

凝聚态物理的新进展——分数物理

New Progress in Condensed—Matter Physics——Fractal Physics

陶瑞宝

(复旦大学物理系, 教授 上海 200433)

分数电荷、分数统计和分数维物质——分形是近十年来凝聚态物理学中几项突破性的新进展。长期以来凝聚态物理中都是与整数打交道, 80 年代初期开始, 才涉足这一分数领域。

1. 分数电荷——孤子

分数电荷的概念源于 60 年代基本粒子中的夸克或层子模型。按此类模型, 认为质子、中子、介子等基本粒子是由更为基本的“夸克”子组成, 而“夸克”子带的电荷是电子电荷的 $\pm 1/3$ 和 $\pm 2/3$, 即具有分数电荷。最后证实这种假定仍然是当今高能物理学目标之一。后来, 在 70 年代中期, 从理论上论证了在一个整数电荷的粒子场中出现带有分数电荷的激发态。这一理论的新思想, 在 1981 年被美国物理学家苏武沛和施里弗(J. Schrieffer)应用到凝聚态物理中。他们的理论指出, 在一维固体中可能实现具有分数电荷的集体激发态——孤子(Soliton)。这类孤子是一个局域的非线性元激发态, 它在输运中呈现分数电荷的行为。这个思想及理论已经成为目前研究准一维导体非线性元激发的重要依据。由于这种非线性元激发的激发能量相当低, 因此分数电荷的概念在凝聚态物理中容易得到实现。只要这个一维导电链的电子能带是 $1/n$ 填充的, 那么按理论, 它的基态是 n 度简并的, 晶格是 n 聚化的, 晶格中出现的一种非线性元激发——孤子的电荷将是 $\pm 1/n e$ (e 是电子电荷) 的整数倍。例如, 三聚化的 TTF—TCNQ 其孤子激发可载有 $\pm 1/3 e$ 及 $\pm 2/3 e$ 的电荷。具有分数电荷孤子的特性已是当今凝聚态物理学中一个重要的研究分支。

2. 分数统计——任意子

一个体系的统计特性来源于全同粒子的交换特性。通常人们讨论的只有玻色和费米两种统计。这些粒子称为玻色子和费米子。在量子力学中微观粒子由于其全同性, 是不可区分的, 两个粒子的空间位置交换, 并不改变微观状态, 改变的只能是波函数的一个相位。因此 $[1, 2]$ 两个粒子的交换操作 P_{12} 满足

$$P_{12}\psi(1, 2) = \exp(i\pi)\xi\psi(1, 2)。$$

ξ 是一个实数。一个直观的概念是两个全同粒子交换两次就同没有交换似的, 因此 P_{12}^2 应等于恒等操作 1 , 所以要求 $\exp(i\pi)\psi(1, 2) = 1$, 结果 $\xi = 0$ 或 1 。 $\xi = 0$ 时, 对应玻色统计; $\xi = 1$ 时, 对应费米统计。这就是所谓通常的两种整数统计。在 70 年代, 有人重新研究了这种全同粒子的交换过程, 考虑到两个全同粒子的重合在粒子的组态空间是一个奇点, 是不允许的, 并且考虑到两个全同粒子的交换过程, 在它们的相对位置的坐标系中就有一条轨迹与它对应, 发现二维空间的拓扑性与高维空间大不相同。在二维空间, 这些轨迹属于无穷多个拓扑类, 而三维空间或更高维空间中粒子交换的轨迹只属两个不同的拓扑类, 每一个拓扑类, 决定了一种统计性质。因此三维空间中只能有两种统计——玻色统计和费米统计。但在二维体系中, 可以存在无穷多个拓扑类, 可以出现交换 n 次才等于不交换的统计。即 $P_{12}\psi(1, 2) = \exp(i2\pi/n)\psi(1, 2)$, 当 $n = 1, 2$ 时, 分别对应玻色和费米统计, $n = 3, 4, \dots$ 时, 对应分数统计, 也可能出现 n 为无理数的任意分数统计。

服从分数统计的粒子现在称为任意子(Anyon)。80 年代初, 分数量子化霍耳效应的出现, 在凝聚态物理中给二维体系中实现分数统计以有力支持。近几年来, 由于高温氧化物超导体的发现, 及对新机制的探索, 使人注意到这种材料中 Cu—O 导电层的二维特性, 有些人提出了任意子超导性的新机制, 结果分数统计和任意子的理论研究突然成为一个大热点。但是对目前高温氧化物超导体的实验研究, 没有发现任意子机制中一定存在的时间反演和空间反演的对称破缺, 所以高温氧化物超导性的机制仍旧不清楚。但是作为分数统计的新概念, 凝聚态物理中二维体系愈来愈重要, 仍将继续成为一个重要的研究分支。

3. 分数维物质——分形

寻常物质的质量 M 的空间分布在大范围内是正比于它们的体积的, 也就是说质量是以整数幂次

正比于它们的线度 r : 即 $M(r) \sim r^{d_f}$ 。这里, d_f 是 1, 2 或 3 时, 分别对应于 1, 2 或 3 维体系。因此我们一直习惯地不区分物质所寄存的空间维数 d 和物质分布的维数 d_f (又称分形维数)。当谈到维数时, 往往仅想到整数的空间维数。1982 年曼德布鲁特首先把几何上的非整数维数概念直接引入到物理学和许多自然现象中, 并把这类体系称为 Fractal, 含有分数之意, 现在我们称它为分形。当我们从 $M(r) \sim r^{d_f}$ 或粒子数目 $N(r) \sim r^{d_f}$ 之定义看 d_f , 原则上我们是不能排除存在某种特殊分布的体系, 其分形维数 d_f 不等于空间维数及非整数这种可能性。这类体系现在知道是大量存在的, 它们的一个共同特点是其空间分布是非均匀的, 并且具有尺度变换的自相似性, 也就是按一定尺度放大或收缩的自相似性。这种自相似性可以在规则的意义下或随机的意义下实现。自然界中曲曲弯弯的海岸线、高高低低的地形、天上的雪花等等都可以看作是在一定层次上的分形。在凝聚态物理中, 高分子链、聚集物质、有些凝胶和渗流阈值处的“无穷大”连通集团、金属的裂纹, 甚至晶体在一定条件下的生长分支等, 都是一种分形。现在在凝聚态物理中已经习惯地把空间的维数和物质分布的维数——分形维数 d_f 分开, 并且为了能更完整地描述物质的几何分布, 有时还需引入一组维数簇 (无穷多个维数), 像对混沌中的奇异吸

引子等多分形体系。现在凝聚态物理中维数概念已经五彩缤纷, 在研究这类非整数维物质的各种动力学性质时还引进了一些动力学维数——谱维数的概念。例如, 当研究体系的振动特性时, 它的低频振动密度 $\rho(\omega) \sim \omega^{d_s}$, 在一般的整数维物质中 $d_s = d$, d 是通常物质的维数, 可是对于分形物质, 由低频振动态密度 $\rho(\omega) \sim \omega^{d_s}$ 得到的 d_s 往往不等于分形维数。因此引入了谱维数 d_s 的概念, 以区别于几何的 d_f 。一般分形物质的 d_f 与 d_s 都不是整数, 习惯称为分数。当然有些非均匀的自相似的分形物质, 也可能是整数维。

在分形物质中, 动力学规律是多姿多彩的, 它与通常物质有着不同的特性。对这类自相似、非均匀的分形体系的研究, 目前已成为凝聚态物理的一大分支。它的理论研究还处于早期阶段, 还没有像具有平移周期性的固体理论那样能找到一组展开的完备基 (福里埃基) 把无限多自由度的问题变成一个有限自由度的问题。可以这么说, 80 年代打开了一个五彩缤纷的分形世界的大门, 但人们对它深入的了解, 还有着很长一段路要走。

综合前述的分数电荷和分数统计, 在最近 10 年的凝聚态物理中已开创了一个分数的新世界, 这是对人们传统概念的突破。未来的十年, 将一定会有新的突破。 (责任编辑 宋义荣)

彩图说明

美国黄石公园的水热活动与自然保护

庞忠和

(中国科学院地质研究所地热研究室副主任、副研究员 北京 100029)

1992 年 7 月在美国参加“第七届水岩相互作用国际讨论会”期间, 笔者有幸考察了闻名遐迩的, 堪称世界之最的黄石公园岩浆—水热系统, 对那里壮观无比的水热活动以及成功的自然保护留下了极为深刻的印象。

古人云, “五岳归来不看山, 黄山归来不看岳”。笔者曾去过以热泉和间歇泉闻名的冰岛和新西兰, 若以黄山和五岳的关系来形容黄石和冰岛或新西兰的任何一个地热区, 颇觉恰如其分。事实上, 世界上别的地方找不出这么大规模集中的水热活动。无论从间歇喷泉的数量、构造活动的强度, 还是从造成巨大的破火山口的火山活动规模来讲, 在现存的活动水热系统中, 黄石公园水热系统都是无可比拟的。

黄石公园水热系统的形成有三个重要因素: 1. 来自北部和西北部的冰雪融化的水为系统提供了充足补给水源; 2. 在距地面 4~5 公里的深度上分布有大量处于熔融状态的岩浆, 为系统带来巨大的热能。黄石公园最后的火山喷发有三次, 时间分别是距今 200 万年、120 万年和 60 万年以前。上述最后一次喷发 (60 万年前) 喷出大约 1000 立方公里的火山碎屑物, 并在喷发中心形成一个长 76 公里宽 45 公里的破火山口盆地。正是这次火山喷发所残留下来的巨大岩浆热能源不断地向那些热泉、间歇泉、喷汽孔和热泥潭输送能量。3. 频繁发生的地

震和构造活动产生的断裂沟通了热泉的通道。估计在破火山口内水循环深度为 4~5 公里, 在其外围这一深度可以达到 12 公里左右。

黄石公园早在 1872 年就被辟为美国国家公园, 也是世界上最早的国家公园。政府规定, 除少量科研钻探之外, 不允许在公园内施工钻孔。其实, 在公园内受到保护的并不仅仅是地热景观, 还有那里宝贵的森林和珍稀的野生动物。令人印象颇深的是, 公园内有很多显然是被大火烧焦的树木, 有的立着, 有的歪七倒八地卧着, 但却都原样不动地保留着。人们所知的黄石森林火灾已经过去几年了, 但按规定, 烧死的树也只能留在那里, 自生自灭, 任其自然。

黄石公园的自然保护不仅为旅游观光提供了一个好去处, 而且为有关的科学研究创造了条件。从地热和地质方面来讲, 首先, 它是研究地热活动规律的极好场所, 为反复的采样和长期的监测创造了条件。美国有不少地热学者都因其对黄石的研究而知名。其次, 水热活动是成矿作用的“活化石”, 实际上世界上许多贵金属矿床就是由类似于黄石公园这样的水热活动对有关元素成分长期的迁移和富集而形成的。在我国也存在精彩的水热活动区, 在考虑能源开发的同时, 是否也应该对比一下黄石公园式的开发模式。 (责任编辑 肖庆山)