·人物评传·

菲利普·沃伦·安德森：凝聚态物理学奠基人

Philip Warren Anderson: The Founder of Condensed Matter Physics

吴双 /WU Shuang　　彭鹏 /PENG Peng　　高策 /GAO Ce

（山西大学科学技术史研究所，山西太原，030006）
(Institute for History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006)

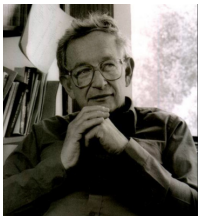
摘　要：菲利普·沃伦·安德森被誉为凝聚态物理学领域的“巨人”。自20世纪40年代以来，他对磁性理论、超导理论和无序系统的电子结构进行研究，并提出安德森局域化；此外还对安德森－希格斯机制做出了重要的贡献，这一机制成为粒子物理学标准模型的基础。1972年，安德森发表了著名文章“多者异也”，其核心思想“涌现”被视为二十世纪重要的哲学洞见，而这篇文章也成为凝聚态物理学的独立宣言。

关键词：菲利普·沃伦·安德森　凝聚态物理学　对称性破缺　涌现　安德森局域化

Abstract: Philip Warren Anderson is revered as a “giant” in the field of condensed matter physics. Since the 1940s, he has delved into research on magnetic theory, superconducting theory, and the electronic structure of disordered systems, proposing the concept of Anderson localization. Furthermore, he made pivotal contributions to the Anderson-Higgs mechanism, which laid the foundation for the Standard Model of particle physics. In 1972, Anderson penned the renowned article “More Is Different”, whose core idea of “emergence” is considered a profound philosophical insight of the 20th century, and the article itself stands as a manifesto proclaiming the autonomy of condensed matter physics.

Key Words: Philip Warren Anderson; Condensed matter physics; Symmetry breaking; Emergence; Anderson localization

中图分类号：K811; O469　DOI: 10.15994/j.1000–0763.2025.07.013　CSTR: 32281.14.jdn.2025.07.013



菲利普·沃伦·安德森

相对论与量子力学是20世纪初物理学划时代的两大理论突破。随着量子力学不断地完善，为凝聚态物理学发展奠定了基础。在凝聚态物理学的发展脉络中，菲利普·沃伦·安德森（Philip Warren Anderson, 1923–2020）是一名极具代表性的人物。他因对无序体系电子结构的基础性理论研究以及对磁学理论发展的科学贡献与范·弗莱克（J. H. Van Vleck）、莫特（N. F. Mott）共同获得了1977年的诺贝尔物理学奖。不仅如此，

基金项目：国家社会科学基金项目“当代宇宙学中的哲学问题研究”（项目编号：24BZX075）；国家社会科学基金重大项目“量子信息科技哲学及其逻辑基础研究”（项目编号：22&ZD046）。
收稿日期：2024年2月25日
作者简介：吴　双（1994–）女，吉林敦化人，山西大学科学技术史研究所博士研究生，研究方向为物理学史、科学哲学。Email: wushuang51660@163.com
彭　鹏（1989–）男，山西榆次人，山西大学科学技术史研究所副教授，研究方向为物理学史、科学哲学。Email: pengpeng@sxu.edu.cn
高　策（1958–）男，山西乡宁人，山西大学科学技术史研究所教授，研究方向为物理学史、科学哲学。Email: Gaoce@sxu.edu.cn

他还在自发对称性破缺等方面做出重要贡献，对凝聚态物理学的发展产生深远影响。

一、安德森的学术之路

1. 家教熏陶，激发科学兴趣

安德森于1923年出生在美国印第安纳州，后跟随其父母迁至伊利诺伊州厄巴纳（Urbana）定居。他的父亲哈里·安德森（H. W. Anderson）是伊利诺伊大学植物病理学教授；外公和舅舅分别是印第安纳州沃巴什学院（Wabash College）的数学教授、英语教授（罗德学者）。[1]安德森家族深厚的学术底蕴为其未来的学术研究生涯构筑了坚实的知识基础。

从安德森的成长轨迹来看，家庭教育是其走向学术生涯最为基础且重要的一步。首先，安德森的父亲十分注重对孩子兴趣的培养。他于居所内建造小型化学实验室，与子共事实验研究。通过父亲的引导与启发，安德森习得丰富的实验实践能力；他还经常带孩子去户外旅游、观察并记录植物，这培养了安德森敏锐的观察力。其次，父亲正直的品格以及母亲埃尔西·安德森（E. Anderson）为人谦逊的精神品质也影响着安德森。[2]最重要的是，父母的生活方式、社交人脉也对安德森的成长起着至关重要的作用，他在1977年获得诺贝尔物理学奖的演讲中就提到了参加“周六旅行者”活动，这是他成长时期中最快乐且具有意义的一段时光。[3]该活动由伊利诺伊州大学的15–30名教职员组成，他们每周六上午驱车前往厄巴纳郊外徒步旅行、游泳、划独木舟、享受篝火野餐以及谈论时下政治话题。正是通过参与这些聚会活动，安德森不仅提升了对政治议题的敏感性，还与伊利诺伊大学物理系主席卢米斯（F. W. Loomis）建立了联系，并在其建议下，选择了哈佛大学的物理系作为深造之地。

2. 转益多师，厚植学术根基

1940年9月，安德森前往哈佛接受本科教育。到了二年级，他转到了电子物理学，这是哈佛为鼓励学生参军而特别设立的专业。正值此时，日本海军航空兵在夏威夷珍珠港基地攻击美国太平洋舰队，这促使美国加入了第二次世界大战。在二战期间，安德森加入由哈佛大学无线电研究实验室和水声实验室组成的项目组。（[2]，p.32）1943年5月他获得电子物理专业的本科学位。同年，安德森进入美国海军研究中心实验室（NRL）担任工程师。

师从范·弗莱克教授是安德森走向凝聚态物理学之门的重要转折点与人生机遇。范·弗莱克是现代量子力学磁性理论的奠基人，他的工作是以量子理论的方法解释磁性物质的微观本质。他最先建立了自旋–晶格耦合引起的顺磁弛豫理论，也最早把晶体场与配位场结合应用于反铁磁性的研究。安德森曾回忆到：“范·弗莱克是一位具有魅力、智慧和深厚修养的人，并且在一些公共领域中拥有绝对发言权。”[4]二战期间，安德森进入由范·弗莱克教授负责的无线电研究实验室理论组，每当他在研究中遇到难题时，就会主动找老师进行讨论。此外，范·弗莱克教授对这位勤奋的少年印象深刻，并给予他具有指导性的建议。（[2]，pp.32–36）

二战结束后，安德森选择继续在哈佛大学攻读硕士学位。期间，他学习了范·弗莱克教授的“量子理论应用的群论”、弗瑞（W. Furry）教授的“统计力学和量子力学”、施温格（J. Schwinger）教授的“原子核物理”以及古德斯米特（S. Goudsmit）教授的“经典力学”等课程。通过这些物理学课程，安德森掌握了关于量子力学的基本原理，这为他在固体物理学领域的研究奠定了丰富、扎实的理论基础。到了博士研究阶段，导师范·弗莱克帮助安德森确定研究选题，通过他的指导，安德森学会以批判性的眼光阅读资料、提出问题及制定研究计划、运用灵活的方式提炼和总结知识点。1949年1月，安德森完成博士论文的撰写，并顺利通过答辩。其论文“微波和红外区域谱线的压力加宽理论”（The Theory of Pressure Broadening of Spectral Lines in the Microwave and Infrared Regions）是对微波光谱学中一个重大问题的突破，随即发表在《物理评论》（*Physical Review*）上。

除学习之外，范·弗莱克还对安德森的个人事业给予帮助。据安德森回忆，在自己刚从哈佛大学毕业时，老师冒着鹅毛大雪驱车赶往贝尔实验室，说服那里的工作人员接纳自己。[5]最终，贝尔实验室固体物理组的联席主管肖克利（W. Shockley）同意安德森留在贝尔实验室从事固体物理研究。

3. 杏坛之上，成就领域“巨人”

贝尔实验室致力于基础科学的研究，依托于固体物理对电子器件进行研发，是当时美国唯一一个专注此领域的研究课题组，它也成为安德森在固体物理学领域大展宏图的重要平台。该实验室以探索新科学知识、推动创新技术发展为理念。这里聚集着科学界中的顶尖人才、具有先进的管理模式以及创新的科研环境。作为一名初出茅庐的研究员，安德森可以在这里遇到许多杰出的物理学家如：肖克利、基特尔（C. Kittel）、赫林（C. Herring）和巴丁（J. Bardeen），并得到他们的帮助。[6]1953年9月，贝尔实验室负责人派安德森参加在日本举行的国际理论物理会议。在本次会议中，安德森围绕磁性研究做了一个演讲，得到了物理学家们的好评。通过本次会议，安德森与对莫特结缘。应莫特之邀，安德森携家人于1961年9月抵达英国，在剑桥大学进行为期一年的访问，同时教授研究生课程。在1967–1975年的八年时间中，每年他都会用一半时间（每年十月到次年三月）在剑桥从事教职、另一半时间在贝尔实验室做科学研究。

1975年，安德森在普林斯顿大学任职，他教授的课程以固体物理学为主。如，多体物理、统计力学、无序物质和二维磁性等。在课堂上他与学生们谈论自己对固体物理学的见解，以及对物理学前沿问题进行交流与讨论。在他的从教生涯中，为许多成功的物理学家提供了宝贵的建议与引导。其中包括1973年诺贝尔奖获得者约瑟夫森（B. D. Josephson）、2016年诺贝尔物理学奖获得者霍尔丹（D. Haldane）。他们在安德森的教学启发与指导下在物理学领域大放光彩。安德森不仅重视学生的理论基础学习，强调理论知识对科研工作的重要性，还十分重视对学生科研思维的培养。霍尔丹曾回忆道：

> 菲尔·安德森是‘凝聚态’物理学领域的“巨人”，他以直观且常常逆向的方式从新的角度看待问题的本质特征，这常常改变了我们思考问题的方式……当我还是一名研究生时，我非常幸运能有他作为我的导师。我会定期与他见面，谈论他交给我解决的问题，但他会告诉我他那天正在思考的事情，看到他的思维过程是一个令人惊奇的事情，让我知道如何思考问题，这决定性地塑造了我未来的职业生涯。[7]

到了1984年，安德森成为普林斯顿大学的全职教授。凭借着多年的教学经验，他写了一本关于凝聚态领域的经典教科书《凝聚态物理学的基本概念》（*Basic Notions of Condensed Matter Physics*），他在这本书中论述了关于对称破缺、元激发、广义刚性、重整化群等概念。其中的一些重要的方法和概念已经成为对凝聚态物理学的主流研究范式。[8]1996年，安德森成为荣休教授。

二、安德森凝聚态物理学成就

安德森是一位极具创造力的物理学家，他的研究主要集中在20世纪50年代至80年代，涉及关于磁性理论、局域化理论以及超导理论等凝聚态物理学中的多个问题。凝聚态物理学曾被嘲笑为“肮脏态物理学（Squalid State Physics）”。然而，正是由以安德森为主的凝聚态物理学家持续不断的开创性研究，使得该领域逐渐发展成为物理学学科中最为重要的分支。

1. 磁学研究的转承巨擘

安德森的磁学研究推动着凝聚态物理学的发展。他的研究主要涉及到反铁磁性研究、自发对称性破缺（Spontaneous Symmetry Breaking）、局域磁矩（Local Magnetic Moments）以及自旋玻璃（Spin Glass）等主题，大致分以下三个阶段：

第一个阶段集中在20世纪50年代，安德森将反铁磁性量子理论作为其开启研究生涯的第一个课题。一方面，表现在关于反铁磁性研究的超交换相互作用，又称为克莱默斯–安德

森超交换（Kramers-Anderson Superexchange Interaction）的成果。1928年，海森堡（W. Heisenberg）就提出了铁磁体自发磁化的量子力学解释，即交换作用理论模型，这一模型为铁磁性理论的发展奠定了基石。随后，基于这一理论，低温自旋波理论和铁磁相变理论等逐渐发展起来。到了20世纪30年代，法国物理学家奈尔（L. Néel）、苏联物理学家朗道（L. Landau）分别独立预测了反铁磁性的存在及属性。与铁磁性不同的是，在反铁磁体系中，相邻的两个原子磁矩趋于反平行。然而，物理学家通常所使用的海森堡模型仅将交换相互作用限制在邻近自旋上，对于真正的反铁磁体并不严格适用。1934年，克拉默斯（H. Kramers）为了阐释物质中的反铁磁性现象，提出了超交换作用模型。证实了被非磁性原子隔开的两个磁性离子之间存在相互作用。然而，他的文章在当时并没有引起足够重视。

第二次世界大战后不久，磁学研究的态势发生重要转变。在战前很多实验物理学家的工作缺少量子理论的观念，他们仅关注于实验观测、或运用经典磁性的理论结论。然而，在战后物理学领域发生了重要转变，这尤其体现在：其一，物理系学生人数迅速增长，从而间接导致磁性研究工作的增加，这些加入者具备较为完整的量子力学课程训练，擅长对观察结果做出量子力学的理论解释；其二，物理学新实验技术的发展，特别是磁共振和中子衍射，这将大大促进物理学的发展与进步。[9]

在与舒尔（C. Shull）以及贝尔实验室的同事基特尔的交流讨论中，安德森不仅了解到中子衍射新技术，还掌握了反铁磁电绝缘体氧化锰（MnO）的实验数据。除此之外，他还阅读了大量关于克拉默斯的学术专著。安德森在克拉默斯理论基础上进行了深入的理论计算，进一步拓展了该模型，并成功地运用该模型解释了金属氧化物中反铁磁性的存在。1950年，安德森发表了“反铁磁——超交换相互作用理论”（Antiferromagnetism: Theory of Superexchange Interaction），他从理论上证明反铁磁体的磁性离子之间存在着间接的交换作用（超交换作用），其一级近似可等效为分子场。[10]安德森在对反铁磁性的超交换作用理论的实际重要性是毋庸置疑的，主要原因不仅在于诸如铁氧体（最近邻之间仅具有基本的反铁磁相互作用），这种材料是一种绝缘亚铁磁体，它是电子电感器、变压器和电磁体的主要材料；还在于安德森意识到超交换的基础是强电子相关性。目前，克莱默斯-安德森超交换作用已经成为现代凝聚态物理学的主要内容。

另一方面，表现为安德森在对反铁磁性的研究中，首次提出了自发对称性破缺的概念，这在今后被确立为凝聚态物理学的学科范式。1952年1月，安德森发表了“反铁磁基态的近似量子理论”（An Proximate Quantum Theory of the Anti-Ferromagnetic Ground State）一文。这篇文章孕育了安德森自发对称性破缺的思想：系统会自发地从多个简并的对称构型中选择一种，从而使其失去对称性（系统的哈密顿量对于该对称性是不变的）。[11]除此之外，安德森还讨论了与反铁磁体自旋方向的集体旋转有关的“戈德斯通模式（Goldstone Modes）”。[12]凝聚态物理学从微观角度出发，研究由相互作用多粒子系统组成的凝聚态物质的结构和动力学过程及其与宏观物质性质的关系。凝聚态物理学的范式就是基于对称破缺这一核心概念建立起来，如平移对称性破缺产生了晶体结构；时间反演对称性破缺产生了磁有序结构等。[13]

第二个阶段集中在20世纪60年代，安德森的兴趣转向为探索金属中的局域磁矩，并根据这种现象建立了安德森模型（Anderson Model），该模型是固体量子杂质模型的奠基之作，也是现代固体电子结构计算的重要组成部分。[14]1960年，安德森在贝尔实验室的同事马蒂亚斯（B. Matthias）等人在发表的文章中，报告了一项实验结果：当在金属中掺入少量磁性原子杂质时，金属是否表现出磁性取决于其电子密度等特性。[15]安德森从马蒂亚斯那里获得了相关数据，经过对实验数据的分析与研究。1961年，安德森在“金属中的局域磁态”（Localized Magnetic States in Metals）中提出了一个简单的、现已成为规范的金属中的“磁

性”杂质原子模型。[16]安德森使用自洽平均场（Hartree-Fock）方法进行分析，他提出，杂质中的电子态与金属中的传导电子态会发生相互作用并杂化，而杂化的程度则决定了磁性的强弱。[15]这篇文章还受到诺贝尔评审委员会的关注。

到了第三个阶段，也就是20世纪70年代，安德森主要贡献在于自旋玻璃模型的建立，自旋玻璃的统计理论对复杂网络系统也产生重要影响。1975年，安德森与埃德沃兹（S. Edwards）提出短程相互作用的自旋玻璃模型。他们得出结论，即相变发生在高温无序状态和低温无序状态之间，高温无序状态下，每个自旋的方向剧烈波动，而低温无序状态下，每个自旋的方向“冻结”为固定但随机的方向。[17]这一结论证明了这些合金被命名为自旋玻璃的合理性，此发现对理解随机材料和复合材料的新方向进行深入探索。在2021年，帕里西（G. Parisi）获得诺贝尔物理学奖，其最著名的工作是给出Sherrington-Kirkpatrick自旋玻璃模型的严格解，他的自旋玻璃理论深刻的地揭示了无序体系中的隐藏对称性，而他的工作就是基于安德森的“EA模型”展开的。安德森创建的自旋玻璃，为许多其他领域的复杂系统提供一个理论模型，除物理学之外，还可以用于组合优化、神经网络及生物演化等研究工作中。[18]

2. 无序电子局域化的开拓先驱

1958年，安德森发表了“在某些随机晶格中不存在扩散”（Absence of Diffusion in Certain Random Lattices），他创造性地提出了著名的安德森局域化理论（Anderson Localization），即无序导致波函数发生指数衰减，出现局域态现象。[19]该理论开创了凝聚态物理学的一个新方向，是凝聚态物理学发展史上一个重要的里程碑。

首先，从量子力学理论上来看，导电电子的波函数被绝大多数的物理学家认为是具有延展性的，这是因为这些理论都假设了电子虽然受到杂质的散射。但晶体是具有周期性的结构，那么，波函数必定会保持延展性。[20]然而，不同于延展波理论，安德森在考虑了杂质和缺陷的散射作用后，发现电子波函数会形成众多振幅和相位各异的散射波，这些散射波相互干涉，从而导致电子波函数发生根本性的变化。在无序系统中，随着无序度的增加，体系电子态局域化。由于局域态的波函数局限在空间的某一范围内，因此对传导没有贡献。

其次，安德森局域化理论的提出得益于贝尔实验室得天独厚的科研环境，为其提供了关键的实验数据与理论支撑。自1945年开始，肖克利带领贝尔实验室的固体物理学研究小组对晶体管进行研究。晶体硅是电子工业的支柱。而与现在不同的是，晶体管在被发现的最初几年都是由锗制成的，因此，贝尔实验室需要进一步深入研究硅晶体中的电子行为，以便日后取代锗以制造性能更优越的晶体管。安德森的同事费赫（G. Feher）致力于研究半导体中掺杂原子的性质，在电子自旋共振实验中，通过对电子自旋弛豫时间的测量，他发现在掺杂浓度较低的区域，自旋扩散效应消失。他将收集的自旋共振数据提供给安德森，并与其进行讨论。基于费赫提供的实验数据，安德森构建出了电子在无序晶格中的简单行为模型。

最后，安德森局域化理论对物理学发展影响深远。安德森局域化理论的文章刚发表时，大多数物理学家对该理论结果持有质疑态度。然而，莫特非常重视波函数局域化的结论，他凭借物理直觉相信这是无序电子系统中的重要概念。基于安德森局域化理论，莫特提出了无序系统中的“迁移率边”（Mobility Edge）、“最小金属电导率”等基本概念。1977年，安德森、莫特以及范·弗莱克凭借“对磁性和无序系统中的电子结构的基础性理论研究”获得了诺贝尔物理学奖。在这之后，其他科学家们也尝试在其他体系中观察安德森局域化现象，其中包括光波、微波、声波、量子光学、超冷原子气体等。

1979年，安德森与与亚伯拉罕斯（E. Abrahams）、理查德罗（D. C. Licciardello）和拉马克里希南（T. V. Ramakrishnan）提出了局域化标度理论（Scaling Theory of Localization），该理论提出了一种基于电导率行为作为系统尺度大小函数的定位方法。[21]

3. 超导研究的登堂引路人

20世纪50年代中后期，随着物理学界对超导的关注与重视，安德森也转向对该领域的研究。在1958年至1966年期间，他发表了30篇关于该主题的学术论文，其中诸多篇章均基于对BCS理论的深入分析、应用及拓展。（[2]，p.158）这包括了约瑟夫森效应、安德森–希格斯机制（Anderson-Higgs）以及共振价键理论（Resonating Valence Bond）。

超导是凝聚态物质中电子的一种宏观多体量子态。一直以来，它都处于凝聚态物理学的前沿领域。1957年，美国固体物理学家巴丁、库珀（L. N. Cooper）与施瑞弗（J. R. Schrieffer）在《物理评论》上发表“超导理论”（Theory of Superconductivity），其研究成果被称为BCS理论。它的创立极大地促进了有关超导研究的进展，也标志着人们对超导电性的解释从宏观唯象阶段进入了微观阶段。

在安德森的超导理论研究中，具有影响力的成果主要表现在以下三个方面：其一，1962年，约瑟夫森根据对称性破缺的概念预言了成对电子通过绝缘势垒的隧穿效应，这也正是受到安德森在剑桥大学课堂上讲到的“对称性破缺思想”的启发。随后，约瑟夫森的预言被安德森与其同事罗威尔（J. Rowell）在贝尔实验室中予以证实。1973年，他也因此获得了诺贝尔物理学奖。从这件事情中，看得出安德森对超导体规范对称性破缺的深刻洞察及对BCS理论的理解，使得他认识到了约瑟夫森效应的重要性。如今，约瑟夫森效应是超导电子学应用的基础，超导量子干涉仪、超导量子计算机以及超导量子比特等依赖于此；其二，1963年，安德森在《物理评论》上发表了关于光子如何获得质量的文章。[22]他意识到若进行一些变量替换，他早些年研究过的BCS超导模型中的库伦效应，恰好就与基本粒子的质量具有相仿的作用。[6]两年后，包括希格斯在内的高能物理学家继续发展了他的工作。如今规范玻色子获得质量的方式通常被称为规范玻色子的亚原子力载体在一种宇宙超导体中获得质量的机制，即，安德森–希格斯机制，这是粒子物理标准模型的关键；其三，1986年，铜氧化物高温超导体的发现是凝聚态物理学发展的一次重要转折。它超越了传统的BCS超导理论，同时揭开了强关联电子体系研究的序幕。安德森提出了共振价键理论，该理论激发了量子自旋液体方面的很多研究，如拓扑序、分数化等概念。他意识到高温超导机理问题与量子自旋液体问题的深刻联系，他启发了不止一代人投身于强关联电子体系新奇量子物态的探索。

三、安德森的科学实践活动

1. 探索学科期刊的规范化

20世纪60年代，为了规范学科发展，安德森提议创办一个行文格式规范且研究内容涉猎广泛的物理学期刊。该建议得到了马蒂亚斯的支持。1964年，二人创办的《物理学》（*Physics Physique Физика*）创刊，并刊登了安德森与马蒂亚斯的发刊词：

> 如果大多数物理学家不得不放弃阅读其他领域的原始材料，甚至是非常接近自己的研究领域，那就太糟糕了，因为他们中的大多数人早已放弃阅读其他科学领域的文章。因此，我们认为建立一个选择性杂志是一个好主意，编辑们尽最大努力提供一系列值得所有物理学家关注的论文。[23]

从以上发刊词，可以看出安德森初衷是希望每位研究者拓宽自己的研究视野，并且将自己的研究专业与其他学科融会贯通，打破科学交流中的学科屏障，试图缓解科学交流中的难题。该期刊的受众将面向国际上所有对物理学感兴趣的研究人员，并且以英文、法文和俄文三种语言印发。安德森选择刊登一些具有话题性和行业代表性的文章，后来期刊内容逐渐专注于固体物理学领域。在创办之初，该期刊就吸引了很多高质量稿件，第一期就刊登了即将获得诺贝尔奖的高能物理学家盖尔曼（M. Gell-Mann）的文章。第三期还包含了贝尔（J. S. Bell）的一篇关于量子力学完备性的文章。

2. 凝聚态物理学的“更名者”

早在1962年，西德创立了刊物《凝聚态物

理》（*Physics of Cndensed Matter*），把固相物理研究和液相物理研究包含在一起是为了增进这两个领域的关系，特别是为了促进液体领域的进一步研究。在1968年剑桥大学也做出了类似的突破，该校著名的固体物理研究组将他们的研究兴趣重新命名为“凝聚态理论”（Theory of Condensed Matter）。到了1970年，一些物理学家开始使用“凝聚态物质”一词，以此来确定研究复杂的物理学学科。安德森也力促这种改变，他在1972年发表的“多者异也”（More Is Different）中主张为凝聚态物理学做智力价值辩护，并且在其中提到了“多体物理学”（Many-Body Physics）这个概念。[24]安德森对这一术语的使用反映了同一时代的物理学家开始使用“凝聚态”来代替“固体”的方式上的转变。

安德森着眼于该学科的本质发展，解开了为学科更名的序幕。随着对铁磁性理论、电子局域化以及超导体的研究的不断深入，他意识到了“凝聚物质”能让人想起众所周知的多体计算难题，而不仅仅是简单的固体。这种由“固体物理学”转变为“凝聚态物理学”的现象，显现出“固体物理学”学科的研究内容发生重要的变革。这个新名称不仅增进了凝聚态物理学家的自我认同，同时也显示出了该领域的严谨性。这种更名为凝聚态物理并不仅仅是简单的重命名，也代表着一股由美国物理学界的知识分子和专业环境所驱动的优先权的转变。安德森的举动促进了该术语在美国的推广。直到1978年美国物理学会（APS）的固体物理学分会正式更名为凝聚态物理学分会（DCMP），由此，固体物理学正式更名为凝聚态物理学。[25]

3. 架起前沿物理与社会之桥梁

坐落于美国新墨西哥州圣塔菲市的圣塔菲研究所（Santa Fe Institute），是一家致力于复杂性科学研究的非营利性研究机构。在1984年，圣塔菲研究所召开了主题为“科学中涌现的综合”（Emerging Syntheses in Science）的创始研讨会，并以探索科学和社会中的涌现行为为核心。应物理学家派恩斯（D. Pines）的邀请，安德森也参加了本次研讨会，并做了名为“自旋玻璃哈密顿量：生物学、统计力学和计算机科学之间的桥梁”的演讲。在研讨会结束后，安德森加入圣塔菲研究所，并成为科学委员会的创始成员之一。

1987年，安德森与诺贝尔经济学奖获得者阿罗（K. Arrow）共同组织了一场关于全球经济发展进化路径的研讨会。本次研讨会共有20位物理学家、经济学家参与，他们进行了为期两周的会谈。安德森对许多科学家描述基础研究的方式提出了质疑，他还讨论了复杂系统的层级关系和对称性的作用。安德森认为，经济发展系统与他研究的自旋玻璃有很多相似之处，从多体和非线性物理科学中得出的见解和方法对于转变经济建模具有很广阔的前景。通过本次研讨会，圣塔菲研究所拥有了第一个项目，并且获得了项目投资资金。

随着对自旋玻璃问题的深入研究，安德森也加深了对复杂的非线性问题的思考与理解。他也曾指出科学家参与的每一种新的复杂的问题都会成为蕴含着新的基础理论和智力挑战的宝藏。进入21世纪，物理学家将越来越多地涉及复杂系统的问题。

四、安德森的科学思想

安德森不仅是一位杰出的物理学家，同时也是一位睿智的思想家，他在从事物理学研究过程中，对一些物理问题做出深刻的哲学层面分析。1972年，安德森在《科学》杂志上发表了著名的文章“多者异也”，这篇文章是安德森在探索凝聚态物理学过程中对其内涵的深刻把握，体现出其对哲学的敏锐洞察。从早期关于量子反铁磁体的研究，安德森–希格斯机制的提出，再到自旋玻璃以及高温超导研究，一以贯之地体现了安德森以“涌现”（Emergence）描述物态和理解阐释物性的思想。安德森关注的是物理科学的哲学背景以及通过在科学研究中产生自发对称性破缺机制来解释涌现，他从复杂的多体系统中抽离出简单的本质，形成自己对物理、甚至是自然世界哲学层面的认识。

首先，从思想根源上看，还原论是物理学

家所运用的基本研究方法以及思维方式，即将一切复杂系统中出现的各种现象，都归结为最基本的组成单元和决定单元行为的基本规律。安德森并没有脱离大多数物理学家所奉行的还原主义，他本人也并没有完全否认还原论主义者的观点，在文章开篇他就表明：

> 还原论（Reductionist）假说在哲学家中或许仍具争议，但我认为，该假说无疑已被绝大多数活跃的科学家所接受了。我们的思维和身体的运作，以及我们所知的任何有生命的或无生命的物质的运作，被认为是被相同的一套基本定律所控制的。[24]

但作为一名凝聚态物理学家，安德森认识到一些预测性质（物理直觉）的任务无法通过从基础物理学推导完成。他指出“还原论假设绝没有蕴含“建构论”（Constructionist）假设，将万物还原为简单基本定律的能力，并不蕴含从这些定律出发重建整个宇宙的能力。”[24]建构主义认为，在给出描述各组成部分理论的情况下科学家可以轻易地预测复杂现象。然而安德森认为多粒子系统的复杂行为不能直接从简单粒子的属性推导出来。随着粒子数的增加，数值计算的难度指数增长，乃至在可以预计的将来无法从理论上准确预测大量粒子组成体系的性质。更重要的是，物质结构实际上可以划分为一系列的层级，各层级有其组成的“基本”粒子及其特征长度和特征能量，而且各层级之间除了一定程度的耦合外，每个层级还具有自己特有的基本规律。由于各层级之间的这种脱耦性质，使得从简单建构复杂并不像设想的那样简单。从而切断了粒子物理学对其他能量尺度小许多的物质结构层次的影响。安德森认为“物理系统在每一个复杂度上都会出现全新的性质”。当大量粒子相互耦合构成一个多体系统，在低能下它将演生出与原始构成粒子所不同的集体激发准粒子。[26]我们不能仅仅基于少数个体的性质就简单地外推多体复杂系统的整体行为。相反，复杂系统在不同层次上往往会涌现出全新的、截然不同的性质。物理学所做的研究工作是在承认这些客观事实的基础上，找出其基本规律，理解这些全新的现象是如何“涌现”出来的。

安德森将“对称性破缺”定义为“More Is Different”背后涌现过程的最清晰实例。他一直强调了解和描述现象的机制是对其进行科学解释的关键，他对“涌现”的推广和解释最重要的根基就在于自发对称性破缺机制。（[12]，p.43）若要进一步了解“涌现”，就需要从对称性破缺及相关理论入手，而首要解决的问题是探寻对称性是如何破缺的。安德森在对铁磁性相变以及超导理论的研究中都发现了系统的“涌现”特性。[8]他曾表示：

> 我自己所在的领域，多体物理学，或许比其他任何学科更接近基础的内涵性研究。该领域中存在非平凡的复杂性（Non-trivial Complexities），于是，我们开始构想一个一般化的理论，来说明从定量到定性的转变是如何发生的。这一理论构想，被称为“对称性破缺（Broken-symmetry）”理论，或许有助于让还原主义的对立面——构建主义——的瓦解更加清晰。[24]

最后，安德森还关注到复杂性科学在未来科学发展中的重要性。他提出“某种意义上，我们应该停止讨论对称性的破缺，而将其称为复杂性的增加”。复杂性科学不仅局限于对事物的本体论描述与讨论，而且注重事物构成的原因及其演化历程，试图构建更接近于真实世界图景的结论。安德森还认为“从还原到涌现，从分析到综合，从简单到复杂的突破，是21世纪科学发展的特点。”[27]

结　语

安德森被誉为二十世纪下半叶最有影响力的凝聚态物理学家。曾经的合作者拉马克里希南认为安德森的研究成果价值体现在以下三方面：其一是涌现性，它总以令人意想不到的方式拓宽我们的认知边界，激发我们的想象力；其二是培根式的科学精神，即强调现代科学必须植根于实验验证之上；其三是机制，作为我们理解自然现象的核心框架。（[12]，p.39）

安德森凭借强大的物理直觉把握事物的本

质。物理学家的直觉是一种建立在经验和逻辑基础上的跨越式思维。一些优秀的物理学家往往能够凭借敏锐的直觉做出选择，进而通过对实验数据的观测以及理论模型推理进行验证，从中把握物理规律的本质。敏锐的物理学直觉以及重视实验的科研方法，是安德森在科学研究中两大显著的特征。安德森认为：

> 事实上，在解决问题之前，我们总是要先猜测答案的本质。诚然，即使是对小分子或大原子进行精确的理论研究，也存在巨大的计算复杂性，但尺寸和复杂性的真正问题是智力问题，而不是计算问题。[24]

安德森的物理学直觉常常使他在有限的时间内推理得出结论，这种能力源于他对知识认知的广度与深度。作为一名凝聚态物理学家，他最大的优点就是从复杂的问题中找出本质，从而可以构建出一个只保留涵盖关键要素的模型去解决问题，这些被简化的模型大大促进了人们对物质复杂性的理解。其次，安德森在研究中非常重视实验的作用。把实验数据当做关键证据，根据数据再对问题的本质进行定性分析，并以建立模型的方式构建新的理论。安德森还认为在凝聚态物理学中理论与实验之间是相互依赖的关系。安德森身为一代物理学大师，他的科学思想与研究方法有助于我们从科学事实中把握科学问题的本质。

安德森一生不仅致力于推动物理科学的发展，还在政界以及公共事务中也获得了广泛的影响力。从1966年开始，安德森广泛传播他的政治观点，他反对美国介入越南战争；呼吁核冻结以及反对里根时代“星球大战”的导弹防御系统。在1976–1984年，安德森还担任了贝尔实验室物理研究室的顾问主任。1982–1986年，安德森担任了阿斯彭物理中心（Aspen Center for Physics）的董事会主席，在此期间，他积极地推动科学项目的完成、组织学术研讨会议，并为该组织争取了稳定的项目资金。1993年，安德森作为凝聚态物理学家的代表（反对美国政府建立超导超级对撞机）与粒子物理学家温伯格（S. Weinberg）（支持建立超导超级对撞机）同时参与了一场听证会并进行相关陈述。最终，该工程项目于1993年通过众议院投票表决后被终止。

安德森爱好广泛，集众多头衔于一身：他是户外运动爱好者、期刊编辑、围棋大师、社会活动家、科技战略家，他还是英国皇家学会的外籍会员、美国普林斯顿大学、日本东京大学的名誉教授、美国哲学学会会员、美国文理科学院院士。普林斯顿大学物理学教授桑迪（S. Sondhi）评价道：

> 在过去的25年里，当Phil（安德森）已经是一个传奇人物时，成为他的同事本身就是一种荣誉。我对他的印象是，他的学识渊博、远超物理学，对科学有着广泛的兴趣，具有巨大的创造力和非凡的能力……[1]

直到今天，我们仍可以通过细心研读其原文原著，真正体会到安德森先生的学术思想与精神，以期对如今的物理学演进有所裨益。万物“涌现”，天地玄黄，山高水长。

[参考文献]

[1]'Interview of Philip W. Anderson by Lillian Hoddeson on 1988 May 10, Niels Bohr Library&Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA'[EB/OL]. https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/30430. 2022–04–10.

[2]Zangwill, A. *A Mind Over Matter: Philip Anderson and the Physics of the Very Many*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2021, 14.

[3]Anderson, P. W. 'Biographical'[EB/OL]. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1977/anderson/biographical/1977. 2022–04–15.

[4]Anderson, P. W. 'John Hasbrouck Van Vleck'[J]. *Physics Today*, 1981, 34(1): 85–87.

[5]Weber, R. L. *Pioneers of Science-Nobel Prize Winners in Physics*[M]. New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1989, 249–250.

[6]Zangwill, A. 'Philip Anderson: Virtuoso of Condensed Matter'[EB/OL]. https://doi.org/10.1063/PT.3.4960. 2022–03–28.

[7]The Office of Communications. 'Nobel Laureate and Princeton Physicist Philip Anderson Dies at age96'[EB/OL]. https://www.princeton.edu/news/2020/03/30/nobel-laureate-and-princeton-physicist-philip-anderson-dies-age-96. 2020–03–30.

[8] Anderson, P. W. *Basic Notions of Condensed Matter Physics*[M]. Redwood City: The Benjamin Cummings Publishing Company, 1984, 265.

[9] Brown, L. M., Pais, A., Pippard, B. 20世纪物理学（第2卷）[M]. 刘寄星 译, 北京: 科学出版社, 2015, 411.

[10] Anderson, P. W. 'Antiferromagnetism: Theory of Superexchange Interaction'[J]. *Physical Review*, 1950, 79 (2): 350–356.

[11] Anderson, P. W. 'An Approximate Quantum Theory of the Antiferromagnetic Ground State'[J]. *Physical Review*, 1952, 86(5): 694–701.

[12] Chandra, P., Yu, C., Stein, D. L., et al. *PWA90: A Lifetime of Emergence*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2015, 44.

[13] 冯端. 凝聚态物理学的回顾与展望[J]. 中国科学院院刊, 2000,（6）: 407–412.

[14] Ramakrishnan, T. V. 'The Anderson Effects'[J]. *Resonance*, 2020, 25(5): 629–646.

[15] 施郁. 层展论的旗手——菲利普·安德森[J]. 自然杂志, 2021, 43（1）: 71–78.

[16] Anderson, P. W. 'Localized Magnetic States in Metals'[J]. *Physical Review*, 1961, 124(1): 41–53.

[17] Edwards, S. F., Anderson, P. W. 'Theory of Spin Glasses'[J]. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 1975, 5 (5): 965–974.

[18] 冯端、金国钧. 凝聚态物理学（上卷）[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013, 583.

[19] Anderson, P. W. 'Absence of Diffusion in Certain Random Lattices'[J]. *Physical Review*, 1958, 109(5): 1492–1505.

[20] 林志忠. 安德森局域化理论的起源[J]. 物理, 2023, 52（5）: 361–366.

[21] Abrahams, E., Anderson, P. W., Licciardello, D. C., et al. 'Scaling Theory of Localization: Absence of Quantum Diffusion in Two Dimensions'[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 42(10): 673–676.

[22] Anderson, P. W. 'Plasmons, Gauge Invariance, and Mass'[J]. *Physical Review*, 1963, 130(1): 439–442.

[23] Anderson, P. W., Matthias, B. T. 'Editorial Foreword'[EB/OL]. https://journals.aps.org/ppf/abstract/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.i. 2022–05–12.

[24] Anderson, P. W. 'More Is Different'[J]. *Science*, 1972, 177(4047): 393–396.

[25] Martin, J. D. 'When Condensed-Matter Physics Became King'[J]. *Physics Today*, 2019, 72(1): 30–37.

[26] 张广铭、朱国毅. 凝聚态物理学的新篇章——超越朗道范式的拓扑量子物态[J]. 物理, 2021, 50（9）: 569–582.

[27] Anderson, P. W. *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011, 110.

［责任编辑　王大明　柯遵科］