中国科大在超导量子临界现象的基础理论研究中取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/6409.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

中国科大在超导量子临界现象的基础理论研究中取得进展。近期，中国科学技术大学近代物理系副教授刘国柱课题组在凝聚态体系中量子临界现象理论研究方面取得新进展，提出了一个在量子临界体系中实现衍生超对称的必要条件，为在凝聚态物理中找寻有效超对称提供了有价值的限制和理论指导，相关研究结果以Absence of emergent supersymmetry in superconducting quantum critical points in Dirac and Weyl semimetals 为题，于7月22日发表于npj Quantum Materials 4, 37 (2019)。

超对称是基本粒子物理学家于上世纪70年代提出的概念，它将时空对称性和内部对称性结合起来。超对称理论预言，任何一种基本粒子都有与之相伴的超对称伙伴(superpartner)，它们质量相等但自旋相差1/2。超对称有望解决标准模型的等级问题(hierarchy problem)，并以很巧妙的方式消除量子场论计算过程中遇到的各种发散，是弦论的基础。由于这些原因，超对称在粒子物理领域具有重要地位。遗憾的是，经过近半个世纪的探索，科学家从未在高能物理实验中发现超对称存在的迹象，甚至连间接实验证据都没有找到。

近几十年来，凝聚态物理学家逐渐形成一个共识，通过调节某些参数，可操控粒子的运动和粒子间的相互作用，由此可在凝聚态物理体系中实现高能粒子物理领域提出和发展的重要概念。实际上，狄拉克费米子、外尔费米子、磁单极、手征反常等高能物理概念，都已在凝聚态体系得以实现。一个有趣的问题是，超对称能否在凝聚态体系中实现?2014年，有研究者提出可通过如下途径实现超对称：三维拓扑绝缘体的表面态是二维空间中的狄拉克费米子，如果粒子间的吸引力足够强，可导致库珀配对(Cooper pairing)，该表面将经历从半金属态到超导态的量子相变，在该相变的量子临界点处，狄拉克费米子质量为零，而超导序参量涨落对应的有效玻色子也是无质量的，两者质量相同(均为零)且自旋相差1/2，满足超对称的基本前提条件。重整化群计算发现，尽管在微观层次(小尺度范围)体系不满足超对称，但通过粒子间的相互作用，在宏观层次(大尺度范围)体系跑动到满足超对称的固定点。这种仅在宏观层次展现的有效超对称，被称为衍生超对称(emergent supersymmetry)。这一理论提议的潜在意义在于，可通过相对简单的凝聚态物理实验，检验超对称量子场论的诸多有趣的理论预言，并将其用于研究丰富多彩的量子临界现象。上述理论进展立刻引起广泛关注，激发了一系列后续研究，在凝聚态体系中寻找衍生超对称很快成为一个新兴的研究方向。

刘国柱课题组多年来一直从事量子相变和量子临界现象的基础理论研究，从长期的研究经验可知，如果一个量子多体系统中所有的费米型和玻色型元激发都是无质量(无能隙)的，那么该体系通常是热力学不稳定的，因为粒子间的相互作用在低能区域(对应于大尺度范围)变得特别强，导致计算诸多物理量的过程中都会遇到严重的红外发散。其后果是，描述量子临界体系的有效低能模

型可能包括非解析的相互作用项，这会阻止时空超对称的出现。前人的理论研究没有发现红外发散，原因在于他们未能恰当地考虑大量重要的极低能粒子散射过程。基于上述想法，刘国柱课题组仔细研究了狄拉克和外尔半金属体系中超导量子临界点处的物理性质，证实无质量的费米子和玻色子间的相互作用确实能导致红外发散，并因此产生无穷多的非定域(non-local)相互作用项，从而使得体系无法满足超对称。想在凝聚态体系中实现超对称，必须首先保证红外发散和非定域相互作用项均不存在，这为衍生超对称的探索提供了一个严重的约束条件。一般而言，如果费米子和玻色子均有质量(能隙)，则体系不存在任何红外发散，这样的体系才是实现衍生超对称的理想候选者。该成果得到npj Quantum Materials 审稿人的高度评价，认为作者们做了重要的、技术上很清晰的分析，所得到的结果非常有趣和令人惊奇，提供了原创、重要的见解。

该论文第一作者为中国科大2019届博士毕业生赵鹏露，刘国柱为通讯作者和第二作者。该项研究得到国家自然科学基金的支持。

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发