

## 2019 年国家自然科学奖项目提名

### 公示内容

#### 一、项目名称：原子气体玻色-爱因斯坦凝聚研究

#### 二、提名单位意见：

该项目致力于激光冷却原子实现玻色-爱因斯坦凝聚（简称 BEC）的研究，使中国成为少数最先实现 BEC 国家之一，取得如下系统性和创新性的研究成果：

- 1) 提出并建立玻色-爱因斯坦凝聚可积模型，预言分数量子涡旋态并被实验证实。
- 2) 提出有限温度量子隧穿的周期瞬子方法，发现非阿贝尔约瑟夫森效应。
- 3) 建立团簇动力学平均场理论，发现超逆流凝聚态。建立了光晶格中冷原子平台，提出了光晶格钟的理论模型，获得了影响精度的各种参数。

该项目 8 篇代表性论文被 SCI 他人引用 886 次，2 篇入选 ESI 高被引论文，1 篇入选 2009 年中国百篇最具影响国际学术论文。多个著名科学期刊如 Rev. Mod. Phys.、Phys. Rep.、Science、Nature 等发表专题评价他们的工作。2010 年被邀请在第 22 届国际原子物理学大会（ICAP）作大会报告，这是中国科学家第一次在这个大会上作邀请报告。项目建立了原子玻色-爱因斯坦凝聚基本理论，首创国内冷原子钟、原子芯片等核心技术，引领并推动了冷原子物理及精密测量相关领域的发展，获 2016 年北京市科学技术奖一等奖。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

### 三、项目简介（限 1 页，不超过 1200 字）：

该项目属物理学中的原子分子物理学领域。

激光冷却原子并实现玻色-爱因斯坦凝聚（简称 BEC）是 20 世纪末物理学的重大进展。1997 年以来已有 4 次诺贝尔物理学奖授予了与冷原子和精密测量相关的科学家（1997、2001、2012、2018 年）。超冷原子 BEC 具有独特的量子力学波动性、宏观量子相干性及人工可调控性，是研究量子力学基本问题的重要平台，对发展原子钟、原子芯片等高新技术具有战略意义，成为世界发达国家抢占的制高点。

(1). 提出并建立玻色-爱因斯坦凝聚可积模型，预言分数量子涡旋态并被实验证实。在国际上率先开展激光冷却原子的实验研究，使中国成为少数最先实现 BEC 的国家之一。提出超冷原子 BEC 相变的关键判据，得到诺贝尔奖获得者 C. E. Wieman 教授的高度评价。建立参数可调的 BEC 可积模型并得到精确解，这是冷原子多体薛定谔方程精确解的最早工作，第一次理论上定量地解释了 W. Ketterle 教授获得 2001 年诺贝尔奖的实验结果。预言旋量玻色-爱因斯坦凝聚体的分数涡旋态和涡旋晶格态，被韩国国立大学 Yong-il Shin 教授实验组证实。该系列工作被 3 篇 *Rev. Mod. Phys.* 综述论文大幅引用和肯定。

(2). 建立周期瞬子方法，发现非阿贝尔约瑟夫森效应。提出周期瞬子方法来计算在高、低能区都适用的有限温度量子隧穿，解决了量子力学基本理论中的一个难题。预言冷原子量子隧穿效应，被佛罗伦萨大学 G. M. Tino 教授实验验证。首先在国际上实现冷原子射频导引和原子芯片 BEC，得到诺贝尔奖获得者 W. Ketterle 教授的高度评价。

(3). 建立团簇动力学平均场理论，发现超逆流凝聚态。建造了可移动式冷原子小喷泉钟、超高精度空间冷原子钟，为超高精度空间时频网络及下一代空间导航系统奠定基础。建立了光晶格钟理论模型，发现镱原子光晶格钟可达到运转 137 亿年误差不足一秒的精度，比现有的铯原子钟精确 1000 倍，为光晶格钟奠定了基础，被 *Science* 等期刊专门评述，应诺贝尔奖获得者 C. Cohen-Tannoudji 教授邀请，撰写其主编《原子分子年鉴》第三章。

该成果 8 篇代表性论文包括 5 篇 *Phys. Rev. Lett.*，SCI 他引 886 次，2 篇入选 SCI 高被引论文，1 篇入选 2009 年中国百篇最具影响国际学术论文。被著名综述期刊 *Rev. Mod. Phys.*、*Phys. Rep.*、*Science*、*Nature* 等发表专题评价。应邀撰写中英文专著共 10 章。在重要国际学术会议作大会报告 50 次，其中 2010 年在第 22 届国际原子物理学大会作大会报告，这是中国科学家首次在这个大会上作邀请报告。该成果建立了原子 BEC 基本理论，发展了冷原子钟、原子芯片等高新技术，引领并推动了冷原子物理及精密测量相关领域的发展。

#### 四、客观评价：

国内外同行评价：

多个著名综述期刊例如 *Rev. Mod. Phys.*、*Phys. Rep.*、*Science* 等项目理论和实验研究发表专题评论。

(一)、提出并建立玻色-爱因斯坦凝聚可积模型，预言分数量子涡旋态并被实验证实的国际同行评价。该团队在国际上率先开展激光冷却原子的研究，使中国成为少数最先实现玻色-爱因斯坦凝聚（简称 BEC）的国家之一（*Chin. Phys. Lett.* 20(2003)799）。在实现玻色-爱因斯坦凝聚的初期，判断发生凝聚是一个重要问题。他们的实验给出了新的相变判据（Wenxian Zhang, Z. Xu, L. You, “The sudden shrinking of the average length, as observed in an earlier experiment by Wang et al. (*Chin. Phys. Lett.* 20, 799 (2003))”, is shown to be a good indication for Bose-Einstein condensation”, *Phys. Rev.* 72, 053627 (2005)）。2001 年诺贝尔物理学奖获得者 Wiemann 教授评论了他们的实验：“实现玻色-爱因斯坦凝聚在任何一个实验室都是一个挑战”。

预言旋量 BEC 分数涡旋态（代表性论文 2，简称论文 2），被韩国国立大学 Yong-il Shin 教授实验证实（他人引用代表性引文 1 和 2，简称引文 1 和 2）。2012 年 Y. Kawaguchi 等人发表在 *Phys. Rep.* 上的综述文章引用了他们 4 篇系列文章（包括论文 1，6），认为这是一种新的拓扑量子态，开创了高自旋涡旋态研究的新领域（引文 3）。

建立新的 BEC 可积模型并利用 BEC 产生调幅和调频的原子激光（论文 1，3），被认为是关于 Feshbach 共振条件下 BEC 及其稳定性的最早工作之一，引发了新的理论和实验研究（证明材料），被 SCI 他引 280 次，入选 SCI 高被引论文，也是迄今为止中国在冷原子领域被 SCI 引用最高的论文之一。2000 年 C. K. Law 等人利用他们的精确解研究了凝聚体的 Dressed 态（引文 4）。2007 年 L. S. Cederbaum 等人利用精确解研究了不同类凝聚体的干涉（引文 5）。

(二)、建立周期瞬子方法，发现非阿贝尔约瑟夫森效应的国际同行评价。2005 年首先在国际上提出高频势阱方案并实现冷原子射频导引和原子芯片 BEC，获得了具有自主知识产权的原子芯片（*Chin. Phys. Lett.* 22(2005)2526），达到了国际先进水平（证明材料），得到了 2001 年诺贝尔物理学奖获得者 W. Ketterle 教授的高度评价：“中国同行的工作令人印象深刻”（国附件 31，32）。

提出在高、低能区都适用的计算量子隧穿的周期瞬子方法，使有限温度量子隧穿的计算变为可能，解决了量子力学基本理论中的一个难题（论文 5）。2006 年出版的德国 Kaiserslautern 大学 H.J.W. Muller-Kirsten 教授的量子力学教程（*Introduction to Quantum Mechanics: Schrodinger Equation and Path Integral*,

World Scientific, 2006), 有四章共 161 页专门论述该方法。这一新理论立即带来了新发现, 例如预言了光晶格中冷原子的量子隧穿, 被佛罗伦斯大学 G.M. Tino 教授的实验证实(引文 5)。

发现光学势中非 Abelian Josephson 效应(论文 6)被 2012 年 Y. Kawaguchi 等人发表在 Phys. Rep. 上综述文章的高度评价(引文 3)。发现光子的约瑟夫森效应及设计的相干光子干涉器件(论文 7)被 2009 年 2 月 4 日 Nature China 对其作为亮点给予了高度评价。编辑 Felix Cheung 专门写了一篇文章“量子光学: 约瑟夫森效应”, 认为这项工作有助于实现未来的量子器件(附件 30)。2010 年, 第 22 届国际原子物理学会议邀请刘伍明作大会报告, 这是中国科学家第一次在这个国际大会上作报告。

(三)、建立团簇动力学平均场理论, 发现超逆流凝聚态的国际同行评价。建造了可移动式冷原子小喷泉钟、超高精度空间冷原子钟(Chin. Phys. Lett. 21(2004)57; CPL 22(2005)1645)。建立了光晶格钟理论模型, 为冷原子光晶格钟奠定了基础。光学微腔阵列中极化光子的逆超流凝聚态(论文 8)被苏黎世高工 S. Schmidt 教授等人认为开辟了研究强关联效应和新奇量子态的方向(引文 8), 被 2008 年德国 Michael J. Hartmann 教授等人的综述文章(引文 10)用整个章节介绍, 特别强调: 此文给强关联领域的研究开辟了一条全新的道路。2009 年在第六届全球华人物理大会做特邀报告, 并应 1997 年诺贝尔物理奖获得者 C. Cohen-Tannoudji 教授邀请, 撰写其主编《原子分子年鉴》第三章“光晶格中冷原子的量子相变”。2006 年墨尔本大学 L. C. L. Hollenberg 教授等人发表在 Nature Physics 2(2006)856 的文章认为他们光晶格中冷原子相变的工作(Phys. Rev. A 70(2004) 045602)可以推广到玻色-费米混合系统、激子凝聚系统和极化子凝聚系统, 并特别强调其在偶极玻色子研究的重要作用。

### 科技查新:

2018 年 12 月 15 日中科院情报中心对该成果的 8 篇代表性论文进行了检索: 8 篇代表性论文被 SCI 他人引用 886 次。

五、代表性论文专著目录：（不超过 8 篇）

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 年月 日	通讯作者	第一作 者	国内 作者	SCI 他引次 数	他引总 次数	知识 产权 是否 归国 内所 有
1	Dynamical creation of fractionalized vortices and vortex lattices / Phys. Rev. Lett. / 纪安春, 刘伍明, 宋军亮, 周飞	2008 年 101 卷 010402-1 -010402-4 页	2008 年 7 月 4 日	刘伍明	纪安春	纪安春, 刘伍明, 宋军亮, 周飞	118		是
2	Exact soliton solutions and nonlinear modulation instability in spinor Bose-Einstein condensates / Phys. Rev. A / 李禄, 李再东,	2005 年 72 卷 033611-1 -033611-11 页	2005 年 9 月 14 日	刘伍明	L. Li	李禄, 李再东, 刘伍明	122		是

	B. A. Malomed , D. Mihalache, 刘伍明								
3	Dynamics of a bright soliton in Bose- Einstein condensates with time-dependent atomic scattering length in an expulsive parabolic potential / Phys. Rev. Lett. / 梁兆新, 张志东, 刘伍明	2005 年 94 卷 050402-1 -050402-4 页	2005 年 2 月 9 日	刘伍明	梁兆新	梁兆新, 张志东, 刘伍明	305		是
4	Quantized quasi-two-dimensional Bose-Einstein condensates with spatially modulated nonlinearity / Phys. Rev. A/ 王灯山, 胡兴华, 胡江平, 刘伍明	2010 年 71 卷 025604-1 -0255604-5 页	2010 年 5 月 19 日	刘 伍 明	王灯山	王灯山, 胡兴华, 胡江平, 刘伍明	82		是

5	Non-Abelian Josephson effect between two $F = 2$ spinor Bose-Einstein condensates in double optical traps / Phys. Rev. Lett. / 齐然, 余小鲁, 李志兵, 刘伍明	2009 年 102 卷 185301-1 -185301-4 页	2009 年 5 月 4 日	刘伍明	齐燃	齐燃, 余小鲁, 李志兵, 刘伍明	77		是
6	Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities / Phys. Rev. Lett. / 纪安春, 孙青, 谢心澄, 刘伍明	2009 年 102 卷 023602-1 -023602-4 页	2009 年 1 月 15 日	刘伍明	纪安春	纪安春, 孙 青, 谢心澄, 刘伍明	74		是
7	Quantum magnetic dynamics of polarized light in arrays of microcavities / Phys. Rev. Lett. / 纪安春, 谢心澄, 刘伍明	2007 年 99 卷 183602-1 -183602-4 页	2007 年 11 月 1 日	刘伍明	纪安春	纪安春, 谢心澄, 刘伍明	97		是

8	Quantum phase transition of two-component Bose-Einstein condensates in optical lattices / Phys. Lett. A / 韩玖荣，张涛，王育竹，刘伍明	2004 年 332 卷 131 -140 页	2004 年 11 月 8 日	刘伍明	韩玖荣	韩玖荣， 张涛， 王育竹， 刘伍明	11		是
---	--	----------------------------------	-----------------------	-----	-----	----------------------------	----	--	---



**六、主要完成人情况（不超过 5 人）：**

姓名	排名	职务	职称	工作单位	完成单位	对该项目技术创造性贡献
刘伍明	1	课题组长	研究员	中国科学院物理研究所	中国科学院物理研究所	该项目的负责人和主要完成人。提出项目的关键学术思想，在物理概念、理论、计算方法的建立和结果分析等方面进行了系统的工作，亲自参与完成并做出了创造性贡献，是代表性论文 1-8 的通讯作者（8 篇代表性论文的第一作者均为他的研究生、联合培养研究生和博士后）。对重要发现的 (1) (2) (3) 都有重要贡献
王育竹	2	课题组长	研究员	中国科学院上海光学精密机械研究所	中国科学院上海光学精密机械研究所	该项目的负责人和主要完成人之一。在物理概念、实验方法的提出和结果分析等方面进行了系统的工作。第 8 篇代表性论文的通讯作者。对重要科学发现点 (1)、(2)、(3) 都有突出贡献。
纪安春	3	无	教授	首都师范大学	中国科学院物理研究所	该项目的主要完成人。在物理概念、理论、计算方法的建立和结果分析等方面进行了系统的工作，亲自参与完成并做出了创造性贡献，是代表性论文 1、6、7 的第一作者。对重要科学发现点 (1)、(2)、(3) 都有重要贡献。
张志东	4	研究部主任	研究员	中国科学院金属研究所	中国科学院金属研究所	该项目的主要完成人。在物理概念、理论、计算方法的建立和结果分析等方面进行了系统的工作，亲自参与完成并做出了创造性贡献。是代表性论文 3 的通讯作者。对重要科学发现点 (1)、(2)、(3) 都有重要贡献。
齐燃	5	无	副教授	中国人民大学	中国科学院物理研究所	该项目的主要完成人。在物理概念、实验方法的提出和结果分析等方面进行了系统的工作。第 7 篇代表性论文的第一作者。对重要科学发现点 (1)、(2)、(3) 都有突出贡献。

## 七、完成人合作关系说明：

刘伍明研究员作为项目负责人和主要完成人，提出本项目的关键学术思想，在物理概念、理论、计算方法的建立，实验指导和结果分析等方面进行了系统全面的工作，亲自领导完成并做出了创造性贡献，是代表性论文 1-8 通讯作者（8 篇代表性论文的第一作者均为他的研究生、联合培养研究生和博士后）。第二完成人王育竹院士负责设计并完成了本项目的主要实验，联合指导博士研究生韩玖荣完成了代表性论文 8。第三完成人纪安春教授发表的代表性文章均是其在刘伍明研究员的实验室作博士后期间完成。第四完成人张志东研究员与第一完成人刘伍明研究员联合指导博士研究生梁兆新完成了代表性论文 3。第五完成人齐燃副教授在第一完成人刘伍明研究员指导下完成了代表性论文 7。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者（项目排名）	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	获奖	刘伍明（1），王育竹（2），纪安春（3），张志东（4），齐燃（8）	全程	北京市科学技术奖一等奖	证书（附件 20）	
2	论文合著	刘伍明（1），纪安春（3）	全程	Dynamical creation of fractionalized vortices and vortex lattices, Phys. Rev. Lett. 101, 010402 (2008).	论文（附件 1）	
3	论文合著	刘伍明（1），张志东（4）	全程	Dynamics of a bright soliton in Bose-Einstein condensates with time-dependent atomic scattering length in an expulsive parabolic potential, Phys. Rev. Lett. 94, 050402 (2005).	论文（附件 3）	
4	论文合著	刘伍明（1），齐燃（5）	全程	Non-Abelian Josephson effect between two F=2 spinor Bose-Einstein condensates in double optical traps, Phys. Rev. Lett. 102, 185301 (2009).	论文（附件 5）	

5	论 文 合著	刘伍明（1）， 纪安春（3）	全程	Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities, Phys. Rev. Lett. 102, 023602 (2009).	论文 (附件 6)	
6	论 文 合著	刘伍明（1）， 纪安春（3）	全程	Quantum magnetic dynamics of polarized light in arrays of microcavities, Phys. Rev. Lett. 99, 183602 (2007).	论文 (附件 7)	
7	论 文 合著	刘伍明（1） 王育竹（2），	全程	Quantum phase transition of two-component Bose-Einstein condensates in optical lattices, Phys. Lett. A 332, 131 (2004).	论文 (附件 8)	