



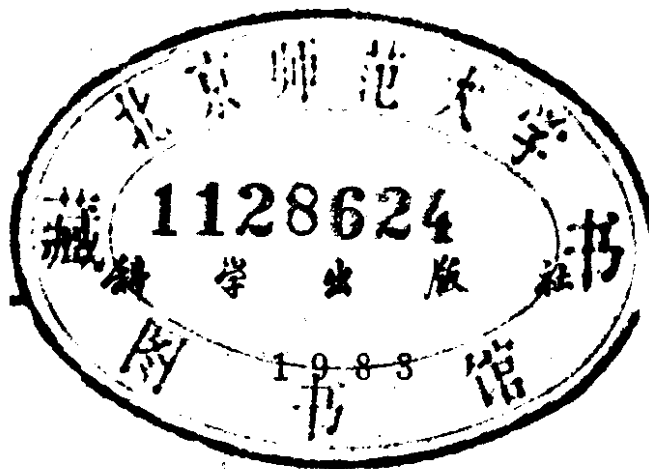
朱士尧 编著

# 等离子体物理基础

科学出版社

# 等离子体物理基础

朱士尧 编著



## 内 容 简 介

本书介绍了物质的气态、液态、固态之外的第四态——高温之下的等离子体。书中较详细地阐述了等离子体的性质、运动规律、研究等离子体物理所采用的方法等。后半部的主要篇幅介绍了高温等离子体与受控核聚变的密切联系和等离子体的技术应用，以及等离子体与天体物理的关系。

本书可供具有中等文化程度的读者、大学低年级学生、中学教师和科研人员阅读。

### 等离子体物理基础

朱士尧 编著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年10月第一版 开本：787×1092 1/32

1983年10月第一次印刷 印张：6 1/2

印数：0001—6,800 字数：146,000

统一书号：13031·2385

本社书号：R3261·13-3

定价：1.05元

## 代 序

1978年8月，中国物理学会在庐山召开年会，不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用，建议中国物理学会与科学出版社合作，编辑出版一套《物理学基础知识丛书》，有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此，中国物理学会理事会进行了认真讨论，积极热情地支持了这一建议，于是，就在风景绮丽的庐山，在中国物理学会和科学出版社的共同主持下，正式成立了本丛书的编委会，讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划，正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律，物质的结构及其相互作用，它是许多科学技术的基础。从本世纪开始，物理学经历了极其深刻的革命，从宏观发展到微观，从低速发展到高速，由此诞生了量子物理学和相对论，并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来，物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就，不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用，使人类掌握了新的能源；半导体科学技术的发展，导致了计算技术和自动控制系统的革命，激光的出现焕发了经典光学的青春；凝聚态物理学的发展，使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……；因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

1980年12月于北京

# 绪 言

等离子体物理学是物理学中一个比较年轻的分支学科。我们知道，物理学是研究物质运动规律，物质结构及其相互作用的一门自然科学。它具有许多不同的分支学科。例如，探索天体的结构与运动、演变及兴衰是天体物理学的任务，而研究微观世界中的物质结构及运动规律乃是原子物理、核物理、基本粒子物理的研究课题等等。那么，等离子体物理学研究的对象是什么？它从什么角度，采用什么方法进行研究呢？这就是本书绪言部分首先要回答的问题。

经过长期的观察研究，人类认识到茫茫宇宙中一切形形色色的宏观物质都是由一百多种元素所构成的。不同元素结合成各种分子。大量的分子又依靠某种作用力结合或凝聚在一起。由于作用力的强弱不等而表现为各种不同的存在状态。这些状态我们称之为物质的聚集态。在中学里就讲过任何物质由于温度不同都可以处于固态、液态或气态，这就是物质的三种聚集态，物质三态之间在一定条件下可以互相转化。这类现象在日常生活和生产中屡见不鲜。

然而，如果温度继续升高，物质的状态会不会发生变化呢？例如将水变为高温蒸汽之后，对它加压并继续提高温度，将会发生什么新变化呢？你也许认为，无非就是产生超高温的蒸汽。当然，温度升到几百度时仍然是蒸汽，仅仅是温度高一点而已。可是，如果温度升到几万度甚至几十万度，物质就将处于一种全新的状态之下。处于如此高温之下的物质，不仅分子之间和原子之间的运动十分剧烈，且它们

彼此之间已经难以束缚，原子中的电子因具有相当大的动能，故它摆脱了原子核对它的束缚，成为自由电子。原子失去电子变为带正电的离子。这样，物质就变成了一团由电子和离子组成的混合物。它既不同于固体和液体，跟普通气体的性质也有许多本质上的区别。它是物质的另一种全新的聚集态，即物质的第四态，称为等离子体。由此可见，等离子体物理的研究对象就是物质的第四态。

物质的第四态对我们来说比较陌生，它是在什么条件下产生的？我们生活的周围环境中存在哪些等离子体现象等等，这就是本书第一章的主要内容。在第二章里，着重介绍等离子体的一般性质，包括等离子体的严格定义，等离子体的主要特性和规律。

从物理学角度来研究等离子体，所采用的方法可分为近似处理和统计处理两大类。近似处理中，对于不同类型的现象，可以采用单粒子模型或者流体模型。单粒子模型就是把等离子体看作由大量的独立粒子组成的系统。研究时完全忽略粒子间的相互作用，然后根据牛顿运动方程来确定单个带电粒子在电磁场中的运动轨道。这种模型给我们提供了关于等离子体中带电粒子运动的非常直观的图象，有利于了解等离子体在总体上的某些性质。本书第三章的任务就是讨论等离子体中独立的带电粒子在电场和磁场中的运动规律。

当然，有些情况下粒子间的相互作用不能忽略。这时必须把等离子体看成是连续的流体介质，这就是等离子体的流体模型。由于这种等离子体流体中存在大量的带电粒子，它是一种能导电的流体。它的运动受到磁场的影响。研究此种导电流体运动规律的科学叫做磁流体力学。我们将在第四章中介绍磁流体力学的基本知识。这里，我们感兴趣的不是等离子体的流动，而主要关心的是在各种位形的磁场中，等离

子体的平衡和稳定问题，以及振荡和波的问题。近年来在这些方面的研究比较活跃。

单粒子模型和磁流体模型对等离子体只能作近似的描述。要真实地研究等离子体中所有粒子的运动规律，必须采用统计的方法来确定各种粒子的分布情况及其运动规律。这部分内容称为等离子体微观理论，也叫等离子体动力理论。当然用这种理论来处理应该是很精确的。然而，实际求解极其复杂，有的近乎是不可能的，只能求出近似解。等离子体微观理论是目前不少物理学家的重要研究课题。在第五章中只是简要地介绍这方面的有关知识。

在第三、第四、第五章介绍了研究等离子体所采用的方法，同时描述了等离子体的主要物理性质之后，第六章专门介绍测量等离子体各种参数的主要方法。

等离子体物理与受控核聚变研究是密切相联的。受控核聚变研究具有巨大的魅力，前景十分诱人。它能使人类面临的能源危机得到最终解决。核聚变能源是人类最理想的新能源。它以海水为原料，提取氢的同位素氘，在近亿度的极高温度下发生热核反应，释放巨大能量。这种能源的原料取之不尽，用之不竭，而且极少放射性污染，因而这种理想的新能源令人神往。一旦实现，将引起人类社会生产力的巨大变革。它的研究成功与否，跟高温等离子体物理的深入研究关系十分密切。为此，本书第七章专门讨论受控热核反应。

低温等离子体在国民经济与科学实验中的技术应用越来越广泛。例如利用等离子体的发光特性，制造出各种各样的电光源；利用等离子体的高温特性，在机械加工方面对耐熔金属进行等离子体切割与焊接，熔炼与喷涂。由于在等离子体条件下能发生一些平常条件下不可能发生的某些化学反应，因此，等离子体化学等离子体化工等新理论新技术亦已逐步



发展起来。此外，磁流体发电也是一个非常具有吸引力的研究课题。它可以实现不经过热机而由热能向电能直接转换的发电过程，从而大大提高发电效率。低温等离子体在各方面的技术应用就是第八章的主要内容。

现代自然科学的显著特点之一就是各学科之间相互渗透。等离子体物理与空间物理、天体物理之间就互相渗透。最近十年来已开始形成了等离子体天体物理学这一新的学科分支。本书最后一章“探索宇宙深处的奥秘”就是介绍宇宙等离子体知识的。

最后，我们简要地追溯一下等离子体物理的发展历史，早在远古时期，我国劳动人民提出了“金、木、水、火、土”五行说。认为世上万物皆由这五种东西组合而成。到了公元前五百年，古希腊哲学家曾断言，我们周围这个错综复杂的世界就是由土、水、空气和火这四种基本的物质相互交叉渗透而构成的。随着科学的发展，后来提出了物质有三种聚集态（固态、液态和气态）的概念。到了十九世纪初，物理学家们提出了一个十分严肃的问题，世界上是否存在着跟已知的三种聚集态在性质上有着本质区别的物质第四态呢？那个时代的许多物理学家为了寻找物质的第四态，花费了艰巨的劳动。法拉第在十九世纪三十年代就观察过气体的辉光放电现象。英国物理学家克鲁克斯在1879年研究了真空放电管的放电过程后，第一次指出了物质第四态的存在。他写道，“这些真空管中的现象在物理学中呈现了一个新的领域，在该领域中物质能以第四态的形式存在。”等离子体物理学可以认为就是从那个时候开始萌芽的。当时主要是研究气体放电的发光效应，发热效应和声学效应及它们在技术上的应用。从第一次世界大战到二十世纪三十年代，等离子体物理学取得了一些基本成就。1923年，德拜提出了著名的德拜屏蔽概念。

1929年朗缪尔和汤克斯第一次引入“等离子体”这个名称，用以表示物质的第四态即完全电离或部分电离了的物质状态。从三十年代到第二次世界大战结束之前，等离子体物理有很大发展，就在那一段时间开展了对电离层的研究。四十年代，阿尔芬建立了磁流体力学并成功地应用于空间物理和天体物理学的研究。可就是在那个时期，部分物理学家出现了一个错觉。认为等离子体物理的基本问题似乎都已得到了解决，因而对于研究等离子体物理的兴趣也不大了。正当等离子体物理学处于危机的重要关头，1945年夏天，在日本的广岛和长崎上空爆炸了两颗原子弹。在爆炸的上空，首次在地球上形成了大量的温度高达几百万度的人造等离子体。当然，这并不是原子弹制造者本来的意图。在这之后不久，又成功地爆炸了氢弹。紧接着，苏联、美国、英国等国几乎同时于五十年代初期各自秘密地开展了受控核聚变的研究。从此等离子体物理的研究又出现了新的热潮。萨哈罗夫五十年代初首先提出了用磁场来约束等离子体的概念。1957年，劳逊推导了实现受控核聚变的能量收支平衡条件，即劳逊判据。为了实现这个必要条件，必须深入地研究高温等离子体的性质。因此近三十年来受控核聚变研究推动了等离子体物理学的迅速发展。与此同时，由于人造卫星的发送和射电望远镜的发明，在空间物理和天体物理方面的观测资料也大大地丰富起来，于是提出了许多等离子体物理方面的问题。因此等离子体物理学近年来发展很快，也越来越受到重视。

本书的目的是试图以通俗的语言向读者介绍等离子体物理及其应用方面的知识。倘若读者阅读了本书之后，对等离子体物理有所了解，并能发生兴趣，那就实现笔者的愿望了。当然，由于本人学识浅薄，书中缺点错误在所难免，望读者批评指正。

最后，作者要衷心感谢项志遛同志、霍裕平同志、尹鸿钧同志、荣福瑞同志和俞昌旋同志，承蒙他们百忙之中仔细审阅了书稿，并提供了宝贵的修改意见。作者在此谨致谢意。

• x •

# 目 录

绪 言 .....	v
第一章 奇妙的物质第四态 .....	1
一、有趣的物态变化 .....	1
二、奇妙的物质第四态 .....	7
第二章 等离子体的一般性质 .....	19
一、等离子体基本特性 .....	19
二、等离子体振荡频率 .....	22
三、等离子体中粒子间的相互作用 .....	24
四、等离子体辐射 .....	30
五、等离子体中两种温度概念 .....	35
第三章 单粒子轨道理论 .....	38
一、磁场中的拉摩运动 .....	38
二、奇特的漂移运动 .....	40
三、带电粒子在环形磁场中的运动 .....	47
四、绝热不变量 .....	50
五、磁镜效应 .....	52
第四章 等离子体流体理论初步 .....	55
一、流体描述的适用条件 .....	56
二、磁场的冻结与扩散 .....	56
三、磁流体平衡 .....	61
四、宏观不稳定性种种 .....	68
五、等离子体中的波 .....	77
第五章 等离子体动力论导引 .....	88
一、基本概念 .....	88

二、朗道阻尼 .....	91
三、微观不稳定性 .....	93
四、等离子体中的输运过程 .....	96
<b>第六章 多种形式的诊断方法 .....</b>	<b>100</b>
一、感应线圈的妙用 .....	102
二、不寻常的探针 .....	103
三、给等离子体留影 .....	107
四、光谱分析 .....	110
五、微波技术在诊断中的应用 .....	113
六、激光诊断技术 .....	115
七、中性粒子能谱分析 .....	119
<b>第七章 高温等离子体的重要应用 .....</b>	<b>121</b>
一、为人类探索理想的新能源 .....	121
二、受控核聚变基本原理 .....	125
三、多途径的探索研究 .....	130
四、曲折的道路，诱人的前景 .....	145
<b>第八章 前途广阔的技术应用 .....</b>	<b>147</b>
一、等离子体切割、喷涂与焊接 .....	147
二、崭露头角的等离子体化工 .....	151
三、高频等离子体 .....	154
四、等离子体光源——气体放电灯 .....	156
五、新颖的等离子体显示 .....	162
六、热电直接转换的磁流体发电 .....	163
<b>第九章 探索宇宙深处的奥秘 .....</b>	<b>167</b>
一、电离层 .....	167
二、范艾伦辐射带 .....	173
三、太阳等离子体 .....	177
四、恒星世界 .....	191
五、星系之谜 .....	193

# 第一章 奇妙的物质第四态

等离子体物理的研究对象是物质的第四种聚集态。本书第一章的任务是介绍物质的聚集态是怎么回事，物质第四态是怎样产生的，并描述存在于我们周围的某些等离子体现象。

## 一、有趣的物态变化

### 1. 分子力与聚集态

我们知道，物质世界中一切宏观物体都是由大量分子（或原子）组成的。所有的分子都处于不停的无规则热运动之中。那么，为什么会形成不同的聚集态呢？为什么固体和液体分子不会散开而能保持一定体积，并且固体还能保持一定的形状。这是因为分子之间有相互吸引力的缘故。我们可以通过一个十分简单的实验来说明分子间确实存在着引力的现象。拿一根直径为2厘米左右的铅柱，用刀把它切成两段，然后把两个端面对上，在两头加上不大的压力就能使两段铅柱重新接合起来。再把它悬挂起来，即使在另一头吊上几公斤的重物，也不会把重新合上的两段铅柱拉开。可见铅分子之间的吸引力是相当大的。那么为什么加很大压力却不能使两片碎玻璃拼接成一片呢？这是因为只有当分子靠得足够近的时候，分子间的吸引力才起作用。铅比较软，加上不大的压力就能使两个断面紧密地合在一起，使两边大部分的

分子接近到吸引力发生作用的距离范围内。而玻璃较硬，即使加很大压力也不可能使接触面两侧分子接近到吸引力发生作用的距离。

固体和液体很难压缩，说明分子之间除了吸引力之外还存在排斥力。不过产生排斥作用的距离比产生吸引作用的距离还要小。

读到这里，你也许会问，分子之间的相互作用力是怎么产生的，它有什么特点呢？我们知道，分子是由原子组成的。分子可以划分为极性分子与非极性分子两类。正负电荷中心不重合的分子（如水分子  $H_2O$ ）称为极性分子，正负电荷中心重合的分子称为非极性分子。两个极性分子之间的相

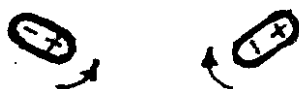


图1-1 两个等效电偶极子指向趋于一致从而互相吸引

互作用可以近似地看成两个等效的电偶极子之间的相互作用。图 1-1 中用两个相隔一定距离的电偶极子代表两个极性分子。由于异性电荷相吸，同性电荷相斥，这两个电偶极子都要绕自己的中心转动，使得两个电偶极子的指向趋于一致，从而互相吸引。可见，分子力的本质是静电力。当然，分子的无规则热运动使电偶极子具有

指向杂乱的倾向。

两个非极性分子之间也会因静电相互作用而彼此吸引。这是什么原因呢？我们知道，每一个非极性分子，它内部的电子云中心与正电荷的中心是重合的。但是在电子运动的每一瞬间，负电荷中心与正电荷中心并不重合，因而出现所谓的瞬时等效电偶极子，如图 1-2 所示。需要注意的是，图中的  $\oplus$  号和  $\ominus$  号分别表示分子的瞬时电荷中心，而并不是在一般原子结构示意图中的原子核与核外电子。由于瞬时电偶极

子的相互作用，两个分子内电子的运动可以相互影响，两个瞬时电偶极子就会出现指向一致并互相吸引的状态。这种非极性分子之间的引力一般称为范德瓦尔斯

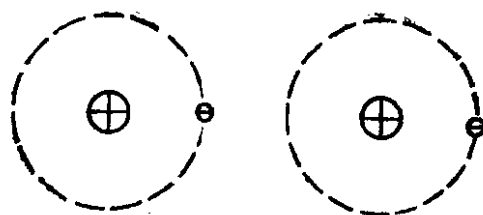


图1-2 瞬时等效电偶极子的相互作用

力。范德瓦尔斯在研究真实气体状态方程时首先引用这种分子力的概念，因此用他的名字来命名。范德瓦尔斯力比极性分子间的引力小得多。根据理论推算，范德瓦尔斯力跟分子间距离的七次方成反比。当分子间距离增大到2倍时，分子间引力就减小到 $\frac{1}{2^7} = \frac{1}{128}$ 。

分子力不论是引力还是斥力，它们都随距离增大而急剧减小，它们都是短程力，具有一定的有效作用距离。斥力的有效作用距离比引力的有效作用距离更短。图1-3表示分子间作用力随两分子质心之间的距离 $r$ 而变化的情况。

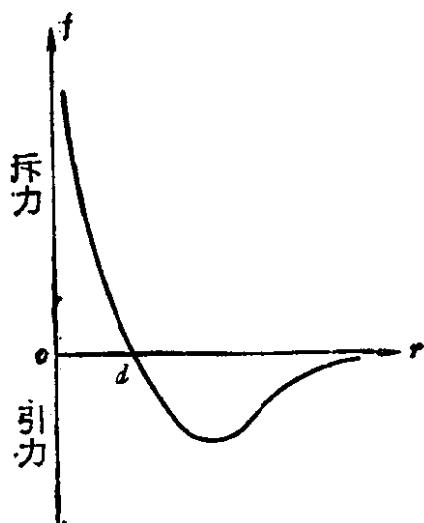


图1-3 分子力与距离之间的关系

的有效直径。

分子间作用力随两分子质心之间的距离 $r$ 而变化的情况。纵坐标上半部表示斥力，下半部表示引力。当 $r = d$ 时，引力与斥力彼此抵消。这一距离称为平衡距离。当 $r < d$ 时，分子力表现为强大的斥力。当 $r > d$ 时，分子力表现为引力。距离再远些，分子引力就迅速趋向于零。实际上我们可以把 $d$ 看作是分子

综上所述，一切宏观物体都是由大量分子组成。由于分



子力的吸引作用使分子聚集在一起，在空间形成某种有规则的分布，也叫有序分布。而分子的无规则热运动具有破坏这种有序排列，使分子分散开来的趋势。正是由于分子力与无规则热运动这两种相互对立的作用的结果，使得物质分子在不同温度下呈现出三种不同的聚集态。温度是分子热运动剧烈程度在宏观上的表现。在较低温度下，分子无规则热运动不太剧烈，分子在分子力的作用下被束缚在各自的平衡位置附近作微小的振动，分子排列有序，表现为固体状态。温度升高时，无规则热运动剧烈到某一程度，分子力的作用已不足以将分子束缚在固定的平衡位置附近作微小的振动，但还不至于使分子分散远离，这就表现为具有一定体积而无固定形状的液体状态。温度再升高，无规则热运动进一步加剧，分子力已无法使分子保持一定的距离，这时分子互相分散远离，分子的运动几乎是自由运动，这就表现为气体状态。

## 2. 有趣的物态变化

现在我们简要地讨论几种物态之间相互转化的过程。

### 液态与气态的相互转化

液体分子逸出液面而成为气体分子的过程称为汽化。汽化方式包括蒸发和沸腾两种。蒸发是发生于液体表面的汽化过程；沸腾是发生于整个液体内部的剧烈汽化过程，伴随大量气泡出现。从微观角度看，汽化是液体中动能较大的分子克服液体表面分子的引力逸出液面的过程。如果没有外界热量的补充，汽化的结果就要使液体内部分子的平均动能减小，从而使液体温度降低。在剧烈运动之后或在炎热的天气里，为了防止人的机体受热，皮肤会自动分泌汗液，通过蒸