

## 等离子体科学发展概述

顾 琅<sup>1)</sup>

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

等离子体科学是 20 世纪 50 年代以后蓬勃发展的一门学科, 它是由 3 个方面并行发展起来的: 高温等离子体(核聚变反应)研究; 空间等离子体科学探测; 低温等离子体的应用研究及发展。20 世纪上半叶, 电磁学、流体物理、统计物理和原子物理都已发展得比较成熟。综合这些学科的概念和方法, 用以研究等离子体状态下的各种现象, 包括从宇宙空间到地球上, 人类利用等离子体的研究。这是等离子体物理学的基本内容。我们可以说, 20 世纪物理学的主要成就之一, 就是明确了“等离子体是物理的第四态”<sup>[1]</sup>。

早在 19 世纪, 随着电学的产生, 科学家们就已观察到一些属于等离子体效应的现象: 19 世纪 30 年代起, 对放电管中气体的导电、发光现象进行了很多研究, 如麦克尔·法拉第 (Michael Faraday, 1791~1867, 英国人, 发现电磁感应定律, 电力线, 磁力线) 在 19 世纪 30 年代研究低气压放电的辉光现象, 发现暗区存在, 后来称之为法拉第暗区。1879 年英国的威廉姆·库克斯确认了放电管中的气体呈现特殊状态——电离态。但是, 在 1895 年汤姆森 (J. J. Thomson) 发现电子及稍后玻尔 C N. Bohr)、卢瑟福 (E. Rutherford) 等人建立物质的原子理论之前, 对等离子体态真正进行研究是不可能的。1897 年, J. J. Thomson 对不同稀薄气体, 不同材料电极制成的阴极射线管施加电场和磁场, 精确地测定构成阴极射线的粒子有同一荷质比, 为电子论提供了实验依据, 电子就成了最先发现的亚原子粒子。

在等离子体研究的发展史上, 有一位科学家必须提及: 他就是美国的化学物理学家, 1932 年诺贝尔化学奖的获得者——欧文·朗缪尔。

正是朗缪尔, 在 1928 年首次采用了“Plasma”这个词

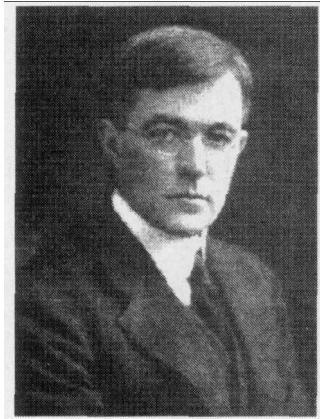


图 1 欧文·朗缪尔

(中译为等离子体) 来定义包含了电子、离子、中性原子和分子, 具有相当电离度, 总体呈电中性的气体状态。1924 年朗缪尔提出静电探针诊断法, 将钨丝做的诊断探针伸入到等离子体内部, 通过改变探针上的偏置电压, 得到相应的电流从而得到其伏安特性。再由曲线算出等离子体内温度、密度等参数(包括电子温度, 密度等) 这个方法至今仍在不断改善和应用。

同期, 朗缪尔和 L. 汤姆斯在实验室中发现了等离子体的振荡现象, 即等离子体中的电子在自身惯性作用和因正负电荷分离所产生的静电恢复力作用下发生的振荡。这种等离子体振荡的频率即等离子体频率, 亦称为朗缪尔频率。

与此并行, 20 世纪以来对空间等离子体的探讨也随着科技发展而深入。关于大气上层的电离层的研究首先随着无线电通讯技术开展起来。1901 年马可尼 (G. W. Marconi 1874~1937, 意大利人, 因在无线电通讯方面杰出贡献获得 1909 年诺贝尔物理奖) 成功试验了从加拿大到英国之间横跨大西洋 3 000 km 的越洋无线电通讯。因地球是圆球形的, 电磁波的传播是直线的, 如何解释这个试验结果? 1902 年, A. E. 肯涅利和 O. 亥维塞先后预言在大气上层存在能反射无线电信号的电离层, 即肯涅利-亥维塞层。电离层 (ionosphere) 是地球大气上层的电离区域。60 km 以上的整个地球大气层区域均处于部分电离或完全电离的状态。一般把部分电离的大气称为电离层, 而最上层完全电离的大气区域称为磁层。或统称为电离层。地球大气上方的电离层一直伸展到近 1 000 km。其中存在相当多的自由电子和离子, 能使无线电波反射、折射、改变速度和方向。这些带电粒子是由于受地球以外的射线, 主要是太阳辐射对中性粒子和空气分子作用而电离的。1924 年英国物理学家阿普尔顿 (1892~1965, 1947 年获诺贝尔物理奖) 用连续波法探测了电离层, 证实了肯涅利-亥维塞层的高度范围。1925 年美国 G. 布赖特和 M. A. 杜福 (G. Breit, M. A. Tuve) 发明电离层垂直探测装置, 阿普尔顿对他们的脉冲技术作了改进和应用。

1949 年人们应用 V-2 火箭, 安装了朗缪尔探针, 开始了大气上方电离层的直接探测。而 1957 年人造地球卫星发射成功后, 电离层的探测进入一个新的时期。

等离子体物理基础的建立是在 1930~1950 年之间, 当时研究的天体方面除了电离层中射频波的传播外, 还包括太阳的活动如何导致地球上的极光现象和磁暴, 磁场在恒星, 银河系及星际介质中起的作用等。

本文于 2010-04-10 收到。

1) E-mail: gulang66@yahoo.com, gulanghappy@126.com

19世纪末及20世纪初，科学家发现了放射性及原子内部结构。著名的物理学家爱因斯坦(Albert. Einstein, 1879~1955, 1921年获诺贝尔物理奖，创建狭义相对论和广义相对论)1905年发表了狭义相对论——以光速不变原理出发的时空理论，提出了著名的质能守恒定律， $E = mc^2$ 。这个定律解决了长期存在，令人困惑的恒星能量来源(包括太阳)的问题，并成为人类向上天学习，利用原子核能量的理论依据。

核聚变现象的研究最早起始于1919年，美国物理学家阿斯顿(F.W. Aston)发现了轻核聚变反应现象，并和卢瑟福(L. Rutherford)一起，证实了轻元素以足够大的能量碰撞引起核反应的现象。10年后，阿特金森(R. Atkinson)和奥特曼斯提出了太阳内氢原子在几千万度高温下聚变的假设。1938年召开了第一次世界物理学家和天体物理学家的交流会议。在此基础上，美国物理学家贝蒂(H. Bethe, 1967年诺贝尔物理奖获得者)提出了热核反应是长期维持恒星能量消耗的主要能源。近年来发现越来越多的高能物理现象，狭义相对论亦成为解释这些现象的一个基本理论工具。

第二次世界大战中著名物理学家费米(E. Fermi)和爱德华·泰勒(E. Teller)提出了氢弹原理和核聚变反应堆的设想。

第二次世界大战以后，科学家对原子能的和平利用进行了大量研究。在建立及发展核裂变反应堆的同时，从太阳的能源得到启发，开始了核聚变反应堆的可行性研究。因为核裂变反应堆也有与煤、石油等化石燃料类似的原料及环境污染问题，而核聚变反应堆资源丰富、洁净、安全，被认为是人类的最终能源。受控核聚变举步艰难。根本原因在于轻元素原子核的聚合远比重元素的原子核分裂困难得多。首先必须使聚变物质处于完全等离子体态，即电子与原子核分离，然后，当带正电的原子核达到够高的动能，它们才有碰撞聚合的可能。最先开始研究的是磁约束聚变反应堆，即用磁场来控制高温等离子体。1958年在第二届和平利用原子能国际会议上达成国际合作交流，公开研究计划协议，集中发展“托克马克”实验研究途径后，取得令人鼓舞进展。核聚变的科学可行性得到证实。90年代后国际合作的热核反应堆工程设计正式启动，从点火装置的实验阶段转到反应堆工程物理实验阶段。

20世纪60年代中，另一种方式称为惯性约束聚变是在不稳定的等离子体中实现核聚变的一种方法，开始了探索。1963年前苏联科学院巴索夫院士提出了激光引发核聚变的建议。并在1968年前苏联学者用实验证明，概念是正确的，可以探测到有个别的靶核释放出高能量的中子。我国物理学家王淦昌教授在1964年独立地在国内提出建议，70年代在上海实验证实原理可行性。只是对激光器的能量要求当时是望尘莫及的。这两种方案近几十年前取得重大进展。尽管离真正的能源还差得非常远，但使一个“异想天开”的想法变成了将来可能实现的愿望，经过了众多科学家的不懈努力。聚变核能的研究同时促进了许多先进等离子体科技的迅速发

展。如脉冲束，强激光束装置及激光等离子体相互作用机制，超导材料的应用发展，同位素分离技术等。

天体方面的等离子体研究进展，得益于高端探测技术的实现。

1931年在美国新泽西州的贝尔实验室里，大学刚毕业不久的美国工程师K. 杨斯基(Karl Jansky)接收到通讯的异常干扰信号，经过追踪、实验，最终发现它来自太阳系外的银河星系中心附近。揭开了来自太空的无线电波秘密，从而产生了一个新的观测手段。1937年，第一台抛物面型的射电望远镜就问世了。第二次世界大战后，射电天文学脱颖而出。上世纪60年代天文学上几项发现如宇宙微波背景辐射、类星体、脉冲星等均用射电望远镜观测得到。

也许不少人知道，最早的天空光学望远镜是伽利略制造的，虽然非常简单，但早在1610年1月第一次指向天空，靠它发现了太阳上的黑子。

20世纪20年代天文学家普遍认为宇宙就是银河星系，且认为宇宙是静止的。美国天文学家哈勃(Edwin P. Hubble, 1889~1953)通过当时最大的望远镜发现所观察到的星云并非都在银河系内。他分析了一批亮度周期性变化(称之为变星)的星云<sup>\*</sup>，断定距离地球远达几十万光年一定位于银河系之外。且这些星系看起来都在远离我们而去，距离越远，远离的速度越快。换句话说，宇宙是在不断膨胀的，并于1929年发现宇宙膨胀的速率(星系的运动速度同距离的比值)是常数，后被称之为“哈勃”常数。

由于地球大气的扰动会造成所观测天体像的畸变，在1990年，由美国的航天飞机将一台巨大的以“哈勃”命名的太空望远镜发射入太空。在离地球表面580km的轨道上运行。它的重量达到 $1.1 \times 10^4$ kg。镜面直径达240cm，运行至今已20年。2009年，宇航员进行了最后一次太空大修，借助例行维护和升级，“哈勃”的功率比最初发射时提高了100倍，获得大量的图片、资料。哈勃太空望远镜的观测发现让从行星到宇宙的几乎所有天文学领域经历了一场革命。观测能力的增强，使我们能根据有关等离子体过程的理论模型，对很多天体物理对象进行分析描述。等离子体物理可能或正成为诠释天文观测结果的主要出发点。空间研究寻求对星球甚至太阳系尺度上自然过程的有益理解，以确定人类对其所处环境的依赖关系。尽管人类从古代就观察宇宙空间，但直到20世纪才将天体和等离子体联系起来。同一门学科——等离子体物理，对聚变和空间研究两者都是至关重要的。而且太阳系中的等离子体现象已被证明是一般天体过程的样板。

最早的低温等离子体应用是霓虹灯。荧光粉发光型低气压放电，1926年传入中国(上海)。低气压汞蒸汽灯又称荧光灯在1939年纽约世博会上大规模使用。大约上世纪80年代，随着微电子工业、材料工业发展、低温等离子体的应用研究异军突起，给人类生活带来了显著变化。一些在空间领域低温等离子体研究人员，也转向以材料等为导向。80年代一个最突出的成果就是：采用等离子体发生器代替传统的

芯片化学刻蚀、清洗，使计算机线路、元件微型化，从而出现了计算机小型化及大规模集成电路芯片。人们发现等离子态，由于具有活性粒子，创造了独特的能量交换环境，又因可以通过电磁场、温度等调控，各方面的应用，研究为低温等离子体科学的应用发展带来了各种机遇和挑战<sup>[3]</sup>。

现在，低温等离子体物理与应用已是一个具有全球影响的重要的科学与工程，对高科技经济的发展及传统工业的改造均有重大影响。科学家预测，21世纪低温等离子体科学及技术将会产生突破，等离子体辅助加工被用来制造特种优良性能的新材料，研制新的化学产品和工艺，改造和精制材料及表面等等，均有广泛的工业前景。

\*：造父变星：是一类高光度周期性脉动变星，即其亮度随时间呈周期性变化。因典型星仙王座\delta（中文古代名造父而得名。根据造父变星的周光关系，可以确定星团，星系的距离。因此造父变星被誉为“量天尺”，北极星也是一颗“造父变星”。如果两颗造父变星的光变周期相同则认为它们的光度亦相同，这样只要用其他方法测量了较近造父变星的距离，就可以知道周光关系的参数，进而就可推出遥远星系的距离。

## 参 考 文 献

- 1 等离子体和流体. 美国等离子体和流体物理学专门小组. 中译本 1996 年霍裕平等译. 1986 (Plasmas and Fluids ISBN 7-03-004686-2 National Academy Press, 1986)
- 2 今日天体物理. 中国科学技术大学天体物理研究室. 上海: 上海出版社, 1980 年 11 月
- 3 等离子体物理学科发展战略研究课题组. 核聚变与低温等离子体——面向 21 世纪的挑战和对策. 北京: 科学出版社

## 把物理思想注入于数学之中

——以黏性流体力学的 Navier-Stokes 方程的求解为例，谈剑桥大学 G.K.Batchelor 教授的一个学术思想

温景嵩<sup>1)</sup>

(南开大学, 天津 300071)

**摘要** 本文指出有 3 条途径可以把物理思想注入于数学之中，来化解数学难点从而求解：(1) 引入适当的物理模型；(2) 引入各种近似；(3) 引入各种变换。本文还以黏性流体力学为例，说明近 200 年来历代流体力学家是如何运用上述 3 种办法来求解著名的描述黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程，使破解此难题的工作逐步推向前进并取得各自的成功。

**关键词** 黏性流体力学，Navier-Stokes 方程的求解，物理思想

To inject physics into mathematics(把物理思想注入于数学之中)——这是 George Keith Batchelor 教授的思想。

Batchelor 教授是剑桥大学 1959 年创办的应用数学与理论物理系的创办人和系主任，闻名世界的国际理论物理大师霍金教授就是 Batchelor 的这个系于 1966 年培养出来的。虽然 Batchelor 是当代国际流体力学大师，但是在在他所发表的流体力学划时代名著《流体力学导论》上，他所使用的学衔却是 Professor of Applied Mathematics，而不是 Professor of Fluid Mechanics。

应用数学教授 Batchelor 对应用数学所下的定义如下：

(1) 初看起来应用数学的含意可以表述为：你所遇到的

物理问题中的未知变量可以用一个微分方程来描述，然后你就要采用某一种数学技巧来求解，这就是应用数学的意义。

(2) 然而上面的表述包含有一个很大的缺点，那就是在上述的表述中它没有提到物理思想，而这正是问题的根本。于是，Batchelor 就给出了他自己的应用数学的定义：要把物理思想注入于数学之中，才能解决问题。这构成了应用数学的灵魂。

以下讲一讲作者自己学习 Batchelor 这个思想的体会：由于一般物理问题所遇到的微分方程求解难度非常大，其难度远远超过了现有的数学技巧所能解决的范围，所以应用数学家就只能根据他所面对的某一个特定问题自身的物理特点来化解数学难点，简化方程从而得到这个特定问题的解。这就是把物理思想注入于数学之中来解决问题的真实含义。

有 3 种办法把物理思想注入于数学之中来化解数学难点：

- (1) 引进特定的物理模型来化解数学难点；
- (2) 引进各种近似来化解数学难点；
- (3) 引进各种变换来化解数学难点。

下面从黏性流体力学的例子讲起。把牛顿力学第二定律应用于不可压缩黏性流体这样的连续介质就会得到著名

本文于 2010-04-22 收到。

1) 温景嵩，教授，博士生导师和学术带头人，主要研究方向为微大气物理、气溶胶力学和气候动力学。E-mail: cswen@nankai.edu.cn