

的高能实验研究相配合,使人们对于原子核和基本粒子的认识更趋于完善;

2. 凝聚态理论。对凝聚态的各方面性质,进行广泛深入的理论研究。这将对电子工业、冶金工业、化学工业、新能源、热核反应、理论天体物理学等各方面的研究,给予巨大的推进作用。为了配合上述工作,在基础理论方面,尤其是关于非平衡态的统计物理学,也将获得较大的发展;

3. 引力理论(广义相对论)和近代天体物理学。天体物理学是研究宇宙间物质运动形态和规律的科学。研究天体起源和演化(包括宇宙论)是天体物理学的主要任务。近年来,发现了许多新天体、新现象,研究它们主要是利用物理学的方法和理论,因此,必须进一步地开展引力理论和高能基本粒子理论等方面的研究。

以上三个方面是互相联系、彼此影响的。在概念、方法和使用的数学工具上都很多共同之处,因此,在某一领域发展起来的新方法、新概念,常常很快就会运用到另一领域中,并取得富有成效的结果。

回顾历史,十九世纪,从没有理论物理到产生了古典理论物理,这时使产业革命获得巨大的发展,而使机械工业、电力工业、化学工业和无线电通讯等大普及。二十世纪上半叶,由古典理论物理学到相对论、量子力学、近代理论物理学的建立,使工程技术各个领域获得了更大的发展,雷达技术、自动化技术、原子能的利用、激光技术,以及导弹和人造卫星技术等相继出现,并日益占有重要地位。

我们深信,在今后的理论研究中,必将发现新的规律,理论物理学会有更突出的成就,无疑地将使人对宇宙世界的认识更向前迈进一步,将对工业生产和科学技术各个领域,起到巨大的推动作用。

统计物理学介绍

郝柏林

科学研究的区分,就是根据科学对象所具有的特殊矛盾性。我们在日常生产和生活实践中接触到的物体都是由大量分子和原子组成的。“大量”也是一种特殊的矛盾性。由大量粒子组成的系统,表现出一些崭新的运动规律,其中很重要的一条,就是这类系统会经过突变进入更有秩序、更有组织的状态。例如,水在降温的过程中并不先变粘后变硬,而是在一定温度下冻结成冰。冰的分子排列比水规整得多,这种规整性通过飞雪中的冰晶或冬大玻璃窗上的花纹呈现在我们眼前。

大量粒子组成的系统,要用统计的方法来研究。这里“统计”二字的涵义和数学分支“概率统计”中是一致的。然而,这并不是指大量实验数据的统计处理,那是实验工作的必须步骤,而是指从单个或少数粒子的运动规律出发,用统计方法推断和说明由大量粒子组成的物体的性质。因此,它构成了一门特殊的理论科学,这就是理论物理学的重要分支——统计物理学。以下从几个方面,说明统计物理学的对象、方法和意义。这些方面是:宏观与微观、平衡与非平衡、平衡附近与远离平衡、渐变与突变、有限与无限。

宏观与微观

少量电子在原子核周围运动,组成各种原子,它们与光

(电磁波)相互作用,吸收或放射出光波。这些构成了理论物理学其它分支,如量子力学或量子电动力学的研究对象。直接研究微观粒子的运动,通常称为微观描述。

一滴水中含有上百万亿亿个水分子。每个水分子由两个氢原子和一个氧原子组成,每个原子又有原子核和围绕着原子核运动的许多电子。一小片最“纯”的半导体中“杂质”原子的数目,远远超过地球上人口的总数。即使我们透彻地懂得了单个电子和原子核的相互作用和运动规律,也不可能直接运用这些规律来描述大块物质的性质:用尽人类有史以来生产的全部纸张也写不完一滴水中所有粒子的运动方程和有关条件,任何大型电子计算机也放不下这么多数据。我们必须另寻出路。

其实早在人类认识物质的微观结构之前,就形成了描述宏观物体的科学体系。液体和气体通常用体积、密度、压力、温度等描述。给不同的物体提供相同的热量,温度升高的数值有多有少;同样把物体升温一度,其体积膨胀的程度不一。我们说,这些物体具有不同的“比热”和“热膨胀系数”。体积、密度、温度、压力、比热、热膨胀系数、压缩率等等物理量,不仅可以用实验方法测定,而且还可以发现它们之间的关系。例如,气体体积一定时,压力基本上和温度成正比。这种“就事论事”不追究根源的描述方式叫作热力学。它在现代原子论、分子论被证实之前,就在研究蒸汽机和内燃机的过程中诞生了。热力学并不是一堆经验规律的集合,它有自己的严谨体系。它从几条源于实践的基本定律如能量守恒、各类永动机不可能实现等等出发,以推理的办法把宏观物体的特性联系起来描述。这种宏观描述既很成功、又颇实用,至今仍然是许多技术科学的基础。

然而,那么多粒子组成的系统,微观运动瞬息万变,怎么

又可能有热力学这样的简单规律可循呢?这就是统计规律性的表现,于是统计物理学应运而生。就微观描述与宏观描述的关系而言,统计物理学有着理论和实践两方面的意义。从理论上讲,它是从微观到宏观的桥梁,是热力学的理论基础。就实践来说,它给出从组成一定物体的原子、分子的特性出发,解释和预见其宏观性质的途径。因此,统计物理学为固体理论、液体理论、等离子体理论、激光理论等领域提供方法和基础,并且已经在研究化学和生物过程中发挥作用。至于在实验室中还无法实现的条件下,例如一亿度高温时的电离气体,几千万大气压下的固体究竟具有什么性质,就更要借助统计物理的方法来研究。

统计物理突出抓住“大量”这一特殊的矛盾性,因此它对“宏观”和“微观”的划分也更为相对,通常不是指物质结构的层次,而是用以区分描述的层次。例如,用统计物理的方法研究银河系的结构时,每个天体都可以看成“微观”粒子。相反,如果强调微观粒子内部无限复杂的结构,有时可以把单个“基本粒子”或原子核看成宏观系统,采用统计物理的概念和方法加以研究。

平衡与非平衡

自然界中平衡是相对的、特殊的、局部和暂时的,而非平衡才是绝对的、普遍的、全局和经常的。人类首先是从特殊性着眼来认识世界,因此历史上最早发展起来的是平衡态的热力学和统计物理。直到不久以前,热力学一词几乎当然是指平衡态。非平衡统计问题的提出,固然与平衡态统计有着同样悠久的历史,但是直到近几十年才逐渐形成一些重要概念,并开始勾划出理论体系。

平衡是有条件的。热力学首先研究物体处于热平衡的条件,而统计物理最初也是计算处于平衡状态下的物质的性质。最简单的条件是,两个处于热平衡的物体温度必须相同,同一物体的温度应当处处相同。其它情况下还要补充一些新的条件,例如溶液的平衡就涉及到浓度。平衡态还应当是稳定的,不能因为外界的小小扰动而失去平衡。因此热力学同时还阐明热平衡的稳定条件。稳定条件之一,就是比热必须是正数,也就是说,世界上任何物体必须在吸热时升温,吸热后降温的规律不能存在。这类往往看起来显而易见的条件,有时在科学研究逻辑推理的过程中起决定作用。至于具体说明各种物质时比热如何又是温度的函数,例如低温下固体的比热与温度的立方成正比,而在一定的高温范围内,它又是基本上不随温度变化的常数,这是统计物理的任务。它同时还离不开物质结构的微观模型,因此必须与量子力学等其它分支结合在一起。这些都属统计物理学中比较成熟的领域。

单纯局限于平衡态之内,不可能全面认识平衡态本身。前面提到的稳定性,就涉及物体受到使其偏离热平衡的扰动时会如何反应。还有一些简单的非平衡系统,可以把平衡态热力学和统计物理的方法稍作推广来加以处理。例如,不平衡的气体或液体,虽然各处温度、压力、密度不同,只要每一个小小的局部都还基本上处于各自的平衡状态,可以用温度、压力、密度等等宏观量描述,就能用类似热力学的方法来研究。流体力学就是这样的科学,它的基本方程可以用非平衡统计物理的方法从微观的运动方程推导出来。这类“局部平衡系统”是非平衡统计物理中处理得比较好的一部分。

非平衡系统的另一种简单例子,是两个自身几乎处于平衡的系统穿插在一起。晶格中原子振动互相影响较大,使晶格处于热平衡之中。另一方面,格点上的磁矩互相作用也比较

强。如果这些磁矩从外界电磁场吸收能量,能很快就平均分配到各个磁矩,使它们基本上达到热平衡。但是磁矩与晶格间的相互作用很弱,磁矩得到的能量要经过慢得多的过程才能转交给晶格,于是我们得到有两个温度的系统:晶格温度和磁矩温度。许多磁共振现象(电子顺磁共振,核磁共振)的研究中,都遇到这类系统的实例。

平衡附近与远离平衡

非平衡现象千变万化,本来不能期望建立象平衡态热力学和统计物理那样比较完整的科学体系。但是近几十年的研究工作表明,非平衡现象也不象乍看起来那样头绪纷云,它们有一些深刻的内在规律。

平衡附近的主要倾向是趋近平衡。如果对处于平衡的系统施以局部或短暂的小扰动,它还会逐渐恢复到平衡。系统基本上回到平衡所要求的时间称为弛豫时间,这一过程通常叫作弛豫过程。如果强行维持一定的外界条件,例如使物体两端温度不同,物体中就会有热流通过。广义地说,维持某种“力”(温度差,电位差,浓度差……),就会引起某些“流”(热流,电流,质量流……),形成热传导、电导、扩散等过程,通称为输运过程。输运过程伴随着一定的能量损耗,它们也是耗散过程。一个与周围环境保持热平衡的系统,它的宏观物理量并不是一成不变的。如果在局部和短时间内作测量,就会得出在平均值上下摆动的不同结果,这叫涨落过程。

弛豫过程、输运过程、涨落过程这些平衡附近的现象,都由趋向平衡这一总的倾向决定。因此,有一些共同的规律把它们联系起来,其中最重要的是输运系数对称原理和涨落耗散定理。

输运系数对称原理是说,如果甲种“力”和乙种“力”都引起甲、乙、丙……等各种“流”,则甲种“力”引起的乙种“流”和乙种“力”引起的甲种“流”,它们对应的比例系数是相等的。这个原理的一般形式虽然是在三十年代才证明的,但是上一世纪用热力学方法为热电现象建立的一些普遍关系早是它的先声。

涨落耗散定理是说,一定物理量的涨落与相应输运(耗散)系数成比例。1905年爱因斯坦把布朗运动与扩散系数联系起来,1929年发现电路中热噪声与电阻成比例,都是这一定理的特例。它的一般形式是在五十年代初证明的。

平衡附近的热力学和统计物理到五十年代已经发展得比较完备。由此再往离开平衡的方向前进,各种物理过程的个性表现得更加突出,难于建立普遍的理论。于是非平衡统计物理的发展稍显沉寂。

但是如果离开平衡再远些,反而又出现带有普遍性的现象。许多物理系统会突然进入新的有“结构”的状态。这些状态与平衡态下的“结晶”不同,必须靠不断由外界提供能量才能维持下去,因此称为“耗散结构”。其实,耗散结构是日常生活中常见的。例如,质量不好的日光灯管会进入一种辉纹放电的状态,黑白相间的条纹就是新的“结构”。由于生物体本身可能就是一种高级的“耗散结构”,这方面的进展正在引起广泛的注意。1977年度的诺贝尔化学奖金,就给予了与此有关的工作。

远离平衡的热力学和统计物理正处在迅速发展时期,有许多尚待阐明的课题。例如,涨落过程对于形成耗散结构的作用,就是正在研究的课题。

渐变与突变

自然界是辩证法的试金石。大量粒子组成的系统中出现的突变现象,正是量变转化为质变这一辩证规律的典型表现。早在一百年前恩格斯就曾经指出:“……每种气体都有其临界点,在这一点上相当的压力和冷却能使气体变成液体。一句话,物理学的所谓常数,大部分不外是这样一些关节点的名称,在这些关节点上,运动的量的增加或减少会引起该物体的状态的质的变化,所以在这些关节点上,量转化为质”。恩格斯在这里说的,是气体凝聚为液体的“相变”点。

自然界中的相变多种多样:磁铁在加热到一定温度时突然失去磁性,许多金属在极低温下突然失去电阻,成为“超导体”,晶体会从一种对称突变到另一种对称。各种物理对象在它们处于渐变阶段时,表现出很强的个性,引起突变的原因也各不相同。但是,一旦很靠近突变点,各类宏观物质的个性就退居次要地位,机理颇为不同的相变表现出极大的相似性。例如,比热随温度的变化会在相变点附近出现一个尖峰,恰当选择比例,可以使各种相变的比热尖峰曲线重叠在一起。统计物理学作为理论物理的一个分支,其任务正在于说明这些共性。近十几年来相变理论取得了很大进展,发现在突变点附近起决定作用的不是具体的内部相互作用,而是物理系统的一些非常带普遍性的特征:例如,相互作用在一个、两个或三个方向显著,比热尖峰的形状就随之不同。

相变是平衡态下的突变,虽然还有不少没有解决的问题,但已经研究得比较清楚。非平衡态的突变更为丰富多彩,其研究工作才开始不久。激光可以看作非平衡态相变的一个典型例子。观察一个半导体激光二极管,当电流较小时,它象普

通发光二极管一样发出荧光,电流达到一定阈值后,突然转变为相干性强的激光。对激光器在阈值附近行为的研究,说明这类现象与平衡态下的普通相变有着许多共同之处。当然,理论的更重要的任务在于阐明非平衡突变所特有的规律。

我们想再次强调指出,突变是大量粒子的一种“合作”或“集体”现象,不论用什么样的简化了的理论模型来描述,都不能回避大量粒子背景所带来的一些现象,例如涨落的作用。因此,平衡和非平衡突变现象的研究,是统计物理学的重要课题,今后还要继续发展。

有 限 与 无 限

把分子看成是一个粒子,它具有许多不同的运动方式:前后、上下、左右的平动,各种转动和振动,还可能有一些不那么直观的“内在”运动。每一种运动方式叫作一个“自由度”。统计物理的对象就是有大量粒子、大量自由度的系统,其数量是如此之多,以至把它们看成具有无限多自由度的系统反而更符合实际一些。在量子场论中,往往要在连续的时间空间中逐点研究其运动方式,因而自由度也是无限多的。这就找到了场论和统计物理的相通之处。近二十年来,这两方面的发展经常互相促进,形成了一些强有力的方法,解决了一批难题。具有无限多自由度的系统的运动规律,这类系统经过突变进入新的有序状态的趋势,可以说是当代理论物理的中心课题之一,其发展正方兴未艾,而且必将影响到对化学和生物过程的认识。

恩格斯早就指出过:“……物质的运动,不仅是粗糙的机械运动,单纯的位置移动,而且还是热和光、电压和磁压、化学的化合和分解、生命和意识”。把高级运动形态还原为低级运

动形态,是注定要失败的机械唯物论的企图。但是高级运动形态并不否定和排斥低级运动形态,犹如高等数学并不排斥初等数学一样。因此,自觉地用统计物理的概念和方法研究化学、生物等更复杂、更高级的运动形态,不但是有意义的,而且对于物理学本身的深化也是必要的。这是物理学发展的历史趋势,我们应当充分注意。