

Is there a unified theory explaining all correlated electron systems?

是否存在关联电子体系的统一理论

李涛

中国人民大学物理系, 北京 100872

E-mail: litao_phys@ruc.edu.cn

2016-09-05 收稿, 2016-09-09 修回, 2016-09-09 接受, 2016-11-08 网络版发表

国家自然科学基金(11674391)和中国人民大学研究基金资助

摘要 对称性自发破缺和费米液体理论作为凝聚态物理的两大基石是我们理解凝聚态物质的结构、物性、相变的出发点. 在强关联电子系统中, 电子关联效应有可能导致超越对称性自发破缺的新的有序形式和与之相应的新的元激发形式. 这些新的有序形式往往与量子力学特有的非局域性相关, 并伴随着低能规范自由度的涌现. 为此, 有必要扩展传统的朗道理论范式, 使我们对物质结构的认识提升到量子波函数的层次.

关键词 朗道范式, 强关联电子体系, 拓扑序与量子序

凝聚态物理是研究由大量粒子聚集构成的体系的结构、物性、以及相变机制的一门学科. 凝聚态物理的研究对象非常广泛, 构成凝聚态体系的粒子既可以是满足量子运动规律的微观粒子, 如固体中的电子和原子核, 也可以是满足经典运动规律的自由度, 例如溶液中的生物大分子或者沙堆中的沙粒, 甚至可以是各种抽象的对象, 例如生物种群中的个体或复杂网络中的节点等. 人们从很早就认识到, 这些表面上看似毫不相关的研究课题实际上存在着深刻的内在联系. 当构成体系的粒子数趋于无穷时, 体系在宏观尺度下的行为将涌现出新的概念、原理和运动规律. 这些宏观尺度下的概念、原理和运动规律很大程度上不依赖于体系构成粒子的相互作用细节, 而是决定于一些普适的物理原理. 追求物理理解的统一一直是凝聚态物理这门看似庞杂的学科的重要的发展脉络, 这一特征同时也使凝聚态物理就其基础性和深刻性而言不亚于任何其他学科, 从而使其具有长久的生命力^[1].

凝聚态物理是由固体物理研究发展演变而来的. 对称性及其自发破缺是研究凝聚态物质的结构、物性

和相变的统一范式. 这一研究范式是在超导、超流、磁性等一系列凝聚态物理问题的研究基础上发展而来的, 通常称为朗道范式. 这一研究范式同时深刻地影响了液晶、多聚物等软凝聚态物理的研究以及自旋玻璃、神经网络、生物、社会及信息等与凝聚态物理交叉的学科的研究^[2]. 按照这一范式, 凝聚态物质的结构由体系对称性的自发破缺方式进行分类, 体系的低能激发行为由基态对称破缺的类型决定. 对于相互作用的费米子系统, 如果相互作用不能诱发对称性的自发破缺, 那么体系的低能激发能谱将可由无相互作用的费米系统的低能激发谱通过绝热演化得到, 一般称之为朗道费米液体行为. 不同物态之间的相变行为由对称性破缺的连接方式以及空间的维度决定, 可以归结为有限的几种普适类. 这一研究范式的确立极大加强了凝聚态物理学家分析具体物理体系的能力.

然而, 从20世纪80年代开始, 随着量子霍尔效应、高温超导以及量子磁性体系的研究, 人们逐渐认识到上述朗道研究范式的局限性^[3~5]. 上述这些体系都是典型的强关联电子体系, 即电子相互作用无法

引用格式: 李涛. 是否存在关联电子体系的统一理论. 科学通报, 2017, 62: 5–8

Li T. Is there a unified theory explaining all correlated electron systems? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 5–8, doi: 10.1360/N972016-00985

通过微扰理论加以理解的体系. 这些体系的研究对于朗道范式提出的主要挑战有: (1) 对称性的自发破缺是否是分类物质状态的唯一依据? (2) 对于不存在自发对称破缺的相互作用费米子系统, 其低能激发是否一定满足费米液体理论的预期? (3) 是否存在超越由对称性和空间维度决定的新的相变的普适类?

对称性自发破缺对应的有序结构一般采用局域物理量的关联函数加以描述. 这些关联函数在无序态呈现指数衰减行为, 在对称破缺态呈现长程关联. 例如, 铁磁体中的磁性有序可以用磁矩的方向关联加以描述. 这种描述方式不论对于经典系统还是量子系统同样适用. 在朗道范式下, 构成粒子的量子特性除了有可能引入新的对称性, 并且决定给定状态的能量稳定性之外, 对于物质结构的描述并不起本质作用. 尤其是, 量子力学区别于经典力学最显著的特点, 即量子力学的非局域特性, 在物质结构的描述中并没有扮演本质的角色.

在最近30年的研究中, 人们发现在强关联电子系统中, 建立在局域物理量关联函数基础上的对称性自发破缺理论往往无法给出所研究体系物质状态的有价值的描述, 例如分数量子霍尔态、高温超导体的赝能隙态, 以及几何阻错的量子磁性体系中的量子自旋液体状态等. 这些状态在对称性自发破缺的意义下都是平庸的, 但是却绝不等价于高温下的无序状态. 人们发现, 在这些强关联电子体系物态的描述中, 量子力学的非局域性都扮演着至关重要的角色. 这具体表现在, 在这些体系的低能物理中, 往往会涌现出各种形式的规范自由度. 在此基础上, 人们发展了拓扑序以及一般的量子序的概念.

拓扑序是一种典型的非朗道意义的有序形式, 它用于描述一个有能隙的量子体系的基态的整体结构^[6]. 这种整体结构在任意局域物理量的关联函数中都无法体现. 对于一个有能隙的量子体系的基态, 所有局域物理量的关联函数都是指数衰减的, 在这一点上它与平庸的高温无序态并没有差别. 但是, 具有拓扑序的量子基态蕴含着平庸的高温无序态所没有的非局域量子关联, 这种非局域的量子关联以低能下分立的规范自由度的方式体现. 分数量子霍尔态是这一状态的典型代表, 另外严格可解的量子磁性模型, 例如Kitaev模型等的基态, 也为这一概念提供确切的例证^[7].

在很长一段时间里, 人们对于拓扑序所蕴含的

整体量子关联只能给出间接而模糊的刻画, 即采用基态拓扑简并的概念来描述拓扑序. 直到2006年, 人们发现这一非朗道意义的有序结构可以采用量子纠缠的概念加以理解^[8,9]. 量子纠缠不同于局域物理量的关联函数, 它直接探测量子多体系统的波函数, 可以反映量子体系在波函数上的非局域结构. 更加一般地, 对于无能隙的量子系统, 人们引入了所谓量子序的概念^[10]. 具体地, 由于规范自由度的引入, 我们可以采用对称群的不同投影表示来区分具有相同物理对称性的不同量子物态.

凝聚态体系的低能激发是由基态的有序形式决定的. 具有非朗道有序形式的强关联体系有可能表现出各种新奇的激发形式. 一个重要的例子是与拓扑序对应的分数化的激发形式. 例如分数量子霍尔效应体系中具有分数电荷和分数统计的元激发, 以及量子自旋液体中的分数化的自旋子激发, 它们都是拓扑非平庸的非局域激发. 从实际材料和现实的模型体系中寻找分数化激发存在的确切证据是凝聚态物理的一个重要前沿课题. 另外, 规范自由度的引入将有可能导致非费米液体行为的出现. 例如, 对于无能隙系统, 低能规范涨落散射造成的奇异自能修正将导致费米子传播子获得奇异的反常标度维数, 从而使其失去准粒子的相干性. 这有可能为理解高温超导体反常的正常态物性提供了一种可能的途径^[11]. 还有, 拓扑简并度的存在有可能导致对Luttinger定理的修正, 从而给出不同于常规费米液体的新的费米液体行为^[12]. 这有可能在一些重费米子体系的物性, 尤其是霍尔响应中得到体现.

在此, 有必要区分相互作用体系在低能下涌现的规范自由度和体系固有的静态规范结构. 在上述拓扑序和量子序的讨论中, 低能规范场以动力学自由度的形式出现. 而在另外一些凝聚态体系中, 低能有效模型有可能具有固有的静态规范结构(例如各种形式的Berry相位结构). 这些结构使得体系的基态具有某种拓扑非平庸性. 这方面典型的例子有各种拓扑绝缘体、拓扑超导体以及拓扑金属或拓扑半金属. 与本文所讨论的非朗道意义的有序形式的本质区别在于, 这些体系中的电子仍然可以采用自由粒子图像和朗道费米液体图像加以描述.

非朗道框架的有序形式和低能激发形式对基于对称性自发破缺的传统相变理论也提出了挑战. 例如, 按照朗道理论, 两个不同自发对称破缺的物态间

一般不可能存在连续相变. 但是在引入分数化激发和低能规范自由度之后, 这样的连续相变可以以“退禁闭的量子临界点”的方式存在^[13]. 对于涉及拓扑序和量子序的相变行为, 目前仍然没有系统的研究.

总之, 对于强关联电子体系, 电子关联效应将有可能导致超越局域物理量关联和对称性自发破缺的新的有序形式, 因此我们需要扩展传统的朗道理论范式, 以涵盖这些新的有序形式以及相应的元激发形式和相变普适类型. 如何在模型研究和实际材料研究中发现更多超越朗道范式的更加确切的例证将是凝聚态物理发展的一个重要方向. 最近十几年来, 随着数

值算法的进步和关联电子材料研究的深入, 人们在这一领域取得了大量的成果. 在基础理论方面, 人们对于对称性和拓扑在关联电子体系中的相互影响, 以及对于低能有效场论和严格可解模型在新的有序结构的分类问题和相变问题中的应用都取得了非常大的进步. 在这些进展的基础上, 人们有望在不远的将来, 形成关于强关联电子体系认识的新的统一范式, 使我们关于物质结构的认识提升到量子波函数的层次. 这一新的范式的确立将有可能导致高温超导机理和量子磁性理论的重大突破, 并导致室温超导、拓扑量子信息处理等一系列新的革命性应用的实现.

参考文献

- 1 Anderson P W. More is different? *Science*, 1972, 177: 393–396
- 2 Anderson P W. *Basic Notions of Condensed Matter Physics*. London: Addison-Wesley, 1984
- 3 Laughlin R B. Anomalous quantum hall effect: An incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 1395–1398
- 4 Anderson P W. The resonating valence bond state in La_2CuO_4 and superconductivity. *Science*, 1987, 235: 1196–1198
- 5 Anderson P W. Resonating valence bonds: A new kind of insulator? *Mater Res Bull*, 1973, 8: 153–160
- 6 Wen X G. Topological orders in rigid states. *Int J Mod Phys B*, 1990, 4: 239–271
- 7 Kitaev A. Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Ann Phys*, 2003, 303: 2–30
- 8 Kitaev A, Preskill J. Topological entanglement entropy. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 110404
- 9 Levin M, Wen X G. Detecting topological order in a ground state wave function. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 110405
- 10 Wen X G. Quantum orders and symmetric spin liquids. *Phys Rev B*, 2002, 65: 165113
- 11 Lee P A, Nagaosa N. Gauge theory of the normal state of high T_c superconductors. *Phys Rev B*, 1992, 46: 5621–5639
- 12 Senthil T, Sachdev S, Vojta M. Fractionalized Fermi liquids. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 216403
- 13 Senthil T, Vishwanath A, Balents L, et al. Deconfined quantum critical points. *Science*, 2004, 303: 1490–1494

Summary for “是否存在关联电子体系的统一理论”

Is there a unified theory explaining all correlated electron systems?

LI Tao

Department of Physics, Renmin University of China, Beijing 100872, China
E-mail: litao_phys@ruc.edu.cn

The Landau theory of phase and phase transition, which describes the state of matter by the spontaneous symmetry breaking, and the Fermi liquid theory of interacting Fermi systems are the two corner stones of contemporary condensed matter physics. They act as our starting points to understand the structure, excitations and phase transitions of any condensed matter system. According to such a Landau paradigm, an interacting Fermi system will behave just as non-interacting Fermi gas system at sufficient low energy, if the interaction is not strong enough to induce a symmetry breaking phase transition in the system. In such a case, the perturbation expansion in the interaction strength is assumed to converge and the low energy excitation can be connected to that of a Fermi gas system adiabatically. In strongly correlated electron systems, such as the high temperature superconductors and quantum antiferromagnets, a perturbative picture on the interaction effect usually fails. The correlation effect between the electrons can induce new forms of order that are beyond the Landau symmetry breaking paradigm. Non-Fermi liquid behavior can emerge in the fully symmetric correlated phases. The Mott insulating phase and the quantum spin liquid phase are the most prominent example of such exotic state of matter. After about three decades of intensive studies, people find that the quantum non-locality effect is at the heart of such new forms of order. The quantum non-locality effect manifests itself in the emergence of gauge degree of freedom in the low energy physics of such strongly correlated system. Such emergent gauge field is not only important for the characterization and classification of the ground state structure, but is also directly responsible for the non-Fermi liquid behavior of the system. The Landau paradigm should be extended to accommodate such new forms of order and the related new form of excitations and new universal class of phase transitions. Such an extension will elevate our understanding of the structure of matter to the level of quantum wave function. Unlike the conventional symmetry breaking order, which is characterized by the correlation functions between local physical observables, the new form of orders, which are commonly called quantum order (with the topological order as one of its typical example), can be better characterized by the entanglement property in the quantum wave function. From a mathematical point of view, the new form of order is closely related to the projective representation theory of the symmetry group, while the conventional symmetry breaking order is well described by the linear representation theory of the symmetry group.

Landau paradigm, strongly correlated electron system, topological order and quantum order

doi: 10.1360/N972016-00985

李涛

1996 年在中国科技大学物理系获得凝聚态物理硕士学位(本硕连读), 1999 年在北京大学物理系获得凝聚态物理博士学位. 1999~2005 年在清华大学高等研究中心从事研究工作, 从 2005 年起为中国人民大学物理系教授. 主要研究领域为强关联电子体系的基础理论, 重点关注高温超导微观机理和量子磁性理论研究. 在高温超导的共振价键理论和量子自旋液体的理论研究和数值模拟方法方面取得一系列成果, 在国际主流期刊发表约 40 篇论文.

