

《物理学报》创刊 90 周年

基于冷原子的非平衡量子多体物理研究

翟荟[†]

(清华大学高等研究院, 北京 100084)

(2023 年 8 月 24 日收到; 2023 年 10 月 1 日收到修改稿)

量子多体物理和非平衡物理相结合, 是当前物理学研究的重要机遇和挑战. 非平衡量子多体物理不仅是当前物理学多个分支共同感兴趣的问题, 而且是发展新兴量子科技不可或缺的理论基础. 冷原子体系为研究非平衡量子多体物理提供了理想的平台. 冷原子等人工量子体系的优势, 体现在研究孤立系统热化、和环境耦合导致的耗散、系统参数的扫描、跳变和周期驱动等多种非平衡动力学过程. 本文结合笔者的研究成果, 给出 3 个具体的例子, 展示基于冷原子的非平衡量子多体物理的研究, 如何突破拓扑物理研究的已有框架, 发展新的测量量子多体关联的方法, 以及丰富规范理论研究的内涵. 这类研究聚焦量子多体系统的拓扑、关联等基本性质, 利用冷原子体系的优势以实现理论和实验的定量结合, 以期提炼出具有普适性的物理规律, 并推广到凝聚态物质、核物质等其他物理系统的非平衡过程.

关键词: 冷原子, 量子多体物理, 非平衡动力学**PACS:** 03.75.-b**DOI:** 10.7498/aps.72.20231375

1 非平衡量子多体物理是当前物理学研究的一个重要机遇和挑战

物理学中对非平衡物理的研究有着悠久的历史. 过去我们在非平衡物理的研究中所取得的成就, 很大一部分是关于经典体系的, 例如发展出经典混沌、自组织等重要的物理概念. 而对于量子系统的非平衡物理, 很多研究是针对光学腔、量子点、电子电离等自由度比较少的量子系统. 因为自由度比较小, 最常用的方法是数值求解量子多体运动方程, 但这种研究方法很难推广到量子多体系统.

物理学中对量子多体物理的研究在过去的一个世纪里也取得了辉煌的成就. 我们对量子多体物理的研究, 大多数情况下关注于平衡态性质, 特别是低能平衡态以及平衡态附近的线性响应区域的关联、对称性和拓扑等效效应. 除了强关联等少数方面以外, 已经有相当完善且普适的理论框架, 例如

对称性破缺、重正化群、拓扑分类等; 已经发展出很多行之有效的理论方法, 既包括各种低能场论和平均场近似等解析方法, 又包括蒙特卡罗、密度矩阵重正化群和张量网络等数值方法; 绝大部分理论的预言都已经被大量的实验所证实.

相比之下, 将非平衡物理和量子多体物理结合起来, 研究量子多体物质远离平衡物理时的物理效应, 虽然也有一些进展, 但相对于经典非平衡物理和平衡态量子多体物理的成就来说, 还有很大值得探索的空间. 针对远离平衡的量子多体系统, 发展行之有效的理论方法、建立普适完善的理论框架、形成理论实验相互印证的体系, 还有很长的路要走, 也是当前物理学留给我们这一代物理人的一个重要机遇.

非平衡量子多体物理问题是当前物理学多个分支的共性问题. 下文会重点谈到, 研究非平衡量子多体物理是当前冷原子物理的核心问题之一. 此外, 随着近年来超快光学的发展, 将超快激光作用

[†] 通信作者. E-mail: hzhai@mail.tsinghua.edu.cn

在凝聚态材料上,在短时间内就将电子体系激发到了很高能量的非平衡态.又如,核物理研究中的相对论重离子碰撞,也是关于致密核物质的非平衡现象.在量子信息的研究中,我们也关心量子信息在多体系统中的扩散、传输和提取等动力学过程.在引力的量子效应的研究中,人们关注的比较多的也是一些非平衡过程,例如信息在落入黑洞以后为何丢失,信息能否穿过虫洞等.这些研究对基础物理学的发展都具有重要的意义.

对非平衡量子多体物理的研究也是发展未来量子科技不可或缺的基础.对未来量子科技的期待,不满足于被动地利用量子效应,而是要去主动地去操控量子效应.在大多数情况下,比如在量子计算过程中,未来的量子器件都需要集成大量的量子比特,而且这些量子比特之间需要有相互耦合.也就是说,这样的量子器件必定是一个量子多体系统.而对这些量子器件的操控,就是通过调节外界参数来改变量子态的状态,这不可避免地涉及多体量子态的非平衡过程.此外,绝大部分量子系统在长时间演化下都会达到热平衡,从而失去局域信息;量子系统也都不可避免地 and 外界环境有耦合而造成耗散.因此,研究量子物质如何响应这些动力学过程,对量子器件的设计非常重要.

2 冷原子物理的发展为非平衡量子物理的研究提供了理想平台

近年来,冷原子物理的发展为研究非平衡量子物质提供了一个非常理想的平台.第一,冷原子体系的特征能标比较低.比如,一个超冷费米原子气体的特征费米能量只有几千赫兹,很容易就能把这个系统激发到一个能量相对于费米能来说很高的激发态.第二,冷原子体系的特征响应时间一般是毫秒量级,因此,在微秒尺度上操控冷原子系统,就已经是超快过程了,从而比较容易实现对系统的超快控制和测量.第三,冷原子体系相对比较干净,不存在内核电子和声子等自由度的干扰,实验系统的建模比较清楚,有利于实验和理论定量地比较.第四,冷原子系统多种多样的操控手段,可以精确地制备不同的多体态,也可以实现各种多样的非平衡过程.离子阱、超导量子计算、核磁和金刚石色心等人工量子体系在很多方面也同样具有优势.

结合这些实验平台的发展,近年来已经发现诸

多新的非平衡物理现象.例如,针对量子多体系统中的热化现象,近十多年来的研究先后发现了多体局域化 (many-body localization)^[1,2]、多体伤疤态 (many-body scar state)^[3] 等违反热化的新现象,丰富了对量子统计的认知.又如,如果以一个固定的频率去驱动一个量子多体系统,有一类系统会以该驱动频率一半的频率给出稳定的响应.这一现象被称为离散时间晶体 (discrete time crystal)^[4].正因为冷原子等物理系统的这些优势,关于多体局域化、量子多体伤疤态和离散时间晶体的实验工作,绝大多数都是在冷原子、离子阱和超导量子计算等实验平台上开展的.

结合冷原子物理近年来的发展,我认为具体研究内容将着眼于以下五类典型的非平衡过程及其相应的物理问题.

1) 孤立系统的热化 (thermalization) 过程. 一个一般的量子多体态演化足够长时间以后能达到热平衡,这是量子统计的基础假设.这里核心的物理问题,一方面是关注多体局域化、多体伤疤态等违反热化的例子;另一方面也关注在热化过程中,量子信息如何从局域扩散到整体.

2) 和环境耦合导致的耗散 (dissipation) 过程. 任何系统都不可避免地和环境有耦合.一般系统中很难明确地知道实际的耗散的形式和强度,而冷原子体系中可以可控地加入耗散,其形式和强度都比较明确,因而有利于理论和实验的定量比较.这里我们着重关注量子多体系统中关联和拓扑等效应是如何被耗散所影响的.

3) 系统参数扫描 (ramping) 导致的非绝热过程. 当绝热地调节参数时,系统处于瞬时本征态,这种绝热动力学能反映出系统的拓扑、关联等性质.冷原子实验上可以准确地控制参数变化的速率,从绝热过渡到非绝热,从而在更广泛的动力学过程中研究拓扑和关联效应.

4) 系统参数跳变导致的淬火 (quench) 过程. 冷原子体系的很多参数都是通过光和原子相互作用来控制.光的调控速度可以远快于原子系统的响应速度,因而可以实现系统参数的瞬间改变,从而使系统处于非常远离平衡的状态.过去我们对普适性的研究,大多集中在低能量的平衡态,这里我们可以探索在高能量远离平衡过程中的普适性.

5) 周期驱动 (periodic driving) 过程. 由于冷原子体系的特征能标一般是千赫兹范围,所以可以

比较容易地实现高频驱动,使驱动的频率比系统的特征能标大.在这种高频驱动的区域中,也比较容易体现出周期驱动问题的普适行为.

利用冷原子等人工量子系统的上述优势,研究上述各种动力学过程中的量子多体物理,将理论和实验定量地结合起来,重点是提炼出具有普适性的物理规律,有可能推广到凝聚态物质、核物质等其他物理系统的非平衡过程,这是基于冷原子体系研究非平衡多体物理的任务和目标.

最后,结合我们课题组在这方面的研究,给出3个有代表性的例子,使读者对这方面的研究有更具体的了解.

例1 利用动力学方法制备和探测拓扑性质

著名理论物理学家 Haldane^[5]于20世纪80年代提出了一个可以表现出拓扑性质的理想模型,后来成为研究拓扑物理最基础的模型之一. Haldane在提出这一模型时,也认为这个理想模型不太可能被直接物理实现.他写道:“While the particular model presented here is unlikely to be directly physically realizable, ...”^[5].而冷原子光晶格的发展使实现这一模型成为可能,但是,要实现 Haldane 模型所要求的特殊的长程跃迁还是很困难的.我们课题组^[6]于2014年提出了利用周期驱动的动力学方案来实现这一模型的方法.其中最基本的想法就是利用高频驱动, Floquet 理论可以给出这个系统的一个等效哈密顿量.我们发现,只要设计合适的驱动方式,等效哈密顿量就可以出现 Haldane 模型所要求的长程跃迁.同年,苏黎世理工实验组^[7]采用同样的方案实现了这一模型,并观察到这个模型中存在拓扑相变的证据.2016年诺贝尔奖授予 Haldane 时,专门引述了这个实验作为支撑.

基于这一进展,进一步可以提出的问题是,在冷原子中实现拓扑模型,能否揭示此前尚未发现的新拓扑效应?此前,在凝聚态体系中,拓扑效应主要集中在平衡态的能带结构和近平衡态的输运行为.而我们结合上述冷原子体系的特点,将研究聚焦在拓扑物理在远离平衡的动力学中的效应.特别是,冷原子体系中的拓扑模型是通过光晶格产生的,调节光场的时间可以远远快于原子运动的时间,因而就可以研究在远离平衡的淬火动力学中的拓扑效应.我们提出并证明,通过观测动力学过程中可观测量轨迹的“缠绕数”,可以表征哈密顿量的

拓扑数^[8].这就可以突破此前拓扑效应研究的框架.之后,汉堡大学实验组按照这个建议,实验证实了这一理论(如图1所示).他们同时指出,这揭示了基态拓扑和远离平衡动力学之间的一个精彩的联系^[9].最近,中国科技大学的实验组还基于这个非平衡效应,在实验上测量出了 Chern-Simons 不变量的量子化.

例2 利用动力学方法测量量子多体关联

线性响应理论是探测量子体系关联效应的基础.我们熟悉的各种实验,比如各种输运实验、角分辨光电子谱和中子散射等,都是通过对一个物理系统施加不同形式的扰动,然后观测物理系统对这些扰动的响应.这里重要的是这些扰动相对于系统的特征能量尺度来说可以被看成一种微扰.线性响应理论就是把这种对微扰的响应和物理系统内禀的关联函数联系起来,建立这一联系的一个重要公式被称为 Kubo Formula.

我们结合上述动力学过程,拓展了线性响应理论的内容.例如,考虑耗散作为一种对物理系统的微扰,研究了物理系统对耗散过程的响应.因为此前各类实验中所施加的扰动都可以由厄米算符所描述,而描述耗散过程的是非厄米算符,所以我们将这种线性响应称为“非厄米线性响应理论”^[10].我们给出了推广的 Kubo Formula,发现这类线性响应可以测量和此前不同的关联函数,特别是可以给出量子临界态的“反常维度”^[10].要在实验上实现基于“非厄米线性响应”的测量,就需要明确地控制耗散的形式和强度.如上所述,这正是冷原子体系中可以做到的.清华大学实验组^[11]在一维玻色原子气体中检验了这一理论,并利用该方法首次测量出了该系统单体谱函数的“反常维度”(如图2所示).又如,在扫描系统参数的动力学过程中,因为有限的扫描速度会造成对绝热过程的偏离,我们发现这种对绝热过程的偏离也可看成一种线性响应,可以用来探测系统的关联效应.这种联系也被清华大学实验组^[12]在光晶格体系中观测到.这两种新的线性响应理论的共同特点,就是对量子多体系统是否有长寿命的准粒子激发非常敏感.换句话说,如果一个系统不具有长寿命的准粒子激发,这两种线性响应就会给出明显不同的信号.这成为这两种新的基于动力学过程的线性响应理论的重要特点.

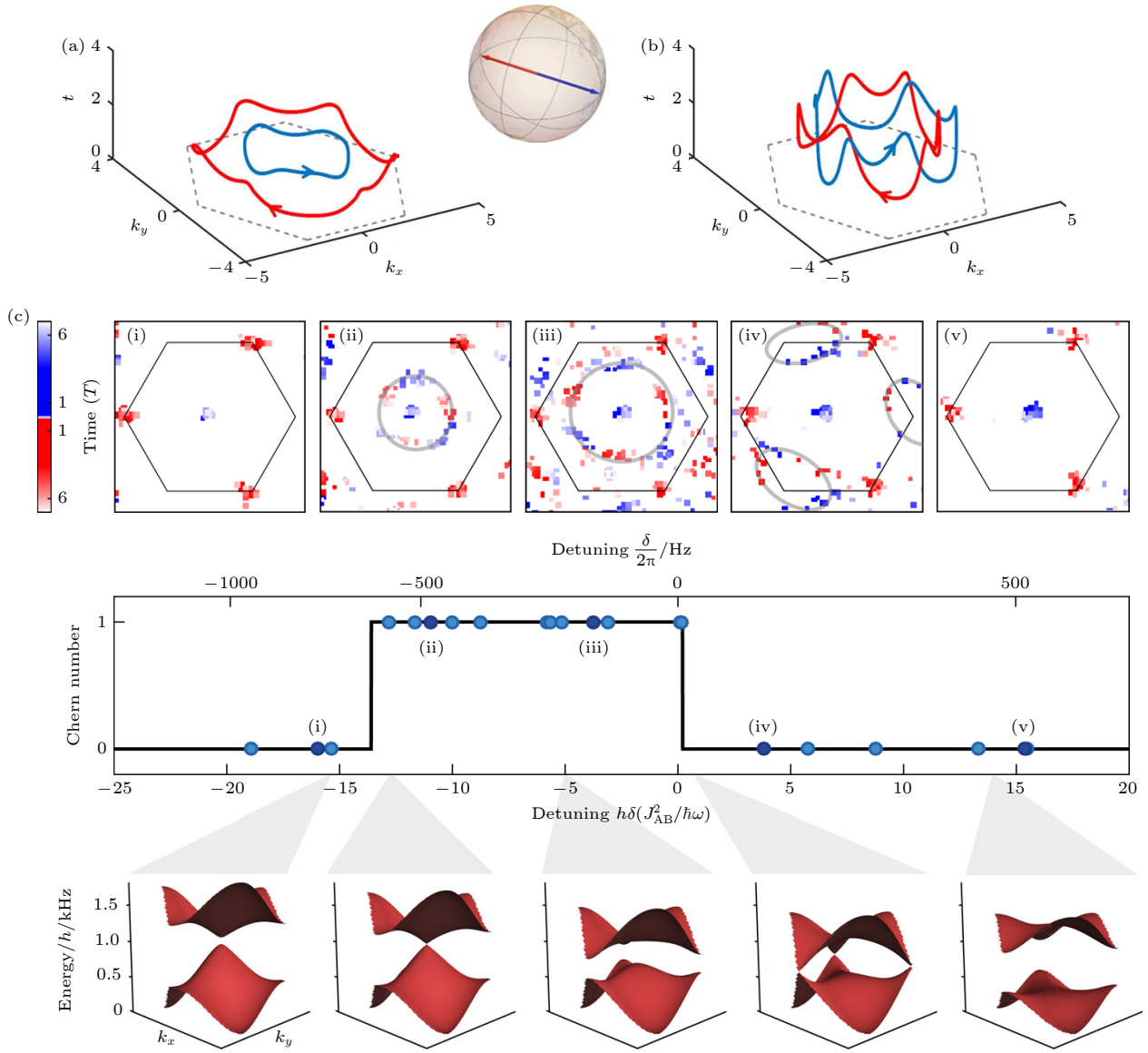


图 1 两种不同拓扑的可观测量的轨迹,“缠绕数”分别是 0 (a) 和 1(b), 分别对应平庸和非平庸的哈密顿量拓扑^[8]; (c) 汉堡大学实验测量的动力学轨迹, 以及对应的拓扑数和相应的平衡态能带^[9]

Fig. 1. Trajectories of a physics observable during unitary evolution under two topologically difference Hamiltonians, the linking numbers are zero (a) or one (b), corresponding to topologically trivial and nontrivial Hamiltonians, respectively^[8]; (c) the dynamical trajectories measured by the Hamburg University group, and the corresponding topological number and equilibrium band structure of the Hamiltonian^[9].

例 3 规范理论中的量子热化

规范理论是描述基本粒子相互作用的基石, 而量子多体系统中演生出的规范理论, 也成为描述众多凝聚态强关联系统的有力工具. 近年来, 冷原子系统也出现了呈现演生规范对称性的物理系统. 一个系统是里德伯原子阵列. 自从 2017 年哈佛大学^[13]的实验以来, 国内外有很多实验组已经或正在开展这方面的实验. 另一个是基于双周期光晶格的玻色子模型. 这方面最重要的实验进展是 2020 年由中国科技大学实验组^[14]完成的. 有趣的是, 这两个体

系在一维时演生出来的都是 $U(1)$ 格点规范理论, 是相互等价的, 其连续极限对应 Schwinger 模型^[15]. 这个模型存在一个量子相变点, 在这两个系统的实验中都被观测到^[13,14].

另一方面, 一个孤立的多体系统如何达到热平衡一直是统计物理研究所关注的核心问题之一. 量子多体系统如何达到热平衡的基本假设是本征态热化假说^[1,2]. 而针对量子热化的研究, 一个重要的方向就是找出违反本征态热化假说的例子, 其中最为人们熟知的就是可积系统和多体局域化系统^[1,2].

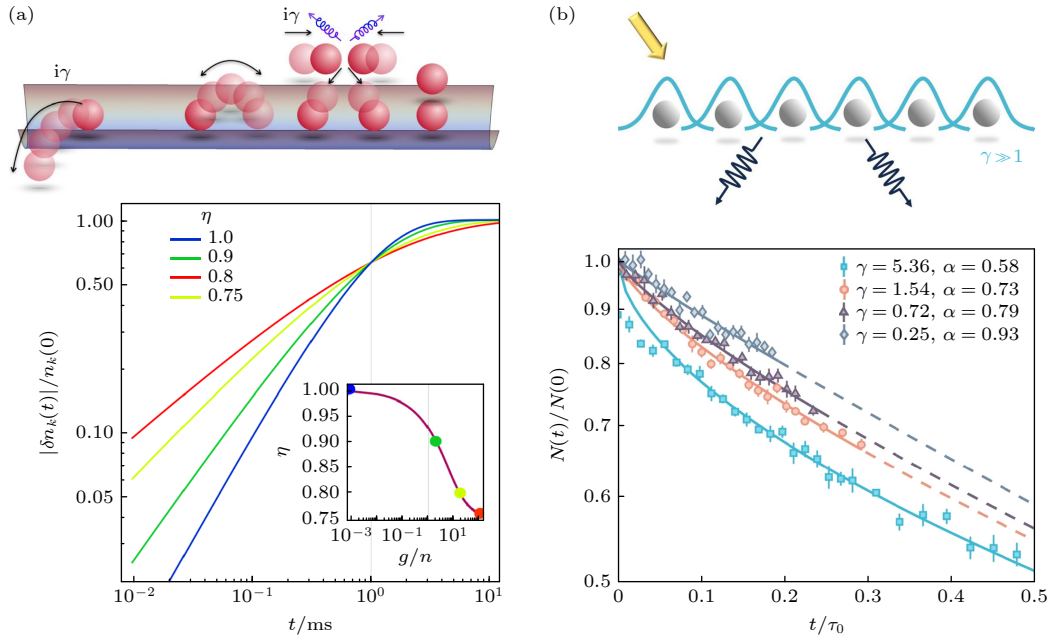


图 2 (a) 理论预言在一维玻色气体中, 加入耗散以后, 粒子数的损失随着时间增长, 服从亚指数函数的形式, 插图是亚指数函数的指数随着相互作用的变化, 可以体现系统的“反常维度”^[10]; (b) 清华实验组测量的一维玻色气体中, 加入耗散以后粒子数的减少, 满足亚指数函数形式. 不同曲线是不同的相互作用参数, 其给出的拟合指数是不一样的, 可以从中测得系统的“反常维度”及其随相互作用的强度的变化^[11]

Fig. 2. (a) Theoretical predication for one-dimensional Bose gas, the decay of particle number obeys a stretched exponential behavior when adding dissipation. The inset shows how the exponent of the stretched exponential function changes as the interaction parameter varies, revealing the anomalous dimension of the system^[10]. (b) The experimental results from the Tsinghua University group, the observed atom number obeys a stretched exponential form. Different curves correspond to different interaction parameters and the fitting yields different exponents, from which one can measure how the anomalous dimension changes as the interaction parameter varies^[11].

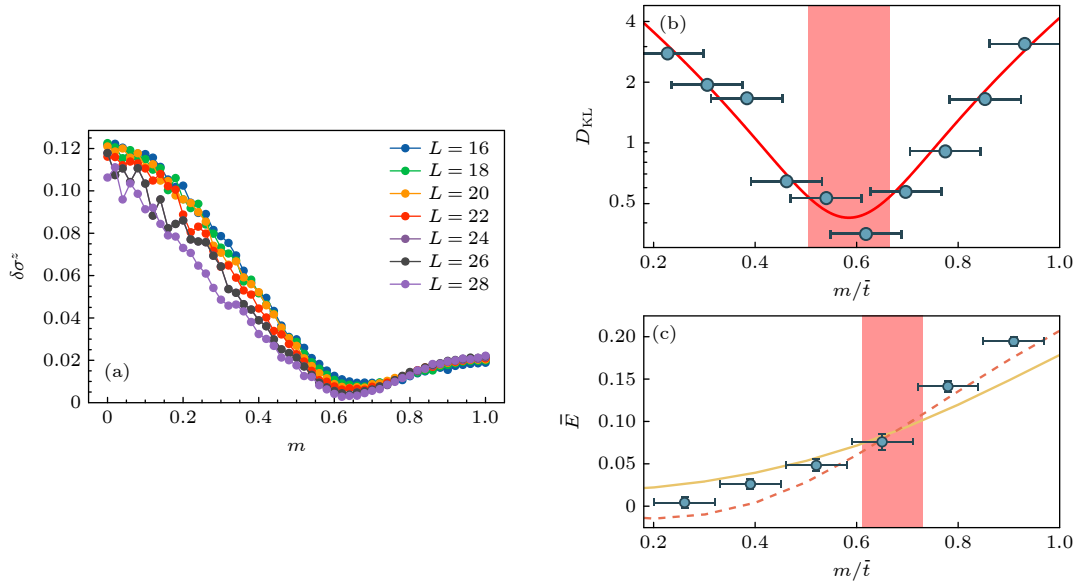


图 3 (a) 理论预言在一维 $U(1)$ 格点规范模型中, 可观测量对热化的偏离和系统中物质场质量 m 之间的关系, 只有在 $m = 0.655$ 附近的相变点, 才出现完全的热化^[16]; (b) 实验结合有限尺度变换得到的平衡态相变点的位置^[17]; (c) 实验测量动力学过程中长时间物理量的值 (数据点), 和预期的热化值 (实线) 的比较^[17]; (b) 和 (c) 的对比验证了完全热化只在相变点附近发生

Fig. 3. (a) Theoretical prediction for one-dimensional $U(1)$ lattice gauge theory, the deviation from thermalization and the mass of matter field are related, the system fully thermalizes only around $m=0.655$ at the phase transition point^[16]; (b) experimental determination of the phase transition point with the help of finite size scaling^[17]; (c) experimental measurement of long time saturation value (data points) of the physical observable, compared with the expected thermalization value (solid line)^[17]; the comparison between (b) and (c) show full thermalization takes place only around the quantum critical point.

而在规范模型中, 由于规范对称性对希尔伯特空间的约束, 使得这些体系中量子多体态的热化会表现出更为丰富的行为^[3]. 我们的工作^[16]指出, 在这个格点规范模型中, 量子热化和量子相变是存在关联的. 量子热化关注的一般是高能量激发态的性质, 而量子相变是基态以及基态附近低能物理的性质, 一般说来, 这两者没有必然的联系. 而在这个模型中, 这两者之所以有关联, 是因为它们都植根于该模型背后的规范结构. 要在实验上证实这一点, 一方面需要精准地制备和操控量子态, 并保证动力学演化过程中的局域规范对称性; 另一方面需要精确地测量基态和动力学演化过程中物理量的变化. 中国科技大学实验组在冷原子体系的实验能力胜任了这两方面的要求. 最近, 我们课题组和中国科技大学实验组^[17]合作的实验工作就证实了量子热化和量子相变相关性的理论预言 (如图 3 所示).

从上述 3 个例子中可以看到, 基于冷原子的非平衡量子多体物理的研究, 可以突破拓扑物理研究的已有框架, 发展新的测量量子多体关联的方法, 丰富规范理论研究的内涵. 这些结论都事关量子多体系统的基础理论, 而冷原子系统的实验能力使这方面的理论能得到实验的定量检验. 这样理论和实验相结合的基础研究可以极大地促进非平衡量子多体物理的发展.

参考文献

- [1] Abanin D A, Altman E, Bloch I, Serbyn M 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 021001
- [2] Altman E 2018 *Nat. Phys.* **14** 979
- [3] Serbyn M, Abanin D A, Papić Z 2021 *Nat. Phys.* **17** 675
- [4] Yao N, Nayak C 2018 *Phys. Today* **71** 40
- [5] Haldane F D M 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2015
- [6] Zheng W, Zhai H 2014 *Phys. Rev. A* **89** 061603(R)
- [7] Jotzu G, Messer M, Desbuquois R, Lebrat M, Uehlinger T, Greif D, Esslinger T 2014 *Nature* **515** 237
- [8] Wang C, Zhang P, Chen X, Yu J, Zhai H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 185701
- [9] Tarnowshi M, Unal F N, Flaschner N, Rem B S, Eckardt A, Sengstock K, Weitenberg C 2019 *Nat. Commun.* **10** 1728
- [10] Pan L, Chen X, Chen Y, Zhai H 2020 *Nat. Phys.* **16** 767
- [11] Zhao Y J, Tian Y, Ye J L, Wu Y, Zhao Z H, Chi Z H, Tian T, Yao H P, Hu J Z, Chen Y, Chen W L 2023 arXiv: 2309.10257v1 [cond-mat. quant-gas]
- [12] Liang L, Zheng W, Yao R, Zheng Q, Yao Z, Zhou T G, Huang Q, Zhang Z, Ye J, Zhou X, Chen X, Chen W L, Zhai H, J. Hu J Z 2022 *Sci. Bull.* **67** 2550
- [13] Bernein H, Schwartz S, Keesling A, Levine H, Omran A, Pichler H, Choi S, Zibrov A S, Endres M, Greiner M, Vuletic V, Lukin M D 2017 *Nature* **551** 579
- [14] Yang B, Sun H, Ott R, Wang H Y, Zache T V, Halimeh J C, Yuan Z S, Hauke P, Pan J W 2020 *Nature* **587** 392
- [15] Cheng Y, Liu S, Zheng W, Zhang P, Zhai H 2022 *PRX Quantum* **3** 040317
- [16] Yao Z Y, Pan L, Liu S, Zhai H 2022 *Phys. Rev. B* **105** 125123
- [17] Wang H Y, Zhang W Y, Yao Z, Liu Y, Zhu Z H, Zheng Y G, Wang X K, Zhai H, Yuan Z S, Pan J W 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 050401

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Non-equilibrium quantum many-body physics with ultracold atoms

Zhai Hui[†]

(*Institute for Advanced Study, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 24 August 2023; revised manuscript received 1 October 2023)

Abstract

Combining quantum many-body physics and nonequilibrium physics is an important opportunity and challenge for current physics research. Nonequilibrium quantum many-body physics is not only a subject of common interest to many branches of physics but also an indispensable theoretical foundation for developing emergent quantum technologies. Cold atom system provides an ideal platform for studying nonequilibrium quantum many-body physics. The advantages of cold atom system, as well as other synthetic quantum systems, are reflected in studying various nonequilibrium processes such as the thermalization of isolated system, dissipation induced by coupling to the environment, ramping, quench, or periodically driving physical parameters of a system. In this work, three examples from our research are discussed to show how the study of nonequilibrium quantum many-body physics with cold atoms can help us go beyond the existing framework of topological physics, uncover new methods of detecting quantum many-body correlations, and enrich the physical content of gauge theory. Such a research concerns the fundamental properties of quantum many-body system, such as topology and correlation, utilizes the advantages of cold atomic system to achieve a quantitative comparison between theory and experiment, and aims at discovering universal physical rules for nonequilibrium quantum many-body process, which can be extended to condensed matter and nuclear matter systems.

Keywords: ultracold atoms, quantum many-body physics, nonequilibrium dynamics

PACS: 03.75.-b

DOI: [10.7498/aps.72.20231375](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231375)

[†] Corresponding author. E-mail: hzhai@mail.tsinghua.edu.cn



基于冷原子的非平衡量子多体物理研究

翟荟

Non-equilibrium quantum many-body physics with ultracold atoms

Zhai Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 230701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231375

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231375>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非厄米临界动力学及其在量子多体系统中的应用

Non-Hermitian critical dynamics and its application to quantum many-body systems

物理学报. 2022, 71(17): 174501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220914>

冷原子物理中的一维少体问题

Review of one-dimensional few-body systems in ultracold atomic physics

物理学报. 2019, 68(4): 040304 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181993>

非平衡量子物态中的对称性与时间维度效应

Symmetries and effect of time dimension in non-equilibrium quantum matter

物理学报. 2021, 70(23): 230310 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211741>

里德堡原子多体相互作用的研究进展

Research progress of Rydberg many-body interaction

物理学报. 2020, 69(18): 180301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200649>

动力学淬火过程中的不动点及衍生拓扑现象

Fixed points and dynamic topological phenomena in quench dynamics

物理学报. 2019, 68(4): 040303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181928>

相互作用费米子的量子模拟

Quantum simulation of interacting fermions

物理学报. 2022, 71(22): 226701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221756>