

# 低温电导实验与局域标度理论吻合的 一场美丽误会：二维弱局域效应

林志忠<sup>†</sup>

(台湾交通大学电子物理系)

2022-09-30收到

<sup>†</sup> email: jilin@nycu.edu.tw

DOI: 10.7693/wl20221108

在过去10年间，科学家了解到我们以前学过的对低温极限下金属电阻率的描述(基于玻尔兹曼输运理论及朗道费米液体理论)，几乎都是错误的。

——B. L. Altshuler和P. A. Lee (李雅达), *Physics Today* (1988年12月)

在大学和研究生的固体物理课本里，所学到的知识大部分是关于组成原子排列整齐有序的晶体结构中的各种森罗万象的物性，如导电性质、光学性质、磁学性质、超导性质等。但是自然界既有的、人工制作或合成的物质及器件，大多是含有缺陷或界/表面的，因此应称之为“无序系统”。缺陷是指原子排列的错位、空位、间隙或杂质等。

无序系统中的导电性质，是凝聚态物理学中一个富有传统的、深刻而牵连甚广的研究领域。诸如，随着无序程度或无规性(randomness)的逐渐增加，何谓金属(态)? 何谓绝缘体/态? 金属如何导电(由玻尔兹曼输运理论描述吗)? 绝缘体如何导电(由跃迁导电过程描述吗)? 金属—绝缘体转变如何发生? 造成导电性质巨大转变的微观机制为何(由电子波的多重散射或是库仑作用描述吗)? 等等，都是持续经年的理论和实验双向研究的重大课题。其中，随着样品中无序程度——即对电子波函数的散射强度——的逐步增强，电子波函数如何从延展态的类平面波形式，转变为呈现指数形式衰减的局域波，是“安德森局域”的核心问题。安德森局域课题的大哉问，发表于1958年<sup>[1]</sup>，一甲

子以来，已吸引了二、三代的凝聚态物理学家投身其中，追求真理。

深受David J. Thouless (2016年诺贝尔物理学奖得主)师生在1970年代早、中期开创性思维工作的启发，1979年春，E. Abrahams, P. W. Anderson, D. C. Licciardello和T. V. Ramakrishnan等“四人小组”把电子波函数随着系统无序度增强，而从延展波过渡到局域波的演变过程，仅使用一个实验可测量的无量纲电导( $G/(e^2/h)$ ， $G$ 为系统/样品的电导， $e$ 为电子电荷， $h$ 为普朗克常数)来描述，从而建构了如今已成为一篇凝聚态物理学经典文献的“局域标度理论”(scaling theory of localization)<sup>[2]</sup>。局域标度理论提出了两点斩钉截铁的破天荒预测：(1)金属—绝缘体转变是一种连续性的转变，而非如N. F. Mott (1977年诺贝尔物理学奖得主)所预测的不连续性转变，即三维系统中并不存在一个有限值的最小电导率；(2)二维系统(如实验室中使用蒸镀或溅射法生长的金属薄膜，或分子束外延法生长的半导体器件中的二维电子气)中不存在金属态，即二维系统在温度趋近于绝对零度时，都是绝缘体。因此，二维系统中并不存在所谓金属—绝缘体转变的问题，与

Mott理论的传统预测相左。

具体而言，局域标度理论一经发表，随即引发了两项重要科学概念和研究领域的蓬勃发展，一是“弱局域”(weak localization)效应的发现，二是“介观物理”(mesoscopic physics)领域的诞生。最近几年，弱局域效应和介观物理知识在深入揭露拓扑量子材料的低温物性方面，已成为不可或缺的重要概念和手段。凝聚态物理学界更有一则关于弱局域效应“首次”被实验“明确”验证的吸引人的故事，它从1979年流传至今，为无序物理领域中所津津乐道，笔者指导的第一位台湾大学物理系博士生吴至原(1996年毕业)亦曾熟读并多次引用该篇论文。迄今，众多文献以及书本里，仍持续教育一代又一代的学生这则故事。然而，巧则巧矣，它却只是一个“美丽的误会”，因为所谓“首次”印证局域标度理论预测的低温金属薄膜电导实验的样品参数，与理论计算的适用范围不符。更有趣的是，这一场美丽的误会之所以流传经年，除了因为局域标度理论在无序系统课题发展史上的关键地位之外，文献中标举的“首次”实验是由(后来的)1996年诺贝尔物理学奖得主Douglas D. Osheroff

及其同事做出来的<sup>[3]</sup>，而领导“四人小组”进行标度理论之建构的，更是鼎鼎大名的凝聚态物理学家、1977年诺贝尔物理学奖得主 Philip W. Anderson。有了双重诺贝尔桂冠加持，当事人和听众岂有不推波助澜，逢人说项的雅兴？

1979 前后 15 年间，Osheroff 在美国贝尔实验室工作，Anderson 则定期从普林斯顿大学赴贝尔实验室访问。巧合的是，就在局域标度理论架构已经建立完成，但仍尚未完成发表之际，Anderson 在一次访问中偶然看到了 Osheroff 和 G. J. Dolan 刚测量到的一组金钼薄膜中的低温电导数据。Anderson 当场兴奋指出，实验数据中呈现的在低温时 (0.3—2.2 K) 电阻 ( $R$ ) 随温度 ( $T$ ) 下降而以对数依赖关系上升的现象 ( $R \propto -\ln T$ ，如图(1)所示)，正是二维弱局域效应所造成的导电行为，这是对玻尔兹曼输运理论(在低温极限情况下)的彻底改写。从此，“首次”实验手牵手、背靠背紧密印证了重大理论预测的美谈，广泛流传于凝聚态物理学界。直到 Anderson 晚年，及 Osheroff 不幸于前些年(因罹患阿兹海默症)不得不痛惜舍弃科研工作之前，他们两人都仍旧深信不疑，以为 Dolan—Osheroff 实验的确是在天时——理论已完成但尚未正式发表之际、地利——贝尔实验室的优越研究条件、人和——Anderson 喜欢造访实验室亲自检视原始数据，等三重条件的美妙配合之下，重构了科学家对无序系统物性的揭秘及理解的一时杰作<sup>[4-5]</sup>。

Dolan—Osheroff 实验引发疑虑之处在于，他们使用蒸镀法制作的金钼合金薄膜只有约 3 nm 厚，因此薄膜并不连续，而是呈颗粒状的，即他们的样品不是一种均匀无序系

统。由于形成的颗粒状结构，他们样品的电阻率高达  $1400 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ，显然极不合理，不是一个弱无序的金属薄膜该有的数值。(使用蒸镀法制作的连续均匀金钼合金薄膜的电阻率，通常小于  $100 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ )。再者，根据标度理论的预测，造成  $R \propto -\ln T$  行为的(准)二维弱局域效应，是在  $k_F l_c \gg 1$  的情况下( $k_F$  为导电电子的费米波长， $l_c$  为电子平均自由程)，由相位相干的电子波函数之间的量子干涉造成的结果，而在 Dolan—Osheroff 的高电阻率样品中  $k_F l_c \sim 1$ ，落在理论计算的适用范围之外，是不同的物理问题。其实，Osheroff 和 Dolan 两人也意识到了他们样品结构的颗粒性，但是在当时，他们和 Anderson 还是都激动地运用二维弱局域效应理论解释图 1 中显示的对数温度变化行为。因为是起源于量子干涉造成的导电特性，所以弱局域效应只能在低温下，电子相位相干时间/长度极长时，才观测得到<sup>[6]</sup>。

同年(1979 年)，苏联理论物理学家 B. L. Altshuler 和 A. G. Aronov 两人研究弱无序系统( $k_F l_c \gg 1$ )中的电子与电子之间的库仑相互作用，发现在二维时，也会造成与弱局域效应相当类似的  $R \propto -\ln T$  行为，称作“电子—电子作用”效应，这是对朗道费米液体理论预测的重大修正与改写。值得强调、分辨的一点是，局域标度理论探讨的是单颗电子在无序势能中的扩散行为，而电子—电子作用理论探讨的则是多体库仑作用问题，这是

两者出发点的迥异之处。随后的研究更进一步厘清，实验时在各种弱无序金属薄膜中测量到的低温  $R \propto -\ln T$  上升行为，通常都是来自于电子—电子作用效应。(反之，在低磁场下测得的(微小)磁电阻，则通常来自于弱局域效应。)因此，即使当年 Osheroff 和 Dolan 把金钼薄膜镀得稍厚一些，形成连续薄膜，也还是不可能观测到二维弱局域效应造成的对数上升现象。这些幽微隐晦与(一时)误解，或许难免令人惊讶与浩叹，但反过来说，却反映了无序和多体作用在主导凝聚态物性中扮演的出人意料又丰富多彩的面貌，此即是 Anderson 挺身揭巢并一再强调的“More is Different”的精义。“More is different”有同侪译为“多者异也”或“多则(而)生异”<sup>[7]</sup>，但笔者喜欢翻译成“积小成大迸发森罗万象”，因它更加明晰地反映了“物质——恒河沙数的原(分)子的组合——因积小成大而导致整(群)体特性和功能性森罗万象又出人(类)意料”的精确含意。

由于凝聚态物理学家的长年不懈努力，我们对无序系统和多体作用的理解逐年改善，稳步精进。到了 20、21 世纪之交，对非均匀性金属颗粒系统中电子导电行为的理论

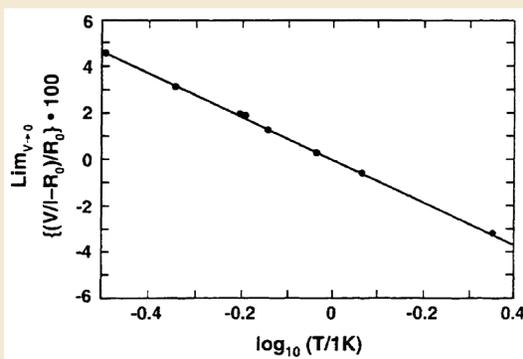


图 1 G. J. Dolan 和 Osheroff 实验中约 3 nm 厚金钼合金颗粒薄膜的电阻随温度的变化关系<sup>[3]</sup>

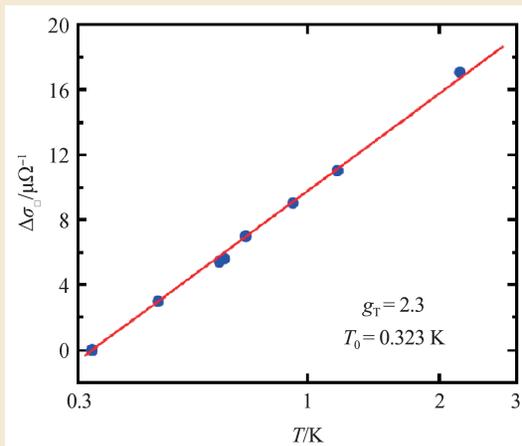


图2 将图1中的Dolan—Osheroff电阻数据换算为方块电导(蓝色圆点),其温度变化可由颗粒导电理论预测(红色直线)定量描述<sup>[10]</sup>

描述,已经近于成熟。当样品中的金属颗粒彼此相近或几乎连续之时,量子隧穿效应显著,样品相对容易导电,可以称之为“金属性颗粒系统”。反之,若组成样品的金属颗粒之间,彼此相互有些远离,则需经由“颗粒跃迁”或“变程跃迁”过程导电<sup>[8]</sup>。吊诡但却有趣的是,这些由(俄国人)I. S. Beloborodov及其合作者推展出来的理论预测,在“金属性颗粒系统”中,不论样品维度是一维、二维或三维,(低温时)电导的修正量都将随温度下降而呈对数函数形式下降,与二维弱局域效应和二维电子—电子作用效应产生的电导变化有相同的温度依赖形式<sup>[9]</sup>。因此,我们面对实验数据,必须仔细分析和谨慎辨别。如图2所示,图1中的

## 参考文献

- [1] Anderson P W. Phys. Rev. Lett., 1958, 109:1492
- [2] “四人小组”局域标度理论论文: Abrahams E, Anderson P W, Licciardello D C, Ramakrishnan T V. Phys. Rev. Lett., 1979, 42:673
- [3] “首次”二维弱局域效应实验论文: Dolan G J, Osheroff D D. Phys. Rev. Lett., 1979, 43: 721; 其背靠背理论解释

一本他的传记 *A Mind Over Matter: Philip Anderson and the Physics of the Very Many* 出版, 作者是 Andrew Zangwill。此外, 美国物理联合会曾经制作和保留了许多 Anderson 的访谈记录, 很值得参阅体会。关于 Osheroff 的教研文献和访谈, 网络中也能够搜寻到。Anderson 和 Osheroff 两人在 1979 年的贝尔实验室的瞬间/短暂交会(金钯合金薄膜的低温电阻测量(图1)是 Osheroff 的唯一一项固体实验工作, 他的终生研究以超流液氦为主), 迸出了动人的火花, 感染了当时和之后的一、二代的凝聚态物理学者及学生, 为他们带来一丝欢欣及喜悦, 成就了一则科研美谈。然而, 这则理论与实验背靠背、手携手紧密共同促进科学进展的故事, 却是一场

- 论文: Anderson P W, Abrahams E, Ramakrishnan T V. Phys. Rev. Lett., 1979, 43:718
- [4] 安德森演讲录像, An Evening with Phil Anderson: Celebrating 50 Years of Localization Physics, (Ohio State University, 2008). <https://www.youtube.com/watch?v=D4K-oM50g>
- [5] Osheroff D D. The Nature of Discovery

“美丽的误会”。

后记 哲人已远, 流芳长存。最近作者和天津大学李志青教授、台湾辅仁大学吴至原副教授, 及台湾交通大学叶胜玄助理教授, 缅怀先进轶事, 重新分析了 Osheroff 和 Dolan 的金钯薄膜低温电导数据, 解释为何他们的实验结果与二维弱局域效应无关, 而必须归之于金属颗粒导电行为。参考文献[10]是为了厘清科学事实, 留下正确记录, 这篇漫谈则是叙说安德森局域问题发展史上的这一段曲折、绚丽却难免于阴错阳差的往事, 以饕读者。这则美丽的误会, 可能仍将流传于凝聚态物理学界。感谢杨仲准教授, 及李志青教授、吴至原副教授和叶胜玄助理教授在本文发表前的仔细阅读与提供修改意见。

另记 有趣的是, 弱局域效应不但是微米、纳米尺度物理和器件中的重要现象, 它也发生在宏观尺度的地震波的传递之时。由于火山底下的地层结构通常很不均匀, 容易造成波行进时的多重散射, 约 20 年前, 别出心裁的科学家曾设计在法国中部著名风景区 Puy des Goules 火山底下, 进行地震波的弱局域效应的精巧实验, 并成功测量到了这种时间反演对称下的相干背散射波干涉行为。这项成果, 应有助于地震科学研究的进展<sup>[11]</sup>。

- in Physics, 收录于 A Century of Ideas—Perspectives from Leading Scientists of the 20th Century (Fundamental Theories of Physics, 149) 一书, ed. Sidharth B G. Springer, Berlin, 2008. pp. 175—203
- [6] 林志忠. 物理, 2016, 45(5):336
- [7] “多者异也”, 请参考: 张广铭, 于录. 物理, 2010, 39 (8): 543; “多则(而)生异”是台湾大学物理系杨信男教授建议的中译

[8] 林志忠. 物理, 2021, 50(9):634

[9] 二维弱局域效应、二维电子—电子作用效应, 和金属性颗粒导电效应等理论, 讨论的都是低温时对残余电阻的修正问题。这些效应造成的修正量通常都很微小(微扰效应), 因此实务上可以写成方块电阻变化  $R_{\square} \propto -\ln T$ , 或方块电导变化  $G_{\square} \propto \ln T$ 。但是, 这些修正量虽然微小, 却是崭新的一套物理概念, 是对玻尔兹曼输运理论和朗道费米液体理论概念在低温极限下的彻底

改写。在 Dolan 和 Osheroff 的 1979 年论文中<sup>[9]</sup>, 虽然并未明确使用方块电阻一词, 但图 1 纵轴中的相对电阻变化量即等量于相对方块电阻变化量。另外, 金属—绝缘体转变中的金属与绝缘体的定义分别为, 在绝对零度时, 系统/样品电导值大于零的, 称作金属; 电导值为零的, 称作绝缘体。“弱局域”则是相对于“强局域”而言, 当系统的无序度极大时, (在低温下) 电阻会随温度下降而以指数形式急速上升, 称为

强局域现象, 这是安德森局域最初探讨的问题。后来“四人小组”研究发现, 在一些微无序时, 量子干涉也会造成电阻上升(忽略轨道—自旋作用), 但修正量极小, 故与前者对照, 称作弱局域效应。

[10] Lin J J, Li Z Q, Wu C Y *et al.* *Physica Status Solidi B*, 2022, <https://doi.org/10.1002/pssb.202200346>

[11] Larose E, Margerin L, van Tiggelen B A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:048501

## arcsec 是弧秒吗?

物理学名词

2022 年第 39 届全国中学生物理竞赛复赛试题第二题以广义相对论的“引力透镜”为题材, 贴近现代物理前沿, 符合中国物理学会《全国中学生物理竞赛内容提要》, 对启发当今高中生的学习兴趣很有帮助。

不过在题目所附的“物理常量<sup>1)</sup>和单位”中出现了这样一个物理教材未出现的单位“毫弧秒”, 且注明: 1 毫弧秒 =  $10^{-3} \times 2\pi$  弧度 / (360 × 3600)。这等于告诉学生, 1 弧秒 =  $2\pi$  弧度 / (360 × 3600) =  $360^\circ / (360 \times 3600) = 1^\circ / 3600 = 1''$ 。就此不少学生问老师, 1'' (1 角秒) 怎么成了 1 弧秒? 有的老师回答说, “弧秒”是“角秒”的另一种称谓; 有的老师则回答说, “弧秒”是度量角距离的单位, “角秒”是度量平面角的单位。甚至另有一些人联想到  $1'' = 1^\circ / 3600$ , 就说 1 弧秒 = 1 弧度 / 3600。各种说法, 似是而非, 不一而足。实际上, 到底是怎

么一回事呢?

历史上, “弧秒”一词源于对英文词汇 arcsec (arc-second) 的误译, 译者机械地以为 arcsecond = arc + second = 弧 + 秒 = 弧秒。

arcsec 的规范译法应该是“角秒”, 不是“弧秒”。同样 arcminute 要译为角分, 不能译为弧分。因为若译成弧秒或弧分, 进而就容易导致产生更大的误会, 以为 1 弧分 = 1 弧度 / 60, 1 弧秒 = 1 弧度 / 3600。

弧度的英文是 radian = radi + an, 即 radius (半径) 的前四个字母与 angle (角) 的前两个字母并合而成。radian 对应的中文词原译为“𠄎”(读 jìng), 它分别由“弧”和“径”的左、右偏旁组合而成<sup>2)</sup>, 意即与半径等长的弧所对的圆心角的大小为 1 𠄎。这种译法, 信、达、雅三者兼具, 就像“熵”字一样造得十分巧妙。可惜的是“𠄎”字比“熵”字略显生僻, 用此称谓的人不多, 大多数人都用“弧度”替代“𠄎”作为 radian 的译名。

“弧度”一词虽然通俗, 但词不达意, 且极易被误解, 引发如“arcminute → 弧分”、“arcsecond → 弧秒”这样的错译; 而“𠄎”字虽略显生僻, 但成词雅致, 且字义准确, 不会引起误会。

在数学、物理学和天文学中, 无论是对平面角, 还是对角距离和角径, 其小量的度量单位根本没有“弧分”、“弧秒”, 而是用“角分(′)”、“角秒(″)”<sup>3)</sup>。之所以在分(或秒)字前加“角”字, 是为了与时间单位“分(m′)”和“秒(s′)”相区别。如 1′3″ 指某角的大小, 而 1m3s 指时间间隔的长短。对极小角可有毫角秒(mas)甚至微角秒(μas)做单位, 根本没有“毫弧秒”或“微弧秒”!

(河北师范大学 杨大卫 供稿)

二、(40 分) 根据广义相对论, 当光线经过某大质量球对称天体附近时, 会向天体方向弯曲一个很小的角度  $\epsilon$ ,  $\epsilon$  称为偏折角, 即出射光与入射光的夹角, 已知  $\epsilon = \frac{2\alpha}{r}$ , 其中常数  $R = 4GM/c^2$ ,  $r$  为光线与天体中心的最近距离,  $G$  为万有引力常数,  $M$  为天体质量,  $c$  为真空中光速。  
物理常数和单位:  $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ , 1 秒差距 =  $3.09 \times 10^{16} \text{ m}$ , 1 毫弧秒 =  $10^{-3} \times \frac{2\pi}{360 \times 3600} \text{ rad}$ 。  
(1) 如图 2a 所示, 当发光背景天体、大质量球对称天体中心以及望远镜恰好在同一条直线上时, 望远镜会观测到爱因斯坦环这一引力透镜现象。已知一背景天体发出的光线通过某近邻白矮星附近时, 形成的爱因斯坦环相对于望远镜的角半径  $\theta_0 = 31.53$  毫弧秒, 近邻白矮星到望远镜的距离为  $d_1 = 5.52$  秒差距, 背景天体到望远镜的距离为  $d_2 = 2 \times 10^3$  秒差距。求该近邻白矮星的质量  $M$ 。

第 1 页, 共 6 页

### 第 39 届全国中学生物理竞赛复赛试题第二题

1) 题中原称  $G$  和  $c$  为常数, 现根据 CODATA(2018)、《物理学名词(2019)》以及现行高中物理教材, 称它们为物理常量。  
2) 虽说《唐文续拾·卷三》有“𠄎之彛名, 於我何有”的字句, 但《康熙字典》、《辞源》和《古汉语字典》都未收入此字, 《辞海》中虽有此字, 但没有古文出处。这意味着近代造此字时, 很可能与此古字无关。  
3) 弧度(rad)是 GB3100-1993《国际单位制及其应用》中仅有的两个 SI 辅助单位之一, 它是[平面]角的度量单位。度、(角)分、(角)秒是 GB3100-1993 中列出的可使用的非法定计量单位: [平面]角的单位。