

超强激光与聚变物理前沿研究

超强超短激光的出现与迅猛发展,为人类提供了前所未有的极端物理条件与全新实验手段。激光脉冲峰值功率达到拍瓦(即PW, 10^{15} W, 千万亿瓦)、脉冲宽度达到数十飞秒级(即fs, 10^{-15} s, 千万亿分之一秒)的超强超短激光,被认为是人类已知的最亮光源,能在实验室内创造出前所未有的超高能量密度、超强电磁场和超快时间尺度综合性极端物理条件,在原子分子物理、化学、材料科学、阿秒科学、等离子体物理、核物理、天体物理、粒子物理、医学与生命科学等领域具有重大应用价值,是国际科技竞争重大前沿领域之一。

1 立项背景及依据

根据国内外超强激光和聚变物理研究的现状、发展态势以及已有的工作基础(图1),本专项开展超强激光与聚变物理前沿研究,重点聚焦超强激光物理以及超强超短激光可能带来聚变物理新研究方向,研究超强激光驱动相位空间超高密度高能电子束与新一代自由电子激光(XFEL)基础物理、强相对论超强激光与物质相互作用中的量子电动力学(QED)效应、相对论性涡旋激光的产生及其应用等前沿问题;研究超强激光驱动质子-硼无中子聚变反应体系等涉及的关键科学问题,探索实现远离热平衡态的聚变反应、开展等离子体状态反应截面,低宇宙环境噪声下小截面反应等方面的创新研究、基于超强激光的新物质产生与新物性研究;开展超高时间对比度超高强度激光光场的调控研究,并进一步开展面向艾瓦级峰值功率的极端超强光场产生与操控的新原理研究,以及中远红外与X射线新波段等新型超强激光

光场创立及其特性操控的新技术和新原理研究。带动高能密度物理,高能物理与核物理,激光高能加速器,高时间对比度新一代超强激光技术以及强激光相关材料科学等的创新发展,力争使上述研究进入到国际同类研究的最前列和领先水平。

2 拟解决的科学问题

本专项责任人为李儒新研究员和徐至展院士,依托单位为中科院上海光学精密机械所,参加单位包括中国科学技术大学、中科院物理所、中科院上海应用物理所、中科院理化技术所和中科院上海硅酸盐所。专项设置3个项目。

(1)项目一:“超强激光等离子体物理中若干前沿问题”,项目负责人为刘建胜研究员和李玉同研究员。重点关注和研究相对论性(甚至强相对论性)超强激光



图1 2016年8月,中科院上海光学精密机械所研制成功5PW超强超短激光装置

与等离子体相互作用中的基础科学问题。进行超强激光驱动相位空间超高密度高能电子束 ($\sim 10 \text{ GeV}$) 与新一代 XFEL 基础物理研究; 5—10 PW 量级超强激光使得激光与等离子体相互作用研究从重点研究相互作用中的相对论效应 (如电子加速等) 到开始同时重视相互作用的量子电动力学 (QED) 效应, 深入研究超强激光在等离子体中对电子捕获的新物理机制 (“辐射反作用” 等), 发展超强激光驱动的超高亮度伽玛射线源并开拓其在光核物理等方面的应用。开拓研究相对论性涡旋激光的产生及其应用, 在实现相对论性涡旋激光及驱动 “光扇” 等研究的基础上, 研究利用相对论涡旋光进行实验室天体物理研究。

(2) 项目二: “超强激光驱动新聚变反应体系与新物质”, 项目负责人为沈百飞研究员和郑坚教授。重点研究超强激光驱动无中子质子-硼聚变反应的核心科学问题, 如高对比度超强激光脉冲与固体相互作用产生特定能量的大电流高品质质子束、实现产生质子-硼聚变所需高量级反应温度等, 探索解决远离热平衡态的聚变反应相关的科学问题。基于超强超短激光驱动产生的飞秒至皮秒级高强度高能质子束等超快高能粒子束流, 开展等离子体状态反应截面, 低宇宙环境噪声下小截面核反应等方面的创新研究。常规方案是采用岩洞屏蔽减少背景噪声, 我们通过缩短实验时间也可以减少整个过程的总噪声。进行基于超强激光的新物质产生与新物性研究。形成正负电子对等离子体, 模拟天体环境, 强激光加速获得高能质子束, 进而探索产生反质子。

(3) 项目三: “新型超强激光光场创立及其特性操控”, 项目负责人为冷雨欣研究员和苏良碧研究员。研

究超高时间对比度超高强度激光光场的调控, 重点开展探索实现超过 10^{22} W/cm^2 激光聚焦强度和超过 10^{11} 超高时间对比度脉冲等涉及的关键科学技术问题研究。开展极端超强光场产生与操控的新原理研究, 进一步探索面向艾瓦级峰值功率激光脉冲放大、压缩、聚焦等的新原理与新方法, 如参量荧光抑制、光场相干合成、基于等离子体介质的时间对比度提升和高通量放大等新原理和新方法研究。开展中远红外与 X 射线新波段超强光场的产生与操控研究, 面向超强激光物理前沿研究的需求, 重点探索在中远红外和 X 射线新波段超强光场产生和操控的新原理新方法, 如基于超强激光与等离子体相互作用产生 GV/cm 级强 THz 辐射场和探索 X 射线波段啁啾脉冲放大机制等方面的研究, 以及开拓与发展相应的时域、频域和空间特性等精密操控的新方法、新技术。

3 预期成果

专项预期的研究成果包括: (1) 基于激光加速获得 10 GeV 级单能电子束, 为未来产生 100 GeV 甚至更高量级的高性能高能电子束提供技术途径; 进行 QED 效应初步实验验证; 产生强度大于 10^{18} W/cm^2 相对论涡旋激光, 并开拓其应用。(2) 利用激光加速获得 GeV 级高能质子束, 进行激光产生反物质及其相互作用研究。在低宇宙环境噪声下小截面反应 (如 $p+B$ 聚变反应截面) 等方面取得重要成果。(3) 产生超过 10^{22} W/cm^2 激光聚焦强度和超过 10^{11} 超高时间对比度脉冲, 探索发展面向艾瓦级极端超强光场产生与操控的新原理和新方法, 并解决相关关键科学技术问题。

(依托单位: 中科院上海光学精密机械所)