

的高能中性粒子注入方法之外,探索各个频率范围的波加热机制;研究等离子体中的反常输运过程和涨落现象;研究抑制宏观不稳定性尤其是抑制危害性较大的大破裂不稳定性;还包括对杂质行为的研究及其控制方法的研究,探索新的更佳磁场位形等。

三、孕育着一代新颖的等离子体高能加速器

高能物理的发展离不开加速器。1930年第一台加速器诞生以来,几乎每十年加速器的能量增加一个数量级。当代高能物理的前沿研究对加速器的能量要求已高达100GeV(电子直线对撞机)。根据目前的加速器技术,加速梯度最大为20MeV/m,为了获得如此高的能量,这种巨型高能加速器将长达50公里以上,这在技术上是相当复杂的,投资也是惊人的。今后随着高能物理的进一步发展,还会提出更高能量的要求。如果继续增加电场,加速器会遇到击穿问题,这就是说必须建造远大于50公里的超巨型高能加速器。无论是技术的难度还是巨额资金的耗费都是可想而知的。美国最近获准建造一台超级的超导质子-质子对撞机(SSC)其周长达84公里,投资32亿美元,计划在6年内建成。要建造下一代能量更高的加速器其根本出路在于探索新颖的加速器原理。关键在于既要提高电场强度,又要避免击穿问题。

等离子体物理学家在这个关键问题上能给高能物理学家助一臂之力。1979年,等离子体物理学家道逊(Dawson)提出了等离子体高能加速器的新思想。在等离子体中可以获得很强的电场而不会击穿(因为它本来已经电离),最大可达到1GeV/m,比传统加速器大约高三个数量级。最近几年已提出了若干种等离子体加速器的方案。一种叫等离子体拍波加速器(PBWA),两束频率相近的激光在等离子体中同时传播,激起等离子体纵向振荡。在一定条件下,注入的相对论性粒子便可以在相当长一段距离内与等离子体波的电场保持同相,从而不断加速。由于电场相当强,便可在较短距离内将电子加速到极高能量。另一方案叫等离子体尾场(wake-field)加速器(PWFA)。当两股相对论性电子束先后高速穿过等离子体时,第一股电子束通过等离子体时在后面流下了一个等离子体振荡的尾场。紧跟在后的第二股电子束便可以“骑”在等离子体波上得到加速。总之,等离子体高能加速器是近年来才提出来的新概念,为等离子体物理学开辟了一个全新的研究领域,可能具有光辉的前景。

除了上述三个方面之外,低温等离子体(温度在10⁴K以下)的研究亦日益受到重视。尤其是利用等离子体与固体表面相互作用形成性能优良的新颖材料,以及等离子体薄膜处理和刻蚀等都具有广阔的前景。此外,凝聚态等离子体的研究以及非中性等离子体的探索研究也都在向纵深发展。

分形凝聚和物质生长模型

黄 灼

无序、不可逆的生长过程是自然界中一种极平常的行为;例如树木、珊瑚的生长,灰尘和云块的聚结,人体肿瘤细胞的繁殖,雪花及各种晶体材料的形成,这类过程统称为生长过程,一般来说生长过程是非常复杂的。我们知道,生长就是物质的一种发展过程,普通物质最后的形成必然与它发展过程中的历史状态有着紧密的关联;因此,它是一种有记忆的非马尔可夫过程。由于这种过程包含着复杂的动力学行为和非平衡的统计规律,不可能简单地写出它的配分函数或生成函数,所以长期以来人们无法对它进行深入的研究。近年来(从1981年起)在这个

领域内有了一些突破,主要是发现生长的物体具有动力学标度律,它的生长结构形状在一定的宏观条件下与分数维数有关。一般称为分形凝聚。这样一来,分形凝聚过程就成了近年来统计力学中一个非常活跃的课题。

生长过程大致可分为三类:第一类是有规则的缓慢生长过程(平衡态),例如单晶的成长等。第二类是稳态的形态生长,这类生长给出一定的花纹结构,例如雪花、树枝状晶态结构等。第三类是远离平衡态的无序分维生成,它具有标度不变性,例如天空中灰尘及云块的凝聚,电解溶液时金属材料的凝集等。在本文中我们主要介绍第三类生长过程。

(一) 生长模型

由于自然界中存在着种类繁多的生长过程,因此必须引进各种不同的生长模型来描述它们。所谓不同的生长模型就是指物质在生长时服从不同的生长规律。这里简单介绍几种模型。

1. 伊登模型

伊登模型是 M. Eden 在 1960 年在计算机上引进的,它的计算规律是:

- 在二维方形点阵(或者其他点阵结构)的中心安置一颗种子微粒。
- 随机地在比微粒的近邻挑选一个格点让第二个微粒占据,并与第一个微粒结合成一个集团。依此类推,可以形成一个很大的集团。
- 集团周界处所有空的格点被占据的概率是相等的。

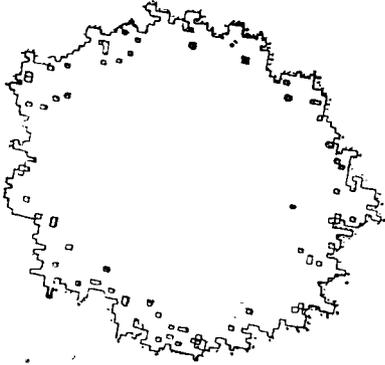


图 1

计算机模拟结果表明伊登模型给出的生长集团是一个实心的物体。图 1 表示的是由 $N = 1500$ 个粒子构成的伊登模型的周界情况。由此可见当 $N \rightarrow \infty$ 时,此集团的密度等于 1,即 $N \propto R^d$ 。这里 R 是集团的回旋半径; d 是欧几里德维数。

2. 有限扩散凝聚模型,简称 DLA 模型

这个模型是由 T. A. Witten 和 L. M. Sander 在 1981 年提出的,它的生长规律是:

- 在二维方形点阵(或其他点阵结构)中心放上一颗种子粒子。



图 2

- 在点阵边界处随机地引进一个粒子,让它在点阵内作无规运动。这时此微粒的运动有两种可能,一种是与种子微粒相碰后结合成一个集团;另一种是运

动到点阵表面,被表面吸收而消失。然后一个新的粒子又在边界处随机地产生,如此循环反复,最后在点阵中央形成某种凝聚集团。由计算机按 DLA 模型求出的凝聚集团呈树枝状,而且具有自相似的性质如图 2 所示,这种类型的结构与一般的实体是不同的,它具有一些独特的动力学行为。由于它在计算上的方便,在应用上的广泛,在性质上的奇特,从而成为近年来较为成功的一个生长模型。

3. 集团-集团凝聚模型

1983 年 P. Meakin 认为 DLA 模型中只有一个不动的核心是不符合实际情况的,因此他修正了 DLA 模型。CCA 模型的生长规律是:

- 在一个二维方形点阵(或其他点阵)上放进 N 个微粒,每个微粒均可在点阵上作无规律行走运动。
- 当两个微粒相遇后就结成一个集团,然后以整个集团为单位作无规律随机运动,从而结合成更大的集团。
- 对于不同大小的集团可以选择不同的迁移率和不同的反应概率。

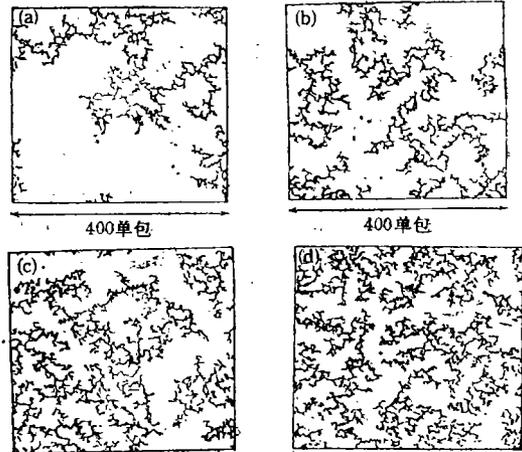


图 3

图 3 分别给出了 (a) $N = 10000$ (相当于每日一格点占有的微粒数密度为 $P = 0.0625$), (b) $N = 15000$ ($P = 0.09375$), (c) $N = 2000$ ($P = 0.125$), (d) $N = 25000$ ($P = 0.15625$)。四种情况下的凝聚结构图。这个模型能较好地描述烟灰、胶体和云尘等聚合成块的实际过程。

近年来在这三个模型的基础上发展起来的形形色色的模型,这里就不一一列举了。

(二) 有限扩散凝聚模型的性质

(1) 在生长过程中集团具有屏蔽性质。如果把组成集团的 3000 个粒子分成两组,前一组 1500 个粒子由粗黑点表示;后一组 1500 个粒子用细黑点表示,如图 4 所示。从图上我们立刻可以看到,尽管集团内部

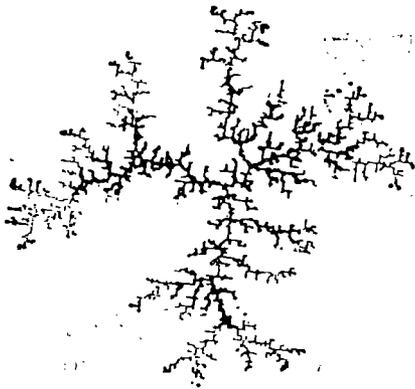


图 4

还有许多空的格点尚未被粒子占据,但是后来到达集团周围的粒子只能粘结在集团的表面而不能深入集团的内部。将它与静电学类比来看,就象在集团的表面存在着一个屏蔽场,它阻止粒子进入集团的内部。这种现象称为屏蔽效应。正是这个效应使 DLA 模型具有了与 Eden 模型不同的树枝状结构。这个现象已被日本科学家 M. Matsushita 等人在对 $ZnSO_4$ 作电解的实验中得到证实。他们在实验中不仅得到了金属锌的枝状结构图,而且还观察到了屏蔽效应。图 5 中 (a), (b), (c) 和 (d) 分别对应于锌金属在 3, 5, 9 和 75 分钟时的凝聚图形。通过集团生长的演化图,我们可以看到图 (a) 中用箭头表示的两点在后来的生长过程中不再发生变化。

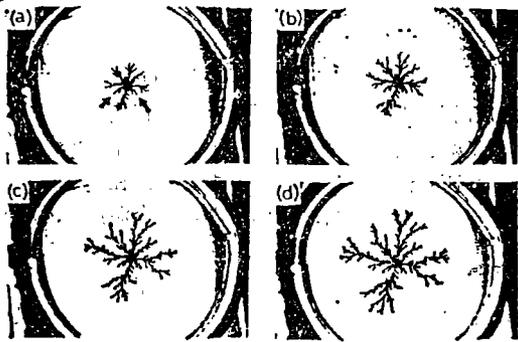


图 5

(2) 集团的结构具有分维性质。分维这个名词是法国数学家 B. Mandelbrot 引进的,它表示这样的一类物体;它们的形状是不规则的,但具有多种尺度变换下的自相似性。它们的空间维数与欧几里德的整数维数不同,而是一个分数数值。在我国,我们将这类物体称为分形体。B. Mandelbrot 对一系列分形体的性质进行了研究,它们是一些特殊的几何体、海岸线、化学中的聚合物和银河系的结构等。有兴趣的读者可参阅他的著作。对于分形体最主要的描述参数是它的豪斯道夫维数 D 。我们知道,常见的固体、液体等普通物

体,它们的质量与体积之间一般具有下述关系式:

$$M = P \cdot V \sim L^d$$

其中 L 是物体的长度尺度, d 是欧几里德维数, P 是物体的密度,它一般是一个常数。但对于分形体,上述公式就改变为:

$$M \sim L^D$$

这里的 D 是豪斯道夫维数。利用 DLA 模型的自相似性,可以求出它的豪斯道夫维数。其结果为: 当 $d = 2$ 时, $D = 1.66 \pm 0.02$; $d = 3$ 时, $D = 2.5 \pm 0.02$ 。这个结果告诉我们 DLA 模型具有分维的性质,所以通常把 DLA 模型称为分形凝聚。

(3) DLA 模型普适性质的讨论。在 DLA 模型提出以后, Witter 和 Meakin 等人不仅在二维方形点阵上进行计算,而且还将比模型推广到三维立方点阵,二维三角形点阵和蜂窝状点阵上。他们的计算结果表明,DLA 集团的豪斯道夫维数 D 只与空间维数 α 有关,而与点阵的结构无关。这种性质称为普适性。这个结果在当时曾引起广大物理学家与化学家的兴趣。随着研究工作的逐渐深入,1985 年 R. C. Ball, L. A. Turkevich 和 H. Scher 在理论和计算机模拟两方面工作的基础上提出,DLA 模型的豪斯道夫维数 D 并不是一个普适常数,它不仅与空间维数 d 有关,还与点阵的结构有关。集团中粒子数愈多,这种差异就愈大。因此有关集团生长的各向异性,及它与生长稳定性的关系就成为近年来研究 DLA 模型的热门课题。我们在实验与理论方面也对这个领域开展了一些工作。

从 1984 年以来,在实验领域中涌现出了一批与 DLA 模型相符合的实验结果,它们是: 金属的电解(二维三维)、表面溅射、真空气体放电、流体在粘滞液体中的流动、城市建设的规划设计等。目前在应用方面还在不断地扩大。我们相信随着人们对生长模型更深入的研究和了解,必将导致更广阔的应用前景。另一方面由于在 DLA 模型问题上的突破,使人们对长期来一直感兴趣的生长、演化问题具有了一些新的观念。分形体的引进帮助科学家开拓了思路。近年来计算机的普及也促进了这个领域研究工作的兴旺。但总的来说,生长模型的研究目前也只是处在起步阶段,还有许多未知的问题在等待着人们去开发,去探索。

(上接第 28 页)

1956 年,这位 69 岁的老人返回自己的故乡,成为维也纳大学物理系的名誉教授。

无论是对整个科学生涯,还是个人生活,薛定谔从来不想规定一个特定的目标,也不追求任何广泛的计划。他总是难以同别人一起工作,即使同他自己的门生也是如此。他喜欢独来独往,甚至在参加布鲁塞尔索尔维会议这种场合,他也总是把他所需的东西放在背包里背着,从车站走到旅馆。

1960 年年底,薛定谔生了一场重病,刚复原不久,又得了一场重病,于 1961 年 1 月 4 日在维也纳逝世。