



第十一届 高能量密度物理 青年科学家论坛

摘要集

2025年11月21-23日
中国·深圳



X-LAKE FORUM
西丽湖论坛



目 录

一、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.....	1
基于激光等离子体的相对论中红外光辐射与调控	1
强场驱动的极化和涡旋粒子源及其核反应研究进展	2
Laser Wakefield Acceleration of Ions with a Transverse Flying Focus	3
双束激光驱动固体靶产生孤立阿秒脉冲	4
激光驱动尾波场中的原位轴子产生与探测	5
高效率激光尾波级联加速	6
时间展宽型 X 射线二极管诊断技术研究	7
非均匀等离子体中激光尾波场驱动的切伦科夫型相干辐射	8
基于混合式磁透镜的分幅相机时空分辨特性研究	9
飞行焦点脉冲驱动等离子体镜注入的真空激光加速产生的高电量相对论电子	10
强激光与固体靶作用下正电子的产生及其加速	11
强激光与曲壁锥形通道相互作用产生阿秒电子束	12
基于等离子体孔径的涡旋高次谐波产生	13
激光尾场加速中自注入电子的极化动力学研究	14
Isolated Attosecond Pulse Synthesis with Relativistically Oscillating Plasma Gratings at a Solid Surface	15
基于二维 PIC 模拟的 TNSA 机制球冠靶质子加速特性研究	16
超强时空涡旋激光驱动携带横向轨道角动量的孤立阿秒 γ 脉冲产生	17
基于等离子体透镜的强流相对论电子束准直现象的实验观测	18
用于强流粒子束-等离子体相互作用研究的快速三维电磁粒子模拟程序开发	19
基于 QuickPIC 的等离子体尾波加速中束流负载贝叶斯优化	20
微带线电压衰减及动态增益均匀性	21
超快诊断技术及其应用	22
基于等离子体差频产生高强度载波包络相位稳定的单周期中红外结构脉冲	23
基于激光等离子体相互作用的强高阶谐波矢量束的产生	24
激光驱动的极化正电子源新方案研究	25
相对论电子束在无序多孔结构中的超亮伽马射线辐射	26
利用涡旋激光产生阿秒双环结构 X/ γ 射线	27
基于时空涡旋激光调控增强正负电子对的研究	28
相对论轻子束的超快自旋调控	29
CEP 固定的单周期超强中红外结构光产生	30
超强涡旋激光驱动产生携带轨道角动量伽马射线源	31
基于激光加速超短脉冲质子束的材料辐照研究	32
面向肿瘤治疗的激光质子束: 0.1Hz 1PW 激光驱动加速质子源的关键技术与质子输出	33
高次谐波辐照薄靶产生阿秒电子束	34

瞬态光学塑形技术在激光等离子体加速中的应用	35
从中等到超重离子: 跨大质量范围的激光重离子加速研究	36
基于激光尾波场调制的束流相空间诊断	37
北京激光加速创新中心 1 Hz、1 PW 飞秒激光系统研制进展	38
基于 QuickPIC 的光子加(减)速过程数值模拟研究	39
横向磁化等离子体中相对论偏振中红外脉冲的产生	40
基于拉盖尔高斯激光的阿秒伽马辐射调控研究	41
基于 ABP 的束流纵向相空间调制器	42
Attosecond-resolution temporal characterization of relativistic electron bunch based on resonance optical streaker	43
相对论少周期激光驱动瞬态静电波中的等离子体动力学	44
超有质动力注入产生激光尾波场加速的高亮度正电子束	45
基于空气多通腔的飞秒光纤激光器脉冲压缩	46
相对论电子束在等离子体尾波场调制形成三维纳米级微聚束以产生相干极紫外辐射	47
等离子体空泡增强的极化质子束磁涡流加速	48
激光维持等离子体单次曝光亚纳米分辨率压缩光谱成像	49
等离子体加速提高 XFEL 装置光子能量的模拟研究	50
等离子体光学时空调控仿真研究	51
微纳结构靶增强拍瓦激光驱动超热电子及辐射源产生	52
从 GeV/m 到 mm, 芯片上的激光加速研究	53
等离子体尾场中的长距离极化电子加速	54
真实激光对大电量激光尾波加速的影响	55
激光驱动等离子体通道中伽马光子发射与磁岛之间的关联性	56
基于等离子体级联加速的仄秒脉冲产生方案	57
基于主平面的激光尾波场加速器横向相空间诊断分析方法	58
结构光驱动的涡旋伽马辐射与横向尾场调控	59
磁化等离子体中超快太赫兹波的动态自旋极化控制	60
基于条纹管的压缩超快成像系统研究及其应用	61
近红外高斯光到近相对论中红外涡旋光的转化	62
矢量光场高维时空结构的单发表征	63
强激光驱动超快电子发射及其加速	64
基于激光等离子体加速的超高能电子放疗	65
基于锥靶贝叶斯优化的增强型定向激光中子源	66
远场时域辐射模拟程序在等离子体相干辐射模拟中的应用	67
短波长激光与纳米靶相互作用产生高能量、高密度阿秒电子束	68
等离子体莫尔晶格对相对论强激光的导引	69
超短超强激光驱动强流电子束产生与应用研究	70
Betatron 光源相衬成像性能的研究	71

激光驱动的 Betatron 辐射源智能优化研究	72
基于弯曲等离子体通道的可调色散等离子体棱镜与中红外辐射源	73
激光与泡沫靶驱动的高亮度辐射源研究	74
激光尾波加速驱动超快电子衍射研究	75
强场结构光的产生和调控研究	76
强激光中子源及其应用技术研究	77
等离子体尾场加速器束流自解啁啾机制	78
二、惯性约束聚变物理、高能量密度下的物质特性	79
神光 II 综合激光装置及应用	79
惯性约束中的双光束双等离子体波衰变不稳定性	80
强激光场中多电子波包的量子相干辐射	81
ICF 黑腔中无碰撞冲击波驱动的组分分层和超热离子分离	82
含束缚电子效应的等离子体温度弛豫建模	83
有限厚度柱几何瑞利泰勒不稳定性非线性演化	84
驱动不对称性对双壳靶内爆及聚变性能影响研究	85
低相干激光增强的几千电子伏特 X 射线发射	86
激光驱动黑腔辐射源与均匀等离子体产生研究	87
宽带激光中的自交叉束能量转移模拟	88
两束偏振垂直激光的前向受激布里渊散射	89
弱相对论下的俘获粒子不稳定性增长率	90
基于射线追踪模型的束间能量转移模块的开发	91
物理信息神经网络在中心点火内爆的应用	92
横向密度调制诱导的大角度受激拉曼散射	93
飞秒激光照射纳米线阵列产生阿尔法粒子	94
固体锂靶激光极紫外转换效率多参数寻优	95
宽带光实验中热电子时间演化的诊断方案设计	96
束间能量转移中的动理学效应研究	97
多光束通过双等离子体衰减与受激拉曼散射高效产生发散与准直热电子的新机制	98
等离子体 Richtmyer – Meshkov 不稳定性中的临界激波强度	99
惯性约束聚变中汤姆逊散射诊断的粒子模拟	100
宽带激光驱动下 1/4 临界密度附近 SRS 非线性演化研究	101
黑腔中对向传播等离子体冲击波的大时间尺度动理学模拟	102
等容等离子体中高密度热斑点火阈值研究	103
共振密度区间决定双等离子体衰变不稳定性饱和水平并实现对惯性约束聚变中超热电子的预测	104
宽频带激光等离子体相互作用中强度尖峰主导的热电子产生机制	105
激光聚变中受激散射过程诊断研究进展	106
通过先进碰撞模型解开燃烧等离子体中的超热离子之谜	107

中等带宽对激光吸收和受激拉曼侧散的影响	108
多光束强耦合受激布里渊散射	109
一维混合模型用于研究直接驱动内爆中的烧蚀瑞利-泰勒不稳定性	110
直接驱动中 LPI 的大尺度模拟研究	111
基于 FLASH 模拟的宽窄带激光驱动 CH 靶等离子体演化	112
2ω - 3ω 混合激光直接驱动: 能量耦合与内爆稳定性研究	113
基于强激光装置实验的锡高压相结构及参数研究	114
尖顶锥靶增强快电子传输及其在快点火和双锥对撞点火中的应用	115
基于神光Ⅲ原型装置的激光斜入射驱动性能实验研究	116
单发压缩超快恢复振幅成像	117
大频差双色光对激光等离子体不稳定性的缓解	118
平面狭缝预热与辐射烧蚀演化的高时空分辨研究	119
从成丝到分层: 剪刀构型下相对论粒子束与等离子体的不稳定性演化	120
烧蚀层厚度对孤立表面缺陷非线性演化的影响	121
基于机器学习的间接驱动黑腔辐射源预测	122
极高压加载、非阻滞点火物理实验研究	123
双锥对撞点火方案中对撞区等离子体及其驱动的冲击研究	124
双锥对撞点火中转滞阶段的密度演化	125
双锥对撞点火: 大尺度动理学数值模拟	126
冲击波与非均匀等离子体相互作用研究	127
双锥对撞点火方案中的快电子产生及输运研究	128
一种改进的磁化等离子体电子非局域热输运模型	129
双锥对撞点火中交叉束能量转移与临界密度面运动的实验研究	130
三、极强场物理、实验室天体物理、激光核物理、强激光暗物质	131
Spin-Polarized Condensed Plasmoids in Radiation Reaction Dominated Magnetic Reconnection	131
强辐射与极化粒子产生的研究进展	132
超短超强激光应用于核物理领域的研究进展	133
具有时间延迟的两个椭圆极化电场在石墨烯中产生电子-空穴对	134
模拟分析实验室尺度等离子体喷流形貌的影响因素	135
超新星遗迹中磁场演化的实验室模拟研究	136
超强激光驱动非对称磁重联电子耗散区的电子加速	137
真空正负电子对产生的涡旋态性质	138
基于空心等离子体通道同步辐射源的双光子对撞机模型	139
外磁场下 Weibel 不稳定性的产生和演化	140
真空通过多光子机制产生正负电子对的相位依赖性展	141
超强太赫兹场致介质电离损伤研究	142
强辐射与极化粒子产生的研究进展	143

激光固体靶中的线形 Breit-Wheeler 过程——光子偏振效应	144
用于喷流研究的径向 Z 箍缩二维离散薄壳模型	145
多电流片相互作用中的多组分离子加速	146
光子极化对 nIBW 正电子自旋的调控研究	147
从强场电动力学到新物理探索: 高能辐射中的角动量与动力学调控	148
电子与靶直接作用的核激发过程	149
^{229}Th 核钟光核激发与生产	150
磁化喷流中的无碰撞蘑菇不稳定性	151
高效等离子体基强 X 射线激光偏振转换器	152
激波湍流相互作用中电子加速的数值模拟研究	153
基于逆反应动力学 ^{93m}Mo 的产生	154
天体磁场起源的模拟实验研究	155
超强激光中辐射阻尼效应引起的新型粒子俘获机制	156
μ 子非弹性散射激发原子核的理论研究	157
磁场调控激光等离子体	158
拉盖尔激光驱动 (γ, n) 反应生产医用同位素 ^{192}Ir	159
激光驱动磁湍流发电机中能量传递的尺度分解	160
四、基于高能量密度物理前沿交叉学科及应用产业化	161
桌面型激光尾波加速器驱动的逆康普顿光源及微米级高清相衬成像研究	161
大型强子对撞机 7 TeV 质子束流与材料相互作用的耦合模拟研究	162
使用分离迁移物理信息神经网络求解带有多间断的欧拉方程组	163
基于流程的异构诊断设备集成控制技术	164
缺陷等离子体光子晶体中的拉比振荡效应研究	165
基于 AI 视觉识别的中子辐射剂量计算方法研究	166
强激光驱动强流粒子束辐照电子器件的性能退化机制研究	167
基于相位压缩注入机制产生和加速孤立的阿秒电子束	168

一、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

hedp2025-001-new

基于激光等离子体的相对论中红外光辐射与调控

余同普¹

(1. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 相对论性少周期中红外脉冲是强场物理和超快科学的重要研究工具, 但传统非线性光学方法难以产生此类脉冲。这里提出采用啁啾驱动激光或等离子体旋转器的新方案。研究表明, 负啁啾激光脉冲因群速度色散与等离子体蚀刻效应可实现纵向快速压缩, 其中心频率通过等离子体密度调制引发的光子减速效应产生下移, 从而实现快速相对论中红外脉冲辐射。研究还表明, 通过相对论线性偏振激光驱动磁化等离子体还可以实现中红外光源的偏振调节: 在磁化等离子体中, 驱动激光经历光子减速与相对论法拉第旋转, 最终产生强度达 10^{16} W/cm^2 、频谱宽度为 5-25 微米的相对论性偏振可调中红外脉冲。这种新型中红外光源为强场物理、阿秒科学和实验室天体物理等领域将提供全新研究机遇。

关键词: 中红外辐射; 激光等离子体

hedp2025-002-new

强场驱动的极化和涡旋粒子源及其核反应研究进展

栗建兴¹

(1. 西安交通大学, 物理学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 近年来, 超快超强激光大科学装置建设在全球范围飞速发展, 目前实验上已经产生了峰值功率达到 10 PW 量级、峰值光强达到 10^{23} W/cm² 量级、脉冲宽度达到飞秒量级的超快超强激光脉冲, 并基于此在实验室条件下实现了超高能量密度、超强电磁场和超快时间尺度等综合性极端物理条件。利用该激光脉冲与物质相互作用, 可以产生强流、超快、极化和涡旋的伽马光子、正负电子等辐射源。并且, 利用强场非线性效应, 有望操控高能粒子的自旋、轨道角动量。相比于只携带内禀自旋角动量的极化粒子, 涡旋粒子不仅携带自旋角动量, 也同时携带轨道角动量, 在与物质相互作用时, 不仅保留了既有的自旋角动量信息特征, 同时也可以激发显著的轨道角动量效应, 例如, 操控核能级激发、诱发新型反应通道、增大反应截面等等, 在原子物理、核物理、粒子物理、等离子体物理等领域具有重要应用前景。

关键词: 强场物理; 自旋极化; 涡旋粒子源

hedp2025-002

Laser Wakefield Acceleration of Ions with a Transverse Flying Focus

弓正¹

(1. 中国科学院, 理论物理研究所, 北京, 100190)

摘 要: The extreme electric fields created in high-intensity laser-plasma interactions could generate energetic ions far more compactly than traditional accelerators. Despite this promise, laser-plasma accelerators have remained stagnant at maximum ion energies of 100 MeV/nucleon for the last twenty years. The central challenge is the low charge-to-mass ratio of ions, which has precluded one of the most successful approaches used for electrons: laser wakefield acceleration. Here we show that a laser pulse with a focal spot that moves transverse to the laser propagation direction enables wakefield acceleration of ions to GeV energies in underdense plasma. Three-dimensional particle-in-cell simulations demonstrate that this relativistic-intensity "transverse flying focus" can trap ions in a comoving electrostatic pocket, producing a monoenergetic collimated ion beam. With a peak intensity of 10^{20} W/cm² and an acceleration distance of 0.44 cm, we observe a proton beam with 23.1 pC charge, 1.6 GeV peak energy, and 3.7% relative energy spread. This approach allows for compact high-repetition-rate production of high-energy ions, highlighting the capability of more generalized spatio-temporal pulse shaping to address open problems in plasma physics.

关键词: ion acceleration; laser wakefield; flying focus

hedp2025-004

双束激光驱动固体靶产生孤立阿秒脉冲

王心想^{1,2}, 高健^{1,2,3}, 刘峰^{1,2,3}, 李博原^{1,2,3}, 陈民^{1,2,3}, 盛政明^{1,2,3,4}, 张杰^{1,2,3,4}

(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. 上海交通大学, 暗物质物理全国重点实验室, 上海 201210; 4. 上海交通大学 李政道研究所, 上海 200240)

摘 要: 孤立阿秒脉冲为探测原子和分子中的超快电子动力学提供了独特机遇, 因其具有超高分辨率而成为超快计量学中的强大工具。本文提出一种全光学控制方案, 利用两束正交偏振激光脉冲与固体靶相互作用产生孤立阿秒脉冲。具体而言, 采用 P 偏振相对论激光束作为驱动光束激发靶面振荡, 同时利用强度较低的 S 偏振少周期激光束作为种子光束经靶面反射后产生高次谐波。PIC 模拟表明: 通过角度选择有限范围内的谐波, 无需种子激光的载波包络相位稳定或附加谐波光谱滤波, 即可产生 110 阿秒的孤立脉冲。该方案基于现有超强激光技术, 为产生高亮度孤立阿秒脉冲提供了一种实用且高效的途径。

关键词: 阿秒脉冲; 高次谐波; 超短超强激光; 相对论振荡镜; 数值模拟;

hedp2025-006

激光驱动尾波场中的原位轴子产生与探测

安相炎^{1,2,3}, 陈民^{*2,3}, 刘江来^{†,1}, 摆展⁴, 吉亮亮⁴, 盛政明^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3}

(1. 上海交通大学, 暗物质物理全国重点实验室, 李政道研究所, 上海 201210; 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; 4. 中国科学院, 上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 我们提出了一种基于激光等离子体尾场的原位轴子产生与探测方案, 利用 Primakoff 过程实现轴子生成。尾场中的强电磁场 ($\geq 10^{11}$ V/m) 能够使轴子产生率相比传统的“光穿墙” (LSW) 实验提高约两个数量级。通过将 LSW 实验中的轴子产生阶段替换为激光-尾场相互作用, 并结合当前可实现的相互作用长度, 可以将轴子-光子耦合常数的约束提升至 $g_{a\gamma\gamma} \sim 10^{-12} \text{GeV}^{-1}$ 。此外, 所产生的轴子能够在背景场中重新转化为光子, 形成具有独特偏振、频率和横向模结构的轴子再生电磁场 (AREM)。这为通过从背景激光与等离子体场中分离、探测 AREM 信号来开展轴子探测提供了一种新途径。

关键词: 激光等离子体尾场加速; 轴子; 类轴子粒子; 粒子网格模拟

hedp2025-008

高效率激光尾波级联加速

李博原¹, 祝昕哲¹, 温昕辉¹, 刘峰^{1,2}, 闫文超^{1,2}, 陈民^{1,2}

(1. 上海交通大学, 物理与天文学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学, 暗物质物理全国重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 超短超强激光与低密度等离子体相互作用可以激发等离子体尾波, 加速电子等带电粒子。激光尾波加速具有超高加速梯度 ($\sim 1 \text{ GV/cm}$), 可以在极短距离内将电子加速到 GeV 能量, 提供了一种紧凑型的加速器方案。然而, 为了获得更高的电子加速能量, 激光尾波加速必须克服激光散焦、电子束失相以及激光能量损耗等问题。目前认为, 单级激光尾波加速可以获得能量 $\sim 10 \text{ GeV}$ 的电子, 想要获得更高的加速能量, 则依赖于多级的级联加速。本次报告将介绍上海交通大学激光尾波加速团队近年来开展的激光尾波级联加速研究进展, 我们的研究结果证明了利用“直+弯曲”等离子体通道的方案, 可以使尾波电子获得二次加速, 并且级联效率超过 50%, 为未来面向 TeV 高能电子加速的多级级联提供了一种有效途径。

关键词: 超短超强激光; 尾波加速; 级联效率; 等离子体通道

hedp2025-013

时间展宽型 X 射线二极管诊断技术研究

杜卓铭¹, 蔡厚智¹, 罗秋燕¹, 刘进元¹, 向利娟¹

(1. 深圳大学, 物理与光电工程学院, 广东深圳 518060)

摘 要: X 射线二极管(X-ray diode, XRD)具有百皮秒的时间分辨能力, 是激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)实验中辐射能流的主要诊断仪器, 但随着 ICF 研究的深入, 要求 XRD 的时间分辨率优于 10 ps。为了提高时间分辨率, 对基于电子束时间展宽的 XRD 诊断技术进行了研究。对电子束时间展宽技术进行了研究, 阴极偏置电压为-3 kV、阴极脉冲斜率为 3.6 V/ps 时, 电子束时间展宽倍率为 10:1, 可采用曲线脉冲激励光电阴极提高时间展宽一致性。优化了阳极电子探测器结构设计、对时间分辨特性开展了研究。微通道板 (microchannel plate, MCP) 输出面偏置电压为 -700 V、放电电容为 10 pF 时, 阳极电子探测器的时间分辨率为 68 ps。建立了实验平台对样机时间分辨率进行测量。MCP 输出面偏置电压为-700 V 时, 测得阳极电子探测系统时间分辨率为 256 ps。加载阴极激励脉冲时, 时间展宽 XRD 时间分辨率被提高至 19 ps, 电子束时间展宽倍率约 13:1。提出了基于电子束时间展宽倍率及 MCP 增益函数的输入信号重构算法, 重建信号准确率可达 95%。

关键词: 惯性约束核聚变; 超快诊断; X 光二极管; 时间展宽; 时间分辨率

hedp2025-014

非均匀等离子体中激光尾波场驱动的切伦科夫型相干辐射

华津宇¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 通过使用二维粒子模拟方法, 从理论和数值上研究了在具有纵向上升密度分布的等离子体薄片激发的激光尾波场的演化及其相关辐射。辐射沿激光传播方向呈圆锥形分布, 这是由于尾波场的相速度超光速, 通过切伦科夫型机制产生的。从模拟中发现了辐射强度与激光聚焦光斑尺寸之间的关系, 该关系与理论相符。在中等激光强度下, 辐射光谱表现为电子等离子体频率的谐波。当尾波场在高度非线性区域被激发时, 辐射光谱呈现出超连续谱特征, 可延伸至电子等离子体频率的十几倍。我们的结果可用于优化实验参数, 以增强来自激光尾波场的辐射产生。

关键词: 太赫兹辐射; 激光等离子体尾场; 切伦科夫辐射

hedp2025-016

基于混合式磁透镜的分幅相机时空分辨特性研究

罗秋燕¹, 卓铭¹, 刘进元¹, 向利娟^{*1}, 蔡厚智^{*2}

(1. 深圳大学, 物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室; 2. 深圳市光子学与生物光子学重点实验室, 广东深圳, 518060)

摘 要: 脉冲展宽型 X 射线分幅相机是激光核聚变研究的重要超快成像诊断工具。为了提高相机的时间分辨率及画幅尺寸, 提出了采用双脉冲对向传输激励微带阴极; 为了提高相机空间分辨率, 设计了基于混合式磁透镜的脉冲展宽分幅相机, 混合式磁透镜由两个短磁透镜和四个长磁透镜构成。采用蒙特卡罗方法、有限差分法和有限元法建立了相机理论模型, 研究了相机时间、空间分辨特性。理论研究结果表明, 当阴极脉冲斜率为 3 V/ps 时, 采用单脉冲激励, 相机时间分辨率为 8 ps, 沿脉冲方向画幅尺寸为 1.5 mm; 采用双脉冲激励, 时间分辨率提高至 4.3 ps, 同时沿脉冲方向的画幅尺寸仅受限于阴极微带长度 60 mm。对于空间分辨特性方面, 相机轴上点最清晰, 随着离轴距离的增大, 相机空间分辨率逐渐降低, 阴极成像面直径 60 mm 范围内空间分辨率优于 46.84 lp/mm, 空间分辨率差异为 1.82%。研究了沿轴方向成像平面位置对空间分辨率差异的影响, 当离轴 15 mm 最清晰时, 阴极成像面直径 60 mm 内, 空间分辨率优于 47.16 lp/mm, 空间分辨率差异为 1.58%。研究了相机成像图像相对畸变, 在离轴 30 mm 处 X 方向相对畸变为 1.50%, Y 方向上相对畸变为 1.55%。

关键词: 惯性约束聚变; 分幅相机; 脉冲展宽; 时空分辨率; 混合式磁透镜

hedp2025-017

飞行焦点脉冲驱动等离子体镜注入的真空激光加速产生的高电量 相对论电子

刘佳鑫¹, 庞泽月¹, 王何翰林¹, 陈自宇^{*1}

(1. 四川大学物理学院高能量密度物理与技术 重点实验室, 四川成都 610064)

摘 要: 强激光在短距离内产生的相对论电子束在高能量密度物理和医学技术中具有重要应用。近年来, 利用等离子体镜注入的电子真空激光加速引起了广泛的研究。然而, 一个长期存在的问题尚未解决, 即由于速度失配, 电子不可避免地会脱离激光加速相位。本文提出利用飞行焦点激光 (flying focus lasers) 来克服这一限制。通过三维粒子模拟, 我们发现飞行焦点激光在高能电子的电量产额上比传统高斯激光提升了一个数量级。这一提升源于两个关键因素: (1) 飞行焦点脉冲峰值强度的亚光速传播速度使更多电子能保持在纵向有质动力的加速区域; (2) 与高斯激光相比, 飞行焦点激光能够在更长距离内维持更强的纵向有质动力。

关键词: 超短超强激光; 电子真空激光加速; 飞行焦点激光

hedp2025-034

强激光与固体靶作用下正电子的产生及其加速

张德生¹

(1. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875)

摘 要: 本工作基于 EPOCH 对强激光与等离子体相互作用过程进行了数值模拟研究。该方案可有效实现正电子的产生及其后续真空加速过程。初步模拟结果表明, 通过利用下一代的超强超短激光技术, 有望获得纳库量级、能量在数 GeV 量级且具有较小发散角的高品质正电子束。该研究为在小型化平台上获得高性能正电子束提供了一种潜在的新方案, 对未来实验室高能物理、天体物理研究及新型加速器应用具有积极意义。

关键词: 激光等离子体相互作用; 强场物理; 真空加速

hedp2025-038

强激光与曲壁锥形通道相互作用产生阿秒电子束

张敏¹, 张翠文¹, 张德生¹, 桑海波¹, 谢柏松¹

(1. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875)

摘 要: 通过二维粒子模拟 (PIC) 研究发现, 采用 p 偏振激光照射弯曲壁锥形通道可获得具有高密度、高能量和小发散角的阿秒电子束。研究表明, 通道壁中的部分电子在横向电场作用下被拉入通道并直接加速, 同时通过激光有质动力沿锥形壁稳定运动。结果表明: 弯曲壁锥形通道的聚焦效应强于传统平壁锥形通道, 阿秒电子束的密度提升近 175%, 最高能量提高 36%。研究还发现电子束品质受锥形通道壁几何形状影响。值得注意的是, 特定双曲几何结构的弯曲壁锥形通道产生的阿秒电子束在离开通道后, 其能量仍能在约 10 个激光周期内维持在峰值附近。

关键词: 强场物理; 激光等离子体相互作用; 粒子数值模拟; 阿秒电子束; 锥形通道

hedp2025-040

基于等离子体孔径的涡旋高次谐波产生

李润泽¹, 闫文超^{1,3}, 易龙卿^{1,2,3}

(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. 上海交通大学李政道研究所, 上海 201210; 3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 当高功率飞秒圆偏振激光脉冲照射在固体箔片上的微米级孔径时, 能够驱动表面等离子体振荡, 在衍射光中产生涡旋高次谐波。然而, 该机制迄今仅在理想条件下进行过理论研究。本工作通过数值模拟研究了更接近实际的物理情境, 重点分析了激光以倾斜入射方式照射靶面以避免反射光损伤光学元件的场景。通过系统调节激光入射角、靶厚和等离子体密度标长等参数, 研究发现增大倾斜入射角、减薄靶材厚度及提高激光对比度均可有效提升谐波转换效率。但在非理想条件下, 产生的谐波光束可能同时包含拉盖尔-高斯模(涡旋)与非拉盖尔-高斯模分量。研究通过发散角差异成功实现了模态分离——涡旋分量具有更小的发散角。此外, 我们还计算分析了不同条件下谐波的发散角特性及涡旋高次谐波的拓扑荷谱。这些纯净的高阶谐波拉盖尔-高斯模可通过滤波提取, 为基础科学和应用物理研究提供新型光源。本研究为未来实验设计提供了重要参考依据。

关键词: 高功率激光; 涡旋光; 高次谐波

hedp2025-043

激光尾场加速中自注入电子的极化动力学研究

李晓锋¹

(1. 中国科学院, 上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 激光尾波场加速 (LWFA) 由于能在非线性空泡区域产生 GeV 能级的准单能电子束而取得显著进展, 这一突破不仅推动了实验研究的快速发展, 更引发了广泛关注。为有效利用和发展激光等离子体加速技术, 科研人员持续优化粒子束的多种特性, 如能量散度、电荷量、脉冲宽度和发射度等。然而, 基于等离子体加速机制下的粒子极化特性却鲜有研究。

当超强激光脉冲在欠稠密等离子体中传播时, 激光轴附近的电子被横向推开, 并在激光后方形成空泡区域。部分电子在空泡尾部被捕获后可获得加速。根据电子运动轨迹的差异, 自注入过程可分为横向注入与纵向注入两类: 对于横向注入情形, 被捕获电子初始位于空泡区的横向边缘, 其自旋主要受空泡场影响; 而对于纵向注入情形, 被捕获电子初始位于激光轴附近, 其自旋主要受激光场调控。此外, 考虑到通过专用激光形成的预极化等离子体难以与加速激光完美对准, 电子自旋方向与加速激光轴存在一定夹角。研究还探讨了初始自旋取向对 LWFA 中加速电子束最终极化状态的影响, 特别是在横向与纵向自注入模式下的表现。这些研究为调控 LWFA 中电子束的极化特性提供了重要理论基础。

关键词: 激光尾场加速; 极化电子; TBMT 方程; 自注入机制

hedp2025-044

Isolated Attosecond Pulse Synthesis with Relativistically Oscillating Plasma Gratings at a Solid Surface

张浩杰¹

(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)

摘 要: We propose a scheme to generate isolated attosecond pulses at different angles via the interaction of relativistic laser pulses with a solid target. Specially, two p-polarized laser pulses with frequency chirp drive oscillating plasma gratings at the solid surface, while an s-polarized laser seeds high-order harmonic generation from the gratings. Unlike conventional harmonics generated from oscillating mirrors, gratings modify the emission angles of harmonics across different orders, and this modification can be controlled by tuning the chirp of one driver pulse. Leveraging this emission-angle control, we employed instant spectral synthesis scheme to generate isolated attosecond pulses two different directions, and verified their feasibility via two-dimensional particle-in-cell simulations. Our scheme highlights the potential of ultrashort ultraintense lasers for applications in plasma metasurface fabrication and relativistic attosecond pulse generation.

关键词: particle-in-cell simulation; high-order harmonics; isolated attosecond pulse

hedp2025-046

基于二维 PIC 模拟的 TNSA 机制球冠靶质子加速特性研究

易霖¹, 周熙晨¹, 王建¹

(1. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海, 201800)

摘要: 在基于靶法线鞘层加速 (TNSA) 机制的质子加速研究中, 靶材结构设计是提升质子束准直性与加速效果的关键。球冠靶凭借独特聚焦特性, 可显著改善传统平面靶质子束发散问题, 为激光核聚变提供性能更优的质子源。本文采用相对论光强为 5.6 的超强激光, 通过二维粒子模拟 (PIC) 方法, 对靶半角宽度 60° 的球冠靶开展质子加速特性研究, 并从鞘层电场演化角度揭示其聚焦机制。在激光波长 1053 nm、脉宽 1 ps 的实验参数下, 系统分析了质子束在不同空间位置的发散规律, 结果表明: 当探测器置于 $70\ \mu\text{m}$ 处时, 球冠靶的质子束聚焦效果最优, 该结论为 TNSA 机制下激光核聚变质子源的靶材参数优化与探测布局设计提供了理论依据。

关键词: TNSA; 质子加速; 球冠靶

hedp2025-048

超强时空涡旋激光驱动携带横向轨道角动量的孤立阿秒 γ 脉冲产生

孙丰钰¹, 王文鹏¹

(1. 中国科学院, 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 首次探索了利用反射式大尺寸光学元件 (包括反射式闪耀光栅、柱面镜和相位板) 实现超强 STOV 激光的可行性方案。利用这种相对论性 STOV 激光实现了相对论孤立阿秒电子片的锁相加速。三维粒子模拟结果表明, STOV 激光独特的相位奇点分布实现了电子束的时空调控: 在纵向方向上实现了电子束的锁相加速; 在横向方向上, STOV 激光的横向电场实现了电子束的聚焦和收缩。最终获得了能量约为 GeV 级、持续时间约为 600 阿秒的孤立准直电子片。此外, 当 STOV 激光被平面靶反射时, 电子脉冲与反射激光前沿碰撞, 触发了非线性康普顿散射过程, 并产生了孤立的超短 (约 600 阿秒)、高亮度 (在 1 MeV 处约为 3×10^{24} 光子/s/mm²/mrad²/0.1%BW) 伽马射线脉冲。该方案克服了传统高斯激光驱动辐射源的缺点, 例如发散角大以及需要复杂的双激光系统。它还将横向轨道角动量引入阿秒 γ 射线脉冲, 为超快成像、核激发和探测等应用开辟了新途径。

关键词: 时空涡旋激光; 电子加速; 非线性逆康普顿散射; 伽马辐射产生

hedp2025-051

基于等离子体透镜的强流相对论电子束准直现象的实验观测

蓝婕婕¹, 胡章虎*¹, 邓志刚², 齐伟², 赵全堂³, 周维民², 王友年¹

(1. 大连理工大学 物理学院, 辽宁大连 116024; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 3. 中国科学院近代物理研究所 低能粒子束技术中心, 甘肃兰州 730000)

摘 要: 激光驱动的电子加速器具有紧凑的加速结构, 在自由电子激光、激光驱动的核物理以及实验室天体物理等领域具有广泛应用。目前, 基于强激光的加速机制可以分为两类: 利用激光与等离子体相互作用激发尾波场进而将电子加速到相对论能量的间接加速机制 (如激光尾波场加速); 利用激光本身的强电磁场加速电子的直接加速机制 (如激光直接加速)。受限于束流负载效应, 间接加速机制产生的电子束电荷量最高仅能达到百皮库量级。而直接加速机制可以产生百纳库甚至微库量级的强流电子束, 但该机制产生的电子束发散角较大。因此, 通过激光-等离子体加速同时获得大电量和小发散角的电子束具有一定的挑战。基于先前在近代物理研究所高能电子成像实验平台上观察到的等离子体透镜对传统射频直线加速器产生的低电量相对论电子束的聚焦效应, 我们进一步提出采用等离子体透镜来准直激光直接加速机制产生的强流相对论电子束。相关验证实验已在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的星光 III 装置上完成, 本文将对实验结果进行简要介绍。

关键词: 强流相对论电子束; 电子束-等离子体相互作用; 等离子体透镜; 电子束准直; 电子束聚焦

hedp2025-052

用于强流粒子束-等离子体相互作用研究的快速三维电磁粒子模拟程序开发

李浩源¹, 胡章虎¹, 徐汪文¹, 惠得轩¹, 蓝婕婕¹, 刘一诺¹, 王友年¹

(1. 大连理工大学, 物理学院, 辽宁大连 116024)

摘 要: 随着激光技术的飞速发展, 强激光与等离子体相互作用在众多领域有着非常重要的应用, 例如, 激光驱动的惯性约束核聚变, 实验室天体物理以及新型激光辐射源等。在激光-等离子体相互作用的过程中, 电子通常会作为激光的能量载体与等离子体相互作用, 并激发出一系列集体效应, 包括束流的聚焦, 能量沉积以及多种等离子体微观不稳定性。考虑到电磁场对束流-等离子体系统演化的影响, 对其进行全面的三维建模具有重要意义。然而, 这会伴随巨大的计算负担, 因此发展适用于强流粒子束-等离子体相互作用研究的快速三维模拟程序至关重要。在本工作中, 以原有二维模拟程序 IBMP 为基础, 发展了一套三维并行电磁粒子模拟程序——IBMP3D。该程序从计算负载和开销两个层面进行了优化。一方面引入了快速电流统计算法来降低程序的整体计算量。另一方面, 设计了一种适配于并行粒子模拟程序的动态数组数据结构, 并基于此提出了一种粒子计数排序算法来提高程序的性能。此外, 还对 IBMP3D 进行了基准性测试, 通过与开源程序 EPOCH 和 WarpX 进行对比, 在模拟结果基本一致的情况下, IBMP3D 的计算时间显著降低。

关键词: 强流粒子束-等离子体相互作用; 粒子模拟程序; 动态数组数据结构; 排序算法; 基准性测试

hedp2025-054

基于 QuickPIC 的等离子体尾波加速中束流负载贝叶斯优化

徐志豪¹, 安维明^{*2}, 周琪¹, 王海南¹, 孟维宇¹, 唐榕¹, 田悦然¹

(1. 北京师范大学物理与天文学院, 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 100049)

摘 要: 在等离子体尾波加速 (PWFA) 中, 驱动束通过等离子体时会激发尾波场, 尾随束则在该尾波场中获得能量。为了实现高效的能量传输, 同时保持尾随束的低能散和低发射度, 通过优化束流负载效应可以有效地改善束流品质。我们提出了一种基于 QuickPIC 的贝叶斯优化框架, 用于在非线性的尾场中优化 PWFA 的束流负载效应。通过将束流纵向电流分布参数化为带约束的分段线性函数, 构建以加速场、减速场的均匀性为核心的目标函数, 引入并改进贝叶斯代理模型实现高效参数空间探索。贝叶斯优化作为一种黑盒优化方法, 通过动态平衡勘探与利用策略, 能够在有限的模拟次数内快速收敛到最优解。数值模拟结果表明, 优化后的束流负载分布能有效提升尾波场的整体均匀性与稳定性, 改进后的优化算法优化效率提升了 7.6 倍, 优化结果提升了 4.65 倍。本研究不仅为 PWFA 中的束流优化提供了有效的解决方案, 也验证了改进后的贝叶斯优化算法在处理复杂等离子体加速问题中的巨大潜力。

关键词: 等离子体尾波加速; 粒子网格模拟; 束流负载; 贝叶斯优化

hedp2025-056

微带线电压衰减及动态增益均匀性

陈轩¹, 姚方鼎¹, 罗秋燕¹, 杜卓铭¹, 刘进元¹, 向利娟^{*1}, 蔡厚智^{*2}

(1. 深圳大学, 物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室; 2. 深圳市光子学与生物光子学重点实验室, 广东深圳 518060)

摘 要: 门控分幅相机工作过程中, 脉冲传输衰减效应会削弱微通道板 (Microchannel Plate, MCP) 微带线的增益, 进而影响相机性能。基于电压脉冲在 MCP 微带线上的传输衰减模型, 对 MCP 的增益均匀性进行了 CST 仿真模拟。所用微通道板直径为 56 mm, 沉积在微通道板上的每条微带线阴极宽度为 8 mm。模拟结果表明, 电压脉冲在 MCP 微带线传输时, 其幅值呈指数衰减形式。峰值 -2 kV, 半高宽为 200 ps 的电压脉冲在微带线传输时其电压衰减至原始值的 88%, MCP 增益下降 2.8 倍, 而垂直于脉冲传播方向的增益变化在 5% 以内。对理论模型进行实验测试, 结果表明: 沿脉冲传播方向, 增益下降约 3.6 倍; 而垂直于脉冲传播方向的增益变化在 10% 以内。另外, 模拟了不同渐变线长度对不同半高宽电压脉冲幅值衰减的影响。结果表明当微带线长度大于 6 cm 时电压衰减斜率趋于平缓。在实际工程应用中应尽量避免选用长度小于 6 cm 的渐变线进行阻抗匹配。

关键词: 超快诊断; 微通道板; 增益均匀性; 脉冲衰减; CST

hedp2025-057

超快诊断技术及其应用

蔡厚智¹, 向利娟*¹, 罗秋燕¹, 杜卓铭¹, 陈轩¹, 欧思凯¹, 刘进元¹

(1. 深圳大学, 物理与光电工程学院, 广东深圳 518060)

摘 要: 惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 物理过程持续时间短, 某些关键过程如内爆热斑, 仅持续约 100-200 ps。精细诊断此类过程, 要求诊断设备的时间分辨率优于 10 ps, 而目前分幅相机及 X 射线二极管等重要诊断设备的时间分辨率约 100 ps。为了提高时间分辨率, 开展了电子束时间展宽技术研究, 该技术对输入信号产生的光电子束团进行时间宽度展宽, 实现电子束的时间放大, 然后使用具有时间分辨的探测器对展宽后电子束进行取样, 从而提高时间分辨率。将电子束时间展宽技术应用于分幅相机, 研制了时间展宽 X 射线分幅相机, 测得其时间分辨率为 4 ps、空间分辨率为 10 lp/mm, 并对其时间分辨率特性、空间分辨特性及快门传输效应进行了研究。此外, 研制了时间分辨率为 19 ps 的时间展宽 X 射线二极管, 发展了超快 CMOS 芯片分幅成像及条纹管压缩超快成像等技术。

关键词: 惯性约束聚变; Z-pinch; 超快诊断; 分幅相机; 电子束时间展宽

hedp2025-058

基于等离子体差频产生高强度载波包络相位稳定的单周期中红外结构脉冲

耿盼飞^{1,2}, 吴益鹏^{*1,2}, 樊志鑫^{1,2}, 陈民^{1,2}, Warren B. Mori³, Chan Joshi³, 张杰^{1,2}

(1. 上海交通大学, 暗物质物理全国重点实验室, 李政道研究所, 上海 201210; 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. 加利福尼亚大学洛杉矶分校, 洛杉矶 90095 美国)

摘 要: 涡旋光束与矢量光束因其螺旋相位前沿与空间结构化偏振特性, 在光学与光子学领域具有重要应用。然而, 在中红外 (mid-IR) 波段实现具备相对论强度、单周期及载波包络相位 (CEP) 稳定的此类光束仍面临巨大挑战。我们理论提出并数值验证了一种新型方案, 可在实验可行条件下产生高强度、单光学周期、CEP 稳定的中红外涡旋与矢量光束, 能量转换效率高达 10%。该方案采用两束波长略有差异的强近红外圆偏振高斯光束入射到固体凹面靶上, 通过等离子体振荡镜驱动的差频产生 (DFG) 过程, 实现 CEP 稳定的中红外脉冲输出。自旋角动量 (SAM) 向轨道角动量 (OAM) 的转换及其复杂耦合赋予了中红外光束涡旋特征与矢量化偏振结构。此外, 具有多重旋转对称性的结构靶能够进一步调控中红外光束的 OAM 和偏振态。该方案所产生的中红外结构光束为探索激光-物质相互作用开辟了新的研究途径。

关键词: 激光等离子体相互作用; 差频产生; 中红外光; 涡旋和矢量束

hedp2025-059

基于激光等离子体相互作用的强高阶谐波矢量束的产生

耿盼飞^{1,2}, 吴益鹏^{*1,2}, 樊志鑫^{1,2}, 陈民^{1,2}, 易龙卿^{1,2}, 远晓辉^{1,2}, 盛政明^{1,2}, Warren B. Mori³, Chan Joshi³, 张杰^{1,2}

(1. 上海交通大学, 暗物质物理全国重点实验室, 李政道研究所, 上海 201210; 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. 加利福尼亚大学洛杉矶分校, 洛杉矶 90095 美国)

摘要: 矢量光束以其空间变化的偏振态及复杂的自旋-轨道角动量 (SAM – OAM) 耦合特性而著称, 在多个领域中具有广阔的应用前景。尽管在可见光与红外波段已能产生矢量光束, 但在短波长的极紫外 (EUV) 或软 X 射线 (SXR) 区域生成高强度矢量光束仍面临巨大挑战。本文系统研究了由相对论强度激光等离子体相互作用产生高次谐波矢量光束的机制。通过理论分析与三维粒子网格 (PIC) 模拟, 我们首次对这一过程中的关键物理机制进行了全面阐释。研究表明, 谐波矢量光束的偏振态与轨道角动量可由入射光的拓扑电荷完全控制。得益于矢量光束的独特性质, 无论采用少周期驱动脉冲, 还是在多周期驱动条件下引入矢量化偏振门控技术, 均可获得具有螺旋波前和空间变化偏振分布的高强度孤立阿秒脉冲。该研究为在 EUV 与 SXR 波段实现高强度/高功率结构光的轨道角动量与偏振调控开辟了新方向, 并为光与物质相互作用研究提供了新的物理平台。

关键词: 激光等离子体相互作用; 高次谐波产生; 矢量束

hedp2025-060

激光驱动的极化正电子源新方案研究

李彦霏¹

(1. 西安交通大学, 核科学与技术学院, 陕西西安 710049)

摘要: 极化正电子源是高能物理对撞机、物质反物质研究等诸多前沿领域的核心需求。然而, 传统极化正电子源的产生方法存在系统复杂、成本高昂且束流品质难以进一步提升的挑战。发展紧凑型、高极化度的新型极化正电子源, 已成为该领域的前沿研究课题。超强激光与物质相互作用为台面尺度下产生高极化粒子束提供了创新性途径。本报告将系统介绍我们针对“激光驱动极化正电子源”这一挑战性目标所开展的系列研究。我们聚焦于“激光-电子对撞产生正电子”的级联过程(即非线性康普顿散射与非线性 Breit-Wheeler 过程), 通过系统解决级联过程中自旋与偏振动力学的数值模拟难题, 发展了电子辐射自旋极化的动力学描述方法, 实现了光子偏振的全关联建模, 完成了激光驱动纵向极化正电子源的全流程数值验证, 并系统性研究了“电子-光子-正电子”的极化传递链条与机制, 为紧凑型极化正电子源的实现提供了理论与数值支撑。在最新研究中, 我们开展了初步的实验探索; 在理论研究方面提出了极化源产生的新备选方案。

关键词: 超强激光; 正电子源; 自旋极化; 正负电子对产生

hedp2025-062

相对论电子束在无序多孔结构中的超亮伽马射线辐射

陈鹏¹, 黄太武¹, 蒋轲¹, 周沧涛¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘要: 伽马射线指能量高于 0.1 MeV 的光子辐射, 在实验室天体物理研究、致密物体成像、化学成分识别及医用同位素生产中有着广泛应用。相对论电子束与材料的相互作用是产生高能伽马射线的一个重要方法。这里我们提出了一种通过相对论电子束与无序多孔泡沫相互作用来产生高能伽马射线的新方法。将相对论电子束注入无序多孔泡沫中, 电子束在其中被聚焦, 产生通道效应, 并辐射出高能光子。三维粒子模拟结果表明, 初始能量为 5 GeV、电荷量为 2 nC 的电子束在穿过无序多孔材料时, 可产生高亮度的伽马辐射, 能量转换效率可达 40%, 发散角的半高全宽为 2.4×2.2 mrad。峰值亮度达到 1.2×10^{27} photons/(s · mm² · mrad² · 0.1%BW)。这项研究表明, 单束电子束即可实现高效的伽马射线产生, 且具有高效性、易操作性和鲁棒性。该方法为紧凑型伽马射线光源提供了新的可能性, 推动高能伽马射线在各个领域的应用和发展。

关键词: 相对论电子束; 微结构; 多孔泡沫; 伽马射线; 超通道效应

hedp2025-067

利用涡旋激光产生阿秒双环结构 X/ γ 射线

陆俊谦¹, 鞠立宝^{*1}, 吴思忠¹, 周沧涛¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘 要: 阿秒光源是探究与操控超快过程 (如检验量子电动力学理论、探索光-物质相互作用极限) 的关键工具。目前可获得的光子能量限制在 keV 量级。提出一种全新方案: 利用涡旋激光与稀薄等离子体相互作用, 产生高能环形 (donut 形) 电子束, 进而辐射出高亮度、准直的阿秒 X/ γ 射线。激光场与其自激发尾波电场的叠加, 聚焦力可将自注入电子在径向的内侧和外侧吸注入到加速电场中, 形成具有双环结构的稠密超短快电子束。三维粒子模拟 (PIC) 显示, 这些电子束团可以发射出超短 (约 420 阿秒)、高流强 (每脉冲 $>10^{12}$ 光子)、准直良好 (发散角 $<10^\circ$) 且超高亮度 (在 1 MeV 光子能量下可达 2.23×10^{25} 光子 $\text{s}^{-1} \text{mm}^{-2} \text{mrad}^{-2}$ per 0.1% BW) 的 γ 射线。

关键词: 超强时空涡旋激光; 激光直接加速; 同步辐射; 结构光调控

hedp2025-068

基于时空涡旋激光调控增强正负电子对的研究

蔡天印¹, 鞠立宝^{*1}, 吴思忠¹, 周沧涛¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘 要: 我们提出一种物理方案, 可通过两束超强对撞的时空光学涡旋 (STOV) 脉冲辐照超薄固体靶, 可以同时操控所产生正负电子对的产额与结构。初始是时空涡旋激光驱动产生的高能电子与 γ 光子穿过相对论透明的固体靶, 再次对向传播的 STOV 场作用, 从而发生重复性的非线性康普顿散射, 之后通过多光子 Breit-Wheeler 过程转化为正负电子对, 这一过程可以显著提升了正负电子对的产额。另外由于时空涡旋激光具有相位奇异性的特点可以直接调控光电场局分布, 可以通过两束对撞 STOV 激光电场叠加形成的倾斜驻波, 在激光奇点附近对新生成的正负电子对进行俘获增强产额、并且操控其空间分布。三维 QED 粒子模拟 (PIC) 表明, 该方案可产生空间结构调控、超临界密度 ($>10^{22} \text{ cm}^{-3}$)、能量达数百 MeV 的正负电子对。

关键词: 超强时空涡旋激光; 横向角动量; 正负电子产生和调控; QED

hedp2025-069

相对论轻子束的超快自旋调控

李中鹏¹, 栗建兴¹

(1. 西安交通大学, 物理学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 相对论自旋极化轻子束对研究自旋相关的物理过程至关重要, 特别是结构自旋极化轻子束。然而, 传统的自旋操控系统 (如自旋旋转器、韦恩滤波器、西伯利亚蛇等) 占地面积大, 若要对轻子自旋的空间操控, 则需要对螺线管或磁铁进行特殊设计, 设计和建造成本较高。太赫兹波导管技术具有结构尺寸适中、电磁模式灵活可控、电场击穿阈值高、可容纳粒子束电荷量大等特点, 为轻子自旋操控提供了契机。我们基于太赫兹波导管提出了一种相对论结构自旋极化轻子束的调控方法, 该方案实现了相对论轻子束横向和纵向之间的超快、可逆切换, 并且能够同步压缩轻子束能散, 提高束流品质, 自旋操控效率达到 98% 以上。此外, 通过引入高阶波导模式, 可以实现类蜘蛛状、螺旋型、角向和径向等多种可定制自旋结构。这一成果不仅为相对论结构极化轻子束的产生提供了切实可行的方案, 也为高能结构光子源的实现开辟了新路径, 预示着在核物理、高能物理、材料科学等领域的广泛应用前景。

关键词: 太赫兹波导; 相对论轻子束; 自旋极化; 波导模式; 自旋操控

hedp2025-070

CEP 固定的单周期超强中红外结构光产生

樊志鑫¹, 耿盼飞¹, 吴益鹏¹

(1. 上海交通大学, 李政道研究所, 上海 200240)

摘 要: 涡旋光束与矢量光束因其能够为光与物质相互作用提供额外的调控自由度, 已在多个研究领域引发广泛关注。然而, 如何在中红外波段产生具有相对论性强度、近单周期脉冲宽度及稳定载波包络相位的此类光束, 仍是一个亟待解决的难题。本文提出一种新方案: 利用强场近红外圆偏振高斯光束垂直入射固体等离子体靶, 可高效生成波长在 6-15 微米范围内、转换效率最高达 10% 的可调谐 CEP 固定的相对论强度单周期涡旋/矢量中红外脉冲。其机理在于, 等离子体表面的长周期振荡通过基于等离子体镜的光子内差频效应 (IDFG), 将入射光频率下转换至中红外波段; 而该过程所具有的方位角依赖性进一步促成了自旋角动量与轨道角动量的转换与耦合, 从而产生涡旋及矢量光束。值得注意的是, 此差频生成机制可自动抵消入射脉冲的载波包络相位波动, 实现具有固定 CEP 的中红外脉冲产生。

关键词: 中红外; 结构光; 激光等离子体相互作用

hedp2025-071

超强涡旋激光驱动产生携带轨道角动量伽马射线源

谢新宇^{1,2}, 孙丰钰^{1,3}, 王文鹏¹, Stefan Weber⁴, 冷雨欣¹, 李儒新^{1,2,3}, 徐至展¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210; 4. ELI Beamlines facility, Extreme Light Infrastructure ERIC, 25241 Dolni Brezany, Czech Republic)

摘 要: 相对论自旋极化轻子束对研究自旋相关的物理过程至关重要, 特别是结构自旋极化轻子束。然而, 传统的自旋操控系统 (如自旋旋转器、韦恩滤波器、西伯利亚蛇等) 占地面积大, 若要对轻子自旋的空间操控, 则需要对螺线管或磁铁进行特殊设计, 设计和建造成本较高。太赫兹波导管技术具有结构尺寸适中、电磁模式灵活可控、电场击穿阈值高、可容纳粒子束电荷量大等特点, 为轻子自旋操控提供了契机。我们基于太赫兹波导管提出了一种相对论结构自旋极化轻子束的调控方法, 该方案实现了相对论轻子束横向和纵向之间的超快、可逆切换, 并且能够同步压缩轻子束能散, 提高束流品质, 自旋操控效率达到 98% 以上。此外, 通过引入高阶波导模式, 可以实现类蜘蛛状、螺旋型、角向和径向等多种可定制自旋结构。这一成果不仅为相对论结构极化轻子束的产生提供了切实可行的方案, 也为高能结构光子源的实现开辟了新路径, 预示着在核物理、高能物理、材料科学等领域的广泛应用前景。

关键词: 太赫兹波导; 相对论轻子束; 自旋极化; 波导模式; 自旋操控

hedp2025-074

基于激光加速超短脉冲质子束的材料辐照研究

方言律^{1,3}, 叶盛华², 李辰童^{1,3}, 黄明峰^{1,3}, 严怡婷^{1,3}, 鄢维^{1,3}, 陈子旻^{1,3}, 颜学庆^{1,3,4}, 林晨^{1,3,4}

(1. 核物理与核技术国家重点实验室及北京大学应用物理与技术中心, 北京 100871; 2. 石墨烯复合材料研究中心, 化学与环境工程学院, 深圳大学, 广东深圳 518060; 3. 北京激光加速创新中心, 北京 101400; 4. 广东激光等离子体技术研究院, 广东广州 510540)

摘 要: 超短超强激光与等离子体相互作用产生的质子束具有宽能谱, 短脉冲 (ps-ns) 和极高瞬态剂量率 (10^7 - 10^9 Gy/s) 的特点, 在材料辐照和损伤机理研究方面具有独特优势。本报告将介绍北京大学基于超小型激光加速质子器 CLAPA 开展的质子束辐照实验。首先, 我们利用质子能量瞬时沉积诱发热膨胀, 首次在固体中探测到可分辨的瞬态声波。辐照实验与多物理-声耦合模拟共同证实: 声信号幅值与质子流强呈线性关联, 为束流在线表征提供了新手段。其次, 我们对 WO_3 纳米线进行了高剂量率的质子辐照, 发现与传统块体材料不同, WO_3 纳米线在辐照后表面未表现出明显损伤; 然而, 利用 XRD 和 SME 等表征技术揭示出纳米线中的“由表及里”的非晶化损伤, 而且此现象利用剂量率低九个数量级传统加速器无法复制。两项工作表明, 超短脉冲激光质子束可以为极端条件下材料损伤机制与物态调控研究开辟了全新平台。

关键词: 激光加速超短脉冲质子束; 辐照; 非晶化; 三氧化钨

hedp2025-076

面向肿瘤治疗的激光质子束：0.1Hz 1PW 激光驱动加速质子源的关键技术与质子输出

高营¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘 要: 北京激光加速创新中心于 2024 年在怀柔科学城建成了 CLAPA-II (紧凑型激光等离子体加速器-II) 平台。该平台总建筑面积为 30,000 平方米, 包含五个区域: 2 PW 激光区、激光质量提升区、激光-靶相互作用区、质子束传输区和质子放疗演示区。该中心的目标是建设成为一个激光质子刀的肿瘤治疗示范中心。其核心关键一环是利用 PW 激光加速产生 100 MeV 甚至更高能量的质子束。现阶段, 我们利用 1 PW 激光与百 nm 厚度的塑料薄膜靶相互作用, 获得了最高能量 76 MeV 的质子束。我们利用单等离子体镜系统提升激光时间对比度, 利用可变形镜优化激光波前, 可以获得最小焦斑 3.5 微米左右。结合重频靶架系统和重频离子探测设备, 我们可以在 0.1 Hz 频率下获得稳定的质子束输出。本次报告将聚焦于靶场的分系统和实验进展的介绍。

关键词: 拍瓦激光; 激光质子加速; 等离子体镜; 质子探测谱仪;

hedp2025-077

高次谐波辐照薄靶产生阿秒电子束

何洋^{*1}, 买买提艾力·巴克^{*1}, 张程琦², 谢柏松²

(1. 新疆大学, 物理科学与技术学院固态物理与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830017; 2. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875)

摘 要: 激光加速电子束及其产生的次级辐射源因其飞秒至阿秒量级的脉冲持续时间, 在探测超快物理过程方面展现出独特的时间分辨优势。本文提出一种创新方案: 利用激光-等离子体相互作用产生的高次谐波作为驱动脉冲, 使其与薄靶相互作用进而产生阿秒电子束。通过该方法, 我们成功获得了具有良好准直特性、持续时间约 100 阿秒的超短电子束, 实现了束团长度的显著压缩。

关键词: 阿秒电子束; PIC 模拟

hedp2025-080

瞬态光学塑形技术在激光等离子体加速中的应用

万阳¹

(1. 郑州大学, 物理学院, 河南郑州 450001)

摘 要: 超短超强激光驱动的等离子体加速器技术是国际前沿研究的热点之一。由于超强激光与等离子体相互作用的时空尺度极小且高度非线性, 激光等离子体加速器需实现精细调控, 其中针对等离子体结构的精确操控尤为关键。本报告介绍一种新型等离子体结构操控技术——瞬态光学塑形。该技术利用经光学整形的小能量飞秒激光, 从横向对气体喷流进行选择性的光场电离, 从而生成加速所需的瞬态等离子体微结构。我们在低密度及近临界密度等离子体中验证了该技术, 证明其能有效调控激光焦点处的横向高阶相位, 并显著提升激光驱动电子/离子加速的效率。

关键词: 激光等离子体加速; 瞬态光学塑形; 激光横向相位调控; 近临界密度离子加速

hedp2025-081

从中等到超重离子：跨大质量范围的激光重离子加速研究

王鹏杰¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 超强激光应用技术研发中心, 广东深圳 518118)

摘要: Unilac 在 1976 年的成功运行标志着加速器可以将元素周期表中几乎所有元素（从氢到铀）加速至可观的速度（16%光速）。激光粒子加速因其具有超高加速梯度等优势而一直备受关注。近年来，激光驱动电子、质子加速等的能量记录和其它性能参数在不断提高；作为激光粒子加速最后一块“拼图”，激光重离子加速的发展将推动激光粒子加速整个领域迈向新的台阶，也将为不同交叉学科的应用注入新的活力。

本报告将介绍我们在激光驱动重离子加速方面的一些研究进展，包括从 mid-Z 铝 ($A \approx 27$)、氩 ($A \approx 40$) 到 super-heavy 金 ($A \approx 197$) 等离子质量跨越一个量级。使用铝薄膜靶和仅一焦耳激光，产生在较宽能量区间 (5-15 MeV) 准平台分布的能谱；利用 PW 激光和冷冻固体氩靶（无杂质、可高重频），观测到反常的“双峰（双束团）”电荷态分布，且两束离子的截止能量相差十倍左右；利用靶后激光加热和自研的复合靶材，将超重离子金离子加速至 1.2 GeV，并实现其电荷态分布和能谱的自校准测量。上述激光重离子加速实验结果展示出激光重离子加速的快速发展与不断优化的潜力，为激光重离子源在高能量密度物理、核物理、医学物理以及材料科学等领域中的应用奠定了基础。

关键词: 激光重离子加速；激光等离子体；高能量密度物理；电荷态分布；先进靶材

hedp2025-083

基于激光尾波场调制的束流相空间诊断

彭波¹, 万阳¹

(1. 郑州大学, 物理学院, 中原之光实验室, 河南郑州 450001)

摘 要: 激光尾波加速机制具备超高加速梯度和极小空间尺寸, 其产生的高能高品质束流在未来粒子对撞机和短波自由电子激光领域具有巨大的应用潜力。在束流参数优化工作中, 如何诊断束流横纵向相空间至关重要。在本工作中提出了一种利用激光尾波场调制的束流相空间诊断方案。当激光尾波场与束流横向相空间作用后, 从被调制后的相空间密度分布可以得到束流源尺寸、束流长度及能量啁啾信息。文中通过理论模拟及实验结果验证了本方案的可行性。

关键词: 激光尾波加速; 超低发射度; 源尺寸; 束流长度; 密度调制

hedp2025-085

北京激光加速创新中心 1 Hz、1 PW 飞秒激光系统研制进展

张慧^{1,2}, 郭雨泽^{1,2}, 张翔宇^{1,2}, 吴旻剑^{1,2}, 耿易星^{1,2,3}, 赵研英^{*1,2,3}, 颜学庆^{*1,2,3}

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871; 2. 北京激光加速创新中心, 北京 101400; 3. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广东广州 510475)

摘 要: 研究人员希望在保持超强超快激光高峰值功率的同时, 提升其平均功率。北京激光加速创新中心 (BLAIC) 正在自主研发一款采用啁啾脉冲放大 (CPA) 技术, 基于掺钛蓝宝石 (Ti: sapphire) 晶体终端放大的双前端、双输出、高重复频率、拍瓦 (PW) 激光装置, 以应对上述挑战。两个独立前端分别是: 基于 Ti: sapphire 晶体再生放大器的 CPA1 系统和交叉偏振波产生 (XPW) 系统组成的传统前端以及基于超快 Yb: YAG 固体激光器泵浦白光产生 (WLG) 中心波 1600 nm 信号光的 OPCPA 放大并结合信号光二次谐波产生 (SHG) 技术的高对比度前端。目前, 我们已经实现双前端重复频率 1 Hz、200 TW 级飞秒激光脉冲的输出, 真空后两个前端脉冲宽度均约 30 fs、光斑尺寸均约 80 mm、100 ps 时域对比度基底分别为 10^{-9} (XPW) 和 10^{-12} (OPCPA)。在此基础上, 基于 XPW 前端, PW 系统进一步完成了重复频率 1 Hz、单脉冲能量 48.7 J、600 发次能量波动低至 0.9% 的宽谱激光放大, 并在大气环境中将脉冲宽度压缩至 28.4 fs。数据分析表明, BLAIC-1 PW 激光系统可以支持重复频率 1 Hz、峰值功率 1.2 PW 的 fs 激光输出。

关键词: 超快激光; 啁啾脉冲放大; 掺钛蓝宝石; 1 赫兹; 1 拍瓦

hedp2025-090

基于 QuickPIC 的光子加（减）速过程数值模拟研究

孟维宇¹, 安维明^{1,2}, 唐榕¹, 王海南¹, 徐志豪¹, 田悦然¹

(1. 北京师范大学, 物理与天文学院, 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: 激光脉冲在等离子体尾场中传播时, 等离子体密度的空间或时间变化会引起其频率的漂移, 从而产生光子加速 (频率蓝移) 或光子减速 (频率红移) 效应。这种频率调制反映了光子与等离子体波之间的能量交换机制, 在孤立超短脉冲形成、高次谐波与 XUV 辐射生成以及超短中红外脉冲产生等方面具有重要的研究意义和应用潜力。尽管在如准 3D 模式的 Osiris 的粒子-网格 (PIC) 模拟程序中已经使用角模式分解等近似方法来降低计算负担, 但在涉及高频率激光-等离子体相互作用的场景中, 传统全三维 PIC 模拟依然需要庞大的计算资源。本文基于准静态 PIC 代码 QuickPIC, 结合其激光包络模型, 对光子加速与减速的动态演化过程进行了系统的数值研究。与采用准三维角分解算法的 Osiris 模拟结果相比, QuickPIC 在保证物理结果一致性与精度的前提下, 实现了约两个数量级的计算效率提升。通过改变等离子体密度梯度、驱动束参数及入射激光结构, 进一步揭示了光子能谱漂移、脉冲时域压缩与频率调制的空间分布规律, 为深入探索等离子体尾场中的光子加 (减) 速机理及其频谱演化特性提供了一种高效而可靠的数值研究手段。

关键词: 等离子体尾波加速; 粒子网格模拟; 光子加 (减) 速; 激光包络模型

hedp2025-091

横向磁化等离子体中相对论偏振中红外脉冲的产生

刘文君¹

(1. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 相对论偏振中红外光源在强场物理、超快科学和天体物理学中有着广泛的应用, 比如激光尾波场加速、超快过程研究、年轻恒星物体探测和各种天文现象观测等。在这次报告中, 我们将展示一种产生相对论偏振中红外脉冲的新方案。当一束强的线偏振激光在外加横向磁场的作用下穿过低密度等离子体时, 两个关键的物理过程同时发生: 一方面, 激光激发非线性等离子体尾波场, 由于尾场密度上升导致的光子减速将近红外激光转化为宽带中红外辐射; 另一方面, 相对论磁双折射效应导致普通和特殊波分量之间出现相位差, 从而实现中红外脉冲从线偏振到圆偏振的调谐。三维粒子模拟表明, 通过调节驱动激光偏振角和外加磁场, 可以精确地控制偏振态, 从而产生 $6.25 \sim 16.67 \mu\text{m}$ 的相对论偏振可调的中红外脉冲。这种全光学、无损伤的方法克服了传统晶体方法的强度限制, 为强场物理学、阿秒科学和实验室天体物理学带来了新的机遇。

关键词: 偏振中红外脉冲; 激光等离子体相互作用; 磁化等离子体; 光子减速; 磁双折射效应

hedp2025-094

基于拉盖尔高斯激光的阿秒伽马辐射调控研究

陈鹏帆¹, 熊力¹, 凡安容¹, 兰小飞¹, 孙斌¹, 何阳帆¹

(1. 西华师范大学, 物理与天文学院, 四川南充 637009)

摘要: 阿秒伽马射线源凭借其极高的时间分辨率与光子能量, 在探测核激发、电子动力学等超快高能物理过程中展现出不可替代的优势。然而, 如何同时实现脉冲宽度的有效压缩与轨道角动量的调控, 仍是当前研究面临的关键挑战。本报告介绍了一种利用携带轨道角动量的拉盖尔高斯激光脉冲与锥台形等离子体靶相互作用, 通过非线性逆康普顿散射高效产生并压缩阿秒伽马射线脉冲串的方法。基于三维 QED-PIC 程序的数值模拟结果表明, 通过优化锥台靶的倾斜角度, 可调控入射与反射激光场之间的干涉, 进而实现对伽马射线的纵向压缩。此外, 通过对正置与倒置两种锥台几何结构的对比研究, 发现前者在小倾角条件下具有更优的脉冲压缩效果, 而后者在大倾角条件下性能更佳。本研究为开发兼具超短脉冲宽度与高轨道角动量的紧凑型伽马射线源提供了新思路, 并展示了靶结构设计在调控强场辐射特性方面的重要潜力。

关键词: 相对论激光等离子体; 阿秒脉冲; 伽马射线; 拉盖尔高斯激光; 非线性逆康普顿散射

hedp2025-096

基于 ABP 的束流纵向相空间调制器

张智豪^{1,2}, 李文章^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 等离子体尾波加速 (PWA) 通过驱动束 (激光或带电粒子束) 激发等离子体尾波场, 可实现高达百 GV/m 的加速梯度, 在未来对撞机和紧凑型光源中具有重要应用前景。目前基于百太瓦/拍瓦飞秒激光器的激光尾波加速 (LWFA) 实验可获得能量达 GeV 量级、约 5% 能散和百 pC 量级的电子束。为进一步提升束流品质、降低能散, 需要引入纵向相空间调制元件, 使束流匹配下一级加速段并实现能量去啾啾。

传统磁压缩结构, 如 Chicane 或 Dogleg, 可建立粒子能量与纵向位置的关联, 但在束流能散或能量抖动较大的情况下, 束流在传输过程中横向尺寸会显著增大, 且整体传输矩阵的非线性效应会显著增加, 这给磁压缩结构的设计和优化带来巨大挑战。主动弯曲等离子体管 (ABP) 可在单一元件内完成类似功能, 其内部高梯度磁场 ($>10^3$ T/m) 适用于大能散束流传输。我们基于对 ABP 场结构和传输特性的分析, 推导了束流振荡方程与纵向位置偏移表达式。结果表明束流能量与纵向位置偏移量呈近似线性关系。即使在能散达到 60% 时, 线性度依然较好。结合数值计算与理论分析, 我们认为当束流沿最低能量粒子轨道注入时, 可获得更线性的纵向偏移与较弱的横向色散。同时, 我们还分析了横向分布和辐射效应的影响, 并根据半 Betatron 周期相混合限制与束团焦点 (流线交叉方程) 位置确定合适的传输距离。

关键词: 等离子体尾波加速; 束流品质; 等离子体元件; 束流动力学; 纵向相空间调制

hedp2025-098

Attosecond-resolution temporal characterization of relativistic electron bunch based on resonance optical streaker

Chuang Liu¹, Yipeng Wu¹, Dao Xiang¹, and Zhang Jie¹

(1. State Key Laboratory of Dark Matter Physics, Tsung-Dao Lee Institute & School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201210, China)

摘 要: We report a single-shot, direct, and non-destructive diagnostic method for reconstructing the longitudinal phase space of electron beams. Through theoretical derivation, we find that when an electron beam co-propagates with a circularly polarized laser, the application of a specific magnetic field enables the beam to remain phase-locked with the laser—namely, its transverse velocity stays synchronized with the laser polarization direction while it longitudinally slips to the laser. This phase-locking mechanism allows the electron beam to acquire a net energy from the laser field, thereby enabling full reconstruction of its longitudinal phase-space distribution with a resolution of sub-femtosecond. According to both theoretical analysis and numerical simulations, when the laser strength $a_0=1.5$ and the external magnetic field is $B = 13$ T, a resolution of 9.5 as can be achieved for a 500 MeV beam with a normalized emittance of $0.1 \mu\text{m}$.

关键词: 阿秒分辨率; 相对论性电子束; 光共振光条纹器

hedp2025-099

相对论少周期激光驱动瞬态静电波中的等离子体动力学

邱冠齐¹, 蔡东赤^{1,2}, 弓正², 颜学庆¹

(1. 北京大学物理学院, 应用物理与技术中心, 北京 100871; 2. 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 激光压缩技术的飞速发展使得少周期激光等离子体相互作用受到广泛关注。通过粒子模拟, 我们证明将激光脉冲压缩至亚 10 飞秒量级可显著增强瞬态静电激波。关键发现在于, 激光载波包络相位 (CEP) 对等离子体动力学行为产生强烈调制。研究结果显示质子截止能量与 CEP 呈显著的类余弦依赖关系, 特定 CEP 值因增强的电子位移和更强的电荷分离场而具有更优加速效果。相空间分析揭示了呈扩张“源”状分布的电子轨道, 其回旋半径与 CEP 依赖的能量传递相关联。我们进一步建立了通过质子能量反推静电激波强度与激光等离子体相互作用参数的解析模型, 该模型通过针对靶材密度、厚度、激光强度及 Φ_{cep} 的大范围参数扫描得以验证。本研究构建了短脉冲激光相互作用中 CEP 调控等离子体动力学的预测框架, 为实验室高能质子源和天体物理环境中高能宇宙射线起源的相关机制提供了新见解。

关键词: 少周期激光; 等离子体动力学

hedp2025-101

超有质动力注入产生激光尾波场加速的高亮度正电子束

孙婷¹, 赵前^{*1}, 栗建兴^{*1}

(1. 西安交通大学, 物理学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 基于等离子体的正电子加速技术因其超高加速梯度和超短脉冲持续时间而备受关注, 然而通过固有注入方式产生尾波场正电子束仍面临巨大挑战。本文提出了一种激光尾波场加速空泡区域内正电子束的超庞德罗莫特注入方法。该方法中横向激光场促使正电子俘获至激光调制的纵向尾波场, 该尾波场主导后续能量增益过程, 这一机制显著区别于静电诱导的超庞德罗莫特电子加速。粒子模拟结果显示, 通过环形尾波与双喷流碰撞可实现该方法, 产生电荷量达数百皮库仑、亮度达 10^{13} 安培/平方米的多周期正电子束。这种碰撞构型在当前激光等离子体实验中具有可行性, 所生成的正电子束适用于开发新一代正负电子对撞机、模拟实验室天体物理过程及开展超快材料诊断研究。

关键词: 激光尾波场; 正电子加速; 超有质动力注入

hedp2025-102

基于空气多通腔的飞秒光纤激光器脉冲压缩

高熙泽¹, 鲁健恒¹, 方冉燃¹, 李政言^{1,2},

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074; 2. 湖北光谷实验室, 湖北武汉 430074)

摘 要: 为实现工业近毫焦级近红外飞秒光纤激光的高效脉冲压缩, 以提升激光峰值功率并满足材料精细加工、极紫外光生成及超快物理过程研究等领域对激光超快特性与高峰值功率的需求, 本研究提出一种无需压力控制气室的低成本激光脉冲压缩方案。方案以空气作为非线性介质, 使激光在多通腔内实现非线性光谱展宽与脉冲压缩, 同时通过模拟计算所用工业激光的基座能量水平。结果显示, 这种多通腔可以将单脉冲能量 $400\ \mu\text{J}$ 、脉宽 $200\ \text{fs}$ 的激光脉冲压缩至接近 $30\ \text{fs}$; 激光能量提升至 $1\ \text{mJ}$ 时, 可将脉宽从 $253\ \text{fs}$ 压缩至小于 $40\ \text{fs}$, 装置能量效率超过 90% 。两种工况下虽然均观察到展宽后光谱的轻微红移, 但未影响非线性压缩效果; 我们的仿真模拟也实现了激光输出能量基座的有效评估。该方案大幅简化了工业飞秒激光的压缩装置, 为毫焦级近红外工业飞秒激光的多通池压缩提供了简洁的器件设计思路。

关键词: 多通腔; 非线性压缩; 飞秒激光; 空气压缩; 克尔效应

hedp2025-105

相对论电子束在等离子体尾波场调制形成三维纳米级微聚束以产生相干极紫外辐射

王晓娟¹, 彭浩¹, 黄太武¹, 胡章虎², 曹磊峰¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118; 2. 大连理工大学, 物理学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 相对论电子束是一种具有高能量、高电流密度的电子流, 其应用涵盖基础科学、工业技术及前沿研究领域。在相对论电子束的广泛应用中, 微聚束 (micro-bunching) 是指对相对论电子束进行时空调制, 使其形成周期性密度分布的电子微束团的过程, 其在阿秒电子衍射、高梯度等离子体加速器、相干辐射源等领域中都具有重要应用价值。本文提出了一种对相对论电子束进行三维空间调控的物理方案: 通过将低密度的相对论电子束注入到近临界密度等离子体中, 利用束流自身激发的等离子体尾波场可同时实现横向聚焦和纵向调制, 最终形成三维纳米尺寸微束团。三维粒子模拟结果表明, 单个微聚束的横向和纵向尺寸均可达纳米量级, 这为高亮度、短波长相干辐射的产生提供了一种新的途径。基于此, 该团队进一步利用自主研发的远场时域相干辐射计算程序 (FaTiDo), 研究了电子微束团在出射等离子体时产生的相干辐射, 在远场区域获得了电场强度达 MV/m、波长为数十纳米的相干极紫外波长辐射。

关键词: 相对论电子束; 等离子体尾波场; 微束团; 包络面振荡; 相干极紫外辐射

hedp2025-106

等离子体空泡增强的极化质子束磁涡流加速

邹治坤¹, 郭干¹, 温猛¹, 刘彬², 颜雪³, 金璐玲¹

(1. 湖北大学 物理学院, 湖北武汉 430062; 2. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广州 510475; 3. 江苏大学, 机械工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 利用激光驱动的离子加速技术, 在预极化的卤化氢气体靶中, 可以经济高效地产生高能自旋极化的质子束。当一束拍瓦级的激光穿透动态极化的卤化氢气体喷流时, 自旋极化的质子通过激光驱动的相对论性通道以及靶内的尾波场, 再通过靶后边界处的磁涡流引起的静态电场进行加速。特别地, 质子在等离子体波中的纵向运动促使其注入到磁涡流加速场中。本研究基于粒子自旋进动方程和激光驱动的空泡结构理论模型, 对质子的加速过程和自旋进动进行了深入分析。通过分析质子的动力学行为和场结构, 本研究探讨了束流能量和极化度对激光和等离子体参数的依赖性。通过理论模型的优化分析, 质子在等离子体波内的预加速得到了增强, 从而显著提升了最终的能量增益。多维等离子体粒子模拟的结果显示, 采用当前拍瓦激光装置, 可以实现具有几百兆电子伏特能量范围和百分之几十极化度的单能质子束。这种方法为极化离子注入直线加速器提供了一个可行的替代方案, 为激光驱动极化粒子对撞机的研究提供了实用的建议。

关键词: 极化质子束; 拍瓦激光; 磁涡流加速; 等离子体空泡; 自旋极化

hedp2025-107

激光维持等离子体单次曝光亚纳米分辨率压缩光谱成像

夏凡¹, 李政言¹, 鲁健恒¹, 胡耀丹¹, 唐惟启¹

(1. 华中科技大学, 光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 光谱学是一类通过分析光的光谱特性来研究光与物质相互作用的重要技术。而在许多应用场景中, 尤其是针对不稳定或不可重复的样品, 需要在单次曝光中实现空间分辨的光谱表征。目前, 已有多种能够在单次曝光下获取三维空间光谱数据立方体的成像光谱方法被开发出来并得到深入研究; 然而, 这些技术在光谱分辨率和通道数目方面通常存在一定限制。我们提出一种空间压缩光谱成像 (SPACIS) 方法, 将直接测量的光谱信息与计算重建的空间图像相分离, 从而在高维空间光谱数据立方体的采集过程中保持了传统光谱学技术的光谱准确性与精度。基于 SPACIS 技术, 我们成功对激光维持等离子体进行了空间光谱诊断, 在覆盖超过 160 nm 的光谱范围内实现了优于 0.49 nm 的光谱分辨率, 对应超过 326 个光谱通道。

关键词: 高光谱成像; 激光维持等离子体; 压缩感知成像; 光谱学

hedp2025-109

等离子体加速提高 XFEL 装置光子能量的模拟研究

刘乐天¹, 马谦益¹, 夏宇辉¹, 王哲男¹, 陈阅恺¹, 杨致彦¹, 蔡东赤¹, 徐泽葳¹,
唐子尧, 胡江浩¹, 安维明^{2,3}, 冯超⁴, 颜学庆^{1,5,6}, 徐新路^{1,5}

(1. 北京大学, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871; 2. 北京师范大学, 物理与天文学院, 北京 100875; 3. 北京师范大学, 天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 102206; 4. 中国科学院, 上海高等研究院, 上海 201210; 5. 北京激光加速创新中心, 北京 100871; 6. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广东广州 510540)

摘要: X 射线自由电子激光 (简称 XFEL) 可产生具有短脉宽和窄带宽特点的高亮度 X 射线脉冲, 在生命科学、材料科学和超快科学等领域应用广泛。近年来, 随着“先衍射后破坏”方法以及动态介尺度材料科学研究的发展, 对高光子能量 X 射线脉冲的需求日益迫切。本文提出利用 XFEL 装置的电子束驱动长度在米量级的双束等离子体尾波加速器, 以紧凑且低成本的方式实现被加速束的能量倍增。通过粒子网格云 (PIC) 模拟研究了不同束流负载 (Beam loading) 情形与非理想因素导致的束流品质退化, 结果表明超过半数的被加速束电子满足 XFEL 装置运行要求。将被加速束传输至波荡器后, 可使辐射的光子能量提升约 4 倍到 22 keV, 同时保持峰值功率。本文为实现高光子能量 XFEL 装置提供了可行路线。

关键词: 等离子体尾波加速; X 射线自由电子激光; 高光子能量; 束流品质; Beam loading

hedp2025-110

等离子体光学时空调控仿真研究

张栋俊¹, 朱坪¹, 崔利捷¹, 李思奇¹, 彭子明¹, 谢兴龙¹, 孙美智¹, 康俊¹,
杨庆伟¹, 朱海东¹, 郭爱林¹, 梁潇¹, 高奇¹, 姚修宇¹, 朱健强¹

(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: 近年来, 等离子体光学器件因其具备超高损伤阈值和灵活的光场调控潜力, 在高功率超短脉冲激光的性能提升与调控中应用日益广泛。为了充分发挥等离子体光学器件在实际应用中的调控性能, 并有效抑制其可能引起的光束质量退化问题, 实现高精度的仿真设计能力至关重要。然而, 现有仿真方法通常简化了模拟过程, 未能深入结合光学传输与激光等离子体相互作用的物理过程。针对这一不足, 我们发展了一种结合光学衍射传输与激光等离子体物理的等离子体光学时空调控仿真模型, 综合考虑了激光电离、激光与等离子体的相互作用以及光学传输等物理过程。基于该算法, 我们模拟了椭球等离子体镜的二次聚焦过程, 定量分析激光时空特性对焦斑的退化规律, 为相关实验设计与性能优化提供了理论依据。

关键词: 等离子体光学; 椭球等离子体镜; 时空调控; 光场传输; 高功率超短脉冲技术

hedp2025-111

微纳结构靶增强拍瓦激光驱动超热电子及辐射源产生

杨月¹, 邓志刚¹, 王少义¹, 温家星¹, 于明海¹, 吴思辛¹, 叶翰晟¹, 吴玉迟¹,
周维民¹, 谷渝秋¹, 赵宗清¹

(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 621900)

摘 要: 超强激光和固体靶相互作用产生的超热电子束及辐射源在材料科学、生物医学、工业检测、基础物理研究等领域具有广阔应用前景。微纳结构靶因能显著提高激光吸收效率及引导超热电子输运, 成为改善电子束和辐射源品质的有效手段之一。为了调控和优化超强激光与微纳结构靶的相互作用过程, 基于微通道靶和纳米刷阵列增强高能电子束及质子源产生的物理方案, 通过理论分析和数值模拟研究相互作用过程物理机理和参数条件优化, 实验验证了微纳结构靶对强流电子束产额和能量的显著提升, 同时证实了靶结构对带电束流的引导和约束效应。研究表明, 通过微纳阵列构型和脉冲参数的调制, 可望调控和优化超强激光驱动强流粒子束的输运状态及强辐射源特性, 为微焦点 X 射线源、惯性约束聚变、离子加速、正负电子对产生等研究和实际应用提供了有利条件。

关键词: 微纳结构靶; 超强激光; 超热电子产生; 电子输运

hedp2025-113

从 GeV/m 到 mm，芯片上的激光加速研究

孙斌^{*1,2,3}，兰小飞¹，赵宗清^{2,3}

(1. 西华师范大学，物理与天文学院，四川南充 637002；2. 中国工程物理研究院，激光聚变研究中心，四川绵阳 621900；3. 中国科学技术大学，核科学技术学院，安徽合肥 230027)

摘要：面对新时代高能物理多维度探索的需求，下一代粒子加速器面临着高能量、高精度的挑战。近年来，电介质激光加速器作为极具潜力的未来加速器候选者得到了广泛关注与研究，尤其是实现了数 GeV/m 的加速梯度，因此已在电子显微镜领域得到了初步应用。然而，由于目前电介质激光加速距离短，最终的能量增益低，这成为了其进一步应用道路上的巨大阻碍。我们提出了一种新型的堆栈式电介质激光加速结构，这种结构是基于逆切伦科夫效应，并给出了参数化的设计公式。与现有的依靠逆史密斯-珀塞尔效应的激光电介质加速器相比，所提出的结构提供了一个长时间的同步加速场，实现了 mm 级的加速距离的同时不需要激光脉冲前沿倾斜技术。这一优势大大减少了所需的激光脉冲时间。此外，易于集成的堆栈式结构有利于级联加速，模拟结果表明，低能量粒子束可以通过高梯度在很远的距离上进行级联加速。这些实际的优势证明了这种新结构在未来芯片加速器中应用的潜力。

关键词：电介质激光加速；粒子加速；逆切伦科夫效应；激光加速；新加速原理

hedp2025-114

等离子体尾场中的长距离极化电子加速

郭义斓^{1,2}, 曾明^{1,2}

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

摘 要: 基于等离子体加速的极化电子束源近来引起了广泛关注。为了揭示极化电子在等离子体空泡尾场中经历长距离加速时的三维自旋动力学行为及其退极化机制, 我们基于 Thomas-Bargmann-Michel-Telegdi (TBMT) 自旋运动方程和等离子体空泡尾场模型, 使用平均化方法与近似处理, 推导了一个尾场中自旋运动三维解析模型。我们通过理论分析揭示了一种新的自旋漂移行为, 这一行为在长距离加速中会引发显著的横向退极化问题。进一步研究发现, 当极化电子束从较低的初始能量开始加速时, 随着能量的提升, 自旋漂移频率会发生一次符号反转, 这种反转促使了束流极化状态的恢复。我们通过四阶龙格-库塔数值模拟方法对自旋漂移现象及横向极化率演化机制进行了验证, 模拟结果与理论预测基本一致。基于上述结果, 我们提出尽管存在显著的横向退极化效应, 在选取适当的初始与最终粒子能量条件下, 仍有望在加速过程中实现较低的净退极化水平。

关键词: 等离子体尾场加速; 极化电子束; 自旋动力学; 退极化; 自旋漂移

hedp2025-116

真实激光对大电量激光尾波加速的影响

夏宇辉¹, 王哲男¹, 唐子尧¹, 胡江浩¹, 马谦益¹, 陈阅恺¹, 刘乐天¹, 杨致彦¹,
张慧¹, 王晨旭¹, 蓝浩洋^{1,2}, 吴笛^{1,2}, 耿易星^{1,2}, 赵研英^{1,2}, 颜学庆^{1,2,3}, 徐新路^{1,2}

(1. 核物理与核技术全国重点实验室, 北京大学, 北京 100781; 2. 北京激光加速创新中心, 北京 101400; 3. 广东省新兴激光等离子体技术研究院, 广东广州 510080)

摘 要: 激光尾波加速可以在厘米长度的等离子体中实现相对论电子束的产生, 同时可以用于不同种类的二级粒子的产生, 这使得其在各个领域都是极具价值的粒子源。在本工作中, 我们通过实验与模拟的方法, 解释了真实激光的非理想的横向强度与相位分布对激光尾波加速的影响。与理想高斯激光相比, 真实激光其复杂的横向分布导致在等离子体中自聚焦所能达到的最大光强降低。此外, 真实激光所激发的非线性尾波场的鞘层结构也呈现出更宽、更复杂的特征。这些效应阻碍了等离子体中电子自注入的发生。随着真实激光在等离子体中传输演化, 其横向强度分布越来越接近椭圆高斯分布, 并且开始驱动尾场, 在长轴方向产生具有锐利边界的鞘层, 使得注入发生。在真实激光模拟中, 得到的电子束团不管是电荷量 (~ 200 pC) 还是能量 (~ 200 MeV) 都与实验结果比较吻合, 而对应的理想高斯激光模拟中得到的电荷量却远高于实验结果 (~ 500 pC)。我们的发现表明在非理想的激光所驱动的尾场中, 其电子注入的动力学过程不同于理想高斯光对应的动力学过程, 同时对大电量电子束的产生具有指导意义。

关键词: 激光尾波加速; 大电量电子束; 真实激光; 椭圆尾场; 相位恢复算法

hedp2025-117

激光驱动等离子体通道中伽马光子发射与磁岛之间的关联性

蔡东赤^{1,2}, 弓正², 徐新路^{1,3}, 颜学庆^{1,3}

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871; 2. 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190; 3. 北京激光加速创新中心, 北京 101400)

摘 要:新的理论研究在相对论激光驱动的等离子体通道中发现了一种特殊的磁岛结构。本文研究了激光等离子体通道中伽马光子的产生机制, 重点分析磁岛结构对光子辐射特性的影响。粒子网格模拟表明, 磁岛的时空结构与发射光子的能量和密度分布存在强关联: 高能光子主要发射于磁岛边缘, 而低能光子则集中于岛间区域。此外, 激光载波包络相位 (CEP) 对磁岛时空分布的调制作用显著, 进而影响光子辐射的空间和角向分布。这些发现揭示了利用磁岛结构和激光 CEP 调控来塑造光子辐射特性的潜力, 对非线性强场量子电动力学 (QED)、超快激光核物理和高能实验室天体物理等领域的研究具有重要意义。

关键词: 磁岛结构; 伽马光子辐射; 载波包络相位; 直接激光加速; PIC 模拟

hedp2025-118

基于等离子体级联加速的仄秒脉冲产生方案

马谦益¹

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘 要: 我们报道了北京大学在激光等离子体加速器及其应用——特别是仄秒辐射产生方面的最新进展。提出了一种利用激光尾波场加速器 (LWFA) 产生的电子束作为驱动源, 在束驱动等离子体尾波场加速器 (PWFA) 中产生相干强仄秒 X 射线脉冲的新方法。该 LWFA 注入级采用常规的 100 太瓦激光驱动, 可产生 GeV 级自注入电子束。该电子束经聚焦后作为驱动束, 进入采用具有调制密度下降梯度的固态密度等离子体构成的 PWFA 级。研究表明, 该方案能产生具有前所未有密度 (10^{26} cm^{-3}) 和亮度 ($10^{24} \text{ A/m}^2/\text{rad}^2$) 的超短电子束, 同时在 0.1 埃尺度上实现预群聚。通过使这种预群聚极端电子束与光学波荡器相互作用, 并将空间聚焦区域与束流的辐射区域匹配, 即可发射强仄秒脉冲。通过全流程多维粒子模拟验证表明: 采用锥形激光脉冲可产生峰值功率达 10 吉瓦量级、半高全宽持续时间 700 仄秒的孤立脉冲。这种强仄秒脉冲产生方案有望为核物理和量子电动力学过程研究提供关键探测工具。

关键词: 仄秒光源; 等离子体级联加速

hedp2025-119

基于主平面的激光尾波场加速器横向相空间诊断分析方法

王哲男¹, 夏宇辉¹, 马谦益¹, 陈阅恺¹, 刘乐天¹, 杨致彦¹, 唐子尧¹, 胡江浩¹

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘 要: 激光尾场加速器产生的电子束发射度诊断中已采用焦点扫描方案。电子束在包含两个或更多四极磁铁的束线中传播后, 其光斑尺寸随能量而变化, 可据此拟合束的发射度与 Courant – Snyder (C – S) 参数。我们引入主平面的概念, 对焦点扫描方案的分析进行统一化处理。文中给出了拟合流程, 并讨论了源点、磁元与屏幕之间距离变化对诊断的影响。通过对具有不同密度下降沿梯度长度的等离子体进行粒子-网格 (PIC) 模拟, 研究其对发射度与 C – S 参数测量的影响。我们的分析为焦点扫描方案提供了统一的理解, 并可推广应用于含更多四极磁铁的束线。

关键词: 束流诊断; 激光尾波加速; 主面

hedp2025-120

结构光驱动的涡旋伽马辐射与横向尾场调控

魏明轩¹

(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)

摘要: 激光尾场加速器产生的电子束发射度诊断中已采用焦点扫描方案。电子束在包含两个或更多四极磁铁的束线中传播后, 其光斑尺寸随能量而变化, 可据此拟合束的发射度与 Courant – Snyder (C – S) 参数。我们引入主平面的概念, 对焦点扫描方案的分析进行统一化处理。文中给出了拟合流程, 并讨论了源点、磁元与屏幕之间距离变化对诊断的影响。通过对具有不同密度下降沿梯度长度的等离子体进行粒子-网格 (PIC) 模拟, 研究其对发射度与 C – S 参数测量的影响。我们的分析为焦点扫描方案提供了统一的理解, 并可推广应用于含更多四极磁铁的束线携带轨道角动量 (OAM) 的结构化光场为强场等离子体物理和新型辐射源研究开辟了新的方向。我们系统研究了拉盖尔 – 高斯 (Laguerre – Gaussian, LG) 激光在尾场加速中的独特作用机制, 并揭示了其在高功率条件下对电子横向动力学的调控规律。基于三维准柱对称粒子模拟与理论模型, 我们发现电子发散经历了“环形注入—合束—准直”典型演化, 而这一过程源自 LG 激光场携带的角动量注入。在共振阶段, 角动量项与能量增益项同步作用, 控制电子的横向收缩与再扩展。解析结果表明, 角动量势垒与离子聚焦势的竞争决定了电子平衡半径的演化规律, 从而支配了束流电量与发散度。进一步参数扫描表明, 在焦斑不变的条件下, 通过提高激光强度并适度增加等离子体密度, 可在 10 PW 级功率下保持合束结构并显著提高电子电量。同时, 我们首次通过全光学逆康普顿散射实验实现了亚 MeV 能区涡旋 γ 光子的产生, 其中相对论电子与亚相对论 LG 激光脉冲散射。由于 γ 光子具有极短波长且通常不具相干性, 我们提出了一种基于量子张角的间接判据, 用以确定其 OAM 性质。实验中观测到携带 OAM 的 γ 光子在角分布上表现出显著展宽, 远超经典预期, 揭示了 OAM 所诱导的量子横向动量特征。该研究首次在实验上验证了涡旋 γ 光子的存在, 并从理论与实验两方面展示了 LG 激光在调控电子加速及强场辐射中的独特优势, 为未来高功率结构光驱动的新型辐射源研究提供了新的思路与平台。

关键词: 激光尾场加速; 角动量; 逆康普顿散射;

hedp2025-124

磁化等离子体中超快太赫兹波的动态自旋极化控制

蔡杰^{1,2}, 寿寅任¹, 弓正³, 温寒¹, 韩立琦¹, 余金清¹, 余金清¹

(1. 北京大学, 物理学院, 北京 100871; 2. 湖南大学, 物理与微电子科学学院, 湖南长沙 410082; 3. 中国科学院, 理论物理研究所, 北京, 100190)

摘要: 针对高场太赫兹 (THz) 偏振调控在带宽、动态性及光学损伤阈值方面面临的挑战, 本研究旨在提出一种基于磁化等离子体的可重构、抗损伤的太赫兹偏振精密调控方案。本文利用磁化等离子体作为可调谐介质, 通过利用寻常波 (O-mode) 与非寻常波 (X-mode) 之间的内禀双折射效应, 识别并运行在一个零群速度失配 (zero-GVM) 区域。在此区域, 两种模式的群速度几乎匹配, 同时保持着有限的相位双折射。该机制仅需单束输入光, 便可实现确定性、宽带且可编程的相位控制。研究通过全波粒子模拟 (PIC) 验证了该方法, 并演示了如何实现一组通用的单量子比特门操作。此外, 研究表明利用空间变化的磁场分布, 能够产生结构化的矢量偏振场 (可编程太赫兹庞加莱光束)。本平台凭借其超快响应、高损伤阈值和原位可调谐性, 为高场太赫兹区域的可重构偏振控制建立了一种新范式, 在超快光谱学、多维太赫兹成像和高速无线通信等领域具有重要应用前景。

关键词: 太赫兹; 偏振调控; 磁化等离子体; 零群速度失配; 双折射; 矢量偏振场

hedp2025-125

基于条纹管的压缩超快成像系统研究及其应用

姚方鼎¹, 程笑寒¹, 叶增¹, 吕超¹, 蔡厚智^{*1}, 向利娟^{*1}, 刘进元¹

(1. 深圳大学, 广东省深圳市深圳大学物理与光电工程学院, 广州深圳 518060)

摘 要: 在激光惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 等超快物理过程研究中, 具有皮秒量级时间分辨的条纹相机是核心诊断设备之一。其与压缩感知 (compressed sensing, CS) 理论结合建立的压缩超快成像 (compressed ultrafast photography, CUP) 系统具备二维空间分辨的诊断能力。然而, 在复杂噪声条件下, 系统的空间分辨能力仍需进一步提高。建立了基于条纹管的压缩超快成像系统模型, 对其空间分辨特性进行了模拟仿真研究。模拟结果表明, 重建图像可获得 10 lp/mm 的动态空间分辨率。通过对模拟结果拟合分析, 获得了不同帧数下成像质量的最佳编码采样率, 可明显提高成像质量。研制了压缩超快成像系统, 对皮秒脉冲激光的时空强度演化过程进行了诊断, 脉冲光斑演化的时间长度约为 30 ps, 重建出 12 帧不同时间激光光斑图像, 重建精度为 96.06%。此外, 利用压缩超快成像方法进行了荧光寿命显微成像模拟, 可实现荧光样品的荧光寿命准确测量与超分辨率成像。

关键词: 超快诊断; 压缩超快成像; 条纹相机; 空间分辨率; 压缩感知

hedp2025-126

近红外高斯光到近相对论中红外涡旋光的转化

王凯¹, 刘伟², 程佳豪¹, 贾青¹

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 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: 中红外波段的强涡旋光逐渐成为高次谐波和超快分子动力学等领域重要研究工具。传统光学器件受限于热损伤阈值, 在产生相对论中红外脉冲和相对论涡旋脉冲上仍然面临一定挑战。我们提出了一种基于等离子体将激光器输出的相对论近红外高斯脉冲直接转化为中红外波段强涡旋光的方案。该方案利用激光直接加速产生的环向磁场将高斯模式转化为拓扑荷 $l=2$ 的拉盖尔高斯模式, 随后使用非线性尾场对激光脉冲进行光子减速, 最终得到所需的中红外近相对论强度涡旋光。同时, 其中的涡旋光转化方法也为超短超强涡旋脉冲的产生提供了一种方案。该方法仅需要三段不同密度的等离子体实现, 这样的等离子体结构目前已用于激光等离子体相互作用实验。因此, 提出的方案能够在现有激光等离子体实验上实现, 所产生的光源有望在高能量密度物理领域得到进一步应用。

关键词: 超短超强激光; 涡旋光转化; 中红外脉冲; 直接加速; 光子减速; 粒子模拟

hedp2025-127

矢量光场高维时空结构的单发表征

胡耀丹¹, 门庭¹, 闫明东¹, 李政言¹

(1. 华中科技大学, 光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

摘 要: 矢量光场在光学检测、光通信、量子调控等领域具有重要意义, 其稳定、特殊的结构以及高能量密度在研究非线性光谱学、手性物质操控、微纳控制领域起到了不可忽视的作用, 实现对矢量光场的三维表征能更好的对超快化学、强场物理等领域进行探索和研究。同时, 大型拍瓦激光装置的低重频特性对飞秒激光脉冲表征技术提出了单发测量的需求, 超高峰值功率拍瓦激光的时空耦合特性也要求对脉冲的时空结构进行同时表征。

为了满足对矢量光场时空结构的单发测量需求, 我们结合点衍射全息技术, 通过压缩光谱成像技术获取了不同频率通道的光场干涉条纹, 并利用频域分辨光学门控对频域光场进行缝合, 在单发条件下实现了对光场振幅、相位和偏振的测量, 实现了对飞秒矢量光场的三维形貌的表征。本工作对偏振门、线偏、椭偏等标量光场, 及径向偏振光、角向偏振光、1 阶拉盖尔高斯光束的矢量光场进行了表征, 该方法有望应用于对各类大型激光装置脉冲进行表征和各种类型的超快矢量光场进行观测。

关键词: 矢量光场; 单发测量; 压缩感知; 偏振测量

hedp2025-128

强激光驱动超快电子发射及其加速

周楚亮¹, 朱翰辰¹, 田野¹,

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 超短电子束的产生与操控是超快科学的核心。本研究利用高对比度近相对论激光脉冲与固体靶相互作用, 探究了强场下的超快电子发射、动力学行为及其加速。基于“激光锁相”机制, 我们实现了电子在激光电场零点处被注入真空, 从而与光场相位强关联。观测到平均宽度约 198 阿秒的电子脉冲串在激光场中发生的偏转, 解析了有质动力散射、真空激光加速等超快动力学过程。进一步地, 通过单电子动力学模型, 我们研究了锁相电子的加速规律, 研究表明利用 10 PW 量级激光可将电子直接加速至 GeV 量级, 并给出了能量定标关系。该工作从阿秒发射观测到 GeV 能量加速, 为发展小型化新型粒子源与超快探测技术奠定了基础。

关键词: 超强超短激光; 电子加速; 超短电子脉冲; 超快科学; 激光等离子体

hedp2025-129

基于激光等离子体加速的超高能电子放疗

周兵¹

(1. 清华大学, 工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 基于全国产化的自研 40 TW 激光器, 组建了世界上首台激光等离子体加速超高能电子放疗样机。开展了小动物实验, 验证了样机的稳定性和超高能电子放疗的可行性。

关键词: 激光加速; 超高能电子; 放疗

hedp2025-131

基于锥靶贝叶斯优化的增强型定向激光中子源

胡理想¹, 张文昱¹, 邹德滨¹, 银燕¹, 余同普¹

(1. 国防科技大学 理学院物理系, 湖南长沙 410073)

摘要: 激光驱动中子源, 尤其是束靶型中子源, 在中子成像、癌症治疗、实验室天体物理等领域具有重要应用潜力。然而, 当前束靶型中子源的品质, 如中子产额和发散角, 仍有较大提升空间。本文提出一种通过相对论激光与锥靶相互作用产生高品质中子的新方案。通过二维粒子模拟与蒙特卡罗集成模拟, 在激光强度为 5×10^{20} W/cm²、脉冲为 30 飞秒的条件下, 成功将氘离子加速至 185 兆电子伏特, 中子产额达 10^9 个。研究还发现, 能量高于 22 MeV 的中子发散角为 43.2°。通过理论分析, 我们系统阐明了高能离子产生、中子产额提升及前向方向性优化的物理机制。还研究了激光强度参数 a_0 、锥顶半径 r_1 、锥长 L 及锥面斜率 $\tan\theta$ 对离子加速和中子产生的影响, 并通过贝叶斯优化确定了最优参数。同时, 流体动力学模拟还揭示了激光预脉冲的作用。与平面靶相比, 该方案能够产生高品质的中子束, 具有产额更高、前向方向性更优、中子能量更高的优势, 在中子成像、中子活化分析及癌症放射治疗等多种应用中具有巨大潜力。

关键词: 激光中子源; 等离子体粒子模拟; 锥靶; 贝叶斯优化

hedp2025-137

远场时域辐射模拟程序在等离子体相干辐射模拟中的应用

文成辉¹, 彭浩¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘 要: 等离子体是一种应用广泛的介质, 可以在从太赫兹、红外到紫外甚至 X 射线的宽波长范围内提供相干辐射, 这在宇宙学、化学、生物医学科学及其他领域具有广阔的应用前景。我们基于 Liénard-Wiechert 势开发了一种远场时域辐射计算代码 (FaTiDo), 能够利用 PIC 模拟中相对论电子的轨迹信息计算集体辐射。与 PIC 的辐射模拟相比, 它具有几个优势: (1) 提供可直接与实验结果比较的远场辐射结果; (2) 不受数值噪声和色散的影响; (3) 可以模拟具有非常高时间分辨率的辐射。在此我们展示了使用 FaTiDo 进行辐射模拟的三种典型案例, 包括: 通过激光与正梯度等离子体的相互作用产生 THz 辐射、通过逆非线性汤姆森散射产生 γ 射线以及通过等离子体镜机制进行高阶谐波生成。使用该程序我们发现并讨论了一些新的物理现象。我们的代码引入了一种新的相干辐射模拟方法, 这可能为某些研究应用提供独特的优势。

关键词: 远场时域辐射模拟; 等离子体; 相干辐射

hedp2025-139

短波长激光与纳米靶相互作用产生高能量、高密度阿秒电子束

黄太武¹, 李震宇¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘 要: 强激光在超短距离内将电子加速到高能的能力为紧凑粒子源提供了一条有前景的途径。真空激光加速 (VLA) 的特点是超高梯度超过 10 TV/m, 但面临着将有效电子注入加速阶段的挑战。在这项工作中, 我们采用二维粒子模拟来演示一种新的注入方案, 其中强 X 射线激光的强电场将电子从纳米级靶上分离出来, 形成高密度电子层。通过优化横向注入激光焦斑的中心区域, 电子在激光轴上的横向运动会引起光谱压缩效应, 我们实现了有效的真空加速, 产生了具有明显准单能特性的相对论电子束。这种高质量的相对论电子束具有超快科学应用的巨大潜力, 通过精确控制驱动激光轮廓可以实现可调参数。

关键词: 短波长; 高能量; 高密度; 准单能

hedp2025-140

等离子体莫尔晶格对相对论强激光的导引

黄容¹, 祝昕哲¹, 陈民^{*1}

(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, 暗物质物理国家重点实验室, 上海 201210)

摘 要: 准周期莫尔晶格具有独特的平带结构, 能够实现光子局域化和长距离光导引。然而, 传统光子莫尔晶格仅能导引毫瓦级弱光。为实现强激光的高效导引, 本文将莫尔晶格概念引入等离子体领域, 提出等离子体莫尔晶格强光导引方案。通过理论计算, 证明了等离子体莫尔晶格同样具有传播常数不随横向波数变化的平带, 具备长距离光导引的理论基础。利用三维粒子模拟方法, 我们研究了等离子体莫尔晶格对相对论强激光脉冲的导引特性。模拟结果表明, 在给定参数下, 该晶格能将不同初始尺寸的激光脉冲有效约束至相近的通道深度, 实现长距离稳定传输。与常用的预制抛物型等离子体密度通道相比, 等离子体莫尔晶格能显著抑制导引过程中因尾波场激发导致的激光红移现象, 适用于导引大能量短脉冲和小能量长脉冲激光等多种情况。进一步研究表明, 等离子体莫尔晶格同样适用于强太赫兹脉冲的长距离弱色散导引。本工作有望为强激光及强太赫兹脉冲的高效弱色散传输提供一种新的思路。

关键词: 激光等离子体相互作用; 等离子体波导; 莫尔晶格; 平带

hedp2025-141

超短超强激光驱动强流电子束产生与应用研究

张锋¹

(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, 621900)

摘 要: 超短超强激光与物质相互作用时, 其极强光场可以迅速剥离原子核外的电子, 电子在有质动力作用下快速被加速至相对论速度, 从而产生了超高能量、超短脉冲的强流电子束。这种高能量、短脉冲强流电子束的能量达到 MeV 甚至超过 GeV 量级, 脉冲宽度仅数十飞秒至数皮秒 (与激光脉冲宽度相当), 携带的能量却可达到数十焦耳。这样的强流电子束可以探索极端条件下的物理现象、深化对高能量密度物理规律的认识, 也可以成为新型辐射源产生的利器, 为核聚变能源、高能粒子辐射源开发等国防科技领域带来革命性的突破。面向激光惯性约束聚变 (ICF) 研究这一有望解决人类终极能源问题的工程问题, 我们实施了国际首次间接驱动快点火综合集成物理实验, 实现了强流电子束与高密度靶丸压缩状态的高效耦合, 显著提升了间接驱动快点火聚变中的能量耦合效率。 μ 子既是基础物理研究的重要对象, 又在核材料检测、深度穿透照相、高能粒子电磁武器等国防科技方面有非常重要的应用前景, 但其目前研究深受制于有限的 μ 子源。我们将 GeV 级高能电子束应用于 μ 子的产生, 设计并实施了国际首次基于超短超强激光的 μ 子产生物理实验并确认了 μ 子产生信号, 厘清了 μ 子产生的主要物理过程, 展示了激光 μ 子源的巨大应用潜力。

关键词: 超短超强激光; 强流电子束; 快点火; μ 子

hedp2025-144

Betatron 光源相衬成像性能的研究

樊思劼^{1,2}, 叶翰晟², 温家星², 吴思辛², 彭茂^{2,3}, 杨月², 朱涛⁴, 巩强⁴, 郭航⁵, 曾高杰⁵, 王少义², 吴玉迟², 王文涛⁵, 赵宗清²

(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研究中心, 四川绵阳 621900; 3. 浙江大学机械工程学院, 浙江杭州 310058; 4. 中国工程物理研究院机械与制造工艺研究所, 四川绵阳 621900; 5. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 基于激光尾场加速的 Betatron 辐射源由于其脉冲长度短、亮度高等特性, 被广泛应用于超快过程相衬成像。本研究设计了临界能量为 25 keV 的 Betatron 辐射源相衬成像实验, 探究了在不同等离子体密度下辐射源亮度与空间分辨率的变化规律, 评估了静态玻碳片样品的相衬成像效果, 并使用了基于波动光学的仿真方法进行了对比验证。实验结果显示, Betatron 辐射源成像空间分辨率与亮度随等离子体密度的变化规律有明显差异, 探究了在源尺寸与探测器分辨率相当时, 整体空间分辨率随等离子体密度变化的变化规律; 在亮度较稳定区域 ($3\sim4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 内达到最优空间分辨率为 $5 \mu\text{m}$, 显著优于高低密度端, 且此时存在相衬效果。仿真结果与实验结果吻合较好, 对亮区边缘与暗区边缘归一化强度的预测误差小于 10%。本研究拓展了对 Betatron 辐射源相衬成像性能的物理认识和规律。

关键词: 相衬成像; 空间分辨率; Betatron 辐射源; 波动光学仿真

hedp2025-147

激光驱动的 Betatron 辐射源智能优化研究

叶翰晟¹

(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: Betatron 辐射源作为一种基于激光尾场加速的新型 X 射线源, 具有高亮度、短脉宽及微焦点等优势, 在材料科学、生命科学等领域展现出重要应用潜力。然而, 其性能优化面临多个关键参数 (如亮度、临界能量、源尺寸) 之间的复杂耦合与相互制约, 传统优化方法难以实现全局最优。报告结合 PIC 模拟和多目标贝叶斯优化方法, 系统探索激光聚焦位置、等离子体密度与长度等关键参数对 Betatron 辐射特性的影响。研究表明, 该方法在 90 次迭代内即可有效逼近帕累托前沿, 显著提升辐射亮度与临界能量, 并揭示源尺寸是制约综合性能进一步提升的主要因素。此外, 构建的预测模型可用于指导面向特定应用的辐射源参数设计, 为实现高能高亮度高分辨 Betatron 辐射源的智能调控与闭环优化提供了可行路径。

关键词: 激光尾场加速; Betatron 辐射; 多目标优化; 贝叶斯算法; 激光等离子体物理

hedp2025-149

基于弯曲等离子体通道的可调色散等离子体棱镜与中红外辐射源

祝昕哲^{1,2}, 李博原^{*1,2}, 毕择武^{1,2}, 温昕辉^{1,2}, 王心想^{1,2}, 刘文君^{1,2}, 黄容^{1,2}, 杨国庆^{1,2}, 李建龙^{1,2}, 鲁林^{1,2}, 刘峰^{1,2}, 盛政明^{1,2,3}, 陈民^{*1,2}

(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. 上海交通大学, 李政道研究所, 上海 200240)

摘 要: 激光脉冲峰值功率的不断提升对晶体光学元件提出了严峻挑战。鉴于等离子体光学元件在强激光条件下具有极高的损伤阈值, 它们为此提供了潜在的解决方案。本文提出了一种新颖的方法, 即利用弯曲等离子体通道构建一种主动、色散可调的等离子体棱镜, 用于对相对论强激光脉冲进行频率转换及不同频率成分的空间分离。理论与实验结果表明, 此类弯曲等离子体通道可作为主动等离子体棱镜, 实现相对论光脉冲的频率转换和角度色散, 且其色散关系可通过等离子体通道的结构进行灵活调控。实验利用 100 太瓦量级的相对论强激光脉冲与不同曲率的等离子体棱镜相互作用, 观察到了主脉冲与产生的强中红外分量之间明显的角度色散和空间分离。这种色散元件在超强激光压缩器、棱镜光谱仪以及强中红外激光光源等多种先进应用领域中具有重要的应用前景。

关键词: 弯曲等离子体通道; 等离子体光学; 中红外辐射源; 光子减速; 色散调控

hedp2025-150

激光与泡沫靶驱动的高亮度辐射源研究

王紫摇¹, 任洁茹^{*1}, 杨明哲¹, Dieter Hoffmann¹, 魏文青¹, 马步博¹, 姜雯¹, 张世政¹, 罗旭阳¹, 邓志刚², 齐伟², 吴玉迟², 周维民², 谷渝秋², 赵宗清², 程锐³, O.N.Rosmej⁴, 蒋轲⁵, 黄太武⁵, 曹磊峰⁵, N.E.Andreev⁶, 赵永涛^{*1}

(1. 西安交通大学 物理学院, 陕西西安 710049; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 3. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 4. Heavy ion Research Center, Darmstadt, Germany; 5. 深圳技术大学 工程物理学院, 广东深圳 518060; 6. Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

摘 要: 相对论激光与近临界密度 (NCD) 等离子体相互作用可以有效驱动强流电子束及次级 X/ γ 等辐射源, 在实验室天体物理、医用同位素制备、生物学 FLSAH 效应、超快成像等前沿领域具有重要应用价值。针对传统高超音速气体喷嘴或固体靶烧蚀制备近临界密度等离子体的方法存在演化速度快、参数梯度大或稳健性差等问题, 本工作提出利用纳秒激光脉冲烧蚀金腔产生软 X 射线, 间接加热三醋酸纤维素 (TAC) 泡沫靶, 制备状态均匀、稳定的准静态 NCD 等离子体, 并开展直接激光加速 (DLA) 驱动强流相对论电子束及次级辐射源的研究。实验和 PIC 模拟表明, 纳秒激光间接烧蚀泡沫后引入皮秒激光的延迟时间会显著影响等离子体的密度分布进而影响电子加速结果, 通过寻找最佳的延迟时间, 可稳定地产生接近微库量级, 有效温度达 10 MeV 的相对论电子束及高亮度次级 X/ γ 辐射源。此外, 我们对相对论皮秒激光与 TAC 泡沫直接作用进行了相关研究, 模拟结果表明泡沫骨架结构附近产生的局部电磁场可以在靶内驱动大量低能质子, 在提升低能核反应产额方面极具潜力, 这与我们近期在星光 III 平台开展的实验结果吻合。

关键词: 相对论激光; 近临界密度等离子体; 直接激光加速; 高亮度辐射源; PIC 模拟

hedp2025-153

激光尾波加速驱动超快电子衍射研究

方煜¹, 李飞¹, 华剑飞¹, 鲁巍^{2,3}

(1. 清华大学, 工程物理系, 北京 100084; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 北京量子信息科学研究院, 北京 100193)

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科研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, 超小加速结构以及激光-束流的天然同步性等优点, 为建设桌面型高时间分辨超快电子衍射源提供了全新可能性。我们依托 10 TW 级超强激光系统开展了激光尾波加速研究, 构建了基于永磁铁的紧凑型高品质束流传输系统及基于太赫兹偏转腔技术的高分辨诊断系统。通过束流传输及能量筛选, 获得能散 3%, 电荷量 11.9 fC 的衍射探针, 经 THz 偏转腔诊断, 最终实现 49.8 fs 的时间分辨。本研究首次完成了基于激光尾波加速器的桌面型百飞秒级时间分辨 MeV 级超快电子衍射装置搭建, 展示了该新型科研装备在超快动力学研究领域的广泛应用前景, 标志着超快超强激光器及激光尾波加速器技术在超快科学应用领域的又一次重要突破。

关键词: 激光尾波加速; 超快电子衍射

hedp2025-160

强场结构光的产生和调控研究

吴益鹏¹

(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)

摘 要: 结构光是一类强度、频率、相位、偏振等维度具有特殊时空分布和演化特性的光场。它能在光与物质相互作用中提供额外的自由度, 促进了众多学科快速发展。然而, 受常规光学介质易损伤的限制, 现有方法构建的结构光强度都相对较低, 限制了其应用范围。等离子体不受光致损伤阈值的限制, 且具有极高的储能密度和丰富的光学特性, 有潜力成为先进的强场光学元器件。本报告将介绍利用等离子体来产生和操控相对论涡旋光和矢量光等结构光场的新方案, 重点聚焦能量放大、频率转换、相位调控和偏振操控等几大方面。

关键词: 相对论强度; 涡旋光; 矢量光; 等离子体

hedp2025-161

强激光中子源及其应用技术研究

陈忠靖¹

(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 621900)

摘 要: 强激光中子源凭借其超短脉冲、小源尺寸、高通量率等独特优势, 成为传统中子源的有力补充, 在快中子照相、材料分析等领域展示了应用潜力。未来随着高重复频率、高功率激光技术的持续发展, 其平均通量和稳定性将进一步提升, 在科研和工业领域具有广泛的应用前景。强激光中子源有两种产生途径, 即激光惯性约束热核聚变和超短脉冲激光驱动束靶核反应, 前者能够产生准单能各向同性快中子源, 后者能够产生宽谱定向快中子源。强激光中子源的空间分布, 是理解中子源产生机制的关键信息之一, 因此, 需要发展亚毫米尺寸快中子源的表征技术。随着强激光中子源强度的不断提升, 将其应用于快中子照相成为可能。强激光中子源由于具有超短脉冲、小源尺寸的特征, 在高空间分辨快中子照相、多能谱快中子照相方面具有独特优势。同时, 结合伴随产生的强 X 射线/伽马射线, 可发展同轴多模态照相技术, 提供物质组成、内部结构和动态过程的关联性、多维度的解析能力, 解决单一模态无法解决的复杂检测问题。

关键词: 强激光中子源; 中子成像; 中子照相

hedp2025-163

等离子体尾场加速器束流自解啁啾机制

王佳¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: This study systematically investigates the intrinsic dechirping mechanisms of electron beams in both laser wakefield acceleration (LWFA) and particle beam wakefield acceleration (PWFA). We classify these mechanisms based on the depletion length of the driver, the distance over which the energy of the driver is significantly depleted in the plasma. Under optimal conditions, injected electron beams can experience multiple dechirping processes within the wakefield. Through particle in cell simulations, we show that both in LWFA and PWFA, the root-mean-square energy spread of the accelerated beam can be decreased to 1% level through two dechirping events as the driver depletes. Our findings highlight that matching the depletion length of driver to the characteristics of wakefield is crucial for generating quasi-monoenergetic electron beams.

关键词: 等离子体尾场加速; 束流; 解啁啾

二、惯性约束聚变物理、高能量密度下的物质特性

hedp2025-003-new

神光 II 综合激光装置及应用

姜秀青¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 高功率激光的发展是激光聚变这一重大工程中的关键技术, 在国防安全、高能密度物理、和天体物理等领域展现出重要的应用价值。神光 II 激光装置作为多功能激光平台, 是国际为数不多、国内唯一可提供皮秒千焦耳和纳秒万焦耳联合打靶功能的激光装置, 是国内唯一的快点火实验平台, 国内唯一开放共享的高功率激光物理实验平台, 是激光聚变点火研究的核心平台, 是高能密度物理前沿探索研究的一把利器。本文主要介绍神光 II 激光综合装置近年来的技术发展、升级后的装置能量倍增、多功能联合打靶及支撑高能物理实验的重要研究成果。

关键词: 高功率激光装置; 关键技术; 多功能激光打靶; 惯性约束核聚变

hedp2025-004-new

惯性约束中的双光束双等离子体波衰变不稳定性

练昌旺¹, 季雨¹, 闫锐^{1,2}, 李俊³, 王立峰⁴, 丁永坤⁴, 郑坚^{3,2}

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230026; 2. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 3. 中国科学技术大学 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 4. 中国工程物理研究院 应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 在直接驱动方案中, 双等离子体衰变 (TPD) 不稳定性因产生超热电子导致靶丸预热而被视为关键的激光等离子体不稳定性之一。在惯性约束聚变装置中, 多角度入射的激光束可能协同激发 TPD, 显著增加预热风险。通过采用粒子模拟对同时入射正入射激光束与大角度斜入射激光束, 模拟结果表明该构型可通过协同作用激发双光束 TPD 不稳定性。其具体表现为: 大角度斜入射激光首先触发 TPD 的绝对增长形成"种子波", 该种子波随后由正入射激光通过对流放大机制增强。这种"种子-放大"机制使 TPD 不稳定性显著加剧, 产生大量超热电子, 最终导致额外的靶丸预热风险。

关键词: 惯性约束聚变; 激光等离子体不稳定性; 双等离子体波衰变不稳定性; 双光束; 大角度斜入射

hedp2025-005-new

强激光场中多电子波包的量子相干辐射

代德佳¹, 沈晓飞¹, 吕清正², 乔 宾¹, 傅立斌²

(1. 北京大学, 物理学院重离子研究所, 北京 100871; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100193)

摘 要: 我们从量子电动力学的角度研究了多电子体系在强激光场中的相干辐射行为, 分析了电子的量子力学性质 (如全同性、波包的动量宽度以及坐标宽度) 对辐射光谱强度的影响, 并在此基础上探讨了对经典电动力学描述多电子体系相干辐射进行量子修正的可能性, 为利用强激光产生相干康普顿光源提供了重要的理论依据。

关键词: 量子电动力学; 强激光; 相干辐射; 波包; 全同性

hedp2025-007-new

ICF 黑腔中无碰撞冲击波驱动的组分分层和超热离子分离

周游利子¹, 姚沛霖¹, 张华², 单连强¹, 谷渝秋²

(1. 中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 2. 深圳技术大学工程物理学院 超强激光应用技术研发中心, 广东深圳 518118; 3. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 在间接驱动惯性约束聚变 (ICF) 中, 复杂的界面动力学过程会改变高 Z 黑腔内壁等离子体与低密度填充气体等离子体界面处的等离子体特性, 从而影响激光传输和能量沉积过程。本研究采用一维隐式 PIC 模拟, 探究了高 Z 金等离子体向稀薄氖-氢 (DH) 气体混合物膨胀驱动的无碰撞激波形成与传播过程中的多组分效应。研究表明, 因与等离子体混合物的相互作用, 静电势的时空演化趋近于稳定传播的两步上升结构。进一步分析由电扩散引起的下游离子分层现象发现, 相较单组分情况, 多组分效应可提升激波速度。此外, 这种特征性的两步上升电势结构将诱导反射超热离子呈现与实验相关的异常速度分布。研究建立了激波特性与反射氢离子和氖离子最可几速度分布差异之间的定量关系。这些发现深化了对多组分等离子体中静电无碰撞激波物理机制的理解, 为评估黑腔中等离子体条件提供了关键见解。

关键词: 静电冲击波; 多组分效应; 组分分离; 超热离子速度分离

hedp2025-011

含束缚电子效应的等离子体温度弛豫建模

张蓉¹, 高聪章¹, 范征锋¹, 韩小英¹, 颜君¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 在聚变等离子体中, 阿尔法粒子碰撞导致电子和离子温度脱离, 出现温度非平衡现象, 影响离子温度场, 因此等离子体电子-离子温度弛豫过程是影响聚变燃烧的关键因素之一。当前常用等离子体电子-离子温度弛豫模型仅适用于全电离等离子体, 无法描述部分电离的高 Z 或含高 Z 元素的混合物体系的电子和离子温度弛豫过程。本项研究以总能量守恒为基本定律, 考虑部分电离元素的束缚电子能量, 给出了含束缚电子效应的部分电离等离子体温度非平衡弛豫方程, 建立了相应的计算程序。理论计算发现, 束缚电子效应有助于提升平衡温度, 弛豫速率也发生一定的变化。针对稠密氢等离子体, 对比了已有的一系列模型, 当前模型对部分电离状态下电子-离子温度弛豫过程的描述具有一定可行性, 初步将本模型拓展到了高 Z 原子体系部分电离状态。

关键词: 部分电离; 电子-离子温度弛豫; 束缚电子效应; 能量弛豫速率; 平均原子模型

hedp2025-012

有限厚度柱几何瑞利泰勒不稳定性非线性演化

卢元博^{1,2}, 王小光², 黄丽霞², 陈鑫睿², 于翔汀², 吴坚¹, 肖德龙²

(1. 西安交通大学, 电气工程学院, 陕西西安 710049; 2. 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: 基于 Layzer 势流模型, 本研究建立了适用于有限厚度不可压缩柱壳的理论模型, 以研究柱几何 (r, z) 平面中单模瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 的非线性演化规律, 并结合理论分析与直接数值模拟, 验证了模型的可靠性。基于该模型, 系统揭示了柱几何效应与有限厚度效应对 RTI 非线性演化的独立作用与耦合机制。研究表明: 在柱几何构型中, 发散场构型下的 RTI 气泡速度较平面几何情形受限, 并随时间推移持续衰减; 气泡速度在演化初期增强, 最终趋近于平面几何对应的渐近值。同时, 有限壳层厚度会导致气泡持续加速, 与半无限流体层中气泡行为形成显著对比, 其物理机制在于扰动的持续增长使气泡区域进一步偏离稳态平衡。值得注意的是, 在发散构型中, 柱几何效应会弱化有限厚度的加速作用。此外, 通过参数空间分析, 进一步揭示了有限厚度与柱几何两种效应之间的竞争规律。

关键词: 瑞利-泰勒不稳定性; 势流模型; 柱几何效应; 有限厚度效应; 非线性演化; Z 箍缩

hedp2025-018

驱动不对称性对双壳靶内爆及聚变性能影响研究

陈鑫睿^{1,2}, 肖德龙¹, 王冠琼¹, 李馨东¹, 文武¹, 李璐璐¹, 王小光¹,
卢元博³, 黄丽霞^{1,2}, 于翔汀^{1,2}

(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; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100193; 3. 西安交通大学 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西西安 710049)

摘 要: 驱动不对称性是惯性约束聚变中降低双壳靶内爆性能的主要原因之一。本研究提出了一种基于时不变辐射源下的多质点理论模型, 用于研究双壳靶中驱动不对称性的传递及其对聚变性能的影响。该模型可用于研究双壳靶内爆五个阶段的激波演化和壳层运动。研究发现, 在烧蚀过程中, 驱动不对称性导致外壳中剩余质量和速度的不对称性。烧蚀结束后外壳的不对称性通过再加速过程传递到内壳。对于本研究中采用的双壳靶, 在转滞时刻内壳的不对称性可以达到辐射温度不对称性的 20 倍, 最终导致燃料不对称压缩和聚变性能下降。当辐射温度不对称性 $P2/P0$ 超过约 -1.74% 或 0.78% 时, 中子产额将降至 1% 以下。该模型还可用于分析 P1 和 P4 等其他模式的驱动不对称性。

关键词: 惯性约束聚变; 双壳靶; 驱动不对称性; Z 箍缩动态黑腔; 多质点模型

hedp2025-019

低相干激光增强的几千电子伏特 X 射线发射

周熙晨¹, 许国潇¹, 于金民¹, 王建¹, 易霖¹

(1 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海, 201800)

摘 要: 几千电子伏特的 X 射线对于惯性约束聚变和高能量密度物理中的诊断应用至关重要。在本文中, 通过使用相干度低的绿光激光以 0.6% 的带宽照射钛箔靶, 实现了多千电子伏特 X 射线发射的增强。实验表明, 在激光强度为 4 至 6×10^{14} 瓦/平方厘米时, 与广泛使用的窄带激光相比, 上述宽带激光使钛的 He- α X 射线强度提高了 17% 至 23%。带宽的引入减少了受激布里渊散射, 从而提高了激光吸收, 这是 X 射线发射增强的原因。结果表明, 宽带激光在 X 射线生成和进一步诊断方面具有广阔的应用前景。

关键词: 几千电子伏特 X 射线

hedp2025-020

激光驱动黑腔辐射源与均匀等离子体产生研究

胡小楠¹, 袁赟^{*1}, 马步博², 任洁茹², 罗文^{*1}, 赵永涛²

(1. 南华大学, 核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 西安交通大学, 物理学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 基于激光装置的高能量密度等离子体环境下的核反应是模拟天体环境及核反应数据测量的重要技术手段。本文使用 FLASH 辐射流体程序对星光 III 装置上开展的均匀近临界密度等离子体制备方案进行模拟研究, 模拟复现了黑腔-泡沫组合靶的准等容加热过程, 得到黑腔与泡沫靶的等离子体参数与实验吻合较好并给出了等离子体环境均匀性的评判准则。研究发现相同黑腔辐射温度下不同初始密度泡沫加热过程中加热波的随着密度增加从超声速加热波演化为烧蚀热波, 还计算了准等容加热过程不同初始密度与黑腔辐射温度的关系为 $\rho \propto T^{2.37}$ 。该结果对后续开展的均匀近临界密度等离子体制备实验及离子束能量损失测量实验具有重要的指导意义。

关键词: 二维辐射流体力学; 黑腔辐射光谱; 辐射与物质相互作用; 均匀近临界密度等离子体

hedp2025-021

宽带激光中的自交叉束能量转移模拟

杨丽月^{1,2}, 张嘉宁¹, 王伟¹, 王平晓²

(1 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海, 201800; 2. 复旦大学现代物理研究所, 上海, 200433)

摘 要: 我们利用基于经典 CBET 理论的简化射线追踪模型, 研究了在宽带激光中自交叉束能量转移 (self-CBET) 的机制。以往的多光束 CBET 模型往往忽略频谱展宽效应, 在此, 我们基于频谱离散化方法, 将单束宽带激光分解为 10 个子光束, 这些子光束具有随机相位和高斯分布的频率 (带宽为 0~5 THz)。模拟结果预测, 与窄带激光相比, 宽带配置下 self-CBET 驱动的能量转移减少约 10%, 这一趋势与已有文献中基于波动机制的离子声去相干理论相吻合。然而, 模型同时表明, 激光吸收率对带宽变化的敏感性有限, 这种差异主要归因于子光束有限离散化导致的频谱去相干不完全。此外, 稳态等离子体假设 (忽略瞬态流动) 以及高强度下非线性饱和效应的忽略, 也会带来影响。与混合动理学代码 (如 CBETor) 的比较验证了该模型的计算效率, 但在波动效应占主导的焦散区仍存在差异。此外, 由于激光吸收对宽带调制改善的不敏感性, 实验诊断或存在挑战。本研究强调了考虑等离子体动态耦合与更精细的频谱去相干建模的必要性, 以推动惯性约束聚变激光系统设计的发展, 在射线与波动方法之间架起桥梁, 为实现有效的 self-CBET 抑制提供理论支撑。

关键词: 自交叉束能量转移; 宽带光; 模拟

hedp2025-023

两束偏振垂直激光的前向受激布里渊散射

吕帅宇¹, 王清¹, 李晓旬¹, 程瑞锦¹, 刘德基², 黄卓明¹, 徐泽宇¹, 陈祖杰²,
王强¹, 刘占军^{1,2}, 曹丽华^{1,2}, 郑春阳^{1,2}

(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)

摘 要: 我们提出了一种两束正交偏振激光激发前向受激布里渊散射的新机制。首先通过辐射流体力学程序对实验进行模拟获得等离子体的状态（温度、密度和流速），再将其作为初始条件进行旁轴近似程序模拟。模拟结果表明，当两束激光受激布里渊散射存在背散模式和共用离子声波模式时，散射光与离子声波之间的拍频可以作为种子激发前向受激布里渊散射。增长起来的前向受激布里渊散射通过驱动散射光之间的能量转移，并与后向受激布里渊散射竞争泵浦能量，从而同时抑制了后向散射与共用离子声波模式。最终，在双光束偏振垂直入射条件下，系统的总背向散射率和单光束入射相当或略高。前向受激布里渊散射不仅是一种不稳定性，更可能成为抑制集体不稳定性的重要手段。然而，也需注意，该过程造成的光束传播方向改变及频率偏移，在惯性约束聚变等应用中可能对内爆对称性与能量沉积产生重要影响。

关键词: 前向受激布里渊散射；共用离子声波；集束；旁轴近似模拟；模式竞争

hedp2025-024

弱相对论下的俘获粒子不稳定性增长率

徐泽宇¹, 王清¹, 刘德基¹, 黄卓明¹, 程瑞锦¹, 李晓旬¹, 吕帅宇¹, 张舒童¹,
陈祖杰², 陈求实¹, 王强¹, 刘占军^{1,2}, 曹莉华^{1,2}, 郑春阳^{1,2}

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2. 北京大学物理学院, 应用物理与技术中心, 高能物理科学与技术中心, 核物理与技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 在惯性约束聚变等离子体中, 捕获粒子不稳定性 (TPI) 对受激拉曼散射和双等离子体衰变中的能量转移动力学有显著影响。本研究引入了一个相对论理论框架, 该框架解决了经典的克鲁尔—道森—苏丹模型在弱相对论温度条件下的局限性, 在这种条件下, 捕获电子的速度可与光速相比。通过将相对论修正纳入粒子动力学和波相互作用, 与 KDS 模型相比, 新模型在预测 TPI 增长率方面实现了更高的精度。从弗拉索夫—泊松系统推导出来的相对论 TPI 色散关系, 纳入了与速度相关的反弹频率修正、用于粒子动力学的麦克斯韦—尤特纳分布, 解决了在非相对论模型中观察到的 $\delta k \lambda_D$ 差异和衰减趋势问题, 其中 δk 表示边带波数与电子等离子体波 (EPW) 波数之间的差值, λ_D 是德拜长度。模拟通过求解由外部驱动的电子等离子体波引发的边带增长率, 证实了该框架的准确性, 验证了 TPI 诱导的波破裂和电子捕获机制。该模型还正确预测了 TPI 增长率对振幅和波数的依赖性, 确立了在高能量密度条件下对 TPI 进行建模时相对论物理学的必要性, 并为完善等离子体不稳定性理论和指导惯性约束聚变实验设计提供了一个基础工具。

关键词: 弱相对论; 俘获粒子不稳定性

hedp2025-026

基于射线追踪模型的束间能量转移模块的开发

王辰龙¹, 李俊¹, 陶弢¹, 蔡正浩¹, 陈坤¹, 贾青¹, 闫锐², 郑坚^{1,3}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学, 近代力学系, 安徽合肥 230026; 3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 束间能量转移 (CBET) 在惯性约束聚变中普遍存在。激光和等离子体状态在惯性约束聚变脉冲时间内会发生明显变化, 导致 CBET 过程显著变化, 故需要同时在辐射流体力学程序中实现在线计算。本研究参考已有的 CBET 理论模型, 在辐射流体力学程序 FLASH 发展了 CBET 模块, 实现了 CBET 在纳秒时间尺度的在线并行计算。同时, 本研究同时发展了计算激光在传播和反射过程中频率发生偏移的模块, 使得 CBET 相关的物理模型更加完善。为检验程序的可靠性, 本研究选取了双锥对撞点火系列实验中的平面靶预脉冲实验进行模拟, 结果与实验测量结果较为吻合。本研究有助于评估实际应用中大时空尺度下 CBET 的强度和特征, 并研究对应的演化规律。

关键词: 惯性约束聚变; 束间能量转移; 辐射流体模拟; 频率偏移; 在线耦合计算

hedp2025-027

物理信息神经网络在中心点火内爆的应用

孙晨磊¹, 李瑞², 雷杨熠¹, 陈民¹

(1. 上海交通大学, 物理与天文学院, 激光等离子体重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学, 网络信息中心, 高性能计算中心, 上海 200240)

摘要: 本文探讨了物理神经网络 (PINN) 如何应用于惯性约束核聚变中心点火内爆的模拟。由于中心点火滑行过程中物理量在时空上变化剧烈, 神经网络中存在的谱偏差 (难以学习高频特征) 会导致训练效果很差。在训练 PINN 算法时, 我们使用了基于同方差不确定性 (Homoscedastic uncertainty) 的多任务深度学习方法, 对 PINN 中各个损失的权重值进行了平衡, 并采用了 MULTI-2D 辐射流体程序的模拟数据。研究结果表明: 1) 所用的损失权重平衡方法可有效缓解极端物理量变化引发的各损失项收敛率失衡问题, 使得 PINN 模型能够稳定收敛; 2) 与未引入 PINN 的同架构神经网络相比, 我们的研究将模拟误差降低了 50%, 显著提升了机器学习对惯性约束核聚变中心点火滑行过程的模拟精度。

关键词: 物理信息神经网络; 惯性约束核聚变; 中心点火滑行过程; 谱偏差; 同方差不确定性; 多任务深度学习方法; 损失权重平衡; MULTI-2D 辐射流体程序

hedp2025-028

横向密度调制诱导的大角度受激拉曼散射

黄卓明¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: Large-angle stimulated Raman scattering (LA-SRS) in a longitudinally inhomogeneous plasma with a transverse density modulation is studied using a three-wave coupled model and numerical simulations. The simulations show that the scattering angle of SRS in a longitudinally inhomogeneous plasma can be significantly affected by transverse density modulation. Under transverse density modulation conditions, the laser focuses into underdense regions, owing to the transversely modulated refractive index. The angle of LA-SRS, neither a purely 90° angle side scattering nor purely backscattering, is almost consistent with the specific angle at which the density inhomogeneity vanishes. In modulated plasmas, the nonuniform distribution of laser intensity shifts the regions of scattering and gain compared with those in uniform plasmas, ultimately affecting the laser transmission. SRS is suppressed in weakly modulated regimes, whereas it is enhanced under strong modulation conditions, and a theoretical criterion distinguishing between strong and weak modulation is established.

关键词: stimulated Raman scattering; density modulation

hedp2025-029

飞秒激光照射纳米线阵列产生阿尔法粒子

王倩¹, 黄海荣^{1,2}, 林杰¹, 董乾¹, 邓慧中¹, 袁赟^{*1,2}, 罗文^{1,2}

(1. 南华大学, 核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 河北省紧凑型聚变重点实验室和新奥科技发展有限公司, 河北廊坊 065001; 3. 教育部, 先进核能技术设计与安全教育部重点实验室, 湖南衡阳 421001)

摘要: 质子硼核聚变是以相当低的中子剂量生产清洁核聚变能源的良好候选反应。 $p^{11}B$ 聚变等离子体的可靠模拟对于研究 $p^{11}B$ 聚变物理及其产生的 α 粒子具有重要意义。为了合理地模拟 $p^{11}B$ 聚变等离子体动力学, 在粒子在胞 (PIC) 模拟代码 EPOCH 中实现了蒙特卡洛 (MC) $p^{11}B$ 聚变模块。对 $p^{11}B$ 聚变反应中的 α 粒子生成进行了基准测试。测试结果与现有的实验和理论数据非常吻合, 从而验证了在 EPOCH 代码中实施 $p^{11}B$ 聚变模块的有效性。此外, 这一开发成果还被用于研究在由十八硼烷 ($B_{18}H_{22}$) 组成的激光照射纳米线阵列 (NWA) 靶中增强的 α 粒子的生成。结合贝叶斯优化靶参数和激光强度, 这种优化不仅有助于确定实现高聚变能效的最佳条件, 还能让我们探索参数空间。二维 PIC-MC 模拟显示, 使用合适的 NWA 靶件可以产生高能 α 粒子, 总产率为 $2.4 \times 10^{11}/J$, 与平面靶件相比高出约两个数量级。我们的结论是, 这一发展为研究高功率激光驱动的 $p^{11}B$ 聚变等离子体物理和应用提供了可靠的工具, 而且纳米线创造的高密度和强场等离子体环境有可能提高核反应的效率。

关键词: 激光等离子体; 氢硼聚变; PIC; 阵列靶; 贝叶斯优化

hedp2025-030

固体锂靶激光极紫外转换效率多参数寻优

林杰¹, 胡小楠¹, 王倩¹, 袁赟*¹, 王文鹏², 罗文*¹

(1. 南华大学, 核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 中国科学院, 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 固体锂靶在激光驱动下产生等离子体被认为是一种极具潜力的极紫外 (EUV) 光源, 其 13.5 nm 线谱辐射具有优良的光谱纯度与更少的高能离子碎片, 适用于下一代 EUV 光刻系统。然而, 实现高效率 EUV 辐射仍面临参数空间大、优化成本高等挑战。本文引入机器学习中的贝叶斯优化策略, 旨在实现多参数下的 EUV 转换效率 (CE) 快速寻优。研究首先采用传统线性扫描方法进行二维网格搜索和优化, 初步确定影响 CE 的关键参数特征。随后开发了基于随机森林代理模型和指数衰减动态采集函数的改进贝叶斯方法, 扩展到四维参数空间以减少局部最优风险。优化结果表明, 对于四个输入参数的仅需 41 次迭代即可获得最优参数组合, 对应最大 CE 为 3.18%, 相较传统网格搜索速度提升近一千倍。该研究为未来激光等离子体光源设计与 EUV 应用技术发展提供了有力支持。

关键词: 等离子体; 极紫外光; 贝叶斯优化; 网格搜索; 随机森林

hedp2025-031

宽带光实验中热电子时间演化的诊断方案设计

蔡正浩¹, 李俊¹, 闫锐², 雷安乐³, 袁鹏⁴, 王绪³, 王佩佩³, 方智恒³, 王伟³,
郑坚¹

(1. 中国科学技术大学, 核科学技术学院, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学, 工程科学学院, 安徽合肥 230026; 3. 中国工程物理研究院, 上海激光等离子体研究所, 上海 200180; 4. 上海交通大学, 李政道研究所, 上海 200240)

摘 要: 宽带光一直以来被认为是抑制激光等离子不稳定性 (Laser Plasma Instability) 的一种有效手段。然而, 近年来在“昆吾”激光装置上的实验结果表明: 与窄带光相比, 宽带光入射反而产生了更多的热电子, 伴随着受激拉曼散射 (SRS) 与双等离子体衰变 (TPD) 的增强。这些热电子的来源以及增强机制仍没有从实验上得到确认, 制约了对宽带光的应用前景的进一步评估。为了探究宽带光实验中的热电子来源, 需要在实验中诊断热电子的时间演化。

基于已有的实验数据, 结合 Geant 4 模拟, 我们对热电子产生的 X 射线和渡越辐射强度进行了估计, 并且对靶后金属层进行了设计。结果显示: 靶后镀 Al 的厚度在 10-20 μm 可以保证 X 射线和渡越辐射强度都处在可以探测的区间; 热电子产生的 X 射线使用闪烁体探测器进行探测, 但是需要采用快速闪烁体结合高速光电倍增管以实现 ns 以下的时间分辨; 热电子产生的渡越辐射在 THz 波段显著大于黑体辐射, 但是需要时间分辨在 ns 以下、等效噪声功率 (NEP) 小于 30 $\text{pW/Hz}^{0.5}$ 的 THz 波段探测器采集渡越辐射。

关键词: 激光等离子不稳定性; 热电子; 渡越辐射; X 射线; 时间诊断

hedp2025-032

束间能量转移中的动理学效应研究

陈坤¹, 李俊^{1,2}, 郝亮³, 姚灿^{1,3}, 闫锐^{2,4}, 郑坚^{1,2}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 621900; 3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 4. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230026)

摘要: 在激光驱动惯性约束聚变 (ICF) 中, 束间能量转移 (CBET) 过程导致能量在激光束之间发生显著转移, 影响靶丸的压缩对称性, 造成激光能量损失, 降低压缩效率。实际 CBET 过程中往往伴随着离子俘获、离子加热等复杂非线性动理学过程, 使其难以被准确描述。本研究中, 我们通过粒子模拟 (PIC) 研究结合理论分析, 系统研究了典型 ICF 参数范围内 CBET 强度在不同程度的非线性效应下随不同激光等离子体参数的变化规律。我们首先发展了线性 CBET 强度的快速计算方法, 并和数值模拟结果进行了正确性检验。之后, 通过对比天然包含非线性效应的 PIC 模拟结果和线性计算结果, 我们发现非线性效应在单组分 He 等离子体中稳定地降低 CBET 强度, 但是对于双组分 CH 等离子体, 非线性效应在部分参数范围内能够反常的提高 CBET 强度。我们发现该反常现象是 CH 组份的分离效应造成的, C、H 离子密度扰动反相位表明 H 离子被大量俘获, C 离子成为离子波的主要载体, 朗道阻尼下降, CBET 强度增加。随着非线性效应的进一步增强, 波粒子相互作用更加显著, 此时离子捕获造成的非线性频移解谐了 CBET 的三波匹配条件, CBET 强度被抑制。

关键词: 束间能量转移; 动理学效应; 离子声波; 多离子组份; 朗道阻尼

hedp2025-033

多光束通过双等离子体衰减与受激拉曼散射高效产生发散与准直热电子的新机制

孟珂阳¹, 蔡正浩¹, 李俊^{1,2}, 姚灿^{1,3}, 郝亮³, 周福熙⁴, 闫锐^{2,4}, 郑坚^{1,2}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 621900; 3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 4. 中国科学技术大学, 近代力学系, 安徽合肥 230026)

摘 要: 在惯性约束聚变 (ICF) 内爆过程中, 激光等离子体不稳定性 (LPI) 会产生超热电子并为靶丸内部的等离子体带来预热风险, 这一风险在超热电子的总能量一定时, 主要取决于这些超热电子的角度特性。通过粒子模拟 (PIC), 我们揭示了一种新型多光束协同机制——双等离子体衰减不稳定性 (TPD) 与受激拉曼散射 (SRS) 的共同作用机制 (STS 不稳定性), 并研究了在典型 ICF 条件下, 双光束以不同入射角 $\sin\theta$ (在入射平面内为 24° 至 55°) 共同驱动等离子体时, 该 STS 不稳定性产生的超热电子角度分布特性。模拟显示, 当 $\sin\theta \gtrsim 44^\circ$ 时, STS 机制成为主要的超热电子产生途径, 并导致超热电子呈现宽的角度分布, 表现出显著的发散与准直的组分。与 STS 相关的共用朗缪尔波在加速这两种超热电子的过程中起到了关键作用。我们建立了 STS 共用子波增益模型与准直及发散超热电子能量之间的标度关系。这些关系表明, 发散的超热电子对增益变化的敏感性高于准直电子。另外, 此共用子波增益能够定性预测当密度梯度偏离激光束夹角平分线时超热电子角分布的不对称性。我们的研究为多光束条件下的超热电子产生提供了新见解, 可能补充此前实验中关于对称光束在相同锥体内重叠强度的重要性以及双光束耦合主导作用的研究结论。

关键词: 双等离子体衰减; 受激拉曼散射; 超热电子; 角分布; 共用子波

hedp2025-036

等离子体 Richtmyer – Meshkov 不稳定性中的临界激波强度

林子涵¹, 罗慧*¹, 朱国怀², 蔡洪波^{3,4}, 朱少平^{1,3}, 罗民兴²

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193; 2. 北京计算科学研究中心, 北京 100193; 3. 应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;
4. 北京大学应用物理与技术研究中心高能量密度物理研究室, 北京 100871)

摘 要: Richtmyer – Meshkov 不稳定性 (RMI) 是高能量密度等离子体中触发界面混合的重要机制, 其演化受激波强度的显著影响。在理想流体条件下, RMI 通常被认为随激波强度单调增强。本文利用 FLASH 代码系统研究了不同激波强度下等离子体 RMI 的演化, 并引入多组分输运模块, 其中输运系数基于统一输运理论计算。模拟结果显示, 扰动振幅与涡旋结构对激波强度的依赖呈现非单调性, 存在对应于最大增长的临界激波强度; 而分子混合则随激波强度单调增加。退耦合模拟进一步揭示, 随着激波强度增大, 激波压缩与加速效应增强, 但同时黏性主导的抑制作用及质量扩散的次要抑制作用逐渐显现, 从而导致振幅的临界行为。我们还提出了一个半经验振幅模型, 仅需有限次数模拟即可快速预测临界激波强度。类似地, 涡旋结构的临界行为源于激波压缩、斜压涡量沉积与黏性阻尼之间的竞争。相比之下, 分子混合主要由增强的质量扩散主导, 因此随马赫数持续增加。研究表明, 通过合理调控激波强度, 可在不稳定性驱动混合与扩散驱动混合之间实现平衡, 并为优化激光驱动条件、提升惯性约束聚变内爆性能提供参考。

关键词: Richtmyer-Meshkov 不稳定性; 激波强度; 多离子种类输运; 黏性; 质量扩散

hedp2025-037

惯性约束聚变中汤姆逊散射诊断的粒子模拟

朱子昂^{1,2}, 刘一凡¹, 李俊¹, 温寒³, 曹世辉², 时银¹, 贾青¹, 陈朝鑫², 刘耀远²,
赵航², 龚 韬², 李志超², 杨冬², 郑坚¹

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900;
3. 湖南大学, 物理与微电子科学学院, 湖南长沙 410082)

摘 要: 在惯性约束聚变 (ICF) 条件下, 等离子体通常处于强碰撞与非热平衡状态, 这使得基于传统理论的汤姆逊散射诊断变得极为复杂, 制约了对实验观测的解释。针对这一挑战, 我们提出了一种基于粒子模拟的汤姆逊散射研究方法: 在模拟中创造典型 ICF 条件下的等离子体并加载探针光, 在模拟过程中对电磁场进行时间上的傅里叶变换, 进而获取具有高角度和频率分辨率的散射光信号。该方法在热相干散射情况下获得的频谱形状与现有理论符合良好, 且可体现离子间碰撞的影响。对于满足三波匹配条件的超热相干散射, 模拟结果同样与理论一致。此外, 即便在驱动密度扰动波矢不完全匹配时, 我们仍观测到显著的汤姆逊散射信号, 这与传统汤姆逊散射理论预测不同。我们发现这种散射信号产生于探针光与密度扰动相互作用区域的边界附近。未来的工作会将此框架应用于非局域热流以及多光束激光等离子体不稳定性的诊断研究。

关键词: 惯性约束聚变; 汤姆逊散射; 等离子体诊断; 粒子模拟; 激光等离子体相互作用

hedp2025-041

宽带激光驱动下 $1/4$ 临界密度附近 SRS 非线性演化研究

张浩^{1,2}, 刘庆康¹, 李鹏宇^{1,2}, 王清¹, 蔡洪波^{#,1,3}, 朱少平^{1,2}

(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; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088; 3. 北京大学, 应用物理与技术研究中心, 北京 100871)

摘 要: 宽带激光因其在抑制激光等离子体不稳定性 (LPI) 方面的潜力而受到广泛关注, 有望作为下一代高增益聚变驱动光源。然而, 宽带激光驱动下 LPI 的非线性演化过程尚未被充分理解[1]。本报告主要研究宽带激光驱动下, $1/4$ 临界密度 (n_c) 附近受激拉曼散射 (SRS) 的非线性演化及其能量传递过程[2]。数值模拟表明, 在 $1/4 n_c$ 区域附近, 朗缪尔波衰变 (LDI) 是 SRS 的主导非线性机制。在中等带宽(0.6%)条件下, 激光的相干时间与电子等离子体波 (EPW) 的响应时间相近, 但远小于离子声波 (IAW) 的响应时间。一方面, 这使得激光中的局域高强度脉冲能够驱动 SRS 爆发, 并增强了 50 keV 以上超热电子的产生。另一方面, 频繁强度涨落打断了 IAW 的持续增长, 并抑制了 LDI 及其后续的拍频过程。这阻碍了能量从高相速度的 EPW 向低相速度 EPW 的传递, 减少了 10-50 keV 热电子的数量, 并抑制了背景等离子体升温。

关键词: 宽带激光; $1/4 n_c$; SRS; 非线性演化

参考文献:

[1] Anle Lei et al, 2024 Phys. Rev. Lett. 132, 035102

[2] Hao Zhang et al, 2025 Plasma Phys. Control. Fusion 67 085023

hedp2025-042

黑腔中对向传播等离子体冲击波的大时间尺度动理学模拟

张旭^{1,2}, 刘庆康^{1,2}, 孟凡琦^{1,2}, 蔡洪波^{1,3}, 朱少平^{1,2,4}

(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; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088; 3. 北京大学, 应用物理与技术研究中心, 北京 100871; 4. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要: 通过混合流体-PIC (particle-in-cell) 模拟研究了空腔中两个对向传播的冲击波的大时间尺度演化。该研究探讨了冲击波演化过程, 以及在复杂多离子等离子体中动理学效应对冲击波结构的影响, 特别是黑腔中膨胀的高 Z 的金泡与低 Z 的黑腔填充气体之间相互作用产生的冲击波。研究发现, 冲击波的产生存在一个转变点, 当气体密度很低时冲击波无法充分形成。对于充分形成的冲击波, 冲击波在对撞中保持了冲击波的结构不变但冲击波的对撞可以显著压缩并加热气体等离子体, 使等离子体成为高温、高密度的平台, 在数百皮秒内保持稳定, 这可能通过减少朗道阻尼显著增强 SRS。此外, 冲击波与腔壁/气体界面的相互作用导致气体离子与腔壁等离子体显著混合, 改变了界面附近的黏性系数。这项研究加深了对冲击波这一现象的理解, 并有助于提高预测黑腔内等离子体性质的准确性。

关键词: 多组分等离子体; 冲击波相互作用; 离子动理学效应; 离子混合; 等离子体冲击波

hedp2025-045

等容等离子体中高密度热斑点火阈值研究

王美乔¹, 徐泽鲲^{1,2}, 吴福源^{3,4}, 王伟民^{3,4,†}, 张杰^{1,3,4,†}

(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; 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: 随着美国国家点火装置实现聚变点火, 激光聚变研究者们逐渐开始关注高增益点火, 以期实现聚变能源。双锥对撞点火方案是一种基于等容构型快点火的新型点火方案, 拥有更低的驱动激光能量要求和更高的聚变增益潜能。

双锥对撞点火方案使用金锥和强磁场约束皮秒激光产生的快电子加热对撞产生的等容等离子体, 拥有较高的能量转换效率。但是, 双锥对撞点火方案的边缘加热等容构型与传统中心点火方案的等压构型存在巨大差别, 因此需要对加热和燃烧过程展开深入研究。双锥对撞点火方案的加热和燃烧过程存在快加热、高密度和边缘构型三大特征, 基于这些假设可以推导其对应的点火判据。在流体力学过程中引入快加热和燃烧过程, 可以更深入地研究双锥对撞点火方案的热斑演化, 给出热斑定义和点火对应的物理条件。研究发现, 高密度热斑激发的激波可以有效地吸收聚变产生的 α 粒子, 因此可以认为激波波峰位置是热斑的边界。在加热后期, 边缘热斑的大部分质量通过稀疏膨胀向真空损失, 此时燃烧的进一步传播要求激波在自身的聚变反应沉积驱动下继续向前传播。因此, 双锥对撞点火方案的点火要求激波达到自持燃烧条件。

为了验证以上结论, 我们开发了跨尺度的加热燃烧模拟程序。通过 PIC 方法计算快电子的产生, Hybrid-PIC 方法计算快电子沉积和流体方法计算背景等离子体演化, 有效地验证了双锥对撞点火方案的加热和燃烧理论。

关键词: 双锥对撞点火方案; 高密度热斑; 跨尺度加热燃烧程序

hedp2025-047

共振密度区间决定双等离子体衰变不稳定性饱和水平并实现对惯性约束聚变中超热电子的预测

姚灿^{1,2}, 李俊^{1,3}, 郝亮², 闫锐^{3,4}, 陶骏¹, 郑冠男¹, 贾青¹, 丁永坤², 郑坚^{1,2,3}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 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 100088; 3. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 4. 中国科学技术大学, 近代力学系, 安徽合肥 230026)

摘 要: 激光等离子体不稳定性的饱和水平决定了其对聚变过程的影响程度。双等离子体衰变不稳定性 (TPD) 是惯性约束聚变中主要的激光等离子体不稳定性之一, 其产生的超热电子更够预热靶丸内部冷燃料, 降低内爆效率, 因此需要被有效抑制。我们发现, TPD 绝对模只在其共振密度区间内增长, 并通过多参数流体模拟加以验证。进一步研究表明, 共振密度区间主导了 TPD 离子密度扰动的饱和水平以及朗缪尔波的非线性饱和。基于这一认识, 并结合一维稳态烧蚀理论对等离子体条件的表征, 我们建立了 TPD 产生超热电子的能量比例 f_{hot} 的预测模型。该模型仅依赖于入射激光强度 I , 通过 (I, f_{hot}) 空间的两到三个实验数据点即可标定与实验相关的系数, 且适用于多种实验构型。利用此模型, 我们成功重现了先前 OMEGA 和 OMEGA-EP 实验的结果。

关键词: 惯性约束聚变; 激光等离子体不稳定性; 超热电子

hedp2025-049

宽频带激光等离子体相互作用中强度尖峰主导的热电子产生机制

姚灿^{1,2}, 李俊^{1,3}, 郝亮², 闫锐^{3,4}, 丁永坤², 郑坚^{1,3}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 3. 上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 621900; 4. 中国科学技术大学, 近代力学系, 安徽合肥 230026)

摘要: 抑制由激光等离子体不稳定性 (LPI) 驱动的热电子产生, 是实现惯性约束聚变 (ICF) 高增益点火的关键科学问题之一。传统观点认为, 宽频带激光脉冲能够通过破坏相位匹配条件来有效抑制不稳定性。然而, 近期在昆吾宽频带激光装置上的实验却发现, 在中等带宽条件下, 热电子能量反而显著增强, 这一反常现象引发了对宽频带激光抑制机制的重新思考。

为了揭示其物理本质, 我们结合理论分析、粒子模拟与实验结果, 对宽频带激光与等离子体的相互作用进行了系统研究。结果表明, 宽频带激光场中随机出现的强度尖峰会显著增强两等离子体衰变 (TPD) 不稳定性, 从而导致更强的热电子产生与 $3/2$ 倍频辐射。该尖峰驱动机制不仅在远高于阈值的情况下存在显著增强效应, 而且在接近阈值时仍能维持强烈的不稳定增长, 与传统理论预期的接近阈值更易抑制趋势相反。通过对尖峰统计特性的分析, 我们进一步建立了热电子能量与不同宽频带方案尖峰特征之间的定量关系。值得注意的是, 多束宽频带激光的叠加能够有效削弱尖峰高度, 从而显著降低热电子能量。本研究揭示了强度尖峰在宽频带激光等离子体相互作用中的主导作用, 为理解宽频带激光的不稳定性机理和优化 ICF 驱动器设计提供了新的物理图像与实践指导。

关键词: 宽频带激光; 超热电子; 激光等离子体不稳定性; 强度尖峰; 双等离子体衰变

hedp2025-053

激光聚变中受激散射过程诊断研究进展

陈朝鑫¹, 刘耀远¹, 刘祥明¹, 龚韬¹

(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: 在激光聚变领域, 受激散射会造成大量激光能量以散射光的形式损失, 严重影响能量增益的提升。所以激光聚变研究对受激散射过程提出了强烈的诊断需求。受激散射过程会驱动高振幅的等离子体波和高强度的散射光, 团队研发了多维度散射光诊断系统和超热相干汤姆逊散射技术分别测量散射光和等离子体波。多维度散射光诊断系统配套了考虑偏振差异的标定方法, 可以精确测量散射光的散射光能量分布、光谱、偏振态等多维度信息。超热相干汤姆逊散射技术诊断受激散射光过程驱动的等离子体波, 可以揭示充气黑腔中的受激布里渊散射增长过程, 发现高填充小尺寸黑腔中, 受激布里渊散射的主要来自 CH 等离子体, 主要受流体速度调制。

关键词: 激光聚变; 受激散射光; Thomson 散射

hedp2025-055

通过先进碰撞模型解开燃烧等离子体中的超热离子之谜

薛宇涵¹, 吴栋¹, 张杰¹

(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)

摘要: 美国国家点火装置 (NIF) 研究人员 2021 年实现了激光聚变 (ICF) 燃烧等离子体, 观测到了暂时无法解释的实验现象——中子能谱数据显著偏离流体力学数值模拟预测并存在偏离麦克斯韦分布的高能氦离子。我们提出一种能全面捕捉离子动力学特征的离子大角度碰撞新模型, 这个模型与团队自主研发的流体动力学混合模拟程序 LAPINS 相结合, 实现了对 ICF 核燃烧等离子体的高精细度动力学数值模拟, 数值模拟结果与 NIF 燃烧等离子体中高能离子的实验数据高度吻合, 找到了美国 NIF 实验现象的物理原因, 并预示着随着能量增益的进一步提高, 等离子体偏离麦氏行为的非平衡现象将更显著。进一步的研究还发现, 大角度碰撞不仅可促使点火时刻提前约 10 ps, 还产生了特定的超热 DT 离子, 显著增强热斑内部及其边缘的 α 粒子沉积, 使峰值 α 粒子密度倍增。这项工作不仅为 ICF 实验带来了全新的阐释视角, 而且为 ICF 核燃烧等离子体这一尚待深入探索的领域开辟了一条全新的研究途径。此外, 该工作在设计并优化新型点火方案以及揭示早期宇宙演化背后的物理机制方面, 也具有重要的科学意义。

关键词: 离子动力学; 超热离子; 大角度碰撞; 非平衡燃烧; 惯性约束聚变; 燃烧等离子体

hedp2025-065

中等带宽对激光吸收和受激拉曼侧散的影响

许国潇¹

(1. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 报告了在惯性聚变能研究中, 单色和宽带绿激光 (带宽分别为 0.2% 和 0.6%) 在 $5-7 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 强度下产生的激光等离子体不稳定性 (LPI) 的实验结果。通过诊断散射光的角分辨分布, 发现激光吸收率随着激光带宽的增加而提高。这种增强主要归因于受激布里渊散射的减轻。同时, 由带宽引起的激光强度固有时间波动导致受激拉曼散射更强烈, 尤其是侧向散射。这些发现表明, 用于惯性聚变能的激光带宽要求应超过中等水平, 以实现 LPI 的全面抑制。

关键词: 宽带激光; 激光等离子体不稳定性

hedp2025-075

多光束强耦合受激布里渊散射

李鹏泽¹, 贾青¹

(1. 中国科学技术大学 核科学与技术系, 安徽合肥 230026)

摘要: 受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering) 作为激光-等离子体相互作用的重要形式, 在惯性约束聚变中发挥着关键作用。早期的理论与实验研究主要集中在单束激光的不稳定性上, 而近年来的研究开始关注多束激光重叠区域内的不稳定性。然而, 现有研究普遍忽略了多束激光重叠时可能出现的强耦合效应。当满足特定条件时, 多束激光重叠区域中产生的强耦合 SBS (SC-SBS) 会显著影响能量沉积与驱动对称性。本文针对均匀等离子体中 N 束对称分布、参数相同的激光, 提出了一种新的多束强耦合 SBS 模式。推导了共享光波 (Shared Light, SL) 与共享等离子体波 (Shared Plasma wave, SP) 两种模式的统一色散关系与阈值条件, 结果表明其有效强耦合阈值随光束数增加而反比降低。随后, 利用二维与三维粒子-网格 (PIC) 模拟对理论模型进行了验证。最后, 将理论进一步推广至空间不对称的两束光配置, 并讨论了非均匀等离子体中的强耦合 SBS 行为。研究结果表明, 多束模式下的强耦合 SBS 与光束数量密切相关, 可能对 ICF 中的能量传输与对称性控制产生重要影响。该研究为通过调节光束数量、排列方式与强度来抑制 SBS 损失提供了新的思路。

关键词: 受激布里渊散射; 强耦合; 多光束相互作用; 激光等离子体相互作用; 惯性约束聚变

hedp2025-086

一维混合模型用于研究直接驱动内爆中的烧蚀瑞利-泰勒不稳定性

刘冬雪¹, 陶骏¹, 李俊^{1,3}, 贾青¹, 闫锐^{2,3}, 郑坚^{*1,3}

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学, 核科学技术学院, 安徽合肥 230027; 3. 上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 本研究开发了一个结合激光烧蚀与初始扰动效应的一维混合模型, 以研究烧蚀瑞利-泰勒不稳定性对压缩动力学的影响。该模型基于浮力-阻力模型确定混合区尺度, 并在混合区域内引入一个与湍流动能和初始扰动水平相关 (含自由调节系数) 的附加热源, 从而描述混合效应对于激光烧蚀的影响。此模型被集成至一维辐射流体动力学程序, 并通过二维平板模拟结果完成了验证: 模型在量化压缩性能方面的相对误差保持在 10% 以内。模型在球形内爆模拟的进一步应用表明, 其能合理预测混合效应导致的内爆性能下降, 包括壳层压缩减弱、滞止压力降低、面密度减小等, 主冲击波会聚与滞止时刻之间的时间间隔可为单发实验中的混合水平提供评估依据。

关键词: 混合模型; 激光烧蚀; 压缩动力学

hedp2025-088

直接驱动中 LPI 的大尺度模拟研究

马行行¹, 陈星宇², 郭守嘉², 杨晓虎¹, 翁苏明², 盛政明², 张杰²

(1. 国防科技大学 核科学与技术系, 湖南长沙 410073 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)

摘 要: 在 ICF 点火方式中, 直接驱动相比于间接驱动具有更高的激光能量转换效率, 因而直接驱动被认为是获得聚变能源的最终选择途径。在直接驱动中, 入射激光会在靶丸冕区等离子体中激发激光等离子体不稳定性 (LPI), LPI 将破坏靶丸的辐照对称性, 同时其产生的超热电子也可能预热靶丸, 增加靶丸的压缩难度。为了研究直接驱动中 LPI 的强弱及其演化规律, 我们利用前期开发的二维大尺度 LPI 模拟程序 PM2D, 在我国双锥对撞点火方案及美国 OMEGA 点火方案的激光、靶参数下, 模拟分析了实验尺度下 LPI 的主导类型、主要发展位置以及超热电子产生情况。相应研究结论对评估点火实验中 LPI 的影响具有重要意义。

关键词: 惯性约束聚变; 激光等离子体不稳定性

hedp2025-092

基于 FLASH 模拟的宽窄带激光驱动 CH 靶等离子体演化

王建¹, 易霖¹, 周熙晨¹

(1 中国工程物理研究院, 上海激光等离子体研究所, 上海, 201800)

摘 要: 激光驱动靶等离子体的演化特性直接决定能量耦合效率与靶材动力学行为, 宽窄带激光的带宽差异可能通过调控激光—等离子体相互作用影响能量吸收效率。本文采用 FLASH 流体模拟程序, 系统研究不同网格精度、宽窄带激光(单色光 526 nm / 双色光 525-527 nm) 及计算域尺寸对 CH 靶等离子体 1/4 临界密度面演化、密度标长及电子温度的影响, 并验证宽带激光的靶驱动效果。

关键词: FLASH 模拟; 宽窄带激光; 1/4 临界密度界面;

hedp2025-093

2 ω -3 ω 混合激光直接驱动：能量耦合与内爆稳定性研究

郑冠男¹, 陶弢¹, 郑坚¹

(1. 中国科学技术大学, 等离子体物理与聚变工程系, 安徽合肥 230026)

摘要: 为了研究 2-3 ω 混合激光在直接驱动中的动力学特性与不稳定性抑制机制, 利用 FLASH 与 MULTI 程序系统模拟了 100-1600 TW/cm² 的激光功率及 0 – 100% 的 2-3 ω 激光混合条件下 CH 靶的烧蚀与加速过程。通过获得稳态烧蚀阶段的关键物理参数 (α 、 β 、 L_m 、 V_a 、 g) , 分析了靶丸在 0-300km/s 加速阶段的瑞利 – 泰勒不稳定性 (RTI) 增长规律。结果表明, 随着激光功率的提高, RTI 有效增益显著降低: 从 100 到 1600 TW/cm², 增益下降约 6 个数量级, 其中低功率区间 (<1000 TW/cm²) 的抑制作用最为显著。高功率的激光导致内爆加速度 g 与烧蚀速度 V_a 显著增加, 其正向效应远超密度梯度标长 L_m 缩短所带来的负面影响, 是 RTI 被有效抑制的主要原因。相比之下, 提升 3 ω 激光混合比虽可略微改善 RTI (一般不超过 1 个数量级), 但效果受功率条件和密度梯度 L_m 波动影响较大。

从能量角度分析, 不同激光条件下达到 300 km/s 内爆速度所需的激光能量随功率升高而增加, 而高频 (3 ω) 成分有助于提升能量吸收效率。纯 3 ω 激光驱动在高功率下能量损失较小, 相比 2 ω 激光具有明显优势。综合 RTI 抑制与能量利用结果, 2 – 3 ω 激光以 40 – 50% 混合比驱动的综合性能最优: 其 RTI 增益接近甚至优于同功率的 3 ω 激光, 而能量需求仅略高 5% 以内。研究结果揭示了 2-3 ω 混合激光在提升直接驱动稳定性与能量利用率方面的潜在优势, 为高增益点火设计提供了参考。

关键词: 2-3 ω 混合激光; 直接驱动; 瑞利-泰勒不稳定性; 烧蚀加速; 能量吸收效率

hedp2025-095

基于强激光装置实验的锡高压相结构及参数研究

段晓溪¹, 刘浩¹, 章欢¹, 王哲斌¹, 杨为明¹, 任颖慧¹, 王哲斌¹, 关赞洋¹,
范伟¹, 理玉龙¹, 王峰¹, 董云松¹, 李志超¹, 杨冬¹, 杨家敏¹, 赵宗清

(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 621900)

摘 要: 极端高压下的材料特性参数 (相结构、状态方程) 研究在天体物理、高压材料科学、国防科学等领域都有重要的应用价值。高能激光能够在 $10^{-9}\sim 10^{-18}$ s 极短的时间尺度内, 将 $10^1\sim 10^6$ 焦耳能量沉积到 $10^{-15}\sim 10^{-9}$ m³ 极小空间尺度内, 产生 $10^9\sim 10^{14}$ Pa 的极端高压下从千 K 到数十万 K 温度范围的宽区热力学状态, 为极端条件下的材料特性研究提供了重要的实验平台。锡 (Sn) 元素在高压下的物性参数一直以来都是高压物性领域研究关注的重要问题。在高压条件下 Sn 的外层电子的杂化行为导致其呈现出复杂的相变序列和多相竞争性质, 例如, Sn 的冲击熔化相边界的压强参数以及高压下理论预测的 BCC→HCP 相变问题一直是理论和实验研究争议的焦点。针对 Sn 材料在高压下的相结构及物性参数问题, 激光聚变研究中心材料压缩特性研究团队依托“神光”系列高能强激光装置, 建立了包含稳定冲击加载、准等熵加载的高压加载技术和适用于高压下材料原位相结构参数测量的动态 X 射线衍射诊断能力, 成功应用于 Sn 的冲击熔化相变和准等熵压缩下的高压相结构测量, 实验结果揭示了 Sn 的冲击熔化相变的压强参数范围, 同时准等熵高压相变研究结果表明: 在激光准等熵加载最高达到 570 GPa 的参数范围内, Sn 一直保持 BCC 相结构, 并未观测到理论预测的 BCC→HCP 相变发生。

关键词: 极端高压物性; 高压相变; 锡; 准等熵压缩

hedp2025-100

尖顶锥靶增强快电子传输及其在快点火和双锥对撞点火中的应用

叶闯天^{1,3}, 张铁怀², 王伟民^{2,4}, 李玉同^{1,3}, 张杰^{1,2,4}

(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, 激光等离子体实验室, 物理与天文系, 上海 200240; 3. 中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 100049; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 为了提高快点火中快电子到高密度燃料区的沉积率, 我们提出一种利用尖顶锥形结构增强快电子输运的快点火方案。基于二维粒子模拟研究皮秒相对论激光与金锥的相互作用, 发现相较于传统平顶锥, 尖顶锥形结构在抑制锥靶背纵向鞘层电场的同时, 显著增强横向鞘层场。该构型在引导低能快电子向高密度靶传输并抑制其传输过程中的横向发散方面具有明显优势。随着锥体插入高密度燃料深度的增加, 靶背鞘层场强度下降, 尖顶锥形结构的优势逐渐减弱。进一步考察等离子体密度及激光强度的影响, 证实尖顶锥形结构在不同参数条件下仍保持其增益, 但尖顶锥优势消失对应的临界插入深度会相应偏移。

关键词: 惯性约束核聚变; 快点火; 强激光; 快电子

hedp2025-108

基于神光Ⅲ原型装置的激光斜入射驱动性能实验研究

李钰淋¹, 杨为明¹, 段晓溪¹, 晏骥¹, 杨家敏¹

(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: 高功率激光烧蚀固体靶在多个前沿领域具有广泛应用。由于激光器排布与靶结构等限制, 激光斜入射靶面的情形常难以避免。在现有激光条件下, 对斜入射激光驱动特性的研究具有重要意义。此项工作, 基于神光Ⅲ原型装置, 开展了功率密度约为 $\sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 的纳秒激光烧蚀 CH 平面靶实验, 获得了不同入射角下的驱动强度数据和变化规律; 利用一维辐射流体程序 Multi 对实验过程进行了模拟, 较好地再现了实验冲击波速度演化曲线, 并通过模拟获得了能量吸收率和烧蚀压等时变参数; 据此建立了快速增长-逐步下降的时变烧蚀压物理模型, 并研究了入射角对各阶段的影响。本研究将为激光极向直接驱动内爆的驱动均匀性优化提供新的物理依据, 同时为激光烧蚀在等离子体物理、冲击物理等研究中的应用提供更多的实验支撑。

关键词: 斜入射; 激光烧蚀; 烧蚀压; 能量耦合; 驱动性能

hedp2025-115

单发压缩超快复振幅成像

张熠森¹, 唐浩程¹, 唐唯启¹, 李政言¹

(1. 华中科技大学, 光学与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 鉴于传统泵浦-探测技术依赖多次扫描而无法避免发次间波动、时空耦合解析能力不足, 且在信息维度上普遍缺失对于光场相位的探测, 本文研究并发展了一种单发压缩超快复振幅成像技术。该技术通过单次曝光即可同步获取飞秒量级分辨率与微米级空间分辨率的图像序列, 实现了对光场的强度与相位信息的同步测量, 从而完成了对光场复振幅的多维探测。本文核心提出两种单发压缩超快复振幅成像方案。一是通过构造傅里叶共轭光场并结合三维相位恢复, 直接构造光场的时空复振幅。二是通过分别测量光场的近场与远场空间-光谱强度, 利用波前恢复技术简介获取完整的时空复振幅信息。在对于弛豫过程的观测中, 实现了 1 ps 时间分辨率和 13.9 μm 空间分辨率清晰捕捉了硅与金的固-液相变及液相的膨胀过程, 并基于相位信息定量计算出膨胀速度, 并通过对复振幅(介电函数)的分析, 定量反演了烧蚀过程中电子密度与散射频率的演化。基于空芯波导压缩方法将探针光光谱展宽, 使时间分辨率达到 9fs 后成功观测到硅在激发阶段的非热熔融现象。本文成功研发出一种高性能的单发压缩复振幅成像技术, 突破了现有技术在单次测量、时空分辨率和信息维度上的瓶颈, 在超快激光加工、大型激光装置诊断等领域具有广阔的应用前景。

关键词: 超快光学成像; 高光谱成像; 泵浦-探测; 飞秒激光烧蚀; 光-物质相互作用

hedp2025-122

大频差双色光对激光等离子体不稳定性的缓解

刘德基^{1,3}, 王清¹, 王强¹, 刘占军¹, 曹莉华¹, 郑春阳¹, 弓正², 颜学庆³

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院理论物理研究所, 北京, 100190; 3. 北京大学 北京 100871)

摘 要: 激光等离子体不稳定性的有效控制是实现高增益激光聚变的关键。早期使用长波长激光的聚变实验发生了严重的激光等离子体不稳定性, 这促使目前主流聚变装置采用短波长激光, 如钕玻璃激光器的三倍频光 (351 nm)。尽管三倍频激光能缓解激光等离子体不稳定性, 但其更容易损坏光学元件。相应的二倍频光 (527 nm) 虽会加剧激光等离子体不稳定性, 却能将能量损伤阈值提升 40% 以上, 降低光学器件的损坏风险。此外, 与三倍频激光相比, 它的基波转换效率更高, 可实现更大的输出功率。

鉴于二倍频激光和三倍频激光各自的优缺点, 我们提出将二倍频激光与三倍频激光共注入, 作为下一代聚变装置驱动源的构想。这种具有大频差的双色光 (351 nm + 527 nm), 相较于总光强相同的单色激光, 拥有更高的转换效率和光学器件损伤阈值。目前, 大多数关于双色光激光等离子体不稳定性的研究集中在小频差情况 ($\Delta\omega/\omega < 10\%$), 这类情况下激光等离子体不稳定性的耦合主要依赖激光场的直接耦合。本海报将综述我们近期提出的大频差双色光耦合机制。通过这些耦合机制, 该双色光可实现比总光强相同的纯三倍频激光更低的激光等离子体不稳定性, 且耦合机制作用参数区间随着驱动总光强增加而增加, 阐述了这种双色光在未来高增益聚变方案设计中的应用潜力。

关键词: 高增益激光聚变; 激光等离子体不稳定性; 大频率差双色光; 双离子声衰减不稳定性; 受激布里渊散射; 受激拉曼散射

hedp2025-130

平面狭缝预热与辐射烧蚀演化的高时空分辨研究

田超¹, 于明海¹, 单连强¹, 张天奎¹, 陈忠靖¹, 周维民¹

(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 621900)

摘要: 在激光惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 靶丸表面的微结构 (如微孔洞、气泡) 及其演化行为对聚变性能至关重要。对于双壳层体点火靶, 其外壳层半球壳拼接处形成的狭缝结构尤为关键。这些微结构在辐射烧蚀过程引起的烧蚀空间非均匀性、流体力学不稳定性、射流等改变会影响冲击波的传播过程并破坏内爆壳层中汇聚冲击波阵面的完整性, 进而影响内爆的性能。X 射线背光照相是研究此类演化的有效手段, 然而传统纳秒激光驱动的 X 射线源受限于能量低、穿透力不足, 难以满足高精度诊断需求。本研究提出并采用了一种基于皮秒激光与金属微丝靶相互作用产生的高亮度、微焦点 ($\sim 10\ \mu\text{m}$) X 射线背光源。该光源具有数十皮秒的脉宽, 可实现微米-皮秒量级的高时空分辨照相。利用此光源, 针对预热及辐射烧蚀下平面狭缝结构的演化机制开展了研究。在神光 II 升级装置上, 实验诊断了不同深宽比平面狭缝在有预热、无预热条件下辐射烧蚀驱动的动态演化过程, 成功捕捉到不同时刻的高分辨演化图像。这些图像清晰揭示了狭缝结构处的流体演化局部特征。基于背光照相数据, 定量分析了狭缝深度、宽度等关键几何参数的演化规律, 获得了预热对辐射烧蚀演化过程的影响。

关键词: 平面狭缝; 预热; 烧蚀; 背光照相

hedp2025-134

从成丝到分层：剪刀构型下相对论粒子束与等离子体的不稳定性演化

刘旭^{1,2}, 吴栋^{*1,2}, 张杰^{*1,2,3}

(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. 上海交通大学 李政道研究所, 上海 200240)

摘 要: 平行对流体系是研究束-等离子体不稳定性（如成丝不稳定性）的典型模型，这些不稳定性在高能量密度物理中至关重要。然而，快电子束的交叉输运会破坏此类系统固有的柱坐标对称性。在此，我们引入剪刀形构型——一种能捕捉这种对称性破缺的基本多速度分量体系。通过理论分析和 PIC 模拟，我们揭示了不稳定性动力学的显著转变：该系统经历的是分层模式而非成丝模式。分层模式会因磁重联迅速淬灭，最终形成磁场能量比传统平行对流系统低两个数量级的准稳态。这一发现确立了通过几何构型实现不稳定性被动控制的原理，为天体物理学和惯性约束聚变中的束-等离子体相互作用提供了新视角。

关键词: 等离子体；不稳定性；快电子束输运

hedp2025-145

烧蚀层厚度对孤立表面缺陷非线性演化的影响

刘云星^{1,2}, 李志远², 董佳钦¹, 陈竹², 李纪伟², 王立锋²

(1. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海, 201800; 2. 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: 惯性约束聚变 (ICF) 中, 烧蚀层表面从亚微米到数微米的孤立表面缺陷, 被认为会降低内爆性能。我们使用一个简化的平面模型, 系统地研究了由缺陷尺寸和烧蚀层厚度决定的局域扰动增长。当缺陷呈现为凹坑且烧蚀层厚度相对较小时, 可以看到一些 Zulick 等人 [Phys.Rev.Lett.125,055001(2020)]最近报告的孤立缺陷演化独特的特征, 即气泡扩张和尖钉闭合。相比之下, 较厚的烧蚀层由于扰动波的传播, 在凹坑和凸起缺陷的主导模式中表现出相位反转和多模行为。因此, 即使缺陷相同, 在加速阶段的瑞利-泰勒 (RT) 不稳定性种子在薄靶和厚靶之间也存在显著差异。而即使缺陷类型不同, 相同厚度的靶也会产生相似的 RT 扰动谱。我们使用流体动力学模拟训练了一个能够量化各种参数对扰动反转影响的人工神经网络 (ANN) 模型。对大量 ANN 预测的结果分析揭示了在所研究参数空间内, 不同缺陷类型的主导模式分布具有一致性。此外, 在所有模式下, 缺陷高度对非线性扰动波效应的增强影响比缺陷宽度更大。这些结果对完善了对直接驱动中孤立缺陷非线性演化的物理认识。

关键词: 惯性约束聚变; 非线性射流; 缺陷

hedp2025-146

基于机器学习的间接驱动黑腔辐射源预测

张棋¹, 况龙钰¹, 郭亮¹, 孙传奎¹, 林雉伟¹, 杨为明¹, 杨冬¹, 杨家敏¹

(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: 核聚变能源因其清洁的反应过程和丰富的燃料资源, 被视为未来能源体系的关键技术之一。美国国家点火装置 (NIF) 已成功开展多次点火实验, 并实现超过四倍的靶增益, 充分验证了间接驱动点火的可行性。然而, 与直接驱动方式相比, 间接驱动点火需经历“激光—黑腔—X 射线”的复杂能量转换过程, 该过程中能量转换效率难以精确评估, 主要受限于当前对黑腔辐射物理机制认识的不足。目前, 尚缺乏能够准确描述黑腔辐射 X 射线时间行为与能谱分布的解析或经验模型, 实验诊断能力亦需进一步提升。因此, 发展发次后辐射源精密评估方法, 并建立发次前辐射源可靠预测能力, 以增强数值模拟对实验的解释力与实验的可重复性, 已成为间接驱动点火研究中的关键科学问题。针对上述问题, 本研究聚焦于 100 kJ 级激光装置中的双激波内爆实验, 提出一种基于多诊断数据联合反演的黑腔辐射源特性推断方法。利用辐射流体程序 Icefire1D, 对 48 发锁孔靶与气体靶实验的任意反射面速度干涉仪、中子条纹相机等诊断数据进行分析。通过引入 9 个辐射源乘积因子及 1 个 M 带 X 光功率份额, 对输入 Icefire1D 的辐射源时间行为与能谱结构进行联合校正, 构建了辐射源与 M 带功率乘子联合反演方法。进一步, 基于反演结果建立了以靶丸设计参数为输入、调参因子为输出的神经网络代理模型, 实现从实验设计参数到辐射源波形的映射。在此基础上, 开发了深度学习推断框架 PRISM, 用于辐射源的精确预测。该模型在预测精度与计算效率方面均表现优异, 为发次前数值模拟提供了高效工具。其外推能力经透射光栅谱仪实验数据验证, 模拟与实测能谱高度一致。采用 Shapley 加性解释方法 (SHAP) 分析了不同设计参数对各乘子影响的重要性。最后, 通过残差分析对工程控制精度进行量化评估, 结果表明, 100 kJ 级装置在 2025 年工程控制水平显著提升, 尤其在激光输出稳定性方面取得进展, 但脉冲同步与时间延迟仍需进一步优化。本研究为实现高精度辐射源建模与可预测惯性约束聚变实验奠定了重要基础。

关键词: 间接驱动聚变; 机器学习; 黑腔辐射源; M 带 X 光

hedp2025-148

极高压加载、非阻滞点火物理实验研究

晏骥*¹, 李纪伟², 贺贤土²

(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: 混合驱动是由我国贺贤土院士针对美国点火攻关战役中传统间接驱动中心点火技术路线存在的不稳定性增长严重等问题独立提出的新惯性约束聚变点火技术路线。相比较于间接驱动中心点火, 混合驱动技术路线独有的非阻滞点火概念能够显著抑制流体力学不稳定性, 驱动对称性等非一维因素的影响, 使得内爆性能接近一维设计, 是一种更加皮实可靠的点火技术路线。对于混合驱动技术路线而言, 存在三类完全区别于目前国际上主流点火技术路线的关键分解物理问题, 分别为: 1) 辐射-激光混合烧蚀增压特性; 2) 超声速电子热匀滑过程; 3) 辐射背景下高功率直接驱动 LPI 特指。项目团队在贺贤土院士带领下, 从 2014 年开始, 基于神光系列激光装置, 针对以上三类问题开展了大量分解实验研究。结果表明: 1) 在混合驱动条件下, 能够产生高达 150 Mbar 的驱动压力, 为同等辐射温度下间接驱动烧蚀压力的 3.6 倍; 2) 半定量的表征了超声速电子热匀滑效果, 表明在数百微米尺度亚冕区等离子体范围内, 冲击波波阵面平整性好于 1%; 3) 对于功率密度达到 $1.5 - 2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的高功率直接驱动束, 在辐射背景下其 LPI 要弱于纯直接驱动。

关键词: 惯性约束聚变物理; 新点火技术路线; 混合驱动

hedp2025-154

双锥对撞点火方案中对撞区等离子体及其驱动的冲击研究

邱志杰^{1,2}, 施川奇^{2,4}, 方可¹, 袁大伟^{4,5}, 张喆^{1,5}, 远晓辉^{3,5}, 李玉同^{1,5}, 张杰^{1,3,5}

(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: 在激光惯性约束聚变中, 为了实现靶丸不同阶段状态参量的监测, 发展复杂物理过程的精密诊断技术至关重要。同时诊断获得的实验物理量也能校验理论模型和数值模拟程序, 为进一步的实验设计提供思路。在双锥对撞点火方案 (Double cone ignition, DCI) 中, 先利用对撞形成高密度等离子体, 之后再将 ps 激光入射到加热金锥内实现快电子能量沉积, 完成加热。对撞等离子体阶段衔接了内爆压缩阶段与加热点火阶段。对撞区高密度等离子体表征了内爆结果的优劣, 也对侧边的金锥产生影响进而会对之后的快电子产额和能谱产生影响, 监测对撞区等离子体的演化以及其对加热过程的影响对于双锥对撞聚变点火方案有着重要的意义。实验上, 我们利用搭建的自发光收集光路, 通过条纹相机诊断 DCI 方案中双锥对撞后, 加热金锥内自发光历程。结合 KB 分幅相机共同诊断, 发现现在的靶型与驱动条件下, 锥破时间基本晚于对撞区压缩信号出现时间, 加热金锥锥口破坏不影响 ps 加热束注入。同时利用搭建的锥口背光流线的诊断发现了在激光主脉冲作用阶段, 压缩金锥的锥口出现了受预热产生的等离子体, 这为我们分对撞等离子体成分提供了一定的参考, 也帮助我们更好的了解 DCI 方案中对撞压缩阶段发生的物理过程。

关键词: 惯性约束聚变; 激光等离子体相互作用; 双锥对撞点火方案; 内爆压缩

hedp2025-155

双锥对撞点火中转滞阶段的密度演化

陈诺¹, 张成龙^{1,2}, 马浚飞³, 张翌航¹, 张喆^{1,4,5}, 李玉同^{1,4,5}, 张杰^{1,3,4}

(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. 中国矿业大学(北京) 理学院物理系, 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; 5. 松山湖材料实验室, 广东东莞 523808)

摘 要: 在双锥对撞点火激光核聚变方案中, 氘氚球壳靶被约束在两个相对放置的金锥内。在高功率纳秒激光的烧蚀驱动下, 靶丸沿着金锥向内压缩、加速, 形成超音速高密度喷流并在锥口发生对撞减速形成聚变密度转滞等离子体。在对撞过程中, 燃料的动能转化为内能, 实现对等离子体的预加热, 同时皮秒激光产生的高能快电子从垂直方向入射并加热高密度等离子体, 使其达到聚变温度, 实现聚变点火。转滞阶段的等离子体密度极大地决定了加热效率, 从而影响点火。实验在神光 II 升级装置上进行, 通过硬 X 射线单色背光成像, X 射线条纹相机和分幅相机等多种高时空分辨诊断, 对转滞阶段的等离子体进行了研究。实验测量发现对撞等离子体中心密度达到了 $103.3 \pm 7.6 \text{ g/cm}^3$ 。

关键词: 惯性约束聚变; 快点火; X 射线; 弯晶成像; 高能量密度物理

hedp2025-156

双锥对撞点火：大尺度动理学数值模拟

吴栋¹

(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)

摘 要: 双锥对撞点火是一种新型激光聚变方案。由于涉及多时空尺度、多物理过程的复杂耦合, 对其开展高精度动理学数值模拟研究具有挑战性。报告人面向实际需求、逐步突破, 研发了隐格式、动理学、涉及多物理耦合、可统一描述经典与量子简并等离子体的数值模拟程序 LAPINS。利用该程序, 报告人: 1) 揭示了量子简并作用在提高“双锥对撞”方案中激光到热斑能量耦合效率方面的关键作用; 2) 揭示了核燃烧等离子体中大角度散射的关键作用; 3) 发现了大尺度电磁湍流非线性动理学演化过程中的离子随机加速机制。

关键词: 双锥对撞点火; 动理学

hedp2025-157

冲击波与非均匀等离子体相互作用研究

孟凡琦^{1,2}, 王文鹏², 蔡洪波¹, 朱少平¹

(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; 2. 中国科学院, 上海光学精密机械研究所, 超强激光科学与技术全国重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 由于靶丸缺陷等因素的存在, 惯性约束聚变内爆过程中存在的冲击波与非均匀等离子体相互作用是实现聚变能源的关键障碍之一。我们使用可以自治捕捉多组分离子对穿混合与离子动力学效应的混合流体-PIC 程序, 进行了冲击波与非均匀等离子体相互作用研究。发现冲击波与由多个气泡组成的非均匀等离子体相互作用过程中驱动了流体界面不稳定性增长, 形成了显著的离子混合区域。冲击波驱动非均匀等离子体由“块状混合”状态转变为接近于“原子尺度混合”状态。多组分离子混合显著影响了等离子体动量输运特性, 增大粘性, 对非线性流场演化造成了持续的耗散作用。

关键词: 惯性约束聚变; 冲击波; 激波-气泡相互作用; 离子混合

hedp2025-159

双锥对撞点火方案中的快电子产生及输运研究

张翌航¹, 张喆^{1,3,4}, 远晓辉^{2,4}, 邱志杰¹, 陈诺¹, 李玉同^{1,3,4}, 张杰^{1,2,4},

(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. 松山湖材料实验室, 广东东莞 523808; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 双锥对撞点火方案中的最后一步“快速点火”通过磁场引导强流快电子束对高密度燃料加热, 使燃料温度迅速提升, 达到聚变点火条件。为了获得皮秒高功率激光到压缩燃料内能之间能量转换效率的最大化, 我们在神光-II 升级装置上开展了一系列皮秒激光驱动快电子产生以及输运的实验研究。通过诊断能力建设与提升, 为金锥内的快电子产生实验提供了测量基础。在快电子束与高密度等离子体相互作用实验中, 通过对金锥内预等离子体状态的系统性诊断, 分析了纳秒激光和压缩等离子体对快电子产生和输运的影响。在快电子束与固体靶作用的实验中, 演示了激光驱动电容线圈产生的脉冲磁场 (强度数百特斯拉) 对金锥靶产生的快电子束的引导效应。引入外加磁场后, 快电子在固体输运层中的通量增加了约 10 倍。此外, 磁场扩散到固体输运介质中的时间约为 0.5 ns, 与数值模拟计算结果匹配良好。以上工作为快速点火方案的设计提供了新的参考依据。

关键词: 快电子; 惯性约束聚变; 快点火

hedp2025-164

一种改进的磁化等离子体电子非局域热输运模型

陈泽豪¹, 杨晓虎¹, 张国博¹

(1. 国防科技大学 核科学与技术系, 湖南长沙 410073)

摘要: 非局域电子热传导是激光驱动惯性约束聚变的关键研究领域。在惯性约束聚变实验中, 大温度梯度为代表的极端条件超出了经典 Spitzer-Harm 局域电子热传导理论的有效参数范围, 导致电子分布函数发生畸变, 从而呈现出明显的非局域特性。尽管多群扩散非局域模型及其结合磁场的扩展模型已发展多年, 但现有磁化模型仍存在若干不足: 首先, 扩散方程中源项的过度简化导致热流预测精度降低; 其次, 现有模型未能解决电子分布函数畸变对 Biermann 磁场的抑制效应。

本研究提出了一种改进的磁化等离子体电子非局域热输运模型。通过修正扩散方程中的源项, 我们确保了热流预测与 Vlasov-Fock-Planck 程序模拟结果高度吻合。通过构建包含密度扰动的修正电场方程, 该模型实现了非局域效应对自生 Biermann 磁场的抑制机制。结果表明, 该模型能准确预测磁化等离子体中非局域效应引起的热流限制、温度预热及磁场抑制等关键现象。这项工作显著深化了我们对磁化等离子体非局域热输运的理解, 并提升了数值预测能力。

关键词: 非局域电子输运; 磁流体力学; 等离子体; 激光; 惯性约束聚变

hedp2025-166

双锥对撞点火中交叉束能量转移与临界密度面运动的实验研究

高凡^{1,2}, 袁鹏³, 郑坚², 张喆^{1,4,5}

(1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽合肥 230026; 3. 上海交通大学李政道研究所, 上海 200240; 4. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240; 5. 松山湖材料实验室, 广东东莞 523808)

摘要: 在激光聚变中, 激光与等离子体相互作用会激励其各种不稳定性过程, 其中受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 和交叉束能量转移 (cross beam energy transfer, CBET) 这两个过程会降低激光与靶丸的能量耦合效率, 劣化激光辐照均匀性, 对于激光聚变是很大的挑战。在激光聚变的双锥对撞点火 (double-cone ignition, DCI) 方案中, 由于其非球对称的靶构型和斜入射激光辐照情况与传统的球对称直接驱动中心点火方案不同, SBS 与 CBET 的诊断十分重要。本文针对在神光-II 升级装置上开展的 DCI 集成物理实验, 发展了一套简单可靠的背向散射诊断系统, 对 SBS 和 CBET 开展了实验研究; 研制了一套激光反射面成像诊断系统, 尝试研究来自临界密度面的残余激光与 CBET 种子信号之间的关系。

背向散射诊断系统通过光纤接收从伺服反射镜表面散射的背向散射光信号, 其中包含了来自倍频晶体的参考信号。信号经过光谱仪色散之后被条纹相机记录, 从而得到时间分辨的光谱。借助参考信号, 该诊断系统能够可靠地给出背向散射光的份额。实验结果表明, 351nm 附近的背向散射光份额不高于 3%, 显著低于球对称辐照直接驱动中心点火方案的实验结果。通过分析背向散射信号与激光辐照条件之间的相关性, 作者判断背向散射包含了 CBET 和 SBS 两种过程。而在#5 路和#7 路激光的背向散射信号中, CBET 份额有显著差异。结合激光束的偏振状态, 作者确认该现象与镜像激光束之间的偏振夹角有关, 这一发现为后续大型激光聚变装置的设计提供了参考。

临界密度面成像诊断系统由 4f 成像透镜组、一维光纤阵列、光谱仪和条纹相机构成。来自靶表面的光信号经过 4f 系统成像至一维光纤阵列的端面, 从而实现对来自靶面不同点反射信号的收集。反射信号经过光学谱仪色散后, 被条纹相机记录, 从而给出离散空间点的时间分辨反射光谱。利用该系统, 作者成功地获得了双锥靶与小球靶两种靶型的实验结果, 为分析临界密度面的运动提供了实验数据。

关键词: 双锥对撞点火方案; 交叉束能量转移; 背向受激布里渊散射; 临界密度面; 散射光谱诊断

三、极强场物理、实验室天体物理、激光核物理、强激光暗物质

hedp2025-001

Spin-Polarized Condensed Plasmoids in Radiation Reaction Dominated Magnetic Reconnection

弓正¹

(1. 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190)

摘 要: Transient plasma evolution with spin polarization dynamics in radiation reaction dominated magnetic reconnection is investigated using particle-in-cell simulations. We identify a condensation of plasmoids accumulated into multiple tiny islands within the reconnection layer, where electrons are strongly polarized while emitting energetic gamma-ray photons to undergo radiative spin flips. Nonlinear analyses elucidate that the condensation is caused by a spiral attractor appearing in the electron's phase space due to radiation reaction. The spiral rotation and contraction of the attractor leads to the electrons' polarization being almost instantaneously parallel with respect to the magnetic field, which results in a gamma-ray emission with an anomalous linear polarization perpendicular to the electron's moving plane. Our studies with around 10^{10} G magnetic fields demonstrate that spin-polarized condensed plasmoids may be realized in extreme power laser facilities and intrinsically exist in extreme astrophysical reconnection scenarios, potentially explaining atypical polarization features in observed high-energy cosmic radiation.

关键词: magnetic reconnection; spin-polarized plasma; radiation reaction.

hedp2025-003

强辐射与极化粒子产生的研究进展

朱兴龙¹

(1. 浙江大学 物理学院, 浙江杭州 310058)

摘 要: 随着高功率超短超强激光的快速发展, 光与物质相互作用将进入到前所未有的极端强场范畴, 由此将会显著改变经典情况下的等离子体效应和作用过程, 从而激发许多新物理效应和作用机制。除了强激光外, 近期我们研究发现利用高能电子束流与等离子体相互作用可以直接激发强场量子电动力学效应, 将束靶作用机制推向极端高强场区域中。据此提出产生极端 GeV 伽马射线和稠密极化轻子束的新物理方案。相关研究揭示了相对论粒子束流与等离子体相互作用诱导强辐射效应的有效作用机制和能量转化模式, 以及伴随的高能伽马辐射、粒子对产生和自旋极化等强场非线性过程。如此超高亮度 GeV 伽马射线源和稠密极化轻子束有望为高强场物理、高能核物理和实验室天体物理等前沿研究带来新途径。

关键词: 激光等离子体; 强场 QED 效应; 伽马射线; 自旋极化; 粒子对

hedp2025-009

超短超强激光应用于核物理领域的研究进展

冯杰¹

(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)

摘 要: 原子核的高效激发在核激光、天体同核异能态、天体核合成等研究领域至关重要。然而, 常规加速器束流受空间电荷效应影响流强较低, 阻碍了短寿命原子核的高效积累, 也无法模拟天体等离子体环境, 严重制约相关领域发展。在中子共振谱学方面, 其依赖于短脉冲的大型中子源, 难以实现广泛的工业及科研应用; 更高分辨的中子共振核数据受限于现有中子源束长, 阻碍了对原子核结构的深入研究。

超短超强激光和物质相互作用, 可以产生极端的高温高密状态, 同时可以驱动各种高亮度辐射源、强流粒子束, 为核物理研究提供了一种全新的手段。本报告将介绍激光“等离子体核激发”与激光“强束流核激发”两种方案。前者实现高温高密状态模拟天体环境并高效诱发核反应, 测得 10^{-11} barn 极小核截面, 为研究天体同核异能态开辟新途径; 后者突破低流强限制, 将峰值激发效率提高四个量级, 为高信噪比获取关键核数据提供了新思路。此外基于激光电子加速驱动的飞秒脉冲伽马光源, 诱发光致裂变产生脉冲快中子源, 创造了 36 皮秒束长的最短纪录, 同时实现了紧凑型的高分辨快中子、超热中子共振吸收谱学装置, 为获取超高精度中子共振核数据奠定了基础。

关键词: 激光等离子体加速; 同核异能态; 短脉冲中子源; 中子共振吸收谱学

hedp2025-010

具有时间延迟的两个椭圆极化电场在石墨烯中产生电子-空穴对

蒋仁子¹, 李子良^{1,2}, 李英骏^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)隧道工程国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

摘 要: 利用无质量量子动力学方程, 研究了在石墨烯中由两个具有时间延迟的任意椭圆率电场产生的电子-空穴 (EH) 对的动量分布。并与真空中产生电子-正电子 (EP) 对的结果进行了比较。对于单个椭圆偏振电场, 在多光子吸收区域, 产生的 EH 对的动量分布与 EP 对的动量分布相似。然而, 对于两个具有时间延迟的同向零频率线偏振电场, EH 对的动量分布呈现出单光子吸收的环形图案, 而在 EP 对产生中则不存在这种现象。对于具有相同或相反手性的两个圆偏振场, 动量分布分别显示出 Ramsey 干涉和螺旋结构。与 EP 对不同, 螺旋结构的形成基本上不受电场的振荡周期数的影响。对于两个具有相同或相反椭圆率的椭圆偏振场, EH 对的动量分布对椭圆率的敏感度低于 EP 对的情况。由于在石墨烯中产生 EH 对对场参数的要求远低于 EP 对。这些发现为我们提供了通过设计石墨烯中 EH 对产生的实验, 来类比从真空中产生 EP 对的重要特征的方法。

关键词: 石墨烯; 电子空穴对; 电子正电子对; 动理学方法

hedp2025-022

模拟分析实验室尺度等离子体喷流形貌的影响因素

马作霖¹, 平永利^{2,3}, 张茜¹, 张雅芃¹, 仲佳勇^{1,2,3}

(1. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学文理学院, 广东珠海 518908; 3. 北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 100875)

摘 要: 高马赫数等离子体射流在天体物理和实验室研究中均已得到广泛探索。本研究通过结合磁流体力学 (MHD) 与粒子网格 (PIC) 模拟方法, 系统阐明了强激光-固体靶相互作用产生喷流基部的演化规律, 以及高超声速射流在低密度介质中的传播特性。MHD 模拟显示: 在平面靶的激光辐照过程中, 冲击压强主导着高马赫数等离子体射流的传输动力学; PIC 模拟则揭示: 当高密度射流注入低密度区域时, 自生磁场对外部激波的稳定性和射流内部核心结构起着关键调控作用。研究进一步发现: 较高金属丰度会显著增强射流准直性, 而射流宽度会根本性改变激波结构与射流形态。

关键词: 实验室天体物理; 等离子体喷流

hedp2025-025

超新星遗迹中磁场演化的实验室模拟研究

袁大伟^{1,2}, 孙伟^{2,3}, 赵刚¹

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 2. 北京师范大学 天文与天体物理前沿科学研究所, 北京 100875; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 超新星遗迹中的磁场主导着其形态演化、高能辐射及粒子加速等关键过程, 然而, 受限于巨大的时空尺度, 其起源问题至今悬而未决。实验室天体物理为解决这一难题开辟了新路径。我们首次在实验中成功模拟了超新星遗迹的完整演化历程, 涵盖自由膨胀、塞多夫-泰勒 (Sedov-Taylor) 与辐射冷却三个阶段。实验揭示, 种子磁场先后通过瑞丽-泰勒不稳定性与湍流随机运动被显著放大。与传统认知形成对比的是, 磁场放大倍数的峰值主要源于瑞丽-泰勒不稳定性, 而磁能转化率的最高值则归因于湍流过程。基于标度变换理论, 本研究成功演示了遗迹磁场的演化规律。此外, 结合粒子加速与同步辐射机制, 我们的结果能够解释为何超新星遗迹在 Sedov-Taylor 初期加速的粒子能量最高, 并预言其辐射频率将随遗迹年龄增长而逐渐降低。

关键词: 磁场; 超新星遗迹; 瑞丽-泰勒不稳定性; 湍流随机运动; 粒子加速; 同步辐射

hedp2025-035

超强激光驱动非对称磁重联电子耗散区的电子加速

张茜^{1,2}, 平永立^{1,2}, 李嘉祺², 张亚鹏², 安伟明², 钟佳勇¹

(1.北京师范大学珠海校区 文理学院 物理系, 广东珠海 519087; 2.北京师范大学 物理与天文学学院, 北京 100875; 3.北京师范大学 天文学与天体物理前沿研究院, 北京 100875)

摘要: 随本研究利用粒子-网格 (PIC) 模拟, 系统研究了超强激光驱动下三维 (3D) 非对称磁重联 (AMR) 中“电子拾取环”的结构特征及形成机制。模拟结果显示, 电子在相空间中呈新月状分布, 这一现象类似于地球磁层中观测到的电子相空间结构。通过分析得到的经验尺度关系 $c = 0.032(B_{low}/B_{high})^{0.25}(p_{max} \cdot w)^{0.55}$ 揭示了这些椭圆形“电子拾取环”的偏心率与磁场非对称性、电子动量以及电流片几何特征之间的联系。结果表明, 磁场非对称性较弱且电子动量较高时, 电子拾取环的拉伸程度更显著。此外, 研究发现重联速率与偏心率呈负相关, 即重联速率较慢时, 电子拾取环呈现更扁平的椭圆形。这些发现将实验室尺度模拟结果与天体物理现象相联系, 为地磁环境及高能等离子体中电子动力学提供了新的理解和洞见。

关键词: 电子拾取环; 非对称磁重联

hedp2025-039

真空正负电子对产生的涡旋态性质

范红豪¹

(1. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875)

摘 要: The vortex structure and the entanglement characteristics of the created particles are investigated in multiphoton pair production in circularly polarized field. It is found that the particle distributions at different spin projection can be understood via effective magnetic field. The topological charges are associated to the pair orbital angular momentum, and are dependent on the pair spin. For multiphoton rings that dominate pair production, the relation between the absorbed photons and the topological charges can be understood via energy conservation. At small momenta, the contribution from assisted tunneling cannot be ignored. The entanglement exhibits local maxima at large phase uncertainty, and its behavior shows a strong dependence on momentum that arises from the increase in orbital angular momentum modes at different momenta. This work will provide a useful reference for the pair production research with respect to vortex states and entanglement features.

关键词: 涡旋结构; 多光子对产生

hedp2025-050

基于空心等离子体通道同步辐射源的双光子对撞机模型

刘一诺¹, 胡章虎¹, 蓝婕婕¹, 李浩源¹, 徐汪文¹, 王友年¹

(1. 大连理工大学 物理学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 通过光子-光子相互作用产生正负电子对, 即线性 Breit-Wheeler (BW) 过程, 是量子电动力学 (QED) 的一项重要预测过程, 理解该相互作用对于探索 QED 的基本过程及其在高能天体物理环境中的应用至关重要。目前已有的探测线性 BW 电子对的方式一定的问题: 当激光强度较高时, 非线性 BW 过程也会产生大量正负电子对, 这极大地增加了线性 BW 过程探测的复杂度。为了改善这一问题, 本文提出了一种基于相对论电子束和空心等离子体通道相互作用的光子-光子对撞模型。该方案不仅能增强辐射强度, 同时也能保证对撞光子束的准确瞄准, 在探测线性 BW 电子对方面具有实验可行性。另外, 该方案在产生大量线性 BW 电子对的基础上, 也能有效避免非线性 BW 等其他过程的干扰, 从而解决当前双光子 BW 实验观测的核心难题。

关键词: 等离子体通道; 线性 BW 过程; 同步辐射源; 相对论电子束; 量子电动力学对

hedp2025-061

外磁场下 Weibel 不稳定性的产生和演化

邓之洋¹

(1.上海交通大学李政道研究所, 上海 201210)

摘 要: 本文系统研究了外加磁场对 Weibel 不稳定性产生与演化的影响, 分别分析了波矢平行与垂直于磁场 两种几何情形。基于 Vlasov–Maxwell 方程推导线性色散关系, 揭示了增长率对波数、温度各向异性 及磁场强度的依赖特征。结合二维与三维 PIC 模拟, 对理论结果进行了系统验证, 并探讨了不同磁化 强度下的非线性演化与饱和机制。结果表明: 弱磁场可延缓各向异性弛豫并维持长寿命磁结构, 而 强磁场通过限制电子回旋运动显著削弱甚至抑制不稳定性。研究揭示了磁场取向在能量转化与磁场 生成中的关键作用, 对磁化等离子体及宇宙磁场起源具有重要意义。

关键词: Weibel 不稳定性; 外磁场

hedp2025-072

真空通过多光子机制产生正负电子对的相位依赖性展

李传可¹, 周鲜鲜², 安邦³, 陈强⁴, 李英骏^{3,5}, 林南省⁵, 万阳¹

(1. 郑州大学, 物理学院、中原之光实验室, 河南郑州 450001; 2. 安徽财经大学, 管理科学与工程学院, 河南郑州 233030; 3. 中国矿业大学(北京), 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083; 4. 郑州大学, 国家超算郑州中心, 河南郑州 450001; 5. 中国矿业大学(北京), 理学院, 北京 100083)

摘 要: 我们运用计算量子场论方法研究了两个具有相对相位的时空非均匀电场产生正负电子对的过程。研究发现多光子跃迁过程对相对相位的依赖性存在显著的不一致现象: 单光子跃迁中正负电子对的能谱随相对相位呈现 2π 的周期性变化, 而双光子跃迁中则观察到 π 的相位周期性。为深入解析此现象, 我们将量子场论框架映射到量子力学的含时微扰方法。令人惊讶的是, 对于高阶多光子跃迁, 相对相位的依赖性重新呈现 2π 的周期性。该观测结果偏离了微扰理论的预期, 表明正负电子对产生过程具有非平凡且本质上非微扰的相位结构。此外, 我们发现当两个场处于同相或反相时, 高阶多光子正负电子对产生会受到强烈抑制。这些发现表明相对相位可作为有效控制参数来增强正负电子对的产生。

关键词: 强场 QED; 正负电子对产生; 计算量子场论

hedp2025-073

超强太赫兹场致介质电离损伤研究

阮洁雅^{1,2}, 张心晓^{1,2}, 徐立桐¹, 董奕辰^{1,2}, 鄢然^{1,2}, 王进光¹, 李毅飞¹, 鲁欣^{1,2,3},
廖国前^{1,2,3}, 李玉同^{*1,2,3}

(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; 3. 松山湖材料实验室, 广东东莞 523808)

摘 要: 随着强场太赫兹 (THz) 辐射的不断发展, 其场强甚至可达到相对论光强水平, 这为研究极端场强 THz 脉冲与物质的非线性相互作用奠定了基础。通过亚拍瓦飞秒激光脉冲与固体密度等离子体相互作用, 产生峰值功率达到 TW 量级的 THz 脉冲。单发 THz 脉冲聚焦到熔融石英玻璃上, 可导致熔融石英玻璃电离发生永久性损伤; 荧光成像以观测到很强的荧光发射; 结合近红外背光成像, 表明 THz 辐照导致介质发生了显著电离, 研究了 THz 场致等离子体的产生及演化动力学, 发现其与近红外光电离现象显著不同。理论建模和数值模拟再现了实验结果, 揭示了 THz 场致介质电离主要源于 THz 加速的高能电子引起的冲击电离, 而非多光子电离或隧穿电离。这一发现为理解 THz 波段的电离机制提供了直接的实验证据, 也开启了超强 THz 等离子体研究的可能性。

关键词: 强场太赫兹脉冲; 电离损伤; 冲击电离

hedp2025-079

强辐射与极化粒子产生的研究进展

徐杨洋¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘 要: In the present work, we investigate the excitation rates and population dynamics of ^{229}Th nuclei induced by inelastic electron scattering, focusing on how electron energy, flux, and ionic charge state influence the excitation process of the nuclei. Using the Dirac Hartree-Fock-Slater method, we calculate cross sections for both the isomeric state (8.36 eV) and the second-excited state (29.19 keV) of ^{229}Th over a wide range of ionic charge states and electron energies. Our results demonstrate that these factors significantly impact the nuclear excitation efficiency. The effect of indirect excitation through the second-excited state on enhancing the accumulation of nuclei in the isomeric state cannot be ignored. By applying rate equations to model the temporal evolution of nuclear populations, we show that under optimal conditions up to 10% of $^{229}\text{Th}^{4+}$ ions can be accumulated in the isomeric state. These findings provide important insights for optimizing electron-nucleus interactions, contributing to the development of ^{229}Th -based nuclear clocks and relevant precision measurement applications.

关键词: 核激发; ^{229}Th

hedp2025-082

激光固体靶中的线形 Breit-Wheeler 过程——光子偏振效应

宋怀航¹

(1. 郑州大学, 物理学院, 河南郑州 450001)

摘 要: 线性 Breit-Wheeler (LBW) 过程描述了两高能光子碰撞产生正负电子对的量子电动力学基本机制。在激光强度低于 10^{23} W/cm² 的超强激光-等离子体相互作用中, LBW 过程可成为主要的对产生途径。本报告将讨论 γ 光子偏振对 LBW 对产生的影响, 重点分析了其在 PW 至 10 PW 级线偏振激光与固体密度等离子体相互作用中的作用规律。研究的出发点在于, 非线性康普顿散射发射的 γ 光子具有显著的线偏振特性, 而 LBW 过程的截面依赖于光子偏振状态。

本报告将讨论如何在 PIC 模拟中实现具有光子偏振分辨的 LBW 过程, 并对光子偏振效应对 LBW 过程的影响进行了系统性分析。我们的 PIC 模拟结果表明, γ 光子偏振使 LBW 产生的正电子总产额相较于非偏振情况降低约 5%—10%。该效应主要来源于碰撞光子在质心系中偏振方向的平行排列, 从而导致有效碰撞截面减小。偏振效应具有角度依赖性, 在垂直于激光偏振平面的方向上抑制更为显著。随着激光强度或靶前预等离子体尺度的增加, γ 光子能量升高、偏振度降低, 偏振对 LBW 产额的影响随之减弱。研究表明, 在当前可实现的超强激光条件下, γ 光子偏振是影响 LBW 对产生效率的重要因素, 应在相关实验设计与理论模拟中加以考虑。

关键词: 线形 Breit-Wheeler 过程; PIC 模拟; 激光等离子体相互作用

hedp2025-084

用于喷流研究的径向 Z 箍缩二维离散薄壳模型

徐强¹, 张道源¹, 张珏¹, 周少彤¹, 张思群¹, 蔡红春¹, 任晓东¹, 段书超¹,
黄显宾¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所)

摘 要: 径向金属薄膜 Z 箍缩常被用于实验室产生高马赫数喷流, 用于模拟恒星喷流的形成过程。为预测实验中等离子体行为, 亟需发展相关理论计算方法。本文提出了一种可快速预测等离子体行为的二维离散薄壳模型 (2D-DTSM), 将通电后的薄膜等离子等效为多个厚度可变化的薄壳元, 同时利用薄壳元的质心连线定义薄壳的切向和法向, 将原有一维动力学方程拓展至二维, 使该模型能描述 r - z 坐标系中等离子体运动, 并可展示磁腔的演化历程。通过磁流体动力学模拟与实验结果的双重验证, 我们确定了不同负载和驱动条件下的模型关键参数, 确保理论与模拟及实验结果相符。该模型能够有效地预测 Z 箍缩薄膜等离子体主壳层的二维运动过程, 同时根据动力学过程可大致预测喷流及磁腔的 X 射线辐射峰值时间。

关键词: 实验室天体物理; Z 箍缩; 喷流; 理论模拟

hedp2025-087

多电流片相互作用中的多组分离子加速

张志鹏¹, 赵忠海¹, 乔宾¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘 要: 磁重联被认为是日球层多组分高能离子起源的重要机制。由于对流和编织过程导致的复杂磁场拓扑结构, 在离子惯性尺度多电流片的相互作用是不可避免的。我们开展了混合粒子模拟, 将离子和电子分别视为粒子和流体。利用真实的离子质量和电荷, 研究了多组分离子在多电流片相互作用中的加速过程。我们自洽地展示了多电流片之间的相互作用可以自发地驱动湍流, 并且早期的重联阶段和后期的湍流阶段都能有效地加速离子。研究发现每核子最大能随时间呈幂律增长, 并且获得了与观测可比拟的每核子最大能随荷质比的幂率关系。湍流阶段的加速效率更高, 且更有效地加速荷质比更小的重离子, 这些特征并不显著依赖于等离子体热压与磁压之比。通过对加速机制的分析, 我们发现湍流阶段的磁场结构在统计上具有更高的曲率, 进而增强了费米加速。这些结果揭示了多电流片相互作用和由此产生的湍流在多组分离子加速中的关键作用, 对日球层高能离子起源模型具有潜在启示。

关键词: 磁场; 磁重联; 湍流; 太阳高能粒子; 离子加速

hedp2025-103

光子极化对 nIBW 正电子自旋的调控研究

资明¹, 马燕云¹, 杨晓虎¹, 张国博¹, 邵福球¹

(1. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 通过自主开发的蒙特卡罗模拟程序, 我们系统研究了极化高能光子与圆极化激光场对撞中的自旋极化电子-正电子对产生过程。首先, 基于包含光子极化和正负电子对自旋自由度的微分发射率进行数值分析, 量化了各项对总发射率的贡献, 并揭示了正电子极化度的显著不对称性。进一步通过蒙特卡罗模拟, 通过调控圆光子 Stokes 参数 ξ_2 控制光子手性与激光偏振的匹配, 发现在圆极化光子条件下正电子展现出独特的分量分布特征和演化规律。研究结果表明, 光子极化状态可有效调控电子和正电子的自旋分布, 为实现高极化度正电子束流提供了新途径。

关键词: 光子极化; 电子对自旋调控; 非线性 BW 过程; 蒙特卡洛方法

hedp2025-104

从强场电动力学到新物理探索：高能辐射中的角动量与动力学调控

陈月月¹

(1. 上海师范大学物理系, 上海 200234)

摘要: 围绕“从强场量子电动力学 (QED) 到新物理探测”的研究进展, 研究聚焦于强激光—电子相互作用中高能辐射的角动量与动力学调控。首先, 系统分析了非线性康普顿散射中的角动量转移规律, 揭示了激光偏振与辐射光子轨道角动量 (OAM) 之间的耦合机制。结果表明, 采用双色反旋圆偏振方案可实现涡旋伽马光子的可控产生, 其轨道角动量谱与自旋角动量可独立调谐。进一步地, 将强场 QED 的理论框架推广至轴子—电子耦合, 提出基于自旋极化电子与超强激光相互作用的“偏角可控”轴子辐射方案: 电子自旋与圆偏振场的协同作用导致轴子发射呈现显著的空间不对称性, 从而为直接探测轴子—电子耦合常数提供可行路径。基于蒙特卡洛模拟, 评估了强激光驱动下的轴子辐射通量, 并据此给出了轴子—电子耦合常数的排除线。该研究揭示了强场 QED 辐射过程中的角动量调控规律, 并自然延展至新物理探测, 为“从强场 QED 通向新物理”的实验探索提供了理论依据与方法指引。

关键词: 强场量子电动力学; 非线性康普顿散射; 轴子-电子耦合

hedp2025-121

电子与靶直接作用的核激发过程

祁金涛¹

(1. 深圳技术大学工程物理学院, 深圳 518118)

摘 要: 光核反应研究在揭示原子核结构、核能级分布及核力特性方面具有重要价值。通过高能 γ 光子诱发核反应, 可探测 E1、E2、E3 等多极跃迁和巨共振行为, 为核模型验证和核天体物理研究提供实验依据。在应用上, 光核反应被用于放射性同位素制备、核废料嬗变及核安全监测。近年来, 随着高功率激光技术的发展, 强电子束流在光核反应研究中发挥着越来越重要的作用。

传统方法通过加速电子通过转换靶产生轫致辐射光, 而后与反应靶作用进行光核反应。最近, 我们在研究中发现, 高能电子与反应靶直接作用相比传统方法具有更高的核反应速率, 单电子原子核激发概率能达到 1。同时, 高能电子与靶作用拥有更丰富的核激发机制, 高能电子能够调控巨共振多极跃迁通道, 极大增强多极跃迁的核激发截面与概率。这些研究结果对核反应基础研究与核数据探测具有重要价值。

关键词: 高能电子; 核激发; 光核反应; 核巨共振

hedp2025-123

^{229}Th 核钟光核激发与生产

王美植^{1,2}, 吴笛^{1,2}, 蓝浩洋^{1,2}, 陈忠义^{1,2,3}, 徐新路^{1,2}, 颜学庆^{*1,2}

(1. 北京大学, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871; 2. 北京激光加速创新中心, 北京 101407; 3. 北京科技大学数理学院 北京 100083)

摘 要: 具有约 8 eV 激发能的核同质异位素 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 是一种有望彻底变革精密测量和基础物理学的核钟的理想候选材料。近期在观测 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 放射性衰变以及在 ^{229}Th 掺杂晶体中实现直接核激光激发方面取得的突破, 激发了一系列为实现固态核钟奠定基础的研究工作。然而 ^{229}Th 的全球稀缺性 (主要从 ^{233}U 衰变中提取) 以及在制造高掺杂 ^{229}Th 晶体靶材方面存在的材料科学难题, 成为了核钟发展中的严重瓶颈。在此, 我们通过将掺有 ^{232}Th 的晶体原位转化为掺有 ^{229}Th 的晶体, 提出了解决这些难题的方法。利用天然丰度高的 ^{232}Th 同位素作为前提, 能够安全且大规模地生产用于固态核钟的 CaF_2 晶体。通过电子束产生的韧致辐射引发的光核反应, 我们在 $^{232}\text{Th}:\text{SrF}_2$ 和 $^{232}\text{Th}:\text{CaF}_2$ 晶体中对这种光核转换技术进行了实验验证, 同时保持了其在真空紫外区的透明度。这一过程通过 $(\gamma, 3n)$ 、 $(\gamma, 2np)$ 和 $(\gamma, 2pn)$ 反应生成 $^{229\text{m,g}}\text{Th}$ 以及母同位素 ^{229}Ac 和 ^{229}Ra 。离线 γ 退激能谱显示 ^{229}Th 浓度达到约 10^7 cm^{-3} 。利用高通量宽带 γ 射线源, ^{229}Th 浓度有望达到 10^{15} cm^{-3} , 与直接激光激发实验中使用的晶体相当。此外, 对辐照的 SrF_2 和 CaF_2 晶体进行真空紫外光谱学分析, 发现了 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 直接光子衰变的证据。这种方法克服了同位素可获得性和放射性处理方面的关键限制, 为探索各种固态基质晶体和核钟的规模化生产铺平了道路。

关键词: 激光核物理; 光核反应; 核钟; $^{229\text{m}}\text{Th}$

hedp2025-132

磁化喷流中的无碰撞蘑菇不稳定性

过尧¹

(1. 激光与等离子体物理实验室, 物理与天文系, 上海交通大学, 上海 200240)

摘 要: 蘑菇不稳定性 (MI) 是一种无碰撞剪切不稳定性, 被认为在相对论性喷流中负责产生和放大磁场。虽然天体中的喷流通常具有磁化特性, 但人们对 MI 在磁化喷流中的作用机制仍知之甚少。本文通过理论分析和粒子网格 (PIC) 模拟, 研究了外磁场对 MI 的影响。在无碰撞冷等离子体极限下, 我们推导出磁化 MI 线性增长率的广义色散关系。数值求解表明, 尽管 MI 比电子尺度开尔文-亥姆霍兹不稳定性 (ESKHs) 对外磁场的抵抗能力更强, 但外磁场始终会抑制 MI 的增长。研究还扩展到剪切界面平面内任意波矢量的不稳定性, 在亚相对论场景中观察到耦合效应。二维 PIC 单模 MI 模拟结果与理论预测高度吻合, 并在磁化模拟中观测到准稳态饱和结构的形成。在有限温度模拟中, 我们发现 MI 与扩散诱导的直流磁场之间存在竞争与协同作用。

关键词: 喷流; 剪切不稳定性; 无碰撞不稳定性

hedp2025-135

高效等离子体基强 X 射线激光偏振转换器

董艺杰¹, 黄太武¹, 陈鹏¹, 蒋轲¹, 彭浩¹, 李然¹, 郁明阳¹, 周沧涛¹

(1. 深圳技术大学, 工程物理学院, 广东深圳 518118)

摘要: 操控 X 射线激光脉冲的偏振态是一项重要且具有挑战性的课题。现有 X 射线偏振转换器（如椭圆偏振波荡器）仅适用于低功率场景，在高功率下易受损。为解决传统装置在高功率 X 射线偏振控制中的易损性问题，本研究提出一种基于固体密度等离子体界面全内反射的高效偏振转换方案。众所周知，当光从光密介质射向光疏介质，且入射角超过临界角时，会发生全反射，反射波中的 p 偏振分量与 s 偏振分量之间会产生相位差。由于当等离子体密度低于 X 射线波长激光的临界密度时，等离子体的折射率小于 1，因此固体密度等离子体原则上可作为全反射界面，实现高功率 X 射线激光的高效线偏振—圆偏振转换。

我们的粒子模拟 (PIC) 结果表明，在高功率激光与等离子体界面的相互作用中，尽管表面等离子激元的激发会引发等离子体密度扰动，导致反射效率略有下降，但在宽范围激光参数下，单次反射效率仍保持在 95% 以上。对于密度为 $7.8 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$ 的固体等离子体，考虑多次全反射时，波长小于 37.5 nm 的 X 射线激光可实现线偏振 - 圆偏振转换。此外，通过调节入射角和等离子体参数，可实现偏振态的连续可调。该方案克服了传统装置的损伤限制，为高功率 X 射线偏振控制提供了一种兼具高损伤阈值和高效率的新途径。

关键词: 高功率 X 射线激光；偏振态转换；固体密度等离子体板；全内反射

hedp2025-136

激波湍流相互作用中电子加速的数值模拟研究

靳先旭¹, 赵忠海¹, 乔宾¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘 要: 无碰撞激波是宇宙中高效的粒子加速器。扩散激波加速机制可以有效解释宇宙射线的幂律性能谱分布, 但加速效率却受限于“注入问题”, 即粒子尤其是质量低的电子需预先获得能量才能进入加速循环。天体环境中普遍存在的湍流, 通过与无碰撞激波相互作用过程, 为克服电子注入问题提供了新途径。本研究利用 WarpX 程序开展动理学模拟, 通过在左边界注入质子-电子等离子体及垂直背景磁场, 并借助朗之万天线激发阿芬湍流, 构建了向左传播的湍动等离子体流。等离子体流经右边界反射后, 与来流相互作用并通过磁活塞机制形成向右传播的湍流性激波。模拟表明, 湍流能有效扰动激波面结构并提升电子加速效率, 且定量调节湍流强度与尺度使得能谱指数在-3 至-5 间发生变化。扩散分析显示, 湍流磁场能有效约束激波附近高能电子, 降低逃逸概率。研究证实该过程符合随机性激波漂移加速机制, 揭示了湍流对电子扩散的关键调控作用, 有助于构建包含湍流散射的电子预加速模型并理解注入问题。

关键词: 阿芬湍流; 无碰撞激波; 扩散分析; 电子幂律加速谱; 随机性激波漂移加速

hedp2025-138

基于逆反应动力学 ^{93m}Mo 的产生

张子晴¹

(1. 南华大学, 核科学技术学院, 湖南衡阳 421001)

摘要: 核同质异能态 (Nuclear Isomers) 因其独特的能级结构与较长的寿命, 在核能量利用、天体核合成及核结构研究中具有重要的科学价值。其中, 电子俘获核激发 (NEEC, Nuclear Excitation by Electron Capture) 作为一种由共振驱动的高效核激发机制, 由于其理论截面显著高于光致激发过程, 近年来受到广泛关注。然而, NEEC 现象仍未在实验中得到验证, 其主要困难在于共振能级匹配要求严苛、同质异能态制备效率较低及复杂的实验本底干扰。针对这些问题, 本文提出一种基于逆反应动力学的 ^{93m}Mo 高效制备方案, 以满足 NEEC 实验高产额和高电荷态的需求。通过重离子反应在融合过程中可向复合核传递更大的动量, 使生成的 ^{93m}Mo 具有较高反冲能与电荷态, 从而为 NEEC 提供有利的实验条件。本文利用 PACE4 与 TALYS 计算多条候选逆反应通道 (包括 $^4\text{He}(^{91}\text{Zr}, 2n)$ 、 $^9\text{Be}(^{88}\text{Sr}, 4n)$ 与 $^7\text{Li}(^{90}\text{Zr}, p3n)$) 的截面, 并在 Geant4 框架下建立了包含融合-蒸发过程的蒙特卡洛模拟框架, 系统分析入射能谱 ($\Delta E/E=0.05$)、靶厚及束流强度等参数对 ^{93m}Mo 的影响。同时结合 Schiwietz-Grande 平衡电荷态模型对出靶的 ^{93m}Mo 电荷态分布进行分析。结果表明, 该方法可以显著提高 ^{93m}Mo 的产额与反冲能, 为实现 NEEC 的实验观测提供了可行的反应通道与优化参数。

关键词: 电子俘获核激发 (NEEC); 核同质异能态; Geant4 模拟; 电荷态分布

hedp2025-142

天体磁场起源的模拟实验研究

赵忠海¹, 乔宾¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘 要: 磁场与等离子体之间的非线性相互作用是天体大尺度强磁场起源问题的核心。为理解弱碰撞天体环境中的磁场产生、放大和逆级联过程, 以及动理学效应在这些过程中的作用机制和规律, 结合高功率激光驱动的高能量密度等离子体和高性能数值模拟开展了模拟和实验研究。在实验上利用激光驱动弱碰撞等离子体及自生磁场, 在数值模拟上开展二维和三维粒子模拟。研究发现, 弱碰撞等离子体中的温度梯度会激发温度各向异性及相应的韦伯不稳定性来产生种子磁场, 动理学尺度的种子磁场通过磁重联来驱动磁场能量逆级联并产生大尺度磁场结构。进一步, 在螺旋驱动力的持续作用下, 无碰撞湍流等离子体通过剪切相混激发压力各向异性并产生净磁螺旋度, 促进磁场能量逆级联来形成系统尺度的近均分相干磁场。结合实验和数值模拟, 研究揭示了动理学压力各向异性在调整无碰撞天体环境中磁场产生和放大中的关键作用, 有助于构建统一的湍流发电机模型来理解天体磁场起源难题。

关键词: 磁场; 湍流发电机; 动理学效应; 磁场逆级联

hedp2025-143

超强激光中辐射阻尼效应引起的新型粒子俘获机制

周舸¹, 王伟民², 李玉同¹

(1. 中科院物理研究所, 北京 100190; 2. 中国人民大学 物理系, 北京 100872)

摘 要: 在超强激光-等离子体相互作用中, 使用 PIC 模拟, 我们发现一种新型的辐射阻尼俘获机制。该机制的成因在于: 当考虑辐射阻尼效应时, 激光-等离子体界面前方的静电场中会形成稳定且依赖场强的电子运动模式及纵向漂移速度。受场强控制的纵向漂移速度使得电子在 $dS(x)/dx < 0$ 且存在 $S(x_{trap}) \equiv 1.18 \times 10^{-8} \xi^4 - 4\hat{E}_x \ll 1$ 的激光-静电场空间分布中聚集在纵向漂移速度近似打孔速度的位置 x_{trap} 。在激光场-静电场中, 使用我们推导的电子辐射阻尼运动理论, 我们从定量上验证了这个新的辐射阻尼俘获机制。模拟中被俘获的电子具有与理论类似的动量变化轨迹, 并且其失相率 u 和根据场强计算得到的失相率一致。最后, 辐射阻尼俘获机制的产生条件被讨论。除了对激光-静电场空间分布的要求, 场强和相互作用时间应足够强, 满足 $\hat{E}_x \omega \phi / u^2 \gg 1$ 。新发现的辐射阻尼俘获机制为控制带电粒子、产生粒子束团以及研究量子电动力学现象开辟了新途径。

关键词: 超强激光; 强场物理; 超强激光等离子体相互作用; 辐射阻尼; 辐射阻尼俘获

hedp2025-152

μ 子非弹性散射激发原子核的理论研究

周杰¹, 王旭^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193; 2. 中国科学院近代物理研究所南方核科学理论中心, 广东惠州 51600)

摘 要: 随着高能 μ 子源的技术发展, 用 μ 子激发原子核的可能性得到广泛关注。理论研究表明, 在低能条件下 (入射动能 $E < 100$ eV) μ 子激发钷-229 原子核的截面比电子高出四个数量级以上。我们研究了一般情形下 μ 子通过非弹性散射激发原子核的过程, 并讨论了高能 μ 子穿透效应对理论的影响。此外, 结合后续的退激过程, 我们计算了产生同核异能态的有效激发截面。例如, 入射动能为 2 MeV 的 μ 子激发铀-115 核的有效截面约为 10^{-27} cm²。本研究为实际观测 μ 子激发原子核的过程奠定了理论基础。

关键词: μ 子; 同核异能态; 非弹性散射

hedp2025-158

磁场调控激光等离子体

胡广月¹

(1. 中国科学技术大学, 核科学技术学院, 安徽合肥 230027)

摘 要: 磁约束等离子体和激光等离子体是两种常用的受控聚变实现方式, 前者依靠磁场约束物质和能量、后者依靠高功率激光冲击压缩之后的惯性约束物质。将强磁场和高功率激光技术相结合的强冲击磁化等离子体可以产生新的物理效应并带来新的应用技术。本报告将介绍我们在这方面的近期实验研究进展, 包括磁化强冲击过程产生的天体喷流、日地系统的霍尔效应和反常磁扩散、高能宇宙射线加速、离子源和脉冲激光沉积镀膜技术、磁惯性聚变等。

关键词: 激光等离子体; 强磁场; 天体现象; 烧蚀

hedp2025-162

拉盖尔激光驱动 (γ, n) 反应生产医用同位素 ^{192}Ir

陈忠义¹

(1. 北京大学)

摘 要: 与大型设施的核反应堆和回旋加速器相比, 现代激光技术在桌面级区域内通过光核反应即可生产医用同位素, 是一种新颖且具有潜力的补充方法。我们提出利用拉盖尔-高斯激光驱动 $^{193}\text{Ir}(\gamma, n)^{192}\text{Ir}$ 反应来生产医用同位素 ^{192}Ir 的方法, 并通过 PIC 与 Geant4 软件进行模拟。拉盖尔-高斯激光可提取高达 80 nC 的电子电量, 显著超越普通高斯激光提取电子的能力。高电量的电子束轰击钽靶时, 能最大化的产生(γ, n)反应所需的光子数, 从而提升医用同位素 ^{192}Ir 的产额。在 1 kHz 重复频率下持续辐照 17.1 小时, ^{192}Ir 的活度可达 100 GBq, 这对宫颈癌、前列腺癌等疾病治疗具有显著成效。

关键词: 拉盖尔高斯激光; 光核反应; 医用同位素

hedp2025-165

激光驱动磁湍流发电机中能量传递的尺度分解

曾博¹, 田立朝¹, 杨晓虎¹, 陈泽豪¹, 李择¹, 徐碧浩¹, 赵子琦¹, 张国博¹,
马燕云^{2,3}

(1. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073; 2. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南湘潭 411105; 3. 湖南大学 物理与微电子科学学院, 湖南长沙 410082)

摘 要: 湍流发电机效应被认为是宇宙中强磁场最合理的起源机制。近年来, 激光驱动等离子体实验的进展使得在实验室中复现相关天体物理条件成为可能, 从而能够直接研究这一过程。本研究基于 FLASH 程序进行的磁流体动力学模拟, 在二维和三维空间中模拟了经典的湍流发电机实验, 并对其进行了尺度分解分析。结果表明, 尽管二维模拟能准确模拟大多数等离子体参数, 但由于存在涡度守恒, 二维表现出三维模拟中所没有的逆级串能量传递, 这表明二维模拟结果在演化的后期阶段是不可靠的。在各类能量传递项中, 磁力线拉伸项 $T_{2,1}$ 被证实是动能向磁能转换的最有效项。其无源分量与涡度 ω 表现出强相关性, 而与其压缩性相关的膨胀分量则对磁力线压缩项 $T_{1,1}$ 产生相反的贡献。此外, $T_{2,1}$ 与 ω 在空间和数值上均表现出强相关性。我们还发现, 控制 的另一因素是应力强度, 而非拓扑结构。在应用 1.5 像素的高斯滤波后, 涡度识别项 $-\lambda_2$ 与 $T_{2,1}$ 强相关, 这表明即使在高破碎化的涡度场中, 涡结构依然是强磁力线拉伸的充分条件。本研究结果可为未来理解湍流发电机过程提供有益的参考。

关键词: 粗粒度方法; 湍流发电机; 尺度分解; 激光等离子体; 磁流体力学

四、基于高能量密度物理前沿交叉学科及应用产业化

hedp2025-006-new

桌面型激光尾波加速器驱动的逆康普顿光源及微米级高清相衬成像研究

郭博¹

(1. 北京量子信息科学研究院, 北京 100193)

摘 要: 激光尾波加速器具有超传统加速器技术千倍的加速能力, 有望大幅缩小基于传统加速器技术大科学装置的规模及成本, 是建设新型紧凑型光源及下一代高能对撞机的重要技术基础, 同时也在新型肿瘤精准放疗技术、超清医学影像、高端科学仪器等领域具有应用潜力。由于高度的技术复杂性和对环境苛刻的要求, 长期以来该技术一直无法走出科研实验室进入实际应用。由北京量子信息科学研究院、清华大学、中科院高能所和河南启源研究院组成的超强激光技术与激光加速应用联合团队长期致力于攻关工业级紧凑型超短超强激光技术与高稳定度激光尾波加速器技术, 先后推出一系列世界首创的超紧凑工业级超短超强激光器 (20 TW、200 TW、重频 PW)、移动式应用级激光尾波加速器以及桌面型全光逆康普顿光源。其中, 联合团队全自研的桌面型全光逆康普顿光源由 40 TW 激光器驱动, 能够覆盖 50-200 keV 波段范围, 具有 5×10^8 ph/s 超高光子通量。在此基础上, 联合团队面向医学、生物、材料等领域对超高清影像的需求, 系统开展了骨骼、小鼠、高分子材料等典型样品的高衬度相衬成像研究, 首次实现了基于全光逆康普顿光源的分辨率优于 4 微米的投影成像及分辨率优于 10 微米的高清 CT。联合团队一系列世界领先的成果表明, 激光尾波加速器以及桌面型同步辐射光源技术已经接近可应用水平, 为激光尾波加速器技术进一步在工业、医疗、科研等领域的大范围应用落地铺平了道路。

关键词: 高功率康普顿源; 成像研究

hedp2025-005

大型强子对撞机 7 TeV 质子束流与材料相互作用的耦合模拟研究

张蔚¹, 秦若毓¹, 安超凡¹, 王勇¹, 李健¹, 陈沅¹, 聂元存¹

(1. 武汉大学高等研究院, 湖北武汉 430072)

摘要: 随着粒子加速器向更高束流能量与流强发展, 机器保护系统面临前所未有的挑战。极端工况下, 粒子束在单点位置的意外损失可引发流体动力学隧道效应, 导致材料辐照损伤深度呈现数量级增长。本研究聚焦于欧洲核子研究中心 (CERN) 大型强子对撞机 (LHC) 7 TeV 质子束与石墨靶的相互作用, 采用基于蒙特卡洛程序 FLUKA 与流体动力学程序 ANSYS-Autodyn 的双向迭代耦合模拟方法, 旨在揭示极端束流辐照下靶体内的多物理场演化规律, 并为机器保护设计提供量化依据。为克服传统单向耦合模拟的局限, 本研究建立了时空多尺度耦合框架: FLUKA 首先计算先抵达质子束团在靶体内的初始能量沉积; Autodyn 模拟由此引发的热力学响应与密度耗减; 更新的密度分布图反馈至 FLUKA 进行后续迭代计算, 直至束流辐照结束。为提升计算效率, 优化了网格生成策略并分析了欧拉网格与拉格朗日网格的适用性。针对石墨的高压相变特性, 引入 Tillotson 状态方程描述极端条件下材料辐照行为, 并与 SESAME 状态方程进行交叉验证。为缓解靶体失效风险, 研究了能量沉积密度与质子束流横向尺寸的关联性。本研究不仅提供了极端束流与物质相互作用的高效模拟方法, 深化了对流体动力学隧道效应机理的分析, 更对高功率加速器机器保护系统的设计与安全运行具有重要参考价值。

关键词: 高功率加速器; 机器保护; 辐照损伤; 蒙特卡罗模拟; 热动力学响应

hedp2025-007

使用分离迁移物理信息神经网络求解带有多间断的欧拉方程组

王传兴¹, 罗慧*¹, 王凯², 朱国怀³, 罗民兴³

(1. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088; 2. 浙江大学物理学院浙江现代物理研究所, 浙江杭州 310058; 3. 北京市计算科学研究中心, 北京 100193)

摘 要: 尽管物理信息神经网络(PINN) 在科学计算的许多领域有了令人兴奋的进展, 但在求解带有多间断的流体力学问题中 PINN 仍然存在困难。本文提出分离迁移物理信息神经网络(ST-PINN)用于处理多间断问题, 基于对间断逐个求解并对训练模型进行迁移学习的思路, ST-PINN 可以显著降低求解多间断问题的难度并提高求解精度。本文首次利用 ST-PINN 对二维非稳态激波折射问题进行求解, 为 PINN 求解更复杂的激波界面相互作用问题提供了参考, 数值实验证明对于带有多间断的流体力学问题 ST-PINN 可以捕捉到更锐利的间断界面并显著降低了求解误差。

关键词: 物理信息神经网络; 间断; 流体力学; 迁移学习; 区域分离

hedp2025-015

基于流程的异构诊断设备集成控制技术

胡琳^{1,2}, 魏惠月^{1,2}, 陈伯伦^{1,2}, 杨品^{1,2}, 梁志远^{1,2}, 李颖洁^{1,2}, 王鹏^{*1,2}

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900; 2. 等离子体物理全国重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 激光惯性约束聚变实验过程中涉及多类诊断设备协同运行, 而诊断设备种类多样性和高度异构性导致控制接口复杂, 独立控制或同类设备批量控制的运行模式制约了实验效率提升, 且安全性和可靠性不足。针对此问题, 开展了基于流程的异构诊断设备集成控制技术研究, 设计并开发了基于流程驱动的诊断集成控制系统。采用面向对象的分布式控制系统框架, 通过构建诊断设备标准接入机制和设计可视化拖拽式流程编辑平台, 并在此基础上集成设备状态监控功能, 使系统获得了设备快速接入的可扩展性和流程快速编辑的灵活性, 支持实验流程自动运行、流程控制中设备状态分级分阶段监控和自动异常告警。该系统已成功部署并稳定运行, 在实验诊断运行效率提升和运行安全保障中发挥了重要作用。

关键词: 高能量密度物理诊断; 集成控制; 流程驱动; 面向对象; 分布式; 微服务

hedp2025-078

缺陷等离子体光子晶体中的拉比振荡效应研究

张小波¹, 翁苏明^{2*}, 乔鑫¹, 艾洪², 薛具奎¹, 盛政明²

(1. 西北师范大学, 物理与电子工程学院, 甘肃兰州 730070; 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)

摘 要:拉比振荡效应作为由物质波动特性引起的著名量子现象之一, 已在双能级系统、超导体系统、玻色-爱因斯坦凝聚体系统及光子晶体等系统中得到了广泛的研究。在该工作中, 我们通过飞秒探测激光脉冲与缺陷等离子体光子晶体相互作用, 验证了在激光等离子体系统中实现拉比振荡的可能性。研究表明, 在两组双色驱动激光脉冲照射下, 低密度等离子体将形成具有缺陷结构的等离子体光子晶体。通过调节等离子体和驱动激光的参数, 可灵活调控缺陷等离子体光子晶体的光子能带结构以及捕获探测激光脉冲的拉比振荡频率。此外, 通过多个激光脉冲的多次注入, 拉比振荡效应还能引发捕获激光强度的梯形攀升。这一发现不仅为量子光学中的拉比振荡研究提供了新途径, 还为强激光脉冲的调控和多种应用的实现开辟了新的方向。

关键词: 等离子体光学; 拉比振荡; 梯形攀升

hedp2025-097

基于 AI 视觉识别的中子辐射剂量计算方法研究

李欣焱¹, 邹德滨¹, 余同普^{*1}

(1. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 中子气泡探测器是一种基于超热液滴技术的辐射检测装置, 广泛用于测量中子辐射剂量, 当中子在其中传输时, 会引发液滴汽化形成气泡, 气泡数量与中子辐射剂量直接相关。因此, 气泡的精确计数是中子辐射剂量评估的关键。然而, 传统依赖人工目视计数的方法效率低下、主观性强、数据回溯困难, 难以满足实际应用需求。现有的自动计数技术虽有一定改进, 但仍存在局限, 对复杂场景 (如气泡重叠、粘连) 适应性差, 且缺乏与探测器编号的自动关联, 操作繁琐。

本研究提出了一种基于 AI 计算机视觉的解决方案, 该方案有效克服了传统方法因遮挡、气泡重叠等导致的计数偏差, 并实现了气泡计数与探测器信息的自动关联与数据管理, 实现了自动化、高精度、可追溯的中子辐射剂量数据处理分析, 未来可应用于在包括核辐射监测、激光/磁约束聚变实验中子诊断、医疗中子治疗剂量评估、国防安全及环境监测等领域。

关键词: 人工智能; 气泡探测器; 机器视觉; 中子产额

hedp2025-112

强激光驱动强流粒子束辐照电子器件的性能退化机制研究

姜雯¹

(1. 西安交通大学, 物理学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 面向深空探测、核能工程与高能装备等国家重大战略需求, 揭示电子器件在瞬态大剂量率粒子辐照下的性能退化机制是提升其极端环境服役可靠性的关键科学问题。通过激光加速强流短脉冲粒子束模拟瞬态大剂量率辐射环境, 可为揭示新型 SiC 电子器件材料的辐照损伤机理提供实验平台, 同时为其在深空探测与国防科技中的抗辐射应用奠定理论与技术基础。国内外基于不同辐射源的辐照效应研究都显示, SiC 器件在注量低于 10^{14} cm^{-2} 时对辐照不敏感, 但瞬态大剂量率辐照有可能使得粒子能量沉积非线性增加, 导致器件性能在较低注量下退化。本团队在“星光 III”装置上采用皮秒激光驱动质子束和电子束, 发现在总注量 $10^{10-11} \text{ cm}^{-2}$ 的质子辐照下 SiC 肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD) 与硅基光敏三极管的电学性能都有显著退化, 在总注量 10^{12} cm^{-2} 的电子辐照下硅基光敏三极管的电学性能也有显著退化。通过拉曼光谱、XRD 等手段对 SiC 和 Si 晶体在同等质子辐照条件下的显微结构变化进行了分析, 发现辐照后 SiC 和 Si 晶体都出现了明显损伤, 解释了器件的电学性能退化, 也证实了强流粒子束在较低注量下也能对 SiC 和 Si 晶体造成破坏。

关键词: 强激光驱动; 质子束辐照; 电子束辐照; 肖特基二极管; 碳化硅

hedp2025-133

基于相位压缩注入机制产生和加速孤立的阿秒电子束

张亮琪¹, 司梅雨¹, 余同普², 毕远杰¹, 黄永盛¹

(1. 中山大学, 理学院, 广东深圳 518107; 2. 国防科技大学, 理学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 相对论的阿秒电子束在超快物理、新型辐射源和自由电子激光注入等领域有着广泛的应用。这里, 我们提出了一个电子束驱动中空通道等离子体靶产生并加速孤立阿秒电子束的新方案。束靶相互作用时, 诱发了等离子体电子的横向振荡, 一个辐射尾场被产生; 同时大量接近光速的等离子体电子从辐射尾场的横向电场的位置自注入到通道中心, 由于辐射尾场在波破过程中发生了相位压缩, 形成一个孤立的阿秒电子束; 然后阿秒电子束被辐射尾场加速。理论和数值模拟表明: 本方案可以产生一个电荷 2 nC, 截止能 13 GeV, 发散角小于 5 mrad, 脉宽 276 as, 能量转换效率 36.7% 的孤立的阿秒电子束。如此 GeV 量级的超短电子束可以为超快物理和高能物理等领域提供重要的应用。

关键词: 孤立阿秒电子束, 相位压缩注入, 辐射尾场



指导单位：国家自然科学基金委数理学部

主办单位：中国物理学会高能量密度物理专业委员会 中国物理学会粒子加速器分会

承办单位：中山大学理学院 深圳技术大学

协办单位：《强激光与粒子束》编辑部 《Matter and Radiation at Extremes》编辑部