

相互作用费米子的量子模拟

罗雨晨¹⁾ 李晓鹏^{1)2)†}¹⁾ (复旦大学物理学系, 上海 200438)²⁾ (上海期智研究院, 上海 201210)

(2022 年 9 月 7 日收到; 2022 年 10 月 31 日收到修改稿)

费米子是标准模型中物质构成的基本单元, 这些基本的粒子通过相互作用构建了物质世界. 同时, 费米子也是凝聚态物理领域和量子化学计算中需要处理的核心的微观自由度, 对理解高温超导性、刻画量子磁性、描述分子结构和功能均起决定性作用. 但是在经典计算机上模拟多费米子模型比较普遍地会遇到负符号问题, 需要的计算复杂度往往随着粒子数的增长呈指数增长. 而超冷原子系统提供了一种直接对相互作用费米子进行量子模拟的有效手段和实验平台, 即通过微观可控的方式在物理实验中实现一个费米子模型, 通过对体系进行测量获取模型的微观和宏观特性, 从而加深对相关物理机制的认知和对关键参数的测定. 近年来, 实验对多费米子系统的基态、热平衡态、量子多体动力学进行了丰富的研究, 在 BEC-BCS 渡越、费米子哈伯德模型、量子多体局域化的研究中取得多项研究进展. 在量子模拟中对经典计算不能有效模拟的物理进行研究, 包括宏观的量子现象和微观的物理机制等, 体现了可控量子系统中的量子优越性. 本文将简单介绍相互作用费米子的模型以及其在描述量子多体物质状态中的重要性, 并阐述相互作用导致的各种超流和密度波关联物态, 而这些物态对理解高温超导和量子磁性有重要科学意义. 同时, 关联物态的模拟在经典计算机上往往具有指数复杂度, 而量子模拟的相关研究在标定相变参数、表征物态性质上体现了量子优越性.

关键词: 量子模拟, 相互作用费米子, 冷原子, 光晶格**PACS:** 67.85.Lm, 37.10.Jk, 03.67.Ac**DOI:** 10.7498/aps.71.20221756

1 引言

费米子作为微观物质世界的基本构成单元, 其中的量子多体物理对描述多种不同尺度的物质状态均有重要意义. 凝聚态物理中的高温超导材料被发现已有三十余年, 但其微观物理机制仍未有定论, 这也阻碍了更具实用价值的高温超导材料的发现, 极大限制了超导材料的实用化进程. 其中一个基本的物理问题是描述高温超导相图的微观物理模型是什么, 一个重要的备选模型是费米子哈伯德模型, 但是经过长期大量的研究, 该模型是否存在超导仍未有定论, 其中重要的原因是模型的经典计算复杂度太高. 在天体物理中, 中子星是一类重要

的研究对象, 其物态方程由强相互作用费米子刻画, 而定量的物态方程对预测中等规模的恒星演化起决定性作用^[1]. 计算相互作用费米子的精确物态方程也遇到计算复杂的困难. 量子化学直接需要处理的问题就是库仑相互作用的多电子体系, 电子关联效应的模拟对分子结构和功能的预测至关重要^[2]. 该领域目前遇到的一个重要困难是关联电子的模拟在经典计算机上复杂度过高.

早在 20 世纪 80 年代, 理论物理学家费曼就提出通过进行量子模拟应对模拟自然界物理现象的经典计算复杂度过高的问题. 基于原子体系的量子模拟在过去二十年取得了长足的进展和丰硕的研究成果. 这些量子模拟的研究大致分为两类: 一类是展示新物理概念的量子模拟, 包括了拓扑物态、

† 通信作者. E-mail: xiaopeng_li@fudan.edu.cn

自旋轨道耦合、非厄米体系等的研究, 这类研究极大地丰富了对低温物质状态的认识; 另一类是对经典计算复杂度过高的量子多体物理模型的量子模拟. 强相互作用费米子的量子模拟属于后者, 研究包括运用 ^6Li , ^{40}K 等费米型原子对费米子哈伯德模型的量子模拟^[3–6], 量子多体局域化到热化的相变^[7,8], BEC-BCS 渡越的物态方程测量^[1], 关联体系量子输运^[6,9,10–12] 等.

目前, 费米子量子模拟的研究正在朝着更加可控、更低温度、更多可编程自由度的方向发展. 近期的冷原子物理实验运用空间高分辨的光场控制技术, 可以制造平整的约束势场, 研究具有宏观平移对称性的多体物态^[4,13] 和动力学^[6,12], 同时可以对约束在光晶格中的原子进行进一步的蒸发冷却达到更低的温度区间^[4,6], 亦可对所模拟的物理模型进行校准从而实现更加精确的量子模拟^[8,14]. 费米光晶格体系也从简单的晶格体系拓展至复晶格到多轨道的光晶格^[15], 为晶格、能带、关联效应之间交叉复合带来了新的发展机遇, 为新型量子物态的制备打开更广阔的空间, 为更具普适意义的可编程量子模拟提供技术和方法等层面的积累.

2 基态和低温热平衡态的量子模拟

采用碱金属原子的超精细能级可以直接实现的费米子模型具有 $\text{SU}(2)$ 对称性, 模型哈密顿量具有以下一般形式:

$$H = \sum_{K,s} K \psi_s^\dagger(K) \psi_s(K) + \sum_{K_1, K_2, K_3, K_4} [V(K_1, K_2, K_3, K_4) \delta_{s_1 s_3} \delta_{s_2 s_4} - V(K_1, K_2, K_3, K_4) \delta_{s_1 s_4} \delta_{s_2 s_3}] \psi_{s_1}^\dagger(K_1) \times \psi_{s_2}^\dagger(K_2) \psi_{s_3}(K_3) \psi_{s_4}(K_4).$$

其中 $\psi_s(K)$ [$\psi_s^\dagger(K)$] 是描述费米子的湮灭 [产生] 算符, 指标 K 表示费米子的外态自由度 (可以表示动量 k , 能带 ν 等自由度, 也可以表示实空间的格点和轨道等自由度), 下标 $s = \pm \frac{1}{2}$ 表示两个自旋自由度. 模型保留到两体相互作用, 忽略了三体和更高阶的相互作用.

在弱相互作用区间或者关联效应不显著的体系, 费米子多体系统由朗道费米液体理论描述. 因为相互作用重整化的原因, 费米面附近的激发表现为几乎自由无碰撞的准粒子. 在低温区间, 费米液

体理论一般的不稳定性仅存在于超导配对通道, 因此费米子在低温下形成超导是一种自然的选择^[16], 即使是排斥相互作用的费米子也可以通过 Kohn-Luttinger 机制在低温下形成超导配对. 费米面附近的准粒子之间的有效吸引相互作用的形式决定了不同的超导配对模式, 即 $\langle \psi_s(K) \psi_{s'}(K') \rangle$, 而不同的超导配对模式给出不同的费米超流. 自旋单态 s-波费米超流是最简单的一种费米超流, 在冷原子的量子模拟实验中已经被实现, 包括 BEC-BCS 渡越的实验^[8] 和光晶格中吸引相互作用的费米子实验^[5] 等. 通常认为自旋单态 d-波费米超流是铜基电子超导电性的本质, 冷原子光晶格实验体系中近十年一直在推进的方向是通过对光晶格中的 ^6Li 原子降温, 来回答排斥相互作用费米子哈伯德模型的基态能否支持 d-波超导^[17]. 如果不能, 则更进一步的问题是什么样的费米子模型才能描述高温超导的微观物理机制^[18]. 自旋三重态 p-波费米超流可以形成手性 $p+ip$ 的配对, 这种超流体具有非平庸的拓扑性质, 其拓扑激发支持马约拉纳费米子, 可以用来进行拓扑保护的量子计算. 这种拓扑超流在一些固体材料体系如氧化物材料和超导-拓扑绝缘体异质结中已有报道, 但未取得足够令人信服实验证据支撑. 在冷原子量子模拟体系中引入 p-波相互作用 (或者等效的 p-波相互作用), 实现拓扑超流也是目前该领域发展的一个重要研究方向, 近期运用里德堡缀饰态控制长程相互作用^[19,20]、光晶格约束 p-波共振^[21] 等技术取得了一定的突破, 有望进一步在费米子量子模拟中证据确凿地实现拓扑超流.

在强相互作用下, 费米子的基态也可以超出超导配对的范畴, 形成 Mott 绝缘体、密度波、自旋密度波等多体状态. 其中的序参量通常可以用粒子-空穴配对刻画, 即 $\langle \psi_s^\dagger(K) \psi_{s'}(K') \rangle$. 而这些强相互作用费米子量子物态的实现也可以通过引入费米面嵌套 (Fermi-surface nesting) 拓展至弱相互作用区间得以实现, 从而避免冷原子量子模拟平台中强相互作用带来的三体损失. 在冷原子二维正方光晶格 (晶格长度设为单位 1) 的实验中采用单格点成像技术观测到了自旋密度波态^[4], 其序参量由 $\langle \psi_s^\dagger(k) \psi_{s'}(k+Q) \rangle$ 描述. 这里, 自旋密度波的波矢为 $Q = (\pi, \pi)$, 自旋空间的配对由自旋三重态描述, 系统自发破缺晶格平移对称性和自旋 $\text{SU}(2)$ 对称性. 而粒子-空穴配对与超导配对类似, 同样可以有

不同的自旋通道 (自旋单态和自旋三重态), 外态 (动量和轨道) 的配对也可以形成高分波的形式^[22]. 这将给出丰富的费米子密度波态, 自发时间反演对称破缺的密度波态也可以支持相互作用诱导的拓扑物态. 实现这些奇异物质状态所需的温度与已经在实验中实现的自旋密度波态的温度在同一个数量级. 目前的费米子光晶格实验中既可以调控费米子的色散关系, 从而引入不同的费米面嵌套或者能带闭合, 又可以调控长程的相互作用. 预期在近期的实验中可以基于这些操控手段引入费米面附近准粒子复杂的相互作用形式, 从而诱导出丰富的多体物质状态.

上述超导配对和粒子-空穴配对可以导致丰富的费米子多体物态. 在微扰相互作用下, 场论计算方法可以可靠地计算系统的平衡态, 但是微扰相互作用体系的相变温度往往过低. 而在非微扰的情况下, 什么样的相互作用支持高分波的超导和高分波的密度波, 模型的相图计算等问题无法通过有效的经典计算得到, 需要的计算复杂度随粒子数呈指数增长, 而这些问题可以利用费米原子体系的量子模拟来回答, 这也是其量子优越性的一种体现.

3 量子多体动力学的量子模拟

量子多体动力学和非平衡态的物理近年来在凝聚态和原子分子光学等领域获得广泛的关注. 在铜氧化物中发现的光致超导、在弗洛凯 (Floquet) 量子体系构造的奇异拓扑边缘态、相互作用无序体系的量子多体局域化、里德堡原子阵列中发现的量子“伤疤”、破缺时间平移对称性的量子时间晶体等蕴含着丰富多彩的量子多体非平衡动力学. 在铜氧化物中发现的光致超导由相互作用费米子的量子动力学描述, 但是理解和分析具有相互作用的非平衡量子体系的长时间动力学演化比平衡态难度更大, 这就导致很难采取传统的建模加经典数值模拟的方式来理清其中的物理机制. 而在冷原子量子模拟的实验中, 既可以同时引入非平衡、相互作用、长时间演化这些复杂性的调控, 也可以把这些要素剥离出来进行从弱到强的调控, 这有助于对量子非平衡体系进行整体性、系统性的把握, 也给理论上进行建模分析带来重要的启发性.

在 ^6Li 冷原子量子模拟的研究中, 近期在一个准二维费米体系的 BEC-BCS 渡越附近发现了丰

富的量子多体动力学现象^[23,25]. 实验将约束在势阱中的 ^6Li 原子快速地从相变温度以上冷却到相变温度以下. 系统因为不能瞬时响应温度的变化, 会被激发到不稳定的非平衡态. 随着时间的演化, 这个非平衡态会逐渐达到平衡, 形成低温的费米超流体. 从高温态到低温超流的形成伴随着多个动力学过程的发生^[26]. 首先, 费米子会形成超导配对^[23], 系统中的费米激发从无能隙变成有限能隙, 而玻色型的费米子对不会立刻发生凝聚, 这时的非平衡态类似于高温超导体中无能隙态. 然后, 随着玻色型的费米子对占比的增多, 系统逐渐进入一个具有大量拓扑涡旋激发的超流状态. 这种状态下, 系统不具有长程的相位关联. 实验发现费米子对数量增长的方式具有普适性, 很大程度上不依赖于系统冷却的速率. 从费米对增长的动力学中可以提取出一个特征的时间尺度 t_f , 而快速冷却过程中产生的涡旋的数目随 t_f 呈现幂指数关系, 实验观测符合著名的 Kibble-Zurek 理论, 证实了该理论对强相互作用的费米子依然成立. 快速冷却也为产生大量随机分布拓扑激发提供了有效手段, 这些大量的涡旋表现出非平庸的空间幂律分布, 由二维 XY 模型描述^[23–25]. 最终, 非平衡态会弛豫到平衡态的费米超流. 最后阶段发生的动力学主要是正负涡旋对的湮灭, 对应的涡旋数目衰减呈现 $1/t$ 的规律^[25]. 这个过程由 XY 模型或者等效的库仑气体模型描述, 主要的模型参数包括相邻的正负涡旋湮灭的速率和涡旋的扩散系数. 实验发现涡旋湮灭存在一种“短板机制”^[25]. 正负涡旋湮灭的速率与超流密度正相关, 而扩散系数与温度正相关. 因为涡旋的有效衰减既需要涡旋在系统中的扩散也需要正负涡旋的湮灭, 因此衰减的速率由湮灭和扩散中较弱的一个决定. 在 BEC 区间, 因为超流密度足够大, 所以涡旋衰减速率由扩散快慢决定, 因此涡旋的衰减速率随温度升高而增大. 在 BCS 区间, 由于大量的未配对的费米子与涡旋碰撞可以导致有效的扩散, 所以涡旋衰减速率由正负涡旋的湮灭决定, 因此随着温度的升高而降低. 如何建立一个统一的严格理论来描述上述费米超流中的复杂动力学仍是一个有待解决的问题, 基于全息对偶理论为研究其中的复杂动力学提供了一种思路^[25,26], 但是如何将全息对偶理论与实验观测对应, 以及如何拓展至费米子体系从而描述实验中的动态无能隙物理仍然有待进一步的研究.

近期发展的空间高分辨的光场调控技术,为冷原子体系研究具有宏观空间平移对称性的量子输运动力学提供了新的机遇. 二流体理论预言超流中存在熵的波动传播对应的第二声集体激发模式. 该激发模式在实验中很难被直接观测到,而最近的实验为超冷费米子制造了平整的约束势阱^[12],可以保持系统的动量守恒,使得第二声的声速和扩散系数等重要物理量可以在密度响应函数中直接体现出来. 实验中通过布拉格谱学的手段,可以施加动量-频率可调的微扰外势以探测系统的密度响应,从而得到系统的密度响应函数. 实验测得的第二声的声速在超流区间为一个有限值,在从低温区逼近相变温度时逐渐趋近于零,而第二声的扩散系数保持为一个有限值. 实验结果印证了第二声在超流区是一个传播模式而在正常流体区是一个扩散模式. 量子输运动力学的实验为研究超流相变的普适动力学临界行为打开了新的视角.

冷原子量子模拟也非常适合于研究远离平衡的多体动力学稳态. 一类有代表性的系统是冷原子-光腔系统. 近期的实验将⁶Li囚禁在一个光学腔中,通过改变泵浦光的光强观测到了费米子体系的动力学超辐射态^[27]. 超辐射发生的临界光强(P_{th})随粒子数(N)呈幂指数关系($P_{th} \sim N^{-s}$),而费米超辐射的幂指数因为泡利不相容原理,与非简并气体和玻色爱因斯坦凝聚均不相同,非简并气体和玻色爱因斯坦凝聚体系对应的指数 $s = 1$,费米子的指数为 $1/2$. 这一费米量子统计对动力学超辐射相变的影响在实验中被证实. 另外一类有代表性的实验是冷原子高轨道光晶格体系. 近期的实验将⁴⁰K成功装载到一个二维的“棋盘”状光晶格的p-能带^[28]. 实验得到了一个长寿命的亚稳态,单分量(无相互作用)的费米子在激发能带上的寿命达到10 s,双分量的费米子寿命也达到秒量级. 这为冷原子系统模拟多轨道的关联电子模型打下了基础.

4 总结与展望

截至目前,费米冷原子体系开展了丰富的量子模拟研究. 从早期的BEC-BCS渡越过程中强相互作用费米子的平衡态相图研究,到其中的强关联量子输运动力学的测定以及费米光晶格中量子热化、量子多体局域化的研究,这些实验都不能在经典计算机进行准确模拟. 从这些实验中测定出的重要物

理参数也不能被准确计算,比如三维强相互作用费米子的超导转变温度与费米温度的比值,量子多体局域化发生的临界无序强度等. 相互作用费米子量子模拟的实验很大程度上符合费曼提出量子模拟的最初逻辑,取得的结果在诸多问题上提供了不可取代的贡献. 运用费米光晶格对量子材料中的强关联电子物态进行量子模拟的研究目前仍未超出经典可计算的范畴,主要原因包括晶格中的原子数目有限、温度偏高等. 进一步的发展需要在费米子降温的技术上或者是在量子模拟的方法、方案上开展创新. 这个方向的突破将产生极为重要的科学意义,比如回答费米子哈伯德模型的基态是否支持超导等. 通过引入更多的可控自由度比如晶格结构、多轨道自由度等,费米子量子模拟将在复杂电子材料建模分析中有助于我们进行模型构造、迭代和筛选. 更进一步的引入库仑相互作用则直接可以进行量子化学问题的量子模拟. 同时,完全可编程相互作用费米子模型的量子模拟同样也为普适量子计算提供了一条路径^[29,30].

参考文献

- [1] Giorgini S, Pitaevskii L P, Stringari S 2008 *Rev. Mod. Phys.* **80** 1215
- [2] McArdle S, Endo S, Aspuru-Guzik A, Benjamin S C, Yuan X 2020 *Rev. Mod. Phys.* **92** 015003
- [3] Boll M, Hilker T A, Salomon G, Omran A, Nespolo J, Pollet L, Bloch I, Gross C 2016 *Science* **353** 1257
- [4] Mazurenko A, Chiu C S, Ji G, Parsons M F, Kanasz-Nagy M, Schmidt R, Grusdt F, Demler E, Greif D, Greiner M 2017 *Nature* **545** 462
- [5] Mitra D, Brown P T, Guardado-Sanchez E, Kondov S S, Devakul T, Huse D A, Schauf P, Bakr W S 2018 *Nat. Phys.* **14** 173
- [6] Brown P T, Mitra D, Guardado-Sanchez E, Nourafkan R, Reymanbaut A, Hébert C D, Bergeron S, Tremblay A M S, Kokalj J, Huse D A, Schauf P, Bakr W S 2019 *Science* **363** 379
- [7] Schreiber M, Hodgman S S, Bordia P, Lüschen H P, Fischer M H, Vosk R, Altman E, Schneider U, Bloch I 2015 *Science* **349** 842
- [8] Lukin A, Rispoli M, Schittko R, Tai M E, Kaufman A M, Choi S, Khemani V, Léonard J, Greiner M 2019 *Science* **364** 256
- [9] Sommer A, Ku M, Roati G, Zwierlein M W 2011 *Nature* **472** 201
- [10] Cao C, Elliott E, Joseph J, Wu H, Petricka J, Schäfer T, Thomas J E 2011 *Science* **331** 58
- [11] Krinner S, Lebrat M, Husmann D, Grenier C, Brantut J P, Esslinger T 2016 *PNAS* **113** 8144
- [12] Li X, Luo X, Wang S, Xie K, Liu X P, Hu H, Chen Y A, Yao X C, Pan J W 2022 *Science* **375** 528
- [13] Sompet P, Hirthe S, Bourgund D, Chalopin T, Bibó J, Koepsell J, Bojović P, Verresen R, Pollmann F, Salomon G,

- Gross C, Halker T A, Bloch I 2022 *Nature* **606** 484
- [14] Qiu X Z, Zou J, Qi X D, Li X P 2020 *NPJ Quantum Inf.* **6** 1
- [15] Li X P, Liu W V 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 116401
- [16] Weinberg S 1994 *Nucl. Phys. B* **413** 567
- [17] Qin M P, Chung C M, Shi H, Vitali E, Hubig C, Schollwöck U, White S R, Zhang S W 2020 *Phys. Rev. X* **10** 031016
- [18] Jiang H C, Devereaux T P 2019 *Science* **365** 1424
- [19] Guardado-Sanchez E, Spar B M, Schauss P, Belyansky R, Young J T, Bienias P, Gorshkov A V, Iadecola T, Bakr W S 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021036
- [20] Li X P 2021 *Physics* **17** 74
- [21] Venu V, Xu P H, Mamaev M, Corapi F, Bilitewski T, D'Incao J P, Fujiwara C J, Rey A M, Thywissen J H 2022 arXiv: 2205.13506
- [22] Li X P, Sarma, S D 2015 *Nat. Commun.* **6** 1
- [23] Liu X P, Yao X C, Deng Y J, Wang X Q, Wang Y X, Huang C J, Li X P, Chen Y A, Pan J W 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 185302
- [24] Ko B, Park J W, Shin Y I 2019 *Nat. Phys.* **15** 1227
- [25] Liu X P, Yao X C, Li X P, Wang Y X, Huang C J, Deng Y J, Chen Y A, Pan J W 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 163602
- [26] Chesler P M, García-García A M, Liu H 2015 *Phys. Rev. X* **5** 021015
- [27] Zhang X T, Chen Y, Wu Z M, Wang J, Fan J J, Deng S J, Wu H B 2021 *Science* **373** 1359
- [28] Hachmann M, Kiefer Y, Riebesehl J, Eichberger R, Hemmerich A 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 033201
- [29] Bravyi S B, Kitaev A Y 2002 *Ann. Phys.* **298** 210
- [30] Daley A J, Bloch I, Kokail C, Flannigan S, Pearson N, Troyer M, Zoller P 2022 *Nature* **607** 667

VIEWS AND PERSPECTIVES

Quantum simulation of interacting fermions

Luo Yu-Chen¹⁾ Li Xiao-Peng^{1)2)†}

1) (Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China)

2) (Shanghai Qi Zhi Institute, Shanghai 201210, China)

(Received 7 September 2022; revised manuscript received 31 October 2022)

Abstract

Fermions are basic building blocks in the standard model. Interactions among these elementary particles determine how they assemble and consequently form various states of matter in our nature. Simulating fermionic degrees of freedom is also a central problem in condensed matter physics and quantum chemistry, which is crucial to understanding high-temperature superconductivity, quantum magnetism and molecular structure and functionality. However, simulating interacting fermions by classical computing generically face the minus sign problem, encountering the exponential computation complexity. Ultracold atoms provide an ideal experimental platform for quantum simulation of interacting fermions. This highly-controllable system enables the realizing of nontrivial fermionic models, by which the physical properties of the models can be obtained by measurements in experiment. This deepens our understanding of related physical mechanisms and helps determine the key parameters. In recent years, there have been versatile experimental studies on quantum ground state physics, finite temperature thermal equilibrium, and quantum many-body dynamics, in fermionic quantum simulation systems. Quantum simulation offers an access to the physical problems that are intractable on the classical computer, including studying macroscopic quantum phenomena and microscopic physical mechanisms, which demonstrates the quantum advantages of controllable quantum systems. This paper briefly introduces the model of interacting fermions describing the quantum states of matter in such a system. Then we discuss various states of matter, which can arise in interacting fermionic quantum systems, including Cooper pair superfluids and density-wave orders. These exotic quantum states play important roles in describing high-temperature superconductivity and quantum magnetism, but their simulations on the classical computers have exponentially computational cost. Related researches on quantum simulation of interacting fermions in determining the phase diagrams and equation of states reflect the quantum advantage of such systems.

Keywords: quantum simulation, interacting fermions, cold atoms, optical lattice

PACS: 67.85.Lm, 37.10.Jk, 03.67.Ac

DOI: 10.7498/aps.71.20221756

† Corresponding author. E-mail: xiaopeng_li@fudan.edu.cn

相互作用费米子的量子模拟

罗雨晨 李晓鹏

Quantum simulation of interacting fermions

Luo Yu-Chen Li Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 226701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221756

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221756>

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

光晶格中超冷原子系统的磁激发

Magnetic excitation of ultra-cold atoms trapped in optical lattice

物理学报. 2019, 68(4): 043703 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190153>

量子计算与量子模拟

Quantum computation and quantum simulation

物理学报. 2018, 67(12): 120301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180710>

用光晶格模拟狄拉克、外尔和麦克斯韦方程

Simulating Dirac, Weyl and Maxwell equations with cold atoms in optical lattices

物理学报. 2019, 68(4): 046701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181929>

量子计算与量子模拟中离子阱结构研究进展

Advances in the study of ion trap structures in quantum computation and simulation

物理学报. 2022, 71(13): 133701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220224>

浅光晶格中量子隧穿现象的实验观测

Experimental observation of quantum tunneling in shallow optical lattice

物理学报. 2022, 71(7): 073701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212038>

超冷 ^{87}Rb 原子在二维光晶格中Mott绝缘态的实验实现

Experimental realization of Mott insulator of ultracold ^{87}Rb atoms in two-dimensional optical lattice

物理学报. 2020, 69(19): 193201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200513>