

一维费米气体中的自旋电荷分离

罗佳佳^{1,2} 汪胜^{1,2} 何丰³ 管习文^{1,†}

(1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉 430071)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 意大利国际高等研究院 意大利里雅斯特)

2022-07-16收到

† email: xwe105@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220809

一个自由电子传播时携带一个单位电荷和1/2自旋, 电荷和自旋总是相伴相随的, 而对于相互作用系统, 系统的低能准粒子激发决定了系统低温时的性质。在解释高维相互作用电子的金属态时, 朗道费米液体理论, 以其具有良好定义的费米型准粒子而呈现出令人满意的说服力。对于朗道费米液体来说, 系统的低能激发是单一的准粒子激发, 每个准粒子依然携带单位电荷和1/2自旋, 电荷和自旋的输运性质依然相同。然而当问题过渡至一维时, 相互作用的存在使得粒子互相牵制, 当对系统施加一个外部的扰动, 作用点处粒子破坏了系统原有的平衡。为了达到一个新的稳态, 哈密顿量里的动能项从作用点处交换相邻的两个粒子, 被交换的粒子随后影响近邻的粒子, 以此将扰动传输至远距离处, 形成了系统的集体运动, 因此一维系统的激发是“牵一发而动全身”的集体激发(图1), 它的低能普适行为由朝永—拉廷格液体理论描述^[1-3]。对于具有自旋自由度的电子系统, 拉廷格液体理论预言一维费米子系统的低能激发将会分裂成由电荷主导的空穴子(holon)和自旋产生的自旋子(spinon)两种独立的集体激发模式, 并且激发谱是线性的, 描述这两种激发的有效哈密顿量是两支分离的自由高斯量子场论哈密顿量。在相互作用系统, 电荷波(CDW)和自旋波(SDW)以不同的波包速度向远处传播, 在一定时间后分别局域在空间中的不同点, 这种现象被称为自旋电荷分离。当然由系统的有效哈密顿量可以获取更多信息, 如系统的热力学量对波包速度的依赖关系以及系统的电荷—电荷关联函数和自旋—自旋关联函数。

通常拉廷格液体理论仅仅考虑低能下的线性谱, 当系统的温度更高时, 引入非线性效应如曲

率修正, 分布构型将随着时间推移以平方根的形式扩大^[4], 小于自旋和电荷之间的距离, 因此自旋电荷分离现象依旧存在, 系统的激发谱呈现出电荷分支和自旋分支的分离行为^[5], 在低能区内,

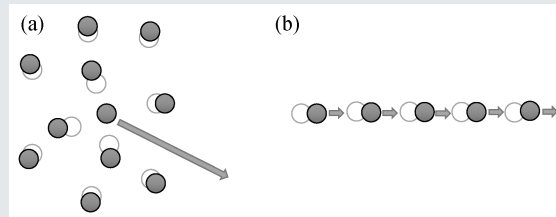


图1 (a)对于高维系统, 近似自由的准粒子激发是个体激发; (b)对于一维相互作用系统, 一个粒子的移动会推动所有其他粒子, 系统的激发只能是集体激发

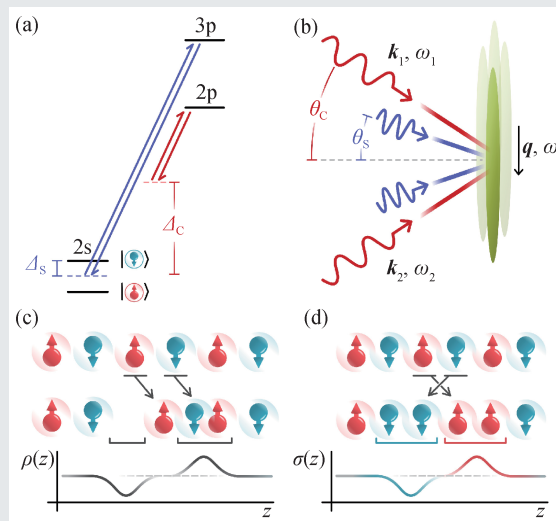


图2 (a)实验中我们用布拉格光散射选择基态和激发态。蓝线表示测量自旋动力学结构因子时选用的激发态以及布拉格光的失谐; 红线表示测量电荷动力学结构因子时, 选用的激发态以及布拉格光的失谐; (b)我们给系统施加两束布拉格光, 转移给系统动量和能量; 系统电荷部分的粒子—空穴对激发(c), 自旋部分的两自旋子激发(d), 以及这些激发对电荷密度和自旋密度的影响。图中的基态选择的是经典的零温反铁磁基态^[8]

两个自由度均表现出线性激发的行为，其分离特性由各自相应的速度来刻画。非线性效应会对系统两支激发的激发速度以及自旋反向激发关联函数产生修正，这是我们在理论计算时需要考虑到的。

虽然自旋电荷分离现象的理论预言很早就被提出，但实验的相关研究总是不尽如人意。在一些固体材料的实验上观测到一些关于自旋电荷分离的迹象。2020年 Vijayan 的 *Science* 文章中^[6]，利用靠近半满的哈伯德模型成功观察到分离现象。但实际上由于靠近莫特相，电荷表现出单粒子激发性质而非集体激发，此工作并没有给出强有力的自旋电荷分离的朝永—拉廷格液体理论实验验证。中美研究团队自2018年开始合作，通过研究一维相互作用费米气体杨—高丁模型 (Yang—Gaudin model) 的精确解，发现在长波极限下该模型中的电荷自由度的粒子—空穴集体激发和自旋自由度的分数化准粒子 (自旋子) 激发可完美地形成分离的自旋密度波和电荷密度波，这样通过布拉格谱可以分别测得自旋和电荷的动力学结构因子 (DSF)，该物理量深刻揭示了量子液体中多体关联的本质。因此，通过对相关集体激发谱的 DSF 的测量可以实现对自旋电荷分离现象的确定性验证。在我们的实验中，使用布拉格光谱方法^[7]，通过调节布拉格光束在共振点处的失谐量，可以选择性的激发电荷或自旋，获取与速度密切相关的 DSF 信息，进而实现对自旋电荷分离现象的验证。

在布拉格光谱方法中，冷原子气体被置于两束动量和频率不同，夹角为 2θ 的布拉格光中，如图2所示，系统中的原子会经历从一束布拉格光中吸收一个光子，激发到某个中间激发态 (如图2(a)所示的 $2p$ 或 $3p$ 态)，再通过释放一个光子到另外一束布拉格光中而回到基态这样一个双光子过程。于是，两个光子的动量差 q 转移给系统中的原子，使得原子沿着布拉格光动量向量差的方向运动，其运动的速度由两束布拉格光的频率差决定。冷原子中的布拉格散射实验主要测量布拉格光转移的动量。首先，在势阱中制备一团稳定的冷原子气体，拍照测量其密度分布。然后对系统施加布拉格光，持续一段时间，使系统中有足够多的原子经历双光子过程而获得动量和能量。下一步撤

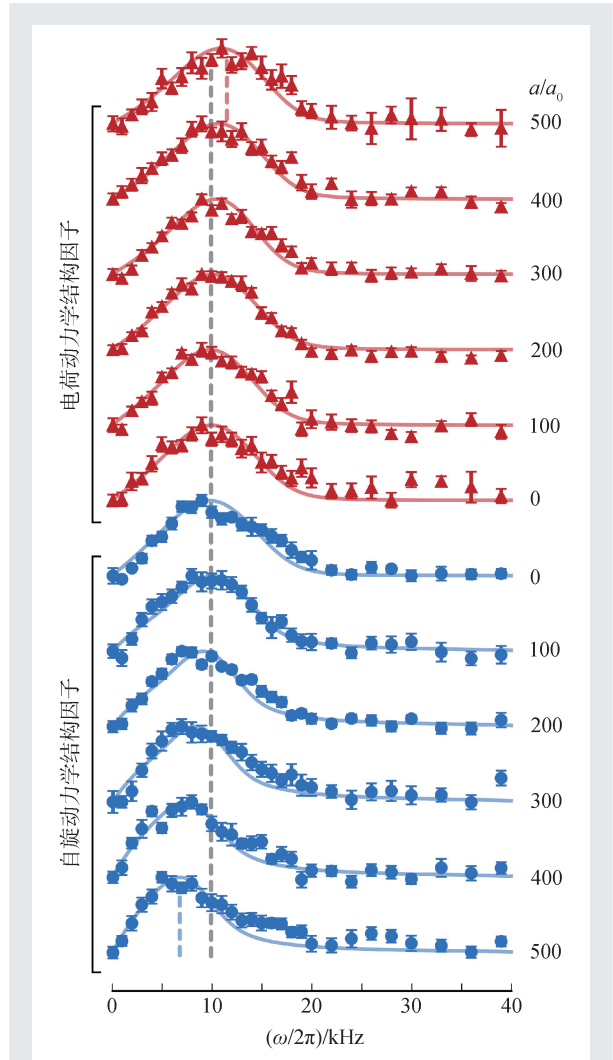


图3 冷原子系统在不同的散射长度下，即不同相互作用下，归一化之后电荷 (红色) 和自旋 (蓝色) 的动力学结构因子。每一个数据点是最少20个实验结果的平均值。垂直的黑色虚线表示无相互作用时波峰的位置，在不同相互作用下，波峰的位置产生移动。三角和圆形表示实验结果，实线表示温度为250 nK下的理论结果，理论结果中考虑了拉廷格液体的非线性效应^[8]

掉势阱，使得原子气体自由飞行，拍照测量其自由飞行一段时间之后的散射粒子密度分布。通过两次测量的密度之差，可计算得到在施加布拉格光之后转移给系统的动量。

图3展示了我们工作的主要结果，可以发现电荷和自旋的动力学结构因子的实验结果，与考虑了非线性效应的拉廷格液体的理论结果符合得很好。同时可以看到在不同相互作用下，波峰位置即激发的声速 $v = w_p/q$ 的明显不同，电荷的激发速

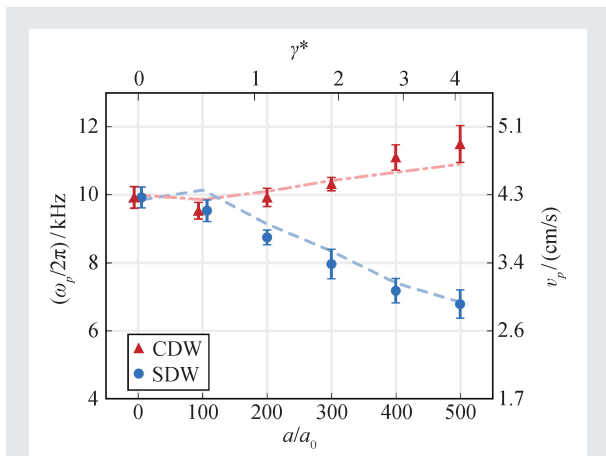


图4 从图3的布拉格谱中得到的波峰数值,红色代表电荷结果,蓝色代表自旋结果。从图中可以很清楚地看到自旋和电荷的激发速度出现了分离,并且电荷的激发速度随着相互作用的增大而增大,自旋的激发速度随着相互作用的增大而减小^[8]

度随着相互作用的增大而增大,自旋的激发速度随着相互作用的增大而减小,这符合拉廷格液体理论对于具有自旋自由度电子系统的预言,如图4所示,波峰数值的变化从理论和实验上验证了自旋电荷分离现象。这一结果最近发表在 *Science*

杂志^[8]。

本实验结果展示了超冷原子可以成为量子磁性模拟器(simulator),精准地模拟磁学和热力学行为。更重要的是分数化准粒子可以用来探索量子度量学及对外磁场的精密测量,自旋子的动力学结构因子与量子费舍信息密切相关^[9],这为利用超冷原子探索多体量子纠缠提供重要的方法。

理论和实验的精确符合展现出我们对于冷原子系统的精密操控能力,这种能力会在未来的精密测量以及量子计算等领域中得到很好的应用。

参考文献

- [1] Tomonaga S I. Prog. Theor. Phys., 1950, 5: 544
- [2] Luttinger J. J. Math. Phys., 1963, 4: 1154
- [3] Giamarchi T. Quantum Physics in One Dimension. Oxford University Press, 2003
- [4] Schulz H J. International Journal of Modern Physics B, 1991, 05: 57
- [5] He F *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125: 190401
- [6] Vijayan J, Sompert P, Salomon G *et al.* Science, 2020, 367: 186
- [7] Yang T L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 103001
- [8] Senaratne R *et al.* Science, 2022, 376: 1305
- [9] Hauke P, Heyl M, Taliacozzo L *et al.* Nature Physics, 2016, 12: 778


欧普特科技
 GOLDEN WAY SCIENTIFIC

做中国专业的 光学元件与光学仪器系统集成商

TO BE A PROFESSIONAL OPTICAL COMPONENTS AND
OPTICAL INSTRUMENTS SYSTEM INTEGRATOR IN CHINA








地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋东5层
E/5F M7, NO.1, JIUXIANQIAO EAST ROAD, CHAOYANG DISTRICT, BEIJING

电话: 010-8809 6218 / 8809 6099

邮箱: optics@goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司

Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd.