

THE PHYSICS OF INERTIAL FUSION

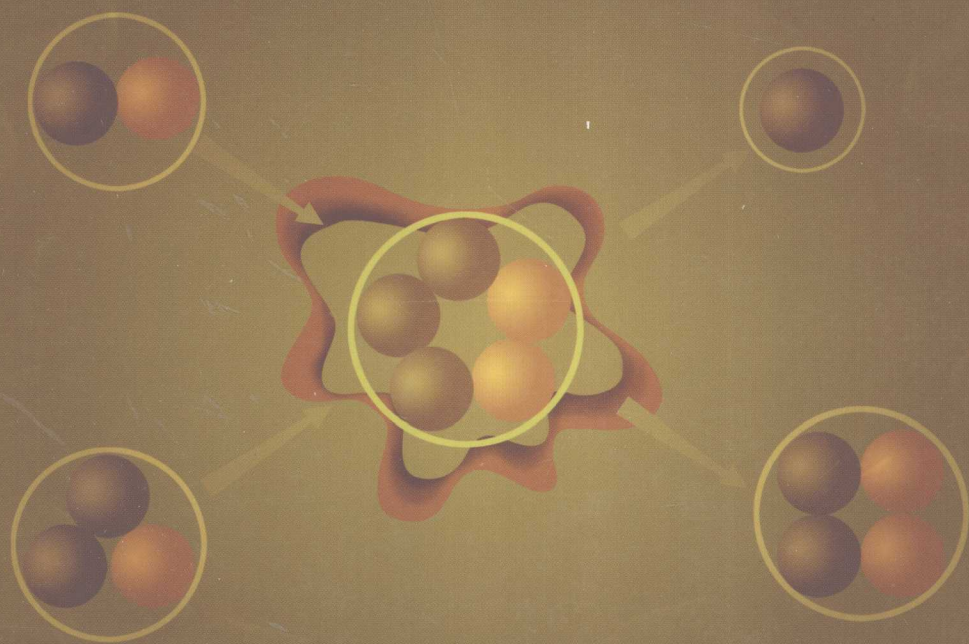
〔意〕 Stefano Atzeni

〔德〕 Jürgen Meyer-ter-Vehn

著

沈百飞 译

惯性聚变物理



科学出版社

www.sciencep.com

惯性聚变物理

〔意〕 Stefano Atzeni, 〔德〕 Jürgen Meyer-ter-Vehn 著

沈百飞 译



科学出版社

北京

图字: 01-2008-3598

内 容 简 介

本书介绍了惯性约束聚变和有关的物理理论. 对激光惯性约束聚变有比较完整的论述, 特别注重聚变中的物理过程并推导了所有关键公式, 包括定标指数和数值因子等, 同时也利用数值模拟结果形象地描述了聚变过程, 具体内容包括热稠密物质中的流体力学、流体不稳定性、热输运、辐射和碰撞过程、物态方程、等离子体与高功率激光或离子束的相互作用及核聚变反应等.

本书可供相关领域的学生及教师使用, 也可作为科研人员的参考书.

© S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn 2004

The Physics of Inertial Fusion was originally published in English in 2004. This translation is published by arrangement with Oxford University Press and is for sale in the Mainland of The People's Republic of China only.

惯性聚变物理原书英文版于 2004 年出版. 本中文版获得牛津大学出版社授权, 仅限于在中华人民共和国大陆地区销售.

图书在版编目(CIP)数据

惯性聚变物理/(意)阿蔡塞(Atzeni, S.)等著. 沈百飞译. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020598-8

I. 惯… II. ①阿…②沈… III. 惯性约束聚变装置-研究 IV. TL632

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 040887 号

责任编辑: 张 静 杨 然/责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵德静/封面设计: 王 浩

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 26 1/2

印数: 1—2 500 字数: 486 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

译 者 序

随着人类社会的不断进步,全球能源问题日益重要.为此,受控聚变能作为一个可能的解决途径,受到人们广泛的重视.在磁约束方面,国际上正合作进行ITER计划,中国也参加了这一计划;在惯性约束方面,美国的国家点火装置即将运行,预期将首次利用高功率激光实现受控聚变点火,并实现较大的能量增益.但目前国内市场还没有全面深入论述惯性约束聚变理论方面的专著,所以此书中译本的引入必将会推动我国这方面的科学研究,并对培养这方面研究人才具有十分重要的意义.

这里,我很高兴地向国内读者推荐 S. Atzeni 教授和 J. Meyer-ter-Vehn 教授的这部专著《惯性聚变物理》(The Physics of Inertial Fusion, Oxford University Press, New York, 2004) 的中译本.

S. Atzeni 教授和 J. Meyer-ter-Vehn 教授都是惯性聚变理论方面的国际著名学者,但都不涉及和军事相关的研究.译者曾有两年时间有幸和 J. Meyer-ter-Vehn 教授一起进行合作研究,他也一直关心中译本的进展情况,并提供了原书的电子版本.

本书详细、深入地讲述了惯性约束聚变,特别是激光聚变的物理基础,给出聚变过程中各阶段的数值模拟结果和完备的解析理论推导.具体内容包括核聚变反应、热稠密物质中的流体力学、流体不稳定性、热输运、辐射和碰撞过程、物态方程、等离子体与高功率激光或离子束的相互作用等.

在本书的翻译过程中,许多人都付出了努力.张淑彦打印了本书的大部分公式,并在修改插图方面提供了大量帮助;张晓梅和李雪梅打印了部分公式;王凤超、温猛、金张英、张晓梅、李雪梅和吉亮亮对全文进行了校对.

希望这本中译本能为促进我国激光聚变研究的进步,起到一定的作用.

沈百飞

于嘉定

序

该书作者邀请我写个简短的序，强调一下劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 在激光聚变方面的早期工作。这个工作的起因是激光有可能产生和热核武器中类似的物质状态和热辐射，同时，从长远来看，少量的 DT 可能不需要裂变的帮助，通过压缩就能点火。到 1962 年，人们已基本知道了设计高能量产出-质量比核武器的基本原则，但是“纯聚变”这一让人着迷的挑战依然存在。

同时在 1961 年夏天，位于 Malibu 的休斯研究实验室演示了 Q 开关腔技术，并将它用到红宝石激光器上产生大功率的短脉冲激光，红宝石激光器也正是 1960 年在这个实验室发明的。这时在美国光学公司，人们发现，用许多稀土氧化物中的任何一种溶解到玻璃中也许就可替代红宝石制造激光器。这样就有可能用相对便宜的材料作激光介质，并且为建造大尺寸和高功率脉冲激光器开辟了广阔前景。

基于这一极具前途的远景，劳伦斯辐射实验室（当时的名称）在 1962 年春天开始一项探索性的研究计划，研究强光和等离子体的相互作用，对建造具有足够大能量和功率的激光器来点燃 DT 进行评估，同时研究合适的内爆和点火方式。初期的计算显示，激光脉冲至少要有 100 kJ 的能量，脉冲时间不超过 10 ns。几个类似的计划也在几个欧洲实验室开展，其中包括前苏联莫斯科的 Lebedev 物理所和法国 Limeil 的 Commissariat l'Energie Atomique 实验室。

这个探索计划从 1962 年进行到 1972 年。考虑用来建造大尺寸激光器的是铍玻璃和碘激光器。后来选了前者，按布儒斯特反射角摆放，建造了由 16 个面泵浦的圆盘组成的原型放大器，这个放大器是多通结构，可放大单个的 5ns 激光脉冲来作激光等离子体相互作用研究。一个重要结果是和 Lebedev 研究所一起发现了高能的“热”电子，这可使正被压缩的 DT 燃料额外地被预热。这个效应及短波长激光可以大大改善激光和靶的耦合，促使我们用激光的三次谐波来驱动靶的内爆。

氢弹物理和惯性约束聚变 (ICF) 物理密切相关，这使得美国和其他拥有核武器的国家将 ICF 的一些研究保密，这些研究，特别是燃料压缩和用热 X 射线驱动内爆被认为是高度机密。美国到 1971 年才开始解密，当时在英国举行的欧洲物理协会会议上，一篇前苏联的文章已有揭示。前苏联一直保密到 1981 年，这年官方发表了如下声明：

(1) 在热核武器方面，裂变爆炸产生的辐射可用来压缩并点燃装有热核燃料

并与之分离的另一装置 (Teller-Ulam “辐射内爆” 原理)。

(2) 对一些 ICF 靶, 聚焦能量 (如激光和粒子束) 转换得到的辐射可用来输运能量、压缩并点燃装有热核燃料并与之分离的另一装置 (ICF 的 “间接驱动” 方法)。

在压缩问题解密后不久, 1972 年 5 月, 在蒙特利尔举行的国际量子电子学会议上, 利弗莫尔的一个研究小组发表了具有里程碑意义的文章. DT 液滴直接驱动内爆的计算模拟结果表明, 只要很好地调节驱动内爆的激光功率的时间依赖关系, 就可以实现一万倍的燃料压缩及中心 “热斑” 燃料点火, 同时 60 kJ 的激光能量足够用来产生 1800 kJ 的热核能量, 即 30 倍的能量增益. 这些重要结果大大提高了美国和其他国家在 ICF 研究方面的兴趣。

在利弗莫尔, 我们决定大规模扩大研究计划, 并将重点放在发展实现间接驱动热核点火所需的大规模激光系统上. 一系列规模不断扩大、输出能量不断增长的激光器得到发展和测试, 最后开始建造目前的 192 路、1.8 MJ 激光, 即国家点火装置 (NIF). 类似的激光装置, 兆焦耳激光器 (laser megajoule, LMJ) 正在法国 Bordeaux 建造。

NIF 和 LMJ 有望于 2008 年完成. 它们将为实验室研究高能量密度物质及物质和强辐射的相互作用, 也为实现 “纯聚变” 这一长期挑战提供前所未有的能力. 高能量密度这一领域的一个新生事物就是 “超强啁啾脉冲激光”, 它可以产生比 ICF 激光大几个数量级的能量密度, 在 ICF 和核物理方面可能有各种应用。

在这个即将迅速拓展的物理领域, 该书来得非常及时, 它对高能量密度物理和惯性约束聚变作了清晰、全面的阐述. 两位作者都来自纯学术部门, 和武器研究没有联系. 这本书有利于促进将涉及高功率束流的实验室高能量密度物理建设成具有许多民用的等离子体分支。

Ray Kidder
Pleasanton
2003 年 7 月

前 言

本书专门研究惯性约束聚变和有关的各个物理分支. 它覆盖热稠密物质中的流体力学、流体不稳定性、热输运、辐射和碰撞过程、物态方程、等离子体与高功率激光或离子束的相互作用及核聚变反应. 本书适用于该领域工作的研究人员、有关教师和学生. 实际上它是一个有关基本知识的介绍, 但它也可以作为一本参考书, 它推导了所有关键公式, 包括定标指数和数值因子.

本书来源于在德国和意大利进行的和惯性聚变能有关的高功率激光研究. 两位作者都在 20 世纪 80 年代进入这个领域, 这已在 Ray Kidder 的序中所讲的开创性年代之后. 在 1980 年, 人们已很清楚, 微小的燃料靶丸必须内爆到很高的密度才能产生很高的聚变能, 但许多细节, 比如利用热辐射这些基本方面仍然保密. 这意味着, 大多数物理要素包括模拟程序必须从头开始发展, 要经过多年才能慢慢成熟.

在德国 Garching 的 IPP (后来在 MPQ) 进行的高功率激光研究由 S. Witkowski 领导. 这些早期研究在 1979 年升级, 当时 R. Bock 在 Darmstadt 的 GSI 倡导了重离子聚变研究, 其目标就是聚变能. 正是 MPQ 和 GSI 的这种研究环境决定了我们中一个作者 (Meyer-ter-Vehn) 的工作内容. 同时来自 Karlsruhe 的 KFK 的 G. Kessler 和来自 Wisconsin 大学的 G. Kulscinski 领导的 HIBALL 反应堆研究确立了许多年的靶研究方向.

在意大利, 从 1963 年起, 关于激光产生等离子体的研究在 CNEN 的 Gas Ionizzati 实验室进行 (后来是 ENEA 的聚变室), 它由 B. Brunelli 领导. 由 U. Ascoli-Bartoli (后来由 A. Caruso) 领导的一个研究小组进行了开创性实验研究, 并发展了产生烧蚀压的理论. 这项工作在 1970 年中断了, 但 10 年后得以恢复, 当时 ABC 激光器的建造得到批准, 同时规划了一个以聚变为目的的小型计划. 正是在这个时候 (1978 年), 我们中的一员 (S. Atzeni) 作为学生加入到 Frascati 研究小组, 做关于激光驱动聚变点火的毕业论文. 这标志着他在激光产生等离子体和惯性约束聚变这一领域 20 年研究生涯的开始, 研究刚开始是在 ENEA, 从 2000 年起是在罗马大学.

本书的第 3~5 章给出 ICF 的一些基本概念: 内爆、点火和增益. 它们反映 (并扩展) 了作者在 20 世纪 80 年代早期所做的工作. 那时, 获得对 ICF 自主的理解是我们实验室的关键课题. ENEA-Frascati 在热斑点火和增益模型理论方面有所贡献, 同时还发展了一维 IMPLO 程序, 设计了一些 ICF 靶. S. A. 要感谢他

的论文导师 B. Brunelli 给予的最初指导. 这些早期工作是在 A. Caruso 领导下, 与 A. Giupponi 和 V. A. Pais 合作完成的. 他还要感谢 S. Nakai 和 H. Takabe 建议他对非等压结构进行深入分析. 第 3 章的内容在很大程度上归功于 R. L. McCrory 和 C. Verdon 领导的 Rochester 的同行们, 同时也归功于和 S. Bodner 的富有启发性的讨论. 我们还要感谢 M. Basko, M. Herrmann, J. Lindl, M. Key, M. Tabak 和 R. Piriz 在增益曲线方面所交换的看法.

1981 年以后, 热辐射在高度对称地驱动靶内爆方面所起的作用逐渐清晰, 正是那时 R. Sigel 关于黑腔靶的工作决定了 MPQ 在 12 年中有关辐射流体的研究, 其巅峰是在大阪 ILE 进行的德日联合实验, 领导者是 R. Sigel 和 H. Nishimura. 关于热波的第 7 章、关于黑腔靶的第 9 章及关于光厚模型的第 10 章的几个小节, 其中很大一部分内容正是基于这一时期的结果. 这包括热波解 (在 MPQ, 最早由 P. Pakula 发现), K. Eidmann 和 G. Tsakiris 发展的高 Z 物质简化光厚模型, T. Löwer, K. Eidmann 和其他人所做的辐射驱动激波实验和光厚测量. R. Ramis 发展了一维和二维 MULTI 程序, 这样我们可以为重离子聚变设计黑腔靶; 我们要特别感谢 J. Honrubia, M. Murakami, A. Oparin, R. Ramis 和 Th. Schlegel 对第 9 章所作的贡献. 类似的工作也在 ENEA-Frascati 进行, 后来发表了关于间接驱动高增益靶的第一个一维模拟 (由 A. Caruso 和 V. A. Pais 完成), 还得到了辐射对称化效应的解析结果. 所有这些工作都间接地受到我们利弗莫尔同事有关工作的激励, 当然有关工作的直接交流直到 1993 年解密之后才有可能.

自 20 世纪 80 年代中期以来, 在 ENEA-Frascati, 对称性和稳定性已成为理论和模拟研究的焦点. 为此特别发展了二维程序 DUED, 有关结果对第 3、8 和 12 章极为重要. 这里 S. Atzeni 要感谢 M. L. Ciampi, A. Guerrieri, S. Graziadei 和 M. Temporal 在 DUED 和模拟研究方面的贡献. 90 年代, 欧洲开始研究重离子聚变, 它由 C. Rubbia 倡议并受到意大利 R. A. Ricci 和德国 R. Bock 的大力支持, 这推动了我们的研究. 关于流体不稳定性的第 8 章非常受益于和许多同事的讨论. 我们要特别感谢 H. Azechi, S. Bodner, S. Haan, N. A. Inogamov, A. R. Piriz, D. Shvarts, H. Takabe 和 J. G. Wouchuk. 这里的内容参考了 H. J. Kull 关于势流模型的评述文章, 还参考了 R. Betti 及其合作者关于烧蚀不稳定性的评述文章.

J. Meyer-ter-Vehn 要特别感谢来自莫斯科朗道理论物理所的 S. Anisimov, 他对本书几乎所有内容进行了深入了解并提供了十分珍贵的意见, 其中特别包括第 6 章中流体动力学和相似解的基本性质. 每年一次的德-俄研讨会 (1984~1989, 俄罗斯方面由 S. Anisimov 和 V. Fortov 组织) 使我们接触到俄罗斯的权威科学家, 并得到重要的俄罗斯文献. 我们要感谢在激波及高能量密度物理方面

和 V. Fortov 的无数次讨论. J. Meyer-ter-Vehn 还要感谢 1994 年在 GSI 的一个月, 那时他写了本书的第一部分. 他要感谢 GSI 的 I. Hofmann 在重离子 ICF 加速器方面所作的许多讨论, 还要感谢 D. Hofmann 和 GSI 等离子研究小组在第 11 章中离子束停止方面所作的大量贡献. 这也包括与来自莫斯科 ITEP 的 M. Basko 和 B. Sharkov 及来自 Sandia 实验室的 T. Mehlhorn 进行的有益讨论.

两位作者都在大阪 (日本) 的 ILE 做过客座教授, S. Atzeni 在 1993 年, J. Meyer-ter-Vehn 在 1995 年. 本书的一些章节基于当时在 ILE 的讲稿. 我们要感谢 S. Nakai 所长, 后来是 K. Mima 所长及我们在 ILE 的同事们在他们研究所创造的奋发向上的氛围. 也要特别感谢和 K. Nishihara, M. Murakami, H. Takabe 及 H. Azechi 和 Y. Kato 的讨论.

2003 年, J. Meyer-ter-Vehn 在加州大学伯克利分校期间完成了第 10 和 11 章, 在此他经常有机会接触利弗莫尔的同事, 特别是 J. Hammer, S. Hatchett, M. Herrmann, J. Lindl 和 M. Rosen 校验了本书的某些内容, 为此他要感谢 Grant Logan 的安排. 关于第 12 章, 作者要归功于最近关于聚变靶快点火的一些研讨会, 其中要特别感谢 S. Hatchett, M. Key, P. Norreys, M. Roth 和 M. Tabak. J. Meyer-ter-Vehn 要特别感谢和 A. Pukhov 收获颇丰的 6 年合作, 这些合作是有关基于粒子模拟的相对论激光等离子体相互作用. 他还要感谢 K. Witte 及 K. Eidmann, E. Fill, G. Tsakiris 在内的 MPQ 实验研究组, 以及他们的优秀学生. S. Atzeni 要感谢 M. L. Ciampi, M. Temporal 在二维开点火模拟方面贡献.

最后我们要感谢 R. Bock 和 R. Kidder 阅读了整个手稿, 感谢 S. Anisimov, F. V. Frazzoli, S. Hatchett 对某些章节所作的评论, 感谢 A. Krenz, Ke Lan, Th. Schlegel 特别是 Zh. M. Sheng 在插图方面的帮助.

写这本书是个引人入胜的工作, 但花费的时间大大超过开始时的预期. 这要感谢我们两个家庭, 特别是我们两位的妻子 Beatrice 和 Helga 的耐心、理解和支持, 有了这些我们才能完成这本书. S. Atzeni 要感谢 Helga 在 A. Garching Meyer-ter-Vehn 家中的热情招待; 两位作者还要感谢 Caterina Tomassi-Atzeni 太太 (S. Atzeni 的母亲) 在意大利阿尔卑斯山 Petrella Liri 她山里的家为我们提供了一个庇护所, 在那里我们可以一起高效率地工作.

S. Atzeni (罗马)

J. Meyer-ter-Vehn (Garching)

2003 年 7 月

致 谢

非常感谢一些作者和出版社允许我们使用相关的插图. 插图的说明可参见包含这些图的原始文献, 具体的引用情况见下面的参考文献列表.

得到美国物理协会 (AIP) 同意使用的有

Figure 3. 3: *Journal of Applied Physics*, **54**, 3662-71. 版权 1983.

Figures 4. 8, 4. 9, 5. 7, 9. 15 和 9. 19: *Physics of Plasmas*, **2**, 3933-4023. 版权 1995.

Figure 5. 8: *Physics of Plasmas*, **11**, 339-491. 版权 2004.

Figure 7. 2: *Physics of Fluids*, **28**, 2007-14. 版权 1985.

Figure 7. 13b: *Physics of Fluids*, **26**, 2011-26. 版权 1983.

Figures 7. 14 和 8. 15: *Physics of Fluids*, **B1**, 170-82. 版权 1989.

Figure 8. 18: *Physics of Plasmas*, **5**, 1446-54. 版权 1998.

Figure 8. 22 和 8. 23b: *Physics of Plasmas*, **8**, 2344-8. 版权 2001.

Figure 8. 29: *Physics of Plasmas*, **5**, 1467-76. 版权 1998.

Figure 8. 36: *Physics of Plasmas*, **3**, 2070-6. 版权 1996.

Figure 9. 3: *AIP Conference Proceedings* vol. 152, pp. 89-99. 版权 1986.

Figure 9. 4: *Applied Physics Letters*, **49**, 377-8. 版权 1986.

Figure 9. 11: *Physics of Plasmas*, **3**, 4148-55. 版权 1996.

Figure 10. 19: *AIP Conference Proceedings*, vol. 547, pp. 238-51. 版权 2000.

Figure 11. 14: *Physics of Fluids*, **17**, 474-89. 版权 1974.

Figure 11. 22a: *Journal of Applied Physics*, **52**, 6522-32. 版权 1981.

Figures 12. 1, 12. 2 和 12. 3: *Physics of Plasmas*, **6**, 3316-26. 版权 1999.

得到美国物理学会 (APS) 同意的有

Figure 8. 7: *Physical Review Letters*, **71**, 3473-6. 版权 1993.

Figure 8. 19: *Physical Review Letters*, **67**, 3259-62. 版权 1991.

Figure 8. 20: *Physical Review Letters*, **76**, 4536-9. 版权 1996.

Figure 8. 21: *Physical Review Letters*, **78**, 3318-21. 版权 1997.

Figure 8. 28: *Physical Review A*, **44**, 2756-8. 版权 1991.

Figure 9. 5: *Physical Review Letters*, **59**, 56-9. 版权 1987.

Figure 9. 12: *Physical Review*, **E52**, 6703-16. 版权 1995.

Figure 9. 13: *Physical Review Letters*, **73**, 2320-3. 版权 1994.

Figure 9. 20: *Physical Review Letters*, **72**, 3186-9. 版权 1994.

Figure 10. 14: *Physical Review*, **B61**, 9287-94. 版权 2000.

Figure 10. 28: *Physical Review*, **E62**, 1202-14. 版权 2000.

Figure 11. 3: *Physical Review Letters*, **48**, 1018-21. 版权 1982.

Figure 11. 6: *Physical Review Letters*, **42**, 1625-8. 版权 1979.

Figure 11. 8: *Physical Review Letters*, **59**, 1193-6. 版权 1987.

Figure 11. 10a: *Physical Review Letters*, **45**, 1399-403. 版权 1980.

Figure 11. 10b: *Physical Review Letters*, **53**, 1739-42. 版权 1984.

Figure 11. 16: *Physical Review Letters*, **49**, 1251-4. 版权 1982.

Figure 11. 17: *Physical Review Letters*, **69**, 3623-6. 版权 1992.

Figure 11. 21: *Physical Review Letters*, **74**, 1550-3. 版权 1995.

Figures 12. 9 和 12. 10: *Physical Review Letters*, **83**, 4772-5. 版权 1999.

Figure 12. 12: *Physical Review Letters*, **79**, 2686-9. 版权 1997.

Figure 12. 13: *Physical Review Letters*, **85**, 2128-31. 版权 2000.

得到剑桥大学出版社同意的有

Figure 8. 27: *Laser and Particle Beams*, **13**, 423-40. 版权 1995.

Figure 8. 31: *Laser and Particle Beams*, **12**, 725-50. 版权 1994.

Figures 10. 26 和 10. 27: *Laser and Particle Beams*, **12**, 223-44. 版权 1994.

得到 EDP SCIENCES 同意的有

Figure 8. 5: *Europhysics Letters*, **22**, 603-9. 版权 1993.

Figures 10. 24 和 10. 25: *Europhysics Letters*, **44**, 459-64. 版权 1998.

得到爱思维尔科学出版公司同意的有

Figure 1. 7: 核能的现状和前景: 裂变和聚变. 费米物理国际学校文集, 116 集, 449-68. 版权 North-Holland 1992.

Figure 9. 7: *Journal of X-ray Sciences and Technology*, **2**, 127-48. 版权 1990.

Figures 10. 1, 10. 2, 10. 20, 10. 21 和 10. 22: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **38**, 353-68. 版权 1987.

Figure 10. 3: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Trans-*

fer, **23**, 517-22. 版权 1980.

Figure 10.17: *Handbook of Plasma Physics*, vol. 3, pp. 63-109. 版权 1991.

Figure 10.18: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **58**, 975-89. 版权 1997.

Figure 11.12: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B197**, 22-8. 版权 2002.

得到英物理协会 (IOP) 同意的有

Figure 7.5: *Plasma Physics*, **42**, B143-B155. 版权 2000.

Figure 7.13a: *Plasma Physics*, **25**, 237-85. 版权 1983.

得到日本纯粹与应用物理协会同意的有

Figures 5.6, 5.10, 5.12 和 5.13: *Japanese Journal of Applied Physics*, **34**, 1980-1992. 版权 1995. 1983.

得到国际原子能机构 (IAEA) 同意的有

Figure 4.14: *Nuclear Fusion*, **36**, 443-51. 版权 1996.

Figures 5.2, 5.3 和 5.4: *Nuclear Fusion*, **22**, 561-5. 版权 1982.

Figure 8.3: *Plasma Physics and Controlled Fusion Research* 1994, vol. 3, pp. 3-12. 版权 1995.

Figure 9.9: *Nuclear Fusion*, **31**, 1315-31. 版权 1991.

Figure 12.5: *Nuclear Fusion*, **37**, 1665-77. 版权 1997.

得到 Interscience 出版社同意的有

Figure 7.8: R. Courant 和 K. O. Friedrichs, *Supersonic Flow and Shock Waves*. 版权 1948.

得到自然出版集团同意的有

Figure 12.14: *Nature*, **412**, 798-802. 版权 2001.

Figure 12.16: *Nature*, **418**, 933-4. 版权 2002.

得到意大利物理学会同意的有

Figure 3.17: 惯性约束聚变: 讲座和研讨会文集 *Villa Monastero, Varenna*, 意大利, 1988 年 9 月 6-16 日, 83-123. 版权 1989.

得到施普林格 (Springer) 出版社同意的有

Figure 10. 6: B. G. Englert, *Semiclassical theory atoms*. 版权 1988.

得到 Wisconsin 大学出版社同意的有

Figure 3. 19: Report UWFD-568, Wisconsin 大学聚变技术研究所. 版权 1984.

目 录

译者序

序

前言

致谢

第 1 章 核聚变反应	1
1.1 发热核反应：裂变和聚变	1
1.2 聚变反应物理	2
1.2.1 截面、反应率和反应速率	2
1.2.2 聚变截面参数表达式	3
1.2.3 非共振反应的穿透因子	5
1.3 一些重要的聚变反应	7
1.3.1 主要受控聚变燃料	9
1.3.2 改进的聚变燃料	10
1.3.3 p-p 循环	10
1.3.4 CNO 循环	10
1.3.5 CC 反应	10
1.4 麦克斯韦平均的聚变反应率	11
1.4.1 非共振反应的伽莫夫形式	12
1.4.2 共振反应率	13
1.4.3 可控聚变燃料的反应率	14
1.5 高密度物质中的聚变反应率	16
1.5.1 电子屏蔽、弱耦合等离子体	17
1.5.2 强耦合等离子体	18
1.5.3 晶状固体：超密核极限	18
1.6 反应核的自旋极化	19
1.7 μ 催化聚变	19
1.8 历史回顾	21
第 2 章 热核聚变和约束	23
2.1 热核聚变	23
2.1.1 束聚变和热核聚变	23

2.1.2 理想点火温度	24
2.2 等离子体约束	25
2.2.1 磁约束	25
2.2.2 惯性约束	26
2.3 热核点火: 磁约束聚变和核惯性约束聚变	26
2.4 磁约束聚变的劳森型和 $n\tau T$ 点火条件	27
2.4.1 功率平衡和能量约束时间	27
2.4.2 劳森型判据	27
2.4.3 $n\tau T$ 点火条件	28
2.5 惯性约束聚变点火和高增益条件	29
2.5.1 约束参数 ρR	29
2.5.2 燃烧效率	30
2.5.3 燃烧参数 H_B	31
2.6 惯性聚变能生产的总体要求	32
2.6.1 惯性聚变能反应堆的增益要求	32
2.6.2 容许的燃料质量	33
2.6.3 高燃料压缩	33
2.6.4 热斑点火和燃烧传播	33
2.7 燃料循环	34
2.7.1 DT 循环和氚增殖	34
2.7.2 氘和改进型燃料	35
第3章 球形内爆惯性约束	37
3.1 球形内爆模拟	37
3.1.1 靶和激光脉冲	38
3.1.2 内爆图	39
3.1.3 整形脉冲驱动的中空壳靶	41
3.1.4 辐照和内爆	43
3.1.5 内爆转滞和热斑产生	45
3.1.6 燃料点火和燃烧	50
3.1.7 模拟结果总结	52
3.1.8 优化靶增益	54
3.2 对称性和稳定性	55
3.2.1 长波扰动	56
3.2.2 瑞利-泰勒不稳定性	58
3.3 聚变靶能量输出	58

3.4 历史回顾	59
3.5 文献回顾	61
第4章 点火和燃烧	62
4.1 点火球的功率平衡	62
4.1.1 聚变功率沉积	63
4.1.2 聚变带电产物	63
4.1.3 中子	65
4.1.4 热传导	65
4.1.5 韧致辐射	65
4.1.6 机械功	66
4.2 预拼装燃料的中心点火	66
4.2.1 自加热条件	67
4.2.2 点火条件	68
4.2.3 自加热时间	70
4.3 热斑产生动力学	72
4.4 热斑演化和燃烧传播	74
4.4.1 早期演化和解析点火判据	75
4.4.2 自调制燃烧波	76
4.4.3 热核燃烧传播区	77
4.5 光厚燃料的体点火	77
4.6 完全燃烧模拟和燃烧效率	80
4.7 纯氦的点火	82
4.8 总结	83
第5章 能量增益	85
5.1 热斑点火模型	85
5.1.1 靶增益、燃料增益、耦合效率 η	85
5.1.2 热斑	86
5.1.3 冷燃料: 等熵参数 α	87
5.1.4 等压结构: 压力 p	88
5.2 等压模型的增益曲线	88
5.2.1 对 η 、 α 、 p 的依赖	89
5.2.2 模型增益曲线和详细计算的比较	91
5.3 极限增益曲线	92
5.3.1 给定燃料质量的增益曲线	92
5.3.2 极限增益的解析推导	93

5.3.3	燃烧给定质量燃料所需的最小能量	95
5.3.4	模型的缺点和推广	97
5.4	约束增益曲线和靶设计	98
5.4.1	烧蚀压和内爆壳层速度	99
5.4.2	点火能量随内爆速度的定标	100
5.4.3	激光功率-激光能量窗口	101
5.5	非等压结构的增益曲线	103
5.5.1	有热斑的等容拼装	103
5.5.2	光厚 DT 燃料的体点火	104
5.5.3	不同结构和燃料的比较	106
第 6 章	流体动力学	108
6.1	理想气体动力学	108
6.1.1	守恒形式的基本方程	108
6.1.2	物理限制	109
6.1.3	欧拉描述	109
6.1.4	一维拉格朗日描述	110
6.2	激波	111
6.2.1	不连续性	111
6.2.2	于戈尼奥条件 (Hugoniot condition)	112
6.2.3	理想气体中的激波	113
6.2.4	弱激波	113
6.2.5	强激波	113
6.2.6	稀疏波和激波稳定性	114
6.3	平面等熵流	115
6.3.1	等熵流	115
6.3.2	特征线和黎曼不变量	116
6.3.3	简单波	117
6.3.4	中心稀疏波	118
6.3.5	等熵压缩到任意密度	119
6.3.6	拉格朗日坐标系中的稀疏波	121
6.3.7	等温稀疏波	122
6.4	$u(r,t) \propto r$ 的径向流	123
6.4.1	均匀绝热流	124
6.4.2	Kidder 的累积内爆	125
6.4.3	转滞流	127