

1. 超级陶粲装置完成物理与探测器概念设计

核探测与核电子学国家重点实验室赵政国院士团队牵头组织国内外众多研究单位开展超级陶粲装置（Super Tau-Charm Facility / STCF）预先研究，取得一系列重要进展，完成了物理与探测器概念设计。2023年11月14日，“超级陶粲装置概念设计报告（STCF CDR）——物理与探测器分册”以专刊发表于“Frontiers of Physics” [Front. Phys. 19(1) 14701 (2024)]。共有来自82个单位（其中有22个国外单位）的453名学者署名。这一设计报告总结了对STCF物理目标和物理潜力，探测谱仪各系统技术方案、可行性和预期性能指标等核心问题的研究成果，其正式发表是STCF项目研究中里程碑式的进展，为正在进行的STCF关键技术攻关以及后续的STCF工程建设奠定了坚实的基础。



当今粒子物理面临一系列重大基本问题的挑战，如强相互作用本质、强子结构和质量起源、物质与反物质的不对称性，以及暗物质和暗能量等。为了应对这些挑战，中国科学技术大学牵头提出建造新一代2-7 GeV能区超高亮度的正负电子对撞机——超级陶粲装置，其设计亮度高于 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。STCF的运行能

区覆盖强相互作用量子色动力学理论的微扰与非微扰过渡能区,具有一系列独特优势,有望在研究强相互作用非微扰性质和核子内部结构、探索新的电荷宇称不对称性、寻找奇特物质和超出标准模型的新物理上取得重大突破。STCF 的建成将成为国际粒子物理领域的重大装置,能够大幅度地提升我国基础科研能力,塑造我国国际合作和竞争的新优势。

STCF 面临高亮度、高精度、高本底、高事例率、高数据量的极大挑战,拟攻克的关键技术将大幅提升我国超高亮度对撞机的设计、特殊设备和部件的设计与建造、粒子探测与信号提取、海量数据传输与获取等方面的综合能力,支撑未来 STCF 的工程建设,也为国家建造其他大科学装置提供技术储备和支撑,并带动相关高新技术和产业发展,实现科技创新链的延伸。STCF 物理与探测器的概念设计工作,在物理模拟、探测器设计和优化、软件和电子学等方面产出了大量物理成果以及众多新方法和新技术,在领域内顶尖期刊如 NIM, EPJC, JINST 等上发表论文 31 篇。STCF 物理与探测器概念设计相关研究工作得到了中国科学技术大学、中国科学院、科技部、基金委的资助。

M. Achasov, et al., STCF conceptual design report (Volume 1): Physics & detector, *Front. Phys.* 19(1), 14701 (2024)

DOI: 10.1007/s11467-023-1333-z

物理:

1. Xiaodong Shi *et al.*, A fast simulation package for STCF detector, *Journal of Instrumentation*, 16, P03029 (2021)
2. Binlong Wang *et al.*, Collins effect at super tau charm factory, *Journal of University of Chinese Academy of Sciences* 38, 4 (2021)
3. Haoyu Sang *et al.*, Feasibility study of CP violation in tau to Ks pi nu decays at the Super Tau Charm Facility, *Chin. Phys. C* 45, 053003 (2021)
4. Yulan Fan *et al.*, Feasibility study of measuring b to s gam photon polarization in D0 to K₁(1270) e nu at STCF, *Eur. Phys. J. C* 81, 1068 (2021)
5. Jiajun Liu *et al.*, Prospects of CKM elements $|V_{cs}|$ and decay constant f_{D_s} in Ds to mu nu decay at STCF, *Eur. Phys. J. C* 82, 337 (2022)
6. Huijing Li *et al.*, Feasibility study of Ds to tau nu decay and test of lepton flavor

- universality with leptonic Ds decays at STCF, *Eur. Phys. J. C* 82, 310 (2022)
7. Yue Xu *et al.*, Sensitivity of CP violation of Lambda decay in J/psi to Lambda anti-Lambda at STCF, *Mod. Phys. Lett. A* 37, 2250208 (2022)
 8. Sheng Zeng *et al.*, Prospects of CP violation in Lambda decay with polarized electron beam at STCF, *Chin. Phys. C* 47, 113001 (2023)
 9. Teng Xiang *et al.*, Sensitivity study of the charged lepton flavor violating process tau to gam mu at STCF, *Eur. Phys. J. C* 83, 908 (2023)
 10. Xiaolin Kang *et al.*, Novel approach in investigate eta decay via eta'->pi pi eta, *Phys. Rev. D* 108, 014038 (2023)

探测器和软件:

1. Jianxin Feng *et al.*, A thermal bonding method for manufacturing Micromegas detectors, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 989, 164958 (2021)
2. Binbin Qi *et al.*, DIRC-like time-of-flight detector for the experiment at the Super Tau-Charm Facility, *Journal of Instrumentation*, 16, P08021 (2021)
3. Zhujun Fang *et al.*, A hybrid muon detector design with RPC and plastic scintillator for the experiment at the Super Tau-Charm Facility, *Journal of Instrumentation*, 16, P09022 (2021)
4. He Li *et al.*, Detector geometry management system designed for Super Tau Charm Facility offline software, *Journal of Instrumentation*, 16, T04004 (2021)
5. Jianxin Feng *et al.*, A novel resistive anode using a germanium film for Micromegas detector, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 1031, 166595 (2022)
6. Wenhao Huang *et al.*, Design and development of the core software for STCF offline data processing, *Journal of Instrumentation*, 18, P03004 (2022)
7. Hang Zhou *et al.*, Design and simulation of a cylindrical μ RWELL inner tracker for the experiment at the Super Tau-Charm Facility, *Journal of Instrumentation*, 18, P06015 (2023)
8. Huangchao Shi *et al.*, Beam background simulation and experiment at BEPCII, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 1050, 168174 (2023)
9. Ping Li, *et al.*, Study of hybrid micropattern gaseous detector with CsI photocathode for Super Tau-Charm Facility RICH, *Journal of Instrumentation*, 18, P04028 (2023)

10. Binbin Qi *et al.*, Imaging-based likelihood analysis for the STCF DTOF detector, Nucl. Instr. and Meth. A, 1049, 168090 (2023)
11. Ziwei Li *et al.*, Cosmic ray test of a STCF DTOF detector prototype, Nucl. Instr. and Meth. A, 1051, 168202 (2023)
12. Zekun Jia *et al.*, A light yield enhancement method using wavelength shifter for the STCF EMC, Nucl. Instr. and Meth. A, 1050, 168173 (2023)
13. Xu Wang *et al.*, A novel fast timing detector based on the double micro-mesh gaseous structure with reflective photocathode, Nucl. Instr. and Meth. A 1055, 168529 (2023)
14. Yong Song *et al.*, Pure CsI electromagnetic calorimeter design for the Super Tau-Charm Facility, Nucl. Instr. And Meth. A 1057, 168749 (2023)
15. Xiaocong Ai *et al.*, Implementation of ACTS for STCF track reconstruction, Journal of Instrumentation, 18, P07026 (2023)

电子学:

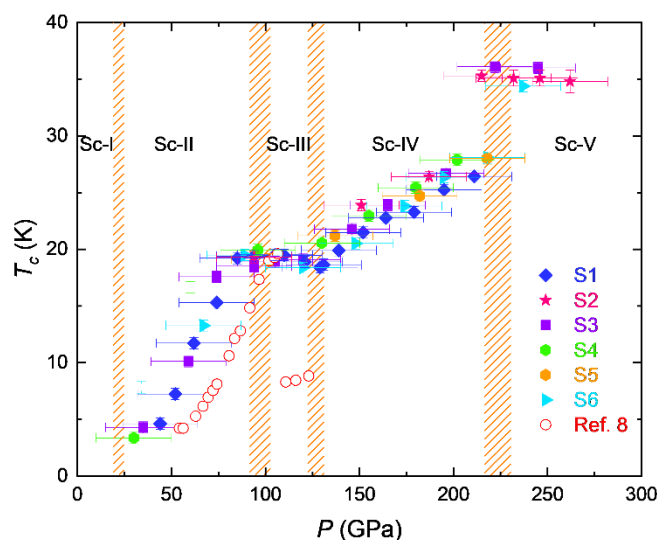
1. Bo Wu *et al.*, Design of time-to-digital converters for time-over-threshold measurement in picosecond timing detectors, IEEE Transactions on Nuclear Science, 68. 470-476, (2021)
2. Yang Hu *et al.*, A Clock Distribution and Synchronization Scheme Over Optical Links for Large-Scale Physics Experiments, IEEE Transactions on Nuclear Science, 68.6, pp. 1351-1358 (2021)
3. Bao-Lin Hou *et al.*, Prototype of the Readout Electronics for the RICH PID Detector in the STCF, Nuclear Science and Techniques, vol. 30, no. 88, pp. 80-1 – 80-13 (2022)
4. Laifu Luo *et al.*, Study on time measurement for CSA-based readout electronics in STCF ECAL, Journal of Instrumentation, 17, P02034 (2022)
5. Chunxiao Song *et al.*, Prototype of a Readout Control ASIC for Data Collection and Command Distribution, IEEE Transaction on Nuclear Science, vol. 70, no. 6, pp. 1053-1060, (2023)
6. Yao Teng *et al.*, SEU protection design for the prototype readout electronics of MAPS-based STCF inner tracker, Journal of Instrumentation 18 (2023)

2. 中科大超导研究团队发现最高超导转变温度的元素超导体

我院陈仙辉、应剑俊等与南京大学的合作者在高压元素超导领域取得重要进展。通过超高压技术手段，研究团队发现单质元素钪在高压下具有高达 36 K 的超导转变温度，刷新了元素超导最高转变温度的记录。2023 年 6 月 22 日以“Record High 36 K Transition Temperature to the Superconducting State of Elemental Scandium at a Pressure of 260 GPa”为题在线发表在《物理评论快报》上（Phys. Rev. Lett. 130, 256002 (2023)）。

超导电性自从荷兰科学家昂内斯在元素单质汞中被发现以来，由于其同时具有零电阻和完全抗磁性，吸引了人们广泛的关注。目前，超导材料有着广泛的应用，例如可以用于无损耗的电传输和稳衡强磁场的产生。尽管人们已经在该领域进行了 100 多年的研究，但是超导材料还没有被大规模应用，最主要的原因是超导需要的条件极其严苛，需要很低的温度才能实现，这样就需要昂贵的制冷设备来维持低温，极大地限制了其应用。因此，人们一直在致力于寻找更高超导转变温度的超导体。单质元素是最简单的系统，这为人们提供了一个理想的研究平台来研究其中的物理机制，例如最早的超导电性及超导体中同位素效应均是在单质元素中被发现的。但是元素单质的超导转变温度大都很低，常压下单质铌具有最高的超导转变温度，但是也只有 9.2 K。人们发现通过施加压力，发现很多常压下不超导甚至是绝缘的元素单质在压力下会出现超导电性，同时对有些超导材料可以通过施加压力来提高超导转变温度。目前人们已经发现 50 多种元素在常压或高压下具有超导电性。此前最高的元素单质超导体是金属钛，它的超导转变温度为 26 K。发现高超导转变温度的超导体是十分困难的，例如此前发现的 20 K 以上的元素超导体只有 2 种，15-20 K 的元素超导体有 4 种，10-15 K 的元素超导体有 6 种，剩下四十多种元素的超导转变温度都在 10 K 以下。

单质元素钪在压力下会经历四个结构相变。早期研究发现在 23 GPa 以上，Sc-I 相会转变为 Sc-II 相。Sc-II 相的超导转变温度在 100 GPa 左右最高可以达到近 20 K，其相对较高的超导转变温度被认为是电子逐渐从 4s 轨道向 3d 轨道转移导致的。但是由于高压实验技术所限，更高压力下的物性测量还十分缺乏。



图示：单质元素钪的超导转变温度高压相图。

针对这一问题，我院陈仙辉超导研究团队对单质元素钪进行了超高压下的输运研究，确定了其高压下的超导相图。通过高压电输运测量发现在 Sc-II 相， T_c 随压力增加迅速增加，与早期的报道一致。但进入 Sc-III 相后， T_c 随压力几乎不变。进入 Sc-IV 相后， T_c 随压力增加而增加，最高可以达到 28 K。当体系进入 Sc-V 相后超导转变温度突然增大到 36 K，并且几乎不随压力变化。这一发现大幅刷新了元素超导的记录。计算结果表明 Sc-V 相中的高 T_c 的起源可能是由于强的 d 电子与中等频率声子耦合导致的。这些结果表明单质元素钪在压力下的超导转变温度与结构密切相关，在 Sc-V 中发现的 36 K 超导转变温度刷新了元素超导记录，相较于原来发现的元素超导体来说，超导转变温度有着大幅的提升，这些发现为在简单体系中寻找高温超导材料提供了新的思路。

该工作得到了科技部、国家自然科学基金委、中科院以及安徽省引导项目的相关基金资助。

Jianjun Ying, Shiqiu Liu, Qing Lu, Xikai Wen, Zhigang Gui, Yuqing Zhang,
Xiaomeng Wang, Jian Sun, and Xianhui Chen

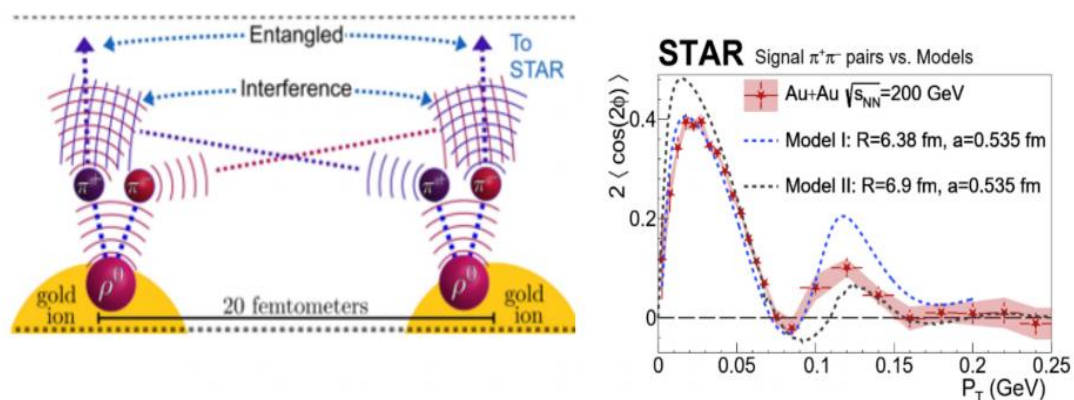
Record High 36 K Transition Temperature to the Superconducting State of Elemental Scandium at a Pressure of 260 GPa

Phys. Rev. Lett. 130, 256002 (2023)

DOI: [10.1103/PhysRevLett.130.256002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.256002)

3. 核探测与核电子学国家重点实验室 STAR 组在费米尺度干涉实验方面取得重要进展

核探测与核电子学国家重点实验室 STAR 组与美国布鲁克海文国家实验室、山东大学等单位的联合研究团队，在 STAR 国际合作组中发挥主导作用，首次在高能重离子碰撞过程中以不稳定粒子 ρ^0 介子为实体实现了费米尺度的单粒子双缝干涉实验，并利用该过程的线性偏振特征观测到极化空间的干涉现象。该研究以题为《Tomography of ultra-relativistic nuclei with polarized photon-gluon collisions》于 2023 年 1 月 4 日在《科学进展》（《Science Advances》）上发表。



ρ^0 介子的双缝干涉示意图及其衰变角二阶余弦调制系数的测量结果

波粒二象性是量子力学的基石原理，也是量子力学“反常识”和“反直觉”的源头之一。而单粒子的双缝干涉思想实验能够非常直接地从现象上诠释波粒二象性。近半个世纪以来，实验学家们相继以光子、电子、原子、分子和生物大分子作为干涉实体，实现了该思想实验。那么，对于高能核物理实验中常见的不稳定粒子是否也能够作为实体产生双缝干涉现象呢？STAR 的研究团队利用甚高能原子核对撞中相干光致产生的不稳定粒子 ρ^0 （寿命约为 1 费米/光速）作为干涉实体实现了费米尺度的双缝干涉实验，这也是目前尺度最小的双缝干涉实验。如图所示，在金核-金核碰撞中，两个对撞核都可以作为 ρ^0 介子散射的靶核（“缝”），从而形成干涉。该过程产生的 ρ^0 介子是完全线性极化的，其衰变产物趋向于沿着极化方向运动，从而导致衰变角的二阶余弦调制随着 ρ^0 介子横动量大小呈现周期变化(如图所示)，这是双缝干涉现象在极化空间的首次体现。

有意思的是，在这些对撞中两个“缝”之间的典型距离约为 20 费米，远大于 ρ^0 介子衰变之前所能到达的距离，这表明来自两个“缝”的 ρ^0 介子波函数在相遇重叠之前就已经衰变， ρ^0 介子的双缝干涉实际上是由其衰变产物（比如 $\pi^+\pi^-$ 对）的协同合作而产生。这些衰变的 $\pi^+\pi^-$ 对“超时空”地协同完成干涉，是诠释量子纠缠现象的一个绝佳范本。

核探测与核电子学国家重点实验室查王妹副教授为这篇合作组文章的主要作者，在实验分析中做出了突出贡献。此外，查王妹副教授还建立了相关唯象理论模型，对甚高能原子核对撞中相干光致产物的双缝干涉进行了理论研究，文章发表在 *PRC*99, 061901(2019)和 *PRD*103, 033007(2021)上，对实验测量有重要指导意义。*STAR* 是基于美国布鲁克海文国家实验室相对论重离子对撞机（*RHIC*）上 *STAR* 实验的大型国际合作组，由来自 14 个国家 71 个单位的七百多位科研人员组成。该项研究受到了国家自然科学基金委、科技部等单位资助。
文章链接：<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq3903>

4. 中国科学院微观磁共振重点实验室利用量子精密测量技术搜寻宇称破缺的新相互作用

中国科学院微观磁共振重点实验室彭新华教授、江敏副研究员等在量子精密测量和检验超越标准模型领域取得重要进展，利用自主研制的量子自旋放大技术实现了对一类超越标准模型的宇称破缺相互作用的超灵敏检验，实验结果提升国际记录至少 5 个数量级，弥补了现有天文学观测的空白。相关研究成果于 1 月 6 日以“Search for exotic parity-violation interactions with quantum spin amplifiers”为题在线发表于国际学术期刊《Science Advances》上。

粒子物理标准模型是 20 世纪物理学建立的最伟大的模型之一。然而，尽管标准模型取得了巨大的成功，但许多物理现象如暗物质、暗能量、中微子振荡、正反物质不对称性等无法被很好解释。为此，许多理论预言了可能存在超越标准模型的新轻玻色子，如轴子、暗光子、Z' 玻色子等，其可以作为暗物质的候选粒子，补充现有的标准模型理论。这些新粒子的能量可能跨度几十个量级的范围。对于低能区的新粒子(远小于 1eV)，更加凸显出粒子的波动性，它们的德布罗意波长甚至要比现在的大型对撞机还要大，因此不适于使用粒子对撞器与加速器等高能装置进行研究。量子传感器如原子磁力仪、原子钟弥补了高能装置对这类超轻暗物质候选粒子的探测空白，但因这些新粒子与标准模型内粒子的相互作用十分微弱，亟需一种高灵敏度的量子传感器对标准模型外的新物理进行研究。

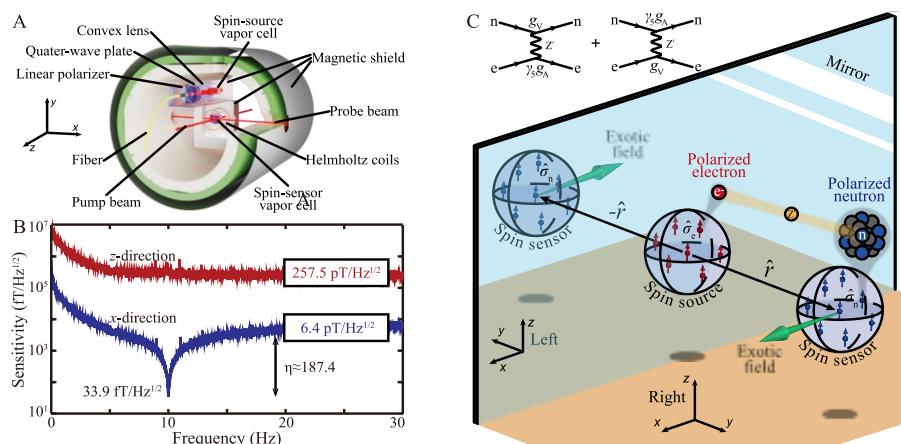


图 1 检验新相互作用的实验装置和相应的磁探测灵敏度

彭新华教授研究组利用近期发展的量子自旋放大器技术(图 1A)[Nat. Phys.17, 1402–1407 (2021)], 实现了对待测磁信号 2 个数量级的放大(图 1B), 并将其应用于超越标准模型的新粒子与新相互作用的搜寻, 在国际上提出了“蓝宝石”研究计划, 英文缩写 SAHPHIRE(Spin Amplifier for Particle PHysicsREsearch)。该计划的首批实验约束了一种由 Z'玻色子诱导的自旋相互作用, 如图 1C 所示, 此类奇异相互作用是宇称不守恒的, 其强度正比于自旋源内的电子自旋数量。因此本实验采用了两个原子气体室, 一个利用惰性气体氙原子作为自旋传感器, 一个利用碱金属铷原子作为自旋源。自旋源内的碱金属原子通过激光泵浦实现约 10^{14} 的电子极化自旋数量, 并由泵浦光间断极化, 从而产生一个交流的震荡奇异场作用于量子自旋传感器上, 并被进一步放大和探测。

相较于其他应用于新物理搜寻的共振技术, 量子自旋放大器中的铷原子充当嵌入式磁强计, 实现了惰性气体氙原子的连续极化和原位测量。相比之下, 原位测量提供的一个显著优势是由于大费米接触放大因子而增强核共振信号。此外, 由于氙核自旋通过与极化铷原子的自旋交换碰撞而连续极化, 自旋放大器可实现对奇异场的连续搜索。由于这些独特的优点, 自旋放大器更适用于奇异相互作用的超灵敏连续波检测。正因如此, 本实验对电子与中子之间的宇称破缺奇异相互作用的约束较国际前沿实验界限提高了 5 个数量级(如图 2A), 且对中子与质子之间的奇异相互作用进行了首次探索(如图 2B)。不仅如此, SAPHIRE 计划仍有很大的性能提升空间, 研究人员提出利用 K-3He 自旋放大器与固体自旋源, 有望将对此类奇异相互作用的实验约束界限进一步提升 8 个量级。

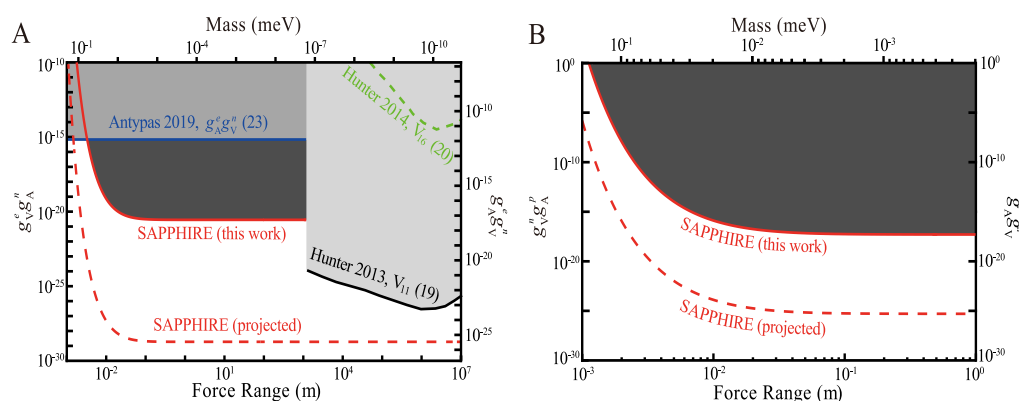


图 2 新奇相互作用实验界限。

审稿人对这一工作有高度评价：“The result is a clearly a major improvement for the field”（该领域的一个重大提升），“What is particularly remarkable about these results is that they have established strong new constraints, which have improved prior bounds by several orders of magnitude, in a region of parameter space where there are little or no constraints from astrophysics”（该实验最引人注目的是在一个几乎没有天体物理学约束的参数空间区域建立了强有力的新约束，将先前的约束提高了多个数量级）。这一成果展示了 SAPPHIRE 计划下量子精密测量技术与粒子物理学研究的有机结合，有望激发宇宙天文学、粒子物理学和原子分子物理学等多个基础科学的广泛兴趣。

中国科学院微观磁共振重点实验室博士研究生王元泓和黄颖为该文共同第一作者，彭新华教授和江敏副研究员为该文共同通讯作者。该研究得到了科技部、国家自然科学基金委和安徽省的资助。

Search for exotic parity-violation interactions with quantum spin amplifiers

Yuanhong Wang, Ying Huang, Chang Guo, Min Jiang, Xiang Kang, Haowen Su, Yushu Qin, Wei Ji, Dongdong Hu, Xinhua Peng, and Dmitry Budker

Science Advances 9, eade0353 (2023)

5. 实现百兆比特率量子密钥分发，将国际成码率纪录提升一个数量级

我院潘建伟、徐飞虎等与上海微系统所、济南量子技术研究院、哈尔滨工业大学等单位的科研人员合作，通过发展高保真度集成光子学量子态调控、高计数率超导单光子探测等关键技术，首次在国际上实现百兆比特率的实时量子密钥分发，实验结果将此前的成码率纪录提升一个数量级。该成果于 2023 年 3 月 14 日在线发表于国际著名学术期刊《自然-光子学》（Nature Photonics）杂志。

量子密钥分发（QKD）基于量子力学基本原理，可以实现原理上无条件安全的保密通信。提高 QKD 的成码率对其实用化起着至关重要的作用。高码率可为更多用户提供服务，实现大数据共享、分布式存储加密等高带宽需求的应用。此前国际上最高的实时成码率是 10Mb/s（10 公里标准光纤信道下）。为了实现更高的密钥率，需要解决系统发送端、接收端和后处理等技术瓶颈。在发送端，高码率 QKD 需要高保真度的量子态调制，然而现有 QKD 系统在高速调制下会产生较高误码率；在接收端，同时具有高效率和高计数率能力的单光子探测器不可或缺，超导纳米线单光子探测器（SNSPD）具有高效率和低噪声的优点，但其计数率通常受到较长恢复时间的限制。

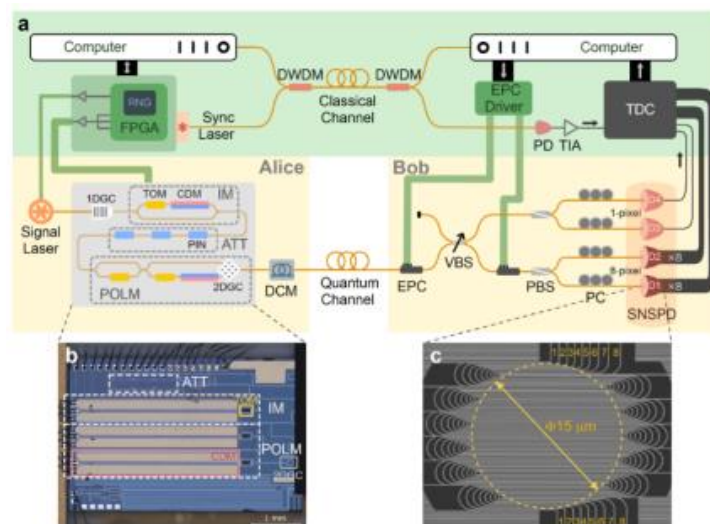


图 1：高码率量子密钥分发装置图

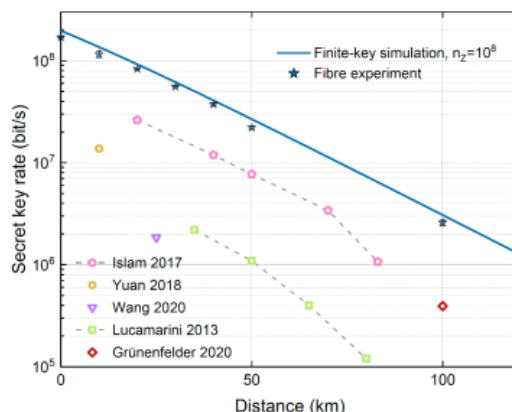


图 2: 量子密钥分发成码率对比图

潘建伟、徐飞虎研究组发展了集成光子片上高速高保真度偏振态调制技术，系统重频达到 2.5 GHz，量子比特误码率优于 0.35%；结合中科院上海微系统所尤立星团队最新研制的八像素 SNSPD，实现了高计数率、高效率的单光子探测，在每秒输入 5.5 亿个光子时仍能保持 62% 的探测效率；同时，研究组发展了偏振反馈控制、高速后处理模块等。在上述技术突破的基础上，研究团队实现了 10 公里标准光纤信道下 115.8 Mb/s 的密钥率，较之前纪录提高了约一个数量级；系统稳定运行超过 50 个小时，在传输距离 328 公里下码率超过 200b/s。上述研究成果表明，QKD 可实现百兆比特率的实时密钥分发，满足高带宽通信需求，对未来量子通信的大规模实际应用具有重要意义。

本研究论文的第一作者是中国科学技术大学博士后李蔚和博士生张立康。

该工作得到了科技部、自然科学基金委、中科院、安徽省和上海市等的资助。

论文链接: <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01166-4>

Wei Li, Likang Zhang, Hao Tan, Yichen Lu, Sheng-Kai Liao, Jia Huang, Hao Li, Zhen Wang, Hao-Kun Mao, Bingze Yan, Qiong Li, Yang Liu, Qiang Zhang, Cheng-Zhi Peng, Lixing You, Feihu Xu & Jian-Wei Pan

High-rate quantum key distribution exceeding 110 Mb s⁻¹

Nature Photonics volume 17, pages416–421 (2023)

DOI: 10.1038/s41566-023-01166-4

6. 核探测与核电子学国家重点实验室在稀有双玻色子散射 研究中取得重要进展

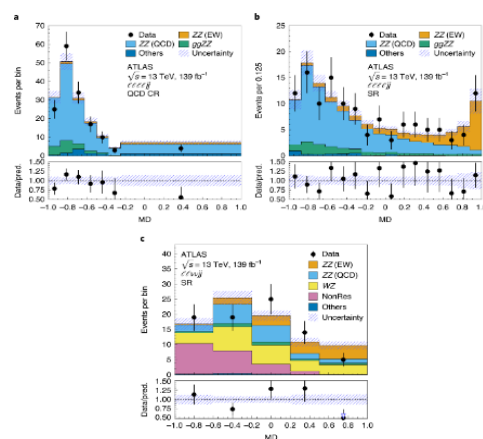
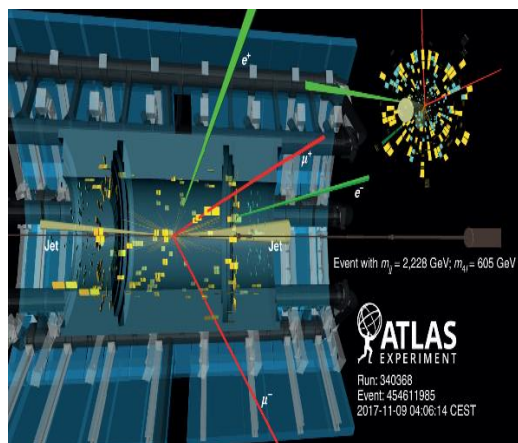
欧洲核子中心大型强子对撞机 LHC 上的 ATLAS 实验组于 2023 年 2 月 9 号在 *Nature Physics* 杂志上在线发表了关于首次观测到稀有 ZZ 双玻色子散射过程的论文[1]，信号探测显著度[*]是 5.7s。这次的发现是粒子物理标准模型电弱测量中的一个里程碑，对理解希格斯机制（电弱对称性破缺机制）具有重要意义，获得审稿人、国际同行的广泛认可与报道。核探测与核电子学国家重点实验室在这项工作中起核心作用。

希格斯玻色子在描述微观世界的标准模型中扮演着举足轻重的地位，基本粒子与希格斯场发生相互作用而获得质量。2012 年在 ATLAS 和 CMS 实验上的发现打开了希格斯物理之门。深入研究希格斯机制可以通过直接测量希格斯产生与衰变过程，也可以通过测量涉及希格斯粒子的电弱物理过程，如双玻色子散射。ZZ 双玻色子散射是其中最为稀有的过程，发现该过程对精确检验标准模型以及间接寻找新物理现象有重要意义，并标志着双玻色子散射研究进入了新阶段。

中国科大与山东大学，上海交通大学/李政道研究所，以及美国密歇根大学合作，在此次发现中扮演了核心角色。其中，核探测与核电子学国家重点实验室吴雨生教授与山东大学李冰研究员（科大本科 06 级）担任该物理分析的负责人，以及合作组文章通讯作者。在该工作中做出主要贡献的核探测与核电子学国家重点实验室博士生有陈婧（现上交博后），刘明依，王文晓，祝鹤龄，以及指导教师赵政国院士，刘建北教授。在该工作中，研究团队利用机器学习大幅优化信号探测灵敏度，细致验证背景过程模拟准确度，积极应用最前沿理论计算，并利用统计方法结合不同衰变道，最终首次发现 ZZ 双玻色子散射过程。图一展示了该过程的一个代表性事例在探测器中的重建结果，图二给出信号区域与控制区域中信号与本底过程的分布。

核探测与核电子学国家重点实验室 ATLAS 实验组是赵政国院士领导下的一支具有相当规模和凝聚力的稳定团队，目前包括 11 名教授、副教授，2 名特任副研究员，3 名博士后，近 30 名博士和硕士研究生。核探测与核电子学国家

重点实验室组成员负责或参与探测器建造、运行维护及性能研究、触发优化、末态重建性能的标定，和广泛的物理研究。在标准模型的精确检验和测量、希格斯粒子的发现和性质研究，以及超出标准模型的新物理的直接寻找的物理研究中，取得了多个以核探测与核电子学国家重点实验室组为主导并得到 ATLAS 国际合作组高度评价的重要物理结果。



参考:

[1] Observation of electroweak production of two jets and a Z-boson pair, Nature Physics 19, 237–253 (2023), <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01757-y>

[*] 粒子物理实验寻找信号过程的正面结果以对应的统计显著度来表征:

5 表明实验数据以 99.99997%的概率排除信号来自背景噪声涨落的假设。

5 应于“发现了信号过程”。

7. 中国科大发现红色类星体驱动外流产生成对的超级气泡

由中国科学技术大学天文学系刘桂琳教授、何志成特任教授、沈璐博士牵头的中美德三国科研人员组成的国际团队，首次观测到红色类星体驱动外流所产生的成对的超级气泡，这些巨大的气泡正处于从星系爆发性逸出的阶段。该成果于2023年7月13日在线发表于《科学·进展》（Science Advances）。

当今星系演化理论的一项重要困难，是大质量星系的实际数量显著低于理论预期，因而需要设定某种机制有效抑制新恒星的形成，从而调节星系的生长。理论研究发现，如果星系在其活跃的“类星体”阶段驱动大量气体外流到宇宙空间，理论和观测可趋于一致，这使得外流机制作为星系演化模型中不可或缺的环节。但由于实测难度大，外流长期停留在理论假设层面，直接观测证据非常有限。

该团队长期致力于实测活动星系外流，曾于2013年使用位于美国夏威夷的北双子座天文台8米望远镜取得突破，发现中红移高光度类星体普遍存在近球形外流的直接证据，美国天文学会在官方文件中称他们“首次证明活动星系核的反馈发生在3万光年尺度上”，被国际同行列为该领域近年取得显著进展的代表性成果，产生了广泛国际影响。然而，传统的类星体筛选方式会遗漏富含尘埃、光学波段暗弱的红色类星体，它们作为宇宙中事实上最明亮的类星体，恰恰很有可能驱动强劲的外流。



图1. 由美、英、加、澳等七国共建的国际双子座天文台拥有两台分别位于南北半球的8米望远镜，图示为银河之下位于美国夏威夷的北双子座望远镜。来源：International Gemini observatory / NOIRLab / NSF / AURA / P. Horálek (Institute of Physics in Opava)

有鉴于此，该团队利用北双子星望远镜弥补了针对红色类星体的观测，发现目标样本中半数均有显著外流特征（此次发表了其中三个）。这些外流并非此前看到的准球形，而呈现为壮观的、成对的巨大超级气泡，最大的一对延伸超过 6 万光年，最高视向速度差达到 1200 千米/秒（极可能脱离星系引力势阱）。这些气泡对是类星体所驱动的外流冲击星系环境中的气体产生，它们正处于从星系高密度环境中“爆发性逃逸（break-out）”的短暂阶段，在快速膨胀同时猛然冲向星系外围的空间。

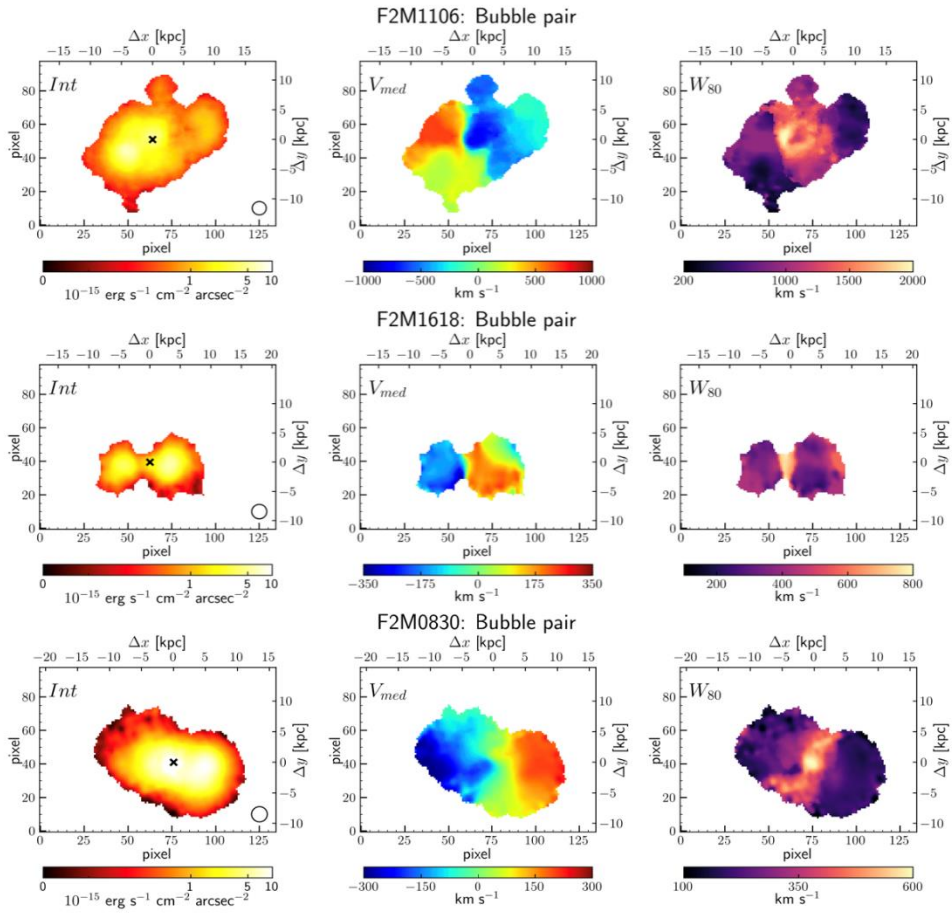


图 2. 三个红色类星体的超级气泡对，从左至右的三列依次为表面亮度、视向速度和速度弥散的分布图。它们延伸达数万光年，正处于从星系高密度环境中“爆发性逃逸”的短暂阶段，在快速膨胀同时猛然冲向星系外围的空间。

成对超级气泡的系统发现对于外流研究有独特价值：1）难以可靠地证认外流，是观测研究的常见关键性困难，比如外流速度常因投影效应而被严重低估而导致存疑，以及仅凭视向速度场等观测信息甚至难以区分外流和内流等等；相比之下，超级气泡对的存在是相当可靠的外流证据。2）理论研究认为，外流与星

系环境气体间的作用会导致不同的观测形态；由于形成气泡会对星系环境参数提出特定要求，所以气泡提供了推算外流能量、评估外流对星系整体演化影响的独特机会。3) 我们所在的银河系也有一对超级气泡，它们与本课题之间的科学相关性，有助于深入理解星系演化历史上活跃时期的性质和行为。

超级气泡结构虽有一定数量偶然发现的先例，但在特定类型的星系中系统性发现，国际上尚无先例。该团队同时开展的数值模拟显示，产生超级气泡的外流气体，其能量足以对星系整体演化产生重要影响。论文发表后，其样本中的类星体 F2M1106 的外流气体形态和动力学得到美国 James Webb 空间望远镜最新观测的进一步确认 (Rupke et al. 2023, *ApJ Letters*, 953, 26)。至此，该团队持续十年的系列外流研究，首次运用积分视场光谱技术针对中红移高光度类星体（涵盖了 1 型、2 型和红色类星体）的系统普查得以完成。这一系列工作，有望对星系演化图像的完整构建产生深刻影响。

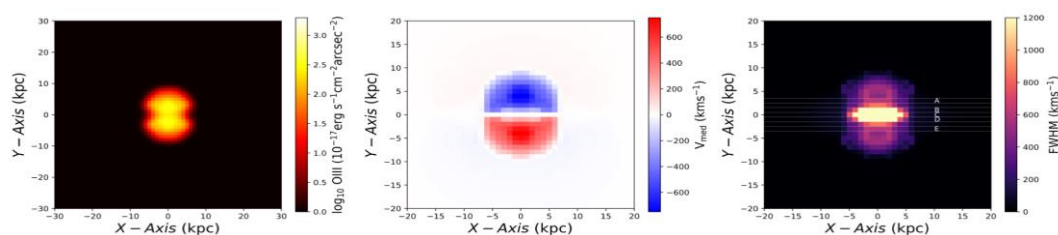


图 3.流体力学模拟成功再现了超级气泡对的形态和气体运动学特征。从左到右依次为模拟的表面亮度、视向速度和速度弥散分布图。

论文第一作者为中国科学技术大学特任副研究员沈璐，天文学系刘桂琳教授、何志成特任教授、约翰·霍普金斯大学 Nadia L.Zakamska 教授为共同通讯作者。本项研究得到中国巡天空间望远镜项目、国家自然科学基金、唐仲英基金、中科大重要方向项目培育基金、中科大青年创新重点基金等资助。

Shen, Lu ; Liu, Guilin ; He, Zhicheng ; Zakamska, Nadia L. ; Glikman, Eilat ; Greene, Jenny E. ; Hu, Weida ; Mou, Guobin ; Wylezalek, Dominika ; Rupke, David S. N.,
Discovery of spectacular quasar-driven superbubbles in red quasars,
Science Advances, 9, 28, eadg8287 (2023)
DOI: 10.1126/sciadv.adg8287

8. 在光场频域测量及调控方向取得重要进展

我院郭光灿院士团队在光场频域测量及调控方向取得重要进展，该团队董春华教授研究组通过微腔增强的光场与物质相互作用和光学非线性，实现了光场的频域调控，包括微腔频梳与频率转换；基于光场与物质相互作用物理过程的精密控制，实现了多波长同时测量的波长计，且波长计的测量精度提升到 kHz 量级。该成果的系列论文先后发表在《自然·通讯》和《物理评论快报》上。

由于光波的频率较高且光子间非线性较弱，因此实现光场的频域测量及调控一直是重要的科学问题。光学微腔是增强光与物质相互作用和光学非线性的有力工具，利用其品质因子高、模式体积小特性，可以有效增强微腔内的克尔效应和光力耦合，产生和调控微腔频率梳。

针对难以产生用于高精度频率计量的磁振子频率梳目这一难题，研究组通过磁力学相互作用在具有机械模式的谐振腔中实验产生了一个磁振子频率梳。此动力学过程由一个处于蓝失谐的外部强泵浦诱导产生，该泵浦使磁致伸缩效应导致的磁力学非线性相互作用显著增强。当泵浦功率足够强时，磁力非线性作用显著，在磁力系统中可以观察到级联四波混频，从而产生磁振子频率梳，频率间隔等于机械模式的谐振频率。

针对难以独立调控微腔光梳梳齿频率和重复频率这一难题，研究团队提出了一种新的物理机制实现了对于光频梳中心频率和重复频率的独立实时调控。通过引入两种不同的微腔色散调控手段，该团队能够对微腔不同阶次的色散进行独立控制，从而实现光频梳不同梳齿频率的全部控制。在实验中，该团队利用泵浦激光和辅助激光分别独立控制微腔不同阶次的空间模式实现了泵浦模式频率的自适应稳定和频梳重复频率的独立调控。基于该光频梳，研究团队演示了对于任意梳齿频率的快速、可编程的调控，并将其应用于波长的精密测量中，展示了具有 kHz 量级测量精度和多波长同时测量能力的波长计。

通过引入机械振子，还可实现光场的频率调控。研究团队将单个光力微腔中两个光学模式和两个机械模式通过光力相互作用构成闭环四模元格，通过控制光的相位实现规范场中几何相位，从而实现全光控制的非互易光

场频率转换。该频域调控可用于实现信息在混合网络中的单向传输，特别是在光学波分复用网络和用于连接不同频率下工作的分立量子系统。

系列研究得到了科技部重点研发计划、中国科学院、国家自然科学基金委的支持。

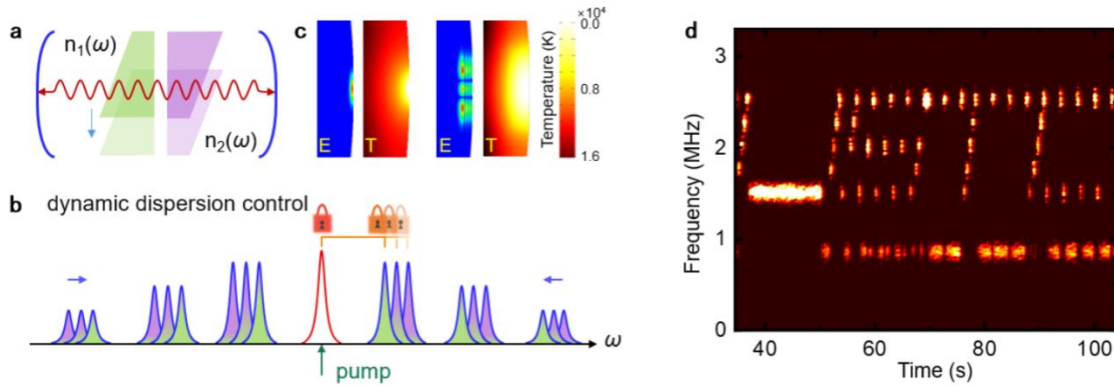


图 11 微腔频梳与光学频率测量

Rui Niu, Ming Li, Shuai Wan, Yu Robert Sun, Shui-Ming Hu, Chang-Ling Zou, Guang-Can Guo & Chun-Hua Dong

kHz-precision wavemeter based on reconfigurable microsoliton

Nature Communications volume 14, Article number: 169 (2023)

DOI: 10.1038/s41467-022-35728-x

Guan-Ting Xu, Mai Zhang, Yu Wang, Zhen Shen, Guang-Can Guo, and Chun-Hua Dong

Magnonic Frequency Comb in the Magnomechanical Resonator

Phys. Rev. Lett. 131, 243601 (2023)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.243601

Zhen Shen, Yan-Lei Zhang, Yuan Chen, Yun-Feng Xiao, Chang-Ling Zou, Guang-Can Guo, and Chun-Hua Dong

Nonreciprocal Frequency Conversion and Mode Routing in a Microresonator

Phys. Rev. Lett. 130, 013601 (2023)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.013601

9. 中国科学院微观磁共振重点实验室利用固态自旋量子传感器在微观尺度探索新奇自旋相互作用

中国科学院微观磁共振重点实验室杜江峰院士团队利用金刚石中氮-空位色心作为固态自旋量子传感器,在微观尺度对于一系列新奇自旋相互作用展开实验搜寻并给出新的实验限定。相关研究成果分别发表在《国家科学评论》[National Science Review 10, nwac262(2023)]、《物理评论快报》[Phys. Rev. Lett. 131, 071801(2023)]和《美国国家科学院院刊》[Proc. Natl. Acad. Sci. 120, e2302145120 (2023)]。

探索超越标准模型的新物理现象能够有助于解答一些不能用标准模型解释的基本问题,例如强 CP 疑难以及暗物质与暗能量的物理本质。近年来对一些新玻色子诱导的新奇自旋相互作用进行实验搜寻成为研究重点。2018 年团队在国际上原创提出将金刚石氮-空位(NV)色心的单电子自旋构筑为量子传感器,可用于搜寻电子与核之间的新奇自旋相互作用,并成功将实验搜寻的力程拓展到亚微米尺度[Nature Communications 9, 739(2018)]。随后对一系列自旋相互作用在微观尺度实现了高精度的实验搜寻[Physical Review Letters 121, 80402(2018), Physical Review Letters 127, 010501(2021)]。为了进一步提升搜寻能力,团队向两个方向推进: 1、发展更高灵敏度的传感器,用于实现更高精度的实验检验; 2、发展新形态的传感器,打开更短力程的探测窗口。

为了实现更高灵敏度的传感器,团队实现高品质金刚石 NV 系综电子自旋生长工艺,将单自旋探测器升级为系综自旋传感器,使得更多 NV 色心能够被同时用于测量,极大提升了探测精度,从而实现对一系列新奇自旋相互作用的实验搜寻[National Science Review 10, nwac262 (2023), Phys. Rev. Lett. 131, 071801 (2023)]。另一方面,团队充分利用单 NV 色心作为原子尺度传感器的优势,结合微机电技术和硅基纳米工艺,实现可扩展的自旋-力学量子芯片。实验表明该芯片在力程小于 100 纳米处将观测约束提升 2 个数量级[PNAS 120, e2302145120 (2023)]。这些成果展示了利用金刚石 NV 色心自旋量子传感器来研究各种超出标准模型的

新物理有独特优势，有望激发宇宙学、天体物理和高能物理等多个基础科学的广泛兴趣。

上述工作得到了中国科学院、科技部、安徽省和国家自然科学基金委等资助。

New constraints on exotic spin-dependent interactions with an ensemble-NV-diamond magnetometer

Hang Liang, Man Jiao, Yue Huang, Pei Yu, Xiangyu Ye, Ya Wang, Yijin Xie, Yi-Fu Cai, Xing Rong and Jiangfeng Du

National Science Review 10, nwac 262 (2023)

Improved Limits on an Exotic Spin-and Velocity-Dependent Interaction at the Micrometer Scale with an Ensemble-NV-Diamond Magnetometer

Diguang Wu, Hang Liang, Man Jiao, Yi-Fu Cai, Chang-Kui Duan, Ya Wang, Xing Rong, and Jiangfeng Du

Phys. Rev. Lett. 131, 071801 (2023)

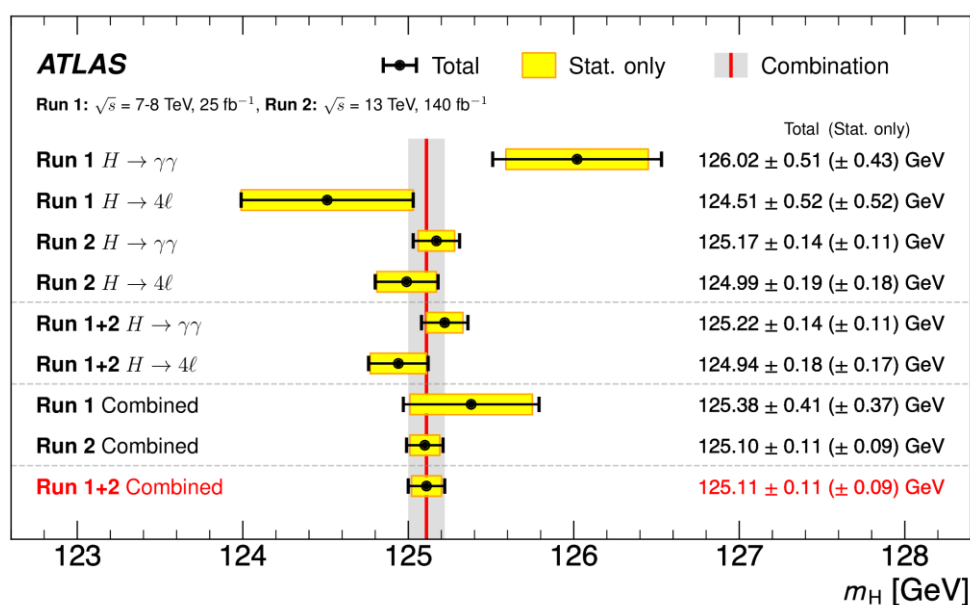
A spin-mechanical quantum chip for exploring exotic interactions

Longhao Wu, Shao chun Lin, Xi Kong, Mengqi Wang, Jingwei Zhou, Chang-Kui Duan, Pu Huang, Liang Zhang and Jiangfeng Du

Proc. Natl. Acad. Sci. 120, e2302145120 (2023)

10. 核探测与核电子学国家重点实验室 ATLAS 组在希格斯质量精确测量中取得重要进展

核探测与核电子学国家重点实验室赵政国、杨洪洮课题组与英国牛津大学、意大利国家核物理研究所等单位合作，在ATLAS国际合作组中发挥重要作用，完成了迄今为止希格斯玻色子质量最为精确的测量，精度达到万分之九（图1）。该研究成果于2023年12月21日在《物理评论快报》发表（Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 251802）并被选为编辑推荐（Editors' Suggestion）。



希格斯玻色子在描述微观世界的标准模型中有着举足轻重的地位。基本粒子通过与希格斯场相互作用而获得质量。希格斯玻色子的质量是标准模型中的自由参数，必须由实验测定。明确希格斯玻色子质量后，标准模型方可准确预测出希格斯玻色子的其他性质，并与实验结果进行对比。因此不论是对于理论还是实验研究，精确的希格斯玻色子的质量测量都是不可或缺的关键步骤。此外，希格斯玻色子的质量大小也与希格斯势场的性质密切相关，对理解电弱真空稳定性等重大科学问题具有重要意义。课题组研究生张阳帆独立完成了联合测量结果，并代表分析团队向全体ATLAS合作组在合作组周会（ATLAS weekly）上报告测量结果。此外，杨洪洮特任教授担任ATLAS实验希格斯玻色子到光子工作组负责人（convener），领导工作组完成了输入测量中最精确的双光子道（ $H \rightarrow \gamma\gamma$ ）的测量工作（Phys. Lett. B 847 (2023) 138315）。

ATLAS实验是基于欧洲核子中心（CERN）大型强子对撞机（LHC）的大型国际合作组，由来自40多个国家与地区的180余所单位组成，科学作者3000余人。核探测与核电子学国家重点实验室ATLAS实验组是赵政国院士领导下的一支具有相当规模和凝聚力的稳定团队，目前包括11名教授副教授，2名特任副研究员，3名博士后，近30名博士和硕士研究生。核探测与核电子学国家重点实验室组成员负责或参与探测器建造、运行维护及性能研究、触发优化、末态重建性能的标定，和广泛的物理研究。在希格斯粒子的发现和性质研究，标准模型的精确检验和测量，以及超出标准模型的新物理的直接寻找的物理研究中取得了多个以核探测与核电子学国家重点实验室组为主导并得到ATLAS国际合作组高度评价的重要物理结果。

相关链接：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.251802>

ATLAS Collaboration, Combined Measurement of the Higgs Boson Mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ Decay Channels with the ATLAS Detector Using $\sqrt{s} = 7, 8, \text{ and } 13 \text{ TeV}$ pp Collision Data, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 251802