

2016年度国家自然科学奖推荐项目公示内容

一、项目名称

基于原子分子体系的量子信息处理基础研究

二、中国物理学会推荐意见

量子信息研究对于基础科学和信息技术应用都具有重要意义。在量子信息处理研究方面，国际上普遍面临着量子算法避错能力差，相干时间短，量子信息存储能力弱，量子比特制备、纠缠态浓缩及退相干抑制难度大，量子通信协议安全性低等关键科学问题。量子信息处理的体系较多，该项目基于原子分子体系，开展了独具特色的量子信息处理研究，在国际上实现了核磁共振算符空间的无退相干子空间，解决了量子算法在态空间避错能力差的问题；实现了单原子蓝失谐光阱，解决了传统光阱中单原子相干时间短的问题；实现了冷原子双色电磁诱导透明，提升了传统原子介质的量子信息存储能力；基于原子及组合体系，提出了量子比特制备、纠缠态浓缩、退相干抑制以及量子关联表征的多种新方案，为制备量子比特、抑制退相干开辟了新途径；提出了两路量子密码通信的新协议，提高了量子通信协议的安全性。

该项目发表的论文被国内外同行广泛引用，产生了良好的社会效益，提升了我国在量子信息研究领域的国际影响力。8篇代表性论文、20篇主要论文的总他引次分别为953次和1778次，代表性论文单篇最高他引217次。项目取得的成果推动了量子信息学科的发展，具有重大科学价值，部分成果曾于2009年获湖北省自然科学一等奖。

鉴于该项目的学术成就和国际影响，中国物理学会郑重推荐该项目申报国家自然科学二等奖。

三、项目简介

量子信息的研究对于国家安全及未来信息技术的发展极为重要，是近年来国际上的重要科学前沿之一。量子信息处理基础研究面临许多极具挑战性的关键科学问题，如量子算法在态空间避错能力差，单原子相干时间短，原子系综量子信息存储能力弱，量子比特制备方法少，纠缠态浓缩难度大，量子纠缠中的退相干效应严重，强耦合环境下的量子关联难以表征，两路量子通信协议安全性低等等，这些问题极大地制约了量子信息处理的研究进程。该项目基于原子分子体系，开展了量子信息处理基础研究，系统地解决了量子信息处理研究在量子纠缠体系制备、量子纠缠与退相干机理以及量子通信安全等方面亟待解决的上述关键科学问题，获得了重要科学发现，推动了量子信息学科的发展。

1. 实现了基于原子分子的独特量子信息处理实验体系。基于核磁共振体系

在算符空间实现了无退相干子空间，实验演示了其避错能力，解决了核磁共振量子算法在态空间避错能力差的问题，被国际同行认为是用核自旋体系率先实现无退相干子空间的重要实验之一；利用空间光调制器实现了单原子蓝失谐光阱，解决了传统红失谐光阱中单原子相干时间短的问题，为单原子量子逻辑门操控开辟了新途径；实验实现了冷原子双色电磁诱导透明体系，提升了传统电磁诱导透明原子系综的量子信息存储能力，被国际同行认为是同时减慢多频光子的方案，为实现多频慢光子间的量子纠缠奠定了基础。

2. 提出了基于原子、光子及其组合体系的量子纠缠制备与退相干抑制的实用方案。提出了基于空腔与原子结合体系的实现量子算法的多种新方案，其中基于超导量子干涉器件的方案被国际同行认为是成功结合超导量子比特与腔量子电动力学的实验方案之一；提出了基于线性光学元件和投影测量方法实现纠缠态浓缩的实用方案，研究结果被 *Nature* 等期刊论文大量引用；给出了耗散因子对绝热量子逻辑门影响的解析表达式，为在量子纠缠中抑制退相干提供了新思路；提出了在强耦合环境下表征量子关联的最佳方案，被国际同行认为是最早明确区分强耦合环境下失协与纠缠异同的重要工作之一。

3. 提出了更安全的两路量子通信新协议。发现了两路量子通信协议中存在的拒绝服务攻击漏洞，提出了针对“乒乓”协议的攻击方案并给出了修正后的协议，该拒绝服务攻击方案和修正协议被德国学者称为“蔡氏拒绝服务攻击”；提出了基于密集编码的两路量子密码通信协议和单光子两路量子通信协议，提高了通信光子的利用效率和通信协议的安全性，受到国内外同行的广泛关注。荣获 2008 年《中国物理快报》“最佳引用论文”和 2012 年中国物理学会“最有影响论文”一等奖。

共发表SCI论文232篇。8篇代表性论文被SCI论文他引852次、总他引953次，单篇最高SCI论文他引191次、最高总他引217次；20篇主要论文被SCI论文他引1585次，总他引1778次。被SCI论文他引超过134次的论文有6篇。项目成果于2009年获湖北省自然科学一等奖，获授权中国发明专利3件、美国发明专利1件。

四、客观评价

1. 发表论文及收录引用概况

该项目共发表SCI论文232篇。其中8篇代表性论文被*Nature*、*Nature Communications*、*Review of Modern Physics*、*Physical Review A*等SCI期刊论文他引852次、总他引953次，单篇代表性论文最高SCI论文他引191次、最高总他引217次；20篇主要论文被SCI论文他引1585次、总他引1778次；被SCI论文他引超过134次的主要论文有6篇。

2. 国际著名期刊和科学家的评价

2.1 对科学发现点1的评价

(1) 德国马普学会核物理研究所理论部主任Keitel教授领导的小组在发表于 *Physical Review A*, 2007 (IF 2.628) 的论文中, 将代表性论文1的基于核磁共振算符空间实现无消相干子空间的实验结果作为最早实现无消相干子空间的核自旋体系之一加以引用。

(2) 美国维斯康辛大学的Saffman教授(美国光学学会会士)和Walker教授(美国物理学会优秀审稿人)发表在 *Reviews of Modern Physics*, 2010 (IF 51.324) 上的关于里德堡原子量子信息的综述文章中, 评论代表性论文2实现单原子蓝失谐微型光阱时写到: “暗光阱中原子被约束在光强最弱的区域而非最强区域, 光子散射和运动退相干效应可以被有效地抑制……。几个研究组已经实现了这种暗光阱(……许鹏等, 2010)”。

(3) 西班牙马德里康普顿斯大学光学部主任Carreño教授发表在 *Physical Review A*, 2005 (IF 2.628) 上的文章对代表性论文3引证评论时写到: “由于 Λ 型或V型原子电磁诱导透明介质在近共振频率附件产生了陡的色散曲线, 已有方案来获得不同频率的慢光子。……王谨等人提出同时使用不同角频率的两驱动场的减慢光子的方案”。

2.2 对科学发现点2的评价

(1) 中国科学技术大学郭光灿院士(信息技术科学部院士)发表在 *Nature Communications*, 2010 (IF 11.904) 上的文章在对代表性论文6关于失协与纠缠的比较研究成果评价时写到: “研究已经聚焦在马尔可夫和非马尔可夫环境下的量子失协和纠缠动力学的比较”。

(2) 日本高等研究生院的 Nobuyuki Imoto 教授(美国物理学会终身会员)发表在 *Nature*, 2003 (IF 41.296) 上文章认为, 代表性论文5提出的方案是国际上实现了光子对纠缠的浓缩最早实验方案之一。

(3) 英国牛津大学量子物理专家Vedral教授等在 *Reviews of Modern Physics*, 2012 (IF 51.324) 上发表的综述文章中评论代表性论文6关于独立热库假设的方法时认为该论文“比较了洛仑兹耗散环境下两个无相互作用的量子比特间纠缠和失协的演化。提出了独立的热库假设”。

2.3 对科学发现点3的评价

(1) 德国明斯特大学的 Bostroem 和波茨坦大学的 Felbinge 在 *Physics Letters A*, 2008 (IF 1.627) 上发表的一篇关于“乒乓”协议安全性的综述性文章中, 专门用一个章节“3. 蔡氏拒绝服务攻击”的全部篇幅介绍代表性论文7提出的拒绝服务攻击方案和解决办法: “蔡庆宇提出了一种简单的攻击方案, 该方案有效且不会被发现, (窃听者) 也不会获得信息, 因此是一种拒绝服务攻击方案。……我们想指出的是, 如果对(蔡庆宇)的攻击方案稍加改进, 甚至可以使窃听者能够决定对信道上传输的哪些信息进行反转。这样, 窃听者可以让接受者接收到相反

的信息。……蔡也同时给出了一个简单的方案来防止类似的攻击，或者使用量子力学的策略，或者采用经典认证的方法，两者都是有效的。”。

(2) 波兰密茨凯维奇大学物理系副主任Wójcik教授在*Physical Review A*, 2007 (IF 2.628)上发表的文章认为，代表性论文8提出的协议是密集编码量子密码协议的一个成功范例：“我们最后强调，……蔡庆宇和李白文关于密集编码量子密码协议已经获得成功”。意大利国家电工研究所的Degiovanni认为代表性论文8提出的协议是安全的。

3. 在国际国内重要学术会议上做特邀报告

项目主要完成人（詹明生、蔡庆宇、冯芒）在国际国内会议上所作的部分大会邀请报告：

(1) 詹明生, Success stories from China: The road to quantum computing, The Second pan-European General Science Meeting (ESOF2006), July 15-19, 2006, Munich, Germany (特邀报告)

(2) 詹明生, Exact disentanglement of tripartite Entangled states, `2001 Internationnal Symposiumon Quantum Information, September 3-8, 2001, Huangshan, China (特邀报告)

(3) 蔡庆宇, 量子密码安全性理论研究, 第九届中国科协论坛, 2010年9月12日, 北京 (大会邀请报告)

(4) 冯芒, Quantum computation using diamond NV centers, The Britain-China Symposium for Solid-State Quantum Computation, April 9-11, 2009, Oxford, UK (大会邀请报告)

4. 获得的科技奖励

(1) 詹明生, 罗军, 蔡庆宇, 冯芒等, 量子计算的实验和理论研究, 2009年获湖北省自然科学一等奖 (湖北省人民政府)。

(2) 蔡庆宇等, 不使用纠缠的确定性安全通信 (Deterministic secure communication without using entanglement), 获 2008 年《中国物理快报》“最佳引用论文”。

(3) 蔡庆宇等, 不使用纠缠的确定性安全通信, 获 2012 年中国物理学会“最有影响论文奖”一等奖。

五、代表性论文目录

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响因子	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	SCI 他引 次数	他引 总数	知识 产权 是否 归国 内所 有
1	Realization of a decoherence-free subspace using multiple quantum coherences/Physical Review Letters/魏达秀, 罗军, 孙献平, 曾锡之, 詹明生, 刘买利	7.360	2005 年 95 卷 020501 页	2005 年 07 月 07 日	魏达秀, 刘买利	魏达秀 (在读 博士 生)	魏达秀 罗军 孙献平 曾锡之 詹明生 刘买利	11	12	是
2	Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap/Optics Letters/许鹏, 何晓东, 王谨, 詹明生	3.179	2010 年 35 卷 2164 页	2010 年 06 月 21 日	詹明生	许鹏 (在读 博士 生)	许鹏 何晓东 王谨 詹明生	40	61	是
3	Bichromatic electromagnetically induced transparency in cold rubidium atoms /Physical Review A/王谨, 朱一夫, 江开军, 詹明生	2.628	2003 年 68 卷 063810 页	2003 年 12 月 10 日	王谨	王谨	王谨 江开军 詹明生	52	57	是
4	Preparation of cluster states and W states with superconducting quantum-interference device qubits in cavity QED/Physical Review A/张小龙, 高克林, 冯芒	2.628	2006 年 74 卷 024303 页	2006 年 08 月 29 日	张小龙, 冯芒	张小龙 (在读 博士 生)	张小龙 高克林 冯芒	64	68	是
5	Practical scheme for entanglement concentration /Physical Review A/赵志, 潘建伟, 詹明生	2.628	2001 年 64 卷 014301 页	2001 年 06 月 04 日	未标注	赵志 (在读 博士 生)	赵志 潘建伟 詹明生	138	143	是
6	Non-Markovian effect on the quantum discord /Physical Review A/王波, 徐震宇, 陈泽乾, 冯芒	2.628	2010 年 81 卷 014101 页	2010 年 01 月 08 日	王波 冯芒	王波 (在读 博士 生)	王波 徐震宇 陈泽乾 冯芒	191	201	是

7	The Ping-Pong protocol can be attacked without eavesdropping/Physical Review Letters/蔡庆宇	7.360	2003 年 91 卷 109801 页	2003 年 09 月 02 日	蔡庆宇	蔡庆宇	蔡庆宇	171	194	是
8	Improving the capacity of the Bostrom-Felbinger protocol/Physical Review A/蔡庆宇, 李白文	2.628	2004 年 69 卷 054301 页	2004 年 05 月 10 日	蔡庆宇	蔡庆宇	蔡庆宇 李白文	185	217	是
合计								852	953	是

补充说明：代表性论文 5 未标注通讯作者。代表性论文 1, 2, 4, 5, 6 的第一作者当时为詹明生或冯芒的在读博士生。

承诺：上述论文专著用于推荐国家自然科学基金的情况，已征得未列入项目主要完成人的作者的同意。知识产权归国内所有，且不存在争议。

六、主要完成人情况表

1、姓名：詹明生

排名：1

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

完成单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

对本项目主要学术贡献：全面负责项目的总体设计，指导分工和协作，为本项目一、二项重要科学发现的主要贡献者。实现核磁共振体系了无退相干子空间；实现了单原子蓝失谐光阱和冷原子双色电磁诱导透明体系；提出纠缠态浓缩实用方案；是代表性论文1, 2, 3, 5和主要论文9, 13, 16的贡献者或通讯作者，是专利1, 2, 3, 4的发明人。

曾获国家科技奖励情况：无

2、姓名：蔡庆宇

排名：2

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

完成单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

对本项目主要学术贡献：为本项目第三项重要科学发现的主要贡献者。率先指出了两路量子通讯协议中存在拒绝服务攻击，提出了使用密集编码的两路量子通讯协议以及单光子（两态）两路量子密码通讯协议，并且证明这两个协议在理想信道下是安全的。是代表性论文7, 8和主要论文11, 12的第一作者和通讯作者。

曾获国家科技奖励情况：无

3、姓名：冯芒

排名：3

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

完成单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

对本项目主要学术贡献：为本项目第二项重要科学发现的主要贡献者。从宏观和微观两个方面着手，系统深入地研究了退相干的机理和对系统纠缠的影响，针对空腔体系（包括光学腔和微波腔）与原子（离子）体系结合的量子信息处理问题开展了系统的研究。是代表性论文4, 6和主要论文10, 14, 15, 17, 18, 19, 20的主要贡献者或通讯作者。

曾获国家科技奖励情况：无

4、姓名：罗军

排名：4

技术职称：副研究员

工作单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

完成单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

对本项目主要学术贡献：为本项目第一项重要科学发现的主要贡献者。理论上建议使用甲基的四个多量子相干构造逻辑量子位，以此构造了无退相干子空间，并用二维核磁共振技术进行了实验验证。是代表性论文1（附件1-1）的主要作者，是专利3, 4的发明人。

曾获国家科技奖励情况：无

5、姓名：王谨

排名：5

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

完成单位：中国科学院武汉物理与数学研究所

对本项目主要学术贡献：为本项目第一项重要科学发现的主要贡献者。率先实现了冷原子系综的双色电磁诱导透明，为同时实现多色光子的减速、多个慢光子间量子纠缠提供了可能。是代表性论文3的第一作者和通讯作者，代表性论文2的作者，是发明专利1, 2的发明人。

曾获国家科技奖励情况：无

七、完成人合作关系说明

在本项目起始至完成时间范围内，第一完成人詹明生分别与第二、三、四、五完成人在论文撰写、专利申请、项目申报、奖项申报等方面有着密切的合作关

系：第一完成人詹明生与第二完成人蔡庆宇通过论文合著、共同获奖的方式进行过密切合作；第一完成人詹明生与第三完成人冯芒通过共同立项的方式进行过密切合作；第一完成人詹明生与第四完成人罗军通过共同获奖、共同立项、论文合著、共同知识产权的方式进行过密切合作；第一完成人詹明生与第五完成人王谨通过论文合著、共同知识产权的方式进行过密切合作。