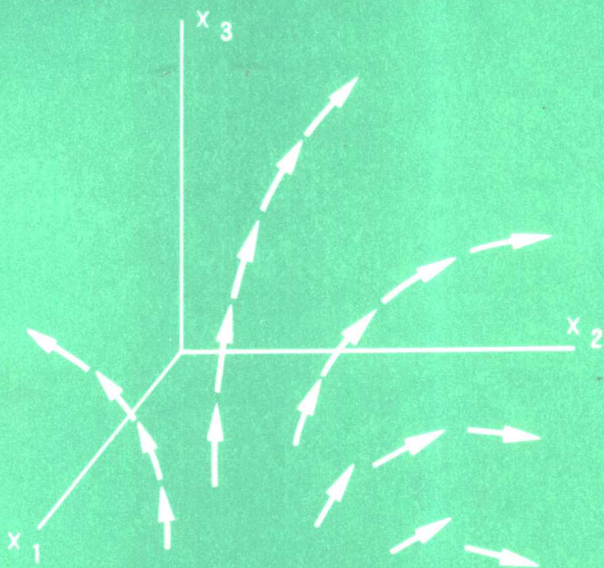


等离子体中的输运过程

(第一卷)

经典输运理论



Balescu 著 徐锡申 陈雅深 陆全康 译

等离子体中的输运过程

第 一 卷

经 典 输 运 理 论

R. Balescu 著

徐锡申 陈雅深 陆全康 等译

首都师范大学出版社

(京)新 208 号

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子体中的输运过程 第一卷: 经典输运理论/ (比利时)巴列斯库 (Balescu) 著; 徐锡申等译. —北京: 首都师范大学出版社, 1995. 2

书名原文: TRANSPORT PROCESSES IN PLASMAS
VOL. 1 CLASSICAL TRANSPORT

ISBN 7-81039-196-8

I. 等… II. ①巴…②徐… III. ①等离子体动力学-输运理论②输运理论-等离子体动力学 IV. 053

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 00454 号

首都师范大学出版社

(北京西三环北路 105 号 邮政编码 100037)

北京市燕山联营印刷厂印刷 全国新华书店经销

1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月第 1 次印刷

开本 850×1168 1/32 印张 11.625

字数 300 千 印数 400 册

定价 13.00 元

作者为中译本写的序言

等离子体中的输运理论，在理解和预言受控热核聚变作为能源的现实性方面是关键因素。未来的聚变堆，无论什么类型，不管它是以磁约束或是以惯性约束为基础，总是在有限区域内有巨大能量突然释放出来。支配这些能量在空间和时间上重新分布的定律将告诉我们是否有可能限制不可避免的漏泄和回收最大数量的能量供高效率利用。

等离子体输运过程对于理解卫星观测得到的地球（或其他行星）磁层内的现象，在太阳表面或日冕中看到的壮观事件，或者宇宙中的大尺度电磁结构等方面也是很重要的。

同样愈益清楚地显示，输运理论是迷人的、但又是很复杂的多学科领域，现仍处于异常活跃发展的时期。现在这部专著中所论述的问题，目前已经达到这样一个阶段，可用统一和优雅的方式予以描述和讨论。然而，为了完全覆盖这个问题，还需要许多进一步的扩展。

等离子体物理和核聚变研究在中国已经发展了许多年。好几个中国实验室很活跃地参与世界性研究计划。我们自己的 Brussels 大学统计等离子体物理组曾经有过与这个领域的中国物理学家合作的长期记录，这个合作仍在继续进行着。

本书中译本的出版是我们两国科学家之间这个友好合作的又一个标志。我们希望这个合作关系将来会愈益紧密地发展下去。

R. Balescu 教授



中 译 本 序

我们愉快地向国内读者推荐 R. Balescu 教授的这部专著《等离子体中的输运过程》(*Transport processes in plasmas*, Vols. 1, 2; North-Holland, Amsterdam, 1988) 的中译本。

R. Balescu 博士是国际著名的理论物理学家, 欧洲科学院、比利时科学院和罗马尼亚科学院院士, 欧洲原子能联营比利时可控聚变联合会共同主席, 现任比利时 Brussels 自由大学教授及统计等离子体物理和非线性光学研究所所长。

他的主要研究领域是非平衡态统计物理。他是著名的 Brussels 学派的主要成员之一。他对以等离子体为背景的多自由度系统的统计理论, 包括等离子体湍流理论做出过很多重要贡献, 其中 Balescu-Lenard 方程已成为等离子体物理的经典工作。他的研究工作十分严谨, 尤其擅长于复杂物理问题的数学形式描述。他的论著甚丰, 除这部书以外还有《*Statistical mechanics of charged particles*》, 《*Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics*》, 这些书都对国际统计物理学界有重要影响, 为我国众多物理学家所熟悉。

《等离子体中的输运过程》这部专著, 在理论物理框架内对等离子体输运理论给出综合和统一描述。全书分三卷, 分别论述(平直场中的)经典输运, (弯曲场中的)新经典输运和(计及集体输运机理的)反常输运, 是目前对这个丰富多采的重要领域进行全面系统论述的唯一专著。全书论述详尽细致, 独立完备, 容易阅读。最后结果都以简明解析公式以及大量图表给出, 形象具体有实用价值。

R. Balescu 教授曾经访问过我国, 对我国十分友好, 并为我国培养过留学生和接待了不少访问学者去他那里工作。R. Balescu 教

授极力支持本书中译本的出版。他不仅热情为中译本作序，而且慷慨提供了原版书及已发现的部分“勘误”。这里我们也感谢 Elsevier 科学出版社 (Elsevier Science Publishers B. V.) 免费准予我们出版中译本。现在这部专著已由徐锡申、陆全康、陈雅深等译成中文，还有张维岩、刘文瑜、李敏、徐春华、黄京民等也参加过本书翻译工作。正如 R. Balescu 教授在为中译本写的序言中所提到的：本书中译本的出版是我们两国科学家之间这个友好合作的又一个标志。我们希望这个合作关系将来会愈益紧密地发展下去。

北京应用物理与计算数学研究所

· 贺贤土 徐锡申

1993 年 7 月

绪 言

经受温度、压强和速度梯度并结合外界电场和磁场作用的等离子体，其中的物质、动量和能量输运问题，无疑是等离子体物理中最关键方面之一。可以简括地说，**输运理论的对象是系统（这里指等离子体）对持续外界约束的响应**。让我们使这个陈述更明确些。

考虑处于某类定态的物质系统。（这定态也许是真正热力学平衡态，也许是某种更普遍类型的准定态，这类实例以后会见到。）在某个时刻，施加一个“**热力学力**”，它扰动了初始平衡。这个力也许是一个外力场，也许是密度、速度或温度的空间不均匀性（例如，一个梯度）。系统**响应于**这种激励：各种类型运动开始了。可能有系统的总体物质运动，也可能有并不一定伴随着物质整体运动的更难以觉察的动量、能量或电荷的流动。

当除去驱动力时，系统的一般趋势是要通过反作用来恢复其初始定态，**如果后者是稳定的**。然而，如果维持住外力，可能发生各种各样的情况：于是系统在**外界约束条件下**发展演化，对抗其返回平衡的趋向。

如果外力维持在定态水平而且不是太强，过一定时间后，系统**可能会**（或者也可能不会！）达到一个新的**非平衡定态**，其中系统的态变量（例如密度和温度）随时间保持定值，但在其中存在有物质、动量、能量和（或）电荷的不为零的**恒定流**。然而，如果约束太强，或者如果约束随时间变化，系统的响应将会更加复杂得多。

总之，施加热力学力的结果将会是整个系统中物质、动量、能量和电荷的重新分布，因而出现不同强烈程度的这些量的相应流。我们进入了**非平衡物理**的领域，当代正在全面发展的一个领域。

输运理论对等离子体物理的重要性是巨大的。这可用下列几个实例予以简要说明。

受控热核聚变问题是建立在下列可能性的基础之上的：等离体能约束在磁场位形内部足够长时间，使核聚变反应能启动以及使反应所产生的能量能聚集。但是这种“磁瓶”决不会是密封的：有不可避免的“漏泄”对约束可能是致命的。这些漏泄的控制意味着，在复杂环状几何位形强约束磁场情况下，对物质和能量从产生或沉积区域（例如等离子体芯区）向器壁运输的机理的完备知识和熟练掌握。

天体物理和地球物理是等离子体物理的另一重要应用领域，因为宇宙中 90% 以上的物质是处于等离子体态。这里在理解种种复杂现象方面，运输问题又是决定性的。仅引述几个实例。太阳现象（耀斑、日珥、黑子、……）的问题，在耗散因而而运输十分重要的情况下，需要磁流力学的深入研究。磁重连通的迷人过程对理解发生在围绕地球以及其他行星的磁层中的现象（例如磁暴）是基本的，这些现象各有其特定性质。重连通理论中的一个基本问题是产生所必需耗散的“反常运输”的机理。后者在没有充分频繁粒子间碰撞的情况下，必然来自微妙的集体电磁现象，包括等离子体不稳定性和湍动过程。

最后，简单提及等离子体物理对气体放电、电弧放电、……这类更加日常现象的应用，其中导电性和导热性问题又是基本的。

除来自应用的这些动机之外，还可强调理论物理学家在**非平衡统计物理、动理学理论和非平衡热力学**的普遍框架内对运输理论的兴趣。这个问题自从气体动理论的奠基者：Maxwell、Boltzmann、Chapman、Enskog、Cowling 等人的时代以来就已经具有巨大的历史重要性。自从等离子体物理的比较新近的发展以来，运输理论中出现了一个完全新的维数。与中性气体不同，等离子体由通过长程力相互作用着的带电粒子所组成：这本身引进多种多样新现象（尤其是粒子的集体行为）。而且，因为具有电荷，这些粒子会受到外界磁场和电场的影响。这个特征在系统和实验者之间开辟了一个新的相互作用层次。实验者不仅可以通过强加温度和压

强梯度，而且可以通过施加具有任何复杂和微妙形状以及时间依赖关系的电磁场，来控制输运过程。转过来，系统又可能对这些外场起反作用，通常难以简单直觉地进行预测：它也许发展出独特的漂移运动，也许发展成可能导致破坏磁场初始拓扑的不稳定性，而在最后阶段，运动（以及内电磁场）可能变成完全混沌的和湍动的。所有这些特征强烈地影响输运机理。结果，等离体的输运理论，与中性气体的经典输运理论比较起来，是无与伦比地丰富多采的领域。

在我的整个科学生涯中，一直迷恋于等离体的统计物理。多年研究着与“动理学阶段”有关的问题，即，从经典力学和量子力学的可逆方程推导出不可逆的动理方程。我想要通过转向“流体力学阶段”而完成统计物理的程序，其中微观的分子信息被转换成宏观水平的可观察量。相当费解的是，这个阶段近年来有些被统计物理学家所忽略了。这是十分令人遗憾的，因为，尤其在等离体物理领域，“流体力学阶段”导致具有其全部迷人方面的等离体输运理论。

许多年来使我感到惊奇的是缺乏论述这个主题的专著。目前，想要进入这个领域的一个物理学家不得不从五篇“经典”评论文章来开始他的研究工作。这五篇文章是：

—S. I. Braginskii, 1965, in: *Reviews of Plasma Physics*, Vol. 1, ed. M. A. Leontovich (Consultants Bureau, New York) [经典理论].

—A. A. Galeev and R. Z. Sagdeev, 1979, *Reviews of Plasma Physics*, Vol. 7.

—F. L. Hinton and R. D. Hazeltine, 1976, *Reviews of Modern Physics*.

—S. P. Hirshman and D. J. Sigmar, 1981, *Nuclear Fusion* [后三篇文献涉及新经典理论].

—P. C. Liewer, 1985, *Nuclear Fusion* [反常输运].

然后他必须查阅专门研究文章，散见于大量杂志、会议录或实验室报告。他将会遇到困难，事实是由于这些文章（包括评论文章！）并不试图在等离子体输运的普遍框架内来介绍一个综合表述，而是从一个特定观点介绍一个特定章节。

现有论述等离子体物理的课本或专著通常仅包含很短的一章用来专门讨论等离子体输运：它是以很基础的和不严密的方式予以介绍的。

因此我决定试图来填补这个空隙，并从1981年初开始这项工作。我立刻开始理解到文献中存在这个空隙的理由。我认识到，如果按我所选定的精神来处理这个主题，绝对不可能在单卷本中包括全部内容，即使排除不太基本的方面之后也是如此。

另一方面，我认识到这个内容应该分成两大部分，它们被设想为独立完备的实体。第一部分将包括所谓**经典和新经典输运理论**，而第二部分是**反常输运理论**。在第一部分中，我们研究由**独立粒子**性质所解释的输运机理，这些独立粒子是粒子间相互作用以及粒子与外界电磁场作用的主角。在第二部分中，我们将讨论上面提及的**集体输运机理**。在第一部分著作结束时，看来这也会导致一本过厚的书，它应用起来会很不方便：因而决定将它再分成两卷。然而，为了强调著作的内在统一性，各章的编序仍保持连续。因此，第一卷致力于**经典输运理论**，包含第一章至第七章；而第二卷致力于**新经典输运理论**，包含第八章至第十九章。关于第三卷著作，致力于反常输运，目前尚处于准备阶段，将在几年后才能出版。

现在我想说明一下这部著作的总精神。我的目的是要写一部独立完备的书，读者学习时每一进程都可以无需求助于附属参考文献。因此我选定将等离子体输运理论作为牢固嵌入理论物理框架内的一门学科而加以介绍。就后一陈述来说，我不仅狭义地指“等离子体物理”，而是更广义地指：Hamilton力学，统计物理，热力学，流体力学，电动力学。等离子体输运理论精确地实现了所有

这些领域的综合：它可以表征为真正的**跨学科活动**。这点解释了在好几章中出现这些“边缘”领域的重要概念的事实，那里简要然而完整地引进了这些重要概念。

在对材料作出不可避免的选择时，我决定集中于比较简单的情况。因而整部书中采用的等离子体模型是由电子和单一种类离子组成的简单完全电离等离子体。在这个框架内，论述是尽可能详尽无遗的：为了使学习起来尽可能容易些，非常详细地给出了计算（比发表的文章要详细得多），对所采用的假设进行了讨论，而对论证中的每一关键步骤则从物理方面和数学方面进行了注释。

我发展了一种理论体系，它允许在全书中以统一的方式，应用相同的工具、概念、方法和记号来描述经典输运和新经典输运的一切特色。这个理论体系的基本工具是求解动理方程的 Hermite 矩法（第四、十一、十二章）。虽然从 GRAD 的经典工作受到启发，它已远超出其起初的表述形式，使之适用于这里所考虑问题的整个范围。

最后结果以完全显示的和简单的**解析公式**的形式给出（一个新特色！）。这些公式使我们能用袖珍计算器以极佳精确度来计算输运系数的数值。书中呈现有大量表格和图，这个特色是输运文献中通常缺少的。我的意见认为，现象具有图表形象，非常有助于问题的全面直观认识。并且，许多图表容许我们简单迅速地读出输运系数的数值。

象这样一本专著意味着大量文献的大量编辑。然而，我想要强调指出，本书的表述绝不停留在编辑的原始阶段，甚至也不是批判性评论文章。我尽力重新考虑所有已知结果，并在统一理论框架内重新予以表述。书中每个单独计算都是多次地算过和重新算过。结果，本书正文在完成目前形式的最后文本之前经历过好几个递次版本。

本书的数学水平是相当简单的。这里所讨论的大部分问题仅要求线性代数和微分方程基础。这将使本书成为实验物理学家以

及优良成绩的大学本科生等广大读者都看得懂的书。这里出现的唯一较不寻常的数学工具是与环状几何位形有关的部分：所有必要的概念都在正文或附录中予以详细讨论了。

必须先具备的知识仅仅是统计物理、动理学理论、电磁学等的基本原理，以及等离子体物理的感情，如从任何一个物理学家或工程师可以预期的。

总之，我写本书的主要目的是对等离子体中输运理论的综合和统一描述。这种努力达到的结果的成功程度，将由读者作出判断。

内 容 简 介

本书著者 R. Balescu 是国际著名的比利时物理学家, 对等离子体的统计物理研究方面有杰出贡献。这部专著在理论物理框架内对等离子体输运理论给出综合和统一描述。全书分三卷, 分别论述(平直场中的)经典输运, (弯曲场中的)新经典输运和(计及集体输运机理的)反常输运, 是目前对这个丰富多采的重要领域进行全面系统论述的唯一专著。全书论述详尽细致, 独立完备, 容易阅读。最后结果都以简明解析公式以及大量图表给出, 形象具体有实用价值。

第一卷共七章, 包括: 电磁场中带电粒子的运动, 等离子体的微观描述和宏观描述, Hermite 矩表示, 经典输运理论, 熵和输运, 以及磁流力学。

可供从事等离子体物理与受控核聚变问题, 天体物理和地球物理等领域研究的理论工作者, 实验工作者, 以及研究生和大学生等参考。

第一卷 目 录

作者为中译本写的序言	iii
中译本序	iv
绪 言	vi
导 言	1
第一章 电磁场中带电粒子的运动	4
1.1 引 言	4
1.2 Hamilton 力学. 正则变换和赝正则变换	6
1.3 磁场和磁场线. 内禀局域参考系	15
1.4 不均匀定态电磁场中带电粒子的运动方程. 粒子变量	22
1.5 简单电磁场中带电粒子的运动	29
1.6 漂移近似: 平均法	38
1.7 漂移近似: 求平均赝正则变换. I. 定态均匀场	48
1.8 漂移近似: 求平均赝正则变换. II. 定态空间不 均匀场	57
1.9 漂移近似: 求平均赝正则变换. III. 随时间慢变 不均匀场	68
参考文献	75
第二章 等离子体的微观描述	78
2.1 等离子体的统计描述	78
2.2 定态外场中独立粒子系统的 Liouville 方程	82
2.3 随时间变化外场中独立粒子系统的 Liouville 方程	90
2.4 相互作用带电粒子系统的 BBGKY 级列方程和 动理方程	96

2.5	Vlasov 动理方程	102
2.6	Landau 动理方程	106
2.7	碰撞项的守恒性质	112
2.8	“Lorentz 过程”	115
附录 2A.1	碰撞项的推导	120
	参考文献	126
第三章	等离体的宏观描述	129
3.1	局域分布函数	129
3.2	等离体的宏观量	132
3.3	回到动理方程	140
3.4	宏观量的演化方程	143
3.5	熵平衡	151
	参考文献	157
第四章	Hermite 矩表示	159
4.1	特征时间尺度, 准中性近似	159
4.2	局域等离体平衡态	163
4.3	Hermite 矩展开	166
4.4	矩的分类	172
4.5	矩的演化方程. I. 一般形式	176
4.6	矩的演化方程. II. 广义摩擦	184
附录 4A.1	矩方程的推导	196
附录 4A.2	表 6.1 结果的证明	198
附录 4A.3	对矩方程的碰撞贡献	199
	参考文献	201
第五章	经典输运理论	202
5.1	线性输运区	202
5.2	线性化矩方程的解, 渐近线和 Markov 化. 矩描述和热力学	208
5.3	经典输运系数	218

5.4	输运系数的数值, 近似方案的收敛性	227
5.5	输运方程的讨论	233
5.6	非常强磁场中输运系数的极限值	248
5.7	与其他处理方法的比较	254
	参考文献	267
第六章	熵和输运	270
6.1	熵平衡和 H 定理	270
6.2	熵和 Hermite 矩, 熵产生的动理学形式	274
6.3	熵产生的热力学形式	278
6.4	熵产生的输运形式	280
	参考文献	284
第七章	磁流体力学	286
7.1	经典流体力学方程, 耗散磁流体力学	286
7.2	电阻性磁流体力学	289
7.3	理想磁流体力学	295
7.4	磁流体力学, 天体物理和聚变, 聚变理论的策略	302
	参考文献	306
总附录一	速度空间中的基函数	309
G1.1	围绕参考分布函数的展开	309
G1.2	可约张量 Hermite 多项式	310
G1.3	球谐函数, Laguerre-Sonine 多项式, Burnett 函数	313
G1.4	不可约张量 Hermite 多项式	317
	参考文献	323
主题索引		xix
记号索引		xxxviii

导 言

这部著作的第一卷专门论述等离子体中的**经典输运理论**。文献中对这个术语所规定的（或者所蕴含的）意义有点不精确，很大程度上是约定的。在本著作中，我们对这个题目选择一个狭义操作型定义。

经典理论适用于下述等离子体中的输运现象；这种等离子体被认为是**在有平直、均匀和定态的磁场与电场存在情况下，通过二体碰撞互相作用着的带电粒子的集体**。

对于稠密等离子体，在这个理论框架中也能考虑到三体或四体碰撞。但是，这些效应与真正集体相互作用（通过“波”，“涡旋”，“凝团”，等等）相联系，后者由于长程 Coulomb 力而存在于等离子体中。这些效应超出经典理论的范围，它们是反常输运理论的研究对象。另一方面，磁场的非均匀和弯曲对输运过程产生一些相当独特的效应：这些将在新经典理论这个标题下进行研究。

即使在许多年以来所发展的这个经典领域，人们可能认为很久以前其中一切都已解决，令人惊异的是注意到许多作者由于（经常未明确说明的）出发假设的差异而引起对结果的描述上的巨大不一致。因此，我试图提出经典等离子体输运理论的一种完备、自洽和自足的观点。这个描述由于正文中所详细讨论过的理由，结果是通常的描述（例如普遍引用的 Braginskii 表述）有点不同。此形式的优点是它自然地纳入非平衡热力学，尤其是关于**熵产生**，的普遍框架。熵产生的概念使我们能深刻理解输运理论的结构。不幸的是，等离子体物理文献中不经常详细论述这个课题。它还导致自然延拓到新经典理论的领域，因此导致统一的输运理论。

这里所应用的许多结果或方法是新的。让我们引用第一章中