

《物理学报》创刊 90 周年

量子信息科技的发展现状与展望

潘建伟^{1)2)†}

1) (中国科学技术大学, 合肥微尺度物质科学国家研究中心, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学, 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院, 合肥 230026)

(2023 年 11 月 13 日收到; 2023 年 12 月 19 日收到修改稿)

20 世纪初, 以原子能、半导体、激光、核磁共振、超导和全球卫星定位系统等重大技术发明为标志性成果的第一次量子革命, 促进了物质文明的巨大进步, 从根本上改变了人类的生活方式和面貌. 自 20 世纪 90 年代以来, 量子调控技术的巨大进步, 使得以量子信息科学为代表的量子科技突飞猛进, 标志着第二次量子革命的兴起. 量子信息科技包括量子通信、量子计算、量子精密测量等方面, 为保障信息传输安全、提高运算速度、提升测量精度等提供了革命性解决方案, 可为国家安全和国民经济高质量发展提供关键支撑. 经过近 30 年的发展, 我国在量子信息科技领域整体上已经实现了从跟踪、并跑到部分领跑的飞跃, 在量子通信的研究和应用方面处于国际领先地位; 在量子计算方面牢固占据国际第一方阵; 在量子精密测量的多个方向进入国际领先或先进水平. 当前, 需要根据国家战略需求和国际竞争态势, 做好未来 5—10 年我国在量子信息领域的发展重点研判, 率先建立下一代安全、高效、自主、可控的信息技术体系.

关键词: 量子通信, 量子计算, 量子精密测量**PACS:** 03.67.-a, 03.67.Hk, 03.67.Lx, 42.50.Dv**DOI:** 10.7498/aps.73.20231795

1 引言

量子通信、量子计算和量子精密测量等是量子信息科技的三个主要研究方向.

量子通信包括量子密钥分发^[1-6]和量子隐形传态^[7-11]两种应用方式. 其中量子密钥分发是指利用量子态来加载信息, 通过一定的协议在遥远地点的通信双方共享密钥. 基于量子密钥分发的量子保密通信是迄今唯一原理上无条件安全的通信方式, 也是最先走向实用化和产业化的量子信息技术. 量子隐形传态利用量子纠缠来直接传输微观粒子的量子状态 (即量子信息), 而不用传输这个微观粒子本身. 量子隐形传态技术可以链接量子信息处理单元来构建量子网络, 同时也是构建远距离量子密钥分发所需的量子中继的关键环节. 因此, 国际学术界将量子密钥分发和量子隐形传态统称为量子通信.

量子通信的发展目标是构建全球范围的广域量子通信网络体系, 具体发展路线: 利用光纤构建城域量子通信网络、通过中继器链接邻近两个城市的城域量子通信网络、通过卫星平台的中转链接遥远区域之间的量子通信网络.

量子计算^[12-15]具有强大的并行计算和模拟能力, 一旦成功研制, 基于计算复杂度的经典信息安全体系将受到巨大冲击. 例如, 基于量子计算机的“Shor 算法”^[16], 能够轻易破解当前在公钥加密和电子商业中被广泛使用的非对称加密算法 RSA 算法; 而基于量子密钥分发的量子保密通信的安全性与计算复杂度无关, 即使是量子计算机也无法破解. 量子计算研究的核心任务是实现多量子比特的相干操纵. 如图 1 所示, 根据相干操纵量子比特的规模, 国际学术界设定了如下 3 个“里程碑”. 第 1 个是实现“量子计算优越性”, 即量子计算机对特定问题的计算能力超越经典超级计算机, 达到这一

† 通信作者. E-mail: pan@ustc.edu.cn

里程碑需要约 50 个量子比特的相干操纵. 第 2 个是实现专用量子模拟机, 应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题, 为特定领域提供初步算力服务. 达到这一里程碑需要实现千量子比特的相干操纵和高精度量子逻辑门, 是当前的主要研究任务. 第 3 个是在量子纠错的辅助下实现可编程通用量子计算机, 即相干操纵至少数百万个量子比特, 能在密码分析、新材料设计、气象预报、生物制药等方面发挥巨大作用. 由于技术上的难度, 国际学术界一般认为实现通用量子计算机仍需 10—15 年甚至更长时间.

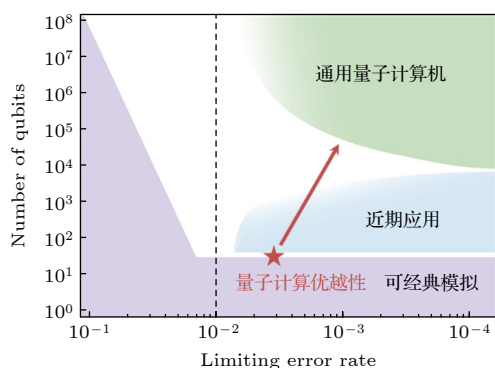


图 1 量子计算的 3 个发展阶段

Fig. 1. Three steps of achieving universal quantum computing.

利用量子资源和量子调控带来的量子计量给精密测量迎来了新的发展契机、新内涵、新原理新体系新方法与新技术, 有望实现如时间、电场、磁场、相位、重力、温度等物理量超越经典技术极限的量子精密测量, 同时也带来了量子操控和量子世界本身测量中许多崭新的问题. 正是由于量子调控与量子信息技术的发展, 2018 年第 26 届国际计量大会正式通过决议, 从 2019 年开始实施新的国际单位定义, 从实物计量标准转向量子计量标准, 这标志着精密测量开始进入量子时代.

2 我国量子信息科技的发展态势

经过近 30 年的努力, 我国量子信息科技领域整体上已经实现了从跟踪、并跑到部分领跑的飞跃. 具体而言, 我国在量子通信的研究与应用方面处于国际领先地位, 在量子计算方面牢固占据国际第一方阵, 在量子精密测量的多个方向进入国际领先或先进水平.

2.1 量子通信

我国的城域量子通信网络技术已初步满足实用化要求, 自主研制的量子通信装备已经为党的“十八大”、“十九大”、纪念抗战胜利 70 周年阅兵、北京冬奥会、杭州亚运会等国家重要活动提供了信息安全保障. 在城际量子通信网络方面, 我国建成了国际上首条远距离光纤量子保密通信骨干网“京沪干线”, 率先在金融、政务、电力等领域开展了远距离量子保密通信的技术验证与应用示范. 在此基础上, 我国全线贯通了总里程超过 10^4 km 的国家量子骨干网, 覆盖京津冀、长三角、粤港澳、成渝等重要区域, 将推动量子保密通信的规模化应用.

在卫星量子通信方面, 我国研制并成功发射了世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”, 在国际上率先实现了星地量子通信^[17], 充分验证了基于卫星平台实现全球化量子通信^[18–20]和开展物理学基本问题检验^[21]的可行性. 利用“墨子号”积累的成功经验, 我国研制并发射了世界首颗量子微纳卫星“济南一号”, 为构建低成本、实用化的量子星座奠定基础. 同时, 地面接收站的重量也已由十几吨降到 100 kg 左右, 可初步支持移动量子通信. 结合“墨子号”量子卫星与“京沪干线”, 我国率先构建了天地一体化广域量子保密通信网络的雏形^[22], 成为近年来国际量子信息研究的一大标志性事件.

2.2 量子计算

实现量子计算主要的物理系统包括光量子、超导量子线路、超冷原子、离子阱、固态自旋、硅基量子点以及拓扑态等. 这些系统各自具有优势和缺点, 需要全面考察各种物理体系, 发展规模化量子比特的操纵技术和超高精度容错量子逻辑门操纵技术. 目前, 构建量子计算机的技术路线尚未收敛, 对各种有望实现可扩展量子计算的物理体系, 中国、美国和欧盟均已具有完整布局. 根据各物理体系的优势, 国际学术界一般认为基于光量子、超导和超冷原子等体系有望率先实现实用化的专用量子模拟机.

在光量子体系, 我国构建了 76 光子的光量子计算原型机“九章”^[23], 在国际上首次在光量子体系实现“量子计算优越性”里程碑. 加拿大量子计算初创公司 Xanadu 实现了 219 个光子的量子计算原型机“北极星”^[24], 一度超越我国 113 光子的“九

章二号”^[25], 成为第 3 个在“高斯玻色取样”问题上实现“量子计算优越性”的量子计算处理器, 但随后又被 255 光子的“九章三号”^[26] 反超 (图 2 为“九章三号”局部展示). 基于“九章”系列光量子计算原型机平台, 我国学者已完成在快速求解图论有关问题方面的演示^[27], 为探索现阶段量子计算原型机的应用奠定了基础.



图 2 “九章”系列光量子计算原型机

Fig. 2. “Jiuzhang” series photonics quantum computing prototype.

在超导量子体系, 我国先后构建了 62 qubits 超导量子计算原型机“祖冲之号”^[28] 和 66 qubits 的“祖冲之二号”^[29] (图 3 为“祖冲之二号”量子电路展示). “祖冲之二号”对量子随机线路取样问题的处理速度比目前最快的超级计算机快 10^7 倍, 这使得我国首次在超导量子体系实现“量子计算优越性”. 值得指出的是, 根据 Pan 等^[30] 提出的张量网络算法, 经典计算机求解谷歌“悬铃木”超导量子计算原型机处理的随机线路采样任务预计仅需数十秒 (“悬铃木”需要 200 s), 该算法已在经典超算上得到验证, 因此谷歌基于“悬铃木”宣称的“量子计算优越性”已不成立. 而即便根据最新的经典算法, 无论是“九章”系列还是“祖冲之二号”, 仍然具备超越超级计算机的能力. 目前, 我国是唯一在两种物理体系都达到“量子计算优越性”里程碑的国家, 牢固确立了国际量子计算研究第一方阵的地位.

此外, 基于超导量子芯片, Zhang 等^[31] 首次实现了拓扑时间晶体的全数字化量子模拟; 基于超导量子计算芯片实现了 51 qubits 簇态纠缠态的制备^[32], 是目前规模最大的超导量子比特纠缠.

在超冷原子体系, 我国目前整体上与欧美发达国家并跑, 在规模化原子纠缠的制备与操纵^[33]、自旋轨道耦合^[34,35]、超冷分子反应^[36-38]、复杂物理问

题的量子模拟^[39-41] 等方面取得了系列重要成果, 并已开展了 Feshbach 共振费米气体研究^[42]、光晶格的相变和关联研究^[43,44]、自旋轨道角动量耦合研究^[45]、超冷原子自旋纠缠态和高分波 Feshbach 研究^[46]、费米气体的 Efimovian 膨胀和腔 QED 的相关研究^[42,47,48]、BEC 在动量空间光晶格的相关研究^[49] 等基础性研究工作, 为解决凝聚态物理、量子化学等领域中若干经典计算机难以处理的复杂问题奠定了基础.

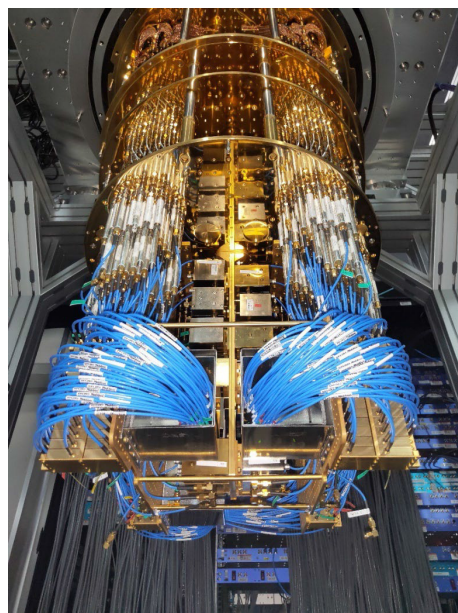


图 3 “祖冲之”系列超导量子计算原型机

Fig. 3. “Zuchongzhi” series superconducting quantum computing prototype.

在离子阱^[50-53]、硅基量子点、金刚石色心^[54,55] 等物理体系, 我国已在相关基本要素方面积累了大量关键技术. 此外, 由于拓扑量子计算理论上在容错能力方面的优越性, 基于拓扑体系实现通用量子计算机是国际上面向长远的重要研究目标. 当前国内外均在为实现单个拓扑量子比特这一“0 到 1”的突破而努力. 在这些体系, 整体上我国处于并跑或小幅落后的水平.

近年来, 随着量子计算的快速发展, 国际上普遍认为能够破解公钥密码体系的量子计算机的诞生时间可能会大幅提前. 为了应对量子计算机对现有密码体系可能带来的冲击, 主要发达国家已经开始布局未来的信息安全体系. 主要路径有两种: 一是抗量子计算的数学密码 (PQC), 二是抗量子计算的量子密码 (即量子保密通信). 值得注意的

是, PQC 本质上是基于计算复杂度的经典加密算法, 原理上仍然会被破解. 例如, 此前通过美国国家标准与技术研究院 (NIST) 多轮审查的 PQC 算法“彩虹”(Rainbow)^[56] 和 SIKE^[57] 先后被使用经典手段破解. 因此, PQC 仍然缺乏严格的安全性证明, 难以单独作为未来信息安全的屏障. 相比之下, 以量子密钥分发为基础的量子保密通信是迄今唯一的安全性得到严格证明的通信方式, 可大幅提升现有信息系统的安全性. 国际学术界的主流观点为通过结合抗量子计算的数学密码和量子保密通信, 共同构建抗量子计算密码体系.

2.3 量子精密测量

在时间频率标准方面, 我国研制的高精度光钟, 其稳定度和不确定度已进入 10^{-18} 量级^[58-60], 达到国际先进水平, 但性能指标仍然落后国际上最优水平 1—2 个数量级^[61-64]. 我国首次在国际上实现百公里级的自由空间高精度时间频率传递实验^[65], 时间传递稳定度达到飞秒量级, 频率传递万秒稳定度优于 4×10^{-19} , 达到国际最优水平 (图 4 为实验装置示意图); 在量子导航方面, 我国研制成功的原子自旋陀螺原理样机^[66,67], 指标与国外公开报道的最高指标相当; 可移动原子重力仪精度已接近国际一流水平, 小型移动式冷原子重力仪达到了目前国

际上野外连续重力观测的最好水平^[68-70].

在单量子灵敏探测方向, 我国研究人员在磁场探测^[71,72]、量子激光雷达^[73,74]、痕量原子示踪^[75]、单分子表征^[76] 等若干方向上达到国际领先或先进水平.

3 激烈的国际竞争态势

鉴于量子信息科技重要的科学意义和巨大的应用价值, 欧美发达国家的政府、科研机构 and 产业资本正在不断完善战略部署, 稳步增加研发投入.

1) 政府发挥主导和引领作用. 2018 年 12 月, 美国启动了为期 10 年的“国家量子行动法案”(NQI)^[77], 2019—2022 年间已投入近 30 亿美元, 2023 年的预算请求为 8.44 亿美元, 远超 NQI 法案最初计划的 5 年 13 亿美元. 2022 年 8 月, 美国总统拜登签署了《2022 年芯片和科学法案》^[78], 为多个量子信息相关项目拨款近 8 亿美元.

2018 年 10 月, 欧盟正式实施“量子技术旗舰项目”^[79], 连同各成员国的配套, 总经费超过 40 亿欧元; 2021 年, 欧盟提出天基安全连接计划^[80], 计划将卫星星座和欧洲量子通信基础设施集成, 以借助量子加密技术为欧洲政府和军事组织提供安全通信, 预估经费总额为 60 亿欧元; 2023 年, 德国

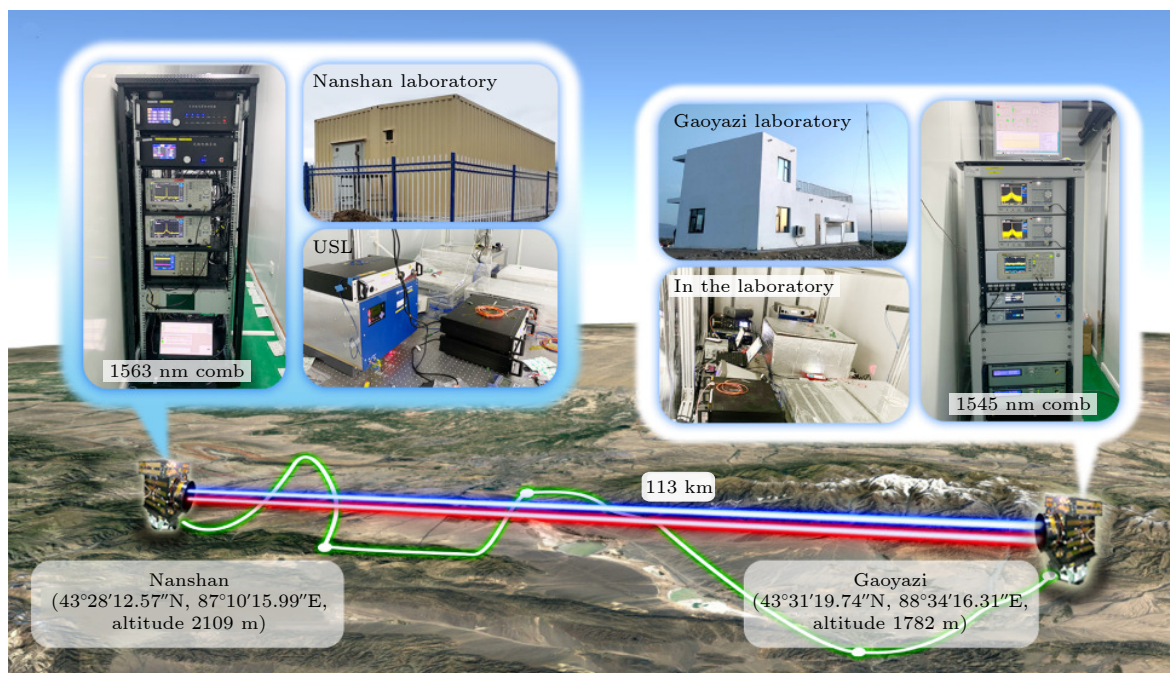


图 4 我国在国际上首次实现百公里级自由空间时间频率传递^[65]

Fig. 4. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km^[65].

政府通过“量子技术行动计划”^[81], 将在 2023—2026 年期间投入约 30 亿欧元. 2021 年 1 月, 法国启动量子技术国家行动计划^[82], 5 年将投资 18 亿欧元. 2023 年 3 月, 英国发布《国家量子战略》^[83], 将在 2024—2034 年间提供 25 亿英镑的政府投资, 并吸引至少 10 亿英镑的额外私人投资.

2) 大型高科技企业积极投入. 2019 年 10 月, 谷歌率先宣布在超导量子体系达到了“量子计算优越性”里程碑^[84]. 此后, 谷歌仅在超导量子计算单一方向就追加 10 亿美元投入, 实验室每年的运行经费约 6000 万美元. 2022 年 10 月, IBM 宣布未来十年将投资 200 亿美元加强半导体、量子计算等的研发和制造. 2023 年 5 月, IBM、谷歌承诺将为芝加哥大学和东京大学提供 1.5 亿美元, 支持两所大学的量子计算研究工作.

3) 扩大对我国的禁运范围. 美国政府自 2017 年起禁止出口量子密码技术和器件, 2018 年起管制量子信息和传感技术出口. 受美国影响, 一些其他北约国家也开始对我国禁运. 2021 年底, 美国将我国部分量子信息研究机构及企业列入“实体清单”, 进一步加强禁运. 2023 年颁布对外投资限制行政令, 并着力打造以美英法德日为首的十二国量子技术利益集团, 通过成立量子技术国际协会等形式, 试图建立排除我国的量子技术相关全球市场和供应链, 意在将我国孤立国际量子科技创新圈之外.

4 下一步量子信息科技创新发展的重点

根据国家战略需求和国际竞争态势, 未来 5—10 年我国在量子信息领域的发展重点如下.

1) 量子通信领域. 构建完整的空地一体广域量子通信网络技术体系, 开展量子通信安全攻防、量子通信专网应用等研究, 进行量子通信系统的安全测评与认证, 完成涵盖器件、系统、网络、安全等层面的量子通信标准体系的构建. 与此同时, 开展自主抗量子计算的数学密码 (PQC) 体系的研究, 推动 PQC 和量子密钥分发、量子随机数发生器的创新融合、优势互补和安全测评, 推动形成下一代抗量子计算的密码体系. 在此基础上, 实现量子通信网络和经典通信网络的无缝衔接, 推进量子通信技术在政务、金融和能源等领域的规模化应用, 支

撑自主可控的国家信息安全生态系统建设.

2) 量子计算领域. 除了各体系相干操纵量子比特规模的提升外, 量子纠错技术是目前研究的一大重点和难点. 2021 年底, 我国团队已经基于“祖冲之二号”处理器实现了表面码的重复纠错实验, 这是朝向容错计算的重要一步^[85]. 此外, 我国在基于玻色码的纠错方案方面也取得重要进展^[86]. 下一步, 将基于可扩展的量子纠错方案, 构建高保真度逻辑比特, 实现高保真度逻辑门操控, 在此基础上实现容错量子计算. 在专用量子模拟机研制方面, 在光量子、超导、离子、超冷原子等物理体系中, 高精度地将量子计算系统扩展至上千比特, 应用于解决若干具有重要价值、经典计算机无法胜任的计算难题, 包括高温超导机制、量子化学反应动力学等复杂物理问题研究. 同时, 在带噪声的中等规模量子处理器上探索将量子计算应用于机器学习等领域. 利用在专用量子计算与模拟机的研制过程中发展起来的相关技术, 提高量子比特的操纵精度使之超越量子计算的容错阈值 ($>99\%$), 实现容错量子逻辑门, 最终突破量子比特大规模集成关键技术, 研制可编程的通用量子计算原型机.

3) 量子精密测量领域. 力争进入国际先进水平行列, 突破与导航、环境监测、医学检验、科学研究等领域密切相关的一系列量子精密测量关键技术, 研制一批重要的量子精密测量设备. 尤其是时间频率标准方面, 建设空地时频传递地面终端, 开展高精度星地时频比对、卫星共视千公里级双站时频比对等实验, 形成广域光频标比对网络, 支撑未来国际计量单位“秒”定义变更, 为未来引力波探测、暗物质探测等物理学基本原理检验奠定基础.

4) 持续增强自主可控能力. 在国家科技主管部门和地方政府的支持下, 以量子信息领域国家战略任务为牵引, 统筹组织国内优势高校、研究机构、企业、用户部门, 汇聚各方资源开展量子科技创新和产业发展亟需的关键材料、核心器件与高端设备自主研发, 保障国家重大科技任务的实施, 确保产业链供应链关键环节自主可控, 形成具有国际竞争力的科技仪器产业典范; 依托全国性量子科技产学研创新联盟, 打造自主研发协同攻关共同体, 搭建政产学研用金协同创新、优势互补的合作平台, 推动创新链、产业链、资金链、人才链深度融合、协调发展, 构筑自主可控、可持续发展的量子科技创新和产业生态体系.

5 结 论

以量子信息为主导的第二次量子革命正在向我们走近,它给了我国一个从经典信息技术时代的跟随者和模仿者转变为未来信息技术引领者的历史机遇.在国际上率先掌握能够形成先发优势、引领未来发展的颠覆性技术,率先建立下一代安全、高效、自主、可控的信息技术体系,推动我国的信息技术和产业核心竞争力实现跨越式提升,是我国量子科技领域的重要使命.

参考文献

- [1] Bennett C H, Brassard G 1984 *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing* Bangalore, India, December 4, 1984 pp175–179
- [2] Ekert A K 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 661
- [3] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [4] Scarani V, Bechmann-Pasquinucci H, Cerf N J, Dušek M, Lütkenhaus N, Peev M 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1301
- [5] Gisin N 2015 *Front. Phys.* **10** 100307
- [6] Pirandola S, Andersen U L, Banchi L, et al. 2020 *Adv. Opt. Photonics* **12** 1012
- [7] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, Jozsa R, Peres A, Wotters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [8] D Bouwmeester, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [9] Boschi D, Branca S, De Martini F, Hardy L, Popescu S 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1121
- [10] Zukowski M, Zeilinger A, Horne M A, Ekert A K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 4287
- [11] Pan J W, Bouwmeester D, Weinfurter H, Zeilinger A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3891
- [12] Feynman R P 1982 *Int. J. Theor. Phys.* **21** 467
- [13] Benioff P 1980 *J. Stat. Phys.* **22** 563
- [14] Grover L K 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 325
- [15] Preskill J 2018 *Quantum* **2** 79
- [16] Shor P W 1999 *Siam Rev.* **41** 303
- [17] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. 2017 *Science* **356** 1140
- [18] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. 2017 *Nature* **549** 43
- [19] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. 2017 *Nature* **549** 70
- [20] Liao S K, Cai W Q, Handsteiner J, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 030501
- [21] Xu P, Ma Y Q, Ren J G, et al. 2019 *Science* **366** 132
- [22] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, et al. 2021 *Nature* **589** 214
- [23] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. 2020 *Science* **370** 1460
- [24] Madsen L S, Laudenbach F, Askarani M F, et al. 2022 *Nature* **606** 75
- [25] Zhong H S, Deng Y H, Qin J, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 180502
- [26] Deng Y H, Gu Y C, Liu H L, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 150601
- [27] Deng Y H, Gong S Q, Gu Y C, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 190601
- [28] Gong M, Wang S, Zha C, et al. 2021 *Science* **372** 948
- [29] Wu Y L, Bao W S, Cao S, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 180501
- [30] Pan F, Chen K, Zhang P 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 090502
- [31] Zhang X, Jiang W J, Deng J F, et al. 2022 *Nature* **607** 468
- [32] Cao S R, Wu B J, Chen F S, et al. 2023 *Nature* **619** 738
- [33] Yang B, Sun H, Huang C J, Wang H Y, Deng Y, Dai H N, Yuan Z S, Pan J W 2020 *Science* **369** 550
- [34] Wu Z, Zhang L, Sun W, Xu X T, Wang B Z, Ji S C, Deng Y, Chen S, Liu X J, Pan J W 2016 *Science* **354** 83
- [35] Wang Z Y, Cheng X C, Wang B Z, Zhang J Y, Lu Y H, Yi C R, Niu S, Deng Y, Liu X J, Chen S, Pan J W 2021 *Science* **372** 271
- [36] Yang H, Zhang D C, Liu L, Liu Y X, Nan J, Zhao B, Pan J W 2019 *Science* **363** 261
- [37] Yang H, Wang X Y, Su Z, Cao J, Zhang D C, Rui J, Zhao B, Bai C L, Pan J W 2022 *Nature* **602** 229
- [38] Yang H, Cao J, Su Z, Rui J, Zhao B, Pan J W 2022 *Science* **378** 1009
- [39] Yang B, Sun H, Ott R, Wang H Y, Zache T V, Halimeh J C, Yuan Z S, Hauke P, Pan J W 2020 *Nature* **587** 392
- [40] Zhou Z Y, Su G X, Halimeh J C, Ott R, Sun H, Hauke P, Yang B, Yuan Z S, Berges J, Pan J W 2022 *Science* **377** 311
- [41] Li X, Luo X, Wang S, Xie K, Liu X P, Hu H, Chen Y A, Yao X C, Pan J W 2022 *Science* **375** 528
- [42] Zhang X T, Chen Y, Wu Z M, Wang J, Fan J J, Deng S J, Wu H B 2021 *Science* **373** 1359
- [43] Huang Q, Yao R X, Liang L B, Wang S, Zheng Q P, Li D P, Xiong W, Zhou X J, Chen W L, Chen X Z, Hu J Z 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 200601
- [44] Jin S J, Zhang W J, Guo X X, Chen X Z, Zhou X J, Li X P 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 035301
- [45] Zhang D F, Gao T Y, Zou P, Kong L R, Li R Z, Shen X, Chen X L, Peng S G, Zhan M S, Pu H, Jiang K J 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 110402
- [46] Cui Y, Shen C Y, Deng M, Dong S, Chen C, Liti R, Gao B, Tey M K, You L 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 203402
- [47] Deng S J, Diao P P, Li F, Yu Q L, Yu S, Wu H B 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 125301
- [48] Deng S J, Shi Z Y, Diao P P, Yu Q L, Zhai H, Qi R, Wu H B 2016 *Science* **353** 371
- [49] Xie D Z, Deng T S, Xiao T, Gou W, Chen T, Yi W, Yan B 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 050502
- [50] Wang P, Luan C, Qiao M, Um M, Zhang J, Wang Y, Yuan X, Gu M, Zhang J, Kim K 2021 *Nat. Commun.* **12** 233
- [51] Mei Q X, Li B W, Wu Y K, Cai M L, Wang Y, Yao L, Zhou Z C, Duan L M 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 160504
- [52] Li B W, Mei Q X, Wu Y K, Cai M L, Wang Y, Yao L, Zhou Z C, Duan L M 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 140501
- [53] Yang H X, Ma J Y, Wu Y K, Wang Y, Cao M M, Guo W X, Huang Y Y, Feng L, Zhou Z C, Duan L M 2022 *Nat. Phys.* **18** 1058
- [54] Zhang Q, Guo Y H, Ji W T, Wang M Q, Yin J, Kong F, Lin Y H, Yin C M, Shi F Z, Wang Y, Du J F 2021 *Nat. Commun.* **12** 1529
- [55] Wang M Q, Sun H Y, Ye X Y, Yu P, Liu H Y, Zhou J W, Wang P F, Shi F Z, Wang Y, Du J F 2022 *Sci. Adv.* **8** eabn9573
- [56] Beullens W 2022 *Annual International Cryptology Conference Santa Barbara, CA, USA, August 15–18, 2022* p464
- [57] Castryck W, Decru T 2023 *42nd Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques* Lyon, France, April 23–27, 2023 pp423–447
- [58] Lu B K, Sun Z, Yang T, et al. 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39**

080601

- [59] Zhang A, Xiong Z X, Chen X T, Jiang Y Y, Wang J Q, Tian C C, Zhu Q, Wang B, Xiong D Z, He L X, Ma L S, Lü B L 2022 *Metrologia* **59** 065009
- [60] Lu X T, Guo F, Wang Y B, Xu Q F, Zhou C H, Xia J J, Wu W J, Chang H 2023 *Metrologia* **60** 015008
- [61] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, Sonderhouse L, Bothwell T, Goban A, Kedar D, Sanner C, Robinson J M, Marti G E, Matei D G, Legero T, Giunta M, Holzwarth R, Riehle F, Sterr U, Ye J 2019 *Nat. Photon.* **13** 714
- [62] Bothwell T, Kennedy C J, Aepli A, Kedar D, Robinson J M, Oelker E, Staron A, Ye J 2022 *Nature* **602** 420
- [63] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H, Katori H 2020 *Nat. Photon.* **14** 411
- [64] Ohmae N, Takamoto M, Takahashi Y, et al. 2021 *Advanced Quantum Technologies* **4** 2100015
- [65] Shen Q, Guan J Y, Ren J G, et al. 2022 *Nature* **610** 661
- [66] Fan W F, Quan W, Liu F, et al. 2019 *Chinese Phys. B* **28** 110701
- [67] Yang Y H, Chen D Y, Jin W, Quan W, Liu F, Fang J C 2019 *IEEE Access* **7** 148176
- [68] Xie H T, Chen B, Long J B, Xue C, Chen L K, Chen S 2020 *Chin. Phys. B* **29** 093701
- [69] Chen B, Long J B, Xie H T, Li C Y, Chen L K, Jiang B N, Chen S 2020 *Chin. Opt. Lett.* **18** 090201
- [70] Wu B, Zhou Y, Cheng B, Zhu D, Wang K N, Zhu X X, Chen P J, Weng K X, Yang Q H, Lin J H, Zhang K J, Wang H L, Lin Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 060302 (in Chinese) [吴彬, 周寅, 程冰, 朱栋, 王凯楠, 朱欣欣, 陈佩军, 翁堪兴, 杨秋海, 林佳宏, 张凯军, 王河林, 林强 2020 *物理学报* **69** 060302]
- [71] Xie T Y, Zhao Z Y, Kong X, Ma W C, Wang M Q, Ye X Y, Yu P, Yang Z P, Xu S Y, Wang P F, Wang Y, Shi F Z, Du J F 2021 *Sci. Adv.* **7** eabg9204
- [72] Wei K, Zhao T, Fang X J, Xu Z T, Liu C, Cao Q, Wickenbrock A, Hu Y H, Ji W, Fang J C, Budker D 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 063201
- [73] Li Z P, Ye J T, Huang X, Jiang P Y, Cao Y, Hong Y, Yu C, Zhang J, Zhang Q, Peng C Z, Xu F, Pan J W 2021 *Optica* **8** 344
- [74] Wang B, Zheng M Y, Han J J, Huang X, Xie X P, Xu F, Zhang Q, Pan J W 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 053602
- [75] Xia T Y, Sun W W, Ebser S, Jiang W, Yang G M, Zhu H M, Fu Y C, Huang F, Ming G D, Xia T, Lu Z T 2023 *Nat. Phys.* **19** 904
- [76] Xu J Y, Zhu X, Tan S J, Zhang Y, Li B, Tian Y Z, Shan H, Cui X F, Zhao A D, Dong Z C, Yang J L, Luo Y, Wang B, Hou J G 2021 *Science* **371** 818
- [77] H.R.6227–National Quantum Initiative Act, Smith L <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text> [2018-12-21]
- [78] H.R.4346–Chips and Science Act, Ryan T <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/4346> [2021-07-01]
- [79] Quantum Technologies Flagship, European Commission <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship> [2021-10-29]
- [80] Space-based Secure Connectivity Initiative, European Commission https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13189-EU-space-policy-space-based-secure-connectivity-initiative_en [2021-08-26]
- [81] Handlungskonzept Quantentechnologien, der Bundesregierung <https://qbn.world/wp-content/uploads/2023/04/Action-Plan-Quantum-Technologies-by-German-Government-2023-2026.pdf> [2023-04-26]
- [82] French Research at the Heart of the Quantum Plan, Felix S <https://news.cnr.fr/articles/french-research-at-the-heart-of-the-quantum-plan> [2021-02-17]
- [83] National Quantum Strategy, GOV. UK <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage> [2023-12-14]
- [84] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. 2019 *Nature* **574** 505
- [85] Zhao Y W, Ye Y S, Huang H L, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 030501
- [86] Ni Z C, Li S, Deng X W, Cai Y Y, Zhang L B, Wang W T, Yang Z B, Yu H F, Yan F, Liu S, Zou C L, Sun L Y, Zheng S B, Xu Y, Yu D P 2023 *Nature* **616** 56

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Quantum information technology: Current status and prospects

Pan Jian-Wei ¹⁾²⁾†

1) (*Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale and School of Physical Sciences,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 13 November 2023; revised manuscript received 19 December 2023)

Abstract

In the early decades of the 20th century, the inception of quantum mechanics catalyzed the first quantum revolution, resulting in groundbreaking technological advances, such as nuclear energy, semiconductors, lasers, nuclear magnetic resonance, superconductivity, and global satellite positioning systems. These innovations have promoted significant progress in material civilization, fundamentally changed the way of life and societal landscape of humanity. Since the 1990s, quantum control technology has made significant strides forward, ushering in a rapid evolution of quantum technologies, notably exemplified by quantum information science. This encompasses domains such as quantum communication, quantum computing, and quantum precision measurement, offering paradigm-shifting solutions for enhancing information transmission security, accelerating computational speed, and elevating measurement precision. These advances hold the potential to provide crucial underpinning for national security and the high-quality development of the national economy. The swift progression of quantum information technology heralds the advent of the second quantum revolution. Following nearly three decades of concerted efforts, China's quantum information technology field as a whole has achieved a leap. Specifically, China presently assumes a prominent international role in both the research and practical application of quantum communication, leading the global domain in quantum computing, and achieving international preeminence or advanced standing across various facets of quantum precision measurement. Presently, it is imperative to conduct a comprehensive assessment of the developmental priorities in the realm of quantum information in China for the forthcoming 5 to 10 years, in alignment with national strategic priorities and the evolving landscape of international competition. This will enable the proactive establishment of next-generation information technology systems that are secure, efficient, autonomous, and controllable.

Keywords: quantum communication, quantum computing, quantum precision measurement

PACS: 03.67.-a, 03.67.Hk, 03.67.Lx, 42.50.Dv

DOI: [10.7498/aps.73.20231795](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231795)

† Corresponding author. E-mail: pan@ustc.edu.cn

量子信息科技的发展现状与展望

潘建伟

Quantum information technology: Current status and prospects

Pan Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 010301 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231795

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231795>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于线性与非线性干涉仪的量子精密测量研究进展

Research progress in quantum precision measurements based on linear and nonlinear interferometers

物理学报. 2022, 71(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220425>

硅和锗量子计算材料研究进展

Research progress of silicon and germanium quantum computing materials

物理学报. 2021, 70(21): 217802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211492>

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

基于单光子双量子态的确定性安全量子通信

Deterministic secure quantum communication with double-encoded single photons

物理学报. 2022, 71(5): 050302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210907>

面向量子计算的拓扑超导材料、物理和器件研究

Research progress of material, physics, and device of topological superconductors for quantum computing

物理学报. 2022, 71(16): 160302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220596>

量子存储式量子计算机与无噪声光子回波

“Quantum memory” quantum computers and noiseless photon echoes

物理学报. 2022, 71(7): 070305 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212245>