

# 目 录

## 第一部分 激光驱动的粒子加速与新型辐射源、超强激光实验方法与技术

Periodic Modulation Of Laser-Driven Proton Spectroscopy Induced By Transverse Instability	Jianhui Bin.....	2
激光与磁化亚临界等离子体相互作用产生圆偏振阿秒脉冲	潘晨浩, 王精伟, 栾仕霞 等 .....	2
超快时空光场单次测量技术及其等离子体诊断应用	朱 坪, 友 建, 徐英明 等.....	3
基于径向偏振光的孤立亚飞秒电子脉冲产生	曹 越, 胡理想, 余同普.....	3
飞秒激光烧蚀过程单次实时超快成像	唐惟启, 李政言.....	4
圆偏振强激光与微柱靶相互作用中高能准直电子束的产生与物理机制研究	李 帅, 蒋 轲, 黄太武 等.....	4
X 射线激光驱动的超强孤立阿秒脉冲辐射	陈 泽, 王云良.....	5
准静态 pic 程序 quickpic 中的激光模块	孙广泽, 孟维宇, 李 飞 等.....	5
超快相干极紫外光源的研发及表征	李 露.....	6
激光驱动电子产生高流强的准直伽马射线	范路林, 徐同军, 李 顺 等.....	6
利用圆偏振激光产生高能量子涡旋态电子	步志刚, 耿学松, 刘世宇 等.....	7
带电粒子在电磁场中运动轨迹的可变阶显式保辛算法在不同场景中的应用	唐宇辰, 张开来, 安维明.....	7
基于单啁啾脉冲的超快压缩成像时间分辨率	唐浩程, 李政言.....	8
强飞秒激光与金属丝作用产生的双端无发散米量级传播的太赫兹辐射源	邵烁婷.....	8
Quickpic 数据可视化图形用户界面程序开发	彭佳欣, 沈昱然, 安维明.....	9
Quickpic 的 gpu 加速算法研究	田悦然, 王钺洛, Viktor Decyk 等.....	9
自旋极化气体靶中的激光驱动电子和质子加速	温 猛, 丁 力, 庾春秀 等.....	10
羲和激光装置 (Sulf) 最新进展	王文鹏.....	10
Beam-Driven Energy Spectrum Tunable Betatron X-Ray Source	Chuanyi Xi.....	11
高功率皮秒激光-近临界密度泡沫驱动电子加速实验研究	邓志刚, 任洁茹.....	11
准静态近似 pic 程序 quickpic 中的一种显式算法	王海南, 李 飞, Thamine Dalichaouch 等..	12
基于相对论激光等离子体高次谐波的新型结构光场研究	陈自宇.....	12
表面等离子化激元相干辐射放大及其高效耦合 mev 电子加速验证	田 野.....	13
弱光场调控下的强激光高次谐波	闫明东, 魏子娟, 夏 凡 等.....	13

准静态近似下 pic 程序 qpad 中的一种显式算法	唐 榕, 李 飞, Warren Mori 等.....14
激光加速兆安流强电子束及驱动超强软 x 射线源的研究	胡曦辰, 祝铭阳, 冯 杰 等.....14
双束对射激光驱动超薄靶的超短脉冲中子源	冯凯源, 邵福球, 蒋祥瑞 等.....15
Gpu 加速算法在 quickpic 中的实现	王钺洛, 田悦然, Viktor Decyk 等.....15
基于放电毛细管弯曲等离子体通道的产生及诊断	李建龙.....16
超强拉盖尔-高斯激光驱动的多峰能谱质子束模拟研究	何坚志, 王文鹏, 董 浩 等.....16
包含场元干涉和等离子体响应的双色场激发太赫兹远场模型	李 楠, 王伟民.....17
基于 lwfa 驱动 pwfa 的混合加速研究	常心源, 曾 明, 王 佳.....17
准柱坐标系下剪式交叉电离注入的 pic 模拟	马明号, 曾 明, 王 佳 等.....18
相对论性等离子体高次谐波的波前特性与聚焦优化研究	伍超能, 李 露, 周沧涛 等.....18
强激光与等离子体表面相互作用产生的高次谐波辐射	刘 峰, 李博原, 吴福源 等.....19
基于等离子体扭摆器的强场可调频太赫兹辐射源	蔡 杰, 寿寅任, 耿易星 等.....19
超强激光辐照超薄靶相干渡越辐射的远场图样研究	徐诗睿, 陈 讯, 高 营 等.....20
紧凑型激光驱动的光子对撞机	韩立琦, 蔡 杰, 寿寅任 等.....20
光扇产生涡旋光中电子的注入与加速	汤 翔, 郝觉玄, 时 银.....21
Generation Of Ultrabright Polarized Attosecond Electron Bunch Via Dual-Wake Injection	Ting Sun, Qian Zhao, Feng Wan 等.....21
基于飞秒激光等离子体的强流辐射源——从太赫兹到伽马射线	余金清.....22
涡旋指向的多束激光驱动轴向磁场产生	郝觉玄, 汤 翔, 时 银 等.....22
激光尾波场电子加速—注入机制探索和高品质电子束产生	王 佳, 曾 明, 李大章 等.....23
综合极端条件实验装置-超快 x 射线 动力学实验站简介	李毅飞.....23
Dual-Beam Experiment Platform For All-Optical Thomson/Compton Scattering At Sjtu	Siyu Chen .....24
激光啁啾控制相对论少周期中红外脉冲产生	李东澳, 张国博, 赵 杰 等.....24
激光驱动螺线管质子级联加速的优化设计	刘志鹏, 马文君.....25
激光加速质子束的传输方案研究	晏 炆.....25
艾里贝塞尔激光驱动等离子体产生高次谐波研究	庞泽月.....26
艾里激光驱动相对论振荡镜产生孤立阿秒脉冲研究	陈 鹏.....26
尾波加速中的三维 betatron 振荡模型	刘玉龙, 曾 明.....27
尾波加速中三维 betatron 振荡的 Particle-In-Cell 模拟	刘玉龙, 曾 明.....27
飞行焦点激光驱动的尾场加速中电子的密度跃迁注入	耿盼飞, 陈 民, 安相炎 等.....28
超强激光驱动的扫雪场中的离子俘获和加速	刘 彬.....28
弯曲毛细管中的光导引和尾波电子加速	祝昕哲.....29
Effects Of Electron Heating And Surface Rippling On Rayleigh–Taylor Instability In Radiation Pressure Acceleration	Xuezhi Wu, Yinren Shou, Xueqing Yan.....29
等离子体管道对激光传播影响的数值模拟研究	许天琦.....30
Highly Spin-Polarized Multi-Gev Sub-Femtosecond Electron Beams Generated From Single-Species Plasma Photocathodes	Zan Nie.....30
等离子体光学时空调控技术研究	张栋俊, 朱 坪, 易友建 等.....31

基于非线性压缩的数 tw 级激光等离子体尾场加速	宁笑楠, 张 杰, 刘 爽 等.....	31
皮秒激光与碳纳米管相互作用产生的高能电子与辐射	潘卓, 陈式有, 高 营 等, .....	32
基于闪烁光纤的重频质子谱仪研发	宋 谭.....	32
通过在线飞秒激光微加工靶材自由切换激光离子加速机制	高 营.....	33
Ps 激光驱动螺线管实现质子束整形	史志勇.....	33
强激光与微通道靶相互作用的极端涡旋高次谐波产生	易龙卿, 胡 可.....	34
用于激光离子加速的液体薄膜靶在线诊断系统	彭梓洋.....	34
Generation Of ~400 Pc Electron Bunches In Laser Wakefield Acceleration Utilizing A Structured Plasma Density Profile	Jiaxin Liu, Haiyang Lu, Huangang Lu.....	35
激光等离子体极紫外光刻光源的数字全息干涉诊断	杨顺熠.....	35
整形超强激光产生强场窄带太赫兹脉冲	孙方正, 卫妍玉, 雷弘毅.....	36
以等离子体望远镜实现紧凑型拍瓦级尾场加速	耿学松.....	36
用于激光驱动离子加速的高分辨率大角度离子谱仪	彭文杰.....	37
非线性 compton 散射中通过自旋到轨道角动量转移产生旋涡 $\gamma$ 光子	马木提江·阿巴拜克热.....	37
深度学习在激光离子加速器自动靶体定位中的应用	郭 臻.....	38
强激光与狭缝相互作用的理论模拟研究	徐 兰, 黄太武, 蒋 轲 等.....	38
实时激光诊断和粒子探测技术	赵马克, 刘 哲, 孙浩帆 等.....	39
High-Gradient Modulation Of Microbunchings Using A Minimized System Driven By A Vortex Laser	Zhengxing Lv.....	39
超强激光驱动的新型辐射源: 从飞秒到阿秒	谭 放, 王少义, 张晓辉 等.....	40
激光尾波加速驱动超快电子衍射研究	李 飞.....	40
高品质激光尾波正电子加速机制研究	丁思勤.....	41
Efficient Generation Of Intense Spatial And Spatiotemporal Vortex Harmonics Using Plasma Mirrors	Yipeng Wu <sup>1</sup> , Zan Nie <sup>1</sup> , Fei Li 等.....	41
重频激光打靶溅射损伤特征与防护研究	陈 讯.....	42
基于菲涅尔双棱镜干涉的飞秒激光脉宽测量技术研究	张子熠.....	42
相对论强流电子束调控及应用	黄太武, 蒋 轲, 彭 浩 等.....	42
基于拍瓦激光与等离子体作用的超强中红外脉冲产生	何运孝, 华剑飞, 张 杰 等.....	43
Pw 激光驱动的高能电子加速与辐射源研究	冯 珂.....	43
激光尾波加速中放电毛细管等离子体的密度测量	温昕辉.....	44
通过强激光和固体靶相互作用产生线偏振 $\gamma$ 光子束	高 哲, 宋怀航, 王伟民.....	44
超强阿秒脉冲对产生的级联机制	李程凯, 王云良.....	45
北京大学国产 200tw 激光系统研制进展	吴旻剑.....	45
相对论电子束驱动等离子体尾波场激发阿秒脉冲源	王晓娟, 彭 浩, 黄太武 等.....	46
基于等离子体尾波加速器和光学波荡器的 xfel 新工作模式	徐新路.....	46
放电弯曲毛细管的气流和光迹模拟及其应用	毕择武.....	47
基于级联激光尾波加速器的新型 x 射线自由电子激光方案	肖恒圆, 李 飞, 华剑飞 等.....	47
激光等离子体加速器束流诊断系统的研发及束流输运系统进展	王 凯, 王科栋, 朱 昆 等.....	48

Cascaded Solenoid Acceleration Of Vortex Laser-Driven Collimated Proton Beam	X. Y. Sun, W. P. Wang, H. Dong 等.....48
基于等离子体的高梯度束流传输元件	林 晨, 杨 童, 晏 炆 等.....49
等离子体尾场加速模拟程序 quickpic 的最新进展	安维明.....49
Systematic Study Of The Fs Laser-Driven Target Surface Electron (Tse) Beam And Its Applicative Explorations	J. Y. Mao, J. Urbancic, L. Hudson .....50
角动量驱动生成万特斯拉级的强磁场	时 银, Alexey Arefiev, 郝觉玄 等.....50
高亮度 betatron 辐射及高分辨动态照相应用	吴玉迟, 王少义, 张晓辉 等.....51
强激光驱动的太赫兹辐射—产生、表征、调控与应用	廖国前, 孙方正, 陈 浩 等.....51

## 第二部分 惯性约束聚变物理、高能量密度下的物质特性

高马赫数高密度量子简并等离子体对撞	张文博.....54
激光聚变靶丸处辐射流测量实验研究	谢旭飞, 侯立飞, 蔡洪波 等.....54
低相干光对激光惯性约束聚变中侧向 Srs 的抑制	李晓锋, 马行行, 刘 钊 等.....55
面向 dci: 多束相对论激光在等离子体中的传输和热电子产生	王伟民, 张铁怀, 周 舸 等.....55
基于多能带韧致辐射成像的热斑电子温度分布诊断研究	吴燕康, 张 兴, 柯盛鑫 等.....56
基于多通道 ross 滤片对成像的热斑混合诊断研究	柯盛鑫, 陈伯伦, 张 兴 等.....56
相对论电子束激发等离子体微观不稳定性的粒子模拟及实验研究	胡章虎, 蓝婕婕, 赵全堂 等.....57
碰撞冲击波在非均匀等离子体中的传播特性研究	孟凡琦, 蔡洪波, 张思浩 等.....57
基于等离子体汇聚的高亮度辐射源实验研究	晏 骥, 任国利, 涂绍勇 等.....58
多光束辐照位形对激光等离子体不稳定性及产生热电子的影响	孟珂阳, 李 俊.....58
准一维球形内爆的低熵波形研究	曾国庆, 贾 青, 郑 坚.....59
等离子体冲击波相互作用中的动理学效应	张 旭, 刘庆康, 张文帅 等.....59
激光强度的时间调制对双等离子体衰变及产生热电子的影响	姚 灿, 李 俊.....60
简并等离子体在加热过程中自生磁场的箍缩效应	李昱衡, 吴 栋, 张 杰.....60
等容快点火模型中的点火判据和热斑演化	徐泽鲲, 吴福源, 姜博放 等.....61
高能量密度下的流体不稳定性研究	张桦森.....61
“自陡峭效应”对质子束在稠密等离子体中能量沉积的影响	徐汪文, 胡章虎, 惠得轩 等.....62
惯性约束聚变燃烧等离子体行为偏离麦克斯韦分布的研究	薛宇涵, 吴 栋, 张 杰.....62
相干渡越辐射诊断快电子输运	刘阳春, 吴 栋, 盛正卯.....63
Title: The Role Of Quantum Degeneracy In Double-Cone-Ignition Inertial Confinement Fusions	Dong Wu, Jie Zhang .....63
Energy Coupling In Intense Laser Solid Interactions: Material Properties Of Gold	刘 旭, 吴 栋, 张 杰.....64
电子束在反向对称电流中聚焦效应的实验观测	蓝婕婕, 胡章虎, 赵全堂 等.....64
超热电子在非均匀外加磁场中的传输	王志伟, 王伟民.....65

基于 x 射线荧光成像的充气管扰动演化实验研究	姚立, 蒲昱东, 晏骥 等.....65
等离子体中电子和离子能量非平衡弛豫速率的评估研究	高聪章, 蔡颖, 范征锋 等.....66
电子脉冲展宽分幅相机时空特性研究	杜卓铭, 罗秋燕, 林楷宣 等.....66
相对论激光强度下的电磁诱导透明	张铁怀, 王伟民, 李玉同等.....67
应用于激光聚变的 x 射线分幅成像技术研究进展	蔡厚智, 向利娟, 罗秋燕 等.....67
激光等离子体不稳定性的 k 空间理论和应用	肖成卓, 姚伟波, 王清 等.....68
磁扩散效应对 z 箍缩磁—瑞利—泰勒不稳定性影响研究	黄丽霞, 肖德龙.....68
动理学区域受激拉曼产生超热电子的粒子模拟研究	王清, 肖成卓, 刘占军 等.....69
激光装置单能成像技术用研究	陈伯伦, 杨正华, 杨品 等.....69
Langdon 效应对 srs 非线性演化的影响	邱捷, 郝亮, 曹莉华 等.....70
宽带激光驱动下受激拉曼散射的非线性爆发	刘庆康, 蔡洪波, 王清 等.....70
针对微尺寸 x 射线源的非相干全息层析成像	陈纪辉, 王峰, 理玉龙 等.....71
Alpha 粒子轰击下的非平衡 dt 聚变反应	杜报, 邹士阳, 康洞国 等.....71
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 泡沫壁小孔点火六通腔设计与实验验证	李欣, 康洞国, 申昊 等.....72
利用光学阴影、干涉成像对等离子体喷流的研究	邱志杰.....73
不稳定性演化与界面混合中的动理学效应	陈铭君, 蔡洪波, 朱少平等.....73
磁场对烧蚀瑞利-泰勒不稳定性增长影响研究	谷昊琛, 戴羽, 董玉峰 等.....74
黑腔 au 等离子体团碰撞动力学 (Kinetic) 效应及射流演化实验研究	张玉雪, 袁文强, 雷柱 等.....74
等容点火模型的热斑边界和聚变燃烧研究	王美乔, 徐泽鲲, 吴福源 等.....75
双锥对撞点火方案中的转滞态动力学过程	方可, 张翌航, 董玉峰 等.....75
多组分流动中速度温度非平衡流体动力学模拟	张超.....76
非均匀等离子体中的受激拉曼侧向重散射	谭尚, 王清, 陈勇 等.....76
神光装置爆推靶实验内爆性能退化原因分析及启示	李志远, 余波, 申昊 等.....77
双锥对撞方案中高密度等离子体的快速加热	戴羽.....77
Hdc 靶常温整形内爆实验理论设计与分析	李传莹.....78
单色弯晶背光成像在双锥点火方案中的建设和应用	张成龙, 张喆, 远晓辉 等.....78
一个新的考虑靶筒并效应的氢硼束靶聚变方案	刘述军, 吴栋, 胡天行 等.....79
锥形内爆中的高效能量转换	张翌航, 张喆, 远晓辉 等.....79
强激光驱动冲击波形成中的离子动理学效应	许育培, 张文帅, 姚沛霖 等.....80
多束大角度入射光驱动的激光等离子体不稳定性及其产生的热电子	李俊, 孟轲阳.....80
激光等离子体参量不稳定性的类流体数值模拟	闫锐.....81
神光 ii 升级装置实验能力提升关键技术及进展	张攀政.....81
激光聚变内爆减速阶段能量转化效率研究	王艺澎, 蔡洪波, 朱少平.....82
三维烧蚀瑞利-泰勒不稳中的自生磁场	张德华, 信靖飞, 刘阳 等.....82
超热电子非局域传输对激光烧蚀靶及烧蚀瑞利-泰勒不稳定性增长的影响	杨晓虎, 陈泽豪, 张国博 等.....83

大时空尺度上的参量不稳定性研究	刘 钊, 马行行, 王圆香 等 .....	83
基于间接-直接复合加载的物理特性实验研究	晏 骥, 李纪伟, 涂绍勇 等 .....	84
基于 x 射线显微成像的间接驱动内爆热斑状态诊断研究	张 兴, 徐 捷, 穆宝忠 等 .....	84
双锥对撞新型激光聚变方案研究	张 喆, 李玉同, 张 杰 .....	85
利用光学汤姆逊散射诊断理解 icf 黑腔	杨 冬, 李志超, 赵 航 等 .....	85

### 第三部分 极强场物理、实验室天体物理、激光核物理

强激光加速高密度强流电子高效激发核同质异能态	冯 杰 .....	88
等离子体环境中氘锂聚变反应的天体物理 S 因子测量研究	吕 冲, 王文钊, 张笑鹏 等 .....	88
激光加速质子束高效生产 $^{93}\text{m}\text{Mo}$ 及其对 $^{92}\text{m}\text{Mo}$ 产生的天体物理意义	樊文茹, 齐 伟, 张景丽 等 .....	89
使用激光驱动超短超强 $\gamma$ 源研究光核反应中的超短寿命同核异能素	吴 笛, 蓝浩洋, 张剑尧 等 .....	89
激光驱动种子级联的量子效应研究	郭银龙, 耿学松, 吉亮亮 .....	90
脉冲星磁层中的极化 qed 级联过程	宋怀航 .....	90
强磁场调控高功率激光与物质相互作用	胡广月 .....	91
角度展宽对非线性康普顿散射的影响	代雅男 .....	91
激光尾场电子加速驱动的微尺寸快中子源	李曜均, 冯 杰, 王文钊 等 .....	92
基于形变 gamow-Like 模型研究原子核的 $\alpha$ 衰变和质子放射性	肖 琼, 程俊皓, 余同普 .....	92
基于激光伽马源的光核截面及同质异能素比测量	蓝浩洋, 吴 笛, 张剑尧 等 .....	93
激光驱动的磁化“创生之柱”实验研究	雷 柱, 王立峰, 李纪伟 等 .....	93
Manipulation Of $\gamma$ -Ray Polarization In Compton Scattering	Yu Wang; Mamutjan Ababekri; Feng Wan 等 .....	94
对流等离子体中电磁湍流和离子动力学研究	刘 鹏, 吴 栋, 盛正卯 .....	94
成丝不稳定性中离子效应导致的磁场反常拓朴	刘一诺, 胡章虎, 王友年 .....	95
3+1 维中含有反作用的 schwinger 效应	刘伟涛 .....	95
粒子束驱动强场 qed 效应及高亮度伽马辐射研究	朱兴龙, 陈 民, 翁苏明 等 .....	96
Strong Laser Driven Vortex Gamma Photons And Vortex Photonuclear Reaction	Jian-Xing Li .....	96
强激光场缀饰下的布雷特-惠勒过程	刘世宇, 步志刚, 吉亮亮 .....	97
强激光等离子体中同质异能素模拟研究	马志国, 王煜森, 杨 奕 等 .....	97
Production Of Multioriented Polarization For Relativistic Electron Beams Via A Mutable Filter For Nonlinear Compton Scattering	马谦益; 唐宇辉; 吴学志 .....	98
Generation Of Medical Radioisotopes Through Laser Induced ( $\Gamma, P$ ) Reaction	张剑尧 .....	98
高功率太赫兹辐射在气体介质中的反常自聚焦	张心晓, 奚婷婷, 廖国前 .....	99
在量子辐射主导的动力学的反射机制下由激光驱动的轻子极化	庄锐鸿 .....	99

正负电子自旋极化对平面波背景场下单光子湮灭过程的影响	高允全, 唐 琐.....	100
稠密等离子体中的原子过程与核过程	任洁茹, 赵永涛, Dieter H. H. Hoffmann 等.	100
黑腔环境中对撞等离子体的大尺度 动力学模拟研究	梁天奕, 吴 栋, 盛正卯.....	101
激光辅助的双质子放射性	邹有甜, 程俊皓, 徐杨洋 等.....	101
通过非线性康普顿散射产生的任意极化光子束	辛 宇, 唐 琐.....	102
级联的 Compton 散射和 Breit-Wheeler 对产生过程: 极化效应	赵 前.....	102
基于百 MeV 能区激光伽马源的 232Th 散裂研究	罗凯军.....	103
Experimental Study Of High Yield Neutron Source Based On Multi Reaction Channels	Cui Bo, Zhang Zhimeng, Qi Wei 等.....	103
Systematic Study Of Laser-Assisted Proton Radioactivity And A Decay From Deformed Nuclei	程俊皓, 余同普.....	104
电子随机加速的实验室研究	袁大伟.....	104

#### 第四部分 高能密度物理相关领域前沿交叉科学

线圈靶驱动低 $\beta$ 磁重联中电子加速的模拟研究	于家成, 仲佳勇, 平永利 等.....	105
Three-Dimensional Dynamic Optical Trapping Using Non-Iterative Computer-Generated Holography	Fengyu Sun, Linwei Zhu, Wenpeng Wang 等.....	108
Plasma Harmonic Generation For Highly Efficient Breit-Wheeler Pair Creation	Suo Tang.....	108
基于 pic 模拟的动态粒子融合和分裂算法研究	董 乾, 余同普.....	109
Dose Rate Assessment Of Spot-Scanning Very High Energy Electrons Radiotherapy Driven By Laser Plasma Acceleration	Jianfeng Lv, Xingyi Zhao, Jiaxin Liu 等.....	109
高功率中红外少周期涡旋光的产生研究	奚婷婷.....	110
一种基于深度学习的中子半影图像重建方法	宋建军, 郑建华, 陈忠靖 等.....	110
非线性康普顿散射中的辐射修正效应	李彦霏, 陈月月, K. Z. Hatsagortsyan 等.....	111
伽玛光子对撞机最新进展及产业化规划	黄永盛.....	111
Generation And Regulation Of Electromagnetic Pulses Generated By Femtosecond Lasers Interacting With Multi Targets	Yadong Xia, Qiangyou He, Di Wu 等.....	112
双束激光产生可控太赫兹	王怡璇.....	112





# 第一部分 激光驱动的粒子加速与新型辐射源、 超强激光实验方法与技术

HEDP 2023-001

# Periodic Modulation of Laser-driven Proton Spectroscopy Induced by Transverse Instability

Jianhui Bin<sup>1</sup>

(1.Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China)

**Abstract:** We report on experimental observation on periodic modulation in the energy spectrum of laser accelerated proton beams. Interestingly, theoretical model and two-dimensional particle-in-cell simulations, in good agreement with the experimental finding, indicated that such modulation is associated with periodic modulated electron density induced by transverse instability. These results, may have implications for further understanding for the accelerating mechanisms as well as optimization strategies for laser driven ion acceleration.

**Keywords:** Laser-driven ion acceleration, lateral instability

HEDP 2023-002

# 激光与磁化亚临界等离子体相互作用 产生圆偏振阿秒脉冲

潘晨浩<sup>1,2</sup>, 王精伟<sup>1,3</sup>, 栾仕霞<sup>1</sup>, 赵耀<sup>4</sup>, 冷雨欣<sup>1,2</sup>, 李儒新<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海, 201800; 2.上海科技大学物质科学与技术学院, 上海, 201210; 3.上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海, 200240; 4.中山大学深圳校区, 深圳, 518107)

**摘要:** 我们提出了一种利用相对论强度的右旋圆偏振激光脉冲与磁化亚临界等离子体相互作用产生圆偏振阿秒脉冲的方法。理论和数值计算表明, 当一个适当强度的外磁场被施加到亚临界等离子体沿着激光传播, 右手圆偏振激光在真空等离子体边界的有质动力显著增强。然后, 电子被稳定地向前推动, 直到随时间增加的电荷分离场变得足够强, 足以将它们拉回来, 形成致密且反向移动的电子片。相对论速度电子片作为飞行镜压缩驱动激光器的尾部, 有效地产生单个圆偏振阿秒脉冲。本方案在不同尺度长度的预等离子体上显示出稳定的效率, 因此可以提供一种强大的方式来产生明亮和圆偏振阿秒脉冲。

**关键词:** 圆偏振阿秒脉冲, 磁化亚临界等离子体, 等离子体表面高次谐波

HEDP 2023-004

# 超快时空光场单次测量技术 及其等离子体诊断应用

朱坪<sup>1</sup>, 易友建<sup>1</sup>, 徐英明<sup>1</sup>, 张栋俊<sup>1</sup>, 丁福财<sup>1</sup>, 谢兴龙<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要:** 高功率超短脉冲激光在激光聚变快点火、高能量密度物理、粒子加速等国家战略与前沿科学领域有着重要应用。本报告将介绍超短脉冲光场时空全域单次测量技术及其在激光等离子体时空单次诊断中的应用, 利用时空复用与计算成像的技术优势, 解决了单发获取多维信息、时空耦合高分辨等难题。提出了空间光谱单次曝光相干调制成像技术 (CMISS), 对时空振幅和相位进行自参考测量, 实现了飞秒级时间分辨率、微米级空间分辨率的光场时空全域表征, 相位测量误差小于 0.04 rad。提出了任意时间波长编码的即插即用双棱镜干涉仪 (TWEBI), 应用于激光等离子体时空单次诊断研究, 对飞秒成丝等离子体动力学过程进行了阴影捕捉和密度测量, 实现了 200 fs 时间分辨率、4  $\mu\text{m}$  空间分辨率、5 Tfps 帧率, 时间测量窗口可在亚皮秒到纳秒量级自由调节。超快时空单次测量与超快诊断技术发展对进一步提升高功率超短脉冲激光的时空品质及其与物质相互作用效果具有重要意义。

**关键词:** 超快光学测量; 等离子体诊断; 时空耦合; 计算光学; 时空复用;

HEDP 2023-007

# 基于径向偏振光的孤立亚飞秒 电子脉冲产生

曹越<sup>1</sup>, 胡理想<sup>1</sup>, 余同普<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 高品质的孤立亚飞秒电子片由于在超快测量及孤立光脉冲的产生等方面有重要应用, 其产生和品质优化成为阿秒科学研究的重要课题。然而, 孤立电子片的产生较为困难, 现有方法通常需要少周期激光或具有陡峭上升沿的激光, 以及纳米厚度的薄靶, 而且所得的电子片在单能性和准直性等方面仍有待改进。我们通过三维粒子模拟深入研究了长脉冲径向偏振光与低密度等离子体相互作用的过程及机制, 提出了一种全新方案, 即利用长脉冲径向偏振光压缩低密度等离子体来产生高品质的孤立亚飞秒电子片。研究表明, 我们的方案可以产生准直单能的孤立电子片, 其能谱宽度为 17.7 MeV, 发散角的峰值和半高全宽分别为 3.6° 和 2.3°, 脉冲宽度为 144 as, 最大密度可以比初始密度高一个量级。我们还分析了激光和靶参数对结果的影响, 给出了本机制的适用范围。最后, 为了增加实验可行性, 我们针对实验条件设计了更容易实现的方案。本方案为基于现有实验条件产生高品质孤立亚飞秒电子片提供了一种新途径。

**关键词:** 孤立电子片; 径向偏振光; 激光电子加速

HEDP 2023-008

## 飞秒激光烧蚀过程单次实时超快成像

唐惟启<sup>1</sup>, 李政言<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北武汉, 430074)

**摘要:** 飞秒激光技术是精密加工的有力工具, 对飞秒激光加工材料过程进行实时超快成像能够更好的帮助我们理解激光与材料相互作用的机制。泵浦-探针方法是目前使用最广泛的方法, 但是基于传统泵浦-探测方法的测量技术有两个局限: 首先受材料表面均匀性的限制, 激光与材料作用的过程需要满足单发条件; 其次需要同时测量探针光的强度和相位信息来还原材料表面介电函数的超快演化。为了克服以上局限性, 我们同时测量探针光近场和远场来还原材料表面空间相位信息, 结合 FROG 技术表征探针光的频域相位信息, 可以实现近傅里叶变换极限时间分辨率的激光加工材料过程的实时单发超快成像。

**关键词:** 超快成像; 单发; 激光烧蚀

HEDP 2023-009

## 圆偏振强激光与微柱靶相互作用中高能准直电子束的产生与物理机制研究

李帅<sup>1</sup>, 蒋轲<sup>1</sup>, 黄太武<sup>1</sup>, 周沧涛<sup>1</sup>

(1. 深圳技术大学 工程物理学院, 广东 深圳 518118)

**摘要:** 由短脉冲强激光驱动产生的相对论强流电子束在惯性约束核聚变、次级辐射产生、材料等容加热等方面具有重要应用。如何稳定产生高能准直电子束是当前的研究热点。本报告中, 我们提出使用圆偏振强激光照射微柱靶产生高能准直电子束新方案。激光与靶相互作用并激发沿靶侧表面传输的等离子体表面波, 该波模具有强的纵向电磁场分量, 其振幅高出激光纵向场近一个量级。微柱靶侧表面电子可被表面波的纵向电场加速, 并从激光场中直接获得角动量形成螺旋电子束。同时, 电子受表面波纵向磁场的约束作用并减小发散。粒子模拟表明, 对于 $I \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 的飞秒激光, 靶后超热电子密度接近临界密度且温度可达 $\sim 14 \text{ MeV}$ , 截止能量大于 $65 \text{ MeV}$ , 发散角约 $8^\circ$ 。该方案为产生高品质电子源提供了新思路, 同时也在质子加速等方面具有一定应用价值。

**关键词:** 电子加速; 电子准直; 强激光; 微柱靶; 表面波

HEDP 2023-012

## X 射线激光驱动的超强孤立阿秒脉冲辐射

陈泽<sup>1</sup>, 王云良<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学物理系, 北京 100083)

**摘要:** 得益于 X 射线自由电子激光技术的发展, 其光强可以达到 10 的 17 次方瓦每平方厘米, 在未来有望获得光强为 10 的 23 次方瓦每平方厘米以上的 X 射线自由电子激光。通过脉冲压缩技术或者高次谐波技术还可以获得近单周期的 X 射线自由电子激光脉冲。因此 X 射线自由电子激光在粒子加速、伽马射线、非线性量子电动力学效应、实验室天文物理等方面的应用是目前的研究热点。本报告将介绍 X 射线自由电子激光脉冲与超密等离子体作用产生超强阿秒或飞秒脉冲的研究结果。阿秒脉冲及飞秒脉冲在原子、分子、纳米结构中的电子超快动力学探测、超快阿秒光学, 以及核动力学探测中都有着巨大的应用前景。超强激光脉冲与固体密度等离子体作用产生的阿秒脉冲具有强度高、脉宽短等优势。对于探测更快的微观过程和更小的空间尺度, 需要更短的脉冲宽度和更高的光子能量, 而相对论的 X 射线自由电子激光脉冲与超密等离子体作用可以产生强度更高, 脉宽更短的飞秒脉冲, 因此本报告将详细讨论 X 射线激光驱动的超强孤立阿秒脉冲或飞秒脉冲辐射机制。当 X 射线激光脉冲与超密等离子体作用时, 在激光场和电荷分离的静电场的共同作用下, 将会形成一个相对论纳米电子片, 该电子片将被加速到超相对论速度, 并最终通过相干韧致辐射机制辐射出超强孤立阿秒或飞秒脉冲, 脉冲强度可以达到 10 的 23 次方瓦每平方厘米, 持续时间为 1.1 阿秒, 滤波后可以达到几百个飞秒。得益于独特的相干韧致辐射的发射机制, 由量子电动力学效应而产生伽马光子与正负电子对的现象仅发生在加速过程, 而不会显著发生在辐射过程中, 从而使辐射出的脉冲拥有更高的峰值能量、更孤立的发射形状与更高的辐射频率。

**关键词:** X 射线激光; 超密等离子体; 相干韧致辐射; 阿秒脉冲

HEDP 2023-013

## 准静态 PIC 程序 QuickPIC 中的激光模块

孙广泽<sup>1</sup>, 孟维宇<sup>1</sup>, 李飞<sup>2</sup>, Warren Mori<sup>3</sup>, 安维明<sup>1,4</sup>

(1. 北京师范大学天文系, 北京 100875; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 3. 美国加州大学洛杉矶分校物理和天文学系, 洛杉矶 90095; 4. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206)

**摘要:** 高强度、短脉冲激光与等离子体相互作用是一类重要的物理研究对象。激光脉冲作为驱动束在等离子体中可以激发出相对论性等离子体尾场, 其中存在极强的纵向加速电场, 加速梯度可比传统加速器高出三个数量级以上, 从而提供了减少加速器体积、降低加速器成本的可能性, 近年来越来越受到人们的重视。使用 PIC 模拟程序能够实现激光与等离子体相互作用的高精度模拟, 但往往需要消耗大量的计算资源。本工作使用包络方程描述激光脉冲, 将激光模块加入到基于准静态近似的 PIC 模拟程序 QuickPIC 中, 从而在保持计算精度的前提下大幅提高模拟计算速度, 降低计算资源消耗。本工作介绍了开源 QuickPIC 中新的激光脉冲演化模块的基本算法, 同时展示了其模拟激光脉冲在等离子体通道以及激光在均匀等离子体中自聚焦情况下的模拟结果。

**关键词:** 准静态近似; 粒子模拟; 包络方程; 等离子体加速

HEDP 2023-014

## 超快相干极紫外光源的研发及表征

李 露<sup>1</sup>

(1. 深圳技术大学工程物理学院 518118)

**摘要:** 超快相干极紫外光源具有捕获原子分子、表面和材料动力学等能力,已在生物学、固体物理、天体物理等领域取得了重大突破。此光源在获取物质结构的探测过程中,实现纳米级空间分辨率、飞秒/阿秒级时间分辨率的主要挑战来源于保证以下主要参数品质:脉冲能量、脉宽、相干性及波前特性。本报告将汇报团队近期在相对论等离子体表面高次谐波及 FLASH 自由电子激光的相关工作。此外,还将简要介绍深圳技术大学的极紫外光源实验室建设进展。

**关键词:** 高次谐波; 相对论等离子体; 极紫外光源; 波前; 自由电子激光

HEDP 2023-015

## 激光驱动电子产生高流强的准直伽马射线

范路林<sup>1,2</sup>,徐同军<sup>1</sup>,李顺<sup>1</sup>,徐张力<sup>3</sup>,徐建彩<sup>1</sup>,朱健强<sup>4</sup>,沈百飞<sup>3</sup>,吉亮亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 上海师范大学 物理系, 上海 200233;

4. 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要:** 利用皮秒激光驱动的电子束,在实验上产生了高通量、低发散角的伽马射线。激光驱动的电子束具有高峰值流强的特点,实验上利用 120J, 1ps 的激光脉冲在低密度气体靶中驱动自调制尾场,产生截至能量为数十 MeV、总电荷量最高为 26nC 的准直电子束,其发散角达到 1.5°。将这些准直的电子束辐照铅靶通过轫致辐射产生伽马射线。使用自主设计的高能量分辨率渐变磁场康普顿散射谱仪和堆栈谱仪同时测量伽马射线,在接受角 1.1° 内实验测量到光子数为  $2.2 \times 10^9$  ( $> 0.3\text{MeV}$ ), 能量最高为 16MeV。对比实验结果和蒙特卡洛模拟,得出伽马光子产额为  $2.2 \times 10^{11}$ , 发散角为 7.73°, 通过模拟还发现可以增加靶厚进一步提高光子产额而不改变其发散角。这种高峰值通量、低发散角的伽马射线源是开展核光子学、光光散射等研究的重要工具。

**关键词:** 轫致辐射; 康普顿散射; 伽马射线

HEDP 2023-016

## 利用圆偏振激光产生高能量子涡旋态电子

步志刚<sup>1</sup>, 耿学松<sup>1</sup>, 刘世宇<sup>1,2</sup>, 雷少虎<sup>1,2</sup>, 栗建兴<sup>3</sup>,  
沈百飞<sup>1,4</sup>, 李儒新<sup>1,5</sup>, 徐至展<sup>1</sup>, 吉亮亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 1000493;  
3. 西安交通大学物理学院, 陕西 710049; 4. 上海师范大学物理系, 上海 200234; 5. 上海科技大学, 上海 201210)

**摘要:** 高能量子涡旋态粒子具有涡旋结构的波函数且携带内禀轨道角动量这一新的自由度, 因而在高能粒子物理与核物理过程中的角动量产生和操控, 以及天体物理等领域有许多重要应用前景。然而, 由于高能粒子波长极短, 实验产生和探测这类高能涡旋态粒子具有很大的挑战。已有的研究表明, 只能通过电子束与圆偏振或涡旋激光的逆康普顿散射产生涡旋态  $\gamma$  光子, 而量子涡旋态电子的产生依然没有有效的方法。

我们提出一种产生高能量子涡旋态电子的新方法: 基于高能电子束与圆偏振激光的非线性涡旋康普顿散射, 将激光光子的自旋角动量传递给散射电子的内禀轨道角动量。基于强场 QED 框架, 我们构建了完备的非线性涡旋散射理论, 第一次自洽描述了多光子吸收过程中的激光光子、散射电子和辐射光子间内禀角动量的守恒及转移。理论结果表明, 在弱相对论下, 激光光子自旋几乎全部转移给辐射  $\gamma$  光子的轨道角动量; 随着激光强度的增加, 辐射反作用将有效地扭曲散射电子波函数为涡旋结构, 从而使散射电子获得明显的内禀轨道角动量, 且中心角动量子数正比于辐射光子与电子能量的比值。考虑到激光场中的散射电子可以继续发生多次散射, 我们又进一步研究了散射的涡旋态电子与激光场的二次散射, 发现量子涡旋态电子的辐射谱呈现明显的双峰结构, 这与普通电子的康普顿散射谱完全不同, 可能作为实验鉴别高能量子涡旋态电子的信号。

我们的研究发现了强场 QED 过程中的辐射反作用与内禀轨道角动量之间的重要关联; 提出在目前激光技术下产生和鉴别高能量子涡旋态电子的新方法。这类涡旋态电子在核物理过程、核结构诊断, 以及高能粒子对撞等过程中可能产生新的物理现象。

**关键词:** 量子涡旋态; 非线性康普顿散射; 轨道角动量; 辐射反作用

HEDP 2023-017

## 带电粒子在电磁场中运动轨迹的可变阶显式保辛算法在不同场景中的应用

唐宇辰<sup>1</sup>, 张开来<sup>1</sup>, 安维明<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206;  
3. 美国加州大学洛杉矶分校 物理和天文学系, 洛杉矶 90095)

**摘要:** 长期以来, 对带电粒子在时变电磁场中运动轨迹的模拟问题计算一直是人们关注是长时间存在的问题, 其难点在于哈密顿量中形式不可分离为动量和坐标形式不可分。一些处理方法例如使用龙格库塔的变形方法可以在步长小的时候达到满足要求, 但其数值模拟方法为隐式算法, 计算速度十分缓慢。ESSRK 方法作为一种显式算法, 既满足了时变电磁场的需要, 也能够处理不可分离的哈密顿量的模拟问题, 并且因为其保辛的特点, 在相空间中运动时体积保持不变, 所以模拟精度高, 能够在长时间以及长步长的情况下保持较好的模拟结果。我们的研究基于 ESSRK 方法能够变阶的特点, 改变阶数以适应不同情况下的需要。我们希望在 PIC 中与至今沿用的 Boris pusher 方法作比较, 以及在高阶的情况下, 与卫星定轨常用的 RK78 方法进行比较, 以寻求 ESSRK 在更广泛的领域中应用的可能性。

**关键词:** 时变电磁场; ESSRK 算法; 显式算法

HEDP 2023-018

## 基于单啁啾脉冲的超快压缩成像 时间分辨率

唐浩程<sup>1</sup>, 李政言<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 超快压缩成像可在单次拍摄中捕获瞬态事件的三维时空信息。当使用单个啁啾光学探针时, 使用直接频率-时间映射方法可以从探针光的幅度或相位调制中获得时间信息。我们将光谱干涉测量等传统一维超快测量技术的时间分辨率分析扩展到三维超快压缩成像。通过获取完整的振幅与相位信息, 可以对探针光使用完整的傅里叶变换, 进而获得只受探针光带宽限制的时间分辨率。提升的时间分辨率有可能实现超快压缩成像, 有效成像速度可达每秒千万亿帧的水平。

**关键词:** 超快成像, 时间分辨率

HEDP 2023-022

## 强飞秒激光与金属丝作用产生的双端 无发散米量级传播的太赫兹辐射源

邵烁婷<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 高功率太赫兹辐射源被认为是研究凝聚态物质动力学、生物医学成像以及无线通信领域的独特的工具。由于传统的 THz 产生方法存在许多不足核限制, 需要发展一种新型的高功率 THz 辐射源。我们在实验上演示了一种基于强飞秒激光辐照金属丝产生双端无发散的 THz 辐射源, 同时金属丝作为 THz 表面波良好的波导结构提供米量级的传输。我们测量的靶前超热电子的角分布来确认 THz 辐射的产生机制, 从实验、PIC 模拟和 CST 模拟结果确认为亚相对论电子的相干渡越辐射。这种新型 THz 辐射源结构简单且结合高转换效率的 THz 产生以及低损耗传输。

**关键词:** 高功率太赫兹; 相干渡越辐射



HEDP 2023-024

## QuickPIC 数据可视化图形 用户界面程序开发

彭佳欣<sup>1</sup>, 沈昱然<sup>1</sup>, 安维明<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206)

**摘要:** QuickPIC 是由 UCLA-北师大合作并主导开发的开源三维并行准静态 PIC 代码, 它可以高效地模拟等离子体尾波加速器问题。针对 QuickPIC 所产生的自解释数据的特殊性、复杂性, 与其现有配套的可视化绘图软件针对性不强这两个可改进方向, 我们设计了一个与其配套的数据可视化程序, 以方便用户更加快捷、简易、清晰地分析 QuickPIC 的计算结果。该程序主要使用 Python 进行开发, 并利用 QtDesigner 设计了便捷的图形用户界面。它可以自动识别数据类型并绘制一维线图, 二维场图, 散点图以及多个图层的叠加图像, 也可以提供图像调整、数据变换等多种功能以满足用户不同需求。未来我们还会将该程序拓展为可对其他 PIC 代码 (如 QPAD, VSHPIC 等) 计算结果进行可视化的程序。

**关键词:** QuickPIC; 快速可视化处理; GUI; python; QtDesigner; 开源程序

HEDP 2023-025

## QuickPIC 的 GPU 加速算法研究

田悦然<sup>1</sup>, 王钺洛<sup>2</sup>, Viktor Decyk<sup>3</sup>, Warren Mori<sup>3</sup>, 安维明<sup>2,4</sup>

北京师范大学 物理系, 北京 100875; 2. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 3. 美国加州大学洛杉矶分校 物理和天文学系, 洛杉矶 90095; 4. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206)

**摘要:** 基于准静态近似的 QuickPIC 算法作为模拟等离子体尾场加速的 PIC (particle-in-cell) 方法的一种, 在保证模拟精度的前提下, 运算速度亦为普通 PIC 程序的 100~1000 倍。为了探究进一步提高 QuickPIC 性能的可能性, 根据程序中需要对大量粒子数据应用相同指令的特点, 我们使用 CUDA C 编写 GPU 子程序, 将模拟过程中不同区域、不同粒子 (或格点) 分配给 GPU 中不同的模块和线程处理, 来代替原程序中负责计算粒子的速度和位移、更新粒子的位置、计算格点处电流、对粒子排序、快速傅里叶变换等部分的 CPU 子程序。对改写后和改写前的程序, 我们采用同一个输入文件, 分别在笔记本电脑和超级计算机上测试了不同部分运行所需的时间, 对于改写后的各个子程序, 分别有 50~200 倍不等的效率提升, 验证了 GPU 加速进一步应用于 PIC 方法的潜力。

**关键词:** 等离子体; GPU 加速; PIC 方法; CUDA; 高性能计算

HEDP 2023-027

## 自旋极化气体靶中的激光驱动 电子和质子加速

温猛<sup>1</sup>, 丁力<sup>1</sup>, 庾春秀<sup>1</sup>, 金璐玲<sup>1</sup>

(1. 湖北大学 物理学院, 武汉 430062)

**摘要:** 激光与等离子体相互加速电子和离子已经发展了四十多年的时间, 用来产生高能电子的激光驱动尾波加速电子的技术发展的尤为成熟, 拍瓦激光加速百 MeV 的质子束已经成为激光加速领域的实验热点。近几年, 自旋极化带电粒子的加速也成为激光加速的研究课题之一。用激光加速自旋极化粒子的实验方案主要分为两类, 一类是粒子先极化再加速, 另一类是先加速再极化。本报告重点阐述第一类先极化再加速方案下激光加速极化电子和质子的物理机制, 详细介绍该方案中靶极化制备方法, 以及采用尾波加速和磁涡流加速机制得到自旋极化电子束和质子束的物理过程。通过 PIC 模拟, 我们证明激光加速过程中粒子在等离子体场中进动造成的电子束和质子束的退极化程度均可控制在 20% 以内; 并且研究表明, 磁涡流加速质子的效果对激光加速电子的能谱存在重要的依赖关系。

**关键词:** 尾波加速; 磁涡流加速; 拍瓦激光; 自旋极化粒子束; 粒子自旋进动

HEDP 2023-028

## 羲和激光装置 (SULF) 最新进展

王文鹏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 强场激光物理国家重点实验室 201899)

**摘要:** 激光与等离子体相互加速电子和离子已经发展了四十多年的时间, 用来产生高能电子的激光驱动尾波加速电子的技术发展的尤为成熟, 拍瓦激光加速百 MeV 的质子束已经成为激光加速领域的实验热点。近几年, 自旋极化带电粒子的加速也成为激光加速的研究课题之一。用激光加速自旋极化粒子的实验方案主要分为两类, 一类是粒子先极化再加速, 另一类是先加速再极化。本报告重点阐述第一类先极化再加速方案下激光加速极化电子和质子的物理机制, 详细介绍该方案中靶极化制备方法, 以及采用尾波加速和磁涡流加速机制得到自旋极化电子束和质子束的物理过程。通过 PIC 模拟, 我们证明激光加速过程中粒子在等离子体场中进动造成的电子束和质子束的退极化程度均可控制在 20% 以内; 并且研究表明, 磁涡流加速质子的效果对激光加速电子的能谱存在重要的依赖关系。

**关键词:** 超强超短激光; 粒子加速

HEDP 2023-029

## Beam-driven energy spectrum tunable betatron X-ray source

Chuanyi Xi<sup>1</sup>

(1. Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract:** X-rays of varying energies find applications in diverse scenarios due to their different penetrability. However, there are many difficulties in energy regulation of existing X-ray sources. In this letter, we show a scheme to regulate the X-ray energy spectrum by manipulating the plasma density in plasma wakefield acceleration(PWFA). The generated X-ray center energy can be tuned within the range of  $\sim 1$  keV to  $\sim 100$  keV, expanding the control range by an order of magnitude. The resulting peak brightness reaches  $5.5 \times 10^{22}$  photons/(0.1%BW·s·mm<sup>2</sup>·mrad<sup>2</sup>), and the source size is minimized. This high-brightness, energy-controlled betatron source opens the way to a wide range of applications requiring photons of specific energy, such as phase contrast imaging in medicine, nondestructive testing and material analysis in industry, and imaging in nuclear physics.

**Keywords:** Plasma; betatron; X-ray; Energy tuning

HEDP 2023-031

## 高功率皮秒激光-近临界密度泡沫驱动电子加速实验研究

邓志刚<sup>1</sup>, 任洁茹<sup>2</sup>

(1.中物院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川绵阳 621900; 2.西安交通大学, 陕西西安 710049)

**摘要:** 激光驱动相对论强流电子束在惯性约束聚变、材料检测、激光核物理等领域中存在重要的应用需求。当前激光驱动电子源电荷量一般在 nC 量级, 远低于上述应用中 1 $\mu$ C 的基本电量需求, 成为制约其发展的关键“卡脖子”问题。高功率皮秒激光与近临界密度泡沫作用是获得超高电量电子束的一种极为有效的途径。依托星光 III 激光装置, 中物院八所联合西交大等多家单位开展了多轮次激光-近临界密度泡沫靶相互作用的实验研究工作, 解决了低密度泡沫制备、等离子体制备及表征、及电子能谱多角度测量等问题, 发现了泡沫微结构对激光传输、电子输运的反常阻滞现象, 提出了激光直接烧蚀、间接烧蚀等多种泡沫匀滑方案, 初步实现了电量超过 1 $\mu$ C 的高能大电量电子束的稳定可控产生。采用一束纳秒激光轰击金腔靶产生 X 射线, 间接烧蚀泡沫产生稳定可控的近临界密度等离子体; 利用皮秒激光与该等离子体作用实验上产生了电量超过 1 $\mu$ C 的高能大电量电子束, 相比激光-固体靶产生的电子束电量高 1-2 个量级, 产生的次级伽玛辐射剂量同样高出 1-2 个量级, 且实验具有极好的重复性, 初步证明了近临界密度泡沫等离子体在激光电子加速中的优越性。

**关键词:** 近临界密度泡沫; 高能大电量电子束

HEDP 2023-040

## 准静态近似 PIC 程序 QuickPIC 中的一种显式算法

王海南<sup>1</sup>, 李飞<sup>3</sup>, Thamine Dalichaouch<sup>4</sup>, Warren Mori<sup>4</sup>, Viktor Decyk<sup>4</sup>, 安维明<sup>1, 2</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学 天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206;  
3. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 4. 美国加州大学洛杉矶分校 物理和天文学系, 洛杉矶 90095)

**摘要:** 等离子体尾波加速是一种利用强粒子束在等离子体中激发出大幅等离子体尾波并对带电粒子进行加速的机制, 其加速梯度比最先进的射频加速技术高出几个数量级, 已达到 GeV/m 级别, 为建造超紧凑型加速器和辐射源奠定了基础, 也为建造基于等离子体的自由电子激光装置和超高能正负电子对撞机提供了可能。准静态近似下的 PIC 程序 QuickPIC 是一个可以高效模拟等离子体尾波加速物理过程的大型并行计算程序。它采用了预测迭代的方法求解准静态近似下的电磁场方程, 在特定情况下需要多次迭代才能达到收敛。WAND-PIC 提出了一种新的显式算法对准静态 PIC 中的方程进行求解, 而不用经过迭代计算。我们将这种方法移植到了 QuickPIC 中, 并展示了 QuickPIC 中迭代算法与显式算法的计算结果对比。

**关键词:** 等离子体尾波加速; 准静态近似; PIC 算法; 有限差分方法; 快速傅立叶变换

HEDP 2023-041

## 基于相对论激光等离子体高次谐波的新型结构光场研究

陈自宇<sup>1</sup>

(1. 四川大学物理学院, 高能密度物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

**摘要:** 基于相对论激光等离子体相互作用产生的高次谐波辐射, 在频域上可以提供极紫外到软 X 射线波段的相干光源, 在时域上可以获得阿秒量级的超短脉冲, 在强度上有潜力达到接近施温格极限的超强光场。本报告将介绍最近三年我们通过数值模拟, 围绕以上三个方面, 在新型结构光场研究中取得的进展, 主要包括: (1) 将矢量光场和携带横向轨道角动量的时空涡旋光场等新型结构光场的产生推进到了极紫外和软 X 射线波段; (2) 利用艾里光束实现多周期激光产生空间分离的单个孤立阿秒脉冲; (3) 利用艾里-贝塞尔光束实现大焦深的极端光场产生, 并探讨 10-100 拍瓦激光作用下 QED 效应对高次谐波产生的影响。

**关键词:** 相对论激光等离子体, 高次谐波, 阿秒脉冲, 结构光场

HEDP 2023-042

## 表面等离极化激元相干辐射放大及其 高效耦合 MeV 电子加速验证

田野<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海, 201800;  
2. 中国科学院大学材料科学与光电子工程中心, 北京, 100049)

**摘要:** 表面等离极化激元以其独特的光学性质, 如亚波长尺寸、高光子动量及近场增强等, 为集成化的光电子器件开发及应用开辟了全新道路。高功率的表面等离极化激元能用于构建片上的信息传输、光谱检测, 以及极紧凑的辐射源等。本工作中, 我们介绍利用飞秒激光驱动产生电子与表面等离极化激元 (SPP) 作用, 实现了对表面等离极化激元能量“放大”, 并通过对 SPP 相干放大“建立”的测量, 阐述了自由电子与 SPP 作用过程中的受激放大机理。基于这一 SPP 模式的太赫兹强源, 我们将其应用于光学波导电子加速实验, 将太赫兹 SPP 与内衬介质波导管耦合, 极大地提高了太赫兹波能量的利用效率, 并在波导管内 5mm 的作用距离上实现了最高电子能量增益 1.1MeV 及 210MV/m 的有效加速梯度, 完成了超过 MeV 量级的光学电子加速验证。

**关键词:** 表面等离激元、电子加速、相干辐射、太赫兹

HEDP 2023-043

## 弱光场调控下的强激光高次谐波

闫明东<sup>1</sup>, 魏子娟<sup>1</sup>, 夏凡<sup>1</sup>, 李政言<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学光学与电子信息学院和武汉光电国家研究中心, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 强激光作用于气体、固体材料、等离子体界面都可以产生激光频率整数倍的高次谐波, 将光谱范围延伸到极紫外和软 X 射线波段。不同于倍频等基于电极化矢量对入射光场微扰展开的传统非线性光学过程, 高次谐波是一种非微扰的极端非线性光学过程。然而当在强激光驱动高次谐波过程中引入另一束光强较弱 (低 3-4 个数量级)、波长任意的微扰光场, 高次谐波产生过程中的电子运动将会在被微扰光场直接调制, 实现对输出极紫外或软 X 射线光源的相干调控。本文讨论气体和等离子体表面高次谐波的微扰光场调控问题, 具体讲述高次谐波微扰混频中和频/差频通道的光强差异性、阿秒脉冲时空分布原位测量中的振幅调制修正、等离子体表面高次谐波混频机制和偏振选择定则等实验和理论研究结果。通过对这些问题的探索, 我们希望将弱激光光场作为一种可以方便操控的相位/振幅调制器, 实现对高次谐波极紫外和软 X 射线输出光场的控制和测量。

**关键词:** 高次谐波, 微扰, 光场测量

HEDP 2023-044

## 准静态近似下 PIC 程序 QPAD 中的一种显式算法

唐榕<sup>1</sup>, 李飞<sup>3</sup>, Warren Mori<sup>4</sup>, Viktor Decyk<sup>4</sup>, 安维明<sup>1, 2</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206;  
3. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 4. 美国加州大学洛杉矶分校 物理和天文学系, 洛杉矶 90095)

**摘要:** 等离子体尾波加速是一种利用驱动粒子束或强激光在等离子体中产生尾波, 并利用尾波对另一个束团进行加速的方法。由于这种加速方法可以产生 10 GeV/m 甚至更高的加速梯度, 因此它越来越有希望成为未来高能对撞机及 X 射线自由电子激光装置中的主要加速手段。作为专门用来模拟等离子体尾波加速的大型并行计算程序 QuickPIC 和 QPAD, 它们采用了准静态近似的 PIC 算法, 其中 QPAD 在 QuickPIC 的基础上还采用了基于角向模式分解的计算方法。目前 QuickPIC 与 QPAD 都采用了预测迭代的方法去求解准静态近似下的电磁场方程, 在特定情况下需要进行多次迭代才能达到收敛。WAND-PIC 中提出了一种新的显示算法对横向磁场方程进行求解, 而不用经过迭代计算。我们将这种求解方法移植到了 QPAD 的 0 模求解器中(即轴对称情况下的求解器)。本工作展示了 QPAD 中迭代算法与显示算法的计算结果对比, 并讨论了将此方法推广至高阶模式的算法。

**关键词:** 等离子体尾波加速; PIC 算法; 准静态近似; 显式算法

HEDP 2023-045

## 激光加速兆安流强电子束及驱动超强软 X 射线源的研究

胡曦辰<sup>1</sup>, 祝铭阳<sup>1</sup>, 冯杰<sup>1</sup>, 邓志刚<sup>2</sup>, 袁宗强<sup>2</sup>, 杨雷<sup>2</sup>,  
卢峰<sup>2</sup>, 李曜均<sup>1</sup>, 闫文超<sup>1</sup>, 周维民<sup>2</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 陈黎明<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 激光等离子体驱动的超快软 X 射线源不仅具有超高亮度的特性, 还具有与驱动激光天然同步的优势。该辐射源在超快泵浦探测吸收谱学方面具有重要的应用价值, 而 X 射线谱通量是实现高信噪比的重要条件。本工作使用紧聚焦数 PW 强激光与次临界密度 ( $\sim 0.03 \cdot n_c$ ) 等离子体相互作用, 通过激光直接加速过程实现了电荷量高达  $\sim 245$  nC @  $E_k > 1$  MeV、束长短至  $\sim 70$  fs 的兆安级强流电子束。因强流电子束在等离子体通道中的快速振荡, 实验实现了峰值谱通量  $5 \times 10^{10}$  photons/0.1%BW/@1keV 的类同步辐射, 临界能量  $\sim 1.7$  keV。本工作实现的软 X 射线源相较于激光尾波场驱动的辐射谱通量提升近 1 个数量级, 高于第三代同步辐射光源, 而与自由电子激光相比具有更宽的辐射谱, 且与强激光同步精度小于数十 fs。因此, 该辐射源结合强激光在诊断物质结构及微、介观特性方面独具优势。

**关键词:** 激光直接加速; 强流电子束; 类同步辐射; 软 X 射线源; 谱通量

HEDP 2023-0046

## 双束对射激光驱动超薄靶的 超短脉冲中子源

冯凯源<sup>1</sup>, 邵福球<sup>1</sup>, 蒋祥瑞<sup>1</sup>, 邹德滨<sup>1</sup>, 胡理想<sup>1</sup>, 张国博<sup>2</sup>, 杨晓虎<sup>2</sup>,  
银燕<sup>1</sup>, 马燕云<sup>3</sup>, 余同普<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 理学院物理系, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院核科学与技术系, 长沙 410073;  
3. 国防科技大学前沿交叉学科学院 第一学科交叉中心, 长沙 410073)

**摘要:** 超短超强激光驱动的中子源具有焦斑小、脉宽短和峰值通量高等优势, 在中子照相、材料无损分析、核截面测量以及核合成等研究领域展现出重要的研究价值。本文使用粒子模拟程序和蒙特卡罗方法研究了二维环境下双束对射圆极化激光与超薄氘靶相互作用中氘氘聚变反应产生中子的过程。研究发现, 由于净光压和横向不稳定性发展的差异, 激光电场矢量旋转方向和初始相对相位差对氘靶压缩及中子特性有重要影响。选择相对相位差为 0 且电场矢量旋转方向相同的双束光, 可获得最高的中子产额; 而采用相对相位差为  $0.5\pi$  或  $1.5\pi$  且电场矢量旋转方向不同的对射光, 中子具有定向的空间分布。对于强度为  $1.23 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>、脉宽为 33 fs、相对相位差为  $0.5\pi$  的左旋光和右旋光, 可获得产额为  $8.5 \times 10^4$  n、强度为  $1.2 \times 10^{19}$  n/s、脉宽为 23 fs、前冲性较好且分布可调谐的脉冲中子源。研究结果有望对实验获得短脉宽、高产率、前冲性好的紧凑型中子源提供参考。

**关键词:** 双束对射圆极化激光; 相对相位差; 电场矢量旋转方向; 脉冲中子源

HEDP 2023-048

## GPU 加速算法在 QuickPIC 中的实现

王钺洛<sup>1</sup>, 田悦然<sup>2</sup>, Viktor Decyk<sup>3</sup>, Warren Mori<sup>3</sup>, 安维明<sup>1,4</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学 物理系, 北京 100875; 3. 美国加州大学洛杉矶分校 物理和天文学系, 洛杉矶 90095; 4. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206)

**摘要:** PIC (particle-in-cell) 是等离子体模拟程序所采用的一种主要方法, 可以得到等离子体中各物理量随时间的变化规律。基于准静态近似的 PIC 程序而 QuickPIC 可以高效模拟等离子体尾波加速问题, 其运算速度与普通 PIC 程序相比提高了 100 到 1000 倍。我们进行了 QuickPIC 的 GPU 加速算法的研究与开发。在实际工作中对 QuickPIC 的 qdeposit, pusher, amjdeposit, pmove, fft 这些部分做了修改, 将 GPU 模块分别嵌入各个工作模组中, 并测试了各个模块改写前和改写后, 在单核 CPU 和 GPU 上处理同一个输入文件时所需的时间, 并把相同模块在笔记本电脑和超级计算机上运行的时间作了对比。结果显示运算速度提高了 50 到 200 倍, 在保证结果正确性与稳定性的基础上显著改善了程序效率, 为后续研究和运用奠定了基础。

**关键词:** GPU; CUDA; 算法加速; 等离子体尾波加速

HEDP 2023-0051

## 基于放电毛细管弯曲等离子体通道的产生及诊断

李建龙<sup>1</sup>

(1.上海交通大学, 上海 200030)

**摘要:**理论上,使用曲率渐变的弯曲等离子体通道来引导新的强激光脉冲可以实现高效的尾波级联加速。我们重点研究了基于放电毛细管产生这种弯曲的等离子体通道的可行性。通过放电光谱分析,对弯曲放电毛细管内等离子体的纵向和横向密度分布进行了诊断。分别研究了充气方式、充气背压和放电电压对毛细管内等离子体密度分布的影响。实验表明,在合理的充气方式下,可以产生纵向均匀,最大通道深度为  $47.5\mu\text{m}$ , 长度为  $3\text{cm}$ , 且在时间上足够稳定的等离子体通道,可以用于激光引导。利用这种等离子体通道,成功地导引了脉冲时间为  $30\text{fs}$  的激光,在其传播方向弯曲了  $10.4^\circ$ 。

**关键词:** 弯曲等离子体通道; 放电光谱; 激光导引

HEDP 2023-055

## 超强拉盖尔-高斯激光驱动的多峰能谱质子束模拟研究

何坚志<sup>1,2,3</sup>, 王文鹏<sup>1,3</sup>, 董浩<sup>1,3</sup>, 江成<sup>1</sup>, 史志勇<sup>1</sup>, 冷雨欣<sup>1,2,3</sup>,  
李儒新<sup>1,2,3</sup>, 徐至展<sup>1,2,3</sup>

(1.中国科学院上海光学精密机械研究所, 高场激光物理国家重点实验室, 中国科学院超强激光科学卓越中心, 上海 201800; 2. 上海科技大学 物理科学与技术学院, 上海 201210; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**随着高功率激光技术的发展,强激光驱动的离子加速成为了强场激光物理的重要研究课题之一。我们使用三维 PIC 数值模拟研究了超强拉盖尔-高斯 (LG) 激光 ( $a=80$ ) 与薄膜靶相互作用产生的高能质子束。模拟结果显示,左旋圆偏振的 LG 激光可以驱动产生高准直的多峰结构能谱的 GeV 量级的质子束。通过对比不同偏振的 LG 激光和高斯激光驱动的质子结果,发现左旋圆偏振 LG 激光独特的纵向电场可以自调制箍缩在激光中心的高能质子束形成多峰结构的能谱。离子束的品质因此得到了较大的改善。研究结果对未来高能离子源的开发及应用具有重要参考价值。

**关键词:** 激光等离子体; 离子加速; 拉盖尔-高斯激光



HEDP 2023-057

## 包含场元干涉和等离子体响应的 双色场激发太赫兹远场模型

李楠<sup>1</sup>; 王伟民<sup>1</sup>

(1.中国人民大学, 北京 100872)

**摘要:** 双色激光场电离空气产生宽谱太赫兹辐射的方案由于其技术上的简便性和产生的高效性已经被广泛研究。实验显示探测到的太赫兹强度角分布通常在其激光的传播轴向上有一个坑, 这不利于其进一步应用, 并且太赫兹的波形通常跟着一个振荡的小尾巴也没有被很好地理解。在等离子体电流模型的基础上, 我们提出了电场元干涉模型, 用具有一定相速度的电流源代替理想的点源, 同时考虑等离子体动力学导致的电流振荡。通过引入时间干涉, 相速度和电流的高斯图样, 可以对太赫兹的强度角分布进行调制。据此推断通过调整激光脉冲的持续时间和群速度可以消除角分布的“坑”。除此之外, 等离子体振荡可以导致太赫兹波形中振荡的小尾巴和对应频谱中的“尖刺”, 这一计算结果与实验结果相似, 给出了水蒸气对太赫兹波吸收之外的另一种解释方案。反之, 太赫兹频谱中的“尖刺”携带有等离子体的密度信息, 潜在地可以作为测量等离子体密度的一种方式。

**关键词:** 太赫兹; 等离子体; 双色激光场

HEDP 2023-059

## 基于 LWFA 驱动 PWFA 的混合加速研究

常心源<sup>1,2</sup>, 曾明<sup>2</sup>, 王佳<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院大学 物理科学学院, 北京 101408; 2. 中国科学院高能物理研究所 加速器中心, 北京 100049)

**摘要:** 基于等离子体的新加速机制因其超高加速梯度而备受关注。粒子束驱动等离子体尾波加速器(PWFA)能够提供 1~100GeV/m 的加速梯度并保持加速束的超低能散与发射度, 单级能量增益相对于激光驱动等离子体尾波加速器(LWFA)更高, 但世界上只有少量由直线加速器驱动的 PWFA, 极大限制了该技术的发展; 驱动 LWFA 的激光器相对于驱动 PWFA 的加速器而言更容易获得, 且 LWFA 能够产生峰值电流高于 10kA 的飞秒级 GeV 电子束, 是实现 PWFA 的理想驱动束, 能够突破目前 PWFA 存在的瓶颈。在此研究中, 我们用 Particle In Cell (PIC) 算法对上述过程进行模拟, 在 LWFA 阶段使用超过 100TW 的超强激光实现自注入, 提取该自注入电子束作为驱动束, 对 PWFA 阶段中密度下坡注入的电子束进行加速。我们得到了 LWFA 阶段自注入电子束和 PWFA 阶段密度下坡注入电子束在能散、发射度等参数方面的变化, 后续将对该 LWFA 驱动 PWFA 的混合加速方案进行优化。

**关键词:** 等离子体尾波加速; LWFA 驱动 PWFA; 混合加速; 束流品质; PIC 模拟

HEDP 2023-060

## 准柱坐标系下剪式交叉电离注入的 PIC 模拟

马明号<sup>1,2</sup>, 曾明<sup>3</sup>, 王佳<sup>3</sup>, 闫文超<sup>1,2</sup>, 李大章<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学 物理与天文学院激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 激光尾场加速因其具有超出传统加速器千倍以上的超高加速梯度而受到广泛关注。剪式交叉电离注入是新近提出的优化注入方案, 其通过调节交叉角等参数可控制注入电子束的品质。一般来说, 剪式交叉电离注入的模拟研究需要用到三维 Particle In Cell (PIC) 算法, 其需要超高的计算资源支撑。在此研究中, 我们尝试使用准柱坐标系模拟算法对这一过程进行 PIC 模拟, 以大量节省计算资源。模拟得到了注入电子束的电量、能散、发射度随交叉角变化的趋势, 这有助于我们后续对该注入方式的进一步优化。

**关键词:** 离子化注入; 准柱坐标系; PIC 算法; 激光尾场加速

HEDP 2023-062

## 相对论性等离子体高次谐波的波前特性与聚焦优化研究

伍超能<sup>1</sup>, 李露<sup>1</sup>, 周沧涛<sup>1</sup>, Matt Zepf<sup>2, 3</sup>, Philippe Zeitoun<sup>4</sup>

(1. 深圳技术大学 工程物理学院, 广东深圳 518118; 2. Helmholtz Institute Jena, Fröbelstieg 3, 07743 Jena, Germany; 3. Friedrich Schiller University Jena, Institute of Optics and Quantum Electronics, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena, Germany; 4. Laboratoire d'Optique Appliquée, CNRS, Ecole Polytechnique, ENSTA, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France)

**摘要:** 量子电动力学 (QED) 是现代物理学的基石之一。由于在实验中无法获得诱导强场 QED 过程所需的极端振幅电磁场, 大部分强场 QED 的理论预测仍未得到实证。随着激光技术的发展, 超短超强激光驱动相对论性等离子体高次谐波产生过程中的等离子体镜表面光学聚焦效应为达成强场 QED 领域所需的极端场强条件提供了可能性。当前, 针对高次谐波辐射近场时空特性的表征工作较为匮乏, 等离子体镜聚焦系统的微米级焦距、亚微米级焦斑尺寸及高于激光聚焦强度的焦点亮度为实验测量提出了挑战。本工作中, 我们通过理论与数值模拟对相对论性等离子体高次谐波的电场强度空间分布及波前特性进行了研究, 建立了通过远场哈特曼波前探测器获取近场等离子体镜表面结构及反射焦点空间特性的方法。同时, 我们针对激光诱导的凹陷等离子体镜聚焦系统的光学特性, 提出了通过调整驱动光聚焦系统实现像差平衡的可行实验方案, 当远场像差满足容限条件时, 高斯焦点处的场强及能量集中度得以显著提升。在实验中, 通过测量远场空间特性以实现焦点优化的方法提高了等离子体镜聚焦方案的可行性。

**关键词:** 高次谐波; 阿秒脉冲; 等离子体镜聚焦; 波前; 像差平衡; 哈特曼传感器

HEDP 2023-063

## 强激光与等离子体表面相互作用 产生的高次谐波辐射

刘峰<sup>1,2</sup>, 李博原<sup>1,2,3</sup>, 吴福源<sup>1,2</sup>, 葛绪雷<sup>1,2</sup>, 远晓辉<sup>1,2</sup>, 陈民<sup>1,2</sup>,  
盛政明<sup>1,2,3</sup>, 张杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海交通大学 物理与天文学院, 上海, 200240; 2. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海, 200240;  
3. 上海交通大学 李政道研究所, 上海 200240)

**摘要:** 超短超强激光与固体靶表面的等离子体相互作用, 可以通过高次谐波产生从极紫外到软 X 射线波段的相干辐射, 这种光源可以应用于超快测量和高分辨显微成像, 并且有望产生极强光场。实验和理论研究都表明靶表面的预等离子体分布对高次谐波产生过程有非常重要的影响。我们利用上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室的 200 TW 飞秒激光系统, 开展了强激光与固体靶表面相互作用产生高次谐波的实验研究, 通过主动控制靶表面的预等离子体分布, 优化高次谐波产生过程及控制高次谐波特性。

当激光的对比度较低, 产生的预等离子体密度标长较大时, 无法产生高次谐波。我们使用等离子体镜技术提高激光的对比度, 然后使用一束预脉冲主动调控预等离子体的密度标长, 可以优化高次谐波的产生效率。我们发现使用预脉冲控制预等离子体的横向密度分布, 在靶表面产生凸起的预等离子体微结构, 可以控制高次谐波的发散角。我们还提出使用一束正入射到靶面的圆偏振预脉冲, 控制预等离子体的纵向密度分布, 可以压缩并消除低密度的预等离子体, 因此能让低对比度的激光也能高效地产生高次谐波, 并且我们在最近的实验中成功地实现了这个技术方案。

**关键词:** 强激光、固体靶、高次谐波、等离子体、极紫外辐射

HEDP 2023-064

## 基于等离子体扭摆器的强场 可调频太赫兹辐射源

蔡杰<sup>1</sup>, 寿寅任<sup>3</sup>, 耿易星<sup>1</sup>, 韩立琦<sup>2</sup>, 徐新路<sup>1</sup>, 文双春<sup>2</sup>, 沈百飞<sup>4</sup>,  
余金清<sup>2</sup>, 颜学庆<sup>1,5,6</sup>

(1. 核物理与技术国家重点实验室、HEDP 部重点实验室、北京大学教育、中国农业技术研究院, 北京 100081;  
2. 物理学院高能尺度物理与应用、湖南省重点实验室、湖南大学电子学系, 湖南 410082;  
3. 广州基础科学研究所、相对论激光科学中心, 广州 510030; 4. 上海师范大学, 上海 200233;  
5. 山西大学极限光学创新中心, 山西太原 237016; 6. 广东激光等离子体研究所, 广东深圳 518049)

**摘要:** 通过将相对论激光辐照固体靶已经实现了宽带太赫兹 (THz) 脉冲的产生。然而, 生成极强、窄带且可调谐频率的 THz 脉冲仍然是一个挑战。这里我们提出了一种新颖的方法来实现这样的 THz 脉冲, 其中通过桌面级飞秒激光与近临界密度等离子体构建一个等离子体摇摆器。在这样的摇摆器中, 激光加速电子产生与等离子体厚度密切相关的 THz 辐射。理论模型和数值模拟预测得出 THz 脉冲的激光-THz 能量转换率超过 2.0%, 超强场强度超过 80 GV/m, 发散角约为 20°, 中心频率可在 4.4 至 1.5 THz 之间调节, 驱动激光能量为 430 mJ。此外, 我们证明这种方法可以在广泛的激光和等离子体参数范围内工作, 为未来极强 THz 脉冲的应用提供了潜力。

**关键词:** 太赫兹;激光;等离子体;扭摆器

HEDP 2023-068

## 超强激光辐照超薄靶相干渡越辐射的 远场图样研究

徐诗睿<sup>1</sup>, 陈讯<sup>1</sup>, 高营<sup>1</sup>, 陈式有<sup>1</sup>, 梅竹松<sup>1</sup>, 潘卓<sup>1</sup>, 刘志鹏<sup>1</sup>,  
彭梓洋<sup>1</sup>, 梁钰岚<sup>1</sup>, 宋谭<sup>1</sup>, 许天琦<sup>1</sup>, 吴清范<sup>1</sup>, 张予嘉<sup>1</sup>, 张子豪<sup>1</sup>,  
赵家瑞<sup>1</sup>, 赵研英<sup>1</sup>, 耿易星<sup>1</sup>, 颜学庆<sup>1</sup>, 马文君<sup>1</sup>

(1.北京大学 物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 在超强激光辐照超薄靶过程中, 激光通过洛伦兹力加速出频率为二倍激光频率的电子串, 这些电子串在大于等于它们频率的波段上可以产生相干辐射。这些辐射携带相互作用信息, 可能用于诊断相互作用过程。这里我们报导在超强激光辐照超薄膜靶的实验中, 于激光透射方向观察到二倍频环状光斑, 并且光斑图样随着不同激光光强分布而发生变化。三维 PIC 模拟发现该二倍频光辐射主要来自于激光加速的二倍频脉动电子微束团在穿越靶背时产生的相干渡越辐射; 且该辐射的远场发散角和形貌特征主要取决于穿越靶背的电子束横向分布。在超薄靶条件下电子束斑和激光光强分布相似, 因此, 超强激光辐照超薄靶产生的二倍频相干渡越辐射的远场光斑图样可能发展成一种在线原位表征高功率激光焦斑形貌的方法。

**关键词:** 超强激光; 超薄薄膜; 二倍频; 相干渡越辐射; 激光光强分布

HEDP 2023-076

## 紧凑型激光驱动的光子对撞机

韩立琦<sup>1</sup>, 蔡杰<sup>2</sup>, 寿寅任<sup>3</sup>, 刘晓丹<sup>1</sup>, 余金清<sup>1</sup>, 颜学庆<sup>2</sup>

(1.湖南大学, 长沙 410082; 2.北京大学, 北京 100871; 3.韩国基础科学研究所, 光谷 61005)

**摘要:** 布莱特-惠勒 (BW) 过程是量子电动力学的基本理论之一, 是在 1934 年由布莱特和惠勒提出的, 由两个光子通过对撞生成正负电子对。在实验上观测双光子 BW 过程需要超高亮度的光子源, 而现有的方法要么基于传统加速器, 要么基于 10PW 以上的激光平台, 需要巨大的资金投入以及大量的占地面积, 同时现有的紧凑型方案牺牲了光子数目, 需要大量的发次, 因此就有必要探寻在更紧凑的设备单发实现双光子对撞实验的方法。我们提出了利用百 TW 紧聚焦激光脉冲驱动线性光子对撞的方案, 单发可以实现双光子对撞过程的实验观测。强度超过  $10^{21} \text{W/cm}^2$  的激光与近临界密度等离子体相互作用产生 6nC, 300MeV 大电量电子束, 由于光子对撞中正负电子对的产额是光子数量、碰撞区域与光子-光子截面的函数, 大电量的电子束可以产生高通量光子束, 提高对撞产额, 因此这样的电子束有利于正负电子对的产额。电子束与激光发生汤姆孙散射, 产生高亮度光子源, 10keV 以上的光子数目超过  $3 \times 10^{11}$ , 大部分能量高于 0.511MeV, 1MeV 处的亮度超过  $11.6 \times 10^{23} \text{photons/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{BW}$ 。使用宏光子法计算单发得到  $1.1 \times 10^5$  个准直正电子。对于给定的  $a_0$ , 最佳的等离子体长度大约是 250  $\mu\text{m}$ , 而光子数量和正负电子对对数分别与  $a_0^{2.4}$  和  $a_0^5$  成正比。同时正电子可以被强烈的横向场加速, 并从等离子体通道中离开, 可以在实验室上被检测。该方案解决了在紧凑平台上实验观察双光子过程的关键挑战, 突破了单发产生正负电子对数量的限制。

**关键词:** 布莱特-惠勒过程; 紧凑型激光; 激光尾场加速; 近临界密度等离子体; 高亮度光子源; 正负电子对

HEDP 2023-077

## 光扇产生涡旋光中电子的注入与加速

汤翔<sup>1</sup>, 郝觉玄<sup>1</sup>, 时银<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 等离子体物理与聚变工程系, 合肥 230026)

**摘要:** 使用拉盖尔高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 模式的激光驱动电子加速有望得到高质量电子脉冲链, 但是在实验中获得高强度的 LG 光仍有较大挑战。其中一个方案就是利用“光扇”结构靶等离子体镜反射高斯光获得相对论强涡旋激光。该工作表明, 通过在“光扇”中心集成纳米丝结构, 电子可以在涡旋光产生过程中有效地注入和加速。通过使用三维 PIC 模拟程序表明,  $a_0=20$  的圆偏振高斯激光束在与“光扇”作用中可以有效的将电子注入到光束中, 靠近激光轴注入的电子经历由纵向激光电场驱动的纵向加速。电子形成具有小发散角的单能束, 最高束能量 310 MeV, 能散度 6.1%, 束电荷 57.38 pC, 其持续时间为 270 as, 发散角为 50 mrad。采用高斯光束, 我们提出的方案在涡旋激光驱动电子加速的实验演示中有望降低实验难度。

**关键词:** 激光驱动直接加速电子; 激光等离子体相互作用; 光扇; 拉盖尔高斯光

HEDP 2023-078

## Generation of ultrabrilliant polarized attosecond electron bunch via dual-wake injection

Ting Sun<sup>1</sup>, Qian Zhao<sup>1</sup>, Feng Wan<sup>1</sup>, Yousef I. Salamin<sup>2</sup>, Jian-Xing Li<sup>1</sup>

(1. School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China 710049; 2. Department of Physics, American University of Sharjah, Sharjah, POB 26666, United Arab Emirates)

**Abstract:** Laser wakefield acceleration is paving the way for the next generation of electron accelerators, for their own sake and as radiation sources. A dual-wake injection scheme is put forward here to generate an ultrabrilliant polarized attosecond electron bunch, employing a radially polarized laser as a driver. We find that the lasermodulated fields in the plasma, formed in the dual wakes excited by both transverse and longitudinal components of the laser field in the quasi-blowout regime, facilitate the attosecond injection of a transversely beamed Cloverlike electron bunch. Initial spin directions of the generated attosecond electrons can be reversed collectively due to the laser-assisted spin precessions, which significantly mitigates the drastic depolarization of the sheath electrons in the strongly nonlinear plasma wake. In our three-dimensional particle-in-cell simulations, an electron bunch, with  $\sim 300$  as duration, six-dimensional brightness of  $\sim 10^{14}$  A/m<sup>2</sup>/0.1% and  $\sim 90\%$  polarization can be generated using a few terawatt laser and a shock-front plasma density. Such an electron bunch could play an essential role in many applications, such as ultrafast imaging, nuclear structure studies, and the operation of coherent radiation sources.

**Keywords:** polarized attosecond electron beam; Laser plasma accelerator

HEDP 2023-00079

## 基于飞秒激光等离子体的强流辐射源 ——从太赫兹到伽马射线

余金清<sup>1</sup>

(1. 湖南大学, 长沙 410082)

**摘要:** 飞秒激光辐射源在生物医学、超快科学、光核物理、非线性量子电动力学效应、高能量密度物理、国防安全等领域有重要的应用需求。然而, 激光辐射源需要解决的挑战包括: 如何通过激光加速获得足够数量的电子, 实现包括辐射源能量、亮度、流强的同步提升。本报告将系统介绍湖南大学激光强场物理团队近年来在激光强辐射源领域的最新研究进展, 主要包括以下几个内容: (1) 基于飞秒激光等离子体, 通过调控相对论电子束的能量和发散角, 高效产生准直、中心频率可调的超强太赫兹辐射源; (2) 百 TW 紧聚焦激光产生数 10 nC 大电量电子束的尾场加速及高亮度辐射源的产生以及在光子对撞机中的应用。

**关键词:** 飞秒激光, 辐射源, 太赫兹, 伽马射线

HEDP 2023-080

## 涡旋指向的多束激光驱动轴向磁场产生

郝觉玄<sup>1</sup>, 汤翔<sup>1</sup>, 时银<sup>1</sup>, 郑坚<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 等离子体物理与聚变工程系, 合肥 230026)

**摘要:** 近年来, 在高能量密度物理研究中, 强磁场效应逐渐取得更多关注, 尤其在可控惯性约束聚变研究中具有潜在应用。得益于 CPA 技术的诞生, 高能量、高强度激光驱动等离子体自生强磁场具有其独特优势。常见的全光产生强磁场的方法是利用圆偏振激光与低密度等离子体相互作用中的逆法拉第效应 (Inverse Faraday effect)。该效应取决于等离子体吸收圆偏振光子过程中所必须遵守的角动量守恒。但在实验上, 要产生高品质的涡旋光束或圆偏振光束需要复杂的技术及昂贵的器件。考虑到激光装置的现有条件和未来发展方向, 该工作充分利用已有和未来高功率激光装置的多光束特性, 创造性地提出通过激光特殊的空间排布以实现角动量的传递。利用 PIC 模拟和理论模型证明多束激光的特殊指向分布可以将角动量高效地传递给等离子体, 携带轴向角动量的热电子会形成高强度的旋转电流, 从而支持沿轴向、轴对称且体积可观 (数万立方微米) 的强磁场 (最高可达万特斯拉) 生成, 并稳定维持较长时间 (皮秒尺度)。该方案有望为双锥对撞点火方案中的超热电子导引提供新的方法, 为强场物理研究提供新的强磁场平台。

**关键词:** 自生强磁场; 激光等离子体; 角动量; 多光束

HEDP 2023-00081

## 激光尾波场电子加速—注入机制探索 和高品质电子束产生

王佳<sup>1</sup>, 曾明<sup>1</sup>, 李大章<sup>1</sup>, 高杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100086)

**摘要:** 基于等离子体的尾场加速器因其较高的加速梯度而受到广泛关注, 但目前产生的电子束团的品质还不太理想, 距离实际应用还有较大的差距。为了进一步缩短差距, 我们从注入机制入手来提高电子束团的品质。剪式交叉双色光电离注入机制利用斜入射的二倍频辅助激光与主激光碰撞, 碰撞过程中的叠加场会离化原子内壳层电子, 从而促进电子注入等离子体尾场。此注入机制有效降低了离化注入的长度, 电子束团的能散得到有效降低。三维 PIC 模拟产生了能量 500MeV, 电荷量 40pC, 能散 1%量级的电子束。同轴激光干涉诱导的注入机制用到两束光斑差别较大的同频率激光脉冲。在合适的相位差下, 两束激光的干涉效应会在等离子体中形成多壳层的尾场结构。由于小光斑激光脉冲的波前曲率变化, 干涉形成的内壳层尾场会逐渐膨胀, 从而促进了尾场相速度的降低和电子的注入。准三维 PIC 模拟产生能量接近 1GeV, 电荷量大于 100pC, 能散千分之几的高品质电子束。

紧聚焦激光脉冲促进电子注入的机制用到光斑尺寸小于 10 微米的百太瓦激光脉冲。高强度激光脉冲的自然散焦有效促进了空泡的纵向膨胀和电子束团的注入。准三维模拟产生能量百 MeV, 电荷量 nC 量级, 能散 1%, 切片能散千分之几的高品质电子束。

综上所述, 我们提出的新注入机制逐步提升了电子束团的品质, 进一步缩短了 LWFA 与实际应用之间的差距。

**关键词:** 激光尾波加速, 电子束, 注入, 双色光, 干涉, 紧聚焦

HEDP 2023-089

## 综合极端条件实验装置-超快 X 射线 动力学实验站简介

李毅飞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100086)

**摘要:** 超快 X 射线动力学实验站是利用高功率飞秒激光与等离子体相互作用产生飞秒 X 射线源的用户装置。利用这些超快 X 射线作为探针, 结合与之自然同步的驱动激光器作为泵浦, 可以在飞秒时间分辨率下对样品进行动力学过程研究。本实验站提供的超快 X 射线源, 包括但不限于 k-alpha、Betatron 等 X 射线源, 可以用于超快成像、XRD、XAFS。此外, 激光器输出的两路飞秒激光, 3TW/20fs/100Hz 和 1PW/25fs/1min(/发), 也可以提供给用户用于激光驱动的粒子加速与新型辐射源、激光核物理等方面的研究。

**关键词:** 激光驱动的新型辐射源及其应用

HEDP 2023-091

# Dual-beam experiment platform for All-optical Thomson/Compton Scattering at SJTU

Siyu Chen<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** Based on the dual-beam experiment platform, an energy-tunable, high-polarized, highly directional, tunable orbital angular momentum all-optical Thomson/Compton scattering x/gamma-ray source has been constructed in Shanghai Jiao Tong University (SJTU). The x/gamma-ray energy spans from tens of keV to tens of MeV. It serves as a high-precision, multi-parameter controllable experiment platform for the generation and application of high-energy radiation sources, nuclear physics, strong-field quantum electrodynamics (SFQED) theories. In the platform, a dual-beam 800 nm Ti: Sapphire laser system in Laboratory of Laser Plasma (LLP) in SJTU, which is 200TW and 300TW respectively, and a 2.5PW 800 nm Ti: Sapphire laser system in Tsung-Dao Lee Institute (TDLI) are employed. Experiments about full angle relativistic electron beam colliding with high field laser have been performed, achieving the energy tuning of x/gamma ray. In addition, we have demonstrated control of the polarization state of x/gamma radiation by manipulating the polarization state of the scattering laser. With the dual-beam experiment platform for all-optical Thomson/Compton scattering x/gamma ray source, it is proposed to experimentally generate x/gamma radiation with orbital angular momentum (OAM), gamma imaging, SFQED theory verification and improvement.

**Keywords:** All-optical inverse Compton scattering, High power laser, Polarization, Orbital angular momentum, Strong field quantum electrodynamics

HEDP 2023-092

# 激光啁啾控制相对论少周期中红外脉冲产生

李东澳<sup>1</sup>, 张国博<sup>2</sup>, 赵杰<sup>1</sup>, 胡艳婷<sup>1</sup>, 鲁瑜<sup>1</sup>, 张昊<sup>1</sup>, 李倩妮<sup>1</sup>,  
张栋泽<sup>1</sup>, 沙荣<sup>1</sup>, 邵福球<sup>1</sup>, 盛政明<sup>3,4,5</sup>, 余同普<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 理学院物理系, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院核科学与工程系, 长沙 410073;  
3. 上海交通大学 物理与天文学院激光与等离子体重点实验室, 上海 200000; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心,  
上海 200000; 5. 上海交通大学 李政道研究所, 上海 200000)

**摘要:** 在强场物理和超快科学领域, 相对论的少周期中红外脉冲是非常有利的工具, 但是这种脉冲难以用传统的非线性光学方法生成。在这里, 我们提出了一种利用负啁啾激光脉冲通过等离子体频率调制的方法来产生这种脉冲的方案。负啁啾激光脉冲由于色散和等离子体腐蚀效应会在纵向上迅速压缩, 这增强了驱动激光强度和等离子体扰动密度, 其中心频率通过光子减速进行下转换。仿真结果表明, 在啁啾参数适当时, 可以产生最大中心波长为 7.9  $\mu\text{m}$ 、脉冲强度为  $a_{\text{MIR}} = 2.9$  的少周期中红外脉冲。此外, 最大能量转换效率可以达到 5.0%。这样的相对论中红外光源具有广泛的应用前景。

**关键词:** 激光等离子体相互作用; 激光尾波场; 中红外; 啁啾; 光子减速



HEDP 2023-093

## 激光驱动螺线管质子级联加速的优化设计

刘志鹏<sup>1</sup>, 马文君<sup>1</sup>

(1. 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 激光质子加速受限于激光光强、靶材等因素, 一步到位获得超过 100 MeV 的高能质子具有一定的困难。利用微螺线管的后加速方案, 不需要多束激光注入, 质子可以在毫米尺度的微螺线管中被激光驱动的 GeV/m 环流电场再次加速, 可以有效提高激光加速质子的截止能量。如何确保加速电场与质子的同步是螺线管级联加速的一个关键问题。本工作通过模拟研究, 首次阐述了由电流色散效应引起的电场失配, 是限制质子同步加速的主要因素。并提出一种将漂移段与螺线管相结合的双级结构, 可以实现色散调控和同步加速。

结果表明, 双级螺线管级联质子加速可以显著提高加速效率, 其质子的能量增益是常规螺线管级联方案的 4 倍。在功率 1 PW 的超短激光条件下, 质子能量超过 100 MeV。并且我们讨论了一些对于螺线管后加速的新的新方法, 能够调制质子束流的截止能量、能谱以及发散度, 可为粒子物理学、辐射治疗和材料科学等领域带来广泛的应用前景。

**关键词:** 激光离子加速, 螺线管, 级联加速

HEDP 2023-094

## 激光加速质子束的传输方案研究

晏炆<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 激光质子加速凭借超高加速梯度成为研究热点, 但激光加速质子束具有的大散角、宽能谱的特点给其传输带来了很强的挑战性, 成为它走向应用的主要障碍之一。现有的基于单一传统磁铁元件的束流传输系统通常具有传输效率不够高、体积大等缺点, 为此我们提出了永磁四极透镜与电磁四极透镜相结合的方案, 实验结果表明, 其传输效率增长为仅有三元四极电磁透镜组的 2.4~6 倍; 研究了新型聚焦元件主动放电等离子体透镜 (Active Plasma Lens, APL), 验证了 APL 的强聚焦能力、小色散性和高可调谐性。并针对激光加速质子束特性, 提出了变径 APL 来提高束流收集能力和优化束流传输质量, 有望在紧凑型加速器的应用中发挥重要的价值。

**关键词:** 激光加速质子束; 束流传输; 四极磁铁; 等离子体透镜

HEDP 2023-095

## 艾里贝塞尔激光驱动等离子体 产生高次谐波研究

庞泽月<sup>1</sup>

(1. 四川大学, 成都 610065)

**摘要:** 艾里贝塞尔光束是一种具有空间无衍射特性的新型光束。我们利用三维粒子模拟方法研究了这种新型光束驱动等离子体振荡镜产生的高次谐波特性,发现高次谐波在传播过程中能出现自愈合现象,恢复出纵向艾里分布和横向贝塞尔分布的时空分布特性,并保持无衍射特性稳定传输。在极端光强与靶面凹陷的情况下,相比于普通高斯激光,艾里贝塞尔激光驱动产生的高次谐波和阿秒脉冲能保持高强度传输更远距离。这为产生短波长高亮度艾里贝塞尔新型光束以及产生大范围极强光场的新型应用提供了可能。

**关键词:** 高次谐波; 艾里贝塞尔光束; 极端光场

HEDP 2023-096

## 艾里激光驱动相对论振荡镜产生 孤立阿秒脉冲研究

陈鹏<sup>1</sup>

(1. 四川大学, 成都 610065)

**摘要:** 基于相对论激光驱动等离子体振荡镜产生高亮度阿秒脉冲,是实现阿秒动力学单发探测的重要技术途径之一,这其中的一个重要挑战是如何产生孤立的单个阿秒脉冲。然而,目前提出的方案基本只对于相对论少周期激光才有效。在这里,我们提出基于多周期艾里激光束驱动等离子体振荡镜产生空间分离的孤立阿秒脉冲。我们通过二维粒子模拟证明了艾里光束由于在空间传播中具有横向偏移特性,可以使不同时刻辐射的阿秒脉冲在等离子体靶面的横向位置产生偏移,并具有不同的传播方向,从而可以形成空间孤立的单个阿秒脉冲。这种方式对于脉宽为几十飞秒的激光同样适用,这为利用实验室中普遍存在的多周期相对论激光产生高亮度孤立阿秒脉冲提供了一个新的解决方案

**关键词:** 高次谐波, 孤立阿秒脉冲, 艾里激光

HEDP 2023-100

## 尾波加速中的三维 betatron 振荡模型

刘玉龙<sup>1</sup>, 曾明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 尾波加速器是未来最有潜力的加速器之一。因极强的横向聚焦力引起的 betatron 振荡是尾波中电子的常见运动状态, 其辐射会反作用于自身, 产生辐射阻尼的作用。为了描述此过程, 我们建立了一个包含有辐射阻尼的三维 betatron 振荡新模型, 并研究电子经过长时间后的平均运动, 推导出 betatron 振荡的长时演化方程。新模型发现在 betatron 相位漂移主导的参数空间会发生椭圆轨道进动现象, 在辐射阻尼力主导的参数空间会发生椭圆轨道变窄现象。另外, 为了使 QuickPIC 模拟符合三维 betatron 振荡的理论模型, 我们引入 Boris 算法和辐射阻尼的作用项, 修正了模拟中粒子所受的高阶力。最终我们从模拟结果中观察到理论预测的椭圆轨道进动现象和椭圆轨道变窄现象。新模型和新模拟算法为未来设计尾波加速器提供了强力的理论和模拟工具。

**关键词:** 尾波加速器; 三维 betatron 振荡; 辐射阻尼; QuickPIC; Boris 算法

HEDP 2023-00101

## 尾波加速中三维 betatron 振荡的 Particle-in-Cell 模拟

刘玉龙<sup>1</sup>, 曾明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** Betatron 振荡是电子在尾波加速中的重要现象。在振荡过程中, 电子的 betatron 辐射会反作用于电子自身, 产生辐射阻尼。理论上已经发展了三维 betatron 振荡模型来描述长距离尾波加速[Phys. Rev. Accel. Beams 26, 031301 (2023)], 但是现有的模拟软件不能直接模拟此过程。QuickPIC 是利用准静态近似条件进行高效模拟的软件, 因为它忽略了纵向速度的高阶项、纵向磁场力和辐射阻尼的作用, 使它不能用于模拟长距离 betatron 振荡演化。为使 QuickPIC 模拟满足三维 betatron 振荡的理论模型, 我们使用 Boris 算法求解电子在三维尾波电磁场中的运动, 从而可以在模拟结果中观察到理论预测的椭圆轨道进动现象; 另外我们在修正洛伦兹力的基础上加入辐射阻尼的作用, 发现辐射阻尼对高能电子的长时间运动有不可忽略的影响。

**关键词:** 尾波加速器; 三维 betatron 振荡; 辐射阻尼; QuickPIC; Boris 算法

HEDP 2023-104

## 飞行焦点激光驱动的尾场加速中 电子的密度跃迁注入

耿盼飞<sup>1,2</sup>, 陈民<sup>1,2</sup>, 安相炎<sup>1,2</sup>, 刘维媛<sup>1,2</sup>, 祝昕哲<sup>1,2</sup>,  
李建龙<sup>1,2</sup>, 李博原<sup>1,2</sup>, 盛政明<sup>1,2</sup>

(1.上海交通大学激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200030; 2 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海, 200030)

**摘要:** 通过使用高强度飞行焦点激光, 人们可以实现无失相或者相位锁定的激光尾场加速 (LWFA), 进而克服传统激光尾场加速中经常遇到的激光衍射、泵浦损耗和电子失相等问题。因此, 该方案有望仅通过单级加速就将电子束加速到 TeV 量级, 极大减小了实验复杂度。然而, 该方案并没有将电子的受控注入机制自洽地包含在内。在之前的理论研究中, 人们仅仅考虑了一团外注入的电子束, 这需要额外的加速器, 并且操作起来也相对困难。这里, 我们数值研究了相位锁定的激光尾场加速中电子的主动可控的密度跃迁注入, 得到了能够注入一定量电子的适当的密度分布。研究表明, 与固定焦点激光驱动的尾场加速相比, 在飞行焦点激光驱动的尾场加速中, 需要更大的等离子体密度梯度。由于驱动激光的超光速的群速度以及尾场结构的变化, 电子束在加速的过程中会沿着横向和纵向丢失。此外, 飞行焦点激光在高密度等离子体中的周期性变形和断裂使得最终的注入电量也取决于密度下降沿的起始位置。我们的研究结果为飞行焦点激光驱动的尾场加速中一定量的电子注入提供了一种可能的方法。

**关键词:** 密度跃迁注入, 激光尾场加速, 飞行焦点激光

HEDP 2023-107

## 超强激光驱动的扫雪场中的离子俘获和加速

刘彬<sup>1</sup>

(1. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广州 510080)

**摘要:** 激光驱动的离子加速依然是一个备受关注的研究领域。多种离子加速机制已经被提出和深入研究, 包括靶后鞘场加速, 无碰撞冲击波加速, 辐射压加速, 以及多种机制混合加速、辅助增强加速等。近些年, 随着超强激光技术的发展以及拍瓦激光器的实施, 基于超强激光和相对论自透明等离子体的离子加速正在引起越来越多的研究兴趣。能够制备相对论自透明等离子体的靶材可以是泡沫、气凝胶、压缩气体、甚至膨胀的液氢射流等。基于相对论自透明等离子体的离子加速对激光对比度要求不高, 有望实现高重频, 这对于实际应用很重要。

超强激光通过相对论效应可以将原本不透明的等离子体变成透明的, 并且以类似扫雪的方式在激光前沿堆积大量电子, 产生局域化的、高速运动的静电分离场, 被称作扫雪场。当前拍瓦激光驱动产生的扫雪场电场强度可以达到 TV/cm, 离子在这样的场中可以在几十微米尺度被加速到几 GeV 能量。但是目前实验上尚未实现这样的加速。其主要挑战在于, 如何在现有的制靶技术条件下, 产生稳定传播的扫雪场, 同时, 最重要的是, 将一些离子俘获在扫雪场中进行有效加速。此报告将回顾我们对激光扫雪场的研究进展, 以及针对离子俘获和加速提出的方案。这些方案有望克服目前遇到的挑战。

**关键词:** 超强激光, 相对论自透明等离子体, 离子加速

HEDP 2023-110

## 弯曲毛细管中的光导引和尾波电子加速

祝昕哲<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200030)

**摘要:** 弯曲等离子体通道已被提出用于引导强激光的各种应用, 如 x 射线激光发射、紧凑型同步辐射源和级联尾波加速。我们实验展示了在厘米级弯曲等离子体通道中的强激光导引和尾波加速。实验和模拟结果表明, 当通道曲率半径渐变且调整激光入射偏轴到合适位置时, 可以减轻激光束的横向振荡, 稳定导引的激光激发尾波, 并使电子沿着弯曲的等离子体通道加速, 并得到最大能量为 0.7 GeV 的电子束。此方案有望为基于弯曲毛细管的等离子体加速结构带来新的可能, 不仅可以作为级联加速中的无缝激光导引方案, 也可以推动弯曲毛细管在等离子体光学等领域的应用。同时, 利用弯曲等离子体通道偏转电子束的方法, 也有望应用于小型化辐射源的其它研究中。

**关键词:** 激光尾波加速; 光导引

HEDP 2023-112

## Effects of electron heating and surface rippling on Rayleigh–Taylor instability in radiation pressure acceleration

Xuezhi Wu<sup>1,2</sup>, Yinren Shou<sup>2</sup>, Xueqing Yan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology and Key Laboratory of HEDP of the Ministry of Education, CAPT, PKU, Beijing, China; 2 Center for Relativistic Laser Science, IBS, Gwangju, Korea)

**Abstract:** The acceleration of ultrathin targets driven by intense laser pulses induces Rayleigh–Taylor-like instability. Apart from laser and target configurations, we find that electron heating and surface rippling, effects inherent to the interaction process, have an important role in instability evolution and growth. By employing a simple analytical model and two-dimensional particle-in-cell simulations, we show that the onset of electron heating in the early stage of the acceleration suppresses the growth of small-scale modes, but it has little influence on the growth of large-scale modes, which thus become dominant. With the growth of surface ripples, a mechanism that can significantly influence the growth of these large-scale modes is found. The laser field modulation caused by surface rippling generates an oscillatory ponderomotive force, directly modulating transverse electron density at a faster growth rate than that of ions and eventually enhancing instability growth. Our results show that when surface deformation becomes obvious, electron surface oscillation at  $2\omega_0$  (where  $\omega_0$  is the laser frequency) is excited simultaneously, which can be seen as a signature of this mechanism.

**Keywords:** Rayleigh-Taylor instability, laser-driven ion acceleration, hydrodynamical and non-hydrodynamical effects

HEDP 2023-116

## 等离子体管道对激光传播影响的数值模拟研究

许天琦<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100091)

**摘要:** 提高基于激光加速离子能量的最直接的方法就是提高激光的峰值功率密度。近年来, 人们发现利用直径与激光焦斑接近的中空的通道靶, 可调控激光能量在空间上的分布, 实现更高的光强。但已有的通道靶的管壁的电子密度都是接近固体密度。我们通过三维 PIC 模拟, 发现当管壁的电子密度在临界密度附近时, 其密度和几何参数可以显著地对激光聚焦位置和聚焦强度进行调控。本工作将详细介绍利用临界密度等离子体通道靶实现对超强超短激光进行调控的方案。

**关键词:** 通道靶; 激光调控

HEDP 2023-117

## Highly spin-polarized multi-GeV sub-femtosecond electron beams generated from single-species plasma photocathodes

Zan Nie<sup>1</sup>

(1. Wuhan National Research Center for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

**Abstract:** High-gradient and high-efficiency acceleration in plasma-based accelerators has been demonstrated, showing its potential as the building block for a future collider operating at the energy frontier of particle physics. However, generating and accelerating the required spin-polarized beams in such a collider using plasma-based accelerators has been a long-standing challenge. Here we show that the passage of a highly relativistic, high-current electron beam through a single-species (ytterbium) vapor excites a nonlinear plasma wake by primarily ionizing the two outer 6s electrons. Further photoionization of the resultant Yb<sup>2+</sup> ions by a circularly polarized laser injects the 4f<sup>14</sup> electrons into this wake generating a highly spin-polarized beam. Combining time-dependent Schrodinger equation simulations with particle-in-cell simulations, we show that a sub-femtosecond, high-current (4 kA) electron beam with up to 56% net spin polarization can be generated and accelerated to 15 GeV in just 41 cm. This relatively simple scheme solves the perplexing problem of producing spin-polarized relativistic electrons in plasma-based accelerators.

**Keywords:** Spin-polarized electrons; plasma wakefield

HEDP 2023-118

## 等离子体光学时空调控技术研究

张栋俊<sup>1</sup>,朱坪<sup>1</sup>,易友建<sup>1</sup>,熊俊<sup>2</sup>,安红海<sup>2</sup>,刘会亚<sup>1</sup>,谢兴龙<sup>1</sup>,孙美智<sup>1</sup>,康俊<sup>1</sup>, 杨庆伟<sup>1</sup>,朱海东<sup>1</sup>,郭爱林<sup>1</sup>,梁潇<sup>1</sup>,高奇<sup>1</sup>,姚修宇<sup>1</sup>,李兆良<sup>1</sup>,康海涛<sup>1</sup>,朱健强<sup>1</sup>

(1.中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;  
2.中国工程物理研究院激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要:** 高功率激光技术在过去几十年里飞速发展, 实现了拍瓦级的激光输出。但由于固体材料存在不可避免的光致损伤问题与非线性效应, 传统的激光技术难以应用于激光装置的激光通量、功率提升以及时空调控。因此, 需要发展等离子体光学时空调控技术, 提升装置的时空光场输出性能。我们基于神光II飞秒数拍瓦装置, 重点开展了等离子体镜的时空特性实验研究, 提出基于时空重叠啁啾脉冲的单次信噪比提升度测量方法, 测得了等离子体镜2个数量级的信噪比提升能力。同时, 将信噪比提升后的脉冲进一步用于质子加速实验研究, 成功将最佳靶厚从7.9  $\mu\text{m}$  提升至0.8  $\mu\text{m}$ , 验证了装置的信噪比得到有效提升。此外, 依托装置开展了曲面等离子体镜二次聚焦研究, 实验中实现了3倍的焦斑缩小。

**关键词:** 高功率短脉冲激光; 等离子体光学; 强激光调控; 信噪比提升技术; 飞秒激光技术

HEDP 2023-119

## 基于非线性压缩的数 TW 级激光 等离子体尾场加速

宁笑楠<sup>1</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>, 刘爽<sup>1</sup>, 陈志浩<sup>1</sup>, 杨贤聪<sup>1</sup>, 陈九成<sup>1</sup>,  
丁思勤<sup>1</sup>, 张天亮<sup>1</sup>, 华剑飞<sup>1</sup>, 鲁巍<sup>1</sup>

(1.清华大学工程物理系, 北京 100084; 2.中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川绵阳 621000)

**摘要:** 受限于超短超强激光系统中的热效应管理, 目前激光驱动的等离子体尾场加速重频往往不超过10Hz, 无法满足很多应用的需求。降低驱动激光脉宽是一种有效的解决方案, 可在维持峰值功率的同时利用空泡加速机制大幅降低所需激光能量。针对钛蓝宝石激光系统, 本文选择基于固体薄片的准直束非线性压缩方案进行后处理, 获得靶上4.18TW、14fs的数周期激光脉冲, 将峰值功率提升至1.5倍、脉宽压缩1.9倍。在此基础上, 研究开展数周期激光脉冲等离子体尾场电子加速实验, 获得较稳定的电子束, 其平均电荷量39.1pC、中心能量28.3MeV、最高能量69.2MeV。相较未做非线性压缩的等离子体尾场加速结果, 电子束品质(包括电荷量、能量、稳定性等)得到大幅提升。基于固体薄片的准直束非线性压缩方案能够有效降低等离子体尾场加速产生高品质电子束所需的激光能量, 同时可以缓解对激光载波包络相位稳定的苛刻要求, 为提升等离子体尾场加速的重复频率、拓展应用前景提供新的可能性。

**关键词:** 激光等离子体加速; 数周期激光脉冲; 非线性压缩

HEDP 2023-120

## 皮秒激光与碳纳米管相互作用 产生的高能电子与辐射

潘卓<sup>1</sup>, 陈式有<sup>1</sup>, 高营<sup>1</sup>, 刘志鹏<sup>1</sup>, 马文君<sup>1</sup>,

邓志刚<sup>2</sup>, 卢峰<sup>2</sup>, 周维民<sup>2</sup>

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变中心, 四川绵阳 621000)

**摘要:** 为提高激光等离子体相互作用中电子电量与光子通量, 通过采用一束脉宽为 3 ns 能量为 10 J 的纳秒激光对碳纳米管泡沫进行预烧蚀, 烧蚀后延迟 5 ns 另一束脉宽为 750 fs 能量为 100 J 的皮秒激光与烧蚀后等离子体相互作用。实验采用电子谱仪和 X 射线堆栈等测量手段对电子和辐射进行表征, 结果表明与不加纳秒烧蚀光相比, 烧蚀激光将电子截止能量提升 3 倍, 电量提升 7 倍, 辐射提高一个数量级以上。电子堆栈给出的最大电量估计为 89 nC。通过 FLASH 和 PIC 模拟研究发现, 纳秒光作用后等离子体密度降低为原来的 1/30, 温度提升至 10 keV, 在此参数下激光的传播更加稳定, 因而增强了电子和辐射的产生。

**关键词:** 临界密度等离子体; 大电量电子束; 激光直接加速; 高通量辐射; 激光驱动  $\gamma$  射线

HEDP 2023-124

## 基于闪烁光纤的重频质子谱仪研发

宋谭<sup>1</sup>

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 激光驱动的质子束流因其广阔的能谱范围、紧凑的源尺寸 (约为 10 $\mu$ m 至 100 $\mu$ m)、ps 级脉冲以及超高瞬态剂量率 ( $>10^9$  Gy/s) 等独特特点, 在放射治疗、辐射生物学和聚变快速点火等领域展现出重要的应用前景。然而, 对激光驱动的离子束流进行准确在线完整的表征一直以来都是一个研究难题。传统的方法, 如 RCF 堆栈探测器, 可以通过记录质子束流在其内部沉积的三维剂量信息, 来实现对质子束流的全面表征。然而, RCF 需要进行离线分析, 而飞行时间谱仪和汤姆逊谱仪也只能在有限的立体角度范围内在线提供能谱信息。

本研究提出一种新的方法, 采用闪烁光纤阵列的正交排列结构, 将质子束流的剂量信息传输到两个正交平面上。通过结合光线追踪算法, 分析这两个平面上的荧光空间分布, 可以恢复出质子束流的二维能谱信息。这种方法利用纤细的光纤结构, 不仅提高了闪烁荧光信号的空间分辨率 ( $\sim 500\mu$ m), 而且增强了荧光传输效率, 从而扩展了探测的动态范围。

总之, 本研究致力于解决激光驱动离子束流在线表征的难题, 通过创新性地采用闪烁光纤阵列和正交排列结构, 为离子束流的能谱表征提供了一种高分辨率的方法。

**关键词:** 激光质子加速; 质子谱仪; 闪烁光纤



HEDP 2023-126

## 通过在线飞秒激光微加工靶材 自由切换激光离子加速机制

高营<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 我们提出了一种利用在线飞秒脉冲微加工薄膜靶材实现自由切换激光离子加速机制的全光学实验方法。该方法涉及使用螺旋波前飞秒预脉冲作为在线微加工工具, 通过时间延迟控制靶密度分布, 以转换占主导的加速机制。理论上, 该方法可以切换靶背法向鞘场加速 (TNSA)、库仑爆炸 (CE) 以及相对论性自聚焦效应。此外, 我们发现, 在特定条件下, 也可以触发级联加速机制, 其本质是由于瞬态微等离子体腔中的热电子振荡, 这已经得到了实验和数值验证。通过将在线飞秒脉冲微加工技术引入激光离子加速领域, 我们可以有效解决诸如微粒或微结构靶实现高重复率实验的快速定位问题。

**关键词:** 激光离子加速; 飞秒精加工; 加速机制转换

HEDP 2023-128

## PS 激光驱动螺线管实现质子束整形

史志勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 实验中实现了采用脉宽 0.8 皮秒的激光驱动铜螺线管的方式对飞秒激光所产生的质子束进行整形的方案。研究发现, 在线圈上产生的电磁脉冲强度高达  $4\mu\text{C}/\text{m}$ , 脉宽  $\sim 20\text{ps}$ , 使得飞秒激光驱动的质子束在第一加速阶段由空心环状变为集中点状。利用 CST 模拟及 PIC 模拟对实验结果进行了解释, 结果表明不同的质子形状与 EMP 强度以及 EMP 的作用时间有密切的关系。这种由两束激光驱动的质子束整形方案可以主动地对质子束进行灵活调控, 在质子成像、质子治疗等方面具有潜在的应用前景。

**关键词:** 质子整形; 质子加速; 质子成像; 螺线管

HEDP 2023-129

## 强激光与微通道靶相互作用的 极端涡旋高次谐波产生

易龙卿<sup>1, 2, 3</sup>, 胡可<sup>1, 2</sup>

(1.上海交通大学 李政道研究院, 上海 200240; 2.上海交通大学物理与天文学院 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240; 3.上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 强场激光在小孔处的衍射效应能够产生具有涡旋相位的高次谐波。这一机制普遍的存在于激光与微通道靶相互作用的整个过程中。因而在理论上可以利用微通道对激光的引导延长相互作用的时间从而大大提高涡旋高次谐波的转化效率。但为保证不同时刻产生的谐波不会相干相消, 必须满足相位匹配机制。我们通过微扰的方法研究等离子体波导理论在强场下的修正, 发现相位匹配能够自动满足。在物理上表现为强激光在微通道内表面激发的表面波改变了边界条件, 从而将不同频率的谐波锁定在同样的相速度下传播。我们进一步通过研究高次谐波能量与高能电子出射的关系, 寻找高效产生涡旋高次谐波的规律, 并调整微通道靶的参数在模拟中实现转化效率高达 10%-20%的极端涡旋高次谐波输出。

**关键词:** 强激光; 微通道靶; 涡旋光; 高次谐波

HEDP 2023-130

## 用于激光离子加速的液体薄膜靶 在线诊断系统

彭梓洋<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 为了满足高重复率激光离子加速的要求, 我们开发了一个全面的在线诊断系统, 用于实时和原位监测两股液体射流碰撞产生的液体薄膜靶 (LST)。不同的子系统以高精度实现了对 LST 的厚度、平整度、倾角和位置的实时表征。在诊断系统的帮助下, 我们揭示了厚度分布对碰撞参数的依赖性, 以及 LST 平整度和倾斜角的决定因素, 这对激光驱动离子加速等应用至关重要。

**关键词:** 液体薄膜靶; 诊断; 激光离子加速

HEDP 2023-133

# Generation of ~400 pC electron bunches in laser wakefield acceleration utilizing a structured plasma density profile

Jiixin Liu<sup>1,2</sup>, Haiyang Lu<sup>3</sup>, Huangang Lu<sup>1,2</sup>, Hui Zhang<sup>1,2</sup>, Xuezhi Wu<sup>1,2</sup>, Di Wu<sup>1,2</sup>, Haoyang Lan<sup>1,2</sup>, Jianyao Zhang<sup>1,2</sup>, Jianfeng Lv<sup>1,2</sup>, Qianyi Ma<sup>1,2</sup>, Yuhui Xia<sup>1,2</sup>, Zhenan Wang<sup>1,2</sup>, Jie Cai<sup>1,2</sup>, Yanying Zhao<sup>1,2</sup>, Yixing Geng<sup>1,2</sup>, Xinlu Xu<sup>1,2</sup>, Xueqing Yan<sup>1,2,4</sup>,

- (1.State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, and Key Laboratory of HEDP of the Ministry of Education, CAPT, Peking University, Beijing 100871, China; 2.Beijing Laser Acceleration Innovation Center, Beijing 100871, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Ultraintense Laser and Advanced Material Technology, Center for Advanced Material Diagnostic Technology, and College of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China; 4. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Shanxi 030006, China)

**Abstract:** In this article we propose and demonstrate experimentally that the charge of the 100 MeV-class electron bunches from LWFAs can be improved to ~400 pC with the aid of a structured nozzle system. A 43 TW laser pulse driver with 30 fs duration is incident on a density structured gas target which is created by a 4 mm long gas jet and a moveable slender needle nozzle with 0.8 mm diameter. The charge of produced beam increases compared with that from merely a gas jet (~100 pC) and reaches its maximum (~400 pC) at an optimal relative position. Particle-in-cell simulations show that the self-focused spot size and intensity of the laser pulse can be tuned continuously and reveal how the detailed dynamics of the laser pulse evolution, the electron injection and acceleration in this structured gas target affects the beam charge. This work demonstrates the feasibility of adjusting the laser pulse distribution through its evolution in a plasma to significantly improve the injected charge in LWFAs which is beneficial for many applications.

**Keywords:** laser plasma acceleration, high intensity laser plasma interactions

HEDP 2023-00137

# 激光等离子体极紫外光刻光源的数字全息干涉诊断

杨顺熠<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 核科学技术学院, 合肥 230026)

**摘要:** 随着芯片特征尺寸的不断减小, 借助 193 nm 准分子光源的浸没式深紫外光刻技术已进入瓶颈, 使用多次曝光技术的工艺路线也已到达目前的商用极限。极紫外光刻 (EUVL) 采用 13.5 nm 的极紫外光源, 被认为是下一代光刻商用化路线必需的技术。目前大功率、高重复率的 CO<sub>2</sub> 气体激光双脉冲打 Sn 靶转换效率为 6%, 仍未到达理论极限。双脉冲打靶方案中等离子体的演化分布对 EUV 辐射而言至关重要, 需要高精度的诊断方法诊断等离子体的参数, 采用数字全息干涉计量方法, 基于双棱镜的共路径配置能够在激光等离子体实验中获得精细电子密度分布且结构紧凑稳定。

**关键词:** 激光等离子体; 极紫外光源; 转换效率; 数字全息干涉

HEDP 2023-139

## 整形超强激光产生强场窄带太赫兹脉冲

孙方正<sup>1,2</sup>, 卫妍玉<sup>1,2</sup>, 雷弘毅<sup>1,3</sup>, 陈浩<sup>1,2</sup>, 马景龙<sup>1</sup>, 廖国前<sup>1,3</sup>, 李玉同<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学物理学院, 北京 100049; 3. 松山湖材料实验室, 东莞 523808)

**摘要:** 强场窄带太赫兹 (THz) 辐射具有很多关键的应用, 特别是对于物质中低能准粒子的选择性激发和操控。然而, 要产生中心频率在 5-15THz 范围内的高峰值场强窄带 THz 辐射仍然十分困难。本报告介绍了通过调制的超短超强激光与金属箔相互作用产生强场、多周期、中心频率可调的窄带 THz 辐射。通过使用声光色散装置对激光脉冲进行自适应相位-振幅调制, 可以获得波形上周期调制的激光脉冲。整形激光和金属薄膜靶相互作用, 在靶前表面产生高能电子脉冲串, 输运到靶背面通过相干渡越辐射过程产生多周期 THz 辐射。使用自行搭建的非共线自相关仪来单发诊断 THz 脉冲的光谱, 配合 THz 焦斑和能量的诊断, 得到 THz 脉冲的各项参数。比较系统地研究了啁啾率、脉宽、峰值功率密度等激光参数对 THz 辐射性质的影响。在实验参数下, 多周期 THz 脉冲的中心频率在 5-8.5 THz 范围内连续可调, 相对带宽约为 30%。根据测量到的 10  $\mu\text{J}$  以上的太赫兹脉冲能量和  $\sim 0.2\text{ mm}$  的焦斑尺寸, 估计 THz 峰值场强高达  $\sim 1\text{ GV/m}$ 。可以预见, 更高能量和更窄频谱的太赫兹脉冲可以通过更高强度的激光泵浦实现, 从而有望填补 5-15THz 范围内的所谓新 "太赫兹空隙"。

**关键词:** 超短超强激光; 窄带太赫兹; 渡越辐射

HEDP 2023-141

## 以等离子体望远镜实现紧凑型拍瓦级尾场加速

耿学松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 高场激光物理国家重点实验室, 上海 201800.)

**摘要:** 拍瓦(PW)级激光驱动的尾场加速装置有着较长的焦距, 例如, 1PW 激光焦距超过 10 米, 而 100PW 激光的焦距可达数百米, 这限制了高功率激光尾场加速的紧凑化发展。长焦距受限于抛物面镜的低损伤阈值和较大的焦斑尺寸。因此, 我们提出利用抛物面等离子体镜与常规抛物面镜构成望远镜系统, 在 1 米的距离内实现 1PW 激光的聚焦并驱动尾场加速。我们用三维 PIC 模拟验证了紧聚焦激光在等离子体抛物面镜的反射过程, 并利用反射激光驱动产生了 9GeV 电子束, 反射激光驱动的加速过程与常规聚焦方法驱动产生的加速梯度一致。这一结构提供了一种适用于 1PW 至 100PW 激光尾场加速紧凑化的新方案。

**关键词:** 等离子体镜, 激光尾场加速, 高功率激光

HEDP 2023-143

## 用于激光驱动离子加速的高分辨率 大角度离子谱仪

彭文杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

**摘要:** 本报告主要介绍我们自行设计的一种用于激光驱动离子加速的高分辨率大角度离子谱仪。我们将传统汤姆逊谱仪的接收小孔替换为周期性的小孔阵列, 通过设计的电磁场, 可实现对百 MeV/u 以上的不同种类离子的高分辨率的能谱探测, 同时通过测量信号, 反推出不同离子的角分布信息, 从而实现同时对多离子束流的大角度、高精度能量分辨测量。

**关键词:** 离子探测

HEDP 2023-144

## 非线性 Compton 散射中通过自旋到轨道角动量 转移产生旋涡 $\gamma$ 光子

马木提江·阿巴拜克热<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学, 西安 710049)

**摘要:** 具有内禀轨道角动量 (OAM) 的涡旋伽马光子在强激光、核物理、粒子物理和天体物理等领域具有丰富的应用, 然而涡旋伽马光子的产生仍然是一个重要挑战。在这篇文章中, 我们通过超相对论电子在圆偏振激光脉冲中的非线性 Compton 散射来研究涡旋伽马光子的产生。为此, 我们发展了量子电动力学散射理论, 揭示了多光子吸收过程中角动量转移机理。我们发现, 当初始或末态电子具有横向相干性时, 由于自旋到轨道角动量的转移, 辐射的伽马光子具有内禀 OAM, 并且由于强激光脉冲的特性, 它们处于不同 OAM 模式的混合态。此外, 我们提出涡旋伽马光子在强激光中的 Breit-Heitler 散射过程可以揭示涡旋伽马光子的相位结构。我们的研究强调了强激光在涡旋伽马光子产生和探测过程中所起的特殊作用, 并呼吁进一步的研究。

**关键词:** 激光驱动的新型辐射源; 涡旋伽马光子; 非线性 Compton 散射; 轨道角动量

HEDP 2023-145

## 深度学习在激光离子加速器自动靶体定位中的应用

郭臻<sup>1</sup>

(1.北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 深度学习技术在图像处理中被成功应用, 如图像分类、目标检测和图像生成。传统对焦方法需要设计复杂的函数来测量成像系统的离焦距离, 耗时较高。以卷积神经网络为基础的图像处理使成像系统的对焦过程被优化。本文介绍了深度学习在激光离子加速器中自动靶体定位的应用: 高重频打靶需要高效的自动对焦过程, 精确定位的耗时性限制了实验, 深度学习可以通过图像信息反馈实现离焦距离的识别和电机移动距离的预测, 从而实现激光加速器的调试过程的自动化。我们探索了两种网络结构(ResNet 和 Yolo)在自动定位任务中表现, 成功地将 YOLO 目标检测网络整合到北京大学的紧凑型激光等离子体加速器控制程序中, 实现了快速且高精度的自动定位。

**关键词:** 深度学习; 激光离子加速; 加速器控制

HEDP 2023-147

## 强激光与狭缝相互作用的理论模拟研究

徐兰<sup>1</sup>, 黄太武<sup>1</sup>, 蒋轲<sup>1</sup>, 伍超能<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>, 周沧涛<sup>1</sup>

(1.深圳技术大学 工程物理学院, 广东 深圳 518118)

**摘要:** 近几年研究发现狭缝在强激光等离子体物理研究中可以发展为等离子体光学器件, 在调控激光驱动质子束和高次谐波产生等方面具有重要应用前景。然而利用狭缝进行聚焦和导引的研究仍主要停留在非相对论强度光波领域。此外, 用于引导波的典型介质波导能量耗散显著。本报告通过结合经典光学衍射模拟与 Particle-in-cell (PIC) 模拟, 分析比较低光强及相对论光强下激光通过狭缝的衍射聚焦情况, 研究狭缝参数对电场聚焦增强倍数和传输效率的影响, 提出利用单狭缝及周期性狭缝分别实现相对论强激光的聚焦增强和高效导引的物理方案。这种新型的强激光衍射导引可以使强激光保持显著高于自由传播情形下的激光强度, 同时又可实现比传统波导更高的能量传输效率。这对汤姆逊散射 X 射线光源、激光驱动粒子加速等研究具有重要应用价值。

**关键词:** 强激光; 狭缝; 聚焦增强; 激光导引; 电子加速

HEDP 2023-151

## 实时激光诊断和粒子探测技术

赵马克<sup>1,2</sup>, 刘哲<sup>1,3</sup>, 孙浩帆<sup>1,5</sup>, 齐荣<sup>1,4</sup>, 白培乐<sup>1,2</sup>, 杨晓俊<sup>1</sup>,  
许毅<sup>1</sup>, 冷雨欣<sup>1,3</sup>, 李儒新<sup>1</sup>, 宾建辉<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;  
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 上海大学 微电子学院, 上海 200444;  
4. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092; 5. 上海科技大学 物质学院, 上海 200120)

**摘要:** 本报告聚焦于基于上海光机所 200 太瓦高性能激光装置建成的激光驱动重频离子束的实验平台的关键探测技术, 主要介绍应用于该平台新型实时激光诊断技术和重频粒子在线探测技术。利用高精度的激光传输控制系统和激光聚焦系统, 实现了在真空条件下的激光诊断和激光聚焦调整, 获得了焦斑为 3.9 微米 (半高全宽), 聚焦光强在  $\sim 10^{20} \text{W/cm}^2$  的优化光斑。通过高分辨率的粒子广角谱仪, 实现了重频粒子的能谱和角发散的在线探测。基于全实时的探测系统, 我们优化了激光驱动质子的加速过程, 最终实现了平均能量为 13.7 MeV, 能量抖动率  $< 10\%$  (rms) 的重频质子束流输出。

**关键词:** 超强超短脉冲激光; 激光驱动离子加速; 实时激光诊断; 在线粒子探测

HEDP 2023-153

## High-gradient modulation of microbunchings using a minimized system driven by a vortex laser

Zhengxing Lv<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Optics and Machinery, Shanghai 201899)

**Abstract:** This study entailed the development of a high-gradient modulation of microbunching for traditional radiation frequency accelerators using a minimized system driven by a relativistic Laguerre–Gaussian (LG) laser in three-dimensional particle-in-cell (PIC) simulations. It was observed that the LG laser could compress the transverse dimension of the beam to within a 0.7  $\mu\text{m}$  radius (divergence  $\approx 4.3$  mrad), which is considerably lower than the case tuned by a Gaussian laser. In addition, the electron beam could be efficiently modulated to a high degree of bunching effect ( $> 0.5$ ) within  $\sim 21$  fs ( $\sim 7$   $\mu\text{m}$ ) in the longitudinal direction. Such high-gradient density modulation driven by an LG laser for pre-bunched, low-divergence, and stable electron beams provides a potential technology for the system minimization of X-ray free-electron lasers (XFELs) and ultrashort-scale (attosecond) electron diffraction research.

**Keywords:** vortex laser, microbunching

HEDP 2023-155

## 超强激光驱动的新型辐射源：从飞秒到阿秒

谭放<sup>1</sup>, 王少义<sup>1</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>, 闫永宏<sup>1</sup>, 杨月<sup>1</sup>, 于明海<sup>1</sup>, 温家星<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>,  
李露<sup>2</sup>, 臧华平<sup>3</sup>, 吴玉迟<sup>1</sup>, 粟敬钦<sup>1</sup>, 周维民<sup>1</sup>, 谷渝秋<sup>1</sup>, 赵宗清<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 上海 20032; 2. 深圳技术大学, 深圳 518118; 3. 郑州大学, 郑州 450001)

**摘要:** 相对论强度激光驱动气体靶产生的 Betatron 辐射源具有飞秒时间尺度的脉宽、微焦点以及能谱覆盖范围大等特点, 可用于超快 X 射线成像应用。本团队基于百 TW 激光装置, 发展了特殊气体密度调制的微气室, 可产生高亮度、高准直性的中低能 X 射线源, 单发产额达到了 109 photons, 达到了世界同类规模装置的先进水平。基于上述类同步辐射源建立了动态 X 射线成像实验平台, 达到优于 4 微米的空间分辨, 时间分辨率优于皮秒。开展了对电爆炸箔起爆器的动作过程的测量, 获得了高清晰的飞片姿态图像。相对论强度激光驱动平面靶产生的高次谐波可用于产生阿秒脉冲, 是目前研究的热点。采用非周期结构靶, 可实现对高次谐波频谱特性的调制; 介绍了本团队利用 PW 激光开展相对论高次谐波实验的最新进展, 成功的获得高亮度高次谐波源, 为后续高亮度阿秒脉冲的产生与研究奠定了基础。

**关键词:** 超强激光; 辐射源

HEDP 2023-156

## 激光尾波加速驱动超快电子衍射研究

李飞<sup>1</sup>

(1. 清华大学, 北京 10084)

**摘要:** 兆电子伏特 (MeV) 超快电子衍射 (UED) 是一种广泛应用于众多领域的超快结构动力学研究工具。激光尾波加速器 (LWFA) 以其超高加速梯度和超小加速结构的优点, 为建设紧凑型全光电子衍射源提供了全新可能性。同时, LWFA 激光-束流的天然同步性有望进一步大幅提升 UED 装置的时间分辨率。我们的实验表明, 基于 LWFA 的电子衍射源和小型化永磁束流传输线可以产生并传输适用于 UED 的飞秒电子束。该束流传输线具有等时性, 可在样品处实现束流压缩并消除束流能量抖动引起的到达时间抖动, 使得 LWFA 激光-束流天然同步的优势得以显现。通过能量筛选, 可实现能散~ 3%、电荷量 2.2 fC 传输至应用端。模拟显示在样品位置电子束长可压缩至 < 30 fs。我们国际上首次获得了基于 LWFA 的 MeV-UED 单晶金样品的清晰衍射成像, 并实现了晶格常数的精确测量。该研究成果为发展基于 LWFA 的高时间分辨超快结构动力学技术奠定了良好基础。

**关键词:** 激光尾波加速; 超快电子衍射



HEDP 2023-160

## 高品质激光尾波正电子加速机制研究

丁思勤<sup>1</sup>

(1. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 高能物理领域亟需下一代正负电子对撞机来精确测量希格斯玻色子等物理。激光等离子体尾场加速(LWFA)具有高加速梯度和规模紧凑的优势,有望大幅降低对撞机成本。然而,目前仍然缺乏有效的基于 LWFA 的高品质正电子束加速机制。在本报告中,我们提出一种在激光驱动的空泡机制中实现低能散、低发射度的正电子束加速方案。通过缩短激光脉宽抑制激光在空泡内的演化,实现激光尾场的长距离稳定传播,为产生稳定的高品质正电子束的提供必要前提。在此基础上结合束团横向匹配,能够很好地控制发射度增长。此外,由于激光的群速度低于光速会导致激光和正电子束团之间相对滑移,使得正电子负载效应发生变化。利用动态负载全局优化正电子束团流强分布,能够实现长距离的低加速能散。最终通过大规模三维粒子模拟,我们验证了低能散、低发射度、大电荷量、高效率激光尾波正电子加速方案的可行性。

**关键词:** 正电子加速; 激光尾波加速; 高品质

HEDP 2023-161

## Efficient generation of intense spatial and spatiotemporal vortex harmonics using plasma mirrors

Yipeng Wu<sup>1</sup>, Zan Nie<sup>1</sup>, Fei Li<sup>1</sup>, Chaojie Zhang<sup>1</sup>,

Ken A Marsh<sup>1</sup>, Warren B. Mori<sup>1</sup>, Chan Joshi<sup>1</sup>

(1. University of California, Los Angeles, California, 90095, USA)

**Abstract:** Intense spatial or spatiotemporal vortex pulses from the extreme ultraviolet to soft X-ray spectral windows are expected to provide new degrees of freedom for a variety of key applications since they carry longitudinal or transverse orbital angular momentum (OAM). Plasma-based high harmonic generation driven by a near-infrared spatial or spatiotemporal optical vortex offers a promising route to such novel light sources. However, the energy conversion efficiency from the incident vortex beam to the vortex harmonics is rather low because of the limited driving intensities available in practice. Here, we propose and demonstrate through three-dimensional fully nonlinear kinetic simulations that by adding a readily available relativistic Gaussian pump beam as a source of energy, the energy conversion efficiency can be increased by several orders of magnitude. In addition, the proposed scheme allows independent control over the frequency and OAM of the vortex harmonics. Furthermore, by tuning the overlapping duration between the Gaussian pump and the vortex seed, an isolated high-intensity attosecond vortex pulse with tunable carrier-envelope-phase can be obtained even though the incident optical vortex has a relatively long duration.

**Keywords:** spatial and spatiotemporal vortices; orbital angular momentum; high harmonic generation; plasma mirror

HEDP 2023-165

## 重频激光打靶溅射损伤特征与防护研究

陈讯<sup>1</sup>

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 激光打靶产生的溅射物将对光路中的光学器件造成严重威胁, 这些溅射物将阻碍激光加速器的稳定运行, 甚至减少加速器使用寿命。本工作立足于揭示溅射物损伤特征并解决激光加速器中溅射物污染的问题。借鉴传统的防护手段, 本工作创新性地提出两种溅射物防护方案: 高速转轮方案以及薄膜屏蔽方案。本次主要介绍了两种方案的理论设计以及工程研制的情况, 力争不断推进, 彻底解决重频拍瓦激光溅射物防护问题。

**关键词:** 溅射物防护、重频拍瓦激光

HEDP 2023-168

## 基于菲涅尔双棱镜干涉的飞秒激光脉宽测量技术研究

张子熠<sup>1</sup>

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871)

**摘要:** 考虑实际应用情况下对高能激光系统脉冲宽度实时快速测量和操作简单高效的要求, 提出基于二次谐波自相关干涉的新型飞秒激光脉宽诊断设备。将自相关仪进行小型化集成、方便移动安装, 降低了使用成本, 理论上可以实现 0.78fs/pixel 分辨率, 中心波长 750-850nm, 动态范围 $>10^4$ , 测量范围 1.4ps 的单发在线实时脉宽测量。

**关键词:** 超快光学; 激光脉宽; 单词自相关仪; 实时测量

HEDP 2023-169

## 相对论强流电子束调控及应用

黄太武<sup>1</sup>, 蒋轲<sup>1</sup>, 彭浩<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>, 吴思忠<sup>1</sup>, 张华<sup>1</sup>, 郁明阳<sup>1</sup>, 卓红斌<sup>1</sup>, 周沧涛<sup>1</sup>

(1. 深圳技术大学 工程物理学院&先进材料测试技术研究中心, 广东深圳 518118)

**摘要:** 相对论强流电子束产生及输运是强激光等离子体物理研究中最基本的物理过程。如何高效调控强流电子束的产生和输运过程, 是推动强激光及强流粒子束应用所需解决的关键问题。本报告将介绍我们课题组近几年围绕相对论强流电子束调控及应用方面开展的研究工作。首先, 介绍我们围绕相对论强流电子束在泡沫微结构中输运开展的研究工作, 发现了由泡沫微结构引起的全新输运规律, 即分支流输运与反常阻滞输运; 这些新的电子输运机制有望为操控强流高能电子束的聚焦、传输及能量耦合过程提供一种新的途径。其次, 介绍我们围绕相对论强流电子束的应用开展的研究工作, 包括超短脉冲相干辐射光源及高亮度伽马光源产生等。最后, 对相对论强流电子束调控及应用研究做下总结和展望。

**关键词:** 相对论电子束; 等离子体; 泡沫微结构; 分支流现象; 相干光源

HEDP 2023-171

## 基于拍瓦激光与等离子体作用的 超强中红外脉冲产生

何运孝<sup>1,2</sup>, 华剑飞<sup>1</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 刘志诚<sup>1,2</sup>, 张博<sup>2</sup>, 赵艺阳<sup>1,2</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 鲁巍<sup>1</sup>

(1. 工程物理系, 清华大学, 北京 100084; 2. 等离子体国防重点实验室, 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

**摘要:** 超短超强中红外激光在超快光化学、超快动力学和阿秒科学等领域均有着重要的应用。但目前传统光学技术在产生中心波长位于中红外波段, 同时激光脉冲能量达到百毫焦量级、脉宽在飞秒量级的超短超强激光方面存在一定局限性。近年来, 基于飞秒激光与等离子体作用的光子减速机制为产生近单周期的超强中红外源提供了新的可能性。此外, 峰值功率达拍瓦 (PW) 级的超短超强激光装置也日益成熟。综合利用拍瓦级超短超强激光装置与光子减速机制, 将有望在中红外波段, 实现峰值功率达数十太瓦 (TW) 水平的超短超强激光输出。实验上, 我们利用 Silex-II PW 激光装置, 结合光子减速机制, 成功地产生了中心波长位于  $3.5\mu\text{m}$ , 脉冲能量高达 230mJ 的超强中红外激光脉冲。

**关键词:** 超短超强激光; 激光等离子体; 光子减速; 中红外

HEDP 2023-173

## PW 激光驱动的高能电子加速与辐射源研究

冯珂<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

**摘要:** 利用超强超短激光驱动的等离子体加速器不存在击穿电压的限制, 其加速梯度比传统加速器高出 3~4 个数量级, 对于小型化高能粒子加速器及高亮度辐射源的研究具有重要意义。本报告我们将介绍近期在 SULF-1PW 激光装置上开展的高能电子加速相关研究进展, 通过激光尾场与粒子尾场混合加速的机制以及准稳相加速的机制, 获得了最高能量大于 5 GeV 的高能电子束, 并开展了高亮度 Betatron 辐射源以及高分辨率单发成像研究。

**关键词:** 高能电子加速、高亮度辐射源

HEDP 2023-174

## 激光尾波加速中放电毛细管 等离子体的密度测量

温昕辉<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200030)

**摘要:** 具有合适径向密度分布的等离子体通道可以用于超短超强激光导引, 这使得等离子体通道在激光尾波加速中有着重要的应用。本文介绍了在上海交通大学激光等离子体实验室开展的毛细管放电和光导引实验。我们通过光谱展宽法测量了充氦气的放电毛细管中的等离子体密度分布, 在长度为 3cm、内径为 300 $\mu\text{m}$  的毛细管中实现了轴向均匀, 径向呈抛物线型的等离子体密度分布。

**关键词:** 激光尾场加速, 毛细管, 等离子体测量

HEDP 2023-177

## 通过强激光和固体靶相互作用 产生线偏振 $\gamma$ 光子束

高哲<sup>1,2</sup>, 宋怀航<sup>3</sup>, 王伟民<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国人民大学物理学系, 北京 100872; 2. 中国科学院量子态构建与操纵教育部重点实验室, 北京 100872;  
3. 中国科学院物理研究所, 北京 100083; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 目前 PW 激光在聚焦后峰值亮度可达  $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ , 在未来有望达到  $10^{24}\text{W}/\text{cm}^2$ 。这样的强激光照在固体靶上, 固体靶会迅速电离成等离子体。激光在接触到高密度靶后会被反射并与入射激光形成驻波场。高能电子在驻波场中辐射出大量高能  $\gamma$  光子。我们通过一维 PIC-QED 程序研究了不同激光强度、固体靶密度和预等离子体密度标长下光子的辐射效率和线偏振特性。模拟结果显示辐射出的光子偏振态为线偏振, 在低能段的偏振度可以超过 60%。在不同的模拟参数下, 辐射出的光子均有很高的线偏振度。

**关键词:** 强激光; 等离子体; 线偏振  $\gamma$  光子

HEDP 2023-179

## 超强阿秒脉冲对产生的级联机制

李程凯<sup>1</sup>, 王云良<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学物理系, 北京 100083)

**摘要:** 阿秒脉冲有着极短的脉冲宽度和超高的时间分辨能力。与阿秒脉冲相关的泵浦探测技术被广泛应用于探测化学反应以及分子、固体的超快动力学研究。该项技术需要用到一对间隔稳定并可调的脉冲对, 并且要保证泵浦脉冲的强度达到激发被测物体到达所需状态的能量。两束脉冲如果是两个不同系统产生后再用做泵浦光源会影响探测超快动力学作用的准确性。为此, 本课题组提出了在一个系统中通过级联相干同步辐射机制先后产生两束高强度、孤立的阿秒脉冲, 并且可以通过调节两个目标靶的间距来调整两束阿秒脉冲的间隔。第一束阿秒脉冲是通过强激光与固体靶作用下相干同步辐射产生的, 相比于激光与气体靶产生的脉冲有着更强的能量, 第二束阿秒脉冲是由第一层固体靶相干同步辐射产生的透射脉冲与第二层固体靶再次发生相干同步辐射产生的, 称为级联相干同步辐射机制, 因此第二束脉冲的中心频数更高。产生的阿秒脉冲对的间隔可以在几飞秒到亚飞秒间调节, 对于探测离子振动波包动力学等有着重要意义。

**关键词:** 级联同步辐射; 高次谐波; 阿秒脉冲对

HEDP 2023-181

## 北京大学国产 200TW 激光系统研制进展

吴旻剑<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 目前全球范围内的商品化的超强超短激光光源以及相应的泵浦激光系统等大部分是由法国 Thales laser 和 Amplitude technology 这两家公司提供。在国内尚未有成规模的商品化的超强超短激光光源。随着激光功率的提高 (10 PW, 甚至 100PW), 激光器国产化和商业化成为了超快激光及其相关应用领域继续高速发展的前提和保障。

为满足激光质子放疗系统等高功率激光相关的应用需求, 北京大学和国内技术优势单位合作研制国产 200TW 激光系统。200TW 激光系统以啁啾脉冲放大技术 (CPA) 和交叉偏振滤波技术 (XPW) 为总体技术路线。在保证激光参数性能卓越先进的同时, 针对应用增加相应功能: 包括回光监测系统、低重频激光自准直系统、大能量大尺寸激光衰减系统等, 为实现 200TW 激光系统的产品化提供基础。目前该系统除真空压缩外全部研制完成, 已获得最大放大输出能量 8.6J, 压缩器压缩效率:  $\geq 60\%$ , 能量稳定性 1.3%, 重复频率 1Hz, 脉冲宽度 29.2fs, 峰值功率 214.8TW。

**关键词:** 国产化; 高功率 fs 激光系统

HEDP 2023-182

## 相对论电子束驱动等离子体尾波场 激发阿秒脉冲源

王晓娟<sup>1</sup>, 彭浩<sup>1</sup>, 黄太武<sup>1</sup>, 曹磊峰<sup>1</sup>

(1. 深圳技术大学 工程物理学院, 深圳 230026)

**摘要:** 阿秒电子源可以为物理、化学、生物等众多领域提供独特的研究手段, 并在超短高能射线的激发以及自由电子激光等领域中有很重要的研究意义。本文采用 FBPIC 研究了相对论电子束在等离子体中激发等离子体尾波场和产生超短脉冲源的过程。相对论电子束驱动的等离子体尾波场使得相对论电子在横向做 Betatron 振荡, 其振荡频率是和横向尾波场与相对论质量相关的。在空间分布非均匀的等离子体尾波场作用下, 束电子的横向振荡频率和能量分别在纵向和横向上呈现非均匀性, 进一步使得相对论电子束调制形成阿秒脉冲源。在相对论电子束的头部, 纵向非均匀性的横向尾波场使得束电子横向调制形成超短脉冲源; 在相对论电子束的中尾部, 横向尾波场在纵向上呈现均匀性, 但是纵向非均匀性的纵向尾波场相对论电子的能量出现了啁啾, 进一步横向调制相对论电子束在纵向上形成阿秒脉冲源。

**关键词:** 相对论电子束; 等离子体尾波场; Betatron 振荡; 阿秒脉冲源; 等离子体

HEDP 2023-183

## 基于等离子体尾波加速器和光学波荡器的 XFEL 新工作模式

徐新路<sup>1</sup>

(1. 北京大学, 北京 100871)

**摘要:** 纳米周期预聚束电子束可以驱动 X 射线自由电子激光工作在“种子型”模式, 产生全相干、能量稳定且窄谱的 X 射线, 在很多学科都有着重要的应用。来自传统加速器领域的研究人员提出了多种谐波种子型方案来产生纳米周期预聚束电子束。我们近期提出一种在等离子体尾波加速中直接产生纳米周期预聚束高品质电子束的方案。该方案基于下降沿注入法, 通过在微米尺度上调控等离子体密度分布来周期性的开启和关闭注入过程。由于下降沿注入法独特的“纵向映射”过程, 离散化注入的电子在注入之后形成预聚束结构, 且其周期从微米尺度压缩到纳米尺度。我们进一步的利用低能、大能量啁啾的预聚束电子束与光学波荡器在等离子体出口对撞, 进入一种新型的自由电子激光工作模式——“自选择”模式。该模式独特的物理过程使得其可以接纳极大的电子束参数抖动, 并产生阿秒吉瓦 X 射线。这种新型的工作模式可能是未来等离子体尾波加速驱动的 X 射线自由电子激光可行方案之一。

**关键词:** 等离子体尾波加速, X 射线自由电子激光, 光学波荡器, 预聚束电子束

HEDP 2023-188

## 放电弯曲毛细管的气流和光迹模拟及其应用

毕择武<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200030)

**摘要:** 弯曲毛细管是实现级联加速的关键。目前 PIC 模拟耗时较长难以迅速得出结果。本文介绍了利用 ZEMAX 进行光学追迹研究激光在弯曲毛细管中的传播性质。光迹模拟耗时短, 可以辅助 PIC 模拟。本文还介绍了弯曲毛细管内的气流模拟以及具体实验过程和结果。

**关键词:** 弯曲毛细管; 光迹模拟

HEDP 2023-189

## 基于级联激光尾波加速器的新型 X 射线自由电子激光方案

肖恒圆<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 华剑飞<sup>1</sup>, 鲁巍<sup>1</sup>

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 激光尾波加速器 (LWFA) 具有极高的加速梯度, 因此具有驱动紧凑型自由电子激光器 (FEL) 的巨大潜力。然而, 由于 LWFA 束流天然具有 fs 级束长, 在波荡器的扭摆运动中与辐射脉冲存在显著的相位滑移效应, 很大程度制约了辐射增益过程。在本报告中, 我们提出了一种基于级联 LWFA 的新型 X 射线 FEL 方案以解决上述问题。通过两级 LWFA 加速并配合磁压缩器(chicane)的使用, 可以产生束长较长、切片能散较小的高品质电子束作为 FEL 驱动源。我们对此方案进行了全过程模拟, 结果表明 FEL 辐射可实现饱和放大。此外, 通过对电子束纵向相空间进行调控, 本方案具备调控 FEL 辐射谱宽的能力。本方案为实现基于 LWFA 的紧凑型 FEL 提供了可行的新途径。

**关键词:** 级联尾波加速, 自由电子激光, 相位滑移

HEDP 2023-196

## 激光等离子体加速器束流诊断系统的研发及束流输运系统进展

王凯<sup>1,2,3</sup>, 王科栋<sup>1,2,3</sup>, 朱昆<sup>1,2,3</sup>, 谢希成<sup>1,2,3</sup>, 蓝浩洋<sup>1,2,3</sup>, 张旭<sup>1,3</sup>, 李洁<sup>1,3</sup>, 蔡实现<sup>1,3</sup>, 朱廷儒<sup>1,3</sup>, 张蔡婕<sup>1,3</sup>, 许志颖<sup>1,3</sup>, 颜学庆<sup>1,2,3</sup>

(1 核物理与核技术国家重点实验室 北京大学 北京 100871; 2 广东省新兴激光等离子体技术研究院 广州 510540; 3 北京激光加速创新中心 北京怀柔 100160)

**摘要:** CLAPA-II 是由北京大学激光等离子体实验室团队承担的国家重大专项项目, 利用激光等离子体加速原理实现质子放疗的装置。其中的束流传输系统是能够完成被激光加速的质子束流收集以及精准配送的重要系统, 将实现 60~200MeV 质子束流的传输和治疗终端的精准递送。整个的束流传输系统主要包括磁铁、电源、束诊系统这两个主要的束流控制与探测系统, 以及真空、水冷、准直等配套系统。其中束流诊断系统则是采用了“拦截式”与“非拦截式”探测器相结合的方式, 完成对束流的精准探测与实时监控。同时为了保证整个系统的测量精度, 建立了准直坐标系, 将束线的磁铁和束流元件的安装精度控制在 0.1mm 以内, 并对各设备进行标定, 以确保后期探测的准确性。

**关键词:** 激光加速器, 束流输运线, 束流诊断系统, 探测器

HEDP 2023-198

## Cascaded solenoid acceleration of vortex laser-driven collimated proton beam

X. Y. Sun, W. P. Wang, H. Dong, J. Z. He, Z. Y. Shi, Y. X. Leng, R. X. Li and Z. Z. Xu

(1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 201800, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Efficient cascaded proton acceleration driven by an intense Laguerre–Gaussian (LG) laser is realized in combined three-dimensional particle-in-cell (PIC) simulations and CST STUDIO SUITE (CST) simulations. CST simulations show that there is no divergent force component in the transverse direction in the coil center. Therefore, the collimated proton beam driven by the LG laser in the first stage benefits from the uniform beam acceleration in the second stage. By contrast, the proton beam with larger divergence disperses to the outside of the coil because of the divergent force near the coil wire in the Gaussian laser case. Finally, a quasi-monoenergetic proton beam with a higher flux is generated by the LG laser, which is much better than the Gaussian laser case. The obtained proton beam can potentially be used in some special applications, such as proton radiography, fast ignition of fusion targets, biomedical applications, and production of warm dense matter.

**Keywords:** cascaded proton acceleration, Laguerre–Gaussian (LG) laser, quasi-monoenergetic



HEDP 2023-202

## 基于等离子体的高梯度束流传输元件

林晨<sup>1,2,3</sup>, 杨童<sup>1,2</sup>, 晏炆<sup>1,2</sup>, 郭臻<sup>1,2</sup>, 程浩<sup>1,2</sup>, 李昱泽<sup>1,2</sup>, 方言律<sup>1,2</sup>, 夏亚东<sup>1,2</sup>,  
李辰童<sup>1,2</sup>, 黄明锋<sup>1,2</sup>, 颜学庆<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京大学, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 2. 北京激光加速创新中心, 北京 101407; 3. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广州 510475)

**摘要:** 激光与等离子体相互作用可以产生极高的加速梯度, 在短距离内获得高能带电粒子束。具有一定密度分布的等离子体通道则能进一步引导超强激光, 延长其传播距离, 从而提高有效加速距离和粒子束能量。同时, 等离子体也是中和空间电荷力进行强流粒子束传输的理想介质。在未来加速器建设中, 等离子体通道装置在束流传输等关键元件的小型化上具有巨大潜力。电离毛细管装置是一种产生可控等离子体通道的装置。本报告将介绍北京大学研发的电离毛细管装置以及等离子体表征方面的工作, 并针对等离子体通道应用在传输激光加速束流上的诸多问题进行了讨论。

**关键词:** 激光与等离子体相互作用, 高能带电粒子束, 加速器束流, 电离毛细管

HEDP 2023-203

## 等离子体尾场加速模拟程序 QuickPIC 的最新进展

安维明<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206)

**摘要:** QuickPIC[1,2]是一个大规模并行准静态 PIC 模拟程序, 它可以高效的模拟等离子体尾波加速的物理过程, 已发展成为相关领域的重要研究工具。近期, 我们将 QuickPIC 算法拓展到了 GPU 上, 这借鉴了 UPIC[3]的 GPU 算法。目前, QuickPIC 已基本实现了 MPI+GPU 的混合同并行算法。我们还将介绍开源 QuickPIC 中激光模块的开发进展。为了在准静态近似下模拟激光在等离子体中的演化, 我们需要求解激光的包络方程。由于 QuickPIC 是基于谱方法求解泊松方程的, 在激光包络方程的求解过程中我们同样需要利用谱方法。我们将通过比较来展示 QuickPIC 与 QPAD[4]对激光尾场加速的模拟结果。除此之外, WAND-PIC[5]使用了一种新的方程对横向磁场进行求解, 这可以将准静态 PIC 算法由隐式算法转变为显示算法。我们将介绍在 QuickPIC 与 QPAD 中实现这种显示算法的最新进展。最后, 我们还将介绍 QuickPIC 中网格细化 (mesh refinement) 的最新进展。该方法可以在局部使用细化网格, 从而达到提升模拟精确度及计算效率的目的。

**关键词:** 等离子体尾波加速; PIC 算法

HEDP 2023-205

# Systematic study of the fs laser-driven target surface electron (TSE) beam and its applicative explorations

J. Y. Mao<sup>1</sup>, J. Urbancic<sup>2</sup>, L. Hudson<sup>3</sup>, S. Mattias<sup>2</sup>, M. Aeschlimann<sup>2</sup>, L. M. Chen<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Chongqing University, Chongqing 400331, China; <sup>2</sup> University of Kaiserslautern and Research Center OPTIMAS, Kaiserslautern 67663, Germany; <sup>3</sup> National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Dr., Gaithersburg, Maryland 20899, USA; <sup>4</sup> IFSA Collaborative Innovation Center and Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the large beam divergence in fast ignition schemes and increase the laser energy deposition on the target core. We systematically studied the relationship between the guiding and acceleration of target surface electrons (TSE) and laser parameters in previous works<sup>1</sup>. The beam quality is found to depend critically on the intensity ratio of the laser prepulse and laser incidence. By optimizing the system, highly collimated mono-energetic TSE beams at MeV level with low divergence and high charge per shot has been observed along the target surface following the interaction of bulk target irradiation by femtosecond laser pulses at relativistic intensity<sup>2</sup>. Then, energy enhancement of the TSE beam was significantly improved by employing a ultra-intense sub-picosecond laser system and we obtained high-quality, tens of MeV class TSE beam with a large total charge<sup>3</sup>. Recently, we studied the terahertz transit radiation driven by TSE experimentally and theoretically and obtained preliminary results.

**Key words:** fs laser, surface electron, terahertz transition radiation

HEDP 2023-208

# 角动量驱动生成万特斯拉级的强磁场

时银<sup>1</sup>, Alexey Arefiev<sup>2</sup>, 郝觉玄<sup>1</sup>, 郑坚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学技术大学, 合肥 230026; <sup>2</sup> 美国加州大学圣迭戈分校, 加州 92093-0411)

**摘要:** 近年来高能密度物理研究中, 强磁场得到越来越多的关注。在惯性约束可控聚变研究中, 强磁场成为了新的热点。实验室天体物理中强磁场下的等离子体行为可以重现无碰撞激波、原恒星射流等天体物理或空间物理现象。可用于重离子癌症治疗的激光驱动离子加速, 也能由轴向强磁场而得到改进。目前, 100-10000 特斯拉量级的磁场一般通过磁通压缩、强激光驱动电容线圈等方法产生。这些方法各有特点, 但实验难度、磁场强度和系统耦合等方面的局限, 限制了高能密度物理中强磁场的更广泛研究。与此同时, 强激光驱动的等离子体内部本身会产生巨大的磁场。常见的全光产生强磁场的方法是利用圆偏振光激光与低密度等离子体相互作用中的逆法拉第效应。该效应依赖于等离子体对圆偏振光子的吸收所必须遵守的角动量守恒。

本工作利用 4 束普通高斯光, 在特定的几何指向下, 可以将角动量高效地传递给等离子体。其中携带轴向角动量的热电子会形成高强度的旋转电流, 从而生成高强度轴向磁场。相比高功率激光装置中引入偏振控制技术或波前调控技术, 该方案利用 kJ/pw 激光装置本身的多光束特性, 引入得指向控制技术也要更简单经济。激光脉冲能量超过 kJ 时, 单个 ps 光束需要非常大口径且昂贵的光学器件, 特别是用作脉冲压缩的衍射光栅。因而, 大部分激光装置都采用单个振荡器产生多路光束, 并且分别放大、压缩。这种激光技术上必要的多光束设计, 却也提供了研究激光等离子体物理的独特工具。即使对于已有的单光束激光装置, 高功率激光的分束技术也不难获得。该工作中, 利用 4 束 ps/PW 激光束可以获得 1000 立方微米、峰值到达 10 kT 的轴向磁场[1]。该方案有望为双锥对撞点火中的超热电子导引提供新的思路, 为强场物理研究提供新的强磁场平台。

**关键词:** 自生磁场、激光等离子体、角动量、高能密度物理、多光束

HEDP 2023-209

## 高亮度 Betatron 辐射及高分辨动态照相应用

吴玉迟<sup>1</sup>, 王少义<sup>1</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>, 谭放<sup>1</sup>, 闫永宏<sup>1</sup>, 杨月<sup>1</sup>, 于明海<sup>1</sup>,  
董克攻<sup>1</sup>, 朱斌<sup>1</sup>, 李纲<sup>1</sup>, 卢峰<sup>1</sup>, 温家星<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 粟敬钦<sup>1</sup>, 周维民<sup>1</sup>,  
谷渝秋<sup>1</sup>, 赵宗清<sup>1</sup>

(1 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 等离子体物理全国重点实验室四川绵阳 621000)

**摘要:** 超短超强激光驱动的尾波场电子加速器的加速效率高、结构紧凑, 对于新一代粒子加速器与辐射源的发展具有重要的意义。基于激光尾波场电子加速器可以产生 Betatron 辐射, 具有飞秒时间尺度脉宽、微米空间尺度束斑以及宽能谱覆盖范围等特点, 可实现超快 X 射线成像应用。等离子体物理全国重点实验室长期致力于激光尾波场加速和次级辐射源研究, 本报告将介绍近期相关研究进展。基于百 TW 级飞秒激光装置, 从大电量注入、横向振荡增强等方面进行了 Betatron 辐射优化, 成功产生了亮度高、准直性好的 X 射线源, 临界能量约 6keV, 光子产额超过 109/pulse, 达到了国际同类规模装置的先进水平。发展了高时空动态 X 射线成像技术, 其空间分辨优于 4 微米, 时间分辨优于 1 皮秒, 完成了放电等离子体驱动的飞片飞行姿态的动态照相, 获得了高清晰的飞片姿态图像。

**关键词:** 激光尾波场电子加速; 高亮度 Betatron 辐射; 动态照相; 高时空分辨

HEDP 2023-213

## 强激光驱动的太赫兹辐射—产生、 表征、调控与应用

廖国前, 孙方正, 陈浩, 卫妍玉, 李玉同

中国科学院物理研究所, 北京, 100190

**摘要:** 高功率太赫兹辐射源是太赫兹科学发展的基础和关键。超短超强激光与等离子体相互作用提供了一种有效的太赫兹产生途径。本报告将介绍我们在强激光驱动的太赫兹辐射方面的一些研究进展, 包括太赫兹产生机制、表征技术、调控手段和应用演示等。实验上利用强激光与金属薄膜相互作用, 产生了能量近 200 毫焦、峰值功率达 1 太瓦的极端太赫兹脉冲, 激光-太赫兹能量转换效率接近百分之一。发展了一系列单发太赫兹探测技术, 揭示了激光等离子体太赫兹辐射的复杂的波形频谱偏振分布特性。通过调节激光和靶参数, 实现了对太赫兹波形和频谱的大范围调控。这种超快强场太赫兹辐射源将为极端太赫兹波与物质相互作用的研究提供一个独特平台, 也可以作为一种新型的激光等离子体诊断。利用强场太赫兹脉冲, 不仅实现了对铁电材料和生物样品的超快调控, 也实现了对高能电子束飞秒动力学的实时可视化。

**关键词:** 强激光, 太赫兹辐射, 表征, 应用



## 第二部分 惯性约束聚变物理、 高能量密度下的物质特性

HEDP 2023-003

## 高马赫数高密度量子简并等离子体对撞

张文博

(上海交通大学)

**摘要:** 高马赫数高密度量子简并等离子体的对撞是双锥点火 (DCI) 惯性约束聚变方案中最重要的过程之一。在高密度和高马赫数的情况下, 量子简并效应以及动理学效应可能在对撞过程中发挥重要作用, 而这将挑战传统流体模型的预测。我们利用 PIC 程序 LAPINS 进行了一系列一维大尺度氘氦等离子体的对撞模拟, 并利用流体以及动理学激波理论对结果进行了分析。我们发现, 为了实现高密度压缩, 对撞的动能压应显著高于量子简并压, 这意味着我们需要较高的对撞马赫数。然而, 当马赫数进一步增加时, 密度压缩却呈反常的下降趋势, 我们认为这是由动理学效应导致的。这一结果揭示出 DCI 方案设计中可能存在理论的最佳对撞速度。

HEDP 2023-021

## 激光聚变靶丸处辐射流测量实验研究

谢旭飞<sup>1,\*</sup>、侯立飞<sup>1</sup>、蔡洪波<sup>2</sup>、吴畅书<sup>2</sup>、彭晓世<sup>1</sup>、段晓溪<sup>1</sup>、刘慎业<sup>1</sup>、任宽<sup>1</sup>、杨冬<sup>1</sup>、李三伟<sup>1</sup>、刘永刚<sup>1</sup>、杜华冰<sup>1</sup>、李志超<sup>1</sup>、李琦<sup>1</sup>、尚万里<sup>1</sup>、魏惠月<sup>1</sup>、车兴森<sup>1</sup>、郭亮<sup>1</sup>、蒋小华<sup>1</sup>、王峰<sup>1</sup>、何海恩<sup>1</sup>、杨家敏<sup>1</sup>、邹士阳<sup>2</sup>、江少恩<sup>1</sup>、张保汉<sup>1</sup>、丁永坤<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 1000881)

**摘要:** 2022 年 12 月 5 日, NIF 装置激光聚变实验用 2.05MJ 激光能量获得了超过 3.15MJ 聚变放能 (约 1.53 倍聚变增益), 实现了聚变点火, 全面验证了激光聚变的科学、技术、工程可行性。然而, 从能量流转化上看, 聚变产额仍远低于输入电网能量, 为实现聚变能源利用和更好的服务国防安全, 必须进一步提升能量增益。从聚变增益突破 1 到高增益依旧困难重重, 必须细致研究激光聚变中的关键物理问题, 其中关键问题之一即为黑腔“能量丢失”问题, 即靶丸感受到的驱动辐射流低于理论预期, 黑腔能量分配与理论预测不符。间接驱动激光惯性约束聚变常采用黑腔将激光能量转换为 X 射线能量, 用于压缩靶丸并使其发生内爆, 其中靶丸处辐射流强度是影响靶丸烧蚀、压缩内爆的关键物理量。受限于靶丸处辐射流强度诊断的复杂性, 传统上主要通过黑腔腔壁辐射流测量数据修正数值模拟程序, 进而间接评估靶丸处辐射流强度。然而, 极端状态下黑腔腔壁辐射流测量容易受到黑腔激光注入孔缩孔、腔壁金泡膨胀等因素干扰, 很难用于精确校验数值模拟程序并表征靶丸处辐射流强度。本工作提出了一种表征黑腔中心靶丸处驱动辐射流强度的新方法, 可有效替代传统基于腔壁辐射流测量的实验方法。本方法中, 靶丸处驱动辐射流强度通过同时测量黑腔中心样品局域再发射流和冲击波速度获得。采用局域辐射流测量系统和成像型任意反射面速度干涉仪, 可同时获得样品局域再发射流时间演化数据和冲击波速度时间演化数据。通过样品局域再发射流和冲击波速度这两套独立诊断量, 可有效降低由样品不透明度参数不确定性引入的误差。传统方法中影响辐射流测量精度的激光注入孔缩孔效应, 可通过针对样品局部区域辐射流的选区测量有效解决, 从而确保可测量整个高功率激光脉冲注入时段内靶丸处驱动辐射流。该研究为表征靶丸处驱动辐射流及研究黑腔“能量丢失”问题提供了一种崭新手段。

**关键词:** 靶丸处辐射流, 样品再发射流, 冲击波图样, 辐射温度, 间接驱动激光聚变

HEDP 2023-033

## 低相干光对激光惯性约束聚变中侧向 SRS 的抑制

李晓锋<sup>1,\*</sup>, 马行行<sup>2,3</sup>, 刘钊<sup>2,3</sup>, 翁苏明<sup>2,3</sup>, 陈民<sup>2,3</sup>, 盛政明<sup>2,3</sup>

(1 强场激光物理国家重点实验室, 上海光学精密机械研究所, 中国科学院, 上海 201800, 中国; 2 激光等离子体教育部重点实验室, 物理与天文学院, 上海交通大学, 上海 200240, 中国; 3 IFSA 协同创新中心, 上海交通大学, 上海 200240, 中国)

**摘要:** 2022 年 12 月份美国国家点火装置使用 2.05MJ 的激光能量实现了 3.0MJ 的聚变能量输出, 这意味着实验室条件下惯性约束聚变取得了巨大进展。尽管如此, 控制和利用激光束与等离子体相互作用中的参数不稳定性仍然是该领域的巨大挑战。近年来由于超宽带激光技术的发展, 其能否有效抑制参量不稳定便引起了人们的广泛关注。针对宽带激光与均匀等离子体中的受激拉曼散射 (SRS), 本文从三波耦合的二维几何空间出发, 开展了一系列理论和数值研究。随着激光带宽的增加, 研究发现侧向 SRS 逐渐优于后向 SRS, 表明抑制侧向 SRS 需要更大的带宽[1]。基于目前的激光技术, 我们提出通过将两个或多个宽带光束与独立的相位光谱相结合来产生类太阳光激光器。使用这种激光器, 可以减轻抑制侧向 SRS 的带宽要求[2]。以上不仅为宽带激光器驱动的参数不稳定性提供了新的理解, 而且可望用于设计作为下一代 ICF 驱动器的超宽带激光器。

**关键词:** 惯性约束聚变; 激光等离子体参量不稳定; 低相干光; 侧向受激拉曼散射;

HEDP 2023-034

## 面向 DCI: 多束相对论激光在等离子体中的传输和热电子产生

王伟民<sup>1,3,4</sup>、张铁怀<sup>2</sup>、周舸<sup>2</sup>、王志伟<sup>1</sup>、张子彦<sup>1</sup>

(1. 中国人民大学物理学系, 北京 100872; 2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 4. 双锥联合研究团队)

**摘要:** 在快点火激光聚变或双锥对撞点火 (DCI) 激光聚变方案中[1], 对靶的加热过程均采用 ps 激光产生的热电子束来实现的, 因此 ps 激光与等离子体相互作用过程的激光传输、热电子产生和传输非常关键[2, 3]。我们围绕着上海光机所神光 II 升级激光装置的激光参数为基础, 面向  $\alpha$  粒子自加热的靶丸所需要的 ps 激光参数进行了研究; 考虑到, 实际使用的 ps 激光时由多束有夹角排布组成, 我们分别研究了单束激光入射, 和两束频率相同的激光入射情形热电子的产生效率和能谱[2], 发现在单束激光情形需要的优化光强高于  $4 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ , 两束激光入射情形它们的夹角为 6-16 度时能获得更好的效果;

特别地, 为了控制热电子能谱, 考虑到使用二倍频激光, 这样涉及到的问题变成两束不同频率的激光入射。我们发现当激光到达强相对论时 ( $> 5 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ ) 激发了电磁诱导透明效应 (EIT), 低频激光在高频激光的帮助下能够穿透高密度等离子体把更多能量转换给热电子, 为此我们发展了一个相对论三波耦合模型对此问题进行解释, 并且给出发生 EIT 的条件和相位匹配要求激光频率通带 (passband)。注意到等离子体物理中的 EIT 概念是 Harris 在 1996 年从原子物理引入的[4], 后来的研究认为此现象在真实等离子体中不能发生, 我们的此项理论研究有望澄清这个长期存在问题[5]。

**关键字:** 双锥对撞点火激光聚变; 快点火激光聚变; ps 激光与等离子体相互作用; 快电子传输; 电场感应透明

HEDP 2023-037

## 基于多能带轫致辐射成像的热斑电子温度分布诊断研究

吴燕康<sup>1</sup>、张兴<sup>1</sup>、柯盛鑫<sup>1</sup>、董建军<sup>1</sup>、杨品<sup>1</sup>、李文杰<sup>2</sup>、徐捷<sup>2</sup>、穆宝忠<sup>2</sup>、陈忠靖<sup>1</sup>、孙传奎<sup>1</sup>、蒲昱东<sup>1</sup>、黄天暄<sup>1</sup>、王峰<sup>1</sup>、董云松<sup>1</sup>、杨冬<sup>1</sup>、杨家敏<sup>1</sup>、赵宗清<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 同济大学 精密光学工程技术研究所, 上海 200082)

**摘要:** 激光驱动惯性约束聚变(ICF)需要实现激光能量到聚变热斑区等离子内能的高效率能量转换, 形成球对称、低混合的高温高密度热斑( $T_i \sim 10\text{keV}$ 、 $\rho R \sim 300\text{mg/cm}^2$ 、 $P \sim 500\text{Gbar}$ )。在高收缩比内爆实验中, 内爆压缩不对称性和壳层-燃料混合是目前制约高品质热斑形成的关键因素, 导致热斑压缩密度和温度难以达到物理设计条件, 且目前缺少对热斑状态参数空间分布的有效诊断方法。在非掺杂靶丸内爆实验中, 热斑电子温度等参数可以通过轫致辐射谱开展诊断分析, 考虑到热斑尺度仅约  $50\mu\text{m}$ , 本文研究团队发展了一种具备四能点准单能成像能力的 KB 显微镜, 通过热斑轫致辐射的多能带高分辨成像方式开展电子温度空间分布诊断。该显微镜空间分辨约  $5\mu\text{m}$ , 采用单层膜反射镜和多层膜反射镜的混合编组设计, 构成能谱分辨约 10% 的四个独立成像通道 ( $4.51\text{keV}$ 、 $6.4\text{keV}$ 、 $8.04\text{keV}$ 、 $9.67\text{keV}$ ), 同时团队基于蒙特卡洛方法开发了一套 KB 显微成像的模拟程序, 发展了一种热斑成像效率空间分布的标定方法, 并建立了激光装置实验中热斑漂移定位的在线测量方法, 解决了热斑轫致辐射强度的 KB 显微成像效率修正问题。在该显微镜投入实验应用之前, 研究团队在现有四通道空间平响应 KB 显微镜上采用多种滤片堆栈组合方式, 获得了三个不同能带的热斑轫致辐射图像, 在热斑分布的二维旋转对称近似下对热斑轫致辐射强度进行了三维重建, 获得热斑电子温度沿等辐射量线的分布, 为后续开展热斑混合区宽度诊断等提供了一种新的诊断方法。后续研究团队将进一步将 KB 成像能点拓展到接近  $20\text{keV}$  能区, 并解决成像视场范围和成像效率的问题, 实现热斑电子温度分布诊断精度的进一步提升。

**关键词:** 热斑电子温度; Kirkpatrick-Baez 显微镜; 轫致辐射成像; 热斑混合; 多能点 KB 显微成像

HEDP 2023-039

## 基于多通道 Ross 滤片对成像的热斑混合诊断研究

柯盛鑫、陈伯伦、张兴、刘祥明、吴燕康、蒲昱东、孙传奎、孙奥、晏骥、尚万里、黄天暄、王峰、董云松、杨冬、杨家敏、赵宗清

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 热斑混合是影响激光驱动惯性约束聚变点火的关键因素之一, 在内爆压缩过程中靶丸壳层缺陷结构和驱动不对称性等都可能成为流体不稳定性增长的诱发因素, 随着内爆收缩比的不断提高, 流体不稳定性将发展进入非线性区并将壳层材料馈入热斑中, 导致热斑温度降低和能量辐射损失加剧, 严重制约聚变性能。在高性能内爆实验中, 靶丸燃料和壳层中均不掺杂示踪元素, 因此热斑辐射以轫致辐射为主, 目前美国 NIF 装置等主要采用 Ross 滤片对成像或特定能点晶体谱仪定量测量等方式开展热斑轫致辐射强度的定量测量, 并诊断热斑混合量。本文针对  $100\text{kJ}$  能量驱动内爆热斑的状态参数特征, 设计并发展了一套五能带 ( $4.5\text{--}5.4\text{keV}$ 、 $5.4\text{--}7.7\text{keV}$ 、 $7.7\text{--}9.7\text{keV}$ 、 $9.7\text{--}17\text{keV}$ 、 $17\text{--}29\text{keV}$ ) 的 Ross 滤片对成像诊断方法, 通过不同能带轫致辐射强度与中子产额的比值获得了内爆热斑的 CH 材料混合量诊断数据, 并结合成像系统的能谱响应定量化标定数据发展了一种多能带



成像的正向拟合分析方法，有助于降低热斑电子温度和混合量的分析不确定度。进一步，本文提出了一种热斑不同混合区宽度下的电子温度径向分布双温建模方法，在热斑对称性较好的实验发次中进行了电子温度径向分布拟合分析，相较传统单温模型，该诊断方法体现出了电子温度径向分布的敏感性，初步探索了热斑混合量空间分布的诊断方法。

**关键词：**内爆热斑混合；流体力学不稳定性增长；韧致辐射定量测量；多通道 Ross 滤片对成像；混合区空间分布；

HEDP 2023-053

## 相对论电子束激发等离子体微观不稳定性的 粒子模拟及实验研究

胡章虎<sup>1</sup>，蓝婕婕<sup>1</sup>，赵全堂<sup>2</sup>，程锐<sup>2</sup>，赵永涛<sup>3</sup>，张子民<sup>2</sup>，王友年<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 物理学院，大连 116024；2. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；  
3. 西安交通大学 理学院，西安 710049)

**摘要：**相对论电子束激发的等离子体微观不稳定性与束流的运输、能量沉积及强磁场的产生密切相关，是天体物理、聚变等离子体以及高能密度物理等领域中的研究前沿和热点问题。本报告主要介绍近期课题组在这一方面的研究进展：包括电子束在横向非均匀等离子体中的成丝及定向漂移，离子对等离子体成丝不稳定性中磁场能量的非线性放大以及引起的横向磁场反常分布。此外我们在中国科学院近代物理研究所的高能电子成像平台末端安装了一种高压直流放电等离子体靶，等离子体最高密度可达到  $10^{23}\text{m}^{-3}$ ，粒子模拟研究表明：通过调节电子束注入及等离子体放电之间的延迟时间，实验上有望观察到电子束从强聚焦区域进入到不稳定性激发区域。

**关键词：**相对论电子束；等离子体成丝不稳定性；斜双流不稳定性；粒子模拟

HEDP 2023-056

## 碰撞冲击波在非均匀等离子体中的 传播特性研究

孟凡琦<sup>1</sup>，蔡洪波<sup>2,3,\*</sup>，张恩浩<sup>4</sup>，张旭<sup>1</sup>，张文帅<sup>2</sup>，朱少平<sup>1,2,5,\*</sup>

(1 中国工程物理研究院研究生院，北京 100088，2 北京应用物理与计算数学研究所，北京 100094；3 北京大学应用物理与技术研究中心，北京 100871，4 北京计算科学研究中心，北京 100088；5 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，绵阳 621900)

**摘要：**通过混合流体-PIC 方法模拟了高马赫数 (Mach) 冲击波与非均匀等离子体的相互作用。分析了冲击波与非均匀等离子体相互作用过程中传统单流体建模难以描述的等离子体效应与离子混合带来的影响。对比激波在均匀、非均匀等离子体中的传播发现，非均匀等离子体导致冲击波和热波速度变快，并在波阵面处产生离子分离。另一方面，冲击波在非均匀等离子体中充分激发湍流状态，导致不同 Z 离子的混合，显著影响了下游粘性；冲击波携带的电场对碳氮的加速不同，带来下游离子温度分离。以上影响可能在 ICF(Inertial Confinement Fusion) 激波压缩过程中带来不符合预期的冲击波速度与密度。

**关键词：**冲击波；混合流体-PIC

HEDP 2023-058

## 基于等离子体汇聚的高亮度辐射源 实验研究

晏骥<sup>1</sup>、任国利<sup>2</sup>、涂绍勇<sup>1</sup>、张兴<sup>1</sup>、蓝可<sup>2</sup>、等

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900; <sup>2</sup> 应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094)

**摘要:** 基于高温等离子体汇聚的概念, 利用功率密度  $10^{14}\sim 15\text{W}/\text{cm}^2$  的纳秒激光与球形腔相互作用, 能够产生高亮度的近  $10\text{keV}$  X 光源。其基本物理过程是利用激光烧蚀金属材料组成的球腔内壁产生多束等离子体流, 等离子体朝向腔中心汇聚并发生碰撞, 形成高温稠密的等离子体并发射特征 X 射线。

该实验在神光 III 原型装置上开展。实验中利用八束脉宽为  $1\text{ns}$ , 总能量约  $6\text{kJ}$  的激光注入在 Fe 的两孔球腔内。实验结果表明, 采用等离子体汇聚的方式, 其激光-X 光转换效率达到  $3.2\%$ 。与同激光烧蚀条件下的传统平面靶相比, 光源亮度提高到  $6.4$  倍。并通过特征发射光谱的诊断表明在汇聚过程中, Fe 等离子体通过动能转换内能的方式, 显著提高了等离子体温度, 从而提升了发射强度。同时, 从时间行为上可以看到, 等离子体汇聚方式, 其发光较强时间段在  $0.6\sim 1.4\text{ns}$  之间, 与一维辐射流体模拟结果符合较好。

**关键词:** 等离子体汇聚; 激光 x 光源

HEDP 2023-061

## 多光束辐照位形对激光等离子体不稳定性及 产生热电子的影响

孟珂阳, 李俊

(中国科学技术大学)

**摘要:** 在惯性约束聚变 (ICF) 中, 激光等离子体不稳定性 (LPI) 产生的热电子能够预热未压缩冷燃料, 显著的降低内爆效率, 需要被有效抑制。之前的实验结果表明, 不同激光辐照位形对于激光等离子体不稳定性及产生的热电子能量有着跨越数量级的影响。除了能量之外, 对于不同的点火方案, 热电子发散角的大小也会明显影响其预热效应的强弱。我们在此通过理论和二维粒子模拟 (PIC) 研究了在不同的双束激光 (单束  $I=3\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ ) 辐照位形下的等离子体 ( $T_e=3\text{keV}$ ,  $L_n=150\mu\text{m}$ ) 中, 双等离子体衰变 (TPD) 和受激拉曼散射 (SRS) 及它们产生的热电子的不同特征。我们重点关注不同入射角度下哪些不稳定性模式增长最显著, 对应热电子的能量和角分布等特征有何种变化, 以及背后的关键物理机制。我们发现, 当激光入射角较小 ( $24$  度) 时, TPD 产生前向的共用子波与前向小发散角的热电子; 当激光入射角较大 ( $48$ ,  $52$  和  $55$  度) 时, 在侧向发生 TPD 与侧散 SRS 的共用子波, 并产生侧向 SRS 散射光与更多大角度的热电子。对于后者, 我们基于 LPI 的 Rosenbluth 理论对共用子波的增益进行了计算, 得到的结果很好的解释了不同入射角度下共用子波和 SRS 侧散的不同增长模式和角度。本研究为更复杂辐照位形下热电子能量和发散角的估计提供了初步的方法。

**关键词:** 激光等离子体不稳定性; 多光束; 热电子; 共用子波; TPD; SRS

HEDP 2023-066

## 准一维球形内爆的低熵波形研究

曾国庆<sup>1</sup>, 贾青<sup>1</sup>, 郑坚<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 等离子体与聚变工程系, 合肥 230026)

**摘要:** 惯性约束聚变需要将球形靶丸压缩到高温高密度的状态实现聚变点火, 外部驱动源主要有高强度激光和 X 射线, 驱动激光设计对于靶丸内爆具有关键性作用。激光波形参数很多, 传统上研究人员通过物理分析给出参数设计, 为了实现高压压缩密度 (>1000 倍), kidder 给出了理想等熵压缩的激光驱动波形。本文利用差分进化算法结合一维辐射流体程序 multi1D 针对高压压缩面密度得到具有弱预脉冲 (picket) 的优化激光波形, 并分析了弱 picket 波形和理论近等熵波形对靶丸的作用。对于中心点火内爆过程, 弱 picket 波形相较于近等熵波形壳层熵增更小, 转滞时刻具有更小的中心热斑以及燃料面密度, 可以实现更高汇聚比的压缩。

**关键词:** 惯性约束聚变; 差分进化算法; 等熵压缩

HEDP 2023-067

## 等离子体冲击波相互作用中的动理学效应

张旭<sup>1</sup>, 刘庆康<sup>1</sup>, 张文帅<sup>2</sup>, 张恩浩<sup>3</sup>, 蔡洪波<sup>2,4,\*</sup>, 朱少平<sup>1,2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

<sup>2</sup>北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

<sup>3</sup>北京计算科学研究中心, 北京 100088

<sup>4</sup>北京大学应用物理与技术研究中心, 高能密度物理数值模拟教育部重点实验室, 北京 100871

<sup>5</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900

**摘要:** 在间接驱动惯性约束聚变中, 黑腔在强激光的辐照下受热膨胀, 并在黑腔气体中驱动冲击波。冲击波会在腔轴附近发生碰撞, 或者与靶丸发生碰撞, 导致碰撞区显著的温度密度的提升, 影响后续的激光等离子体相互作用以及辐照对称性。动理学效应是影响等离子体状态的重要因素, 也是通常流体模拟无法直接描述的物理现象。通过混合流体-PIC 模拟研究了两个离子声冲击波相互作用的过程, 分析了动理学效应在这一过程中的作用。研究发现: (1) 气体区两个冲击波碰撞的过程可以认为是相互贯穿的过程, 碰撞后产生的高温高密度区域是新的下游区。(2) 反射离子可以降低碰撞后的离子密度, 同时由于不同离子反射情况不同, 会发生离子密度分离。在离子碰撞很弱时, 冲击波波列结构的叠加使碰撞后电场出现波动结构, 这可以进一步耗散入射粒子的动能, 使离子密度二次升高, 同时可以通过离子捕获将离子密度调制成正弦函数式的振荡结构, 产生一个不稳定性种子。这一研究将有助于提升对黑腔等离子体状态的预测, 有助于理解和评估黑腔中的激光等离子体不稳定性演化。

**关键字:** 冲击波相互作用; 混合流体-PIC; 动理学效应

HEDP 2023-069

## 激光强度的时间调制对双等离子体衰变及产生热电子的影响

姚灿<sup>1</sup> 李俊<sup>1</sup>

(中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:** 我们通过理论和数值模拟研究了双等离子体衰变不稳定性 (TPD) 在入射激光强度存在时间调制时的增长行为特征, 以及其产生热电子能量占激光能量的份额  $f_{hot}$  随调制频率  $\Delta\omega_m$  的变化。我们重点关注  $\Delta\omega_m$  和 TPD 增长率  $\gamma_0$  处于同一数量级 ( $\Delta\omega_m \sim \gamma_0$ ) 时的情况, 这对应于中等的激光频率带宽。通过在二维粒子模拟 (PIC) 中使用双色光模型来灵活调节  $\Delta\omega_m$ , 我们发现 TPD 棒的瞬时强度和  $f_{hot}$  在 ( $\Delta\omega_m \sim \gamma_0$ ) 时呈现出间歇性增长的动态行为。当  $\Delta\omega_m \gg \gamma_0$  时, 双色光产生的超热电子  $f_{hot}$  低于同等平均入射光强下单色光产生的超热电子  $f_0$ , 与之前的研究结果一致; 但是当  $\Delta\omega_m$  小于  $\Delta\omega_c$ , 结果显示  $f_{hot} > f_0$ 。我们发现阈值  $\Delta\omega_c$  主要依赖于  $\gamma_0$  以及等离子体的碰撞阻尼率  $\nu_{ei}$ , 而对等离子体的温度和密度梯度标长不敏感。基于 TPD 间歇性增长特征的分析, 我们阐释了  $f_{hot}$  随  $\Delta\omega_m$  变化的物理机制, 使之能够推广到更真实情况下宽频带激光的强度调制。

**关键词:** 双等离子体衰变不稳定性, 热电子, 激光时间调制

HEDP 2023-070

## 简并等离子体在加热过程中自生磁场的箍缩效应

李昱衡; 吴栋; 张杰

(中国科学院物理研究所)

**摘要:** 在双锥点火方案中, 通过将两个对头锥体中压缩的燃料喷射并碰撞, 形成一团等容的对撞等离子体。该等离子体在与锥体轴线垂直的方向上由皮秒级激光束产生的高通量密度快电子迅速加热。被加热的等离子体的量子简并度可以通过碰撞等离子体的速度和密度进行调节。在这项工作中, 我们研究了量子简并度对快电子在碰撞等离子体中传输的影响。通过混合 PIC 模拟, 我们发现在初始量子简并等离子体中, 自生磁场比具有相同燃料密度的非简并等离子体强 1.4 倍。量子简并态中产生的强自生磁场可以将轴向注入的快电子束箍缩, 从而得到 1.2 倍的加热效率。我们的研究结果对其他快点火方案也有广泛启示。

**关键词:** 惯性约束聚变; 双锥对撞点火方案; 快电子输运

HEDP 2023--071

## 等容快点火模型中的点火判据和热斑演化

徐泽鲲<sup>1,3</sup>, 吴福源<sup>2,3</sup>, 姜博放<sup>2,3</sup>, Shigeo Kawata<sup>3,4</sup>, 张杰<sup>2,3\*</sup>

(1. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190; 2. 上海交通大学 物理与天文学院, 上海 200240;

3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心和 DCI 联合研究团队, 上海 200240;

4. 宇都宫大学 工程研究生院, 日本 宇都宫)

**摘要:** 惯性约束聚变中, 点火判据, 即燃烧波向周围冷燃料中稳定传播所需的热斑条件对激光聚变实验的设计和评估具有关键性意义, 如美国国家点火装置 (NIF) 团队在报道 1.37MJ 聚变输出的论文中使用了九种不同形式的点火判据对实验结果进行评估[1]。以往对等容快点火模型点火判据的研究往往使用实验中难以产生的球形中心热斑。快点火实验中, 外部加热源导致热斑在等容燃料边缘形成, 并通过真空界面直接损失质量和能量, 这一新的能量损失机制被命名为热斑溃散。针对该特点, 我们建立了新的半解析模型, 该模型假设了位于半无限大冷燃料边缘的半球形热斑这一更符合现实的构型。计算结果揭示了热斑溃散和燃烧传播二者间的竞争在等容快点火模型中对热斑的演化起决定性作用, 并给出修正后的点火判据。随后我们利用三维辐射流体力学程序 O-SUKI-N 3D [2]进行模拟, 模拟结果与半解析模型相符。该模型可以为双锥对撞点火[3-5]等基于等容快点火模型的新型聚变方案的实验设计提供参考。

**关键词:** 激光聚变; 等容快点火; 燃烧波传播; 点火判据; 双锥对撞点火;

HEDP 2023-072

## 高能量密度下的流体不稳定性研究

张桦森

(中国北京应用物理与计算数学研究所)

**摘要:** 武器物理研究是面向国家战略安全的重大需求并牵引了以激光 ICF 为代表的高能量密度物理研究。高能量密度状态下的流体不稳定性及其导致的混合是影响武器和 ICF 内爆性能的重要物理因素。与经典的流体不稳定性不同, 高能量密度下的流体不稳定性显著受到界面能量输运的影响, 一方面导致界面附近密度渐变, 另一方面导致扰动增长受到烧蚀效应的影响。这些差异导致高能量密度下的流体不稳定性增长行为与经典流体不稳定性有较大的差别。本工作以瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 为例, 分别研究了高能量密度条件下界面能量输运导致的烧蚀效应与密度渐变对 RTI 扰动增长的影响, 获得了非线性阶段 RTI 的增长规律[1-4]。根据 RTI 的气泡竞争理论建立了一个评估内爆加速阶段流体稳定性悬崖的定标关系, 并应用于分析激光直接驱动内爆实验观测到的流体稳定性边界[5]。

**关键词:** 流体不稳定性

HEDP 2023-073

## “自陡峭效应”对质子束在稠密等离子体中能量沉积的影响

徐汪文<sup>1</sup>, 胡章虎<sup>1</sup>, 惠得轩<sup>1</sup>, 王友年<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 物理学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**带电粒子束和等离子体之间的相互作用一直以来是人们关注的热点。本文采用粒子模拟程序 EPOCH (Extendable PIC Open Collaboration) 研究了激光加速产生的强流质子束在稠密等离子体中的输运和能量沉积过程。在等离子体密度较高的情况下, 库仑碰撞已然成为束和等离子体相互作用过程中不可忽视的因素之一。模拟结果表明, 当质子束入射到强碰撞等离子体中, 会激发出强减速电场而发生能量沉积。减速电场会将初始时刻为高斯分布的质子束调制成束尾部密度极高(密度最大值为初始时刻的 5 倍)的陡峭式分布, 我们称之为“自陡峭效应”。在模拟过程中, 束激发的电场会因为该效应的出现而逐渐增强, 从而进一步增大了束自身的能量沉积。这一发现对惯性约束聚变以及高能量密度物理研究有一定的参考价值。

**关键词:** 质子束; 等离子体; 库仑碰撞; 粒子模拟;

HEDP 2023-075

## 惯性约束聚变燃烧等离子体行为偏离麦克斯韦分布的研究

薛宇涵, 吴栋, 张杰

(上海交通大学物理与天文学院激光等离子体研究所)

**摘要:**随着美国国家点火装置(NIF)对实验条件的改进, 一些发次中的燃料达到了燃烧等离子体状态, 但其中存在偏离麦克斯韦的等离子体行为, 流体模拟无法解释。这些发次中 $\alpha$ 粒子加热成为主要的加热机制, 此时聚变反应剧烈产生大量高能 $\alpha$ 粒子, 其与燃料离子(如氘氚)的直接碰撞尤其是大角度库仑碰撞的影响不能被忽略。传统模拟中常采取小角度碰撞或麦克斯韦分布近似, 然而, 相比小角度碰撞, 单次大角度碰撞可以令氘氚离子与 $\alpha$ 粒子间交换更多能量, 从而产生燃烧等离子体的聚变行为所敏感的超热离子分布。受 NIF 上研究的启发, 我们在质点网格(PIC)动理学程序 LAPINS 上, 综合离子静电电势与相对运动后考虑大角度碰撞, 模拟了接近 NIF 条件下的等离子体并成功看到了超热离子分布与接近实验的离子各向同性速度和表观离子温度之间的关系, 这可能为理解实验上的异常中子观察提供重要思路。

**关键词:** 大角度碰撞; 燃烧等离子体; 超热离子分布

HEDP 2023-082

## 相干渡越辐射诊断快电子输运

刘阳春, 吴栋, 盛正卯

(浙江大学)

**摘要:** 快电子在高密度靶中的输运时高能密度物理的关键性问题。然而, 实验上很难对快电子在靶里面的输运进行诊断。我们通过对密度为 2.7g/cc 的固体靶进行二维和三维的 PIC 模拟, 诊断靶后产生的相干渡越辐射。考虑电离效应和碰撞效应的模拟结果说明相干渡越辐射直径随着靶的增大而增大, 这是由于电子束在厚靶里面的能量损失更多。根据三维模拟的结果, 我们发现相干渡越辐射的直径会随着时间的增大, 结合相干渡越辐射直径与电子能量的关系, 我们认为相干渡越辐射可以用于诊断靶后表面的快电子能谱。同时为了更深入地研究非理想效应对这一结果的影响, 我们关闭电离和碰撞效应进行模拟, 发现不考虑电离和碰撞效应会低估快电子在靶中输运的能量损失, 靶后相干渡越辐射的结果有很大的不同, 从而无法对相干渡越辐射特性进行完整的描述。

**关键词:** 相干渡越辐射, 诊断快电子输运

HEDP 2023-083

## Title: The role of quantum degeneracy in double-cone-ignition inertial confinement fusions

Dong Wu, Jie Zhang

**Short Abstract:** Although National Ignition Facility (NIF) had reached ignition and net energy gain, there is still a long distance to bring the laser fusion energy to the national grid. One of the most obstacles is the low energy coupling efficiency from input laser to the hot spot. NIF's recent landmark achievement was based on their advanced engineering progress, such as high-quality target fabrication and laser beam control. However, in order to dramatically increase this coupling efficiency, essential physical insight is really required. Here, role of quantum degeneracy is fully taken and optimized in the double-cone-ignition (DCI) scheme, which is believe to be of key importance in order to achieve high efficiency laser fusion. Firstly, via momentum filtering and confinement by the inner walls of cones, nearly isothermal compression of Deuterium-Tritium (DT) fuels can be achieved with a shell-in-cone design, which leads to the formation of highly degenerated DT jets outside cone tips. Secondly, for the colliding two jets at highly degenerated states, the diffusion of DT fuels can be controlled to the minimum, which is beneficial in order to increase the energy coupling efficiency from colliding kinetic energies of fuels to their internal energies. Thirdly, phase transition from degenerate to nondegenerate takes places in the colliding front, and when fast electron beams produced by picosecond petawatt laser pulses are injected, the particular degenerate-nondegenerate-degenerate sandwich configuration generates kT surface magnetic fields, confining fast electrons and creating a hot spot with a very localized region in the fuel. Large scale first-principle kinetic simulations indicate by taking and optimizing the role of quantum degeneracy, the energy coupling efficiency to the hot spot is further increased by 80~120%.

HEDP 2023-084

## Energy coupling in intense laser solid interactions: Material properties of gold

刘旭; 吴栋; 张杰

(上海交通大学)

**Short interview:** In the double-cone ignition inertial confinement fusion scheme, a high density deuterium - tritium (DT) fuel is rapidly heated with high-flux fast electrons, which are generated by short and intense laser pulses. A gold cone target is usually used to shorten the distance between the critical surface and the compressed high density DT core. The material properties of the solid gold may affect the generation and transport of fast electrons significantly, among which the effects of ionization and collision are the main concerns. In this work, the effects of ionization, collision, and blow-off plasma on the laser energy absorption rate are investigated using the LAPINS code: A three-stage model is adopted to explain the mechanism of fast electron generation and the change in the laser energy absorption rate. With the increase in the charge state of Au ions, the laser - plasma interaction transfers to the later stage, resulting in a decrease in the laser energy absorption rate. Collision has both beneficial and harmful effects. On the one hand, collision provides a thermal pressure, which makes it easier for electrons to escape into the potential well in front of the target and be accelerated in the second stage. On the other hand, collision increases stopping power and suppress electron recirculation within the target in the third stage. The vacuum sheath field behind the target enhances the electron circulation inside the target and, thus, improves the laser energy absorption; however, this effect will be suppressed when the blow-off plasma density behind the target increases or collision is considered.

**Keywords:** 激光固体相互作用; 数值模拟; PIC 方法

HEDP 2023-086

## 电子束在反向对称电流中聚焦效应的实验观测

蓝婕婕<sup>1</sup>, 胡章虎<sup>1</sup>, 赵全堂<sup>2</sup>, 冉朝晖<sup>2</sup>, 李 佳<sup>2</sup>, 周有为<sup>2</sup>, 陈艳红<sup>2</sup>, 闫文兵<sup>2</sup>, 程锐<sup>2</sup>, 曹树春<sup>2</sup>, 赵永涛<sup>3</sup>, 张子民<sup>2</sup>, 王友年<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 物理学院, 大连 116024; 2. 中国科学院近代物理研究所 电子加速器研究中心, 兰州 730000; 3. 西安交通大学 理学院, 西安 710049)

**摘 要:** 在电子束激发的等离子体微观不稳定性中, 横向韦伯型成丝不稳定性和纵向双流不稳定性作为能量沉积、磁场放大和辐射产生的主要机制受到了广泛关注。在实际场景如天体物理、实验室激光-等离子体相互作用中, 这两种不稳定性同时存在, 称为耦合成丝/双流不稳定性, 又称斜双流不稳定性。为了在实验上观测到斜双流不稳定性, 我们在中国科学院近代物理研究所的高能电子成像平台末端安装了一个高压直流放电等离子体靶, 该靶的特点是放电产生反向对称的电流结构。首先, 我们采用一束能量为 50MeV 的低电荷量电子束来诊断等离子体靶的反向对称电流对束电子运输的影响。电子束进入等离子体靶首先在同向电流的作用下散焦, 随后在反向电流的作用下聚焦。由于磁场从中心轴线向管壁线性增加, 因此电子束受到的聚焦力大于散焦力, 反向对称的电流结构最终对电子束存在聚焦效果。实验观察到电子束的半径在此电流结构的作用下减小了 2.6 倍, 同时, 我们对电子束在等离子体中的运输过程进行模拟进而与实验对比。

**关键词:** 斜双流不稳定性; 电子束聚焦; 高压直流放电等离子体靶; 反向对称电流; 粒子模拟



HEDP 2023-087

## 超热电子在非均匀外加磁场中的传输

王志伟<sup>1</sup>、王伟民<sup>1</sup>

(1.中国人民大学物理学系, 北京, 100872)

**摘要:** 根据 Lawson 判据, 通过快点火方案实现激光聚变的点火温度至少需要 5 keV[1], 这就需要将大量超热电子注入 DT 燃料, 将超热电子的能量转化为聚变燃料的能量, 从而实现对聚变燃料的加热 [2]。这就对注入聚变燃料的超热电子提出了两点要求, 一是超热电子的能量应当处在能够实现高效能量沉积的能段; 二是超热电子必须有较好的方向性, 这样在输运过程中才不至于大角度发散, 从而沿中心区域大量进入 DT 等离子体, 将自身能量尽可能完全转化给聚变燃料。我们知道, 加入强磁场可有效限制超热电子的发散行为[3], 实验上已经演示了使用 ns 激光打电容线圈靶, 诱导超热电子运动, 在圆线圈中产生强电流进而形成强磁场的方案, 这样的磁场强度达到 kT 量级[4]。以往的研究工作通常是把线圈靶中产生的磁场设为空间均匀的[5], 继而分析超热电子的传输, 但是真实的磁场是有空间分布的, 所以我们从理论分析和数值模拟这两个方面系统研究了圆线圈产生的具有空间非均匀分布的磁场构型对超热电子传输的约束作用, 相应的结论也能回答什么样的磁场构型能更好的约束超热电子传输。我们的研究工作可以应用于磁场辅助的快点火方案中, 尤其是目前正在开展的双锥对撞点火(DCI)方案[6]。

**关键词:** 快点火、超热电子、输运过程、非均匀磁场

HEDP 2023-102

## 基于 X 射线荧光成像的充气管扰动演化实验研究

姚立<sup>1</sup>, 蒲昱东<sup>1</sup>, 晏骥<sup>1</sup>, 陈伯伦<sup>1</sup>, 杨正华<sup>1</sup>, 董云松<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>,  
杨冬<sup>1</sup>, 申锦<sup>2</sup>, 王秋平<sup>2</sup>, 李传莹<sup>3</sup>, 戴振生<sup>3</sup>, 王立峰<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026;  
3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 惯性约束聚变中充气管会诱发向内射流, 将烧蚀层材料混进中心热斑, 进而降低热斑温度和中子产额。美国国家点火装置实验经验表明, 对充气管扰动演化过程的物理解和充气管诱发混合程度的有效控制是实现聚变点火的关键因素之一。实验观测是研究充气管扰动演化过程的重要手段, 但小尺寸充气管扰动结构被大尺寸壳层结构包围, 需要具备局域示踪能力的诊断技术, 实验观测难度大。X 射线背光照相技术在充气管扰动演化诊断方面存在对比度不足问题, X 射线荧光成像技术具备元素特异性和低光学厚度下高对比度特性, 可满足局域示踪诊断能力需求。在神光 III 原型激光装置开展了 HDC 平面靶充气管扰动演化探索实验, 通过局域预置钛荧光元素并对钛原子 K 壳层荧光进行时空分辨准单能成像, 成功获得了多个时刻充气管扰动演化图像。实验观测到充气管结构诱发的 HDC 界面形貌特征和射流结构, 与二维流体模拟结果定性相符, 可为相关物理过程理解和实验设计优化提供数据支撑。

**关键词:** 充气管; 荧光成像; 局域示踪; HDC; 射流

HEDP 2023-103

## 等离子体中电子和离子能量非平衡弛豫速率的评估研究

高聪章\*, 蔡颖, 范征锋, 殷建伟, 王裴

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 当等离子体中的电子和离子被加热的速率不同时, 电子和离子的温度将发生脱离, 形成电子-离子双温非平衡等离子体, 等离子体能量非平衡弛豫过程主要由电子和离子碰撞主导。由于非平衡等离子体在激光烧蚀、冲击波和惯性约束聚变(ICF)等有广泛的应用, 因此获得电子-离子能量非平衡弛豫速率是非常重要的。当前基于分子动力学方法能够自洽地模拟弱耦合等离子体的电子和离子非平衡弛豫, 但是从分子动力学模拟温度中提取电子和离子能量非平衡弛豫速率的方法多种多样, 获得的结果也不尽相同。本研究评估了电子和离子能量非平衡弛豫速率提取方法, 首次给出了各种方法适用性的理论判据。通过建立不同方法之间的关系, 获得了能量弛豫速率的外推关系。

**关键词:** 能量弛豫速率; 弱耦合等离子体; 分子动力学模拟

HEDP 2023-106

## 电子脉冲展宽分幅相机时空特性研究

杜卓铭, 罗秋燕, 林楷宣, 邓莹, 刘俊凯, 杨恺知, 黄晓雅, 向利娟\*, 蔡厚智\*, 刘进元\*

(深圳大学 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:** X 射线分幅相机具有二维空间分辨率和优于 100 ps 的时间分辨能力, 常用于激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)实验对等离子体进行诊断。电子脉冲展宽分幅相机是一种新型的具有优于 10 ps 时间分辨率的分幅相机。为对电子束团展宽, 在光电阴极加载电脉冲, 使光电阴极与栅网之间的加速电场场强随时间变化, 电子从加速电场出射后进入 52 cm、受磁透镜作用的漂移管进行展宽。为了提高空间分辨率, 需利用磁透镜的磁场在漂移管内对电子进行聚焦成像。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)采用长磁透镜研制了单视线(single line-of-sight, SLOS)相机, 空间分辨率为 25 lp/mm; 深圳大学采用四个短磁透镜获得相机静态空间分辨率优于 15 lp/mm, 并提出基于短磁与长磁透镜的混合式透镜系统, 其理论静态空间分辨率优于 50 lp/mm。由于单脉冲在光电阴极上传播, 光电阴极上受电脉冲作用的空间点与相邻点电势不同, 故各点出射的电子经过加速后漂移速度也不同, 相邻空间同一时间出射的电子不能同时到达时间分辨取样探测器, 系统成像画幅尺寸受限, 且光电阴极电势的空间不均匀性还会导致时间分辨率与空间分辨率也不均匀。针对单脉冲的均匀性问题, 引入对撞脉冲技术, 从光电阴极两端分别输入电脉冲, 解决光电阴极的电势空间分布不均匀问题, 提高画幅尺寸、时间和空间分辨率均匀性; 且等效阴极脉冲斜率增大一倍, 提高了相机时间分辨率。

**关键词:** 惯性约束聚变; 超快诊断; 分幅相机; 时间展宽; 时间分辨率; 空间分辨率

HEDP 2023-108

## 相对论激光强度下的电磁诱导透明

张铁怀<sup>1,4</sup>, 王伟民<sup>2,3,4</sup>, 李玉同<sup>1,3,4</sup>, 张杰<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 2. 中国人民大学物理学系, 北京 100872; 3. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240; 4. 双锥 (DCI) 联合研究团队)

**摘要:** 激光在远高于临界密度等离子体中的稳定传输对于快点火聚光聚变、相对论电子产生以及强电磁辐射源等研究方向具有重要的意义, 但实现起来非常困难。早在 1996 年, S. E. Harris 把电磁诱导透明 (EIT) 从原子物理学中的概念引入到等离子体物理中<sup>[1]</sup>, 即在一束高频泵浦激光的加持下, 原本无法传输的低频光可以透过高密度等离子体。然而后续的研究认为, EIT 无法在有边界的真实等离子体中发生。本工作通过 PIC 模拟展示了 EIT 过程可以在强相对论激光条件下发生, 使得低频光可以稳定在有界过密等离子体中稳定传输。我们发展了一个相对论领域的三波耦合模型, 并给出了 EIT 发生的判据和频率通带 (passband) 范围。在强相对论情况下, 该通带足够宽, 使得 EIT 机制可以持续工作; 相对的, 在弱相对论范围内, 该通带缩小到近似一个点的范围, 这一变化解释了在以往研究中未曾观测到 EIT 效应的原因<sup>[2]</sup>。

**关键词:** 激光-等离子体相互作用; 电磁诱导透明; 快点火聚光聚变; 双锥对撞点火激光聚变;

HEDP 2023-111

## 应用于激光聚变的 X 射线分幅成像技术研究进展

蔡厚智; 向利娟; 罗秋燕; 邓萱; 杜卓铭; 刘进元\*

(深圳大学物理与光电工程学院, 广东深圳 518060)

**摘要:** 在激光惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 及 Z-pinch 等实验研究中, 需要对持续时间为 ns 及亚 ns 量级的超快物理过程及物理参数进行研究, 微通道板 (microchannel plate, MCP) 选通 X 射线分幅相机是重要的诊断工具之一, 它具有二维的空间分辨能力和 60~100 ps 的时间分辨率。随着 ICF 研究的深入, 要求分幅相机时间分辨率优于 30 ps。为了提高时间分辨率, 引入电子束脉冲展宽技术, 结合原有 MCP 行波选通分幅技术, 研制新型的脉冲展宽型分幅相机。利用电子束脉冲展宽系统对电子束的时间宽度进行展宽, 实现电子束的时间放大, 然后使用 MCP 选通分幅相机对展宽后的电子束进行测量, 从而提高时间分辨率。电子束时间展宽技术将系统的时间分辨率由 71 ps 提高至 4 ps。对相机时间分辨率均匀性、快门传输效应及成像质量等进行了研究。此外, 电子束脉冲展宽技术也可应用于 CMOS 和 XRD。

**关键词:** 惯性约束聚变; Z-pinch; 超快诊断; 分幅相机; 电子束脉冲展宽

HEDP 2023-115

## 激光等离子体不稳定性的 k 空间理论和应用

肖成卓<sup>1,2</sup>, 姚伟波<sup>1</sup>, 王清<sup>2</sup>, J. F. Myatt<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 物理与微电子科学学院, 长沙 410082; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100871;  
3. University of Alberta, Edmonton, Canada T6G 1H9)

**摘要:** 非均匀等离子体中的激光等离子体不稳定性 (LPI) 是惯性约束聚变的重要过程。我们提出了一种通过傅里叶变换从 k 空间求解 LPI 的方法。该方法适用与受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS)、双等离子体衰变 (TPD) 等不稳定性, 能给出任意散射位形、任意密度分布下不稳定性的增长规律。应用该方法我们研究了近期比较受到关注的侧向散射, 给出侧向散射在线性阶段的较为完整的演化规律、阈值、增益等参数。我们也比较了不同的散射位形在不同的密度剖面下的发生可能性, 着重探讨了背向散射和侧向散射之间的竞争。研究发现在惯性约束聚变的参数条件下侧向散射有着比背向散射更低的阈值, 在直接驱动位形和间接驱动位形中都是有存在的可行性, 需要实验上给予更多的关注。

**关键词:** 受激拉曼散射; 受激布里渊散射; 侧向散射; k 空间理论; 背向散射

HEDP 2023-121

## 磁扩散效应对 Z 箍缩磁—瑞利—泰勒不稳定性的影响研究

黄丽霞<sup>1</sup>, 肖德龙<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 磁—瑞利—泰勒 (MRT) 不稳定性是影响 Z 箍缩内爆品质进而决定点火成败的关键问题。本文研究了有限电阻率导致的磁扩散效应对 MRT 不稳定性的影响规律。采用解析理论方法, 基于三区平面模型对电阻磁流体方程组进行线性化, 并利用 Jukes 近似模型, 推导了四阶行列式形式的色散方程。通过数值计算, 获得了扰动增长率随外加磁场、电阻率、波数等的变化规律。研究表明, 轴向磁场对于 MRT 不稳定性存在制稳作用, 轴向磁场的扩散效应则会减弱这一制稳作用。在有限磁扩散条件下, 不稳定性增长率随电阻率的增加而增加, 特别是对于长波长扰动, 磁扩散效应对 MRT 不稳定性的解稳作用更加显著。

**关键词:** 磁—瑞利—泰勒不稳定性; 磁扩散效应

HEDP 2023-123

## 动理学区域受激拉曼产生超热电子的 粒子模拟研究

王清<sup>1</sup>, 肖成卓<sup>2</sup>, 刘占军<sup>1</sup>, 蔡洪波<sup>1</sup>, 陈京<sup>1</sup>, 曹莉华<sup>1</sup>, 郑春阳<sup>1</sup>, C. S. Liu<sup>3</sup>, W. Rozmus<sup>4</sup>, J. F. Myatt<sup>4</sup>, and 贺贤土<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Applied Physics and Computational mathematics, Beijing, 100094, China <sup>2</sup>Hunan University, Changsha, 410082, China <sup>3</sup>University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA <sup>4</sup>University of Alberta, Alberta, T6G 1H9, Canada)

**摘要:** 近来实验揭示受激拉曼散射是直接驱动和间接驱动中超热电子的产生机制[1]。在多光束和大尺度等离子体条件下, 阈值较低的侧散成为了受激拉曼散射的一种主要形式[2]。我们采用粒子模拟的方法研究动理学区域受激拉曼侧散(SRSS)产生电子等离子体波(EPW)的边带不稳定性(sideband instability), 发现边带不稳定性对超热电子的能谱和份额有较强的关联。模拟发现边带不稳定性发生之前, 电子捕获导致SRSS的动理学暴涨。动理学暴涨可能是实验中观察到SRSS主要发生在对流区域而不是绝对不稳定性区域原因之一。边带不稳定性在暴涨SRSS起饱和作用。边带不稳定性的波数谱特征与超热电子的能谱有较强的关联, 提供了一种估算SRSS超热电子份额的途径, 为此我们建立了相应估算超热电子份额的理论模型。

**关键词:** 受激拉曼散射, 超热电子, 粒子模拟

HEDP 2023-131

## 激光装置单能成像技术研究

陈伯伦, 杨正华, 杨品, 李晋, 张兴, 王峰

(中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心)

**摘要:** 利用高功率激光装置, 能够在实验室条件下创造高温、高压、高密度的高能量密度物理状态。等离子体的密度分布是描述极端物质状态的基本参数之一, 对于理解物质压缩状态, 获得质量烧蚀压等关键参数, 评估界面混合程度等具有重要意义。背光吸收成像是国内外激光装置上通常使用的密度测量方法, 背光强度分布、宽能谱响应及空间分辨和噪声是影响密度测量精度的关键因素。在神光系列装置上, 发展了基于球面弯晶的高分辨单能背光成像技术。球面弯晶单能背光成像技术基于Bragg衍射原理, 实现准单能X射线的衍射, 利用球面镜成像原理实现高分辨成像, 通过类点投影成像排布设计, 实现背光自匀滑。在此基础上, 通过成像参数设计优化和系统工程结构优化, 实现兼顾高分辨的二位背光成像、自发光成像的柔性结构设计, 并进一步探索基于弯晶的单能吸收成像和折射增强成像关联的同视轴成像方法。该成像技术已应用于神光系列装置, 获得高信噪比的内爆烧蚀压缩过程流行图像, 并进一步应用于辐射冲击波、高压状态方程等实验研究中。

**关键词:** 烧蚀密度, 单能成像, 球面弯晶

HEDP 2023-134

## Langdon 效应对 SRS 非线性演化的影响

邱捷<sup>1</sup>, 郝亮<sup>1</sup>, 曹莉华<sup>1</sup>, 邹士阳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京应用物理与计算数学研究所 二室, 北京 100094)

**摘要:** 激光照射等离子体中, Langdon 加热效应会导致电子能量分布函数 (EEDF) 偏离 Maxwellian 分布变成超高斯分布, 这会大大增强 SRS 的对流增益, 使其更易进入绝对不稳定增长区, 大为增加 SRS 水平, 研究 SRS 绝对增长阈值以及其非线性饱和水平在超高斯分布等离子体中的变化规律, 对于 ICF 中选择策略规避 SRS 风险意义很大。我们通过自行编制的 Vlasov-Maxwell 方程模拟程序 (VlaMaxw1d1v) 支撑, 采用宽参数扫描模拟, 多种手段 (与简单三波、修正三波模型的对比、时空谱分析认证不稳定机制等等) 分析对比模拟结果, 我们发现超高斯分布会与暴涨 (源于电子束缚效应) 联合作用大为拓宽 SRS 绝对增长参数域, 并给出了不同参数下, SRS 主导非线性饱和机制 (可能机制包含束声速模衰变、向低  $k_{\perp}$  的 Langmuir 波模衰变、束缚粒子不稳定性、单级及多级 Langmuir 衰变不稳定性、重散) 以及非线性饱和水平随超高斯指数的变化规律。

**关键词:** Langdon 效应, 激光-等离子体相互作用

HEDP 2023-135

## 宽带激光驱动下受激拉曼散射的非线性爆发

刘庆康<sup>1,2</sup>, 蔡洪波<sup>1\*</sup>, 王清<sup>1</sup>, 姚沛霖<sup>3</sup>, 张文帅<sup>1</sup>, 高妍琦<sup>4</sup>, 朱少平<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京, 100094  
3. 清华大学工程物理系, 北京, 100084; 4. 上海激光等离子体研究所, 上海, 201899)

**摘要:** 激光等离子体不稳定性 (LPI) 是困扰 ICF 点火的主要难题之一。宽带激光技术作为抑制 LPI 的有力工具, 近年来引起人们的广泛关注。然而, 宽带激光 LPI 在非线性的复杂行为尚未被阐明。我们使用 PIC 模拟研究了宽带激光驱动下动理学区域受激拉曼散射 (SRS) 的长时间演化过程。模拟表明, 在非线性的阶段, 宽带激光的非均匀光场通过协同作用驱动 SRS 剧烈爆发, 其背反光份额高于线性理论预测。频谱分析发现, 宽带激光中的高强度脉冲扮演了动理学效应放大器的角色。脉冲能量通过 SRS 爆发转移给电子等离子体波 (EPW) 簇, 造成其强度增加, 并显著改变电子分布函数, 继而引发边带增长/展宽和涡旋合并。由于边带展宽的不对称性, 电子捕获的中心速度上移并产生大量热电子。单个高强度脉冲引起的爆发事件就能使热电子份额从 6.76% 增加到 14.78%。上述结果揭示了动理学效应在宽带激光 LPI 中的重要性, 并为理解宽带激光的模拟和实验结果提供了参考。

**关键词:** 惯性约束聚变; 宽带激光; 激光等离子体相互作用; 受激拉曼散射

HEDP 2023-138

## 针对微尺寸 X 射线源的非相干全息层析成像

陈纪辉<sup>1,2</sup> 王峰<sup>1†</sup> 理玉龙<sup>1</sup> 张兴<sup>1</sup> 姚科<sup>2‡</sup> 关赞洋<sup>1</sup> 刘祥明<sup>1</sup>

(1 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;  
2. 复旦大学 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433)

**摘要**：在惯性约束聚变实验中,无论是对黑腔等离子体或是内爆靶丸区域的单次成像诊断都无法分辨深度方向上的辐射强度信息,即探测器获取的图像均是沿探测方向上的强度积分。本文介绍了一种利用非相干全息技术对微尺寸 X 射线源进行层析成像的方式。所述的非相干全息成像技术具有将光源的三维空间信息编码并压缩至二维全息图的成像机制,再结合基于压缩感知的全息图重建算法,能够从二维全息图中恢复出沿探测方向不同物距上光强的二维分布情况。为了验证该成像方案的可行性,本文模拟了轴向长度为 16mm 的光源的非相干全息成像过程,并利用各种算法重建模拟生成的非相干全息图,分别得到了间距为 4mm 的层析光强分布结果。通过对比不同算法的重建结果可以发现:压缩感知算法能够正确信号平面上重建出清晰的图像,并使其免受其他层面光强分布的干扰。

**关键词**：等离子体诊断, 非相干全息, 菲涅尔波带片, 压缩感知

HEDP 2023-142

## Alpha 粒子轰击下的非平衡 DT 聚变反应

杜报, 邹士阳, 康洞国, 刘畅, 蔡洪波, 朱少平

(北京应用物理与计算数学研究所)

**摘要**：惯性约束聚变 (ICF) 的核心目标是用有限的能量消耗实现足够高效的 DT 聚变反应放能。其中 DT 聚变反应速率是影响点火悬崖的关键因素之一。因为反应截面  $\sigma_{DT}$  敏感地受到 DT 离子质心动能影响, 导致真正贡献给核反应的粒子速率集中在 Gamow 峰附近。Gamow 峰远高于热速度, 其粒子数目也远小于处于热速度的粒子。如果存在动理学效应 (例如本报告中所述的 alpha 粒子轰击作用), 改变这部分粒子数目, 将容易给核反应速率造成显著影响。此外, 传统 alpha 粒子输运计算只关注入射带电粒子在 DT 等离子体中的能量损失速率, 但不能描述背景 DT 离子以及电子粒子将如何获得这份沉积能。为此, 我们放弃了传统带电粒子输运中采用的阻止本领, 通过对单次散射行为进行严格的蒙卡建模, 可同时实现 alpha 粒子能量沉积以及背景粒子 DT 粒子能量吸收的计算。研究发现, 3.5MeV 的 alpha 粒子在与 DT 粒子碰撞进行能量沉积时可导致受碰的背景 DT 粒子获得可观的能量, 导致出现非平衡速度分布, 显著增加位于 Gamow 峰附近的粒子数目以及核反应速率。另外, 新的带电粒子输运方法表明, alpha 粒子射程具有较大的空间展宽, 显著区别于阻止本领方法得到的固定射程。因为避免了 Bragg 峰附近不合理的平均库伦对数近似, 新模型得到的平均射程会小于阻止本领预测的结果。

**关键词**：惯性约束聚变;  $\alpha$  粒子输运; 聚变反应速率

HEDP 2023-146

## Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 泡沫壁小孔点火六通腔设计与实验验证

李欣, 康洞国, 申昊, 郝亮, 王强, 邱捷, 古培俊, 郑无敌,

张桦森, 邹士阳, 丁永坤, 朱少平

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

董云松, 蒋炜, 赵航, 况龙钰, 李志超, 尹传盛, 李三伟, 黄天暄, 陈忠靖, 唐琦, 彭晓世, 宋仔峰, 张兴, 董建军, 邓博, 邓克立, 王强强, 杨轶蒙, 刘祥明, 景龙飞, 黎航, 刘中杰, 余波, 晏冀, 蒲昱东, 涂少勇, 袁永腾, 杨冬, 王峰, 周维, 黄小霞, 何智兵, 刘海军, 刘一杨, 杨家敏, 张保汉, 张维岩

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 美国国家点火装置 (NIF) 通过交叉束能量转移技术 (CBET) 解决了两端激光注入直柱黑腔构型长期存在的  $P_2$  驱动不对称性问题, 结合流体不稳定性控制, 实现了间接驱动惯性约束聚变点火燃烧。其中, NIF 210808 采用直柱黑腔驱动高密度碳靶丸 (HDC), 在 1.9MJ 激光能量条件下, 产生~1.37MJ 中子放能, 首次实现了物理意义点火。六通构型黑腔 (SCP) 具有正八面体旋转对称性, 二阶驱动不对称性天然为零 ( $Y_2=0$ ), 自然解决直柱黑腔  $P_2$  不对称性问题, 具有潜在的应用价值。针对 NIF 210808 点火靶丸, 本文给出一个点火六通腔理论设计方案。采用 1.6MJ 激光能量驱动, 理论上实现了~3.5MJ 点火放能(点火增益  $G\sim 2.2$ ), 相对于 NIF210808 提高~2.6 倍。黑腔腔壁采用极低密度 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 泡沫 (~30mg/cc) 材料优化残余  $Y_4$  驱动不对称性是性能提升的主要原因。设计方案采用直径 2400 $\mu$ m 小激光注入孔, 进一步将激光-靶丸能量耦合效率提高了~19%。针对该点火六通腔设计方案, 在 100kJ 激光装置上开展了相关物理实验验证。首先, 基于理想两端注入光路排布初始条件, 采用“移束”方式提出了六端激光注入光路排布方案。首次全束组实验即实现了辐射驱动温度  $Tr\sim 220$ eV、DD 中子产额  $> 1E9$  的内爆性能。其次, 优化设计思路, 实现了六通腔直径 1000 $\mu$ m 小孔 (全装置最小尺寸) 激光注入。辐射驱动能流提高~1.4 倍, 内爆产额提高~6 倍。演示了六通腔小孔激光注入的可行性与模拟置信度。然后, 开展了极低密度 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 泡沫壁光斑运动诊断实验。演示了点火长预脉冲驱动条件下 ( $Tr\sim 130$ eV,  $\tau\sim 4$ ns) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 泡沫壁抑制光斑运动的显著效果。最后, 在保持对称驱动条件下, 通过放大靶丸、增加燃料等方式显著提高了内爆中子产额~20 倍。N153 获得了六通腔最高 DD 中子产额 ( $5.6E10$ ), 激光-靶丸能量耦合效率~10%。考虑到 100kJ 装置非理想六端光路排布与点火方案要求的理想光路排布之间的差异, 实验数据支持点火方案激光-靶丸能量耦合效率设计值 (~15%)。

**关键词:** 点火六通腔; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 泡沫; 小激光注入孔; 美国 NIF 装置; 100kJ 激光装置; N210808



HEDP 2023-152

## 利用光学阴影、干涉成像对等离子体喷流的研究

邱志杰

(中国科学院物理研究所)

**摘要:** 低密度等离子体的研究是惯性约束聚变(ICF)的重要组成成分。我们设计了一套冕区等离子体形貌发展观测和电子密度测量的实验装置,依托上海光机所 SGII 装置利用阴影成像法和干涉法测量了不同靶形状条件下等离子体密度和低密度等离子体喷流的速度。实验发现,相同激光驱动条件下,靶前 Cu 的低密度等离子体喷流速度高于靶后 Al 低密度等离子体喷流,同时 K 型靶相比平面靶高密度等离子体喷流的速度更高。这为无碰撞冲击波、实验室天体物理和惯性约束聚变的研究提供了重要的参考。

**关键词:** 阴影法; 光学干涉法; 等离子体喷流

HEDP 2023-154

## 不稳定性演化与界面混合中的动理学效应

陈铭君<sup>1</sup>, 蔡洪波<sup>1,2</sup>, 朱少平<sup>2</sup>, 张维岩<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘要:** 激光约束聚变(ICF)领域,物质界面处 RM 不稳定性发展伴随着非燃料物质与燃料物质扩散混合,影响聚变点火的裕量和深度。研究表明,实验中观察到的扩散混合过程中存着显著的动理学效应。为此,我们将流体模拟与 PIC 模拟相结合,开发了混合流体-PIC 程序,从动理学角度研究了 RM 不稳定性的扩散混合过程。模拟结果表明,由于动理学效应的影响,扩散混合层宽度、面积与混合质量都随时间呈一次方关系,且扩散宽度可达初始扰动振幅三倍以上,这些扩散行为抑制了 RM 不稳定性非线性结构的产生。此外,在 RM 不稳定性演化过程中,动力学模拟自洽地揭示了伴随的自生电磁场,主要分布在激波前沿和混合界面内。由于场能量密度的存在,后期这些区域的电子和离子温度相较于没有自生电磁场的情况下降低了 10% 以上。同时自生电磁场拉动 RM 不稳定性持续增长,对后期演化行为也有不可忽视的影响。

**关键词:** 动理学效应; RM 不稳定; 自生电磁场; 离子混合

HEDP 2023-159

## 磁场对烧蚀瑞利-泰勒不稳定性增长影响研究

谷昊琛<sup>1,2</sup>, 戴羽<sup>1,2</sup>, 董玉峰<sup>1,2</sup>, 周鹏<sup>3,5</sup>, 袁大伟<sup>4,5</sup>, 张喆<sup>1,5,6</sup>, 远晓辉<sup>3,5</sup>, 李玉同<sup>1,5,6</sup>, 张杰<sup>1,3,5</sup>

(1. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 物理学院, 北京 100049; 3. 上海交通大学, 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240; 4. 国家天文台, 中国科学院光学天文重点实验室, 北京 100101; 5. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 6. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 激光烧蚀导致的瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 是影响激光聚变靶丸内爆性能的关键因素。在双锥对撞点火 (DCI) 方案的第四个物理过程-快电子加热阶段, 需要额外引入外加脉冲强磁场来引导快电子。外加磁场除了有利于约束快电子、提高热斑中  $\alpha$  粒子在磁化靶丸中的能量沉积效率, 其对 RTI 发展的可能影响也需要深入研究。在神光 II 激光装置上, 我们利用 x 光背光成像和时间分辨针孔相机测量了不同振幅预调制平面靶中的 RTI 增长。在实验中, 通过电容线圈靶引入与平面靶面平行的外加磁场, 研究了其对 RTI 增长速度的影响。初步结果表明, 与靶面平行的磁场将延缓了 RTI 的增长的速度, 并排除了电容线圈靶产生的 x 射线对预调制靶产生的影响。

**关键词:** 脉冲强磁场; 瑞利-泰勒不稳定性; 双锥对撞点火方案; 背光成像

HEDP 2023-164

## 黑腔 Au 等离子体团碰撞动力学 (Kinetic) 效应及射流演化实验研究

张玉雪<sup>1</sup>, 袁文强<sup>2</sup>, 雷柱<sup>3</sup>, 宋天明<sup>1</sup>, 张继彦<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 黄成武<sup>1</sup>, 朱托<sup>1</sup>, 张志宇<sup>1</sup>, 杨国洪<sup>1</sup>, 黎宇坤<sup>1</sup>, 车兴森<sup>1</sup>, 任宽<sup>1</sup>, 乔宾<sup>2</sup>, 杨家敏<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 2. 北京大学物理学院, 北京海淀 100081; 3. 中国工程物理研究院北京应用数学与物理研究院, 北京海淀, 100094)

**摘要:** 为解决惯性约束聚变研究对碰撞过程相关的动力学效应难以准确描述的问题, 我们有针对性地设置了系列半黑腔分解实验研究。实验采用 1ns 的双束激光作用于半黑腔内, 通过感测等离子体加热发光、辐射流演化、Au 等离子体时空分辨温度演化, 以及等离子体团间相互碰撞的射流形成及演化等过程, 发现 Au 等离子体团的碰撞动力学效应将产生相当于单束激光焦斑处产生的 M 份额的 30% 增量, 且离子温度远高于电子温度, 达到其约 7-8 倍。同时, 二维模拟研究发现, 单流体模型下的碰撞模型, “激波将能量主要转移给离子”, 无法准确描述此过程, 需进一步基于新粘性因子修正碰撞过程中产生的激波、电子和离子的再分配描述。此外, 通过对两束不同激光能量下等离子体团碰撞产生的射流演化过程研究发现, 当束间激光能量不平衡时, 产生的射流以及射流头部激波等结构, 通过偏折运动, 有直接砸向靶丸烧蚀区, 引入靶丸预热和内爆压缩非对称等问题。本研究的结果与结论对进一步细化管理高能密度物理和 ICF 研究中的基础物理问题有重要意义, 需引起同行关注。

**关键词:** 惯性约束聚变; 动力学效应; 碰撞效应; 射流; 靶丸预热; 内爆对称性

HEDP 2023-166

## 等容点火模型的热斑边界和聚变燃烧研究

王美乔<sup>1</sup>, 徐泽鲲<sup>1,2</sup>, 吴福源<sup>3,4</sup>, 张杰<sup>2,3,4</sup>

(1. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049; 2. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190; 3. 上海交通大学物理与天文学院, 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 热斑点火是实现激光聚变点火和高增益的必要方式<sup>[1]</sup>。中心热斑等容靶丸在点火初期可以分为中心燃烧区域、激波区域和冷燃料区域。利用强激波近似和波后缓变近似建立的描述激波区域的半解析模型, 表明可以将激波波峰位置定义为等容模型热斑边界, 且等容热斑也存在“燃烧自调节过程”。通过分析 $\alpha$ 粒子在高密度等容热斑中的不均匀沉积行为建立的描述中心燃烧区域的半解析模型, 描述了等容热斑内部的温度和密度演化。利用半解析模型分析双锥对撞点火过程<sup>[2]</sup>发现, 更软的快电子束更有利于实现点火。对于 $\rho R = 1.05 \text{ g/cc}$ 的等容靶丸, 2 kJ点火能量的点火快电子阈值能量为0.82 MeV, 3 kJ时为0.90 MeV。利用半解析模型还可以估计等容热斑在点火初期和全过程的聚变产能。利用三维辐射流体程序 O-SUKI-N<sup>[3]</sup>和一维辐射磁流体程序 MULTI-IFE<sup>[4]</sup>对半解析模型进行了验证, 发现半解析模型与数值模拟的吻合很好。

**关键词:** 激光聚变; 双锥对撞点火; 热斑边界;  $\alpha$ 粒子不均匀沉积; 半解析模型

HEDP 2023-167

## 双锥对撞点火方案中的转滞态动力学过程

方可<sup>1</sup>, 张翌航<sup>1</sup>, 董玉峰<sup>1,2</sup>, 张铁怀<sup>1,2</sup>, 张喆<sup>1,3,5</sup>,  
远晓辉<sup>3,4</sup>, 李玉同<sup>1,2,3,5</sup>, 张杰<sup>1,3,4</sup>

(1. 北京凝聚态物理国家研究中心 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 物理科学学院, 北京 100049; 3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 4. 上海交通大学 物理与天文学院, 上海 200240; 5. 松山湖材料实验室, 广东东莞 523808)

**摘要:** 双锥点火方案中, 对顶放置的一对金锥中的氘-氚壳层被球形压缩和加速。从锥口喷出的高速等离子体喷流在转滞阶段相互碰撞并产生更高密度和温度的转滞态等离子体。10 ps强激光产生的快电子束随后将对撞等离子体快速加热到点火温度。转滞态等离子体的状态对加热效率和点火过程影响巨大。为了解转滞阶段的动力学过程, 我们在实验中对转滞态等离子体自发光信号的时间演化行为进行了诊断。通过阿贝反演算法和勒让德模式分解分析了对撞区域等离子体的温度和密度的时空分布。转滞过程持续时间约300 ps, 转滞中心区域温度介于340 ~ 390 eV之间, 对撞等离子体的纵横比约为0.78。

**关键词:** 快点火; 转滞态等离子体; X-射线自发光诊断; 阿贝反演算法; 快电子能量沉积

HEDP 2023-172

## 多组分流动中速度温度非平衡 流体动力学模拟

张超

(北京应用物理与计算数学研究所)

**摘要:** 在惯性约束聚变 (ICF) 内爆中, 烧蚀体混合到燃料和热斑中是导致点火性能下降的最不利因素之一。最近美国在 OMEGA 激光设施和国家点火设施 (NIF) 上进行的实验证明了非均匀混合中温度分离效应的重要性[1]。在本工作中, 我们提出了一种处理温度不平衡多组分流的方法, 最终目的是研究温度分离对混合和聚变燃烧的影响。目前的工作包括两个方面: (a) 推导了一个温度不平衡多组分流与扩散的物理模型, (b) 使用所推导模型研究了温度弛豫多组分流中的瑞利-泰勒 (RT) 不稳定性现象。所提出的模型是在小努森数 ( $Kn \ll 1$ ) 的极限下由完全不平衡多相 Baer-Nunziato 模型简化而来。速度不平衡由扩散定律封闭, 形式上仅保留一个质量加权速度。因此, 原始 Baer-Nunziato 模型的复杂特征结构在很大程度上被简化, 在保留其模拟有限温度弛豫的能力的基础上使其计算效率更高。我们还提出了求解所提出模型的高效数值求解方法。基于所提出的模型和数值方法, 我们进一步研究了温度弛豫对惯性约束聚变 (ICF) 减速阶段 RT 不稳定性发展的影响。数值模拟结果表明, 对于高密度低温组分和低密度高温组分之间界面处的 RT 不稳定性, 温度弛豫具有显著抑制作用。

**关键词:** 多组分流动, 温度弛豫, 物质扩散, 流体不稳定性

HEDP 2023-176

## 非均匀等离子体中的受激拉曼侧向重散射

谭尚<sup>1</sup>、王清<sup>2</sup>、陈勇<sup>3</sup>、姚伟波<sup>1</sup>、肖成卓<sup>1</sup>

(1 湖南大学, 长沙 410000; 2 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 3 安徽理工大学, 淮南 232001)

**摘要:** 激光等离子体不稳定性(LPI)是惯性约束聚变(ICF)中尚未解决的重要问题, 包括受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、双等离子体衰变(TPD)等<sup>[1-3]</sup>。由于激光能量的损失和产生热电子对燃料进行预热, SRS 引起了广泛的关注<sup>[4-6]</sup>。在进入非均匀等离子体后, 入射激光在一定角度上进行散射, 在早期实验中观察到许多大角度散射现象<sup>[7,8]</sup>。由于散射光的方向不同, 等离子体中的 SRS 主要有两种散射形式: 如果散射光矢量与入射光矢量相反, 则为受激拉曼后向散射(SRBS)<sup>[9]</sup>, 如果散射光矢量与入射光矢量不共线, 则为受激拉曼侧向散射(SRSS)<sup>[7,10,11]</sup>。理论上, 受激拉曼侧散射(SRSS)可能有一个特殊的模式, 即散射后的光会再次散射, 称为受激拉曼侧散射的重散射, 但是在此前从未被报道过。所以, 我们在本文中建立了 SRSS 重散射的理论模型, 并从理论上给出了其发生的位置, 然后在二维 PIC 模拟中发现了这种二阶重散射的侧散射, 其结果与理论模型以及对于发生区间的预测吻合较好。此外, 在模拟中发现, 重散射与侧向散射的演化过程是不同的, 且对超热电子有不同的影响, 重散射在其他方向上会产生超热电子, 这可能会影响 LPI 中的其他效应。在不同的泵浦强度、密度梯度和温度等情况下, 重散射会有不同的表现形式, 在一定的参数范围内, 重散射是强度很高不容忽略的。

**关键词:** 惯性约束聚变; 激光等离子体不稳定性; 受激拉曼散射; 高阶侧向散射; 超热电子

HEDP 2023-178

## 神光装置爆推靶实验内爆性能退化 原因分析及启示

李志远<sup>1</sup>, 余波<sup>2</sup>, 申昊<sup>1</sup>, 李纪伟<sup>1</sup>, 王立锋<sup>1</sup>

(1、北京应用物理与计算数学研究所,北京, 100094; 2、中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 近期, 神光装置极向直接驱动爆推靶实验最高取得  $3.5 \times 10^{13}$  中子产额。该中子产额只有一维设计的 10% (YOC~10%)。针对该轮实验内爆性能退化机制, 我们采用集成球坐标三维光路追踪的 LARED-S 程序开展数值模拟分析。分析表明, 限制壳层压缩, 不考虑惯性压缩出中子, 可同时比对上实验的中子成像、中子产额、NTOF 离子温度、中子 Bangtime。我们推断该轮实验内爆性能退化主要原因是聚心反射冲击波到壳时壳层混合严重, 导致壳层失去约束能力。该研究表明, 我们在后续理论设计中可着重采用一维设计, 并将反射冲击波到壳时的中子产额作为优化目标, 以冲击更高中子产额。

**关键词:** 爆推靶; 极向直接驱动; 内爆; 激光聚变

HEDP 2023-180

## 双锥对撞方案中高密度等离子体的快速加热

戴羽

(中国科学院物理研究所)

**摘要:** 介绍了双锥对撞点火 (DCI) 这种新型惯性约束聚变方案的最新实验进展。通过 DCI 过程的压缩, 加速, 对撞过程我们产生了高密度等离子体。在对撞时刻利用皮秒拍瓦激光与金平面相互作用产生的超热电子对高密度等离子体实现了快速加热。实验发现对撞等离子体在加热后自发光明显增强, 同时示踪元素的光谱有明显变化。从加热后光谱的峰值强度比出发认为等离子体温度升高到 600eV。

**关键词:** 快速加热; 激光等离子体; 惯性约束聚变; 超热电子

HEDP 2023-184

## HDC 靶常温整形内爆实验理论设计与分析

李传莹

(北京应用物理与计算数学研究所)

**摘要:** 在间接驱动惯性约束聚变中, CH 材料和 HDC 材料都是常见的烧蚀材料。与 CH 相比, HDC 材料密度高(壳层薄), 拥有驱动脉冲短的优势, 可以采用较低的黑腔充气密度, 对黑腔驱动不对称性调控更有利; 另外在相同黑腔条件下可以采用更大尺寸的靶丸, 腔靶耦合效率更高。但是 HDC 材料的流体力学不稳定性更为严重, 在工程因素方面, 充气管对 HDC 靶丸内爆有显著影响, 因为充气管会引起内爆过程中烧蚀材料和燃料的混合, 增强辐射漏失, 降低热斑温度和产额。在美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 高熵内爆实验中 CH 靶丸黑腔调控出现困难后, Livermore 实验室的研究人员采用 HDC 靶丸获得内爆性能进一步提升, 自 2021 年 8 月 8 日后已先后实现四发次兆焦耳放能, 并于 2022 年 12 月 5 日在 NIF 上利用 2.05MJ 激光能量产生了 3.15MJ 的聚变放能, 历史上首次实现了净能量增益。国内在 100kJ 激光装置已开展了三轮 HDC 靶常温内爆实验。2020 年开展了方波驱动直柱腔 HDC 靶常温内爆实验, 实验中 HDC 壳层采用了打孔充气后封胶的工艺, 最高中子产额达到了 1010 量级。但是在冷冻靶内爆中, 必须采用充气管方式将燃料注入靶丸芯部, 同时进行冷冻, 在壳层内壁形成均匀的燃料冰层。2021 年对靶丸制靶工艺进行了改进, 使用带充气管的 HDC 靶丸开展了方波/两台阶整形脉冲驱动的六通柱腔内爆实验, 但中子产额均未达到 1010, 其中整形脉冲内爆最高中子产额  $2.2 \times 10^9$ 。基于前两轮 HDC 内爆实验, 我们在理论设计中进行了两点改进: 一是增大 HDC 靶丸的尺寸, 提高腔靶耦合效率, 二是降低黑腔充气密度以减弱激光等离子体相互作用。另外通过数值模拟发现 HDC 内爆对壳层上的锥孔角度  $\theta$  十分敏感,  $\theta$  大的靶初始激光穿孔区与其它区域密度差更大, 产额更低。因此我们提出改进充气管工艺不仅要减小充气管外径, 同时要减小锥孔角度。制靶水平改进后近期开展了本轮实验。基于该理论设计结合改进后的充气管工艺, 整形脉冲内爆性能显著提升, 相对上一轮整形脉冲发次中子产额提升 1 个量级。我们在报告中给出了实验后黑腔模拟的辐射温度及内爆 1D 模拟的结果。

**关键词:** 惯性约束聚变; HDC 靶; 内爆

HEDP 2023-185

## 单色弯晶背光成像在双锥点火方案中的建设和应用

张成龙<sup>1,2</sup>, 张喆<sup>2</sup>, 远晓辉<sup>3</sup>, 徐妙华<sup>4</sup>, 李英骏<sup>1</sup>

(1 中国矿业大学地质力学与深层地下工程国家重点实验室(北京)中国, 北京 1000832 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家研究中心北京 1001903 上海交通大学 IFSA 协同创新中心上海 2002404 中国矿业大学理学院(北京)北京 100089)

**摘要:** 本文针对双锥对撞点火方案, 研制了一套基于石英球面弯晶的单色晶体背光成像系统。该成像系统主要用于研究双锥对撞等离子体的空间分布和时间演化。我们研究了激光参数对成像系统的 X 射线背光强度和空间分辨率的影响。当使用 CCD 探测器时, 成像系统的空间分辨率可以达到 10 $\mu$ m。进行了集成性双锥背光成像实验, 并证明该系统能够获得高质量的时间分辨背光照相图像, 这使得能够研究双锥对撞等离子体的形状、大小、均匀性和密度分布。

**关键词:** 背光成像; 空间分辨; 面密度

HEDP 2023-187

## 一个新的考虑靶筒并效应的氢硼束靶聚变方案

刘述军; 吴栋; 胡天行; 梁天奕; 宁小川; 梁迥航; 刘阳春; 刘鹏; 刘旭; 盛正卯; 赵永涛; D. H. H. Hoffmann; 贺贤土; 张杰;

(浙江大学)

**摘要:** 质子-硼 ( $p-11B$ ) 反应被认为是先进聚变燃料的圣杯, 因为主要反应产生 3 个  $\alpha$  粒子, 并只从二阶反应中产生极少量的中子。与氘-氚反应相比, 氢硼反应需要更高的反应温度。此外, 硼的高核电荷导致氢硼等离子体造成的韧致辐射能量损失比同等情况下氘-氚等离子体的高得多。近年来, 由于激光技术的进步, 强激光束或激光加速质子束与硼靶碰撞产生  $p-11B$  反应变得越来越有吸引力。 $p-11B$  反应的聚变产率与质子束参数和硼靶的密度、温度和成分等条件密切相关。我们发现, 筒并参数通过降低入射质子的阻止能力来提高聚变反应的产额。在这项工作中, 我们提出了一种新的束靶  $p-11B$  融合方案, 通过将能量为一个 MeV 的质子束注入高度压缩的量子筒并硼靶。这样的硼靶可以通过使用精确形状的激光脉冲对固体硼进行准等熵压缩来实现。

**关键词:** 氢硼聚变; 束靶; 筒并效应; 等离子体; 高能量密度

HEDP 2023-190

## 锥形内爆中的高效能量转换

张翌航<sup>1</sup>, 张喆<sup>1,3,5</sup>, 远晓辉<sup>2,3</sup>, Kevin Glize<sup>2,3</sup>, 方可<sup>1</sup>, 李玉同<sup>1,3,4,5</sup>, 张杰<sup>1,2,3</sup>†

1. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190;
2. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240;
3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240;
4. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;
5. 松山湖实验室, 东莞 523808

**摘要:** 双锥对撞点火 (double-cone ignition, DCI) 方案[1]中的能量学过程主要包括以下三步, 首先利用特殊整形的纳秒激光匀滑辐照金锥中的球壳靶, 实现金锥内的球对称内爆压缩, 以降低对驱动激光能量以及内爆均匀性的要求; 然后通过两个相对的锥口喷出的高密度等离子体的对撞, 利用内爆动能向内能的转换, 实现对撞等离子体的预加热; 最后, 再用皮秒拍瓦激光产生的快电子, 在磁场的引导下, 对对撞等离子体快速加热到点火温度。

本文主要报告关于双锥对撞点火方案中的锥形内爆过程中能量转换的实验研究结果。我们在神光-II 升级装置上利用多种诊断设备对能量学物理量进行了较为完整的测量。结果表明, 在纳秒激光与 CHCl 球壳的作用中, 激光等离子体不稳定性可以得到有效的控制, 激光能量的吸收效率在 89%~96%。同时, 受激拉曼散射在激光能量损失中占据主导地位。经过锥壁横向箍缩的内爆等离子体在喷出锥口的时刻, 其动能占驱动激光能量的 2%~6%。其中, 内爆等离子体的在锥内的质量流失是限制锥口燃料动能的主要因素。另外, 对锥口燃料的温度和纵向速度的诊断表明, 这部分燃料在出锥口时形成了为马赫数为 4 的等离子体喷流, 而高马赫数喷流将有利于后续燃料对撞阶段的高密度、退筒并等离子体燃料核心的形成。本研究工作有助于我们更加深入、系统地理解锥形内爆中能量的传输与转换等物理过程, 并为进一步提高双锥对撞点火方案的能量转换效率提供依据。

**关键词:** 惯性约束聚变, 激光等离子体相互作用, 等离子体喷流

HEDP 2023-191

## 强激光驱动冲击波形成中的离子动理学效应

许育培<sup>1,2</sup>, 张文帅<sup>2</sup>, 姚沛霖<sup>3</sup>, 刘庆康<sup>1,2</sup>, 罗慧<sup>1</sup>, 李树<sup>2</sup>,  
蔡洪波<sup>2,4†</sup>, 朱少平<sup>1,2‡</sup>

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;  
3. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 4. 北京大学应用物理与技术研究中心, 工学院, 北京 100871)

**摘要:** 在直接驱动惯性约束聚变中, 激光驱动冲击波起到了关键的作用, 其中涉及激光能量沉积、电子-离子能量交换、冲击波形成和演化等相互耦合的复杂物理过程。我们利用混合流体-Particle in cell 模拟研究了强激光驱动冲击波形成中的离子动理学效应, 模拟发现来自冲击波下游的高能离子可以输运到冲击波区域, 导致该区域离子分布函数高能尾部抬升。虽然在分布函数中占比少, 这部分高能离子在冲击波形成时贡献了大部分的离子热流, 而且在冲击波形成区域, 离子热流显著大于电子热流, 这表明高能离子主导了冲击波的形成。本工作为激光驱动冲击波形成过程提供了新的物理图像, 加深了对冲击波中离子动理学效应的理解。

**关键词:** 激光驱动冲击波; 混合流体-PIC; 离子分布函数; 离子动理学效应

HEDP 2023-192

## 多束大角度入射光驱动的激光等离子体不稳定性及其产生的热电子

李俊 孟轲阳

(中国科学技术大学)

**摘要:** 在惯性约束聚变中, 激光等离子体不稳定性产生的热电子能够预热未压缩冷燃料, 显著的降低内爆效率, 需要被有效抑制。之前的实验结果表明, 不同激光辐照位形对于热电子能量有着跨越数量级的影响。除了热电子能量之外, 热电子发散角的大小在不同的点火方案下都会明显影响其预热效应的强弱。针对这一关键问题, 我们通过二维粒子模拟研究了在典型物理参数下, 不同双束激光辐照位形下的等离子体中, 双等离子体衰变 (TPD) 和受激拉曼散射 (SRS) 及它们产生的热电子的能量和角分布特征。我们重点关注不同入射角度下哪些不稳定性模式增长最显著, 对应热电子的能量和角分布等特征有何种变化, 以及背后的关键物理机制。我们发现, 当激光入射角较小时, TPD 产生前向的共用子波与前向小发散角的热电子; 当激光入射角较大时, 在侧向发生 TPD 与侧散 SRS 的共用子波, 显著增加了热电子能量, 并产生侧向 SRS 散射光与更多大角度的热电子。对于后者, 我们基于 Rosenbluth 对流增益理论对共用子波的增益进行了计算, 得到的结果很好的解释了不同入射角度下共用子波和 SRS 侧散的不同增长模式和角度。本研究为更复杂辐照位形下热电子能量和发散角的估计提供了初步的方法。

**关键词:** 受激拉曼散射; 双等离子体衰变; 多光束激光等离子体不稳定性; 热电子



HEDP 2023-193

## 激光等离子体参量不稳定性的类流体数值模拟

闫锐

(中国科学技术大学, 合肥 230026, Email: ruiyan@ustc.edu.cn)

**摘要:** 激光等离子体参量不稳定性 (LPI) 是惯性约束聚变 (ICF) 中的两类关键风险因素之一。基于流体模型的 LPI 模拟工具在合适的场景中可以发挥其优点。我们开发了一系列描述不同物理细节的数值模拟工具, PHANTAM、FLAME-1D、FLAME-MD 等, 针对性地应用于 ICF 相关的场景中。基于射线追踪和稳态对流放大模型, 我们开发了计算软件 PHANTAM, 用于对流体运动尺度下的 LPI 过程进行全局模拟和图像把握, 如: 针对间接驱动集束实验中的受激拉曼散射 (SRS) 背散主导现象的物理机制做了模拟和分析; 对双锥对撞直接驱动方案中的 SRS 信号来源做了分析和判断, 获得了与实验信号较为一致的模拟信号, 从而判断其主要来自 SRS 侧散。基于双流体方程, 我们提出了 FLAME 模型并开发了系列软件, 用于在波动 (分辨电子等离子体波、光波、离子声波等) 尺度下捕捉 LPI 精细的波结构和准确的增长阈值, 如: 利用三维 FLAME-MD 模拟, 研究了间接驱动激光烧蚀封口膜时大角度斜入射条件下多光束双等离子体波衰变 (TPD) 过程, 发现即使单束激光强度远低于阈值, TPD 仍然可以被多束激光在大角度斜入射条件下共同激发从而带来燃料预热风险; 模拟研究了涡旋拉盖尔高斯激光通过 TPD 过程把角动量传递给等离子体波的过程, 并揭示了该过程产生轴向强磁场的物理机制。

**关键词:** 惯性约束聚变、激光等离子体参量不稳定性、数值模拟

HEDP 2023-194

## 神光 II 升级装置实验能力提升 关键技术及进展

张攀政

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

**摘要:** 神光 II 升级装置是国际为数不多常年运行的惯性约束核聚变激光装置。为满足日益发展的物理要求, 对装置进行了实验能力提升, 包括纳秒打靶能量、皮秒打靶能量、运行效率、控制精度等。本报告将重点介绍其中几个关键技术及目前的总体提升进展。

**关键词:** 放大器; 非线性; 到靶能量; 控制精度; 运行效率

HEDP 2023-197

## 激光聚变内爆减速阶段能量转化效率研究

王艺澎<sup>1</sup>, 蔡洪波<sup>1,2\*</sup>, 朱少平<sup>1,2,3\*</sup>

(1 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2 北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871; 3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 激光聚变 (ICF) 球形内爆经历 X 光辐照、靶丸烧蚀、冲击加速、飞层减速、热斑形成、聚变点火、燃烧传播等一系列过程, 其中在内爆转滞阶段, 等离子体飞层的动能转化为内能, 形成高密度高温的热斑。能量转化效率直接影响 DT 点火阈值, 为了解等离子体动能如何向内能转换的物理细节, 我们采取准一维平板内爆模型。基于自主研发的 hybrid fluid-PIC 程序, 考虑了等离子体碰撞对穿和反射等过程, 采用标准的粒子云方法来描述离子, 并采用蒙特卡罗碰撞描述离子间的碰撞, 可更为细致地描述离子动能到内能的转换过程。通过模拟对比, 平板两侧在不同漂移速度下, 受制于驱动不对称性, 能量转化显著减小; 同时, 对比平衡态与非平衡态的情况, 关注飞层动能转化内能这一问题, 定性给出了转化效率的演化趋势。该工作有助于理解激光聚变内爆过程。

**关键字:** 内爆转滞; 转化效率; 非平衡态

HEDP 2023-199

## 三维烧蚀瑞利-泰勒不稳中的自生磁场

张德华<sup>1</sup>, 信靖飞<sup>1</sup>, 刘阳<sup>1</sup>, 姜贤<sup>1</sup>, 闫锐<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230026)

**摘要:** 我们模拟研究了惯性约束聚变相关参数下的三维单模烧蚀瑞利-泰勒不稳定性 (ARTI) 演化过程中产生的自生磁场。模拟中包含了 Biermann 电池、磁场耗散, Nernst 效应等磁场的生成和输运效应, 并考虑了磁场通过改变电子传热影响 ARTI 流体动力学演化的反馈机制。数值模拟的结果表明, 三维 ARTI 可生成  $10^3$  特斯拉量级的自生磁场, 显著高于二维 ARTI 产生的自生磁场的强度。Nernst 效应可沿温度梯度的相反方向压缩磁场, 使磁场强度明显增强, 并提高该区域内霍尔参数的幅值, 使霍尔参数达到 1 左右。高强度的自生磁场对 ARTI 的增长产生反馈作用: 磁化热流抑制了尖钉头部附近的烧蚀效应, 从而加速了尖钉的增长, 促进了靶材料与高温低密度区域等离子体的混合。这种效应在短波长模态中更加显著。

**关键词:** 瑞利-泰勒不稳定性; 自生磁场; 烧蚀效应; 磁化热流; Nernst 效应

HEDP 2023-201

## 超热电子非局域传输对激光烧蚀靶及烧蚀瑞利-泰勒不稳定性增长的影响

杨晓虎<sup>1,3\*</sup>, 陈泽豪<sup>1</sup>, 张国博<sup>1</sup>, 马燕云<sup>2,3</sup>, 张杰<sup>3</sup>

(1 国防科技大学理学院核科学与技术系, 长沙 410073; 2 国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073;

3 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 激光驱动惯性约束聚变中, 高强度激光与靶相互作用时, 超热电子自由程会接近甚至超过等离子体温度标长, 此时等离子体的经典热传导理论将不适用。超热电子非局部传输可以预热燃料, 限制惯性约束聚变中的热流, 增加燃料的熵, 降低靶丸最终的压缩。

首先, 我们将描述超热电子非局域传输的改进型 Schurtz-Nicolai-Busquet (SNB) 模型添加到辐射流体力学程序中, 研究了二倍频激光烧蚀碳氢靶过程。发现当激光强度大于  $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  时, 超热电子的非局域传输效应变得显著。相比限流模型, SNB 模型中由于冕区等离子体温度更低, 其质量烧蚀速率大于限流模型的质量烧蚀速率, 能更好地吻合实验结果。超热电子的非局域传输效应与激光频率紧密相关, 我们得到了不同激光频率下应考虑非局域传输效应的激光强度阈值, 给出了在不同激光强度和频率下, 限流模型中限流因子的合理取值范围。

其次, 我们研究了非局域传输效应对烧蚀瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 发展的影响, 发现超热电子非局域传输效应对短波长扰动有更强的抑制作用。从等压近似的守恒方程出发, 推导了耦合非局域热流的 RTI 线性增长率, 进一步证实了模拟结果, 表明非局域效应对短波长扰动的抑制效果, 增大了截止波长。

本工作可为激光驱动惯性约束聚变中激光烧蚀靶和 RTI 增长研究提供参考和借鉴。

**关键词:** 超热电子; 非局域传输; 激光烧蚀; 烧蚀瑞利-泰勒不稳定性;

HEDP 2023-204

## 大时空尺度上的参量不稳定性研究

刘钊, 马行行, 王圆香, 李晓锋, 翁苏明, 盛政明, 张杰

(上海交通大学物理与天文学院激光等离子体实验室)

**摘要:** 激光驱动的惯性约束聚变中, 激光与等离子体相互作用中会激发受激拉曼散射 (SRS)、受激布里渊散射 (SBS)、双等离子体衰变 (TPD) 等各种参量不稳定性过程。这些过程不仅会造成相当份额的激光能量损失和破坏辐射对称性, 它们所产生的超热电子还会预热靶丸从而降低压缩效率和聚变能量增益。美国国家点火装置等激光聚变研究装置上所开展的实验研究均表明, 对 LPI 物理过程的充分理解和有效控制对成功实现激光聚变点火至关重要。而在大时空尺度上, 各种参量不稳定性呈现出更复杂的发展演化规律, 此时如何精确地描述不稳定性演化中的各种动力学效应和非线性效应以及如何同时抑制这些不稳定性都是极具挑战性的难题。本报告首先将简单回顾 LPI 基本物理过程, 而后将重点讨论大时空尺度上参量不稳定性的演化规律及其抑制, 最后还将简单探讨如何将等离子体光学方法用于抑制参量不稳定性。

**关键词:** 激光与等离子体相互作用, 受激拉曼散射, 超热电子,

HEDP 2023-207

## 基于间接-直接复合加载的物理特性实验研究

晏骥<sup>1</sup>、李纪伟<sup>2</sup>、涂绍勇<sup>1</sup>、王立峰<sup>2</sup>、贺贤土<sup>2</sup>等

(1 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900; 2 应用物理与计算数学研究所, 北京, 100094)

**摘要:** 基于我国大型激光装置开展了大量间接-直接复合加载物理特性实验研究。相比较于传统的直接驱动、间接驱动等加载方式, 间接-直接复合加载方式有其独特的物理特点, 面向部分高能量密度物理前沿研究具备一定的优势。本工作分别从辐射流体动力学、激光等离子体参量不稳定性等方面开展了大量实验研究; 并从实验上获得了复合加载驱动压力、等离子体热匀滑效应等独特物理过程的重要实验结论, 有助于开拓高能量密度物理研究的新方向。

**关键词:** 激光等离子体, 间接-直接复合加载, 直接驱动, 间接驱动, 大型激光装置

HEDP 2023-211

## 基于 X 射线显微成像的间接驱动内爆热斑状态诊断研究

张兴<sup>1</sup>、徐捷<sup>2</sup>、穆宝忠<sup>2</sup>、陈忠靖<sup>1</sup>、陈亮<sup>2</sup>、董建军<sup>1</sup>、杨品<sup>1</sup>、孙传奎<sup>1</sup>、蒋炜<sup>1</sup>、晏骥<sup>1</sup>、袁永腾<sup>1</sup>、蒲昱东<sup>1</sup>、李明涛<sup>2</sup>、李文杰<sup>2</sup>、王新<sup>2</sup>、董云松<sup>1</sup>、王峰<sup>1</sup>、杨冬<sup>1</sup>、杨家敏<sup>1</sup>、赵宗清<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200082)

**摘要:** 在有限激光能量驱动条件下, 间接驱动惯性约束聚变 (ICF) 需要通过高收缩比内爆设计来实现自持燃烧的等离子体状态。高收缩比内爆物理设计, 对实验中如何形成一个高度球对称性、极低混合量的高品质热斑提出了重要挑战。美国国家点火装置 (NIF) 近十年的实验结果显示, 内爆压缩不对称性和流体力学不稳定性增长等因素导致的热斑形变和混合, 是前期制约 NIF 实现点火的关键因素。辐射驱动对称性以及靶丸形变及装配精度等是热斑低阶不对称性的部分来源, 降低热斑压缩度; 靶丸缺陷以及靶结构孤立扰动等因素则是压缩过程流体力学不稳定性增长的重要来源, 在阻滞阶段形成热斑界面区高阶模态结构, 进一步演化形成湍流结构并造成热斑混合, 降低热斑压缩度并因辐射漏失能量导致热斑温度下降。考虑到热斑尺寸仅约  $50 \mu\text{m}$ 、辐射能量主要处于 keV 能区, 基于 KB 显微镜等掠入射显微成像技术是热斑辐射图像以及电子温度诊断的最佳途径之一。针对热斑低阶不对称性诊断, 本文发展了一种空间平响应四通道 KB 显微镜, 空间分辨达到  $5 \mu\text{m}$ , 有效视场接近  $1\text{mm}$ , 四通道成像一致性超过 97%, 实现 P2 和 P4 阶不对称性的诊断不确定度控制在 5% 以内。针对热斑界面高阶模态诊断, 发展了一种 TTSS 构型的类 Wolter 显微镜, 实现  $8\text{keV}$  能区的成像空间分辨提升至  $2 \mu\text{m}$  水平, 有效视场达到  $400 \mu\text{m}$  范围, 为流体力学不稳定性增长的微尺度结构成像提供了一种诊断工具。针对热斑电子温度诊断, 发展了一种具备多能点成像能力的四通道 KB 显微镜, 设计通过热斑韧致辐射图像的多能点发射强度空间分布测量, 结合热斑三维重建算法, 获得电子温度空间分布信息, 为热斑混合区宽度等物理分析提供诊断参考。

**关键词:** X 射线显微成像诊断; 热斑不对称性; 流体力学不稳定性增长; 热斑电子温度; KB 显微镜

HEDP 2023-212

## 双锥对撞新型激光聚变方案研究

张喆, 李玉同, 张杰

中国科学院物理研究所, 北京市, 100190

**摘要:** 为了验证双锥对撞激光聚变方案 (DCI) 四个分解物理过程的可行性, DCI 联合研究团队于 2020-2022 年间在神光 II 升级激光装置上进行了四轮实验研究。在两端各 10 kJ 的驱动激光能量下, 实现了对金锥内球壳靶的 20 倍以上的等熵压缩; 观察到锥口等离子体的喷射速度大于 200 km/s; 从两个锥口出射的高速等离子体对撞后密度实现了倍增, 面密度达到 300 mg/cm<sup>2</sup> 以上; 对撞过程实现了等容密度分布等离子体, 高密度等离子体持续时间大于 100 ps; 对撞过程中动能向等离子体内能的最大转换效率可达 90%; 实验还观察到 0.5 kJ 皮秒激光产生的快电子对等容压缩等离子体的快速加热效应。

**关键词:** 双锥对撞激光聚变, 激光驱动, 等熵压缩

HEDP 2023-214

## 利用光学汤姆逊散射诊断理解 ICF 黑腔

杨冬<sup>1</sup>, 李志超<sup>1</sup>, 赵航<sup>1</sup>, 龚韬<sup>1</sup>, 李欣<sup>2</sup>, 蒋小华<sup>1</sup>, 郑坚<sup>3</sup>, 刘永刚<sup>1</sup>, 刘耀远<sup>3</sup>, 陈朝鑫<sup>1</sup>, 李三伟<sup>1</sup>, 李琦<sup>1</sup>, 潘凯强<sup>1</sup>, 郭亮<sup>1</sup>, 理玉龙<sup>1</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 彭晓世<sup>1</sup>, 吴畅书<sup>2</sup>, 张桦森<sup>2</sup>, 郝亮<sup>2</sup>, 蓝可<sup>2</sup>, 陈耀桦<sup>2</sup>, 郑春阳<sup>2</sup>, 古培俊<sup>2</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 蔡洪波<sup>2</sup>, 郑无敌<sup>2</sup>, 邹士阳<sup>2</sup>, 杨家敏<sup>1</sup>, 江少恩<sup>1</sup>, 赵宗清<sup>1</sup>, 张保汉<sup>1</sup>, 朱少平<sup>2</sup>, 丁永坤<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 3. 中国科学技术大学工程与应用物理系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 当前, 激光惯性约束聚变 (ICF) 研究在越来越接近点火的极端能量密度条件下, 实验与模拟的偏离逐渐增大, 关键原因之一是缺乏对黑腔等离子体状态及其影响黑腔能量学和内爆对称性的细致研究和判断。汤姆逊散射 (TS) 是一种强有力的等离子体参数诊断方法, 可以对等离子体中电子与离子的温度、密度和流速等一系列状态参数进行高精度诊断。

汤姆逊散射固有的难点在于待测信号强度极弱, 典型实验条件下的信号强度仅为探针光强度的 10<sup>-9</sup> 倍。因此, 实验的挑战在于定量评估特定散射位型下的背景干扰并提升信噪比。在神光系列激光装置上, 我们发展了多角度、多波数深紫外汤姆逊散射诊断技术。通过灵活选择和组合不同角度和不同波段的汤姆逊信号 (263nm 附近的离子谱、200nm-250nm 的电子谱), 可以在具有强干扰和封闭几何特征的惯性约束聚变 (ICF) 黑腔环境下, 高精度地获得电子密度、电子温度、离子温度、离子组分等参数。这些参数是校验辐射流体模拟程序、研究 ICF 中激光等离子体相互作用过程 (LPI) 的基础。在此基础上, 通过精确匹配 LPI 驱动的等离子体静电波模, 进一步发展了超热相干汤姆逊散射诊断方法, 能够直接诊断到 LPI 产生的等离子体静电波, 如多光束拍频和受激布里渊散射 (SBS) 过程激发的定向离子声波。结合上述两种技术对 ICF 黑腔内的等离子体和 LPI 演化进行了细致的诊断和研究, 揭示了其时空演化规律和物理机制。

**关键词:** 汤姆逊散射; 惯性约束聚变; 激光等离子体相互作用



### 第三部分 极强场物理、实验室天体物理、 激光核物理

HEDP 2023-005

## 强激光加速高密度强流电子高效激发核 同质异能态

冯 杰

(上海交通大学, 物理与天文学院, 上海 200240, Email: [fengjie93@sjtu.edu.cn](mailto:fengjie93@sjtu.edu.cn))

**摘要:** 原子核同质异能态的高效激发对于诸如核钟、核电池、清洁核能和核  $\gamma$  射线激光等开创性应用至关重要。然而, 由于其较小的核激发截面和快速衰变, 很难通过传统的加速器或反应堆积累大量短寿命的同质异能素。本报告将介绍两种高效激发核同质异能态的实验研究结果: 1) 利用百太瓦的飞秒激光装置, 通过激光和氦团簇的非线性共振, 首次在数十飞秒内实现了高密度快速振荡的电子库伦激发  $83\text{Kr}$  原子核, 且在等离子体环境中以  $2.34 \times 10^{15} \text{ p/s}$  的超高效率激发了核同质异能态  $83\text{mKr}3$ ; 2) 利用紧聚焦的百太瓦激光驱动尾波场电子加速, 通过多空泡离子化注入实现了大电量、准直、且能量适合用于驱动韧致辐射并诱发核巨偶极共振的强流电子束, 利用此强流电子束对铀核进行光核激发, 并在更高的能段实现了  $1.12 \times 10^{15} \text{ p/s}$  的超高激发效率。这两种高效、通用的核同质异能素激发方法可广泛应用于激发态寿命短至皮秒的同位素, 对核钟、核  $\gamma$  射线激光和同位素示踪技术等领域及核跃迁机制的研究具有重要意义。

**关键词:** 强激光; 电子加速; 核同质异能态

HEDP 2023-006

## 等离子体环境中氘锂聚变反应的天体物理 S 因子测量研究

吕冲<sup>1</sup>; 王文钊<sup>2</sup>; 张笑鹏<sup>3</sup>; 符长波<sup>4</sup>; 郭冰<sup>1</sup>

(1.中国原子能科学研究院; 2.上海交通大学; 3.中科院高能物理研究所; 4.复旦大学)

**摘要:** 核参数在宇宙演化中起着至关重要的作用。目前, 几乎所有的核参数, 如反应速率、截面、衰变速率等, 都是在实验室环境中基于传统加速器的方法测量的。然而事实上与核合成有关的核反应正在热等离子体中发生, 这就导致核参数在等离子体和非等离子体环境之间可能不同, 因此直接测量等离子体环境中的参数是非常重要的。这对于更好地理解一些长期存在的与核合成有关的谜题可能至关重要, 例如大爆炸锂丰度之谜等。

本报告中, 将基于强激光装置, 通过等离子体喷流对撞的方法, 开展等离子体环境中与锂丰度问题相关的  $7\text{Li}(\text{D}, \text{n})$  的氘锂聚变反应实验研究, 实验测量并获得等离子体环境中氘锂聚变反应截面, 并探索电子屏蔽效应对其影响的物理机理。为相关研究提供理论和实验数据, 促进学科发展和交叉融合。

**关键词:** 激光核物理; 等离子体; 核反应测量



HEDP 2023-010

## 激光加速质子束高效生产 $^{93m}\text{Mo}$ 及其对 $^{92}\text{Mo}$ 产生的天体物理意义

樊文茹<sup>1</sup>, 齐伟<sup>2</sup>, 张景丽<sup>1</sup>, 罗文<sup>1</sup>

(1. 南华大学, 核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 同质异能素在宇宙元素的产生中发挥着关键作用, 并在按需控制核能释放方面有许多潜在应用。 $^{93m}\text{Mo}$  是研究通过电子捕获的核激发(NEEC)的最优核素。为此, 需要探索  $^{93m}\text{Mo}$  高效产生的方法。在本工作中, 我们通过实验证明了通过强激光脉冲诱导的  $^{93}\text{Nb}(p, n)$  反应有效地产生  $^{93m}\text{Mo}$ 。当使用持续时间为 ps 的 100 J 激光脉冲辐照靶时, 在能级能量为 2425keV( $21/2^+$ ,  $T_{1/2}=6.85\text{h}$ )下产生  $^{93m}\text{Mo}$ , 产额为  $1.8 \times 10^6$  个粒子/发。由此  $^{93m}\text{Mo}$  产生的峰值效率约为 1017 个粒子/秒, 这比使用传统质子加速器至少高出五个数量级。进一步, 我们研究了  $^{93m}\text{Mo}$  的对有争议的天体物理 p 核素  $^{92}\text{Mo}$  产生和破坏的影响。研究发现,  $^{93}\text{Nb}(p, n)^{93m}\text{Mo}$  反应是产生  $^{93m}\text{Mo}$  的重要生成途径, 并且经由  $^{93m}\text{Mo}$  产生  $^{92}\text{Mo}$  的反应流程的影响不容忽视。此外, 我们建议使用激光诱导质子束直接测量(p, n)反应的天体物理核反应速率, 因为激光诱导产生的质子束很好地符合 Maxwell-Boltzmann 分布。我们的结论是, 激光诱导的质子束为理解 p 核的核合成开辟了一条新的途径, 并且能够产生具有高峰值效率的同质异能素。

**关键词:** 同核异能素  $^{93m}\text{Mo}$ ; 激光加速质子束; (p, n)反应; 天体物理反应率; 同位素  $^{92}\text{Mo}$

HEDP 2023-011

## 使用激光驱动超短超强 $\gamma$ 源研究光核反应中的超短寿命同核异能素

吴笛<sup>1,2</sup>、蓝浩洋<sup>1,2</sup>、张剑尧<sup>1,2</sup>、刘佳鑫<sup>1,2</sup>、卢寰港<sup>1,2</sup>、吴学志<sup>1,2</sup>、吕建锋<sup>1,2</sup>、蔡杰<sup>1,2</sup>、夏雨辉<sup>1,2</sup>、王哲男<sup>1,2</sup>、张慧<sup>1,2</sup>、杨致彦<sup>1,2</sup>、徐新路<sup>1,2</sup>、耿易兴<sup>1,2</sup>、余金清<sup>3</sup>、王浩然<sup>4</sup>、刘伏龙<sup>4</sup>、贺创业<sup>4</sup>、郭冰<sup>4</sup>、王乃彦<sup>4</sup>、颜学庆<sup>1,2,\*</sup>

(1. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 2. 北京怀柔激光加速创新中心, 北京 101407; 3. 湖南大学物理与微电子学院, 湖南长沙 410012; 4. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 同核异能素是一类普遍存在的长寿命核激发态的重要种群, 激发态能量最高可达 13.8MeV( $^{208}\text{Pb}$ ,  $T_{1/2}=60\text{ns}$ ), 最低仅为 8.3eV ( $^{229}\text{Th}$ ,  $T_{1/2}=7\mu\text{s}$ ), 其半衰期最长甚至超过了宇宙寿命, 在核结构、核反应机制和核天体物理等领域发挥着重要作用。然而, 由于缺乏合适的测量方法, 半衰期为几秒或更短的光核反应中产生的同核异能素几乎没有实验截面数据, 这在一定程度上限制了相关领域的发展。本工作提供了一种利用激光驱动的超短超强  $\gamma$  射线对光核反应产生的超短寿命同核异能素进行在线  $\gamma$  谱分析的新方法, 其最快的时间分辨可达到亚 ps 级, 瞬时强度高于  $10^{19}/\text{s}(\geq 8 \text{ MeV})$ , 适用于  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, xp)$ ,  $(\gamma, \alpha)$ , 甚至  $(\gamma, f)$  等光核反应的超短寿命同核异能素研究。

实验在北京大学 200TW 激光加速器上进行[1,2,3], 利用激光尾波加速(Laser Wakefield Acceleration, LWFA)产生的近单能电子在高压区首次测得半衰期仅为 43.1 ms 的  $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m2}\text{In}$  反应截面数据, 在线能谱及本

底如图 1 所示, 实验结果为研究 In 元素的核结构及核反应理论提供了新的数据。本方法的建立为深入了解超短寿命同核异能素提供了一条独特的途径, 有望填补相关实验数据的空白。

**关键词:** 同核异能素、超短寿命、光核反应、激光驱动  $\gamma$  射线

HEDP 2023-020

## 激光驱动种子级联的量子效应研究

郭银龙 耿学松 吉亮亮

(上海光学精密机械研究所)

**摘要:** 强场量子电动力学 (Strong-field Quantum Electrodynamics) 过程的离散性和随机性使其区别于经典电动力学。验证 SF-QED 特征的一个重要方法是通过极强激光与等离子体的相互作用。通过数值模拟研究了两个反向传播的超强激光脉冲驱动的 QED 种子级联, 重点关注正电子产额的统计特性和量子随机性的显现。研究发现, 内禀的随机量子效应和外部环境涨落都可以导致产额的概率分布, 但前者表现为: 1) 包含耦合随机效应的概率分布总是更宽; 2) 由于量子随机性, 级联可能会出现比平均/经典期望高得多的正电子。这些特征提供了一种统计方法来识别 SF-QED 过程中的量子效应特征。

**关键词:** 强场量子电动力学, 种子级联, 量子随机性

HEDP 2023-023

## 脉冲星磁层中的极化 QED 级联过程

宋怀航\*

(上海交通大学, 物理与天文学院, 上海 200240)

**摘要:** 脉冲星一般被认为是旋转的磁化中子星, 其表面磁场可以高达 1012 高斯。脉冲星的自转周期很短, 在秒的时间尺度上, 因此真空条件下磁场会在其平行方向上诱发出很强的电场。该电场所引起的电势会远远超过引力电势, 将电子或正电子从脉冲星表面拽出。为了达到一个稳定状态, Goldreich 和 Julian 提出脉冲星周围应该有一个由正负电子等离子体构成的磁层[1][2], 以屏蔽电场的平行分量。而这些正负电子等离子体最有可能来自 QED 级联过程, 即高能电子或正电子辐射出  $\gamma$  光子,  $\gamma$  光子再湮灭为正负电子对, 而后这两个过程会循环多次。

在本报告中, 我将介绍关于脉冲星磁层中极化 QED 级联过程的最新研究进展, 重点关注辐射  $\gamma$  光子的偏振性质, 以及其对正负电子对产生的影响。我们利用的数值模拟方法包括单粒子程序和 PIC 程序。这两种模拟程序具有相同的光子辐射和正负电子对产生模块, 特别地包含了正负电子自旋和光子偏振效应, 详细的算法可以参考我们之前的工作[3][4]。我们的结果揭示了脉冲星磁层中曲率辐射 (curvature radiation) 和同步辐射 (synchrotron radiation) 具有不同的光子偏振性质。另外, 与一般激光等离子体相互作用不同的是, 曲率辐射中光子偏振效应会有利于正负电子对的产生。

**关键词:** 脉冲星磁层; QED 级联过程; 光子偏振效应

HEDP 2023-030

## 强磁场调控高功率激光与物质相互作用

胡广月

(中国科学技术大学)

**摘要:** 高功率激光与物质相互作用广泛地应用于激光聚变、实验室天体物理、物质成分检测、真空镀膜、X 射线源等领域。但传统的调控高功率激光与物质相互作用的手段主要是通过改变激光参数或靶参数来实现,其中典型的代表是激光聚变中使用紫外激光和极紫外光刻光源中使用激光预脉冲。但对特征演化时间远大于激光脉冲宽度的物理过程、或者发生区域远离激光能量沉积区的物理过程,传统的手段很难进行有效调控。近年来我们对强磁场调控高功率激光与物质相互作用过程进行了系统的实验研究、结合数值模拟发现了一些新现象,例如磁化天体现象的实验室研究(磁准直天体外流产生机制、太阳风与地磁层作用时的霍尔效应、高能宇宙射线的磁化无碰撞激波加速机制)、磁场增强激光烧蚀、脉冲磁场改善脉冲激光沉积镀膜技术、充磁黑腔激光聚变新方案等。本报告对强磁场调控高功率激光与物质相互作用这一研究方向进行宏观梳理,介绍磁场调控的必要性、磁场产生方法、和磁场调控的适用范围。

**关键词:** 高功率激光与物质相互作用, 强磁场, 纳秒激光

HEDP 2023-035

## 角度展宽对非线性康普顿散射的影响

代雅男

(上海师范大学)

**摘要:** 我们研究了椭圆偏振激光在超相对论性电子束下的非线性康普顿散射过程中光子在入射电子周围的动量扩散的影响。在强场 QED 中,考虑角度扩展在相对论状态下很小,忽略角扩展是一个很好的近似。我们仔细研究了这种近似在非线性康普顿散射中的有效性。为此,我们改进了电子自旋和光子偏振全分辨的蒙特卡罗模拟方法,采用角分辨概率方法对超强激光场中辐射高能光子进行模拟。我们采用 Baier 和 Katkov 的量子算符的方法和局域常数场近似计算辐射概率。模拟结果表明,发射角度的扩展对辐射粒子的角分布和极化有显著影响。

**关键词:** 非线性康普顿散射, 局域常数场近似, 角度扩展

HEDP 2023-047

## 激光尾场电子加速驱动的微尺寸快中子源

李曜均; 冯杰; 王文钊; 谭军豪; 葛绪雷; 刘峰; 闫文超;  
张国强; 付长波; 陈黎明

(上海交通大学)

**摘要:** 脉冲快中子源是快中子共振照相和快中子吸收谱学应用的关键。然而, 传统脉冲快中子源由于横向源尺寸大 (mm 量级)、脉冲持续时间长 (ns 量级), 难以实现高空间分辨率、精细吸收谱的高对比度中子成像。本研究工作提出了一种产生微小源尺寸超短脉冲中子源的实验方案, 由台式激光等离子尾场电子加速器在薄金属转换体上驱动光致裂变反应。在 100 TW 激光设备上, 用数十 MeV 准直电子束驱动产生了源尺寸约 500  $\mu\text{m}$ 、持续时间约 36 ps 的快中子源。这种微尺寸超短脉冲中子源能将快中子吸收谱的能量分辨率提高数十倍, 例如, 在 1.65 MeV 下提高至 100 eV, 这有利于高质量的快中子成像和对中子物理理论模型的深入理解。

**关键词:** 快中子; 超强超快激光; 激光尾波场加速; 光核反应

HEDP 2023-049

## 基于形变 Gamow-like 模型研究原子核的 $\alpha$ 衰变和质子放射性\*

肖琼<sup>1</sup>, 程俊皓<sup>1</sup>, 余同普<sup>1,†</sup>

(1 国防科技大学, 理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 在本工作中, 我们通过引入原子核的形变对 Gamow-like 模型进行了改进, 并将其用于  $\alpha$  衰变和质子放射性研究。计算结果表明, 形变 Gamow-like 模型能更好地符合实验数据, 且在远离原子核壳层时, 理论计算和实验数据的符合程度有明显的提升。该模型也被用来更准确地预测远离壳的核的质子发射半衰期, 获得的预测结果遵循盖革-努托尔定律。此外, 我们也使用形变 Gamow-like 模来研究原子核的壳结构, 通过研究引入形变对不同中子数母核的理论半衰期和实验数据符合程度的提升规律, 发现了下一个中子壳的数量可能是 152。这项工作可能有利于未来寻找超重核和新的质子放射性核素研究。

**关键词:** Gamow-like 模型;  $\alpha$  衰变; 质子放射性; 壳结构; 半衰期; 原子核形变

HEDP 2023-050

## 基于激光伽马源的光核截面及 同质异能素比测量

蓝浩洋<sup>1,2</sup>, 吴笛<sup>1,2</sup>, 张剑尧<sup>1,2</sup>, 刘佳鑫<sup>1,2</sup>, 卢寰港<sup>1,2</sup>, 吕建锋<sup>1,2</sup>, 吴学志<sup>1,2</sup>, 马谦益<sup>1,2</sup>, 王哲男<sup>1,2</sup>, 夏宇辉<sup>1,2</sup>, 耿易星<sup>1,2</sup>, 蔡杰<sup>1,2</sup>, 余金清<sup>3</sup>, 颜学庆<sup>1,2,\*</sup>

(1. 北京大学 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 2. 北京怀柔激光加速创新中心, 北京 101407; 3. 湖南大学 物理与微电子学院, 湖南 长沙 410012.)

**摘要:** 光核反应截面及其反应产物中的同核异能素产额比在核结构、核反应机制和核天体物理等领域具有重要意义。目前在北京大学物理学院 CLAPA 实验室 200 TW 激光器上, 利用激光尾波加速的电子可稳定获得峰值强度 1019~20/s、截止能量为数十到数百 MeV、脉宽为数十 ps 的韧致辐射, 适用于光核反应的平均截面及同质异能素比研究。采用该激光伽马源进行了  $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)$  反应的光核活化测量, 得出  $^{197}\text{Au}$  的多核子发射通道的韧致辐射谱平均截面以及  $^{196\text{m}}\text{gAu}$  的同质异能素比。探究了同质异能素比对光学势、能级密度函数及伽马强度函数的敏感性, 结果表明相关测量结果可对典型核结构参数进行约束。在此基础上, 根据光核反应特性及靶核的稳定性, 选定了一系列同质异能素作为研究对象, 从 TALYS 计算结果中提取了产生一系列同质异能素的光核反应截面, 并带入 Geant4 程序中进行蒙特卡洛模拟, 探究了利用激光驱动光核反应研究一些典型同质异能素的可行性。基于模拟分析结果, 形成了对短寿命同核异能素进行在线测量的实验方案。

**关键词:** 激光电子加速; 韧致辐射; 光核反应; 同质异能素

HEDP 2023-052

## 激光驱动的磁化“创生之柱”实验研究

雷柱<sup>1</sup>, 王立峰<sup>1,2</sup>, 李纪伟<sup>1,2</sup>, 邹士阳<sup>1,2</sup>, 吴俊峰<sup>1</sup>, 赵忠海<sup>2</sup>, 孙伟<sup>3</sup>, 袁文强<sup>2</sup>, 袁文强<sup>2</sup>, 李龙兴<sup>2</sup>, 闫政<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 叶文华<sup>1</sup>, 贺贤土<sup>1,2</sup>, 乔宾<sup>2,4</sup>

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2. 北京大学 应用物理与技术研究中心、重离子物理研究所、核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 3. 原子能研究院 核物理研究所, 北京 102413; 4. 北京大学 纳光电子前沿科学中心, 北京 100871)

**摘要:** “创生之柱”是天空中最著名的天体之一, 其被认为与新恒星形成密切相关, 有恒星摇篮之称。然而, 由于非线性辐射磁流体力学的复杂性, 柱状结构的形成和维持机制依然存在争议。同时由于观测仪器精度的限制, 无法对其形成区域开展高分辨观测。在这里我们提出了一种新的实验方案用来在实验室中通过高功率激光设施研究磁场对等比柱状结构形成和演化的影响, 并利用二维和三维辐射磁流体力学模拟展示了柱状结构在磁场中形成的自洽动力学过程, 也进一步验证了实验方案的可靠性。通过研究发现, 只有当磁压和烧蚀压相当时, 磁场才能显著改变等离子体的流体动力学行为。对于初始为中等磁化 ( $\beta_0 \sim 3.5$ ) 的情况, 靶内部磁场由于烧蚀过程中产生的火箭效应而被压缩放大, 使得形成的柱状结构内部的磁压足够大。通过磁压对柱状结构侧面的支撑可有效抵抗烧蚀压对柱状结构的压缩, 从而避免柱状结构坍塌。初始磁场分量平行于柱状结构时, 与天文观测结果更加符合。当初始垂直磁场分量足够强时, 磁场几乎保持其初始分布不变, 并显著抑制等离子体的运动, 导致

无法形成柱状结构。三维模拟研究发现，创生之柱结构中“Column I”柱头部的弯曲可能是由于初始分布的非平行磁场造成洛伦兹力左右不对称所导致的。经过相似性标度变换，我们的结果可以应用于解释柱状结构的形成和维持机制，并为未来的实验设计提供参考。

**关键词：**辐射烧蚀；创生之柱；激光等离子体；磁场；实验室天体物理

HEDP 2023-065

## Manipulation of $\gamma$ -ray polarization in Compton scattering

Yu Wang; Mamutjan Ababekri; Feng Wan; Jia-Xing Wen; Wen-Qing Wei; Zhong-Peng Li; Hai-Tao Kang; Bo Zhang; Yong-Tao Zhao; Wei-Min Zhou; Jian-Xing Li

(西安交通大学)

**Abstract:** High-brilliance high-polarization  $\gamma$  rays based on Compton scattering are of great significance in broad areas, such as nuclear, high-energy, astro-physics, etc. However, the transfer mechanism of spin angular momentum in the transition from linear, through weakly into strongly nonlinear processes is still unclear, which severely limits the simultaneous control of brilliance and polarization of high-energy  $\gamma$  rays. In this work, we investigate the manipulation mechanism of high-quality polarized  $\gamma$  rays in Compton scattering of the ultrarelativistic electron beam colliding with an intense laser pulse. We find that the contradiction lies in the simultaneous achievement of high-brilliance and high-polarization of  $\gamma$  rays by increasing laser intensity, since the polarization is predominately contributed by the electron (laser photon) spin via multi-photon (single-photon) absorption channel. Moreover, we confirm that the signature of  $\gamma$ -ray polarization can be applied for observing the nonlinear effects (multi-photon absorption) of Compton scattering with moderate-intensity laser facilities.

**Keywords:** Compton Scattering;  $\gamma$ -ray; polarization

HEDP 2023-074

## 对流等离子体中电磁湍流和离子动理学研究

刘鹏<sup>1,2</sup>, 吴栋<sup>2</sup>, 盛正卯<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 物理学院, 浙江 杭州 310058; 2. 上海交通大学 物理与天文学院, 上海 200240)

**摘要：**逆流等离子体中的非线性电磁湍流和离子动理学在实验室天体物理和激光—等离子体相互作用领域是非常重要的课题。在本工作中，我们通过最近开发的高阶隐式粒子模拟(Particle-in-cell, PIC)程序在没有采用任何标度变换的前提下，首次定量地研究了电磁湍流对实验室尺度的未磁化和磁化逆流等离子体中离子动理学过程的影响。结果表明，非线性湍流场可以显著加热离子，特别是在磁化的逆流等离子体中，观察到了显著的湍流场放大和离子加热现象，其导致磁化参数增加一个数量级之多以及离子温度增加超过 10 keV，这与天体物理中重要的磁化湍流加热问题密切相关。集成在模拟中的中子诊断方法已经验证了对穿等离子体区中 PIC 给出的离子动理学信息，并预测了当外加磁场为 50 T 时，热核反应的中子产额可以提高超过一个数量级。该工作为逆流等离子体系统中宇宙粒子加速/加热和湍流磁场放大相关的验证实验提供了新的思路。

**关键词：**电磁湍流；离子动理学；对流等离子体；粒子模拟

HEDP 2023-085

## 成丝不稳定性中离子效应导致的磁场反常拓扑

刘一诺<sup>1</sup>, 胡章虎<sup>1</sup>, 王友年<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 物理学院, 大连 116024)

**摘要:** 采用二维电磁粒子模拟程序 IBMP, 我们研究了等离子体离子对韦伯型成丝不稳定性中磁场拓扑结构的影响。研究发现, 随着电子束能量的增加, 束电子对电磁场的响应时间增加并大于等离子体离子, 在成丝不稳定性饱和后, 等离子体呈现丝状结构并被电子束包围, 同时发现等离子体中的磁场呈现反常拓扑结构。在这种紧凑的等离子体密度位形下, 横向磁场的最大幅值位置由束边缘转移到了等离子体丝边缘, 进而将等离子体电子局域于等离子体丝做螺旋运动。我们进一步通过解析模型给出了磁场反常拓扑结构的产生与等离子体密度、束密度、能量以及等离子体离子质量之间的关系, 模拟结果与解析模型相吻合。

**关键词:** 粒子模拟; 离子效应; 韦伯型成丝不稳定性; 相对论电子束; 磁场拓扑结构

HEDP 2023-088

## 3+1 维中含有反作用的 Schwinger 效应

刘伟涛

(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

**摘要:** 3+1 维时空中包含有反作用的 Schwinger 效应, 因电磁相互作用的非禁闭特性, 在解析计算和数值模拟上存在着困难。我从外场中能级重新排布的角度出发, 将背景电磁场看作热库, Schwinger 效应则可认为是费米子体系能量由高到低的自发衰变, 并结合凝聚态物理理论中发展出的动力学平均场理论方法, 对体系中的电荷移动进行模拟, 再进一步确定正反电子对的数目。这个方法不但能模拟强场下电子对数目线性增长, 也能展示出在反作用下 Schwinger 效应逐渐减弱至体系达到热力学平衡。该方法对任意形状的标量场均有效, 从而拓宽了我们对极强电场的研究范围。

**关键词:** Schwinger 效应; 反作用; 动力学平均场理论; 非平衡态统计

HEDP 2023-097

## 粒子束驱动强场 QED 效应及 高亮度伽马辐射研究

朱兴龙<sup>1,2</sup>, 陈民<sup>2</sup>, 翁苏明<sup>2</sup>, 盛政明<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>

(上海交通大学 李政道研究所, 上海 200240; 上海交通大学 物理与天文学院, 上海 200240)

**摘要:** 近年来, 世界各地正在大力建设和发展十拍瓦级超短超强激光装置, 例如上海超短超强激光装置 (SULF)、欧盟的极端光学基础设施 (ELI) 等。这类激光装置的一个重要目标是探索极端强场引起的非线性 QED 效应及其应用。但是极端光场与物质相互作用中的许多物理机制和作用过程尚未研究清楚, 因此需要开展大量的理论与模拟研究, 以期对未来实验研究提供参考和理论基础。近期, 我们提出了一种全新的物理方案来研究强场 QED 效应, 并据此高效率产生极高亮度的 GeV 伽马射线。该方案的独特之处是不再使用激光脉冲驱动, 而是利用相对论电子束与固体靶的直接相互作用。由于产生的伽马光束具有亚微米级束斑、毫弧度级发散角、飞秒级脉宽和  $10^{12}$  量级高光子数, 使其峰值亮度可以比其他方案高几个数量级以上。这种前所未有的极高亮度 GeV 伽马射线源, 有望为强场 QED 物理、核物理、高能物理和实验室天体物理等领域研究提供独特手段。

**关键词:** 强场 QED 效应; 伽马辐射; 粒子束与等离子体相互作用

HEDP 2023-099

## Strong laser driven vortex gamma photons and vortex photonuclear reaction

Jian-Xing Li

**Abstract:** Vortex  $\gamma$  photons with intrinsic orbital angular momenta (OAM) possess a wealth of applications in various fields, e.g., strong-laser, nuclear, particle and astro-physics, yet their generation remains unsettled. In our recent works, we investigate the generation of vortex  $\gamma$  photons via nonlinear Compton scattering of ultrarelativistic electrons in a circularly polarized laser pulse. We develop a quantum electrodynamics scattering theory that explicitly addresses the multiphoton absorption and the angular momentum conservation. We find that, emitted  $\gamma$  photons possess intrinsic OAM as a consequence of spin-to-orbital angular momentum transfer, and they are in a mixed state of different OAM modes due to the finite pulse shape of the laser. Moreover, the nonlinear Breit-Wheeler scattering of the vortex  $\gamma$  photon in a strong laser can reveal the phase structures of the vortex  $\gamma$  photons. Our findings emphasize the special role played by the intense laser regarding both generation and detection of vortex  $\gamma$  photons, and call for further investigations.

Meanwhile, traditional photonuclear reactions primarily excite giant dipole resonances, making the measurement of isovector giant resonances with higher multipolarities a great challenge. In our recent works, the manipulation of collective excitations of different multipole transitions in nuclei via vortex  $\gamma$  photons has also been investigated. We develop the calculation method for photonuclear cross sections induced by the vortex  $\gamma$  photon beam using the fully self-consistent random-phase approximation plus particle-vibration coupling (RPA+PVC) model based on Skyrme density



functional. We find that the electromagnetic transitions with multipolarity  $J < m\gamma$  are forbidden for vortex  $\gamma$  photons due to the angular momentum conservation, with  $m\gamma$  being the projection of total angular momentum of  $\gamma$  photon on its propagation direction. For instance, this allows for probing the isovector giant quadrupole resonance without interference from dipole transitions using vortex  $\gamma$  photons with  $m\gamma = 2$ . The electromagnetic transitions with  $J > m\gamma$  are strongly suppressed compared with the plane-wave- $\gamma$ -photon case, and even vanish at specific polar angles. Therefore, the giant resonances with specific multipolarity can be extracted via vortex  $\gamma$  photons. Moreover, the vortex properties of  $\gamma$  photons can be meticulously diagnosed by measuring the nuclear photon-absorption cross section. Our method opens new avenues for photonuclear excitations, generation of coherent  $\gamma$  photon laser and precise detection of vortex particles, and consequently, has significant impact on nuclear physics, nuclear astrophysics and strong laser physics.

Keywords: Breit-Wheeler Process Dressed in Intense Laser Field

HEDP 2023-113

## 强激光场缀饰下的布雷特-惠勒过程

刘世宇; 步志刚; 吉亮亮

(中国科学院上海光学精密机械仪器研究所)

**摘要:** 基于我国正在建设的极端光物理线站, 我们提出了一种新的用于观测光光对撞产生正负电子对的实验方案, 通过高能  $\gamma$  光与 x 光对撞在强激光场的缀饰下产生正负电子对。我们对该过程进行了理论解析计算, 同时与非线性 Breit-Wheeler 过程进行了对比。通过理论计算发现在我们所能提供的实验参数范围内, 激光缀饰 Breit-Wheeler 过程的贡献要远远大于非线性 Breit-Wheeler 过程。

**关键词:** 强场量子电动力学; 正负电子对产生;

HEDP 2023-114

## 强激光等离子体中同质异能素模拟研究

马志国; 王煜森; 杨奕; 李怡馨; 王友敬; 赵凯; 符长波; 何万兵; 马余刚

(复旦大学现代物理研究所 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 20043)

**摘要:** 同质异能素在恒星核合成、核时钟、核电池、清洁核能和  $\gamma$  射线激光等领域发挥着重要作用。随着高功率密度激光技术的发展, 使得“桌面型”激光装置激发或退激发同质异能素成为可能。激光诱导等离子体可以通过光子激发(PE)、库仑激发(CE)、电子跃迁激发(NEET)、电子俘获激发(NEEC)和电子桥激发(EB)等多种机制产生同质异能素。我们利用 PIC 程序来研究激光与纳米线阵列的相互作用, 探索 CE 和 NEEC 机制在激光驱动等离子体产生同质异能素中的作用。研究表明, 激光驱动等离子体可以产生同质异能素, 并可能用于探索期待已久的 NEEC 机制。

**关键词:** 强激光核物理; 同质异能素; 库仑激发; 电子俘获核激发;

HEDP 2023-0125

## Production of Multioriented Polarization for Relativistic Electron Beams via a Mutable Filter for Nonlinear Compton Scattering

马谦益; 唐宇辉; 吴学志

(北京大学)

**Abstract:** We propose a feasible scenario for directly polarizing a relativistic electron beam and obtain an overall polarization in various directions through a filter mechanism for single-shot collisions between an ultrarelativistic unpolarized electron beam and an ultraintense circularly polarized laser pulse. The electrons are scattered over a large angular range of several degrees, and the polarization states of the electrons are connected with their spatial positions after the collision. Therefore, we can employ a filter to filter out a part of the scattered electrons based on their position, and obtain a high degree of overall polarization for the filtered beam. Through Monte Carlo simulations with consideration of spin, polarizations with a degree of up to 62% in arbitrary transverse directions and a longitudinal polarization of up to 10% are obtained for filtered beams with currently achievable laser intensities. We analyze theoretically the formation of the distribution of the scattered electrons and investigate the influence of different initial parameters through simulations to demonstrate the robustness of our scheme. This scenario provides a simple and flexible way to produce relativistic polarized electron beams with various polarization directions.

**Keywords:** beam polarization; quantum description of light matter interaction

HEDP 2023-0127

## Generation of medical radioisotopes through laser induced ( $\gamma, p$ ) reaction

张剑尧

(北京大学物理学院)

**Abstract:** Generally, short-lived medical isotopes and/or their generators are produced in nuclear reactors and cyclotrons. However, considering the environmental concerns and economic costs posed by these traditional approaches, laser-induced photon-nuclear reactions can serve as a potentially supplementary method. In this work, we have used both experiment results and PIC-GEANT4 simulations to demonstrate a promising way of medical isotope production. We have developed a model capable of calculating isotope yields under various laser conditions and acceleration mechanisms. Using this method, it has been shown that a 10 Hz 30 fs 4J laser pulse is well suited to the production of therapeutic amounts of medical radionuclides ( $^{47}\text{Sc}, ^{67}\text{Cu}$ ).

**Keywords:** laser-driven  $\gamma$ -photons, photonuclear reaction, isotope production

HEDP 2023-136

## 高功率太赫兹辐射在气体介质中的反常自聚焦

张心晓<sup>1,2</sup>, 奚婷婷<sup>2</sup>, 廖国前<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 随着高功率太赫兹辐射源的快速发展, 高功率太赫兹辐射在介质中的传播过程成为非线性太赫兹光学、强场太赫兹应用研究中的一个重要基本问题。通过数值求解非线性薛定谔方程的方法, 仿真了高功率太赫兹辐射在弱电离气体中的传播过程, 系统地研究了气体电离率和压强、太赫兹场强和脉冲宽度及初始聚焦  $F$  数等参数对太赫兹辐射时空演化过程的影响。数值模拟发现, 即使入射太赫兹功率远低于常规克尔自聚焦阈值功率, 在一定的参数条件下, 依然可观测到明显的自聚焦现象。物理机制分析表明, 这种“反常”自聚焦现象源于强场太赫兹冲击电离导致的“凹型”横向等离子体密度分布。参数扫描发现, 对于自聚焦效果, 气体电离率、压强、初始聚焦  $F$  数等参数均存在合适的取值范围。在光强足够高的条件下, 太赫兹脉宽越长, 自聚焦效果越明显。该研究对于理解太赫兹波与物质相互作用、开发基于等离子体的太赫兹光学元件提供了重要的参考。

**关键词:** 高功率太赫兹辐射; 自聚焦; 非线性薛定谔方程; 数值模拟

HEDP 2023-140

## 在量子辐射主导的动力学的反射机制下由激光驱动的轻子极化

庄铠鸿

(上海师范大学)

研究了超相对论电子束与反向传输的超强激光脉冲相互作用过程中超相对论极化轻子的产生。虽然激光场的对称性倾向于平均的轻子的辐射偏振为零, 我们证明了通过打破对称性的过程中的反射制度的可行性相当大的辐射偏振。在反射之后, 离轴粒子逃逸具有与发射角相关的偏振的紧密聚焦的光束, 而光束中心处的粒子更有可能在具有不匹配的偏振和动力学运动的激光场中被捕获。同时, 由于在横向平面上的自旋, 通过进动, 沿着电场出现极化。这样, 辐射偏振、自旋进动和激光场聚焦的综合效应形成了出射轻子的角度依赖性偏振。我们的自旋分辨蒙特卡罗模拟表明, 电子和正电子的角度相关极化度高达 20%, 每个种子电子的产量为一对。为在超强激光装置上产生极化高密度电子和正电子射流提供了一种新的途径。

**关键词:** 强场 QED; 反射; 极化电子束;

HEDP 2023-148

## 正负电子自旋极化对平面波背景场下单光子湮灭过程的影响

高允全<sup>1</sup>, 唐琐<sup>1</sup>

(中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 我们对脉冲平面波背景下粒子自旋极化对正负电子湮灭成单光子过程的影响进行了研究。通过散射矩阵理论推导出了自旋极化粒子(电子和正电子)的湮灭概率的表达式并分别在圆偏振背景激光场和线偏振背景激光场中进行了讨论。通过引入密度矩阵理论对电子和正电子的自旋进行了完备的描述。数值结果表明, 一对自旋方向相反(相同)的电子和正电子可以明显提高(抑制)单光子湮灭的概率。我们还推导得到了局部单色场近似和局部恒定场近似的结果, 并用量子电动力学计算得到的精确解对其进行了基准测试。

**关键词:** 自旋; 单光子湮灭; 激光脉冲; LCFA; LMA;

HEDP 2023-149

## 稠密等离子体中的原子过程与核过程

任洁茹<sup>1</sup>, 赵永涛<sup>1</sup>, Dieter H. H. Hoffmann<sup>1</sup>, 魏文青<sup>1</sup>, 徐星<sup>1</sup>, 王兴<sup>1</sup>, 马步博<sup>1</sup>, 张世政<sup>1</sup>, 徐忠锋<sup>1</sup>, 栗建兴<sup>1</sup>, 邓志刚<sup>2</sup>, 齐伟<sup>2</sup>, 王少义<sup>2</sup>, 范全平<sup>2</sup>, 陈勇<sup>2</sup>, 崔波<sup>2</sup>, 贺书凯<sup>2</sup>, 朱少平<sup>2</sup>, 曹柱荣<sup>2</sup>, 周维民<sup>2</sup>, 赵宗清<sup>2</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 曹磊峰<sup>3</sup>, 程锐<sup>4</sup>, 肖国青<sup>4</sup>, 赵红卫<sup>4</sup>

(1. 西安交通大学 物理学院, 西安 710000; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 3. 深圳技术大学 工程物理学院, 深圳 5180000; 4. 中科院近代物理研究所, 兰州 730000; )

**摘要:** 稠密等离子体广泛存在于宇宙星体中, 同时也是惯性约束聚变中物质所必经的物质状态, 实验室稠密等离子体中的原子过程相关研究是天体物理及高能密度物理等领域的基础前沿课题。我们利用 ns 激光轰击金腔驱动 X 射线加热准等容加热泡沫靶制备了状态均匀、大体积、维持时间在 10ns 量级的等离子体 ( $T \sim 17\text{eV}$ ,  $n_e \sim 4E20/\text{cc}$ )。基于该等离子体样品, 我们围绕稠密等离子体中的离子能损与电荷交换过程、光辐射特性以及核反应开展了一系列实验研究, 主要结果如下: 1) 测量了激光加速碳离子穿过等离子体后的电荷态分布, 发现靶密度效应在近临界密度等离子体中起着重要作用, 引起离子有效电荷态以及能损显著增加; 2) 该等离子体样品的温度和 C/O 质量比与白矮星(WD) H1504+65 的大气状态极为相似, 我们得到了等离子体样品的高分辨发射谱, 为白矮星的天文观测谱识别提供了数据参考; 3) 测量了激光加速强流质子束在含硼等离子体中的核反应产额, 单位激光能量下的核反应产额国际领先, 等离子体环境中的核反应产额显著高于冷物质, 且产额随着束流强度非线性提升。此外, 开展了利用激光与近临界密度等离子体相互作用产生高能量大电量电子束实验研究, 电子温度约 12 MeV, 截止能量约 90 MeV, 1MeV 以上电子电量约 90nC。

**关键词:** 高功率激光; 均匀近临界密度等离子体; 能损; 电荷交换; 核反应

HEDP 2023-150

## 黑腔环境中对撞等离子体的大尺度 动力学模拟研究

梁天奕 吴栋 盛正卯

**摘要：**近来，美国国家点火装置在惯性约束聚变中成功实现了燃烧等离子体和点火，但其中仍然有许多基础的物理过程没有得到充分理解，例如黑腔中的动力学过程。单连强研究员等人通过测量中子能谱来研究黑腔中对撞等离子体的动力学过程[Phys. Rev. Lett, 120, 195001, 2018]。但由于黑腔中较大的时空尺度（ $\sim \text{mm}, \sim \text{ns}$ ），传统的 PIC 方法并不能很好地模拟实验过程，而混合模拟方法也因为该实验条件下电子无法很好地满足流体近似而无法使用。因此我们使用隐格式 PIC 代码 LAPINS [Phys. Rev. E, 100, 013207, 2019] 自治地进行包含氘氚核反应的大尺度的动力学模拟。模拟结果表明，金等离子体与氘等离子体对撞过程中会逐渐驱动起无碰撞的静电冲击波。反射的上游离子具有准单能的能谱，通过束靶核反应产生具有不寻常展宽的中子能谱。这与实验的测量数据完全吻合。该工作有助于理解黑腔中对撞等离子体的动力学过程。

**关键词：**大尺度动力学模拟；无碰撞静电冲击波；中子能谱；

HEDP 2023-157

## 激光辅助的双质子放射性

邹有甜、程俊皓、徐杨洋、肖琼、刘思曼、邵福球、余同普

（国防科技大学）

**摘要：**在这项工作中，我们首次使用单参数模型研究了超强激光场条件下原子核的双质子放射性现象。结果表明：超强激光场对发射双质子对的预形成概率几乎没有影响，但可以通过改变穿透率在一定程度上改变双质子放射性的半衰期。由于真实的双质子放射性的隧穿路径较长，在超强激光场条件下，其放射性过程比非真实的双质子放射性更容易受到强激光场的影响。此外，我们还发现激光辅助的双质子放射性对衰变能特别敏感，预形成概率和穿透率的相对变化率随衰变能的增加对激光场呈现不同的响应。同时，还讨论了高斯激光对双质子放射性的时间分辨瞬时修正和时间积分平均修正。最后，我们对单参数模型进行了扩展，预测了双质子放射性候选核的半衰期，并确定了激光辅助双质子放射性的可能实验对象核，为未来在 SEL 和 ELI-NP 等大型激光设备上进行实验研究提供了可能。

**关键词：**强激光场、双质子放射性

HEDP 2023-158

## 通过非线性康普顿散射产生的任意极化光子束

辛宇, 唐琐

(中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 我们研究了在平面波背景下高能电子对极化光子的非线性康普顿散射。散射光子的极化度不仅取决于激光背景场的极化, 还取决于电子的自旋。我们采用了用密度矩阵理论对光子极化和电子自旋进行了全面描述。数值计算结果表明, 通过选择合适的角度, 可以很好地控制散射光子极化与激光背景场极化的关系; 通过调节背景场的椭圆度, 可以获得具有任意极化度和超高极化度的明亮光子源。

**关键词:** 非线性康普顿散射; 电子自旋; 密度矩阵理论; 光子极化; 激光背景场极化

HEDP 2023-163

## 级联的 Compton 散射和 Breit-Wheeler 对产生过程: 极化效应

赵前

(西安交通大学)

**摘要:** 级联 Compton 散射和 Breit-Wheeler (BW) 过程在高能天体物理源和激光驱动的量子电动力学 (QED) 等离子体中起着基础性作用。深入理解这些级联过程中的极化转移对于阐明高能宇宙伽马射线和激光驱动的 QED 等离子体的极化机制至关重要。在本研究中, 我们采用解析截面计算和蒙特卡罗 (MC) 数值模拟来研究电子引发的逆康普顿散射 (ICS) 和 BW 过程级联中的极化转移。理论分析表明, 由于螺旋度转移, 背景光子的极化可以有效地转移到最终态粒子中的第一代级联中。考虑极化背景光子和非极化种子电子, MC 模拟揭示了级联的 ICS 和 BW 过程所产生的依赖粒子能量的特征极化曲线。结果表明, ICS 产生的第一代光子呈现出非衰减的阶梯状极化曲线, 与第一代电子的线性衰减曲线形成对比。有趣的是, 这种极化曲线趋势可以在第二代级联中逆转, 这是由 BW 对的极化曲线所导致。级联过程会因为第二代光子的能量低于 BW 过程的阈值而截止。本研究为级联的康普顿散射和 BW 过程提供了关键的见解, 对于实验室条件下激光驱动的 QED 等离子体的创造和高能天体物理研究的理解和进一步探索具有重要意义。

**关键词:** 级联, 极化效应, Compton 散射, Breit-Wheeler 对产生

HEDP 2023-170

## 基于百 MeV 能区激光伽马源的 232Th 散裂研究

罗凯军

(南华大学)

**摘要:** 光致裂变的实验研究不仅对于理解光致裂变过程本身具有重要意义,而且可以在医用同位素生产、核废物处理和核安全保障等应用领域发挥重要作用。而在高能区对光致裂变进行研究更有利于深入理解核裂变机制、核结构和天体物理核合成过程。在传统加速器上已开展了光致裂变产生同质异能素的实验,但鲜有利用强流激光伽马源驱动的散裂反应研究。本海报主要介绍 100 MeV 能区的光核散裂截面计算结果,以及基于北京大学紧凑型激光等离子体加速器的钍靶光核散裂模拟和初步实验进展。相关研究结果为进一步理解 100 MeV 能区的光核散裂物理机制以及潜在应用开拓提供一定支撑。

**关键词:** 激光伽马源; 百 MeV 能区; 散裂

HEDP 2023-175

## Experimental study of high yield neutron source based on multi reaction channels

Cui Bo<sup>1\*</sup>; Zhang Zhimeng<sup>1</sup>; Qi Wei<sup>1</sup>; Deng Zhigang<sup>1</sup>; He Shukai<sup>1</sup>; Teng Jian<sup>1</sup>;  
Zhang Bo<sup>1</sup>; Wu Di<sup>2</sup>;

(1. Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

e-mail (\*): cuijiali326@126.com)

**Abstract:** Intense short-pulse laser driven neutron source (LDNS) has the characteristics of micro focus, short pulse duration and high fluence. It has attracted extensive attention and interests in the world. LDNS of the laser-ion driven method (pitcher-catcher method) is most possible to achieve high yield and to meet the application requirements.

Our research group had carried out many experiments about LDNS in the XGIII laser facility at the Laser Fusion Research Center of the Chinese Academy of Physics, and hitherto reaches the yield of  $2 \times 10^9$  n/sr using a 147 J picosecond laser with intensity of  $6 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>. Compare with our former experiments, the yield is increased about 10 times by using advanced TNSA target and more efficient convertor.

**Keywords:** laser pulse neutron source; neutron yield; neutron converter; multi reaction channels

HEDP 2023-186

## Systematic study of laser-assisted proton radioactivity and $\alpha$ decay from deformed nuclei

程俊皓; 余同普

(中国人民解放军国防科技大学)

**Abstract:** The ultrahigh-intensity laser has provided a new tool to explore the firmly bound nuclear matter. To obtain achievable quantitative evaluations of the laser influences on proton radioactivity and  $\alpha$  decay, we present a systematic study of the laser-assisted proton radioactivity and  $\alpha$  decay of deformed nuclei based on the state-of-the-art Gaussian laser. The calculated results show that ultrahigh-intensity laser fields affect the decay half-life by changing the penetration probability to some small but finite extent. Moreover, we found that the rate of change of the penetration probability is negatively related to the released energy of proton radioactivity. To obtain a more significant average rate of change in penetration probability, we study the effect of the chirp-laser pulse on the average rate of change in proton radioactivity penetration probability. It is shown that the rational use of a positive chirp is equivalent to increasing the laser intensity by two orders of magnitude. Furthermore, the relationship between laser properties and the average rate of change of the  $\alpha$  decay penetration probability is investigated. The calculations indicate that the shorter the wavelength of the laser pulse is, the larger the average rate of change of the penetration probability.

**Keywords:** laser; proton radioactivity;  $\alpha$  decay

HEDP 2023-206

## 电子随机加速的实验室研究

袁大伟

(中国科学院国家天文台)

**摘要:** 宇宙射线的起源一直是一个未解之谜。天文观测结合理论分析和数值模拟表明:磁重联加速、冲击波加速和随机加速均可以产生高能粒子。作为研究天体物理问题的一种新方法——实验室研究发现:磁重联、激波冲浪加速、一阶费米加速等过程可以将带电粒子有效地加速到相对论能量。然而,实验室研究随机加速机制依然是一种挑战,其主要难点在于如何产生无碰撞湍流等离子体和提升粒子的加速效率上。本报告主要介绍关于电子随机加速的实验室研究最新进展。利用非线性 Weibel 不稳定性的自组织演化过程成功产生了无碰撞湍流等离子体(典型的谱指数为  $k-2.9$ ),并且观测到了呈现幂指数分布的高能电子能谱(E-3),其最大加速能量约为 550 keV。理论模拟表明:该加速电子主要来自于热电子与湍流等离子体内的磁岛发生多次随机碰撞产生的。基于实验发现,我们提出一个自洽的冲击波加速理论并解决了长期困扰大家的粒子注入问题。

**关键词:** 宇宙射线观测, 电子随机加速, 冲击波加速, 非线性 Weibel 不稳定性



HEDP 2023-210

## 线圈靶驱动低 $\beta$ 磁重联中电子加速的模拟研究

于家成<sup>1,2</sup>, 仲佳勇<sup>1,2\*</sup>, 平永利<sup>1,2</sup>, 安维明<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学大学 天文系, 北京 100875; 2. 北京师范大学大学 天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 100875)

**摘要:** 电容线圈靶驱动磁重联是近年来实验室用以研究低  $\beta$  磁重联常见的方案, 其中  $\beta$  是等离子体热压与磁压的比值。地球磁层中经常可以观测到低  $\beta$  磁重联的发生, 其中等离子体的特征  $\beta$  值  $\leq 0.01$ 。本文基于实验参数的背景下, 我们利用 PIC 模拟分析了磁重联过程中的电子加速及其对电子能谱的影响。我们注意到当电流片下降到大约三个电子惯性尺度时, 重联过程中的粒子加速和出流速度迅速增加。我们定量比较了线圈靶驱动的低  $\beta$  重联中电子加速的不同机制, 发现重联过程中电子加速由 betatron 机制主导的, 而平行电场起着冷却作用, 费米加速的影响可以忽略。电流片中被加速的电子导致了电子能谱中的 bump 现象。我们还发现将电子注入电流片是电子在重联中被进一步加速的关键过程。此外我们还模拟了双线圈同向磁场和单线圈的情况, 排除了线圈电流直接将电子加速至非热能量的可能, 线圈电流之间的挤压只能在重联前低效地加速电子。模拟结果为以后的电容线圈靶驱动低  $\beta$  磁重联实验的改进提供了指导意见。

**关键词:** 磁重联; 电子加速; PIC 模拟; Betatron 加速; 电容线圈靶



## 第四部分 高能量密度物理相关领域 前沿交叉科学

HEDP 2023-026

## Three-dimensional Dynamic Optical Trapping using non-iterative computer-generated holography

Fengyu Sun,<sup>1,3,4</sup> Linwei Zhu,<sup>2,\*</sup> Wenpeng Wang,<sup>1,\*</sup> Zhiyong Shi,<sup>1</sup> Yanqi Liu,<sup>1</sup> Yi Xu,<sup>1</sup>  
Qiang Shi,<sup>5</sup> Yuxin Leng,<sup>1,3</sup> Ruxin Li<sup>1,3,\*</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics and CAS Center for Excellence in Ultra-intense Laser Science, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 201800, China.; <sup>2</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; <sup>3</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China ; <sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>5</sup>Yantai Magie-Nano Technology Co. Ltd., Yantai 264006, China )

**Abstract:** Holographic optical trapping enables three-dimensional (3D) particle manipulation based on a traditional iterative algorithm. However, this type of particle manipulation is typically unstable. It is challenging to realize continuous dynamic 3D optical trapping because uniformity and a unique solution cannot be obtained over several time-consuming iterations. In this study, highly uniform 3D multifocal spots were generated via non-iterative algorithms (using a complex amplitude coding method and fan-shaped subzone phase method) to realize stable dynamic optical trapping for 3D particle manipulation. The corresponding experimental results pave the way for potential applications of colloid transport and the micro-assembly of objects in the micro-operation field.

**Keywords:** Optical Trapping, Computer-generated Holography, Non-iterative, Three-dimensional

HEDP 2023-038

## Plasma harmonic generation for highly efficient Breit-Wheeler pair creation

Suo Tang

( College of Physics and Optoelectronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao, China )

**Abstract:** Observation of efficient Breit-Wheeler electron-positron pair creation is one of the main goals for modern-day strong laser-particle experiments. We propose exploring this process by colliding plasma generated harmonics, from currently available laser pulses, with a beam of GeV photons. We show that the creation yield is enhanced for more than one order of magnitude, compared with the yield obtained without high-harmonic generation. The robustness of the yield enhancement is demonstrated by considering multiple interaction parameters and the potential photon source for the upcoming experiments. Moreover, we show that due to the evident field asymmetry in the plasma-generated harmonics, the spin polarization of the created pairs could be as high as 60%.

**Keywords:** plasma harmonic generation, Breit-Wheeler pair creation

HEDP 2023-054

## 基于 PIC 模拟的动态粒子融合和分裂算法研究

董 乾<sup>1</sup>, 余同普<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 在 PIC 模拟中, 宏观粒子代表由众多真实粒子组成的粒子簇。合理地融合和分裂这些宏观粒子簇可以显著提高模拟效率, 减少不必要的计算需求和内存消耗。为此, 我们提出了一种动态粒子融合和分裂算法。对于不同密度区域的宏观粒子, 由 Minkowski 度量函数对其进行划分, 得到区域宏观粒子簇。通过动态改变宏观粒子簇的数量来实现宏观粒子的动态融合和分裂, 从而在不改变系统物理描述的情况下减少宏观粒子的数量。为检验算法的执行效率, 我们比较了算法在三种经典等离子体情况下的性能: 双流不稳定性(1D)、QED 级联(2D)和磁簇射(3D)。结果表明该算法在不改变原有物理现象的前提下, 显著降低了计算时间和内存消耗, 有望进一步提升大规模 PIC 粒子模拟的运算效率。

**关键词:** PIC 粒子模拟; 粒子融合; 粒子分裂; 双流不稳定性; QED 级联; 磁簇射

HEDP 2023-090

## Dose rate Assessment of Spot-Scanning Very High Energy Electrons Radiotherapy Driven by Laser Plasma Acceleration

Jianfeng Lv<sup>1,2</sup>, Xingyi Zhao<sup>1,2</sup>, Jiaxin Liu<sup>1,2</sup>, Di Wu<sup>1,2</sup>, Gen Yang<sup>1,2,3,a</sup>, Minglei Kang<sup>4,a</sup>, Xueqing Yan<sup>1,2,a</sup>

(北京大学)

**Abstract:** Laser plasma accelerators (LPA) can produce very high energy electrons (VHEE) with ultra-short bunch duration, which may facilitate the application of ultra-high dose rate radiotherapy (FLASH-RT) to treat deep-seated tumors. The study aims to evaluate the dose rate delivery by spot-scanning VHEE beams produced by LPA and to discuss the feasibility and beam specifications for FLASH-RT implementation. Various dose rate metrics, including averaged dose rate (ADR), dose-averaged dose rate (DADR), and dose-threshold dose rate (DTDR), are examined in the context of spot-scanning. Theoretical analysis and Monte Carlo simulations are employed to quantify the dose rate distribution for a water phantom and explore the impact of beam parameters. All the beam parameters are based on experimental results. With a lower pulse repetition rate of 5 Hz, ADR can only reach a dose rate in the order of  $10^{(-1)}$  Gy/s, while attaining the FLASH-RT dose rate of 40 Gy/s necessitates the utilization of high-power lasers with a kilohertz working repetition rate. In contrast to ADR, DADR and DTDR remain independent of the scanning path and can reach the ultra-high dose rate surpassing  $10^{14}$  Gy/s at the phantom surface. Meanwhile, the ultrashort electron bunch can be stretched during the scattering within the water, resulting in a dependence of DADR and DTDR on the penetration depth. Both the charge per shot and angular spread are important parameters in dose rate calculations. This investigation offers insights into the practical beam parameters for preclinical applications and supplies guidance for designing the LPAs suitable for future spot-scanning VHEE FLASH-RT.

**Keywords:** laser plasma acceleration, very high energy electron, dose rate

HEDP 2023-098

## 高功率中红外少周期涡旋光的产生研究

奚婷婷

(中国科学院大学 物理科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 高功率中红外少周期涡旋光能够为超快探测和产生孤立阿秒涡旋光提供重要的驱动光源。然而目前通过光学参量放大过程只能得到吉瓦量级的少周期涡旋光。我们理论提出了一种产生高功率中红外少周期涡旋光的方案, 即通过中红外多周期飞秒涡旋光在熔融石英组成的固体薄片组中非线性传输产生具有初始涡旋结构的光谱展宽, 同时自压缩产生少周期脉冲。我们首先通过比较色散长度、光谱展宽长度、自压缩长度和调制不稳定性产生多丝的特征长度, 得到了中红外飞秒涡旋光孤子式自压缩产生少周期涡旋光的解析条件, 包括激光波长的适用条件和薄片厚度的范围。然后通过数值模拟证实了解析条件的适用性。我们还模拟了中心波长为 3 $\mu\text{m}$  的飞秒涡旋光在此薄片组中产生光谱展宽并孤子式自压缩的过程, 3mJ/90fs 的涡旋光压缩产生 2.75mJ/15.1fs 的涡旋光, 转化效率超过 90%。

**关键词:** 中红外少周期激光; 涡旋; 光谱展宽; 自压缩; 固体薄片组

HEDP 2023-105

## 一种基于深度学习的中子半影图像重建方法

宋建军<sup>1</sup>, 郑建华<sup>1</sup>, 陈忠靖<sup>1</sup>, 陈纪辉<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** ICF 中的不对称性是影响内爆性能的重要因素, 通常使用热斑形状来反映不对称性。中子成像系统是诊断热斑形状的重要诊断设备。中子成像系统由孔径和探测器组成, 其孔径包含很多种类, 其中半影孔由于其加工简单和对中子的探测效率高, 而广泛使用。然而, 由于孔径的特点, 包含热斑不对称性的信息被编码在探测器信号中的半影区中。需要使用重建算法将信息反解出来。近来, 深度学习发展迅速, 使得使用训练过的神经网络进行图像重建任务成为可能。本研究发展了一种名为 FFTNN 的神经网络用于中子半影图像重建。数据集是进行网络训练的基础, 传统的辐射流体程序计算时间长, 无法生成大量的热斑分布。为此, 我们提出了一种唯象描述热斑分布的方法。并基于此生成了大量数据, 用于神经网络训练, 得到了相比传统解码算法维纳滤波和 Lucy-Richardson 算法重建性能更加优异的 FFTNN 算法。同时, 本研究测试了不同数据集规模对重建性能的影响, 得到了相对合适的数据集规模。

**关键词:** 中子成像系统; 重建算法; 热斑模拟; 深度学习; 半影成像

HEDP 2023-109

## 非线性康普顿散射中的辐射修正效应

李彦霏；陈月月；K. Z. Hatsagortsyan； C. H. Keitel

（上海师范大学）

**摘要：**我们研究了圆偏振强激光脉冲与电子的非线性康普顿散射过程，并分析了相对论电子在激光场中的自旋动力学特性。研究表明，在强激光场中运动的电子，其自旋会因辐射极化和辐射修正发生改变。其中，单圈图自能修正不仅引起电子在非辐射过程中发生自旋变化，还会由反常磁矩引起自旋旋转。在圆偏振强激光场中，辐射极化的横向分量与激光场同相位，反常磁矩会诱发强场螺旋性传递效应，并产生纵向极化的高能电子。因此，纵向极化度的出现可作为辐射修正的观测信号，从而验证辐射修正对电子磁矩的影响 [1]。此外，当相互作用进入量子辐射占主导的区域内，强辐射的电子会被反射到激光传播方向，弱辐射电子会保持原有运动方向。前者的辐射特性取决于辐射极化效应，而后者取决于辐射修正。由于辐射修正引发的自旋改变和辐射极化的影响符号相反，前向电子携带的负极化特性可作为自能修正的观测信号[2]。因此，我们提出了利用超强激光条件研究 QED 辐射修正效应的全新途径，并为利用强激光产生纵向/横向极化的电子束提供了新思路。

**关键词：**辐射修正；QED 效应；极化电子；螺旋性传递

HEDP 2023-122

## 伽玛光子对撞机最新进展及产业化规划

黄永盛

（中山大学理学院，深圳，518107）

**摘要：**中山大学理学院将在深圳校区建设世界首台伽玛光子对撞机及综合束流设施。该设施将有望首次实验验证光光弹散、双光子 BW 过程以及其他光子新物理的研究。目前已经获得前期设备经费 3800 万，购置了 120MeV 电子加速器一台套，教育部前期验证装置的已经批复。将于 2025 年底建设单条线的高亮度伽玛光源束线。整个装置的建设预计将于 2027 年完成。该装置建设同时，不仅仅可以形成粒子物理、等离子体物理、材料、医学的重要学科综合平台，也可以在高端医疗设备以及装备无损探伤等应用开发，为实现产业化提供技术支撑。

**关键词：**伽玛光子对撞机；量子场论；光子结构；无损探伤

HEDP 2023-162

# Generation and Regulation of Electromagnetic pulses generated by femtosecond lasers interacting with multi targets

Yadong Xia<sup>1,2</sup>, Qiangyou He<sup>1,2</sup>, Di Wu<sup>1,2</sup>, Defeng Kong<sup>1,2</sup>, Dongjun Zhang<sup>3</sup>, Jiaxin Liu<sup>1,2</sup>, Ping Zhu<sup>3</sup>, Wenjun Ma<sup>1,2</sup>, Xueqing Yan<sup>1,2</sup> and Chen Lin<sup>1,2,\*</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, and Key Laboratory of HEDP of the Ministry of Education, CAPT, Peking University, Beijing 100871, China; <sup>2</sup>Beijing Laser Acceleration Innovation Center, Beijing 101407, China; <sup>3</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China.;

\*lc0812@pku.edu.cn )

**Abstract:** Ultra-short and powerful laser interaction with the target will produce intense and wide band electromagnetic pulses (EMPs). In this study, we report EMPs generated by the interactions between 1 PW (30 fs,  $1.4 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>) and 200 TW (30 fs,  $6 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>) femtosecond (fs) lasers with plastic, metal, nanowire-array and gaseous targets. The effects of target configuration on EMP spatial distribution, time domain, frequency domain and radiation energy are thoroughly unveiled. The results indicate EMPs for metal targets show larger amplitudes at varying angles than those from plastic targets, and gaseous targets produce more polarized EMPs. EMPs induced by nanowire-array targets are remarkably enhanced. The peak values of EMPs triggered by PW laser are about 3 to 6 times higher than TW laser, and the corresponding spectra are broader. The study paves a new avenue to regulate EMPs by controlling laser power and targets and also beneficial for electromagnetic shielding design.

**Keywords:** electromagnetic pulses, femtosecond laser, time domain, frequency domain, targets

HEDP 2023-200

## 双束激光产生可控太赫兹

王怡璇

(湖南大学)

**摘要:** 最近,使用传统的双色激光成丝方法获得的太赫兹的质量有所提高。然而,由于等离子体的饱和,太赫兹的质量和效率受到显著限制。我们提出了一种基于光子频率降频的双激光器获得可控太赫兹辐射的新方法。在这种方法中,800nm激光器驱动尾流场(产生空泡),10.6um激光器经历强烈的频率降频,从而产生太赫兹脉冲。所产生的太赫兹脉冲的频率是可调谐的,并且激光减速到太赫兹是大约10%。该方法将驱动尾场和频率降频过程分离,使产生的太赫兹脉冲可控。

**关键词:** 双色光; 太赫兹