

十年一瞬间——巨霍尔效应的故事¹⁾林志忠[†]

(台湾交通大学物理研究所和电子物理系)

一直到了 10 多年以前,香港与台湾的地理与心理距离似乎有些遥远(北京、天津则当然更加杳不可及),两地之间的自然科学研究的交流也不常听闻.我个人与香港第一线科研人员的第一篇合作学术论文是在 2001 年发表的.那是与香港科技大学物理系的张西祥和沈平教授的团队之合作成果,大部分的工作,包括样品制作、实验量测和理论计算,都在香港科技大学完成.我们在新竹交通大学所执行的,则是对样品的低温磁电阻和电子相位相干长度(electron dephasing length)的量测部分.在那一篇论文(发表在 *Physical Review Letters*, 2001 年第 86 卷第 5562 页上)中,我们首先发现了铜—二氧化硅(Cu-SiO_2)颗粒膜(granular films)中的“巨霍尔效应(giant Hall effect, GHE)”,即在量子逾渗阈值(quantum percolation threshold)处,样品的低温霍尔系数(Hall coefficient)增强了近 3 个量级(约 1000 倍!),这完全是量子干涉输运造成的奇妙结果(见图 1).要出现这种巧妙的物理现象,理论计算要求金属颗粒的尺寸必须远小于电子相位相干长度,因此实际样品中金属颗粒的直径都得小于 5nm 左右.反之,在经典逾渗理论中,只考虑了单纯的金属颗粒之间的几何连通(直接碰触)而产生的导电行为,其霍尔系数至多只能增强几十倍,而且最大值将发生在比量子逾渗阈值稍低的经典逾渗阈值(classical percolation threshold)处²⁾.

实验方面,依赖传统的镀膜方法去制作一系列的含有细微差异(约 1%)之金属体积百分比的样品,技术上非常不容易控制.实际上,想要观察巨霍尔效应(或其他逾渗现象),往往需要在逾渗阈值附近制作十几甚至二十几个以上的颗粒膜样品,这项严苛的要求,既考验实验者的技术能耐,又考验他(她)的耐心与细心.但是这些困难,都被张西祥教授和刘晖(现任南开大学电子科学与微电子系教授)一一克服了(中国科学院物理研究所景秀年先生在香港科技大学担任访问学者期间,为这项实验工作奠定了一些早期基础).理论方面,为什么会产生如此

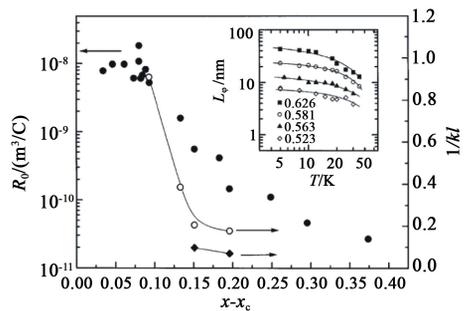


图 1 $\text{Cu}_x\text{-(SiO}_2\text{)}_{1-x}$ 颗粒膜中的霍尔系数 R_H 与 $x-x_c$ 的变化关系图(温度 $T=5\text{K}$), x 是铜的体积百分比, $x_c \approx 0.43$ 是经典逾渗阈值. 与高含铜量($x \gg x_c$)的颗粒膜比较, 增大约 700 倍的霍尔系数发生在 $x \approx x_q \approx 0.51$ 处, x_q 为量子逾渗阈值. 插图显示 4 个铜体积含量 x 接近 x_q 值时颗粒膜样品的电子相位相干长度与温度的变化关系. 引自 X. X. Zhang(张西祥)等人的文章

巨大的霍尔效应,则由沈平教授提出解释(见 *Physical Review B*, 2002 年第 66 卷第 075309 页).沈教授的理论说,在金属—绝缘体复合物系统中,如果颗粒的尺寸很小,颗粒之间又存在复杂的不规则细微结构(microstructures),则电子波函数的多重散射和散射造成的相长与相消干涉,就有可能形成等效载流子浓度(effective carrier density)在量子逾渗阈值处急剧大幅度降低,从而造成巨大的霍尔效

1) 本文同步刊载于 2012 年第 41 卷第 10 期《物理》杂志(北京)和 2012 年第 34 卷第 5 期《物理》双月刊(台北).

2) 颗粒膜属于一种金属—绝缘体复合物(metal-insulator composites),可标示如 M_x-I_{1-x} 系统,电导的大小由各个样品中的金属体积百分比 x 决定.当金属颗粒刚好可以形成一条,而且只有一条(蜿蜒曲折而狭窄)的通道时,那一个特定的金属体积百分比称为经典逾渗阈值(x_c).如果考虑量子干涉效应,则金属体积百分比需要稍微再提高之后,电流才能开始通过样品,此时称为量子逾渗阈值(x_q).又,冯端和金国钧两位老师合著的《凝聚态物理学》(上卷)第 276 页中,引用并讨论了我们这一篇 2001 年发表的巨霍尔效应论文.

“Percolation”似乎是一个特别难以确切中译的物理名词,为了行文方便,本文暂时采用“逾渗”这个译名. Percolation 的中译以及它的广泛科学、社会和经济等层面的意义,应可作为《物理》杂志“物理学咬文嚼字”专栏的一篇精彩文章的恰当题材.

2012-07-13 收到

[†] Email: jjlin@mail.nctu.edu.tw

应. 因为这是一种导电电子的量子相干效应, 因此针对的是非磁性的材料, 是一种崭新的物理概念(在磁性材料中出现巨大的霍尔效应, 并不希罕.)³⁾

根据我个人的理解, 这个量子相干巨霍尔效应理论发表之后, 似乎并未获得国际理论界的广泛接受. 其中的原因之一应在于计算模型中的一些假设的微观意义和理论基础尚未完全明确, 迄今犹有待厘清. 原因之二则应在于除了上述的张西祥和刘晖教授的实验之外, 世界上的其他实验室并没有(或无法)重复观测到这个现象.

理论计算中的确有一些地方不够清晰透彻, 我恍惚有所感觉. 但是作为一个实验物理学家, 我没有时间与能力, 也没有必要去检验其中的每一个计算环节. 可是, 我的直觉又相信这个现象确实存在, 导电电子的量子干涉改变了逾渗输运行为应该是有道理、有深层物理意义的. 所以我一直把这个课题放在心上, 时时想要寻找一个适合的金属颗粒膜或金属—绝缘体复合物系统, 重现巨霍尔效应!



图2 天津市河北区意大利租界区“梁启超故居”, 铜像是梁启超座像, 其后是“饮冰室”书房(作者摄于2008年6月). 梁启超一生奔走救国, 可是为了保护他的藏书安全和保证他能够拥有一个可以持续著述写作的远离军阀战火的外在环境, 他只得将书斋建立在外国人的租界地上.《饮冰室文集》启迪民智, 改写了中国现代史, 梁启超的教育思想与方式使梁思成改写了中国建筑史. 当梁思成与林徽音在美国学业告一段落返国(1928年)时, 梁启超坚决主张他们二人应该到新成立的沈阳“国立东北大学”建筑系去开创一片天空, 而不应该安逸地选择接受已经享有学术声誉而且生活条件也远为优裕舒适的“北平”清华大学的聘书

时间一年一年地过去了. 由于张西祥教授的引介, 我认识了天津大学物理系的李志青教授. 年轻的李志青教授首先于2003年底到新竹交通大学来访问交流一年, 学习低温输运实验的基本技术与物理概念. 其后, 我也数度短暂的访问了天津大学(顺道游览蓟县长城、独乐寺、清东陵、曲阜、泰山、赵州桥、盘山、梁启超纪念馆, 等等!). 在天津大学物理系的实验室里, 我看到了许多台由中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司装配制造的溅射镀膜系统. 这些溅射系统都制作得相当大型而壮观, 真空腔体体积

庞大(与国外同类仪器比较), 正是溅射颗粒膜样品的上等选择. 于是我们与李志青教授合作, 一心一意想要“看到”巨霍尔效应. 后来, 经过了李志青教授的一代代的研究生, 尤其是武雅楠的努力, 我们终于在钼—二氧化锡(Mo-SnO_2)颗粒膜中, 量测到了比当初在铜—二氧化硅颗粒膜中所看到的还稍微更大一些(增大800倍)的霍尔系数. 武雅楠、李教授和我的这一篇论文发表在 *Physical Review B*, 2010年第82卷第092202页上, 距刘晖与张西祥教授的论文发表日期, 相隔已经将近10年. 在这10年间, 天津大学也购置安装了美国 Quantum Design 公司制造的“物理性质量测系统(Physical Property Measurement System)”⁴⁾, 为低温输运实验奠定了初步基础, 使得巨霍尔效应的量测具备了充足的物质条件.

在这10年之间, 虽然由于缺乏更多的实验数据以资比较, 使得理论缺乏具体的计算方向, 但是理论方面的探索也并没有完全停顿. 例如2009年, 沈平教授与他的研究生谢杭在 *Physical Review B* 期刊发表了一篇长文, 他们提出了一些新的计算结果, 再根据计算结果, 建议如何去选择半导体二维电子气材料, 并设计与制作实验样品⁵⁾. 我个人的解读是, 从事这一篇新理论论文工作的心理基础, 显然是出于沈平教授对于他自己的量子干涉理论的自信, 以及对于实验数据之迟迟不够广泛充足的耿耿于怀⁶⁾, 所幸的是, 在这一篇理论文章发表之后不久,

3) 金国钧老师和他的研究生也曾经尝试解释巨霍尔效应, 见 *European Physical Journal D*, 2005年第34卷第259页.

4) 有一个说法是, 当初 Quantum Design 公司制造的无须使用液态氦(liquid helium)冷却的“干式(cryogen-free)物理性质量测系统”, 是专门为了抢攻新兴的中国大陆科研市场而开发设计的. 该公司广泛销售的两项高级昂贵代表产品, “物理性质量测系统”及“磁学性质量测系统(Magnetic Property Measurement System)”, 反映了美国尖端精密科学仪器厂商雄厚的研发、制作和销售实力. SQUID 是“Superconducting Quantum Interference Device(超导量子干涉仪)”的简称. 如果市面上少掉了这两项操作简易的商业测量仪器, 过去10多年间国际上的凝聚态物理期刊论文或许会减少百分之数十. 这是科研型态与仪器的商业化的一个重要例子, 或许值得对科研的本质及(中国)科技发展的过程关心而有兴趣的人去追踪探索和论述. 如果使用的都是商业化的仪器设备, 在实验方法和技术以及研究课题上, 将很难产生最具原创性的创新思维并孕育出深长的学思体系.

5) 新理论(*Physical Review B*, 2009年第79卷第165307页)的想法是: 在半导体二维电子气材料上进行微加工, 以调控操作电子波函数的散射与相干效应, 将远比在传统的镀膜过程中, 去逐渐改变颗粒膜内的金属体积百分比以期逼近量子逾渗阈值, 相对容易.

6) 一个物理理论的正确、漂亮与否, 必须由实验结果拍板定案!

我们就兴奋地向沈教授展示了铟-二氧化锡颗粒膜的新数据,他也终于可以放下苦苦背负了10年的心中的一块石头!我们的这篇论文投稿之后,收到了审查意见并进行修改时,曾请沈教授阅读.当时(2010年6月),他快速回复给我的email,提出的具体建议,是他在返回香港途中,在北京机场发送的,而那时,我正在日本千叶大学(Chiba University)讲课.

这是一个本土物理学家的小故事.月出日落,潮来潮去,它发生在你我周遭,不亮丽、不显眼,也没有高影响因子,可是它是你我的故事,是我想诉说的一个故事.且慢,故事尚未结束.“天涯若比邻”⁷⁾,沈平、张西祥、李志青与我,正在向量子逾渗物理迈进.或许另一个10年之后,我们可以再告诉你一个小故事,关于量子逾渗(quantum percolation)、迁移率边(mobility edge)与量子相变(quantum phase transition)的故事.那时候,想必我已经游历了更多名胜古迹,更笃定而胸有成竹了.

后记 (一)曾经参与巨霍尔效应的实验和理论之研究的师生,笔者并没有全部亲身接触过,因此有些名字在本文中并未提及,谨在此向他们致意并且致

歉.每一项看似小小的研究工作,都是无数多人的无限心力之长期积累的成果,共勉之.(二)在《物理》杂志(北京)第41卷(2012年)第4期刊登的《潜心悠游的治学研究一去不返了?》一文里,笔者写着一段话:“作为一个实验物理学家,我希望有许多的做理论物理的朋友,可以时相讨论.……因为可以时相讨论,所以我们的实验论文是在探讨一个个物理问题,而不只在进行材料的表征.”我相信,“巨霍尔效应”所探讨追索的就是一个具有深刻内涵的“物理课题”!(三)最后,感谢北京大学物理学院阎守胜老师、南京大学物理学院金国钧老师及中国科学院物理研究所张殿琳、吕力和景秀年老师,感谢他们在本文发表前的阅读与提供修改意见.

7) 全球化的科技活动已经落实在我们的这一项合作研究中,沈平教授在香港科技大学,张西祥教授在沙特阿拉伯的阿卜杜拉国王科技大学(King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)),李志青教授在天津大学,我则在台湾新竹交通大学.大部分的时间,我们是依赖email,偶而也使用skype进行讨论与联系.正是:“天涯若比邻”,我们的研究与生活都更全球化,更丰富了.