

演生原理与物质世界的层次结构

人类一直尝试以不同方式认识和理解我们所面对的物质世界。从这些尝试中生长出哲学与自然科学这两种思维方式。前者侧重思辨的、定性的讨论；而后者则更加注重实证的、定量的分析。

现代物理学的研究主流可以概括为探索物质的基本组成与运动的基本规律。综合大量的研究成果，人们逐渐确立了对物质世界“还原论”的认识，并进而上升到对整个物质世界“构造式”的理解，即相信从最终可以认识的物质“原子”的运动规律出发，通过逻辑与数学的演绎即可理解整个物质世界的运动。然而，这种构造论从20世纪70年代起不断受到质疑与挑战，这与物理学本身，特别是凝聚态物理学的发展密不可分。经过长期的研究与阐释，人们逐渐形成了对物质世界“演生论”与层次结构的认识。

结合凝聚态物理学几十年的发展，演生论逐渐得到比较充分的阐释，形成了一种比较系统的自然观，逐渐被凝聚态物理学界普遍接受，并不断扩大它的影响。

1 复杂性来自多体系统的相互作用

由于凝聚态物理学以及其他学科中研究对象的复杂性，从更基本的物理规律建立起的数学模型往往难以严格求解，这使得从基本规律完全确定地演绎出宇宙变得不可能。举一个简单的例子：一粒沙中大约有 10^{23} 量级的离子与外层电子。尽管这些粒子间两体的库仑相互作用的性质已非常清楚，但在这样大的相互作用体系中，粒子的运动变得不可能严格求解。

对复杂体系的研究通常借助各种近似方法。在传统的固体物理中，人们总是将问题化为单体运动的问题进行近似求解：首先通过电子与离子运动的近似解耦合，对电子运动进行单电子近似得到传统的能带理论；离子的集体运动则导致晶格运动的量子“声子”；电子与离子的耦合则导致电声子相互作用。

特别值得注意的是，这里出现了第一个元激发的概念，即声子。它携带能量与准动量，可以参与固体中的相互作用，在很多方面均与传统观念中的“粒子”无二。但它不是由任何一种“基本”粒子构成的：它是晶格的集体运动，不能脱离固体而存在。值得指出，传统固体物理中已出现了不能用简单的构造主义理解的现象，而上述近似方法往往不适用于20世纪80年代开始陆续发现的一系列低维强耦合的凝聚态体系，如铜氧化物中发现的高温超导电性及二维电子气中的分数量子霍尔效应等。在这些体系中，电子间强烈的相互作用导致物质表现出更为奇异的性质，电子似乎在跳优美的集体舞，导致更新奇的元激发与运动规律出现。

2 有序态掩盖了高能标的物理定律

在实际研究中，一方面由于实验条件限制难以达到很高的能量（如粒子物理学），另一方面，多体体系往往在低能量（低温

度）下表现出奇异性质（如凝聚态物理学），因此我们往往只关心体系在低能区域的性质。一种普遍的现象是，在低能下，体系往往形成有序态，导致高能的物理规律（对应更“基本”组成粒子的运动规律）被隐藏起来。

一种常见的有序态的形式是对称性的自发破缺。例如，大多数物质在低温下会形成晶体，从而破坏了空间在任意小的平移下的对称性；具有铁磁性的物质（如铁、钴、镍等金属及一些化合物）在低温下会发生自发磁化，其宏观磁矩具有特定的空间指向，因而破坏了空间的各向同性，即在任意的旋转变换下的对称性。对称性自发破缺的理论构成了传统凝聚态物理学的两大基石之一。

对强关联电子体系的研究揭示出超越对称自发破缺观念的其他有序态形式，如所谓的拓扑序等，典型的体系是分数量子霍尔效应体系等。对这些有序形式的理解仍是凝聚态物理学的研究热点。

3 低能世界由有效理论描写

由于在人们所关心的低能范围内，高能的基本规律往往通过形成有序态被隐藏起来，低能的物理性质可以用一些有效理论来描写，这些低能的有效理论往往与高能规律的形式根本不同。这是因为，与高能状态及其规律所对应的大量自由度被冻结起来（低能下不能激发），它们不能从根本上影响低能态的运动规律。

一个不太恰当的比喻是海岸线的形状。当我们变换观测的尺度时，海岸线的形状会随之变化，从这一意义上说，海岸线是具有分形结构的，它在不同尺度下表现出不同的性质。然而，海岸线原子尺度的离散性质并不影响宏观尺度下我们在沙滩上的嬉戏。

类似地，体系在不同能量标度下表现出不同的物理规律，可以用完全不同的理论进行有效的描写。例如，我们相信在所谓普朗克能标下（ $\sim 10^{19}$ GeV）引力必定会表现出量子性质，此时我们需要更精确的量子引力来描写物质的运动，但在远低于此能标之下（如现在的粒子物理标准模型所涉及的能量）引力的量子效应可能并不重要；又如，在固体的费米能量（ $\sim 10^4$ eV）以上，电子开始发生完全的电离，我们需要等离子体物理学来描写等离子态的性质，但在此能量之下，凝聚态物理学可以很好地描写固体的行为，其中低能激发的典型能量尺度约为 10^{1-3} K；而当我们进一步降低能量尺度（相应于放大空间尺度）时，在宏观尺度下，经典物理（经典力学，经典电磁理论与经典统计力学）可以很好地描写物质的运动而无需借助量子力学。

4 低能自由度表现出普适性

微观来看完全不同体系的可能展现出相同的标度规律，这个令人惊奇的事实首先在实验中观察到。例如，图1和图2展示

出化学结构很不相同的多种铜氧化物高温超导体在核磁共振实验以及中子散射和拉曼散射实验中有很好的标度行为,即对不同体系测量得到的大量数据可以落到同一条曲线上。

不同体系的标度行为现在被认为是有效理论的自然结果。

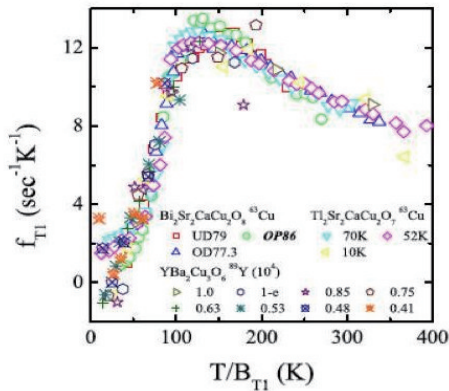


图1 铜氧化物中核磁共振实验展现出的标度行为

5 低能自由度由元激发携带

低能下体系的行为由低能自由度控制,其物理规律由有效理论来描写的另外一个后果是,体系的低能自由度由所谓低能激发体现,前面提到的声子就是一个典型的例子。这些低能激发态携带能量以及其他量子数(如声子的准动量),可以通过实验进行直接探测,因此声子与通常意义上的粒子没有区别。

按照低能激发态的起源,可以将其粗略地划分为个别激发与集体激发两类。前者与体系的组成粒子有直接的对应,如金属和半导体中的准电子,空穴以及激子等;后者则起源于电子和离子等组成粒子的集体运动,与组成粒子有根本的不同,如上文提到的晶体中的声子。在强关联体系中,由于电子之间强烈的相互作用,电子的集体运动常常表现出新奇的激发形式,即所谓的电子分数化行为。例如,在分数量子霍尔效应体系中,电子与磁通形成复合粒子,它的激发态可以具有 $1/3$ 或 $1/5$ 的电子电荷;又如,在高温超导体中,理论认为体系中存在电子的自旋-电荷分离,即电子的自旋自由度与电荷自由度分别由不同的元激发携带,分别称为自旋子和空穴子,它们在不同相中呈现出丰富的禁闭与解禁闭现象;再如,在一类“自旋冰”体系中,理论预言存在一种磁单极子形式的激发,实验观测证实了它的存在,而“自由的”磁单极子作为一种理论上允许的基本粒子至今尚未在实验上确认。

6 理论的层次结构:什么是基本规律?

尽管人们可以将物质还原到“基本”粒子研究其运动规律,但这些规律对应于体系微观的、高能规律。当体系中存在大量相互作用的粒子时,模型的复杂性导致其不可能精确求解。但当体系处于低能态时,大量的高能自由度被冻结,体系往往演生出新的有序态,高能物理规律被隐藏起来。决定体系的低能自由度由低能元激发携带,它们往往与组成粒子具有根本的不同,因而描写其性质的有效理论往往与高能理论很不相同,而不同的体系则可能由相同的有效理论描写,并具有类似的低能性质。

简单说来,大量的高能自由度被冻结起来,体系的低能物理性质仅由少数低能自由度决定,因而微观来看十分不同的体系可能具有相同的低能有效理论形式,从而在实验中表现出标度行为。

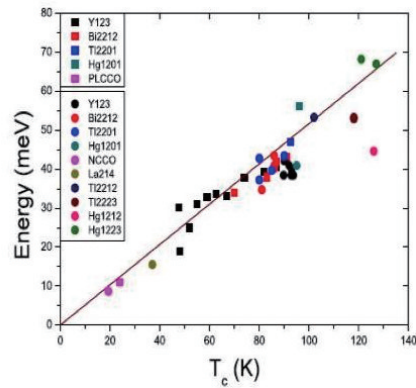


图2 铜氧化物中中子散射与拉曼散射实验展现出的标度行为:Spin-roton激发

基于以上论证可以得到如下结论:随着复杂度的升高,物质世界将形成不同的层次。尽管理解每一层次的规律需要上一层次已建立起的理论作为支撑,但复杂性的升高导致每个层次都演生出全新的“基本”规律,每一层次的低能行为均由相应的“基本”规律完全描写。

7 演生的宇宙会是光子和电子的起源吗?

在考察了低能下体系的元激发与相应的有效理论后,可以看到,复杂的相互作用体系演生出的低能元激发可能是全新的,它们处处表现与通常理解的基本粒子无二,而且往往具有简单的运动规律。因而,一个有趣的问题是,往往被视为物质基本组成的光子与电子等粒子是真正“基本”的吗?它们有没有可能是演生出来的呢?

详细说来,人们要问:我们通常理解的真空是不是一个强关联系统的基态呢?光子与电子等粒子是不是这个体系的低能激发?描写这些粒子规律的标准模型是不是这一体系的低能有效理论?有没有可能构造这样的强关联体系,使之满足上述要求?关于这种体系的构造,已经有很好的尝试。

值得强调的是,这样的构造即使成功,也不意味着人们达到了比标准模型更进一步的对基本粒子与基本运动规律的认识。例如,在文小刚教授与合作者的构造中,强关联的弦-网体系由玻色场构成,费米子是玻色弦的末端振动模式,这并不意味着我们证明了玻色子比费米子更基本。它只是提供了一个具体的例子来支持如下观点:人们用来描写物质世界的一切理论,包括物质粒子的概念本身,都是低能下的有效理论;建立有效理论的意义不在于帮助人们认识物质世界的“本质”组成或“终极”规律,而仅在于建立不同实验结果之间的数学关系。

作者/张龙

作者简介:北京大学量子材料科学中心,博士后。

(责任编辑 王丽娜)