



近代物理讲座

第五讲 等离子体物理与受控热核反应简介

张承福

(北京大学物理系)

一、什么是等离子体

1. 等离子体是物质的第四态

随着温度的升高,一般物质可经历固态、液态和气态,统称物质三态。在很高温度下,中性的分子和原子将离解和离化,变成电子和离子,物质进入一种新的状态——等离子体态。因此,等离子体可称为物质的第四态。

如上所述,等离子体就是由电子和离子组成的混合物(在未完全电离的等离子体中,还可包括一部分中性的原子和分子)。电子和离子分别带负、正电荷,但是它们的电荷总量是相等的,因此从总体来看,等离子体还是呈电中性的。需要指出,并非所有包含电子、离子的气体都能称为等离子体,这里有一个量的要求,称为等离子体条件。在此条件下,等离子体的运动显著有别于普通中性气体运动,具有自己独特的运动规律,这也就是等离子体物理研究的对象。等离子体条件的定性表述是:(1)准中性条件;(2)集体效应起主要作用。其定量表述及含义我们将在本文第三节中谈到。

2. 自然界的等离子体

据估计,宇宙中99.9%的物质处于等离子体状态。此估计并不准确,但是考虑到具有巨大质量的恒星、白矮星、中子星、星云等宇宙物质都处于等离子体状态,说“绝大部分物质处于等离子体状态”则是可信的。在我们生活的地球上却很少见到等离子体,即地球恰好处于这“绝小部分”之中,这是因为等离子体存在的条

物理

件与人类生存条件是不相容的。当电离与复合达到平衡时,电离率由所谓沙哈方程给出:

$$\frac{n_i}{n_n} \simeq 2.4 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/kT}, \quad (1)$$

式中 n_i 和 n_n 分别是离子和中性原子的密度(每立方厘米中的粒子数), T 是气体温度(K), U_i 是电离能, $U_i(\text{氢})=13.6\text{eV}$; $U_i(\text{氮})=14.5\text{eV}$ ($1\text{eV}=1.6 \times 10^{-12}\text{erg}$,在等离子体物理中,常以eV作为温度单位, $1\text{eV}=11600\text{K}$)。由(1)式可估计出室温大气中的平衡电离率为 10^{-12} ,是微乎其微的!只有在极高温的条件下(10^4K 时,还只是部分电离的等离子体,完全电离的等离子体一般在 10^5-10^7K 范围)或者在极低密度的条件下(如星际空间中)才能形成等离子体。这就是在地球上很少见到等离子体的原因。实际上,地球上及其周围还是有等离子体的。就自然现象来说,闪电、极光等就是一种等离子体现象;地球外层空间约五十公里到几万公里的区域也有弱电等离子体,它们构成电离层,对地球的环境和通讯有重要影响。至于气体放电、电弧、日光灯、火箭的高温尾气等等,则是人工的或实验室的等离子体。

3. 等离子体物理与各学科及技术的关系

(1) 气体放电(气体电子学)

对等离子体的研究,最初就是从气体放电研究开始的。等离子体的一些重要现象,如朗缪尔振荡、德拜屏蔽等也是由此而发现的。

(2) 空间物理学

对电离层的研究以及太阳风(由太阳发射出来的带电粒子流)与地球磁场的相互作用的

研究等等都是等离子体物理的一个重要应用。近二、三十年来,由于人造卫星技术的发展,可直接测量空间等离子体的性质,这对空间物理学及等离子体物理学的发展是一个很大的推动力。

(3) 受控热核聚变

从五十年代以来对受控热核聚变的研究开创了现代等离子体物理学,同时受控热核聚变又是当前等离子体研究的一个重要目标。此问题下面将专门介绍。

(4) 现代天体物理学

如上所述,宇宙中多数物质处于等离子体状态,需用等离子体性质研究其运动规律。此外,对于星系,虽然其中各个星体并不带电,但由于引力与静电库仑力的相似性,也可用等离子体动力学理论推断星系的发展等等。

(5) 磁流体发电及离子推进器

如图 1(a) 所示,高温等离子体气体通过磁场区,由于洛伦兹力的作用,离子和电子分别向上、下偏离,从而使两个电极产生电压。这样,气体的动能直接转换为电能,避免了热循环的低效率,是一种很有前途的能量转换技术。

将此原理反过来应用,就可制造适用于星际飞行的离子推进器 [图 1(b)]。在电极上加

电压,驱动电流 j 通过等离子体,洛伦兹力将等离子体抛离火箭,从而推动火箭前进。

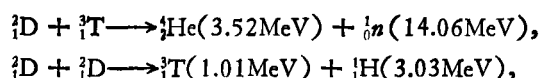
(6) 低温等离子体技术

低温等离子体技术如电弧切割、焊接、喷涂等,也都与等离子体性质有关。

二、什么是受控热核反应(聚变)

1. 核聚变与能源

当前人类消耗的主要能源仍是煤、石油、天然气等储量有限的化学能源。核能源却是一种很有前途的替代能源。它有两类。一类是裂变反应:由中子打击较重的核(如 U^{235}),使之分裂成两个较轻的核,同时放出若干轻粒子(如中子等)及大量能量。原子弹及原子能反应堆都属于这一类;另一类是聚变反应:由两个较轻的核聚合成一个较重的核,同时放出若干轻粒子及大量能量。条件最低、最易实现的两种聚变反应是



其中氘(D)、氚(T)是氢的同位素,式中括号内给出粒子携带的动能。太阳等恒星的巨大能量就是来源于聚变反应。氢弹能量也来自聚变反应,但是氢弹是靠原子弹引爆的,其能量起点太大,只能是破坏性的,不属于受控热核反应。受控热核反应(聚变)研究的目的是在人类控制的条件下实现聚变反应以取得能量。

2. 聚变反应的优点及其困难

聚变取能的优点是:(1)燃烧价值大,即单位质量燃料释放的能量大。例如,1kg 氘聚变时放出的能量相当于 4kg 铀的裂变能,也等于 6.6×10^6 kg 石油的燃烧能;(2)储量大。氘可从海水中提取,每公斤海水含氘 0.03g。由于海水的巨大储量,据说按现有的耗能量估算,足够使用几百亿年!更何况还有其它轻元素可以使用,所以实际储量可说是无限的;(3)与裂变反应比较,聚变的放射性废物较少,易控制,较安全。

所以聚变取能的前景是非常吸引人的。但

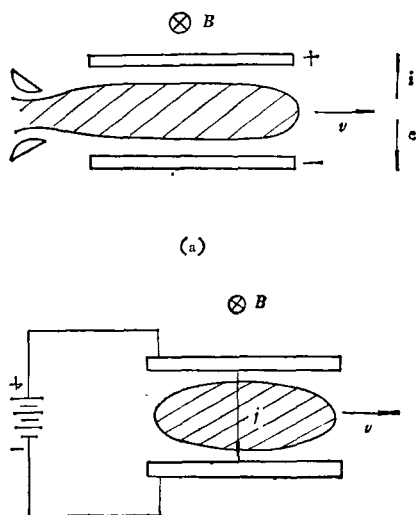


图 1

是它的实现也是艰巨和困难的。困难的基本原因在于：裂变是由中子打击核而发生反应的，中子不带电，容易进入核。而聚变则是由两个轻核接近到核作用范围（约 10^{-13}cm ）而发生反应的。反应条件下，核以离子形式存在，离子带正电，要使之接近必须克服巨大的库仑排斥力。也就是说这些核必须具有巨大的热运动能量才行。据估计，至少要达到 10^7-10^8K 的温度时，才能有足够的高能核可克服库仑排斥力以实现聚变反应。这也是称为受控热核反应的原因。

3. “点火条件”——劳逊判据

根据如下粗略的估计，实现聚变反应的起码要求是：聚变反应释放能量的功率应该等于由各种原因引起的能量损失功率，即

$$\left(\frac{n}{2}\right)^2 PQ = 3nT/\tau_E, \quad (2)$$

其中 P 是反应几率，它是温度的灵敏函数； Q 是每次反应放出的能量； $3nT$ 是电子和离子的热运动能量； τ_E 是能量损失特征时间。由 (2) 式可估计出“点火条件”为

$$\text{对 D-T: } T \lesssim 5 \times 10^7 \text{K} \quad n\tau_E \lesssim 10^{14} \text{s/cm}^3,$$

$$\text{对 D-D: } T \lesssim 2 \times 10^8 \text{K} \quad n\tau_E \lesssim 10^{16} \text{s/cm}^3.$$

实现上述条件是很困难的，而要取得可用的能量，则条件更高，任务更艰巨。

4. 受控热核反应与等离子体物理的关系

受控热核反应研究由三方面组成。一是核物理的研究，如反应截面的测量和计算等等，这方面已基本清楚；二是工程技术研究，它涉及高真空、高压、强磁场、大电源技术以及高功率粒子束源、微波发射源、辐射防护设施等；三是高温等离子体性质的研究，这也是物理工作者的主要任务。在热核条件下，反应物处于高温等离子体状态。怎样使它加热到几千万度的高温——加热问题，并且维持足够长的时间而不损失——约束问题，这是研究的两个主要课题。迄今为止，受控热核反应研究中遇到的困难主要在于高温等离子体的复杂行为。出现的各种不稳定性和各种“反常”现象影响着等离子体的加热和约束。所以，对高温等离子体性质的研究和受控热核反应的实现是不可分割的。

5. 实现热核反应的两大途径

在恒星中，高温等离子体的强大压力是靠恒星的巨大引力来平衡的。在地球上，这是不可能的。为约束等离子体，目前正沿两条途径探索。一是所谓“惯性约束”途径，也即不加特殊约束措施，在极短的时间内用高功率能源将等离子体加热并压缩到高温、高密度状态 ($T \sim 10^7-10^8\text{K}$, $n \lesssim 10^{22}\text{cm}^{-3}$)，在因惯性而尚未飞散的极短暂时间间隔内即实现反应。氢弹就是一例，它用原子弹引爆，但是不属于“受控”范围。高功率激光及高能电子束也是一种可用的能源，用以“引爆”D-T 小球，以实现小规模受控热核反应，这方面的问题正在研究中。此种试验还可用于模拟氢弹爆炸的效果等。另一条途径就是用磁场来约束等离子体，即所谓“磁约束”途径。这是当前的主要研究途径，是一大类研究的总称，具体形式还是很多的。如加热方式就有微波加热、欧姆加热、微波加热、中性粒子束加热等。至于约束磁场的形态更是花样繁多（在第三节中，通过对等离子体若干性质的叙述将介绍几种磁约束方式）。

三、等离子体的若干基本性质

等离子体由带电粒子组成，电磁场对其运动有重大影响，同时，等离子体的运动又将改变空间的电磁场。因此，两者的运动和演变是耦合在一起的，运动一般是很复杂的。对此体系的完善描述应是从统计物理及电动力学出发的统计性描述，但是一般情形下这是一个很困难的课题。实际上，根据不同条件和所考虑的具体问题，可用不同的近似方法描述和研究等离子体。主要有三种方法：单粒子描述、磁流体描述和统计描述。它们各从不同的侧面研究等离子体的性质，互相配合和补充，以构成对等离子体全貌的了解。下面只介绍单粒子描述及磁流体描述中的几个主要问题。

1. 单粒子描述

研究稀薄等离子体（粒子间的“碰撞”可忽略）中电子和离子在确定的电、磁场中的运动规

律。

(1) 磁场可约束等离子体：在均匀磁场 B_0 中，在垂直于磁场的平面内，粒子 (e, i) 作回旋运动 [图 2(a)，从三维空间看，则是螺旋运动]。回旋频率 $\Omega = \frac{eB_0}{mc}$ ，半径 $r_L = \frac{v_{\perp}}{\Omega}$ ，称为拉莫尔半径，其中 v_{\perp} 是速度的垂直分量。可见，磁场使粒子由三维的自由运动限制为沿力线方向的一维的自由运动了。

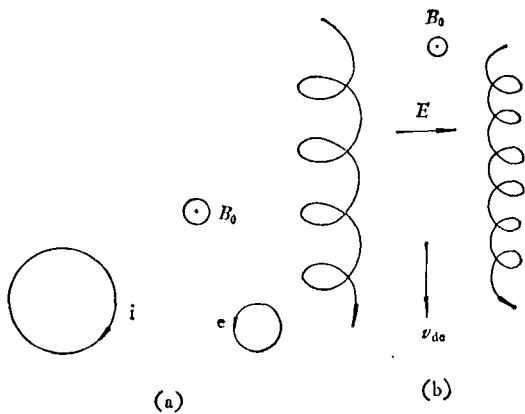


图 2

(2) 电漂移与外力漂移：如果存在垂直方向的电场 E_{\perp} 或外力 F_{\perp} ，则仍可导致粒子的横向运动。以 E_{\perp} 为例，我们以 V_{dc} ($V_{dc} \perp B_0$ ，大小待定)运动的参考系来观察此问题。在运动参考系中，电场变为

$$E'_{\perp} = E_{\perp} + \frac{1}{c} V_{dc} \times B_0.$$

如果适当选取 V_{dc} ，使得 $E'_{\perp} = 0$ ，也即令

$$V_{dc} = c E_{\perp} \times \frac{B_0}{B_0^2}, \quad (3)$$

则在此参考系中，粒子作简单的回旋运动。回到实验室参考系，则可看到粒子一方面以 Ω 频率回旋，同时又以 V_{dc} 速度作横向漂移运动 [图 2(b)]，即在 E_{\perp} 作用下，电子和离子以同样速度在垂直于 E_{\perp} 及 B_0 的方向上作漂移。这将影响横向约束。

同理，外力 F_{\perp} 也会引起漂移。只需将(3)式中的 E_{\perp} 改成 F_{\perp}/e 即可，即

$$V_{dc} = c \frac{F_{\perp} \times B_0}{e B_0^2}. \quad (4)$$

可见外力引起的漂移对电子和离子是反方向的。

(3) 磁力线的弯曲和磁场的非均匀性也能引起粒子横向漂移，称为磁漂移。弯曲磁力线等效于粒子受到离心力 $F_{\perp} = \frac{mv_{\parallel}^2}{R}$ 的作用，其中 v_{\parallel} 是平行速度， R 是磁力线的曲率半径 [图 3(a)]。按(4)式有

$$V_B = c \frac{mv_{\parallel}^2}{R_e B_0} \frac{R}{B_0} \times \frac{B_0}{B_0}. \quad (5)$$

磁场的非均匀性也可引起横向漂移：

$$V_{\nabla B} = \frac{\mu}{e B_0^2} B_0 \times \nabla B_0, \quad (6)$$

其中 $\mu = mv_{\perp}^2/2B_0$ 是粒子的磁矩。漂移的原因可从图 3(b) 定性说明：磁场的非均匀性导致粒子轨道曲率的不均匀性，磁场较强处(图中的右侧)曲率半径变小，从而导致漂移。电子与离子的回旋方向相反，因而漂移方向也相反。

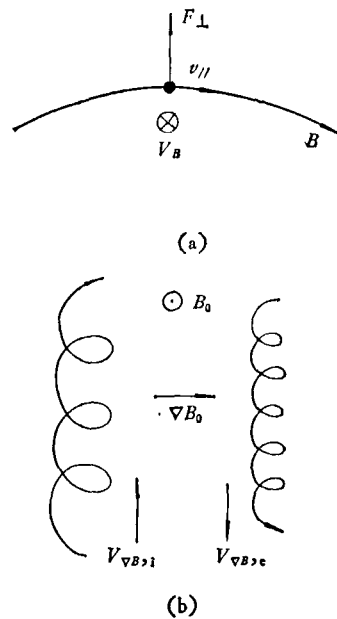


图 3

总之，电场、外力、磁力线的弯曲和磁场的非均匀性都将导致横向漂移，影响等离子体约束。

(4) 在缓慢变化的磁场中，磁矩是绝热不

变量。电流圈的磁矩是 $\mu = \frac{1}{c} IS$ 。对于作回旋运动的粒子, $I = e \frac{Q}{2\pi}$, $S = \pi r_L^2$, 所以 $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B_0}$ 就是磁矩。可以证明, 如果磁场的空间变化是缓慢的, 即

$$\left| \frac{v_{\perp}}{Q} \frac{1}{B_0} \frac{dB_0}{dz} \right| \ll 1,$$

或者磁场的空间变化是缓慢的, 即

$$\left| \frac{1}{Q} \frac{1}{B_0} \frac{\partial B_0}{\partial t} \right| \ll 1,$$

则 μ 是绝热不变量, 即 μ 近似地是常数。

此性质可用来限制等离子体的纵向运动, 以约束等离子体。所谓“磁镜”或“磁瓶”装置就是按此原理构造的 [图 4(a)]。由磁矩守恒以及洛伦兹力不作功及粒子能量守恒 $\frac{1}{2} m (v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2) = E_0$ 常数, 可得

$$v_{\parallel} = \pm \sqrt{\frac{2}{m} [E_0 - \mu B_0(z)]}, \quad (7)$$

可见磁场增强时 v_{\parallel} 下降。对多数粒子, 存在 $v_{\parallel} = 0$ 的反射点, 这些粒子就可较长时间地被约束在磁镜装置中。其实, 地球磁场也形成磁镜形态 [图 4(b)], 使太阳风带来的带电粒子长时间地约束在该区域内, 形成电离层。

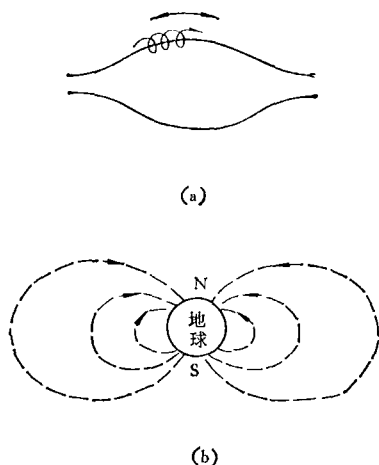


图 4

磁镜中的磁力线是通向外界的, 属于“开瓶装置”, 正如一个开口的瓶子, 总有部分粒子要物理

沿磁力线跑走的。为改进约束, 一种措施是以各种方法来“堵漏”, 使约束有所改善, 但是总不能完全堵住。另一种办法则是将磁力线闭合起来, 制造闭合磁位形的装置。

(5) 一种闭合磁位形——环形装置: 如果将磁力线弯成环形, 装置外形象汽车轮胎, 就没有终端损失了。但是, 简单的环形磁场不行 [如图 5(a) 所示], 因为环形磁场是不均匀的, ∇B_0 指向中心轴线, 磁漂移会引起上、下方的电荷积累, 产生向上的电场。在此电场作用下, e, i 将一起向外漂移, 破坏了横向约束。

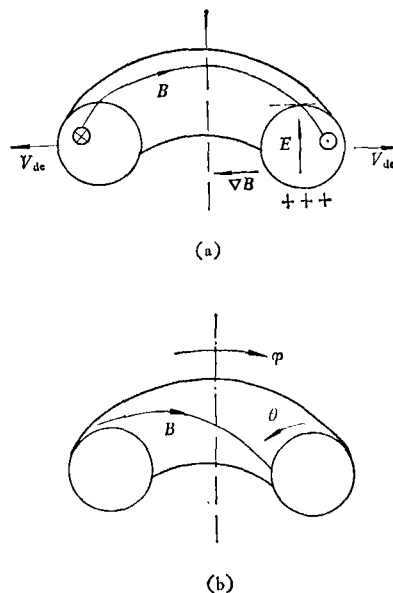


图 5

经过很多试验和研究, 目前找到的一种较好的磁场位形称“托卡马克”位形。其主要特点是, 除了有沿大环方向的磁场 B_{ϕ} 外, 还有由环向电流产生的角向磁场 B_{θ} [图 5(b)],

$$B_0 = B_{\phi} + B_{\theta} \quad \left| \frac{B_{\theta}}{B_{\phi}} \right| \ll 1.$$

磁力线不仅沿大环方向旋转, 而且还沿 θ 角向旋转。磁力线的这种旋转性可以大部分抵消磁漂移的不良后果, 改进了约束性能。这是一种很有前途的途径, 也是当前各国研究的重点之一。

以上表明, 单粒子描述可以阐明等离子体部分性质, 但也只是部分性质。其它如宏观的

平衡、稳定性以及输运过程等许多性质则必须由别的描述才能解决。

2. 磁流体描述

这是一种集体的描述，它将等离子体看成单种或多种(电子及各种离子)流体，此流体的运动则与电磁场的变化互相耦合。等离子体的宏观平衡、稳定性、集体振荡及各种波动现象等的性质均可从这种描述中得到认识。

(1) 电子等离子体振荡(朗缪尔振荡)

在电中性的等离子体中，设想由于扰动，某区域中的电子在 x 方向移动了 x 距离(图 6)，离子质量较大，可认为是不动的均匀背景。这将产生空间电荷，电荷面密度 $\sigma = n_0 e x$ 。类似于平行板电容器，此电荷产生的空间电场为

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi n_0 e x.$$

因此，电子运动方程为

$$n_0 m_e \ddot{x} = -n_0 e E = -4\pi n_0^2 e^2 x,$$

亦即

$$\ddot{x} = -\omega_{pe}^2 x, \quad \omega_{pe} \equiv \sqrt{\frac{4\pi n_0 e^2}{m_e}}. \quad (8)$$

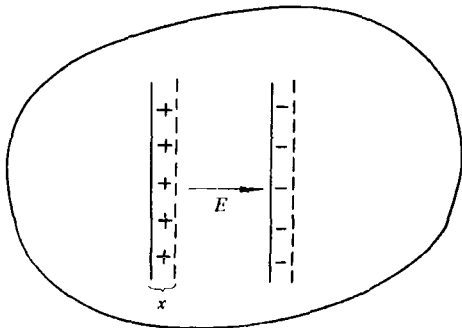


图 6

可见电子将作简谐振荡， ω_{pe} 代表振荡的特征频率， ω_{pe}^{-1} 代表等离子体一旦偏离电中性后，恢复电中性的特征时间。如果再考虑热压力等，则此振荡将以波的形式传播。 ω_{pe} 在等离子体中起着重要的作用，其重要特性之一是：对于 $\omega < \omega_{pe}$ 的电磁波，不可能进入等离子体，而将在其表面被反射回来。此性质类似于良导体对电磁波的屏蔽效应。不过在金属导体中，由于电子密度很高 ($\sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$)，除了极高频的 X 射线外，几乎所有电磁波都被反射，

而在等离子体中，密度变化范围很广，可分别反射和屏蔽不同波长的电磁波。这一性质对于微波通讯也很重要，正是利用地球周围电离层对微波的反射性质，地球两侧的微波通讯才成为可能。

(2) 德拜长度：如果上述电子振荡是由于热涨落所造成的，则其振幅应由下式确定：

$$\left(\frac{m_e \dot{x}'}{2}\right)_{\max} \simeq \frac{T_e}{2},$$

于是可得振幅 x_0 为

$$x_0 = \lambda_{De} \equiv \sqrt{\frac{T_e}{4\pi n_0 e^2}}. \quad (9)$$

此长度即称为德拜长度。它代表由于热运动而导致的偏离电中性的特征尺度。例如对于 $T_e = 10^6 \text{K}$ ， $n_0 = 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 的等离子体， $\lambda_{De} \simeq 7 \times 10^{-4} \text{cm}$ ，这是很小的尺度。 λ_{De} 也代表等离子体对空间电荷的屏蔽尺度，因为点电荷在真空中的电势为

$$\varphi(r) = \frac{q}{r},$$

若将它放在等离子体中，则由于等离子体的屏蔽效应，可证明电势为

$$\varphi(r) = \frac{q}{r} e^{-r/\lambda_{De}}. \quad (10)$$

增加了因子 $e^{-r/\lambda_{De}}$ 。当 $r > \lambda_{De}$ 时， $\varphi(r)$ 迅速下降， $\varphi(r)$ 的有效范围约为 λ_{De} 的尺度。所以 λ_{De} 代表等离子体屏蔽电荷的特征尺度。

(3) 等离子体条件

现在可将第一节提到的等离子体条件定量地表达出来。(a) 准中性条件： $L \gg \lambda_{De}$ ， $\tau \gg \omega_{pe}^{-1}$ ，其中 L 是等离子体线度， τ 是等离子体存在的时间。只有在此条件下，才有从总体上看是电中性的等离子体。(b) $n_0 \lambda_{De}^3 \gg 1$ 。此式表示以 λ_{De} 为半径的球内的粒子数远大于 1。利用(9)式，将此条件改写一下，就容易看出其物理意义了。

$$n_0 \lambda_{De}^3 \simeq \left[\frac{T_e}{e^2/d}\right]^{3/2} \gg 1, \quad (11)$$

式中 $d = n_0^{-1/3}$ 代表粒子间的平均距离； e^2/d 则代表粒子间的平均相互作用势能。不等式

(11) 表示热运动能量远大于相互作用势能,即“碰撞”效应是弱的(在这一点上类似于理想气体),其运动主要地由集体效应所产生的宏观电磁场所决定。

(4) 磁流体的各种宏观不稳定性

普通流体就有不稳定性,如轻液体托住重液体的状态就是不稳定的(即瑞利-泰勒不稳定性)。等离子体具有更多的“易变性”,其不稳定的可能性和方式比普通流体多得多。寻找稳定的平衡位形,是解决约束问题的重要课题。下面介绍几种常见的不稳定性及使其稳定化的措施。

(a) 交换不稳定性: 用磁场约束等离子体,若同时又有指向外侧的“重力”[图 7(a)],这种状态正如轻液体托住重液体一样,是不稳定的。等离子体与磁场将交换位置,以致完全破坏平衡。实际上,在等离子体中,真正的重力是不重要的,而弯曲磁力线中的离心力则可起等效“重力”的作用。因此,前面讨论过的磁镜位形在宏观上就是不稳定的[图 7(b)]。

克服此种不稳定性的办法是使各层磁场的

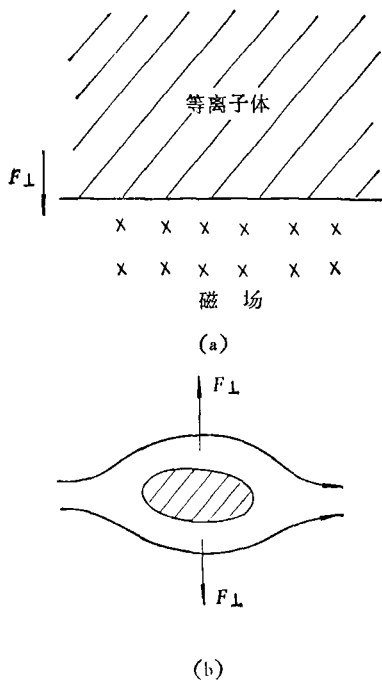


图 7

方向不断改变(即有“磁剪切”),使等离子体不容易从这种“交叉的篱笆”中钻出去。

(b) 腊肠型不稳定性: 设图 8(a)所示的等离子体电流柱已达平衡。由于扰动,柱体某处变细了些[图 8(b)],在该处磁场强度将增加(因为 $B \propto \frac{1}{r}$),磁压力增加,使得该处不断变细,以致柱体断开。克服此种不稳定性的措施是在柱体中事先加上一些纵向磁场,正如“钢筋”可以加固“水泥柱”一样[图 8(c)]。

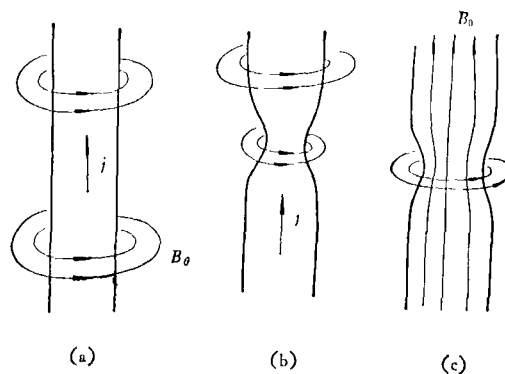


图 8

(c) 扭曲型不稳定性: 如果柱体的扰动如图 9(a)所示是扭曲状的,则扰动后磁压力的不平衡将继续使扰动加强,导致不稳定性。克服的办法是在柱体周围加上良导体的壁,利用导体壁的感应效应可阻止扰动的发展[图 9(b)]。

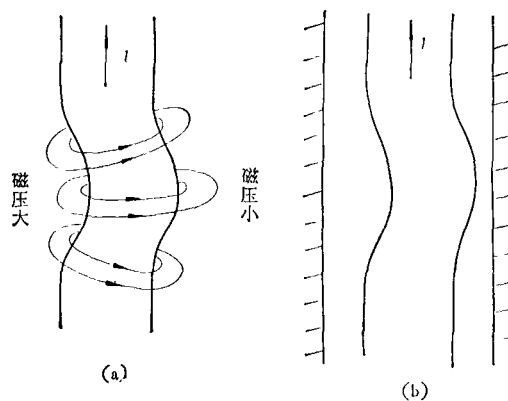


图 9

以上介绍的只是等离子体中的一些最简单的性质,等离子体物理学涉及的内容还很多。

例如,在等离子体中可以存在各种各样的静电波和电磁波,其数目及形态之多远超过普通介质中的波。这些波不仅可由外界激发,而且在一定条件下可自发增长起来,即存在各种不稳定性,而各种不稳定性可导致等离子体约束的破坏,或者使电阻、扩散、热导等输运率异常增加,即出现所谓“反常”输运等。又如,等离子体中粒子间碰撞的性质以及(由碰撞决定的)经典输运的定标规律(随温度等的变化规律)也与普通气体很不相同;而即使在很稀薄的“无碰撞”等离子体中,波与粒子间的共振相互作用仍可使波与粒子交换能量,导致波的阻尼(或增长),此即朗道阻尼(增长)机制,是等离子体的一个很重要的性质。总之,等离子体的性质是复杂而又丰富多采的,但由于篇幅关系,在这个简短的介绍中不能一一涉及了。

等离子体物理的研究已有一百多年的历史。

近二、三十年来,由于受控热核反应及空间物理等研究的需要和促进,等离子体物理有了很大的发展。因为还有很多问题、很多“反常”现象有待解决,所以又可以说它是一门有前途的新兴学科。在等离子体物理研究中,几乎所有经典物理的知识都将用到,在某些问题中也将用到原子物理、量子力学、相对论等知识;至于数学知识,高等数学、数理方程及计算机技术等也是必须的。因此,这也是一门综合性的学科。

参 考 文 献

- [1] F. F. 陈著, 等离子体物理学导论, 人民教育出版社, (1980).
- [2] 徐家骧、金尚亮, 等离子体物理学, 原子能出版社, (1981).
- [3] L. A. Artsimovich, Controlled Thermonuclear Reactions, Oliver & Boyd Ltd, (1964).

新实验技术在材料研究中的应用讲座

第十三讲 扫描超声显微镜在材料科学上的应用

殷 庆 瑞

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

G. A. D. Briggs

(英国牛津大学冶金、材料系)

一、引 言

大约四十年以前,苏联科学家 S. T. Sokolov 首先提出了超声显微镜的概念,那时由于技术条件的限制,不能制造出分辨率能与光学显微镜(光镜)相比较的超声显微镜(声镜)。随着微波声学、电子学、薄膜技术的发展,到了七十年代,又引起了人们对发展声镜的兴趣。其中美国的 Quate 教授和他的学生 Lemons 做了非常

出色的、开创性的工作。研制了世界上第一台能工作的机械扫描声镜。此后,在英国、法国、日本也相继开展了这方面的工作。中国科学院声学研究所也在 1980 年建立了国内第一台声镜实验装置,并取得了相当清晰的生物组织的图像^[1,2],受到了国际同行的称赞。

近年来,声镜之所以受到各国科学家的重视以及得到迅速的发展,主要是因为它的成象机理与通常的光镜不同。光镜成象主要取决于物质的光折射、光密度和相漂移,是物质的光学