分结合能，相当于裂变反应。

1. p-p 反应

实际上，我们在地球环境下使用的化石能源和风力、水力、太阳能都源于太阳的辐射能源。而太阳，和其他类似恒星一样，其辐射来自于其内部的聚变反应。太阳的组成为 71% 的氢，27% 的氦，2% 为其余元素 (按质量计)。发生的聚变反应主要是一种称为质子-质子反应的过程。它占太阳辐射能源的 90% 以上。这种反应由几个分支构成，最主要的分支是如下

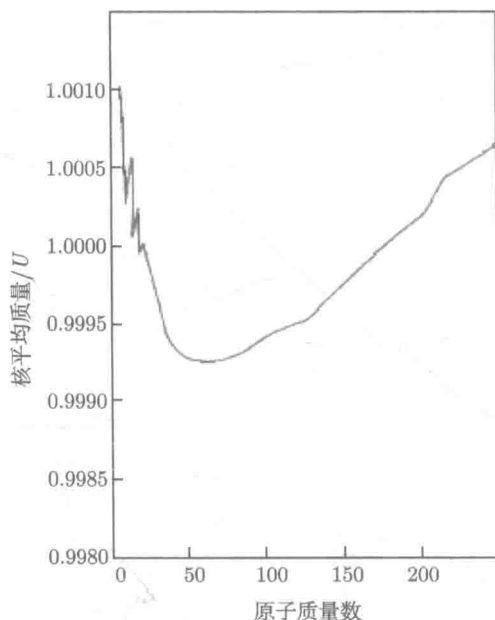
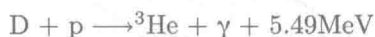
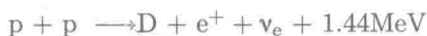


图 1-2-1 核子平均质量随核质量数的变化

p-p 循环(p-p cycle), 下列反应式也给出每级反应释放的能量



其中, e^+ 为正电子, ν_e 为电子中微子。其中第一个反应为参加反应的一个质子通过弱相互作用发射正电子而转换为中子, 再与另一质子结合成氦核。在产生的 1.44MeV 能量中, 有 1.02MeV 是反应产生的正电子和电子湮没释放出的。这些聚变产物, 再通过其他聚变反应分支, 进一步反应生成更重的元素。以上反应产物, 包括中间产物, 一部分随太阳风 (从太阳大气发射的稳定粒子流) 流往整个太阳系。

这类反应发生在太阳及其他类似恒星内部。此外还可能发生一种称为 **CNO 循环**(CNO cycle) 的聚变反应链, 在更高温度的恒星上以这种反应为主。太阳核心的温度约为 $1.5 \times 10^7 \text{K}$, 密度为 160g/cm^3 。相当于 10^{31}m^{-3} 量级的数密度, 远高于我们所处环境下的固体密度。即使在这样的条件下, 上述 p-p 循环反应率也是很低的。我们用太阳的总辐射功率 $3.83 \times 10^{26} \text{W}$ 除以太阳质量 $1.989 \times 10^{30} \text{kg}$, 得到的结果是 1 吨重的物质仅产生 0.2W 的功率。也正是这样低的燃烧速率, 保证了太阳能在 50 亿年内持续供应目前水平的能量。目前在实验室环境下, 尚不能探测到这样低反应率的质子-质子反应。它的反应截面是按照弱相互作用理论计算出来的, 为 10^{-23}b ($1 \text{b} = 10^{-28} \text{m}^2$)。所以, 在地球环境下不可能用氢的质子反应作为能源, 必须寻找其他类型的聚变反应。

2. 主要的可用聚变反应

在目前条件下可以利用的聚变反应主要有以下几种。括号内列出相应产物的能量。这一能量分配符合动量守恒定律。其中,前两式称 D-D 反应,使用氢同位素氘。两种反应具有非常相近的几率。第三种称为 D-T 反应,使用氘和氢的另一同位素氚。最后一种使用氘和氦同位素 ^3He 作为燃料。



将这样的反应和化学反应如氢的燃烧 $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(2.96\text{eV})$ 比较,可见聚变能为化学能的百万倍以上。

考虑上述聚变反应的截面,由于核力是非常短程的力,所以只有两个核非常接近时才能发生聚变反应。而两个核的接近须克服它们之间的库仑斥力,或者说,核必须通过它们之间的位垒才能发生聚变反应。按照库仑定律,越过这一位垒所需能量应为

$$E_{\max} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} \quad (1-2-1)$$

其中, Z_1, Z_2 为原子序数, $r_{12}(\text{m}) = 1.4 \times 10^{-15}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ 为两核间距离, A_1, A_2 为两核质量数, e 为电子电荷, $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$ 为真空中的介电常数。对 D-D 反应这一能量为 0.40MeV , 对 D-T 反应为 0.37MeV (所以 D-T 反应比 D-D 反应更容易实现)。这样高的能量只有在粒子加速器中才能达到,特别是对于较高 Z 的燃料,所以应尽量使用低 Z 燃料用于聚变反应。另一原因是高 Z 燃料在高温时产生的辐射能量损失大。

考虑到量子力学的隧道效应以后,聚变反应所需能量大大降低。利用准经典的 WKB 法,得到以下反应截面的 Gamow 公式:

$$\sigma(E) = \frac{C}{E} \exp\left(-\frac{\pi\sqrt{\mu}Z_1Z_2e^2}{\epsilon_0 h\sqrt{2E}}\right) \quad (1-2-2)$$

其中, C 是一个常数, E 为粒子能量, μ 为两核的折合质量, h 为 Planck 常量。这公式包含两个因子。前一因子相当于库仑散射截面,后一指数因子相当于位垒渗透深度。实际上这一反应尚须考虑到核间的共振效应,所以 Gamow 公式并不完全符合实验结果,实际截面还要大一些,反应所需的能量约在 10keV 以上。实际所用的数据来源于测量结果(图 1-2-2)。但较低能量的实验数据缺乏,可以从 Gamow 公式外推。从图 1-2-2 可以看出,在高能区域,由于库仑散射截面随能量增加而减小,所以受其影响聚变反应截面也随之减小。

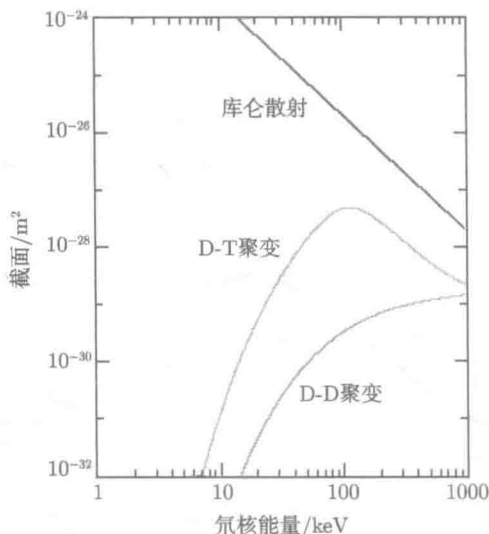


图 1-2-2 D-T 和 D-D 聚变反应截面和 D-T 之间的库仑散射截面比较

我们当然可在粒子加速器中或用其他方法 (如气体放电) 将氘核加速到足够的能量, 用来轰击同样材料的靶或氚靶, 以实现聚变反应。但是, 即使用此方法实现少量聚变反应, 由于库仑散射截面远大于聚变反应截面, 大部分束能量用于加热靶材料, 所获得的输出能量也是微不足道的。这样的定向粒子流产生的聚变反应称为**束靶反应**, 可能在一些放电装置中观察到, 它的特点是产生的中子不是各向同性的。在温度未达到聚变温度的实验装置中用氘气运行时, 一般也不能观察到聚变中子。但使用几十 keV 的中性粒子束 (氘原子) 注入加热时, 经常探测到束粒子和靶等离子体粒子间反应产生的中子, 也有部分束粒子和束粒子之间反应产生的中子。

作为能源的聚变反应只能在高温下实现。这时物质呈等离子体态, 反应粒子以很高速度进行无规的热运动, 以一定的几率相互碰撞发生反应。这样的反应称**热核反应** (thermonuclear reaction)。热核反应产生的中子在空间的分布是各向同性的, 可作为区别束靶效应的判据。热核反应释放很大的能量, 在可控条件下可用作大规模能源。正因为热核反应发生在等离子体态下, 所以受控聚变研究必须以等离子体物理的研究为基础。

3. 反应速率

处于热平衡的反应粒子的速度可用麦克斯韦速度分布来描述。反应截面和粒子间相对速度乘积对这一分布的平均值 $\langle \sigma v \rangle$ 是反应速率系数。它的意义是, 单位时间单位体积的反应次数是 $\langle \sigma v \rangle n_1 n_2$ 。其中, n_1, n_2 是参加反应的两种粒子的数密度, 如果两种粒子相同则反应速率为 $\langle \sigma v \rangle n^2/2$ 。上述三种反应的速率系数作为温度的函数如图 1-2-3 所示, 其中 D-D 反应的数据是两种反应的平均值。随着温度的增加, 几种反应截面都急剧增加。直到几十个 keV (几亿摄氏度) 的高温, 反应速率系数才接近它们的极大值。

在这几种反应中, D-D 反应的燃料最易得到, 反应产生的中子能量也较低, 容易被屏蔽。重水 (D_2O) 约占自然界海水分子的 $1/6700$, 淡水中含量稍低。从其中所含氘经聚变反应所

产生的热量计算, 1 升水可抵 300 多升汽油。所以对 D-D 反应而言聚变能源实际上是取之不尽的。但由于 D-D 反应所需的条件较难达到, 利用 D-D 反应建造的聚变堆不在近期考虑之内。

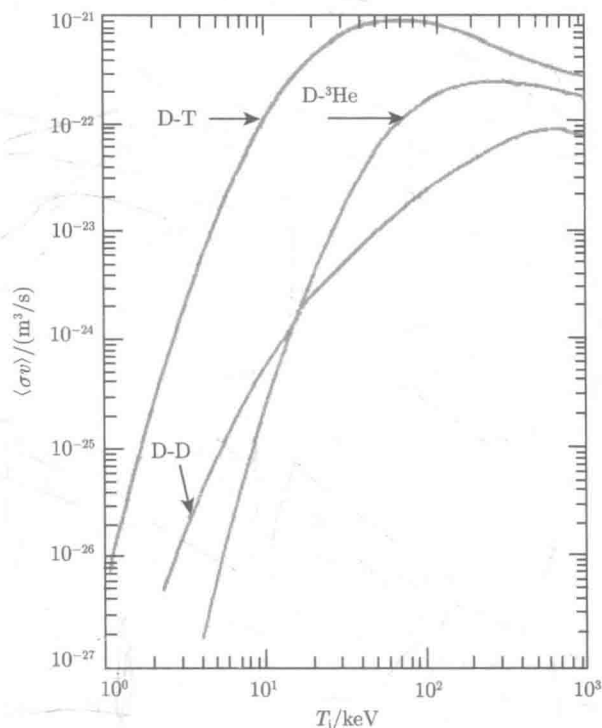


图 1-2-3 几种聚变反应速率系数随离子温度变化的曲线

在图 1-2-3 所示温度范围内, D-T 反应速率始终远高于其他两种反应。这一反应截面在 $T=100\text{keV}$ 时为 5b (图 1-2-2), 达到最大值。它的反应速率系数可用以下公式拟合, 其中温度单位为 keV:

$$\langle \sigma v \rangle (\text{m}^3/\text{s}) = \frac{3.7 \times 10^{-18}}{H(T) \times T^{2/3}} \exp\left(-\frac{20}{T^{1/3}}\right), \quad H(T) = \frac{T}{37} + \frac{5.45}{3 + T(1 + T/37.5)^{2.8}} \quad (1-2-3)$$

目前所指望实现的聚变堆主要依赖 D-T 反应。目前已证实的聚变能源的科学可行性也是对 D-T 反应而言的。

D-T 反应所用的氢的另一同位素氚 (T) 是一种放射性同位素, β 衰变的半衰期为 12.323 年, 衰变电子平均能量为 5.7keV, 能量有分布的原因是反应同时有介子产生, 氚在自然界存在甚少 (热核爆炸试验前约为 900g, 试验后有很大增加), 但可用裂变反应堆产生的中子轰击锂 6 得到。锂 6 的同位素相对丰度为 7.5% (其余为锂 7), 和中子的以下反应产生氚:



目前锂主要从含锂矿石中提取。但锂在海洋中总储量很大, 每升海水含 0.1~0.17mg。从海水中提取锂的方法现处在研究阶段。从这个意义上说, 聚变能源也是取之不尽的。

图 1-2-4 是在反应温度为 70keV 时,所产生的中子和 α 粒子的能谱。由于反应粒子原来有一定速度分布,两种聚变产物的能量分布均有一定宽度,由反应粒子的温度决定。此外由图可以看到,除去 D-T 反应产生数目相等的 14MeV 的中子和 3.5MeV 的 α 粒子,还有少量 D-D 反应 (称为次级反应或副反应) 产生的 2.45MeV 中子。

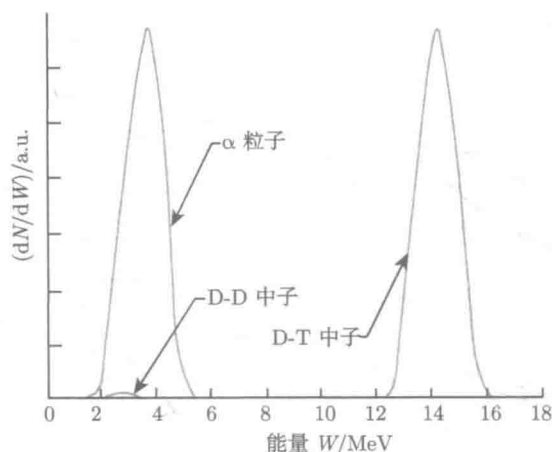


图 1-2-4 D-T 反应产生的中子和 α 粒子能谱

D-T 反应产生的高能中子在聚变反应堆的包层中慢化,能量转化为热能。在实际的 D-T 运行反应堆中 (燃料流程见图 1-2-5), 可以用 ${}^6\text{Li}$ 作为吸收反应产物的包层, 称为增殖包层 (breeder blanket)。包层中还包括中子增殖剂和冷却剂。包层中的 ${}^6\text{Li}$ 在聚变中子作用下, 可以生成氦再进入反应室作为燃料。用反应堆的中子生产氦燃料的速率过低, 成本很高, 造成氦的匮乏, 所以在反应堆中配置这种增殖包层是十分必要的。如果增殖率大于 1 称为氦自持。实际上, 由于氦在反应室和包层中的滞留、泄漏等原因, 堆中的增殖率要求达到 1.2。

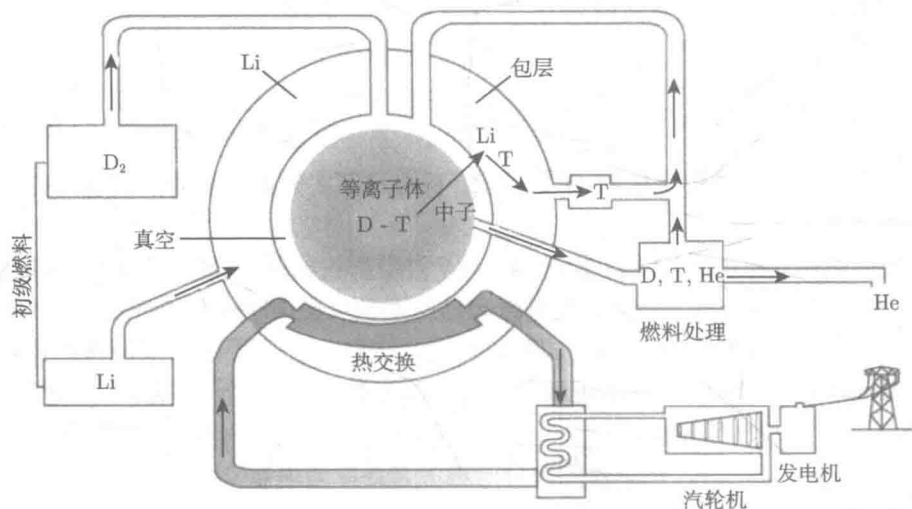


图 1-2-5 增殖包层 D-T 反应堆燃料流程