核科技与量子科技领域交叉融合的实践与战略思考

陈双凯，杜静玲，徐利军，喻　宏，伍险峰
（中国原子能科学研究院，北京　102413）

摘　要：量子科技是全球研发的热点前沿领域，是颠覆性技术之一。核科技属于战略高科技领域，它是基于微观原子核体系发展起来的，满足量子力学规律，是应用量子科技最佳的场所之一。系统梳理了国内外量子科技政策，并充分调研了国内外核科技与量子科技交叉融合的现状，从量子计算、量子测量和量子通信与核科技交叉融合 3 个角度为中国核科技创新发展提出了参考性建议。

关键词：学科交叉；核科技；量子科技
中图分类号：O413；TN918；TL361　**文献标识码**：A　DOI：10.3772/j.issn.1009-8623.2023.11-12.002

核科技属于战略性的高科技领域，其是维护国家安全的关键基础，也是国家能源安全的重要保障，它是基于原子核的微观体系发展起来的，研究内容主要包括原子核辐射、衰变与核反应等，满足量子力学规律，是应用量子科技最佳的场所。

量子科技是以量子计算、量子通信、量子测量和量子材料为代表的新兴技术，该技术将突破经典信息技术极限，拓展未来科学技术新疆域，推动信息技术和数字经济发展演进[1−2]。量子计算以量子比特作为信息编码和存储的基本单元，利用量子叠加和纠缠等原理实现量子通信。量子通信利用量子叠加态或纠缠效应，在经典通信辅助下进行量子态信息传输或密钥分发。量子测量与传统的核领域测量属于同一个范畴，目前所谓的量子测量多指在经典测量领域引入微观量子效应的测量，用于测量的量子传感器是以量子力学为指导、以量子系统为传感介质，利用量子效应设计的传感器件。量子材料是指由于其自身电子的量子力学特性而产生特殊物理特性的材料。

各国逐步将量子科技上升为国家战略，量子科技所具有的重大科学意义和战略价值已逐步展现，其中主要的发展方向是学科交叉融合发展。当前，量子科技已实现与材料、医学和信息科学等众多学科交叉融合，产生了巨大的社会经济效应[3−5]。以美国为首的发达国家正在积极布局量子科技与核科技领域的交叉融合。为抢占核科技与量子科技交叉融合国际竞争制高点，推动中国核科技创新发展，亟须研究国外相关政策，精准识别并把握量子科技与核科技融合的创新趋势，构筑中国量子核科技发展新优势。

1　国内外量子科技政策

量子科技是全球科技竞争的新焦点和新高地，各国纷纷制定中长期发展规划和战略部署，加大投入力度，推动关键技术攻关和产业化应用。国外量子科技发展主要集中在美国、欧盟、法国、日本、俄罗斯和印度等。

美国发布《国家量子倡议法案》等多项政策文件[6−7]，构建量子科技领先优势，成立国家量子协调办公室和国家量子计划咨询委员会，推动建立一批由国家实验室牵头的量子科技研发机构，集聚各方优势力量加快推进协同攻关。

第一作者简介：陈双凯（1993—），男，博士，助理研究员，主要研究方向为战略研究。
通信作者简介：喻宏（1973—），男，博士，研究员，主要研究方向为核反应堆、战略研究。电子邮箱：yuhong@ciae.ac.cn
收稿日期：2023−08−11

欧盟实施“量子技术旗舰计划”，系统性地谋划了欧盟量子领域的发展方向[8]，将量子计算视为维护“技术主权”的核心领域之一，提出新的近中远期发展目标，围绕4个主要应用领域设定路线图。

法国谋划国家量子战略，法国国会于2020年提出制订量子技术国家战略计划的提案《量子：法国不会错过的技术转变》[9]，期望成为全球量子科技的领导者之一，在5年内筹集14亿欧元用于量子技术的投资，支持法国科研机构和企业承担欧盟“量子旗舰计划”，新建3个量子研究中心，在2024年之前，创建约50家量子初创公司等。

日本政府在推进量子科技方面发布了包括2020年发布的《量子技术创新战略》[10]等多项重要战略和计划。从人才、产业发展、国际合作和市场规范等方面为日本未来10～20年的量子科技发展做出了明确的计划和战略部署，联合日本企业共同提升日本国家量子技术竞争力。

俄罗斯将量子科技列为“数字经济国家项目”的重点发展领域之一[11]，计划在未来5年内投入10亿欧元推进四大领域的研发，批准了“俄罗斯联邦量子通信发展路线图”，规定了在2024年前计划实施的120余项措施和项目。

印度越来越重视量子科技发展，在这一领域的研发部署仍处在积极探索时期[9]，2018年启动了一个为期5年的量子技术研究项目。2019年资助“量子使能科学与技术”研究项目，发布了一份量子技术倡议，提出了一系列发展愿景。2020年宣布实施国家量子技术与应用任务，计划在5年内投入约11亿美元，主要投资领域包括量子计算、量子通信和量子密码学，并加强国际合作研究和人力资源开发，培育壮大初创企业等。

2013—2021年，中国共颁布10余项量子科技支持政策[12]，主要集中于支持量子通信、量子计算、量子测量和量子材料四大量子技术领域的发展，形成多项政策支持、重点技术聚焦的发展模式，将量子科技上升为国家战略。中国量子信息技术领域具备良好的研究与应用实践基础，总体发展态势良好，未来有望进一步取得更多技术研究、应用探索与产业培育的新成果。

各国量子科技政策目标各有侧重，规模与国力相匹配。美国和中国是量子科技领域的主要力量，投入资金和时间在全球范围内最多，在相应领域处于世界领先水平。日本和俄罗斯投入资金和时间较少，寻求在某些领域取得突破。欧盟、法国和印度则介于美国和中国以及日本和俄罗斯之间，投入资金相对充裕，期望成为全球量子科技的领导者之一。

本研究统计了国外近年来在量子信息领域的投资情况[2]（见图1）。而在核领域进行量子科技投资数据较全的机构主要是美国能源部（Department of Energy，DOE），从事量子科技研究的DOE核领域国家实验室主要包括桑迪亚国家实验室（SNL）、洛斯阿拉莫斯国家实验室（LANL）、美国太平洋西北国家实验室（PNNL）、美国橡树岭国家实验室（ORNL）、布鲁克海文国家实验室（BNL）、劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）、劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）、阿贡国家实验室（ANL）、费米国家加速器实验室（FERMI）和国家加速器实验室（SLAC），以上DOE核领域国

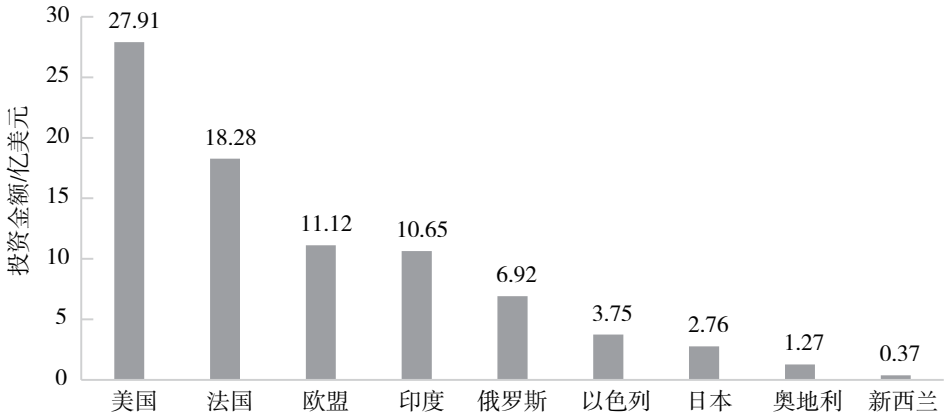

图1　2017—2021年国外各国在量子科技领域的投资情况

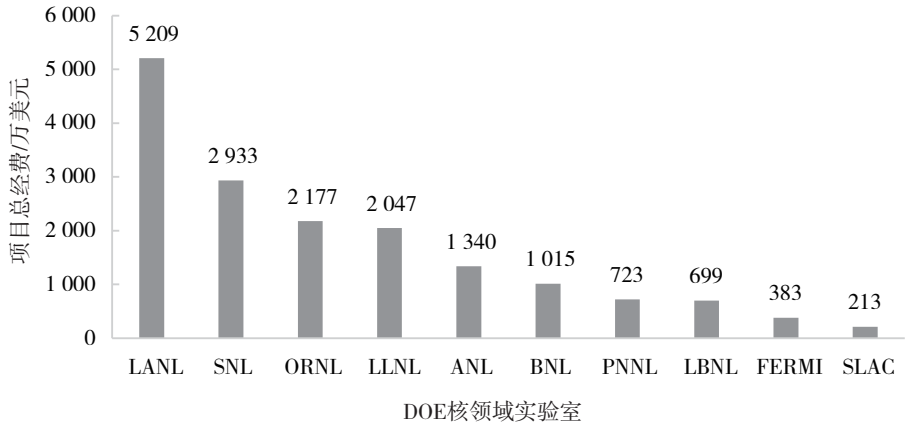

图 2　2017—2021 年 DOE 核领域国家实验室在量子科技领域的科研经费投入情况

家实验室在量子科技领域科研经费投入情况、科研项目申报数量和主要研究方向分布分别见图 2、表 1 和图 3，数据来自美国能源部 2017—2021 年美国能源部国家实验室自主研究开发活动（Laboratory Directed Research and Development，LDRD）①项目。

2　国内外核科技与量子科技的交叉融合现状

在核科技与量子科技交叉融合方面，美国、欧洲等发达国家和地区主要研究机构或组织已经做出了很多有益的探索，并已取得一些标志性成果，例如，欧洲核子中心的科学家利用量子计算进行了粒子物理学实验数据分析[13]。美国能源部依托其 11 个重点国家实验室（主要包括阿贡国家实验室、劳伦斯利弗莫尔国家实验室、费米国家加速器实验室、橡树岭国家实验室和桑迪亚国家实验室等），利用

表 1　2017—2021 年 DOE 核领域国家实验室的量子领域科研项目申报数量

从事量子科技研究的 DOE 核领域国家实验室	在量子领域科研项目申报数量
LANL	132
SNL	90
ANL	62
ORNL	51
BNL	47
LLNL	43
PNNL	31
FERMI	28
LBNL	28
SLAC	14

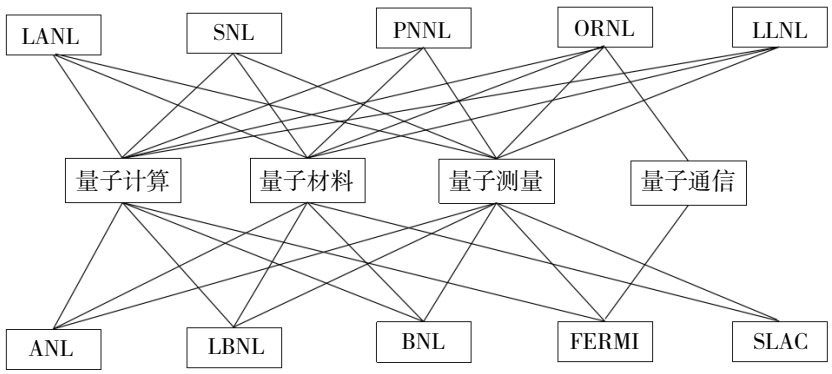

图 3　2017—2021 年 DOE 核领域国家实验室量子科技领域的主要研究方向分布

① LDRD 是能源部国家实验室普遍采用的一种科研项目组织形式，美国能源部允许其下辖国家实验室使用实验室总经费的 6% 进行自主选题项目的研发，LDRD 项目重点支持与美国能源部任务相关的前沿科技领域及新思想、新概念、新方法等。

量子计算推进聚变能和等离子体科学进步[14-15]、将量子传感与测量技术应用于基础物理和核安保领域[16-17]。此外，中国在核科技与量子科技交叉融合领域也取得了一定的研究进展，例如，中国科学技术大学与德国科学家合作开发出一种新型超灵敏量子精密测量技术以实现对暗物质试验的直接搜寻[18]；清华大学联合国内外大学研究所通过设计新的实验方案以测量超越标准模型的新型相互作用力的存在等[19]。这些目前国内外核科技与量子科技交叉融合的研究成果对于中国开展这方面相关工作（如政策制定和研发创新等）具有重要参考价值。

2.1 量子计算技术推进核物理基础研究

2.1.1 利用量子计算机更准确地理解核物理学基本理论

核物理被认为是亚原子尺度上的量子多体物理，其理论是用与物质耦合的量子规范场来描述的，其利用经典计算机模拟存在巨大的挑战，而量子计算为研究和理解核物理提供了一种具有变革性的方法。例如，在量子计算机上进行晶格规范理论的实时演化和基态模拟（Schwinger 模型）既验证了核物理可以在量子计算机上进行研究，又揭示了量子色动力学共有的一些重要特征[20]。利用量子计算机探索原子核的内部结构（包括计算原子核的结合能）以得到物质更精确的基本组成，利用量子计算研究原子核散射的时间演化问题和有限温度下的非平衡量子系统（如重离子碰撞或早期宇宙膨胀中产生的夸克－胶子等离子体）等[20]。量子计算机也可以帮助预测中子星中的超密度物质的行为或者质子在粒子碰撞过程中的分裂机理。这些应用都涉及描述亚原子粒子的量子波的相互作用[21]。

2.1.2 量子计算技术分析粒子物理学实验数据

量子机器学习（将量子算法整合到机器学习程序中）是一种几乎未经探索的新方法，该方法利用粒子相关性可以改进射流分类性能。2022 年 8 月，欧洲科学家结合量子算法与机器学习分析了质子与质子对撞数据[13]。大型强子对撞机（LHC）上底夸克探测器（LHCb）实验合作组“数据处理与分析”（DPA）项目团队首次展示了量子机器学习（QML）技术如何在大型强子对撞机上识别底夸克（b 夸克）引发射流的电荷。

2.1.3 利用量子计算推进聚变能和等离子体科学进步

美国能源部积极倡导利用量子计算技术推进核领域科学进步。2021 年 11 月，全栈量子计算公司 Rigetti Computing 成功获得由美国能源部资助的 310 万美元，用于聚变能源研究的量子模拟项目[14]。Rigetti Computing 将与劳伦斯利弗莫尔国家实验室和南加利福尼亚大学合作开展一个为期 3 年的项目，该项目将在 Rigetti Computing 的云量子计算机上模拟等离子体动力学，并进一步加深对等离子体物理学的科学理解。

美国阿贡国家实验室也将量子深度学习应用于核聚变反应堆中等离子体破坏活动的预测[15]。研究者结合了经典计算和量子计算的优势，探索了混合算法，而非纯量子算法，其中经典计算被用来优化量子门参数。

2.2 量子传感与测量技术用于基础核物理和核安保领域研究

2.2.1 探索新粒子或相互作用

物理学标准模型指出，自然界存在引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力 4 种基本相互作用力。然而，标准模型并不完美，例如，没有包含暗物质粒子。近几十年来，探索超越标准模型的新物理，包括寻找暗物质粒子，一直是基础物理研究领域的重要问题。在各种实验方案中，利用精密测量技术探测是否存在超越标准模型的新型相互作用力（也被称为“第五种力”）为发现新物理及寻找暗物质粒子提供了重要方法。

（1）探索暗物质。

美国能源部费米国家加速器实验室和芝加哥大学的科学家联合开发出一种基于量子位元超导设备的量子测量新技术，该技术将推动对暗物质的探索[16]。在这项技术中，量子位被设计用来探测暗物质粒子与电磁场相互作用时产生的光子，其对光子的探测灵敏度是传统量子测量基准的 36 倍，使暗物质的搜索速度加快了 1 000 倍。

在暗物质探测和量子传感与测量技术的交叉融合领域，中国也取得了研究成果。2021 年 11 月 18 日，中国科学技术大学彭新华教授研究组与德国科学家合作开发出一种新型超灵敏量子精密测量技术，实现了对暗物质实验的直接搜寻，首次突破国际公认最强的宇宙天文学界限，实验结果比先前

的国际最好水平提升至少 5 个数量级 [18]。

（2）寻找超越标准模型的新型相互作用力。

为解决标准模型自身存在的问题，物理学家预测可能存在“第五种力”，而微观粒子间自旋耦合的奇异力是“第五种力”的重要候选者。但这种相互作用极其微弱，只有提高测量精度才能验证其存在。随着量子测量技术的发展，这种测量成为可能。

2021 年 11 月 17 日，彭新华教授研究组利用超灵敏量子测量技术开展了“第五种力”的实验搜寻，获得了国际上最强的 Z’玻色子的约束界 [22]。

2023 年 3 月 28 日，清华大学物理系刘永椿研究组联合北京航空航天大学以及德国美因茨大学亥姆霍兹研究所为更好地测量“第五种力”的存在，提出了新的实验设计方案。虽然目前并未找到“第五种力”的信号，但实验结果为电子 – 质子自旋 – 速度相关的“第五种力”的耦合系数给出了新的限制 [19]。

2.2.2　量子传感技术在核安保领域的应用

（1）利用量子重力仪实现地下乏燃料桶的三维成像。

量子重力仪可以用于探测地下基础设施（如城市下方的管道）、采矿勘探和考古。在核安保领域，一项潜在的应用是对乏核燃料桶进行成像技术监控。

美国桑迪亚国家实验室目前已研发利用量子重力仪实现地下乏燃料桶的三维成像 [17]。测量质量异常的量子物理学依赖于原子波函数的叠加原理，该原理可用于创建原子干涉仪。这种原子干涉仪检测到局部重力场的微小变化，由此可以推断出质量异常。通过仔细测量原子干涉仪信号的相移，计算重力加速度差，然后可以将其与局部质量异常联系起来。

具体措施为将一个紧凑型量子重力仪放在机器人平台上，并在乏燃料储存库上方行驶，可以记录因乏燃料重金属而引起的质量异常的超灵敏测量值，以生成类似于射线照相图的图像。实际的干法储存桶会封装多个燃料组件，因此扰动将更大，更容易被检测到。测量结果可用于创建地下储存桶的三维图像，该三维图像可用于“计数”燃料组件。

（2）利用超导量热计精确解析钚光谱。

美国桑迪亚国家实验室开发了一种精确测量 $^{240}Pu/^{239}Pu$ 比值的新量子传感方法 [17]。这种方法利用超导跃迁边缘传感器（transition-edge sensor，TES），结合超导量子干涉器（Superconducting Quantum Interference Device，SQUID），分离 ^{240}Pu 和 ^{239}Pu 线。这种微量热计方法将含水钚样品包裹在金箔中，使液体蒸发，然后，利用 TES/SQUID 仪器，以微小的温升检测钚的辐射现象。这种新型微量热量计阵列能够比高纯锗（HPGe）探测器更好地解析钚光谱，目前该方法处在研发阶段，未来有望用于核安保任务。

（3）利用电磁量子传感器精确探测电磁辐射。

美国桑迪亚国家实验室研究了一种精确探测电磁辐射的量子传感方法，该方法对电磁场的微小变化具有极高的灵敏度 [17]。涉及电力或旋转机械的工业过程通常会发出电磁（EM）场，例如，六氟化铀（UF6）离心机级联可以在特定频率发射电磁场。这种电磁辐射以 $1/r^2$ 的速度衰减，其中 r 是与辐射源的距离，因此很难对这些辐射场进行远距离遥感。但电磁场的量子传感具有极高的灵敏度，可以实现更远距离的遥感。在核领域，这样一个超灵敏的电磁量子传感器将被用于检测微小的电磁场，以获取核燃料循环过程的相关信息 [17]。

2.3　量子通信技术在核信息安全领域的巨大优势

2.3.1　利用量子科技加强核领域信息安全水准

由于核领域的特殊性，其敏感信息较多，因此核领域信息安全与国家安全和利益息息相关。在核信息安全领域，核电站信息安全一直以来受到了广泛的关注。随着核电站数字化网络化程度的提升，在享受其带来便利的同时，核电站也面临信息安全威胁，如核电厂内办公通信网络安全威胁 [23]。

在核电厂内部办公通信网络中或者多个核电厂办公通信网络之间传输信息时可能存在信息泄露的风险，例如，同一台主机交替接入互联网或其他公共信息网与物理隔离内网，使得入侵者可以攻击内部网络；使用移动存储介质在不同网络之间传输文档会打破网络隔离从而造成秘密泄露；核电厂 Wi-Fi 的广泛应用使得受到无线网络攻击的可能性增加 [23]。

为了防止信息在传输过程中被泄露出去，保密通信技术应运而生，目前采用的传统保密通信技术是借助加 / 解密算法的数学复杂度提供计算安全

性，但由于其提供的计算安全性是有限的，因此容易受到黑客攻击，而量子通信技术加密传输过程中的密钥是随机的，即使被相关人员截获，也不容易破解，因此与传统通信技术相比，其具有理论上的绝对安全性和高效率。这主要是因为量子密钥分配（QKD）是依据量子力学中的不确定性原理、测量坍缩原理和未知量子态不可克隆原理设计的，因此量子通信的理论基础为通信双方提供了不可被窃听、存储和破解的量子密钥安全共享信道[24]。

目前，国内外已经在量子通信领域取得了一定的成果，例如，纽约州立大学石溪分校和意大利帕多瓦大学联合构建了量子通信网络的硬件，成功地实现了量子通信的关键步骤，包括量子位的生成、传输、存储和分析[25]。潘建伟等[26]在国际上首次成功实现量子信息百公里隐形传输，为发射全球首颗“量子通信卫星”奠定了技术基础。

虽然当下量子通信技术的发展还未被实际应用到核电领域，但由于其在信息安全领域展现的巨大优势，且核电站又属于典型的基础设施，其安全性需要相关技术的保障[23]，二者的交叉融合将是核电信息安全领域未来的发展方向，因此加快在该交叉融合领域的研发投入，对保证中国未来核电信息的安全稳定发展意义重大。

2.3.2 提前布局核领域量子信息传输网络以增强信息传输功能

国际互联网是当今时代最为流行的信息传播方式，互联网的迅猛发展加快推动了信息流通和资源共享[27]。目前信息传输主要通过有线或无线的方式进行联网传递，除易受到黑客攻击等安全性问题外，传统通信技术还存在可靠性差的问题，如数据传输存在中断和丢失现象、传输和控制监控图像存在一定的延时等。这对核领域内信息安全可靠地传输提出了极大的挑战，由于核领域对信息的安全性、可靠性以及快速响应性等要求极高，因此，在核领域内建立安全性高、可靠性强且传输高速的网络是非常重要的环节。

而量子通信在具有极高安全性和高效率性的同时还可以满足空间远距离、大容量、易组网等方面的要求[28]，可以用来构筑高速、大容量的通信网络，实现高清晰度图像等大容量超高速数据的传输，为建立量子因特网奠定了坚实的基础。在核领域内建立量子信息传输网络是未来增强核领域信息传输功能的方式之一。

3 结论与建议

3.1 结论

量子科技是当前国际前沿热点领域之一，核科技是量子科技应用的最佳场所，二者交叉融合是未来发展的方向。本文首先梳理了国内外量子科技政策，其次重点分析了国内外核科技与量子科技交叉融合的现状，包括量子计算技术在核物理基础研究方面的推进、量子传感与测量技术在基础核物理和核安保领域中的应用，以及量子通信技术在核信息安全领域的应用等。

通过分析国内外核科技与量子科技存在的交叉融合的案例，本文得出核科技与量子科技交叉融合是一种全新的技术突破，具有新颖性和传统技术所无法比拟的能力特征，例如，与传统计算机相比，量子计算机在解决核领域复杂的计算问题时具有更高的效率，能够解决传统计算机所不能求解的问题；量子测量技术则可以提供传统测量技术所无法提供的测量精度和准确度，为核领域实验提供更加可靠的数据；量子通信技术相比传统通信技术具有更强的抗干扰能力，可以提供更安全和更高效的传输方式，保证核领域重要信息的安全性。

核科技与量子科技的交叉融合是一种全新的技术发展方向，量子科技为核领域的发展提供了重要且全新的工具手段，是加速推进中国核科技发展的催化剂，二者的交叉融合在未来前景广阔，但二者的交叉融合还处于发展初期。关于未来的发展方向，一是要拓展核科技与量子科技交叉融合的广度，探索更多可能的交叉领域；二是要增加核科技与量子科技交叉融合的深度，以实现更深层次的结合，即要实现从量子科技为核科技提供工具解决问题到综合两个学科的技术、知识和思想研究一个共同的综合性复杂问题的转变。

未来核科技与量子科技交叉融合可能的重点领域包括利用量子特性实现核领域内的高效计算与安全通信；运用量子科技实现清洁核能和安全处理核废物；借助核科技与量子科技的融合推动新材料的研究和应用等。为了支撑这些重点领域的发展，一是要加强基础研究，为工程实用化打下理论与实验基础；二是要聚焦核心关键技术研发，以解决实际问题为目标，推动技术创新和工程应用。

3.2　建议

当前量子科技发展面临的主要问题和困难包括：（1）技术难题，如量子比特的制备、稳定性和操作，以及量子纠缠和量子纠错的实现等；（2）算法和软件开发，尽管量子计算在理论上已经展示出强大的潜力，但实际应用中的算法和软件开发仍处于起步阶段；（3）安全性和隐私保护，量子通信和量子密码技术具有天然的安全性，但在实际应用中仍需要解决如量子密钥分发网络的设计、量子存储和传输等问题。此外，随着量子计算机的发展，现有的加密算法可能面临被破解的风险，因此需要研究新的抗量子加密算法。

为应对这些问题和困难，应持续关注量子科技领域的技术发展，攻克关键技术难题，推动核科技与量子科技的融合创新；加大对量子算法和软件的开发力度，实现核科技领域问题的量子求解；研究量子通信在核科技领域的应用，确保核设施和信息的安全。具体建议如下。

一是核物理领域量子计算的超前部署。量子计算在核物理领域应用前景广阔。目前，“中等规模含噪声量子”（Noisy Intermediate-Scale Quantum，NISQ）的现状给量子计算在核物理中的应用带来了挑战。因此，需要加快核领域量子计算人才队伍的建设，以提高量子计算在核物理领域的应用能力。同时，需要在 NISQ 阶段推动量子计算在核物理中的使用以及算法的发展，以便更好地应对挑战。量子计算在核物理领域的应用，不仅可以提高核物理研究的效率和质量，还可以为其他领域提供新的思路和方法。因此，需要超前部署量子计算在核物理领域的应用，以实现量子计算在核物理领域的突破性进展。

二是进一步发展量子传感与测量技术，提高核领域测量精度。在量子传感领域，随着科技的不断发展，可以利用量子传感的超高灵敏度和精度，开展暗物质探索和乏燃料管理等相关研究。量子传感技术在核领域具有广泛的应用前景，可以帮助更好地探测和理解核反应。

由于量子传感与测量领域涉及学科面广，器件的微加工属于高精尖领域，研发横向跨度大，某些方案属于新兴领域。因此，中国核领域相关科研机构要积极探索，自主研发量子测量技术及量子化传感器并尽早实现应用，提高当前核领域测量精度。这不仅可以推动量子传感技术的发展，还可以为核领域的发展做出贡献。

在未来的研究中，研究者可以进一步探索量子传感技术在核领域的应用，提高测量精度和可靠性，为核领域的研究和发展做出更大的贡献。

三是促进核领域和量子通信技术的深入融合。加强核领域与量子通信技术深度交叉融合，是中国核领域发展的一项重要任务。目前，量子通信技术正在飞速发展，在不久的将来将会成功建成量子互联网。因此，中国核领域相关机构应提前部署，与量子领域相关机构合作建设核领域量子通信基础设施。

核领域是一个高度敏感和重要的领域，保密性和安全性至关重要。量子通信技术保密性强、安全性高，可以有效地解决传统通信技术面临的安全问题，为核领域的信息安全提供了强有力的保障。

在核领域量子通信基础设施的建设过程中，需要充分考虑核领域的特殊环境和需求，开发出适合核领域的量子通信产品和技术。同时，还需要加强对量子通信技术的研发和创新，不断提高量子通信技术的可靠性和稳定性，使其更好地服务于核领域。

加强核领域与量子通信技术的深度交叉融合，是中国核领域发展的一项重要任务。通过合作建设核领域量子通信基础设施，将量子通信技术应用到核领域中，可以有效地提高核领域的信息安全水平，为保障核领域的安全和可持续发展提供有力的技术支持。■

参考文献：

[1] 中国信息通信研究院 . 2020 白皮书 : 量子信息技术发展与应用研究报告 [R]. 北京 : 中国信息通信研究院 , 2020.

[2] 中国信息通信研究院 . 2021 白皮书 : 量子信息技术发展与应用研究报告 [R]. 北京 : 中国信息通信研究院 , 2021.

[3] 王寿泰 . 量子绝缘材料 [C]// 中国电工技术学会电线电缆专委会 . 中国电工技术学会电线电缆专委会 2001 年会论文集 . 宜兴 : 中国电工技术学会 , 2001: 99-107.

[4] 于海旺 , 朱宝宽 . 量子与中医学 : 量子科技与中医学融

合 [C]// 中国保健协会美容保健分会 . 第十九届东南亚地区医学美容学术大会论文汇编 . 北京 : 中国保健协会 , 2019: 118-120.

[5] 秦金廷 , 游金桦 . 量子技术在通信网络及安全方面的应用分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学 , 2023(3): 58-60.

[6] United States House Committee on Science, Space, and Technology. The national quantum initiative act[EB/OL]. [2023-08-22]. https://science.house.gov/2018/6//hr-6227-national-quantum-initiative-act.

[7] United States House Committee on Science, Space, and Technology. The national quantum initiative reauthorization act[EB/OL]. [2023-08-22]. https://science.house.gov/bills?ID=5DA4C2C3-2C01-44CD-B548-F1D2CEEBCA02.

[8] European Commission. The quantum technologies flagship[EB/OL]. [2023-08-22]. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum.

[9] 中华人民共和国科学技术部 . 国际科学技术发展报告 [M]. 北京 : 科学技术文献出版社 , 2021: 117-123.

[10] 日本の内閣府 . 量子技術イノベーション戦略 最終報告 [EB/OL]. [2023-08-22]. https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo4-2.pdf.

[11] Министерство Связи И Массовых Коммуникаций России И Другие Ведомства. Об утверждении программы «цифровая экономика российской федерации». [EB/OL]. [2023-08-22]. http://government.ru/docs/28653/.

[12] 中华人民共和国中央人民政府 . 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 [EB/OL]. [2023-08-22]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5103134.htm.

[13] GIANELLE A, KOPPENBURG P, LUCCHESI D, et al. Quantum machine learning for *b*-jet charge identification[J]. Journal of high energy physics, 2022, 2022(8): 1-23.

[14] Rigetti Computing. Rigetti awarded department of energy contract to develop quantum simulation for fusion energy[EB/OL]. [2023-08-28]. https://www.globenewswire.com/news-release/2021/11/04/2327618/0/en/Rigetti-Awarded-Department-of-Energy-Contract-to-Develop-Quantum-Simulation-for-Fusion-Energy.html.

[15] LIU M, DONG G, FELKER K G, et al. Exploration of quantum machine learning and ai accelerators for fusion science[R]. Argonne, IL (United States): Argonne National Lab.(ANL), 2021.

[16] Steve Koppes. Sensitive qubit-based technique to accelerate search for dark matter[EB/OL]. [2023-08-28]. https://news.fnal.gov/2021/04/sensitive-qubit-based-technique-to-accelerate-search-for-dark-matter/.

[17] FARLEY D. Quantum sensing and its potential for nuclear safeguards[R]. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States): Sandia National Lab, 2021.

[18] JIANG M, SU H, GARCON A, et al. Search for axion-like dark matter with spin-based amplifiers[J]. Nature physics, 2021, 17: 1402-1407.

[19] JI W, LI W P, FADEEV P, et al. Constraints on spin-spin velocity-dependent interactions[J]. Physical review letters, 2023, 130(13): 133202.

[20] ZHANG D B, XING H X, YAN H, et al. Selected topics of quantum computing for nuclear physics[J]. Chinese physics B, 2021, 30(2): 36-47.

[21] CHO A. DOE pushes for useful quantum computing[J]. Science, 2018, 359(6372): 141-142.

[22] SU HAOWEN, WANG Y H, JIANG M, et al. Search for exotic spin-dependent interactions with a spin-based amplifier[J]. Science advances, 2021, 7(47): eabi9535.

[23] 胡江 , 孙国臣 , 张加军 , 等 . 由“震网”病毒事件浅议核电站信息安全现状及监管 [J]. 核科学与工程 , 2015, 35(1): 181-185, 192.

[24] 赖俊森 , 吴冰冰 , 李少晖 , 等 . 量子保密通信研究进展与安全性分析 [J]. 电信科学 , 2015, 31(6): 46-52.

[25] NAMAZI M, VALLONE G, JORDAAN B, et al. Free-space quantum communication with a portable quantum memory[J]. Physical review applied, 2017, 8(6): 064013.

[26] 徐海涛 . 我国实现量子信息百公里隐形传输 [J]. 共产党员 , 2012(18): 54.

[27] 李荣森 . 军用仿真网络数据保密传输技术研究 [D]. 长沙 : 国防科学技术大学 , 2006.

[28] 叶俊 . 量子通信中的量子隐形传态技术研究 [D]. 武汉 : 华中科技大学 , 2007.

Practice and Strategic Thinking on the Intersection and Integration Between the Fields of Nuclear Science and Technology and Quantum Science and Technology

CHEN Shuangkai, DU Jingling, XU Lijun, YU Hong, WU Xianfeng
(China Institute of Atomic Energy, Beijing　102413)

Abstract: Quantum science and technology is a global hot spot in R&D and one of the disruptive technologies. Nuclear science and technology belongs to the strategic high-tech field, which is developed based on the microscopic nuclear system, satisfies the laws of quantum mechanics, and is one of the best places for the application of quantum science and technology. This paper systematically reviews the domestic and foreign policies on quantum science and technology and fully investigates the current situation of the intersection and integration of nuclear science and technology and quantum science and technology at home and abroad. It puts forward reference suggestions for the innovative development of China's nuclear science and technology from three aspects: the intersection and integration of quantum computing, quantum measurement, and quantum communication with nuclear science and technology.

Keywords: disciplinary intersection; nuclear science and technology; quantum science and technology

(上接第9页)

ラルに伴うグリーン成長戦略」[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html.

[48] East Asia Forum. Japan's bet on hydrogen cars needs a jump-start[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.eastasiaforum.org/2022/04/13/japans-bet-on-hydrogen-cars-needs-a-jump-start/.

[49] IEA. Global Hydrogen Review 2023[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023.

Development of Japan's Hydrogen Energy Strategy and Its Implications for China

LIN Yunlei[1, 2], BIAN Shuguang[1], CHENG Zhujing[1], CHEN Jinhui[1, 2]
(1. High Technology Research and Development Center, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing　100044;
2. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing　100084)

Abstract: This paper explores Japan's important strategic initiative in the energy field— its hydrogen energy strategy. Through an in-depth analysis of Japan's hydrogen energy strategy, the implementation background, strategic goals, policy initiatives, and future prospects of Japan's hydrogen energy strategy are discussed. It also examines the challenges faced in implementing hudrogen energy strategy. Through the research of Japan's hydrogen energy strategy, this paper aims to provide implications for China's hydrogen energy policy formulation and industrial development.

Keywords: Japan; hydrogen energy; hydrogen energy strategy; hydrogen society