

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	激光粒子束与物质相互作用机理
主要完成人	赵永涛，任雪光，栗建兴，任洁茹，王兴，徐忠锋
主要完成单位	西安交通大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>激光粒子束与物质相互作用机理是等离子体物理、原子与分子物理及其相关交叉领域的共性基础挑战性难题,该项目针对极端强流条件下离子束在稠密等离子体中的能损机制、超强激光驱动的量子电动力学效应以及带电粒子与物质作用中的反应动力学机制等关键科学问题，开展了实验和理论研究，取得了重要进展：</p> <p>1) 突破激光驱动强流准单能质子束产生和准静态稠密等离子体样品制备难题，实现了强流质子束在稠密等离子体中能量沉积的高精度实验测量，发现和揭示了极端强流条件下起主导作用的欧姆能损机制；</p> <p>2) 搭建了离子与等离子体、电子与原子分子及团簇体系碰撞动力学实验研究平台，开展了复杂体系中粒子间量子多体碰撞动力学实验测量，揭示了离子激发态对电荷及能量转移过程重要影响机制，首次实验发现生物分子间超快能量转移库仑衰变 ICD 效应；</p> <p>3) 发展了包含粒子自旋的非线性康普顿散射和多光子 Breit-Wheeler 正负电子对产生理论，揭示了强激光场中辐射引起的粒子自旋随机反转和信息传递机理，提出了基于强激光的高能极化正负电子束和偏振高亮度伽马光源制备方法。</p> <p>相关成果发表在 Nat. Commun.、Nat. Chem.、Phys. Rev. Lett.以及 Matter Radiat. Extrem.等权威期刊，整体达到国际先进水平。对照相关授奖条件，同意提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。</p>			
<p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
责任专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
提名意见：			
<p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

三、项目简介

研究背景：“激光粒子束与物质相互作用机理”是等离子体物理、原子与分子物理及其交叉科学与技术领域如聚变科学、生物医疗、深空探索以及先进材料器件等领域的基础共性重大科学问题，研究成果对推进未来能源、未来健康、未来空间和未来材料等方向新质生产力发展具有重要意义。激光粒子束与物质相互作用的研究、发展和应用水平，显著影响着一个国家的高新技术产业。

激光粒子束与物质相互作用研究极具前沿性和挑战性，尤其在超高粒子束流强密度、超快作用时间尺度、超强电磁场等极端条件下，相互作用过程具有强关联、非平衡、非线性、微扰理论失效等特点，实验手段有限、高精度数据缺乏、理论建模及其参数可靠性亟待检验。新一代重离子加速器及强激光大科学装置不断将高能量密度前沿科学探索向宏观拓展、向微观深入、向更极端推进，基本科学问题孕育着重大突破，可望催生一批新的重要科学理论和颠覆性技术。

主要研究内容及成果：本项目面向极端条件下激光粒子束与物质相互作用机理世界科技前沿，围绕高功率激光装置以及重离子加速器装置发展需求，针对强流条件下离子束在稠密等离子体中的能量沉积集体效应、复杂体系中粒子间超快碰撞动力学机制以及超强激光驱动的量子电动力学效应等关键科学问题，开展了实验和理论研究，主要研究内容及取得的学术成果如图 1 所示，具体包括一下 3 个方面。

图 1. 主要研究内容及学术成果（*代表性论文）

1) 突破激光驱动强流准单能质子束产生和准静态稠密等离子体样品制备难题, 实现了强流质子束在稠密等离子体中能量沉积的高精度实验测量, 发现和揭示了极端强流条件下起主导作用的欧姆能损机制;

2) 搭建了离子与等离子体、电子与原子分子及团簇体系碰撞动力学实验研究平台, 开展了复杂环境中粒子间量子多体碰撞动力学实验测量, 揭示了离子激发态对电荷及能量转移过程重要影响机制, 首次实验发现生物分子间超快能量转移机制;

3) 发展了包含粒子自旋的非线性康普顿散射和多光子 Breit-Wheeler 正负电子对产生理论, 揭示了强激光场中辐射引起的粒子自旋随机反转和信息传递机理, 提出了基于强激光的高能极化正负电子束和偏振高亮度伽马光源制备方法。

科学价值:

1) 发现和揭示了极端强流条件下起主导作用的欧姆能损机制, 这种机制将会显著影响人们对惯性约束聚变中心点火、带电粒子束快点火以及离子束驱动高能量密度物质中基本物理过程的理解和认识, 对其中的关键参数指标设计具有参考价值; 发展的数值模拟技术, 为高能量密度物理相关研究提供了重要工具; 提出并发展的高能量密度物质制备方案和技术, 为国际上开展实验室天体物理、高能量密度物理以及聚变物理实验研究提供了支撑, 同时也为我国强流重离子加速器大科学装置项目 HIAF 在高能量密度物理实现引领奠定了基础;

2) 搭建的离子与等离子体相互作用实验平台以及原子分子反应动力学实验平台处于国际先进水平, 为国内外开展原子分子物理、等离子体物理、核天体物理以及激光与粒子束科学技术在能源、生命及材料等领域的重要应用提供了平台。实现了在原子分子尺度解析复杂等离子体及团簇体系结构和动力学性质, 使人们对复杂环境中离子、电子与原子分子之间的碰撞动力学过程认识迈出了坚实的一步, 加深了人们对高层大气及宇宙等离子体环境体系的形成, 以及重离子治癌等过程中物理机制的理解和控制。

3) 揭示了强激光场中辐射引起的电子自旋随机反转机理, 提出了基于强激光的高能极化正负电子束和偏振高亮度伽马光源制备方法, 为探究原子核结构, 研究宇称不守恒以及超出标准模型的新物理等高能物理实验所需的高能自旋极化电子束提供一种高效研究手段, 为相关核物理、高能量密度物理以及实验室天体物理实验对高能极化粒子源迫切需求提供了全光解决方案。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

上述研究成果获得了美国普林斯顿等离子体物理研究、加州大学、俄罗斯科学院列别德夫物理研究所、德累斯顿罗森多夫研究中心、上海光机所等国内外知名学术机构的专家学者引用和评价，5 篇代表性论文他引 136 次，其中，PRL 122(2019)154801 入选为 ESI 高被引论文，MRE 5(2020)054402 入选《Matter and Radiation at Extremes》期刊亮点文章，国家自然科学基金委对部分成果进行了专题报道。

部分客观评价如下：

“重要科学发现一”同行引用和评价举例

a) 俄罗斯科学院列别德夫物理研究所 S. Yu. Gus'kov（惯性约束聚变以及高能量密度物理领域广泛使用的 Guskov 电荷交换模型提出者）在其文章[Phys. Plasmas 30, 062709 (2023)]中将本项目成果[Nat. Commun. 11, 5157 (2020)]作为泡沫结构靶的典型应用进行了引用和评述，指出“泡沫结构靶的另一个研究方向是在实验室产生热力学参数时空演化可控的等离子体。这种等离子体中的离子或电子能损得到了活跃研究”。

b) 德国亥姆霍兹德累斯顿-罗森多夫研究中心辐射物理研究所所长 Thomas ECowan 在其文章[Phys. Plasmas 29, 023102 (2022)]中将本项目成果[Nat. Commun. 11, 5157(2020)]作为快点火以及惯性约束聚变中能损研究的代表性成果进行了引用和评述，指出“这种由于阻止电场引起的异常能损在试图实现惯性聚变的快点火实验和理论中得到了广泛研究”。

c) 美国加州大学能源研究中心 J. Kim 等人在其文章[Phys. Plasmas 29, 113103(2022)]中指出“如果想要对强流离子束在稠密等离子体中的能损和输运进行准确建模，必须要考虑集体场效应”，将本项目成果[Nat. Commun. 11, 5157(2020)]作为典型成果进行了引用。

d) 美国普林斯顿等离子体物理实验室(PPPL)的 Sophia Malko 等人在其文章[Nat. Commun. 13, 2893 (2022)]中将本项目成果[Nat. Commun. 11, 5157 (2020)]作为国际上 1990 年以来关于离子束在等离子体中能损测量的 10 个实验之一列举在文章图一中。

e) 项目成果[Nat. Commun. 11, 5157(2020)]获得专家推荐入选 2020 中国光学十大进展候选，指出项目“首次实验揭示激光加速强流离子束在稠密物质中的欧姆能损机制”。

“重要科学发现二”同行引用和评价举例

a) 印度理工学院教授 G. Aravind, 在其文章[Nat. Chem. 14, 1098 (2022)]中将本项目成果[Nat. Chem. 14, 232 (2022)]作为电子碰撞诱导分子团簇ICD 反应的典型实验结果, 指出电子碰撞实验是研究 ICD 效应的有效方法。

b) 瑞士苏黎世联邦理工教授 H. J. Wörner (亚非秒电子动力学的发现者), 在其文章[Phys. Rev. Lett. 130, 253202 (2023)]中, 将本项目成果[Nat. Chem. 14, 232(2022)]作为研究 ICD 反应的代表性成果进行了引用和评述, 特别指出所开展的电子碰撞实验是证明 ICD 效应的重要实验手段。

c) 吉林大学丁大军教授 (吉林大学原子与分子物理研究所所长), 在文章[Phys. Rev. Lett. 129, 023001 (2022)]中指出本项目成果[Nat. Chem. 14, 232 (2022)]为实验证明原子分子中环境效应提供了依据和实验参考。

d) 德国科学院院士、Heidelberg 大学教授、ICD 领域的开拓者和创始人 L.S. Cederbaum 教授, 在其最近的文章[J. Phys. Chem. Lett. 14, 1418 (2023)]中将本项目成果[Nat. Chem. 14, 232 (2022)]作为粒子碰撞诱导ICD 反应的典型实验手段进行了引用和评述, 其评价本项目成果是实验证明 ICD 效应的代表性成果之一。

“重要科学发现三”同行引用和评价举例

a) 英国皇家工程院院士、瑞典哥德堡大学教授 Mattias Marklund、美国劳伦斯伯克利国家实验室研究员 Stepan Bulanov 等人在国际权威综述期刊文章[Rev. Mod. Phys. 94, 045001 (2022)]将本项目成果[PRL 122, 154801 (2019)]作为强电磁场中粒子极化研究的成果典范, 并评价“自旋依赖的辐射反作用在椭圆偏振激光脉冲中可以导致一束初始未极化电子分裂成两束相反极化的电子束。当采用百分之几的椭圆率和约 5 个周期的激光脉宽长度, 初始能量为 4GeV 的电子束与 $a_0=100$ 的这种激光对撞, 可以产生高达 65%的极化度”。

b) 英国爱丁堡大学希格斯中心 Anton Ilderton 教授在国际权威综述期刊文章[Phys. Rep. 1010, 1 (2023)]中将本项目成果[PRL 122, 154801 (2019)]作为强场 QED 研究成果典范, 详细介绍了本项目发展的描述费米子自旋的 PIC 代码计算原理, 并且指出“做为首次应用, 申请人工作发现一束初始未极化电子可以被带有小椭圆度的激光分裂成两部分, 这两部分具有相反极化、几十毫弧度的分离、以及高达 70%的极化度”

c) 德国尤里希研究中心研究员、杜塞尔多夫海因里希·海涅大学教授 Markus Büscher 等人在国际知名综述期刊文章[High Power Laser Sci. Eng. 8, e36 (2020)]中将本项目成果[PRL 122, 154801 (2019)]作为相对论激光产生极化粒子束的成果典范, 详细介绍了申请人工作提出的在椭圆偏振激光中电子辐射极化机理。

d) 国家自然科学基金委以“我国学者提出相对论自旋极化电子束制备新方案”为题, 在基金委官网对项目成果[PRL 122, 154801 (2019)]进行了宣传报道。

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

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	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Observation of a high degree of stopping for laser-accelerated intense proton beams in dense ionized matter	NATURE COMMUNICATIONS	Ren, JR Deng, ZG ;Qi, W ;Chen, BZ ;Ma, BB;Wang, X ;Yin, S ;Feng, JH ;Liu, W ;Xu, ZF ;Hoffmann, DHH ;Wang, SY ;Fan, QP ;Cui, B ;He, SK ;Cao, ZR ;Zhao, ZQ ;Cao, LF ;Gu, YQ ;Zhu, SP ;Cheng, R ;Zhou, XM ;Xiao, GQ ;Zhao, HW ;Zhang, YH ;Zhang, Z ;Li, YT ;Wu, D ;Zhou, WM ;Zhao, YT .	年: 2020 卷: 11 期: 1	OCT 14 2020	Zhao, Yongtao.Zhou, Weimin .Wu, Dong	Ren, Jieru	Ren, JR Deng,ZG ;Qi, W ;Chen, BZ , Ma,BB ; Wang, X ;Yin, S ;Feng,J H ;Liu,W ;Xu,ZF ; Wang, SY ;Fan, QP ;Cui,B ;He,SK ; Cao, ZR , Zhao, ZQ ;Cao, LF ;Gu,Y Q ;Zhu,SP ;Cheng, R ;Zhou, XM ;Xiao , GQ ;Zhao , HW ;Zhang, YH ;Zh ang, Z Li,YT ;W u,D ;Zhou , WM ;Zhao, YT	53	SCI	是

2	Benchmark Experiment to Prove the Role of Projectile Excited States Upon the Ion Stopping in Plasmas	PHYSICAL REVIEW LETTERS.	Zhao, YT ;Zhang, YN ;Cheng, R ;He, B ;Liu, CL ;Zhou, XM ;Lei, Y;Wang, YY ;Ren, JR ;Wang, X ;Chen, YH ;Xiao, GQ ;Savin, SM ;Gavrillin, R ;Golubev, AA ;Hoffmann , DHH .	年: 2021 卷: 126 期: 11	MAR 15 2021	Zhao, Y. T. Cheng, R. He, B	Zhao, Y. T	Zhao, YT ;Zhang, g, YN ;Cheng, R ;He, B ;Liu, CL ;Zhou, XM ;Lei, Y;Wang, YY ;Ren, JR ;Wang, X ;Chen, YH ;Xiao, GQ	26	SCI	是
3	Ultrarelativistic Electron-Beam Polarization in Single-Shot Interaction with an Ultraintense Laser Pulse	PHYSICAL REVIEW LETTERS	Li, YF ;Shaisultanov, R ;Hatsagortsyan, KZ ;Wan, F ;Keitel, CH ;Li, JX	年: 2019 卷: 122 期: 15	APR 19 2019	Li, Jian-Xing	Li, Yan-Fei	Li, YF ;Wan, F ;Li, JX	123	SCI	是
4	Target Density Effects on Charge Transfer of Laser-Accelerated Carbon Ions in Dense Plasma	PHYSICAL REVIEW LETTERS	Ren, JR; Ma, BB; Liu, LR; Wei, WQ; Chen, BZ; Zhang, SZ; Xu, H; Hu, ZM; Li, FF; Wang, X; Yin, S; Feng, JH; Zhou, XM; Gao, YF; Li, Y; Shi, XH; Li, JX; Ren, XG; Xu, ZF; Deng, ZG; Qi, W; Wang, SY; Fan, QP; Cui, B; Wang, WW; Yuan, ZQ; Teng, J; Wu, YC; Cao, ZR; Zhao, ZQ; Gu, YQ; Cao, LF; Zhu, SP; Cheng, R; Lei, Y; Wang, Z; Zhou, ZX;	年: 2023 卷: 130 期: 9	FEB 27 2023	Zhao, Yongtao. Zhou, Weimin	Ren, JR; Ma BB;	Ren, JR; Ma, BB; Liu, LR; Wei, WQ; Chen, BZ; Zhang, SZ; Xu, H; Hu, ZM; Li, FF; Wang, X; Yin, S; Feng, JH; Zhou, XM; Gao, YF; Li, Y; Shi, XH; Li, JX; Ren, XG; Xu, ZF; Deng, ZG; Qi, W; Wang, SY; Fan, QP; Cui, B; Wang, WW; Yuan, ZQ;	10	SCI	是

			Xiao, GQ; Zhao, HW; Dieter H. H. Hoffmann; Zhou, WM; Zhao, YT					Teng, J; Wu, YC; Cao, ZR; Zhao, ZQ; Gu, YQ; Cao, LF; Zhu, SP; Cheng, R; Lei, Y; Wang, Z; Zhou, ZX; Xiao, GQ; Zhao, HW; Zhou, WM; Zhao, YT			
5	Ultrafast energy transfer between π -stacked aromatic rings upon inner-valenc e ionization	NATU RE CHEMI STRY	Ren,XG;Zhou, JQ;Wang, EL ;Yang, T;Xu, ZF;Sisourat,N ;Pfeifer, T;Dorn, A	年:2022 卷: 14 期: 2 页码: 232	FEB 2022	Ren, Xuegua ng	Ren, Xueguang	Ren,XG;Z hou,JQ;W ang, EL ;Yang, T;Xu, ZF	43	SCI	是
合 计									255		
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	赵永涛	排 名	1
行政职务	副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：			
策划和实施了基于加速器和强激光大科学装置的强流离子束在稠密等离子体环境中能量沉积集体效应以及等离子体环境中离子碰撞动力学相关的实验、理论和模拟研究，参加了激光与等离子体相互作用产生偏振伽马光的理论研究，代表性论文[1]、[2]、[4]共同通讯作者，代表性论文[2]第一作者，代表性论文[5]共同作者。			

姓 名	任雪光	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 搭建了原子分子反应动力学实验平台，策划和实施了团簇体系的电子碰撞动力学实验测量以及数据分析，代表性论文[5]通讯作者，代表性论文[5]第一作者，代表性论文[4]共同作者。			

姓 名	栗建兴	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>全面负责强激光与电子束或等离子体相互作用产生自旋极化电子源和伽马光源系列工作的理论发展、仿真计算以及方案实施，代表性论文[3]通讯作者，代表性论文[4]共同作者。</p>			

姓 名	任洁茹	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主导了激光加速强流质子束在稠密等离子体中的能量沉积整体实验测量与数据分析，参与了离子与等离子体相互作用中的碰撞动力学实验测量以及激光驱动强场电动力学效应讨论，代表性论文[1]、[4]共同第一作者，代表性论文[2][5]共同作者。</p>			

姓 名	王兴	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 负责了基于强激光驱动 X 射线准等容加热制备稠密等离子体过程中 X 射线辐射流诊断工作，参与了离子与等离子体相互作用中的碰撞动力学实验测量，代表性论文[1]、[2]、[4]共同作者。			

姓 名	徐忠锋	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 共同指导了强流质子束在稠密等离子体中的能量沉积以及电子与原子分子碰撞动力学微观机制研究工作，参与了激光及离子束与等离子体相互作用理论分析工作，代表性论文[1]、[4]、[5]共同作者。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 为本项目的顺利开展提供了实验室、办公室、计算机时以及研究生。	

完成人合作关系说明

以项目完成人为主体的于 2016 年在西安交通大学物理学院成立了激光与粒子束科学技术研究所，联合搭建了 400kV 离子加速器平台、原子分子反应动力学实验平台以及数值仿真模拟平台，通过开展联合实验和理论计算以及集中研讨数据分析结果等方式，开展了高能量密度物理、强场 QED 理论及尾场加速、等离子体物理、高电荷态离子物理、核技术及等离子体技术应用等研究，获批成立了西安市重点实验室。

其中，针对本项目代表性论文的合作关系如下图所示。

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
1	联合实验、数据分析、结果讨论	赵永涛、任洁茹、王兴、徐忠锋	2016.01.01 至 2020.10.14	Nat. Commun. 11, 5157 (2020)	代表性论文 1
2	联合实验、数据分析、结果讨论	赵永涛、任洁茹、王兴	2016.01.01 至 2021.03.15	Phy. Rev. Lett. 126, 115001 (2021)	代表性论文 2
3	理论建模、数值模拟、结果讨论	栗建兴、赵永涛、徐忠锋、任雪光	2017.01.01 至 2019.04.19	Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 154801	代表性论文 3
4	联合实验、数据分析、结果讨论	赵永涛、任洁茹、栗建兴、徐忠锋、王兴	2017.01.01 至 2023.01.30	Phy. Rev. Lett. 130, 095101 (2023)	代表性论文 4
5	联合实验、数据分析、结果讨论	任雪光、徐忠锋	2017.01.01 至 2022.02.01	Nat. Chemist. 14, 232 (2022)	代表性论文 5