

# 中国工程物理研究院的核物理、核技术及相关学科的研究

于敏 胡仁宇 杜祥琬 江文勉 郑绍唐 力光伦

(中国工程物理研究院 成都 610003)

**摘要** 本文概要地介绍中国工程物理研究院的核物理、核技术及相关学科的研究与发展,内容包括九个方面:脉冲核反应体系的诊断学;中子学(微观与积分中子核数据、粒子输运);高离化态原子物理学;激光惯性约束核聚变与高温高密度等离子体物理;X射线激光;加速器物理与技术(含自由电子激光与微波研究);核电子学;核军备控制物理学及核技术应用等。

**关键词** 核物理, 核技术, 中国工程物理研究院.

中国工程物理研究院(CAEP)是一个多学科的科学技术综合研究机构,包括十余个研究所和一个研究生部.三十多年来,在党中央、国务院的亲切关怀和全国各兄弟单位与部门的大力协同、支持下,为执行我国的核计划、发展我国尖端科学技术事业进行了大量研究,取得了一系列具有我国特色的成果.这些成果是集体智慧的结晶,它凝结了杰出的老一辈科学家的心血,也浸透了一批中青年科技工作者辛勤劳动的汗水.

核物理、核技术及其相关学科是我院的重点学科领域之一,是一个具有明确应用背景和需求牵引的应用基础学科.主要研究内容有:脉冲核反应体系的诊断学、中子学、高离化态原子物理学、激光惯性约束核聚变与高温高密度等离子体物理、X射线激光、加速器物理与技术、核电子学、核军备控制物理学以及核技术应用等.其中,有关实验物理工作主要在核物理与化学研究所,核电子学与核技术应用主要在应用电子学研究所,而流体物理所与位于上海的激光等离子体物理所也有一部分有关工作,理论和数值模拟的工作集中在北京应用物理与计算数学研究所.

## 1 脉冲核反应体系的诊断学

在脉冲的核裂变与核聚变系统中,核反应是和爆轰、高温高压流体运动、辐射及粒子输运等相互伴随的,全部过程在极短的时间内完成,这个“极短”的过程又常常包含几个

性质不同的发展阶段.了解这一反应的全过程,掌握其中多种因素的内在联系与变化规律,是十分重要和有趣的.脉冲核反应体系的外部可观测量携带有内部反应情况的信息,但这些信息常常不能简单地给出关于内部反应情况的判断,需要通过诊断理论的研究去建立它们之间的联系.诊断理论的研究告诉我们:测哪些外部的可观量,能判断或推算出哪些内部的特征量,怎样进行这样的推算和判断,均需有一套完整的原理和方法.为此,发展了整套我国自己的诊断原理和方法学.发展了瞬态脉冲辐射诊断测量技术.三十年来,发展了一系列测量瞬态脉冲中子、 $\gamma$ 与X射线的能谱、时间谱、时间能量二维谱及相关特征量的测量方法,可以在电磁干扰及高本底混合辐射场中提取有用的信息.还发展了高精度的同位素分析与核化学分析方法.这些测量与分析手段与诊断理论相结合,可给出反应体系鉴别发展阶段的特征物理量、体系的空间变化图像、温度分布及高温高密度等离电子体中的非平衡与非线性过程等.

为满足测量方法的要求,研究与发展了各类适用的核辐射探测器.如电流型核辐射探测器输出线性电流大、时间响应快和探测灵敏度配套.根据不同要求研制的探测器种类有:Si-PIN 二极管探测器、Au-Si 和 Al-Si 面垒型探测器、GaAs:Cr 光导探测器以及 InP:Fe 光导探测器等.此外,还研究掌握了信号的长距离传输与变换技术,如模拟信号

的长距离电缆与光纤传输技术,模拟信号转换为数字信号的传输技术以及时间信号的关联技术等.

## 2 中子学

中子学(微观与积分中子核数据、中子与 $\gamma$ 输运等)的精度对核工程的设计与分析具有重要意义.首先是要提高中子核数据的精度,作为中国核数据中心的发起与支柱单位之一,我们分析了使用中的核数据存在的问题和改进方向,促进各协作单位不断提高了各种中子核截面、双微分截面及散射角分布的质量,同时也不断完善了裂变产物产额、轻核聚变截面、核结构与衰变数据以及带电粒子核反应截面等.在微观核数据的基础上,制作并不断改进了多群参数,发展了全套群参数制作、检验、调整及敏感度计算软件,通过中子积分实验的检验分析,评估并不断提高了群参数的精度.

在粒子输运方面,主要研究中子、 $\gamma$ 光子与各种带电粒子在介质中输运的数学描述与物理规律,输运方程的各种解法及其在核工程、核科学技术等方面的应用.中子与 $\gamma$ 光子的输运理论不仅在核反应堆、聚变裂变混合堆及其它核工程设计中有重要的应用,近年又在核测井以及用中子方法检查隐藏爆炸物的研究中有新的开拓.在一些核工程问题及惯性约束聚变研究中还涉及电子、 $\alpha$ 粒子等带电粒子的输运问题,受控聚变研究中也关心一些轻离子的输运问题,这就是我们对带电粒子输运也感兴趣的原因.相应地发展一整套适应多种应用研究的粒子输运软件系统.

开展了系统的临界、次临界参数研究与中子学积分实验.高浓铀、钚金属材料的加工、使用、贮存与运输中确保临界安全的重要性是显见的.三十多年中先后建造了若干单体次临界装置,多体次临界装置与临界装置及快中子脉冲堆.这些由高浓铀、钚金属构成的活性区还具有灵活配置的特点,适于多种

实验的要求.在这些装置上取得了数百个临界安全参数,提供了大量的临界安全判据,也为裂变谱段的中子群参数提供了积分检验.在快中子脉冲堆上正在开展核辐照效应及堆泵浦气体激光研究.

在加速器上开展了聚变中子学积分实验,先后完成了造氚率、裂变率、造钚率、穿透率及泄漏中子能谱等基准实验与工程模拟实验.1987年起,参与国家 863 高技术的聚变裂变混合堆包层中子学研究活动,开展 Be 和 Pb 的 14MeV 中子倍增率实验研究,其中 Be 的实验为中、美、日、俄国际合作项目. Be、Pb 中子倍增率实验已被 IAEA 采纳为基准实验.在中美关于核聚变合作的 17 个项目中,承担了“关于 ITER 和美国能源部建议的聚变堆包层及屏蔽系统的中子学积分实验”.

## 3 高剥离态原子物理学

该领域研究的应用背景是热动平衡及非热动平衡的高温稠密等离子体系统辐射与电子输运过程的研究、惯性约束聚变及 X 光激光的研究.理论原子物理关心的问题包括非相对论性与相对论性原子的结构理论、多荷电离子光谱学、电子离子碰撞、光子离子碰撞、谱线结构及双电子复合理论等.应用中除需要的原子结构与各种碰撞截面数据外,往往还需要辐射平均自由程、电子热传导系数及各种过程的速率系数,因此,还要花大力气加工制作这些参数.

实验研究了高离化态原子谱学.利用 0.3 TW 高功率钕玻璃激光器,多个不同晶格常数的平晶摄谱仪与光栅谱仪观察了铁周期元素钛、铁、镍、铜、锌和锆及四个高 Z 元素铪、钽、钨与铼的高离化态原子发射谱,侧重于类氦和类镍谱,以及附近几个电离级离子线跃迁和带结构.分别用组态相互作用 Hartree-Fock 方法和多组态 Dirac-Fock 方法分析辨认发射谱中的线跃迁,来分辨跃迁组理论模型处理发射谱中的带结构,波长的实验误差,

平晶谱仪为 $\pm 0.002 \sim 0.01 \text{ \AA}$ ,光栅谱仪为 $\pm 0.05 \text{ \AA}$ . 辨认归类了从类钠至类氦离子数百条跃迁线. 对于四个高 $Z$ 元素,理论计算与实验测量比较表明用未分辨跃迁组理论模型能很好地解释发射谱的带结构. 实验还观察到有利于复杂谱辨认,并可用于高 $Z$ 元素激光等离子体诊断的带结构特征量.

由于离子有不同离化度,各种离化度的离子又有千变万化的组态,因此,原子数据的数量十分浩繁. 这就决定了国内与国际合作研究的重要性与建立数据库的必要性. 从1987年起就有10个单位自愿成立了以北京应用物理与计算数学研究所为首的“中国原子分子数据研究联合体”(CRAAMD). 国际上,CRAAMD是维也纳国际原子能机构原子分数据网络成员之一,我们还与国际上主要的几个原子分子数据研制单位建立了经常的联系,出版不定期的简讯与Bulletin. 各类数据的存取、管理靠计算机完成,我们已初步建立了一个小规模的原子分子数据库.

原子物理的研究得到了国家863计划和自然科学基金的支持. 一个新的与原子物理相关的研究方向是强场物理. 激光技术的发展、高亮度源的建立,开拓了强场物理的新领域. 由于辐射场与原子库仑场强接近或远远超过,原子和强辐射之间的能量耦合将会出现复杂的非线性过程,原来在原子物理中通用的微扰多光子过程已不能解释这些新的物理现象. 这些现象又是在等离子体背景下发生的,它与等离子体背景耦合形成了现象的复杂与多样性. 作为物理学基础研究和具有应用前景的课题,其前景是很吸引人的.

#### 4 激光惯性约束聚变与高温高密度等离子体物理

70年代末,在王淦昌教授等著名科学家倡导下,我院即着手于激光聚变研究实验室的筹建. 经过近二十年的努力,在器件的诊断、理论实验和制靶诸方面均取得显著进展.

根据我院研究的需要,在中科院上光所

的参与下,于80年代先后研制成功了LF-11和LF-12两台激光器. 经改进提高,LF-11已成为我国目前唯一的高功率倍频激光器. 而LF-12升级后(称神光Ⅰ),将于1997年拥有 $\geq 2\text{TW}$ 、 $3\omega$ 打靶能力. 为了对激光聚变的辐射场和高温高密度等离子体进行诊断,发展了高时空分辨与高能谱分辨、单次脉冲、快速计录和具有抗干扰能力的数十种百余道诊断仪器,并建立了一些标定源. 激光靶制备微工艺、靶材研制、高压充氙技术及靶参数测量技术也同步得到了发展. 可以制备充高压氙的玻壳靶丸、高分子材料靶丸,进行各种涂层,以及体现不同物理思想的精巧的黑腔靶丸组合体及台阶靶等.

利用激光聚变与核武器物理过程的类似性,发展了激光聚变的理论研究和数值模拟软件;利用计算机对激光吸收、X射线转换、辐射输运等黑洞物理和内爆动力学过程进行模拟、预言和优化实验,对实验进行系统分析,加深对物理规律的认识. 多年来,在LF-11上进行了大量的平面靶实验和黑洞靶的分解实验,得到了一些规律性的认识. 1986年后,在LF-12上进行了黑洞物理实验和直接与间接驱动中子实验,均取得了可喜的成果,还进行了千万大气压下状态方程的实验研究. 今后,利用神光Ⅰ和计划中的神光Ⅱ将进行更为精密的物理工作. 惯性约束聚变在863计划立项后,更进一步加强了该院这方面的工作与国内各兄弟单位的协作.

#### 5 X射线激光研究

在国家863计划的支持下,我院X射线激光的研究取得了进展. 1988年底,获得了光电离俄歇效应泵浦Xe的108.9nm波长激光输出,这是我国首次获得真空紫外波段的激光输出. 1989年观察到三体复合机制类锂铝软X光激光增益现象,同年又获得电子碰撞激发类氦锗X光激光增益,从而使我国在该领域进入世界先进行列. 1990年,实现了类

氦镭激光双程放大. 在理论与实验的密切配合下, 巧妙构思实现了双靶对接、四靶串接和四靶串接并加反射镜的实验, 有效地克服了 X 光激光在靶等离子体中折射的影响, 获得了增益长度积  $GL = 17$  的激光输出, 达到深度饱和. 接着采用行波放大, 使 X 光激光的发散角减小到  $1\text{mrad}$ , 获得高亮度的类氦镭软 X 光激光输出. 1995 年, 在降低驱动源能量和克服 X 光激光多线干扰方面又取得新进展, 利用预脉冲主脉冲驱动模式, 获得了类氦镭的波长为  $32.6\text{nm}$  的激光单线和类氦镭的波长为  $21.2\text{nm}$  的  $0 \sim 1$  跃迁线. 这一连串的进展引起了国内外同行的注目.

## 6 加速器物理与技术

三十多年来, 出于不同的应用目的研制了多种类型的电子加速器, 最具代表性的设备是闪光-1 强流电子束直线加速器 (Marx 电压  $8\text{MV}$ , 束流  $100\text{kA}$ , 脉冲宽度约  $80\text{ns}$ ). 这台加速器已运行了十二年, 目前仍是亚洲最大的一台脉冲线电子加速器, 运用这些脉冲功率设备, 成功地进行了高速瞬态过程的闪光照像、电磁脉冲 (EMP) 及内电磁脉冲 (IEMP) 的实验研究、电子元器件及电子系统的辐射效应模拟实验和抗辐射技术研究、核辐射探测器件的刻度等.

强流直线感应加速器是我院加速器技术的特色之一, 其代表性装置是  $10\text{MV LIA}$ , 其主要性能指标为: 电子束能  $10\text{MeV}$ , 束流  $> 2\text{kA}$ , 脉宽  $60\text{ns}$  (FWHM), 运行状态好, 是进行闪光照像的更有力设备, 在完成我院科研任务中发挥了重要的作用.

在利用加速器技术研究自由电子激光和微波方面, 也取得了成绩. 在输出高品质的电子束流的基础上, 相继实现了无引导场的 Raman 型 FEL, 基于感应型加速器的 FEL 放大器饱和增益实验, 达到亚洲领先水平. 基于射频加速器的远红外 FEL 理论和实验研究正在进行. 微波实验研究, 首先在闪光-1 加速器

上进行了虚阴极振荡产生微波的机制研究, 得到了较高的峰值功率输出.

## 7 核电子学

### 7.1 电子测量仪器

电子测量仪器研制的主要方向为单次高速瞬变信号的采集、传输、记录及处理的现场测量仪器和专用设备. 代表产品有 80 年代投产使用的以硅靶扫描转换管为基础的数字式高速波形记录系统 (BSC-100 硅靶示波器系统) 及近期研制成功的  $1000\text{MHz}$  微同道板示波器, 高精度大量程 32 路时间间隔测量仪. 作为国家暂行计量标准的精密时间间隔产生器和稳幅脉冲产生器等. 这些仪器目前仍代表着国内电子测量仪器的最高水平.

### 7.2 抗辐射电子学

抗辐射电子学是研究核辐射环境与电子学系统相互作用的效应、机制和防护技术的一门边缘科学, 也是随核武器技术同步发展的一门应用科学. 为了提高电子系统在核环境下的生存能力和减小易损性, 从 60 年代起开始对电子元器件和电子系统进行辐射效应和加固技术的研究, 获得大量元器件的中子、 $\gamma$  和 EMP (电磁脉冲) 损伤阈值数据, 编著了“半导体二极管、三极管辐射效应手册”, 主持制订了六项本专业的国家军用标准. 在实验研究中研制生产的模拟量光纤数据传输系统已在核研究和其它领域得到广泛应用, 建立了核 EMP 和电离辐射环境模拟设备, 可对造成电子系统损伤的因素进行实验室研究.

## 8 核军备控制的科学技术问题

在国际核军备控制的研究与讨论中有许多热点问题, 包括核政策、核不扩散问题. 全面禁核试核查技术, 核武器裁减核查技术和核材料处理技术研究等. 其中, 许多科学技术问题属于应用核物理的研究范围. 因此, 这一研究方向也是核物理学科研究的自然开拓. 这一研究工作的开展将为我国核政策的制定

与在国际核军控活动中应采取的对策的确定提供科学依据,因而日益受到有关各方面的重视.军备控制科学技术问题的研究还可为保证军控条约的实施提供技术保障,使军控条约可以在防止违约行为方面作更为充分的考虑.我院已建立了从事核军控科技问题研究的“科学与国家安全研究项目”(Program for science and National Security Studies),并发展了国内外的学术交流.

## 9 核技术应用

为了使科学技术面向经济建设,加速军用核技术向民用转移,我院在核技术应用方面也做了一些工作.

1)发挥专业优势,研制生产石油测井应用的“C/O”测井中子管发生器(包括中子管,电源及电子学部件),实现了该产品的国产化和在国内推广应用,并按“国家八五重点技改项目”的计划要求,完成了生产线的建设,扩大了生产能力.

2)开展就用于机场安全检查的“快中子探测炸药”技术方案的研究.此项目已列入公安部主持的“国家八五科技攻关计划”,正在按合同要求开展研究工作.

3)与工农业生产相结合,采用由中子管组成的中子活化分析系统开展探矿、无损在

线检测和生物辐照刺激光生长实用化研究.

4)利用辐射加工工艺,研制高质量、低成本、国产化的新型印染助剂:增稠剂.目前,已进入中试和小批量生产阶段.此外,还有高分子材料辐照交联、宝石改色着色、单晶硅掺杂和核孔膜等的开发与生产.

5)离子注入材料改性研究已取得实用成果,提高了金属、切削刀具的硬度和寿命.

6)开展将脉冲功率技术用于环境净化工程的研究.

7)在3MW反应堆及加速器上开展了中子活化分析、离子束分析技术和中子照像等应用研究.为环境调查、微量元素与疾病、材料学科、刑侦、地质成矿、标样研制及工业生产工艺改进提供服务.

8)同位素仪器仪表开发,如线轧钢薄板监测仪、感烟型离子火灾警器和同位素与标记化合物研制等.

根据形势发展的要求,今后将重点加强若干分支学科的应用核物理及相关领域的研究,如实验室内激光驱动核聚变的研究,X射线激光、自由电子激光及微波的理论和实验研究;高剥离态原子物理的研究、核军控科学技术的研究以及加速器与其它核技术的开发应用.努力在新的形势下,为国家科学技术和国民经济的发展作出新的贡献.

## Study on nuclear Physics, Nuclear Technology and Related Disciplines at CAEP

Yu Min Hu Renyu Du Xiangwan Jiang Wenmian Zheng Shaotang Li Guanglun  
(China academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

**Abstract** This paper briefly introduces the research and development of nuclear physics, nuclear technology and related disciplines at CAEP. It contains nine branches: diagnostics of pulsed nuclear reaction assembly, neutronics multi-charged atomic physics, laser fusion and plasma physics, X-ray laser, accelerator physics and technology, nuclear electronics, nuclear arms control physics and applications of nuclear technology.

**Key Words** nuclear physics, nuclear technology, China Academy of Engineering Physics (CAEP).