

超导“小时代”之九 金钟罩、铁布衫

罗会仟[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-05-05 收到

[†] email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160508

天下武功，无坚不摧，唯快不破。

——金庸《笑傲江湖》

在金庸的武侠世界里，各大门派风起云涌，江湖大侠层出不穷，武功路数高低难分。总结来说，武功无外乎“攻”、“防”二字，面对敌方气势汹汹来袭，既可选择主动出击挫其锐气，亦可选择被动防御无懈可击。攻者有如华山剑宗的独孤九剑，讲究快、变、狠；又如逍遥派的北冥神功，瞬间化去对手内力。守者有如凌波微步和乾坤大挪移，巧妙躲避或化解敌方攻击，又如少林扫地僧的金刚不坏护体神功，有如“金钟罩、铁布衫”一样的铜身铁臂足以抵御一切外力(图1)^[1]。这些人体之间攻防应激，对应到我们的物理世界里，就体现为物体对外界干扰的一种响应。也就是说，一个物体置于某个外界干扰(称之为“外场”)下，它会根据内部结构的不同，而做出截然不同的响应方式。一个最简单的例子，就是静电感应现象，在静电场里的金属材料，因为内部电荷的重新分布，会在表面感应出正电荷或负电荷。那么，如果将一个材料置于静磁场之下，它会做出什么样的“攻防响应”呢？

最早研究这个问题的，就是我们在本系列文章第六篇《秩序的力量》里提到的法国物理学家皮埃尔·居里。居里同学的聪明勤奋众人皆知，18岁获得硕士学位，23岁就当上了巴黎理化学校的实验室主任，

但随后12年漫长的攻读博士期间，他主要是在研究物质的磁性问题的。居里发现物质对外磁场的相对响应——磁化率和温度成反比关系，由此被命名为“居里定律”。后来皮埃尔·外斯发现在大部分材料里，这个反比关系应该在某个特定温度以上才会出现，于是在分母中减去了一个居里温度项，这个定律便改名为“居里-外斯定律”。这二位的研究告诉我们，对于大部分材料而言，它的磁性对外磁场的响应是“低眉顺眼”型的，随着温度的降低表现越顺从，物理上把这类典型磁现象叫做“顺磁性”^[2]。颇像武功里的北冥神功，将外力吸收化为己有。

遗憾的是，皮埃尔·居里46岁(1906年)遭遇飞来横祸，被马车撞死，甩下了玛丽·居里和两个年幼的女儿。居里夫人难以抑制内心的悲痛，后来在皮埃尔一位学生的悉心照料下才慢慢缓过来。这位学生名叫保罗·朗之万，比导师皮埃尔·居里小13岁，比师母玛丽·居里小5岁。朗之万于1902年在皮埃尔·居里指导下获得博士学位，并于1905年尝试在导师的磁性理论上发展微观解释。在无外磁场时，物质中原子的磁矩是杂乱无章的，所以整体不显磁性；有外磁场时，原子的磁矩会在磁场作用下倾向于和磁场方向一致排列，从而出现顺磁

性，外磁场越强，顺磁强度就越大。然而，细心的朗之万发现除了顺磁性之外，几乎所有的材料还应该同时具有“防御”外磁场的能力——称之为“抗磁性”。这是因为外磁场会让原子内部电子发生额外的进动，电子因运动产生的轨道磁矩会被削弱，原子整体产生一个和外磁场相反的磁矩变化，即每个原子本身就会“抗拒”外磁场，而且这个原子抗磁性是与磁场和温度无关的^[3]。朗之万的研究奠定了他在物理学界的地位，博士毕业后不久就成为法兰西学院的物理学教授，与当时的大物理学家爱因斯坦、埃伦费斯特、昂尼斯、外斯等人交往甚



图1 少林铜人之“金钟罩、铁布衫”
(来自 www.leewiart.com/art/46002)

密(图2)。而与美丽又孤独的玛丽·居里师母走得越来越远,也给朗之万带来了不少绯闻。在当时最著名的国际物理学会议——索尔维会议上,经常可见居里夫人和朗之万的身影。例如著名的1927年第五届索

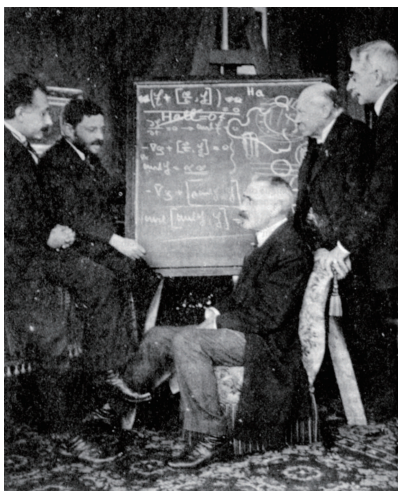


图2 (从左到右)爱因斯坦、埃伦费斯特、朗之万、昂尼斯、外斯在昂尼斯位于荷兰莱顿的家中(来自英文维基百科)

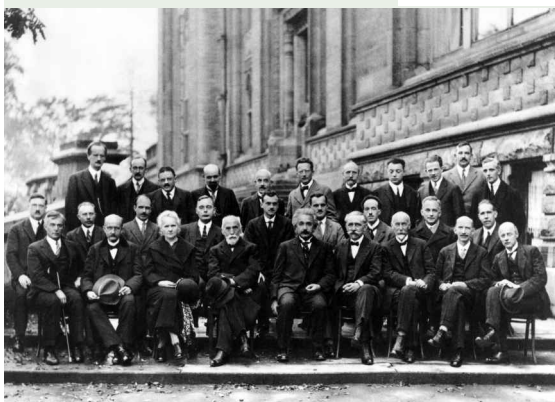


图3 1927年第五届索尔维会议“电子与光子”参会科学家合影,爱因斯坦右二为居里夫人,左一为朗之万(来自英文维基百科)

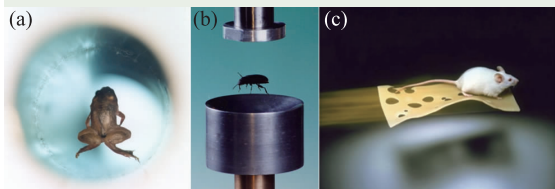


图4 (a)青蛙磁悬浮;(b)昆虫超声悬浮;(c)“飞毯”上的白鼠(来自英文维基百科及西北工业大学谢文军教授)

尔维会议,集齐了创立量子力学和相对论的人类顶级智慧大脑,位于合影人群中心的爱因斯坦右二为居里夫人,左一就是朗之万(图3)。尽管朗之万有心不惧世俗的目光,但却难免被他的“女汉子”媳妇在报纸上当众羞辱,最后家庭不欢而散,绯闻也止步于传言。有意思的是,居里夫人的女儿伊蕾娜·居里再度勇敢选择了朗之万作为导师,并为居里家族捧回第三个诺贝尔奖。时隔多年后,居里夫人的外孙女伊莲娜终于和米歇尔·朗之万结为连理,后者正是保罗·朗之万的嫡孙。一段大科学家之间的情感纠葛,就像情节跌宕起伏的武侠故事一样,前后跨越50余年,终成圆满结局^[4]。

不过,原子的抗磁性是材料中“防”外磁场的低级功夫,轻松可破。因为从微观上来说,原子的顺磁性主要来自于电子自旋磁矩的贡献,抗磁性则主要来自于电子轨道磁矩的贡献,前者一般要比后者大得多,所以许多材料中抗磁性难以体现。不过,在顺磁性非常弱的情况下,抗磁性就显现出来了。例如在惰性气体和金、银、铜等金属单质中都具有抗磁性,而食盐、水以及绝大多数有机化合物呈现出很强的抗磁性^[5]。为了验证水和有机化合物的抗磁性究竟有多强,充满好奇心的荷兰物理学家安德烈·海姆在他的强磁场实验室玩起了花样。他把一只活的青蛙放进了20 T的强磁场中,神奇魔法出现了

——青蛙因为抗磁性而被磁悬浮起来^[6]。海姆因为他的神奇实验获得了2000年的“搞笑诺贝尔物理学奖”,这却不是他最后一次拿“诺贝尔奖”。2010年,正宗“诺贝尔物理学奖”授予给了海姆,获奖理由是他的另一杰作——用胶带“手撕”石墨获得了单原子层的“石墨烯”。无独有偶,中国的“疯狂”科学家利用超声波技术,也玩起了各种悬浮花样,包括各种小昆虫、蝌蚪、小鱼^[7]。美国宇航局的科学家更是超级疯癫地把一只10 g重的活白鼠给磁悬浮起来^[7]!或许科学就是要这种“玩”的心态,才能解开思维樊笼的束缚,得到重大的发明或发现(图4)。如今,人造磁铁材料钕铁硼合金的磁场强度足以达到1 T,许多五金店都有卖。或许读者可以试试,用磁铁是否可以隔空推动小块黄瓜或西红柿?

在金属材料中,存在着大量可以自由奔跑的电子,因此,金属中的传导电子顺磁性和抗磁性有着许多特殊的地方。一般来说,金属中顺磁性要比抗磁性强三倍。要理解清楚其物理根源,仅用朗之万基于经典物理框架的图像是不够的,必须用到高一层次的“武学造诣”——量子力学。两位伟大且绝顶聪明的理论量子物理学家——泡利和朗道给出了非常直观的解释。按照泡利的理解,材料内部的电子本来是对称分布的:自旋向上和自旋向下的电子数目相等,所以在没有外磁场情况下不显磁性;但是一旦引入外磁场,这种平衡就被打破了,自旋沿着磁场方向的电子数目将增加,而自旋和磁场方向相反的电子数目将减少,导致整体沿着磁场存在一个顺磁的磁矩,这被称之为金属的“泡利顺磁性”(图5)^[8]。朗道从电子

运动方式分析,在磁场影响下电子的回旋运动会出现能量量子化——朗道能级,从而金属导体整体能量会随着外磁场强度周期性规律变化,相应出现抗磁性的特征,这被称之为金属的“朗道抗磁性”^[2]。在量子化的朗道能级影响下,随着外磁场的增加,金属的磁矩、电阻、比热等物理性质会出现“量子振荡”行为^[9],又按照发现者人名被命名为“德·哈斯—范阿尔芬效应”和“舒勃尼科夫—德·哈斯效应”等^[10]。在量子振荡行为中,隐藏着许多尚待发现的物理,至今仍有诸多物理学家为揭秘而努力(图6)。

正如武学中功夫层层递进、上不封顶一样,关于金属磁性的物理起源深入探索远远没有结束。随着许多新的物理现象不断被发现,理论的概念也在不断刷新,人们对材料中电和磁现象的认识也越来越丰富。武林派别,只会越来越多,越来越怪。

1911年,与朗之万、泡利等齐名的实验物理学家卡末林·昂尼斯发现了超导材料的零电阻现象。任何人只要稍微翻阅电磁学发展史,就可以从奥斯特、安培、法拉第、麦克斯韦、赫兹等人的研究中发现,凡是存在某些电现象,必然同时伴随着特定磁现象。电和磁,如同鸡蛋同源一样,密不可分。遗憾的是,当时许多物理学家或忙于寻找更多具有零电阻特性的超导材料,或忙于证明零电阻确实是零电阻,或仍然在搜索可能的“理想导体”(如杜瓦和昂尼斯预言的纯净金属电阻会缓慢连续地在零温下降为零)。关于超导体的磁效应实验,迟迟未能开展。

11年后的1922年,著名量子力学奠基人马克斯·普朗克的弟子沃尔特·迈斯纳(Walther Meissner)跟随昂尼斯等人的脚步,在德国着手建立

当时世界第三大氦气液化器,并于三年后完成。掌握了基于液氦的低温物理技术,迈斯纳也投入进了当时刚刚火起来的超导研究。时间又过了11年,于1933年终于实现了突破。迈斯纳和他的学生罗伯特·奥森菲尔德(Robert Ochsenfeld)在对金属球体做磁场分布测量时发现,在磁场中把锡或铅金属球冷却进入超导态时,磁力线似乎一下子从球内部被“清空”出去(图7)。由于他们无法直接测量超导内部磁场的变化,只间接从内外磁场相反变化行为推断,超导体内部的磁感应强度为零,磁力线遇到超体会耍起“凌波微步style”绕道而行(图8)^[11]。

于是,和零电阻效应相媲美,超导材料的电磁效应又多了一个零——具有完全抗磁性特征!超导体的完全抗磁性又被命名为“迈斯纳效应”。让迈斯纳青史留名的是一篇极短的半页纸论文,里面没有公式,没有图表,只有简短的一些描述他们观测到实验现象的文字,以及最后有迈斯纳和奥森菲尔德的署名。可见,优秀的研

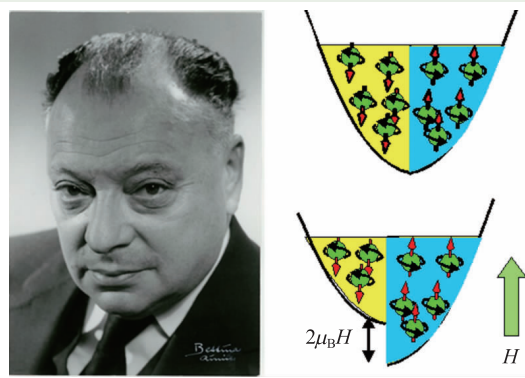


图5 泡利与金属顺磁性(来自英文维基百科)

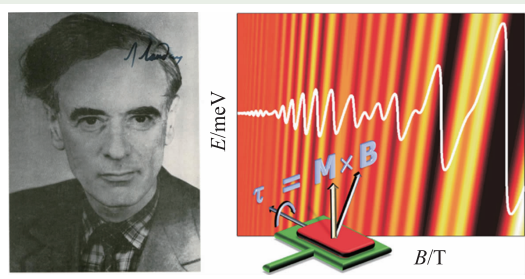


图6 朗道与量子振荡效应(来自 www.thefamouspeople.com 和 www.pss-b.com)

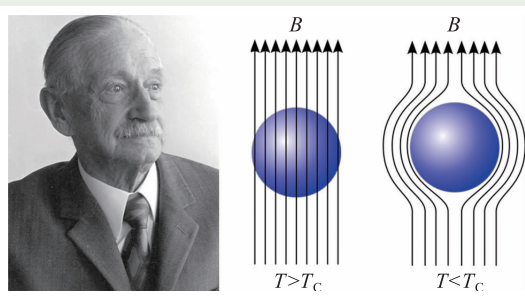


图7 迈斯纳与超导体的完全抗磁性(来自英文维基百科)

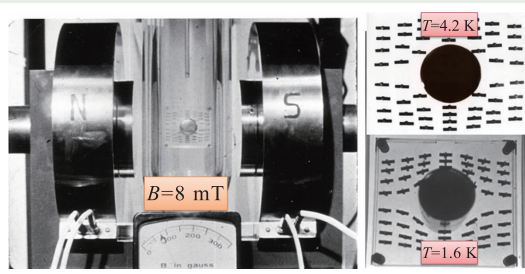


图8 实验观测金属锡的迈斯纳效应(来自英文维基百科)

究工作有时并不需要长篇累牍来解释,短小精悍地解决关键问题最重要!迈斯纳的研究发表之后,后人对

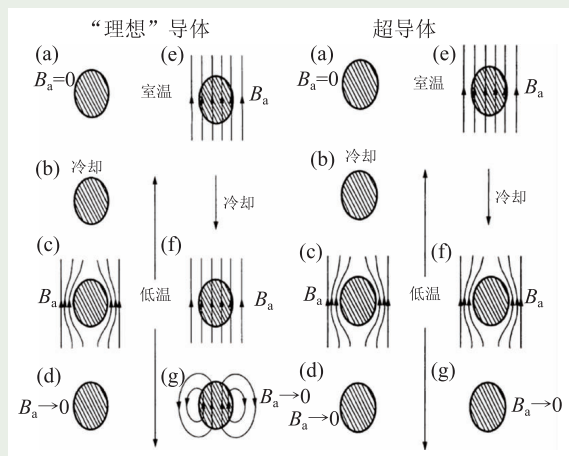


图9 “理想”导体与超导体的磁性的区别(来自张裕恒《超导物理》)

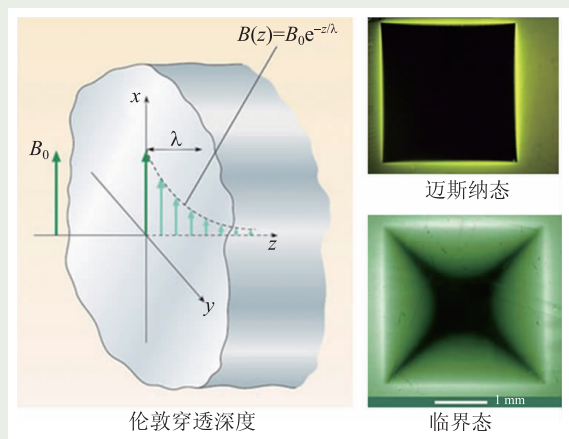


图10 伦敦穿透深度与磁场进入超导体内部情况(来自 www.open.edu 和 www.mn.uio.no)

超导体的磁性开展了进一步的研究。他们发现无论是先降温到超导态再加磁场,还是先加磁场再降温到超导态,都无法改变最终的事实——磁感应强度在超导体内部为

参考文献

[1] 金庸武侠小说《笑傲江湖》、《倚天屠龙记》、《天龙八部》等
 [2] Kittel C. Introduction to Solid State Physics, 8th Edition. Hoboken: Wiley, 2005
 [3] Mehra J, Rechenberg H. The Historical Development of Quantum Theory. Springer, 2001
 [4] 邢志忠. 科学世界, 2014, (7): 110
 [5] Jackson R. Annals of Science, 2015, 72 (4): 435

的物理性质的材料,才可以被严格地称之为“超导体”。正如前面提及,食盐、水、甚至青蛙等都存在一定的抗磁性,但它们绝对不是超导体!超导体的完全抗磁性,要远

[6] Geim A. Physics Today, 1998, (9): 36
 [7] Choi C Q. Live Science, 2006-11-29, 2009-9-9. <http://www.livescience.com/5688-mice-levitated-lab.html>
 [8] Nave C L. Magnetic Properties of Solids. HyperPhysics, 2008
 [9] Wilde M A et al. Phys. Status Solidi B, 2014, 251(9): 1710
 [10] Shubnikov L, de Haas W. Leiden Commun., 1930, 207a: 3

零,低温下撤掉磁场后仍为零,即超导体的完全抗磁性是和超导紧密联系在一起。这需要特别区分于所谓“理想导体”,因为理想导体还是具有普通金属特征,尽管先冷却再加磁场会使得内部磁感应强度为零,但是若先加磁场后冷却的话,磁力线则会穿透材料内部,最后撤掉磁场时,材料会发生磁化效应而产生磁性(图9)^[12]。正是如此,迈斯纳效应告诉我们,超导体并不简单地等于“理想”导体,它具有特殊的电磁性质。

因此,同时具有零电阻效应和完全抗磁性两个独立

远比电子轨道磁矩变化引起的抗磁性大得多,是目前发现的最强抗磁性现象^[13]。就像少林绝技“金钟罩、铁布衫”一样,超导材料一旦降温进入超导态,就能完全抵御外磁场的入侵做到全身而退,可谓是顶级功夫!

不过话说回来,“天下武功、无坚不摧”,再结实的瓷器,也顶不住金刚钻。超导体对磁场并非是百分百“免疫”的,即使在迈斯纳态,磁场也可以穿透到进入超导体表面和边缘处。随着外磁场强度的增加,磁场穿透的深度也会越来越大,最终夺占整个超导体,超导性能完全消失。这一现象于1935年由伦敦兄弟提出,因为超导体内部磁感应强度为零,对麦克斯韦方程组稍加修改就可以得到新的描述超导电特性的方程,称之为“伦敦方程”^[14]。由伦敦方程可知,磁感应强度在进入超导体之后指数衰减,其穿透深度又称为“伦敦穿透深度”,至今仍是描述超导材料的一个重要物理参数。完全破掉超导体的“金钟罩、铁布衫”,只需要足够强的磁场,就能让其抵达临界态,最终完全崩溃成有电阻的正常态(图10)^[15]。

那么,超导体的完全抗磁性有多强大?超导体在不同强度磁场下会有什么具体表现?超导体受限于哪些临界参数?不急,下节将为您详细分解。

[11] Meissner W, Ochsenfeld R. Naturwissenschaften, 1933, 21: 787
 [12] 张裕恒. 超导物理. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1997
 [13] 章立源. 超越自由:神奇的超导体. 北京:科学出版社, 2005
 [14] London F, London H. Proc. Roy. Soc. London A, 1935, 155: 71
 [15] <http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/groups/amks/superconductivity/mo/>