

光呈现的量子流体图像

(中国科学院物理研究所 汪力 编译自 Claire Michel, Matthieu Bellec. *Physics*, May 8, 2023)

探测半导体微腔中准粒子的实验进一步揭示了光的量子流体动力学性质。

流体无摩擦流动的能力，即超流性，并不局限于流体动力学所描述的系统。十多年前，研究人员开始对超流体和其他量子流体产生兴趣，这是因为在非线性介质中传播的光可以表现出量子流体动力学的特征。相关的研究通常在两种场景下进行：半导体微腔对光子形成的约束，以及体介质中光子的传播几何行为。这两种情况下都允许光子获得有效质量并实现有效的相互作用，从而在整体上表现为量子流体。然而，对这些奇异状态的进一步认识受到实验上的限制，特别是对于作为量子流体行为标志的集体激发，在探测上存在一定的困难。最近，法国索邦大学 Kastler-Brossel 实验室(LKB)的 Ferdinand Claude 等对半导体微腔中极化激元形成的

量子流体进行了前所未有的详细描述。

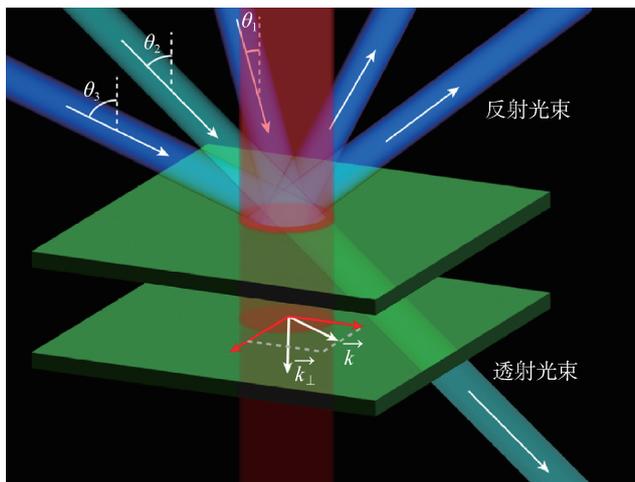
当用频率与腔共振模式相匹配的电磁波照射半导体微腔时，垂直于腔平面的波矢分量将被量子化，在色散关系中表现出可以赋予光子有效质量的二次依赖性。激光照射产生的激子与微腔中光子相干耦合产生的极化激元兼具光子和激子的特性(其质量由激子有效质量和光子有效质量决定)，它们之间通过激子—激子耦合相互作用。这些极化激元的集体行为表现为大量相互作用的粒子流，即量子流体，从中已经观察到了从玻色—爱因斯坦凝聚到超流的量子流体行为。

腔极化激元和二维量子流体的时间演化均可由所谓的 Gross—Pitaevskii 方程来描述。量子流体行为的一个标志是集体激发的存在，在静止流体表面形成传播的小密度扰动。这种传播由类似博戈留波夫(Bogoliubov)的色散关系描述，该关系具有类声区域(大空间尺度上的线性能量—动量关系)和类自由粒子

区域(小尺度上的抛物线关系)。Claude 等人的工作专注于这些集体激发(Bogoliubov 波)的定量测量。对于给定的泵浦能量，他们测量在不同角度入射(波长可调谐)的探测光束的反射率，如图所示。对于每个角度，当探测光与极化激元的集体激发共振时，反射率谱中都会出现一个凹陷，因此可以用不同的波矢矢量表征 Bogoliubov 激发，从而重建色散关系。

在超流体中，Bogoliubov 色散关系有两个分支，一个是正常色散，一个是负色散，也被称为幽灵分支。后一个分支之所以得名，是因为它很难激发，因此也很难观察。在先前的工作中，LKB 的研究人员已经在微腔反射率测量中找到了这种幽灵分支的踪迹，现在这项新工作进一步改善了两个分支的表征，特别是对于迄今为止表征不佳的色散曲线区域，并观察到流体密度和其他参数如何影响波速的新细节，以及各种流体不稳定性的建立过程。

这项工作使量子流体的研究获得了更高层次的实验控制，为更广泛的极化流体定量研究铺平了道路。通过探测与标准量子流体行为的微小偏差，该项技术将进一步促进有关量子流体动力学的研究。更重要的是，它有可能使极化激元系统能够用作引力的光学模拟，模拟与天体物理学、宇宙学和量子引力相关的难以探测的现象。



激光脉冲(红色)通过光泵浦在半导体微腔中产生极化激元，通过测量波长可调谐探测脉冲在不同入射角下的反射率，可以获得具有量子流体特征的极化激元色散曲线