

基础科学发现如何促进新兴产业创新 ——来自2022年度诺贝尔物理学奖的启示

吴培熠¹, 霍佳鑫^{2,*}

(1. 北京航空航天大学人文社会科学学院, 北京 100191; 2. 中国科学技术发展战略研究院, 北京 100038)

摘要: 阿兰·阿斯佩 (Alain Aspect)、约翰·克劳泽 (John F Clauser) 和安东·塞林格 (Anton Zeilinger) 因“纠缠光子实验、证明贝尔不等式不成立和开创性的量子信息科学”共同获得了2022年诺贝尔物理学奖。本文回顾了三位诺贝尔物理学奖得主的成长经历与科学贡献, 介绍了中国在量子信息领域的发展历程, 进而为我国基础科学研究与新兴产业创新发展提供思考。

关键词: 量子信息, 诺贝尔物理学奖, 基础研究, 产业化

2022年10月4日, 瑞典皇家科学院决定将2022年的诺贝尔物理学奖授予法国物理学家阿兰·阿斯佩 (Alain Aspect)、美国物理学家约翰·克劳泽 (John F Clauser) 和奥地利物理学家安东·塞林格 (Anton Zeilinger), 以表彰他们为纠缠光子实验、证明贝尔不等式不成立和开创性的量子信息科学所作出的贡献。在获诺贝尔物理学奖之前, 三位科学家曾在2010年一起因对非局域量子纠缠的观察等实验而获得过沃尔夫物理学奖。

近二十年来, 量子理论在信息领域中的重要性逐步凸显, 其“在信息处理速度、信息安全性、信息容量、信息检测精度等方面将会发挥极大作用。^[1]”于是便诞生了一门新的交叉科学——量子信息学。

本次颁奖委员会在介绍获奖者工作时, 特别提到了中国科学家所做的工作, 这在一定程度上体现了中国在量子信息研究上的重要地位。本文主要关注三个问题: 本届诺贝尔物理学奖获得者

的科学贡献有哪些? 为什么说本届诺贝尔物理学奖背后有中国科学家的贡献? 回顾中国在量子信息领域的贡献对我国开展科技管理有哪些启示?

1. 诺贝尔物理学奖得主的成长经历和科学贡献

1.1 阿兰·阿斯佩 (Alain Aspect) 成长经历和科学贡献

阿兰·阿斯佩, 法国物理学家, 1947年出生于法国阿让, 毕业于法国卡尚高等师范学院。现任法国高等光学学校教授、巴黎综合理工学院教授, 查尔斯法布里实验室量子气体组研究员, 法国国家科学研究中心名誉研究主任。阿斯佩除诺贝尔物理学奖外还获得过法国国家科学研究中心金奖、沃尔夫物理学奖和爱因斯坦奖章。此外, 阿斯佩还是奥地利、比利时、法国、英国和美国的科学院院士。

1969年阿斯佩就通过聚合实验, 获得物理学

作者简介: 吴培熠, 男, 博士, 助理教授, 北京航空航天大学人文社会科学学院, 研究方向为公共管理、新兴技术治理。

霍佳鑫, 男, 博士, 中国科学技术发展战略研究院博士后, 研究方向为科学技术与社会, 科技政策。

* 通讯作者。

项目来源: 中国科协2022年度科技智库青年人才计划资助 (项目编号: 20220615ZZ07110305)。

“一级教师资格”并从奥赛大学获得物理学硕士学位，1983年从法国奥赛巴黎—南德大学获得博士学位^[2]。1971年至1974年，阿斯佩在喀麦隆服过兵役，退伍后担任巴黎高等师范学院的讲师。阿斯佩在研究生涯早期就开展了关于验证贝尔不等式的实验。1980年，他在撰写博士论文时通过“难以捉摸的贝尔不等式实验”证明了贝尔不等式的成立，说明了不存在关于局域隐变量的物理理论可以复制量子力学的每一个预测。进而表明纳森·罗森、波多尔斯基和爱因斯坦的量子力学反证法通常是在一定距离下的幽灵行为。事实上，当两个粒子相距任意大的距离时，这种反证法似乎实现了。

量子纠缠¹作为一种理论——被阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）所抛弃——当一个粒子一分为二时，两个新粒子的属性保持联系，就好像通过一根看不见的绳子，不管它们相距多远。直到1981年，阿斯佩和他的团队在实验中首次证明了这一现象，在12米（40英尺）的距离上，两个光子（光的单位）纠缠在一起。他的实验最终解决了爱因斯坦和尼尔斯·玻尔（Niels Henrik David Bohr）之间的争论。该实验为阿斯佩所谓的“第二次量子革命”铺平了道路。自此一系列新技术，包括量子计算、加密等开始登上历史舞台^[3]。

1985年，他接受了巴黎法兰西学院原子物理系的教职，之后成为夏尔·法布里光学研究所的高级科学家，后来担任原子光学小组的教授和负责人，并在巴黎理工学院担任教授。阿斯佩拥有着夺目的研究履历，在量子领域开创了多个第一，诸如在实验证明中排除测量站之间的亚光速通信，证明量子力学使可分离隐变量理论无效；通过实验证明单光子的波粒二象性；比较了相同条件下费米子和玻色子的汉伯里布朗-特维斯相关性；证明了超冷原子系统中

的安德森局域化^[4]。

1.2 约翰·克劳泽（John F Clauser）成长经历和科学贡献

约翰·克劳泽，美国理论和实验物理学家，1942年出生于美国加利福尼亚州帕萨迪纳，1964年获得加州理工学院物理学学士学位，1966年获得物理学硕士学位，1969年获得哥伦比亚大学物理学博士学位。

从1969年到1996年，他在劳伦斯伯克利国家实验室、劳伦斯利弗莫尔国家实验室和加州大学伯克利分校工作^[5]。1969年，受约翰·贝尔（John Bell）理论启发，他与迈克尔·霍恩（Michael Horne）、艾布纳·希蒙尼（Abner Shimony）和理查德·霍尔特（Richard Holt）一起首次提出了对局部隐变量理论的检验，并为这些理论提供了第一个实验上可检验的CHSH—贝尔定理预言，即克劳泽—霍恩—希莫尼—霍尔特（CHSH）不等式。1972年，他与斯图尔特·弗里德曼（Stuart Freedman）合作，对CHSH不等式的预测进行了实验。这是世界上第一次观察到非局域量子纠缠。1974年，他与迈克尔·霍恩合作，把局部实在论公式化为局部隐变量理论进行推广，并首次表明贝尔定理的推广为所有的局部实在论提供了严格的约束。这项工作引入了Clauser-Horne（CH）不等式，作为率先由局部实在论提出的完全通用的实验要求，直到2013年才通过测试。他还引入了“CH不增强假设”，据此CH不等式简化为CHSH不等式，由此相关的实验测试也限制了局部实在性。

克劳泽最重要的贡献是对量子力学基础的开拓，特别是CHSH不等式，首次实验证明非局域量子纠缠是真实的（弗里德曼—克劳泽），以及局域实在论的形成（克劳泽—霍恩）。1972年的Freedman-Clauser实验同样被认为足够重要，已经

¹ 量子纠缠是量子世界中一个典型现象，即一对处于量子纠缠态的粒子，即使相隔极远，当其中一个状态改变时，另一个状态也会即刻发生相应改变，这是量子非定域性的一种表现。

成为本科物理实验课程必做项目。

1.3 安东·塞林格 (Anton Zeilinger) 成长经历和科学贡献

安东·塞林格, 奥地利物理学家, 1945年出生于奥地利, 1971年在维也纳大学获得博士学位^[6]。曾担任奥地利物理学会主席, 现任奥地利科学院院长。主要研究领域是量子力学的基础实验, 重点是量子纠缠、量子干涉测量和量子信息。特别是对新颖的纠缠态及其在量子通信和量子计算中的应用研究。正如他在首届艾萨克·牛顿奖章的颁奖词中所提到的因其“对量子物理学基础的开创性概念和实验贡献而受到认可, 这些贡献已成为快速发展的量子信息领域的基石”。除今年的诺贝尔物理学奖外, 他还获得过萨托里乌斯奖、艾萨克·牛顿奖章、沃尔夫奖以及世界科学院的TWAS奖章。

塞林格目前是维也纳大学量子信息研究所物理学教授, 并且他还担任过包括麻省理工学院、慕尼黑工业大学、柏林洪堡大学、牛津大学和法兰西学院的客座教授。与此同时, 塞林格还是包括奥地利、中国、法国、德国、罗马尼亚、俄罗斯、乌克兰、英国和美国的科学院院士。塞林格作为著名的量子信息领域和量子力学基础的先驱, 实现了许多重要突破, 他以纠缠的实验和理论工作而闻名, 最著名的是多粒子纠缠态的实现、量子隐形传态、量子通信和密码学等。

值得一提的是, 塞林格与中国颇有渊源, 他有多位中国学生, 潘建伟院士就是其中之一。他积极推动中奥国际学术交流与合作, 尽可能为中国学者参加国际交流创造条件。不仅如此, 他还在中国科学技术大学、南京大学、西安交通大学担任名誉教授, 为中国青年学子在量子领域的研究提供帮助。塞林格的团队合作参与了中科院主导的洲际量子通信实验, 利用“墨子号”量子科学实验卫星, 在国际上第一次实现了北京—维也纳两地的量子保密通信, 成果入选2018年度国际物理学十大进展。

1.4 小结

三位科学家通过证明贝尔不等式不成立, 验证了量子力学的完备性。克劳泽提出可以证明贝尔不等式不成立的实验, 阿斯佩则弥补了克劳泽实验中的漏洞。塞林格通过更多地实验进行检验, 其团队还利用量子纠缠展示了量子隐态的传输。他们的工作开拓了量子信息科学的研究领域, 成为第二次量子信息革命的先驱。

2. 量子信息在中国的发展历程

量子力学的诞生深刻地改变了人类社会, 在20世纪推动社会发展的核能、激光、半导体等高科技都源于量子力学。中国对量子信息的关注始于20世纪80年代对量子光学研究, 根据对研究成果和技术应用的梳理, 可将中国量子信息发展划分为三个时期: 一是创新积累时期(2001年以前), 二是跟随创新时期(2001—2009年), 三是领跑创新时期(2009年至今)。

在20世纪, 中国已经出现了一些从理论物理、光学和实验物理学领域, 研究量子信息学的学者, 如王育竹、彭堃堦和郭光灿等。他们从自身的学科背景和研究领域出发, 从不同的角度关注并研究与量子信息有关的问题, 日后成为量子信息领域的带头人。

2000年以来, 在科学家的呼吁和推动下, 我国相继设立了一些与量子信息有关的实验室, 包括: 中国科学院量子光学重点实验室、中国科学院量子信息重点实验室、量子光学与光量子器件国家重点实验室等。智力资源的集聚和创新平台的建设为后来的赶超和超越发展奠定了基础。在量子通信领域, 郭光灿团队和潘建伟团队的研究实力逐渐凸显, 通过建立协同创新中心, 成立了技术公司推动成果转化, 在研究与应用领域齐头并进。

从2009年至今, 中国在量子通信技术领域不断取得进展, 发射“墨子号”量子科学实验卫星, 相继建成了芜湖量子政务网、合肥城域网

子通信试验示范网、济南量子通信城域网、京沪干线等，中国在量子信息领域的国际影响力不断提升。

2.1 创新积累时期（2001年以前）：学科布局与建制化

1983年8月，第五届国际量子光学会议在美国罗彻斯特大学召开的，共有8名中国人参会，其中包括：郭光灿、彭堃堦、谢长德、于良、陆启生五名访问学者和吴令安等三名研究生。他们一致认为量子光学，是光学乃整个物理学领域中有较强生命力的学科，在未来几十年内将会有重大的突破，中国在这个领域虽然在当时是一片空白，但是只要奋起直追，措施得力，就可以在这个新兴的领域做出中国人自己的贡献并获得一席之地。郭光灿、彭堃堦、吴令安、谢长德等人商定，回国之后要通力协作，组织和培养国内量子光学的队伍，为振兴中国的量子光学事业而齐心协力。这次小小的聚会成为中国量子光学和量子信息发展的里程碑。

郭光灿回国后的第一件事情就是兑现自己推动中国量子光学发展的诺言。1984年，他用中国科学技术大学资助的3000元在安徽琅琊山醉翁亭召集了全国首届量子光学会议，共有50多人参加^[7]。虽然大多与会者未曾开展过量子光学研究，很多人抱着尝新鲜的态度来参加了这次会议，但是这次会议成为了中国量子光学的起点。

经过近十年的发展，中国的量子光学已经初具规模，在国际和国内的影响力初步形成。1990年10月24日，在成都科学技术大学（后并入四川大学）举办的第四届全国量子光学会议上，中国物理学会常务理事会正式决定成立量子光学专业委员会，量子光学专业委员会挂靠在中国科技大学，曹昌祺担任主任，彭堃堦担任副主任委员、郭光灿担任副主任委员兼秘书长。在这次会议上，谭维翰做了大会报告，欧发、彭金生，和宁生、高锦月、何林生、曹昌琪等从事量子光学的前辈参加了这次会议，我

国量子光学领域的研究队伍慢慢壮大起来，学科也得以迅速发展，标志着中国量子光学事业从无到有的发展到了新的阶段^[8]。

后来成为中国量子通信领军人物的潘建伟，也在国外实现着自己的“量子梦”。他于1987年至1995年在中国科学技术大学学习，跟随张永德教授攻读硕士学位，先后获理论物理专业学士和硕士学位。1996年他赴奥地利学习，投身塞林格教授门下，三年后获维也纳大学实验物理博士学位，1999年至2001年在维也纳大学实验物理所从事博士后研究。潘建伟与荷兰学者波密斯特（Bouwmeester）等人合作，首次实现了未知量子态的远程传输，这是国际上首次在实验上成功地将一个量子态从甲地的光子传送到乙地的光子上，该成果发表于《自然》杂志。

2.2 跟随创新时期（2001—2009年）：基础研究与技术开发

“20世纪90年代，当量子信息作为一门新兴学科在国际学术界悄然萌芽时，郭光灿敏锐地意识到，这是极富有生命力的崭新发展方向，是中国可能在国际学术界占据一席之地的大好机遇。^[7]”2001年，经过多年“屡战屡败，屡败屡战”，郭光灿申请到科技部“量子通信和量子信息技术”“973”项目（现国家重点基础研究发展计划），这也是我国第一个量子信息领域的“973”项目。与当年推动量子光学的发展一样，郭光灿希望整合全国力量共同研究量子信息技术。

五年后，项目以优秀结题，不仅产出了一批出色的研究成果，而且在全国各地初步建立起了若干的研究基地，更为重要的是培养了一支杰出的科研团队，项目中的四位课题组长：郭光灿（2003年信息技术科学部），彭堃堦（2003年信息技术科学部），孙昌璞（2009年数学物理学部）和潘建伟（2011年数学物理学部）先后被评为中国科学院院士。2015年，课题组成员杜江峰也被评为中国科学院院士（数学物理学部），有

10多位年轻学术骨干后来作为首席科学家承担了科技部“973”项目, 这在整个学术界是一个非常罕见的现象。

量子通信技术的创新来源于量子信息科学的研究, 是科研和实践相互作用产生的。在量子通信的发展过程中经历了从基础研究到应用研究的过程。在世纪之交, 我国相继设立的一些与量子信息有关的实验室也开始从事技术的开发工作。2007年, 潘建伟团队在世界上首次实现了基于诱骗态方案的超过100km的光纤量子通信实验。2009年, 郭光灿团队在安徽省芜湖市建成世界上第一个“量子政务网”并投入了试运行。

经过20年的发展, 中国逐渐形成了几个主要的研究团队。分别是中国科技大学的郭光灿团队、潘建伟团队和杜江峰团队, 以及山西大学的彭堃堃团队, 各个团队在研究量子信息研究方面呈现你追我赶的架势。

2.3 领跑创新时期(2009年至今): 技术扩散与产业化

2016年8月, 我国自主研发的世界首个量子科学实验卫星——“墨子号”发射成功, 人类首次迈向真正意义上的卫星和地面之间的量子通信。

“墨子号”拥有三大科学任务: 星地量子纠缠分发及非定域性检验、星地量子密钥分发、星地量子隐形传态。“墨子号”的主要目标是: 一是做卫星和地面之间的量子通信; 二是能够通过卫星实现远距离的纠缠光子分发, 测试量子纠缠现象, 并在远距离地点之间对量子力学预言的非定域性进行检验; 三是做量子信息的远距离传送, 即量子隐形传态。尽管现在用光纤上网, 但量子通信的信号在光纤里传输一百公里之后, 99%的信号都损耗掉了。但是上天之后, 通过量子卫星则可以传播几百K的密钥, 大大提高量子保密通信的密钥分发数量^[9]。”

美国和欧洲在量子信息科学发展上一直处于领先地位, 但为什么这次是中国首发量子科学实验卫星? 潘建伟解释发射卫星是一个非常复

杂的过程, 需要一个非常庞大的团队来做, 例如卫星平台、空间光跟瞄、地面大型望远镜的接收等^[10]。除了科研团队之外, “墨子号”是由中科院上海技术物理研究所等将近十几个研究所, 几百人一起完成的。

此后, 随着国家的逐步重视, 整体布局, 我国量子信息技术发展进入快车道。2017年, 世界上第一条无线量子保密通信系统“京沪干线”建成。2020年, 中国墨子号无线量子科学实验室探测卫星在境内国际上率先完成了基于量子纠缠技术的千公里毫秒级无线量子密钥及时分发, 将以往基于地面无中继器的量子保密信息通信的量子空间探测距离精度提高了一个新的数量级^[11]。2021年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》规划中明确提出了组建量子信息领域的国家实验室, 持续加码量子信息技术, 保持我国在量子领域第一阵营中的地位, 提升我国未来科技竞争力。

3. 启示

通过分析2022年三位物理学诺贝尔奖得主的科学贡献, 并纵观我国在量子信息领域的发展历程, 可以发现基础科学发现促进或转化为新兴产业创新, 具有两个重要因素: 开放的国际化人才体系和有力的政府支持。我国在量子信息领域的发展经验, 可以为其他科技领域的发展提供启示。

关于国际化人才体系建设。一方面, 要优化教育特别是高等教育培养体系, 突破人才甄别选拔困境, 完善人才队伍培养和管理体制, 建立符合科技发展规律的人才发展机制。“完善科研人员评价和奖励制度, 以解决重大战略性科技问题的能力为标准, 强调长期考核和稳定资助, 给人才以用武之地。^[12]”另一方面, 在国际人才培养方面, 需要保持与国际科学界的友好关系, 加强科技人才交流沟通。既要继续支持留学生、访问学者赴国外学习, 也要引进高层次科技人才, 在

全球范围配置人才资源。

政府在研究制定政策支持基础上需要遵循创新规律，有针对性地提供相应政策支持。在创新过程的上游基础研究阶段，需要对理论创新进行持续投入；在创新的中游阶段，需要在国际科技发展趋势下，按照国家需求，鼓励关键核心技术突破；在创新过程的下游和应用开发阶段，需要对技术开发和原型生产、产业化进行支持，引导基础研究向经济应用发展，鼓励高校和科研机构与企业合作，将成果落地。

“随着科技的进步与行业竞争力的加剧，科研创新团队的发展受到的限制和压力越来越大，因此，科研创新团队的发展需要积极寻找外部合作的机会，获取政府、高校和各种社会机构的外界支持。^[13]”从基础研究到产业化需要建立一个整体连贯的科学研究架构和协调机制。这种机制建立可以分为三个阶段，一是基础研究的成果产出，二是基础研究成果向产业化过渡，三是产业化推广。在基础研究向产业化转化的过程中，主要面临两大挑战，一是基础研究的成果识别，二是如何支持基础研究向产业化过渡。

“基础研究是科学体系的源头，是所有技术问题的总机关，只有重视基础研究，才能永远保持自主创新的能力。^[14]”基础研究的推动主要依靠科学家兴趣与国家需求两种形式实现。对于基础研究成果多是以理论、假说的形式存在，在一定条件下存在难以证伪的现实局限性。那么对成果的选择可能会产生资源错配的情况。对于量子领域的研究如果不是早期王育竹、彭堃堦和郭光灿等学者兴趣与对科技发展趋势的研判，并进行持续的研究，很可能导致我国量子领域与国际差距越来越大，制约我国量子信息科学与技术的发展。

可见，对于基础研究的成果识别虽然具有难以预见性，但是也需要采用一些方法，对此李侠教授提出可以采用综合打分法，这种方法把理论的优点分为五个维度，“分别是准确性（accurate）、一致性（consistent）、广谱性

（broad scope）、简单性（simple）、成果丰富性（fruitful），这五项指标可以根据需要设定不同权重，然后计算得分，总分值最高的理论就是最好的理论。^[15]”尽可能筛选出颠覆性基础研究。

更为重要的是基础研究成果向产业化过渡阶段。研究成果需要契合科学发展趋势，也需要符合国家需求。基础研究的关键突破，离不开基础科学项目的支持和资助。与此同时，基础研究成果向产业化过渡，离不开灵活多样的政府支持。在产业应用层面，企业活动需要动用更灵活的政策工具，在政策层面率先缩短基础研究与新兴产业之间的链路。同时，通过开放创新环境，政府可以让企业获得更广泛的应用场景进行技术迭代，进而为我国科技创新探索新模式。

责任编辑：董阳 校对：王萌 李琦

参考文献

- [1] 郭光灿, 张昊, 王琴. 量子信息技术发展概况[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(03): 1-14.
- [2] John P. Rafferty [EB/OL]. [2022-10-23] <https://www.britannica.com/biography/Alain-Aspect>.
- [3] Alain Aspect. Nobel-winning father of quantum entanglement [EB/OL]. [2022-10-23] <https://phys.org/news/2022-10-alain-aspect-nobel-winning-father-quantum.html>
- [4] Alain Aspect [EB/OL]. [2022-10-23]. http://en.wikipedia.org/wiki/Alain_Aspect.
- [5] John P. Rafferty [EB/OL]. [2022-10-23] <https://www.britannica.com/biography/John-F-Clauser>.
- [6] Erik Gregersen [EB/OL]. [2022-10-23]. <https://www.britannica.com/biography/Anton-Zeilinger>.
- [7] 郝俊. “量子推手”郭光灿的科学品味[N]. 中国科学报, 2012-07-02.
- [8] 内部资料: 郭光灿《量子光学》学位课程的创立与建设.
- [9] 凤凰咨询. 潘建伟谈量子通信: 欢迎基于科

学实验的严肃质疑[EB/OL].(2016-09-02)[2022-10-23] https://ishare.ifeng.com/c/s/v002drNIOJ8Ph0ymumrCsJFVV6ubljCTnO8vgQIK-_68RVewWQiYznh--U7Wq4S8fKS5ZdWBZsekho0YjD2o0ubTXvwA_____.

[10] 陈伊凡, 潘建伟.这3个原因使中国成为量子卫星首发国家[EB/OL].(2016-08-24)[2022-10-23]https://news.ifeng.com/a/20160824/49832736_0.shtml.

[11] 李赓.量子通信技术研究现状[J].电子元件与信息技术, 2022,6(03):111-113.

[12] 马双, 陈凯华.美国基础研究体系: 主要

特征与经验启示[EB/OL].科学学研究:1-19.DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.20220623.001.

[13] 徐玫瑰, 韦浩然, 王冀宁.基于扎根理论的高水平创新团队发展环境研究[J].南京工业大学学报(社会科学版), 2019,18(6):101-110.

[14] 叶玉江.基础研究的新形势和新部署[J].中国基础科学, 2017,19(04):12-13.

[15] 李侠, 李双. 如何识别基础研究领域的颠覆性成果?[EB/OL].(2022-10-8)[2022-10-23] <https://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=829&do=blog&id=1355993>.

How does basic scientific discovery promote the innovation of emerging industries: Inspiration from the 2022 Nobel Prize in Physics

Wu Peiyi¹, Huo Jiabin^{2,*}

(1. School of Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.Chinese Academy of Science and Technology for Development, Beijing 100038, China)

Abstract: Alain Aspect, John F. Clauser and Anton Zeilinger won the Nobel Prize in Physics in 2022 for "entangled photon experiment, proof of Weibull inequality and pioneering quantum information science". This paper reviews the growth experiences and scientific contributions of three Nobel Prize winners in physics, introduces the development of quantum information science in China, and then provides some thoughts on the relationship between basic scientific research and innovation of emerging industries in China.

Key words: quantum information technology; Nobel Prize in Physics; basic research; industrialization