
物理所在固体氦中首次直接观测到位错线雪崩及声学激发效应

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/1678.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

氦是最轻的单原子分子，在液体或固体状态中氦原子具有非常大的零点动能和非常小的范德华作用，因此液体和固体氦具有一系列有趣的量子现象，被称作“量子液体”和“量子固体”。满足波色统计的液体He在2mK以下也通过p波配对的形式进入超流相，形成目前唯一被确定了的p波超流(超导)体。固体氦同样具有一些奇异的量子特性——由于原子具有非常大的零点动能，原子间交换变得十分频繁，因此固体中的缺陷具有非常高的迁移率。在温度接近熔点时(1~2K)，由热激发所产生的空位运动主导了固体的塑性形变行为，而在远离熔点的低温区(<0.5K)，位错线的运动成为塑性形变的主要原因，因此观察固体氦的塑性形变可以作为研究量子固体中缺陷运动行为的手段。之前的工作大多集中在接近熔点处的塑性形变，研究的是热激发空位的行为。然而在远离熔点的极低温环境下对固体氦塑性形变的研究仍处于空白，主要难点在于在此温度下需要施加非常大的形变或应力才能使固体产生塑性形变，这在极低温条件下十分困难。

为了深入研究在极低温条件下量子固体的塑性形变，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心固态量子信息与计算实验室特聘研究员程智刚与加拿大阿尔伯塔大学物理系教授John Beamish合作，采用叠加多层压电陶瓷单元的方法，在1.5K处制备4He固体，并在16mK对其施加最大0.4%的切向形变使其进入塑性形变区，观测到瞬时发生的应力释放现象。该应力释放过程持续时间为25 μ s左右，释放应力最大幅度达到6%。通过分析发现，该过程是由于位错线在应力作用下产生雪崩效应，新生成的位错线以声速运动，导致晶格滑移并释放应力。研究者同时观测到声学激发信号，通过频谱分析得到位错线输运距离在5微米至5毫米之间。其中5微米的最小输运距离与位错线的平均间距相当，表明在这一尺度中位错线的运动为弹道输运过程。该研究成果首次在量子固体中观测到位错线的雪崩效应、弹道输运过程、声学激发过程等一系列现象。这些现象均与量子固体中位错线的极高迁移率相关，在常规固体中很难在宏观尺度被观测到。

如图1所示，研究者将18块压电传感器叠在一起作为形变发生器，并以一块压电传感器作为应力测量器，两者之间间隙为170 μ m。通过在垂直表面方向对形变发生器施加电场产生较大的切向位移，从而在间隙内固体氦中产生切向形变和应力。该应力作用在测量器上，在表面产生积累电荷。由于所施加的形变随时间线性变化，测量器上的电荷也随时间变化，产生微弱的电流。电流强度与微分切变模量 μ diff成正比，电流对时间积分得到的电荷则与应力成正比。研究者发现在形变 <0.2%时 μ diff为常数，表明固体在弹性形变区，而当 >0.2%时， μ diff随机出现尖锐的负方向的峰，峰宽大约为25微秒。这表明应力在瞬间得到释放，预示固体氦内部出现位错线雪崩效应并引起晶格滑移。经过计算，位错线以声速($v_t \approx 200$ m/s)运动，并由此得出晶格滑移最大距离为5 mm。

研究者进一步利用超高采样率设备观测到持续时间小于 $1\ \mu\text{s}$ 的应力震荡信号。该信号来自于晶格滑移导致的声学激发，即由于位错线运动在晶格滑移区产生局部的声学共振，并且以声子的形式向周围释放能量。经过频谱分析，该信号频率分布在 $5\sim 30\ \text{MHz}$ 范围内，中心频率为 $20\ \text{MHz}$ ，由此推出该信号所对应的晶格滑移区大小为 $5\ \mu\text{m}$ 。综合以上两个实验可以判断晶格滑移范围在 $5\ \mu\text{m}$ 至 $5\ \text{mm}$ 之间。值得指出的是，固体氦中位错线的平均分隔距离为微米量级，实验中观测到的 $5\ \mu\text{m}$ 的滑移距离意味着位错线以声速做弹道运动。宏观尺度下的位错线弹道输运过程在常规固体中并不常见，但固体氦的量子效应导致位错线具有极高的迁移率，从而使得弹道输运可以被观察到。

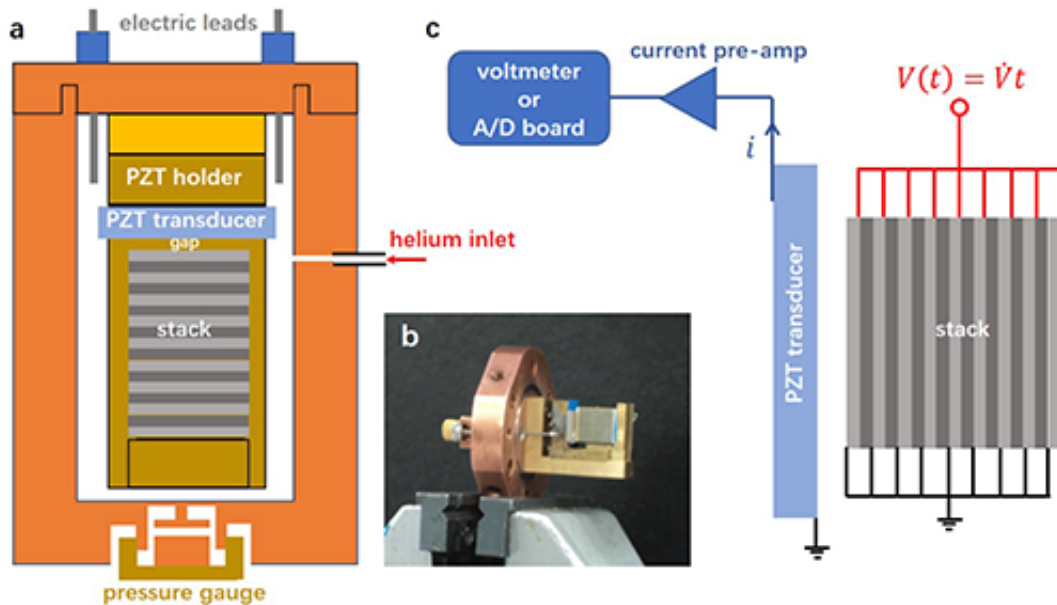


图1：a)实验装置示意图;b)实验装置实物图;c)实验原理图。在压电形变发生器上施加随时间线性变化电压以产生线性形变;在应力探测器上产生的电流被电流前置放大器转换成电压信号，并被数据采集卡记录下来。

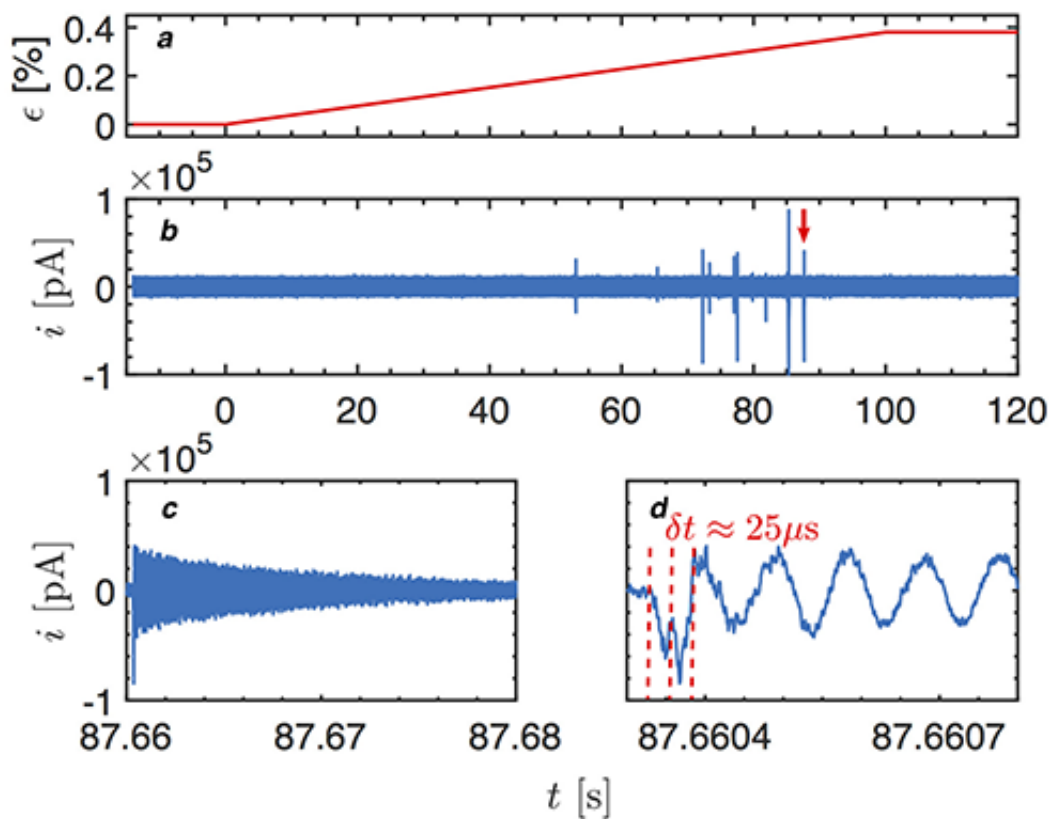


图2：应力释放过程。a)形变 ϵ 在 $t=0$ 时开始随时间线性增加，达到0.38%后停止增加；b, c, d)应力监测信号。当 $\epsilon > 0.2\%$ 时应力释放随机产生，表现形式为微分切变模量 μ diff(正比于电流)出现一个负方向的峰，随后跟随逐渐衰减的振荡。负方向的峰表明应力瞬时释放，振荡的产生是由于局部小范围内的晶格滑移在大范围的固体氦内产生了声学共振。

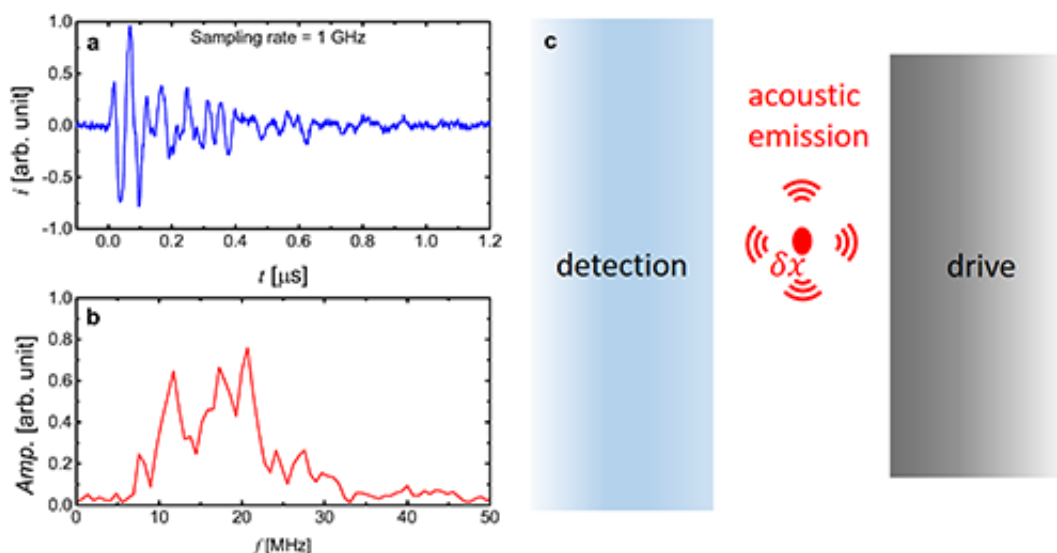


图3：a)声学激发时域信号；b)声学激发频域信号。；c)声学激发示意图。在尺度为 x 的晶格滑移范围内产生声学共振，向周围以声子形式释放能量。

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发