应变玻璃中的类玻色峰与玻璃的物理统一性

马恩

西安交通大学, 金属材料强度国家重点实验室, 材料创新设计中心, 西安 710049

E-mail: maen@xjtu.edu.cn

Boson-peak-like behavior found in strain glasses suggests that physical phenomena are universal across various types of glassy states

En Ma

Center for Alloy Innovation and Design, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

E-mail: maen@xjtu.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2021-1150](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1150)

2021年诺贝尔物理学奖最近揭晓, 意大利罗马大学教授乔治·帕里西(Giorgio Parisi)由于“发现了从原子到行星尺度的物理系统中无序和涨落之间的相互影响”而获奖。帕里西教授关于无序材料和随机过程的理论反映了复杂系统的物理统一性, 其开创性贡献是基于一种简单的玻璃系统——自旋玻璃^[1]而做出的: 他最早给出了非平衡体系中最简单的数学模型——自旋玻璃模型的严格解。所谓自旋玻璃^[1], 是一种由于晶格点阵中每个位置上的磁矩呈长程无序排列而形成的无序系统。

与自旋玻璃相对的长程有序态即为铁磁相。除了磁矩长程有序的铁磁相以外, 还存在着类似的长程有序的铁性相, 例如电极化长程有序的铁电相和晶格切应变长程有序的马氏体相/铁弹相。这三类铁性相具有高度的物理平行性, 会展现出高度类似的相变特征和功能特性, 并都可以被以相应序参量为变量的唯象朗道模型解释。这样的物理统一性也存在于和它们三类分别对应的、物理上高度平行的铁性玻璃系统中^[2], 包括自旋玻璃、铁电相所对应的玻璃系统——电极化长程无序分布的弛豫铁电体、马氏体相/铁弹相所对应的玻璃系统——近年来发现的晶格应变长程无序分布的应变玻璃。概括地讲, 铁性玻璃^[2]指的是铁性晶体中由于序参量长程无序分布而出现的“玻璃”态。

与这三类晶体中的铁性玻璃不同, 人们更熟悉的玻璃, 如窗玻璃、玻璃杯等, 是一种原子结构位置长程无序的结构玻璃^[3]。以玻璃原子尺度成键单元的不同, 结构玻璃可以被细分为金属玻璃、氧化物玻璃、高分子玻璃等。但有趣的是, 这些结构玻璃却具有共同的动力学弛豫特征^[4,5]。例如, 这些玻璃在玻璃转变温度附近都会经历动力学慢化, 而另一个共性特征

则是结构玻璃会在低温下(5~20 K)表现出相对于晶体物质过剩的比热异常, 该反常现象被称为比热玻色峰。玻色峰被认为是结构玻璃的典型特征, 是理解结构玻璃物理本质的重要抓手, 然而结构玻璃中玻色峰的起源当前仍然充满争论。目前, 多种理论都可以在一定程度上解释玻色峰现象, 而玻色峰真正的物理起源仍然是未解之谜。而且, 前述的三类铁性玻璃中是否也存在类似的低温比热异常依然未知。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心极端条件物理重点实验室EX4组汪卫华院士团队^[6-8]长期致力于金属玻璃的物理本质与功能特性的研究。近期, 该团队注意到了上面这一学科交叉领域存在的重要科学问题。该组博士后任帅博士与西安交通大学宗洪祥副教授等人^[9]合作, 首次发现了应变玻璃的低温比热具有与结构玻璃类似的玻色峰异常, 揭示了应变玻璃中的类玻色峰异常起源于一种新的声子软化机制。如图1所示, 应变玻璃与金属玻璃类似, 相较于其长程有序态(即马氏体相)的低温比热表现出过剩的比热异常。这一实验结果表明, 应变玻璃与金属玻璃具有相对应的动力学特征。一般认为, 金属玻璃的玻色峰和低频振动模对应的声子软化, 与体系中由原子位置结构无序造成的强烈的声子阻尼密切相关^[10,11]。应变玻璃是否也遵从类似的声子软化机制呢? 模拟研究发现^[9], 尽管应变玻璃在某一特定方向([110]方向)上存在强烈的声子阻尼效应, 但应变玻璃中的玻色峰与系统中的声子阻尼效应不相关, 与无序结构不相关, 而是起源于系统的声子谱上[001]方向的横波声学支的软化。进一步的理论分析发现, 这一新机制符合近期基于格林函数的针对玻色峰的理论预测^[12]。因此, 应变玻璃中类玻色峰异常的发现折射出玻璃(态)的物理统一性, 对铁性玻璃和

图 1 (网络版彩色)应变玻璃中的类玻色峰异常及其结构起源^[9]. (a) $\text{Ti}_{50-x}\text{Ni}_{50+x}$ 应变玻璃的约化低温比热; (b) $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ 块体金属玻璃的约化低温比热; (c) 应变玻璃各部分的振动态密度; (d) 应变玻璃的声子谱
Figure 1 (Color online) Boson-peak-like anomaly in strain glass and its structural origin^[9]. (a) Reduced specific heat of $\text{Ti}_{50-x}\text{Ni}_{50+x}$ strain glass (STG); (b) reduced specific heat of $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ bulk metallic glass (BMG); (c) vibrational density of states of each part in the strain glass; (d) phonon spectra of the strain glass

结构玻璃两个领域都具有重要的意义。该发现显示了应变玻璃所具有的新的玻璃特征，将有助于加深对包括应变玻璃在内的铁性玻璃的物理本质的理解。更进一步地，其背后的新机制表明之前在结构玻璃的范畴内理解玻色峰起源还不够，有必要对包括晶体和非晶在内的所有固体中玻色峰的起源进行再思考和再认识。

玻璃作为一种典型的复杂系统，虽然系统中充斥着随

机、混沌和无序，但其中所蕴含的物理却有规律可循。正如今年诺贝尔物理学奖获得者帕里西教授在自旋玻璃研究中所发展出来的理论广泛适用于诸如结构玻璃、阻塞系统、恒星运动等各种无序体系，寻找复杂体系背后的普适物理规律是物理学发展的原动力。任帅等人^[9]从玻色峰这个角度探讨了结构玻璃和铁性玻璃所具有的共性特征及其起源，将有望为理解“玻璃”(即无序态)背后统一的物理规律提供新的视角。

参考文献

- Mydosh J A. Spin Glasses: An Experimental Introduction. London: Taylor & Francis, 1993
- Ren X B. Strain glass and ferroic glass—Unusual properties from glassy nano-domains. *Phys Status Solidi B*, 2014, 251: 1982–1992
- Wang W H. The nature and properties of amorphous matter (in Chinese). *Prog Phys*, 2013, 33: 5 [汪卫华. 非晶态物质的本质和特性. 物理学进展, 2013, 33: 5]
- Wu Z W, Li R Z. Revisiting the breakdown of Stokes-Einstein relation in glass-forming liquids with machine learning. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 276111
- Fierro A, de Candia A, Coniglio A. Interplay between the glass and the gel transition. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 107007
- Li M X, Zhao S F, Lu Z, et al. High-temperature bulk metallic glasses developed by combinatorial methods. *Nature*, 2019, 569: 99–103
- Yu B S, Sun Y H, Bai H Y, et al. Highly energetic and flammable metallic glasses. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 276112
- Shen L Q, Yu J H, Tang X C, et al. Observation of cavitation governing fracture in glasses. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf7293
- Ren S, Zong H X, Tao X F, et al. Boson-peak-like anomaly caused by transverse phonon softening in strain glass. *Nat Commun*, 2021, 12: 5755
- Yang J, Wang Y J, Ma E, et al. Structural parameter of orientational order to predict the boson vibrational anomaly in glasses. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 015501
- Fan H Y, Fan Z, Liu X J, et al. Atomic vibration as an indicator of the propensity for configurational rearrangements in metallic glasses. *Mater Horiz*, 2021, 8: 2359–2372
- Baggioli M, Zaccone A. Unified theory of vibrational spectra in hard amorphous materials. *Phys Rev Res*, 2020, 2: 013267