



2019

重大科学问题和 工程技术难题

中国科学技术协会 主编

2019

重大科学问题和 工程技术难题

中国科学技术协会 主编



中国科学技术出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

2019 重大科学问题和工程技术难题 / 中国科学技术协会

主编. —北京: 中国科学技术出版社, 2019.8

ISBN 978-7-5046-8331-1

I. ① 2… II. ① 中… III. ① 科学研究工作—概况—中国
IV. ① G322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 151579 号

责任编辑	韩颖 高立波 冯建刚
封面设计	中文天地
责任校对	焦宁
责任印制	李晓霖

出版	中国科学技术出版社
发行	中国科学技术出版社有限公司发行部
地址	北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮编	100081
发行电话	010-62173865
传真	010-62173081
网址	http://www.cspbooks.com.cn

开本	787mm × 1092mm 1/16
字数	90 千字
印张	7
版次	2019 年 8 月第 1 版
印次	2019 年 8 月第 1 次印刷
印刷	北京长宁印刷有限公司天津分公司
书号	ISBN 978-7-5046-8331-1/G · 811
定价	49.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

2019重大科学问题和工程技术难题

学术组织机构

作者(按姓氏笔画排序)

马婷婷	王 飞	王光辉	王 旭	孔令义	龙 斌
朱新广	刘飞香	刘书杰	那顺布和	李 中	李玉同
李清平	何祖华	张 杰	季向东	赵立金	郝海平
胡 平	冒加友	钟义信	俞 立	闻 悦	姜建娜
费宇彤	秦四清	袁建宇	徐明岗	徐 悦	黄江川
梅勇兵	盛政明	崔光磊	寇 伟	彭正阳	程 军
鲍 岚	蔡巧言				

专家委员会(按姓氏笔画排序)

马福海	王一然	王国辰	方祖烈	史玉波	孙咸泽
李 骏	李德毅	吴 季	陈晓亚	陈晔光	林左鸣
金红光	周晓林	胡义萍	姚建年	詹文龙	

秘书组(按姓氏笔画排序)

马成贤	王 希	王 焯	王红杰	牛景蕊	申志铎
安向阳	孙文虹	杜 勇	杨振荣	时 蓬	谷冬梅
宋娟娟	张 超	张霄潇	陈 扬	林晓静	周 丽
姜建娜	贾晓丽	鞠华俊			

前言

习近平总书记在“科技三会”上讲话时指出：“综合判断，我国已经成为具有重要影响力的科技大国，科技创新对经济社会发展的支撑和引领作用日益增强。同时，必须认识到，同建设世界科技强国的目标相比，我国发展还面临重大科技瓶颈，关键领域核心技术受制于人的格局没有从根本上改变，科技基础仍然薄弱，科技创新能力特别是原创能力还有很大差距。”

提出有价值的问题对于科学发展及其推动经济社会发展尤其具有意义。科学发展就是不断地始于问题和终于问题的过程，同时也是科学概念、科学定律和科学理论不断地形成和增长的过程。原中国科协主席、中国科学院院士周光召指出，科学问题，特别是科学难题的提出、确认和解决，构成了科学自身发展的内在动力。提出科学问题，尤其是提出概念清晰的难题，更能对科学进步起到真正的推动作用。科学问题和难题往往蕴藏在科学理论与科学实验之间、不同理论之间的冲突之中，而标志科学前沿、代表科学发展方向的重大科学问题和难题，往往出现在科学自身发展的逻辑和社会需求的交汇点上。跨门类科学间即多学科间的交叉产生的科学难题，对于科学系统的整体发展，无疑具有更重大的意义。

为研判未来科技发展趋势、抓住科技创新突破口、前瞻谋划和布局前沿科技领域与方向，推动世界科技强国建设，2019年中国科协组织全国学会及学会联合体开展了重大科学问题和工程技术难题征集发布活动，产生了强烈的社会反响。此次征集发布活动，共收到81家全国学会及学会联合体提交的463个问题难题。736位科技工作者参与撰写、1527位专家学者参与推荐、7079名科研一线科学家参与线上初选、124名学科领军专家参与复选线上投票、52名专家参与复选现场评议、27名院士专家参与终选，最终75个问题难题入选进入2019重大科学问题与工程技术难题库，20个对科学发展具有导向作用、对技术和产业创新具有关键作用的前沿科学问题和工程技术难题，于2019年6月30日在第二十一届中国科协年会闭幕式上发布。

此次评选特色鲜明。一是活动由中国科协组织全国学会及学会联合体面向广大科技工作者广泛征集，“自下而上”推荐，具有鲜明的科协组织特色；二是活动参与面广泛，所征集的问题难题覆盖理、工、农、医等各领域，学科覆盖面全。三是发布的重大问题难题多属交叉、跨界、融合的领域，问题难题具有创新性、引领性、前瞻性，既反映我国科研一线工作者的关注热点，又体现国家科技发展战略方向。《2019重大科学问题和工程技术难题》一书，即是在此次征集发布活动相关内容的基础上汇编而成的。

中国科协名誉主席、中国科学院院士韩启德提出，中国科协重大科学问题和工程技术难题的发布，既和当下的国计民生息息相关，又有面向未来的战略意义。这些问题和难题的发布再一次证明，我国的科技创新能力正从“量的积累”向“质的飞跃”转变、从“点的突

破”向“系统能力提升”转变。未来，让我们一起见证这些问题和难题的突破！

中国科协党组书记、常务副主席、书记处第一书记，中国科学院院士怀进鹏在第二十一届中国科协年会闭幕会上致辞时提出，要放眼世界大变局，深刻理解科技创新的价值、学术交流的价值、开放合作的价值，从战略和全局高度研判并识别问题、识别机遇、识别挑战，担当起创新与振兴的时代使命，推动以科技支撑共建繁荣世界。

重大科学问题和工程技术难题征集发布活动是中国科协瞄准世界科技前沿、抢占世界学术高地的重要举措，也是中国科协期望借此动员引领全国学会加强智库建设、提高服务科学决策能力的品牌活动。今后，中国科协将有效整合和深度挖掘学术资源，紧盯世界科技前沿领域，遴选世界各国共同关注的重大科学问题，并与世界各国科学家、科研机构、企业等共同合作开展科技攻坚，为全人类的繁荣进步、可持续发展贡献力量。

目 录

1 暗物质是能探测到的基本粒子吗	1
2 对激光核聚变新途径的探索	5
3 单原子催化剂的催化反应机理	10
4 高能量密度动力电池材料电化学	14
5 情绪意识的产生根源	19
6 细胞器之间的相互作用	24
7 单细胞多组学技术	29
8 废弃物资源生态安全利用技术集成	33
9 全智能化植物工厂关键技术难题	38
10 近地小天体调查、防御与开发问题	44
11 大地震机制及其物理预测方法	50
12 原创药物靶标发现的新途径与新方法	57
13 中医药临床疗效评价创新方法与技术	62
14 人工智能系统的智能生成机理	66
15 氢燃料电池动力系统	71

16 可再生合成燃料	74
17 绿色超声速民机设计技术	83
18 重复使用航天运输系统设计与评估技术	87
19 千米级深竖井全断面掘进技术	92
20 海洋天然气水合物和油气一体化勘探开发机理和关键工程技术	99



暗物质是能探测到的基本粒子吗

中文题目 暗物质是能探测到的基本粒子吗

英文题目 Is Dark Matter a Detectable New Elementary Particle

所属类型 前沿科学问题

所属领域 粒子物理 / 天体物理

所属学科 物理学

作者信息 季向东 上海交通大学

推荐学会 中国物理学会

学会秘书 谷冬梅

中文关键词 暗物质粒子；直接探测；空间卫星探测

英文关键词 dark matter particles; direct detection; space satellite
detection

推荐专家 王贻芳 中国科学院院士，中国科学院高能物理研究所所长

专家推荐词

暗物质很可能是一种未知的、相互作用非常微弱的基本粒子，可以建造超级灵敏的粒子探测器来进行研究。暗物质粒子一旦被发现，将成为人

类科学史上具有划时代意义的重大成就，会对未来粒子物理与天体物理的发展产生巨大影响。

问题背景

近百年的天文观测显示，宇宙中存在着大量的、看不见摸不着的暗物质，它们比普通的可见物质多五倍以上。在银河系里，暗物质形成一个巨大的晕，将银盘包围起来，使得恒星绕银心的转动速度远超预期。如果没有暗物质，银河系将会分崩离析。暗物质到底是什么？它是否像普通物质一样，是一种新的基本粒子？如何通过实验来探测到这样的粒子？暗能量与暗物质的属性是物理和天文学家公认的 21 世纪最重要的科学谜团，其挑战性类似于 100 年前被称为 20 世纪初物理学中的两朵“乌云”，很有可能孕育出新的物理学重大发现。

近年来，美国和欧洲科学界纷纷布局，提出自己的路线图，期望在暗物质探测问题上抢先取得突破，做出奠基性的贡献。中国科学界对暗物质研究的重要性也有了共识。中国科学院在 2009 年发布的“创新 2050：科学技术和中国未来”战略研究系列报告中提出可能出现革命性突破的 4 个基本科学问题：暗物质、暗能量被列为第一。该报告指出：“揭开暗物质、暗能量之谜，将是人类认识宇宙的又一次重大飞跃，可能导致一场新的物理学革命。为此，需投资建设几项关键性的探测暗物质、暗能量的重大实验装置，以取得第一手实验数据，在国际竞争中处于主导地位。”

关键突破点

暗物质粒子探测和相互作用研究目前主要有三种方法：① 直接探测。通过建造一个超级灵敏的探测器，放于很深的地下（屏蔽宇宙线），太阳

轨道附近的暗物质粒子流与探测器碰撞会产生可观测的信号。该方法需要一个体量很大但本底很低的探测器。② 间接探测。大量暗物质粒子在银河系中心会有一些的概率湮灭成为可见物质，这些额外的物质可通过空间或地球上的高能粒子探测器探测到。但确定这些信号的来源比较困难，必须对银河系中的天体物理过程有比较详细的了解。③ 暗物质在高能加速器中产生。这是当前世界上最高能量加速器 LHC 上最重要的研究课题之一。

在过去 10 年里，国际上暗物质探测方面的进展迅速，中国团队也奋起直追，已经达到国际水平。在直接探测方面，美国 LUX 与 CDMS 合作组以及欧洲 XENON 合作组，在大质量与轻质量暗物质探测方面均取得过最好灵敏度的探测。在中国锦屏地下实验室，PandaX 合作组在 2016、2017 年连续取得大质量暗物质的国际最好探测结果；CDEX 合作组在轻质量暗物质探测方面也有重要进展。在空间探测方面，丁肇中先生带领的 AMS-2 合作组在高能正电子谱探测方面取得重要成果；我国“悟空号”卫星上的 DAMPE 探测器对电子正电子谱的测量也发现了重要的异常现象，引起科学界的高度关注。

目前，美国 LZ 合作组和欧洲 XENON 合作组正在研制 7 吨级的液氙探测实验，CDMS 也在研制百千克级的半导体探测器。中国 PandaX 合作组正在研制一个相当规模的液氙实验，争取将灵敏度迅速提升 1~2 个数量级，对在 DAMPE 电子谱看到的 1.4TeV 暗物质疑似区寻求直接验证。我国 CDEX 合作组也在研制百千克级的高纯锗实验。在今后 3~5 年，中国科学家团队将持续实现与国际最高水平的并跑。

一个能对暗物质粒子属性做出决定性判断的终极探测实验是一个百吨级的液氙实验和吨级的半导体探测实验。这是一个国际大科学计划，能在

今后 5~10 年内实现。在该水平上，必须联合国际上 500 到 800 名暗物质探测科学家，将经费、队伍和经验聚集在一起，找到一个环境最优秀的实验室开展工作。中国的锦屏极深地下实验室可以提供这些条件。中国的暗物质科学家有经验、也有能力来牵头开展这样一个国际大科学计划。

在实现终极直接探测的同时，迅速开展卫星暗物质探测 DAMPE 的二期工作，将电子能谱探测统计量提高 1 个数量级以上，这些工作也能在 5~10 年内完成。

战略意义

暗物质粒子一旦被发现，将成为人类科学史上具有划时代意义的一项重大成就，对粒子物理与天体物理的发展产生巨大影响。暗物质粒子的存在以及与普通物质的相互作用将表明粒子物理标准模型的缺陷，为新物理指明方向。在新物理理论中，暗物质很可能与基本粒子质量的起源有关，也可能与几种基本相互作用的统一有关。

暗物质研究是一个跨世纪的项目，实验上探测到暗物质仅仅是第一步。接下来，物理学家需要研究暗物质的种类、质量、内禀量子数及相互作用等。一旦暗物质的相互作用被测量，我们将可以精确计算暗物质在星系和宇宙中的分布和演化的动力学过程，这对天文学有非常重要的影响。

暗物质探测需要研究最灵敏的探测器。这些探测器技术对于其他方面的应用将可能产生重大影响。如：液氙探测器在医学探测上有重要应用；高纯锗探测器的研发将大大降低成本，提升其在核探测、核监控领域的实际应用价值。我国科学家牵头开展这些研究将对实现相关高精尖技术的国产化起到重要的推动作用。

2

对激光核聚变新途径的探索

中文题目 对激光核聚变新途径的探索

英文题目 Search for New Schemes of Laser Fusion

所属类型 前沿科学问题

所属领域 数理科学

所属学科 物理学

作者信息 李玉同 中科院物理所

盛政明 上海交通大学

张 杰 中科院、上海交通大学

推荐学会 中国物理学会

学会秘书 谷冬梅

中文关键词 高功率激光；惯性约束核聚变；国家安全；能源

英文关键词 high power lasers; inertial confinement fusion; national security; energy

推荐专家 詹文龙 中国科学院院士，中国物理学会理事长

专家推荐词

激光核聚变的成功实现将有望解决困扰人类多年的能源问题，还可用

于模拟核武器相关过程，可带来巨大的经济与社会效益，并保障国家安全。

问题背景

能源不仅是经济发展的命脉，也是国家安全的重要保证。美国、欧洲、日本等发达国家的繁荣，正是建立在对能源巨大消耗的基础之上的；国家之间的许多利益争端，其核心实质上是对能源资源的争夺。以煤炭、石油等化石为主体的能源不可再生，已面临着逐渐枯竭的忧虑。从长远来看，核能是解决人类能源问题的终极方案之一。与裂变核能相比，聚变核能由于不存在重核素的核污染，因此不仅是一种安全、洁净的高能值能源，而且由于所需氘氚燃料在地球上储藏丰富，可谓用之不竭。

20世纪60年代初，苏联科学家巴索夫和我国科学家王淦昌先生分别独立提出了利用激光实现核聚变反应（即ICF）的设想。其基本原理是把多路高能量密度的激光束球对称聚焦后直接辐照（或将激光束聚焦到黑腔内壁转换为X射线后间接辐照）由氘氚燃料制成的微型靶丸，实现烧蚀氘氚等离子体的向心聚爆，在惯性约束的时间内达到劳森判据对核聚变反应所要求的极高温与密度，实现氘氚燃料的核聚变点火和持续燃烧。ICF研究不仅对于解决人类能源问题意义重大，而且对于国家战略安全也至关重要。因此，美国等核大国均非常重视在实验室中开展激光核聚变研究，并给予长期的高强度投入。

目前实现ICF主要有间接驱动和直接驱动两条研究路线。间接驱动是将高能量密度激光能量聚焦注入到圆柱形黑腔内壁上，通过产生的X射线，均匀烧蚀黑腔中心的氘氚燃料，产生向心聚爆。而直接驱动是利用高能量密度激光直接烧蚀球形氘氚燃料，产生向心聚爆。自1996年开始，

美国耗资 35 亿美元，倾全国科技之力，历时 10 多年建成了美国国家点火装置（NIF），目标是通过间接驱动的研究路线实现激光聚变点火。NIF 是人类历史上规模最大的光学工程，其工程精密程度和重要关键技术的先进程度都达到或超过了设计指标。然而，由于 ICF 物理过程中高度复杂的内禀物理困难，NIF 建成后虽然经过十多年的高强度研究，至今仍然没有能够实现聚变点火。

针对美国 NIF 在间接驱动研究的现状，美国能源部发布了《2015 年惯性约束聚变与高能密度科学评估报告》。报告中提到：除非有不可预见的技术突破，否则以 NIF 激光装置目前的能力，在近期实现点火是不太可能的，在中期实现点火也具有相当的不确定性。与间接驱动研究路线相比，直接驱动研究路线具有更高的激光到核燃料的能量耦合效率、更低的点火阈值和更高的能量增益。因此，近年来在 NIF 间接驱动研究路线遇到巨大障碍之后，直接驱动研究路线吸引了越来越多的关注。

在直接驱动研究方面，受 NIF 装置的几何排布和靶场结构的巨大制约，美国目前主要依托罗切斯特大学的 OMEGA 激光装置开展直接驱动研究。但由于 OMEGA 激光装置的总能量较低，不能进行真正意义的点火研究，只能通过定标关系外推有关结论。与此同时，欧盟主要国家也在积极开展包括冲击点火在内的直接驱动相关研究，但是欧洲目前也不具备实质性开展直接驱动相关研究的大型激光装置。

关键突破点

自 2010 以来，美国利弗莫尔国家实验室的科学家进行了多次实验，虽然在最新的实验中产生了 1.9×10^{16} 个中子，聚变能达到了 54kJ，但距离

实现真正的点火和增益大于 1 的目标还有难以预估的距离。下面列举激光核聚变研究面临的部分关键挑战和物理问题：

- (1) 入射激光总能量转化为靶丸内爆能量的效率太低，如何提高转化效率？
- (2) 现有 ICF 聚爆过程中密度压缩和温度提升是耦合在一起的，能否将压缩过程与加热过程分离？
- (3) 激光等离子体相互作用不稳定性不仅造成激光能量的散射，而且可能会由于超热电子的预热导致压缩困难，能否有效控制激光等离子体相互作用过程中不稳定性？
- (4) 在球对称聚爆过程中，能否有效控制等离子体流体力学不稳定性的非线性增长？

针对以上物理问题，我国科学家提出了独具特色的激光聚变点火新方案，在激光-靶丸耦合效率、辐照均匀性、不稳定性抑制等方面均具有一定的优势，有望成为实现 ICF 聚变点火的新途径。这些独具特色的点火方案为激光聚变研究提供了全新思路，有望对解决目前 ICF 研究遇到的困难和关键问题起到重要作用。

战略意义

从长远角度来看，激光聚变的成功将一劳永逸地解决人类能源问题，为我们带来巨大的经济和社会效益，同时，激光聚变研究也对国家战略安全意义重大。

在美国 NIF 间接驱动技术方案没有实现真正点火、欧盟直接驱动技术路线进展缓慢的国际形势下，我国科学家提出了独具特色的点火方案。这些方案在提升激光-靶丸耦合效率、辐照均匀性、抑制不稳定性等方面均