

# 总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”<sup>①</sup>，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

---

<sup>①</sup> 习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告。北京：人民出版社，2022：33。

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”<sup>①</sup>

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

---

<sup>①</sup> 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). [http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c\\_1127209130.htm](http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm)[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”系列成果以“中国学科及前沿领域 2035 发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

## 总 序

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”

联合领导小组

2023年3月



# 前 言

物质材料是人类文明发展的重要基础。人类对石器、青铜器、铁器、钢和硅基半导体材料的大规模应用可以被用于划分人类文明发展的不同阶段。从这个意义讲，人类文明的发展史也是一部物质材料发展的历史。量子物质研究领域的兴起是人类对物质世界的探索深入微观层次的自然结果，其主要研究对象是由大量粒子组成的复杂体系的物质结构及其粒子集体运动的基本规律。20世纪，固体能带理论、朗道费米液体理论和磁性微观量子模型的建立促进了晶体管、信息磁存储设备的发明以及整个微电子工业的发展，推动着人类社会进入信息时代。然而随着越来越多新物质体系的发现，新的量子现象不断被揭示，新的物理概念和物理规律也大量涌现，这些发现超越了传统能带理论和朗道费米液体理论的范畴。在量子物质前沿领域的研究对象中，电荷、自旋、轨道和晶格等微观自由度之间往往存在着紧密的耦合，外界参量微小的变化即可使系统在不同的量子物态之间转换从而产生巨大的物性变化，使系统表现出丰富的物理现象，从而产生诸多实际的应用。国际上普遍认为量子物质领域的发展极有希望推动下一次产业革命，为人类经济社会发展带来新的机遇。

量子物质前沿领域立足于对物质微观层面上基本规律的探索，着眼于先进功能材料、量子现象和器件的实际应用，是一个基础性

和应用性都很强的科学领域。一方面，对量子物质的研究不断改变着人类对物质中单粒子和集体激发基本规律的认识，把人类对物质世界的理解在微观尺度和复杂性这两个方向上推进到前所未有的深度；另一方面，量子物质前沿领域不断涌现的新材料和新现象，推动人们产生新的物理思想，为信息和能源领域的长久发展提供物质基础与原理支撑。

量子物质是一个相对新颖并快速发展的前沿研究领域，其内涵和研究对象在过去十多年得到巨大的扩展。在“量子物质”这一概念出现的早期，一般是指凝聚态物理中的强关联电子体系，而后随着拓扑物态、低维物理和新型磁性等研究领域的兴起，量子物质的科学内涵也日益扩大，形成了一个具有丰富物理性质和覆盖面广泛的前沿领域。目前，量子物质前沿领域总体处于基础研究全面开展和产业应用的培育阶段，未来十五年是有望实现多点突破的关键时期。在这样的形势下，量子物质前沿领域未来的发展趋势如何，存在哪些关键科学问题，有望产生哪些重要突破，如何满足信息、能源和材料领域的发展诉求，都需要我们系统、深入地进行研判和布局。

在国家自然科学基金委员会和中国科学院的统一部署下，项目负责人陈仙辉集合国内量子物质研究领域 110 余位专家组成的工作组，开展了量子物质与应用发展战略研究。根据量子物质前沿领域的发展规律和国家需求，研究工作组经过多次讨论确定了战略研究报告的基本结构，制定了研究内容大纲，确定了超导与强关联体系、拓扑量子物态体系、低维量子体系、多自由度耦合的量子物态体系、极端条件下的新奇量子物态以及量子物质的探索与合成等六大方向，共计 50 个具体研究方向进行专题调研与研究。之后，在整理和汇总各专题报告的基础上，经过集中研讨形成了战略研究报告的初稿。工作组随后数次征集了领域内专家的意见和建议，对报告内



容进行了仔细的修改。研究报告提交至战略研究顾问组进行评议后，征询院士、专家的建议和修改意见，编写组按照反馈的建议和意见对报告内容做了认真修改、完善并最终定稿。

本书汇聚了国内百余位量子物质领域专家学者的共同努力，以翔实的资料数据和调研为基础，评述了量子物质及应用前沿领域的科学意义与战略价值，总结与分析了量子物质领域在国内外的研究现状和发展趋势，甄选我国应该重点瞄准的发展方向，给出了相应的研究思路和发展目标。希望它能对我国量子物质领域乃至物理学科的发展发挥积极的推动作用。

在战略研究和书稿编撰过程中，我们得到了许多同行专家的大力支持，顾问组的院士、专家也提供了宝贵的指导意见。在此，对众多院士、专家们的指导和帮助表示衷心的感谢！

由于量子物质前沿领域分支众多且发展迅速，书中难免会存在不完善、疏漏之处，恳请专家和读者给予批评指正。

陈仙辉

《中国量子物质与应用 2035 发展战略》编写组组长

2022 年 9 月



# 摘 要

认知和利用物质材料是人类文明发展的基础。量子物质前沿领域的兴起是人类对物质世界的认知深入到微观尺度的必然结果。该前沿领域起源于凝聚态物理，研究对象是由大量（微观）粒子组成的复杂物质体系的结构以及粒子的集体激发行为。量子物质领域在发展过程中与物理学的其他分支（特别是原子分子物理和光学）、化学、材料科学、信息科学、微电子学、生物学及医学等不断交叉融合，已成为物质科学的核心前沿领域。量子物质研究既是基础性的引领科学，又与应用需求密切相关。一方面，量子物质领域的研究把人们对物质世界的认识在微观尺度和复杂性这两个方向上推进到前所未有的深度，并以此指导设计新型材料结构、发现新奇物态、制备先进量子器件；另一方面，它还具有鲜明的先导特性，为高新技术和前沿科技产业的发展提供不可或缺的物质基础与原理支撑，很有可能推动下一次产业革命。量子物质和应用是一个相对新颖并快速发展的前沿研究领域，其内涵和具体研究内容在过去十年不断得到扩展。在这个时间节点编纂一部战略发展规划，在回顾和总结我国量子物质领域已取得的成就的基础上，对不同分支领域进行深入剖析，审视其发展态势，评估所面临的挑战和机遇，甄选优先发展方向，为我国相关科研工作者、各级政府和科技管理部门提供一个相对前瞻性的视角和参考，是一件有意义的工作。

## 一、量子物质与应用前沿领域的科学意义与战略价值

量子物质是量子力学应用于物质科学并深入发展的必然结果，极大地提升了人类对微观世界的认知，也从根本上改变了能源、信息和材料这三大现代科技支柱的原有理论框架与研发模式。顾名思义，量子物质是将量子理论运用于物质科学的研究领域，具有十分广阔的科学内涵。通过综合考虑学科发展历史规律和未来发展趋势，确定量子物质前沿领域的主要研究对象为：电子关联相互作用显著或存在某种类型电子序（如超导、磁有序）的材料体系，由于波函数的几何相位而呈现奇特电子特性的体系，以及其他宏观集体性质受量子行为控制的系统（如超冷原子体系）等。量子物质的普遍特征是大量个体单元组成的复杂体系表现出“演生”现象：对于由大量个体单元构成的复杂体系，其整体行为并不能依据单个粒子的性质做简单的外推，而是在每一个不同的复杂层次都会呈现全新的物理概念、物理定律和物理原理，其整体性质远超出个体单元的物理学规律。

量子物质前沿领域的研究不断改变着人类对物质世界的认知，推动了人们对物质中各种单粒子和集体激发基本规律的理解。基于单电子近似的固体能带理论和朗道费米液体理论在区分绝缘体、半导体、金属和解释它们的物理性质上取得了巨大的成功，促进了晶体管的发明和微电子工业的发展，推动着人类社会进入信息时代；磁性微观量子模型的建立，使人类对磁性的起源和相关物性有了深刻认识，众多新的磁性物理现象的发现（如巨磁阻效应），开辟了磁记录和高速信息读写的新方式，目前已被广泛应用于电子信息工业和日常生活中。在量子物质前沿领域中，研究对象往往存在电荷、自旋、轨道和晶格等微观自由度之间的紧密耦合，外界参量微小的变化即可导致系统在不同的量子物态之间转换从而产生巨大的物性变化。随着新物质体系的不断发现，大量新奇的演生物理现象、新

的物理概念被不断揭示，如（分数）量子霍尔效应、量子自旋霍尔效应、高温超导电性、近藤效应、马约拉纳准粒子、斯格明子、量子自旋液体等，已超越了现有能带理论和朗道费米液体理论的范畴。量子物质前沿领域不断涌现的新材料、新现象和新物理，将推动人们产生全新的物理思想，促成科学上的重大变革，为信息、材料和能源领域的长久发展提供科学基础，具有重要的战略意义。

## 二、量子物质与应用前沿领域的发展规律和发展趋势

量子物质前沿领域的一大鲜明特点是与实际应用需求密切相关，从根本上推动技术进步和产业变革。在量子物质领域不断涌现的新物质和新现象为诸多新技术的形成奠定了原理基础作为支撑，为高新技术的发展提供了物质材料，其每一次跨越和突破都会推动若干新兴产业的发展。20 世纪，沿着摩尔定律快速发展的半导体电子技术引领了全球科技、经济市场和社会生活的进步与发展。目前，半导体集成电路中器件尺寸正逼近物理极限，基于传统材料的半导体器件性能和制造工艺接近发展的瓶颈。在这样的时代背景下，如何在基础材料以及器件层面实现突破，支撑现代社会的计算需求，是当前量子物质领域的重要前沿课题。一方面，基于量子物质的低功耗信息存储、存内计算和类脑计算等迅速发展，这些新型计算架构有望更好地满足大数据、人工智能等方面的计算需求；另一方面，基于量子态叠加和纠缠的量子计算在近年来取得了很大进展，有望对人们未来的生产和生活方式产生革命性影响。量子物质领域的研究是材料科学中重大创新的先导，为能源和信息技术的长远发展提供了科学基础。例如，超导材料所展现的零电阻、完全抗磁和磁通量子化等奇特电磁性质已经在电力、医疗、通信、军事以及科学研究等领域获得了广泛的应用，在不久的将来，超导相关技术也有望在能源、交通和量子计算等领域中产生大规模应用。

近年来，量子物质领域的发展在深度和广度上表现出强劲的态

势，研究的边界不断拓展，研究更加深入，研究对象更加广泛。随着研究手段的不断发展，人们能够在多种极端情况下实现新的物质结构和形态，对它们的深入研究也不断提升人们的认知水平。实验技术的发展和完善，使得人们对量子物态的研究从统计平均的宏观水平，深入到单原子的空间尺度、阿秒的时间尺度，从而揭示了大量新的量子现象。随着研究的不断深入，量子物质领域的研究对象也从早期的电子等费米子体系扩展到光子、冷原子等玻色子体系及极化子等复合准粒子体系，从三维块材扩展到量子效应显著的低维和界面体系；物态调控手段越来越多样化、协同化，通过改变压力、磁场、电场、应力、堆垛摩尔周期等多种方式实现对量子物态和性质的调控；对材料制备的控制能力不断提高，薄膜生长和异质结构筑技术使得人们有望实现“自下而上”的功能导向的原子制造技术路线，在原子尺度构造、搭建、调控量子物质体系，进而直接制造功能器件。

随着量子物质研究的不断深入，人们所探索的物质系统越来越复杂，仅靠实验观测来总结物质世界的演化会有很大局限性，因此理论、计算和实验观测的结合越来越紧密。量子多体系统的数值计算方法在关联物态的研究过程中获得了长足的发展，大量新的数值算法被提出，如新型量子蒙特卡罗方法、动力学平均场方法、密度矩阵重正化群方法、各种类型的团簇近似方法等，使得人们计算处理复杂物质系统的能力不断提升。建立一个超越朗道框架的普适的低能有效理论图像不仅是量子物质领域研究自身的需要，也是其基础研究价值最重要的体现方式。这一目标的达成需要来自实验、理论、计算研究的长期密切合作。这种新研究范式的建立，必将使相关基础科学和应用研究迈上一个新的历史台阶。

在量子物质领域的研究中，尖端精密测量技术和大科学装置发挥着越来越重要的作用。物质科学的发展历史表明，关键表征技术

的进步能极大地促进人们对物质材料的科学认识和应用。先进表征技术的发展本身也带来了众多应用技术的进步，如实验表征通常对物质表面的洁净程度有非常高的要求，为此发展出超高、极高真空技术；很多奇异物性在低温甚至极低温才会出现，因而发展出低温和极低温制冷技术；对材料性质进行测量时通常需要外部磁场调控，因此催生出稳态强磁场和脉冲强磁场技术。可以说，国际上前沿物质科学研究的竞争，在很大程度上取决于能否掌握和研发出领先的、创新性的表征技术，而先进表征技术的突破又能推动尖端应用科学技术的发展。同时，大科学装置是开展战略性、基础性和前瞻性科学研究的基础，是实现高水平的科技突破和集成创新的重要支撑，为提升国家原始创新能力、完善专业人才培养、加强国际交流合作、带动高新技术产业发展起到巨大的促进作用。在量子物质研究领域，同步辐射光源、中子源以及稳态和脉冲强磁场等大科学装置作为重要的支撑平台，极大地提高了探索和研究量子物态的能力。

我国在量子物质的各分支领域都有布局并且进行了长期的支持，在研究队伍规模、测量设备条件、理论认知深度等方面都已具备较强的国际竞争力。目前，我国在量子物质的主要分支上已形成较大的覆盖面，在许多领域也取得了受国际同行广泛关注的研究成果，有些方向甚至走到国际最前沿，在一段时间内引领学科的发展。近十多年来，我国在量子物质领域中取得了一系列国际瞩目的研究成果，代表性工作包括铁基高温超导、量子反常霍尔效应、外尔半金属、拓扑材料数据库以及新型二维材料的发现等。在量子物质的应用研究中，我国研制了 10 kV/2.5 kA 和 35 kV/2.2 kA 三相同轴交流高温超导电缆，已将超导电缆分别运用于深圳和上海高负荷密度供电区域，系全球首次城市核心区域实用化应用；我国在自主研制二维结构超导量子比特芯片的基础上，成功构建了包含 62 个比特的可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”，实现了量子优越性并为后续

研究具有重大实用价值的量子计算打下了基础。

总体来说，在量子物质与应用前沿领域，我国已实现了研究“量”的突破，并在一些分支领域做出了引领性的工作，但还没有实现主流方向上的大面积领先，标志性的原创工作还不显著。这主要表现在深层次、长周期的系统性研究工作不多，独立发现的新物质体系、发现新现象和新规律的原创性工作较少；理论计算和实验测量在总体上的相互合作不够充分；自主研发新颖实验技术、开发新的计算方法的能力仍待加强；较为注重材料工艺和简单表征研究，缺乏研究上游新概念、新理论的工作；基础研究的下游——实际应用之路还较为狭窄。下一步发展需要在原创性上下功夫，实现更多“质”的突破，建设量子物质与应用前沿领域的科技强国。未来，应加强领域总体规划，完善宏观布局，逐渐减少一些重复性的研究，鼓励深层次、长期系统的原创性研究；充分发挥大科学装置的作用，完善专业人才培养建设；鼓励发展新的计算方法和软件、自主研发尖端实验设备，提高开创性研究的能力。

### 三、量子物质与应用前沿领域的关键科学问题、发展思路和重要研究方向

量子物质和应用前沿领域立足于对物质微观世界中基本规律的探索，着眼于先进功能材料、量子现象和器件的实际应用，是一个基础性和应用性都很强的科学领域。目前，国际上量子物质领域总体仍处于基础研究全面开展和产业应用的培育阶段，未来十年是有望实现多点突破的关键时期。在未来布局上需要追求在应用导向研究和长远探索性研究之间保持均衡发展，既要强调对新物理、新现象、新材料和新物态调控手段的探索，也要重视发挥其在材料、信息、能源等领域的引领作用，使科学研究成为推动社会经济发展的原动力。在研究方向的选择上，统筹兼顾自由探索和国家战略导向性研究，优化研究队伍的组织架构。



根据自身物理规律的特质以及与不同应用领域的融合情况，可将量子物质与应用前沿领域分为超导与强关联体系、拓扑量子物态体系、低维量子体系、多自由度耦合的量子物态体系、极端条件下的新奇量子物态以及量子物质的探索与合成六个分支方向。布局应在总体统筹的情况下各有侧重，既要保持分支领域的研究特点，又要促进分支之间的交叉融合，推动我国量子物质领域的快速、可持续发展。

超导与强关联体系中最重要科学问题包括高超导转变温度乃至室温超导的实现、对高温超导机理的理解以及超导材料的低成本和大规模应用。如果电子具有强的配对势，同时晶格还不失稳，就有可能获得更高转变温度的超导。从理论上讲，除了电声子耦合图像之外，还存在一种预期，即利用电子系统自身的强关联效应来实现高温下的超导配对。在强关联图像下，这些强配对势的库珀对如何形成，如何理解伴随超导出现反常物性，是高温超导机理研究的重点内容。建立一个超越朗道框架的普适的低能有效理论图像不仅是高温超导机理研究自身的需要，而且也能促成物理学的重大突破。为此，还有必要发展多体数值计算方法以得到强关联系统准确的基态、激发态和相变等关键信息。在超导应用方面，一方面需要提高高温超导材料的综合性能，使其性价比优于传统的导电材料，实现低温制冷系统长期运行的可靠性和稳定性。另一方面，超导集成电路、新材料电子技术、量子技术新原理等也会成为电子信息技术领域的前沿和国际竞争热点。其中超导量子计算在过去二十多年发展迅速，已经从最初的展示宏观电路量子特性的基础研究，发展成一个有可能孕育出变革性新技术的研究方向。

拓扑材料的高通量计算和非磁性拓扑电子材料数据库的建立，使得拓扑材料的分类和预测工作已经基本完成。拓扑量子物态领域的下一步研究目标是预测、发现、调控新型拓扑材料和拓扑量子物

态。“新”可以体现在以下几个方面。①与已发现的材料相比，物理性质更为理想的拓扑绝缘体和拓扑半金属材料，为拓扑电子学器件发展提供材料基础。②与磁性、超导电性等效应共存的拓扑物态和其对应的材料。它们不仅是值得深入探索的新颖物态，也是拓扑物理走向应用的一个重要出口。例如，磁性拓扑材料有望成为拓扑自旋电子学、拓扑电路互连、高温量子反常霍尔效应等物理效应的理想载体，在信息传感、信息传输、逻辑运算、高密度存储和催化等方面具有巨大的应用潜力；拓扑超导作为马约拉纳准粒子的载体，有望用以发展拓扑量子计算。③打破了传统的“体边对应原理”的新型拓扑量子物态，如高阶拓扑物态、非厄米拓扑体系等。在此基础上，利用新奇的拓扑物性，即无耗散的电荷、自旋输运，具有全局稳定的高容错性，非局域电、磁、光、热调控等，可用于拓扑量子计算的马约拉纳零能态等，来推动原型拓扑器件的探索。同时，光和声是除电子之外另外两个信息载体和媒介，在信息的产生、传播、处理和显示中具有不可取代的作用。与之对应的拓扑玻色体系的性质具有鲁棒性，有望发展适于光波、声波调控的新应用和新器件。

低维量子体系的研究总体仍处于基础研究阶段，部分材料体系正迈向产业应用的培育阶段。结合国家需求和领域发展前景，低维量子体系的研究目前在以下四个方向上蕴含大量原创性发现的机会。①新型低维量子体系的创制，以及多种低维量子物态的复合。②低维量子体系的物态调控，以及基于低维量子体系物态调控的器件原型研发。③低维量子材料的大规模制备及其产业化应用。④低维量子体系先进表征手段的研发及其国产化。基础研究首先要扩大低维材料的研究范围，预测、制备更多的新型材料，并通过在单原子、单电子、单自旋水平上的结构与性能表征，更深入理解新奇物性的起源，从而进行精准的调控。在此基础上探索二维量子材料在面向

未来的信息功能器件中的应用，发展和半导体工艺兼容的相关技术和工艺，研发高灵敏度、高速、低功耗的自旋逻辑器件和存储器件。同时，需要开发有效的样品生长与转移技术，实现高质量、大面积低维材料的制备和转移加工；鼓励对科研设备的自主研发，加强前沿实验技术与企业间的合作，对通用的核心实验技术和有应用前景的前沿表征技术进行推广。

立足固体中电子与相关物理自由度间的关联，结合国家需求和领域发展前景，多自由度耦合量子物态体系应优先布局发展的方向如下。①自旋电子学，着重发展与半导体微电子工艺兼容的超高密度、大容量、非易失磁存储和逻辑存算一体化器件等；②新型热电材料，发展新概念、新方法协同调控电子声子输运，研发热管理和能量转换一体化的新概念器件；③铁电和多铁材料，关注量子理论的发展和多功能设计，推动智能材料与器件、电控磁性存储和新型铁电量子器件的研发；④忆阻材料，促进存算一体神经形态、模拟、数字逻辑、随机计算等超越传统冯·诺依曼架构的研究探索。多自由度耦合的量子物态，常伴随着热力学相空间多个能量极小值出现，空间上的电子相分离难以避免。研究电子相分离的基本规律和演生效应不仅具有重要的基础科学价值，而且将指导开发更多的新型功能器件。为克服当前存算分离计算框架的困难，发展基于高性能量子材料的类脑计算、存算一体化和深度学习功能的神经网络体系也被寄予很高期望。

极端实验条件是已知与未知之间的边界。极端条件下对新奇量子物态的探索虽然难度大、周期长，但却是一个明确可行、有望获得未知物理现象的研究方向。极端条件下对新奇量子物态的研究已经体现出明确的价值，并针对部分关键科学问题形成了较为集中的研究方向。磁场下的物态调控随着强磁场装置的发展成为量子物质领域的重要研究方向。在强场激光和超快光学领域也有一系列前沿

热点问题（如光诱导的高温超导电性、光诱导的超快相变和调控、强场激光对磁性材料的调控、强场激光对拓扑材料的调控、强光场和微纳结构的强耦合效应等）。超冷原子（分子）系统可以用来模拟复杂的量子多体模型并用显微学的方法研究其物理性质，理解凝聚态物理和量子场论中悬而未决的物理问题，并为精密测量和量子计算等领域提供高精度的量子测控技术。多种不同极端条件的结合也为对现有科学问题的深入理解提供了有价值、有潜力的研究方法。在极端条件下量子物质的研究中，尖端仪器的创新以及大科学装置的应用扮演着重要角色。

新型量子材料的探索与合成往往是量子物质领域研究的突破口，并对相关科学技术起到决定性作用。如何在无机化合物晶体结构数据库中寻找有科学价值的量子材料，确定哪些元素可以组成尚未被发现的量子材料，是量子物质领域的根本问题之一。材料基因组是材料研发的最新理念，其通过高通量计算缩小尝试范围，利用并行和组合思想的方法加速实验流程，借助机器学习寻找海量数据库中潜藏规律，并回过头来修正理论模型，指导材料设计。新颖异质界面的构筑、基于电子能带的多物态调控、微纳尺度的低功耗高性能器件以及人工带隙材料等也是未来需要重点发展的方向。近年来，人们在以转角石墨烯为代表的摩尔超晶格体系中陆续实现了多种新颖的量子物态，转角调控也成为量子物态人工调控的新的有效手段。

#### 四、围绕量子物质与应用前沿领域发展的政策建议

综合量子物质领域的研究特点、发展现状和国家需求，为保障未来十五年我国该领域的持续发展并进入世界前列，提出如下建议。

①建立更活跃的跨学科交流网络，鼓励国内不同研究小组之间的深入合作，组建具有不同学科背景的联合攻关团队，明确适合跨学科合作模式下符合时代发展的成果贡献体现形式和考核评价机制，鼓励研究人员围绕重大基础问题开展长期、深入的合作。

②在基础研

究和应用开发中，应鼓励和坚持走自主创新的道路，在科研经费方面给予长期稳定支持，提高科研经费的分配和使用效率，通过政策倾斜鼓励有条件的企业投资或自主展开基础科研。③重视人才队伍的结构化培养，重视基础教育，优化学科的课程教育体系，建立技术人员的支持和晋升机制。④深化企业、科研院所和高校之间的合作，注重前沿基础研究与产业界的联系，提高技术创新能力和创新技术的产品转化。⑤鼓励科研设备的自主研发，开展多种类的仪器研制项目。⑥在新的国际环境下，应加强国际学术交流和合作，建立新的交流和合作途径及模式。



# Abstract

The cognition and utilization of materials constitute the foundation for the development of human civilization. The rise of quantum matter is an inevitable result of human cognition of materials to the microscale. In this frontier, which originates from condensed-matter physics, the structures of complex material systems comprising many (micro) particles and the basic law of collective excitation behavior of these particles are adopted as research objects. Notably, the field of quantum matter continuously overlaps with other branches of physics (particularly the atomic and molecular physics and optics), chemistry, material science, information science, microelectronics, biology, and medicine, and it has become the frontier field of material science. Quantum matter research is a basic leading science that proffers solutions to practical application-based needs. On the one hand, the study of quantum matter expands our understanding of materials to an unprecedented level in the directions of both complexity and microscopic scale, naturally guiding the design of new material structures, discovery of novel states of matter, and fabrication of advanced quantum devices. On the other hand, due to its distinctive leading characteristics, this research field presents indispensable material foundation and principle support for developing highly advanced and cutting-edge science and technology industries, and

it is expected to play a leading role in the next industrial revolution. As a relatively new research frontier, quantum matter and its applications are developing rapidly, and its connotation and specific research content have expanded in the past decade. Therefore, it is meaningful to compile a strategic development plan for reviewing and summarizing the progress in the field of quantum matter in China, which encompasses an in-depth analysis of different subfields, examination of their development trend, evaluation of the challenges and opportunities faced, and determination of high-priority development directions. Additionally, forward-looking perspectives and reference for relevant scientific researchers, governments at all levels, and science and technology management departments in China are provided.

### **0.1 Scientific significance and strategic value of the frontier field of quantum matter and its application**

Quantum matter, as the name implies, involves applying quantum mechanics to material science. The emergence of quantum matter not only significantly improves our cognition of the micro-world, but also fundamentally changes the original theoretical framework and research and development (R&D) mode of the three modern scientific and technological pillars: energy, information, and materials. With applying quantum theory to material science, the scientific connotation of quantum matter is considerably broad. Based on the careful consideration of the discipline's historical development law and future development trends, the main research objects of quantum matter include material systems with significant electronic-correlation interaction or some types of electronic orders (such as superconductivity and magnetic order), systems exhibiting peculiar electronic characteristics because of the geometric phase of the wave function, and other systems (e.g., ultracold



atomic systems) whose macroscopic collective properties are controlled by quantum behaviors. A universal feature of quantum matter is that complex systems composed of many individual units show “emergent” phenomena, i.e., the overall behavior of a complex system composed of many individual units cannot be simply extrapolated based on the properties of individual particles. Instead, at different complex levels, new physical concepts, laws, and principles emerge, and the overall properties are far beyond the physical laws of individual units.

The research on the frontier field of quantum matter constantly changes our cognition of the material world and promotes our understanding of individual particles and the various basic laws of collective excitation in materials. Using the band theory of solids based on single-electron approximation and Landau’s Fermi-liquid theory, researchers have achieved significant success in distinguishing insulators, semiconductors, and metals, in addition to explaining their physical properties. These achievements have facilitated the invention of transistors and the development of the microelectronic industry, launching human society into the information age. With the establishment of the microscopic quantum theory of magnetism, humans obtained a deep understanding of the origin of magnetism and its related physical properties. Many new magnetic phenomena have been discovered, such as the giant magnetoresistance, which has facilitated the development of magnetic recording and high-speed information reading and writing. Today, these phenomena are widely utilized in the electronic information industry and our daily life. In the frontier field of quantum-matter, there are often close couplings among micro degrees of freedom, such as charge, spin, orbit, and crystalline lattice, in the research objects. Slight changes in external stimuli may lead to phase transitions between different quantum states, resulting in significant changes in the physical

properties. The continuous discovery of new material systems has led to the continuous discovery of many novel and evolutionary physical phenomena, as well as new physical concepts, such as the (fractional) quantum Hall effect, quantum spin Hall effect, high-temperature superconductivity, Kondo effect, Majorana quasiparticle, Skyrmion, and quantum spin liquid, which are beyond the scope of the existing band theory and Landau's Fermi-liquid theory. The emergence of new materials, new phenomena, and new physics in the frontier of quantum matter, will inspire breakthrough in physical understanding, promote major changes in science, and provide a scientific basis for the long-term development in the fields of information, materials, and energy. Thus, the field of quantum matter is of high strategic significance.

## **0.2 Development law and development trend in the frontier field of quantum matter and its application**

A distinctive feature of the frontier field of quantum matter is its close relation to practical application-based needs. Thus, this field fundamentally promotes technological progress and industrial transformation. The new materials and new phenomena emerging in the field of quantum matter provide theoretical support for developing various new technologies and materials for the development of new and high technologies. Each leap and breakthrough will facilitate the emergence of several emerging industries. In the last century, the rapid development of semiconductor electronic technology following Moore's law led to the progress and development of science and technology, the economic market, and social standards worldwide. Today, the size of devices in semiconductor-integrated circuits is approaching the physical limit, and the performance of and manufacturing engineering for semiconductor devices based on traditional materials are approaching the

limit. In this background , low-power information storage, in-memory computing, and neuromorphic computing based on the quantum matter are developing rapidly, and these new computing architectures are expected to better meet the computing needs of big data and artificial intelligence. Moreover, the research on quantum computing based on quantum superposition and entanglement has recorded significant progress in recent years, and this field is expected to have a revolutionary impact on our production and lifestyle in the future. The research in the field of quantum matter plays a leading role in achieving major innovation in material science, providing a scientific basis for the long-term development of energy and information technology. For example, the peculiar electromagnetic properties of superconducting materials, such as zero resistance, Meissner effect, and flux quantization, have been widely exploited in electric power, medical treatment, communication, military, and scientific research applications. In the near future, the large-scale application of superconductivity-related technologies is anticipated in energy, transportation, and quantum computing fields.

In recent years, the development of the quantum matter field has shown a strong trend in depth and breadth. The research boundaries are constantly expanded, and the research objects are becoming more in-depth and extensive. The continuous advancement in this frontier will enable the achievement of new material structures and forms in various extreme situations. Meanwhile, the in-depth study of these new material structures and forms will also broaden our cognitive level constantly. The development and improvement of experimental techniques will promote the in-depth research of quantum states from the macro level of statistical average to the spatial scale of single atoms and the time scale of attosecond, thus enabling the emergence of numerous quantum phenomena. With the research advancement, the research objects in the field of quantum matter have also expanded from fermion systems, such

as electrons in the early stage, to bosonic systems such as photons and cold atoms, as well as composite quasiparticle systems. The research objects have also expanded from three-dimensional bulk materials to low-dimensional and interface systems with significant quantum effects. The diversity and synergy of the means of phase manipulation are improving, and the quantum state and properties can be regulated by adjusting the pressure, magnetic field, electric field, strain, moiré stacking, etc. The control of material-synthesis procedures is continuously improving. Film growth and heterostructure engineering enable the achievement of “bottom-up” function-oriented atomic manufacturing technologies, as well as the construction, building, and manipulation of quantum matter systems at the atomic scale to directly manufacture functional devices.

With the advancement in quantum matter research, the complexity of material systems is increasing, and the evolution of the material world based only on experimental observation will be met with significant limitations. Therefore, the efficient combination of theory, calculation, and experimental observation is strongly desired. The research on correlated states of matter has facilitated the advancement of the research on the numerical calculation method of the quantum many-body system, with many new numerical algorithms being proposed, such as the new quantum Monte-Carlo method, dynamic mean field method theory, density matrix renormalization group method, and various types of cluster approximation methods, which continuously improve our ability to calculate and manage complex material systems. The establishment of a universal low-energy effective model beyond Landau’s framework is not only the objective of quantum matter research, but also the most important embodiment of its basic research value. In the field of quantum matter, , the role of cutting-edge precision-measurement technology and large-scale scientific facilities is becoming increasingly important. The development history of material science shows that the advancements

in key characterization technology can significantly promote our understanding of scientific principles and the application of materials. The international competition in cutting-edge material science research, as it were, largely depends on whether leading and innovative characterization technologies can be developed and mastered, and breakthroughs in advanced characterization technologies can promote the development of cutting-edge applied science and technology. Preferably, large-scale scientific facilities are the basis for strategic, basic, and forward-looking scientific research, and they provide important support for the realization of high-level scientific and technological breakthroughs and integrated innovation. Furthermore, they play a significant catalytic role in promoting the original innovation abilities of countries, improving the building of professional talent team, strengthening international exchange and cooperation, and driving the development of high-tech industries. As important supporting platforms in the field of quantum matter, synchrotron radiation light sources, neutron sources, static/pulsed strong magnetic fields, and other large-scale scientific facilities significantly promote the exploration and study of quantum states.

China has created strategic plans to research various branches of quantum matter and has provided long-term support, and it has reached the global standard in terms of research team size, measurement equipment conditions, theoretical cognition depth, and so on. Thus far, China has achieved extensive coverage of the major branches of quantum matter and has recorded research achievements that have attracted considerable attention from international peers in many fields. In some branches, it has even reached the global forefront, playing a leading role in discipline development for a period. Over the last ten years, a series of internationally remarkable research achievements have been recorded by China in the field of quantum matter. The representative work includes iron-based high temperature superconductivity, quantum

anomalous Hall effect, Weyl semimetal, topological material databases, and the discovery of two-dimensional materials. In the application field of quantum matter, China has developed 10kV/2.5kA and 35kV/2.2kA three-phase coaxial high-temperature superconducting cables, which have been employed in high-load-density power-supply areas in Shenzhen and Shanghai, respectively. These are the first practical application in urban core areas globally. China has successfully built a 62-bit programmable superconducting quantum computing prototype, “Zu Chongzhi”, based on its self-developed two-dimensional superconducting quantum bit chip, which has realized quantum superiority and has laid a foundation for the research on quantum computing with significant practical value.

Generally, China has made breakthroughs in the “quantity” of research in the frontier field of quantum matter and application, and has played a leading role in some branch fields. However, it has not yet established a large-scale leading edge in the mainstream directions and is not prominent enough in iconic original works. This is mainly attributed to the following. There are not many deep-seated and long-term systematic research works, and original works on the independent discovery of new material systems, phenomena, and laws are lacking. The collaboration between theoretical calculation and experimental observation is insufficient. The ability to independently develop novel experimental technologies and new computing methods still requires improvement. The study of material technology and simple characterization are prioritized, while upstream new concepts and new theories are underemphasized. China focuses on the basic research of laboratory applications, whereas downstream practical applications are relatively trivialized. The next step in development requires effort in originality to achieve more breakthroughs, and to build a scientific and technological powerhouse in the frontier field of quantum materials and applications. In the next fifteen years, we should strengthen the overall

planning of the field, improve the macro layout, gradually reduce some repetitive research, encourage deep, long-term and systematic original research; fully function the large scientific facilities, and improve the construction of professional talent teams; encourage the development of new computing methods and software, independently develop cutting-edge experimental equipment, and enhance the ability to conduct pioneering research.

### **0.3 Key scientific issues, development ideas, and important research directions in the frontier field of quantum matter and application**

Established for exploring the basic laws in the “micro” world of matter, the quantum matter and application frontier focuses on the practical application of advanced functional materials, quantum phenomena, and devices. This scientific field is strong in terms of foundation and applicability. To date, the global study of quantum matter is still in the stage of comprehensive development of basic research and cultivation of industrial applications; multiple breakthroughs are expected in the coming decade. When planning for the future, it is necessary to pursue a balance between application-oriented research and long-term exploratory research. We should emphasize not only the exploration of new physics, new phenomena, new materials, and new state regulation means, but also the leading role of this frontier in the fields of materials, information, and energy, so that the fundamental research can become one of the driving forces in the economic and social development. In the choice of research directions, we should strive to achieve an overall balance between free exploration and national strategy-oriented research while optimizing the organizational structure of the research team.

According to the characteristics of its physical laws and the integration

with different application fields, the quantum matter and application frontier can be divided into six branches: superconductivity and strong-correlation systems, topological quantum matter systems, low-dimension quantum systems, strongly-coupled quantum systems with multiple degrees of freedom, novel quantum state of matter under extreme conditions, and quantum matter exploration and synthesis. The overall plan should have different emphases, which should not only maintain the research characteristics of the branches but also promote the cross integration among branches and the rapid and sustainable development of the quantum matter field in China.

The most important scientific directions in the fields of superconductivity and strong-correlation systems includes the realization of a high superconducting transition temperature and even room-temperature superconductivity, the mechanism of high-temperature superconductivity, and the low-cost and large-scale applications of superconducting materials. If the electrons have a strong superconducting pairing potential and the lattice is not unstable, it is possible to achieve superconductivity with higher critical temperature. Exploring the formation of Cooper pairs with a strong pairing potential within strong-correlation picture and understanding the abnormal physical properties accompanying superconductivity are the key contents of the research on the high-temperature superconducting mechanism. The establishment of a universal low-energy effective theory that goes beyond the Landau framework is not only a request for the study of high-temperature superconductivity, but also leads to a major breakthrough in physics. For this reason, it is necessary to develop many-body numerical calculation methods to obtain accurate, key information of ground states, excited states, and phase transitions in strongly correlated systems. In terms of superconducting applications, on the one hand, it is necessary to enhance the cost-performance ratio of high-temperature superconductors to



achieve a value close to that of traditional electric conducting materials and realize the reliability and stability of long-term operation of low-temperature refrigeration systems. On the other hand, superconducting integrated circuits, new material electronic technology, and new principles of quantum technology will also become the frontiers and international competition hotspots in the field of electronic information technology. Among them, superconducting quantum computing has developed rapidly in the past two decades, from the initial basic research to understand the quantum characteristics of macro circuits to a research stage that may breed new transformative technologies.

With the establishment of high-throughput calculation methods for topological materials and non-magnetic topological electronic material databases, the classification and prediction of topological materials have been basically achieved. The prediction, discovery, and regulation of new topological materials and topological quantum states have become the new research objectives in the field of topological quantum states. “New” can be reflected in the following aspects. The first is that the hunting for topological insulators and topological semimetals with more ideal physical properties compared to the existing materials that can provide a material basis for the development of topological electronics devices. The second is that topological materials coexisting with magnetism and superconductivity. They not only provide platforms to realize novel quantum states worth deeply exploring, but also presents an important outlet for the application of topological physics. For example, magnetic topological materials are expected to become ideal platform for physical effects such as topological spintronics, topological circuit interconnection, high-temperature quantum anomalous Hall effect, and have enormous application potential in information sensing, information transmission, logic operations, high-density storage, and catalysis. Topological superconductors, as the carrier of Majorana quasi-particles,

are expected to be used to develop topological quantum computing. The third is that new topological quantum states that break the traditional “bulk-boundary correspondence”, such as higher-order topological states and non-Hermitian topological systems. Exploiting the novel topological properties, namely non-dissipative charge and spin transport, globally stable high fault tolerance, and non-local electrical, magnetic, optical, and thermal regulation, Majorana zero mode for topological quantum computing, can promote the exploration of prototype topological devices. Conversely, light and sound are two other information carriers and media besides electrons, which play irreplaceable roles in the generation, transmission, processing, and display of information. The corresponding topological Bosonic system is robust, and new applications and devices suitable for the regulation of light and sound waves are expected to be developed.

Generally, the research on low-dimensional quantum systems is still in the basic research stage, with material system research approaching the cultivation stage for industrial application. Taking together the national needs and field development prospects, currently, there are huge opportunities for original discovery in the following four directions of the field of low-dimensional quantum systems: (1) the discovery of new low-dimensional quantum systems and the recombination of multiple low-dimensional quantum states; (2) phase manipulation of low-dimensional quantum systems, and the research and development of primitive device based on the regulation of low-dimensional quantum systems type; (3) large-scale preparation of low-dimensional quantum materials and their industrial application; (4) advanced characterization methods for low-dimensional quantum systems and its localization. We should aim to first expand the research scope of low-dimensional materials, and predict and prepare more new materials. Thereafter, through the structure and performance characterization at the single-atom, single-electron, and

single-spin levels, the research efforts can be devoted to understanding the origin of the novel physical properties and achieving accurate regulation. Thus, research works should focus on exploring the application of two-dimensional quantum materials in future-oriented information functional devices; developing relevant technologies and techniques compatible with semiconductor processes; and realizing high-sensitivity, high-speed, and low-power spin logic devices and memory devices. Meanwhile, it is necessary to develop effective sample growth and transfer technologies to realize the preparation and transfer processing of high-quality and large-area low-dimensional materials; encourage the independent research and development of scientific research equipment, strengthen the cooperation between cutting-edge experimental technologies and enterprises, and promote common core experimental technologies and promising cutting-edge characterization technologies.

In strongly-coupled quantum systems with multi-degrees of freedom, according to the national demand and field development prospects, the following research fields should be prioritized for fields: spintronics, focusing on the development of ultrahigh-density, large-capacity, non-volatile magnetic storage and logic in-memory-computing devices compatible with semiconductor microelectronic technologies; new thermoelectric materials, focusing on developing new concepts and new methods to coordinate and control electron-phonon transport and new concept devices integrating thermal management and energy conversion; ferroelectric and multiferroic materials, focusing on the development of quantum theory and multifunctional design, as well as the promotion of the R&D of intelligent materials and devices, electrically controlled magnetic storage, and new types of ferroelectric quantum devices; and memristor materials, promoting the research and exploration of in- memory-computing neural morphology, simulation, digital logic, stochastic computing, and so on, beyond the traditional von

Neumann architecture. Strongly-coupled quantum systems with multi-degrees of freedom are often accompanied by multiple energy minimum in the thermodynamic phase space, and spatial phase separation is difficult to avoid. The study of basic laws and evolutionary effects of phase separation not only has important basic scientific value, but also guides the development of more new functional devices. To overcome the difficulties of the separation of storage and calculation in the current framework, research efforts should be devoted to the development of neural-network systems with brain-like computing capabilities, in-memory-computing capabilities, and deep-learning functions based on high-performance quantum materials.

Extreme experimental conditions constitute the boundary between the known and the unknown. Although the exploration of novel quantum states under extreme conditions is difficult and time-intensive, it is definitely a feasible research direction that is expected to provide insights into unknown physical phenomena. Clear results have been obtained in the research on novel quantum states under extreme conditions, and a relatively concentrated research direction has been established targeting some key scientific problems. With the development of strong magnetic field scientific facility, the regulation of the state of matter using magnetic field has become an important research direction in the frontier field of quantum matter. In the fields of intense field laser and ultrafast optics, there are also a series of cutting-edge hot issues (such as light-induced high-temperature superconductivity, light-induced ultrafast phase transition and regulation, regulation of magnetic materials by strong-field laser, regulation of topological materials by strong-field laser, strong coupling effect of strong light field and micro-nano structure, etc.). Ultracold atomic (molecular) systems can be used to simulate complex quantum many-body models and to study their physical properties using

microscopy, for the understanding of outstanding physics problems in condensed matter physics and quantum field theory, and to provide high-precision quantum technologies for precision measurement and quantum computing.

The exploration and synthesis of new quantum materials are often correct routes for achieving breakthroughs, and they play decisive roles in related science and technology. The identification of scientifically valuable quantum materials in the database of crystal structures of inorganic compound and the determination of elements that constitute undiscovered quantum materials are two of the fundamental problems in the field of quantum matter. The latest concept in material research and development is the material genome, which narrows the research scope by high-throughput calculations, accelerates the experimental process through the methods of parallel and combinatorial thoughts, identifies the hidden laws in massive databases through machine learning, and subsequently modifies the theoretical model to guide material design. In the future, the following topics should be prioritized: the construction of novel heterogeneous interfaces, multistate regulation based on electron energy bands, micro-nano-scale low-power and high-performance devices, and artificial bandgap material. In recent years, a variety of novel quantum states have been realized in moiré superlattice systems such as twisted angle graphene, and twist-angle method has also become a new and effective means for artificial regulation of quantum state of matter.

#### **0.4 Policy suggestions on the development of the quantum matter frontier and its applications**

Based on the research characteristics, development status, and national needs in the field of quantum matter, the following suggestions are put forward to ensure that China continues its development and

emerges as the global leader in this field in the next 15 years. (1) Establish a more active interdisciplinary communication network, encourage in-depth cooperation among different domestic research groups, establish joint research teams with different disciplinary backgrounds, define achievement contribution manifestation forms and evaluation mechanisms suitable for development under the interdisciplinary cooperation mode, and foster long-term and in-depth cooperation among researchers on major basic issues. (2) Encourage and adhere to the principles of independent innovation in basic research and application development, provide long-term stable support in terms of scientific research funds, improve the allocation and usage efficiency of scientific research funds, and introduce preferential policies to encourage eligible enterprises to invest or independently carry out basic scientific research. (3) Attach importance to basic education and the structured cultivation of talents, optimize the curriculum of the educational system for various disciplines, and establish support and promotion mechanisms for technicians. (4) Strengthen the cooperation among enterprises, research institutes, and universities, prioritize the connection between cutting-edge basic research and industrial circles, and promote technological innovation capabilities and the product transformation of innovative technologies. (5) Encourage the independent R&D of scientific research equipment and the performance of various instrument-development projects. (6) Strengthen international academic exchange and cooperation in the new international environment.

# 目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / xi

Abstract / xxiii

## 第一章 量子物质与应用前沿领域总论 / 1

第一节 量子物质的定义和内涵 / 1

第二节 量子物质与应用前沿领域的科学意义和战略价值 / 3

第三节 量子物质与应用前沿领域的现状及其形成 / 6

第四节 量子物质与应用前沿领域的关键科学、技术问题和发  
展方向 / 12

第五节 围绕量子物质与应用前沿领域发展的政策建议 / 21

## 第二章 超导与强关联体系 / 24

第一节 新超导材料的探索 / 26

一、科学意义与战略价值 / 26

二、研究背景和现状 / 27

- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 30
- 第二节 非常规超导机理的实验与理论研究——铁基超导 / 32**
  - 一、科学意义与战略价值 / 32
  - 二、研究背景和现状 / 34
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 43
- 第三节 非常规超导机理的实验与理论研究——铜氧化物超导 / 46**
  - 一、科学意义与战略价值 / 46
  - 二、研究背景和现状 / 47
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 50
- 第四节 重费米子超导 / 54**
  - 一、科学意义与战略价值 / 54
  - 二、研究背景和现状 / 54
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 57
- 第五节 有机超导体 / 59**
  - 一、科学意义与战略价值 / 59
  - 二、研究背景和现状 / 60
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 63
- 第六节 非中心对称超导体 / 65**
  - 一、科学意义与战略价值 / 65
  - 二、研究背景和现状 / 66
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 69
- 第七节 高压下富氢高温超导体 / 70**
  - 一、科学意义与战略价值 / 70
  - 二、研究背景和现状 / 70
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 72
- 第八节 非常规超导体中的反常物性 / 75**



一、科学意义与战略价值 / 75	
二、研究背景和现状 / 76	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 78	
<b>第九节 二维转角体系的关联物理 / 80</b>	
一、科学意义与战略价值 / 80	
二、研究背景和现状 / 81	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 86	
<b>第十节 其他过渡金属基超导体 / 87</b>	
一、科学意义与战略价值 / 87	
二、研究背景和现状 / 88	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 91	
<b>第十一节 高温超导材料的应用——强电应用 / 94</b>	
一、科学意义与战略价值 / 94	
二、研究背景和现状 / 94	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 98	
<b>第十二节 超导材料的应用——弱电应用 / 99</b>	
一、科学意义与战略价值 / 99	
二、研究背景和现状 / 101	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 104	
<b>第十三节 量子自旋液体与自旋 - 轨道液体 / 107</b>	
一、科学意义与战略价值 / 107	
二、研究背景和现状 / 107	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 110	
<b>第十四节 具有电子关联的强自旋 - 轨道耦合的体系 / 113</b>	
一、科学意义与战略价值 / 113	
二、研究背景和现状 / 113	

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 117

#### 第十五节 强关联理论与计算方法 / 119

一、科学意义与战略价值 / 119

二、研究背景和现状 / 120

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 126

#### 第十六节 量子临界现象和相变 / 133

一、科学意义与战略价值 / 133

二、研究背景和现状 / 134

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 139

#### 第十七节 关联多体系统中的量子纠缠、量子混沌及其非平衡动力学 / 140

一、科学意义与战略价值 / 140

二、研究背景和现状 / 141

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 145

### 第三章 拓扑量子物态体系 / 148

#### 第一节 新型拓扑材料 / 149

一、科学意义与战略价值 / 149

二、研究背景和现状 / 150

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 153

#### 第二节 拓扑玻色系统 / 156

一、科学意义与战略价值 / 156

二、研究背景和现状 / 157

三、关键科学、技术问题与发展方向 / 159

#### 第三节 量子霍尔效应 / 163

一、量子反常霍尔效应 / 164

二、量子自旋霍尔效应 / 167	
三、分数量子霍尔效应 / 169	
四、量子热霍尔效应 / 171	
五、三维量子霍尔效应 / 173	
六、非线性霍尔效应 / 176	
<b>第四节 拓扑半金属 / 178</b>	
一、科学意义与战略价值 / 178	
二、研究背景和现状 / 179	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 182	
<b>第五节 关联拓扑物态 / 184</b>	
一、科学意义与战略价值 / 184	
二、研究背景和现状 / 185	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 188	
<b>第六节 拓扑超导体与马约拉纳费米子 / 190</b>	
一、科学意义与战略价值 / 190	
二、研究背景和现状 / 192	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 198	
<b>第七节 拓扑量子计算和器件 / 201</b>	
一、科学意义与战略价值 / 201	
二、研究背景和现状 / 201	
三、科学、技术问题与发展方向 / 204	
<b>第八节 拓扑序和拓扑量子相变 / 207</b>	
一、科学意义与战略价值 / 208	
二、研究背景和现状 / 208	
三、关键科学、技术问题与发展方向 / 211	
<b>第九节 拓扑量子物态体系——非厄米量子体系 / 214</b>	

- 一、科学意义与战略价值 / 214
- 二、研究背景和现状 / 214
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 217

## 第四章 低维量子体系 / 220

### 第一节 团簇与量子点——新型准零维量子材料 / 222

- 一、科学意义与战略价值 / 222
- 二、研究背景和现状 / 223
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 226

### 第二节 新型一维量子材料 / 229

- 一、科学意义与战略价值 / 229
- 二、研究背景和现状 / 230
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 233

### 第三节 新型二维量子材料 / 236

- 一、科学意义与战略价值 / 236
- 二、研究背景和现状 / 237
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 243

### 第四节 人工范德瓦耳斯异质结构 / 247

- 一、科学意义与战略价值 / 247
- 二、研究背景和现状 / 248
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 252

### 第五节 二维/界面超导及低维体系的量子相变 / 254

- 一、科学意义与战略价值 / 254
- 二、研究背景和现状 / 255
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 257

### 第六节 低维材料的量子调控 / 260

- 一、科学意义与战略价值 / 260
- 二、研究背景和现状 / 261
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 263
- 第七节 低维材料的电子学及其芯片应用 / 266**
  - 一、科学意义与战略价值 / 266
  - 二、研究背景和现状 / 267
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 270
- 第八节 低维材料先进表征手段 / 273**
  - 一、科学意义与战略价值 / 273
  - 二、研究背景和现状 / 274
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 277
  
- 第五章 多自由度耦合的量子物态体系 / 281**
  - 第一节 自旋电子学 / 283**
    - 一、科学意义与战略价值 / 283
    - 二、研究背景和现状 / 285
    - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 293
  - 第二节 能谷电子学 / 300**
    - 一、科学意义与战略价值 / 300
    - 二、研究背景和现状 / 301
    - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 303
  - 第三节 新型热电材料 / 306**
    - 一、科学意义与战略价值 / 306
    - 二、研究背景和现状 / 306
    - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 309
  - 第四节 新型铁电及多铁材料 / 311**

- 一、铁电材料的科学意义与战略价值 / 312
- 二、铁电材料方向的研究背景和现状 / 312
- 三、铁电材料方向的关键科学技术问题与发展方向 / 316
- 四、多铁性材料的科学意义与战略价值 / 320
- 五、多铁性材料的研究背景和现状 / 320
- 六、多铁性材料的关键科学技术问题与发展方向 / 324

#### 第五节 电子相分离及演生功能 / 326

- 一、科学意义与战略价值 / 326
- 二、研究背景和现状 / 327
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 329

#### 第六节 忆阻材料及其应用 / 332

- 一、科学意义与战略价值 / 332
- 二、研究背景和现状 / 332
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 335

#### 第七节 基于神经网络功能实现的新体系 / 339

- 一、科学意义与战略价值 / 339
- 二、研究背景和现状 / 340
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 344

#### 第八节 全量子化凝聚态体系 / 346

- 一、科学意义与战略价值 / 346
- 二、研究背景和现状 / 346
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 350

### 第六章 极端条件下的新奇量子物态 / 353

#### 第一节 高压下的新奇量子物态 / 355

- 一、科学意义与战略价值 / 355

- 二、研究背景和现状 / 356
- 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 358
- 第二节 强磁场下的新奇量子物态 / 360**
  - 一、科学意义与战略价值 / 360
  - 二、研究背景和现状 / 361
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 363
- 第三节 极低温下的新奇量子物态 / 366**
  - 一、科学意义与战略价值 / 366
  - 二、研究现状及其形成 / 367
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 370
- 第四节 光诱导的新奇量子物态及超快现象 / 373**
  - 一、科学意义与战略价值 / 373
  - 二、研究现状及其形成 / 374
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 377

## **第七章 量子物质的探索与合成 / 380**

- 第一节 量子块体物质的探索和合成方法 / 382**
  - 一、科学意义与战略价值 / 382
  - 二、研究现状 / 383
  - 三、研究思路 / 388
  - 四、发展趋势 / 390
- 第二节 量子薄膜材料生长 / 391**
  - 一、科学意义与战略价值 / 391
  - 二、量子薄膜材料的背景和现状 / 392
  - 三、关键科学、技术问题与发展方向 / 395
- 第三节 材料基因工程 / 398**

中国量子物质与应用2035发展战略

- 一、国内外研究和发展现状 / 398
- 二、发展趋势和科学问题 / 401
- 三、优先支持的研究方向和建议 / 403

第四节 人工带隙材料与应用 / 404

- 一、光子晶体 / 405
- 二、声子晶体 / 411
- 三、超构材料 / 416
- 四、超构表面 / 422
- 五、非厄米人工材料 / 428

第八章 保障措施及建议 / 434

参考文献 / 438

关键词索引 / 445



# 量子物质与应用前沿领域总论

认知和利用物质材料是人类文明发展的基石，古代石器、青铜器、铁器、钢，到现代硅基半导体材料的广泛应用被作为划分人类文明的不同阶段的标志。从这个意义上讲，人类社会的发展史就是一部物质科学发展的历史。20世纪初期，随着人类生产实践和科学实验深入微观物质世界，人们发现微观粒子的运动与日常生活中宏观物体的运动行为具有很大差异。于是，量子力学应运而生，开启了人类认识量子世界的序幕。几十年来，对量子现象的研究跨越了不同的空间维度、时间尺度以及丰富的物质体系，提升了人类对微观世界的认知，也从根本上改变了能源、信息和材料这三大当代科技支柱的原有理论框架与研发模式。其中，对量子物质的研究不仅极大地促进了人们对物质世界的微观理解，而且催生了许多应用领域的前沿方向，如超导电子学、磁电子学、自旋电子学以及拓扑电子学等。

## 第一节 量子物质的定义和内涵

物理学的研究范式与架构是人类认识与改造自然的核心方法论。“量子

物质”起始于凝聚态物理（旧称固体物理学），已发展为多学科交叉融合的前沿领域。这一前沿领域主要关注这样一大类物质材料：电子关联相互作用显著或存在某种类型的电子序（如超导、磁有序）的材料体系，或由于波函数的几何相位而呈现出奇特的电子特性（如拓扑绝缘体和类似石墨烯的狄拉克电子体系等），以及其他宏观集体性质受量子行为控制的系统（如超冷原子体系）。量子物质的共性特征是大量个体单元表现出“演生”（**emergence**）现象：对于由大量个体单元构成的复杂体系，其整体行为并不能依据单个粒子的性质做简单的外推，而是在每一个不同的复杂层次都会呈现全新的物理概念、物理定律和物理原理，其整体性质远超出个体单元的物理学规律（**Anderson, 1972**）。量子物质领域的核心内容，就是研究和利用这种超越个体特性“演生”出来的合作现象。

“量子物质/材料”是一个相对新颖并快速发展的概念。这个概念的演化，最早可以追溯到20世纪80年代在“关联电子材料”中涌现的一系列革命性发现。这些发现为量子物质领域后续的发展确立了方向。20世纪60年代和70年代，凝聚态物理的主题是在朗道费米液体理论和对称破缺理论的框架下，研究不同的电子有序态，利用序参量、关联函数等来描述各种不同的物相和它们对外场的响应。这一研究范式持续到了20世纪80年代，出现了两个关键的进展——高温超导体和（分数）量子霍尔效应，它们的发现对这一经典框架提出了严峻挑战，极大地激发了人们对强关联电子体系的研究兴趣。电子的强关联是指体系中电子之间的强库仑排斥势不能被有效简化处理的一个重要科学问题，是经典能带论和朗道费米液体理论框架下一个必然的科学延伸。这也是为什么“量子材料”这个概念早期是作为关联电子体系的别称出现的。近年来，随着拓扑材料与低维材料中演生量子现象的井喷式发展，量子物质的范畴已从关联电子材料体系扩展为更加广泛的物质体系（**Keimer and Moore, 2017; Tokura, et al., 2017**）。典型的例子是拓扑物态：系统中电子波函数的几何性质，可以在不存在强电子关联、不破坏体系对称性的情况下导致非平凡或“奇异”的电子行为和物理效应。以二维石墨烯和三维拓扑绝缘体为代表的相关领域迅速发展，使人们越来越清楚地意识到，对量子物态的研究不应局限于强关联电子体系，而是需要一种新的、具有更广阔内涵的概念来描述。这个概念就是“量子物质”。到目前为止，被人们较为广泛接受的

量子物质前沿领域包括：①超导电性和超导材料，如非常规超导体、铜氧化物和铁基高温超导、重费米子超导体等；②关联电子体系，如莫特绝缘体、巨磁电阻、多铁材料等；③拓扑物理，如拓扑绝缘体、拓扑半金属、拓扑超导体等；④超流体、超冷原子、(分数)量子霍尔效应等其他量子体系；⑤先进功能材料中的量子现象，如新型热电材料等。

回溯量子物质学科的发展进程，这绝不单纯是各分支方向的简单堆砌，也绝不仅仅是一次简单的学术名词上的创新。“量子物质”这一概念提供了一个本质上的共同线索，即演生物理，将物理、化学、材料、微电子学和量子信息等多个学科的对应前沿领域联系在了一起，为多学科的交叉和融合提供了桥梁。在这里，来自不同学科分支的学术思想、理论方法和技术手段相互碰撞，形成了多元而异质的交融和协同合作，培育了一批新兴学科生长点，同时深刻地影响了现代科学技术的发展，甚至有望推动下一次产业革命。

## 第二节 量子物质与应用前沿领域的科学意义和战略价值

量子物质是多学科融合形成的交叉前沿，已成为物质科学与应用研究的核心领域。它发展于凝聚态物理，具有很强的基础学科属性，其发展将极大推动人们对物质世界的认知水平，丰富人们的知识宝库；它具有很强的交叉性，为材料、化学、微电子学、计算机科学和量子信息等科学领域的交叉融合提供了物质基础与桥梁，催生了一大批新兴学科交叉生长点；它与应用需求密切相关，是发展前沿科技产业的必要物理基础，是高新技术发展的先决条件，极有可能推动下一次产业革命。具体而言，量子物质与应用前沿领域的战略地位表现在以下几个方面。

(1) 对量子物质的研究深刻地改变了人们对物质微观世界的认识，加深了人们对物质中各种单粒子和集体激发规律的理解。传统凝聚态物理的研究范式为基于单电子近似的能带理论和朗道费米液体理论对单电子性质的修正。这

些理论在区分绝缘体、半导体、金属和解释它们的物理性质上取得了巨大的成功，并为半导体科学与技术奠定了基础。而在量子物质中，传统的能带理论和朗道费米液体理论不再适用。由于晶格、电荷、自旋、轨道等自由度紧密地耦合在一起，牵一发而动全身，所以量子物质表现为典型的复杂多体体系，其性质由大量电子的集体激发行所决定，表现出多种多样、与单个电子截然不同的量子行为和特征。回顾历史，量子物质研究的兴起可追溯到 20 世纪 80 年代铜氧化物高温超导体的发现和（分数）量子霍尔效应的观测。前者展现了电子关联相互作用在物质体系中的重要作用，后者则将拓扑这一纯粹的数学概念引入到物质体系中。这些发现确立了量子物质研究的主要方向，即电子的关联性和拓扑特性，它们共同构成了当前量子物质研究的两大核心前沿。

随着量子物质研究的兴起，传统凝聚态物理研究的面貌发生了重大变化，大量新的物理概念和理论方法不断涌现（如非费米液体、量子临界、重费米子等）。此外，在量子物质中观察到许多新奇的演生现象（如量子反常霍尔效应、自旋霍尔效应、高温超导电性、巨磁电阻效应、多铁性与磁电耦合、电荷-轨道有序等）和演生粒子（如外尔费米子、马约拉纳费米子、磁单极子、斯格明子等）。同时，量子物质前沿领域的发展推动了包括角分辨光电子能谱、扫描探针显微镜、中子散射、超快及非线性光谱技术等在内的多种测量手段的发明或发展，人们对微观物质世界的探测得以在亚埃的空间尺度、阿秒的时间尺度上进行；量子多体系统的理论和数值计算方法也得到了空前发展。量子物质前沿领域不断涌现的新材料和新现象，将推动人们建立全新的物理思想，促成科学上的重大变革。

（2）量子物质前沿领域的研究对象、研究方法和技术向相邻学科渗透，与材料、微电子、计算机和信息等多个学科的交叉广泛且深入，表现出丰富的层次特征。随着研究的深入，量子物质领域的发展在深度和广度上表现出强劲的态势。研究对象从早期的电子等费米体系已拓展到光子、冷原子等玻色体系及极化子等复合准粒子体系，从三维块材扩展到量子效应显著的低维和界面体系；物态调控手段愈加多样化、协同化，通过改变压力、磁场、电场、应力、堆垛摩尔周期等多种方式实现对量子物态和性质的调控；对材料制备的控制能力不断提高，薄膜生长和异质结构筑技术使得人们有望实现“自下而上”的功能导向的原子制造技术路线，在原子尺度上构造、搭建、调

控量子物质体系，进而直接制造功能器件。

量子物质前沿领域的交叉性很强，与物理学、材料科学、化学、信息科学、能源科学存在着密不可分的联系。该前沿领域中的每个新材料和新现象的发现，都有可能催生出一个新的学科方向。例如，凝聚态物理中对称性自发破缺的概念在粒子物理、宇宙学等多个领域都有广泛应用。凝聚态理论物理学家安德森（Anderson）借鉴超导理论最早指出，由对称性破缺产生的戈德斯通（Goldstone）玻色子可以通过吸收无质量的规范场而获得质量。随后，三组研究者独立完成了具体的相对论场论计算，表明规范对称的自发破缺使得规范粒子获得质量，这就是基本粒子质量起源的安德森-希格斯（Anderson-Higgs）机制。又如，自旋电子学是磁性物理与信息技术相结合的一门新兴交叉学科，它利用固体电子内禀自旋实现对信息的处理、存储和传输等。与电子电荷间相互作用能比较，电子自旋间相互作用能要小三到四个量级，因此固体自旋器件具有超低能耗、超快速度和超长相干时间等优势，是“后摩尔时代”信息产业的潜在发展方向之一。

（3）量子物质科学是发展前沿科技产业的必要物理基础，是高新技术发展的先决条件。量子物质前沿领域有着广泛的应用背景，强烈的应用需求极大地推动着该领域的发展，不断地为该领域提供新的课题和研究方向。近年来，随着人工智能、大数据和物联网等新兴信息技术的蓬勃发展，人类社会的发展对计算能力的需求呈现爆炸式增长。目前，硅基半导体集成电路工艺已进入5纳米技术节点，尺寸非常接近物理极限，能耗、性能和制造工艺等瓶颈问题日益凸显。基于量子物质的非易失信息存储、突破冯·诺依曼架构的存内计算和类脑计算、磁电高效耦合的异质结逻辑存储和运算等，以及基于量子态叠加和纠缠的量子计算，将改进和突破现有的经典模式，简化多功能器件的构型，适应高密度、低功耗、极速的海量信息收集和处理，对未来人们的生产和生活方式产生变革性影响。如何在基础材料以及器件层面实现突破，支撑现代社会的计算和数据处理需求，是量子物质领域的重要研究课题，也是国家重大战略需求。

在面对即将到来的第二次量子科技革命的关键时刻，布局量子物质与应用研究对我国的科学发展和技术升级都具有重要的战略意义，这一领域的突破将会像半导体芯片一样给人类社会的发展带来极其深远的影响。

### 第三节 量子物质与应用前沿领域的现状及其形成

“量子物质”首次作为专业术语出现在论文中是在 20 世纪 90 年代。在 2010 年前后，这个概念开始较为广泛地出现于论文和学术活动之中（Cheong, 2021）。可以看到，“量子物质”是一个相对新颖的概念，它的内涵也在过去十年中不断得到扩展。在“量子物质”这一概念出现的早期，它一般指凝聚态物理中的强关联电子体系，随着拓扑物态、低维物理和新型磁性等研究领域的兴起，量子物质的研究对象不断增多，内涵日益扩大，目前形成了一个成熟的、覆盖面广泛的前沿领域。根据自身物理规律的特质以及与不同应用领域的融合情况，可将量子物质与应用这一前沿领域分为超导与强关联体系、拓扑量子物态体系、低维量子体系、多自由度耦合量子物态体系、极端条件下的新奇量子物态以及量子物质的探索与合成六个方向。这六个方向既有各自的研究特点，又相互联系、相互促进。本节和随后的章节将梳理这六个方向的发展情况和现状，进一步凝练和明确重点科学问题及优先发展方向。

#### （一）超导与强关联体系

20 世纪中期，基于固体能带论的朗道费米图像在描述很多的金属、半导体和绝缘体及其相关的科学问题时取得了巨大的成功，这为半导体物理和计算机科学的飞速发展奠定了基础。在随后的一段时间内，凝聚态物理研究的基石是朗道费米液体理论和对称破缺的概念，通过确定反映系统基本对称性的序参量，可以确定该对称性的出现条件、特性和对外界的响应。然而，人们发现存在越来越多的材料，用固体能带论来描述它们时会出现一些很严重的问题。究其原因是在经典能带理论的框架下，人们把电子之间的相互作用当作弱微扰进行了平均场的处理。这样的处理可以大大简化计算的复杂性，使得固体中大量电子的基本属性能够被确定下来。然而在很多真实材料中，这样的简化很难成立，对电子属性的描述需要涉及电子的强关联特性。20 世

纪 80 年代，铜氧化物高温超导体和（分数）量子霍尔效应的发现颠覆了传统的朗道理论框架。以铜氧化物和铁基超导为代表的两大类高温超导体以及重费米子超导、量子临界、无能隙等物理现象一起，构成了关联电子体系的核心内容。从此，凝聚态物理在思想方法和研究方法上都实现了质的飞跃，人们提出了大量新的物理思想（如量子自旋液体）和理论研究方法，发展了多种新的测量手段和数据分析方法。建立一个普适的、超越朗道理论框架的物理模型，将给人类认识和利用物质资源的能力带来质的飞跃。

我国在超导和强关联领域的研究一直得到国家多个部门的持续支持，发展势头良好，在许多研究方向上与国际先进水平相当。就超导方面而言，国家从“九五”期间的攻关和攀登计划就开始有组织地对国内超导研究进行资助，后来这些资助演变为由以科技部主导的 973 计划和 863 计划支持，到“十三五”期间进一步演变为由国家重点研发计划支持。国家自然科学基金委员会对超导和电子强关联方向也一直给予了强有力的支持。强关联电子系统的研究在“十三五”时期之前以国家自然科学基金项目支持为主，之后也得到国家重点研发计划的有力支持。由于这些支持，我国在超导和强关联电子材料领域呈现繁荣发展的局面。在这两个领域的主要分支方向上，我国都有相关人员从事研究工作。在超导的应用方面，我国也走在了世界前列，并具有自身的特色和优势。同时，得益于国家在过去二十年的时间内实施的各项人才政策，很多学成归国的学者也壮大了我国的研究队伍。在超导和强关联电子研究领域，我国在研究队伍规模、测量设备条件、理论认知深度等方面都已具备国际竞争力。另外，我国在制冷技术、综合极端条件物性测量方法、先进谱学测量等方面与国际尖端水平仍有一定差距，亟待进一步发展和完善。

### （二）拓扑量子物态体系

拓扑物理学的研究，源于物理学家对于守恒量和宏观量子数的长期的、内在的兴趣，其快速发展则得益于人们对于拓扑边界态在量子比特和新型电子元件设计中的应用前景的预期。20 世纪 80 年代，量子霍尔效应的发现颠覆了人们对传统物质相和相变理论的认知，将数学中的拓扑概念引入物理学研究，揭示了一类特殊的凝聚态体系中蕴含着一种新的全局守恒量，即拓扑不变量。近十几年来，以拓扑绝缘体和拓扑半金属的理论预测与实验发现为代

表，各种相关的新奇物态相继被预测和发现，如拓扑超导体、玻色拓扑物态、高阶拓扑物态、磁性拓扑物态以及非厄米拓扑物态等，这些新奇物态的发现极大地拓宽了人类对物质科学的认知与理解。多种量子霍尔效应处于该研究领域核心，各种新奇拓扑物态都与其有关联或是其延伸，近年来的进展包括量子反常霍尔效应、量子自旋霍尔效应、量子热霍尔效应、三维量子霍尔效应、（分数）量子霍尔效应以及非线性霍尔效应等。拓扑物态的研究极大地促进了物质科学及其相关学科的快速发展，代表了人类认识自然界物态和相变的研究前沿。除了具有重大理论研究价值，其相关的应用价值也备受瞩目，可能的应用场景包括且不限于新一代超低功耗电子元件、量子信息的储存媒介、高容错量子计算、高效信息传输以及新型表面催化等。

我国在拓扑量子体系也早有布局并且进行了长期的支持。近年来，我国科学家在这一领域不断取得重大的原创性成果，包括量子反常霍尔效应、外尔半金属、本征磁性拓扑绝缘体、三维量子霍尔效应、拓扑材料数据库、铁基拓扑超导体、光/声学拓扑态、非厄米趋肤效应等一系列重要成果，处于国际先进水平。

### （三）低维量子体系

在面向现代信息科技产业的新材料、新器件探索中，低维量子体系有其独特的优势。“界面即器件”，低维材料的电场调控作为场效应管工作的核心，是当今整个半导体产业的基础。由于低维体系中各种量子序之间由竞争而达到的平衡极易受到外界的微扰而被打破，从而对体系的物性产生巨大的影响。外界微弱的光、电、应力等信号就可以通过低维体系而加以放大，这有助于寻找全新的器件原型。更为重要的是，当电子被局限在低维量子体系中时，电子的量子行为因为尺寸效应得到放大而占据主导。由于低维体系中特殊的拓扑结构、各种丰富的量子序以及它们之间的相互关联与竞争，引发了量子霍尔效应等一系列新奇的物理现象。这使低维量子体系成为量子物质研究的核心前沿，深刻影响了量子物质研究的各个分支。例如，一维碳纳米管在材料制备、晶体管研究和电路集成领域的发展取得了一系列长足的进步，为碳基集成电路的发展打下了基础。以石墨烯、过渡金属硫族化合物、黑磷为代表的二维材料改变了低维量子体系的研究范式。这类材料表面无悬挂键，



在原子级厚度可以稳定存在，其中二维半导体材料有望为未来半导体器件提供材料宝库；它们还可任意堆叠，形成丰富的人工异质结，成为发现新物性的理想平台。由于以上这些原因，低维量子体系的研究经过多年发展方兴未艾，涵盖了凝聚态物理的所有主要方向，成为量子物质研究中最活跃的前沿之一。

我国在低维量子体系的各个方向都有布局。十多年来，我国科学家在这个领域中取得了一系列国际瞩目的研究成果，例如，石墨烯和过渡金属硫化化合物的大面积制备，硅烯、硼烯、二维黑磷等新型材料的提出与制备等。但也可以看出，在二维量子材料研究领域，我国大部分领先的进展比较集中在材料制备方面，在新型材料预测、量子特性表征以及调控方面还没有做到全面领先，有许多方向是在国外同行做出首次突破后再迎头赶上。同时，我国在二维逻辑器件、存储器件和类脑计算方面的基础研究也达到了较高水平，但在产业化应用方面还存在明显的短板。

### （四）多自由度耦合量子物态体系

固体中的电子除了拥有电荷自由度和自旋自由度外，还存在与这两个自由度密切关联的多物理维度，如电子轨道、声子、能带、低能激发等，其对应的物态可称为“多自由度耦合的量子物态”。当今科技前沿激烈竞争的情势，迫切要求超越电荷自由度，去积极探索并利用自旋自由度以及演生的其他物理维度，以推动我国科技进步和高科技产业升级换代。自旋电子学利用固体电子的内禀自旋实现对信息的处理、存储和传输等。与电子电荷间相互作用能比较，电子自旋间相互作用能要小三到四个量级，因此固体自旋器件具有超低能耗、超快速度和超长相干时间等优势。新型热电材料能够在固体状态下实现热能和电能的相互直接转换，既能实现精确的温度控制和制冷，也能实现高效热电发电；在量子物质框架下，发展新概念、新方法协同调控电子声子输运，实现热电优值（ $ZT$  值）提高，可显著拓展热电研究领域和范畴。20 世纪 90 年代铁电量子理论的诞生诠释了铁电态作为一个量子物态的地位，改变了铁电材料研究的态势，也触发了多铁性这一新领域；铁电半导体、铁电金属和二维铁电材料等新概念的诞生更是将铁电和多铁材料纳入多自由度耦合量子物态麾下，赋予其新的生命力和应用前景。基于量子物质的存算

一体化和类脑计算将超越传统冯·诺依曼架构，将在非易失性存储、高速高效计算、智能传感和人工智能芯片等未来高科技领域发挥重要作用。

国内自旋电子学方向的研究起步较晚，近十年来，随着投入的逐步增大，该领域逐渐与国际先进水平接轨；在热电领域，我国在过去二十余年取得了长足发展，在高效热电材料、热电输运新效应、先进制备技术、器件研制等方面取得了众多国际领先成果；在铁电材料领域，我国在压电材料、纳米铁电、多层铁电电容器材料等领域达到国际先进水平，不过铁电材料方向实现超越的研究分支并不多，整体研究水平还可提高；在强关联材料相分离的多场调控方面，我国处于国际先进水平，相对而言，对于利用相分离效应构筑新型人工神经网络器件这一前沿领域，目前我国尚处于“跟跑”状态。

### （五）极端条件下的新奇量子物态

极端条件下的探索，不仅在过去带来了意外的量子现象，而且将继续帮助人们认知物理世界。首先，极端条件是调控已知量子物态的便利手段，理论研究可以通过极端条件帮助人们认识和理解新物理规律，为实验研究指明方向。其次，在凝聚态物理中，多体问题中的许多未知还有待极端条件实验在新的参数空间中探索。极端条件下对新奇量子物态的探索虽然难度大、周期长，但却是一个明确可行、有望获得未知物理现象的努力方向。强磁场下拓扑材料、重费米子材料、非常规超导体、半导体材料以及磁性量子材料的研究都随着强磁场装置的不断发展而走向繁荣。在强场激光和超快领域，也有一系列如光诱导的高温超导电性、光诱导的超快相变和调控、强场激光对磁性材料的调控、强场激光对拓扑材料的调控、强光场和微纳结构的强耦合效应等前沿热点问题。超冷原子（分子）系统可以用来模拟复杂的量子多体模型并用显微学的方法研究其物理性质，帮助理解凝聚态物理和量子场论中仍然悬而未决的物理问题，并为精密测量和量子计算等领域提供高精度的量子测控技术。总而言之，多种不同极端条件的结合为现有科学问题的深入理解提供了有价值、有潜力的研究方法。

得益于我国经济实力和科技实力的迅速提升，极端条件下的新奇量子物态的研究也取得了明显的进步。随着金刚石对顶砧高压技术的推广，国内已有多家科研院所成立了高压研究团队，搭建了先进的高压综合极端环境研究