报告荐读 | 争夺量子优势的芬兰-国家量子战略的政策建议

SITRA

MEMORANDUM

5 MAY 2024

Andrea G. Rodríguez

FINLAND IN THE RACE FOR QUANTUM ADVANTAGE

Policy Recommendations for a National Quantum Strategy

声明

《FINLAND IN THE RACE FOR QUANTUM ADVANTAGE-Policy Recommendations fora National Quantum Strategy》报告的编译著作权归ICV TA&K 与光子盒（QUANTUMCHINA）共同所有。

引用请注明来源。

目录

声明 2

序言 1

摘要 2

对于芬兰量子优势的建议 3

导语 4

一、全球量子计算的新兴趋势 6

混合经典-量子接口 7

量子计算即服务（QcaaS） 9

二、欧洲的量子政策 10

三、芬兰——全球量子参与者 14

四、作者关于使芬兰在量子竞赛中处于领先地位的四项建议 17

建议 1：制定国家量子战略 18

建议 2：建立 QuantumFinland 以支持工业进步 19

建议 3：确保对低温、量子软件和超导量子计算机这些领先项目进行投资 19

建议 4：设立国家量子技术社会影响卓越中心 20

五、结论 21

作者简介 23

附录 1：研究阶段和受访者 24

— QUANTUMCHINA —

序言

量子技术预计将在未来几年彻底改变许多行业。量子计算对网络安全、医学、材料科学等方面的影响使其成为战略性技术。

随着几个国家竞相成为量子技术的先行者，全球竞争正在加速。中国等国与美国、欧盟等国家和地区之间的紧张局势增加了政府对量子技术的投资，也是为了避免依赖性并增强韧性。芬兰在量子研究和开发方面拥有数十年的经验，并在量子供应链的关键领域拥有领先的公司。此外，芬兰拥有欧洲最强大的超级计算机 LUMI，为量子计算的实际应用提供了重要支持。

熟练劳动力短缺是量子行业的一个众所周知的瓶颈。现在，芬兰需要意识到这一点：地缘政治甚至安全政策已经成为考虑因素。芬兰既是欧盟的成员也是北约的成员，北约对量子技术有着自身的利益考量。随着时间的推移，芬兰可以围绕量子技术及其应用行业发展一个庞大的工业生态系统。或者，芬兰也可能会任凭最优秀的公司和专家到对量子技术有着战略性投资的国家。

本文鉴于不断演变的地缘政治环境，旨在概述量子政策格局，并针对芬兰提出政策建议。它还旨在激发利益相关者对关于如何发展芬兰量子政策格局的讨论。为了实现量子技术的战略潜力，了解其优势和国际竞争的残酷现实至关重要。

该报告由独立作者撰写，并基于对主要国家和经济区域战略的研究，以及与多家公司、机构、公务员和专家的访谈。

摘要

量子计算对社会、经济和国家安全具有重要的地缘政治和地缘经济意义。随着中国和美国等主要国际参与者竞相开发先进的量子能力，欧盟于 2018 年启动了量子旗舰计划，以确保对量子技术的长期投资。此外，许多欧盟成员国已经启动了量子技术的国家计划，截至 2024 年 3 月，只有五个国家制定了完整的国家量子战略（丹麦、法国、德国、爱尔兰和荷兰）。量子技术的公共投资数字各不相同。丹麦承诺投资 1.5 亿欧元，法国 10.5 亿欧元，德国 20 亿欧元，荷兰 6.15 亿欧元。爱尔兰尚未公开披露其量子技术研究和创新的预算。

随着量子计算格局的演变和新趋势的出现，如量子计算服务（QCaas）和混合量子经典界面，芬兰可以利用其独特的“学术-产业-政府”网络、研究卓越性以及现有的先进高性能计算网络，成为量子竞赛的领先者。知名的芬兰量子公司，如 IQM 和 Bluefors，已经成为欧洲量子计算供应链的关键组成部分。然而，如地缘政治不确定性以及在欧盟和北约背景下对国际伙伴关系的不同立场等之类的战略性挑战尚待解决。

为了加强芬兰蓬勃发展的量子计算生态系统并且引领量子企业和量子技术研究，芬兰必须认识到量子技术的战略重要性，制定国家量子战略，并团结努力，协调资金，填补供应链的空白，并促进量子计算的应用。不采取战略行动可能会导致关键参与者流失到已经制定了战略并长期支持量子行业的国家。更好地协调和了解欧盟背景下的行业格局对于芬兰在量子时代取得成功至关重要。

对于芬兰量子优势的建议

1.在 2024 年为芬兰制定国家量子战略。吸引所有关键利益相关者，确保所有参与者之间精诚团结。

2.通过建立芬兰现有参与者的协作结构来支持芬兰量子技术的工业政策目标。这一联合倡议名为 QuantumFinland，将系统地监测量子行业的发展，确定供应链的空白，帮助企业吸引并扩大私人投资，促进关键行业和技术之间的互补性，并支持实际应用案例的实施。

3.通过针对性的领先投资计划，补充现有的计划，投资于低温技术和基础技术、量子算法和中间件，以及超导硬件，以推进芬兰在量子计算供应链的关键领域的领先地位。

— QUANTUMCHINA —

4.建立一个量子技术社会影响的国家卓越中心，以提高芬兰的远见能力，并促进量子技术的负责任发展和使用。

导语

在当今快速变化的世界中，前沿科技已成为推动进步、创新和发展的不可或缺的因素。量子计算，一种利用量子力学的新型计算模式，具有彻底改变经济、改善工业流程并帮助决策者解决复杂挑战的潜力。然而，量子和其他深层技术由于其变革性潜力和双重用途应用，已经获得了深远的地缘政治意义。量子技术对网络安全，尤其是加密，材料科学或医学的影响，促成了将量子计算视为战略技术的看法，为在塑造全球市场、国际技术格局和确保关键基础设施方面具有先进能力的国家提供了实质性优势。

传统的地缘政治竞争正与经济实力交织在一起。美国和中国正在投入巨额资金来引领量子竞赛。如果欧洲在这项技术竞赛中落后，不仅可能失去竞争优势，还可能产生新的关键依赖关系（Bradford，2023）。此外，由于量子计算在信息安全等领域的颠覆性影响，缺乏对量子技术的投资和竞争优势可能会带来额外的国家安全风险（G. Rodríguez 2023）。

因此，各国越来越多地通过利用其经济实力在全球舞台上推进其战略利益，寻求的不仅是影响力，而是统治地位。这种现象，由各种因素的复杂相互作用推动，正在扰乱贸易动态、投资流向、供应链和技术发展。

因此，各国越来越多地通过利用其经济实力在全球舞台上推进其战略利益，寻求的不仅是影响力，而是统治地位。这种现象，由各种因素的复杂相互作用推动，正在扰乱贸易动态、投资流向、供应链和技术发展。国家战略政策将在第三章讲述。

欧盟政策中的量子技术

近年来，量子技术在欧盟政策中备受关注。2018 年，欧盟启动了量子旗舰计划，承诺投入 10 亿欧元以确保对量子技术的长期投资。该计划与其他资金工具（如加速器和“地平线欧洲”计划）相辅相成，已成为欧洲量子技术合作的基石。此外，在过去两年中，该主题在欧盟机构中变得越来越重要。欧盟多次在文件中提到了量子计算的战略重要性，例如 2022 年的《战略指南》、2022 年的欧盟芯片法案和 2023 年的经济安全战略。

在 2023 年 11 月 28 日，北约批准了北约的量子战略，这反映了量子技术对和平与安全的重要性。然而，北约本身并没有拥有这些能力，各国负责开发这些能力（《北大西洋公约》第 3 条）。因此，虽然该战略可以帮助北约协调优先事项，但实施的责任在于各个成员国。

正如硅谷通过数十年的政策发展而成为一个繁荣的创新生态系统一样，欧盟及其成员国也可以通过正确的长期政策框架发展自己的生态系统，为战略自主性和欧洲大陆的长期繁荣做出贡献。芬兰在量子技术的许多领域已经拥有世界领先的专业知识。通过正确的政策组合和投资，芬兰可以发展出世界领先的能力，建立竞争力强劲的量子商业产业，并在量子技术供应链的关键领域争取领导地位。然而，如果其关键公司和专家逐渐流向海外或被海外收购，芬兰也存在失去其有前途的地位的风险。

到 2040 年，量子技术的潜在市场规模估计约为 1060 亿欧元。其中，量子计算仅在四个关键行业：化工、生命科学、金融和汽车，对全球经济的影响到 2035 年就有可能达到约 1 万亿欧元（麦肯锡，2023）。了解量子计算的战略价值的国家将从先发优势中获益，带来积极的经济和外交溢出效应。

本文将探讨全球量子领域新兴趋势，如混合经典-量子接口和服务型量子计算，深入探讨欧洲的量子政策和芬兰的地位，并最终提出对芬兰的政策建议。芬兰如何提高韧性，增加生产力，并从量子计算的市场潜力中受益？它如何利

用其外交力量促进其在量子技术方面的利益?

一、全球量子计算的新兴趋势

量子计算通过量子力学以一种新的方式处理数据并对其进行操作。与经典计算机即先进的图灵机的演变不同，它代表了一种范式转变，需要开发新的硬件和软件。而经典计算机是以 0 和 1（比特）的系列来处理信息，量子计算机则使用叠加原理在整个数学空间填充所有可能的状态。叠加意味着量子系统可以同时存在于多种状态，直到被测量或观察为止。因此，“量子计算机不是按位逐位顺序处理，而是在量子变量同时假定的众多状态上并行计算”（Jaeger，2018）。总而言之：计算能力呈指数增长，打开了新应用和优势创新的大门，影响着当前的各个行业：从汽车到材料科学，从健康到人工智能（AI）。

然而，在开发容错量子计算机方面存在着重大挑战。科学家们目前正在尝试不同的量子计算架构（囚禁离子、超导电路、自旋量子比特、光子网络、中性原子、Majorana 费米子等）。然而，在这些架构中，由 IQM 等公司开发的超导计算机正蓬勃发展。

对不同架构的实验被创建能够减少干扰或防止能破坏量子态并促进纠缠量子比特的可扩展性（这是未来量子计算能力的基础）的噪音的架构的需求所影响。此外，这些架构实验有助于找到可以塑造新市场并确保量子计算领域私人投资涌入的真实应用。

随着科学的进步，围绕如何创建量子计算机的创新也在不断发展，这影响着各国如何战略性地考虑制定相关政策，以促进科学发展与工业应用。了解市场趋势，如混合界面和通过云端访问量子计算，可以成为各国制定有针对性的

投资计划的良好起点。

混合经典-量子接口

混合经典-量子接口使量子计算机能够与经典超级计算机（高性能计算机，HPC）协调工作。高性能计算允许将数据传输到量子处理器，控制系统并进行测量，但量子计算机进行计算。混合接口通过支持量子计算机并使其能够在真正有用的应用中使用，而无需等待大型量子计算机的开发，并允许量子计算机与经典环境——当前网络和信息系统进行交互，来使量子计算机与经典环境护臂。它还允许中小企业通过 HPC 网络从量子计算中获益。

目前的量子计算机无法与经典计算机竞争，因为需要数百个功能齐全的量子比特并结合低错误率才能获得优势，并且关于量子计算机是否能够完全取代经典超级计算机市场仍存在疑问。然而，随着领域的发展，混合经典-量子接口对于理解未来量子应用并探索当前技术发展如何与量子领域的发展相互促进与互补，以在更短的时间内创造商业价值具有重要意义。

由于混合经典-量子接口的应用案例更为直接，行业参与者也在支持混合化。在欧洲，诸如 Qilimanjaro 和 IQM Finland 之类的公司正在开发可以在高性能计算环境中无缝使用的产品。以色列的 QuantumMachines 专注于可与经典环境交互的互操作结构。在美国，NVIDIA 正在开发加速混合接口的解决方案，例如 cuQuantum 等软件解决方案或新平台（如 QODA），IBM 更进一步，最近与东京和芝加哥大学签署了一项协议，以实验新的混合架构（IBM Newsroom，2023）。

欧洲拥有分布在整个大陆的先进超级计算机网络，以支持研究和创新。

2018 年，欧盟创建了欧洲高性能计算联合企业（EuroHPC JU），其使命是开发、部署和扩展欧洲的超级计算机网络。从那时起，EuroHPC 已采购了九台超级计算机，并于 2023 年与六个 EuroHPC 站点签署了量子计算机托管协议，其中一个位于属于 LUMI 联盟的 Ostrava（EuroHPC JU，2023）。

这些计算机将通过现有的 EuroHPC 网络向欧洲学术研究人员和行业参与者提供。作为欧洲最强大的超级计算机（EuroHPC JU 2023），LUMI 由于其泛欧基地而有望成为 HPC 创新的参考点，这使其可以访问几台量子计算机，例如将在 Ostrava、Espoo 和联盟的其他站点启用的计算机（CSC 2023）。这可以将芬兰置于尖端创新的中心，并有极大的潜力基于量子和高性能计算的使用创建高价值应用。

随着混合经典-量子基础设施在量子市场中发挥着越来越重要的作用，并且量子计算机的硬件发展朝着不同的方向发展，中间件在将量子计算机整合到经典超级计算机中的问题日益成为一个开放性问题。中间件是一种作为 HPC 和量子计算机之间粘合剂的软件，并确保生态系统中的系统和设备之间有效地通信（Boger and Knoll 2023）。中间件位于硬件和算法之间，使开发人员能够与异构硬件（经典和量子）进行交互，并专注于其算法。中间件还需要管理计算资源，在混合接口中，这些资源既是经典的又是量子的，并确保算法运行，并且硬件被有效地使用（Faro et al. 2023）。

然而，由于当前量子计算市场的硬件焦点，中间件——对于将量子计算机整合到 HPC 中至关重要——尽管是控制完整堆栈所必需的，但在很大程度上被忽视。出于这个原因，旨在提供端到端量子计算的大型公司，如 IBM，正在投资中间件，这减少了中间件参与者的数量，从而减缓了确保从 HPC 访问量子

计算机所需的创新速度，并延迟了采用。

量子计算即服务（QcaaS）

量子计算机建造成本高、操作困难，并且占用大量空间。随着技术的进步，升级和维护的成本变得过高，这影响了可扩展性。因此，借鉴云计算市场的成功，公司越来越倾向于通过云端提供量子计算服务。

基于云的量子计算（或量子计算即服务，QCaaS）允许开发人员和研究人员远程访问量子模拟器、仿真器或处理器，他们希望在量子环境中测试其解决方案。QCaaS 使公司能够租用量子计算能力，在先进的计算环境中使用经典接口进行实验和测试新产品，这也使提供商能够在真实世界的应用中测试其量子硬件，拓宽客户组合并闭环反馈。

基于云的量子计算降低了参与量子行业的门槛，从硬件和技能方面降低了进入成本，无需量子物理学家也可以通过云端与量子环境交互。

尽管欧洲有许多新兴公司提供 QCaaS（例如荷兰的 QuantumInspire、奥地利的 AQT 和德国的 T-Systems），但由于过去十年的持续投资，中国公司如阿里巴巴和百度以及美国公司处于领先地位。IBM Q Experience 允许任何人远程访问具有 5 至 16 个量子比特的系统，微软创建了一个开放的生态系统，供外部开发人员在所选的量子硬件上编写和运行代码，加拿大的 D-Wave 则提供了访问量子退火解决方案的机会，使公司能够提高其服务的最优水平。

在芬兰，几乎没有公司专注于开发 QCaaS 服务。这已经延迟了众多战略产业的创新，例如化学工业，这是芬兰的重要出口产业之一，也是四个预计受到量子计算影响最大的行业之一。获得量子计算资源可以最大程度地发挥研发

投资，例如通过帮助研究人员更好地理解分子行为，从而帮助发现新材料或新活性成分，或者利用新的量子算法解决优化问题来支持生产和运输。

二、欧洲的量子政策

2016 年，欧盟发布了一项量子宣言，呼吁成员国和欧盟委员会创建旗舰计划，以支持欧洲在量子技术方面的技术优势。虽然该计划于 2018 年实现，但该宣言还呼吁欧盟在可能出现的不同战略上进行协调，并认识到这些技术对长期繁荣、竞争力和安全的战略重要性。

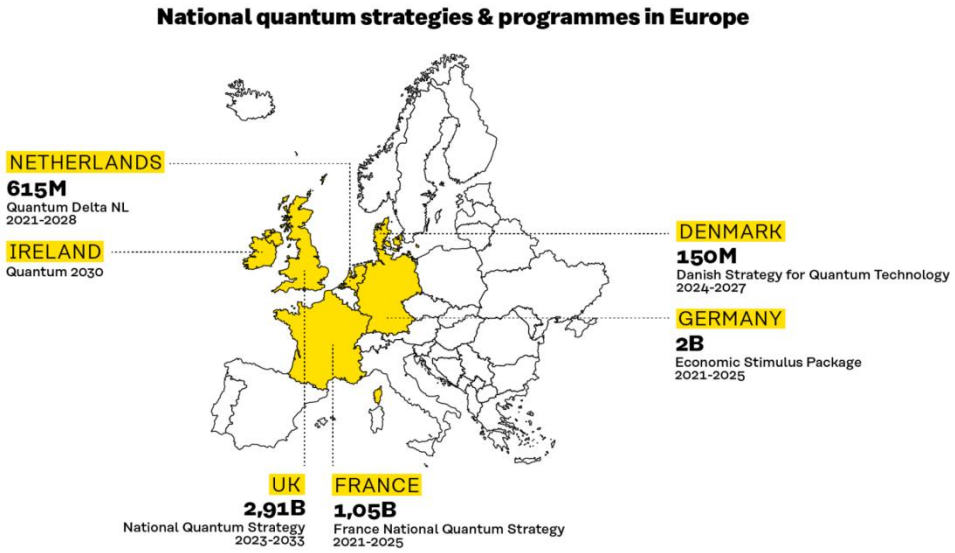
六年后，该计划已经以几种方式实现：通过量子旗舰计划进行研究协调，以及通过 QuantERA 计划进行资金协调，非欧盟国家如以色列、瑞士、土耳其和英国也参与其中。然而，正是缺乏政策协调阻碍了欧盟作为量子技术全球行动者的潜力。

这部分原因是欧盟领导人对量子技术利益的不同看法。虽然一些国家，如法国、德国或荷兰，将其视为国家优先事项，但许多其他国家仍将其视为研究和创新问题，因此在政治议程上将其置于较低的水平。这些不同的现实导致先行者国家积累了关键的资源和服务，如硬件、投资和人才，并且只在存在技术转移的真实风险或欧洲主权受到威胁时，才推动欧洲层面的对话。这也是为什么在 2023 年欧盟经济安全战略发布后，量子技术被标记为“战略”的原因之一（欧洲委员会，2023b）。

中国是领先的量子技术公共投资者，尽管可靠的数据很难获得，并且数据存在不确定性。仅中国国家量子信息科学实验室就有 85 亿欧元的公共投资。这些努力得到了其他几种投资工具的补充（总投资估计达到 140 亿欧元）。在

中国之后，欧盟及其成员国是量子技术第二大公共投资者，总投资额约为 77 亿欧元（麦肯锡，2023 年）。

图 1：欧洲的国家量子战略及项目



资料来源：被选中选国家的国家量子战略。

然而，大多数私人投资仍然集中在美国，截至 2022 年底，量子技术初创企业吸引了约 30 亿欧元的投资（McKinsey 2023）。尽管欧洲市场（包括缺乏风险投资市场）有许多固有障碍，但欧洲及其成员国可以通过了解当前行业格局和新兴生态系统来战略性地支持价值链不同环节，以打造行业领军企业。

随着各国努力应对新冠疫情带来的经济冲击，复苏与韧性设施（RRF）成为减轻影响、重组国家经济以实现数字化和绿色转型目标的重要工具。因此，欧盟委员会设定了至少 20%的资金分配要求用于数字化倡议。因此，各国投资于量子技术的机会已经成熟。

尽管在疫情爆发前只有少数国家为量子技术投入了专门资源，但 2021 年欧洲出现了最多的量子项目和资金倡议（见表 1）。实际上，可用资金发挥了关键作用，但日益增强的关于技术供应链脆弱的意识以及不断加剧的地缘政治

紧张局势所带来的破坏效应，以及对技术保护主义的教训也同样重要。

表 1：部分国家的量子战略比较

国家	国家战略	公共资金（€）	使用年份
中国	“十四五”计划 2021*	约 138 亿	2021-2025
芬兰	国家量子计划，2018	34 亿	2019-2023
英国	国家量子战略，2023	29.1 亿	2023-2033
德国	2020 年经济刺激计划	20 亿	2021-2025
法国	法国国家量子战略，2022 年	10.5 亿	2021-2025
荷兰	量子三角洲 NL，2019	6.15 亿	2021-2028
丹麦	丹麦量子技术战略，2023 年	1.5 亿	2024-2027
爱尔兰	量子 2030，2023	未披露	2023-2030

*中国在量子技术上的战略重点可以追溯到几年前。然而，由于信息不足和不可靠性，对量子投资的准确估算很难进行。麦肯锡（2023）估计，作为第十四个五年计划（2021）的一部分，政府在量子技术上的投资约为 150 亿美元，该计划将量子技术确定为中国数字主权的重要技术。

截至 2024 年 3 月，只有五个欧盟国家拥有完全发展完备的国家量子战略（丹麦、法国、德国、爱尔兰和荷兰）。其他六个国家建立了具有一定程度的政府协调的量子计划，但它们主要依赖于研究和学术机构（奥地利、匈牙利、西班牙、意大利、拉脱维亚和斯洛伐克）。

全球至少有 16 个国家专门为量子技术发展提供公共资金支持。资金数额包括在给定战略中承诺的额度。随着应用逐渐进入市场，这些数字预计将在未来几年增加。

因此，欧洲的量子计划普遍都有于确保获得可靠基础设施的需求，并因此将创建国家量子计算机或能够创里量子计算机的公司置于中心地位，并建立新的教育计划来填补劳动力缺口。除了这个共同因素外，鉴于欧盟缺乏协调，欧盟国家越来越多地关注国际合作的问题，这事实上将成员国分成了几个群体：

国际主义国家和内向型国家。

国际主义国家认为有必要与其他非欧盟力量合作，特别是在量子技术方面，以创建技术影响力范围。荷兰等国家，以及直到最近的丹麦，都是这一流派的例子。内向型国家，如法国或德国，优先考虑在不同新兴生态系统之间创建国家协同效应，而将在欧盟层面的合作放在次要位置。与非欧盟国家的合作是零星的、因情况而异的。

这两个群体的出现在欧洲层面引起了重大问题，并可能在长期限制欧盟的行动。国际主义国家可能会认为限制合作对其自身经济安全有害，并可能否决在这方面作出的任何决定，无论是在获得欧盟资金的问题上——通过公共采购流程、公开征集或招标——还是在外交层面通过签署协议。这个问题加剧了没有共同欧盟政策的国家在量子技术领域看待国际合作为开放科学问题的情况，如奥地利与中国等国保持着紧密的合作联系。

— QUANTUMCHINA —

欧盟成员国对量子技术的态度

自 2019 年以来，几个欧盟国家已开始投资于量子技术。然而，作为新兴产业，各国对量子技术的态度各不相同。以下创作团队将与芬兰进行比较，列举三个相关的基准。

荷兰

与本次比较中的其他两个欧盟国家相比，荷兰在对待量子技术方面更加注重产业。2019 年，荷兰启动了关于量子技术的国家战略，并成立了 QuantumDeltaNL（QDNL），这是一个国家基金会，于 2021 年获得了 6.15 亿欧元的资助，用于实施 2021 年至 2028 年期间的战略设想。QDNL 围绕四个行动线路展开工作：

1.创新与研究

2.量子生态系统

3.人力资本

4.社会影响

QDNL 在三个主要战略领域开展工作：量子计算和仿真、传感应用以及创建国家量子网络。

自成立以来，QDNL 已创建了多个计划，以推动在这些领域创立中小企业，支持获得基础设施和设施的机会，并在量子生态系统内部创建协同效应。2022 年，它在代尔夫特理工大学校园内开设了量子之家（House of Quantum），一个供量子初创企业共同工作的空间。

丹麦

丹麦正试图将其欧洲雄心与其对跨大西洋关系的承诺调和，利用尼尔斯·玻尔研究量子科学的特权地位以及作为北约 DIANA 量子加速器的优势。2023 年，丹麦高等教育和研究部发布了《丹麦量子技术战略》的两部分（7 月和 9 月），表明了在未来四年内在关键丹麦部门（如制药工业、交通运输、金融、网络安全和绿色转型）发展量子应用方面投资约 1.5 亿欧元的雄心。这些努力是对 2019 年发表的《量子发展计划》的补充。值得注意的是，2022 年，哥本哈根获得了 DIANA 量子加速器的席位，这是新的北约创新机构，有潜力从联盟各地吸引人才和企业到丹麦。

西班牙

西班牙将其量子计划集中在其高性能计算（HPC）卓越传统上，倾向于混合接口，并与大学周围的初创企业集群建立联系，同时通过专门的计划推动量子通信。2021 年 10 月，西班牙经济和数字转型部为 QuantumSpain 提供了 2200 万欧元的初始资金，用于资助一个与西班牙超级计算网络相连的国家量子计算机，该网络连接了 12 个不同地区和大学的超级计算机，由巴塞罗那超级计算中心（Barcelona Supercomputing Centre）协调，该中心是 EuroHPC 网络的一部分。西班牙还推出了一项量子通信计划（7600 万欧元）。

三、芬兰——全球量子参与者

在 2023 年，芬兰量子议程呼吁建立一个国家战略，并创建一个量子生态系统的路线图和有针对性的发展计划。芬兰在研究和创新领域享有全球认可，并拥有一个充满活力且迅速发展的量子技术领域。在科学卓越和世界一流学术机构、工业界和政府之间牢固的合作传统的支持下，芬兰有潜力成为欧盟量子技术领域的领军者之一，并将自己定位为欧洲领先的量子产业之一，拥有蓬勃发展的工业基础和强大的出口潜力。

芬兰已经有几个重要参与者致力于推动芬兰的量子技术领域发展，如芬兰技术研究中心（VTT）、设立了专门的量子宣传活动的芬兰国家商务促进局以及芬兰量子研究所（InstituteQ），包括 BusinessQ。目前，芬兰有 11 家公司专门从事与量子相关的主题（见表 2），在量子软件、硬件和基本组件（例如光学）等互补的子行业中。两个全球公认的参与者 IQM 和 Bluefors 已经在欧洲量子供应链的配置中发挥着重要作用（QuantERA 2023）。尽管这些公司在规模上有所不同，但在探索了计算和量子软件的机会上具有明显的协同效应。

表 2：芬兰的量子技术概况

公司	专业领域
SemiQon	量子电路
AlgorithmiQ	量子算法
Modulight	量子计算机激光器
IQM Finland Oy	超导量子计算机
Bluefors	稀释制冷器
Futurice	云端解决方案
Quantrolox	自动化量子比特控制软件
VTT	临界通信/量子计算
Unitary Zero Space	量子计算教育
Vexlum	高功率激光系统
Quanscient	量子算法

这 11 家公司是研究卓越和芬兰软件和电子工业的实力的结果。此外，大多数公司都是来自芬兰不同大学的衍生企业，这突显了加强芬兰学术-产业-政府网络的价值和必要性，这种网络只存在于小国家。通过改善协调，并创建必要的政策框架，芬兰可以利用这些优势促进国内价值链的创建，并促进互补行业（包括机器学习、软件、电子、光学、制冷技术）之间的合作。

作为欧洲的一员，了解自身的优势和劣势对于芬兰参与国际事务并在全球技术竞赛中定位自身，学会如何应对来自邻国地位（国际主义国家与内向型国家）以及整体地缔造的地缘政治格局的日益不确定性，也是至关重要的。最后，作为北约成员国，芬兰有潜力在支持北约技术优势方面发挥关键作用，并利用其在联盟中的地位与量子产业中的相关国家建立新的联系，这些国家也是北约的一部分，如加拿大——一个新兴的全球量子软件领导者——以及美国，与其已于 2022 年签署了一项联合声明。北约的北大西洋国防创新加速器（DIANA）最近批准了芬兰的建议，旨在在芬兰建立一个加速器，重点关注下一代通信和量子技术的初创企业和中小企业。此外，将建立两个测试中心：一个在奥卢关注 6G 网络，另一个在 Otaniemi 专注于量子技术、网络安全通信和空间技术（芬兰政府，2024 年）。

芬兰在数字竞争力方面位居世界前十，这得益于政府对数字转型的支持、对数字技术的快速采用和对数字技能的促进（IMD 2023）。这促进了一个充满活力的软件社区的出现，预计到 2025 年将为芬兰经济增加约 35 亿欧元（Statista 2023）。考虑到中间件和软件应用对连接量子计算机和经典设备以及帮助用户测试和在量子硬件上运行实验的重要性日益增加，投资促进国家量子软件行业可能产生强大的积极影响，并帮助芬兰从潜在的数十亿欧元市场中

获益。目前，加拿大和美国处于领先地位，但芬兰已经拥有欧洲市场领军企业，如 AlgorithmiQ 和 Quanscient，这些公司——在正确的政策方向和投资组合下——已经有资格成为欧洲的量子软件冠军。

四、作者关于使芬兰在量子竞赛中处于领先地位的四项建议

尽管芬兰的企业文化促进了本地合作，但该国的顶尖企业已经开始向海外扩张。2020 年，IQM 在慕尼黑开设了首家子公司，并继续向美国扩张，在 2023 年 12 月 15 日与加州大学伯克利分校签署了合作伙伴关系。

同样地，Bluefors 作为奥尔托大学的分支机构和低温冷却器的主要供应商，决定在荷兰的代尔夫特开设一个研发设施，代尔夫特是 2019 年荷兰国家量子计划的一个关键工业节点。此外，2023 年，Bluefors 宣布在荷兰建立一个新的量子实验室，进一步促进与当地荷兰量子产业的协同。

尽管已经有了一些旨在激发人才投入量子技术并建立应用的倡议（例如量子计算运动、芬兰量子旗舰项目和芬兰量子学院 InstituteQ），但芬兰可以从进一步协调努力和资金、填补供应链缺口、减少战略依赖以及促进量子技术在芬兰的采用中获益，无论是在民用还是军事层面。

在 27 个欧盟成员国中，截至 2024 年 3 月，只有丹麦、法国、德国、爱尔兰和荷兰拥有国家量子战略，其中一些国家已经拨款并建立了支持计划，这些支持计划有助于这些国家的量子生态系统增长，并潜在地防止了它们新兴产业的外流。芬兰尚未拥有国家战略或等效的支持计划，尽管它已经做了很多工作。

图 2：芬兰量子竞赛的四项建议

建议 1：制定国家量子战略

国家量子战略应该反映量子技术的国际方面，包括新的地缘经济动态，并设定优先事项和时间表，以在芬兰建立一个可持续的量子计算生态系统，借鉴其成熟产业的优势，加强其学术-工业-政府网络。该战略的目标是在芬兰打造一个充满活力的量子产业，整合并建立在芬兰教育、研究和商业领域当前努力的基础上，并明确概述实现这一及其他战略目标所需的补充措施。

芬兰经济事务和就业部已于 2022 年表示有必要制定战略。随着地缘政治环境进一步恶化，芬兰加入北约以及全球人才、企业和投资之间竞争加剧的影响，使得芬兰有必要在 2024 年制定一项紧迫的量子战略，采用一种协作方法，吸引所有相关利益相关者参与。

该战略可能包括创建三个重要且密切相互关联的组成部分：QuantumFinland、一个卓越中心和主导计划，以在新兴量子计算供应链的关

键部分保持领先地位，确定和采用相关的量子技术用例，并促进芬兰经济增长。

建议 2：建立 QuantumFinland 以支持工业进步

尽管芬兰已经在推动本地量子技术产业方面进行了持续努力，但需要更强的协调以确保研究优势转化为产业领导力。芬兰生态系统中各方之间更紧密的合作将是至关重要的，以确保芬兰拥有产业领导者的重要力量，从而在量子技术周围形成规模经济，同时确保资金战略性地投资以满足国家量子战略的需求。

因此，建议建立 QuantumFinland 来支持芬兰的工业政策目标。QuantumFinland 可以是芬兰现有量子技术支持者的合作结构。它将监测量子行业的发展，并对芬兰和国外的量子领域进行观察。QuantumFinland 可以建立在现有倡议的成就之上，例如 BusinessQ，但其核心是创建一个可持续且充满活力的产业生态系统，从研究优势中受益。因此，QuantumFinland 将通过结合量子技术、高性能计算和云服务（QCaaS）加速实际用例的开发。

QuantumFinland 还将帮助识别供应链中的差距，并帮助企业吸引和扩大私人投资。此外，它还可以促进关键行业和技术之间的互补性，如高性能计算、人工智能、半导体、云和绿色技术。最后，QuantumFinland 还可以成为加强国际合作、开发实际量子应用和服务的关键因素。

建议 3：确保对低温、量子软件和超导量子计算机这些领先项目进行投资

此外，继续投资芬兰的优势领域，同时在量子市场中拓展机会至关重要。为此，建议在低温技术和启用技术、量子算法和中间件以及超导量子计算机领域补充现有项目，以确保芬兰在量子计算的整个技术领域中处于先进地位，并

在全球市场上具有竞争力。这三个专门的主导项目不会取代对量子价值链其他领域的投资，应被视为对现有结构的补充，而不是限制。

芬兰作为软件公司的理想地点，以及与 IQM 等公司一起在量子硬件领域的领先地位，可以通过创建支持这两个领域创新的专门资金计划，进一步巩固其在欧洲市场的优势，并成为国际上的全球领导者。因此，这两个旗舰计划应确定清晰的里程碑，并依靠独立的资金来确保长期收益。类似的倡议也可以在其他国家找到。例如，荷兰有一个 2900 万欧元的量子传感器工作组，法国有专门资金的战略领域专项计划（Quantum Priority Research and Equipment Programme，PERP），总预算为 1.5 亿欧元。

建议 4：设立国家量子技术社会影响卓越中心

在 2023 年底，包括芬兰在内的几个欧洲国家签署了《量子宣言》。在其中，他们承诺建立量子技术卓越中心网络。芬兰可以通过建立量子技术社会影响国家卓越中心来履行其责任，以提高对量子技术影响的前瞻能力。同样的卓越中心也可能研究其他具有双重用途能力的颠覆性技术，如太空、6G、网络安全和人工智能。

在国家量子战略的指导下，该实体可以帮助芬兰引领欧盟层面关于量子技术社会影响及环境的辩论，包括围绕负责任的使用和发展以及未来工作的问题。随着世界采用和发展量子技术，预见其对劳动力市场的影响，并创建适当的结构以确保专业知识和人才的可用性将至关重要。该中心应该依靠独立资金，并且可以处于这些辩论的中心，并向政府和欧盟提供政策建议，以促进量子素养，增加量子技术专家的数量，并提高对量子技术社会影响的认识。

此外，正如值得信赖的人工智能的经验所显示的那样，从早期阶段促进负责任的发展可以对芬兰量子应用的声誉产生积极影响，帮助制定欧洲和全球政策，并降低适应未来规定的成本以确保公平。此外，芬兰将处于这些讨论的最前沿地位，这可能转化为产业竞争优势。

五、结论

量子计算将在实现芬兰的创新雄心和管理数据流方面发挥关键作用。它将对推进人工智能能力、发展 6G 网络以及创建虚拟世界至关重要。随着这一领域的竞争日益激烈，芬兰与其他欧洲国家一样，将在国际合作方面需要仔细考虑如何以及与谁合作，同时也需要防范技术转移和外国对领先公司的收购。虽然芬兰公司已经在国外寻求资金，但技术转移的主要挑战可能来自与芬兰在国家利益或意识形态上有分歧的国家，他们寻求利用芬兰的创新为自己的利益服务。

因此，任何国家量子战略都不仅应着眼于使芬兰成为投资和创新的吸引力中心，还应着眼于促进芬兰的优势并保护其免受外国收购的技术。本文中提出的建议旨在支持芬兰发展竞争性的量子行业，吸引和留住人才，促进国际合作，推动负责任的量子技术发展，并防止关键公司落入外国手中。这些措施可以将芬兰定位为创新解决方案的测试场，这些解决方案可以在欧洲范围内扩展以满足全球需求。

在 2022 年，芬兰是唯一一个进入全球风险投资/私募股权投资量子初创企业前十名榜单的欧洲国家（麦肯锡，2023）。这清晰地反映了芬兰有望成为量子计算领域的全球领导者，进一步协调和明确公共投资将建立在学术、产业和

政府网络、研究卓越性以及获得 LUMI 尖端 HPC 技术等优势基础上。

随着国际竞争的加剧和越来越多的欧洲国家加入量子竞赛，了解量子计算作为基础技术，并表明优先发展量子创新可以帮助芬兰吸引必要的人才，并拥有足够的实力在其经济中产生积极的溢出效应，同时保持量子公司留在其国内。

不采取行动的成本太高，而成为早期行动者的时机即将结束。随着 2024 年新的国家加入量子竞赛以及新的量子技术交易和投资，制定国家量子战略，并加强主要利益相关者之间的更紧密合作，以及雄心勃勃的产业政策，是将芬兰置于全球量子竞赛前沿的必要步骤。

光子盒®
QUANTUMCHINA

作者简介

Andrea G. Rodríguez 是一家深科技咨询公司 PolicyPulse Hub 的执行经理兼创始人。她还领导着 ImpaQT，这是一个总部位于荷兰代夫特的量子技术公司联盟。在加入 ImpaQT 之前，她曾担任布鲁塞尔欧洲政策中心（EPC）的首席数字政策分析师，并在 CIDOB（巴塞罗那国际事务中心）担任首席研究员，研究欧盟数字议程和新兴技术。她曾连续三届为欧洲网络安全论坛提供咨询，并为参与制定北约 2030 年战略概念形成的专家组成员之一。她作为北约科学技术组织（NATO STO）的小组成员参与过北约事务。作为多次获奖者，2021 年，Cybervolunteers 基金会将她评为技术领域应关注的 13 位西班牙女性之一，该倡议得到了西班牙社会事务部和 2030 议程的支持。

光子盒
QUANTUMCHINA

附录 1：研究阶段和受访者

时间线	描述	位置
2023 年 9 月至 11 月	案头研究和资料汇编	布鲁塞尔
2023 年 11 月 7 日至 2023 年 11 月 9 日	访问丹麦和荷兰，并与相关行为者举行非正式会议	哥本哈根 阿姆斯特丹
2023 年 11 月 9 日至 2023 年 11 月 16 日	芬兰游学之旅	赫尔辛基/埃斯波
	与 VTT 会面	
	与 CSC 会面	
	与 IQM 会面	
	与 SITRA 会面	
	芬兰信息安全集群 （FISC）	
	芬兰就业和经济部	
2023 年 11 月 22 日至 2023 年 11 月 23 日	与 QUANTera 参与者的非正式会议	马德里
2023 年 12 月	与芬兰国家商务促进局的分析和在线会议	布鲁塞尔/在线
2024 年 1 月	同行评审、校对和定稿	马德里 布鲁塞尔
2024 年 1 月	向芬兰的利益攸关方和政策界介绍研究报告	埃斯波
2024 年 1 月/2 月	审查文件并纳入反馈意见	布鲁塞尔
2024 年 2 月 23 日	与阿尔托大学举行审查会议	在线
2024 年 3 月 1 日	与芬兰国家商务促进局的审查会议	在线

参考链接

[1]https://www.sitra.fi/en/publications/finland-in-the-race-for-quantum-advantage/#references