

湖南省科学技术奖提名公示内容

(2022 年度)

项目名称: 基于旋转腔的非互易量子光学

提名单位: 湖南师范大学

提名等级: 湖南省自然科学奖一等奖

提名意见:

作为第二次量子革命标志的量子通信、量子计算和量子精密测量技术，是当今世界发达国家争先抢占的技术高地，是我国量子科技中正在或将要面临的“卡脖子”技术。目前，我国在国际量子通信领域处于领导者地位，但在量子计算和量子精密测量方面与世界发达国家相比还有较大差距。在精密测量方面，量子信息单向传输是实现隐身传感和无反馈噪声精密测量技术的关键。针对基于旋转腔的非互易效应，面向国家抢占量子科技先机、突破关键量子技术瓶颈和壁垒的重大战略目标，立足光力系统，聚焦量子精密测量新原理、新技术，通过长期系统的研究，在国家自然科学基金等项目支持下，申报团队获得了以下具有国际领先水平的原创性成果：

- 1) 揭示出旋转腔对环境干扰具有超高响应灵敏度，可用来探测尺寸更小的纳米颗粒或病毒，灵敏度达到目前最好的静态腔的 3 倍；发现了旋转腔宇称-时间反对称自发破缺效应，揭示了非互易光透射的新原理，实现了比常规厄米器件的隔离度更高的宇称-时间反对称非互易光透射。
- 2) 研究了量子涨落的非互易操控及应用，揭示了非互易光子阻塞效应以及非互易非常规光子阻塞；提出一种基于旋转腔实现量子非互易纠缠的新方案，揭示了量子非互易纠缠的保护和恢复机制，区分了经典与量子非互易效应不同的产生条件；突破了传统经典非互易物理的范畴，探索新奇的量子非互易效应与应用。

提名该项目为湖南省自然科学奖一等奖。

项目简介:

人工非互易光电力系统，即输入端与响应端交换对称性被打破的单向信号传输系统，在隐身探测与精密测量、无反馈噪声固态器件与通信技术、手性信号调控等领域具有重要应用价值。近年来，非互易器件的实现方案主要采用非线性结构、增益-耗散系统或周期结构，2018 年我们提出理论方案，随后和以色列、美国、日本学者合作，利用转速最高达到 6.6 kHz 的旋转腔，在商业光纤中观察到隔离

度达到 99.6%的非互易激光传输，这是旋转光学腔系统的第一个实验，具有不依赖非线性耦合、连续可调、不存在功率阈值或饱和值、可方便拓展到阵列或芯片等优点。

在上述实验基础上，针对旋转腔非互易量子光学研究应用，本项目取得如下重要创新成果：

1) 基于旋转腔的非互易激光传输与非互易灵敏探测：我们发现，通过控制 Sagnac 频移与光纤引起的耗散耦合之间的相对平衡，就可以在两个光学模式之间实现宇称-时间反对称性。特别是，调节并保持腔的转速在实验可行的范围内（kHz 量级），可以实现宇称-时间反对称自发破缺，展示出明显优于厄米系统的单向光传输能力。此外，利用旋转腔系统与纳米粒子耦合，我们发现相对于静止腔，旋转腔对微小的扰动的灵敏度更高，可用来探测尺寸更小的纳米颗粒或病毒，其灵敏度达到静态腔的 3 倍。

2) 基于旋转腔的非互易量子效应：考虑到量子通讯技术的发展，我们研究了量子涨落的非互易操控及应用，突破了传统经典非互易物理的范畴，探索新奇的量子非互易效应与应用。基于旋转克尔腔，我们发现系统左右输出端的二阶量子关联可以明显不同，出现非互易光子遂穿和光子阻塞效应；在此基础上，我们考虑耦合旋转腔，发现旋转对非常规光子阻塞效应有显著影响，在弱非线性条件下，即可实现 2 个数量级量子关联差异的非互易性；基于旋转光力腔，我们提出一种实现量子非互易纠缠的新方案，揭示了量子非互易纠缠的保护和恢复机制，区分了经典与量子非互易效应不同的产生条件，发现非互易调控可有效抑制由缺陷等实际非理想条件导致的量子消相干效应、恢复系统的量子相干性，为探索利用非互易器件保护和操纵量子资源奠定了基础，有望在抗噪声的量子处理器和传感器及量子网络等量子信息技术领域中获得重要应用。相关研究成果发表在 Phys. Rev. Lett.、Nano Lett.、Optica、Photonics Res. 等期刊。

我们的旋转腔超灵敏探测工作 [Optica 5, 1424 (2018)]，被同行评价为“无需复杂的材料、杂化系统、光学增益或低温就可以提升传感器灵敏度”[Adv. Photonics Res. 2, 2000150 (2021)]；非互易激光传输工作 [Nano Lett. 20, 7594 (2020)]，被日本东京大学知名物理学家 M. Ueda 等的综述正面引用 [Adv. Phys. 69, 249 (2020)]；非互易光子阻塞效应以及非互易光力纠缠的成果[Phys. Rev. Lett. 121, 153601 (2018)、Phys. Rev. Lett. 125, 143605 (2020)]，被同行列为研究量子非互易的代表作之一 [Phys. Rev. Lett. 128, 213605 (2022)]，最近，基于我们的工作，美国罗切斯特大学实验验证在经典互易系统中存在非互易量子关联 [Phys. Rev. Lett. 128, 213605 (2022)]。

代表作目录:

序号	代表作名称/刊名/作者	年卷页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯作者 (含共同)	第一作 者 (含 共同)	国内作者 (排 序)	知识产权 是否归国 内所有
1	Nonreciprocal photon blockade/Physical Review Letters/ R. Huang, A. Miranowicz, J. Q. Liao, F. Nori, and H. Jing	2018 年 121 卷 153601 页	2018 年 10 月 12 日	H. Jing	R. Huang	黄然, 廖洁桥, 景辉	是
2	Nonreciprocal Optomechanical Entanglement against Backscattering Losses /Physical Review Letters/Y. F. Jiao, S. D. Zhang, Y.-L. Zhang, A. Miranowicz, Le-Man Kuang, and H. Jing	2020 年 125 卷 143605 页	2020 年 10 月 02 日	Le-Man Kuang, and H. Jing	Y. F. Jiao	焦亚峰, 张圣 典, 张延磊, 匡乐满, 景辉	是
3	Breaking Anti-PT Symmetry by Spinning a Resonator/Nano Letters/ H.-L. Zhang, R. Huang, S. D. Zhang, Ying Li, Cheng-Wei Qiu, F. Nori, and H. Jing	2020 年 20 卷 7594 页	2020 年 09 月 16 日	H. Jing	H.-L. Zhang	张会来, 黄然, 张圣典, 李鹰, 景辉	是
4	Nonreciprocal unconventional photon blockade in a spinning optomechanical system/Photonics Research/ Baijun Li, Ran Huang, Xunwei Xu, Adam Miranowicz, and Hui Jing	2019 年 7 卷 630 页	2019 年 05 月 14 日	Adam Miranowicz, and Hui Jing	Baijun Li	李柏军, 黄然, 徐勋卫, 景辉	是

5	Nanoparticle sensing with a spinning resonator/Optica/ H. Jing, H. Lü, S. K. Özdemir, T. Carmon, and F. Nori	2018 年 5 卷 001424 页	2018 年 11 月 06 日	Hui Jing	H. Jing	景辉, 吕昊	是
---	---	------------------------------	------------------------	----------	---------	--------	---

主要完成人：景辉、黄然、焦亚峰、张会来、李柏军、廖洁桥

主要完成单位：湖南师范大学

主要完成人合作关系说明：基于旋转腔的非互易量子光学项目由主要完成人景辉、黄然、焦亚峰、张会来、李柏军、廖洁桥等合作完成。具体介绍如下：

1. 第二完成人黄然在湖南师范大学获得博士学位，在本人（第一完成人）指导下从事光学微腔中的新奇光子阻塞效应研究。第六完成人廖洁桥在学术问题讨论、计算方法等方面给予指导，在国家自然科学基金面上项目（项目编号：11774086）支持下，黄然在 *Physical Review Letters* 发表了非互易量子关联的工作 [代表作 1]。
2. 第三完成人焦亚峰在湖南师范大学获得博士学位并进行博士后研究，从事宏观杂化量子系统中量子纠缠态调控研究。其中，2018 年—2020 年期间，在国家自然科学基金项目（项目编号：11774086、11935006）支持下，本人（第一完成人）指导他以第一作者完成了旋转光力系统中的非互易量子纠缠及其调控研究 [代表作 2]。
3. 第四完成人张会来在湖南师范大学获得博士学位，从事旋转光学微腔中的宇称-时间反对称性研究。项目期间，在国家自然科学基金项目（项目编号：11774086、11935006）支持下，在本人（第一完成人）指导下，张会来与第二完成人黄然开展科研合作，完成了基于单个旋转腔的宇称-时间反对称系统的非互易光传输研究 [第一作者为张会来，代表作 3]。
4. 第五完成人李柏军在湖南师范大学获得博士学位，从事光力光子阻塞效应。项目期间，在国家自然科学基金项目（项目编号：11774086）支持下，在本人（第一完成人）指导下，李柏军与第二完成人黄然进行交流合作，完成了基于耦合旋转腔的非互易非常规光子阻塞研究 [第一作者为李柏军，代表作 4]。
5. 第六完成人廖洁桥教授与本人保持长期合作，对第二完成人黄然在光子阻塞方面的研究进行了指导，合作发表了非互易光子阻塞 [代表作 1]。