

一本学习等离子体物理理论的好教材 ——评赵凯华先生所著《电浆基本理论》

刘寄星[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2025-01-07收到

[†] email: ljx@mail.itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250203

CSTR: 32040.14.wl20250203

写在前头的话：赵凯华先生于2024年11月18日离开了我们，令人万分悲痛。回想14年前先生八十寿辰之时，我曾以《书缘》为题给先生写过一篇祝寿文章，文末曾用96字韵语，赞先生一生功绩并附我们对他的期望。赞曰：“少年聪慧，大器晚成。生于纽约，拜师两京。杏坛授业，六十冬春。红烛常燃，木铎金声。披沙求真，赵门家风。笔耕不息，吐丝织锦。大作迭出，著作等身。传授物理，华夏留名。淡泊名利，忠厚待人。博导之师，自在人心。寿虽八十，心若孩童。恭祝我师，永葆青春。”不意14年后，这位对物理世界“心若孩童”不断探索的物理教育大师竟然乘鹤西去，我们再也看不到他的音容笑貌，再也听不到他揭开物理学奥秘的娓娓教导。如《书缘》所述，我与赵先生因书结缘，至今已有66年，期间因拜读先生大作，聆听先生教诲，得益良多。回想起来，我有两次对不起先生，第一次是2008年先生的《定性性与半定量物理学》新版出版后，他曾约我为《大学物理》写一篇书评，因我当时得了带状疱疹，处于厌读厌写状态，只好委托好友朱允伦教授去写。允伦聪慧，书评非常精彩。但自己总因未亲自完成先生嘱托而内心不安。第二次则是2013年底他的最后一本大作《电浆基本理论》出版后，先生甫得样书即赠我几本，嘱我送给相熟的同行并注意收集他们的反应。这次书虽送出，但未收集到系统的反响，尤其是没有从年轻一代的等离子体学者中得到反响，深感对不起先生。第二次先生虽未约我写书评，但为弥补第一次的遗憾，我曾在数度拜读先生这本等离子体理论大作之后，写过一篇书评，向青年一代推荐该书，因等待比我年轻一代的反应，迟迟未敢投稿，结果直到先生去世也未能刊出。鉴于先生的多本大作均已有人著文介绍评论，唯这本《电浆基本理论》尚未见评介，故不顾浅陋，将这个书评在《物理》刊发出来，以纪念先生一生“杏坛授业”“传授物理”的不朽功绩。

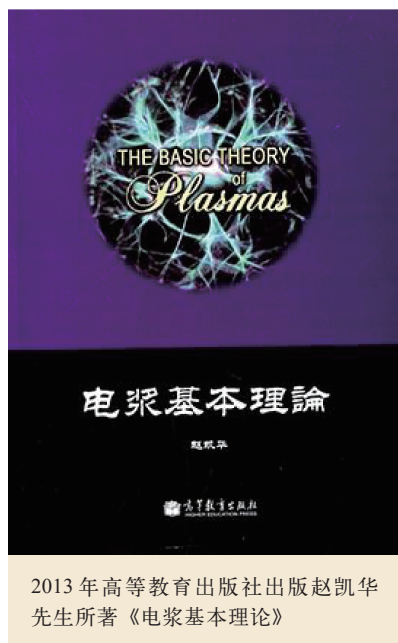
多年来一直盼望赵凯华先生能为学习等离子体物理理论的研究生撰写一本好教材，现在这本书终于出版了，可喜可贺。赵先生为这本书起了个大陆学者不太常用的名字，叫《电浆基本理论》，把大陆学术界用了半个多世纪的“等离子体”这个词改为台湾地区使用的“电浆”，自有其深意，这在书一开头的“开场白”中就说明了，顺便交代了物理学中“plasma”这个词的来历和两个中译名的优劣，这里不再重复¹⁾。笔者学习和研究等离子体物理已有半个多世纪的历史，一时改不了口，因此还把plasma称作等离子体，不叫电浆。

仔细读过赵先生这本书，觉得赵先生不愧是

物理学教学大家和物理学教材写作的高手，写出一本书来，总能抓住读者所需释疑解惑，把读者引入该学科的中心。他的5卷本《新概念物理教程》如此，这本《电浆基本理论》亦是如此。

等离子体物理是一门综合性的学科，宏观上看它是对电磁场作用极为敏感的流体，微观上看它是大量带电粒子的集合，因此描述它的行为必然要综合使用流体力学、电动力学和统计物理的概念和方法。另外，等离子体又是宇宙间99%以上的物质存在的状态，其可以存在的密度、温度和磁场强度等参数的跨度大得惊人，可达十几个量级，加之其形态和性质受外加电磁场强烈影响，存在极其丰富的集体相互作用，因此对等离子体的研究强烈地依赖于具体研究对象，于是就产生了等离子体物理的各个具体分支，如低温等离子

1) 为了方便，我把赵先生这个开场白作为附录，列在本篇书评的后面，供对物理学名词有兴趣的读者参考，也让广大读者领略赵先生的写作风格。



体物理、磁约束聚变等离子体、惯性约束等离子体物理、空间等离子体物理、天体等离子体物理等等。要想用一本书把这个学科的基本理论有系统地讲解清楚，实非易事。

赵凯华先生的这本书用10章²⁾的篇幅，分别从单粒子理论、宏观流体理论和微观统计理论三方面对等离子体中的各种复杂物理过程进行了详尽的阐述，给出了等离子体各具体分支的共通理论基础。

具体而言，该书的前8章是等离子体线性理论。在第1章中扼要阐述了等离子体的单粒子理论，引进了导向中心平移、变化磁场中的浸渐不变量和强激光等离子体粒子加速等重要概念。第2章阐述等离子体宏观理论，详尽地讨论了磁流体力学的基本方程、磁感应线冻结、等离子体的静态平衡、不稳定性与磁流体激波，给出了色散介质电动力学方程、介电张量解析性质和色散介质中电磁能量传播的推导。第3章则在二流体理想磁流体力学理论的框架下，讨论了冷等离子体和热等离子体中的各种波动和不稳定性。第4和

第5两章全面阐述了等离子体动理论的基本内容以及导出各种动理学方程的BBGKY理论，构成用非平衡统计方法研究等离子体的核心理论内容。第6、第7两章则用弗拉索夫方法详尽地分别讨论了无碰撞各向同性与无碰撞各向异性等离子体中的波和不稳定性，全面显示了运用动理学方法探索等离子体性质的威力。第8章专门讨论了等离子体和外磁场非均匀性引起的漂移波和漂移不稳定性，特别详细地阐述了在弱非均匀性条件下介电函数的计算和回旋动理方程的建立，使得这些看似难以用线性方法处理的问题仍可在线性理论的框架中得到解决。该书的后两章，集中阐述了等离子体中的两类典型的非线性现象的理论，第9章讲述了激光与等离子体相互作用中必定出现的参变激发，第10章则集中讨论了等离子体中的孤波、孤立涡旋和无碰撞激波等协合结构(coherent structures)。

从上述内容不难看出赵先生这本书的第一个特点——内容丰富，它利用等离子体物理中常用的各种理论方法，如粒子轨道理论、磁流体理论(包括二流体理想磁流体动力学理论)、等离子体动理论，全面透彻地讨论了等离子体的宏观和微观性质，诸如等离子体中的各种波动和不稳定性。同时，这本书涵盖了等离子体线性与非线性理论，书中对非线性理论的阐述虽然只用了两章多的篇幅³⁾，但这些内容确实是几十年来发展起来的非线性等离子体理论中最重要也是最可靠的篇章。

本书的第二个特点是物理清晰。与其他物理学分支相比，应当说等离子体这个学科是一门相当“肮脏”或者说“不干净”的学科，用赵先生自己的话说：“等离子体这个学科，从理论物理角度讲是非常不干净、极为凌乱的学科，里面的实际问题都不是一个简单的理论模型所能解决的，要考虑的因素，也许别的地方可以忽略，但等离子体里不可忽略，把所有因素考虑进去又没法做。

2) 全书目录：第一章，粒子轨道理论；第二章，电浆的宏观理论；第三章，电浆里的波(二流体理想MHD理论)；第四章，电浆动理论；第五章，BBGKY理论；第六章，无碰撞各向同性电浆中的波和不稳定性(Vlasov理论)；第七章，无碰撞各向异性电浆中的波和不稳定性(Vlasov线性理论)；第八章，漂移波和漂移不稳定性；第九章，参变激发；第十章，孤波孤立涡旋无碰撞击波；名词索引；符号索引。

3) 第9、10两章和第6章的6、7两节。

能够做出些成果的往往是做过许多近似假设凑出来的,而且这个理论的有效范围都不好说。”^[1]然而,就是针对如此“不干净”的一个学科,赵先生将等离子体理论的单粒子理论、磁流体理论和动理论三大理论描述方法恰如其分地运用于不同问题,给出了清晰的理论结果。在讲述中对模型的适用范围、所用近似都做了明确的界定。例如,在用单粒子理论讲述变化磁场中的浸渐不变量时,赵先生巧妙地引用了第一次索尔维会议上爱因斯坦对洛伦兹所提的一个貌似简单实则深刻的问题的回答,定义浸渐不变量,令人印象深刻。还有,在应用弗拉索夫方程处理波粒子相互作用时,对于貌似从数学中推导出来的朗道阻尼,书中不但给出了该结果定性的物理解释,而且指出了朗道阻尼物理图像与切连科夫辐射的相似之处,使人耳目一新。而且,书中专辟一节详尽地讨论了当波振幅足够大时的非线性朗道阻尼及其效应,使读者对这一问题具有全面的物理图像。尤其令人称道的,是该书在讲述用BBGKY品级方程推导玻尔兹曼方程、朗道方程、莱纳尔—巴列斯库方程三个动理学方程时,扼要地介绍了建立动理学方程基础的博戈留波夫浸渐假设,并明确地指出这些假设是博氏凭其物理直觉给出,而不是从更深层次的理论推出的,解除了读者容易产生的疑惑⁴⁾。而且在该节末尾的小结中,作者明确地回答了读者最感困惑的问题:BBGKY理论的出发点是刘维尔方程,它对时间是可逆的,然而为什么由它导出的动理学方程都是不可逆的?以上这些特点,都是其他一些等离子体物理教材中难以见到的。

本书的第三个特点也是它有别于其他等离子体物理学教材最鲜明的特点,是它的理论推导的详尽。一些教科书或专著中往往用“不难得到”、“可以导出”等词掩盖艰难的推导过程,直接给出理论公式,使得后学者往往对这些结果知其然而不知其所以然,在实际应用中陷入迷茫。赵先生这本书则不然,在所有需要繁复推导的地方,绝

不含糊,或不惜篇幅,详细推出,或给出数学附录,指导读者自己推出,使得后学者能真正掌握这些理论方法,可以用于实际工作。学过等离子体理论的人都知道,由于等离子体的宏观和微观描述需要用到流体力学、电磁学和统计物理学,特别是使用动理学描述时,一个物理问题的推导过程会相当冗长繁复,例如各向异性等离子体的介电张量的推导、处理非均匀磁场情况下问题的回旋动理学方程的推导等等,往往令人生畏。在当今计算机模拟大行其道的时代,不少人会产生放弃掌握解析推导技巧只依赖计算机模拟也可进行研究的想法。然而不学会这些技巧,不掌握这些“算功”,正如郝柏林同志在他为阿布里科索夫等人所著《统计物理学中的量子场论方法》的译者序言中所说,只能是“跛脚而行的理论物理学工作者”^[2],行之难远。因此,一切想要在等离子体领域内做出有意义工作的人们,都应当掌握必要的解析推导技巧,赵先生这本书,无疑是学习这种技巧的极好的教材。

本书的作者赵凯华先生20世纪50年代曾在莫斯科大学物理系师从等离子体动理学理论奠基人之一的A.弗拉索夫⁵⁾学习等离子体理论,两年之内获苏联数理科学副博士学位。回国后,因全力投入物理教学和教材建设,惜未能继续深入研究。



赵凯华先生(右三)参加中国物理学会第八届名词委员会第三次会议(2005年10月)

4) 与此类似,对于刻画朗缪尔波凝聚和塌缩的扎哈罗夫方程,不少著作中有对它的详尽推导,赵先生在本书第10章第2节中,采用了梅罗斯(D. B. Melrose)的说法,指出这个方程只是一个物理模型的解析表达式而绝非从更一般的理论推导出来的方程。

5) 国际上公认的等离子体动理学理论的奠基人是三位苏联理论物理学家:A. A. 弗拉索夫, L. D. 朗道和 N. N. 博戈留波夫。

1980年代他曾在北京大学物理系及其他有关单位为研究生和研究人员讲授等离子体理论，深受欢迎，其自编讲义广为流传。难能可贵的是，赵先生在年近80高寿完成其5卷本《新概念物理学教程》修订及名著《定性和半定量物理学》的再版之后，从2008年至2013年，花6年之功，披阅文献、推导公式、自行排版，呕心沥血地为大家奉献了这本难得的等离子体理论教材，令人肃然起敬。

基于上述，作为一个曾经在等离子体理论方

面做过一点工作的过来人，特郑重地向有兴趣的读者推荐赵先生这本内容丰富、物理清晰、推导详尽的不可多得的优秀研究生教材，希望它在提高我国等离子体物理人才培养和研究中发挥应有作用。

参考文献

- [1] 则贤问学录-赵凯华篇(上). https://mp.weixin.qq.com/s/_IRM-WTLGbvSlqdZeS-sSRQ
- [2] 阿布里科索夫等著,郝柏林译.统计物理学中的量子场论方法,中文本第三版译者序.北京:北京大学出版社,2014

附录：赵凯华先生为《电浆基本理论》所写的开场白

1、Plasma，“等离子体”抑或“电浆”？

Plasma一词我国大陆一直作“等离子体”，在台湾由吴大猷先生倡导作“电浆”。本书作者曾发表文章，述说“等离子体”译名之不当，建议改称“电浆”，理由如下。

“等离子体”译名的缺点有三：一是太长（一般以二三字为宜）；二是难以抽出其中任何一个单字来组成复合词；三是随着科学的发展，它已不能概括此词现代的含义。这些缺点都源于当初订名时企图把概念的解说包含在订名中，这往往是不可能的，正像一个人的名字不能完全表达他的身份、人品和性格一样。Plasma的原意是有一定程度电离的气体，因它在整体上常保持电中性，故曰“等离子”。后来出现了nonneutral plasma，就得译作“非中性等离子体”，使我们陷人“不等的等离子体”的尴尬局面。现在看来，像台湾那样把plasma一词直译作“电浆”是可取的。这样，plasma ion source可译作“电浆离子源”，而不必叫做拗口的“等离子体离子源”。plasmon可译作“电浆子”甚至“浆子”，而不必作“等离子体子”或“等离子体激元”，作“等离子体子”也是不令人满意的。

有人说，“电浆”是什么东西？让人感到莫名其妙。其实对于外国人来说plasma一词也是莫名

其妙的，有个Plasma Center（等离子体研究中心）还被一般人误认为是献血站呢，因为plasma的原意是“血浆”。最早研究气体放电中plasma的人是朗缪尔(Irving Langmuir)，plasma一词也是他选订的，时间是1927年。据当时在朗缪尔手下工作的莫特-史密斯(Harold M. Mott-Smith)1967年给友人的信中是这样回忆的(*Nature*, 233(sept. 1971), 219):

……朗缪尔开始研究水银蒸气放电。他很快发明了他的探针。我做的是实验工作和大部分的数学推导，在盖斯勒(Geissler)管的阳极柱里和充气热离子管里，我们很快积累了水银电弧柱体内的离子密度和速度分布的许多数据。

我们注意到他们揭示的放电结构与我们的相似性，朗缪尔指出这件事的重要性和可能具有广泛的意义。我们努力为它取个名字。我们翻来覆去地考虑“均匀放电”、“平衡放电”这些名字；对于围绕电极的亮暗区则取名“辉光”、“晕”等。一天朗缪尔兴高采烈地来到说他想好了。他指出，放电的“平衡”部分的作用是一种基底，运载着各种粒子，如热电离丝发出的高速电子，气体杂质的分子和离子，这使他联想到血浆运载红血球、白血球和细菌的方式。所以他建议把我们的“均匀放电”叫做“plasma”。我们当然都同意。

不过后来我们骑虎难下了。在相当的一段时期里被医学杂志纠缠着要我们论文的复印本,甚至到现在还这样。物理界和化学界斜眼看这个陌生的名词,迟迟未接受它到自己的词汇中。工程界则把它当做了通用电器公司的商标。在我离开实验室以后很久,情况突然发生了可喜的变化,人人开始谈论 plasma 了。这发生在热核(聚变)成为政府资助的项目之前不久,终于给 plasma 盖上了体面的印记。

从这段回忆看来,朗缪尔为电离气体取“plasma”这个名字是有一定道理的,也许这个道理并不充分,曾经遭到同行的冷落。现在不同了,在所有使用拼音文字的国家里,朗缪尔的 plasma 和血浆都是同样的拼法。约定成俗,习惯成自然,今天物理界说到 plasma 时已赋予它全新的含义,不再联系到血浆。我们的汉语不是拼音文字,不宜音译,于是译成了“等离子体”或“电浆”,前者完全意译,后者半直译半意译。科学名词照字面直译的作法未必不可取。随着科学的发展,一个名词的内涵是要扩展和延伸的,过分拘泥当前的认识赋予名词现有的含义,将来是会被动的。在这种情况下不如照字面直译,使字面上的意思与特定的含义联系不那么紧密,却可在概念发展时在称呼上与国际保持同步。在这种考虑下我支持“电浆”的译法,它既简短,又便于组成愈来愈长的复合词。

“等离子体”一词已沿用了五六十年,改得了吗?一个人改了名字,老朋友会在一段时间里很不习惯,对新朋友来说不存在这个问题。近来物理学名词审定委员会已初步决定,把“电浆”列为“等离子体”的别名,允许使用。万事总得有人带个头,我就来当这个带头羊,全书以“电浆”作为 plasma 的译名。

2、电浆的定义

粗略地讲,电浆就是电离了的气体,其中或多或少地包含一定数量的正负离子,在大多数情况下负离子就是电子。在热力学平衡态下气体电离靠温度,一个标志性的参量是离子平均热运动动能(可用 $k_B T$ 表征, k_B 为玻尔兹曼常量)与离子间库仑势能(可用 e^2/d 表征, d 为粒子间平均距

离)之比:

$$\Pi \equiv \frac{k_B T d}{e^2} = \frac{k_B T}{e^2 n^{1/3}}, \quad (0.1)$$

式中 n 是游离电子的数密度。 $\Pi \ll 1$ 时气体的电离度是很低的, $\Pi \gg 1$ 时气体完全电离。即使气体电离度很低,它的电导率已很可观,其性质与未电离的中性气体也有很大的差别,我们亦可称之为“电浆”。不过更典型的电浆应属于 $\Pi \gg 1$ 的情况。

电浆的最主要特征,是带电粒子间的相互作用(库仑力)是长程的,其力程等于无穷大。不过一个带电粒子的周围会被带相反电荷的粒子包围起来,将库仑力在一定距离上屏蔽掉。这概念首先是德拜(Peter Joseph William Debye)在研究电解溶液时提出来的,称为德拜屏蔽。按平衡态的统计力学推算,德拜屏蔽距离[见第四章(4.56)式]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T}{4\pi e^2 n}}. \quad (0.2)$$

运用统计力学的条件是以德拜屏蔽距离为半径的球体内粒子的数目 N_D 足够多:

$$N_D = \frac{4\pi \lambda_D^3 n}{3} \gg 1. \quad (0.3)$$

将(0.2)式代入(0.3)式可以看出:

$$N_D = \frac{\Pi^{3/2}}{6\sqrt{\pi}} = 0.094 \Pi^{3/2}. \quad (0.4)$$

所以 $\Pi \gg 1$ 与 $N_D \gg 1$ 条件是一致的。通常称(0.3)式中 N_D 为电浆参量(plasma parameter),对于典型的电浆, $N_D \gg 1$ 。

电浆里的一种典型的振荡称为电浆振荡(plasma oscillation),其角频率为[见第三章(3.26)式]

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}. \quad (0.5)$$

而电子与离子两体碰撞的有效频率为[见第四章(4.153)式]

$$\nu_{ei} = \frac{4\pi n Z e^4 \ln \Lambda}{\sqrt{8m} (k_B T)^{3/2}}. \quad (0.6)$$

式中 m 为电子质量, Z 为正离子的电荷数, $\ln \Lambda$ 称为库仑对数,其中 $\Lambda = 3N_D$ 。 ν_{ei} 与 ω_{pe} 之比为

$$\frac{v_{ei}}{\omega_{pe}} = \frac{Z \ln \Lambda}{3\sqrt{8} N_D} . \quad (0.7)$$

对于氢和它的同位素, $Z = 1$, 而在广阔的 n 、 T 参量范围内取库仑对数 $\ln \Lambda = 10$ 是很好的近似, 从而:

$$\frac{v_{ei}}{\omega_{pe}} = \frac{1.8}{N_D} \sim \frac{1}{N_D} \ll 1 . \quad (0.8)$$

归纳起来, 电浆的定义可包含以下三点:

(1) 电浆近似

$N_D \gg 1$, 德拜球里有大量带电粒子, 它们处于集体相互作用之中。

(2) 准电中性

在大于 λ_D 以上的空间尺度下电浆的平衡态是准电中性的。

(3) 无碰撞近似

在电浆振荡的时间尺度下动理过程中电磁场的作用超过了两体碰撞。

以上三点最基本的是第(1)点。

传统的物质聚集态有三: 温度最低的是固态, 温度升高些是液态, 温度更高了是气态。比气态温度再高, 是电浆态。它具有与普通气态相当不同的性质, 人们称它为物质第四态。

赵凯华先生与物理学名词审定工作

朱 星[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2025-02-07收到

[†] email: zhuxing@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250204

CSTR: 32040.14.wl20250204

赵凯华先生是国内外著名的物理教育家。他出身于书香门第受到良好熏陶, 在中小学阶段得到系统的中国文化、历史知识教育, 在北京大学物理系又有完整的本科与研究生教育, 后在莫斯科大学攻读研究生期间, 他钻研学习了物理学史和等离子体物理理论, 四年内完成学业, 获得副博士学位。赵先生的学习经历, 使他成为学贯中西的物理学大师。几十年的教育生涯中, 他通过

授课和编写大量物理学教材, 培养了大批物理学人才。他的学生们都以尊重和敬仰的心情怀念这位人生导师。我于1987年来到北京大学物理系, 当时赵先生已经将系主任的接力棒传给了甘子钊先生, 因此我本人并没有机会直接得到赵先生的教育和教导。

赵先生在担任中国物理学会副理事长(1991—1999)期间, 长期担任学会的物理名词委员会主任(1987—2003)。他还担任了全国科学技术名词审定委员会(以下简称全国名词委)物理学名词审定委员会主任(1985年起), 2006年阎守胜教授接任主任, 2014年我为新一届主任。赵先生主持审定了《物理学名词》(1988、1997版), 并且作为顾问参与审定了2018版的《物理学名词》。他主编的《英汉物理学词汇》, 为中国物理学名词术语的标准化和规范化作出了奠基性贡献。我于2011年进入中国物理学会常务理事会, 从阎守胜教授手中接下学会的物理名词委员会主任和全国名词委物理学名词审定委员会主任后, 与赵先生在名词审定工作方面产生了比较密切的交集, 从而有机会从先生那里学习他对于物理名词审定的深厚功



2024年6月, 我与先生在小区散步时留影