



九层之台，起于累土^①

白春礼

近代科学诞生以来，科学的光辉引领和促进了人类文明的进步，在人类不断深化对自然和社会认识的过程中，形成了以学科为重要标志的、丰富的科学知识体系。学科不但是科学知识的基本单元，同时也是科学活动的基本单元：每一学科都有其特定的问题域、研究方法、学术传统乃至学术共同体，都有其独特的历史发展轨迹；学科内和学科间的思想互动，为科学创新提供了原动力。因此，发展科技，必须研究并把握学科内部运作及其与社会相互作用的机制及规律。

中国科学院学部作为我国自然科学的最高学术机构和国家在科学技术方面的最高咨询机构，历来十分重视研究学科发展战略。2009年4月与国家自然科学基金委员会联合启动了“2011~2020年我国学科发展战略研究”19个专题咨询研究，并组建了总体报告研究组。在此工作基础上，为持续深入开展有关研究，学部于2010年底，在一些特定的领域和方向上重点部署了学科发展战略研究项目，研究成果现以“中国学科发展战略”丛书形式系列出版，供大家交流讨论，希望起到引导之效。

根据学科发展战略研究总体研究工作成果，我们特别注意到学科发展的以下几方面的特征和趋势。

一是学科发展已越出单一学科的范围，呈现出集群化发展的态势，

^① 题注：李耳《老子》第64章：“合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土；千里之行，始于足下。”

呈现出多学科互动共同导致学科分化整合的机制。学科间交叉和融合、重点突破和“整体统一”，成为许多相关学科得以实现集群式发展的重要方式，一些学科边界更加模糊。

二是学科发展体现了一定的周期性，一般要经历源头创新期、创新密集区、完善与扩散期，并在科学革命性突破的基础上螺旋上升式发展，进入新一轮发展周期。根据不同阶段的学科发展特点，实现学科均衡与协调发展成为了学科整体发展的必然要求。

三是学科发展的驱动因素、研究方式和表征方式发生了相应的变化。学科的发展以好奇心牵引下的问题驱动为主，逐渐向社会需求牵引下的问题驱动转变；计算成为了理论、实验之外的第三种研究方式；基于动态模拟和图像显示等信息技术，为各学科纯粹的抽象数学语言提供了更加生动、直观的辅助表征手段。

四是科学方法和工具的突破与学科发展互相促进作用更加显著。技术科学的进步为激发新现象并揭示物质多尺度、极端条件下的本质和规律提供了积极有效手段。同时，学科的进步也为技术科学的发展和催生战略新兴产业奠定了重要基础。

五是文化、制度成为了促进学科发展的重要前提。崇尚科学精神的文化环境、避免过多行政干预和利益博弈的制度建设、追求可持续发展的目标和思想，将不仅极大促进传统学科和当代新兴学科的快速发展，而且也为人成长并进而促进学科创新提供了必要条件。

我国学科体系系由西方移植而来，学科制度的跨文化移植及其在中国文化中的本土化进程，延续已达百年之久，至今仍未结束。

鸦片战争之后，代数学、微积分、三角学、概率论、解析几何、力学、声学、光学、电学、化学、生物学和工程科学等的近代科学知识被介绍到中国，其中有些知识成为一些学堂和书院的教学内容。1904年清政府颁布“癸卯学制”，该学制将科学技术分为格致科(自然科学)、农业科、工艺科和医术科，各科又分为诸多学科。1905年清朝废除科举，此后中国传统学科体系逐步被来自西方的新学科体系取代。

民国时期现代教育发展较快，科学社团与科研机构纷纷创建，现代

学科体系的框架基础成型，一些重要学科实现了制度化。大学引进欧美的通才教育模式，培育各学科的人才。1912年詹天佑发起成立中华工程师会，该会后来与类似团体合为中国工程师学会。1914年留学美国的学者创办中国科学社。1922年中国地质学会成立，此后，生理、地理、气象、天文、植物、动物、物理、化学、机械、水利、统计、航空、药学、医学、农学、数学等学科的学会相继创建。这些学会及其创办的《科学》《工程》等期刊加速了现代学科体系在中国的构建和本土化。1928年国民政府创建中央研究院，这标志着现代科学技术研究在中国的制度化。中央研究院主要开展数学、天文学与气象学、物理学、化学、地质与地理学、生物科学、人类学与考古学、社会科学、工程科学、农林学、医学等学科的研究，将现代学科在中国的建设提升到了研究层次。

中华人民共和国建立之后，学科建设进入了一个新阶段，逐步形成了比较完整的体系。1949年11月新中国组建了中国科学院，建设以学科为基础的各类研究所。1952年，教育部对全国高等学校进行院系调整，推行苏联式的专业教育模式，学科体系不断细化。1956年，国家制定《十二年科学技术发展远景规划纲要》，该规划包括57项任务和12个重点项目。规划制定过程中形成的“以任务带学科”的理念主导了以后全国科技发展的模式。1978年召开全国科学大会之后，科学技术事业从国防动力向经济动力的转变，推进了科学技术转化为生产力的进程。

科技规划和“任务带学科”模式都加速了我国科研的尖端研究，有力带动了核技术、航天技术、电子学、半导体、计算技术、自动化等前沿学科建设与新方向的开辟，填补了学科和领域的空白，不断奠定工业化建设与国防建设的科学技术基础。不过，这种模式在某些时期或多或少地弱化了学科的基础建设、前瞻发展与创新活力。比如，发展尖端技术的任务直接带动了计算机技术的兴起与计算机的研制，但科研力量长期跟着任务走，而对学科建设着力不够，已成为制约我国计算机科学技术发展的“短板”。面对建设创新型国家的历史使命，我国亟待夯实学科基础，为科学技术的持续发展与创新能力的提升而开辟知识源泉。

反思现代科学学科制度在我国移植与本土化的进程，应该看到，20世纪上半叶，由于西方列强和日本入侵，再加上频繁的内战，科学与救亡结下了不解之缘，新中国建立以来，更是长期面临着经济建设和国家安全的紧迫任务。中国科学家、政治家、思想家乃至一般民众均不得不以实用的心态考虑科学及学科发展问题，我国科学体制缺乏应有的学科独立发展空间和学术自主意识。改革开放以来，中国取得了卓越的经济建设成就，今天我们可以也应该静下心来思考“任务”与学科的相互关系，重审学科发展战略。

现代科学不仅表现为其最终成果的科学知识，还包括这些知识背后的科学方法、科学思想和科学精神，以及让科学得以运行的科学体制、科学家的行为规范和科学价值观。相对于我国的传统文化，现代科学是一个“陌生的”“移植的”东西。尽管西方科学传入我国已有一百多年的历史，但我们更多地还是关注器物层面，强调科学之实用价值，而较少触及科学的文化层面，未能有效而普遍地触及到整个科学文化的移植和本土化问题。中国传统文化以及当今的社会文化仍在深刻地影响着中国科学的灵魂。可以说，迄20世纪结束，我国移植了现代科学及其学科体制，却在很大程度上拒斥与之相关的科学文化及相应制度安排。

科学是一项探索真理的事业，学科发展也有其内在的目标，即探求真理的目标。在科技政策制定过程中，以外在的目标替代学科发展的内在目标，或是只看到外在目标而未能看到内在目标，均是不适当的。现代科学制度化进程的含义就在于：探索真理对于人类发展来说是必要的和有至上价值的，因而现代社会和国家须为探索真理的事业和人们提供制度性的支持和保护，须为之提供稳定的经费支持，更须为之提供基本的学术自由。

20世纪以来，科学与国家的目的不可分割地联系在一起，科学事业的发展不可避免地要接受来自政府的直接或间接的支持、监督或干预，但这并不意味着，从此便不再谈科学自主和自由。事实上，在现当代条件下，在制定国家科技政策时充分考虑“任务”和学科的平衡，不但是最大限度实现学术自由、提升科学创造活力的有效路径，同时也是

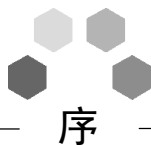
让科学服务于国家和社会需要的最有效的做法。这里存在着这样一种辩证法：科学技术系统只有在具有高度创造活力的情形下，才能在创新型国家建设过程中发挥最大作用。

在全社会范围内创造一种允许失败、自由探讨的科研氛围；尊重学科发展的内在规律，让科研人员充分发挥自己的创造潜能；充分尊重科学家的个人自由，不以“任务”作为学科发展的目标，让科学共同体自主地来决定学科的发展方向。这样做的结果往往比事先规划要更加激动人心。比如，19世纪末德国化学学科的发展史就充分说明了这一点。从内部条件上讲，首先是由于洪堡兄弟所创办的新型大学模式，主张教与学的自由、教学与研究相结合，使得自由创新成为德国的主流学术生态。从外部环境来看，德国是一个后发国家，不像英、法等国拥有大量的海外殖民地，只有依赖技术创新弥补资源的稀缺。在强大爱国热情的感召下，德国化学家的创新激情迸发，与市场开发相结合，在染料工业、化学制药工业方面进步神速，十余年间便领先于世界。

中国科学院作为国家科技事业“火车头”，有责任提升我国原始创新能力，有责任解决关系国家全局和长远发展的基础性、前瞻性、战略性重大科技问题，有责任引领中国科学走自主创新之路。中国科学院学部汇聚了我国优秀科学家的代表，更要责无旁贷地承担起引领中国科技进步和创新的重任，系统、深入地对自然科学各学科进行前瞻性战略研究。这一研究工作，旨在系统梳理世界自然科学各学科的发展历程，总结各学科的发展规律和内在逻辑，前瞻各学科中长期发展趋势，从而提炼出学科前沿的重大科学问题，提出学科发展的新概念和新思路。开展学科发展战略研究，也要面向我国现代化建设的长远战略需求，系统分析科技创新对人类社会发展 and 我国现代化进程的影响，注重新技术、新方法和新手段研究，提炼出符合中国发展需求的新问题和重大战略方向。开展学科发展战略研究，还要从支撑学科发展的软、硬件环境和建设国家创新体系的整体要求出发，重点关注学科政策、重点领域、人才培养、经费投入、基础平台、管理体制等核心要素，为学科的均衡、持续、健康发展出谋划策。

2010年，在中国科学院各学部常委会的领导下，各学部依托国内高水平科研教育等单位，积极酝酿和组建了以院士为主体、众多专家参与的学科发展战略研究组。经过各研究组的深入调查和广泛研讨，形成了“中国学科发展战略”丛书，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。学部诚挚感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家们！

按照学部“十二五”工作规划部署，学科发展战略研究将持续开展，希望学科发展战略系列研究报告持续关注前沿，不断推陈出新，引导广大科学家与中国科学院学部一起，把握世界科学发展动态，夯实中国科学发展的基础，共同推动中国科学早日实现创新跨越！



序

中国科学院根据中国科技发展战略布置各学部按专业研究学科前沿及发展战略，在面临我国由大国走向强国的背景下，核物理与等离子体物理作为现代物理学的重要组成部分，其发展战略尤为重要。本书分析学科构成、前沿布局，同时用一定的笔墨描述了我国的学科基础和发展愿景。目前，我国在这个学科处于国际同行的第二方阵，有个别方向的突破成为国际同行的范例，列入新发展规划的研究也显示一定的先机。

本战略研究考虑到核与等离子体在物质层次相交，涉及共同的新兴交叉前沿，如高能量密度物质（核、原子），在能源和国家安全领域应用和研究有机衔接，因此形成一个战略研究报告，本书包括核物理与等离子体物理两卷。

上册核物理卷，共八章。前五章为强子、核物质、核结构、核天体物理及大科学研究装置，其中，首次根据国际划分方法把强子物理列入核物理学科。后三章为核技术与应用及学科交叉，根据我国能源发展重点把先进核裂变能突出为第七章。

下册等离子体物理卷，分为六章。根据学科重大需求，前两章为惯性聚变和磁约束聚变及大型研究装置，第三章为基础等离子体物理，后三章为等离子体技术与应用及学科交叉，其中第四章突出了强场激光等离子体。


从战略层面较全面、详实地描述和分析了核物理及等离子体物理领域发展的动态和趋势，并给出我国发展战略的建议，这是本书的特点，也是 30 多位老中青一线科研骨干的智慧和辛勤工作的结果；书中列举

的一批现有和建议未来建设的研究装置可以看出该学科的发展轨迹，要切忌“重硬轻软”“存在就是合理”，未来大型研究装置的建设和选择还需要进一步优化，更需要注重错位发展和提升国际竞争力。

本书的出版特别要感谢王乃彦院士，他欣然接受担任中国科学院数理学部核物理与等离子体物理学科发展战略研究组组长，以他广博的知识和丰富的阅历，高效地召集 30 多位老中青专家共同研讨，兢兢业业完成这本书。

詹文龙

时任中国科学院数理学部主任



前 言

受中国科学院数学物理学部的委托,本书从核物理与等离子体物理中长期发展趋势方面提炼科学发展的重大科学问题,结合我国学科发展和国家需求,提出在今后一段时间内(到 2030 年左右)我国核物理与等离子体物理发展战略的建议;按照学部要求,结合我国科学家在核物理和等离子体领域中的主要贡献和有影响的重要工作,从而分析和判断我国科学界在本学科中的地位 and 影响,为进一步提升我国科技界在该领域中的创新能力提供参考和借鉴。

原子核作为物质结构的一个重要层次,核物理在原子物理、核物理和粒子物理中起着承上启下的作用,是物理学中的一个重要的组成部分。原子核物理研究的问题以强相互作用为主,也涉及弱相互作用和电磁相互作用。自然界的基本对称性之一——弱相互作用宇称不守恒的实验验证,就是 20 世纪 50 年代最先在原子核的 β 衰变中确认的。原子核物理在 21 世纪展现了两个重要的发展方向,同时也是 21 世纪物理学发展的重要前沿。

(1) 强相互作用理论和标准模型的探索与发展。探索和发展强相互作用理论及检验和发展标准模型是 21 世纪物理学的前沿,是核物理和粒子物理的共同目标。核物理在这项研究中起着重要和不可替代的作用,这方面的主要领域有相对论重离子碰撞、高能连续束电子和核的相互作用以及高能强子和核的相互作用。

(2) 通过对远离稳定线新核素的研究,检验和发展稳定区建立的核理论,探索新的双幻核、合成宇宙元素的新路径、单粒子能级、剩余相互作用及多体关联,发现新的超形变,探索新的放射性衰变,检验标准

模型及电弱统一理论。

原子核物理研究中开发的许多实验技术和理论方法已广泛地应用于现代物理学的其他学科，同时核物理和其他学科相结合，形成了许多交叉学科。

核能(包括裂变能和聚变能)是原子核研究的一个重要的应用领域。裂变能已成为经济建设和社会发展所必需的重要能源之一，半个世纪以来还不断为更丰富和更理想的聚变能而努力，以期最终更有效地解决能源的问题。此外，核技术也广泛地应用于医学、工业、农业和环保等领域，我国核物理、核技术和核工业及其支撑行业构成的体系，为我国的能源工业建设和国防建设提供了保证。

等离子体是由大量带电粒子组成的系统，等离子体状态是物质存在的基本形态之一，等离子体物理是研究等离子体的基本运动规律。由于粒子间存在着长程库仑相互作用，因此等离子体的运动与电磁场紧密结合，存在着极其丰富的集体效应和集体运动的模式。等离子体物理学是以等离子体的整体形态和集体运动规律，等离子体和电磁场与其他形态物质的相互作用为主要研究对象的。

按照应用目标和参数，等离子体物理基本上可以分为：

(1)高温等离子体物理。高温等离子体研究是核聚变研究的基础，经过几十年的努力，无论在磁约束聚变和惯性约束聚变方面都取得了很大的进展。通过轻核聚变释放巨大能量解决人类能源需求，已成为人类的奋斗目标。然而核聚变中的等离子体是多自由度、高度非线性系统。迄今为止，人们只对少自由度系统和多自由度线性系统有正确的分析方法，而对复杂系统了解得却很少。这种非线性、多尺度的特点，决定了很难从纷纭复杂的现象中总结和归纳出一套完整和普适的理论。从实验出发总结归纳出在特定时空尺度范围内对各种参数的经验定标关系。这就是在核聚变等离子体中要用一定的定标率从低参数的等离子体外推至高参数的等离子体时要特别注意的问题，即这种定标率及用这种定标率推出的计算程序的可置信度。事实证明，运用那

些未经过实验验证的定标率和计算程序作为指导来进行实验装置的升级，往往会造成升级后装置不能达到原来的设计指标。目前国际聚变研究重点仍然应该是进一步夯实聚变的物理基础，特别是对实验定标关系外推可靠性的验证和相关物理基础的研究，发展更好的诊断手段和物理模型，持续不断地改善对高温等离子体的理解，提高对等离子体性能的测量诊断的能力。

(2) 空间与天体等离子体物理。空间与天体等离子体物理是研究宇宙中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，空间与天体所研究的各种对象都涉及等离子体，因而等离子体物理既是空间物理和天体物理的基础，又是人类认识宇宙各种现象的锐利武器。

(3) 低温等离子体物理。社会需求的牵引及其具有其他技术不可替代性是低温等离子体技术发展的一个重要的特点。非平衡大气压等离子体放电（包含介质阻挡放电、冷射流放电、射频大气压放电、微空心放电等）机理的实验和模拟研究极大地促进了其在材料表面处理、灭菌、甲烷转化等方面的应用。人们对电弧等离子体产生及控制的研究，推动了它在材料表面喷涂处理、煤的裂解与汽化、有害废物的处理、离子推进器等方面的应用。

(4) 基础等离子体物理。基础等离子体物理的主要目标是探索新现象，研究新问题，等离子体中存在着丰富的波与不稳定性、非线性现象，这些问题的研究将导致新的发现和理论上的新突破，促进等离子体物理的发展。

为此，三十名专家组成了项目研究组，开展了近两年的深入调查研究，经过多次的报告会并听取广泛的同行、专家意见后，又做了认真的修改，现在整个报告已经成文了。项目组认为这份报告是三十位专家（还有许多撰写的专家）和工作人员近两年辛勤劳动的结晶，尤其是目前工作在我国核物理和等离子体物理领域第一线的中青年科技骨干和学

术带头人，他们在繁忙的科研工作中抽出宝贵的时间，以高度认真负责的态度撰写了自己负责的那部分报告，年长的院士们对他们撰写的报告提出了许多宝贵的意见，给予了许多帮助和指导。

这份报告较全面深入地分析了核物理和等离子体物理领域中国内外发展的动态和趋势，指出了学科发展中的一些重大科学问题，可供科技领导机构在今后制定发展规划和政策时借鉴和参考，也可供从事核物理和等离子体物理及其相关领域的科研人员和相关专业的研究生学习参考。因为它较系统深入地论述了在核物理和等离子体物理最新发展中存在的问题，而这些内容是在一般教材和科技论文中找不到的。我相信研究生和科技工作者认真阅读这份报告时一定会有所收益的，正是基于这种考虑，才将原来只准备给中国科学院数学学部的报告发表，供读者阅读。

项目秘书组为研究报告的完善和最后成文做了大量的工作，在此表示感谢。

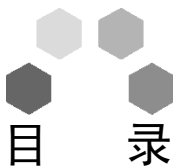
由于核物理和等离子体物理所涵盖的内容非常广泛，并且其发展十分迅速，报告中会存在不当之处，望读者给予批评与指正。

王乃彦

中国科学院数学学部

核物理与等离子体物理学科发展战略研究组组长

2017年1月31日



上册：核物理卷

发展战略研究概述.....	1
一、科学背景与发展趋势.....	1
二、主要研究领域及其发展思路和建议.....	3
参考文献.....	19
第一章 强子物理.....	20
1.1 引言.....	20
1.2 核子结构与 EIC 计划.....	21
1.2.1 物理背景.....	21
1.2.2 核子结构研究概况.....	22
1.2.3 核子结构实验和国内外 EIC 计划.....	32
1.3 强子谱研究现状及发展建议.....	37
1.3.1 强子谱研究概况.....	37
1.3.2 我国强子谱相关大科学装置发展建议.....	42
1.4 核子宇称破坏过程研究及后续发展.....	44
1.4.1 核子宇称破坏概述.....	44
1.4.2 宇称破坏的介子核子相互作用.....	45
1.4.3 核子宇称破坏过程的实验进展和展望.....	47
1.5 小结.....	51
参考文献.....	53
第二章 核物质性质和相图.....	57
2.1 引言.....	57
2.2 量子色动力学与核物质相结构.....	59



2.2.1	解禁闭	60
2.2.2	手征对称性及其恢复	62
2.2.3	微扰 QCD	63
2.3	核子自由度的强作用物质	63
2.3.1	核物质状态方程和对称能	65
2.3.2	对称核物质状态方程	65
2.3.3	对称能及其探针	66
2.3.4	核子平均场势	69
2.3.5	中低能重离子碰撞模型	70
2.3.6	核物质液气相变	72
2.3.7	核子-核子短程关联	74
2.4	探索夸克-胶子等离子体的实验进展	76
2.4.1	高能重离子碰撞实验研究现状	77
2.4.2	重离子碰撞中的反物质产生和反物质相互作用的测量	91
2.4.3	理论进展	97
2.5	小结	113
	参考文献	114
第三章	核结构和动力学	121
3.1	引言	121
3.2	核力与核多体理论的新发展	123
3.2.1	核子-核子相互作用	123
3.2.2	壳模型和从头计算模型的新发展	127
3.2.3	密度泛函理论	135
3.3	不稳定核的基本性质与同位旋对称性	148
3.3.1	不稳定核的基态性质	148
3.3.2	原子核中的对称性	154
3.4	新幻数与壳演化	158
3.4.1	引言	158
3.4.2	核子间的有效相互作用	158
3.4.3	张量力在远离稳定线壳演化中的作用	160
3.4.4	传统幻数的演化	161
3.5	集团结构与共振态	172

3.5.1 引言	172
3.5.2 稳定核中的集团结构	174
3.5.3 不稳定核中的集团结构	178
3.5.4 中重核的 α 衰变与核结构	181
3.5.5 原子核的共振态	183
3.5.6 集团结构和共振态研究的未来发展	187
3.6 反应动力学与超重岛探索	187
3.6.1 核反应机制	187
3.6.2 未来在反应机制研究方面值得关注的问题	195
3.6.3 超重稳定岛与新元素	196
3.7 小结	202
参考文献	203
第四章 核天体物理	207
4.1 引言	207
4.1.1 研究领域简述	207
4.1.2 恒星演化与元素核合成	207
4.1.3 天体核反应研究方法	211
4.2 国外研究进展	213
4.3 我国的研究基础	215
4.4 关键科学问题和未来研究展望	218
4.4.1 关键科学问题	218
4.4.2 未来研究展望	219
4.5 小结	222
参考文献	223
第五章 装置需求和建设	226
5.1 引言	226
5.2 核物理研究对加速器装置的需求	227
5.2.1 中低能核物理研究——核结构、放射性束物理及核天体物理	227
5.2.2 高能核物理研究——高密核物质性质、强子结构和电子-离子碰撞	229
5.3 用于核物理研究的加速器装置和伽马光源装置现状	231



5.3.1	用于中低能核物理研究的加速器装置	231
5.3.2	用于高能核物理研究的加速器装置	240
5.3.3	用于核物理研究的伽马光源装置	242
5.4	基于核物理研究的加速器装置的未来发展	245
5.4.1	下一代放射性束加速器装置发展及其关键技术	245
5.4.2	下一代放射性束加速器装置	248
5.4.3	多用途大型中高能加速器装置	251
5.5	小结	256
	参考文献	260
第六章	核技术及应用	262
6.1	引言	262
6.2	核探测与核分析技术	267
6.2.1	发展状况	267
6.2.2	展望与建议	270
6.3	核影像技术与放射治疗技术	271
6.3.1	发展状况	271
6.3.2	展望与建议	272
6.4	辐射技术及应用	273
6.4.1	发展状况	273
6.4.2	展望与建议	275
6.5	中子源及应用	276
6.5.1	发展状况	276
6.5.2	展望与建议	281
6.6	同步辐射及应用	282
6.6.1	发展状况	282
6.6.2	展望与建议	284
6.7	辐射防护	285
6.7.1	发展状况	285
6.7.2	展望与建议	288
6.8	小结	289
	参考文献	290

第七章 先进核裂变能装置	292
7.1 引言	292
7.2 核裂变能技术发展动向分析	292
7.2.1 核裂变能技术现状与问题	292
7.2.2 核裂变能技术发展动向	294
7.2.3 先进核裂变能装置的要求	295
7.3 加速器驱动的次临界系统	296
7.3.1 ADS 系统的现状与挑战	297
7.3.2 加速器驱动先进核能系统	299
7.4 钍基核能系统	300
7.4.1 熔盐堆物理和钍铀循环	301
7.4.2 熔盐冷却剂和回路技术	302
7.4.3 熔盐堆材料技术	303
7.4.4 化学后处理技术	304
7.5 小结	305
参考文献	306
第八章 核数据	309
8.1 引言	309
8.2 核数据测量平台与方法	311
8.2.1 中子源	311
8.2.2 探测器技术	314
8.2.3 新型核数据测量方法	316
8.3 中子核数据精确测量研究	317
8.3.1 裂变核反应数据测量	317
8.3.2 轻核与中重核反应数据测量	320
8.4 核数据评价	321
8.4.1 全套中子数据研究	321
8.4.2 裂变核反应数据理论	327
8.4.3 轻核反应数据理论	333
8.4.4 核结构数据评价	337
8.4.5 核质量数据研究	339
8.5 核数据群常数制作	342

8.6 核数据可靠性研究.....	350
8.6.1 核数据宏观检验.....	350
8.6.2 核数据协方差研究.....	355
8.6.3 核数据灵敏度-不确定度分析.....	360
8.6.4 核数据调整方法.....	364
8.7 原子、分子数据研究.....	366
8.8 小结与展望.....	372
参考文献	374

彩图



发展战略研究概述

一、科学背景与发展趋势

物质结构以层次划分，复杂性与简单性交替，根源于相互作用（含有效相互作用）的种类和层次内外的既显著区别又密切关联^[1]。原子核和强子是物质结构的微观层次，是典型的量子多体复杂体系（图 1）。微观体系的结构和相互作用，又与宇宙大爆炸之后的宇观过程密切相关，制约着宇宙的演变历史（图 2）。原子核中包含了丰富的内秉自由度与多种基本相互作用，储存着宇宙间绝大部分已知的可释放能量。近百年来，核物理处于物质科学的前沿，对人类的生存与发展 and 国家的地位与安全产生了重大影响，成为衡量综合国力的一项重要标志。核物理在自身发展的同时，还为其他学科提供了重要的理论基础和研究手段。进入 21 世纪，核能和核安全在国家核心利益中的地位愈加显著。在基础研究方面，以兴建若干大科学工程为标志，国际上核物理研究正在继续蓬勃发展并面临重大的突破，并对各国的国防、能源、交叉领域等的发展起了重要的推动作用^[2-4]。

核物理发展的一个重要特点是依靠大科学装置，这是由于探索微观体系需要极短波长（对应高能量）的探针所决定的。反过来，大科学装置的发展又极大地拓展了人类探索微观世界的范围和深度，许多重大突破来自于利用新手段的偶然发现。除了宇宙射线提供的某些天然特殊可能性之外，粒子加速器是研究核物理前沿科学问题的主要大科学装置。与粒子加速器配套的大型实验探测设备，是探索物理过程、开展核物理研究必不可少的工具。

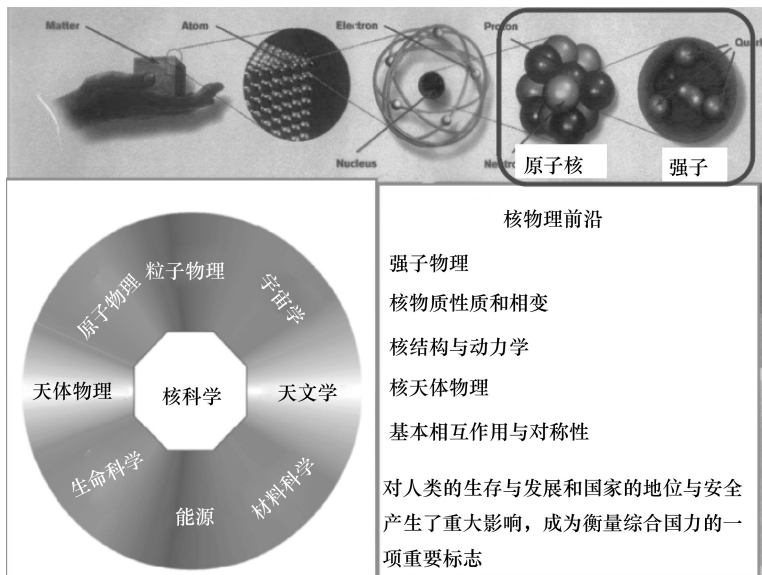


图1 物质的层级结构与核物理的研究前沿

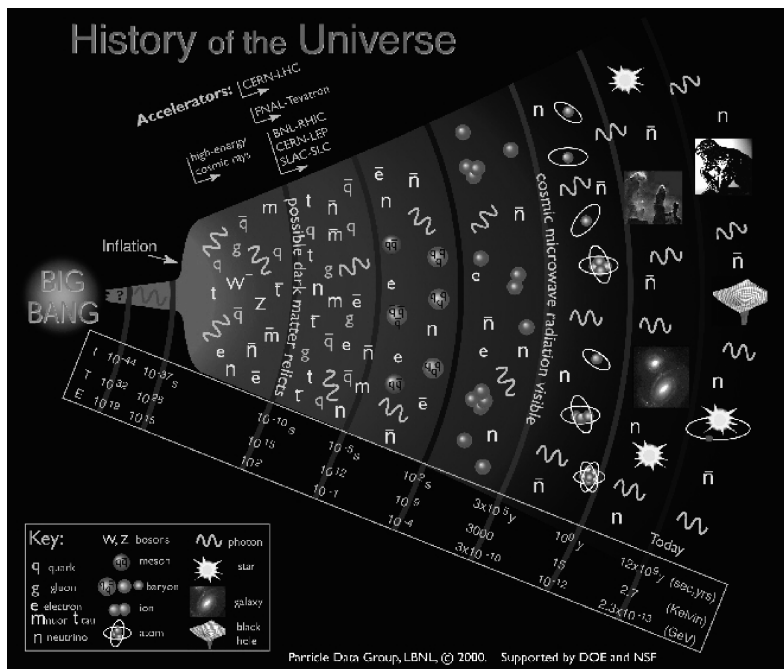


图2 宇宙的历史与核过程

核物理研究涉及国家安全、清洁能源、医疗健康、多学科交叉等一系列重大应用，因此一直以来受到各科技强国的高度重视，是必争的战略高地。各国在基础前沿研究开放合作的同时，对核物理研究中涉及战略高技术的部分又有十分严格的相互限制。因此，在大力加强国际交流合作的同时，我们还必须保持和发扬自力更生的优良传统，立足国内发展核心知识和技术。

二、主要研究领域及其发展思路和建议

核物理研究涉及前沿基础和重大应用两个方面。基础研究方面包括强子物理、核物质性质和相变、核结构和动力学、核天体物理等领域；重大应用方面包括大型加速器装置、核技术应用、先进核裂变能装置、核数据等领域。基于各国的学术传统、装置和技术发展、队伍传承等，这些领域的研究在不同国家和地区各有侧重^[2-4]，下面分别对其进行阐述。

1. 核物理前沿研究

1) 强子物理

强子，包括介子和重子，是能从物质中分离出来的、已观测到的具有内部结构的最小单元。强子内部的夸克-胶子结构以及可能存在的新强子态是当今人类正在探索的物质世界的最微观部分，是中高能核物理和粒子物理共同关心的交叉前沿热点。

强子结构是由强相互作用决定的，量子色动力学（QCD）是描述微观世界强相互作用的基本理论。但是由于 QCD 非阿贝尔低能非微扰特性，我们还很难从 QCD 基本拉氏量出发直接推导出强子的性质和结构。虽然原则上格点 QCD 方法可以直接计算强子的性质，但考虑到目前计算机的运算能力，在可以预见的未来，利用它来系统地研究强子的性质还不太现实。由于至今还没有能力解析地求解 QCD，人们对禁闭区非微扰 QCD 的了解非常贫乏，所以对禁闭区非微扰 QCD 的研究已成为目前粒子物理标准模型最主要的挑战性难题。目前主要是通过实验观测和基于 QCD 启发的唯象模型及有效理论，探索在 QCD 非微扰区夸克和胶子是如何通过色禁闭构成强子以及强相互作用的性质，从而解释我们现实世界物质的构成和性质，同时寻找超出标准模型的新物理。强子中的核子是可见物质世界的基础，占可见物质的 99% 以上，是组成物质世界的“原材料”。然而，核子质量的 90% 不是来源于由 Higgs 机制产生的流夸克质量，而是 QCD 理论的手征对称性自发破缺。所以，研究强子内部结构和强子谱对于质量起源具有十分重要的意义，相

关的动力学机制是构成可见的物质世界最重要的基础之一。强子物理是原子核物理、基本粒子物理、宇宙天体演化物理的重要组成部分。

强子物理实验主要分为三类：一是测量自然界存在的唯一稳定的强子-核子的夸克-胶子结构函数；二是研究各种强子激发态能谱及其衰变性质；三是研究核力的宇称破坏过程。

强子谱、强子结构和强子相互作用的理论和实验探索是中高能核物理和粒子物理共同关注的交叉前沿课题。经过半个多世纪的努力，人类已经在这些方面取得了很大的成功，但是依然存在许多根本的具有挑战性的问题有待进一步研究。

在核子结构方面，即将建成投入使用的 JLAB 的高亮度电子束流 12GeV 升级设备有望在核子多维夸克-胶子分布函数方向上取得突破性进展。中国实验物理学家正积极参与和领导正在筹建的 JLAB SOLID 的大型项目，除了有望取得重大物理结果，在先进探测器技术掌握和人才培养等方面也将取得重要进步和突破。关于在 JLAB 的 12GeV 升级设备之后该领域的进一步发展，国际核物理界已基本形成共识：更高能量的高亮度电子-重离子对撞机（EIC）将是研究核子、原子核内夸克-胶子分布的最有效设备。美国和欧洲都在考虑建造此类对撞机。我国若能在已获国家批准建造的强流重离子加速器装置（HIAF）之处增建一台强流高能电子加速器，在 2020 年左右实现 EIC@HIAF，就能在 5~10 年甚至更长时间内在这一基础科学与相关技术研究领域处于世界领先地位，使我国的核子结构研究在激烈的国际竞争中走在世界前列，同时在强子谱和核子宇称破坏等方面做出国际贡献。

在强子谱方面，目前活跃在这个领域的实验有我国的 BESIII，德国波恩的 ELSA 和 CERN 的 COMPASS 等。即将建成 JLAB 的 12GeV 升级设备、日本的超级 B 工厂 Belle-II 和 JPARC 的 K 介子束流实验等也将加入这一重要前沿领域的激烈竞争。我国 BES 实验已经在粲物理和轻强子谱研究方面取得了一批具有世界领先水平的创新性物理成果，特别是在轻强子谱和粲偶素谱学方面具有独特的优势，在强子谱研究方面积累了丰富的经验，在国际上占有一席之地。我国不应放弃这一重要前沿阵地，可以考虑建造更高亮度的超级 τ -粲工厂，可以开展的重要强子谱研究课题包括 XYZ 新强子态和高奇异数的超子激发态谱等。我国新近建成的大科学工程兰州重离子加速器冷却储存环（CSR）或在建的 HIAF 也可考虑提供高亮度的质子束流，并增建一个 4π 立体角强子探测器，寻找与 $p+p$ 耦合强的“失踪”的 Δ^{*++} 重子激发态、与 σp 耦合强的“失踪”的 N^* 核子激发态及含有较多奇异夸克成分的重子激发态机双重子态，使我国在核子-核子碰撞相关强子物理走在世界前列。

在核子宇称破坏方面,国际上未来几年主要会在 JLAB 的 12GeV 升级设备中通过新设计的 SOLID 实验开展宇称不守恒的电子散射测量,预期的精度将比目前提高一个数量级,将对标准模型的预言提供极为精确的检验,有望发现在标准模型之上可能存在的新物理。我国正在兴建的两大科学装置——加速器驱动次临界系统(ADS)和强流重离子加速器(HIAF)——都有望提供国际上最高亮度的强流质子束流,如果能研发配备相应的探测器系统,将能够利用极化的质子束流精确地测量核子-核子宇称破坏,为发现超出标准模型的新物理奠定坚实的基础,使我国在这一中高能核物理研究重要前沿方向走在国际前列,并促进我国在相关领域的技术进步。已经建成的兰州重离子加速器冷却储存环、上海同步辐射光源和东莞散裂中子源也都可以考虑开展原子核宇称混合态方面的研究。

为了能使我国未来大型物理实验装置充分发挥其潜力,健康可持续发展,加强与之相应的理论研究是非常有必要的。利用现有的有效理论对实验做出理论预言,可以对新实验方向给予理论指导;理论与实验结合,可以加强对现有数据的物理分析,对实验结果的理论研究,探讨物理现象的唯象规律及物理内涵以发展理论。同时,理论与实验结合有利于培养更加全面发展的研究生,培养国际一流的青年后备力量。只有这样才能使国家投巨资建设的大科学工程及国际合作充分发挥作用,不断做出大量的具有国际领先水平的成果。

2) 核物质性质和相图

得益于现代加速器和探测器技术的高速发展,高能核物理在过去几十年取得了巨大的成功。国际社会和政府的持续高投入,使得大科学装置建设和连续运行得到保障。一些重大的前沿学科问题也正在得到逐步的攻克。然而要彻底搞清楚核物质在不同温度、密度下的性质和相图,仍有一些关键的科学问题没有解决,这些问题将成为今后研究的热点和难点。简而言之,可以归为三个主要方面的问题:

(1) QCD 相变临界点的确定。尽管目前已经测量了很多实验观测量,通过研究它们的能量依赖性,存在由部分子相到强子相的相变现象,但是一级相变和二级相变的交汇点,即相变临界终点的确定仍是一个非常大的难点。未来相对论重离子对撞机(RHIC)将在更多的能量点寻找相变临界点,同时增加现有能量点的数据统计量,相变临界点有望在所在范围得到缩小乃至最终确定。

(2) 强耦合夸克-胶子物质的性质研究。目前已经基本断定在 RHIC 最高能量下的金核+金核碰撞和大型强子对撞机(LHC)能量下的铅核+铅核的碰撞中产生

了退禁闭的强耦合性质的夸克-胶子物质。目前 2.76TeV 的铅核+铅核碰撞的一切物理现象看上去和 RHIC 能量下 200GeV 的金+金碰撞保持了很好的一致。接下来更高能量的 5.5TeV 的铅核+铅核碰撞将提供更多的粒子多重数和更长的夸克-胶子物质寿命,这将有助于我们更好地理解 and 发现强耦合性质的夸克-胶子物质的性质。完整的理论模型的开发以及用于分析累积的实验数据将帮助我们更精确地提取强耦合性质的夸克-胶子物质的物理性质。

(3) 对称能的密度依赖性。相比于亚饱和密度的对称能,过饱和密度的对称能仍然非常不确定,不同研究甚至给出截然相反的结果。这里主要的问题是模型的依赖性非常强,而且模型中的可调参数相对较多,因此如何减小对模型和参数的依赖性将是下一步研究的重要方向。同时,一个成功的模型,必须用同一套参数能很好地描述多个实验观测量。另外,一些新的因素,如核子的短程关联、张量力、自旋-轨道作用、磁场等因素也需要在模型中得到综合考虑。作为当前热门课题,对过饱和密度的对称能尚需进行进一步研究。

为了解决以上问题,高能核物理的装置的持续运行和更新,甚至新的装置的建设是必须的。目前一些高能核物理装置的下一步升级计划也逐步清晰:

(1) RHIC 探测器升级分近期(到 2020 年)和长期(到 2025 年)两个阶段。近期来讲,RHIC 研究的焦点还是重离子对撞系统中高温高密核物质性质研究;长期来讲,RHIC 将从重离子对撞机逐步过渡到电子离子对撞。

(2) LHC-ALICE 实验组:计划在 2018 年完成核心径迹探测器系统 (Inner Tracking System) 的升级,使得 ALICE 对于夸克-胶子等离子体性质有更精确的测量和更深刻的理解。

(3) HIRFL-CEE 和 HIAF:兰州重离子加速器-冷却储存环 (HIRFL-CSR) 可以提供入射能量在 0.5~1.2GeV 的重至铀的各种离子束流。推荐尽快建设“低温高密核物质探测谱仪”(CSR External-target Experiment, CEE),该谱仪的建成有望在 QCD 相图的低温高密段发挥独特的作用。同时,我国“高流强加速器装置”(HIAF)的建设将进一步推动在我国低温高密核物质的实验研究。

3) 核结构和动力学

当今核结构与动力学的前沿研究主要针对不稳定原子核,称为放射性核束物理或稀有同位素物理等(可通称 RIB 物理)。自 1896 年核科学诞生以后直到 20 世纪 80 年代初,人类研究的原子核(核素)只有几百个(其中稳定核不到 300 个),这些核通常有比较大的结合能(平均每个核子若干 MeV),因此可称为深束缚原子核(或稳定原子核),它们的结构基本上可以通过平均场、壳模型等加以描

写。自 1985 年在美国伯克利国家实验室的放射性束实验开始，人类研究的核素数目迅速扩大，目前实验上已产生了近 3000 种，而理论预言总共有 8000~10000 个核素。不稳定线原子核的结合能逐渐减小，直到最后一个核子结合能为 0 的边界（滴线）。在滴线区，原子核成为弱束缚的开放体系（open system），体积可以大大扩张，结构形态和有效相互作用的性质发生显著变化，传统核理论的描写面临根本性变革。在初期的研究中已有的重大发现包括：三体力 and 张量力等在非稳定核有效相互作用中的突出作用；幻数和壳层在非稳定核区发生系统演变；晕和集团等新的结构自由度在滴线区明显加强；软巨共振等新的集体运动模式；核反应中的多步过程和强耦合效应；同核异能素大量出现，等等。但受实验装置条件的限制，过去的研究还集中在较轻核的范围，质子滴线到 $Z=30$ 左右，中子滴线只到 $Z=8$ 左右。大部分滴线区域，特别是丰中子一侧，仍然难以企及。可以期待随着研究区域继续向更重和更靠近滴线的弱束缚区域扩展，还会发现更加丰富的科学宝藏。

远离稳定线核的研究，又与平稳和爆发性天体过程以及核物质状态方程密切相关，涉及当今国际重要前沿交叉科学问题。合成超重元素、登上“超重核稳定岛”，是人类半个多世纪以来的梦想。非稳定丰中子核的大量产生和深入研究，特别是关键丰中子核的熔合反应或大质量转移反应机制的研究，有可能提供进入“超重核稳定岛”的新途径，实现重大突破。在原子核稳定性极限区域探索新现象、新规律的基础研究，必然产生众多新的核样本和核数据，引起实验方法和技术的重大变革和创新，从而有可能在核材料、核能装置、核探测等方面带来难以估量的重大应用。

正是由于有激动人心的物理目标引导，目前国际上已经和正在推出若干大型第三代 RIB 装置，如日本理化所的 RIBF-BigRIPS、德国的 GSI-Super-FRS、法国的 GANIL- SPIRAL2、美国的 FRIB、韩国 RAON 等。我国在 20 世纪七八十年代选择了中低能重离子物理作为主导发展方向，建成了兰州重离子加速器和北京串列加速器等一批大科学装置，并开展了系列研究工作。从 20 世纪 90 年代中期开始，与国际上的发展潮流相一致，中低能重离子核物理逐步转向热点的 RIB 物理，建成了 HIRFL-RIBLL 和 CIAE-GIRAFFE 放射性束流线，特别是兰州的冷却储存环大科学工程 HIRFL-CSR 已于 2008 年开始逐步投入使用，北京放射性核束装置（BRIF）最近也已出束。在首轮“973”项目以及大批基金项目支持下，RIB 物理研究取得了长足进展，形成了较强的国际竞争力。国家已经批准的 HIAF 大装置和北京 ISOL 装置，将为未来 15 年左右我国核结构和动力学研究整体上实现历史性的跨越提供难得的机遇。

未来发展的建议：

(1) 加强实验设备建设。围绕现有设备持续发展和改进束流装置与探测设备，同时在新建装置过程中充分重视物理实验设备的规划和建设。实际上国际上著名的核科学装置发挥作用都有一个持续完善提高的过程，不断拓展研究内容和产生高水平成果。实际上大量研究工作和成果是难以事先预计的，是在探索过程中不断发现、提出、发展和实现的。原来我国的投资方式中缺少物理实验设备的部分，大大延缓了大装置作用的发挥，今后应该加以改进。目前我们需要特别关注国家较大规模投资的仪器专项，尽可能用于补充和提高物理实验研究能力。

(2) 持续组织好重大科研项目，促进理论、实验、设备建设的紧密结合。持续稳定的科研项目经费投入，对整体达到国际高水平是至关重要的。RIB 物理、核天体物理和超重研究，已经连续三次得到“973”项目支持，目前效果正在显现出来，逐步进入到理论、实验、探测设备密切结合，形成良性循环的阶段，这是各个课题组经过十几年艰苦努力逐步形成的比较好的状态。在这个基础上继续努力，未来十年有望实现整体性的跨越。因此，持续稳定的项目支持十分关键，也需要做好队伍组织和重大项目申报工作。

(3) 切实加强实验队伍建设。目前 RIB 物理领域国内有一支以 60 后为主要带头人，相对比较年轻的队伍，未来十年应该大有作为。过去十年理论队伍规模扩大较快，但实验队伍受各单位评价体系等的制约，始终难以按合理比例成长，与发达国家相比更是规模太小。近几年在上海交通大学、北京航空航天大学、山东大学等高校这种现状有所改观，但在全国范围、特别是在高校中核物理实验队伍的建设仍然面临巨大困难，这势必严重制约本领域的发展，无法适应核科学和国家核事业的需要。这方面问题的解决还需要全方位的努力和政策与评价体系等的改进。

(4) 大力加强基于实验装置的合作体建设。在 RIB 物理方面，自 2012 年 7 月起成立的 RIBLL 合作组，每年定期召开两次会议，在学术交流、实验合作、设备研制、项目组织、争取国家实验室更大支持等方面发挥了积极作用，未来需要进一步加强组织，发挥效率，特别是大力促进理论、实验、设备的紧密结合，形成学术优势和特点，促进高水平成果产出。

(5) 大力促进基于学术方向的整体性国际合作。在 RIB 物理方面，近年来发展了与德国 GSI 在质量测量方面、与美国 MSU 等在奇特核理论方面(CUSTIPEN)、与日本理化所在 RIB 实验方面等的规模化合作，起到很好的作用。今后需要构建更完善的机制，特别是加强我国在重点发展方向上的国际合作与人才培养。

4) 核天体物理

浩瀚无垠的宇宙中无数闪闪发光的恒星都有形成、演化和死亡的过程。由于恒星内部热核反应释放出来的辐射能量形成向外的压力抗衡引力收缩，导致恒星流体静力学平衡的演化过程非常缓慢。一颗类似太阳的恒星一旦形成，在大约 10^{10} 年的时间内不会发生人们可直接观测到的显著变化。这些核反应不仅是恒星的能源，也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的唯一机制，在原始大爆炸后最初几分钟至恒星寿命终结的宇宙和天体演化过程中起着极为重要的作用。核天体物理是研究微观世界的核物理与宇观世界的天体物理相融合形成的交叉学科，主要目标是宇宙中元素的合成与核反应如何控制恒星的演化和结局。这个充满神秘的交叉学科一直受到国际物理学界的高度重视，被列为基础科学研究的前沿领域之一。美国和欧洲的核科学长程发展规划中均将核天体物理列为核科学研究的前沿方向之一。

目前对于恒星演化和元素起源复杂过程的认知是核物理学家、天体物理学家和天文学家近一个世纪密切合作的结果，至今已有多项成果先后获得了诺贝尔物理学奖。核天体物理虽然取得了显著进展，但关于元素起源及恒星演化仍存在很多亟待破解的难题。

我国核天体物理研究起步较晚，在过去的十几年中，在国家自然科学基金、科技部“973”等项目的支持下，核天体物理实验和理论研究都取得了一些重要进展，但距离国际领先水平仍有较大差距。为加快我国核天体物理研究队伍建设，取得更多原创性科学研究成果，建议国家在以下几方面给予重点部署或支持。

(1) 针对核天体物理关键科学问题，依托我国的大科学装置，如中国原子能科学研究所的串列加速器和即将建成的北京不稳定离子束装置、中国科学院近代物理研究所的次级束流装置和冷却储存环以及中国科学院国家天文台的天文望远镜等研究平台推进我国的核天体物理研究。

(2) 启动一批基于新的大科学平台和实验室的核天体物理研究，如上海激光电子伽马源 (SLEGS)、锦屏深地核天体实验室和强激光核天体物理装置。上海激光电子伽马源有望在未来数年内建成，将为在国内开展光核反应的研究提供一个重要平台。我国锦屏山地下实验室 (CJPL) 提供了直接测量核天体物理关键反应的顶级条件。我国将利用该绝佳条件，利用基金委的重大项目建设地下核天体物理实验室 (JUNA)，并适时启动 JUNA-II 项目。强激光技术发展为核天体物理带来了难得的机遇，应建立以基础科学研究为中心的大型激光核科学实验装置和实验平台，并依托这些装置开展核天体物理研究。

(3) 进一步加强国际合作。核天体物理是一门交叉学科，只有将实验测量的数据结合理论计算，建成数据库，输入核天体物理网络计算，得出特定天体环境的元素丰度分布，进而与天文观测的丰度进行比较，才能得到天体演化过程的全面规律。开展这些研究，数据和团队要求大，单靠一国力量往往无法达到。因此，把各国的核物理和天体物理结合起来、理论和实验结合起来的国际合作非常重要。例如，美国的联合核天体物理中心（JINA）运行以来，大大加强了核天体物理的国际交流，取得了一批优秀成果。

(4) 建立核天体物理跨学科中心。核天体物理是一个多学科高度交融的研究领域，天体物理模型和天文观测方面的进展可能产生对核物理知识的新需求，必须进一步加强这个领域的核物理学家、天体物理学家和天文学家之间的协作。应在基金委中心项目的支撑下，参照美国核天体物理交叉学科中心的做法，建立我国核天体物理跨学科中心。

5) 基本相互作用与对称性

原子核可以作为一个“实验室”来精确检验标准模型中的基本对称性和寻找超出标准模型的新物理。在核物理中的基本相互作用与对称性研究通常依靠一些特殊的微弱过程和特殊手段，我国过去在这方面的研究开展较少，目前正在逐步加强力量，形成重要的研究方向。例如，在强子物理领域开展核子-核子过程宇称破坏方面的研究；利用双 β 衰变研究中微子质量；探测不为0的电偶极矩（EDM）以研究CP破缺等。

2. 核物理相关的重大应用

1) 大型加速器装置

粒子加速器大科学装置是研究核物理前沿科学问题的主要工具。利用粒子加速器装置提供的不同能量、不同种类、高品质的粒子束流（如稳定核离子束、放射性核束、极化和非极化粒子束等）开展相关研究，不断深化对物质微观结构和宇宙演化的认识。反过来，核物理重要前沿领域的研究对粒子加速器大科学装置也提出了迫切的需求。

核物理研究对加速器装置未来发展的需求是高流强、高功率、高亮度、高束流品质、高束流稳定性和加速器高效率、高可靠地稳定运行。一方面，国际加速器领域会持续不断地开展高功率、强流束相关的加速器物理研究，以解决与强流束和束流损失相关的物理问题，同时针对面临的诸多加速器技术挑战开展技术预研和攻关，以发展新技术，突破关键技术瓶颈。在此基础上，未来15~