



装备科技译著出版基金

# 高能量密度物理

——基础、惯性约束聚变和实验天体物理学

High-Energy-Density Physics  
Fundamentals, Inertial Fusion,  
and Experimental Astrophysics

[美] R. Paul Drake 著  
孙承纬 译 赵剑衡 校



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 高能量密度物理

——基础、惯性约束聚变和实验天体物理学

**High-Energy-Density Physics**

**Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics**

[美] R. Paul Drake 著

孙承伟 译

赵剑衡 校

国防工业出版社

· 北京 ·

## 著作权合同登记 图字:军-2011-061号

### 图书在版编目(CIP)数据

高能量密度物理—基础、惯性约束聚变和实验天体

物理学 / (美) 德雷克 (Drake, R. P.) 著; 孙承纬译.

—北京: 国防工业出版社, 2013. 1

书名原文: High - Energy - Density Physics;

Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics

ISBN 978-7-118-08430-6

I. ①高... II. ①德... ②孙... III. ①物理学 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 315821 号

Translation from the English language edition:

*High - Energy - Density Physics* by R. Paul Drake.

© Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer - Verlag 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

### 高能量密度物理——基础、惯性约束聚变和实验天体物理学

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 24 $\frac{3}{4}$

字 数 560 千字

版 印 次 2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 译者前言

所谓“高能量密度系统”,是指处于高能量密度状态的连续介质或者粒子体系,也就是在高压、高温、高速碰撞或驱动、高强度辐照(激光、粒子束)、强电(磁)场诱导等极高功率加载条件下,物质单位体积内的能量或者粒子的平均动能通过沉积、聚积等途径得到急剧提高的系统。“高能量密度物理”(High Energy Density Physics)即是关于构建物质高能量密度状态的原理及技术,考察高能量密度系统响应特性、行为规律及相互作用的各个力学、物理学科的交叉研究领域。许多读者也许不熟悉这个新的学科名词,但应注意它与粒子物理学的“高能物理”极其不同。

高能量密度物理是核武器物理过程实验室模拟、强冲击动力学、超高压物态方程、实验天体物理学和激光强场物理等重要应用分支的共同学科基础,其基本框架是连续介质模型的流体动力学,包括冲击动力学、电磁流体力学、等离子体动力学和辐射流体力学等。按照学术界当前公认的定义,物质的高能量密度状态是指加载过程中其能量密度增量达到 $0.1 \text{ MJ/cm}^3$  以上时所呈现的状态,也就是物质内部的总压力不低于 100 万 atm (100 GPa) 量级的状况。这个压力量级相当于金属材料冲击压缩性明显呈现、液态气体(如液氢)达到冲击压缩极限的程度,对于上述各种重要应用具有标志性的意义。以传统的加载方式为例,速度高达  $10 \text{ km/s}$  的铝飞片撞击静止的铝靶所产生的冲击波压力只有 180 GPa 左右,说明这个定义大致对应于新老加载技术压力范围的不同界限。

虽然作为新的学科领域而言,高能量密度物理只是在近 10 多年来才受到人们的重视,但其发源可以追溯到半个多世纪以前。在核武器物理深入研究的基础上,20 世纪 60 年代苏联泽尔道维奇(Я. Б. Зельдович)和莱伊捷尔(Ю. П. Райзер)撰写了从流体力学和动理学方面阐述稠密高温等离子体中高速流动与强辐射相互作用的奠基性专著《激波和高温流体动力学现象物理学》(Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, Наука, Москва 1966),这是本书引用最多的基本参考书。1969 年 7 月,意大利物理学会在 Varenna 召开了主题为“高能量密度物理”(Physics of High Energy Density)的费米物理国际研讨会,实际上是核武器物理和激光聚变原理的专业研讨会。根据 E. Teller 的主题发言,这个新名字意味着各国相关科学家正在致力开拓的新学科领域。各位专家的报告围绕着炸药爆轰、冲击压缩、内爆动力学、高速发射等传统加载技术和新颖的爆炸磁通量压缩发生器、高功率激光与等离子体相互作用和相对论强电子束以及天体物理的相对论流体力学等问题,其中 R. E. Kidder 等关于稠密高温激光等离子体参数状态和不稳定性的分析,预言了激光烧蚀驱动(辐射)冲击波的压力可以达到 10 TPa 甚至更高的量级,属于这方面最早的一些重要理论工作。1971 年,Academic Press 正式出版了该研讨会的文集“Physics of High Energy Density”,这是译者所看到的“高能量密度物理”名词的最早来由。中国工程物理研究院流体物理研究所当时的所长方正知教授认为,这个名称恰当地表示了流体物理所

的学科性质,就用这个名字命名了该所创办的所刊。

1996年,美国利弗莫尔国家实验室 M. D. Rosen 指出,高能量密度研究的参数空间及加载手段可分为两个范围,分别对应于高压凝聚态物质处于核武器初级(原子弹)流体动力学试验(炸药爆轰驱动的内爆压缩阶段)至裂变材料点火的范围,以及高温稠密等离子体处于核武器次级(氢弹)、黑腔物理及惯性压缩聚变(ICF)研究至热核点火的范围(The science applications of the high-energy density plasmas created on the NOVA laser, Phys. Plasmas 3 (5), 1803-1812 (1996))。这是全面禁核试之后对于核武器物理实验室模拟工作在学科上的高度概括,与洛斯阿拉莫斯实验室的两类地面实验计划(分别对应于核武器初级和次级的 AGEX-I 和 AGEX-II 计划)是完全一致的。

当高功率激光、强流粒子束或脉冲大电流分别通过光学透镜、磁聚焦透镜或汇流传输线集中快速地沉积于凝聚态物质和稠密等离子体靶样品中,在力学稀疏、热扩散和磁扩散等因素来不及发挥作用之前,靶物质中形成处于高能量密度状态的沉积能量区域,达到很高的温度或压力。与此同时,介质沉积能量中的动能部分通过动力学途径压缩能量沉积的区域,驱使能量进一步聚积于大大缩小了的体积之中,从而大大提高最终得到的能量密度或压力。动力压缩往往依靠速度为数十千米每秒至数百千米每秒的辐射冲击波,并且通过介质内聚运动的内爆方式。因此,能量高密度沉积的技术基础是研发极高功率的激光、粒子加速器和脉冲强电流装置;介质的高密度压缩则依靠相应驱动条件下内爆动力学研究。这些工作和极高压力下物质力学性质的研究,构成了高能量密度物理领域中与前述核技术应用基础密切相关的“动力学”研究组成部分。

纳秒(或亚纳秒)激光脉冲对应的  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  的辐照度,意味着激光作用范围内能量沉积造成的热压力约  $0.1 \text{ TPa}$ , 然而再通过动力压缩途径,很小范围中物质压力可达到  $10 \text{ TPa}$  甚至  $10^3 \text{ TPa}$  的量级。但是在  $10^{15} \text{ W/cm}^2$  以上范围,激光与等离子体非线性相互作用激起的各种不稳定性以及功率损失日益严重,限制了这种加载方式实际上可达到的压力水平。目前我们还不知道通过什么途径可以到达更高的实验可行的物质压力范围。尽管如此,在激光加载和动力压缩可达到的  $10 \text{ TPa}$  超高压、 $10^8/\text{s}$  超高应变率范围内,物态方程和冲击动力学的研究还只是方兴未艾,而且还看不出其他技术手段将来能够达到更高的加载水平。

21 世纪初以美国圣地亚国家实验室 Z/ZR 机器为代表的脉冲功率加载技术得到迅速发展,在几个纳亨的短路负载样品上能够通过幅度几十兆安、前沿数百纳秒的大电流,斜波加载的磁压幅度达到数百吉帕,驱动的薄铝飞片终速度超过  $40 \text{ km/s}$ 。人们已经研制了一些新结构的小型化磁驱动加载装置,未来有望达到幅度太帕量级的加载能力,与激光技术比较其样品尺寸较大、应变率影响较低。

20 世纪年代以来,国际上大型激光聚变设施、超短激光技术和强电流脉冲功率技术突飞猛进,以 NOVA、Omega、NIF 激光器(以及数十兆安的 Z/ZR 强电流机器)和拍瓦( $10^{15} \text{ W}$ )激光器为标志,10 多年内固体靶表面的激光辐照度从  $10^{15-17} \text{ W/cm}^2$  提高到了  $10^{18-21} \text{ W/cm}^2$ ,即将达到  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  以上的水平。由于光子动量改变所引起的靶表面光压将远超过激光烧蚀以及动力压缩所造成的物质压力,理论上可达到  $10^2 \text{ TPa} \sim 10^5 \text{ TPa}$  的

量级,虽然这两者间并不存在可比性,极短时间的光压也许难以实际应用于物质压缩实验。

意义更为深远的是,激光光波电场幅度的平方正比于激光辐照度,例如,在  $1.38 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  下将达到原子内场强  $10^9 \text{ V/m}$  的上千倍,这种强电场中电子的振荡动能为  $511 \text{ keV}$ ,恰等于其静止质量能,即成为相对论电子。相对论的高能量密度系统呈现了一个崭新的物理世界。现在证实在尾波场、表面电场势和库仑爆炸等机制作用下,靶等离子体中的电子能够得到极高梯度的加速,已得到束散度很小、电荷数相当大的  $100 \text{ MeV}$  量级准单能电子束,还能够产生几十兆电子伏量级的高能质子束和重离子束。超短超强激光与固态靶的其他类型相互作用还可能导致极强磁场 ( $10^5 \text{ T}$ ) 的产生、正负电子对的形成、核反应的引发和元素的嬗变。这些难以想象的极端高能量密度场景,为 21 世纪物理学的发展带来了巨大的动力和罕见的机遇。这个全新学科的确切名称是“激光强场物理”,考虑到它与高功率激光(尤其是快点火技术)的自然联系,可视为高能量密度物理领域“物理”研究的重要组成部分。

遥远宇宙空间中许多天体物理系统的行为,其实是由等离子体动力学和辐射流体力学的规律所控制的,在主要物理参数适当缩比模拟的条件下可以通过实验室中高能量密度实验进行研究,尤其是天体中辐射冲击波、超高速喷流等力学行为以及引发核反应等问题。在超新星(SN)爆发、超新星遗迹(SNR)演化、利用产生正负电子对解释  $\gamma$  射线暴(GB)机制等方面已得出令人信服的结果。另外,天体物理系统的一些重要特性参数(如物态方程、发射光谱、不透明度等)也可以做模拟实验研究。21 世纪初建立的高功率激光设施和脉冲功率驱动的等离子体内爆实验,使实验天体物理从设想成为现实,发展前景令人鼓舞,显示了高能量密度物理方法应用于基础科学研究的巨大潜力。

基于高能量密度物理各个方面的发展,美国国家研究理事会的等离子体委员会于 2002 年发表了题为“高能量密度物理领域:当代科学的交叉发展策略”的报告(R. C. Davideson, *Frontiers in High - Energy - Density Physics: the X - Games of Contemporary Science*, National Academies Press, 2002),全面阐述了这个崭新领域的意义、组成和方向。我国学者于 2005 年 3 月举行了第 246 次香山科学会议,专门研讨高能量密度物理领域的发展;并从 2009 年起,开展了每年一次的全国高能量密度会议的系列学术活动。

本书是 Springer 出版社出版的国际“冲击波与高压现象”丛书之一,是目前仅有的较全面论述高能量密度物理基础和应用的专著,是美国密执安大学大气海洋和空间科学系教授 R. P. Drake 在其多年研究生教材的基础上撰写而成的。Drake 教授于 1979 年在 John Hopkins 大学取得博士学位,长期参加利弗莫尔国家实验室(LLNL)聚变研究计划,擅长激光与等离子体相互作用,1989 年—1996 年任该实验室等离子体研究所所长。其间,1989 年—1993 年任加州大学 Davis 分校教授,1996 年到密执安大学任教后专门从事实验室天体物理的研究。

本书第 1 章~第 7 章属于流体动力学和辐射流体力学基础,然而阐述角度独特,内容与一般教材不同,使从流体力学或者从等离子体物理进入高能量密度物理研究的读者都会受益匪浅。第 8 章介绍利用高功率激光设施和 Z 箍缩内爆装置得到高能量密度稠密等离子体

的原理和技术,叙述简明扼要。最后三章分别论述以高能量密度物理作为基础的三个主要研究领域或学科,即惯性约束聚变、实验室天体物理和激光强场物理(相对论高能量密度系统),想要更好掌握这些知识的读者还应进一步学习有关的专著。

上海激光等离子体研究所孙今人、方智恒、安红海、孟祥富、王轶文等为本书译稿的打印付出了辛勤劳动。中国工程物理研究院流体物理研究所陈军、姬广富大力支持,译稿全文并经该所赵剑衡、胡流森悉心校对。译者谨向他们致以衷心的感谢。本书概念新颖、内容艰深,译文疏漏和不当之处希望读者不吝赐教。

中国工程院院士  
上海激光等离子体研究所 孙承纬  
中国工程物理研究院流体物理研究所

2012年3月

# 原书序

本书有两个目标:一是为高能量密度物理入门者提供一种手段,以便从一本教材中获取宽广的基础知识;二是为这个领域的研究者提供一本有用的工作参考书。

从学术角度来说,本书至少有四种可能的用途。首先,它可以作为高能量密度物理的学习教材,支持日益增多的进入该领域的大学和实验研究单位开展工作。其次,侧重于发展超快激光技术的学校可以通过本书初步了解、使用高功率激光器,并且了解在第 11 章关于相对论系统所涉及的范围内各种激光打靶实验中出现的现象。再者,本书可以作为大学物理系、应用物理系或工程系相关课程的教材,提供用途明显的流体力学和辐射输运的简要基础。最后,对于大学的天体物理系也可用于类似目的,同时还可以使学生们了解到实验室系统与天体物理系统之间的类似性和差异。

本书有意采用较少的记号,并尽可能使得一个符号只有一种意义。所使用主要符号的定义列于附录 A。在不同场合,添加角标以区分不同情况下的同一个物理量,例如,用  $\rho_1$  和  $\rho_2$  区别两个不同区域中的质量密度。为了减少所用符号的总数,并且使它们用途专一,本书特意避免各种通常的用法。例如,避免把  $\mu$  用作黏性系数,改以乘积  $\rho\nu$  来表示黏性,这里  $\nu$  是运动黏性系数。

本书中许多练习题只能使用数学计算程序求解。虽然现在和以后还有一些可资利用的这类程序,但作者倾向于使用“Mathematica”数学计算软件,这是本书写作时采用的主要工具。作为有效工具的计算程序的出现,体现了与传统学习模式的分离,而且必将是未来科学家标准工具箱中的重要部分。数学计算程序使得问题“简单”解的意义发生巨大改变,例如,8 阶多项式方程不再是很难对付的问题。附录 B 包括书中讨论的两个问题的 Mathematica 计算编码,用以帮助读者在这方面的起步。

下面谈谈单位的使用,从广泛的意义来说,单位制是科学的公共语言。然而,普遍的情况尤其是各种高能量密度系统不便于在任何单一标准单位制的子系统内来分析。SI 制、cgs 制或者其他单位制,即使对于一定的问题用起来最为方便,也还要有一些其他的专门单位作补充,如电子伏特(eV),这些单位制的存在自有其原因。这些特殊的单位是从实际工作科学家的重要工具,可以使他们轻松地在不同单位制之间转换。现在的学术文献,大部分确实是以科学家使用的常用单位作为表达,因为它们用起来比较方便。但是在检查人们的推导过程等情形中,经常需要进行单位变换,此时不同单位制之间的比较十分重要。

本书作者坚决反对单一地使用 SI 单位制,即反对不许使用任何非 SI 制的单位,并且坚决提倡在个人的所有工作中规定他自己使用的单位体系。只要情况许可,本书中的方程组都尽量以与物理量单位无关的方式表示。如果办不到(如洛伦兹力)则指出其单位,通常采用 cgs 制单位,它们对于大多数等离子体应用问题而言最为方便。当给出具体的方程组时,通常也指明其相应的单位。这就是本书作者的做法,谨请读者指出其不确之处。最后指出,



Jackson 的专著“Classical Electrodynamics”(经典电动力学)中关于单位的附录,是对于这个论题极好的参考材料。

本书大部分篇章附有不多的参考文献目录,大多是已出版的书籍,它们对一定问题的陈述要比本书能做到的更为详尽。所引用的期刊文献,只涉及尚无相关书籍包括的内容,因此并不反映该领域中期刊文献工作的全貌。采取这种做法是基于如下一些理由:

目的之一在于提供一本多年之内依然有用的专著,而存档文献的变化很快,当前正是高能密度物理和天体物理学快速发展的年代,任何现时的文献很快就会过时。另外,目前书刊数据库的即时检索技术已经成熟,未来的读者将能够轻易地在当时的存档文献中找到最新的文献。

目的之二是以通常方式陈述专业基础知识,因为在作者看来这些内容作为教学使用最为有效。如果一本专业书籍的内容与已发表的文献联系过紧,可能会变得不连贯和缺少条理。

目的之三是展现本书内容在物理学家认识中的“简单性”。物理现象有意义的全部画面,是从一些简单的开始方程组起源并一直向前发展演变。按照物理学家费因曼(R. Feynman)的精神,人们不必经过清晰的思考就能够理解许多物理现象,虽然我们应当再加上一点,即理解一些非线性问题时,数学计算程序还是很有帮助的。本书第3章和第8章的写作与作者上述目的有较大偏离,为了避免拖得过长的讲述,只好不做很多解释而勉强读者去接受一些具体的内容。

全书用一些图形表示计算机模拟的结果,显示流体力学和辐射流体力学现象。除非另作说明以外,这些数值模拟都是用 Jon Larsen 设计的计算编码 HYADES 进行的,本书写作时该编码文本由 Cascade Sciences 公司提供。还有一些类似的工具,对于估算可能的实验结果以及鉴别人们感兴趣的具体物理系统中最重要物理机制,很有用处。

许多人对本书的编写做出了贡献,如何表达对他们的感谢颇使作者为难。对于本书致谢中遗漏的人士,请向作者指出,至少应当请您吃顿饭。还要感谢我的家庭和现在的研究组,是他们允许我利用很多时间来写这本书。Dmirtri Ryutov 是我多年来极其重要的合作者,他一直启发、指导和鼓励本书的写作,并且审阅了其中的两章。Alexander Velikovich 也审阅了两章,而且抽出时间同我多次愉快交谈,显著地拓宽了我对于一些问题的理解。Harry Robey 提出了对于流体动力学不稳定性很有价值的看法,并发现了写作中一个重要的错误。Robert Kauffman 和 David Montgomery 提供了许多特别有用的图形。Enam Chowdhury 提供渠道,慷慨地允许我使用他的一些工作结果。Michael Des Jarlais, Warren Mori, Mordecai Rosen, Mark Hermann, James Knauer, Riccardo Betti 和 Bedros Afeyan 花费时间评阅了本书,或者对一些内容做了讨论。Farhat Beg 和 William Kruer 依据本书手稿进行了教学。Ralph Schneider 给予我持久的鼓励。

密执安大学 2003 年度和 2005 年度有关讲座的学生们以及 2004 年暑期讲习班的 28 个参加者都听了这门课程,学生人数众多无法一一列举。他们帮助我找出了书中一些错误,并且提出许多改进意见。我现在的研究生 Amy Reighard, Carolyn Kuranz, Eric Harding 和 Tony Visco 在给予我持续激励的同时,还承担了书稿繁重的具体事务。Korbie Dannenberg 除了承

担一些例题工作外,还在我暂停写作离开时继续保持这个团队的工作向前推进。Jan Beltran 从行政上对暑期班和本书写作都给予了广泛的支持,对此我十分感谢。当然,本书存在的错误只是我一个人的责任。

除了上述团队之外,过去 20 多年中我还有幸与很多科学家、工程师和技术人员团体进行合作。其中,上面没有提及的关键人物有 Dave Arnett, Jim Asay, Hector Baldis, Steve Batha, Bruno Bauer, Serge Bouquet, Jim Carroll, John DeGroot, Kent Estabrook, Adam Frank, Gail Glendinning, Martin Goldman, Tudor Johnston, Jave Kane, Paul Keiter, Alexei Khokhlov, Marcus Knudson, Barbara Lasinski, Sergey Lebedev, Dick McCray, Tom Mehlhorn, Aaron Miles, Steve Obenschain, Ted Perry, Diana Schroen, Wolf Seka, Bob Turner, David Villeneuve, Russell Wallace, Bob Watt, James Weaver 和 Ed Williams, 还有许多未提及的人们。作者还要感谢来自 Springer 出版社的本书编辑 Chris Caron 博士的积极互动和鼓励。

我喜欢坐在咖啡店里工作。恰巧在本书写作早期,我喜爱的 Espresso Royale 在离我家很近的普里茅斯路上开设了一家分店。我常常坐在这家咖啡店的桌子旁写作、编校和推导公式,为此我要感谢 Sarah 小姐和该店所有工作人员的款待。

最后还要感谢两位先生,没有他们本书就不会推出。一位是 E. Michael Campbell, 正是在为使惯性约束聚变成功所需的科学研究得不到支持的困难时期,他劝说我进入这个领域;而当这种科研获得支持时他又帮助我继续前进;另一位是 Bruce A. Remington, 他指导我在天体物理研究中跨越地应用高能量密度的方法,当时这是一个全新的思想,从此以后他一直是我最宝贵的合作者。谨向他们两位致谢。

R. Paul Drake

2005 年 12 月于美国密执安州安阿伯市

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 1 章 高能量密度物理导论      | 1  |
| 1.1 若干历史注记           | 2  |
| 1.2 高能量密度物理的各种状态     | 4  |
| 1.3 惯性约束聚变简述         | 6  |
| 1.4 实验天体物理学简述        | 8  |
| 1.5 与以前有关著作的联系       | 10 |
| 1.6 变量和符号            | 12 |
| 第 2 章 流体与等离子体的描述     | 13 |
| 2.1 多方气体的欧拉方程组       | 13 |
| 2.2 麦克斯韦方程组          | 17 |
| 2.3 更加普遍和完全的单流体运动方程组 | 18 |
| 2.3.1 一般的单流体运动方程组    | 19 |
| 2.3.2 磁流体力学          | 24 |
| 2.3.3 三温单流体模型        | 25 |
| 2.3.4 计算机数值模拟方法      | 26 |
| 2.4 等离子体理论           | 28 |
| 2.4.1 传统等离子体理论的有效性状况 | 28 |
| 2.4.2 双流运动方程组        | 31 |
| 2.4.3 动理学的描述         | 35 |
| 2.5 单个粒子的运动          | 36 |
| 第 3 章 高能量密度等离子体的性质   | 39 |
| 3.1 简单物态方程           | 40 |
| 3.1.1 多方气体           | 41 |
| 3.1.2 辐射主导的等离子体      | 42 |
| 3.1.3 费米简并的物态方程      | 43 |
| 3.2 电离等离子体           | 47 |
| 3.2.1 根据萨哈方程的电离平衡    | 49 |
| 3.2.2 连续能区下降和离子球模型   | 52 |
| 3.2.3 库仑相互作用         | 55 |
| 3.3 电离等离子体的热力学       | 57 |

|              |                     |           |
|--------------|---------------------|-----------|
| 3.3.1        | 广义多方指数              | 57        |
| 3.3.2        | 压力、能量及相关结论          | 59        |
| 3.3.3        | 物态方程的概貌             | 64        |
| 3.4          | 计算使用的物态方程           | 64        |
| 3.4.1        | 托马斯 – 费米模型和 QEOS    | 64        |
| 3.4.2        | 表格式物态方程             | 66        |
| 3.5          | 实验室和天体物理学使用的物态方程    | 68        |
| 3.5.1        | 物态方程的天体物理学背景        | 69        |
| 3.5.2        | 实验室物态方程及其在天体物理学中的应用 | 70        |
| 3.6          | 测量物态方程的实验           | 71        |
| 3.6.1        | 平面飞片直接撞击            | 71        |
| 3.6.2        | 阻抗匹配                | 72        |
| 3.6.3        | 其他方法                | 74        |
| <b>第 4 章</b> | <b>冲击与稀疏</b>        | <b>76</b> |
| 4.1          | 冲击波                 | 76        |
| 4.1.1        | 冲击间断跳跃条件            | 77        |
| 4.1.2        | 冲击绝热线和物态方程          | 79        |
| 4.1.3        | 一些有用的冲击波关系式         | 79        |
| 4.1.4        | 经过冲击波后熵的变化          | 84        |
| 4.1.5        | 斜冲击波                | 85        |
| 4.1.6        | 冲击波与界面的相互作用和平面飞片撞击  | 88        |
| 4.2          | 稀疏波                 | 93        |
| 4.2.1        | 平面一维等温稀疏过程和自相似分析    | 93        |
| 4.2.2        | 黎曼不变量               | 95        |
| 4.2.3        | 平面一维绝热稀疏过程          | 98        |
| 4.3          | 爆炸波                 | 101       |
| 4.3.1        | 爆炸波中的能量守恒           | 102       |
| 4.3.2        | 自相似运动的一般讨论          | 104       |
| 4.3.3        | 谢多夫 – 泰勒球面爆炸波       | 107       |
| 4.4          | 流体动力学界面现象           | 109       |
| 4.4.1        | 冲击波在界面处的行为及其影响      | 109       |
| 4.4.2        | 追赶冲击波               | 112       |
| 4.4.3        | 稀疏过程中产生的二次冲击波       | 112       |
| 4.4.4        | 爆炸波在界面处的行为          | 114       |
| 4.4.5        | 稀疏波在界面处的行为          | 115       |
| 4.4.6        | 斜冲击波在界面处的行为         | 119       |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 流体动力学不稳定性</b>              | 124 |
| 5.1 瑞利 – 泰勒不稳定性简述                   | 125 |
| 5.1.1 浮力的驱动作用                       | 125 |
| 5.1.2 流体动力学描述的基础                    | 128 |
| 5.2 瑞利 – 泰勒不稳定性线性理论的应用              | 132 |
| 5.2.1 两个均匀流体之间界面的瑞利 – 泰勒不稳定性        | 133 |
| 5.2.2 黏性对瑞利 – 泰勒不稳定性的影响             | 134 |
| 5.2.3 具有密度梯度系统的瑞利 – 泰勒不稳定性 and 全局模式 | 137 |
| 5.3 对流不稳定性或熵模式                      | 140 |
| 5.4 瑞利 – 泰勒不稳定性非线性阶段的浮力 – 阻力模型      | 142 |
| 5.5 模式耦合                            | 144 |
| 5.6 开尔文 – 亥姆霍兹不稳定性                  | 149 |
| 5.6.1 开尔文 – 亥姆霍兹不稳定性的基本方程组          | 149 |
| 5.6.2 具有陡峭变化边界的均匀流体系统               | 152 |
| 5.6.3 具有扩展的速度剪切层、其余区域均匀的流体系统        | 154 |
| 5.6.4 存在过渡区的均匀流体系统                  | 155 |
| 5.7 冲击波稳定性和里希特迈耶 – 缅希柯夫不稳定性         | 157 |
| 5.7.1 冲击波稳定性                        | 157 |
| 5.7.2 冲击波与波纹形界面的相互作用                | 160 |
| 5.7.3 冲击波经过后界面的演化——里希特迈耶 – 缅希柯夫不稳定性 | 161 |
| 5.8 流体动力学湍流                         | 164 |
| <b>第 6 章 辐射运输</b>                   | 173 |
| 6.1 基本概念                            | 174 |
| 6.1.1 辐射的性质与描述                      | 174 |
| 6.1.2 热辐射                           | 178 |
| 6.1.3 辐射与物质相互作用的类型                  | 178 |
| 6.1.4 辐射与物质净相互作用的描述                 | 180 |
| 6.2 辐射运输                            | 181 |
| 6.2.1 辐射运输方程                        | 181 |
| 6.2.2 辐射运输计算                        | 183 |
| 6.2.3 天体物理学和实验室研究中使用的不透明度           | 186 |
| 6.2.4 平衡扩散极限下的辐射运输                  | 189 |
| 6.2.5 非平衡扩散和双温模型                    | 190 |
| 6.3 相对论辐射运输的考察                      | 191 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第7章 辐射流体力学</b>          | 195 |
| 7.1 辐射流体力学方程组              | 197 |
| 7.1.1 基本方程组                | 197 |
| 7.1.2 热力学关系                | 198 |
| 7.2 辐射和涨落                  | 200 |
| 7.2.1 辐射声波,光学厚情形           | 200 |
| 7.2.2 输运较为重要情形中冷却的作用       | 203 |
| 7.2.3 光学薄的声波               | 206 |
| 7.2.4 辐射热不稳定性              | 208 |
| 7.3 辐射扩散和马夏克波              | 209 |
| 7.3.1 马夏克波                 | 210 |
| 7.3.2 电离辐射波                | 212 |
| 7.3.3 常能量的辐射扩散波            | 213 |
| 7.4 辐射冲击波                  | 216 |
| 7.4.1 辐射冲击波的各种状况           | 216 |
| 7.4.2 辐射冲击波的流体动力学          | 220 |
| 7.4.3 辐射前驱波的模型             | 226 |
| 7.4.4 光学薄介质中的辐射冲击波         | 231 |
| 7.4.5 下游光学厚、上游光学薄介质中的辐射冲击波 | 234 |
| 7.4.6 光学厚介质中辐射冲击波的流体动力学    | 237 |
| 7.4.7 光学厚介质中的辐射冲击波,通量主导状况  | 238 |
| 7.4.8 光学厚介质中的辐射冲击波,辐射主导状况  | 239 |
| 7.4.9 冲击波中电子与离子的耦合         | 241 |
| 7.5 电离阵面                   | 242 |
| <b>第8章 创建物质的高能量密度状况</b>    | 245 |
| 8.1 激光束直接辐照                | 245 |
| 8.1.1 激光技术                 | 246 |
| 8.1.2 激光束聚焦                | 247 |
| 8.1.3 电磁波的传播与吸收            | 249 |
| 8.1.4 激光散射和激光-等离子体不稳定性     | 254 |
| 8.1.5 电子热输运                | 259 |
| 8.1.6 烧蚀压力                 | 264 |
| 8.2 黑腔                     | 268 |
| 8.2.1 激光束转换为X射线            | 269 |
| 8.2.2 离子束产生X射线             | 272 |
| 8.2.3 X射线引起的烧蚀             | 272 |

|               |                                     |            |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 8.2.4         | 与黑腔有关的其他问题 .....                    | 275        |
| 8.3           | Z 箍缩与相关的实验方法 .....                  | 277        |
| 8.3.1         | 应用于高能量密度物理研究的 Z 箍缩技术 .....          | 277        |
| 8.3.2         | 动力黑腔 .....                          | 283        |
| 8.3.3         | 磁驱动高速平面飞片 .....                     | 285        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>惯性约束聚变 .....</b>                 | <b>287</b> |
| 9.1           | 发生聚变的燃料终态条件 .....                   | 288        |
| 9.1.1         | 聚变反应所需燃料及其终态状况 .....                | 288        |
| 9.1.2         | 能量增益:是否值得去做 .....                   | 290        |
| 9.1.3         | 压缩状态下氘氚燃料的性质 .....                  | 291        |
| 9.2           | 燃料终态的形成和聚变点火 .....                  | 295        |
| 9.2.1         | 高度压缩状态的实现 .....                     | 295        |
| 9.2.2         | 聚变燃料点火 .....                        | 298        |
| 9.2.3         | 中心热点点火 .....                        | 301        |
| 9.2.4         | 快点火 .....                           | 302        |
| 9.3           | 困境和问题 .....                         | 304        |
| 9.3.1         | 瑞利 - 泰勒不稳定性 .....                   | 304        |
| 9.3.2         | 对称性 .....                           | 306        |
| 9.3.3         | 激光 - 等离子体不稳定性 .....                 | 307        |
| <b>第 10 章</b> | <b>实验天体物理学 .....</b>                | <b>310</b> |
| 10.1          | 流体动力学系统的标度关系 .....                  | 311        |
| 10.2          | 一个透彻的例子: II 型超新星中的流体动力学界面不稳定性 ..... | 314        |
| 10.2.1        | 关于 II 型超新星的天体物理学基本知识 .....          | 314        |
| 10.2.2        | 超新星中界面不稳定性的标度参数问题 .....             | 316        |
| 10.2.3        | II 型超新星中界面不稳定性的模拟实验 .....           | 319        |
| 10.3          | 另一个例子: 星际云团破碎中的相互作用 .....           | 321        |
| 10.4          | 辐射流体力学系统的标度关系 .....                 | 322        |
| 10.5          | 辐射天体物理喷流: 研究背景和标度关系 .....           | 324        |
| 10.5.1        | 天体物理喷流的基本知识 .....                   | 324        |
| 10.5.2        | 从辐射天体物理喷流至实验室系统的标度关系 .....          | 325        |
| 10.5.3        | 辐射喷流的实验 .....                       | 236        |
| <b>第 11 章</b> | <b>相对论高能量密度系统 .....</b>             | <b>329</b> |
| 11.1          | 超快激光器的发展 .....                      | 330        |
| 11.2          | 强电磁场中单电子的运动 .....                   | 331        |

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 11.3   | 激光与等离子体相对论相互作用的引发    | 338 |
| 11.4   | 吸收机制                 | 340 |
| 11.5   | 谐波的产生                | 342 |
| 11.6   | 相对论自聚焦和诱导透明性         | 344 |
| 11.7   | 粒子的加速                | 344 |
| 11.7.1 | 等离子体内的加速             | 345 |
| 11.7.2 | 利用固体靶表面的电场势进行加速      | 347 |
| 11.7.3 | 利用库仑爆炸进行加速           | 349 |
| 11.8   | 钻孔现象和无碰撞冲击波          | 351 |
| 11.9   | 其他现象                 | 354 |
| 附录 A   | 物理常数,缩写词,变量符号        | 357 |
| 附录 B   | 简单的 Mathematica 计算编码 | 364 |
| 参考文献   |                      | 371 |



# 第 1 章 高能量密度物理导论

本书关注具有高能量密度系统的物理学。“高能量密度系统”一词,是指压力在  $10^6 \text{ atm}$  以上的系统。这样的压力单位可以写为  $1 \text{ Mbar}$ , 或者  $10^{11} \text{ Pa}$ 、 $10^{11} \text{ J/m}^3$ 、 $10^{12} \text{ dyn/cm}^2$  和  $10^{12} \text{ erg/cm}^3$ 。我们倾向于用  $\text{Mbar}$ (即  $100 \text{ GPa}$ ) 为单位表示压力,因为在相关文献中使用这种单位最为普遍。高能量密度系统的这种表征,是在美国国家科学院(NRC)的一份题为“高能量密度物理领域:当代科学的交叉发展策略”(Frontiers in High - Energy - Density Physics: the X - games of Contemporary Science)中提出来的。这个报告反映了若干实验观察事实,例如,我们在学校学习到固体和流体是“不可压缩”的,但严格说来这并不正确,如果把  $100 \text{ GPa}$  的压力作用于通常的固态物体,该物体就会受到压缩。高能量密度这种表征的另一种说法是,一个氢分子的内能密度大约相当于  $100 \text{ GPa}$ 。

对这种表征再深入思考一下,就可以认识到把粒子集合在一起的能量(无论其形式是作用压力或者键能),一旦达到分子和原子之间内能的量级,它们的性态将更像离子和电子,而不太像中性粒子。金属具有传导电子的事实,实际上可看作这类现象的起始。更高压力下(或者更低密度下,此时  $100 \text{ GPa}$  的压力对应于更高的温度),物质必将成为电离介质。电离介质也是一种等离子体,然而传统的等离子体理论只适用于电离气体。在本书第 2 章中将看到,这种高能量密度物理状态几乎不能用传统的等离子体理论来描述。因此,高能量密度系统的另一种表征是:非常稠密以至于传统等离子体理论无法描述的等离子体,第 3 章中将探讨这种表征的涵义。第 8 章中讨论如何产生这种高能量密度稠密等离子体的途径。读者可能想早些了解这些途径,然而为了介绍第 8 章中更深入的可以理解的内容,第 3 章至第 7 章中所研讨的概念确实至关重要。

第 8 章讨论如何创建高能量密度状态条件,例如,可以向通常物体中传入冲击波,使之成为高能量密度物体,这样的冲击波速度应在  $10 \text{ km/s}$  以上。同样压力下,物体密度降低、冲击波速度增高,以至于高能量密度物理研究中常见到  $100 \text{ km/s}$  ( $36 \text{ 万 km/h}$ ) 以上速度的冲击波。作为其他的途径,可以发出很强的光子束、电子束或离子束,贯穿物体直接对其加热。

高能量密度物理的研究范围并不限于上面所述的稠密等离子体状态,还包括很低密度物体中由于很高温度造成的压力超过  $100 \text{ GPa}$  的状态。例如,通常大气密度约为  $1 \text{ mg/cm}^3$ , 在  $10 \text{ keV}$  以上温度下,这样密度空气中的压力达到  $100 \text{ GPa}$  左右。本书采用电子伏特的能量单位表示温度,波耳兹曼常数即是  $1.6 \times 10^{-12} \text{ erg/eV}$ , 或者  $1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$ 。  $10 \text{ keV}$  的温度大约为  $10^8 \text{ K}$ ,所以在高能量密度物理研究中数百万摄氏度甚至更高的温度是很平常的。当物体的密度进一步降低,其压力超过  $100 \text{ GPa}$  的状态将是相对论性的,也已处在传统等离子体理论考虑范围之外。总之,高能量密度系统与传统等离子体以及凝聚态物质系统共同的地方,即集体效应是它们行为的主要方面。高能量密度物理与传统等离子体物理的差别,