

等离子体和流体物理学

PHYSICS OF PLASMAS AND FLUIDS

孙 湘

编者按：本文是孙湘同志应本刊之约，根据1986年美国科学院出版的《跨越90年代的物理学》一书中《等离子体和流体物理学》分册的内容撰写的。

等离子体物理

等离子体物理是物理学的一个新兴分支。这一物理学分支主要是在过去30多年中成长起来的。当前它正在科学技术的许多方面发挥作用，生产上的一些应用也相继出现。

作为一门学科，等离子体物理学是在电磁学、流体力学、统计力学和原子物理学结合的基础上，对大量相互作用的带电粒子的群体，用一种统一的方法进行处理。粒子间的这种“集体相互作用”和它们所处的电场及磁场耦合，在数学上说，成为一种多参数的非线性问题。因此等离子体物理的进展和现代大型计算机及计算技术的发展是分不开的。两者之间有着一个相互促进的历史。

20世纪20~30年代开始的、实验室内气体放电以及天体物理的各项研究是等离子体物理的萌芽。其后，无线电波在电离层中的传播，太阳活动在地球上产生的极光和磁爆，恒星、银河和星际介质中的磁场行为，以及实验室中对电离状态物质的多项研究，进一步奠定了等离子体物理学的基础。等离子体物理学发展的主要阶段开始于50年代初期，主要由于两方面的推动。一个方面是，苏联的第一个人造地球卫星发射和以后一系列空间技术的进展创造了研究太阳系等离子体和天体等离子体的

有利条件，扩展了这方面的实验领域，实验诊断和理论解释日益完善。太阳周围等离子体行为成为天体等离子体物理过程的一个实例，整个太阳系已成为研究天体物理过程的一个实验室。另一个方面是将太阳的能源机制，即热核聚变能，在地球上重现，人类对核能和平利用的这一企图正在逐步实现。

热核聚变最常用的反应是由氢的同位素氘和氚在很高的温度下聚合成为氦，并释放出巨大的能量。这种能源的原料足以供人类使用10亿年以上，几乎是取之不尽用之不竭的。50年代初开始的研究发现，受控聚变的障碍不是人们对原子核物理了解不够，而是缺乏等离子体物理的知识。50年代后期，美国和苏联对这项研究工作解密，从此开展了广泛的国际合作，推进了工作。氘氚核聚变必须克服原子核之间互相排斥的库仑力，这就需要使氘氚气体加热到上亿摄氏度，此时的氘、氚早已离化为电子和原子核混合的等离子体。除了加热外，还要把等离子体约束住，这就是聚变等离子体的加热和约束。开始时用磁场约束。50年代中，许多实验室在各类小型装置上进行约束和加热实验，积累经验，提高对等离子体物理的认识。60年代后期，在一个带有环形电流并用环向磁场约束的环形装置——托卡马克(Tokamak)上，得到了温度达几百万摄氏度、约束几十毫秒的等离子体，磁约束等离

子体取得了重要进展。目前除了建立许多中小型装置外，几个大型装置已在美国、西欧、日本运行，苏联也即将建成类似设备，并积极地向聚变堆迈进。在这段时间内，磁约束等离子体在理论、模型计算、实验诊断和装置建造上都取得了很大的进展，除非出现完全不同于理论测算的意外情况，受控聚变的科学可行性，即达到得失相当的水平，将在今后五年内得到实验证明。60年代后期，几乎与托卡马克同时，出现了由等离子体自身的惯性来约束的方法，称为惯性约束聚变。出现后就以非凡的速度发展，也达到了较高的等离子体参数。目前聚变等离子体的实验技术和诊断精确度有了明显提高，能进行有很好时间分辨的、多维空间图像测量，从而鼓励着理论工作者去解释和分析比以前更细致、更完整的现象。在实验中，需建立许多有关的技术，如：强磁场、大体积超导磁体、强高能粒子束、高功率激光、真空和表面技术，以及功率高、频率宽的各种无线电波源。在有关的实验技术发展的同时，等离子体物理出现了许多其他方面的应用，如：自由电子激光可产生从微波到光学波段，甚至到X光区的相干光，这在许多其他学科、工业、医药中都有应用价值。由于等离子体集体效应，可能创造出新一代用于高能粒子物理的加速器。同位素分离可用于核燃料、医学诊断、医疗、农业及记录环境中的污染物等。

自然界和实验室中的等离子体，可以是稀薄的或稠密的，经典的或量子型的。图1是用温度和密度为坐标表示的各种类型的等离子体。从图中可以看到，其温度跨度约为10个量级，密度跨度约为30个量级。

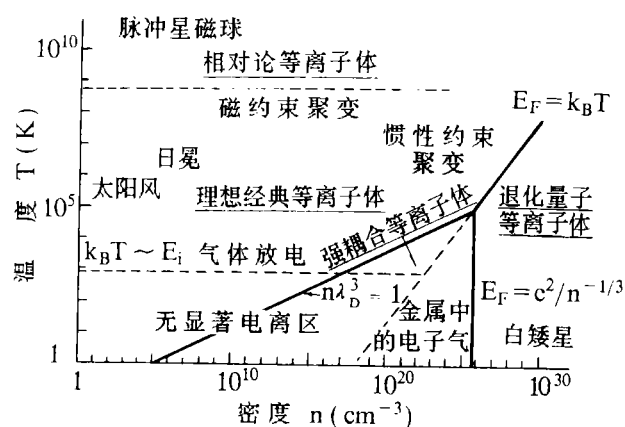


图1 等离子体的温度和密度的分类

磁约束聚变等离子体物理 第一代聚变反应堆

将用氘和氚聚合产生 α 粒子和高能中子。等离子体的温度、密度、约束时间是聚变研究进展的主要指标。磁约束是利用带电粒子沿磁场作半径较小的回旋运动而约束的，温度为10 000电子伏（1电子伏约为10 000℃）的氘核在20 000高斯的磁场内的回旋半径为1厘米，所以反应堆的尺度和所需的磁场强度现代技术是能够达到的。目前在许多反应堆的设计中，磁场大致为50 000高斯，平均等离子体密度为 2×10^{14} /厘米³，平均离子和电子温度为10 000电子伏。所需的约束时间约1.5秒，也就是燃料自己维持燃烧（点火）的条件，这时氘氚等离子体产生的聚变功率为5兆瓦/米³，在工程上符合实际的数值。托卡马克等离子体达到的参数远较其他途径高，它的温度、密度和约束时间的乘积距离达到建堆的要求只差4~5倍。其他磁场形态有它们自己的优点。从长期着想，为了使聚变堆的性能更好，美国和其他国家，都还有许多不同类型的磁约束装置，并不断地出现新设想。但重点还是放在托卡马克上。在美国，它的经费，目前每年约为2.5亿美元，占磁约束聚变总经费的60%以上。

等离子体的加热，除了等离子体电流及磁约束加热外，还须用其他方法提高温度，如注入高能中性束，各种频率的射频波。要达到建堆的功率需30~50兆瓦。目前已有了30兆瓦的中性粒子束，还须提高粒子能量。离子回旋频率的波源也可达到30兆瓦。

惯性约束聚变等离子体物理 惯性约束聚变是用强激光束或高能粒子束聚焦在装有氘、氚燃料的小靶球的面上，靶球直径为几十到几百微米。束能沉积在球表面，加热表面层，使表面物质向外喷射，利用喷射的反作用压缩并加热燃料。压缩力可达几千万到上亿个大气压，驱动末期，当燃料密度达到液体密度的1 000倍，相当于 $10^{25} \sim 10^{26}$ /厘米³，中心温度为10 000电子伏时，开始自持燃烧，中心部分的燃烧很快扩展到周围而产生聚变能，产生的能量可比驱动能大很多倍，高密度燃料自身的惯性起到了约束作用，使燃料在反应时间内不会分散，惯性约束时间为几十皮（ 10^{-12} ）秒，反应释放的高能中子、X射线、 α 粒子等有的被俘获转换成热能，有些则可引出用于其他方面。自60年代初以来，惯性约束聚变发展迅速，美国和其他国家都有这方面的研究，主要用激光驱动。目前波长为1微米的钕玻璃激光器和波长为10微米的CO₂激光器的输出都达到了100 000焦耳，也有些用强的轻离子束作为驱动源。惯性约束在向着点火的目标稳

步前进。目前靶球的压缩已是液体密度的 100 倍,有的实验已达到了聚变温度。过去十年中,着重研究了各种有关的物理问题,如驱动能与靶球表面的耦合、喷射压力、压缩前燃料的温度、向内爆炸的均匀度等,取得了显著的效果,推动了今后的发展。美国惯性约束研究的经费目前每年约 1.6 亿美元。

空间和天体等离子体物理 空间和天体物理范围广阔,内容丰富。空间等离子体物理为太阳系内的等离子体物理,包括太阳和太阳风,行星的电离层和磁球层,慧星和太阳系内的宇宙线的加速和输运等现象。太阳的研究是空间和天体等离子体的交界面。太阳较近,人们可以直接测量,对从内部结构到表面层中的等离子体现象已有较多的认识。在应用方面,许多民用和军用的飞行器,必须在多变的、有危害性的地球和太阳的等离子体环境中运行,等离子体过程有时能破坏所有的设施,包括地面设施,所以有关太阳系的等离子体变化的信息是极为重要的。天体等离子体物理的范围包括行星、恒星和银河系中的磁场行为及恒星大气,以及星际间、银河系间、中子星、类星体的等离子体物理现象,如宇宙射线的加速和传递等。过去十年中,空间研究有了飞跃的进展,测量技术、理论分析、模拟计算的精确度都有大幅度提高。空间研究已是基础等离子体研究的推动力和实验场所。用各种飞行器及地面观测研究了太阳的大部分行星的磁球层的性质和形状,发现地球的磁球层的概念能成功地推广应用到这些行星的磁球层中。太阳系外面的工作进展较慢,主要是由于不能像空间和实验室内的等离子体那样进行直接测量。但现代化的测量、理论分析和计算工具也可以为更远、更大的等离子体模型的建立开辟道路。

流 体 物 理

流体物理是物理科学中最古老的分支之一。虽然它的历史悠久,但是由于广泛的应用需要和基础研究的发展,仍在不断出现可供深入研究的课题。

流体物理目前已渗透到其它许多学科,如生物、化学、地质、气象、天文等,形成了一系列边缘学科。人们日常接触的各种流动,从营养物质穿透多层生物薄膜的迁移到新近发现的行星大气中孤立波的运动都是流体物理研究的课题。流体运动有时以不规则的湍流出现,有时也可以是尺度大得多的连续结构,这些都是新近发展起来的非线性动力

学的重要的研究内容。它是许多重要工程问题研究的推动力,如飞行器和热机效率及化学处理系统生产率的提高、射流噪音的减小,都与深入了解流体物理的基本性质有关。采用后掠机翼和低噪音发动机的近代运输机反映了最近几十年来人们对高速流动的深入了解。这些成就都是由早期的经验和后来的理论研究结合得到的。对燃烧和热传导的进一步了解,增长了发动机关键部件的寿命,减少了废气污染。由于仔细地分析了液体混合和热转换过程,现在化工厂的效率比十年前提高了许多倍。这些都说明由于技术界的激烈竞争,流体物理的研究成果能很快地转入应用。由于这一学科的理论与自然现象有广泛的联系,以及对它在许多重要问题中的作用和在过去十年中对复杂现象的了解达到了新的水平,从而使这门学科获得了更强的生命力。这些进展还应归因于强有力的研究设备的不断发展,它使人们有可能对以前难于理解的自然界中的复杂现象,如湍流、复杂的高速流动、生物流、各种地质现象等进行研究。有了高效率的计算工具和技术设备,未来十年中流体物理学研究将会获得更多的成就,重要者如:

燃烧和反应流动 燃烧是化学反应流动中的特殊过程,可用一般的流体力学方程加上化学动力方程处理。它在应用中占有重要位置,如地下的可逆和正向燃烧,提供了大规模从油页岩中重获石油和从煤中得到高效能燃气的可能。对燃烧过程的了解可改进天然气、石油、燃烧器的经济性和燃烧效率。它与化学处理工业、化学激光、大气污染、废料排放、事故防止等都有关系。这方面还留着许多问题有待解决。在这一领域中,年轻的研究人员的质量和数量正在增加。

涡流支配的流动 关于涡流支配的流动(vortex-dominated flow fields)的研究,旨在描述这样一种状态(稳定的和非稳定的),在其中强涡旋诱导产生的速度是建立流场的核心特征。这类流动与另一类流动(例如流场中弱涡旋由强的非旋转流传输)相反,因而在很大程度上可视为线性的。类似的例子还有薄翼型理论,升力线理论,以及绝大多数升力面理论。涡流支配流动包括以下几种类型。1.初始旋转流动的扰动,如有限翼展机翼在强旋转流场中运动所产生的流动,这类流动在飞机燃气涡轮发动机压气机和涡轮叶片设计中有重要意义;又如复杂弯曲或变截面管道中初始旋转流体的流动研究,对上述发动机的管道设计也很重要。2.高过载机翼和机身大攻角时产生的涡流场的研究,

这对高速飞机,特别是高性能战斗机性能的估算非常重要。3.地球物理流动,如地球和行星大气的流动的研究,这对天气预报很有实用价值。

高速流动 过去十年中主要成就集中于提高商用和军用运输机的效率以及战斗机的机动性能。随着对分离流动的进一步认识,对湍流的开始了解和控制,对新的空气动力学设计过程的运用,用计算机解决空气动力学流场等工作的发展,对上述两方面的问题的研究一定会更加深入。

湍流 惯性大于微观动量输运的连续流中,一般都出现湍流。在许多工艺过程中,它产生阻力、热量和质量迁移。它控制着地球上的食物分布、热量、湿度和生物圈中的光,使地球上生命存在。地壳的温度和运动可能与岩浆中的湍流有关,它的热迁移控制着星体大气和星际气体云的运动。湍流输运常常比分子输运大几个量级。当湍流出现时,它的影响就盖过了其他流动,人们对湍流的了解,长期以来只是定性的,粗浅的。许多物理学家一直认为湍流是在连续物理中没有解决的最后一个大问题,最近却有了一些进展。过去半个世纪中,工程、数学、气象、海洋学家们累积了大量的数据。

对这些数据进行统计处理后,在许多情况下能比较清楚地掌握住湍流的性质。如在机械系统中对混沌的新了解,在地球的海洋,大气和其他行星大气中证实了大尺度湍流和连续流体动力学的结构。用几种与量子场论有关的解析法,可把一些问题了解得更深入。大型计算机的出现在有些简单的湍流中得到了纳维-斯托克斯方程的解。看来这些方面的工作还要进行一段时间,也可能出现新方法。一般说来,目前还没有突破性的进展,对大气和海洋的一些湍流现象,渐渐地有了一个动力学方面的较清楚的认识。这方面的研究,在一定范围内,是非线性物理和数学的起源。

流体物理还有许多其他方面的问题,如非牛顿流体、粘性流动、稳定性、浮力驱动流动、界面现象、声的产生和传播、辐射流体力学、多孔物质、转动现象、相转变,都有丰富的内容,涉及面广。

本文作者孙湘(Sun Xiang)系中国科学院物理研究所研究员。

科技动态

美国将兴建超导超级对撞机

〔本刊讯〕 美国《科学美国人》杂志1989年1月报道,美国能源部宣布准备在得克萨斯州达拉斯以南40公里处建造当前世界上最大的粒子加速器,超导超级对撞机。两年前当里根政府最终批准建造时,超级对撞机工程似乎得到广泛的支持。对撞机加速器管道周长达85公里,足以将纽约城的大部分包围在内。加速器可以使质子以 40×10^{12} 电子伏特的总能量相撞。此能量是目前使用的世界最大加速器——费米国家加速器试验室的Tevatron所能达到的能量的20倍。其他的比Tevatron能量更大的加速器可能在90年代中期投入使用。苏联正在兴建 3×10^{12} 电子伏特的质子对撞机,欧洲粒子物理实验室在考虑兴建 18×10^{12} 电子伏特的对撞机。但是这些加速器对实现粒子物理学的最新突破——发现黑格斯玻色子(Higgs boson)能量还不够。寻找这种粒子可以进一步弄清物质的起源,或许能导致统一自然界各种力的新理论的建立。超级对撞机的支持者声称,这种对撞机具有足够的能量或者最终发现黑格斯玻色子,或者证明不存在,从而指出寻求新理论的方向。

另外,超级对撞机也将给得克萨斯州提供明显的经济效益。美国能源部提出将在今后8年内花50亿美元来建造这一加速器。加速器建成后将聘用2500名科学家和技术人员,以及500名访问学者,年预算将达2.7亿美元。

能源部在1989年预算中要求拨款3.63亿美元,比前一年的预算多10倍,以开始兴建加速器。1988年,在广泛听取意见后,国会只批准1亿美元拨款,以继续进行设计研究,并明确至少在1989年内工程不开工。推迟兴建可以使新任总统有可能重新考虑这一计划。

可望新任总统布什继承其前任的决定,支持能源部的8年预算,但即使有布什总统的支持,超级对撞机计划仍有可能被国会再度推迟,甚至被取消。某些议员受到一些反对该项计划的知名物理学家的影响,例如AT&T贝尔实验室的Arno A.Pergias.普林斯顿大学的Philip W.Anderson等,他们认为兴建超级对撞机会影响其他有价值的、耗资较少的科研项目的经费和人力。

国会还要考虑另外一个问题,即超级对撞机所用强力超导磁体。为将质子沿椭圆形管道加速并聚焦,约需10000个这样的磁体。早期制造的原型磁体性能很差,最近虽然问题已经解决,专家们认为生产这种磁体费用很贵。

超级对撞机面临许多大型研究项目的竞争,例如空间站、人类染色体组研究,空天飞机等。这些计划的效益更明显,而且不是只依靠一个州的支持,而可能得到更为广泛的支持。为了减少美国对超级对撞机的投资,能源部要求加拿大、英国和日本等国家合作并分担部分费用。但是在明确知道美国的态度之前,这些国家是不太可能坚决支持的。

(一丁整理)