

# 物理研究所在强场物理研究领域 取得重要进展<sup>\*</sup>

物理研究所

(北京 100080)

**摘要** 超短超强激光与物质的相互作用研究(强场物理)是目前世界上非常活跃的前沿研究领域之一。1999年物理研究所强场物理研究组正式成立。经过三年的艰苦奋斗,该组在强场物理研究方面取得了骄人的成绩,引起国际的广泛关注。系统地介绍了该组在强场物理研究方面所取得的重要进展及其在科研与应用中的意义。

**关键词** 强场物理,超短超强激光

超短超强激光与物质的相互作用研究(强场物理)是目前世界上非常活跃的前沿研究领域之一。成立于1999年的物理研究所强场物理研究组,是一支由近年来回国的青年学者组成的科研队伍,平均年龄32岁,组长是从英国卢瑟福实验室回国的张杰研究员。该组白手起家,经过三年的艰苦努力,建成了国际先进水平的强场物理研究平台并在强场物理研究领域取得了重要进展,引起了国内外强场物理学术界的广泛关注。三年间该组在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表论文3篇,在 *Phys. Rev.* 上发表论文9篇,在 *Phys. Plasmas* 上发表论文8篇,共发表SCI论文63篇;在重要国际学术会议上做特邀报告14次。该组还同英国卢瑟福实验室、美国利佛莫尔国家实验室,日本大阪大学等国际重要强场物理研究基地建立了密切的合作关系和伙伴关系,在国际强场物理研究界产生了巨大的影响。

## 1 超短超强激光物理和技术研究

性能优良的超短超强激光是进行强场物理实验的必要条件和保障。该组成立初期,只有一台输出能量5毫焦、脉冲宽度150飞秒(1飞秒= $10^{-15}$ 秒)、重复频率10赫兹的小型超短脉冲激光器,输出功率只有0.03太瓦(1太瓦= $10^{12}$ 瓦),远不能满足当今发展迅速的强场物理的科研需要。

1999—2000年,该组主要利用国产元件,历时一年半,建成了脉冲宽度25飞秒、峰值功率1.4太瓦的超短脉冲激光装置“极光I号”。国家自然科学基金委员会和中国科学院联合鉴定认为,“该装置的多项指标达到了国际先进水平”,“该装置的建成标志着我国在超短超强激光高技术领域已步入国际先进行列”。其成果获中国科学院科技进步奖二等奖。目前一台类似的激光装置已出口日本,用户评价“运行稳定,性能优良,使我们的实验进行得非常顺利”。

2001年,该组又建成了脉冲宽度30飞秒、输出能量0.64焦耳,峰值功率大于20太瓦的“极光II号”。该装置光束质量好,激光聚焦后在物质表面的强度高达 $3 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ ,如此高的功率密度在国际上屈指可数。“极光II号”的建成提供了进行相对论光强物理实验的条件,为科研工作再上新台阶搭建了平台。

## 2 飞秒激光等离子体实验诊断技术和诊断设备研制

高强度飞秒激光聚焦到靶面上所产生的激光等离子体具有空间尺度小(几十立方微米的空间)、时间过程快(重要物理过程的时间尺度为皮秒量级)的特点。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2003年1月11日

对飞秒激光等离子体进行诊断,主要有两类方法。一是对飞秒激光等离子体发射的各种产物进行测量,比如各种射线和粒子,是一种被动诊断法;另一种是向等离子体中注入一束已知特性的粒子束或者光束,粒子束或光束从等离子体出射后,其性质会发生变化,这些变化反映了等离子体的性质,为主动诊断法。该组对这两种方法都进行了深入研究和 发展,并取得了重大突破。

在被动诊断法方面,该组在世界上首先发明了角分辨好于 5 度的  $2\pi$  空间超热电子测量仪。该仪器采用热释光探测器为记录系统,可以方便高效地对飞秒激光等离子体产生的超热电子空间分布进行测量。为了得到超热电子的能谱信息,该组还自行研制了体积小,分辨率高,能量覆盖 50keV—30MeV 的超热电子能谱仪三台。该组还研制成功适用于飞秒激光等离子体的可见和红外光谱仪、软 X 射线谱仪、弯晶谱仪和  $\gamma$  谱仪,可对等离子体发射的射线进行全谱段诊断,包括红外、可见、紫外、软 X 射线、硬 X 射线和  $\gamma$  射线。其中软 X 射线平场谱仪优点极为突出,其谱平面和普通罗兰圆谱仪不同,为平焦场,且其摄谱范围极宽,可达 2—100nm,并具有空间分辨性能,该仪器性能国际领先。

在主动诊断法方面,该组结合飞秒激光等离子体的特点,发展了高灵敏度光学干涉法、阴影法和纹影法。采用这些方法对飞秒激光等离子体的流体力学特性、产生的冲击波、超热电子向高密度区的输运等过程进行了诊断,得到了许多重要的信息。

3 超短超强激光与物质的相互作用物理研究

在激光装置和诊断技术迅速发展的同时,强场物理的实验和理论研究也取得了突破性进展。从研究对象来看,可以分为超短超强激光和固体、液体、气体和团簇相互作用研究;从所研究的物理内容来看,可以分为超短超强激光和等离子体相互作用、激光粒子加速、与快点火激光核聚变相关的高温高密度等离子体物理过程、强激光天体物理、X 射线激光研究、飞秒激光脉冲在大气中的传输过程等。

3.1 超短脉冲强激光与固体相互作用研究

国际上对预等离子体的研究非常重视。由于飞

秒激光脉冲在靶面聚焦后功率密度非常高(可达  $>10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ ),而一般激光器的信噪比为  $10^6$  左右,飞秒激光脉冲前沿的自发辐射平台可将靶材料电离形成预等离子体,对激光等离子体相互作用造成非常大的影响。该组首先在中等功率密度下,发现几十皮秒的预脉冲可大幅度增强飞秒激光等离子体的  $\gamma$  射线产额和相应超热电子的温度。通过改变预脉冲和主脉冲的时间间隔,可控制与主脉冲相互作用的等离子体密度标长,当密度标长由零个激光波长向几个波长过渡时,等离子体出现明显的三个吸收峰,这些吸收峰分别对应着不同的能量吸收机制。此结果对于探索飞秒激光脉冲和等离子体的能量耦合过程具有重要意义。

在激光惯性约束核聚变研究中,近年来提出的快点火方案受到广泛关注。该方案的关键是使用超短超强激光脉冲产生一束方向性很好的高能电子束。到目前为止,虽然对超热电子的产生和输运问题进行了很多研究,但对如何控制超热电子发射方向仍不很清楚。不同研究组在超短脉冲激光-固体相互作用中观察到的超热电子发射方向也很不一致。此外,目前提出的准直超热电子束的加速机制主要是针对 p 偏振斜入射激光而言的。因为许多基本的等离子体行为是由强激光场而不是等离子体密度和温度决定的,所以研究激光偏振态对超热电子发射的影响就非常重要。该组采用高强度的超短激光脉冲辐照铝靶,通过观测 p、s 偏振光斜入射到有、无预脉冲的等离子体上产生的向内、外传播的超热电子发射,发现通过调制等离子体的密度标长,可控制高能电子束的发射方向。这一成果标志着人们对激光等离子体中高能电子产生和传输物理机制的理解进入了一个新的阶段。

另外,该组还对中等激光强度下飞秒激光脉冲和薄膜靶相互作用产生的超热电子特性进行了研究。实验发现,前向超热电子的高能分量透过薄膜靶后向激光传播方向发生了偏折,低能分量由于在等离子体和靶材料中的碰撞效应散射为连续背景。3D 蒙特卡洛模拟支持了这一看法。超热电子能谱测量和能量吸收测量表明,共振吸收可能对超热电子产生起了重要作用。为了进一步探索超强激光与固体靶相互作用中产生的超热电子向高密度等离子

体区域传输的空间和时间特性,该组还采用探针光照射端面镀铝膜的透明靶,将超热电子在透明靶中诱生的离化径迹成像,结果表明,前向超热电子在靶中传播时,对靶材料进行电离,形成了 jet 结构的离化通道,该通道直观地表征了超热电子在固体靶中的传播过程。

在“极光 II 号”建成后,该组的最新实验结果表明,当激光强度由非相对论光强向相对论光强过渡时,对于 s 偏振激光,超热电子的发射方向由准直的两个峰逐渐变得方向随机,发射方向越来越差。进一步的物理探索工作正在进行中。

3.2 超短脉冲强激光与气体和团簇相互作用研究

超短激光脉冲在大气中的传播已引起世界很多实验室极大的兴趣。这是因为当超强、超短激光脉冲在大气中传输时,空气的非线性效应将会使光线在传播过程中产生自聚焦,而自聚焦产生出来的等离子体对激光束有散焦的作用。当自聚焦过程和等离子体的散焦过程两者之间达到动态平衡时,就可引导激光光束传播较远的距离,激光脉冲可以传播远大于瑞利长度的距离而不发散,这个优点使之有很大的应用价值。如在超短光脉冲的产生、光学高次谐波的产生、X 射线激光、激光驱动的加速器、大气环境监测、激光引导闪电以及在国防上都具有重要的应用价值。

该组从实验和理论两方面对激光与大气的相互作用进行了研究。在理论研究方面,建立了激光在大气中传播的模型,详细研究了激光为什么能在大气中传播很远的距离并预言了许多有重要应用价值的物理现象。同时还进行了大量的实验工作,利用强飞秒激光在大气中传输形成的自聚焦和等离子体的散焦的动态平衡实现了长度达数千米的等离子体通道,同时测量了通道的导电性,发现其导电性较好。此外,还观测到激光在大气中传播产生的光谱展宽和锥角辐射并进行了研究。在实验中,该组观测到在大气中有很强的三次谐波辐射并对此进行了研究,否定了以前认为紫外光谱是由于自相位调制引起的结论。另外,对激光在大气中传播的动力学过程也做了研究,取得了重要结果。最近还创造性地提出了激光成丝精细结构的概念。这

些成果均为国际领先并引起了国际学术界的广泛关注。

3.3 超短脉冲强激光与液体相互作用研究

目前,国内外对激光脉冲和固体、气体及团簇相互作用产生的超热电子特性研究很多。相比之下,对激光与液体相互作用高能产物的研究很少,尤其是超短激光脉冲情况。以前的激光与液体相互作用主要是将长脉冲激光(纳秒或者亚纳秒)聚焦到液体中,对激光击穿和激光空泡等现象进行研究。该组首次对飞秒脉冲激光与水等离子体相互作用产生的超热电子、X 射线和水等离子体的动力学行为进行了实验和理论研究。实验表明,间隔 10ns 的多脉冲可以明显增强超热电子的产生,原因是第一个脉冲首先和水相互作用,产生微米尺度的液滴颗粒,当后续脉冲到来后,通过共振吸收,产生准直性很好的超热电子峰。观测结果表明,能量大于 25keV 的超热电子空间分布呈与激光轴对称的双峰结构,无论是垂直入射还是斜入射,峰值总是位于激光偏振面内。X 射线谱给出的超热电子温度为 64keV。粒子模拟结果和实验结果非常吻合。水等离子体前向膨胀的密度波前在早期以声速传播,之后逐渐过渡到纯流体力学过程,密度波前的运动最后趋于声速。飞秒激光脉冲在水面产生的爆轰波在开始时和 Sedov 理论平面波近似相吻合,最后趋于球面波传播。

为了更好地控制激光和液体相互作用的实验条件,该组还自行设计建立了一套液滴靶产生装置。在高压气体的推动下,液体通过几十微米宽的高压喷嘴喷出,可以形成微米尺度的液滴或液体射流。实验发现,当飞秒激光脉冲和这样的液体靶相互作用时,产生的超热电子数目与温度比和固体靶相互作用还高。这对于在实际应用中设计建设无污染 X 射线源和高能粒子源有重要意义。

3.4 强激光实验室天体物理学

20 世纪 90 年代以来,随着激光功率变得越来越强,采用强激光装置在实验室里模拟天体物理的某些过程成为可能。为了增加激光等离子体与天体等离子体的相关性,一般在实验室中采用激光等离



子体产生的 X 射线辐射加热样品来获得类似于大多数天体等离子体状态,满足局域热力学平衡条件的、具有均匀电子温度和密度分布的等离子体,这对于实验室天体物理学的研究起着非常重要的作用。

激光能量向 X 射线转换是辐射加热靶产生对模拟天体物理现象的一个极其重要的物理过程。该组研究了激光等离子体产生的 X 射线的能量输运过程,详细分析了功率为  $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ , 脉冲宽度为  $1\text{ns}$ , 波长为  $0.35\mu\text{m}$  的激光辐照平面 Au 靶时能量输运过程和 X 射线能谱分布以及辐射热波的性质;讨论了靶的厚度对 X 射线转换效率的影响;通过优化靶的厚度得到了作为近似黑体辐射的转换靶的最佳厚度范围;利用转换靶产生的 X 射线辐射加热样品 Al 靶,在样品靶中得到了密度和温度梯度很小的均匀等离子体。此外,还利用研究非局域热力学平衡态下等离子体状态程序包 NIMP 与 MULTI 结合对近似 Planck 分布的辐射场对等离子体中的激发和离化态的影响进行了数值模拟研究,所有这些对于未来研究天体物理中与辐射输运过程相关的实验设计都具有一定的理论价值。目前,该组正在进行黑洞辐射对吸积盘表面光离化作用和相互作用物理的研究。

3.5 超短脉冲强激光产生 X 射线激光

该组用数值模拟方法对低强度纳秒预脉冲和高强度皮秒主脉冲辐照平板锗靶激发 X 射线激光的过程进行了研究。计算结果表明,当预脉冲强度不足以将预等离子体离化到类氦的状态时,适当地增加主脉冲宽度同样能产生很高的增益。通过调节预-主脉冲之间的时间延迟,可以极大地改善增益区的时空分布。经过对泵浦脉冲结构系统地优化,在  $19.6\text{nm}$  的波长上得到了超过  $200\text{cm}^{-1}$  的增益。

该组还深入研究了瞬态类氦锗 X 射线激光的泵浦机理,用数值模拟方法详细比较了飞秒脉冲和皮秒脉冲与平板锗靶相互作用时产生的等离子体的流体力学状态、增益系数以及离化平衡态。参照瞬态 X 射线激光的标准定义,发现对于类氦锗离子,即使泵浦脉冲短到几百飞秒,产生的增益仍然

属于准稳态泵浦的范畴,而理想的瞬态 X 射线激光需要用几十飞秒的泵浦脉冲产生。这一重要结论纠正了长期以来人们对瞬态 X 射线激光泵浦条件的错误认识。

3.6 超短脉冲激光与等离子体相互作用的理论研究和数值模拟

在理论方面,除了很好地解释了实验结果外,还提出了为国内外广泛关注的超热电子随机加热理论、互调制尾波场粒子加速理论等新概念。

在等离子体中,对于两个反向传播的激光脉冲,当激光场超过一定的阈值后,可以激发电子的随机运动。粒子模拟表明,在真空或者稀薄等离子体中,双激光脉冲可以比单个激光脉冲更有效地加速电子。此外,近年来人们提出用超短脉冲激光激发的尾波场来加速电子的设想。为达到共振激发,其中所需的激光脉冲必须小于一个等离子体周期,同时光脉冲要达到足够的光强。为克服这些困难,人们又提出了用相对较长的激光脉冲通过自调制产生大振幅等离子体波的方案,但由此必须先产生超过一个瑞利长度的均匀等离子体。该组提出了一种新的加速方案——互调制尾波场粒子加速。用两个同向传播的激光脉冲,其中前一个短脉冲产生低振幅的尾波场,用此尾波场调制后一个长脉冲。被调制的长脉冲反过来放大此尾波场。数值模拟证实了这种方案的可行性。

利用粒子模拟程序研究了飞秒激光与固体靶相互作用过程中的物理机制,结合实验,比较系统地讨论了激光能量的吸收、高能电子的发射与等离子体密度梯度的关系,特别是发现了在 p 偏振光入射作用下,等离子体对光的吸收随等离子体密度梯度的标尺长度变化呈现多个吸收峰现象。这与实验结果吻合。

该组还对飞秒激光与薄膜靶相互作用中离子的加速进行了研究。利用 PIC 程序详尽研究了飞秒激光与薄膜靶相互作用中离子的加速机制。对超强、超短脉冲与薄膜靶相互作用实验提出了优化建议。