

序 言

FOREWORD

1949年11月1日，中国科学院成立，肩负起领导和推动全国科技事业发展、服务国家工农业和国防现代化建设的历史使命。1955年，党中央决定成立中国科学院学部，其目的在于遴选和汇聚全国各领域最优秀的科学家，在国家科技发展的重大决策中发挥学术领导和战略咨询的核心作用。70多年来，国家科技体制不断完善，中国科学院作为国家战略科技力量，始终把服务国家、造福人民作为根本宗旨，始终践行把握科技发展大势、前瞻研判未来方向、支撑国家科技决策的使命担当。以今天中国数字经济的奔腾算力和现代工业体系的智能控制为例，其最核心的技术原点与产业基石，可追溯至1956年中国科学院学部委员和领域专家研讨提出的发展计算技术、半导体技术、无线电电子学、自动化技术“四大紧急措施”。世纪之交，在全球知识经济浪潮兴起、中国实施“科教兴国”战略的背景下，中国科学院决定持续发布《科学发展报告》《高技术发展报告》《中国可持续发展报告》三大报告，向政府和决策层系统报告世界和中国科技发展的情况，为决策提供科技发展的背景资料和依据，向公众系统传播最新最前沿的知识。“三大报告”对国家、地方及产业界的发展理念、政策制定、发展重点选择产生了深远的影响。

当前，我国正处在为2035年基本实现社会主义现代化目标

而接续奋斗的关键节点，加快高水平科技自立自强，引领发展新质生产力，已成为我们必须回答好的时代命题；与此同时，新一轮科技革命和产业变革深度交织，科技创新成为大国博弈的主战场，科学、技术与社会之间的互动关系正在经历深刻重构。在这一历史方位下，中国科学院落实“国家科学技术界最高学术机构、国家科学技术思想库、自然科学基础研究与高技术综合研究的国家战略科技力量”使命定位，发挥学部的组织领导作用，发挥院士群体凝聚引领全国科学家的作用，发挥专业研究支撑平台和团队的作用，系统凝练思想库成果产出，聚焦“决策咨询系列”“学术引领系列”“科学文化系列”“科学普及系列”，打造优质、特色、体系化的一流思想库系列成果品牌，支撑国家科学技术思想库建设。

其中，“学术引领系列”策划推出新版《科学发展报告》《高技术发展报告》《可持续发展报告》《科技基础能力发展报告》四个报告，由中国科学院六个专业学部常务委员会和学部学术与出版工作委员会负责，组织各领域中国科学院院士及团队、中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报机构等多支专业力量共同编纂。四个报告的体系结构完整、互为支撑，以科学报告提供认知依据，以高技术报告支撑能力跃迁，以科技基础能力报告强化系统韧性，以可持续发展报告锚定长远价值导向，从影响国家长远发展和人类共同未来的根本性、战略性科技问题出发，进行前瞻性的战略研判和发展比较分析，以期搭建科技界与决策层、社会公众之间持续沟通的桥梁。

《科学发展报告》的研究和出版始于1997年，是面向国家政府决策层和社会公众的年度报告，至今已出版发行25本，多方位综述国际科学研究进展，报告全球与中国科学的发展态势，评述前沿动态，推介重大成果，提出促进我国科学发展的思路与建议。近30年来，《科学发展报告》已成为我国科技战略研究的重要品牌，为建设创新型国家和科技强国提供了有益智力支撑。

《2025 科学发展报告》紧扣“夯实基础研究地基、支撑科技强国建设”主线，构建“科学展望—科学前沿—动态扫描”三位一体的内容框架，研判和展望基础科学领域重要发展趋势，揭示和洞察科技前沿重要突破方向，综述重要科技领域国际前沿进展与战略部署，展示基础科学发展的脉络与未来图景。

报告由中国科学院数学物理学部常务委员会与化学部常务委员会牵头组织。第一章和第二章由相关常务委员会确定选题和牵头人，并组织撰写，凸显深厚的学术底蕴和研究水平；第三章和附录由中国科学院科技战略咨询研究院组织，研究支撑团队撰稿，及时、系统地反映各领域的前沿进展与重要战略布局。

第一章“科学展望”，面向未来，展望数学、物理学、化学、天文学、生命科学、地球科学等基础学科的发展趋势，为基础学科研究的前瞻性布局提供参考。

第二章“科学前沿”，立足当前，聚焦领域内研究热点与前沿科学，直面关键核心技术背后的科学瓶颈。数学软件作为支撑科技创新的关键基础设施，呈现“科研—产业”双向牵引的发展格局；后量子密码的数学基础正在重构信息安全底层架构；极端物

态挑战物质基本形态的认知边界；量子物质与量子技术领域从实验室阶段跃升至加速实用化与集成应用的新阶段；多孔框架材料、稀土与锕系元素化学的精准调控，为能源转换、核能利用提供原子级解决方案；合成生物学、脑科学与类脑智能、基于核酸的分子医学、分子自旋科学等新兴交叉领域，正打破传统学科壁垒，孕育下一代诊疗技术与信息处理范式；我国嫦娥探月工程取得举世瞩目的成就，未来将开展全月球长期综合科考，开启月球应用研究的新时代。

第三章“国际科学动态扫描”，立足全球视野，通过对顶尖期刊、领域内重要学术机构评述、评奖、发布的重要战略和政策等，追踪主要科技强国在数学、物理、天文学、化学、生物学、地学、海洋、环境、农业科学等领域的年度进展与重大计划，比较美日德法英等主要科技强国战略部署并深度解析中美科研格局分化态势，为我国优化科技资源配置提供前瞻性参考。

附录部分记录了近三年科学领域重要获奖情况、中国与世界十大科技进展新闻、新当选院士名单等。

受篇幅所限，报告所呈现的内容不一定能体现科学发展的全貌，重点是从当年受关注的科学前沿成果中，择要进行介绍与评述。

本报告的研究和撰写凝聚了众多专家的智慧 and 心血，在此谨向参与报告研究、撰写的众多院士专家团队致以衷心感谢，向参与本年度报告的咨询与审稿工作（按照姓氏笔画排序）的王友德、王世强、王道文、龙桂鲁、叶萌春、冯玮、冯霄、吕中元、吕厚

远、刘文彬、孙思维、李龙、李莹、李春来、李嘉禹、吴乃琴、吴学兵、吴善超、何中虎、沈冰、沈电洪、张力勤、张正斌、陆发隆、郁昱、明平兵、周济林、赵永席、袁辉球、夏志国、顾兆炎、徐骏、高小山、郭少明、黄培强、龚旭、章跃标、章福祥、惠鹤九、谢泽雄、谭宗颖、戴俊彪等专家，参与报告支撑工作的中国科学院科技战略咨询研究院等团队，一并表示衷心感谢。

中国科学院数学物理学部第十七届常务委员会主任



中国科学院化学部第十七届常务委员会主任



2026年5月

目 录

C O N T E N T S

序言

第一章 科学展望

- 1.1 从发现到设计——近期凝聚态物理学进展
谢心澄 刘海文 / 002
- 1.2 极端物态：连接宇宙中的极小与极大
张 杰 刘江来 张园园 / 025
- 1.3 天文学研究进展与展望
武向平 李向东 高 亮 等 / 037
- 1.4 融合变革中发展的合成科学
丁奎岭 吴骊珠 / 056
- 1.5 整合生物学发展展望
李 林 张学博 陈大明 / 065
- 1.6 我国行星科学研究：现状与展望
潘永信 / 080

1.7 调和分析的核心猜想与方法革命——跨领域交叉融合

田 刚 苗长兴

/ 094

第二章 科学前沿

2.1 基于数学软件的前沿交叉科学

袁亚湘 陈伟坤 刘亚锋

/ 120

2.2 后量子密码的研究现状与迁移挑战

王小云 喻 杨 王安宇

/ 133

2.3 核物理与强子物理科学前沿——极端条件下的强相互作用物质

马余刚 邹冰松 赵政国

/ 152

2.4 量子物质与量子技术前沿

潘建伟 向 涛 陈仙辉

/ 170

2.5 多孔框架材料科学前沿

卜显和 陈小明

/ 183

2.6 分子视角中的自旋化学与量子物理

高 松 蒋尚达

/ 197

2.7 稀土和锕系元素化学前沿

严纯华 张洪杰 叶国安

/ 205

2.8 合成生物学前沿

邓子新 刘陈立 傅雄飞 等

/ 219

2.9 基于核酸的分子医学前沿

谭蔚泓 周 翔 樊春海 等

/ 234

2.10 脑科学与类脑技术前沿

骆清铭 王以政 施 华 等

/ 247

2.11 基于载人月球探测的关键科学问题

李献华 林杨挺 林红磊

/ 258

第三章 国际科学动态扫描

3.1 数学

赵 晶 王晓欢

/ 274

3.2 物理学

黄龙光 沙小晶

/ 282

3.3 天文学

王海名 范唯唯 韩 淋 等

/ 295

3.4 化学

边文越

/ 308

3.5 化学工程

张超星

/ 318

3.6 生物学

邢 颖 傅立峰

/ 330

3.7 农业科学

袁建霞 陈晓怡 惠仲阳 等

/ 345

3.8 地球科学

郑军卫 刘文浩 刘 学 等

/ 355

3.9 海洋科学

於维樱 高 峰 冯志纲 等

/ 370

3.10 环境科学

廖 琴 曲建升 曾静静 等

/ 385

3.11 世界主要科技强国和经济体科技战略部署	
张秋菊 李 宏 王建芳 等	/ 400
3.12 全球科研产出新格局下的中美优势领域分化	
王小梅 李国鹏 宋心玉	/ 420

附录

附录一 2023—2025 年诺贝尔奖（自然科学类）简介	/ 446
附录二 2023—2025 年沃尔夫奖（科学类）简介	/ 464
附录三 2023—2025 年引文桂冠自然科学奖简介	/ 485
附录四 2023 年国家最高科学技术奖及国家自然科学奖一等奖简介	/ 493
附录五 2023—2025 年两院院士评选中国与世界十大科技进展新闻	/ 495
附录六 2023 年和 2025 年中国科学院、中国工程院新当选院士名单	/ 533

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Outlook on Science

1.1 From Discovery to Design—Recent Progress in Condensed Matter Physics	/ 024
1.2 Extreme Matter and States: Connecting the Smallest and the Largest in the Universe	/ 035
1.3 Recent Progress and Prospect of the Development of Astronomy	/ 055
1.4 Development of Synthetic Science in the Context of Integration and Transformation	/ 064
1.5 Prospect on the Development of Integrative Biology	/ 078
1.6 Planetary Science Research in China: Current Status and Prospects	/ 092
1.7 Core Conjectures and Methodological Revolutions in Harmonic Analysis: Interdisciplinary Cross-fertilization	/ 116

Chapter 2 Frontiers in Sciences

2.1 Mathematical Software-Enabled Frontier and Interdisciplinary Science	/ 132
2.2 Research Status and Migration Challenges of Post-Quantum Cryptography	/ 151
2.3 Scientific Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics —Strong-Interaction Systems under Extreme Conditions	/ 169
2.4 Frontiers in Quantum Matter and Quantum Technology	/ 182
2.5 Scientific Frontier of Porous Framework Materials	/ 196
2.6 Spin Chemistry and Quantum Physics from a Molecular Perspective	/ 204
2.7 Frontiers in Rare Earth and Actinide Elements Chemistry	/ 218

2.8 Frontiers in Synthetic Biology	/ 233
2.9 Frontiers of Nucleic Acid-Based Molecular Medicine	/ 246
2.10 Frontiers in Brain Science and Brain-Inspired Technology	/ 256
2.11 Key Scientific Issues Related to Crewed Lunar Exploration	/ 271

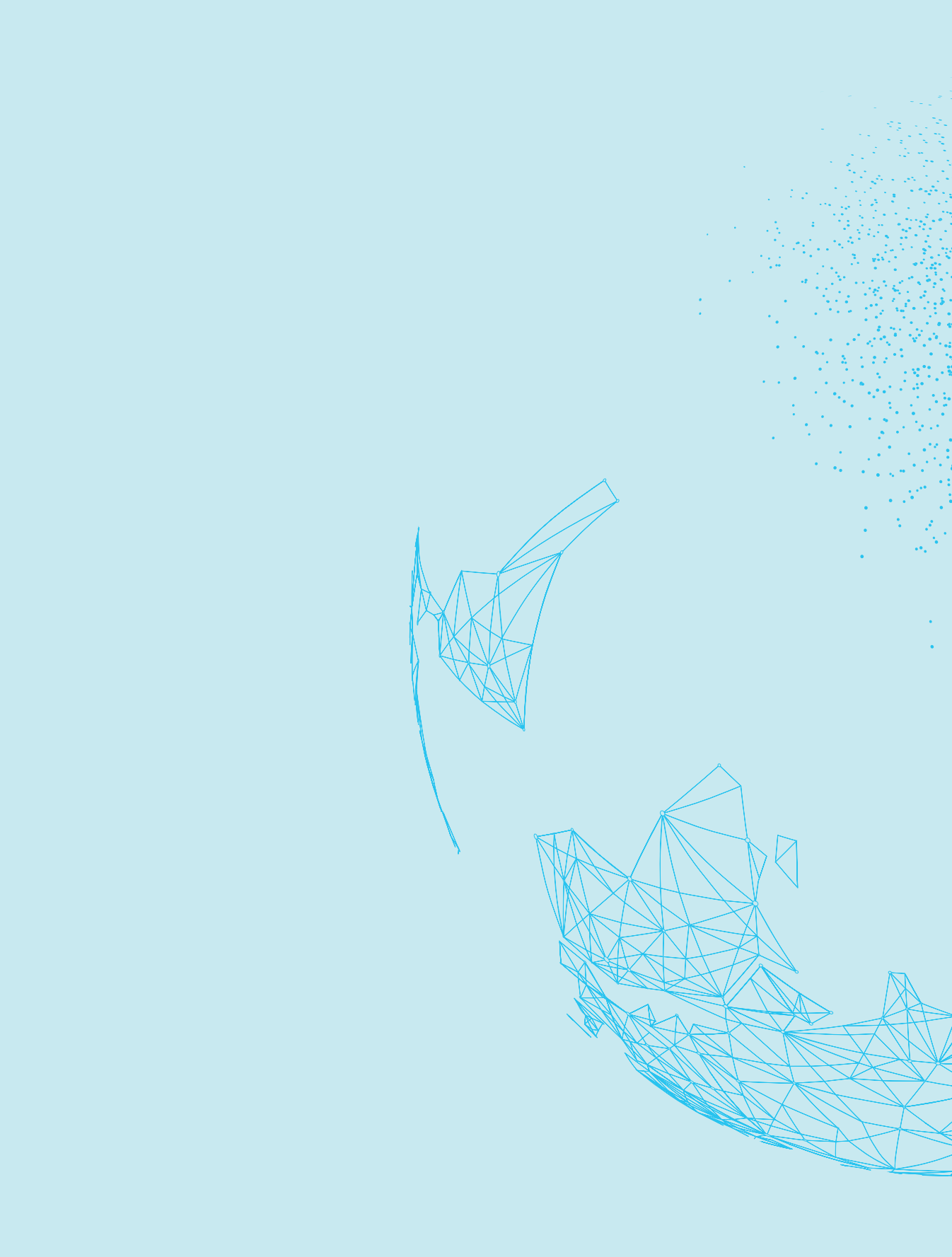
Chapter 3 Scanning of Scientific Progress

3.1 Mathematics	/ 281
3.2 Physics	/ 294
3.3 Astronomy	/ 307
3.4 Chemistry	/ 317
3.5 Chemical Engineering	/ 329
3.6 Biology	/ 344
3.7 Agricultural Science	/ 354
3.8 Earth Science	/ 368
3.9 Marine Science	/ 383
3.10 Environmental Science	/ 398
3.11 Science and Technology Strategies of Major Technological Powerhouses and Economies	/ 419
3.12 China-U.S. Divergence in Comparative Advantage across Research Areas in the New Global Landscape of Research Output	/ 443

Appendix

1. Introduction to the 2023-2025 Nobel Prize in Natural Science	/ 446
2. Introduction to the 2023-2025 Wolf Prize in Natural Science	/ 464
3. Introduction to the 2023-2025 Citation Laureates in Natural Science	/ 485

4. Introduction to the National Supreme Science and Technology Award and the First Prize of Natural Science for 2023 and 2025	/ 493
5. Selection of China's and World's Top 10 Advances in Science and Technology News by Academicians of the Two Academies (2023-2025)	/ 495
6. List of the Newly Elected CAS and CAE Members in 2023 and 2025	/ 533





第一章

科学展望

Outlook on Science

1.1 从发现到设计 ——近期凝聚态物理学进展

谢心澄^{1,2} 刘海文³

(1. 北京大学物理学院量子材料科学中心; 2. 复旦大学理论物理与信息科学交叉中心; 3. 北京师范大学物理与天文学院)

本文回顾了近期(2010—2025年)凝聚态物理学的演进历程。这一时期见证了凝聚态物理学从“观测与表征”向“设计与操控”的根本性范式转移,是学科从被动理解物质走向算法化主动“编程”物质的关键阶段。本文梳理了从拓扑绝缘体的发现到镍基超导的突破,从非平衡态动力学的确立到量子计算材料的工程化实现的宏大图景,涵盖拓扑几何与新物态、强关联电子与超导机理、人工物质与复杂系统三大核心领域。本文旨在阐述凝聚态物理学如何通过维度、对称性、纠缠与耗散的精确控制,重塑我们对物质世界的认知与构建能力。

一、引言：从发现到设计的范式转移

回溯凝聚态物理学的演进历程,从发现走向设计是学科发展的核心主线。20世纪70年代,超晶格技术的诞生使人类学会了模仿自然并改良微观结构,确立了以“结构与能带工程”为核心的范式,标志着物质设计进入“1.0时代”。这一范式不仅成为21世纪先进生产力的重要驱动,更为当今人工智能(artificial intelligence, AI)的蓬勃发展奠定了坚实的物质基础。当前凝聚态物理学正跨入物质设计的“2.0时代”。这一新阶段侧重于对物质更深层次的理解与精确控制:

研究不再局限于材料的成分与结构，而是聚焦于对维度、对称性、纠缠与耗散等量子物理基本概念的深度操控。在此基础上，科学家得以设计出新奇的量子材料与器件，并实现对其物性的系统性预测与调控。

近 15 年（2010—2025 年）正是物质设计“2.0 时代”的关键发展期，见证了凝聚态物理学从“观测与表征”向“设计与操控”的根本性范式转移，是学科从被动理解物质走向算法化主动“编程”物质的关键阶段^[1-3]。在此期间，凝聚态物理在多个方面取得了突破性进展，展现出从非平衡态动力学的确立到量子计算材料的工程化实现的宏大图景^[4-6]，涵盖了拓扑几何与新物态、强关联电子与超导机理、人工物质与复杂系统三大核心领域^[7,8]。

在这一过程中，学科的核心任务逐渐从“发现自然界存在的有序态”转向“利用拓扑几何与量子特征设计人工量子物质”^[5,9]。凝聚态物理学通过对维度、对称性、纠缠与耗散的精确控制，重塑对物质世界的认知与构建能力^[4]。关于非厄米拓扑物理、张量网络态^[10,11]、开放量子系统模拟^[12,13]以及电路量子电动力学（circuit quantum electrodynamics, circuit QED）^[14]的一系列奠基性工作，为后续的量子技术发展提供了理论语言和实验工具^[15]。基于对称性指标^[16]和拓扑量子化学^[17]的高通量筛选方法的建立^[18]，使得拓扑材料的研究摆脱了对偶然发现的依赖，进入了利用计算工具进行系统化筛选与设计的新阶段^[19]。这一转变不仅加速了新材料的发现，更确立了“算法驱动物理”的新范式^[20]，能够在庞大的无机晶体数据库中精准定位具有特定拓扑性质的量子材料^[21-24]。

二、拓扑几何与新物态

1. 拓扑绝缘体：自旋轨道耦合下的新物质相

拓扑绝缘体的发现标志着对绝缘态分类的根本性变革。传统的能带理论根据能隙存在与否区分金属和绝缘体，而拓扑能带理论则根据波函数在布里渊区上的拓扑性质对绝缘体进行细分^[25]。凯恩（C. L. Kane）和梅勒（E. J. Mele）指出，对于自旋轨道耦合系统，存在一种新的拓扑不变量—— Z_2 不变量^[26]。这一不变量只

能取 0 或 1 两个值，分别对应于普通绝缘体和拓扑绝缘体。其物理本质在于，强自旋轨道耦合在能带结构中充当了动量依赖的有效磁场，使得自旋向上和自旋向下的电子感受到相反的等效磁通，从而在保持总时间反演对称性的前提下实现了非平凡的拓扑态^[27]。

拓扑绝缘体最显著的特征是“体－边对应关系”（bulk-boundary correspondence）^[28]：体能带的非平凡拓扑性质必然导致在样品边界处出现受保护的无能隙金属态。对于二维量子自旋霍尔绝缘体（quantum spin Hall insulator, QSHI），这一边缘态表现为一对反向传播的螺旋边缘态，电子的自旋方向与其动量方向严格锁定^[29]。这种自旋－动量锁定禁止了非磁性杂质引起的背向散射，因为背向散射要求电子翻转动量的同时翻转自旋，而在时间反演对称性保护的体系中，非磁性杂质无法引起自旋翻转。但是，需要注意的是，仅消除背向散射并不等同于完全消除能量耗散。近期的研究指出^[30]，在拓扑电子器件中实现真正的无耗散传输，还需满足注入模式数等于隧穿模式数与背向散射模式数之和（ $N_{\text{in}}=N_{\text{tunl}}+N_{\text{bs}}$ ）这一严格判据，基于注入、隧穿与背向散射参与模数的平衡来刻画何时能够避免内部发热，从而把“无耗散”从直观口号提升为可工程化验证的设计判据。

2. 拓扑量子化学与对称性指标：大数据的胜利

早期拓扑材料的发现往往依赖于物理学家的直觉和个案计算。2017 年左右引入的拓扑量子化学和对称性指标理论改变了这一局面。这一理论框架的核心洞见在于：仅仅通过分析晶体在高对称点上的能带表示（不可约表示），就可以推断出能带在整个布里渊区的拓扑性质。如果高对称点的原子轨道表示无法组合成一组局域化的万尼尔函数（Wannier function）^[31]，那么该材料必然是拓扑非平庸的。这种方法将复杂的拓扑不变量计算转化为对晶体对称性的简单代数分析，极大地降低了计算成本。利用这一高效算法，研究人员对无机晶体结构数据库（Inorganic Crystal Structure Database, ICSD）中的数万种材料进行了高通量扫描^[32]。结果表明，自然界中相当比例的材料具有潜在的拓扑性质^[33]。这一发现直接推动了包含数千种拓扑绝缘体和拓扑半金属的在线数据库的建立，改变了拓扑材料“稀缺”

的旧观念。从此，寻找拓扑材料进入了按图索骥的大数据时代，物理学家可以根据所需的拓扑性质（如特定的表面态或节点结构）在数据库中反向搜索候选材料，极大地加速了实验验证的进程。

3. 拓扑物态的深化：外尔与狄拉克半金属的崛起

2010 年以后，拓扑物理的研究重点延伸到了拓扑半金属。外尔费米子（Weyl fermion）和狄拉克费米子（Dirac fermion）最终在固态晶体的低能激发中找到了对应^[34]。狄拉克半金属可以看作是三维版的石墨烯，而外尔半金属则是在时间反演或空间反演对称性被破缺时出现的。TaAs 家族化合物是首个被实验证实的外尔半金属体系^[35,36]。外尔半金属独特的特性体现在其表面态和体态的对应关系上：在表面布里渊区，费米面呈现出非闭合的“费米弧”结构，连接着体态外尔点的投影。此外，手性反常效应导致了巨大的负磁阻效应，即当电场与磁场平行时电阻减小^[37]。除了标准的外尔费米子，凝聚态物理还孕育了高能物理中不存在的粒子。随后，理论预言并实验证实了“第二类外尔半金属”^[38]。在 WTe₂ 和 MoTe₂ 等层状材料中，严重倾斜的外尔锥打破了洛伦兹不变性，导致费米面不再是点状，而是电子和空穴口袋在接触点相切的“零能隙”结构。这种独特的能带结构导致了强各向异性的磁输运性质和源于“外尔轨道”的非常规量子振荡。外尔轨道由体态的手性朗道（Landau）能级和表面的费米弧共同构成，其振荡行为随样品厚度衰减，为体-边对应关系提供了独特的非局域输运证据。

4. 拓扑量子物态的深化与广延：量子反常霍尔效应的代际演进

量子反常霍尔效应（quantum anomalous Hall effect, QAH 效应）的研究经历了一条清晰的演进脉络。第一代磁性掺杂体系〔如 Cr 掺杂 (Bi,Sb)₂Te₃〕确立了“拓扑+磁性”的范式^[39]，但受限于无序，观测温度极低^[40]。第二代本征磁性拓扑绝缘体（如 MnBi₂Te₄）大幅降低了无序影响，并发现了轴子（axion）绝缘体态^[41]。MnBi₂Te₄ 具有层间反铁磁、层内铁磁的特性，奇数层表现为 QAH 效应，偶数层则展现出轴子绝缘体态，具有量子化的磁电响应。第三代莫尔量子物质则

在纯碳基或半导体系统中实现了 QAH 效应，并允许原位调控^[42,43]。在 21 世纪 20 年代，研究重心转向高陈数 QAH 态。通过构建多层结构，成功实现了多通道无耗散输运。高陈数 QAH 效应不仅提高了霍尔电导，也为低功耗自旋电子器件提供了可能。莫尔系统还为研究分数量子反常霍尔效应（fractional quantum anomalous Hall effect, FQAH 效应）提供了前所未有的机会。这种不依赖于强磁场的分数统计态的实现，不仅在基础物理上证实了拓扑平带中相互作用的重要性，也为未来的拓扑量子计算提供了更加稳定和易于集成的硬件平台。

5. 非线性霍尔效应

非线性霍尔效应突破了传统霍尔效应依赖时间反演对称性破缺（如外加磁场或磁序）的限制，转而在保持时间反演对称性但破坏空间反演对称性的量子材料中实现横向输运。其内禀物理机制源于动量空间费米面附近的贝里曲率偶极子（Berry curvature dipole），即贝里曲率的一阶矩，这使得电子在交流电场驱动下产生二阶非线性响应^[44]。除了内禀几何贡献外，杂质散射诱导的侧跳（side-jump）和斜散射（skew-scattering）等外禀机制也在非线性输运中扮演关键角色^[45,46]，且可以通过标度律分析与内禀贡献进行区分。

实验上，非线性霍尔效应首先在 WTe_2 等具有低对称性的外尔半金属中被观测到，该效应表现出独特的晶体取向依赖性以及可通过门电压调控符号的特性，证实了门电压对能带拓扑性质的操控能力^[47,48]。凭借其电流响应与电场平方成正比（ $j \propto E^2$ ）的特性，非线性霍尔效应具备天然的频率倍增和整流功能，被认为是开发无需偏置电压的室温太赫兹探测器、无线能量采集器及贝里曲率存储器的理想方案。此外，这一概念已被推广至非线性自旋霍尔、非线性能斯特及马格努斯霍尔效应等广义非线性输运领域。

6. 凝聚态体系中的量子几何效应

量子几何张量作为波函数希尔伯特空间的核心几何量，其虚部贝里曲率与实部量子度规的偶极矩效应，为非线性输运提供了全新的物理机制。在空间反演

破缺体系（如 WTe_2 ）中，贝里曲率偶极子主导了电非线性霍尔效应^[44]；而在保留宇称-时间（parity-time, PT）对称性的反铁磁体（如 MnBi_2Te_4 ）中，量子度规偶极子则独立诱导了显著的二阶非线性霍尔电压及纵向响应^[49,50]，这一机制即使在零贝里曲率下依然有效。此外，在笼目（Kagome）磁体 Fe_3Sn_2 中^[51]，电子波包的反常轨道极化率与磁场耦合产生了磁非线性霍尔效应，这表明量子几何不仅刻画了电子态的静态结构，更直接决定了外场驱动下的复杂非线性动力学行为。

在动能被淬灭的平带系统中，量子几何效应超越了传统的能带色散理论，成为决定超导电性与拓扑物态稳定性的关键因素^[52]。对于魔角石墨烯等平带超导体，其超流权重主要源于由量子度规定义的几何贡献，这种“几何超导”机制使得电子在极平能带中仍能获得有限的有效质量并维持相干性，从而实现远超 BCS 理论（Bardeen-Cooper-Schrieffer theory）预期的超导转变温度^[53]。与此同时，在莫尔超晶格（如转角 MoTe_2 ）中，零磁场分数陈绝缘体的实现严格依赖于量子几何量在动量空间的均匀分布；只有当平带的量子度规与贝里曲率满足特定的迹条件与均匀性判据时，强关联相互作用才能稳定地诱导出分数量子反常霍尔效应。

7. 实空间拓扑与自旋电子学：磁性斯格明子的兴起

磁性斯格明子（skyrmion）的研究改变了对实空间自旋结构的操控能力^[54]。斯格明子是具有非平凡拓扑性质的涡旋状自旋结构^[55]，其行为如同具有质量的粒子，稳定性受到拓扑保护。随着实验分辨率的提高，蒂勒（Thiele）方程成为描述斯格明子动力学的标准模型^[56]。研究重点之一是理解斯格明子与材料中缺陷导致的钉扎中心的相互作用，霍尔效应导致斯格明子在复杂能量景观中表现出高迁移率，往往绕过钉扎中心而非被捕获。物理学家通过人工制造缺陷阵列^[57]，构建了“棘轮”和“二极管”，实现了斯格明子定向输运和逻辑运算。关于斯格明子晶格稳定性的研究也取得了进展，无序的斯格明子玻璃相与有序的斯格明子晶格相之间存在着动态转换机制，这使得该体系成为探索非平衡统计物理的重要研究平台。与此同时，在氧化物超晶格中发现了一系列极性涡旋和斯格明子，利用

电场和应力可对极性拓扑态进行确定性操控，这为超快存储器的研发提供了物理基础^[58]。

8. 拓扑超导与马约拉纳零能模

在 21 世纪初期，对拓扑绝缘体的研究迅速拓展至超导领域^[59]。实验物理学家对马约拉纳零能模（Majorana zero mode, MZM）的探索是该时期的重要科学议题^[60]。2012 年首次观测到的零偏压电导峰被视为 MZM 存在的首个迹象^[61]。然而，该领域随后经历了深度的自我修正期，因为许多平庸机制 [如安德烈耶夫（Andreev）束缚态] 也能产生类似信号，引发了关于“量子化电导平台”真伪的讨论。问题的解决依赖于材料科学的进步和更严格的验证协议。近年来，凭借原子级平整的异质结的制备^[62]，以及基于铁基超导体（如 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ ）涡旋芯态的研究^[63]，研究人员观测到与 MZM 相符的零能模信号。目前，基于拓扑保护的量子比特处于原型验证阶段，目标是利用拓扑保护降低其对局域噪声的敏感性，但其系统级优势仍有待进一步实证。

9. 非阿贝尔编织的新范式

拓扑狄拉克费米子模 [如 QSHI 中的杰基夫-雷比（Jackiw-Rebbi）零能模^[64]或高阶拓扑绝缘体中的角态] 本质上可视作受么正对称性保护的马约拉纳对，同样具备非阿贝尔统计特性^[65]。研究表明，在手性对称性破缺导致简并解除的条件下，杰基夫-雷比零能模展现出一种广义的、连续可调的非阿贝尔编织统计及融合规则^[65,66]。传统的非阿贝尔编织依赖于拓扑超导体中 MZM 的“半电荷”特性及阿哈罗诺夫-玻姆（Aharonov-Bohm）效应^[67]。而在自旋超导体这一新机制中，激子凝聚形成电中性但携带自旋的库珀对，其拓扑边界态通过阿哈罗诺夫-卡舍尔（Aharonov-Casher）效应积累非阿贝尔几何相位^[68]。这种机制利用磁偶极矩（自旋）在电场梯度涡旋下的量子效应，为非阿贝尔统计的实验验证提供了更清晰的物理图像。

三、强关联电子与超导机理

1. 高温超导：交织序与配对密度波的胜利

如果说拓扑材料是设计的结果，那么高温超导的研究则是发现的过程。在 2015 年之前，学界倾向于将高温超导相图中的各种有序态视为相互“竞争”的序参量。然而，后续工作指出，这些序参量实际上是“交织”在一起的，它们源于同一个微观机制^[69]，甚至可以共同构成一种全新的量子态。在交织序的框架下，配对密度波（pair density wave, PDW）被确立为理解铜氧化物物理的关键^[70]。PDW 是一种奇异的超导态，其库珀对的质心动量非零，导致超导序参量在空间上呈现周期性调制。理论研究表明，PDW 态可以自然地解释层间解耦现象和电子液晶相^[71]。

利用约瑟夫森（Josephson）扫描隧道显微镜，研究人员直接观测到了超导能隙的空间调制，其周期与电荷密度波倍频一致，这一突破性的实验证据有力地支持了 PDW 假说^[72]。强涨落的 PDW 态有可能提供了统一视角来看待铜氧化物中的赝能隙态、费米弧、奇异金属等这些看似孤立的现象，有学者认为这些奇异行为本质上都是同一复杂量子态在不同能量和温度尺度下的投影，也许预示着理解高温超导机理研究迈出了决定性的一步。

2. 界面与低维超导的新机制：FeSe/SrTiO₃ 与 Ising 超导

自 2012 年以来，随着范德瓦耳斯（van der Waals）异质结制备技术的成熟，物理学界开始在二维极限下通过界面工程和能带调控探索超导的新机制。单层 FeSe 生长在 SrTiO₃（STO）衬底上时，其超导转变温度（ T_c ）可被显著提升至 65 K 甚至更高^[73]。角分辨光电子能谱（angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES）实验观测到了独特的“复本能带”，其与主能带之间的能量差与 STO 衬底中高频氧光学声子模式的能量相对应^[74]。理论与实验分析指出，FeSe 层电子与 STO 衬底声子通过小动量转移的前向散射发生强耦合。这种机制与体系内部的自旋涨落协同工作，在几乎不破坏 $s_{\pm}$ 波配对的同时，显著增强了配对势。

另外，在单层 NbSe_2 等过渡金属二硫化物中，发现了一种能够在超强面内磁场下存活的超导态，称为“伊辛（Ising）超导”^[75]。由于缺乏中心反演对称性且具有强自旋轨道耦合，电子自旋被牢牢锁定在垂直于晶体平面的方向上^[76]。这种自旋-能谷锁定效应在能带的 K 点和 K' 点产生了一个巨大的等效内禀磁场，保护了库珀对不被外加面内磁场拆散^[77]，使其上临界场远超泡利（Pauli）极限。Ising 超导的发现不仅拓展了超导的生存极限，也为在强磁场环境下操作超导量子器件提供了新的材料选择。

3. 镍基超导的崛起： $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的双层革命

2023 年， $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中压力诱导的近 80 K 高温超导电性的发现，是高温超导领域的又一里程碑^[78,79]。 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 在常压下表现为金属，原位高压实验表明，随着压力增加至 14 GPa 以上，材料发生结构相变， $\text{Ni}-\text{O}-\text{Ni}$ 键角趋向 180° ，极大地增强了层内电子跃迁和层间磁性交换。这一结构变化是触发高温超导电性的关键因素。在微观机制上，与铜氧化物主要由 $d_{x^2-y^2}$ 轨道主导不同， $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中 d_z 轨道起到了至关重要的作用^[80]。层间较强的反铁磁耦合主要通过顶角氧介导的 d_z 轨道超交换相互作用实现^[81]。这种双层结构和双轨道物理的结合，展示了多轨道物理和层间耦合在高温超导中的核心地位。这一体系不仅为高温超导机理的普适性提供了关键拼图，也暗示通过调控层间耦合和轨道杂化来设计新型高温超导体是一条可行的路径。

4. 反常玻色金属与“失败的超导体”

2015 年以来，关于量子超导体-金属相变（quantum superconductor-to-metal transition, QSMT）的研究确定了一种奇异的“反常金属”态，无法用传统的费米液体框架对其进行解释。正如卡皮图尔尼克（A. Kapitulnik）等所综述的，当二维超导体（通过磁场、栅压或无序度）被调控至量子临界点附近时，就会出现这种状态。在现象学上，其特征表现为电阻率起初随温度降低而下降，仿佛系统正进入超导态，但在温度趋于 0 K 时却饱和在一个有限值，该值通常比德鲁德