

二十年来的物理学——等离子体

M. B. 戈特列布

二十年以前，等离子体的研究在物理学中只占次要地位。各式各样的等离子体现象没有揭示出来。这个领域发源于本世纪初期，当时对气体放电，即对比较稠密的、稍微电离的等离子体区（其中主要效应是电离、受激、复合和其他原子碰撞过程）进行了研究。欧文·朗缪（Irving Langmuir）发现等离子体静电振荡，并且认识到：这是集体粒子运动的一个侧面，从而开创了近代等离子体物理。等离子体中的物理现象所以丰富多彩，并且使等离子体与普通流体那样不同，原因就在于这些产生电磁场，并与之相互作用的集体运动。

在早期，天体物理和地球物理的研究也曾起过重要作用。爱德华·阿普尔顿（Edward Appleton）研究电离层时（在30年代），正确地描述了电磁波在等离子体中的传播（包括静磁场效应）。西德尼·查普曼（Sydney Chapman）和文森佐·费拉罗（Vincenzo Ferraro）发展了等离子体流与地球磁场相互作用的理论。威拉德·贝内特（Willard Bennett）于1934年预言过收缩效应，引起了后来25年间的大部分实验工作。

1941年出版了汉内斯·阿尔文（Hannes Alfvén）的《宇宙电动力学》（Cosmical Electrodynamics），再次对等离子体的前景带来影响，特别是首次描述了以他的名字命名的波动过程。

等离子体动力学理论开始得更早。列夫·朗道（Lev Landau）1934年导出碰撞积分的福克尔—普朗克（Fokker-Planck）近似。查普曼和托马斯·考林（Thomas Cowling）在《非均匀气体的数学理论》（The Mathematical Theory of Nonuniform Gases）著作中，证明玻尔兹曼方程可以简单地应用于等离子体问题。1945—46年，朗道关于相混合的经典论文和符拉索夫（A. A. Vlasov）建立所谓无碰撞玻尔兹曼方程的经典论文，奠定了必要的基础，虽然还有待进行严格的证明。

近代等离子体物理的第一个强力刺激（约在1950年）来自这样的认识：要使聚变反应释放出可控能量，似乎要涉及和磁场相互作用的热等离子体。几年之内，由于发现在行星际空间中太阳所产生的等离子体起着重要作用，等离子体物理得到了进一步的推动。在随后的一段时间内，我们在这方面的知识迅速扩大。

等离子体理论

本质上，等离子体物理是一个多体问题，其中基本的（电磁）相互作用已经了解得很清楚，而量子效应通常可以忽略。因此，这些系统的平衡的统计力学问题是一个浅显的问题；但是，由于所涉及的各种力具有微妙的长程性，动力学却是异常丰富的——可能出现各种类型的集体运动。

在过去十年中，关键的理论进展是（从多体方程）严格导出玻尔兹曼方程稍加修正的形

式，即福克尔—普朗克方程，此方程连同马克斯威尔方程，支配着等离子体的行为。因此基本动力学发生在六维相空间。两个进一步的重要简化通常是互相关联的。在距离大于德拜（Debye）长度，频率小于等离子体频率 $(4\pi ne^2/m)^{1/2}$ 的条件下，任何运动一定保持准中性。在距离大于回转半径，频率小于回转频率的条件下，可以采用粒子运动方程的简化形式，因而玻尔兹曼方程的“导向中心”近似是有效的。根据此近似，已经确定流体（磁流体动力）理论适用的条件，此外理论上已经预见，实验中并已观察到一种崭新的低频波——漂移波。

导向中心近似的物理意义是，粒子按 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ 漂移（即场线本身的速度）横过磁场。因此 $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = 0$ ；在运动坐标系中电场为零。同时粒子被 \mathbf{E} 平行于 \mathbf{B} 的分量沿场线自由加速。当没有此种平行运动时，粒子严格地随着场线运动，而且等离子体和磁场冻结在一起。这是无限电导率流体理论的显著特性。另一方面，当波沿磁场的相速度小于粒子速度时，此种横向运动变成平均化。当此条件应用于电子时，冻结于场线上的有力束缚没有了。在这些条件下，更大的一类动力学问题——特别是漂移波成为可能。

因此对于低频波和由此产生的不稳定性，可以用导向中心近似进行研究；但是在较高的频率时，由于特征距离非常小，几何效应不大重要。这样一来，理论就主要涉及速度空间的运动，其中各向异性常常提供不稳定性的能源。

如同物理学的其他分支一样，线性波的行为现在已经了解得相当深入，波的非线性行为则是既复杂而常常又极端重要。在某些方面，这种研究类似于经典的纳维—斯托克斯湍流。乍一看，它好象更复杂得多，因为涉及到多种波动的非线性相互作用，并且需要考虑六维相空间中的粒子分布。然而往往总是存在着足够的限制（例如刘维定理，绝热不变量守恒等等），以致可能不会出现完全的湍流运动，而可能发生小振幅下的稳定性，导致如同1945年戴维·玻姆（David Bohm）所假设的那种横过磁场的反常扩散效应。

研究“弱湍流”区是现代理论工作者的主要任务之一，因为这种研究对于热核研究的关键问题“我们会不会找到一种充分稳定的约束平衡？”说来，是在继续寻求明确的答案。

等离子体实验

1948—58年期间，美、英、苏在等离子体方面均进行了广泛的经典性工作。将等离子体的简单流体理论应用于收缩现象的动力学及其大部分不稳定性问题，并且用以构成寿命较长，大体稳定的环形收缩的几何形状。这个时期还发明了其他的基本环形磁瓶（仿星器和托卡马克），并且证实了环形稳定性与流体理论所作的预言大体一致。

实验工作者证实用磁镜可以有效地约束热等离子体，并且发展了旋转等离子体、等离子体加速器和碰撞等离子体激波的物理学。在此期间开始对等离子体波进行实验研究，并将其应用于等离子体加热。

关于等离子体的似流体行为的这些实验，大部分是在较低的温度范围（ 10^4 — 10^7 °K）和 10^{14} — 10^{17} 厘米⁻³的密度范围内进行的。原则上可以用欧姆加热和磁压缩的方法产生等离子体。应用可见光、紫外光和X射线的光谱学、微波干涉以及多探针技术，发展了有效的等离子体诊断。

1958年日内瓦会议开始了受控聚变方面的国际合作。那时简单的等离子体理论刚好开始出现一些反常现象。在1958—68年这十年中，提出了一整套更加成熟得多的理论和实验，某些重要的反常现象已经得到解决。

研究热等离子体不似流体的行为主要在磁镜机器方面取得了进展。在复杂磁场中长时间

约束单粒子已被证实,并且证明与绝热不变量理论一致。当 $10^7\text{--}10^9\text{ }^\circ\text{K}$ 范围的,束注入的等离子体达到 $10^8\text{--}10^{10}\text{ 厘米}^{-3}$ 密度范围时,就开始激发高频不稳定性,同不稳定性有关的速度空间扩散对等离子体约束的限制已经予以确定。

对速度空间稳定性问题进行细致的实验研究,起初受到下述事实的限制:在简单磁镜机器中另外还出现似流体的不稳定性。引进最小B磁场构形既证实了这些不稳定性的性质,又有效地消除了这些不稳定性。然后发现了磁场内中性原子束的劳伦茨分离,这一发现提供了捕捉高能离子的高度可控方法,开始揭示高频模的详细结构和参数间的关系。在理论方面,现在已经建立了丰富的高频模谱,无限介质理论已加以推广到包括有限的几何效应的情况。在数量上实验和理论基本一致。

其次,已经将有限等离子体的似流体行为的认识加以推广到包括更复杂的等离子体动力学。通过具有内导体的收缩实验,首次证明用无限电导率流体方法处理等离子体稳定性是不恰当的。有限电阻率稳定性理论出现了,对实验的和天体物理的现象提供了更真实的向导。随后引入并经实验证实的是回转粘性效应,由此又导致漂移波及有关的密度和温度梯度不稳定性的极为重要的发现。

仿星器实验提供了测量圆环中反常扩散的详细参数关系的方法,并且经验地证实了短平均自由程范围内的玻姆假设($D=ckT/16eB$)。理论上现在可以根据电阻的和漂移型的不稳定性了解扩散反常,利用磁场构形技术(切变和最小平均B)和转移到长平均自由程区域来稳定等离子体的条件已经推导出来。

轴对称内导体圆环(多极,悬浮器(levitron))实验以及更晚些时候的仿星器实验,已经定性地作出了这些理论预见,并且相对于玻姆扩散公式已经取得了实质性的进展。据报告,在大型托卡马克实验中, $10^6\text{--}10^7\text{ }^\circ\text{K}$ 和 $10^{12}\text{--}10^{13}\text{ 厘米}^{-3}$ 的等离子体已经给出10—30的改善系数(相对于玻姆扩散)。

某些最基本的等离子体实验采用了简单的线性几何形状来代替业已成为长时间等离子体容器表征的复杂的磁场构形。金属等离子体(Q机器)已经被用于实验上实现漂移波和离子声波。在稳态低密度的氢等离子体柱中产生静电波的实验,已经证实了朗道阻尼和受激过程的细节,并且证实存在着回波。

从受控聚变研究的观点来看,线性实验最重要的是(在 θ 收缩中)瞬时约束温度范围 $10^7\text{--}10^8\text{ }^\circ\text{K}$ 、密度为 $10^{16}\text{--}10^{17}\text{ 厘米}^{-3}$ 、压力可与磁场压力比拟的等离子体。单流体不稳定性本质上是可以控制的,而且已经证明反常扩散的上限不超过玻姆范围。 θ 收缩几何形状也可用以产生和研究无碰撞激波,因而为这个重要的空间现象的理论提供实验验证。

形成类似于等离子体实体的相对论电子的稳态相干环,其可能性已经得到证实。但是,当这类环能够形成受控聚变(天体器(Astron))的封闭磁瓶以前,它们需要进一步增加环电流。这类环最近在聚流的高能加速器上的应用是眼前的应用方向(参阅 Physics Today, Feb. 1968, p.51)。

激光技术和等离子体领域已经发生了有意义的相互影响。激光被用于诊断技术(例如干涉仪、法拉第旋转和汤姆孙散射),同时大功率激光器通过完全电离小的悬靶提供高能等离子体的瞬时点源。

空间等离子体

过去20年中等等离子体物理在天体物理中起着日益重要的作用,而且在空间物理中几乎起

着决定性作用。

1958年美国第一个空间飞行器(探索者X)携带了仪器,探测被地球磁场磁镜效应所捕获的高能带电粒子。这些粒子沿着被地球附近增强着的磁场所反射的力线前后振荡,并且由于磁场不均匀和地球旋转而绕着地球漂移。应用绝热不变量概念,可以极其简单地详细了解这些粒子的运动(百眼巨人实验(Argus experiment)戏剧性地证实了此概念,在此实验中原子弹在大气层之上爆炸,出现一个人工辐射带,其发展情况可以随着时间进行观测)。

60年代初期,人造地球卫星发现太阳不断地高速喷射等离子体——太阳风。从解释彗尾起源的日冕平衡理论出发早已预见到这种喷射。因为太阳风有很高的导电性,它不能穿透而必须绕过地球磁场,形成地磁空腔或地磁层(在其中我们发现了范·阿仑辐射带)。1961年细致地确定了此空腔的边界,并且发现:在太阳方向此空腔的形状和位置满足根据太阳风的压力和磁场压力平衡所建立起来的简单理论。1965年顽童(Imp)I号卫星发现空腔形成柱体,由地球(向太阳的反方向)延伸达几百倍地球半径,形成磁尾。在此磁尾中磁场平行于柱体,在北半部朝着一个方向,在南半部则朝着另一方向,在二者之间为中性层;在此层中等离子体的不稳定可能是引起强烈的极光和磁暴的原因。磁尾的起源则至今还不能肯定。

太阳风实质上是无碰撞的,所以当顽童I号(1964年)发现地球前面的驻激波时,等离子体理论获得一大胜利。这是首次观察到的无碰撞激波。1962年向金星发射了一些“水手”探测器,观察到太阳风中更远的一些无碰撞激波。这些激波可能是太阳表面的耀斑强烈干扰太阳风而产生的爆炸波。

太阳风包含一个由光球层辐射出来的力线的弱磁场。由于太阳旋转,可以想象这些力线被太阳风的径向运动搞成阿基米德螺线。该磁场在地球处的预定角(Predicted angle)($\approx 45^\circ$,相对于地球—太阳连线)的测量证实了这样的概念:磁通线是由导电流体运载的。这点进一步为该磁场的极性同相应极性的光球层面积的关系所证实。

1963年Alouette卫星通过射频脉冲激发和预定频率反响的观察,首先在电离层中发现垂直于 \mathbf{B} 的静电模。在阿雷西博(Arecibo)的雷达实验,显示出微波从电离层往回散射的集体效应。在这些观察中,传播主要是由于离子多普勒频率(与等离子体动力学论相符),而不是由于电子多普勒频率。由光电子激发的等离子体频率振荡的散射也被探测到,并且同理论符合。

假如下一个20年与过去20年一样产生丰硕成果的话,可以预期:对等离子体——宇宙中占绝对优势的物态的认识将有高度的发展。

译自: Melvin B. Gottlieb, Twenty Years of Physics, Plasmas, Physics Today,
May 1968, pp. 46—49.

(晏名文译)