

# 他山之石,可以攻玉

## ——太赫兹二维相干谱学打开探索分数化现象的新窗口

万源<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2019-08-21 收到

<sup>†</sup> email: yuan.wan@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200106

分数化(fractionalization)是一种出现在多体系统中的新奇物理现象<sup>[1]</sup>。在出现分数化现象的多体系统中,构成体系的基本物理单元(如电子、自旋等)被相互作用劈裂。这些被劈裂的部分成为体系的元激发。这里以铁磁伊辛自旋链为例说明(图1(a)):该体系中自旋的取向高度受限,其只能沿着或者背对着自旋的易轴(这里假设易轴方向与自旋链方向相同)。与此同时,自旋之间的铁磁交换相互作用希望自旋的取向一致。因此,自旋链具有两重简并的铁磁基态,对应自旋的两种可能取向。这个系统的元激发是所谓的畴壁,也就是简并基态的边界。一方面,我们熟知自旋携带磁偶极矩,从图1(a)可以看出,这意味着畴壁携带或

正或负的磁荷,它们可以被看作是体系中的磁极。另一方面,自旋携带的磁偶极矩,可以被看作是一正一负两个磁荷紧紧束缚在一起形成的。结合这两方面的观点,可以认为,在铁磁伊辛自旋链中,自旋携带的磁偶极矩“一分为二”,劈裂为两个自由的磁荷。而这两个被劈出来的自由磁荷,正是畴壁元激发。因此,我们说铁磁伊辛自旋链中出现了分数化现象,分数化元激发(fractional excitation)就是畴壁。

分数化元激发往往具有有趣的物理性质。前述的铁磁伊辛自旋链中的畴壁,其本质是可以产生、消灭和移动的磁极,这大大不同于我们熟悉的常规铁磁体。后者的磁极数量和位置是固定的。分数化元激发的例子不仅限于畴壁。分数量子霍尔液体(fractional quantum Hall liquid)中分数化元激发是准电子和准空穴,它们携带了分数单位的电子电荷。量子自旋液体(quantum spin liquid)中分数化元激发是自旋子(spinon),它们携带半个单位的自旋角动量,而非常规磁振子携带一个单位的自旋角动量。不仅如此,在一定条件下,准电子、准空穴还有自旋子的量子统计性质超越了玻色—爱因斯坦统计和费米—狄拉克统计,既非玻色子,亦非费米子。

分数化元激发的奇特物理性质激励物理学工作者在实验中寻找它们。分数化元激发“一分为二”(或者说“一分为多”)的特性决定了它们的主要实验特征。在谱学实验中探测分数化元激发,我们利用外部扰动将它们激发出来,检验这些元激发对动量和能量的吸收,从中提取关于它们的信息。这里回到前面的铁磁伊辛自旋链的例子。设想用时域太赫兹谱学来探测畴壁(图1(a))。在理

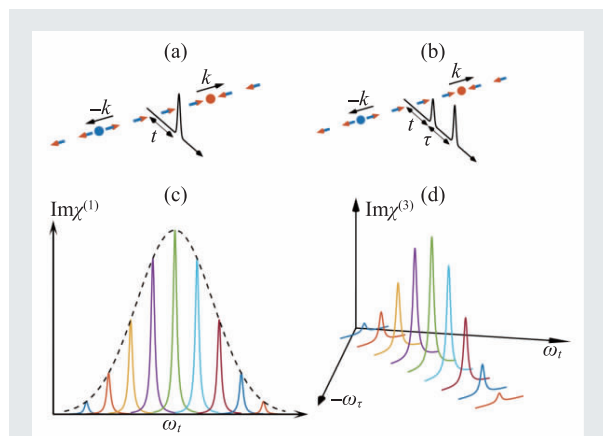


图1 (a)常规的时域太赫兹光谱学利用太赫兹脉冲探测铁磁伊辛自旋链中的畴壁元激发。这里箭头指示自旋的朝向,红色和蓝色标明自旋携带磁偶极矩的指向,红色为磁北极,蓝色为磁南极。红色和蓝色小球指示畴壁所处的位置和它们携带的磁荷。黑色曲线代表太赫兹脉冲的磁场分量;(b)二维相干谱学利用两个太赫兹脉冲探测体系的非线性光学响应。得到的光谱是两个频率的函数;(c)在常规的太赫兹谱学中,畴壁表现为一个连续谱;(d)二维相干光谱能展现出畴壁对的本征线宽和线型(改编自文献[2])

想条件下，我们使用一个太赫兹脉冲穿透自旋链。测量的物理量可以认为是体系在脉冲过后 $t$ 时刻对脉冲磁场分量的响应。对这个时间变量 $t$ 作傅里叶变换，就得到体系的太赫兹光谱。在这样一个实验中，太赫兹电磁波的能量和动量被体系吸收，并激发出一对(而不是一个)畴壁。这意味着，被吸收的电磁波动量和能量必须分配给这一对畴壁，而动量和能量的分配方式则是无

穷多的。每一种分配方式均会在光谱中表现为一个吸收峰，而前述多个分配方式则导致多个吸收峰。这些吸收峰挤在一起，最后总的效果就是一个缺乏尖锐特征的连续吸收谱(图 1(c))。

分数化元激发的这种连续谱被当作是它们存在的实验证据。但是连续谱给进一步分析分数化元激发的物理性质带来了挑战。连续谱来自于多个吸收峰的组合，因此掩盖了这些吸收峰的本征线宽与线型，这也就难以进一步分析分数化元激发的谱学特性。在材料样品或者实验条件不理想的情况下，这种缺乏显著特征的连续谱使得实验工作者难以仅凭谱学数据判断体系中是否存在分数化元激发。

最近，我们从理论上提出太赫兹二维相干谱学(terahertz two-dimensional coherent spectroscopy)，这种新兴实验技术可以给分数化元激发的谱学探测这个长期难题打开一个突破口<sup>[2]</sup>。红外波段和可见光波段的二维相干谱学是一个相对成熟的实验技术，被广泛应用到分子物理、化学和生物物理等领域<sup>[3-5]</sup>。近年来，二维相干谱学被拓展到太赫兹波段，这使得人们利用这个技术研究固体中的低能元激发成为可能<sup>[6]</sup>。太赫兹二维相干谱学用两个或者多个太赫兹脉冲探测体系中的非线性光学响应。在最简单的共线构型实验中，人们使

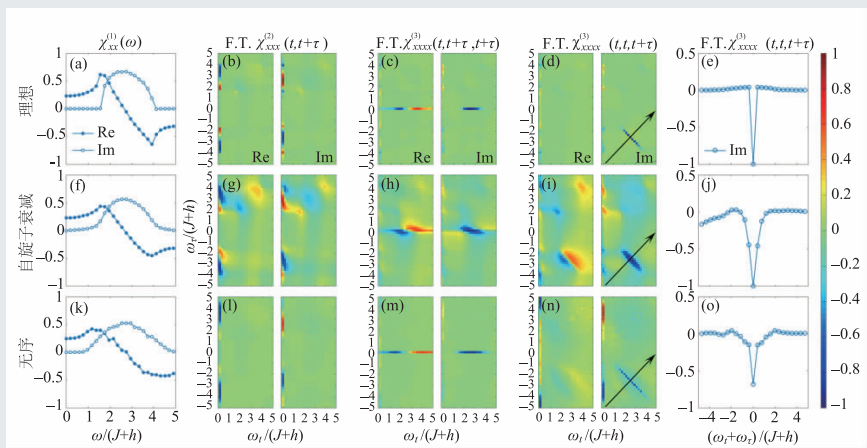


图2 量子铁磁伊辛自旋链中自旋子的一维光谱(左起第一列)和二维相干光谱的各个信号通道(第二到四列)。畴壁产生的光子回波信号展示在第四列，其反对角线方向的信号宽度展示在第五列。从上到下，第一行到第三行，分别对应于理想的自旋链(畴壁元激发寿命为无穷)、畴壁元激发存在衰减和存在结构无序的情形(源自文献[2])

用两个太赫兹脉冲，因此存在两个独立的时间变量 $\tau$ 和 $t$ ，前者是两个脉冲之间的间隔时间，后者是脉冲过后体系的响应时间(图 1(b))。对这两个时间变量作二维傅里叶变换得到的谱图是两个频率变量的函数，因此得名“二维光谱”。

我们的研究发现，太赫兹二维光谱中的光子回波(photon echo)信号可以用来分解分数化元激发的连续谱，并提取分数化元激发动力学的新信息。其背后的物理机制与光子回波区分所谓均匀展宽与非均匀展宽的物理机制类似。具体来说，在太赫兹二维相干谱学中，光子回波信号出现在二维光谱的第四象限(图 1(d))。前述分数化元激发的吸收峰被展布到一个二维频率平面上，这些吸收峰沿着平面对角线方向拥挤在一起，这一点类似常规光谱。但沿着反对角线方向，这些吸收峰的本征线宽则被直接揭示出来。


我们以量子铁磁伊辛自旋链这个模型系统为例，解析计算了该体系的太赫兹二维相干光谱，具体说明了这个实验技术如何用于分解畴壁的连续谱，并进一步揭示畴壁的分数化动力学特性。在理想条件下，畴壁为体系哈密顿量的严格本征态，元激发寿命为无穷长。在常规的光谱学中，畴壁表现为缺乏尖锐特征的连续谱(图 2(a))。但是，在二维光谱中，来自畴壁的光子回波信号表

现为一个明亮长条(图2(d)),这个长条在对角线方向的宽度反应了一对畴壁的能量取值范围,在反对角线方向的宽度为零——这反应了畴壁无穷大的元激发寿命(图2(e))。如果我们在理想量子伊辛自旋链的基础上引入一些微扰,如次近邻自旋之间的交换相互作用,自旋-晶格相互作用等,畴壁只是体系的近似本征态,其寿命有限。此时常规光谱变化不大(图2(f)),在二维光谱中,畴壁的光子回波信号沿着反对角线方向展宽(图2(i)),其信号宽度反比于准粒子寿命(图2(j))。最后,当体系存在结构无序,但是畴壁的元激发寿命依然是无穷时,畴壁的光子回波信号沿着反对角线方向的展宽依然为零,不受无序的干扰(图2(n, o))。这些理论预言,可以直接应用到以铌酸钴( $\text{CoNb}_2\text{O}_6$ )为代表的量子伊辛自旋链材料中去<sup>[7]</sup>。我们也有理由相信,太赫兹二维相干谱学这一实

验技术,未来必将在量子材料等强关联多体系统的研究中大有用武之地。

### 参考文献

- [1] Castelnovo C, Moessner R, Sondhi S L. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2011, 3:35
- [2] Wan Y, Armitage N P. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122:257401
- [3] Mukamel S. *Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy*. New York: Oxford University Press, 1999
- [4] Hamm P, Zanni M. *Concepts and Methods of 2D Infrared Spectroscopy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- [5] 翁羽翔, 陈海龙 等 编著. 超快激光光谱原理与技术基础. 化学工业出版社, 2013
- [6] Woerner M, Kuehn W, Bowlan P *et al.* *New J. Phys.*, 2013, 15: 025039
- [7] Coldea R, Tennant D A, Wheeler E M *et al.* *Science*, 2010, 327:177



## Advanced Research Systems 低温超导设备制造专家

### 1.5K-800K全程低温超导解决方案


#### 低温探针台

ARS生产的低温探针台,是理想的低温测试平台。它提供稳定的变温环境(4K-800K),可在不破坏材料或器件的情况下进行可重复的电学,微波,光电,磁电,磁光等测试。

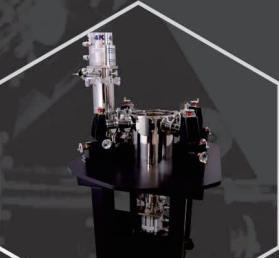
ARS可提供低温超导磁体探针台、低温电磁体探针台、低温超稳结构探针台、低温闭循环探针台及液氮/液氮探针台等多种探针台以满足客户不同应用需求。

ARS探针台根据客户需要装配直流探针臂、微波探针臂、光纤探针臂。并可选配超高真空结构,真空度优于 $10^{-9}$  Pa,以及快速换样结构。

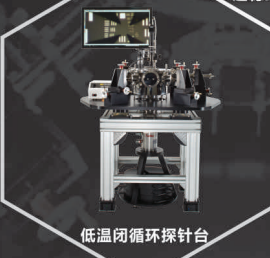
ARS可接受各种不同结构探针台定制。



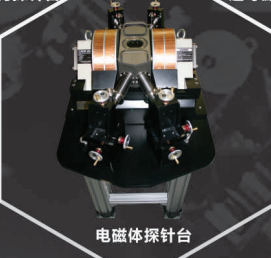
超稳结构探针台




超导磁体探针台



低温闭循环探针台



电磁体探针台



**DOWELLLAB**  
扫一扫关注官方微信  
了解更多产品信息

天津多为莱博科技有限公司是ARS产品在中国的独家代理  
网址: [www.dowelllab.com](http://www.dowelllab.com) 邮箱: [sales@dowelllab.com](mailto:sales@dowelllab.com)  
销售及服务热线: 022-26802283