

自然科学学科发展战略研究报告之十四：等离子体物理学

Strategic Research on Natural Science Disciplines: Plasma Physics

国家自然科学基金委员会

一、战略地位

等离子体是由大量相互作用但仍处在非束缚状态下的带电粒子组成的宏观体系,是和固态、液态、气态同一层次物质第四态,自然界的物质主要以这种状态出现。等离子体物理以这类多体体系呈现出的整体形态和集体运动规律为主要研究对象,同时也研究等离子体和其它形态物质的相互作用过程。

等离子体物理学是物理学的一个新分支学科。人类对等离子体的认识开始于19世纪30年代气体放电管中电离气体的研究,到20世纪20年代,等离子体的基本概念和特征运动的时空尺度已基本建立,30年代到50年代初在借鉴其它学科研究方法的基础上建立了等离子体物理的基本理论框架和描述方法,同时把其研究范围从电离气体、金属中电子气拓展到电离层和某些天体。但只是从50年代起,在受控热核聚变研究和空间技术的巨大推动下,等离子体物理才得到充分的发展并成熟起来,终于在70年代末成为物理界公认的一个独立分支学科。在此期间,以气体放电和电弧技术为基础发展了低温等离子体物理和工艺。近十多年来,在基础工业和高技术领域低温等离子体科学的广泛应用,更推动了等离子体与其它物理及基础学科、技术领域的相互渗透和交叉,从而增强了等离子体科学和相关技术在国民经济中的影响。

和物质的其它三态相比,等离子体可以存在的参数范围异常宽广(其密度、温度及磁场强度都可以跨越十几个数量级)。等离子体的形态和性质受外加电磁场的强烈影响,并存在极其丰富的集体运动(如各种静电波、漂移波、电磁波以及非线性的相干结构和湍动)。此外,等离子体对边界条件还十分敏感。所以,等离子体性质的研究强烈地依赖于具体的研究对象。

今日的等离子体物理研究主要集中在以下几个相对独立的领域:热核聚变能源研究(高温碰撞等离子体)、空间等离子体物理(低温无碰撞等离子体)和天体等离子体物理(各种极端参数条件下的等离子体)、气体放电和电弧的工业应用(低温等离子体及其与物质相互作用),以及涉及强流带电粒子束的现代高科技应用(非中性等离子体及其与强静电、电磁波场的相互作用)。

等离子体物理学的这些特点决定了这一学科的独特战略地位。

等离子体物理学是研究宇宙中最广泛存在的物质状态规律的科学,认识和掌握各种条件下等离子体运动规律是人类认识宇宙中各种现象的基本前提。宇宙中99%以上的物质处于等离子体状态,从地球上空近百公里处的电离层开始直至茫茫太空,到处充满等离子体。天体物理和空间物理所研究的各种现象,如太阳耀斑、日冕、日珥、太阳黑子、太阳风,以及一般恒星、星云、脉冲星等,都涉及等离子体。星系和星云的形成、宇宙线的加速和传播、行星和恒星磁场的形成等重大科学问题都有赖于等离子体物理学的研究,因而等离子体物理学既是空间物理和天体物理的基础,又是人类认识各种宇宙现象的锐利武器。

等离子体物理学的研究为人类未来能源问题的解决带来希望。地球能源枯竭和现有化学能源(煤、石油)及核电站带来的环境污染和生态危机一直是威胁人类生存的全局性问题。通过轻核聚变释放巨大能量这一规律实现受控核聚变而解决能源危机已成为人类的主要选择。受控核聚变所遇到的主要困难在于,若使两个轻核接近并聚合在一起,必须克服两核间的库仑斥力。只有在几亿度的高温下,轻核聚变才有可观的反应率。这就是核聚变称为热核聚变的原因。在热核聚变温度,所有的物质均呈等离子体态,因而高温等离子体研究成为核聚变研究的基础。通过几十年来国际聚变科学界的持续努力,目前无论采用磁约束还是惯性约束方式,

受控聚变研究已处于验证其科学可行性的前夕。1991年在欧洲的磁约束聚变装置JET上和1993年在美国TFTR装置上分别成功地进行的用注入少量氦粒子的办法产生氦—氦反应的实验,无疑是实现聚变能应用的重要里程碑。按照目前的计划,演示性的聚变堆将于2025年实现,而商用聚变堆将于2040年建成。高温等离子体规律的掌握是实现这一目标的关键所在。

等离子体物理研究是人类认识和控制地球环境变化,开发空间产业,维持全球通信的重要保证。太阳是地球上生物活动的主要能源,太阳活动是引起地球生态环境变化的主要因素。太阳辐射总量的微小变化将会导致气候的剧烈变化(例如冰川时期的到来),乃至引起生物大规模毁灭。最近发现的南极和北极上空的臭氧洞,如果存在和扩展,势必导致气温增高和皮肤病人的急剧增加。地球的天气过程和气候变迁都与太阳活动和大气层与磁层、电离层的相互作用有联系。研究太阳等离子体热核能量的输出和在行星际空间的传输,研究磁层和电离层中能量的转化和分配,对于认识和保护地球环境都有深远的意义。目前人类已经进入了空间时代,空间等离子体物理学能为航天安全和空间应用的正常进行提供环境保证,如提供环境参数、进行环境监测和预报等。美国天空实验室由于没有充分估计临近太阳活动峰年的影响,以至提前两年坠毁,而1984年4月10日由于得到太阳耀斑的正确预报,“哥伦比亚”号航天飞机及时采取了有效措施,避免了天空实验室事故的重演。资源卫星这类长寿命的飞行器上电器部分绝缘材料的瞬时失常和辐射损伤,以及同步卫星带电等,都是与周围等离子体相互作用的结果。因此,监测和预报空间等离子体环境,研究等离子体和飞行体的相互作用,是空间开发的前提。无线电通信,特别是短波全球通信以及广播、导航、制导和授时是否能正常进行都与电离层等离子体状况有密切关系,太阳剧烈扰动引起的电离层骚扰可能导致短波通信中断。1984年2月太阳大耀斑就曾引起全球短波通信中断达4小时之久。因此,研究电离层等离子体环境及其对电波传播的影响,起着保障和改善通信、导航和授时精度的重要作用。

等离子体研究促进了低温等离子体技术在国民经济各领域中广泛应用。低温等离子体技术近年来以极为迅猛的势头进入了工业应用的各个领域,除去在传统的焊接、切割、照明、冶金、化工、磁流体发电等方面继续扩展其应用之外,在微电子加工、光记录和磁记录技术、材料的表面改性、镀膜、超细超纯材料粉的制备等新技术领域都显示了独特的优越性,创造了极大的经济效益。与此同时,在臭氧制造、核废料和有毒物质处理等环境保护方面也取

得重大进展。方兴未艾的低温等离子体技术的广泛应用得益于多年来低温等离子体物理研究;同时,这些应用又都有力地推动着低温等离子体物理研究的深入开展。

等离子体研究开辟了高技术开发的新领域。随着等离子体物理研究的深入,等离子体研究领域从原来的中性等离子体扩展到非中性等离子体,由于认识到非中性等离子体(电子等离子体、离子等离子体)与中性等离子体一样具有集体效应并掌握了其规律,引起了一批崭新的具有革命性意义的高技术项目的出现,如具有数十吉瓦量级的高功率微波器件的开发,从微波直至紫外波段可调的自由电子激光装置的成功建成,利用带电粒子束中等离子体波的强场加速粒子的各种新加速器概念的提出等应运而生。这些基于等离子体物理基础研究的高技术项目,有的已见成效并有可能在能源、国防、通信、材料科学、生物医学中发挥重要作用。

二、发展趋势

当前等离子体物理正向广度和深度两个方向发展,在核聚变等离子体物理、空间和天体等离子体物理、低温等离子体物理等各个方面不断取得重要成果并提出新的问题。

磁约束聚变托卡马克等离子体物理方面,近年来围绕提高等离子体温度和加长等离子体约束时间这两个关键问题在等离子体稳定性、边界区物理和杂质控制、辅助加热、非感应电流驱动等实验和理论研究中均取得重要进展。1991年和1993年在两个大托卡马克(JET和TFTR)上相继进行了氦氦反应实验,分别得到了1.7兆瓦和5兆瓦的聚变功率,标志着这一装置已距输入输出功率得失相当的条件不远。但是聚变等离子体中粒子和能量反常输运机理一直没弄清,同时堆条件下 α 粒子物理有待进一步探索,如何实现托卡马克高温稳态运行,研究高温准稳态等离子体的性质并控制其行为,仍是十分艰巨的任务。在激光核聚变等离子体研究中,间接驱动情况下黑腔等离子体物理和内爆动力学研究均取得重要进展,表明高增益惯性约束在原理上可行;在直接驱动情况下氦氦靶壳已获得较高的压缩密度,并正进行新驱动器研究。目前各国都在积极进行靶物理研究,美日均争取在2000年前进行实验室点火和低增益演示。靶物理研究中突出要解决的问题是激光等离子体物理和内爆动力学。前者由于强激光与等离子体相互作用过程十分复杂,表现出很强的非线性特征,后者则是要研究DT靶在内爆压缩下来不及飞散的极短时间内充分燃烧的力学,挑战性极强。

空间和天体等离子体研究方面,近年来一直围

绕对等离子体能量转化和耦合起重要作用的磁场重联、波-粒子相互作用和反常输运、无碰撞激波、等离子体加热和高能粒子加速、空间等离子体湍流、大尺度等离子体和磁场相互作用、等离子体激元激发的自生磁场、射电星系和活动星系中的等离子体过程、天体吸积盘中等离子体性质等开展研究。当前的发展趋向之一是充分利用空间探测技术的进步和空间、天体等离子体研究的已有成果,通过国际合作,研究太阳热核能量如何输出和传输到地球并最终对地球环境产生影响的全过程。根据美、日、欧“国际日地物理计划”,国科联“全球日地能量计划”以及各国空间科学界的规划,本世纪内将为实现上述目标取得重大突破。

低温等离子体方面突出的趋势为等离子体技术广泛应用到工业的各个部门,有些已形成产业,无论是局域热力学平衡的热等离子体、热力学非平衡的冷等离子体,还是燃烧等离子体,都已突破传统的应用领域,向新的应用领域扩展。突出要解决的问题是工业应用中的机理不清、产品质量不稳、效率偏低,从而对应用基础实验和理论研究更为重视,对反应机理研究和诊断手段改善尤感迫切。

在与等离子体有关的高技术领域,自由电子激光、高功率微波和X光激光的研究仍是各国竞争的热点,并不断有新概念提出。

在以上诸方面推动下,等离子体物理基础研究中,非线性等离子体物理、非中性等离子体物理与强耦合等离子体物理研究成为研究的热点,新结果不断出现,同时高能成分等离子体物理,与磁约束核聚变未来建堆密切相关的近点火区和点火区等离子体物理,与惯性约束聚变有关的激光等离子体基本物理问题的研究也极为活跃。

在这些新进展中有两点特别值得注意,一为计算等离子体物理的兴起,一为诊断手段的提高。前者使复杂的等离子体过程的理论分析获得难以比拟的进步,后者使对等离子体实验的理解更为深入可靠。

三、战略目标和措施

我国等离子体物理学研究,从50年代少数人首先进行核聚变、空间等离子体、磁流体发电研究开始(更早期还有分散的气体放电和电离层研究),经历了曲折的过程,发展到目前不仅有专业研究所和研究室开展有关磁约束和惯性约束聚变等离子体、空间和天体等离子体的实验和理论研究,而且在相当数量的研究机构 and 高等院校均在等离子体物理学的各个领域从基础到应用开展研究,已形成了一支可观的科研队伍。

但是,我们也应清醒地看到我国等离子体物理

研究水平总体上与国际水平差距甚大,学科发展中存在一些问题:如研究布局不够理想,发展不协调;研究工作水平不高,独创性的工作较少;科研队伍的知识、年龄结构不合理,总体素质还不高,高水平的学科带头人较少。从总体上看我国对等离子体物理研究,特别是基本物理过程研究支持不力,重视不够,缺乏发展这门重要学科的总体、长远规划。

近十年等离子体物理研究的进展速度越来越快,今后十年将会是等离子体研究在基础和应用两方面取得重大突破的时期。我国应抓住这一大好时机。

在等离子体物理学基础和应用研究的若干重要领域内,应争取占领前沿,做出一批有国际影响的工作,缩小与先进国家的差距。为实现此目标,发展战略应为:大力加强我国等离子体物理基础和应用基础研究,加强等离子体物理实验和理论研究的经费投入,注意人才培养,进一步做好规划,在聚变等离子体物理、激光等离子体物理研究中筹建装置应有明确的物理目标,特别要重视诊断设备和诊断技术的备置和改进,强调对物理基本规律的探索。在低温等离子体的应用基础研究中,应注意结合实际应用提高水平,切实解决问题。

在聚变等离子体物理研究方面,应当本着磁约束和惯性约束并重的原则,国家的高级决策机构应加强国内协调和分工,密切跟踪国际发展趋势,积极开展关键性技术预先研究,充分利用现有设备,深入开展物理实验,在基本物理过程的深入研究上下工夫。从国际上看,大装置的建设正在走向国际联合,我们应根据国情制定自己的国际合作战略。

在空间和天体等离子体物理研究中,一方面要配合国家空间计划努力改善自己的观察手段,进行空间和天体等离子体物理过程的基础研究,另一方面要积极开展国际合作,力争进入国际研究主流。

切实大力加强对基础等离子体的实验和理论研究的组织和组织,重视高水平研究队伍的培养,特别是学科带头人的培养。注意基础实验研究的小型装置的建设 and 诊断设备的配套。

在低温等离子体的研究中应特别加强对基本过程和机理的探索,并注意解决应用中遇到的科学技术问题。

加强诊断工作是等离子体研究的当务之急,无论是聚变研究和低温等离子体研究,诊断手段的缺乏及诊断技术落后都在严重地影响着我国研究水平的提高。今后十年中只有在这方面切实改善,我国等离子体物理研究水平方可望有实质性提高。

等离子体物理学计算机模拟研究是当前国际发展的一个明显热点,等离子体物理和计算机科学的结合,利用计算机手段对复杂的等离子体物理过

程,特别是非线性过程进行研究,国际上目前正突飞猛进,已取得显著进展。这方面的研究我国十分薄弱,必须切实在设备和组织上予以加强。

为保证发展战略的贯彻:

1. 理顺学科布局,加强对学科发展方向的引导,在原有专业学会、协会基础上组织统一的全国等离子体物理学二级学会,以团结全国等离子体物理学研究和教学工作者,协调组织全国性的学术交流活动。

2. 由于历史的原因,我国等离子体物理研究已形成的现有布局是:重点突出地集中在聚变研究方面,空间和天体等离子体研究已有一定实体机构,而在基础等离子体研究、低温等离子体研究以及等离子体教学方面则程度不同地显得较为分散和薄弱。对后三个方面进行的支持和扶植,可通过联合协作的方式形成若干研究中心,或建立必要的国家重点实验室及部门开放实验室。

3. 国家对等离子体物理学学科的支持,宜采取多渠道和交叉支持的方式,工程技术性应用研究,如耗资较大的聚变研究及空间观察手段的建立等,由国家高技术发展计划予以专门支持,低温等离子体应用研究则主要从有关产业部门取得支持,国家自然科学基金委应着重支持等离子体基础研究。

4. 等离子体研究后继力量的培养,应鼓励在大

学物理系开设等离子体物理的选修课,对已有的大学等离子体物理专业,应予加强,而不是削弱和取消。

5. 加强国际交流活动,参予国际竞争与合作。国家应拨出一定款项,组织和支持我国科学家参加国际等离子体学术交流。

6. 国家自然科学基金委员会应选择下列学科发展前沿作为优先资助领域:

(1)磁约束等离子体近点火区物理的理论研究(如 α 粒子物理)和边界等离子体物理研究;

(2)激光与高密高温等离子体相互作用基本物理的研究;

(3)等离子体非线性过程,特别是等离子体湍流及反常输运的研究;

(4)相对论性等离子体物理研究;

(5)低温等离子体中的物理、化学过程及其与表面相互作用机理的研究;

(6)非中性等离子体物理(包括强耦合等离子体)的实验和理论研究;

(7)空间和天体等离子体的磁场重联和粒子加速机制的研究;

(8)等离子体物理与化学、材料科学、信息科学以及生命科学交叉项目的研究。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第6页)

题。

第一,目前已经公布的改革方案,还存在某些争议或漏洞。例如,企业所得税按“隶属关系”上交、三资企业的外汇收入可以不结汇等规定都值得进一步的研究。

第二,今年出台的财税体制和金融体制改革与其他方面的改革,如建立现代企业制度、建立社会保障体系等关系密切,必须组织好各方面改革的协调,加强薄弱环节的配套改革,避免发生脱节现象,牵制改革的全面推进。

第三,宏观经济的稳定是保证各项重大改革措施顺利实施的前提。目前我国面临较大的通货膨胀压力,必须保持适当的宏观调控力度,改善调控方法,力争把通货膨胀率控制在居民能够承受的范围内。同时,要注意缓解在利益格局调整过程中可能出现的失业增加等社会矛盾,保持社会稳定。

1979年以来我国经济经常由于过度和通货膨胀而导致波动。这种波动将随改革的推进而有所减少。如果前面提出的诸项改革能够顺利推行,使市场力量更充分地发挥作用,则在90年代保持10%左右甚至更高的增长率是完全可以做到的。

(责任编辑 蔡 今)

(上接第54页)

一级还是二级干线,其科研和应用发展的重点应放在常规的强度调制直接检波(IMDD)技术、光同步数字体系(SDH)与数字交叉连接(DXC)技术的发展和应用上。

对于掺铒光纤放大器(EDFA)和密集型波分复用(DWDM)技术要积极开发,尽快实用化。

从本地用户光缆网来看,现阶段应重点发展用户光纤环路(FITL)和与有线电视(CATV)有关的技术,并积极开展对异步转移模式(ATM)的本地用户光纤通信系统的研究。

从海底光缆网看,它是将来组成我国沿海光缆网络和全球光缆网的必要技术,对海底光缆通信技术开展研究将对我国的光电集成电路技术、光放大和波分复用技术、光孤子通信技术的发展起重要的促进作用。

国际通信技术正处于更新换代,蓬勃发展的时期。美国的“信息高速公路”和日本的“新世纪通信网”都是以光纤通信网为基础加以发展的。到2000年,我国交换机的总容量将超过1亿门,光纤通信在我国的发展将进入一个新的纪元。我们应该结合国情,把握住发展方向,缩小与国际水平的差距,建成四通八达,并具有巨大社会和经济效益的现代化先进通信网。

(责任编辑 孙立明)