

等离子体

物质第四态

〔苏联〕Д. А. 夫兰克-卡勉涅茨基 著

上海科学技术出版社

3

40

等离子体—物质第四态

〔苏联〕Л. А. 夫兰克-卡勉涅茨基 著

張 森 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书主要叙述等离子体的基本性质,简单地介绍了用导电流体模型和独立粒子模型研究等离子体的方法。对等离子体的取得、维持和诊断,等离子体在电磁场中的性状和运动,电磁波在等离子体中的传播,以及等离子体的振荡和不稳定性等作了较全面的介绍。最后讨论了等离子体中的碰撞和迁移过程,也适当地介绍了有关受控热核反应的实验装置。

本书内容简明扼要,多从基本概念讲起,并且不牵涉到复杂的计算。可供对等离子体有兴趣的一般科技人员和大专学生阅读,也可供初从事受控热核反应工作和初学等离子体物理学的专业人员参考。

本书付印前,已出版原书第二版(1963年),故部分内容曾按新版本作了修改。

ПЛАЗМА-ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Д. А. Франк-Каменецкий

Госатомиздат • 1961

等离子体-物质第四态

張 森 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

大东集成联合印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 4 排版字数 105,000

1965年6月第1版 1965年6月第1次印刷

印数 1-2,000

统一书号 13119·655 定价(科六) 0.55 元

作 者 的 話

这本书的任务是帮助初学的讀者認識有关等离子体的科学。它主要为工程师和技术員而写，但是我們力求使受过較少訓練——知識在中学水平以上的讀者也能了解本书。书中所有比較困难的地方都用小字印刷，在主要内容中所用的数学不超出初等代数的范围。为了解本书也需要有电学和磁学的基本概念，以及基本的电工技术与无綫电技术，所有这些都包括在現在的中学教学大綱之內。

本书不能作为通俗讀物。我們預料讀者欲熟識等离子体的愿望不会是曇花一現的。我們希望讀者愿意找更專門的书籍来扩大和加深有关等离子体的知識。因此，我們不仅不避免簡單的公式，而且也不避免最重要的專門術語。每一門学科都有自己的語言。要动身去旅行，我們不仅應該稍許認識一下地理，而且也應該知道那里的方言……。当然对每个新的術語都立即說明，并且用黑体字标出。

全书都采用高斯对称单位系，其中电学量用 CGSE 单位表示，磁学量用 CGS 系的 CGSM 单位表示。真空中的介电率和导磁率认为等于 1。

有关等离子体的科学正以广大科学家的力量蓬勃地发展着，这本书的篇幅不允许給他們全体以应有的表彰，我們要是只提到某些人，就会使其余的人受到委屈。因此，我們决定在人名上不給引証，除非它們在科学用語里已成为通用的詞汇。

等离子体这門年青的科学目前在不同知識水平的人們中間广泛地引起了濃厚的兴趣，我們希望这本书在他們中間找到自己的讀者。

目 录

作者的話	
等离子体——物质第四态	1
怎样得到等离子体	6
等离子体的诊断	9
准电中性和电荷分离	14
等离子体的极化	18
气体放电	19
等离子体热力学	20
基本过程	28
等离子体和辐射	29
电离的稳定态和平衡态	32
把等离子体当作导电的流体	35
場的扩散和等离子体的扩散	40
导电流体模型的应用	41
环形磁捕集器	43
电磁泵和等离子体的加速	44
磁流体力学流	46
双流体模型	48
等离子体在磁場中的导电性	51
把等离子体当作独立粒子系	53
漂移运动	55
电漂移	57
磁矩守恒	59
絕热捕集器	61
在非均匀磁場中的漂移	63
极化漂移	66
旋轉的等离子体	68
磁化电流	69
准流体力学近似	71
等离子体的磁流体不稳定性	73
收縮的不稳定性	76
用冻结磁場稳定	77
互換型或凹槽型不稳定性	79
反向磁場的扩散	81
等离子体中的振蕩和波	84
靜电等离子体振蕩	87
有离子参与的靜电振蕩	88
等离子体在磁場中的振蕩	91
在回旋加速频率附近的色散	93
斜波和振蕩的总分类	95
无綫电波通过等离子体	96
等离子体共振器和等离子体 波导管	101
振蕩的衰减和增长	103
等离子体中的冲击波	107
无規过程	108
“醉汉”游蕩	110
碰撞截面和射程	111
和中性粒子的碰撞	112
庫侖碰撞	114
热平衡的建立	118
磁場中的迁移过程	119
双极扩散	121
現代等离子体实验	122

等离子体——物质第四态

从在学校里的时候起，我们就一直习惯于认为物质有三态：固态、液态和气态。然而近几年来，物质在第四种特殊状态的性质日益引起人们的巨大注意，这种状态叫做等离子态。温度越高，物质的粒子越活跃。在固体里，原子和分子按照严格的规律整齐的排列；在液体里，它们可以运动，但是要受到一定的限制；在气体里，分子或者甚至原子都能自由地移动，不过原子内部的电子只能沿量子力学定律确定的自身轨道有规律地飞舞；最后，在等离子体内，电子已经脱离原子，并且能够完全自由地运动。失去一部分电子的原子和分子带有正电荷，它们叫做离子。等离子体就是由正负带电粒子按一定比例组成的气体，其总电荷等于零。自由运动的电子可以传递电流，因此换句话说，等离子体就是导电的气体。

到目前为止，电工技术上都用固态物质——金属作为电导体。在金属内也有自由电子，它们被高密度产生的力从原子内拉出。金属中的原子可以被挤压到其电子壳层被“挤破”的程度。在等离子体内是由灼热粒子快速运动产生的力，或由放电或光的作用使电子从原子内脱出。等离子体的新的奇特的性质，使它有希望作为电导体和高温介质在技术上得到广泛应用。在电工技术上等离子体较之金属更具有明显的优越性，它比金属即使不轻几百万倍，至少也轻几千倍。

关于物理学的等离子体不久以前才开始谈到，但是我们每个人都曾看到过等离子体。闪电和北极光的宏伟景象就是等离子体的真实面貌。任何人要是“欢喜”在电网上建立短路，也会遇到等离子体，在电极之间跳过的火花即由在空气中放电的等离子体组成。晚上沿大城市的街道散步，我们欣赏霓虹灯广告，没有想到在它们里面是氖或氙的等离子体在发光。任何物质，加热到足够高的温度都进入等离子体状态。这在带有硷金属（象钠、钾，尤其是

它們中最重的鉍) 蒸汽时最容易发生。普通的火焰也有某种程度的导电性。虽然电离程度很低,但它却是电离的,即是等离子体。这种导电性的原因是有极少的鈉的混合物,它可以根据发黄色的光辨别。要使气体完全电离,温度必須在几万度。

在我們地球上,物质的等离子体状态是非常罕見和特別的。但是在整个宇宙中正相反,罕見的是象我們地球这样冷的固体。宇宙中的物质多半是电离的,即处在等离子体状态。在恒星内电离由高温产生;在稀薄的星云和星际气体内,电离由恒星的紫外輻射引起。

在太阳系内,太阳完全由等离子体組成,它的质量比地球质量大三十三万倍。地球大气上层被太阳的輻射电离,即也由等离子体組成。这个上层大气称为电离层,远距离无綫电通訊可以依靠这个电离层。

在古代认为世界由四种基元或自然力組成:土、水、空气和火。土、水和空气相当于我們物质的固态、液态和气态;等离子体相当于第四种自然力——火,它在宇宙範圍内是主要的。

等离子体和气体之間沒有明显的界限,等离子体服从气体規律,并且在許多关系上类似气体。为什么我們說等离子体是物质的新的第四态呢?等离子体的新的特性表现在强磁場的作用下,这种等离子体叫做磁化的等离子体。

我們曾談到,在原子内部电子有規律地飞舞,而在等离子体内它們完全混乱地运动,就象分子在气体中一样。但是等离子体的最重要的性质正是其中粒子的运动可以調整,可以使粒子以“正規队形”运动。誰是指揮官使任性的电子服从严格的紀律呢?这是磁場。在原子内电子和核成小組飞舞;在固体結晶里它們被束縛在一定的地方;在磁化的等离子体内,它們大都按同样規律运动,好象一个整体。

一般气体粒子的运动只受到本身之間或与器壁之間碰撞的限制,等离子体粒子的运动可以被磁場限制。等离子体可以用磁壁来約束,用磁活塞来推动,封閉在磁捕集器内。在强磁場内,等离

子体的粒子圍繞磁力綫旋轉，沿着磁場粒子自由地运动。沿着力綫的自由运动和圍繞力綫的旋轉迭合得到螺旋形的运动。如果使等离子体橫着磁場运动，它会拖着力綫一起运动，就是說等离子体的粒子好象被“粘”在力綫上，或者說磁場好象“冻结”在等离子体内。不过这个冻结定律只在灼热的等离子体内有效。問題在于，在灼热等离子体内粒子一个个很快地飞驰，来不及互相“鈎住”。这种等离子体几乎不給电流阻力，它的电导率非常大。在低电导率的冷等离子体内，粒子之間在碰撞时相互作用，使磁場好象能够透过等离子体。

当我们談到“冷的”等离子体时，必須考虑到等离子体的温度范围完全不象我們习惯的那样，这里温度的单位用电子伏特，它等于 $11,600^{\circ}\text{C}$ 。对于温度在一万或十万度的等离子体，物理学家会说：“总共只几电子伏特——这是冷的等离子体”。灼热等离子体的温度应该最低限度用几百电子伏特計量，即在几百万度。假如气体沒有变成等离子体状态，就不可能加热到这样高的温度，因为沒有东西約束它。任何固体器壁面对着这样的炎热都不能支持，以致气体飞散。但是灼热等离子体可以被磁場約束。等离子体粒子在磁力綫周圍螺旋形地回轉，如果不和其他粒子碰撞，就不会离开自己的路程。在灼热等离子体内，就象在鉄路上一样，运动的安全工作組織得很好，碰撞是很少有的，不“出軌”时粒子不会飞到器壁上。約束灼热等离子体的磁捕集器的各种各样的設計都建立在这个基础上。

可惜，不仅碰撞使粒子离开磁力綫，而且有另外破坏粒子正常运动的原因——就是它們的集体相互作用。設想一条公路，汽車大队沿着这条公路行駛，一辆汽車就足以破坏运行的秩序，使之完全混乱。后面的将碰到前面的，前面的停下又妨碍后面的运行。这种混乱最初在一处，逐漸傳到整个队伍。这种很小的扰动引起普遍混乱的現象叫做**不稳定性**，在等离子体内常常发生。

近代物理学上最誘人和最困难的問題之一就是灼热等离子体的取得和約束。这里所指的是使物质加热到非常高的温度，在这

种温度下任何固体的器壁連短促的一刹那也不能支持。只有磁場可以約束灼热的等离子体，它使等离子体的粒子和器壁被不可穿透的障碍隔开，不让粒子飞到壁上或向器壁傳遞能量。不稳定性恰恰又是这种方法上的主要障碍。假如沒有不稳定性，就不难解决等离子体的約束問題，并且甚至不只用一种方法解决。

設想一个充滿等离子体的管子，把金属綫圈繞在这个管子上，让电流通过綫圈。这时綫圈变成电磁鉄，在管子内部产生磁場，磁力綫沿着管子方向。如果全部粒子按一定队形运动，則磁場不让它們飞到管壁上。但是沿着管子它們自由地飞舞，并且可以通过管端飞出。为了不让它們从管端飞出，可以采用两种方法。一种是把管子弯曲成环形，得到的物体好象面包圈，在几何上把它叫做“圓环”，这是环形磁捕集器；另一种方法是在管端产生更强的磁場，这个磁場不让等离子体从管内流出，因此把它叫做**磁塞**，或者說等离子体的粒子从强磁場区域被反射，因此也把它叫做**磁鏡**。

在环形捕集器內很容易加热等离子体。把捕集器充滿气体，并且在这种气体內产生强电流。沿气体通过的电流使气体变热，就象螺綫形电热絲或电灯泡中的細絲被电流燒热一样。因此气体能够变为等离子体状态，并且繼續变热。但是随着温度的升高等离子体的电阻急速下降，到一定温度时即不再变热。为了得到高温，曾提出用另外更近代的加热方法，这种方法是用高频放电或使等离子体被磁活塞很快地压縮。在磁塞捕集器內更方便的是注射預先被电場加速的快速离子，因此一开始就得到灼热的等离子体。但是所有这些加热方法都只在一定条件下，即等离子体不和固体器壁接触时才能适用。和器壁接触来加热等离子体就象在冰做的容器內煮沸水一样不可能。

为了使等离子体的粒子不碰到器壁，必須迫使它們按一定的队形运动，这也只有磁捕集器可以做到。但是不稳定性妨碍磁捕集器的工作。就象課間休息时乱跑的儿童們一样，电子和离子向不同方向飞散，随着飞散而逼近器壁，无益地耗費自己的能量。

碰到器壁的等离子体粒子从壁上打出制造器壁的物质 的原

子。因此，不稳定性使等离子体被外界杂质染污，杂质的重原子又以光和紫外线的形式发射更大的能量，因而能量的损耗进一步增加。代替灼热的等离子体，捕集器被器壁蒸发的冷的产物充满。

假如等离子体粒子的庞大队伍永远操练“齐步走”，则不论在环形捕集器内还是在磁塞捕集器内，它都同样能很好地被约束。可惜，实际上等离子体的队伍不守纪律，即发生不稳定性。整个物理学界已在向与等离子体的不稳定性作斗争方面进军。如果能够把等离子体征服，就会有广阔的前途。

在太阳内部，压缩的等离子体温度超过 $10,000,000^{\circ}\text{K}$ 。在这样高的温度下，原子核以非常猛烈的力相撞，以致它们自己之间结合，发生热核反应，使氢变成氦，并且放出巨大的能量。正是这种被太阳发射的能量直到目前还是我们取之不尽的能源。我们能不能“驯服”热核反应，使它按照我们的意志在地球上为我们服务呢？普通的氢即使在最高的温度下放出能量也很慢，只有在巨大质量的太阳里被重力强烈地压缩，形成太阳氢，才能作为那样巨大的能源。但是氢的重同位素——氘和氚放出能量非常快。如果能够在几千万度的高温下把它们稳定地约束在磁捕集器内，热核能的问题就得到解决。对于这件事其实只要做到一点——克服等离子体的不稳定性。共计只有这一个困难，但是这个困难是如此之大，以致于谁也无法说出近于解决这一困难的途径。

热核问题是有关等离子体的科学中最诱人的问题，等离子体性质的广泛研究就是由它引起的。科学的发展总是获得意外的成果，在科学史上就常发生这样的事情。在研究等离子体的性质时发现等离子体可以被磁场推动，就建立了等离子体炮。从炮内可以发射速度达到每秒 100 公里的等离子体块，这比子弹快一百倍，比宇宙火箭快十倍。起初建立这种炮是为了注射等离子体到磁捕集器内，但是后来明白了可以由它做成等离子体电动机。

等离子体电动机按作用原理很象一般的电动机，只是它的电导体不是金属而是等离子体。但是一般电动机经过简单变换可以成为发电机，自然这就引起了等离子体发电机的想法。在等离子

体发电机中，等离子体流在磁场中减速产生电流。难道不应该期望全部电工技术从笨重的金属转变为轻便的等离子体吗？

在无线电技术上，等离子体的应用前途目前还很少研究。等离子体在磁场中有许多不同形式的振荡，发射无线电波。目前还只观察到混乱的振荡，即所谓噪声。但是从理论上说可以建立等离子体共振器和波导管——频率完全确定的振荡设备。

磁化的等离子体有很多奇特的性质，其中电力引起质量的运动(所谓漂移)，而非电性力产生电流；运动速度和电流的方向不是沿着力的作用方向，而是横着力的方向；力不是使等离子体得到加速度，而是使它得到不变的漂移速度。等离子体的所有这些奇特的性质都还等待我们用来为人类谋福利，就连无益的不稳定性在将来也能作为激发等离子体振荡的手段，得到有益的应用。

许多等离子体现象展开在宇宙空间的巨大范围内。看来太阳的爆发(日辉)是由于等离子体被磁场很快地压缩产生的。太阳爆发时向空间喷射等离子体流，宇宙空间的磁场把太阳抛出的等离子体捕捉到各种磁捕集器内。这种充满等离子体的捕集器在地球附近被发现：就是对将来的宇宙航行产生辐照危险的著名的辐射带。太阳爆发之后，在地球上观察到极光、磁暴以及无线电通讯的破坏。所有这些都是组成地球大气上层的等离子体的扰动，这种扰动是由沿着星际等离子体传播的冲击波或等离子体流引起的。冲击波沿着几乎真空的星际空间传播，也是磁化的等离子体的奇特的性质之一。宇宙火箭和人造卫星越来越多的证实了等离子体在宇宙空间所起的作用。在科学和技术发展的新阶段，必然向物理学的最年青的部门——关于等离子体的科学提出更高的要求。

怎样得到等离子体

为了使气体进入等离子体状态，至少要使一部分电子脱离原

子,使这些原子成为离子。这种使电子和原子脱离叫做**电离**。我們以后再用原子-分子能級概念研究詳細的电离机构,这里只限于討論电离过程的一般性质。

在自然界和技术上可以用不同的方法产生电离,其中最重要的有:

- (1) 热致电离;
- (2) 輻射电离;
- (3) 放电电离。

任何物质加热到足够高的温度都会成为电离的物质,这就是所謂**热致电离**。原子或分子的**电离能**越小,即其电子被束縛得越弱,电离所需的温度就越低。化学元素的原子电离能和它在門捷列夫周期表中的位置有关。在一价硷金属(鋰、鈉、鉀、銣、鉍)原子內,电子被束縛得都比較弱,在这种原子內一个外层电子(价电子)位于远的軌道上,容易脱离原子。在惰性气体(氦、氖、氩、氪、氙)原子內,电子被束縛得都比較牢固,它們的全部电子組成封閉的壳层,这种壳层很难破坏。在門捷列夫周期表的每一直行內,原子越重,电离能就越小(在重原子內有許多屏蔽核电場的內层电子)。因此,在所有元素中,最重的硷金属——鉍最容易被电离,在實驗室和技术上为了得到热等离子体都喜欢采用它。

有硷金属蒸汽存在,在 $2000 \sim 3000^{\circ}\text{C}$ 时就已經能看出气体的导电性。但是要用加热的方法得到完全电离的等离子体,必須使温度达到几万度。

在自然界內,恒星是由灼热等离子体組成的。用加热的方法也能够得到高密度和較低温度的弱电等离子体,不过要加入容易电离的杂质。火焰的导电性首先和其中存在硷金属杂质(把火焰染成黄色的鈉)有关。

輻射电离只在非常稀薄的气体內才有意义,因为在任何可以察覺的密度下,粒子之間的碰撞就比輻射的作用重要得多。这种电离方法对于天体物理学是重要的,因为灼热恒星的紫外輻射在

其周圍的气体星云和星际气体区域(所謂单电荷氦离子 $\text{HeII}^{\text{①}}$ 区域)內产生电离。太阳的輻射也引起地球大气上层的电离。企图在技术上利用輻射电离未必会有成效,因为在技术上要求的密度下,很快进行相反的电子和离子**复合**的过程,产生平衡状态。

在实验室和技术上,最广泛地采用在气体放电內得到等离子

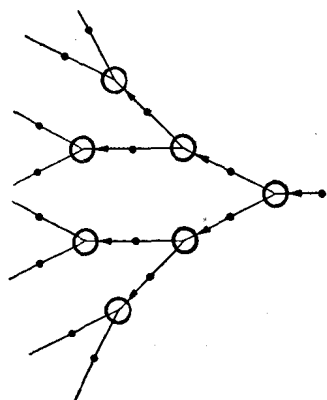


图1 电子雪崩

圆圈代表原子,黑点代表电子

体的方法。闪电是这个现象在自然界中的例子,任何电火花、伏打电弧、气体发光灯的閃光以及很多其他气体放电仪器中的现象,都可以作为技术上的例子。放电中的电离机构在于形成**电子雪崩**(图1)。这个过程就象化学上的鏈鎖反应或者瘟疫时的細菌繁殖一样。为了使雪崩发展,必須給气体以附加电场,使电子在一个自由程上得到的能量大于从原子中再打出一个电子所需的能量。由于某种附帶的原因,在气

体中即使出現很少量的自由电子,在被电场加速之后就足以打出新的电子,并且因此使电子成几何級数增殖。同样,即使是从宇宙射线产生的,或从金属表面发射的少量电子,就能引起整个气体电离,并且把气体变成等离子体。

除了这些产生等离子体的主要方法以外,还有一系列更狭义的方法,象为了寻求实现热核反应的途徑而研究的**注射法**:把在加速器內达到巨大速度的气体离子注射到磁捕集器內,并从周圍的介质內引入电子,它們一开始就組成灼热的等离子体。

压力电离是使电子脱离原子的特殊方法。在非常大的密度下任何物质都进入**退化状态**,在退化状态中电子被“挤”到最高的能級,如果这个能級的能量(所謂費米能)超过电离能,則电子壳层

^① 在光譜学中采用如下記号:对中性原子用它的化学符号和羅馬数字 I,对单电荷离子用它的化学符号和羅馬数字 II,等等。——原注

被“挤破”，并且电子从原子中脱离。这种现象可以在超密的星球——白矮星和大的氦行星内发生，而根据某种假说甚至在地心内也能发生。在用会聚的冲击波压缩物质的实验中，可以观察到导电性的产生，这种现象可以用压力电离来解释。但是要发生这种现象必须有非常大的密度，在这种密度下物质与其说象等离子体，不如说更象金属，所以这种现象不一定是属于等离子体物理学的。

等离子体的诊断

从事普通气体工作的工程师和研究人員，在测定气体的物理性质和成分时不会感到困难。任何温度计或高温计都可以給他指出气体的温度，压力计可以指出气体的压力，各种流量计可以测出气流的速度，最后，用精密拟定的化学或物理化学的气体分析方法可以测定气体的化学成分。等离子体的情形则不同，其中各种测量都成为问题。例如用不同的方法测量同一等离子体的温度，可以得到相差几十倍的数值，并且每个从事等离子体工作的实验者得出的结果都相差很远，甚至准确知道的基本量，象等离子体中带电粒子的浓度的测量也是这样。

因此，测定等离子体的物理特性和测定普通气体特性的区别不是简单地在测量技术上。测定等离子体的温度、浓度和成分的方法是实验等离子体物理学的最重要部分，它叫做**诊断**。根据测量仪器的读数对等离子体的状态作出判断，就象根据对病人的观察对疾病作出诊断一样困难。如果把普通气体比作乐意回答医生问题的病人，则等离子体就象不会说话的畜生一样，因此测定等离子体的特性就象给畜生看病一样困难。

在等离子体中发生的一系列物理现象都可以用来进行诊断。我们在整本书内都会遇到这些诊断方法。这里我们只给出诊断方法的一般概述，它的物理原理将在以后更详细地解释。

没有磁场时，等离子体的温度和电子浓度可以用电探极（朗缪

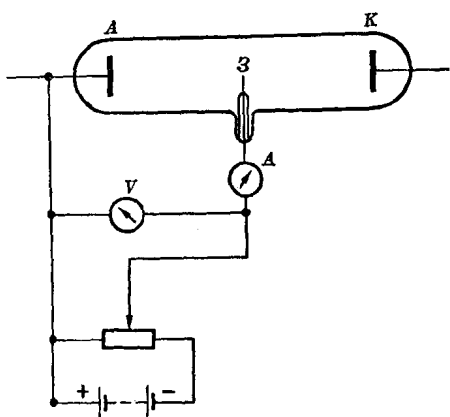


图2 在气体放电中用电探极测定
电子浓度和温度图

A 和 K 是气体放电管的阳极和阴极, 3 是电探极, V 和 A 是显示伏安特性的伏特计和安培计。下面是加在探极上的电源和用来改变电压的变位计

于在热运动中碰到探极表面的电子所携带的电荷的多少。如果已知电子热运动速度, 则从饱和电流可以得出它的浓度。热运动速度可以从电子温度算出, 而电子温度又可以从伏安特性曲线的斜率得到。

饱和电流

$$i_H = S n_e \bar{v}_e,$$

其中 S ——探极面积;

e ——电子电荷;

n_e ——电子浓度;

$\bar{v}_e$ ——电子在一个方向上的平均速度, 它和电子温度^① T_e 的关系为:

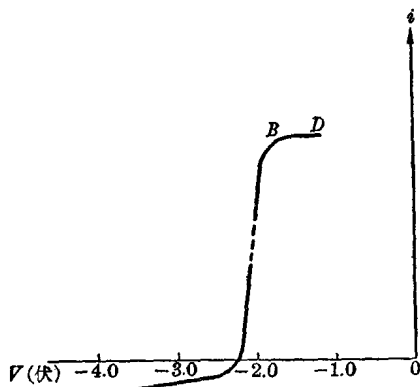


图3 电探极的伏安特性

i 是探极上的电流, V 是探极相对于阳极的电位, 线段 BD 是饱和电流

① 温度取能量单位。——原注

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m}},$$

其中 m 是电子质量。

在探极相对于等离子体为负电位的区域内，由伏安特性的进程可以决定电子的温度。在这个区域内探极排斥电子，只有那些在波尔兹曼分布中具有较大能量的电子才能到达探极表面，这种电子的能量必须足够克服一定的电位差 $V - V_0$ ，这里 V 是探极电位， V_0 是等离子体电位。由此

$$\ln i = \frac{e}{T_e} V + \text{常数}.$$

在图上电流强度 i 的对数和电位 V 的函数关系在很宽的区间内为直线(图4)，由它的斜率可以决定电子温度 T_e 。

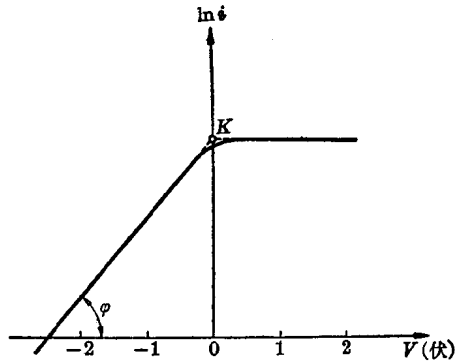


图4 在对数标尺中电探极的伏安特性

电探极的方法在经典气体放电物理学中曾得到广泛的应用。在磁场内，粒子沿着磁场运动和横着磁场运动具有完全不同的性质，因此在有磁场时，电探极不能用于绝对测量^①。如果预先按照某种绝对方法定好探极刻度，才能按照它的读数看出电子浓度的变化。磁场中的等离子体的带电粒子浓度可以用微波方法测定。

① 如果把探极的尺寸做得比回旋加速半径小，磁场对电探极的影响可以消除。由于探极要捕捉电子，实际上不能做得比电子回旋加速半径小。离子的回旋加速半径比电子的大几千倍，因此如果利用的不是电子电流，而是离子电流，即在大的负电位时得出的探极特性曲线的离子部分的饱和离子电流，则可以利用电探极的方法在磁场中进行绝对测量。——原注

要了解这些方法的实质,必須熟悉无线电波在等离子体中的傳播,我們在适当的地方再討論。

光学方法在等离子体的診斷中应用非常广泛。等离子体发出

的輻射强度和光譜成分与等离子体的温度有关,并且在較小程度上依賴于等离子体的密度。非常濃密的等离子体发出一般的热輻射,它的温度可以用普通的光学高温計測量。光譜学的方法給出許多关于等离子体的温度、成分和濃度的有价值的报告。为了研究等离子体,必須把等离子体的輻射分成光譜。等离子体的光譜比气体和固体的光譜更复杂。气体光譜由单个的所謂不連續譜綫組成,固体光譜是連續的,等离子体的光譜則为不連續譜綫和較弱的連續光譜的迭加。

如果等离子体内除了原子以外,还剩下未分解的分子,則在光譜中除了狹窄的譜綫以外,还观察到寬闊的分子帶。图5表示等离子体光譜的典型形式。按照图上标出的特征綫的位置,可以定性地判断等离子体的化学成分。例如,灼热等离子体和器壁接触时,在光譜内很快出現构成器壁的物质原子的特征綫。

随着温度的升高,有更多的电子轉移到远的軌道上。根据从不同能級发射的譜綫强度之間的关系,

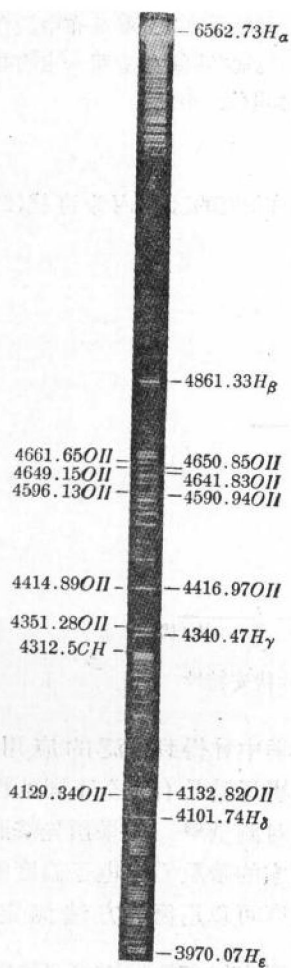


图5 等离子体的典型光譜譜綫
H—氫原子, OII—单电荷氧离子, CH—OH根。数字是以Å为单位的波长