



手性引力子模在分数量子霍尔效应中的实验观测

杜瑞瑞

北京大学物理学院, 北京 100871

E-mail: rrd@pku.edu.cn

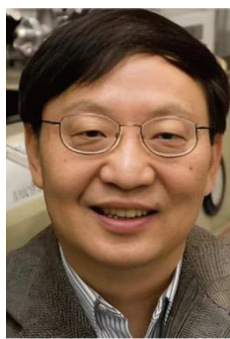
南京大学物理学院杜灵杰教授率领的研究团队利用极低温强磁场共振非弹性偏振光散射技术, 在砷化镓量子阱中从自旋、能量和动量的角度测量了分数量子霍尔效应中的集体激发, 首次观察到涌现的手性引力子模^[1]——基本引力子在分数量子霍尔效应中对应的准粒子。分数量子霍尔效应中涌现的手性引力子模这一概念最早由D. Haldane、D. T. Son和Kun Yang等人在理论上提出^[2-5], 简称为量子霍尔引力子模; 这是一种凝聚态类引力子, 可以理解为一种二维空间的有质量引力子^[6]; 其在实验上表现为手性自旋2的最低能量集体模式激发, 所以也被称为引力子模或者引力子激发^[1], 出现在不同文献中的这些名称描述的是同一个物态; 本文以下的叙述中使用“手性引力子”这个名称。

这一成果标志着自20世纪30年代引力子概念被提出以来, 首次观察到具有引力子特征的准粒子(类引力子), 从而在真实系统中揭示了引力子物理的量子规律, 打开了在凝聚态系统中研究量子引力物理的新方向。从凝聚态物理的角度, 该工作证实了诺贝尔物理学奖得主D. Haldane提出的分数量子霍尔效应全新的几何解释, 开拓了关联物态几何研究的新路径。

广义相对论和量子力学在现代物理学中占据着核心地位, 可以分别成功地用来描述宏观和微观世界, 但彼此并不兼容。科学家们希望能将这两大理论桥接起来, 实现最终的大一统理论。

作为当前最为成功的引力理论, 爱因斯坦的广义相对论指出引力的本质不是物体间的相互吸引力, 而是一种时空弯曲产生的几何效应。通过爱因斯坦场方程, 这一理论可以解释宇宙中绝大多数的宏观现象, 预言了引力波是时空度规的扰动并被实验观察到。

另一方面, 量子力学在描述微观世界(如原子和亚原子尺度)方面取得了巨大成功。按照当前的理解, 宇宙中一共存在着四种基本作用力, 分别是强相互作用力、弱相互作用力、电磁力和引力。人们认为只要统一这四种作用力就可以得到大一统理论。目前物理学家们已经将这四种基本作用力中的



杜瑞瑞

北京大学物理学院讲席教授。1978~1982年就读于复旦大学物理学专业, 1990年在伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校获物理学博士学位。历任普林斯顿大学-贝尔实验室博士后研究员、犹他大学教授、莱斯大学教授, 2015年起任北京大学教授。2015~2020年任国际量子材料中心主任。长期从事凝聚态物理实验研究, 成果在分数量子霍尔效应、复合费米子, 及其他二维电子体系领域具有重要影响。曾获美国斯隆研究奖、海外华人物理天文学会研究奖等。

三种——强相互作用力、弱相互作用力和电磁力——统一到量子力学的理论框架内。但是, 引力一直未能被纳入这一框架。根据量子力学的核心概念——波粒二象性, 我们知道光子作为电磁波的量子化粒子来传递电磁力, 类似地, 物理学家们推测引力波的量子化粒子是引力子时空度规扰动的量子。物理学家们试图通过引力子, 将引力融入量子力学的框架, 实现广义相对论与量子力学的统一。

早在1915年广义相对论诞生之初, 爱因斯坦就思考过将其与量子力学进行统一。早在1930年, Rosenfeld第一次尝试将引力场量子化, 而同时期丹麦物理学家Bohr提出引力场的量子化可能与中微子有关。之后在1934年, 苏联物理学家Blokhintsev和Gal'perin首次使用了“引力子”这个名字, 但他们仍然认为和中微子有关, 而中微子具有1/2自旋。在量子力学中, 自旋是粒子的一个固有的重要属性, 根据整数和半整数的自旋可将粒子分为玻色子和费米子。直到1939年, 物理学家Fierz和Pauli基于爱因斯坦场方程的线性化形式, 首次提出了相应的量子化理论——Fierz-Pauli场方程^[7], 在这一理论中他们将引力子描述为时空度规扰动的量子, 是自旋2的玻色子。Fierz-Pauli场方程为理解如何量子化引力场提供了重要的理

引用格式: 杜瑞瑞. 手性引力子模在分数量子霍尔效应中的实验观测. 科学通报, 2026, 71: 2225-2230

Du R-R. Experimental observation of chiral graviton modes in the fractional quantum Hall effect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2225-2230, doi: 10.1360/CSB-2025-5468

论工具,是早期的量子引力理论(属于大一统理论),这一方程后来主要用于描述有质量的引力子。引力子之后在超弦理论等量子引力理论中也占据着核心地位。然而,因为引力与物质的相互作用截面极小,所以作为基本粒子的引力子很难探测。

另一方面,我们身边绝大部分的可见物质都是凝聚态,包括固体和液体。而如美国凝聚态物理学家P. W. Anderson (1977年诺贝尔物理学奖得主)所说,“多者异也”:凝聚态系统包含大量的电子和分子等,虽然单体的性质已被完好地知晓,但是单体的复杂聚集体的行为并不能依据单体的性质做简单外推来理解,系统会呈现出区别于单体的特征。单体聚集而成的复杂系统从微观上可以看成是“新粒子”组成的简单系统,这种“新粒子”称为准粒子,可被视作基本粒子在凝聚态中的对应。历史上,苏联物理学家朗道(1962年诺贝尔物理学奖得主)首先引入了准粒子的概念。旋子是朗道在解释氦4超流时提出的准粒子,这一工作使得准粒子成为凝聚态物理的一个重要范式。

人们已经发现凝聚态系统存在着与基本粒子具有类似物理性质的对应准粒子。例如,在单层石墨烯中,发现了表现为无质量狄拉克费米子特性的准粒子。在超导体中观察到的希格斯模也与高能物理中的希格斯玻色子相对应,是希格斯机制的不同表现形式。此外,近年来在固体系统中观察到的马约拉纳零能模和外尔费米子态,分别表现出马约拉纳费米子和外尔费米子的特征。这些重要的发现为在“凝聚态宇宙”中探索新奇的粒子物理现象指出了新的道路。

“几何”这一概念不仅在广义相对论中取得巨大的成功,而且被引入到凝聚态系统中。凝聚态物理学家开始探索在低维半导体(注:半导体是一种固体)系统中通过几何效应来研究引力子物理的可能性,美国凝聚态物理学家D. Haldane提出了分数量子霍尔效应全新的几何解释^[2]。另一方面,量子引力的理论物理学家也开始将引力子的研究推广到更低的维度^[8]。这样,凝聚态物理和量子引力这两个不同的领域开始交叉。近年来,理论物理学家们推测可能存在着量子霍尔引力子,这是引力子在分数量子霍尔液体中对应的准粒子。

分数量子霍尔效应是一种超越传统凝聚态物理框架的强关联现象,是凝聚态物理学研究的前沿。该物态在半导体两维电子系统中的发现和理论解释获得了1998年诺贝尔物理学奖。分数量子霍尔效应可以理解成一种“复合费米子”(例如,一个电子复合两个磁通量子的整数量子霍尔效应,即复合费米子在二维空间沿着圆形回旋轨道做运动。这种圆形轨道的形状通常被认为是不能改变的。这种理解是在陈西蒙斯拓扑量子场论框架范围内的。直到近年来,D. Haldane认为这种理论解释并不完整,提出了分数量子霍尔效应的新理论解释——一种量子几何解释,超越了传统的陈西蒙斯拓扑量子场论框架。这一理论指出,二维电子在强磁场和强库仑相互作用下,不再是点粒子,而是有了一定的“面积”和形状;在面

积保持不变的情况下,这个形状可以变化并可以被一种长期被忽视的基本的几何自由度所描述,即描述电子关联的量子度规张量。由于度规张量也是引力理论的基本自由度,该理论框架可以被看作某种引力理论^[6]。这个形状的量子波动就形成了手性引力子,本质是度规扰动的量子化,表现为轨道形变产生的最低能量长波激发,其自旋只能为+2或-2,具有手性。

这种量子霍尔引力子一方面反映了量子几何的作用,另一方面其手性特征来自拓扑效应。具体而言,基本引力子理论上具备+2和-2的自旋,在分数量子霍尔效应中,体态-边缘态分离这种拓扑效应带来了体态的两维有质量引力子准粒子,其自旋具有特定的手性,比如+2,以及边缘态上的一维无质量引力子准粒子,其自旋具有相反的手性,比如-2。因此,这种引力子的手性深刻地反映了分数量子霍尔效应的拓扑效应,而手性引力子的一体两面正是拓扑和量子几何。由于边缘态上的引力子是一维的且无能隙,因此很难通过光学或者输运手段测量;在实验上能够测量到的手性引力子指的是体态的两维有质量引力子。

手性引力子不仅具有类似于引力子的性质,而且也可以通过相应的量子引力方程来描述。分数量子霍尔效应是非相对论极限下的,而量子引力理论学家^[8]指出,手性引力子可以由一种分数量子霍尔效应中对应的有质量Fierz-Pauli场方程所描述,还可被零级近似简化的3+1维线性爱因斯坦场方程所描述,揭示了这类准粒子的引力子特征。

在分数量子霍尔效应中,(体态的)手性引力子即自旋为+2或-2的长波磁旋子。美国凝聚态物理学家Girvin、MacDonald和Platzman^[9]在20世纪80年代将朗道提出的氦4超流中的旋子引入到分数量子霍尔效应,用来描述最低能量中性集体激发。因为这里有磁场,所以这种旋子被称为磁旋子。磁旋子可以简单理解为做回旋运动的被激发的复合费米子与其留下的空穴形成的激子。非长波极限下的磁旋子属于偶极激发,而根据科恩(Kohn)定理,偶极激发的长波磁旋子是无法产生的。因此,在传统拓扑量子场论框架内,复合费米子沿着轨道运动,无法被光子激发带到具有相同圆心的更高能量的次近邻轨道。但是考虑了量子度规之后,随着度规的变化,回旋轨道的几何形状会发生扭曲(如图1所示),从而将复合费米子推向同圆心的次近邻轨道;这就是轨道形变引发的四极激发的长波磁旋子。

因此,手性引力子具有:(1)自旋2的手性,其自旋值只能为+2或-2;(2)特定的质量(即长波磁旋子能隙),这是由于该激发源自度规扰动的量子化。值得一提的是,并非手性自旋2的集体激发都是手性引力子,在这里特征动量(长波)和特征质量都是手性引力子不可缺少的特征,在分数量子霍尔效应中同时具备特征动量、特征质量和特征自旋的集体激发才是手性引力子。

磁旋子的实验研究在20世纪八九十年代已经开展,最早

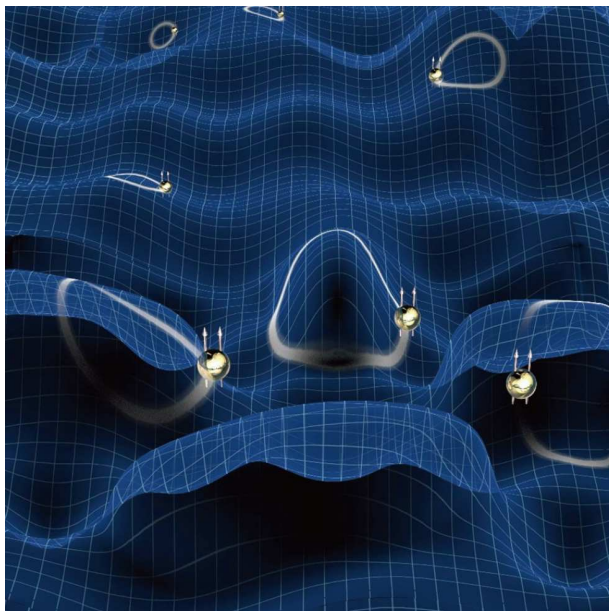


图1 (网络版彩色)量子度规描述回旋轨道的形状

Figure 1 (Color online) The shape of the cyclotron orbits in the gauge description

的相关实验结果由美国凝聚态实验物理学家A. Pinczuk在1993年报道^[10]。在这一工作中, A. Pinczuk在填充数为 $1/3$ 的分数量子霍尔效应中观察到了一种长波低能集体激发, 这一实验开创了分数量子霍尔效应的集体激发光学研究。而观察到的长波低能集体激发可能是长波磁旋子, 也可能是同样具备长波特征的双磁旋子。双磁旋子由两个位于最低能量的磁旋子结对形成, 和长波磁旋子一样, 也是长波特征的四极激发, 并且其能量和长波磁旋子非常相近。双磁旋子和长波磁旋子的主要区别在于, 它们的色散关系不同, 而且后者具有自旋2的手性特征。当动量趋近0时, 对于双磁旋子, 其能量逐步减少, 且在动量为0时小于磁旋子最低能量的两倍; 而对于长波磁旋子, 其能量则逐步增加, 且在动量为0时大于磁旋子最低能量的两倍。由于在以前的实验中, 长波极限下的色散关系测量和自旋测量都是缺失的, 因此手性自旋2长波磁旋子或者手性引力子在实验上一直没有被观察到。后来在第二个朗道能级上的 $1/3$ 填充, 人们也观察到了一种长波低能集体激发^[11], 被认为可能是手性引力子^[5], 但同样由于自旋和色散关系测量的缺失而无法确定。

在分数量子霍尔效应中, 长波低能集体激发的实验研究给了当时理论界很大的冲击。根据科恩定理, 长波磁旋子作为偶极激发的激发强度为零, 实验上应该观察不到, 这也是人们倾向于将观察到的长波低能集体激发解释为双磁旋子的原因^[10]。但是这一实验结果也激发了理论物理学家们的新思考, 最终引入了来自度规扰动量子化的作为四极激发的长波磁旋子(即手性引力子), 带来了分数量子霍尔效应全新的几何解释。

手性引力子是四极激发, 需要双光子过程的非弹性光散射来探测(如图2所示)。在这类实验中, 因为光子自旋为1, 入射和散射的圆偏振光可以提供+2、-2和0的自旋给电子系统, 当入射和散射光的自旋为-1和+1时, 就可以产生自旋为-2的元激发, 并且入射和散射光子的能量差等于元激发的能量。另外, 实验采用背散射结构, 二维电子气和入射/散射光存在一个小的倾斜角度, 所以光子可以转移二维电子气平面方向上的动量到电子; 由于光子处于800 nm附近的可见光, 因此最终转移的动量也很小, 产生的动量守恒的元激发就处于长波极限下。所以通过这种方式, 可以实现对自旋2的长波磁旋子的光学测量。

开展这种实验对设备的要求很高: (1) 实验要求极低温(约50 mK)和强磁场(约10 T), 这是分数量子霍尔效应实现的条件, 需要带超导磁体的稀释制冷机来实现。(2) 作为分数量子霍尔效应的载体, 砷化镓量子阱的能隙要求入射光是可见光。可见光通过制冷机外壳上的透明窗口照射到样品, 但是可见光以及窗口本身的辐射却容易将极低温下的样品温度提升至100 mK以上, 从而破坏分数量子霍尔效应。(3) 由于手性引力子的能量(最低约70 GHz)和动量极低, 实验必须同时进行入射光频率连续可调的微波波段的极小动量共振拉曼散射光测量和圆偏振性质测量, 前者需要提高光谱的分辨率达到现有光谱仪的极限并且消除环境振动, 而后者则需要保证光学环境的背景干净度, 以利用入射和散射圆偏振光的自旋确定手性引力子的自旋特征, 实验技术上即使在室温下也极具挑战!

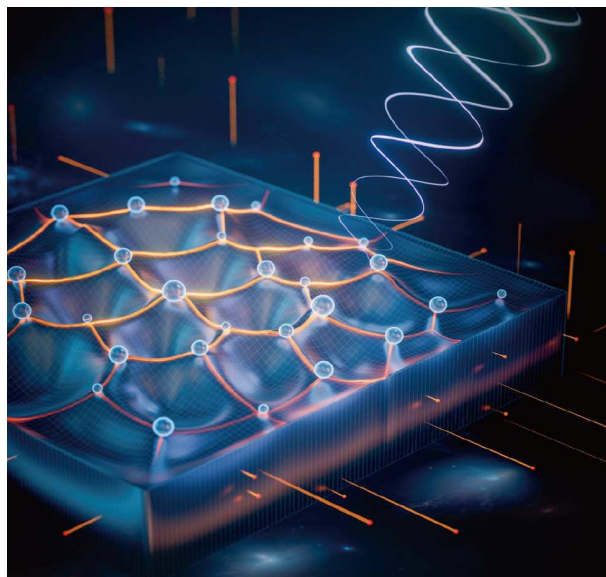


图2 (网络版彩色)在砷化镓量子阱中, 以圆偏振光测量分数量子霍尔效应中的手性引力子

Figure 2 (Color online) In a gallium arsenide quantum well, chiral gravitons in the fractional quantum Hall effect are measured using circularly polarized light

在此前磁旋子的实验测量中,国外团队采用的是消耗液氮的湿式稀释制冷机,可以提供极低温和强磁场环境,并且机械振动相对更小,但是光学实验设计更加复杂,尤其很难展开极小动量的测量.近年来,南京大学杜灵杰团队采用了脉冲管制冷的干式稀释制冷机方案,这一方案极大地简化了光路设计,但是制冷机脉冲管带来的振动,如果不消除,会对实验测量有很大影响.团队经过多年的努力,将看似矛盾的测量要求一一实现,自主设计、集成组装了一台极低温强磁场共振非弹性偏振光散射系统(如图3所示).据悉,这台新型设备最终能够在30 mK和14 T下捕捉到最低10 GHz的激发并判断其自旋,测量精度小于16 μeV ,测量参数达到国际领先水平.

手性引力子实验的样品采用的是超高迁移率砷化镓量子阱,来自美国普林斯顿大学L. N. Pfeiffer教授课题组.实验团队利用自主研发的光学测量系统,在砷化镓量子阱中成功观测到分数量子霍尔效应中的手性引力子.他们通过共振非弹性光散射测量到了长波低能隙集体激发,但正如前文所说,长波磁旋子和双磁旋子都在这个能量附近,所以很难对这一长波低能集体激发定性.为了解决特征能量的问题,实验团队一方面通过减小倾斜角度从而减小动量进行测量,发现这种激发的能量相比磁旋子最低能量在增加,并且最终比值超过2倍,完全排除了双磁旋子的可能性;并且发现当动量减小为原来的40%时,长波磁旋子的强度变化不大,这也就排除了其是偶极激发的可能,因为偶极激发会以动量的四次方(40倍!)的速度快速减小.进一步,他们对不同分数态的长波

磁旋子进行了测量,发现测到的能量在 m/n 分数态正比于 E_c/n (E_c 为库仑能),符合长波磁旋子的能量特性(图4(a)).并且,他们发现测量到的这种激发具有极小激发峰宽(图3(b)),峰宽等于来自系统杂质的本征峰宽,说明这种激发符合动量守恒,而实验采用的是可见光,所以这种激发具有长波特性.至此,实验团队完全确定了对长波磁旋子的测量.接下来,实验团队通过改变入射和散射光的自旋,观察到该激发具有自旋2的特性且是手性的(图3(c)).对于填充数为1/3和2/5的电子态,测量到的长波磁旋子自旋为-2,而对于填充数为2/3和3/5的空穴态,测量到的长波磁旋子自旋为+2,这些结果可以用手性引力子模型很好地描述.所以,这些结果从自旋、动量和能量角度充分提供了手性引力子的实验证据.

手性引力子是分数量子霍尔效应几何解释的直接产物,其实验观察对凝聚态物理学的研究具有极其重要的意义.

以往人们在研究分数量子霍尔效应时,主要关心其“拓扑”性质,而忽视“量子几何”的重要性.2016年诺贝尔物理学奖告诉我们,甜甜圈和橡皮圈在“拓扑”上是相等的,因为它们都有一个洞;而如果我们把橡皮圈绷紧,用手一拨产生的振动则对应着“量子几何”效应.实际上“量子几何”与“拓扑”有

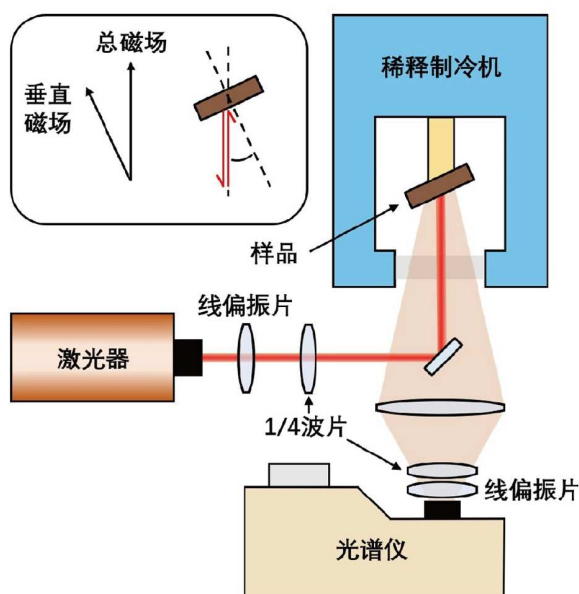


图3 (网络版彩色)极低温强磁场共振非弹性偏振光散射测量平台
Figure 3 (Color online) A resonance inelastic polarized-light scattering measurement platform utilizing extremely low temperatures and strong magnetic fields

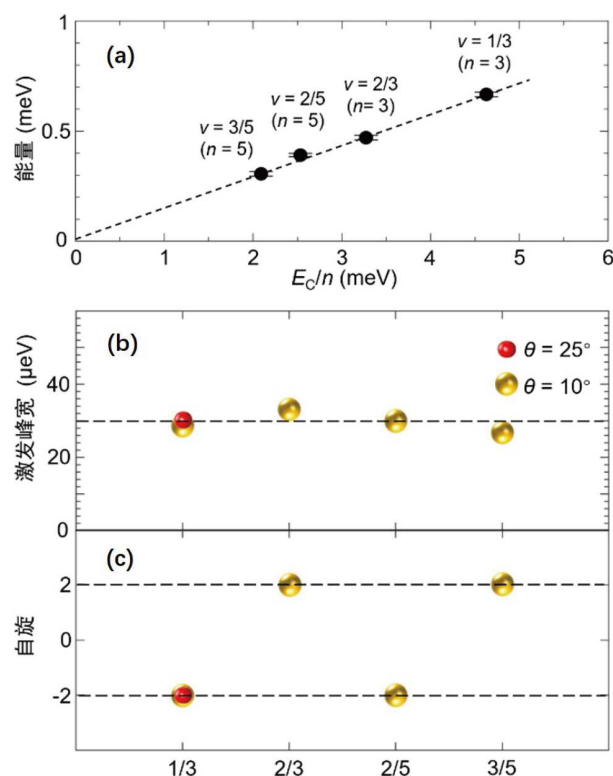


图4 (网络版彩色)(a) 手性引力子激发能量符合其能量特性. (b) 激发峰峰宽揭示其长波特性. (c) 手性自旋2特性

Figure 4 (Color online) (a) The excitation energy of chiral gravitons conforms to their energy characteristics. (b) The peak width of the excitation peak reveals their long-wave characteristics. (c) Chiral spin-2 characteristics

着相当的重要性,对理解物质的关联性质都是不可缺少的.分数量子霍尔效应的传统理论,即拓扑量子场论,只能描述分数量子霍尔效应中的“拓扑”性质,而Haldane提出的几何理论突破了传统理论,带来了一种新的“拓扑+量子几何”框架,对理解分数量子霍尔效应至关重要但是一直缺乏实验验证.而手性引力子的实验观测则为分数量子霍尔效应的量子几何理论提供了关键的实验证据,铺平了关联物态几何效应研究的新道路.

此外,手性引力子可以用来分辨偶数分母的分数量子霍尔态($5/2$ 态)所具有的非阿贝尔基态,对于实现拓扑量子计算有着关键的意义. $5/2$ 分数量子霍尔态是著名的偶数分母分数态,作为拓扑量子计算重要候选方案而广受关注.目前输运实验上还无法确定 $5/2$ 态具体的量子基态.比如Pfaffian态是一种可能,其通过复合费米子 p 波配对形成;还可能存在的Pfaffian态的粒子-空穴共轭态Anti-Pfaffian,其通过复合费米子 f 波配对形成;也可能是复合费米子 s 波配对形成的particle-hole Pfaffian态.这些量子态都具有非阿贝尔统计特征,但是无法确定具体基态会影响基于 $5/2$ 态拓扑量子计算方案的实现.最近,Haldane等人指出Pfaffian态、Anti-Pfaffian态和particle-hole Pfaffian态有着不同的量子几何性质^[12]:其手性引力子模有着截然不同的自旋.在实验上,通过测量手性引力子的自旋可以分辨 $5/2$ 态的非阿贝尔基态波函数,这一关键步骤

对于相关拓扑量子计算方案的实现很重要.

无论是手性引力子还是具有引力子特征的(类引力子)准粒子,此前都从未在实验上观察到.而理论物理学家将手性引力子赋予重要的物理意义,将其解释为二维空间的有质量引力子.因此,该实验工作是首次观察到分数量子霍尔效应中的手性引力子,也标志着自引力子这一概念提出以来,首次在真实系统中观察到类引力子.这一实验发现从二维空间角度揭示了度规扰动的量子是自旋2的低能激发,该概念可以追溯到20世纪30年代的早期量子引力理论,但此前却从未有实验证据支持.实际上“量子几何”与“拓扑”有着相当的重要性,对理解物质的关联性质都是不可缺少的.分数量子霍尔效应的传统理论,即拓扑量子场论,只能描述分数量子霍尔效应中的“拓扑”性质,而Haldane提出的几何理论突破了传统理论,带来了一种新的“拓扑+量子几何”框架,对理解分数量子霍尔效应至关重要但是一直缺乏实验验证.而手性引力子的实验观测则为分数量子霍尔效应的量子几何理论提供了关键的实验证据,铺平了关联物态几何效应研究的新道路.

沿着这一研究思路,未来这类实验可以用来测量引力子的超对称伙伴——引力微子,探索涌现的超对称性,以及测量高自旋的几何激发,实现对低维非相对论性量子引力理论的进一步探索.

推荐阅读文献

- 1 Liang J, Liu Z, Yang Z, et al. Evidence for chiral graviton modes in fractional quantum Hall liquids. *Nature*, 2024, 628: 78–83
- 2 Haldane F D M. Geometrical description of the fractional quantum Hall effect. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 116801
- 3 Yang B, Hu Z X, Papić Z, et al. Model wave functions for the collective modes and the magnetoroton theory of the fractional quantum Hall effect. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 256807
- 4 Golkar S, Nguyen D X, Son D T. Spectral sum rules and magneto-roton as emergent graviton in fractional quantum Hall effect. *J High Energ Phys*, 2016, 2016: 21
- 5 Liou S F, Haldane F D M, Yang K, et al. Chiral gravitons in fractional quantum Hall liquids. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 146801
- 6 Kun C Y. Geometric degrees of freedom and graviton-like excitations in fractional quantum Hall liquids. *Acta Phys Sin*, 2024, 73: 177801
- 7 Fierz M, Pauli W. On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field. *Proc R Soc London Ser A*, 1939, 173: 211–232
- 8 Bergshoeff E A, Rosseel J, Townsend P K. Gravity and the spin-2 planar Schrödinger equation. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 141601
- 9 Girvin S M, MacDonald A H, Platzman P M. Collective-excitation gap in the fractional quantum Hall effect. *Phys Rev Lett*, 1985, 54: 581–583
- 10 Pinczuk A, Dennis B S, Pfeiffer L N, et al. Observation of collective excitations in the fractional quantum Hall effect. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 3983–3986
- 11 Du L, Wursthauer U, West K W, et al. Observation of new plasmons in the fractional quantum Hall effect: interplay of topological and nematic orders. *Sci Adv*, 2019, 5: eaav3407
- 12 Haldane F D M, Rezayi E H, Yang K. Graviton chirality and topological order in the half-filled Landau level. *Phys Rev B*, 2021, 104: L121106

Summary for “手性引力子模在分数量子霍尔效应中的实验观测”

Experimental observation of chiral graviton modes in the fractional quantum Hall effect

Rui-Rui Du

School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: rrd@pku.edu.cn

This paper introduces a groundbreaking experimental observation of chiral graviton modes in the fractional quantum Hall effect (FQHE), achieved by a research team from Nanjing University and its collaborators. Utilizing gallium arsenide quantum wells as the experimental platform, the researchers employed resonant inelastic polarized light scattering under extremely low temperatures and strong magnetic fields. This approach enabled the detection of chiral graviton modes as a novel type of quasiparticle arising from collective excitations. The discovery marks the first time graviton-like quasiparticles—characterized by features analogous to theoretical gravitons—have been observed in a real physical system, opening new avenues for quantum gravity research within condensed matter physics.

From a condensed matter perspective, this experiment provides experimental validation for the new geometric description of the FQHE proposed by Prof. D. M. Haldane of Princeton University. Traditionally, the FQHE can be understood through the Chern-Simons topological quantum field theory framework, where composite fermions follow fixed circular orbits in two dimensions. Haldane's theory, however, advances a quantum geometric interpretation by introducing the quantum metric tensor as a fundamental geometric degree of freedom, allowing the shape of electron orbits to fluctuate while conserving area. These quantum fluctuations of shape manifest as chiral graviton modes—quantized metric perturbations with intrinsic chirality (spin ± 2)—thus bridging the concepts of quantum geometry and topology in solid-state systems.

The results have profound implications for the intersection of general relativity and quantum mechanics. While general relativity describes gravity as the curvature of spacetime, and quantum mechanics unifies three of the four fundamental forces, gravity has long resisted integration into the quantum framework. The graviton, a hypothetical spin-2 boson predicted to mediate gravitational interactions, has proven elusive due to its extremely weak coupling to matter. In condensed matter systems, however, quasiparticles can exhibit analogous properties to fundamental particles, as seen in previous discoveries of Dirac fermions in graphene, Higgs modes in superconductors, and Majorana and Weyl fermion states in topological materials.

In the FQHE regime, the interplay of strong magnetic fields and Coulomb interactions induces complex electron correlations, giving rise to emergent quantum geometric phenomena. The observed chiral graviton modes reflect quantum metric fluctuations coupled with topological effects, specifically the bulk-edge correspondence that separates two-dimensional, massive bulk gravitons (with definite chirality) from one-dimensional, massless edge gravitons of opposite chirality. The experimental identification of these graviton modes provides direct evidence of the role geometry plays in strongly correlated electron systems and demonstrates the potential for condensed matter platforms to simulate and explore aspects of quantum gravity. Overall, this research not only advances the understanding of the FQHE but also sets a precedent for future investigations into the unification of geometric and quantum principles in physical systems.

condensed matter, fractional quantum Hall effect, chiral graviton modes, semiconductor, light scattering, collective excitations

doi: [10.1360/CSB-2025-5468](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5468)