



申请代码	A040309
接收部门	
收件日期	
接收编号	1187040159



1187040159

国家自然科学基金 申请书

(2018版)

资助类别: 面上项目

亚类说明:

附注说明:

项目名称: 超冷原子的超快电偶极操控

申请人: 吴赛骏 电话: 02165642239

依托单位: 复旦大学

通讯地址: 复旦大学物理系, 邯郸路220号

邮政编码: 200433 单位电话: 021-65642662

电子邮箱: sai junwu@fudan.edu.cn

申报日期: 2018年02月23日

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	吴赛骏	性别	男	出生年月	1977年01月	民族	汉族
	学位	博士	职称	研究员	每年工作时间(月)	9		
	是否在站博士后	否		电子邮箱	saijunwu@fudan.edu.cn			
	电话	02165642239		国别或地区	中国			
	个人通讯地址	复旦大学物理系, 邯郸路220号						
	工作单位	复旦大学/物理学系						
	主要研究领域	超冷原子, 量子光学						
依托单位信息	名称	复旦大学						
	联系人	王浩	电子邮箱	hao.wang@fudan.edu.cn				
	电话	021-65642662	网站地址	http://dst.fudan.edu.cn				
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	超冷原子的超快电偶极操控						
	英文名称	Ultrafast electric-dipole control of ultracold atoms						
	资助类别	面上项目			亚类说明			
	附注说明							
	申请代码	A040309. 冷原子分子物理			A040408. 量子光学和量子信息			
	基地类别	应用表面物理国家重点实验室						
	研究期限	2019年01月01日 -- 2022年12月31日			研究方向: 超冷量子气体			
	申请直接费用	110.0000万元						
中文关键词	超冷原子; 超快调控; 亚辐射; 偶极相互作用; 原子干涉							
英文关键词	ultracold atoms; ultrafast control; sub-radiance; dipolar interaction; atom interferometry							



中文摘要	<p>超冷原子简并气体不仅是优秀的量子模拟平台，也是理想的量子光学媒介。高密度超冷原子的集体激发可形成著名的Dicke超辐射态和亚辐射态，前者有助于原子系集和自由光场的高效耦合，而后者不仅蕴涵丰富的偶极相互作用多体物理，也为光存储和光子-光子相互作用提供了崭新的机制。我们计划结合新近发展的任意波形亚纳秒脉冲光电偶极调控技术，对自由空间和光晶格中的简并波色气体实现集体光激发和超快相位调制，运用光晶格势抑制密度涨落导致的亚辐射态消相干，研究并有效操控强光学跃迁集体电偶极激发的频谱和辐射特性。我们的目标是发展光晶格气体亚辐射和超辐射集体偶极激发模式的光学操控及超快转换方法，拓展超冷原子气体作为高带宽非线性量子光学媒介的应用前景。本研究的相位调制技术将同时应用于简并气体原子干涉实验。</p>
英文摘要	<p>Degenerate gas of ultracold atoms serves not only as an excellent platform for quantum simulation but also as an ideal quantum optical medium. In particular, collective optical excitation of high-density gases emerges into the renowned Dicke super- and sub-radiant states. The former can collectively enhance the coupling between atomic ensemble and free-space light. The latter is not only encoded with rich dipolar many-body physics but also provides a novel quantum memory for photon storage and interactions. We plan to combine the newly developed arbitrary waveform sub-nanosecond light pulse control technique and to realize high-efficiency optical excitation and ultrafast phase modulation of degenerate gases in optical lattices, so as to control and manipulate collective electric dipole excitation for strong optical transitions. Our goal is to develop ultrafast optical methods envisaged by Scully for efficient control of and conversion between super- and sub-radiant optical modes in densely populated optical lattices. The success of this project would extend the prospect of ultracold atoms as a broadband quantum nonlinear optical medium. The ultrafast phase modulation technique will also be used for atom interferometry with degenerate gases.</p>



项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职称	学位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作时间（月）
1	何亦尊	1994-01-16	男	博士生	学士	复旦大学	65642239	yzhe16@fudan.edu.cn	440106199401160395	10
2	裘李阳	1994-04-03	男	博士生	学士	复旦大学	65642239	lyqiu16@fudan.edu.cn	330602199404030015	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
3	1				2	



国家自然科学基金项目资金预算表 (定额补助)

项目编号: 1187040159

项目负责人: 吴赛骏

金额单位: 万元

序号	科目名称	金额
	(1)	(2)
1	一、项目直接费用	110.0000
2	1、设备费	23.6000
3	(1)设备购置费	14.60
4	(2)设备试制费	9.00
5	(3)设备改造与租赁费	0.0000
6	2、材料费	22.40
7	3、测试化验加工费	2.00
8	4、燃料动力费	2.00
9	5、差旅/会议/国际合作与交流费	10.00
10	6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	6.00
11	7、劳务费	42.00
12	8、专家咨询费	2.00
13	9、其他支出	0.0000
14	二、自筹资金来源	0.0000



预算说明书（定额补助）

（请按《国家自然科学基金项目资金预算表编制说明》中的要求，对各项支出的主要用途和测算理由及合作研究外拨资金、单价 ≥ 10 万元的设备费等内容进行详细说明，可根据需要另加附页。）

1. 设备费 (23.6 万)

1a. 795 nm 外腔式激光器及配件（北京优力光泰）(8 万)

其中：激光器及控制器 6 万
光隔离器及锁频配件 2 万

1b. 795nm 锥形放大系统及配件（北京优力光泰）(6.6 万)

其中：激光器放大器及控制器 5 万
光隔离器 1.6 万

1c. 任意波形电光调制系统升级（试制，9 万）

高频微波源一台：3 万

微波放大器一台：3 万

高频线缆，混频器，衰减器等：3 万

2. 材料费 (22.4 万)

基本光学机械结构（面包板，支撑架等，大恒），2000 元/件，10 件，2 万元

高稳定性光学调节架，移动平台 3000 元/件 (Thorlabs, 大恒)，20 件，6 万元

高精度光学元件，透镜，反射镜 (Thorlabs, 大恒)：1200 元/件，20 件，2.4 万元

基本光纤光学元件，3000 元/套 (Thorlabs, 大恒)，10 套，3 万元

基本偏振光学元件，3000 元/件 (Thorlabs, 大恒)，20 件，6 万元

激光器二极管更换，3 件，3 万

3. 测试化验加工费 (2 万元)

离子束曝光表面加工（复旦大学），2000 元/小时，10 小时，2 万元

增透镀膜（武汉优光或者福建华科），5000 元/批，1 批，0.5 万元

4. 燃料动力费 (2 万)

2 万元，用于新实验室净化所需的动力和运行费用。

5. 差旅/会议/国际合作与交流费 (10 万元)

主要包括通过每年派遣学生参加重要国内国际会议及和知名实验室的交流。

6. 出版/文献/信息传播/知识产权事务费 (6 万元)



7.劳务费（42万）

劳务费科目中列支。

博士生补贴：2000元/人/月，80人月，16万元

博士后津贴：12000元/人/月，20人元，24万元

访问学者补贴：2万元/人/月，1人月，2万元

8.专家咨询费（2万）

9.其他支出

无

NSFC 2018



报告正文

参照以下提纲撰写,要求内容翔实、清晰,层次分明,标题突出。
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

(一) 立项依据与研究内容 (建议 8000 字以下):

1. 项目的立项依据 (研究意义、国内外研究现状及发展动态分析,需结合科学研究发展趋势来论述科学意义;或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录);

从 Fraunhofer 发现日冕吸收谱线到氢原子 Lamb 移动的精确测量,人类对光和原子相互作用的探究是现代物理大厦建成的重要推动。孤立原子是理想的量子力学体系,其和光场耦合极高的品质因子不仅保证了原子光谱的精密性,也为光对孤立原子的精确自由操控提供了可能。当代量子技术中实用化的激光冷却技术[1],原子钟/磁强计等精密原子光谱技术[2],原子干涉技术等[3],本质上均基于光对孤立原子的操控和探测。另一方面,在物理学家更期待的“下一代”量子技术,如量子计算,量子模拟,基于量子重复器件的高速量子通讯等方面,其关键性物理框架之一是光(“飞行量子比特”)和多原子体系(“非线性量子内存”)的集体相互作用。著名案例如基于暗态极化的拉曼光存储方案[4],DLCZ 远程量子纠缠通讯方案等[5],均运用拉曼超辐射实现原子系宗集体激发和自由空间单模光场的强耦合。

多原子体系的超辐射和亚辐射理论[6]自 1954 年由 R. H. Dicke 提出后,大量的理论和实验研究阐明了其机制及在热原子系宗中的局限。本世纪初 Lukin, Fleischhauer, Zoller, Duan, Yelin 等将偶极 Dicke 态拓展到双光子拉曼领域,大大增加了多原子集体辐射的可控性。近年来,随着激光冷却和超冷原子技术的发展,实验室制备的近简并原子系宗最终可以逼近高密度,无多普勒展宽的电偶极集体辐射理论模型。人们首次在冷原子中观察到 Scully 提出的时序-超辐射 Dicke 态和亚辐射态[7,8],在光晶格超冷碱土金属中实现亚辐射光激发等[9]。在理论方面,Adams, Yelin 等发现二维光晶格和单模光场令人惊讶的高效强耦合[10], Kimble, Chang 等系统发展了亚波长光晶格集体光激发理论[11]。Lukin, Rey 等发现亚波长光晶格体系可自然实现自旋轨道耦合的拓



扑偶极激发等[12]。总体来说，亚波长超冷光晶格和近场偶极耦合的量子光学媒介在耦合强度和可控性上大大超出传统的基于混沌原子系宗和平均场效应的量子光学媒介，其集体激发模式的设计、制备和操控是未来数年超冷原子和量子光学结合的重要发展方向。

本项目计划研究高密度冷原子的集体电偶极跃迁响应。光学波段的单电子电偶极跃迁是强光学跃迁，是中性原子和光相互作用的最基本形式。受限于短至数十纳秒的自然线宽寿命，此前在强光学跃迁上多原子集体响应的精密调控实验工作并不多见，有限的工作包括近期的时序-Dicke 态及亚辐射态在冷原子系宗中的激发和观测[8]，另香港科技大学杜胜望老师组在波形可控单光子吸收和辐射方面也做出了优秀的工作[13]等。不同于拉曼和窄线宽跃迁，在电偶极跃迁上对多原子体系的集体光学响应的操控需要亚纳秒的控制和测量带宽。常规声光/电光调制器在这个时间尺度上工作并不理想，而锁模激光不仅带宽过大，且尚缺乏纳秒尺度上的波形可控性。近来光纤通讯领域发展出来的光纤电光调制技术虽有 10 GHz 级带宽，然而调制激光输出功率较低($<10\text{mW}$)，应用仅限于弱激发及线性响应探测[8, 13]。而在强光学跃迁上实现真正的多体偶极操控，特别是诸如 Scully 近期提出的[14] 基于超辐射/亚辐射超快转换的量子光学界面，需要在纳秒尺度上实现对多体原子光学响应的容错操控，而其在超冷原子体系中的实现将拓展量子光学和超冷原子技术发展。从长远来说，可辅助实现基于亚辐射态的自由空间高速(GHz)光存储，新型单光子级非线性光学和超冷原子偶极气体等，并推动包括量子精密测量在内的实用量子技术的发展。

[1] 例如: J. Hu 等., *Science* 358, 1078–1080 (2017); Kozyryev 等, *Phys. Rev. Lett.* 120, 063205, 2018

[2] 例如: D. Sheng 等, *Phys. Rev. Lett.* 110.160802, 2013; R. Li 等, *Chinese Phys. B* 26, 120702, 2017.

[3] 例如: P. Asenbaum 等, *Phys. Rev. Lett.* 118.183602, 2017; Duan 等, *Physical Review Letters*, 117, 023001, 2016.

[4] M. D. Lukin 等., *Phys. Rev. Lett.* 84, 4232, 2000; M. Fleischhauer, M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* 84, 5094, 2000.

[5] L. Duan 等, *Nature*, 414, 413, 2001; Z. Yuan 等, *Nature*, 454, 1098, 2009; K. Hammerer 等, *Rev. Mod Phys.* 82, 1041, 2010.



- [6] R. H. Dicke, Coherence in spontaneous radiation processes, *Phys. Rev.* 93, 99 (1954)
- [7] M. Scully 等, Directed Spontaneous Emission from an Extended Ensemble of N Atoms: Timing Is Everything, *Phys. Rev. Lett.*, 96, 010501, 2006;
- [8] C. C. Kwong 等, Cooperative Emission of a Coherent Superflash of Light, *Phys. Rev. Lett.* 113, 223601, 2014; M. O. Araújo 等, Superradiance in a Large and Dilute Cloud of Cold Atoms in the Linear-Optics Regime, *Phys. Rev. Lett.* 117, 073002, 2016; W. Guerin 等 Subradiance in a Large Cloud of Cold Atoms, *Phys. Rev. Lett.* 116, 083601, 2016.
- [9] Yosuke Takasu 等, Controlled Production of Subradiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice, *Phys. Rev. Lett.*, 108, 173002, 2012; B. H. McGuyer, T. Zelevinsky 等 Precise study of asymptotic physics with subradiant ultracold molecules, *Nature Physics*, 11, 32, 2014.
- [10] Bettles, Adams 等, Enhanced Optical Cross Section via Collective Coupling of Atomic Dipoles in a 2D Array, *Phys. Rev. Lett.* 116, 103602, 2016; Shahmoon, S. Yelin 等, Cooperative Resonances in Light Scattering from Two-Dimensional Atomic Arrays, *Phys. Rev. Lett.* 118, 113601, 2017.
- [11] A. Asenjo-Garcia, H. J. Kimble, D. E. Chang 等, Exponential Improvement in Photon Storage Fidelities Using Subradiance and “Selective Radiance” in Atomic Arrays, *Phys. Rev. X*, 7, 031024, 2017;
- [12] S. Syzranov, M. Rey 等, Emergent Weyl excitations in systems of polar particles, *Nature Communications*, 7, 13543, 2016; Perczel, Lukin 等, Topological Quantum Optics in Two-Dimensional Atomic Arrays, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 023603, 2017.
- [13] S. Zhang 等, Coherent control of single-photon absorption and reemission in a two-level atomic ensemble, *Phys. Rev. Lett.* 109, 263601, 2012;
- [14] M. Scully, Single Photon Subradiance: Quantum Control of Spontaneous Emission and Ultrafast Readout, *Phys. Rev. Lett.* 115, 243602, 2015.
- [15] M. Hebenstreit 等, Subradiance via Entanglement in Atoms with Several Independent Decay Channels, *Phys. Rev. Lett.* 118, 143602, 2017.
- [16] M. Horvath 等, Above-threshold scattering about a Feshbach resonance for ultracold atoms in an optical collider, *Nature Comm.* 8, 452, 2017.
- [17] X. Wu 等, Multi-axis atom interferometry with a single diode laser, *Optica*, 4, 1545, 2017.
- [18] X. Miao, H. Metcalf 等, Strong optical forces from adiabatic rapid passage, *Phys. Rev. A* 75,



011402, 2007.

2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题 (此部分为重点阐述内容);

研究内容总结: 本项目计划运用亚纳秒任意波形相干光脉冲对自由空间和光晶格中的简并气体进行保真度优化的集体光激发和相干调控, 探索强光学跃迁上高密度原子体系超辐射和亚辐射态的激发, 控制和超快转换的技术可行性和相关物理机制, 同时发展相关的高密度原子干涉技术。

详细说明如下:

一. 发展高带宽任意波形脉冲对简并铷原子气体的亚纳秒高保真 D1 布局反转和相干操控技术, 运用超快 Ramsey 光谱和光子回波技术研究集体偶极激发的能谱, 相干性和弛豫:

运用本实验室新近发展 (原创) 的中等功率 (100 mW)、高带宽 (10 GHz) 任意波形脉冲激光技术, 此前我们已经成功的在另一种原子 (钾) 上实现了稀疏冷原子样品 ($\sim 10^{11}/\text{cm}^3$) 的 D1 亚纳秒高保真绝热布居反转和相干操控, 获得高达 95% 以上的反转保真度 (接近 $f=98\%$ 的纳秒激发自然线宽极限)。为更加方便的运用超精细结构实现相干操控, 并和本实验室简并气体实验资源结合, 本研究计划将该脉冲调控技术运用到铷 87 原子 D1 谱线。

相比于单体操控, 本研究的关键创新在于简并气体和亚纳秒光学相干操控的结合: 铷原子简并气体的密度可高达 $10^{13}-10^{14}/\text{cm}^3$, 原子间平均距离可远小于激发光波长。这样高密度下的多原子集体光学跃迁具有单原子不同的跃迁频率和线宽, 其中集体展宽 $\Gamma_c \sim 2\pi \times 1\text{MHz} \times \rho\text{cm}^3/10^{12}$ 可高达数十兆赫。虽然通常 BEC 实验中近共振光可用来原位探测原子密度, 却很难用来对超冷原子实现光学操控。我们将结合亚纳秒任意波形光脉冲的强度/频率容错优势, 在纳秒时间尺度上优化绝热脉冲对超冷高密度原子实现高效布居反转并观察激发态原子集体自发辐射的动力学。通过吸收谱, 延时荧光, 及冷原子集体反冲等手段测量集体激发的寿命, 相干性, 及在 BEC 相变点附近的密度涨落相关特征。

在绝热反转的基础上, 我们计划运用新近发展的绝热量子门操控技术 (成功在稀疏钾原子中实现), 包括相位门和反转门等, 对简并铷原子 D2 实现亚纳秒“绝热 θ 激发”, 光学 Ramsey 光谱, 及光学回波等。运用亚纳秒干涉手段观测超冷原子多体偶极激发的能谱, 展宽和非线性光学特征。



二. 亚纳秒任意波形脉冲对简并铷原子气体的亚辐射态激发和操控

从定义可知,亚辐射态和光场耦合较弱,而优质的亚辐射态和光场几乎不耦合,因此亚辐射态的可控激发是量子光学领域的技术难题之一。近期突破性工作中碱土金属双原子亚辐射态激发的关键技术是利用亚辐射态的窄线宽和频率移动,实现能量分辨的连续光激发[9]。该长时间窄线宽激发方法对原子相对运动的控制有较高要求,难以推广到多原子体系。

借鉴 Scully 的超快相位调控思想[14],我们计划运用高速相位调控来协助激发和操控高密度超冷气体的亚辐射激发态。具体来说,运用相反传播的光脉冲在 1 纳秒时间内对实现简并气体的布居反转和回归操控,从而对简并气体实现 $\lambda/2$ 或更小周期的相位调制。这一相位调制常被用来实现原子加速,事实上我们已经成功在另一种原子(钾)的稀疏冷原子样品($\sim 10^{11}/\text{cm}^3$) D1 谱线上实现了纳秒级原子相位门和物质波加速(每纳秒 1 hk 的加速保真度高达 92%以上)。由于相位调制对基态和激发态存在差异(事实上写入相位接近于相反),对于微弱电偶极激发的气体来说,这一物质波相位调制伴随着原子系宗的集体光激发倒空间平移[11],可协助实现超辐射态/亚辐射态的切换[14]。我们计划运用这一超快相位调制技术对铷原子 D2 谱线的集体弱激发进行操控(选择 D2 探测的原因包括准循环跃迁的存在,以及基于波长选择的 D1 操控光背景去除),探索超辐射/亚辐射态超快转换的可行性。

三. 超辐射/亚辐射调控的亚波长光晶格实现

亚辐射激发的相干时间主要受限于原子密度涨落导致的偶极相互作用展宽[15]及原子运动。不同于碱土金属窄线宽操控方案[9],在强光学跃迁和纳秒时间尺度上我们预期亚辐射态寿命不受光波长尺度上冷原子运动的影响。对于超流态的超冷原子,亚辐射态消相干可直接由光波长 λ 尺度上的密度涨落导致的共振偶极相位涨落来估算, $\delta\omega_c(\lambda)\sim 2\pi \times 1\text{MHz} \times \sqrt{\rho\text{cm}^3/10^{12}}$,相对于单铷原子 D2 线 26 ns 自发辐射时间和更短寿命的超辐射态,我们预期亚辐射态可以在自由简并气体中被观测到(其寿命可能是相变点附近密度涨落的灵敏探测),然而进一步提高亚辐射态寿命乃至实现微秒级光子态存储必须降低原子密度涨落,这儿我们需要用到亚波长光晶格。

我们计划运用已有实验室资源,结合 840nm/420nm 的钛蓝宝石激光倍频光源,



实现周期小至 210nm 的三维或者低维晶格，运用先进的超冷原子操控手段实现高度填充的超冷铷原子简并气体，降低原子密度涨落，探索准循环跃迁多能级原子亚辐射态稳定性[15]，力争实现自由空间微秒级光子态的亚辐射态激发和操控。

四. 高速高密度原子干涉

本项目运用于亚辐射态激发的高速相位写入技术同时将光子动量以 $2\hbar k$ 为单位传递给原子。对于自由空间的超冷原子，这个动量传递在毫秒尺度上可以清晰以反冲位移的形式被探测，或在原子干涉仪中以反冲频率的形式体现。结合本实验室的高速原子干涉项目（重点专项），我们计划运用亚纳秒脉冲调控技术对高密度简并气体实现相干加速和分束，探索高密度 ($10^{12}/\text{cm}^3$ 以上)/高速 (10hk 级分束动量) 原子干涉中可能的新物理如高速原子碰撞[16]相关的失相机制等。

研究目标总结：运用任意波形纳秒光脉冲实现自由空间和光晶格中的铷原子简并气体的高保真相干光学操控，研究集体电偶极激发的频移，展宽，相干性等频谱特征，在铷原子 D2 谱线循环跃迁上探索可控的超辐射/亚辐射态及超快转换方案，力争实现基于光晶格气体亚辐射态激发的 780 nm 光子的微秒级存储和读取。探索高速高密度原子干涉技术及相关物理。

拟解决的关键科学问题总结：总所周知，高密度气体的集体光学跃迁频率受偶极相互作用影响，相对于孤立原子的本征频率有较大的展宽和移动。这样的展宽和移动背后是深刻的多体偶极相互作用物理，而常常被人们忽略的是多原子体系的共振光耦合激发模式构成了一个巨大的希尔伯特空间，不同激发模式和真空场的相互作用强度存在数量级上的差异，而众多亚辐射态拥有比孤立原子窄得多的线宽和长得多的辐射寿命。对共振偶极相互作用多原子体系的理解是量子多体问题，其数值模拟并不简单，人们对这一领域的认识仍然有限，表现之一是即使是近期才涌现的突破性理论工作也常限于简化原子能级模型（如[7, 10-12, 14, 15]等）。而在实验方面，不同于常被实验研究的超辐射，多原子的亚辐射态受到原子运动和局域原子密度涨落的影响，在光学频率上极难被实现或运用，此前有限的观测或限于双原子结构 [9]，或在稀疏原子样品中实现 [8]，难以操控。



本项目计划结合新近发展的高带宽任意波形光脉冲调控技术,将已经实现在稀疏原子样品上的亚纳秒激发和纳秒相位调控技术运用到高密度超冷原子,运用绝热反转,光学 Ramsey 光谱等手段研究集体电偶极激发的相干特征,并通过高速相位调制切换超辐射/亚辐射态。亚辐射态的亚纳秒激发一定程度上规避了原子运动对亚辐射态消相干的影响,而我们计划进一步运用超冷光晶格抑制原子密度涨落,提高亚辐射态的相干寿命,探索基于光晶格亚辐射态激发的自由空间光子存储方案。该项目的科研进展将有助于理解高密度多能级原子共振偶极相互作用体系的基本物理,推进多原子体系集体跃迁的高速相干操控技术,最终实现自由空间强光学跃迁集体激发的高带宽量子存储及非线性控制。

3. 拟采取的研究方案及可行性分析(包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明);

研究方法总结: 本项目计划运用亚纳秒任意波形相干光脉冲对自由空间和光晶格中的高密度超冷原子集体光激发模式进行保真度优化的激发,调控和探测。具体来说,运用亚纳秒绝热脉冲对超冷原子实现容错布居反转,运用光学 Ramsey 光谱,光子回波等手段研究集体激发的相干特征,运用高速相位调制实现亚辐射态的激发及和超辐射态的超快转换等。同时运用亚波长光晶格抑制原子密度涨落,提高亚辐射态的相干寿命。平行于量子光学研究,本项目将同时运用纳秒脉冲物质波高速相位调制技术发展高速高密度原子干涉方案。

技术路线,关键技术和预期难点:

一. 较大功率 795nm 亚纳秒任意波形相干光脉冲调控技术:

我们计划结合本实验室在面上项目支持下新近发展的高带宽任意波形脉冲激光技术,运用光纤通讯领域的光纤电光调制技术及高带宽锥形激光放大技术,在 795nm 激光波长上获得 100 mW 输出,带宽 10 GHz 以上的低噪音任意波形相干辐射,通过聚焦激光获得 GHz 级电偶极跃迁拉比频率,用于相干操控铷原子 D1 谱线跃迁。预期难点及解决方案如下:

a) 任意波形激光的原位波形控制和优化



基于此前经验，我们预期任意波形亚纳秒脉冲激光系统存在和有限带宽，数字噪音及非线性放大相关的脉冲波形畸变。为获得最优控制，我们正在发展一套原位任意波形脉冲矫正系统，运用热原子的瞬态响应优化纳秒脉冲波形，预期将获得较高保真度激光波形控制。

b) 锥形放大器荧光噪音

为获得较高功率激光以在较大激光聚焦体积内实现冷原子的电偶极容错调控，我们运用激光二极管锥形放大器对经过光纤电光调制的毫瓦级激光进行放大。不同于高功率连续光放大对荧光的放大器有效抑制，低功率脉冲光放大由于光增益欠饱和，输出存在荧光噪音问题。

我们计划结合国际领先实验室的经验[17]，通过脉冲式注入提高光纤电光调制器输出，从而有效利用锥形放大器增益，抑制荧光；同时结合此前经验，运用边带调制技术并同时向锥形放大器注入电光调制的零级和信号级，通过零级注入增益连续抑制荧光噪音。

c) 铷原子 D1 谱线超精细分裂对电偶极操控的影响

不同于本实验室先前研究中的钾原子 D1 谱线，铷 87 D1 谱线有高达 800 MHz 的超精细分裂，不同的激发态超精细能级在纳秒时间尺度上有不可忽略的相移，如不加以控制会降低纳秒脉冲电偶极操控的保真度。幸运的是铷原子光的光泵浦态制备技术非常成熟，而在特定超精细纯态，100% 极化的简并铷 87 气体很容易获得。运用 D1 谱线的跃迁选择，可以较容易的将定子能级的电偶极跃迁隔离成理想的二能级系统加以控制。而由于铷原子超精细结构在纳秒时间尺度上可以分辨，其相互作用成为量子控制的资源之一，将被用来全面调控 D1 谱线的超精细电偶极运动。

二. 铷 87 原子简并气体和光晶格装载：

我们计划运用传统的激光冷却+蒸发冷却的方法实现铷 87 原子简并气体，并在必要的时候装载入 840nm 和 420nm 波长光晶格，限制简并气体的密度涨落，提高集体偶极激发的相干时长。

预期难点及解决方案：



a) 实现稳定和高重复频率简并气体实验

高重复频率样品制备和测量是冷原子实验成功的关键因素之一，简并气体实验受蒸发冷却过程及激光冷去原子装载时间限制，实验周期可长达 10 秒以上。

我们预期通过优化初级磁光阱装载，以及高效光阱蒸发方案，尽量将实验周期缩短到 5 秒以下，并通过温控抑制光路的长期飘动，增强稳定性。

b) 高密度光晶格的装载

我们计划通过运用高功率 420nm 激光(1W)缀饰 5S-6P 高激发态跃迁获得周期短至 210nm 的光晶格。对于二维正方形晶格，布里渊区边界到 Γ 点的最短距离可达 1.3 倍 780nm 光子动量，足够实现亚波长光晶格的亚辐射态[11]，而可以预期的技术困难是如何高填充率均匀装载 420nm 光晶格。

我们计划运用 840nm 光晶格对高密度超冷原子实现光晶格的预装载，并利用铷原子相互作用抑制光晶格原子数随机涨落（最优情况是获得 Mott 绝缘体），随后打开 420nm 激光，利用近共振 $6P_{3/2}$ 激发的共振偶极排斥等机制优化 420nm 晶格的均匀装载。由于铷原子 $6P_{3/2}$ 激发态寿命较长（112ns），将 10 GHz 失协 1W 激光聚焦到 30 微米光斑可获得 10MHz 阱深，自发辐射率小于 $(1 \text{ 毫秒})^{-1}$ 的光晶格，足够支持纳秒和亚微秒量子光学实验。

虽然不完美的晶格填充会降低亚辐射态的相干寿命，然而对于初态为高密度简并气体的原子样品，我们预期非完美填充光晶格中偶极集体激发特征仍然可以在相邻原子间形成并被观测，进而提供反馈信号优化光晶格的装载。

三. 亚辐射态的集体激发和探测

借鉴 Scully 超快调控思想[14]，本项目计划运用空间周期相位的高速调制对高密度冷原子的集体电偶极激发实现倒空间的整体平移，进而实现超辐射态/亚辐射态的切换以及亚辐射态的集体激发和探测。虽然在冷原子高速相位调制方面已经有先前经验，仍存在预期难点如下：

a) 亚辐射态微小信号检测

由于简并气体的高密度以及相应较强的偶极激发相互作用，我们预期集体激发



存在较高的非线性[11]。为避免非线性展宽的影响，初期实验中我们计划保持激发光子数远小于原子数，在中等强度的集体激发下通过光学外差法寻找亚辐射特征，而运用实验室已有资源，我们的系统将进一步设计成具备单光子探测的能力。

为降低微小光信号探测的背景噪音，我们在波长上将高速相位调制激光(795nm)和集体激发耦合激光(780nm)分开。结合光路方向的垂直性，并结合原子时间飞行成像进行相关测量，预期可以方便的去掉控制光背景噪音获得高质量的弱激发信号探测。

b) 多能级系统的亚辐射态实现

从 Dicke 的最初讨论[6]起，集体激发的超辐射/亚辐射态常局限于二能级原子，而多能级原子的亚辐射态的物理图像讨论较少[11, 14]，在技术实现上存在一定不确定性。

我们计划利用铷原子 D2 谱线的循环跃迁，考察极化原子和圆偏振光的相互作用。虽然原子间的近场耦合并不完全遵守角动量选择定则，然而我们预期在计划中原子密度下该跃迁保持准循环特性，可以有效支持集体激发的超/亚辐射特征。而初始信号将引导我们优化参数并向更复杂的参数空间[14]推进。

可行性分析总结：虽然本项目的创新性技术较多而因此具体实现指标有一定的不确定性，然而基于本实验室在相关高带宽电偶极调控及超冷原子实验技术上的准备，同时考虑到待测亚辐射等集体偶极激发现象对非完美冷原子技术实现的容错性，申请人相信本项目的实验进展拥有足够的技术保证和探索优化空间。

4. 本项目的特色与创新之处；

本项目计划结合新近发展的高带宽任意波形光脉冲调控技术，将由本实验室首创，已经实现在稀疏原子样品上的亚纳秒激发和纳秒相位调控技术运用到高密度超冷原子。运用绝热反转，光学 Ramsey，光子回波等手段研究高密度超冷原子集体激发的相干特征，并通过高速空间相位调制切换超辐射/亚辐射态，探索 Scully 提出的超快自由空间共振光子存储方案在超冷光晶格中实现的可能[14]。该项目的科研进展将有助于实现多原子体系集体跃迁的高速相干操控，推动最



终实现基于自由空间强光学跃迁的高带宽量子存储，单光子相互作用，及有效实现原子间可控共振偶极相互作用。

5. 年度研究计划及预期研究结果(包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等)。

第一年

完成超冷原子设备搭建和铷原子 D1 任意波形激光系统的技术升级/搭建，初步实现超冷铷原子的 D1 电偶极亚纳秒超快调控和相干原子加速。

第二年

初步展开在纳秒尺度上集体电偶极激发的超冷铷原子实验，通过时间分辨光学外差和原子时间飞行方法探测 D1 集体激发的激发态弛豫，Ramsey 光谱及光子回波。同时推进超冷原子的 840nm 及 420nm 光晶格装载。

第三年

全面展开纳秒尺度上操控 D1/D2 激发的超冷铷原子实验，基于运用 Ramsey 光谱方法考察自由空间和光晶格中的集体激发能谱和弛豫，并考察 D2 弱激发的超辐射特性以及经过 D1 高速相位调控后的亚辐射特性。

第四年

考察自由空间和光晶格简并气体的亚辐射激发相干时间对密度涨落的依赖，调价脉冲光和晶格参数优化光晶格中基于亚辐射激发的光存储时间，拓展多能级亚辐射相关物理实验。

(二) 研究基础与工作条件

1. 研究基础 (与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩);

申请人在亚纳秒冷原子偶极调控方面的工作积累:



在基金委面上项目的支持下，申请人过去两年发展了一套亚纳秒任意波形脉冲激光调控技术，获得了 100mW 级，10GHz 带宽任意波形调制的相干光，通过反向传播的绝热脉冲激发和布居回归获得了比自发辐射加速高一个量级以上的相干原子加速(保真度 $f \sim 92\%$, 理论极限 $f=96\%$, 远优于 Metcalf 组的早期工作[18]), 在此基础上首次实现了低密度冷原子的光学电偶极跃迁的高保真绝热相干操控并实现了强光学跃迁的单比特逻辑门，并利用量子过程层析技术测量其保真度，和本项目研究直接相关的技术包括实现 1 纳秒绝热反转操作(保真度 $f > 95\%$, 理论极限 $f=98\%$), 2 纳秒几何相位门(保真度 $f > 90\%$, 理论极限 $f=96\%$), 光学 Ramsey 光谱等。通过两年来该面上项目的探索，掌握了该创新技术的关键难点，计划通过相应技术改进提高带宽和可控性，接近并提高理论极限，相关工作正在整理发表。

申请人在冷原子成像方面的工作积累：

在上海市自然科学基金的支持下，申请人过去两年发展了一套基于全息显微的冷原子成像技术，该项目通过结合结构光照明和基于多平面波前采集和 Gerthberg-Saxton 算法克服散斑噪音，将高精度全息显微技术拓展到冷原子光谱领域，获得了微米级 (2.6 μm) 的空间分辨率，1.2 mrad 的相移分辨率，量子散粒噪音极限分辨冷原子大动态范围全息探测，首次实现了冷原子电磁感应透明和亚自然线宽光谱的全息观测，首次实现了全息显微方法对成像空间不同平面冷原子的精密成像和对加速原子的多普勒速度探测。该项目的成果展示了全息显微作为高精度成像技术，不仅可以运用于超冷原子探测，并且拥有常规吸收/荧光成像难以获得的优势，如吸收/相移的同时测量，原子数无关的精密光谱学和多普勒速度分析，不同成像平面的同时探测，精确光场畸变修正等。预期该方法会被较广泛运用到超冷原子科研领域，拓展新的科研机遇。相关工作正在整理发表。

申请人在脉冲激光原子外态相干控制方面的前期研究工作积累：

申请人在博士论文研究期间在哈佛大学 Prof. Mara Prentiss 的指导下研制出可用于精密测量的光脉冲波导原子干涉仪。此工作的关键性突破在于结合波导的对称性，物质波干涉路径的对称性，以及波导量子限制效应来提高导波原子的相干性。代表性成果发表在 Phys. Rev. Lett. (99,



173201, 2007) 并在 Science (9, 889, 2007) 上获得二次报导。后续工作包括实现长达 1 秒相干时间的波导原子干涉 (Phys. Rev. A, 81, 043631, 2010)。申请人参与了美国太空联合实验室 (JILA) 诺贝尔奖得主 Eric Cornell 组基于原子芯片的光脉冲波导原子干涉研究 (Phys. Rev. Lett. 94, 090405, 2005), 在 JILA 实验观测基础上申请人提出的光脉冲原子波相干控制理论 (Phys. Rev. A, 71, 43602, 2005) 数次在国际冷原子突破性工作中获得技术应用 (例如: PRL, 109, 243003, 2012; Science 20, 335, 2012; Nature 440, 900, 2006)。申请人在哈佛大学物理系博士后研究期间首次提出利用原子干涉仪测量周期性脉冲激光混沌场中物质波在平移微扰下保真度的衰减, 并利用博士期间建设的波导原子干涉实现了这一想法, 且验证了混沌场中保真度守恒和量子共振的一个不平凡数学关系, 此成果发表于 Phys. Rev. Lett, 103, 034101, 2009。该实验成果获得理论物理学界专家的好评 (Prof. Eric Heller & Prof. Olshani Maxim)。后续工作包括在远离量子共振条件下利用保真度衰减对原子反冲动量的精密测量 (PRA, 79, 051402)。

申请人在多光子激光冷却等冷原子物理方面的前期研究工作积累:

利用多光子跃迁进行激光冷却是申请人在美国国家标准局的博士后导师 Dr. James V. Porto 的一个突破性想法, 初衷是对单原子进行激光冷却的同时进行激光波长变换, 从而获得无背景的单原子荧光。申请人从这一简单想法出发进行了大量的理论计算和实验验证, 关键性成果证实了利用原子激发态之间的光学跃迁进行多普勒和亚多普勒冷却的可行性, 文章发表于 Phys. Rev. Lett. 103, 173003, 2009。此研究成果同时被 Virtual Journal of Atomic Quantum Fluids 选登。基于多光子激光冷却思想, 申请人于 2011 年提出一个对(反)氢原子进行有效激光冷却的方案, 这一设想发表于 Phys. Rev. Lett. 106, 213001, 2011, 并得到欧洲加速器中心反氢原子捕获团队的长期重视。在常规激光冷却领域, 申请人和法国巴黎高等师范 Kastler Brossel 实验室 (LKB) 的合作研究 (最初想法由申请人提出) 解决了国际冷原子研究领域一个 20 年来的难题: 对费米锂和钾原子的有效亚多普勒冷却, 结果发表于 Europhysics Letters (100, 63001, 2012) 并被编辑选为 featured article。此工作将激光冷却费米锂和钾原子的相空间密度提高了 4 个量级, 此成果正对国际超冷原子研究产生较大影响。而申请人在复旦大学和 LKB 的后续合作 (PRA91, 023426, 2015, 申请人为



通讯作者之一) 对此 D1 亚多普勒冷却的物理图像做出了定义性诠释 (“Definitive”, 审稿人语)。

2. 工作条件 (包括已具备的实验条件, 尚缺少的实验条件和拟解决的途径, 包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况);

已经拥有的实验条件:

在高带宽任意波形激光调控方面, 我们已经开发出一套 770nm 用于钾原子 D1 谱线的 10GHz 带宽任意波形脉冲系统。利用高效大面积光栅分光, 该系统可以方便的扩展出 795nm, 780nm 波段输入输出端口操控和探测铷原子 D1, D2 谱线。

在超冷原子方面, 申请人在国家重点研发计划支持下正搭建一套铷 87 原子简并气体装置, 相关仪器已经到位, 相关实验装置正在搭建。

在短波长光晶格和原子干涉方面, 申请人在国家重点专项支持下发展铷原子的高激发态脉冲光原子干涉仪, 相关技术准备特别是 420nm 光源可方便用于产生亚波长近共振光晶格。

尚缺少的实验条件:

在实验设备方面, 我们尚缺少铷原子 D1 谱线的光源和放大器, 任意波形激光系统的技术升级相关设备 (混频器, 放大器等), 以及开展本项目需要的一些其他耗材 (见预算)。

在实验团队方面, 我们的学生研究力量稍显不足, 在年青学生培养的同时, 我们计划和国内外团队展开合作, 并尽力招聘一名博士后研究员。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况 (申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况, 包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目, 要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等);



国家自然科学基金面上项目，编号 11574053，基于皮秒脉冲序列容错调控的冷原子技术， 2016/01-2019/12，73 万，主持和本项目的关系：

该项目的根本目标是发展高带宽任意波形脉冲激光的冷原子调控技术，包括激光冷却和原子相干加速。此项目自 2016 年立项以来的发展，包括钾原子 D1 谱线相干调控和相干加速的成功实现，相应皮秒脉冲序列/任意波形脉冲技术的完善，以及稀疏冷原子调控中的集体效应初步探索，为本项目运用脉冲激光实现高密度超冷原子气体的集体调控和探测打下原创性技术基础，提供了第一手经验，而申请人希望本项目的进展从量子光学层面拓展该面上项目考察的单原子技术，不仅在超冷原子调控技术上获得更全面的物理图像，且将该技术运用到基于集体光学相应的超冷原子量子光学领域。

科技部国家重点专项，2017YFA0302200，基于原子与光子相干与关联操控的量子精密测量，2016/7-2021/6，200 万，参与和本项目的关系及负责的内容：

申请人在该项目中负责的内容是运用高激发态跃迁，脉冲调控，表面微结构等手段发展新型相干原子分束技术，发展小探测体积，高重复频率的原子干涉仪。此项目的发展和本项目是支持和互补的关系：铷原子高激发态跃迁的 420nm 激光原子干涉调控资源可方便的和本项目亚波长光晶格结合起来，脉冲激光原子干涉调控技术在微秒和毫秒时间尺度上发生，和本项目的纳秒级量子光学观测形成互补。而对高密度原子集体光学相应的深入理解和操控将有助于将近简并气体运用到小探测体积原子干涉仪中，提高信噪比。

科技部国家重点研发计划，2017YFA0304204，光晶格中的新奇拓扑物理及相变研究，2017/7-2022/6，260 万，参与和本项目的关系及负责的内容：

申请人在该项目中负责研发基于大数值孔径全息显微的新型超冷原子成像技术。该项目和本项目是资源共享和互相促进的关系：本项目依赖于在该研发计划支持下即将建成的铷原子简并气体实验装置，



在超冷原子成像探测上将受益于新型全息显微系统。而另一方面，本项目提供独特的超冷原子相互作用操控手段，在多体原子样品制备上提供了新的手段，也可能为量子气体显微技术中多原子无损成像技术提供新思路。

4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已完结科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已完结项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）。

无

（三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无



4. 其他。

无

NSFC 2018



吴赛骏 简历

复旦大学，物理学系，研究员

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- (1) 2001.9 - 2007.5, 哈佛大学, 应用物理, 博士, 导师: Mara Prentiss
- (2) 1999.9 - 2001.7, 北京大学, 光学, 硕士, 导师: 邹英华
- (3) 1995.9 - 1999.7, 北京大学, 物理, 学士, 导师:

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

- (1) 2014.7-至今, 复旦大学, 物理, 研究员
- (2) 2011.7-2014.6, 英国Swansea大学, 物理, 讲师（高级讲师）
- (3) 2007.10-2011.5, 美国马里兰大学, 博士后, 合作导师: James Porto

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）：

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况：

国家自然科学基金面上项目，11574053，基于皮秒脉冲序列容错调控的冷原子技术，2016/01-2019/12，73万，主持

科技部国家重点专项，2017YFA0302200，基于原子与光子相干与关联操控的量子精密测量，2016/7-2021/6，200万，参与

科技部国家重点研发计划，2017YFA0304204，光晶格中的新奇拓扑物理及相变研究，2017/7-2022/6，260万，参与

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：①10篇以内代表性论著；②论著之外的代表性研究成果和学术奖励。



一、10篇以内代表性论著

- (1) Franz Sievers*^{(#)(*)}; Norman Kretzschmar; Diogo Rio Fernandes; Daniel Suchet; Michael Rabinovic; **Saijun Wu**^(*); Colin V. Parker; Lev Khaykovich; Christophe Salomon; Frederic Chevy, [Simultaneous sub-Doppler laser cooling of fermionic Li6 and K40 on the D1 line: Theory and experiment](#), Physical Review A, 2015. 2. 23, 91(2): 023426-1~023426-11 (期刊论文)
- (2) Sobol, J. P.^(#); **Wu, Saijun**^(*), [Imaging cold atoms with shot-noise and diffraction limited holography](#), New Journal of Physics, 2014. 9. 30, 16 (期刊论文)
- (3) Brown, Roger C.^{(#)(*)}; **Wu, Saijun**; Porto, J. V.; Sansonetti, Craig J.; Simien, C. E.; Brewer, Samuel M.; Tan, Joseph N.; Gillaspay, J. D., [Quantum interference and light polarization effects in unresolvable atomic lines: Application to a precise measurement of the Li-6, Li-7 D-2 lines](#), Physical Review A, 2013. 3. 7, 87(3) (期刊论文)
- (4) Sansonetti, Craig J.^{(#)(*)}; Simien, C. E.; Gillaspay, J. D.; Tan, Joseph N.; Brewer, Samuel M.; Brown, Roger C.; **Wu, Saijun**; Porto, J. V., [Absolute Transition Frequencies and Quantum Interference in a Frequency Comb Based Measurement of the Li-6, Li-7 D Lines](#), Physical Review Letters, 2011. 7. 6, 107(2) (期刊论文)
- (5) **Wu, Saijun**^{(#)(*)}; Brown, Roger C.; Phillips, William D.; Porto, J. V., [Pulsed Sisyphus Scheme for Laser Cooling of Atomic \(Anti\)Hydrogen](#), Physical Review Letters, 2011. 5. 24, 106(21) (期刊论文)
- (6) **Wu, Saijun**^{(#)(*)}; Plisson, Thomas; Brown, Roger C.; Phillips, William D.; Porto, J. V., [Multiphoton Magneto-optical Trap](#), Physical Review Letters, 2009. 10. 23, 103(17) (期刊论文)
- (7) **Wu, Saijun**^{(#)(*)}; Tonyushkin, Alexey; Prentiss, Mara G., [Observation of Saturation of Fidelity Decay with an Atom Interferometer](#), Physical Review Letters, 2009. 7. 17, 103(3) (期刊论文)
- (8) **Wu, Saijun**^{(#)(*)}; Su, Edward; Prentiss, Mara, [Demonstration of an area-enclosing guided-atom interferometer for rotation sensing](#), Physical Review Letters, 2007. 10. 26, 99(17) (期刊论文)
- (9) Wang, YJ^{(#)(*)}; Anderson, DZ; Bright, VM; Cornell, EA; Diot, Q; Kishimoto, T; Prentiss, M; Saravanan, RA; Segal, SR; **Wu, SJ**, [Atom Michelson](#)



[interferometer on a chip using a Bose-Einstein condensate](#)[✓], Physical Review Letters, 2005. 3. 11, 94(9) (期刊论文)

(10) **Wu, SJ**^{(#)(*)}; Wang, YJ; Diot, Q; Prentiss, M, [Splitting matter waves using an optimized standing-wave light-pulse sequence](#)[✓], Physical Review A, 2005. 4, 71(4) (期刊论文)

NSFC 2018



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	激光冷却PRA	系统解决了激光冷却碱金属的一个长期难题，共同通讯作者	代表性论著
2	全息显微NJP	冷原子全息成像前期工作，最新工作正在整理	代表性论著
3	精密光谱PRL	指出了长期被原子光谱界忽视的“魔术角”现象，近来广泛被引用。	代表性论著
4	激光冷却PRL	提出了激发态冷却氢原子的方法。	代表性论著
5	原子干涉PRL	精密波导原子干涉	代表性论著

NSFC 2018

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

接收编号: 1187040159

申请人: 吴赛骏

依托单位: 复旦大学

项目名称: 超冷原子的超快电偶极操控

资助类别: 面上项目

亚类说明:

附注说明:

申请人承诺:

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助, 我将履行项目负责人职责, 严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 认真开展工作, 按时报送有关材料。若填报失实和违反规定, 本人将承担全部责任。

签字:

项目组主要成员承诺:

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助, 我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 加强合作、信息资源共享, 认真开展工作, 及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定, 本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称 (应与加盖公章一致)	证件号码	每年工作时间(月)	签字
1	何亦尊	复旦大学	440106199401160395	10	
2	裘李阳	复旦大学	330602199404030015	10	
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

依托单位及合作研究单位承诺:

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助, 我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障, 严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定, 督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

合作研究单位公章1

合作研究单位公章2

日期:

日期:

日期: