

# 四十载自主探索路

——中国科学院上海光学精密机械研究所激光惯性约束核聚变的探索历程

陈崇斌<sup>†</sup> 王乐天

(中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026)

**摘要** 在40多年激光惯性约束核聚变研究的发展历程中,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员始终坚持走自主探索的道路,依靠自己的技术和工业基础,建成了以“神光”系列为代表的大型综合性激光装置,取得了一系列国际水平的研究成果,推动了中国激光科学技术的快速发展。

**关键词** 历史,激光约束核聚变,中国科学院上海光学精密机械研究所

## Forty years of inertial confinement fusion research in the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

CHEN Chong-Bin<sup>†</sup> WANG Le-Tian

(Department of History of Science & Technology and Archaeometry,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** On the basis of China's own technology and industry, the “Shenguang” inertial confinement fusion (ICF) research devices were built, and a series of world-class results achieved. In this paper, the history of ICF research in the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics is reviewed.

**Keywords** history, inertial-confinement fusion (ICF), Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics

激光惯性约束核聚变(ICF)是激光科学和核科学交叉衍生的科学前沿领域,自诞生以来一直受到许多发达国家的重视,成为国际科学研究的一个热点。1965年,在著名核物理学家王淦昌的倡议下,中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称“上海光机所”)邓锡铭领导开始了这一领域的实验探索,从那时起,他们的这项研究几十年来从未间断,完全依靠自己多年积累的技术基础,在上世纪80年代、90年代相继研制了“神光I”和“神光II”大型激光综合装置,在激光约束核聚变(inertial-confinement fusion,缩写为ICF)领域取得了一系列国际水平的研究成果。在建造一系列激光装置的过程中,研究人员坚持应用中国自主制造的器件,促进了中国的激光各单元技术水平的提高,推动了中国激光科学技术的快速发展。目前,对于这项很具影响的研究工作,科学史界尚未有人进行专门的研究。本文主要依

据王淦昌<sup>1)</sup>、邓锡铭<sup>2)</sup>、范滇元<sup>3)</sup>等科学家的回顾、总结等文献资料,对中国ICF研究的历史进行初步的总结,以期弥补这方面研究之不足。

2010-03-05 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人。Email:ccb@mail.ustc.edu.cn

- 1) 王淦昌(1907—1998),江苏省常熟人。1930年毕业于清华大学物理系,1930—1933年留学德国,获哲学博士学位。中国实验原子核物理、宇宙射线及基本粒子研究的主要奠基人,热核聚变研究的开拓者和奠基人,中国科学院院士。曾任核工业部副部长。1999年被国家追授“两弹一星”功勋奖章。
- 2) 邓锡铭(1930—1997),广东东莞人。1952年毕业于北京大学物理系。中国科学院上海光学精密机械研究所研究员、中国科学院院士。上海光机所建所时任副所长,后任高功率激光物理国家实验室主任。
- 3) 范滇元(1939—),江苏常熟人。1962年毕业于北京大学物理系。中国科学院上海光学精密机械研究所研究员、1995年当选为中国工程院院士。长期从事“神光”系列高功率激光研究。

## 1 上海光机所 ICF 研究的探索历程

1991年,一直从事 ICF 研究的邓锡铭和范滇元在《高功率激光与“神光”装置》一文中提出,上海光机所 ICF 研究的探索历程大致分为 4 个阶段:初创阶段、打出中子的突破阶段、建成六路激光装置并实现向心压缩的成长阶段、“神光”装置建成并运行的重大发展阶段<sup>[1]</sup>。笔者认为,这个分期在今天仍然是适用的,所以本文基本按照这个分期来阐述上海光机所 ICF 研究的发展历程。

### 1.1 初创阶段

1965年,上海光机所接受了中国科学院下达的激光聚变研究任务,因此激光物理学界将这一年看作中国 ICF 研究的开始。其实,在此之前的 1964年,王淦昌独立提出了激光聚变物理思想,由此导致了我国 ICF 研究工作的开展,因此,中国 ICF 研究的初创阶段是 1964—1972年。这一阶段,在王淦昌的指导下,上海光机所的研究人员进行了最初的实验探索。

#### 1.1.1 ICF 物理思想的提出

目前国际上通常采取两种驱动方式来探索实现激光惯性约束聚变的可能性。一种是直接驱动:采用多束激光球对称辐照氘氚燃料制成的靶丸,激光能量在靶丸的临界密度面附近被吸收,靶丸周围形成稀薄的高温等离子体冕区;冕区吸收的热能向内传导到尚未加热的靶丸表面,引起靶面物质迅速消融并对外猛烈喷射;喷射物质的反冲作用产生向心的球形冲击波,压缩未被消融掉的剩余靶丸物质,这样靶丸达到了数亿度的高温和极高的密度状态而发生聚变反应;聚变反应在释放能量的同时产生大量的高能粒子,部分高能粒子会与周围的高温高密度燃料碰撞,满足一定的条件就能发生链式反应,从而实现激光“点火”的目的,释放出巨大能量。另一种是间接驱动,氘氚靶丸是被放在一个高 Z 材料(例如金箔)制成的圆柱形腔体中,激光束通过圆柱两端的小孔,直接照射腔体内侧壁的高 Z 材料而产生强 X 射线辐射,依靠这种强 X 射线来加热氘氚靶丸,以实现聚变反应。间接驱动可以明显改善辐照靶丸的均匀性,有利于实现高倍对称压缩,降低对原始入射激光的技术要求,因而科学家们非常关注这种驱动方式。

国际上最早公开提出激光聚变思想的是前苏联科学家巴索夫(N. G. Basov, 1922—2001)。1963年2月,在第三届国际量子电子学会议上,巴索夫提出,

用高功率脉冲激光照射聚核燃料靶来产生高温高密度的等离子体,能够达到点燃热核反应的条件,从而实现人工核聚变反应<sup>[2]</sup>。1964年,巴索夫和美国科学家道森(J. M. Dawson, 1930—2001)公开发表了激光加热等离子体的论文<sup>[3]</sup>。

在中国,著名核物理学家王淦昌于 1964 年独立提出了激光聚变的物理思想。当时王淦昌正在从事核武器的研制工作,当他了解到激光有单色性、相干性、方向性和高强度等特点后,经过深入思考,提出了用激光打击含氘物质产生中子的设想。1964年10月4日,王淦昌撰写了《利用大能量大功率的光激光器(即激光器)产生中子的建议》的开创性论文。文中写到:“我们认为,若能使这种光激光器与原子核物理结合起来,发展前途必相当大。其中比较简单易行的就是使光激光与含氘的物质发生作用,使之产生中子……至于利用这种核作用的方法,是否有进行一种新型的可控制热核反应的可能性,暂不在此讨论”<sup>[4]</sup>。1964年12月,王淦昌遇到上海光机所从事高功率激光研究的邓锡铭,就把自己的设想告诉了邓,并把这篇论文交给了他,以指导他们开展这项研究工作。这样,在王淦昌的倡导下,中国激光约束聚变领域的初期预研工作就起步了。当时,由于保密原因,研究人员并不了解外国科学家在该领域做的一些工作,若干年后他们才知道,美国和前苏联的科学家也在这段时间里提出类似的设想。鉴于王淦昌的激光聚变的物理思想是独立于美苏科学家的激光打靶理论提出的,并且他还亲自组织开展了这项研究,学术界都把他看作世界激光惯性约束聚变研究的奠基人之一<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 实验探索

开展 ICF 研究最基本的工作是研制高功率激光器。1961年,中国第一台红宝石激光器在中国科学院长春光学精密机械研究所(以下简称“长春光机所”)诞生后,邓锡铭于 1962 年即独立提出用调 Q 技术提高激光器的输出功率。1963年,长春光机所的研究人员采用转镜 Q 开关,实现了国内第一台高功率红宝石激光器的激光输出,脉冲功率达到  $7 \times 10^6$  W。1964年,长春光机所的激光研究人员和中国科学院电子学研究所的固体激光研究人员迁往上海,成立上海光机所。1964年12月,在北京召开的第三届全国人民代表大会期间,王淦昌向邓锡铭提出了利用激光进行核聚变研究的建议。邓锡铭欣然接受了这个建议,认为“这是实现激光应用的一条重要路子”。1964年年底,邓锡铭把王淦昌的实验设

想向时任中国科学院副院长、党组书记的张劲夫作了汇报,立即得到他的赞赏和支持.1965年5月,中国科学院向上海光机所布置了开展ICF研究的任务,时称71#任务<sup>[6]</sup>.

上海光机所当时的重点是研制大能量、大功率激光器(学术界也常称“高能量、大功率激光器”).1964年底,研究人员认为红宝石不适合作为高功率激光器的工作介质,决定改换钽玻璃作为工作物质进行高功率激光器的研制工作.这是一个非常重要的决策,国际上后来发展的激光核聚变装置也都采用了钽玻璃作为工作物质,所以那时的选择使中国的核聚变研究少走了许多弯路,技术也因经过长时间摸索而更加成熟.邓锡铭回忆当时作出决定的情形时,写到:“虽然当时国外一些研究评论认为,钽玻璃不适合大功率激光器的研制,但中国的研究人员经过分析认为,钽玻璃在中国的研究有基础,光学质量好,加工容易,利于扩大尺寸等.从1964年底决定放弃红宝石方案,改用钽玻璃工作物质作为我国的高功率激光器的发展方向”<sup>[7]</sup>.

1965年,上海光机所的研究人员建立了第一台钽玻璃四级行波放大装置,功率输出达到 $10^8$ W,激光束在空气中传播时,形成了空气电离的电火花串(见图1).研究人员利用这台激光器进行了最早的ICF实验探索并取得了进展.在激光打靶的实验中,研究人员第一次观察到从靶面发出的X射线穿过铝箔,使照相底片感光.“这在国际上属最早的实验成果之一”<sup>[8]</sup>.



图1 激光使空气电离形成电火花串

国际上,ICF理论成熟的标志是美国物理学家纳科尔斯(John Nuckolls)等人提出的向心聚爆理论<sup>[9]</sup>.该理论提出采用多束激光同时打靶的实验构想,受此理论影响,今天国际上大型激光装置都采用多束激光同时打靶的方式.实际上中国的研究人员也曾经提出过类

似的实验设想.1965年底,在北京的友谊宾馆,上海光机所的研究人员和王淦昌召开了一次小型的激光聚变座谈会.会上,针对大孔径打靶镜头设计和制作的困难,他们提出了采用12束和96束激光同步打靶的方案.1968年,上海光机所的研究人员还进行了最初的尝试,研制出了一台5束小型激光装置.虽然邓锡铭坦言他们不可能把多束激光同时打靶的实验构想发展到向心聚爆理论<sup>[10]</sup>,但这足以说明他们的一些物理思想还是非常有意义的.

其后,研究人员把工作方向转移到提高激光器的输出能量方面.他们逐步扩大高功率激光器的规模,工作孔径由直径40mm增大到180mm,输出能量由几J增大到1000J.但由于未能解决器件产生的超辐射、自振、超荧光、反向激光、因超负载而导致的工作物质损伤等技术问题,这样的激光器并不能用来进行打靶实验,所以这一阶段上海光机所的ICF的研究进展较慢.鉴于1968年前苏联科学家巴索夫就已经在激光打靶实验中观察到中子产生<sup>[11]</sup>,上海光机所的研究人员在1970年后开始注重靶点处功率密度的提高和输出激光光束质量的改善,开始激光打靶的实验尝试.

## 1.2 突破阶段

激光打靶能够打出中子的实验结果表明,激光能在极短的时间内将物质加热到热核聚变所需的高温,这在实验上论证了激光约束核聚变的可能性,所以,国际学术界通常把在激光打靶实验中打出中子作为ICF研究取得突破进展的标志.上海光机所取得这个突破进展的时间是在1973—1974年.

### 1.2.1 打出中子的实验

为了能尽快打出中子,上海光机所的研究人员采取了一系列的技术手段来改善激光器的性能.他们采取的主要技术手段包括:为了有效地控制输出激光的横模,把非稳谐振腔用于转镜式调Q振荡器,光束的发散角由原来的 $2 \times 10^{-3}$ 弧度减小到 $0.5 \times 10^{-3}$ 弧度,靶面的功率密度提高了一个数量级;用带孔反射膜板作为输出耦合器,消除了用法布里-珀罗腔的输出对放大器的正反馈效应;第一次使用了电光削波器,把 $60\text{m}\mu\text{s}$ 的振荡输出脉冲截取为 $4\text{m}\mu\text{s}$ 的脉冲(窄脉冲对激光打靶输出中子至关重要);增加了放大系统级间距离,有效地减少了超辐射及反向激光落在镜面上的总剂量(振荡器到靶面的距离为65m);特别是大幅度地改进了非球面聚焦透镜的光学质量和靶瞄准、调焦精度.通过一系列技术改进,1973年,他们建成了两台 $10^{10}$ W级的激

光装置,并在4月份进行了激光打靶实验,成功地从氘靶中打出了中子,中子产额达每次  $10^3$  个,实现了 ICF 研究的突破性进展。

上海光机所取得打出中子的突破性进展的时间比国外晚.最早打出中子的实验是在1968年,前苏联科学家巴索夫用微微秒级量级脉宽的钽玻璃激光照射 LiD 靶,观察到了少量的中子输出.此后,美国、法国、西德、日本、意大利等相继报道了发现中子的实验结果.1974年,KMS 聚变公司用两束近乎正交的激光照射含氘氦混合气体的玻璃球壳靶,获得了  $3 \times 10^5$  个的中子产额和 50—100 倍的体压缩<sup>[12]</sup>,这是上世纪 70 年代国际 ICF 研究的标志性成果.所以,中国取得的一次打出  $10^3$  个中子产额的实验结果在当时确实是一个非常了不起的成果,“标志着我国的 ICF 研究进入了世界先进国家的行列”<sup>[6]</sup>.

1974年,为了更充分地提取放大介质(钽玻璃)中的储能,提高总体效率,上海光机所的研究人员,采用多程放大构形的大口径片状放大器,研制出新型的大型单路激光系统,使激光输出功率又提高了一个量级,达到  $2 \times 10^{11}$  W,激光打靶实验的中子产额也提高了一个数量级,中子产额达到  $2 \times 10^4$  个.

### 1.2.2 中子信号的确认——“小毛刺”

在打出中子的实验中,上海光机所的研究人员遇到了判定中子信号的难题.中子探测器记录到的信号一直存在干扰,总在一个“大信号”波形的背景上叠加了几个“小毛刺”(见图 2).最初研究人员认为“大信号”是中子信号,“小毛刺”是干扰信号,但一直没有找到干扰源.王淦昌听到这个情况后,指派中子专家王世绩专程从四川到上海鉴别实验结果.王世绩察看了实验现场和有关资料后,认为“大信号”才是干扰信号,“小毛刺”倒具有中子信号的特征.在这一思想的指导下,研究人员经过反复的实验判断,终于找到了产生大信号的干扰来源——激光打靶时高温等离子体产生的电磁信号,从而确认“小毛刺”是真正的中子信号.原来,装置中夹持激光靶的部分是金属导体,当激光照射到靶上时,在产生高温高密度的等离子体的同时,还产生了强烈的电磁干扰,通过金属夹持结构传导到中子探测器,从而出现了一个大信号.后来研究人员采用塑料、玻璃纤维等绝缘材料来夹持靶,成功地消除了干扰信号,得到了清晰的中子信号(见图 3)<sup>[13,14]</sup>.

### 1.3 成长阶段

1975—1980年是上海光机所 ICF 研究的成长阶段.在这一阶段,上海光机所的研究人员研制出了

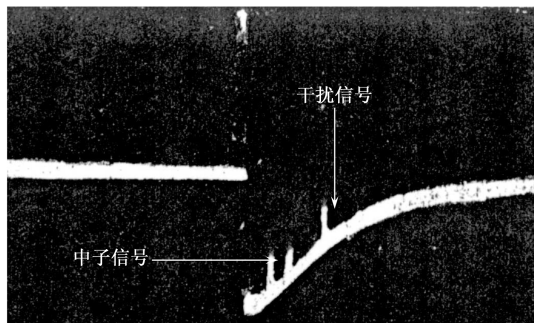


图 2 包含干扰信号的中子信号

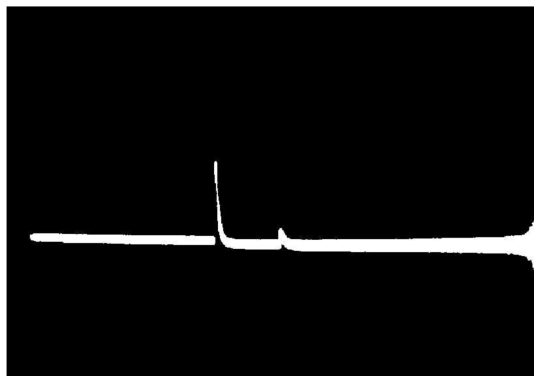


图 3 排除干扰后的中子信号

六路激光装置,并在该装置上完成了激光打靶的向心压缩实验。

#### 1.3.1 建造六路激光装置

为开展向心压缩聚爆研究,上海光机所从 1975 年开始建造六路激光装置.在建立六路激光装置的过程中,他们采取的主要技术方案包括:系统中全部采用硅酸盐 III 型钽玻璃作放大介质;采用五甲川可饱和和吸收染料和 50MHz 的声光调制器作为主动—被动调制,使锁模脉宽从 20ps 到 100ps 分段可调,光谱强度呈高斯形,脉宽为  $0.17 \text{ \AA}$ ;单脉冲选择器采用双普克尔斯盒电光开关,双普克尔斯盒开关的门脉冲宽度为 8ns,锁模脉冲序列中每相邻两个脉冲间隔为 10ns,保证了每次能稳定地选出单脉冲;为避免激光系统自激振荡和隔离靶面反射光,装置采用了一台直径为 60mm 的法拉第磁光隔离器,同时还在光路中设置了由透镜—针孔—透镜组成的低通真空空间滤波器来抑制小尺寸自聚焦。

装置的研制分为两个阶段,第一阶段目标是建立脉宽纳秒级、输出功率  $2.5 \times 10^{11}$  W/束的六束激光系统,并进行激光微球靶的基本打靶探索;第二阶段目标是建立亚纳秒脉宽、输出功率  $5 \times 10^{11}$ — $10 \times 10^{11}$  W/束的六束钽玻璃激光等离子体物理实验装置。

1975 年底,研究人员建成了第一台  $2 \times 10^{11}$  W 级的六路高功率钽玻璃系统.1979 年,研究人员又通过采用

锁模、空间滤波技术把这台装置改建成亚纳秒六路钷玻璃激光系统,并研制出十多种物理实验诊断装置,为我国激光等离子体物理实验奠定了物质基础。

### 1.3.2 压缩实验

按照纳科尔斯 1972 年公开的向心聚爆理论,多路强脉冲激光对聚变燃料靶球进行球对称辐照后,靶球被激光加热,外层形成的几千万摄氏度的高温等离子体向外迅速膨胀(即所谓“消融过程”),从而产生向内的反向冲力,形成聚心冲击波,压力可达  $10^{12}$  大气压,将靶球中心压缩到液氢密度的 1 万倍以上,温度达到几亿度,依靠向心压缩的惯性,靶芯在尚未来得及分散前发生聚变,完成热核反应。该理论认为,由于向心压缩使靶材料密度大幅度提高,可以大大降低 ICF 实验中输入脉冲激光的能量,只需几万焦耳的能量就能使聚变反应成为可能。所以,在 ICF 研究中,能够实现向心的向心压缩是一个标志性的实验进展。

1977 年,研究人员利用六路激光装置中的四路激光进行了薄壁玻壳微球靶的打靶实验,通过对玻壳球中心发光区的 X 射线针孔照相图像分析,体压缩达到了 30—50 倍,说明中国的激光等离子体研究已接近消融型压缩水平,“标志着我国的 ICF 进入了逐级论证向心聚爆原理的重要发展阶段”<sup>[15]</sup>。

## 1.4 发展阶段

1980 年以后,为适应 ICF 研究的发展需求,上海光机所依靠中国自己的技术力量和工业基础,建造了以“神光”系列装置为代表的大型综合性装置,在 ICF 领域取得了许多国际水平的研究成果。邓锡铭先生把这一阶段称为“重要发展阶段”。

### 1.4.1 “神光 I”装置的建造

虽然上海光机所 ICF 研究取得了较大进展,但由于工业基础和技术方面的差距,到了上世纪 70 年代末,他们已经比美国落后了很多,突出表现在大型高功率激光装置的研制方面。美国在 70 年代后期建成了功率  $10^{12}$  W 的 ARGUS 装置,1978 年建造了更大规模的 SHIVA 装置,1982 年开始建造更大功率的 NOVA 装置,中国 80 年代初才开始做大型激光装置的预研工作。

1980 年,为能赶上国际研究的步伐,上海光机所开始了大型综合性激光装置的预研工作。经过两年的技术论证和工程预研,1982 年,上海光机所和中国工程物理研究院开始合作研制中国的激光 12<sup>#</sup> 大型综合装置。研制期间,两个单位大力协作,国内众多单位支持,上海光机所更是投入近三分之一的科技力量和工厂加工主力,经过三年的艰苦工作,1985 年激光 12<sup>#</sup> 装置基

本建成。1986 年夏天,张爱萍将军为激光 12<sup>#</sup> 装置亲笔题词“神光”,于是,该装置被正式命名为“神光”,1994 年退役后被称为“神光 I”。

在研制“神光 I”的过程中,研究人员采取了三条关键性的技术路线。第一,确定以磷酸盐钷玻璃作为激光系统的工作物质,实践证明这一技术路线是正确的,这是装置先进的重要标志之一。当时,磷酸盐钷玻璃作为激光系统的工作物质在国际上尚无成功先例,采取这个技术路线反映出研究人员的不凡胆识,后来该技术路线成为国际上大装置的主流路线。第二,光束方面,摒弃了小口径多光束(如前苏联的 216 路)的路线,选择了双束、大口径片放大器的基本路线。这个技术路线的选择也是十分重要的,国际上的大装置基本都是采用这条技术路线。第三,装置的建造主要依靠中国的元件、材料和技术基础,通过预研取得第一手数据,以此作为根据独立自主地进行总体方案计算和设计,体现了中国的自主创新意识。建成的“神光 I”装置的 99.5% 以上的元件、材料和组件是国产,总体调试一次成功。

“神光 I”装置建成并投入运行后,研究人员进行了多轮重要的物理实验,在 ICF 研究方面取得了具有国际先进水平的成果。研究人员利用“神光 I”装置直接驱动打靶,得到了  $4.5 \times 10^6$  个中子产额的实验结果,间接驱动打靶也有  $1 \times 10^5$  个的中子产额,冲击波压强达 0.8TPa(1TPa =  $1 \times 10^{12}$  Pa)。

“神光 I”装置的技术指标与美国 70 年代末的 AGRUS 装置的基本相当,与当时美国的 NOVA 装置尚有差距,但装置有中国自己的特色,并有若干独创性研究成果的运用,是国际少数几个水平相当先进的装置之一。对“神光 I”的技术水平,王大珩先生是这样评价的:“尽管国外激光输出功率还有比这大一个半数量级的,但这个装置世界上还是数得上的,……我们的工作有特色,在较小的装置上也能做出人家大装置的工作”<sup>[16]</sup>。

事实上,“神光 I”研制成功的意义并不仅仅在于它的技术指标有多先进,成果多么突出,重要的还在于,它表明中国有能力像少数发达国家那样研制出这种大型综合装置,这对 ICF 研究的进一步深入至关重要。所以“神光 I”的研制成功在中国 ICF 发展历史上具有非常重要的地位:“既是 1965 年以来 15 年工作基础的集大成者,又使我国高功率激光综合技术跃上了新的台阶,同时锻炼培养了一支骨干队伍,为以后的发展打下坚实的基础。建造这一大型科学工程的经验教训更是一笔宝贵的财富”<sup>[17]</sup>。

#### 1.4.2 神光Ⅱ装置以及中国 ICF 研究格局的形成

90 年代初, ICF 研究及相关技术对神光装置提出了更高更新的需求,“神光Ⅰ”不再能满足研究的需要,1994 年 5 月,中国科学院、中国工程物理研究院、国家高技术研究发展计划(863 计划)相关主题,向高功率激光物理联合实验室下达了研制“神光Ⅱ”装置的任务。“神光Ⅱ”装置于 1994 年 5 月 18 日立项,2001 建成。“神光Ⅱ”装置的规模比“神光Ⅰ”扩大了 4 倍,仅次于美国的 NOVA, OMEGA, 日本的 Gekko-Ⅻ, 总体技术水平达到国际先进水平。

利用“神光Ⅱ”装置,研究人员开展了多轮物理实验,在 ICF 方面取得了重要进展,直接驱动打靶实验,获得单发  $4 \times 10^9$  个中子,是国际同类装置获中子产额的最好水平。截至 2005 年底,“神光Ⅱ”装置已经累计提供了有效运行打靶 2200 多发次,平均成功率高达 77.62%。“神光Ⅱ”装置的建成,为我国 ICF 研究提供了可靠的实验平台,标志着我国 ICF 研究实验已经跃上了一个短波长、大功率激光打靶的新阶段<sup>[18]</sup>。

在“神光”系列大型激光装置研究的推动下,国内其他一些研究单位也纷纷开展这项研究,一批新系列的激光聚变装置应运而生,如中国工程物理研究院的规模稍小的“星光”系列装置,中国原子能科学研究所的“天光”系列氟化氘准分子激光器装置,中国科学院物理研究所的“极光”装置等,一个配套、互补的 ICF 研究格局在国内逐步形成,促进了中国 ICF 研究的健康发展。其中,“神光”系列主要进行大型总体实验;规模较小的“星光”装置用于分解实验和各类靶物理探测诊断设备的考核标定,同时开展若干激光新技术的预先研究,如在国内首先研制成功并达到国际先进水平的三倍频技术等;“天光”装置则作为下一代候选驱动器作好先导性判断研究<sup>[19]</sup>;“极光”装置用于高能量密度物理的实验研究。

## 2 促进上海光机所 ICF 研究发展的原因

大型综合性激光装置是一个国家科研能力的综合反映。“神光”系列装置的研制成功标志着中国的 ICF 研究进入了先进国家的行列,成为“我国跟踪世界高技术领域的一个范例”。回顾上海光机所 ICF 研究的探索历程,它的快速发展离不开以下几个方面原因。

### 2.1 王淦昌的创新科学思想和积极倡导

国际学术界通常把王淦昌看作是粒子物理学的专家,因为他早年在粒子物理方面做出了许多世界一流的成果——40 年代的中微子的实验方案、50 年代的宇宙射线研究和发现反西格马超子。但王淦昌本人认为“一生最满意的工作”却非粒子物理学方面的成就,而是他提出了 ICF 的物理思想。之所以如此,是因为 ICF 研究在解决能源问题方面具有重要意义。除此之外,一个重要的原因是王淦昌晚年的科研活动基本集中在 ICF 领域。

1964 年 10 月,王淦昌提出 ICF 的物理思想,1965 年,上海光机所的研究人员就在王淦昌的倡议下开始了 ICF 研究的实验探索,年底,研究人员就取得用激光打靶发出的 X 射线穿过铝箔使照片底片感光的实验成果,这时英国、法国、日本、联邦德国等一些发达国家还没有开始着手这方面的研究,能先于这些发达国家开展 ICF 的研究工作,主要得益于王淦昌先生独立提出了 ICF 的物理思想。较早的起步为中国 ICF 研究的打下了坚实的基础。

70 年代末,王淦昌从我国核武器的研制工作退下来后,开始从事 ICF 的研究工作,很快就发现了中国 ICF 研究存在的问题。当时二机部九院(中国工程物理研究院)和上海光机所都在从事 ICF 的研究。二机部九院主要从事等离子体物理理论研究和诊断、测试工作,上海光机所主要从事激光的实验研究。虽然两个单位都做了许多工作,但由于 ICF 涉及两个领域——等离子体领域和激光领域,二机部九院的研究缺少实验支持,而上海光机所缺少理论指导,两个单位的研究都存在不足。因此,王淦昌建议两个单位联合起来做 ICF 的研究工作,建议得到了有关主管部门的支持。中国科学院管理部门的有些人员曾担心与二机部九院的一纸协议是“卖身契”,王淦昌就借用“瞎子背拐子”的民间故事来向他们说明两个单位联合的好处,强调“合则成,分则败”,解决了大家思想上的顾虑。1977 年 10 月,王淦昌以二机部九院副院长的身份,带领一些九院从事等离子体物理理论和实验研究的科技人员来到上海光机所,商谈合作研究 ICF 的问题,经过广泛讨论,两个单位达成了许多共识,之后又进一步建立了高功率激光联合实验室。事实证明,两个单位的联合对中国的 ICF 研究起到了积极推动作用,邓锡铭、范滇元在总结神光工程的建设经验时这样写到:

“最重要、最有深远意义的是在神光装置上开始了与中国工程物理研究院的长期合作。这种合作不

只是技术和财力上的一般支持,而是从思想上破除了凡事都要以我为主包打天下的旧观念,确立了工程装置只有全心全意为使用服务才会长盛不衰的辩证关系;在组织管理上从研制阶段的协调小组发展到装置建成后的联合实验室,打破了部门所有制,两支队伍实质性地汇合在一起.近二十年的实践已经证明这是正确的、有生命力的,是神光装置能够如期建成、正常运行和物理成果迭出的根本保证.……导致高功率激光工程持续发展的大好局面”<sup>[17]</sup>.

80年代,王淦昌在中国原子能科学研究院领导了KrF准分子激光的研究工作,建成了用于ICF实验探索的“天光”装置.90年代,在他和王大珩、邓锡铭等人的努力下,ICF研究成为国家863计划的一个主题.

从上面的事实可以看出,王淦昌提出的ICF创新物理思想以及他在推动中国ICF研究方面所做出的努力,对中国ICF研究产生的影响是巨大的,所以,国内学术界公认他是中国ICF研究的奠基人.

## 2.2 研究人员的自主探索与创新精神

从60年代开始研究高功率激光装置,到“神光”装置的研制成功,这一系列的进展都是建立在中国自主探索的基础上,通过自主的技术改进和技术创新,主要依靠中国自己的工业基础完成的.自主进行的科学实践活动是技术进步和技术创新的源泉,这在“神光”装置的研制过程中得到了充分体现.

在“神光I”研制之前,上海光机所的六路激光装置的一系列实验表明,输出激光因工作介质硅酸盐Ⅲ型钕玻璃的折射率的非线性变化出现了亮度明显下降的现象,因此,研究人员提出要选取新的低非线性折射率、高增益材料——磷酸盐钕玻璃作为工作介质<sup>[20]</sup>,在国际上尚无成功先例的情况下,就决策将这个技术路线应用到“神光I”装置上.

“神光I”装置采用国产元器件的建造要求,迫使研制人员尽最大努力来提高国产器件的质量,客观上大大促进了我国激光单元技术的快速进步.同时,由于个别单元技术短时间无法取得突破,不能迅速达到国际水平,迫使研究人员进行思考,催生了许多独创性技术成果和方法.例如,为了保证光束质量,国外同类装置要求大口径光学元件表面的平度达 $1/20$ 波长,但中国当时的光学加工能力很难达到这样的要求.在这种情况下,研究人员创造性地提出了补偿方法来解决光学加工上的困难,继而又将自适应光学技术引入高功率激光系统.事实证明,补偿方法非常适合中国光学加工能力与国际水平尚有一定差距的国情,成为中国自主

创造的有效手段.“神光I”装置采用的透镜列阵的均匀靶面照明技术,也是中国人自己的独创性成果,被国际学术界称为“上海方法”或“LA”法<sup>[21]</sup>.据统计,“神光I”装置共有自适应光学波前校正系统、靶场均匀照明系统、产生均匀线状等离子体技术、靶瞄准定位监测三合一系统、脉冲激光波面“冻结”和测量技术、恒流充电系统等15项单元技术和特种工艺属国内首次采用,达到国际先进水平,一部分属国际首创.

在研制“神光II”装置过程中,研究人员也独立自主地解决了一系列技术难题,同样有15项单元新技术应用,在输出激光的通量、等效可聚焦功率密度和时空信噪比等方面达到了国际先进水平,许多技术指标超过日本Gekko-Ⅲ大型激光装置,并有关键技术指标接近当时世界上最先进的OMEGA装置.其中,“神光II”装置的光路调整系统采用“选好基准,以动制动”的新技术路线,采用有特色的CCD并行图像处理技术,用约30min时间即可实现全系统光路自动准直高精度调整,有效地提高了光路自动准直工作效率,而日本Gekko-Ⅲ需要2个多小时才能实现路自动准直调整过程.

在长期的自我探索中,研究人员还创造性地提出一些新的物理思想,例如,宽频带激光在ICF中的应用、“多靶串接”X射线激光新方案等等,这大大提升了中国在国际学术界的地位.

## 2.3 国家的支持

一项大的科学研究,无论是应用研究,还是基础研究,都需要国家给予足够的重视与支持,而ICF研究更加需要.

20世纪80年代前后,随着研究的深入,ICF实验研究需要更高功率的激光装置、配套的等离子体实验装置及诊断装置,其实验装置的建造逐步演变成一种涉及多个领域的大型科研工程.同时,一个装置只能满足研究的某一个特定阶段的要求,装置还需要不断地升级换代.这就导致了进行ICF研究所需的资金投入非常巨大.以美国为例,正在运行的OMEGA装置,从研究、设计到建造共花费了6100万美元;而刚刚在利弗莫尔劳伦斯国家实验室建成的“国家点火装置(NIF)”耗资更达35亿美元,这样大的投资没有国家的充分重视和支持是不可能完成的.

上海光机所的ICF研究一直受到国家的重视.中国科学院在1965年向上海光机所下达了开展ICF研究的任务,“文化大革命”运动也没有打断它的研究进程.“神光I”装置研制之时,国家和中国科学院处于调整之际,许多大项目和新建院所因经

济困难不得不纷纷下马.在这种情况下,“神光 I”装置投资达 2600 多万元(这在 80 年代初是相当大的一笔资金),虽然也曾几度面临下马或取消的困难境地,但最后得到了院长会议的批准,成为当时全院批准上马的仅有的两个项目之一.这些充分体现了国家对 ICF 研究的重视与支持.

1993 年,在王淦昌等人的推动下,国家高技术研究发展计划确立了惯性约束聚变主题,中国的 ICF 研究迅速进入更快的发展时期,投资更大的“神光 II”在这个时期开始开工建设.目前,“神光 III”原型已经建成,“神光 III”主机正在紧张进行工程建设.

### 3 结束语

经过四十多年的自主探索,上海光机所的 ICF 研究做出的重大贡献主要在两个方面.其一,“神光”系列大型激光装置的建成为 ICF 研究提供了实验平台,在多年探索中获得的成功经验和教训为中国今后的 ICF 研究打下了坚实基础.其二,在长期的探索过程中,研究人员自主建造一系列激光装置的技术实践,促进了钕玻璃、KDP 晶体、脉冲氙灯、镀膜、大型光学平面的加工等激光单元技术水平的提高,推动了中国激光科学技术向前发展.

除此之外,上海光机所 ICF 研究的成功经验还非常具有现实意义.他们很早就独立地自主开展 ICF 研究的事实表明,进行科学研究最重要的是要能提出独创性的科学思想,只有提出了独创性的科学思想,才有可能自己独立地开展相关科学研究,走出始终跟踪别人研究的窘境,做出国际水平的研究成果.研究人员在“神光”装置研制过程中产生的众多独创性技术成果和创新思想则表明,科学研究必须坚持自主探索的原则,只有通过自己的探索,才能找到适合自己的道路或方法,才能产生自己的独创性技术成果和创新的科学思想,才能实现真正意义上的自主创新.这两点对于今天的中国很具有现实意义.

**致谢** 在论文的写作过程中,上海光机所范滇元院士接受了作者的访谈,提供了珍贵的文献及图片资料,并对论文终稿的不准确或有误之处进行了订正,作者在此向范先生表示衷心的感谢!

### 参考文献

[1] 邓锡铭,范滇元. 国外激光, 1991(5):7 [Deng X M, Fan D Y. Guowaijiguang( Overseas Lasers), 1991(5):7 (in Chinese)]

- [2] Basov N G, Krokhin O N. In Proceeding of conference on quantum electronics, Paris, 1963
- [3] Dawson J M. Phys. Fluids, 1964, 7:981
- [4] 王淦昌. 中国激光, 1987, 14:641 [Wang G C. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14:641 (in Chinese)]
- [5] 胡仁宇. 物理, 2007, 35:346 [Hu R Y. Wuli (Physics), 2007, 35:346 (in Chinese)]
- [6] 上海光学精密机械研究所志(简本)内部资料, 2003 :9 [History of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (Simple Edition), 2003:9(in Chinese)]
- [7] 邓锡铭等. 兵器激光, 1982(3):1 [Deng X M *et al.* Bingqijiguang(Laser Technology), 1982(3):1(in Chinese)]
- [8] 王淦昌. 民主与科学, 1992(5):10 [Wang G C. Democracy & Science, 1992(5):10(in Chinese)]
- [9] Nuckolls J *et al.* Applications Nature, 1972, 239(9):139
- [10] 邓锡铭等. 兵器激光, 1982(2):1 [Deng X M *et al.* Bingqijiguang(Laser Technology), 1982(2):1(in Chinese)]
- [11] Basov N G *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 1968, QE-4(11):864
- [12] Campbell P M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34(2):74
- [13] 范滇元. 理论实践创新. 见卢嘉锡主编. 院士思维. 第 4 卷. 合肥:安徽教育出版社, 2001, 366 [Fan D Y. Theory Practice and Innovation. In: Lu J X. Thoughts of Academicians, Vol. 4. Hefei: Anhui Education Publishing House, 2001, 366(in Chinese)]
- [14] 王淦昌. 现代物理知识, 1993, 5(1):7 [Wang G C. Modern Physics, 1993, 5(1):7(in Chinese)]
- [15] 谭维翰. 中国激光, 1984, (11):641 [Tan W H. Chinese Journal of Lasers, 1984, (11):641(in Chinese)]
- [16] 王大珩. 国外激光, 1991, (5):1 [Wang D H, Guowaijiguang (Overseas Lasers), 1991, (5):1(in Chinese)]
- [17] 邓锡铭, 范滇元.“神光”装置的建造、应用和工程管理. 1997《科研工程》论文原稿 [Deng X M, Fan D Y. The Building, Exploiting and Project Management of “Shenguang” Facility. Keyangongcheng(Research Projects), 1997(Fan D Y’s Manuscript) (in Chinese)]
- [18] 朱健强. 自然杂志, 2006, (5):271 [Zhu J Q. Chinese Journal of Nature, 2006, (5):271(in Chinese)]
- [19] 范滇元, 张小民. 激光聚变驱动器的发展与展望. 宋建主编. 中国科学技术前沿(1999/2000). 北京:高等教育出版社, 2000, 361 [Fan D Y, Zhang X M. Development and Prospect of Laser Facility for ICF. In: Song J. Science and Technology at the Frontier in China, Beijing: Higher Education Publishing House, 2000, 361(in Chinese)]
- [20] 邓锡铭等. 光学学报, 1981, (4):289 [Deng X M *et al.* Acta Optica Sinica, 1981, (4):289(in Chinese)]
- [21] 邢新华. 邓锡铭与激光、激光核聚变. 卢嘉锡主编. 中国当代科技精华. 哈尔滨:黑龙江教育出版社, 1994, 102 [Xing X H. Deng X M’s activities in Laser and ICF Research. In: Lu J X. The Essence of Modern Science and Technology in China. Harbin: Heilongjiang Education Publishing House, 1994, 102 (in Chinese)]