

决策咨询系列



国家科学思想库

中国 科学家思想录

第四辑

中国科学院



科学出版社



国家科学思想库

中国 科学家思想录

第四辑

中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

中国科学家思想录·第四辑 / 中国科学院编. —北京: 科学出版社,
2013. 1

ISBN 978-7-03-036137-0

I. ①中… II. ①中… III. ①自然科学—学术思想—研究—中国
IV. ①N12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 293038 号

丛书策划: 胡升华 侯俊琳

责任编辑: 郭勇斌 卜 新 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 黄华斌

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 258 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

白春礼

中国科学院作为国家科学思想库,长期以来,组织广大院士开展战略研究和决策咨询,完成了一系列咨询报告和院士建议。这些报告和建议从科学家的视角,以科学严谨的方法,讨论了我国科学技术的发展方向、与国家经济社会发展相关联的重大科技问题和政策,以及若干社会公众广为关注的问题,为国家宏观决策提供了重要的科学依据和政策建议,受到党中央和国务院的高度重视。本套丛书按年度汇编1998年以来中国科学院学部完成的咨询报告和院士建议,旨在将这些思想成果服务于社会,科学地引导公众。

当今世界正在发生大变革大调整,新科技革命的曙光已经显现,我国经济社会发展也正处在重要的转型期,转变经济发展方式、实现科学发展越来越需要我国科技加快从跟踪为主向创新跨越转变。在这样一个关键时期,出思想尤为重要。中国科学院作为国家科学思想库,必须依靠自己的智慧和科学的思考,在把握我国科学的发展方向、选择战略性新兴产业的关键核心技术、突破资源瓶颈和生态环境约束、破解社会转型时期复杂社会矛盾、建立与世界更加和谐的关系等方面发挥更大作用。

思想解放是人类社会大变革的前奏。近代以来,文艺复兴和思想启蒙运动极大地解放了思想,引发了科学革命和工业革命,开启了人类现代化进程。我国改革开放的伟大实践,源于关于真理标准的大讨论,这一讨论确立了我党解放思想实事求是的思想路线,极大地激发了中国人民的聪明才智,创造了世界发展史上的又一奇迹。当前,我国正处在现代化建设的关键时期,进一步解放思想,多出科学思想,多出战略思想,多出深刻思想,比以往任何时期都更加紧迫,更加

重要。

思想创新是创新驱动发展的源泉。一部人类文明史，本质上是人类不断思考世界、认识世界到改造世界的历史。一部人类科学史，本质上是人类不断思考自然、认识自然到驾驭自然的历史。反思我们走过的历程，尽管我国在经济建设方面取得了举世瞩目的成就，科技发展也取得了长足的进步，但从思想角度看，我们的经济发展更多地借鉴了人类发展的成功经验，我们的科技发展主要是跟踪世界科技发展前沿，真正中国原创的思想还比较少，“钱学森之问”仍在困扰和拷问着我们。当前我国确立了创新驱动发展的道路，这是一条世界各国都在探索的道路，并无成功经验可以借鉴，需要我们在实践中自主创新。当前我国科技正处在创新跨越的起点，而原创能力已成为制约发展的瓶颈，需要科技界大幅提升思想创新的能力。

思想繁荣是社会和谐的基础。和谐基于相互理解，理解源于思想交流，建设社会主义和谐社会需要思想繁荣。思想繁荣需要提倡学术自由，学术自由需要鼓励学术争鸣，学术争鸣需要批判思维，批判思维需要独立思考。当前我国正处于社会转型期，各种复杂矛盾交织，需要国家采取适当的政策和措施予以解决，但思想繁荣是治本之策。思想繁荣也是我国社会主义文化大发展大繁荣应有之义。

正是基于上述思考，我们把“出思想”和“出成果”、“出人才”并列作为中国科学院新时期的战略使命。面对国家和人民的殷切期望，面对科技创新跨越的机遇与挑战，我们要进一步对国家科学思想库建设加以系统谋划、整体布局，切实加强咨询研究、战略研究和学术研究，努力取得更多的富有科学性、前瞻性、系统性和可操作性的思想成果，为国家宏观决策提供咨询建议和科学依据，为社会公众提供科学思想和精神食粮。

前 言

为国家宏观决策和科学引导公众提供咨询意见、科学依据和政策建议,是中国科学院学部作为国家在科学技术方面最高咨询机构的职责要求,也是学部发挥国家科学思想库作用的主要体现。

长期以来,学部和广大院士围绕我国经济社会可持续发展、科技发展前沿领域和体制机制、应对全球性重大挑战等重大问题,开展战略研究和决策咨询,形成了许多咨询报告和院士建议。这些咨询报告和院士建议为国家宏观决策提供了重要参考依据,许多已经被采纳并成为公共政策。将学部咨询报告和院士建议公开出版发行,对于社会公众了解学部咨询评议工作、理解国家相关政策无疑是有帮助的,对于传承、传播院士们的科学思想和为学精神也大有裨益。

本丛书汇编了1998年以来的学部咨询报告和院士建议。自2009年5月开始启动出版以来,院士工作局和科学出版社密切合作,将每份文稿分别寄送相关院士征询意见、审读把关。丛书的出版得到了广大院士的热情鼓励和大力支持,并经过出版社诸位同志的辛勤编辑、设计和校对,现终于与广大读者见面了。

希望本丛书能让广大读者了解学部加强国家科学思想库建设所作出的不懈努力,了解广大院士为国家决策发挥参谋、咨询作用提供的诸多可资借鉴的宝贵资料,也期待着广大读者对丛书和以后学部的相关出版工作提出宝贵意见。

中国科学院院士工作局

二〇一二年十一月

我国物理学与其他学科交叉的现状、问题及对策

王乃彦 等

物理学是人类不断认识自然界的重要基础学科，物理学的研究及其应用一直是并将继续是科学和技术发展的一个重要基础。为应对 21 世纪各种挑战（如能源短缺、环境保护及大众健康等），物理学将发挥重要的作用。众所周知，20 世纪初叶发生了以相对论与量子力学为标志的物理学革命。前者使人类对宇宙存在的历史、时间和空间有了革命性的认识，产生了核能的利用；后者使物理学、化学、生物学、地学发生了革命性的变化。20 世纪后半叶，正是由于一批物理学家、化学家进入生物学研究领域，发现了 DNA 双螺旋结构，才导致了分子生物学的诞生，为人类从分子水平认识生命过程提供了坚实的物理基础，也为农业、林业、医学、环保等领域提供了新的发展途径。21 世纪新涌现的科学技术，如纳米科学技术、信息技术、能源开发以及生物技术等，都是由物理学基础研究及其应用所驱动。

为促进物理学与众多学科的交叉融合，推动 21 世纪我国物理学的发展，中国科学院数学物理学部组织有关院士、专家成立咨询组，就我国物理学与其他学科交叉的主要相关领域的现状、问题与对策进行了深入、全面的调查研究，完成了本文。

我们认为，在我国需要自主创新、加快发展科学和技术的新时期里，要加强物理学与材料科学、能源科学、信息科学、生命科学等的交叉与融合，关注新的发展，及时抓住机遇。本文就强激光核物理、核科学技术和生命科学、量子纳米科学、量子信息、理论生物物理和生物信息学、软物质物理六个方面进行阐述，并提出建议。

一、强激光核物理

最近 10 年，激光技术有了显著的进展，激光功率密度已超过 10^{21} 瓦/厘米²，电场强度达到 1.2×10^{12} 伏/厘米，比氢原子中电子波尔轨道上的库仑场大 240



倍。在未来 10 年中, 激光功率密度可能会提高到 $10^{26} \sim 10^{28}$ 瓦/厘米², 这样高强度的激光将产生极高的加速电场 ($2 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15}$ 伏/厘米), 可以将粒子加速到很高的能量。高功率超短脉冲激光技术的发展, 在实验室中创造了前所未有的极端物态条件, 如高电场、强磁场、高能量密度、高光压、高的电子抖动能量和高的电子加速度。这种极端的物理条件, 目前只有在核爆中心、恒星内部、黑洞边缘才能存在。在超强激光和物质的相互作用中, 产生了高度的非线性和相对论效应。在小型太瓦级强激光的强电场作用下, 所有的原子都会在极短的时间内被电离, 产生从几兆电子伏到几十兆电子伏的电子、质子、中子以及韧致辐射, 这些粒子可以产生核反应。超强激光脉冲开辟了崭新的物理学领域, 也为多个交叉学科前沿研究领域带来了历史性机遇和拓展空间, 并将成为研究核物理、粒子物理、引力物理、非线性场论、超高压物理和天体物理等的一个有力工具。

目前具有超短超强激光装置的研究单位并不少, 但将它们运行好、做出好的物理工作成果的还不多。同时, 存在一个问题, 即研究强激光技术的专家, 一般光学的基础和造诣比较好, 但对等离子体物理尤其是核物理、高能物理的了解就少一些; 核物理、粒子物理的专家对超强超短激光的最新进展缺乏了解。这就需要发展强激光核物理这一交叉学科。

建议: 为专家们的交流和讨论提供更多的机会和更好的条件; 国家自然科学基金委员会和科技部“973”计划的前沿基础研究能对这类前沿交叉基础研究内容给以立项支持; 完善超强激光装置的诊断测试设备, 培养有经验的维护技术人员, 保证开展有意义的物理研究。

二、核科学技术和生命科学

核科学技术以核性质、核反应、核效应、核辐射、核谱学和核装置为基础。当今核科学技术和非核科学技术相互渗透, 相互促进, 已形成众多交叉学科, 如核医学、核药理学、放射生态学、辐射生物学、核农学、环境放射化学等, 重点是与生命科学的交叉。当前重大研究方向包括: 新型核方法尤其是可用于超微量、微区、实时和化学种态的核检测方法的建立; 分子核医学用于脑功能、癌症和心血管疾病的诊断和治疗; 用同位素示踪技术研究癌细胞的生长、繁殖、转移和凋亡; 离子束生物效应的机制研究及其与生命起源的关系; 辐射生物和环境毒理学的研究; 用同步辐射 X 射线衍射和中子散射等方法测定蛋白质的结构, 满足蛋白质组学发展的需求; 用新型自由电子激光研究生命科学中的许多重要课题; 等等。民用核技术具有巨大的经济效益。中国 2005 年民用核技术产值约 300 亿元。其中, 核电产值约 200 亿元。而美国 1995 年民用核技术产值就高达 3310 亿美元, 并提供了 400 万个工作岗位。其中, 核电产值 900 亿美元, 提供 40 万

个工作岗位。

20 世纪 80 年代以来,我国的核科学技术基本上是走下坡路。主要标志是:

1) 设置核科学技术专业的高等院校数目下降。

2) 就读核科学技术专业的学生数量急遽减少。

3) 核科学技术专业人才大量流失。近年来,核技术专业本科生和研究生的数量和质量都无法满足社会的需求,更不能适应我国未来发展核电、国家安全、核技术应用的需要。

4) 放射性和辐射防护科普宣传和教育薄弱。社会公众对核科学技术缺乏正确了解,对核辐射产生不必要的恐惧。加强核科学技术发展的关键是人才,而人才的基础是教育。

建议:吸引和鼓励青年学生学习核科学技术专业,加强核科学技术的大学本科和研究生教育,在一些重点大学开设核科学技术和生命科学、环境医学等交叉学科的专业,加强放射性和辐射防护的研究和教育,加强核技术相关仪器等设备的研制和产业化。

三、量子纳米科学

量子纳米科学是纳米科学的重要部分。纳米材料分为两类:第一类是基于量子效应的纳米材料和结构,称为量子纳米材料,主要由半导体组成。第二类主要是利用纳米材料的表面和界面效应,称为工业纳米材料。工业纳米材料在化工、陶瓷、建材和医药等领域中已经有许多应用,产生巨大的经济效益。量子纳米结构的电子、光子和微机械将成为下一代量子微电子和光电子器件的核心。它与电子学、光电子学以及通信技术、计算机技术密切相关,将在 21 世纪引起一场新的技术革命。2000 年美国发布的《国家纳米技术发展计划》指出:“纳米结构将孕育一场信息技术硬件的革命,类似于 30 年前那一场微电子革命,半导体电子学取代了真空管电子学。”未来的纳米器件将几百万倍地提高计算机的速度和效率,极大地增加存储量(达 10^{12} 比特),通信系统的带宽将增加 100 倍,平面显示器将比现在的显示器亮度提高 100 倍,生物和非生物器件集成到一个相互作用系统,将产生新一代的传感器、处理器和纳米器件。

目前存在的问题是:对发展纳米科学的认识具有片面性,对量子纳米科学的重视和投入不足,存在以下倾向:重短期行为,轻长期基础研究;重材料制备,轻物理、化学、生物等物性的深入研究和纳米器件的设计、制造和应用;重单个器件的研究,轻器件的集成;重单学科的研究,轻综合性的、多学科的交叉研究;等等。实际上,量子纳米科学目前虽然还没有进入大量应用阶段,但是从长远来说,它对未来的信息高技术产业将产生重大影响。



建议：对量子纳米科学给予足够的重视，加强对量子纳米科学研究的投入和有关平台建设，鼓励多学科交叉。在制备和发展纳米材料的同时，加强对纳米材料物性以及纳米器件的研究。

四、量子信息

量子信息是利用量子态作为信息载体进行信息存储、处理、计算和传送的一门学科，它能完成经典信息系统难以胜任的高速计算、大容量信息传输通信和安全保密等信息处理任务。它是量子物理与信息科学、计算机科学形成的交叉领域，主要包括量子计算、量子通信和量子密码学。量子信息的研究特别是量子计算的研究，将可能为突破传统计算机芯片的尺度极限提供新启示和革命性解决方案，从而导致未来计算机构架体系的根本性变革。量子信息的研究不只是两个不同学科的简单交叉，它涉及怎样从物理学的角度，在物质科学层面上深入理解什么是信息、什么是物质、能量和信息关系等基础性问题。反过来，这些问题的解决也有助于推动量子物理的发展。近年由于量子信息的深入研究，在新的实验技术平台上，许多量子力学原理上的一些争论得以检验和进一步澄清。

我国的量子信息研究虽然取得了一些有国际影响的结果，但总体水平与国际量子信息研究还有一段距离，主要问题是：

- 1) 原理方面缺少原始创新的理论，实现固态量子计算和量子信息处理的研究还刚开始。
- 2) 实验研究工作的布局不合理，实验工作大多集中在光学系统，一定程度上造成技术设备和研究人员的重复投入。
- 3) 与计算机科学和数学方面的交叉不够。

建议：加强固态系统的量子计算理论和实验研究，把固态量子计算研究作为未来量子信息研究的主攻方向；促进物理学与信息、计算机科学的交叉，鼓励更多数学家和信息学家投身于量子信息的研究；加强以实际应用为目标的量子密码学和量子通信研究；加强基础理论的研究，鼓励具有原始创新性的研究工作。

五、理论生物物理学和生物信息学

传统生物物理学发展面临许多新的问题，现有的观念和方法难以解决这些问题，因此理论生物物理学应运而生。基因研究的最新成果向物理学提出了与生命过程联系更为深刻的课题，如 DNA 和染色质的力学性质在基因转录调控中的作用，如何理解细胞中 DNA 超螺旋、分子马达运转、核仁形成和染色体包装等多种非平衡过程的物理机制及其生物学效应等。理论上研究大分子在生物体内的

结构有可能带来重大突破。理论生物物理的另一个重要研究方向是与非线性物理、复杂性科学的交叉。随着分子生物学向定量研究的深入开展,已经积累了大量蛋白质相互作用与基因调控机制的信息,这使得从整体角度定量研究生物动力学系统成为可能。从蛋白质相互作用与基因调控网络出发,研究生物网络的拓扑性质、动力学性质、生物功能及它们之间的相互关系,是理论生物物理的一个重要研究内容。生物信息学的方法正在渗透到分子结构预测以及生物网络拓扑结构的分析中,有望在细胞生物学和生物物理学中发挥作用。

目前,我国的理论生物物理研究的基础比较薄弱,人才比较缺乏。

建议:在一些重点高等学校物理系和相关研究所,成立以研究基础生命理论问题为中心的实验室,建立研究模式生物的实验平台,培养硕士和博士研究生;加大对交叉学科的支持,提供合理比例的经费,提供交叉学科创新群体平台;近年应设立若干项目,给以重点支持。

六、软物质物理

软物质是指处于固体和理想流体之间的物质。它一般由大分子或基团组成,如液晶、聚合物、胶体、膜、双亲体系、泡沫、颗粒物质、生命体系物质等。软物质中的复杂相互作用和流体热涨落导致了它的特殊性质。它的基本特性是对外界微小作用的敏感和非线性响应、自组织行为等。软物质在自然界、日常生活和工业生产中广泛存在。另一方面,生物体基本由软物质组成,如DNA、蛋白、细胞、体液等。对软物质的深入研究将对生命科学、化学化工、医药、食品、材料、环境、清洁工程等领域及人们日常生活有广泛影响。

我国软物质物理研究起步较晚,没有受到应有的重视,软物质物理和液体物理的研究几乎处于空白状态。

建议:在一些重点高校物理系和相关研究所成立软物质物理研究组、研究室,开展软物质物理研究,培养研究生;通过举办软物质物理讲习班、暑期学校和研讨会等方式普及和推广软物质研究;加大对软物质物理研究的支持,提供合理比例的经费。近年应设立若干项目,给以重点支持。

七、问题和建议

综上所述,我国近代科学主要从西方输入,经几代科学家近百年前赴后继的奋斗,我国的科学水平已经有了长足的发展和进步,但仍然比较落后。21世纪交叉学科的发展,为世界各国都提供了新的机遇。如果决策部门能够未雨绸缪,加强对交叉学科发展的支持与部署,中国在物理科学上的崛起——后来者居上是



完全有可能的。

目前存在的普遍问题：

- 1) 交叉学科的发展缺乏系统规划，缺少具体支持措施。
- 2) 学科之间的交叉研究还停留在低层次的形式上，缺乏实质性融合。
- 3) 现有的科技评价体系缺乏长远观念，不利于交叉学科发展。
- 4) 交叉学科的人才培养缺乏计划，造成交叉学科人才短缺。

对策建议：

1) 科技部、教育部、中国科学院、国家自然科学基金委员会等相关部门应加大对交叉学科的支持，制定可实施的发展交叉学科的中长期规划，提供合理比例的经费。近年设立若干项目，给以重点支持。

2) 在一些研究型高校和相关研究所成立交叉学科研究中心，设立有关专业，开设相关课程，培养本科生和研究生。

3) 建立有利于交叉学科发展的机制和相应的研究平台，鼓励不同领域的科研人员的合作，促进多学科交叉。

4) 建立科学合理的科技评价体系，创造一个有利于交叉学科发展的环境。

5) 开展国际学术交流，举办各种类型的讲习班、暑期学校和研讨会等，培训交叉学科研究人员。

附件 关于我国物理学与其他学科交叉的现状、问题及对策的调研报告

物理学是人类不断认识自然界的重要基础学科，物理学的研究及其应用一直是并将继续是科学技术发展的一个重要基础。为应对 21 世纪各种挑战（如能源短缺、环境保护及大众健康等），物理学将发挥重要的作用。众所周知，20 世纪初叶发生了以相对论与量子力学为标志的物理学革命。前者使人类对宇宙存在的历史、时间和空间有了革命性的认识，产生核能的利用；后者使物理学、化学、生物学、地学发生了革命性的变化。20 世纪后半叶，正是由于一批物理学家、化学家进入生物学研究领域，发现了 DNA 双螺旋结构，才导致了分子生物学的诞生，为人类从分子水平认识生命过程提供了坚实的物理基础，也为农业、林业、医学、环保等领域提供了新的发展途径。21 世纪新涌现的科学技术，如纳米科学技术、信息技术、能源开发以及生物技术等，都是由物理学基础研究及其应用所驱动。

为应对物理学与众多学科交叉融合的迅猛发展，促进 21 世纪我国物理学的发展，中国科学院数理学部组织有关院士专家就我国物理学与其他学科交叉的主要相关领域的现状、问题及对策进行了深入、全面的调查研究，完成了本报告。

我们认为,在我国需要自主创新、加快发展科学和技术的新时期里,要加强物理学与材料科学、能源科学、信息科学、生命科学等的交叉与融合,关注新的发展,抓住新的机遇。报告主要在下列六个方面(强激光核物理、核科学技术和生命科学、量子纳米科学、量子信息、理论生物物理和生物信息学、软物质物理)进行阐述,建议予以关注。

| (一) 强激光核物理 |

1. 研究领域界定、背景和特点

最近 10 年,激光技术有了显著的进展,激光功率密度已超过 10^{21} 瓦/厘米²,电场强度达到 1.2×10^{12} 伏/厘米,比氢原子中电子波尔轨道上的库仑场大 240 倍,相当于在原子尺度大小上加上约 10 千伏的电压,在原子核尺度大小上加上约 0.12 伏的电压。在这种很强的电场作用下,所有的原子都会在极短的时间内被电离,产生从几兆电子伏到几十兆电子伏的电子、质子、中子以及韧致辐射,这些粒子可以产生核反应,从而开辟了核物理以及非线性相对论光学研究的新领域。

在今后 10 年中,激光功率密度可能会提高到 $10^{26} \sim 10^{28}$ 瓦/厘米²,这样高强度的激光可以产生极高的加速电场 ($2 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15}$ 伏/厘米),可以将粒子加速到很高的能量。高功率超短脉冲激光技术的发展,在实验室中创造了前所未有的极端物态条件,如高电场、强磁场、高能量密度、高光压、高的电子抖动能量和高的电子加速度。这种极端的物理条件,目前只有在核爆中心、恒星内部、黑洞边缘才能存在。在强激光和物质的相互作用中,产生了高度的非线性和相对论效应。强激光脉冲开辟了崭新的物理学领域,也为多个交叉学科前沿研究领域带来了历史性机遇和拓展空间,并将成为研究粒子物理、引力物理、非线性场论、超高压物理、天体物理和宇宙线等的一个有力工具。

2. 国内外研究现状

当前,国际社会已经在一些实验室中建立了几十太瓦到 1 拍瓦的激光系统。20 世纪 80 年代中期以前,激光的强度长期停留在 10^{14} 瓦/厘米² 左右,这是由于非线性吸收效应随着激光强度的增加而迅速增强。80 年代中期后,由于采用了啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA),激光强度提高 6~7 个数量级。在 CPA 技术中,一个飞秒或皮秒脉冲通过色散的光栅在时间尺度将它展宽了 3~4 个数量级,这样就避免了在很高强度时由于非线性效应产生光学放



大器件损伤和放大饱和现象。经过放大后，再由另一光栅将脉冲宽度压缩回飞秒或皮秒宽度，以获得 $10^{19} \sim 10^{21}$ 瓦/厘米² 的靶上功率密度。法国光学应用研究所，瑞典隆德大学，德国 Marx-Planck 大学、耶拿大学，日本原子能研究所 (JAERI) 和中国工程物理研究院、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院物理研究所等都建有 CPA 超短脉冲太瓦级激光装置。日本原子能研究所采用变形镜和 CPA 相结合的技术，运用低 f 值的抛物面镜将激光聚焦于 1 毫米的斑点，可以进一步提高焦斑上的功率密度，但是由于放大介质的单位面积上的饱和能量通量和光学元件的损伤阈值的限制，单位面积上最大的光强度约为 10^{23} 瓦/厘米²。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 正在计划建造 10^{18} 瓦和 10^{21} 瓦激光装置，以期获得 $10^{26} \sim 10^{28}$ 瓦/厘米² 靶上功率密度。

超短超强的激光可以引起许多核反应，举例如下：

1) 产生高能电子。运用强激光在等离子体中产生的尾场去加速电子，当激光强度大于 10^{18} 瓦/厘米² 时，在激光电场做抖动的电子可以达到很高的能量，产生了相对论等离子体。例如，用一台紧凑型重复频率激光器可以产生 200 兆电子伏的电子。这种激光等离子体型加速器具有比通常电子加速器高出 1000 倍的加速梯度，即达到吉伏/米。运用高强度、单次脉冲的激光也获得了 100 兆电子伏的电子，并测量到它的韧致辐射。

2) 产生质子束。现正在探索运用这些质子束产生正电子发射层面 X 射线照相术 (positron emission tomography, PET) 所需要的短寿命正电子放射源。一种用激光来产生的小型化经济质子产生器有望在未来用于质子治癌。

3) 产生正电子。运用超短超强激光直接产生正电子已在英国卢瑟福实验室实现，他们用重复频率的太瓦级的激光，打在高 Z 元素的靶上得到每脉冲 2×10^7 个正电子，它对于基础研究和材料科学很有用途。

4) 产生中子。通过超短超强激光和氘团簇的相互作用，产生聚变反应中子，产额可以达到 10^5 个中子/焦。激光产生中子的能量效率已达到世界上大型的激光装置的水平，它可以成为台面的中子源。由于其中子脉冲通量高，但总的中子剂量很小，适合于生物活体的中子照相和材料科学的研究。

5) 产生硬 X 射线。运用超短超强的激光在相对论性的电子上的散射，产生几百飞秒、几十埃的硬 X 射线，可以用来研究材料和生命科学的一些问题。这种超快的硬 X 射线源对于研究一些高 Z 物质和时间分辨的超快现象具有重要的意义。超短超强激光所产生的高能电子，在物质中产生高能 X 射线，可以在裂变物质铀中引起裂变，并在裂变靶中探测到许多裂变产物。

在激光强度达到 10^{28} 瓦/厘米² 时，电场强度只比 Schwinger 场 (真空击穿场强) 低 1 个数量级。在这样的场中由于真空的涨落被激化，激光就有可能从真空中产生正负电子对。美国 Lawrence Berkeley 实验室在斯坦福线性加速器中心

(SLAC) 高能加速器用 10^{18} 瓦/厘米² 激光束和聚焦性能很好的 46.6 吉电子伏电子束相碰撞, 产生 200 多个正负电子对。这是由于: 在反向相碰的电子和激光中, 从电子坐标系来看, 激光场强增强了 Lorentz 因子, 以至于可以远远地超过 Schwinger 值, 直接从真空中产生正负电子对。

3. 新的科学研究的内容、新的交叉点

(1) 激光产生高能电子

产生高能电子的机制有两种: 第一种是在激光场作用下, 电子抖动运动, 在激光强度 $I = 10^{20}$ 瓦/厘米² 时, 电子抖动运动能量可达到 10 兆电子伏; 第二种是由非线性效应所产生的能量比较高的部分。用 300 焦、0.5 皮秒的激光照射在厚的金靶上测量到的电子能谱分布基本上由两个部分组成, 一部分是由于有质动力产生的, 它的能量在 20 ~ 30 兆电子伏以下, 还有一部分就是由非线性效应产生的几十兆电子伏以至 100 兆电子伏以上的高能量的电子。

当激光的强度增加, 光波的压力变得很大, 光压推着电子往前走, 光波就像一个光子犁将等离子体中的电子推到脉冲的前面积累, 形成电子的“雪犁”(snow plow), 在这种“雪犁”加速中电子的动能得到增益。在综合了光压作用和激光场的作用后, 计算得到在激光强度为 $I = 10^{26}$ 瓦/厘米² 时, 加速梯度可达 200 太电子伏/厘米, 如果加速长度达到 1 米, 电子能量能达到 2×10^{16} 电子伏。这些高能电子可以用来研究高能物理中的许多问题。但目前达到的加速距离很短, 在激光强度为 $I = 10^{20}$ 瓦/厘米² 时, 加速长度还不到 1 毫米。

(2) 激光产生质子束

在激光等离子体中, 在 $I = 10^{20}$ 瓦/厘米² 的情况下, 加速梯度约为 1 兆伏/微米, 质子被加速的距离为 60 微米左右, 加速质子的能量可以高达 58 兆电子伏。如何增长加速距离成为非常重要的研究内容, 加速质子的机制是相当复杂的, 也提出了一些加速模型的设想。激光能量转换成质子束能量的效率是高的, 而且和激光的能量有关。当激光脉冲为 10 焦, 宽度为 100 飞秒时, 转换效率为 1%; 当激光脉冲为 500 焦, 宽度为 500 飞秒时转换效率为 10%。人们已经获得了 10^{13} 质子/脉冲, 相当于 10^{25} 质子/秒, 即 1.6×10^5 安脉冲质子流。从理论到实验应该研究如何进一步提高能量转换效率的问题, 尤其是当激光能量进一步提高时, 是否还继续保持高转换效率。

实验上的研究结果已显示它具有很大的应用前景, 表现在:

1) 质子束的发散角比较小, 观察到的横向发散角为 0.5 毫米·毫弧度, 纵向发散角为兆电子伏/秒, 比通常加速器上加速的质子束的发散角小。

2) 高能质子束的获得可能会在今后的 10 年中实现。按照 Bulanov 等的计算



结果, 在 $I=10^{23}$ 瓦/厘米² 时, 质子可以被加速到 1 吉电子伏以上。如果能达到足够长的加速距离, 那么在 $I=10^{26}$ 瓦/厘米² 和 10^{28} 瓦/厘米² 时, 质子能量可以分别达到 100 吉电子伏和 10 太电子伏。

3) 目前已获得几十兆电子伏的质子束, 已经用于为 PET 产生 ^{18}F 等短寿命的正电子源。英国 Rutherford 实验室 Vulcan 装置用 20 分钟制备了 10^9 贝可 ^{18}F 源, 已经可以用在 PET 上。

4) 产生 200 兆电子伏质子, 可用于质子治癌。由于它在能量沉积性能上有优越性, 以及整个装置可以做得小, 成本低, 所以在治癌运用上很有发展前景, 并可应用于质子照相。

(3) 激光产生中子

超短超强激光加热氘团簇产生核聚变, 已经产生了 10^4 个中子/脉冲或 10^5 个中子/焦。Hilsher 等用钛宝石激光 (300 毫焦, 50 飞秒, 10 赫, 10^{18} 瓦/厘米²) 轰击氘化聚乙烯靶, 产生 10^4 个中子/脉冲, 每焦激光产生约 3.3×10^4 个中子。Disdier 等用 20 焦、400 飞秒、 5×10^{14} 瓦激光辐照 CD_2 靶, 获得 10^7 个中子, 每焦激光产生了 5×10^5 个中子, 这是很高的中子产额。他们还要用 500 焦、500 飞秒、1 皮瓦激光照射 CD_2 , 以获得更多的中子。从激光能量转换成中子的效率看, 这与美国 LLNL 大型激光器 NOVA 的每焦激光的中子产额相当, 比日本大阪大学大型激光装置 Gekko 12 的数值大一个数量级, 因此是一种很有发展前景的桌面式中子发生器。因为这种中子源的时间宽度只有 1 皮秒, 是一个高中子通量的中子源, 可用于材料科学和中子照相。

氘的团簇在吸收了激光能量后要发生库仑爆炸, 到现在为止对于库仑爆炸的机理尚不清楚, 尤其是对团簇爆炸后产生的氘分子和氘的小团簇如何产生氘-氘聚变反应也缺乏细致的了解。在改进方面, 还可以有发展的余地, 如采用多束超短超强激光同时照射团簇, 或用大于 50 太脉冲磁场去推迟热等离子体的解体时间, 以增加中子产额。

在激光辐照 CD_2 平面靶时, 除了要研究激光能量在 CD_2 靶上的能量沉积分布外, 如何充分利用沉积能量是一个很重要的问题。沉积的能量有很大一部分要转变成等离子体的动能, 在平面靶的情况下, 如何设计靶面形状, 最大限度地使等离子体的动能对 D-D 反应作贡献。

(4) 激光产生硬的超短 (约 100 飞秒) X 射线

用超短超强激光 (50 毫焦, 0.5 太瓦, 100 飞秒) 和 50 兆电子伏的电子束散射可以产生 4 纳米、300 飞秒硬 X 射线。虽然转换效率不高, 但可以利用产生的 X 射线做时间分辨的材料研究。例如, 在 Si 表面产生衍射峰, 研究 Si 表面相变过程 (固相→熔化); 研究蛋白质折叠动力学, 蛋白质的折叠时间为 1000 纳秒, 用 300 飞秒硬 X 射线可了解它的折叠过程。

(5) 激光产生正电子

将具有几个兆电子伏的电子, 经过很好地准直后, 射到一个高 Z 靶上, 通过 Trident 过程 ($Z + e^- \longrightarrow Z' + 2e^- + e^+$) 和 Bethe-Heitler 过程 ($Z + r \longrightarrow Z' + e^- + e^+ + r'$) 产生正电子。采用重复频率的超短超强激光和高 Z 靶的相互作用, 每脉冲可以产生 2×10^7 个正电子, 经过慢化, 储存在磁场中, 它对于基础科学和材料科学的研究是很有用的。

4. 存在的主要问题和分析

这门新兴的交叉学科在国际上也只有三四年的历史, 但发展十分迅速, 研究激光技术和原子核物理的科学家们已经开始在一起召开学术研讨会, 共同参加一些实验。由于它是一个新的生长点, 比较快也比较容易发现一些新现象, 所以合作的积极性也在日益增长。随着超短超强激光技术的发展, 在粒子加速、核物理甚至粒子物理方面有可能做出一些很好的工作。

我国发展的情况有些滞后, 学科之间的交叉和合作还没有真正形成, 学科之间的了解、交流还不够, 因此只在交叉学科的边缘做了一些工作。按照我国在激光技术和核物理方面的力量来说, 应该有可能做出更多更好的工作。目前具有超短超强激光装置的研究单位并不少, 但将其运行好、做出好的物理工作成果的还不多。

和国外相似, 国内存在着一个问题, 即搞强激光技术的专家, 一般光学的基础和造诣比较好, 比较容易在和光学等其他学科的交叉上做出很好的工作, 但对等离子体物理尤其是核物理、高能物理的了解就少一些; 核物理、粒子物理的专家对光学的最新进展缺乏了解。这就需要发展强激光核物理这一交叉学科。

从强场物理到超短超强激光技术, 以及应用于各个领域, 在世界上是基础科学和技术进步相互推动、相互作用的一个范例。基础研究的需求, 以及光学科学的基础、非线性科学的基础等促进了超短超强激光技术的发展, 而高强度激光的发展又为物理学的发展提供一个崭新的世界。

5. 政策和建议

1) 建议为专家们的交流和讨论提供更多的机会和更好的条件, 开好相关的学术讨论会。

2) 建议国家自然科学基金委员会和科技部“973”计划的前沿基础研究能对这类前沿交叉基础研究内容给以立项支持。