

# 合肥微尺度物质科学国家研究中心

HEFEI NATIONAL LABORATORY FOR PHYSICAL SCIENCES AT THE MICROSACLE

2020年第05期 (总第 178 期)



合肥微尺度物质科学国家研究中心办公室

0551-63600458 hfnloff2@ustc.edu.cn

## 中国科大在《现代物理评论》上 发表量子保密通信综述论文

5月26日,中国科学技术大学潘建伟及其同事徐飞虎、张强,与清华大学马雄峰、多伦多大学Hoi-Kwong Lo等,应邀在国际物理学权威综述期刊、美国物理学会的《现代物理评论》(Reviews of Modern Physics)上发表题为“基于现实器件的安全量子密钥分发”(Secure quantum key distribution with realistic devices)的长篇综述论文。该论文系统阐述了量子密码的原理、理论和实验技术,并指出,经过全球学术界三十余年的共同努力,现实条件下量子密码的安全性已经建立起来,尤其是测量器件无关等量子密钥分发协议的提出,彻底关闭了量子密码在物理实现过程中可能出现的安全性风险,为实现基于现实器件的安全量子密码铺平了道路。此论文为量子密码的广泛应用以及标准化制定奠定了坚实基础。

量子通信是量子信息科学的重要分支,它是指利用量子比特作为信息载体来进行信息交互的通信技术。量子通信中最典型的应用方式之一是量子保密通信(量子密钥分发)。量子密钥分发可以提供一种原理上安全的通信手段,是迄今唯一的安全性得到严格证明的通信方式,也是首个从实验室走向实际应用的量子信息技术。它已经成为物理学最有活力的前沿研究方向之一。经过我国科学家的长期努力,成功发射了世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”,并完成了国际上最大规模的量子保密通信光纤网络“京沪干线”,这一系列研究成果使我国在这一领域处于国际领先地位。

近年来,随着量子密钥分发逐步走向实用化研究,量子密钥分发的现实安全性得到了国际上的广泛关注。主要研究实际系统中的器件并不完全符合协议的数学模型而引入的潜在安全性风险和解决方案。这其中涌现了很多关于量子安全攻防的研究,以及多个新型的量子密钥分发协议。其中,潘建伟团队在国际上首次实验实现多个重要的新型协议,包括诱骗态、测量器件无关和双场等协议,极大的推动了量子密钥分发的现实安全性。

中国科大潘建伟等受邀为《现代物理评论》撰写的综述论文长达60页。文章详细回顾了量子密码的发展历史,深入讨论了量子密钥分发的现实安全性,并展望了量子密钥分发技术的未来发展趋势。正如《现代物理评论》杂志专门发布的评论所指出:在科学家的长期共同努力下,国际学术界在现实条件下量子密钥分发的理论和实验上都取得了重要的进展,现实安全性得到了彻底的提升(“Security has been thoroughly enhanced, as a consequence of both theoretical and experimental advances.”);这篇论文描述了当前最优的量子安全理论,以及实际保证量子密码系统现实安全性的方法和关键技术(“This review gives both sides of the story, with the current best theory of quantum security, and an extensive survey of what makes quantum cryptosystem safe in practice.”)。

《现代物理评论》是国际物理学界最权威的综述性期刊,近五年平均影响因子超过40,每年仅发表约四十篇学术论文。该期刊一般不接受自由投稿,主要是邀请在各领域卓有建树的物理学家执笔,旨在对当今物理研究的重大热点问题做历史总结、原理阐述、现状分析和趋向预测。论文需经过国际同行的匿名评审方可发表。此论文是潘建伟团队继2012年在《现代物理评论》发表“多光子纠缠和干涉度量学”之后的第二篇综述论文,也是我国量子信息科学领域在该期刊发表的第二篇综述论文,标志着我国在量子通信方面继续保持国际领先地位。

合肥微尺度物质科学国家研究中心

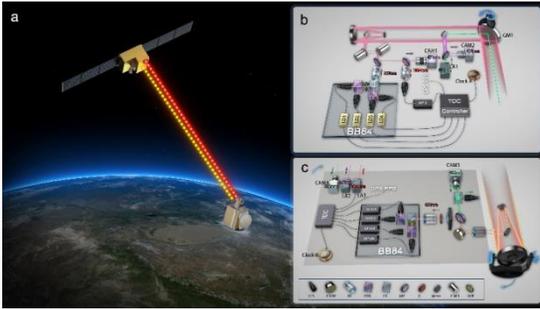
# 简报



## 研究进展

### 中国科大利用“墨子号”量子科学实验卫星实现安全时间传递

中国科学技术大学潘建伟及其同事彭承志、徐飞虎等利用“墨子号”量子科学实验卫星，在国际上首次实现量子安全时间传递的原理性实验验证，为未来构建安全的卫星导航系统奠定了基础。该成果于2020年5月11日在线发表在国际学术知名期刊《自然·物理》上。



实验装置图

高精度时间传递是日常生活中导航、定位等应用的核心技术。然而，当前广泛使用的时间传递技术面临着数据篡改、信号欺骗等各种攻击的潜在风险。

量子通信技术为安全时间传递带来了新的解决方案。基于量子不可克隆原理，以单光子量子态为载体的时间传递技术可以从根本上保证信号传输过程的安全性。潘建伟团队首次提出了基于双向自由空间量子密钥分发技术的量子安全时间同步方案。在该方案中，单光子量子态同时作为时间传递和密钥分发的信号载体，进行时间同步和密钥生成。这个过程所生成的密钥用来加密经典时间数据，从而确保时间数据的安全传输。

基于“墨子号”量子科学实验卫星，潘建伟团队突破了星地单光子时间传递、高速率星地双向异步激光时间应答器等关键技术，实现了星地量子安全时间同步的技术验证，获得了30 ps精度的星地时间传递，此精度达到了星地激光时间传递的国际先进水平。该工作得到了审稿人的高度评价“该实验在空间量子实验领域又一次超越了现有技术水平（The experiment once again pushing beyond state of the art with respect to space-based quantum experimentation）”，“这对于量子技术的实用化至关重要（which is critical towards practical use and ultimately commercialization of quantum technologies）”。上述研究成果将极大地推动量子精密测量相关领域的研究和应用。

### 中国科大揭示NLRP3炎症小体活化和髓系细胞控制肿瘤化疗敏感性的关键机制

2020年5月4日，中国科学技术大学生医部、基础医学院、中科院天然免疫与慢性疾病重点实验室和合肥微尺度物质科学国家研究中心周荣斌、江维研究组，附属第一医院潘跃银研究组和复旦大学刘素玲研究组合作在Nature Cell Biology上在线发表题为“Myeloid PTEN promotes chemotherapy-induced NLRP3 inflammasome activation and antitumor immunity”的长篇研究论文，发现髓系细胞中PTEN蛋白能够促进NLRP3炎症小体活化，并增强化疗反应性。

为了探究髓系细胞中的PTEN蛋白是否影响肿瘤的治疗效果，研究者首先对髓系细胞中PTEN条件性基因缺陷小鼠进行皮下荷瘤，并利用能够诱导肿瘤细胞发生免疫源性细胞死亡的化疗药物进行治疗。结果显示当PTEN缺陷后，化疗药物对肿瘤的治疗效果显著降低。更多实验结果表明PTEN可能通过促进免疫微环境中炎症小体活化提高机体抗肿瘤免疫。

接下来研究者在细胞水平探究PTEN对炎症小体活化的影响。研究者发现PTEN能够特异性促进NLRP3炎症小体活化，而不影响AIM2和NLRC4炎症小体活化。此外，作者还构建了能够特异性识别NLRP3酪氨酸30位点磷酸化的抗体以及NLRP3酪氨酸30位点组成型磷酸化的knock-in小鼠Nlrp3<sup>Y30E/Y30E</sup>，进一步确定了PTEN通过诱导NLRP3酪氨酸32位点去磷酸化促进NLRP3炎症小体活化。

为了明确髓系细胞PTEN促进化疗诱导的抗肿瘤免疫依赖于NLRP3炎症小体。研究者在PTEN条件缺陷鼠中回补细胞因子IL-1 $\beta$ 和IL-18，发现回补细胞因子后能够显著提高化疗药物对PTEN条件缺陷鼠的治疗作用，表明PTEN通过促进免疫微环境中NLRP3炎症小体活化提高机体抗肿瘤免疫。在肿瘤临床样本中，研究者也发现髓系细胞中的PTEN与肿瘤患者对化疗药物的敏感性呈现正相关关系。

该研究创新性体现在：1）发现肿瘤抑制因子PTEN在NLRP3炎症小体活化中发挥关键作用；2）揭示髓系细胞PTEN可以通过控制NLRP3炎症小体活化从而决定化疗敏感性；3）提示髓系细胞PTEN的表达可以作为一种预测化疗敏感性的生物标记物。



## 研究进展

## 中国科大在高储能电介质电容器 研究中取得重要进展

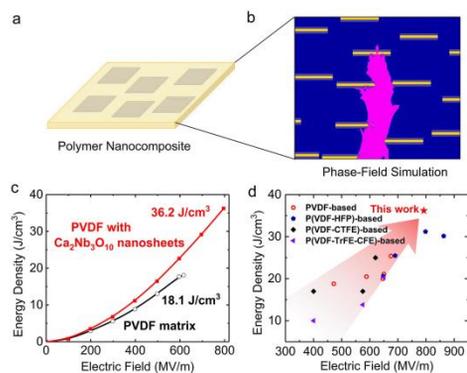
### 中国科大揭示光合固碳关键酶 RuBisCO组装的精细调控机理

中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心和生命科学与医学部周从照教授、陈宇星教授课题组阐明了蓝藻分子伴侣Raf1协助核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(RuBisCO)组装的分子机理,发现RuBisCO组装和成熟过程的多层次精细动态调控网络,为人工改造RuBisCO以提高光合作用效率奠定了基础。该研究成果以“Molecular basis for the assembly of RuBisCO assisted by the chaperone Raf1”为题于2020年5月25日在线发表在《Nature Plants》上。

RuBisCO是地球上丰度最高的酶,总质量约为7亿吨,催化光合作用暗反应的碳同化过程,每年将地球上超过1000亿吨CO<sub>2</sub>固定为有机物。然而RuBisCO的催化效率极低,每个全酶每秒钟只能催化3~10个CO<sub>2</sub>分子的转化。为了应对环境中CO<sub>2</sub>浓度的不断降低,蓝藻进化出CO<sub>2</sub>浓缩机制(CCM),通过羧酶体包裹RuBisCO并高度富集CO<sub>2</sub>,从而提高催化效率。蓝藻和植物中的I型RuBisCO全酶由8个大亚基RbcL和8个小亚基RbcS组成,其组装和成熟过程需要多个分子伴侣的帮助,包括GroEL/ES、RbcX和Raf1等。将蓝藻的CCM系统引入植物被认为是一种潜在的提高植物光合效率的方法,然而迄今为止对于RuBisCO组装和成熟的精细过程仍然不清楚,极大限制了RuBisCO的工程改造和活性优化。

该研究基于蓝藻分子伴侣Raf1以及Raf1和RuBisCO大亚基RbcL复合体的晶体结构分析,精细展示了Raf1与RbcL的相互作用界面。Raf1以交错的二体形式存在;当与RbcL结合时,Raf1的两个结构域相对旋转,形成类似镊子的结构夹住一个RbcL二体,进而稳定RbcL八聚体。同时,通过冷冻电镜单颗粒技术解析了RuBisCO和Raf1复合物一系列不同中间状态的三维结构,直观展示了RbcS替换Raf1形成全酶过程中的多步动态构象。此外,通过生化手段发现Raf1能够拮抗支架蛋白CcmM介导的RuBisCO堆积及相变过程,进而可能参与调控RuBisCO的堆积和羧酶体内核的形成。基于上述实验结果,作者提出了Raf1调控蓝藻RuBisCO组装、成熟以及在羧酶体内核中规则堆积的分子机理。该研究为深入理解RuBisCO的组装和功能及其应用改造奠定了分子基础。

中国科学技术大学李晓光团队联合清华大学沈洋教授课题组在高储能密度柔性电容器领域取得重要进展。研究者成功找到了一种可以大幅度提高聚合物基复合材料击穿电场强度和介电储能密度的方法,该方法可推广至不同的柔性聚合物电介质材料,为今后高储能电容器的设计提供了一种可行的方案。该成果以“Negatively Charged Nanosheets Significantly Enhance the Energy-Storage Capability of Polymer-Based Nanocomposites”为题在线发表在《先进材料》(Adv. Mater.)杂志上。



图例说明: a. 复合材料示意图。 b. 复合材料电击穿过程的相场模拟中,带负电Ca<sub>2</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>10</sub>纳米片对电树枝发展起阻碍作用。 c. PVDF基复合材料与纯PVDF的储能密度与电场的关系。 d. 不同聚合物基纳米复合材料的击穿强度和能量密度的对比。

成本低、易加工、耐高电压的柔性聚合物是最有潜力的电容器电介质材料之一,但其低介电常数导致的低储能密度限制了当今电子工业对器件小型化和高性能化的要求。针对这一难题,人们提出将高介电常数的无机填料加入到聚合物基体中,用于制备高储能密度复合材料,但通常高体积分数的无机材料的加入会降低复合材料击穿电场强度,对使用安全和寿命造成影响。

针对上述挑战,合作团队研究人员制备出掺入少量带负电的2维Ca<sub>2</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>10</sub>填料的聚偏二氟乙烯(PVDF)基复合材料,在提高其介电常数的同时,获得了极高的击穿场强(~792 MV/m)和储能密度(~36.2 J/cm<sup>3</sup>),该柔性电容器的储能密度是目前已报道聚合物基复合材料中最高的,是目前最好的商用双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜电容器的18倍,甚至超过了商用电化学电容器(20-29 J/cm<sup>3</sup>)。此外,相比于PVDF基体,复合材料的杨氏模量也有明显的提高而漏电流密度依然维持在较低水平,这些分别有利于避免机电击穿与电热击穿的发生。为了进一步验证该策略的普适性,研究人员基于相场模拟和有限元计算验证了纳米片填料负电荷对抑制电击穿的重要作用,并在聚苯乙烯(PS)基复合材料中同样实现了击穿场强与储能密度的大幅提升。该项研究工作为今后高能量密度柔性电介质储能材料的实用化提供了全新的思路。