

电子通道

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

电子通道的概念是理解超导现象的关键, 也是加速寻找或设计室温超导体的重要理论基础。所谓电子通道, 指的是导体中分子之间形成的电子路径网络, 电子可在这些路径中以相同的能级自由移动, 从而产生电流。而能级低于电子通道的电子则被束缚在各自分子内部的轨道^[1], 无法参与导电。只有当电子的能量足够高, 能够进入电子通道时, 电流才能在导体中形成^[2]。由此可见, 导体内部空间可分为两类区域: 一类是贯穿分子之间、允许电子流动的电子通道网络; 另一类是围绕单个分子的孤立电子单元。二者的结构关系类似于混凝土中水泥与鹅卵石的分布。电子通道并非普遍存在于所有材料中: 它是导体导电所必需的, 但在绝缘体中则完全缺失。**超导体**^[3]是一类特殊的导体, 其价层轨道与电子通道直接相连。因此, 价电子无需额外能量即可自然进入电子通道, 自由移动, 从而实现零电阻状态, 这也是超导现象的核心所在。需要强调的是, 这里所说的“电子通道”与能带理论中的“导带”^[4]属于不同概念, 二者描述的物理机制并不相同, 不应混淆。

“电子通道”一词最早在《低温与高温超导的统一理论》提出²。该理论建立了一个统一框架, 系统解释了低温与高温超导现象^[5], 并为理解绝缘体、导体与超导体之间的本质差异提供了理论基础。在这一模型中, 绝缘态、导电态与超导态被视为同一物质在不同物理条件下可能呈现的三种电学状态, 而这些状态之间的转变, 通常与电子通道对温度和压力变化的响应密切相关。此外, 电子通道的概念不仅统一了对各种超导现象的解释, 也为在常温常压等标准地球条件下筛选和开发超导材料提供了理论依据和实践指导。

吸引系数

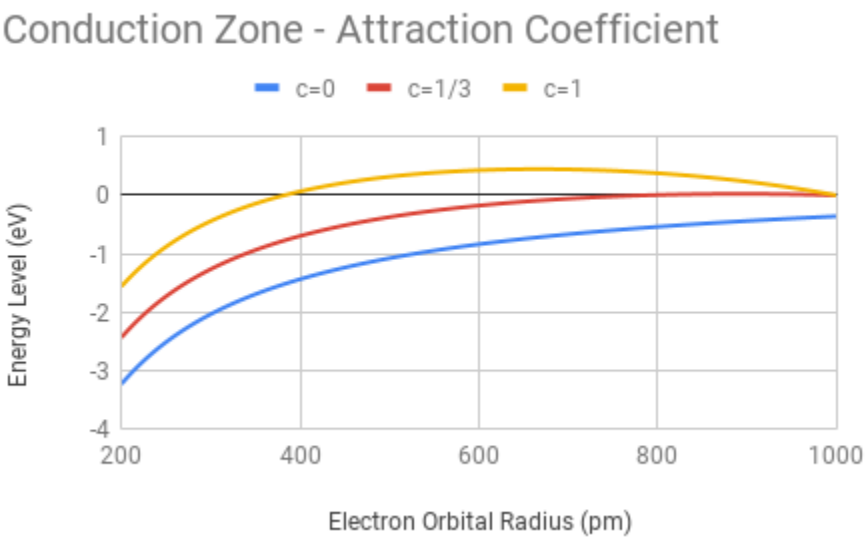
分子中原子的外层电子云通常分布不均, 由此产生多种分子间作用力^[6]。这些分子间的吸引力(或称分子键)将分子维持在足够接近的距离, 这是形成电子通道, 实现电子在分子之间流动的必要条件。需要注意的是, 尽管如共价键^[7]等分子内部的化学键允许电子在单个分子内部的原子之间移动, 但它们并不能实现电子在不同分子之间的迁移, 而这种跨分子的电子运动正是电流产生的关键。

为了研究键合强度对电子通道形成的影响, 并界定导体中电子通道与分子单元之间的边界, 引入了**吸引系数**^[2](attraction coefficient), 记作c。该系数用于描述相邻分子对某电子的吸引强度, 典型情形如金属键^[8]产生的作用。假设一个电子受到其所在分子中原子核的吸引, 其等效电荷为Q(已考虑同分子内其他电子的屏蔽效应); 那么, 相邻分子对该电子的吸引可建模为一个等效电荷cQ所施加的作用力, 其中c的取值通常在0到1之间。当c=1时, 表示相邻分子的吸引力与原始分子等效, 例如该相邻分子存在电子空穴; 而当c=0时, 则表示该分子对电子无吸引作用。因此, 考虑晶体结构中多个分子的叠加效应后, 仍可通过该模型计算电子所受的总作用力, 并进一步推导出晶格中任意位置处电子的能级及分子间的电势分布。

例如, 在两个分子之间连线的中心线上, 电子所受的库仑力^[9]可以精确求得, 为进一步计算电子通道的形态与稳定性提供基础。

$$F = KQe \left[\frac{1}{r^2} - \frac{c}{(2R-r)^2} \right]$$

其中， K 表示库仑常数^[10]， e 为电子的电荷量， r 是电子的轨道半径， R 为两分子中心之间距离的一半，代表电子位置到两分子边界的距离。不同的 c 值对应于由不同类型的分子键所产生的吸引强度。该模型可进一步扩展，用于模拟导体晶格中所有分子对电子的整体作用。然而，随着分子间距离的增加，远离电子原始位置的分子所产生的影响迅速减弱，因此它们在总作用中的贡献可忽略不计。



电子通道宽度与吸引系数之间的关系可通过一个简化模型加以说明。在该模型中，两个相邻分子的中心间距设为2000pm，一个分子对电子的吸引强度以吸引系数 c 表示。每条曲线表示在特定 c 值下，电子能级随其轨道半径变化的情况。 x 轴从分子中心起，向相邻分子方向延伸，图中展示的是从距离分子中心200pm起至两分子边界(1000pm)的电子能级分布。随着轨道半径增大，即电子远离分子中心靠近相邻分子边界，其能级逐渐升高。当 $c=1$ 时，电子能级由负值上升，并在382pm处转为正值，如图中黄色曲线所示。正能级意味着电子已脱离原子核束缚，能够在分子间自由移动，对应的区域即为电子通道。此情形模拟的是相邻分子存在电子空穴，对电子产生最大吸引力，因而形成最宽的电子通道。当 $c=1/3$ 时，电子能级在785pm处转正，通道变窄，对应红色曲线；而当 $c=0$ 时，能级在整个范围内均为负值，电子始终被束缚在原分子中，未形成电子通道，如蓝色曲线所示。

基于该模型，计算了吸引系数 $c=1$ 时，两个单原子分子中心线上电子的能级变化。电子能级从接近原子核处的负值开始，随着轨道半径增加，在相当于两原子半核间距的0.382倍处升至零，随后向分子边界方向继续升高为正值。正能级表明电子已脱离核束缚，能够在分子间自由移动，因此能级为正的区城即为电子通道。零能级点对应电子通道与分子单元边界的交界处。当 $c=1/3$ 时，电子能级在距离边界约0.785倍轨道半径处转为正值，电子通道变得更窄。若 $c=0$ ，电子能级始终为负，表明无电子通道存在，对应物质的绝缘态。总体来看，电子通道宽度随吸引系数 c 下降而减小，约在 $c=0.225$ 时消失。这揭示了吸引系数(即分子间键合强度)与电子通道宽度(反映物质电学状态) 之间的密切关系。

电阻与超导的本质

由于库仑力的作用，带负电荷的电子始终受到附近原子核和其他电子的影响^[10]。电子在导体中的运动并非随机，而是由电场规律所控制。电子沿对应能级的轨道运动，在低能级时被限制在原子轨道内^[1]，可在同一分子的原子间移动，如共价键中的共

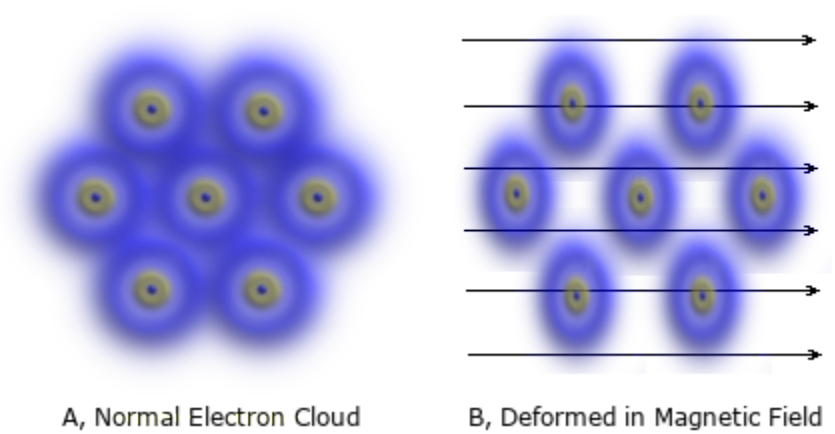
享电子^[7]，但这类运动不会产生电流。因此，低能级电子被束缚在分子单元内，只有获得外部能量激发后才能跃迁至更高能级。

当电子处于较高能级时，便能沿着电子通道在分子间流动，产生电流^[2]。电子通道可视为多个分子间共享的高能级轨道，构成电子在导体分子间流动的等势路径。需要指出的是，电子通道并非自由空间，电子不能在其中无序运动。通道内充满由周围分子电荷产生的电场，只有能量足够的电子才能沿其运动，电子流动完全受电场调控。

导体中产生电流的前提是价电子被激发进入电子通道，而激发电子所需的能量正是电阻产生的根源^[11]。被激发电子往往回落到存在电子空穴的低能轨道，过程中的能量以光子的形式散失，表现为电阻热^[12]。因此，导体的电阻率与电子通道与价轨道之间的能量差距直接相关，差距越小，电阻率越低^[2]。在超导体中，部分价轨道与电子通道重叠，实质上消除了这一能量差距，使价电子无需额外能量即可自然进入电子通道自由运动，从而实现零电阻。

超导的性质解析

在外加磁场作用下，超导体电子通道中运动的电子会受到洛伦兹力偏转^[13]，使电子沿特定方向循环流动，进而产生磁场抵消超导体内部的外加磁场，同时在超导体外部叠加该磁场^[2]，形成迈斯纳效应^[14]。电子通道中运动电子的数量限制了超导体的最大电流密度，即临界电流密度^[15]。当外加磁场强度增大到电子通道内电子运动无法完全抵消该磁场时，剩余磁场将偏转轨道电子的运动，主要影响价电子。电子云沿磁场方向被压缩，价电子被拉回电子通道以下，破坏超导^[2]。超导体维持超导状态的最大磁场称为临界磁场^[16]。这揭示了超导体临界磁场与临界电流密度之间的内在联系。

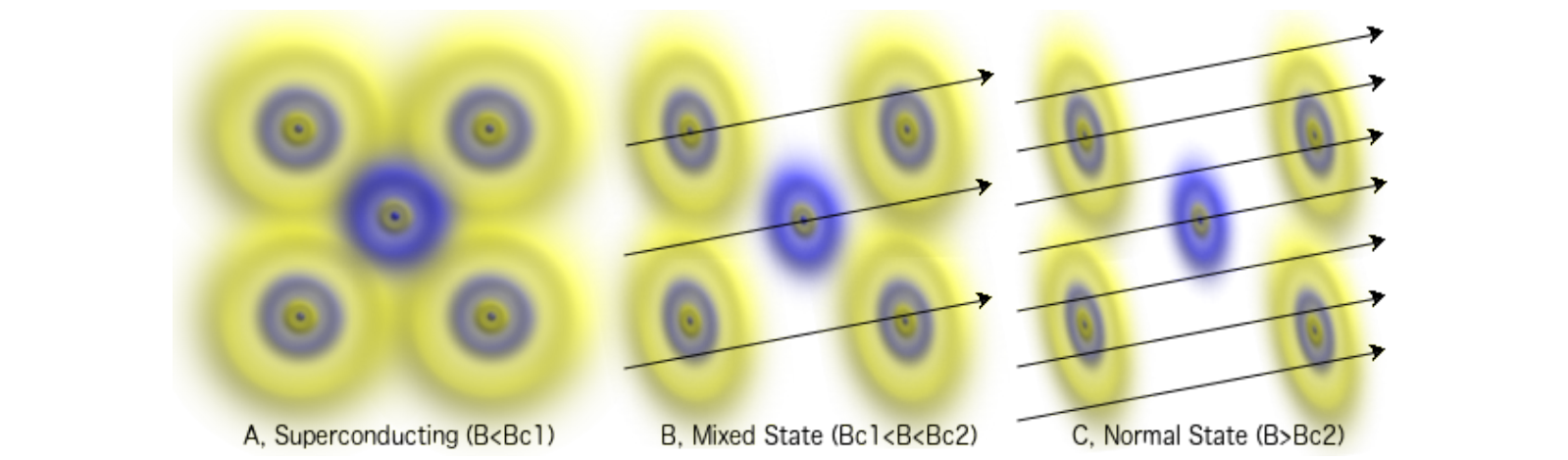


外加磁场对超导的破坏机制可以通过电子通道模型来解释：**(A)**当外部磁场较弱或不存在时，超导体可通过迈斯纳效应产生内部感应磁场，完全抵消外加磁场，使其内部呈现出“无磁场”状态。此时，价电子的电子云可在晶格中自由扩展，电子保持在电子通道中，超导得以维持。超导体可在外加磁场不超过其临界磁场的条件下保持零电阻状态。**(B)**当外加磁场超过临界值时，由于临界电流密度的限制，电子通道中所有电子所产生的反向磁场已不足以完全抵消外场。此时，剩余的磁通量穿透超导体，电子在该磁场中受到洛伦兹力作用，其运动轨道被迫偏转，轨道面沿垂直于磁场方向发生扭曲。电子云因而被压缩，形状类似被压扁的灯笼。随着轨道形变，价电子脱离电子通道，超导随之丧失。

二型超导体^[17]通常由合金或化合物构成，不同分子键的强度和电子通道宽度存在差异，因此各区域对外加磁场的耐受能力不同，导致超导在不同区域于不同磁场强度下被破坏。其超导状态存在两个临界磁场：**下临界场**和**上临界场**，分别对应超导

性开始被破坏和完全消失的外加磁场强度。由于晶体结构具有各向异性，同一区域对来自不同方向的磁场响应不同，即超导性的破坏与磁场方向有关。因此，二型类超导体的临界磁场对磁场方向敏感，并具有方向依赖性。在混合态下，超导性被部分破坏的区域转变为导体区，形成磁通涡旋结构^[18]，使外部磁场能够局部穿透超导体。随着外加磁场强度升高，更多临界场较高的区域丧失超导性，涡旋数量增加，涡旋密度随之升高。

磁通量子是由单个电子运动所产生的最小磁通单位^[19]，其数值可由薛定谔方程导出为 $h/2e$ ，其中 h 是普朗克常数， e 是电子的电荷量。这一理论预测可通过环形超导体加以验证。电子在分子间运动时，需通过轨道跃迁完成转移，同时会产生一个电子-空穴对。因此，每一个电子的流动都伴随着一个电子空穴的反向漂移，形成两个方向相反的电荷流。在环形超导体中，这两个反向流沿环路径构成两个相对的回流，其等效效果相当于两个电子沿同一方向运动，从而使超导环中形成的最小磁通量为两个磁通量子。这一结论已被B.S.Deaver与W.M.Fairbank^[20]，以及R.Doll与M.Näbauer^[21]独立实验证实，确认超导体中最小可观测磁通量为 $2 \times (h/2e)$ 。



二型类超导体的特性，可以通过电子通道对不同方向外加磁场的响应来加以解释：(A)二型类超导体通常由合金或化合物构成。当外加磁场低于**下临界场**时，所有分子间的电子通道保持完好，价电子可在其中自由流动，超导性在整个材料中完全维持。(B)当磁场强度介于**上下临界场**之间时，部分价电子在洛伦兹力作用下被拉下电子通道，例如中心小分子区域的价电子。这会在局部区域蜕变成导体，表现为混合态中的磁通涡旋或“超导空洞”。(C)当磁场超过**上临界场**时，所有价电子都脱离电子通道，超导完全丧失，材料恢复为导体。此外，电子云在外磁场作用下的形变受磁场方向影响，因此，二型超导体的临界磁场具有明显的方向性，不同方向的外加场可能导致不同的超导响应。

物质的导电状态分类

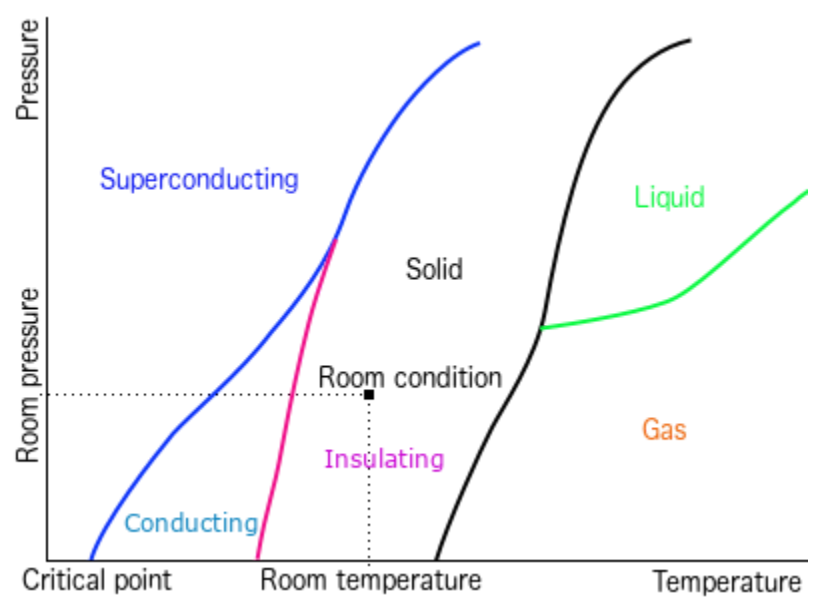
固态和流体态是物质在不同压力和温度下表现出的不同抗剪切状态^[22]。同样，物质也会呈现不同的电阻状态：绝缘态、导电态和超导态，并且能在不同的压力和温度条件下实现这些状态之间的转变^[2]。

随着压力增大，分子间距减小，导体中电子通道与价轨道之间的差距缩小，导致电阻率下降。这解释了压力与电阻率负相关的现象^[23-25]。在某些高压条件下，该间距可被压缩至零，电阻消失，材料转变为超导态。因此，越来越多的超导体是在高压下发现的，甚至一些原本为绝缘体的陶瓷材料也能在高压条件下转变为超导体^[26-29]。

低温条件下，电子倾向于回到较低能级轨道，减小分子间的排斥力。因此，环境压力的作用更加明显，导致分子间距缩小，产生相当于压力增加的压缩效应。这解释了导体中温度与电阻率的正相关，以及传统超导体多在低温下出现的原因^[30-31]。

分子原子距离较短时会产生吸引力或形成化学键。其中部分键，如压缩键^[32]，主要在压力作用下导致的。因此，吸引系数通常随压力升高而增加，这也强化了压力与电阻率之间的负相关关系。

通常情况下，随着压力的增加，电子通道与价轨道之间的间距缩小，导体的电阻率随之下降^[2]。压力升高还会增强分子间的吸引力系数，使电子通道变宽，进一步降低电阻率。因此，绝缘体在压力增大时可能形成电子通道，实现向导体的转变。随着压力继续增大，电子通道进一步拓宽，能隙进一步缩小，导体的电阻率持续降低。在更高压力下，能隙可能完全闭合，导体电阻消失，转变为超导体。正如上文所述，在恒定环境压力下，温度降低同样会产生相当于加压的压缩效应，导致温度与电阻率呈正相关。因此，压力和温度是决定物质电学状态的关键因素。



超导、导电和绝缘状态的相变，以及传统剪切阻力状态的相示意图。超导相变边界通常位于室温条件下的低温高压区域，这解释了室温超导体较为罕见的原因，因为地表环境条件难以满足其形成需求。当物质能够直接从绝缘态转变为超导态时，绝缘相变边界可能与超导相变边界相交。

超导体的**临界点**是指在特定压力下出现超导转变的临界温度。对于传统超导体，这一临界点通常是在常压下测得的。而一个超导体在不同压力条件下可能具有多个临界温度^[2]，所有临界点共同构成了状态图中的**超导相变边界**。

从宏观角度看，导体的电阻率可以视为温度与压力的函数，并构成一个三维曲面，曲面上的每一个点代表在特定温压条件下的电阻率值。**超导相变边界**即是该电阻率曲面在值为零处与压力-温度平面的交线。

从微观机制来看，**导电-超导相变边界**对应于电子通道开始与价轨道发生重叠的温压条件；而**导电-绝缘转变边界**则对应电子通道宽度收缩至零的点，此时吸引系数约为0.225，正如前述模型所预测的那样。

室温超导体的设计与实现

随着对超导微观机制的深入理解，室温超导体的研发已从随机探索转变为可系统推进的工程实践。尽管电子通道理论认为超导是一种常见的物质状态^[2]，现实中大多数材料仅在极高压力或极低温度下才能进入该状态。要实现室温超导的实用化，必须开发能在地表常规环境下稳定工作的材料。基于电子通道理论，以下几点工程策略可有效缩小室温超导体的设计范围：

- **利用分子间吸引力形成电子通道**: 通过合理排列分子, 引入特定的分子间吸引作用, 可在局部区域实现压缩, 使分子排列接近, 从而有助于构建宽阔的电子通道并与价轨道重叠, 形成连续导电路径。
- **合理选择元素电负性**^[33-34]: 避免使用电负性过高的元素 (如NaCl中的Cl), 因其对电子的强束缚性会抑制电子在分子间的自由流动; 而电负性过低的元素则难以建立必要的分子间吸引力, 不利于通道形成。理想的选择是在元素电负性变化范围较小的材料体系中寻找平衡, 以优化电子通道的连通性和电子迁移效率。
- **规避过于复杂的分子结构**: 过大的分子或结构复杂的化合物可能会破坏电子通道的完整性, 类似绝缘体中常见的电子阻断效应。优质超导体应具备方向各异、连通性良好的电子通道结构, 避免引入绝缘区域或通道中断。
- **引入大小原子的结构不对称性**: 由大小原子共同组成的合金或化合物, 易在微观层面形成不规则的分子间电场和局部应力场, 从而增加形成分子间吸引力和压缩区域的可能性。这有助于在部分区域形成有利于超导的电子通道结构。

版本更新

- 08/29/2023: 本文在斯坦福初始发布
- [11/01/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

相关文献

- [热力学中的错误概念](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [布朗运动的原动力](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [温度是分子平均动能的标志吗?](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [绝对零度的本质](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [能量转换三角](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗?](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [超流体不是流体](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [为什么相变温度保持恒定](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [摩擦为何会产生热量?](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [简明熵概念](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [熵可以减少](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))
- [回归原理](#) (PDF: [DOI](#)) (中文: [DOI](#))

- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)

参考文献

1. Orchin, Milton; Macomber, Roger S.; Pinhas, Allan; Wilson, R. Marshall (2005). "[1. Atomic Orbital Theory](#)". *The Vocabulary and Concepts of Organic Chemistry* (2nd ed.). Wiley. Archived ([PDF](#)) from the original on 9 October 2022.
2. Liu, Jerry Z. (2019). "[Unified Theory of Low and High-Temperature Superconductivity](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17507669](#).
3. Combescot, Roland (2022). [Superconductivity](#). Cambridge University Press. pp. 1–2. ISBN 9781108428415.
4. Ashcroft, N. W.; Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Brooks/Cole. ISBN 978-0-03-083993-1.
5. Grant, Paul Michael (2011). "The Great Quantum Conundrum". *Nature*. Nature Publishing Group. **476** (7358): 37–39. doi:10.1038/476037a. PMID [21814269](#). [S2CID 27665903](#).
6. Margenau H, Kestner NR (1969). *Theory of Intermolecular Forces*. International Series of Monographs in Natural Philosophy. Vol. 18 (1st ed.). Oxford: Pergamon Press. ISBN 978-0-08-016502-8.
7. Whitten, Kenneth W.; Gailey, Kenneth D.; Davis, Raymond E. (1992). "7-3 Formation of Covalent Bonds". *General Chemistry* (4th ed.). Saunders College Publishing. p. 264. ISBN 0-03-072373-6.
8. Brown, Theodore L.; LeMay, H. Eugene Jr.; Bursten, Bruce E.; Murphy, Catherine; Woodward, Patrick (2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson. ISBN 978-0-13-441423-2.
9. Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl (2013). *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons. pp. 609, 611. ISBN 9781118230718.
10. Huray, Paul G. (2010). *Maxwell's Equations*. Hoboken, New Jersey: Wiley. pp. 8, 57. ISBN 978-0-470-54991-9. OCLC [739118459](#).
11. Gleick, James (1986-10-21). "[PHYSICISTS FINALLY GET TO SEE QUANTUM JUMP WITH OWN EYES](#)". *The New York Times*. ISSN [0362-4331](#). Retrieved 2021-12-06.

12. Itano, W.M.; Bergquist, J.C.; Wineland, D. J. (2015). "[Early observations of macroscopic quantum jumps in single atoms](#)". *International Journal of Mass Spectrometry*. **377**: 403. Bibcode:2015IJMSp.377..403I. doi:10.1016/j.ijms.2014.07.005.
13. Griffiths, David J. (2017). *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Cambridge University Press. p. 218. ISBN 978-1-107-01402-2.
14. Meissner, W.; Ochsenfeld, R. (1933). "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit". *Naturwissenschaften*. **21** (44): 787–788. Bibcode:1933NW.....21..787M. doi:10.1007/BF01504252. S2CID [37842752](#).
15. Blatter, G.; Feigel'man, M. V.; Geshkenbein, V. B.; Larkin, A. I.; Vinokur, V. M. (1994). "Critical Current Density and Flux Pinning in High-Temperature Superconductors". *Reviews of Modern Physics*. **66** (4): 1125–1388.
16. De Gennes, P. G. (1964). "Magnetic Field Effects in Type-II Superconductors". *Reviews of Modern Physics*. **36** (2): 225–237. doi:[10.1103/RevModPhys.36.225](#).
17. Rjabinin, J. N.; Shubnikow, L. W. (1935). "Magnetic Properties and Critical Currents of Supra-conducting Alloys". *Nature*. **135** (3415): 581. Bibcode:1935Natur.135..581R. doi:[10.1038/135581a0](#).
18. Orthacker, Angelina. "[Superconductivity](#)". *Technical University of Graz*.
19. London, Fritz (1950). [Superfluids: Macroscopic Theory of Superconductivity](#). John Wiley & Sons. p. 152.
20. Deaver, Bascom; Fairbank, William (1961). "Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders". *Physical Review Letters*. **7** (2): 43–46. Bibcode:1961PhRvL...7...43D. doi:10.1103/PhysRevLett.7.43.
21. Doll, R.; Näbauer, M. (1961). "Experimental Proof of Magnetic Flux Quantization in a Superconducting Ring". *Physical Review Letters*. **7** (2): 51–52. Bibcode:1961PhRvL...7...51D. doi:10.1103/PhysRevLett.7.51.
22. Wahab, M.A. (2005). *Solid State Physics: Structure and Properties of Materials*. Alpha Science. pp. 1–3. ISBN 978-1-84265-218-3.
23. Machado, A.J.S.; Renosto, S.T.; Santos, C.A.M. dos; Alves, L.M.S.; Fisk, Z. (2012). "Defect Structure Versus Superconductivity in MeB₂ Compounds (Me = Refractory Metals) and One-Dimensional Superconductors". doi:10.5772/48625. ISBN 978-953-51-0794-1.
24. Vaidya, R.; Bhatt, N.; Patel, S.G.; Jani, A.R.; Garg, A.; Vijayakumar, V.; Godwal, B. (2003). "[Effect of pressure on electrical resistance of WSe₂ single crystal](#)". *Pramana -- Journal of Physics*. **61** (1): 183–186. doi:10.1007/BF02704523.
25. Souza, E.L. de; Gomes, J.E.; Araújo, F.G.S.; Oliveira, C.P. de (2006). "[Improvement of metallic joint electrical conductivity using a novel conductive paste produced from recycled residues](#)". *Rev. Esc. Minas*. **59** (2). doi:10.1590/S0370-44672006000200011.
26. Bednorz, J. G. & Müller, K. A. (1986). "Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system". *Z. Phys. B*. **64** (1): 189–193. Bibcode:[1986ZPhyB..64..189B](#). doi:10.1007/BF01303701. S2CID [118314311](#).
27. Bednorz, J. G. & Müller, K. A. (1987). [Nobelprize.org](#). The Nobel Prize in Physics. Archived from the original on September 19, 2008. Retrieved April 19, 2012.
28. Choi, C. Q. "[A New Iron Age: New class of superconductor may help pin down mysterious physics](#)". *Scientific American*. Retrieved October 25, 2019.
29. Ren, Zhi-An; Che, Guang-Can; Dong, Xiao-Li; Yang, Jie; Lu, Wei; Yi, Wei; et al. (2008). "Superconductivity and phase diagram in iron-based arsenic-oxides ReFeAsO_{1-δ} (Re=rare-earth metal) without fluorine doping". *EPL*.

- 83 (1): 17002. arXiv:[0804.2582](https://arxiv.org/abs/0804.2582). Bibcode:[2008EL.....8317002R](https://ui.adsabs.org/abs/2008EL.....8317002R). doi:[10.1209/0295-5075/83/17002](https://doi.org/10.1209/0295-5075/83/17002). S2CID [96240327](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/96240327/).
30. Combescot, Roland (2022). *Superconductivity*. Cambridge University Press. pp. 1–2. ISBN 9781108428415.
31. Fossheim, Kristian; Sudboe, Asle (2005). *Superconductivity: [Physics and Applications](#)*. John Wiley and Sons. p. 7. ISBN 9780470026434.
32. Liu, Jerry Z. (2021). "[Superfluids Are Not Fluids](#)". Stanford University. Archived ([PDF](#)) from the original on 8 May 2021. Retrieved 10 July 2022. doi:[10.5281/zenodo.17504327](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504327)
33. IUPAC, *[Compendium of Chemical Terminology](#)*, 2nd ed. (the "Gold Book") (1997). Online corrected version: (2006–) "[Electronegativity](#)". doi:10.1351/goldbook.E01990.