

中国科学家在世界上首次观测到费米超流中的熵波临界发散,有望成为量子模拟领域的一座里程碑

神秘“第二声”首次破译!温度远去了,你“听”到了吗

■本报记者 许琦敏

热量不仅会扩散,在某些情况下,它还可能像声波一样,以波的形式传播,被称为“第二声”。这神秘的“第二声”一般不会出现在普通物质中,只会出现在某些特殊物质中,例如液氦超流。

最近,中国科学技术大学潘建伟团队在世界上首次破译了“第二声”的衰减率,即声扩散系数。这是他们基于超冷锂-铷原子量子模拟平台获得的结果,并依此准确测定了费米超流的热导率与粘滞系数。

虎年第一周,国际著名学术期刊《科学》发表了这项来自中国的量子模拟重大突破。杂志审稿人称该项工作“展示了令人惊叹的实验杰作”“是一篇极为出色的论文”“有望成为量子模拟领域的一座里程碑”。

神秘“第二声”发现80多年,诺奖预言却难以深入研究

什么是超流?超流就是粘滞性变成0的流体,这是一种宏观量子现象。

举个例子,因为有粘滞性的存在,我们搅拌一杯水而形成的漩涡,会在停止搅拌后慢慢消失,水体恢复平静。而超流体中的漩涡则会永远停不下来。更神奇的是,装到一个容器中的超流体,会自己“爬”出来。

1937年,苏联物理学家卡皮查在液氦-4中首次发现了超流现象,还发现它具有许多奇特性质,如极高热导率、粘滞性极小,可以克服重力沿容器壁向上攀升,还有“第二声”现象等等。

上世纪四十年代,苏联科学家朗道建立了二流理论,成功解释了氦-4液体(强相互作用玻色体系)的超流现象,并预言了熵或温度会以波的形式在超流中传播。由于熵波(即温度波)的性质与声波(第一声)类似,会在传播过程中逐渐衰减,因此朗道又将其命名为“第二声”。他本人也因此获得了1962年诺贝尔物理学奖。

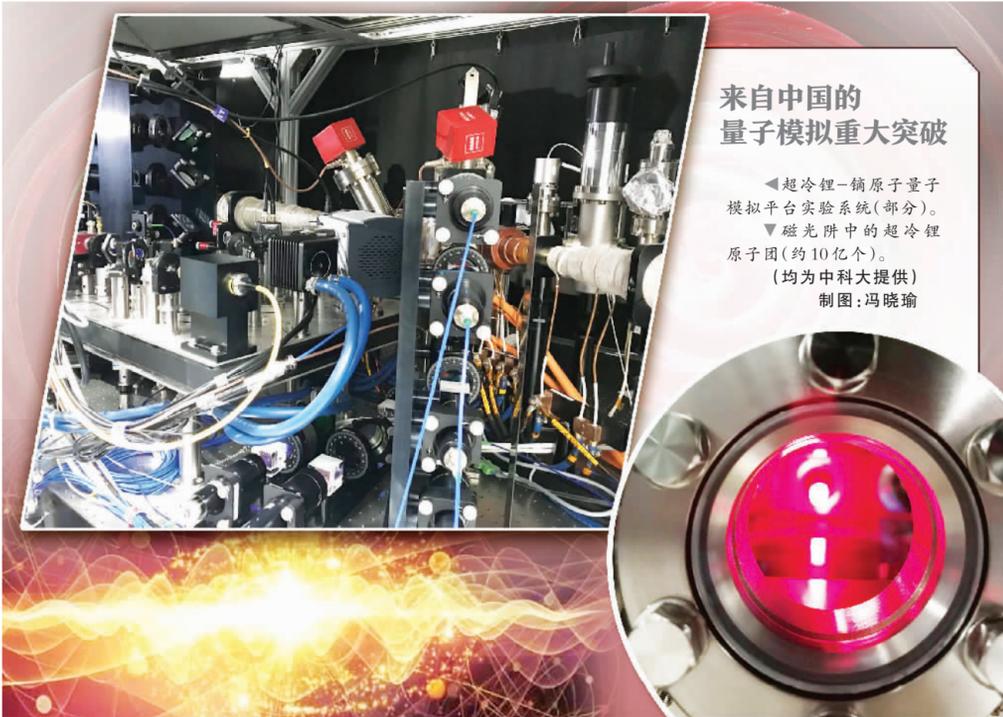
在研究液氦超流现象的基础上,人们建立了一个普通理论,叫做“动力学标度理论”,它对很多量子体系的相变都具有重要指导意义。该理论指出,许多不同体系的相变过程都遵从某些相同的普适函数。

此次论文的共同第一作者、中科大博士生罗翔解释,液氦-4是一个强相互作用的超流费米体系,同样的体系也存在于中子星的地壳、宇宙大爆炸之初的夸克-胶子等离子体之中。因此,破译超流的物理性质参数,有望使我们对那些无法触及的物理现象有更多理解。

然而,科学家在几十年的研究中发现,动力学标度理论中的很多关键参数在液氦中非常难测,因为它的量子临界区非常狭窄,观测技术和设备远不足以精确地从中间测到所需参数,故而在液氦体系中很难再深入研究“第二声”现象。

新机遇出现 精确调控超冷原子,模拟复杂量子系统

科学家发现,“第二声”的传播和衰减与超流序参量直接耦合,是一种只存在于



来自中国的量子模拟重大突破

超冷锂-铷原子量子模拟平台实验系统(部分)。
磁光阱中的超冷锂原子团(约10亿个)。
(均为中科大提供)
制图:冯晓瑜

超流体中的独特量子输运现象。

那么,除了液氦-4之外,还有没有其他超流体呢?超冷原子的出现,让物理学家们隐约看到了新的希望。由强相互作用极限下的超冷费米原子形成的超流体,具有极佳的纯净度与可控性,这为研究“第二声”的衰减带来了新机遇。

科学家经过坚持不懈的努力,终于在2005年前后确认了超冷原子体系中存在超流现象,又于2013年在该体系中测到了第二声波的存在。

在费米超流中研究“第二声”的衰减行为,不仅能回答“二流理论能否描述强相互作用费米超流的低能物理”这一长期存在的问题,还能表征强相互作用费米体系在超流相变处的临界输运现象。

这的确是一个机遇,但更是一个难度极高的国际前沿研究方向。罗翔告诉记者,之前有两个技术瓶颈难以突破:一是原子数不足,二是测量精度不够。实际上,超冷原子的温度本身已经接近绝对零度,只比绝对零度高千万分之一摄氏度,测温本就非常困难,而观测“第二声”则要探测温度波动所伴随的那一点点物质密度波动,更是难上加难。

该论文通讯作者之一、中科大教授陈宇翱认为,尽管困难重重,但这同时也是超冷原子量子模拟领域的一个重要目标——用人造的可精确操控的量子体系,来模拟复杂的量子系统,以发现复杂系统的物理规律。

陈宇翱进一步解释说,强相互作用的超冷原子就是费米子,如果用铷原子来模拟朗道所预言的费米超流中的熵波,那么未来就可以把实验中所观测到的规律,推广到其他强相互作用的费米体系。比如,中子星就是一个强相互作用的费米体系。

经过长期艰苦努力,中科大潘建伟、姚星灿、陈宇翱等成功搭建起了超冷锂-铷原子量子模拟平台。作为量子模拟的一个应用,他们与澳大利亚科学家胡辉合

作,开始挑战测量“第二声”的衰减率等关键参数。

突破技术关 千万个原子中,探测“纳开级”温差

想要观测“第二声”的衰减,既要制备出高品质、密度均匀的费米超流,还要发展出探测微弱温度波动的方法。费米超流确立十几年来,这两项关键技术却一直未得到突破,因此无法对“第二声”的衰减率进行测定。

在过去四年多时间里,潘建伟研究团队不仅搭建了一个全新的超冷锂-铷原子量子模拟平台,还融合发展了灰色黏团与算法冷却、盒型光势阱等先进的超冷原子调控技术,最终成功实现了世界领先的均匀费米气体的制备。

该论文通讯作者之一、中科大教授姚星灿详细介绍了他们在费米超流制备上的主要突破。与早期冷原子实验只有几个原子相比,他们所制备的超冷费米超流所包含的原子数达到了千万级,即约1000万个铷原子。

但这超流体的实际大小只是一个肉眼几乎看不见的小颗粒,直径仅为百微米——1立方厘米的空气大约只有指甲盖大小,却包含有1千亿个气体分子。而1000万个超冷气态铷原子的密度只有空气的百万分之一。

与此同时,研究团队对超冷原子体系温度的调控精度也达到了纳开尔文级别(十亿分之一开尔文,开尔文是热力学单位)。基于低噪声行波光晶格与高分辨原位成像技术,他们通过实验实现并理论论证了低动量传递(约百分之五费米动量)与高能量分辨率(优于千分之一费米能)的布拉格谱学方法,并利用其实现了对体系密度响应的高分辨测量。

在这一系列技术突破的基础之上,团队终于精确测得了“第二声”的衰减率。

获得衰减率 破译关键参数,后续研究已在路上

“第二声”实在太微弱了!罗翔一边回忆历时四年多的实验历程,一边向记者解释,在超冷锂-铷原子量子模拟体系中,第二声波伴随的气体原子波动,远比第一声波要微弱。在茫茫噪声中发现了隐隐约约的信号时,他深深吐出了一口憋在胸口好几年的气——终于感觉到了希望,真是找了很久,他曾睡觉都担心,怕没法在毕业前测到它。

陈宇翱介绍,在这个实验中,他们精确测量了熵波或者说温度波的衰减率,并且发现衰减率只跟玻尔兹曼常数和普朗克常数有关。由此,他们准确推算测定了体系的热导率与粘滞系数。

研究结果还表明,强相互作用费米超流的输运系数均达到了普通的量子力学极限值。同时它还可用来证明,黏滞系数、热导率等输运系数都只是粒子数和温度的函数,与粒子间相互作用的具体形式无关。

此外,研究团队还成功观测到了熵波在量子临界区附近的发散行为,并高质量标定出了这个体系所拥有的量子临界区——它非常可观,比液氦体系大了100倍。姚星灿颇感自豪地说,这一发现为利用该体系开展进一步的量子模拟研究,从而理解强关联费米体系中的反常输运现象奠定了基础。

未来,研究团队将对强相互作用费米超流的临界现象展开更深入的量子模拟研究。这不仅对人们理解和探索高温超导体等强关联费米体系有所帮助,还有望确定超流相变的普适临界函数。

2021全球量子科技亮点

量子安全视频会议

2021年4月1日,《物理世界》借着愚人节发表了一个关于在量子计算机上运行Zoom视频会议的虚构玩笑故事。没想到几个月后,这个故事竟部分变成了现实。英国和德国的研究人员利用量子纠缠,实现了在网络中多个用户之间安全地分配密钥,这一成果可能为量子安全的Zoom通话铺平道路。

在177个小时的实验中,赫瑞瓦特大学和杜塞尔多夫海因里希-海涅大学的物理学家们产生了一个包含超过一百万比特的安全密钥,并利用它在网络中的四个用户之间安全地共享了一个图像。该图像包含一只猫——就是刘易斯·卡罗尔的《爱丽丝梦游仙境》中的那只柴郡猫。

对化学进行量子测试

尽管量子计算吸引了大量的商业关注,但在量子科技界仍有一个广泛共识,即量子模拟——使用简单的量子系统来研究化学、凝聚态物理和材料科学中的复杂现象,将为基础科学研究带来“量子优势”。

美国哈佛大学倪康坤的工作就是对这种“量子优势”的一次尝试。2021年5月,倪康坤和他的哈佛同事报告说,他们已经将钾和铷的分子冷却到极其接近绝对零度,从而将分子之间可能发生化学反应的数量从无限多减少到57个。在一系列实验中,他们对这57种反应中的每一种都进行了追踪,并测算了发生概率。虽然其中50个都符合理论预测,但仍有7个不符合——这一引人入胜的结果,预示着量子化学的新可能性。

量子纠缠揭示生物结构

受激拉曼散射(SRS)被广泛用于分子尺度上的生物组织成像。2021年6月,澳大利亚和德国的研究人员对SRS进行了量子升级,用“压缩振幅”量子态的纠缠光子取代普通光子,大大降低了其成像系统的噪音。

这种新方法使科研人员能够观察到以其他方式无法测得的生物结构。研究人员还在比之前低14%的浓度溶液中检测到了分子样本。而这是在不需要提高他们的成像激光器的光功率的前提下达到的,提高光功率将会破坏脆弱的生物结构。

量子优越性愈加显著

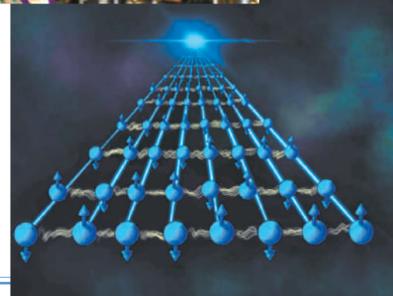
2020年底,由中国科学技术大学潘建伟和陆朝阳领导的研究团队,构建了76个光子的量子计算原型机“九章”,实现了具有实用前景的“高斯玻色取样”任务的快速求解,其速度比当时最快的超级计算机快一百万亿倍。

2021年10月,该小组再接再厉,又将计算速度提高了一百倍。新的结果表明,“九章”升级版能以比经典计算机快亿亿倍的速度执行相同的采样任务。同时,由潘建伟领导的另一个团队也在一种更传统的量子计算机上展示了量子优势,它使用66个超导量子作为量子比特。这令大家都满怀期待,中国科学技术大学的团队及其竞争对手将在2022年树立起哪些新的里程碑。



澳大利亚昆士兰大学的研究人员在展示他们的量子显微镜。(来源:昆士兰大学官网)

永恒的材料,时间晶体艺术渲染图。(来源:Matteo Ippoliti)



量子模拟中国成果昨登《自然》,首次在超冷原子分子混合气中合成三原子分子

量子力学下的“三体问题”有了理想研究平台

本报讯(记者许琦敏)昨天凌晨,国际著名学术期刊《自然》发表了中国科学技术大学潘建伟、赵博等与中国科学院化学研究所白春礼小组的合作成果——在超冷原子分子混合气中,首次合成三原子分子。该成果向基于超冷原子的量子模拟和超冷量子化学的研究迈出重要一步。

量子计算和量子模拟具有强大的并行计算和模拟能力,不仅能够解决经典计算机无法处理的计算难题,还能有效揭示复杂物理系统的规律,从而为新型

材料开发、新材料设计等提供指导。

利用高度可控的超冷量子气体来模拟复杂的难以计算的物理系统,可对复杂系统进行精确的全方位研究,在化学反应和新型材料设计中具有广泛的应用前景。

超冷分子将为实现量子计算打开新思路,并为量子模拟提供理想平台。但由于分子内部的振动转动能级复杂,通过直接冷却的方法来制备超冷分子非常困难。

近年来,超冷原子技术的发展为制

备超冷分子提供了一条新途径。人们可以绕开直接冷却分子的困难,从超冷原子气中利用激光、电磁场等来合成分子。从原子和双原子分子的混合气中合成三原子分子,是合成分子领域的重要研究方向。

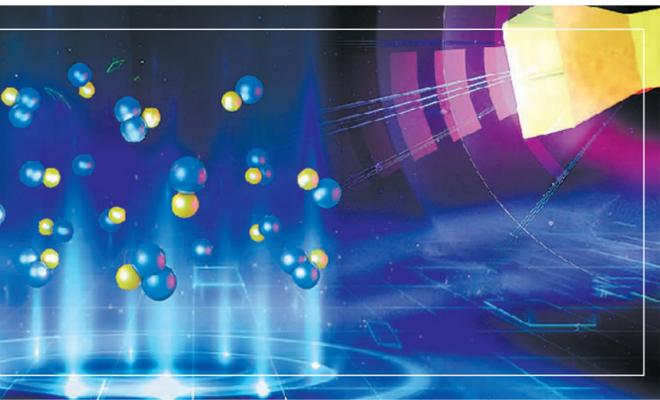
2019年,中科大研究小组首次观测到超低温下原子和双原子分子的Feshbach共振。在Feshbach共振附近,三原子分子束缚态的能量和散射态的能量趋于一致,而且散射态和束缚态之间的耦合被大幅度地共振增强。原子分子Fesh-

bach共振的成功观测,为合成三原子分子提供了新机遇。

此次研究中,中科大研究小组和中科院化学所研究小组合作,首次成功实现了利用射频场相干合成三原子分子。在实验中,他们从接近绝对零度的超冷原子混合气出发,制备了处于单一超精细态的钠钾基态分子。在钾原子和钠钾分子的Feshbach共振附近,科研人员通过射频场,将原子分子的散射态和三原子分子的束缚态耦合在一起。他们成功地在钠钾分子的射频损失谱上观测到射频合成三原子分子的信号,并测量了Feshbach共振附近三原子分子的束缚能。这一成果为量子模拟和超冷化学的研究开辟了一条新道路。

超冷三原子分子是模拟量子力学下“三体问题”的理想研究平台。“三体问题”极其复杂,即使经典的“三体问题”由于存在混沌效应也无法精确求解。在量子力学的约束下,“三体问题”变得更加难以捉摸。如何理解和描述量子力学下的“三体问题”一直都是少体物理中的一个重要难题。

此外,超冷三原子分子可以用来实现超高精度的光谱测量。这为刻画复杂的三体相互作用势能面提供了重要基准。由于计算势能面需要高精度地求解多电子薛定谔方程,超冷三原子分子的势能面也为量子化学中的电子结构问题提供了重要的信息。



从超冷原子和双原子分子混合气中利用射频场合成三原子分子的示意图。(中科大提供)

两次造出时间晶体

迎来时间晶体研究的突破就像等候公共汽车:你等了很久才等到,结果一下子就来了一辆。2021年11月,来自QuTech、美国加州大学伯克利分校和第六元素的一个物理学家团队表明,钻石中的核自旋可以构成一个特定的时间晶体——也就是说,一个在时间上表现出周期性的系统,就像晶体材料在空间上的周期性。

几周后,由美国谷歌和斯坦福大学研究人员领导的另一个小组发表了他们自己的时间晶体结果,证明这些奇异的量子物体构成了物质的非平衡阶段。有趣的是,后者使用谷歌的“悬铃木”量子处理器对其候选时间晶体进行测试,严格检查其是否符合所有要求——这是一个早期量子设备用作研究凝聚态系统的试验台的好例子。

有待探索的量子异象

2021年,我们了解到量子热力学限制了纳米级机械钟的精度、复杂的量子操作服从每秒17毫米的速度限制,只有六个原子的集合体可以表现出集体行为、量子属性可以脱离其母体并徘徊在物体本身从未去过的区域,以及如果你把信息扔进黑洞,量子计算机甚至都不能帮助你再次把它弄出来。这些奇特的量子行为,有待科学家在新的一年里进行更多探索。

(编译自《Physics World》)