

《物理学报》创刊 90 周年

我和《物理学报》

于渌[†]

(中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2023 年 11 月 1 日收到)

我的物理生涯和《物理学报》紧密相连, 在关键节点得到她的有力支持, 心存感激. 其中, 开启独立研究的“习作”, 60 年后仍被前沿研究广泛引用; “文化大革命”期间幸存的独立前沿计算, 为改革开放后的国际学术交流打开了局面.

关键词: 物理学报, 束缚态, 连续相变**PACS:** 01.60.+q**DOI:** 10.7498/aps.72.20231739

2023 年是《物理学报》创刊 90 年, 我作为《物理学报》的读者和作者, 已有 60 多年, 受益匪浅, 心存感激. 在物理生涯的关键节点, 我得到了这一学术交流平台的强有力支持: 在“学物理”到“做物理”的转变中, 《物理学报》刊登了我的“习作”《含顺磁杂质超导体中的束缚态》^[1], 至今还被前沿研究广泛引用; 在“文化大革命”时期, 我充分利用中国科学院物理研究所(下文简称“物理所”)的局部环境, 在完全封闭的特殊年代, 自主完成了一项国际前沿的计算, 和郝柏林合作《连续相变临界指数的骨架图展开》^[2], 1973 年投稿《物理学报》, 1975 年发表, 虽然当时没有英文标题和摘要, 但这篇论文帮助我们在改革开放时期打开了国际学术交流的局面.

1956 年我有幸到苏联哈尔科夫大学留学 5 年, 毕业论文导师是卡岗诺夫(M. I. Kaganov), 他是朗道学派的重要成员, 希望我继续攻读博士学位(苏联叫 Candidate of Sciences). 由于中苏关系破裂, 我失去了这个机会. 1961 年, 我回国后被分配到物理所工作, 超乎预期, 这开启了我科研成长的新路. 时任理论室主任的李荫远先生非常开明, 他原希望我跟随他工作, 当发现我对多体、超导等新课题更有兴趣, 就成立了一个新的超导组, 让我当

组长. 对于我, 一个 24 岁刚毕业的大学生, 这是莫大的信任, 也是难得的机遇, 更是巨大的挑战. 幸好室内有几位充满科学激情、志同道合的年轻同事, 带头的是陈春先. 他 1959 年初从莫斯科大学毕业回国, 在 Bogoliubov 组里受过熏陶, 在苏联顶级期刊上发表过论文. 另外, 还有我在哈尔科夫大学高两届的师兄郝柏林, 北京大学毕业的霍裕平和复旦大学毕业的陈式刚. 我们几个年轻人都胸怀大志、敢想敢闯, 边干边学, 用互教互学的办法, 很快走到学科的前沿. 当时学习的强度非常大, 差不多每天下午都有学术报告, 一讲就两三个小时, 之后的讨论也很踊跃. 这种“打破砂锅问到底”的互动学习过程, 对我们的成长非常重要. 除了陈春先在改革开放初期率先“下海”, 成为“中关村民营科技第一人”, 其余 4 人都先后当选中国科学院院士.

我在学校里没学过超导, 在工作过程中补了这一课, 并开始做超导方面点事情. 作为学习过程的一个“练手课题”, 我研究了杂质对超导体的影响. 当时这是热门课题, 许多凝聚态物理的“大咖”, 从美国的安德孙(P. W. Anderson)到苏联的阿布里科索夫(A. A. Abrikosov)、戈里科夫(L. P. Gor'kov), 都参与其中. 安德孙有个定理, 认为非磁性杂质影响不大, 主要是抹去各向异性, 能隙略微减

[†] 通信作者. E-mail: lyu@aphy.iphy.ac.cn

小; 阿布里科索夫和戈里科夫指出磁性杂质会减小超导能隙, 降低超导转变温度, 前者更快, 甚至可能变成能隙为零的超导体. 由于超导知识储备不多, 出于好奇, 我有时会提一些“平庸”的问题. 我没有做过半导体的研究, 但学过固体物理, 知道半导体中杂质形成的束缚态很重要. 当时想, 半导体中有能隙, 杂质可以形成束缚态; 超导体中也有能隙, 会不会也有束缚态? 苏联学者用微扰论研究磁性杂质效应, 没有考虑束缚态. 我在组里讲了自己的想法, 年轻同事们都支持我试试. 我做了这个“大习题”, 计算出确实有个束缚态, 只是很靠近能隙的边缘, 探测不容易. 同事们又帮我推敲, 找毛病, 写成了前面提到的《含顺磁杂质超导体中的束缚态》论文, 1963年投至《物理学报》, 1965年发表. 多年后得知, 日本的斯波弘行 (H. Shiba)、苏联的 A. I. Rusinov 分别在 1968 年和 1969 年在杂志上发表了类似的文章, 比我晚几年. 1981 年, 南京大学龚昌德老师到美国开会, 提到我算出的那个束缚态德国的 Buckel 教授好像在隧道效应中看到了迹象. 我算出的束缚态真正在实验上证实是在 1997 年, IBM 实验室的 A. Yazdani 用扫描隧道显微镜观测到磁性杂质形成的束缚态电子密度分布. 当时我的文章国际同行并不知道, 20 世纪 80 年代有机会与斯波弘行交流时, 我告知他 1965 年自己的那篇文章, 我俩一见如故, 后来成为很好的朋友, 友谊延续至今. 1994 年, 我到美国 Los Alamos 实验室访问, 苏联的 A. Balatsky 正在研究杂质对 d-波超导体的影响, 我告诉他 60 年代我做的磁性杂质对 s-波超导体影响的计算, 并把文章给了他. 他当即请中国访问学者译成英文, 读后觉得很好, 对他的工作有帮助, 很友好地在自己的文章中详细转述, 后来就出现了很多对我文章的引用. 很幸运, 60 年前做的这项工作对当前热门的、在凝聚态体系中“捕捉”马约拉纳 (Majorana) 费米子的研究还有用, 引用已超过 400 次, 同行把我们讨论的《含顺磁杂质超导体中的束缚态》称为“Yu-Shiba-Rusinov 态” (简称 YSR 态).

磁性杂质可在超导体中形成束缚态是受掺杂半导体的启发, 半导体可以用单电子的能带论描述, 而超导是多体量子系统演生出的对称破缺现象, 掺杂引起的效应比半导体的杂质态更丰富多彩. 马约拉纳费米子是意大利物理学家马约拉纳预言的一种反粒子为其本身的奇特基本粒子. 寻找马

约拉纳费米子是高能物理领域的一大研究热点, 然而始终未能找到该粒子存在的确切证据. 在固体材料中, 特定的拓扑缺陷上存在着与马约拉纳费米子具有类似性质的束缚态, 它的产生湮灭算符满足自共轭关系, 称为马约拉纳零能模. 这个零能模符合非阿贝尔统计, 其编织操作是实现容错拓扑量子计算的主要路径之一.

通常, 超导体中具有两大类缺陷态: 磁性杂质诱导的具有自旋极化的 YSR 束缚态和磁场诱导的磁通涡旋内的 CdGM (Caroli-de-Gennes-Matricon) 束缚态. 磁通涡旋可能是拓扑型的, 铁基超导体单晶表面在极低温、超强磁场下观察到的是拓扑型涡旋, CdGM 束缚态能级是整数系列 ($E_n = n\Delta^2/E_F$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. 其中 $n=0$ 是马约拉纳零能模); 非拓扑、平庸的涡旋中没有马约拉纳零能模, 其涡旋束缚态能级序列呈现半整数行为 ($E_n = n\Delta^2/E_F$, $n = \pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \dots$). 有趣的是这两种缺陷态存在联系, 在一定条件下还可互相转变.

几年前, 在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 超导体单晶表面, 在间隙铁原子上观察到鲁棒的零能束缚态, 但起源不清楚. 最近的理论分析表明, 单晶中的间隙铁原子与基底的交换相互作用足够强时, 交换相互作用和自旋轨道耦合会产生一个等效磁场, 在铁原子附近诱导出量子反常涡旋, 由于单晶拓扑表面态的存在, 在量子反常涡旋中可以产生马约拉纳零能模. 中国科学院物理研究所高鸿钧和丁洪联合研究团队在 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶表面低温沉积铁原子, 在铁原子上观测到了 YSR 束缚态和零能模, 发现零能模随空间变化不发生劈裂, 并且在零能模附近呈整数量子化能量分布的束缚态; 通过变温测试, 发现零能模消失温度为 4 K, 与磁通涡旋中马约拉纳零能模的行为一致. 在高场下, 零能模不劈裂且半峰宽保持不变, 与 YSR 束缚态在磁场下劈裂的现象显著不同. 实验提供了量子反常涡旋和马约拉纳零能模存在的有力证据, 并进而通过针尖操纵实现了 YSR 束缚态与马约拉纳零能模的可逆转变.

回顾 60 年前与年轻伙伴互教互学做“大习题”的情景, 既难忘又开心. 那是我独立从事物理学科研的第一篇文章, 也是与《物理学报》的第一次结缘. 当时怎么也没想到, 60 年后自己的“习作”还能发挥作用, 引伸出一些有趣的前沿研究. 这也算圆了我小时候一个小小的梦: 要是有一件事我先搞明白那该多好.

可惜,好景不长,1966年“文化大革命”开始,研究中断,后来到“五七干校”接受“再教育”.即使在这期间,在物理所的局部环境里,还有可能做一点事情,确实非常幸运.1971年杨振宁先生第一次回国访问,毛主席接见他;1972年第二次访问,周总理接见他,特别讨论了要加强基础研究.当时周培源先生在场,根据总理指示,他在《光明日报》发表了长篇文章,强调基础研究的重要性.我们敏锐地意识到:现在到了可以做基础研究的时候.1972年,施汝为所长带了一个四人小组到加拿大访问,参加加拿大物理协会年会,郝柏林是成员之一.他在会上听到 M.E. Fisher 关于相变理论和 K.G. Wilson 关于重正化群的报告.这个信息很重要,他回国后马上告诉组里同事,我们赶紧到物理所图书馆找资料.很幸运,“文化大革命”期间的期刊没停,影印的,甚至少数原版期刊都继续收到.打开尘封的包裹后,大家惊讶地发现,就在我们搞“运动”时,关于相变和临界现象的研究正经历一场真正的革命.这样一个重要领域翻天覆地的变化带给我们巨大的震撼!强烈地感觉到:我们落后了!没有别的办法,只有“强补”,花功夫下力气,把所有重要的文章,一篇一篇看,一篇一篇算,一篇一篇讲.记不清讲过多少次,只记得讲稿擦起来很厚.

1982年, K. G. Wilson 的临界现象重正化群理论获得诺贝尔物理学奖.这个理论的基本想法是先把高能(短波)涨落积掉,求出耦合常数随标度的变化,利用“半群”在不动点附近的性质,从理论上论证了标度律和普适性,通过在“不动点”附近的展开发展了计算临界指数的数值重正化群方法;紧接着,又用重正化群解决了近藤(Kondo)问题,开拓了强关联体系研究的新途径.重正化群计算中的“小”参量是 $\varepsilon = 4 - d$, d 是空间维数.对我们最感兴趣的三维情形, $\varepsilon = 1$, 并不“小”, 但一个正确的理论外推后往往还能给出有意义的结果.

法国的 E. Brezin 等用量子场论中的 Callan-Symanzik 方程计算临界指数,比较复杂. T. Tsuneto 和 E. Abrahams 用“拼花图”(parquet diagram)方法计算,宣称可推广到 ε 的 3 阶.我们还是坚持“边学边干”,从重复别人计算开始,仔细研究规则,明白了他们考虑的是特例,二分量模型,不能直接用于任意分量数,通过反复尝试,找到了系统的算法,得到了正确的结果.为保证计算正确,我们用双人“对手算”,郝柏林用“规矩的微扰论”,我用

“拼花图”,隔几天对一次结果.在我们整理算稿准备写文章时,发现 Brezin 等在 *Physics Letters A* 上发表了两页的短论文,宣布了临界指数计算到 ε 3 阶的结果,那时我们既高兴,又遗憾,有人验证了我们的计算,但别人抢了先.考虑到我们是用不同方法独立完成的计算,比热临界指数是不采用标度律直接计算的,于是整理成文,1973年投到《物理学报》,1975年发表,就是前面提到的《连续相变临界指数的骨架图展开》那篇文章.根据当时的规定,没有英文标题和摘要.由于与外界隔绝,国外同行当时无法知道我们的工作,很遗憾当时没能产生学术影响,但却对后来的学术交流发挥了重要作用.

1975年3月,中国固体物理代表团访美,当年美国固体物理代表团回访中国.美国同行对这类访问活动的组织通常不太细致,但这次很特别,来中国之前在日本开了预备会,之后又回日本开了总结会.他们力求了解中国固体物理教学和研究的实际情况.这个团的组成级别很高,十位成员里有四位是诺奖得主.他们在物理所待了整整三天,不光听报告、参观实验室,还把少数人请到他们下榻的北京饭店进行更深入的座谈,面对面了解实情.这个过程中,我结识了施里弗(Bob Schrieffer)等著名科学家,向他们介绍了我与郝柏林合作的计算.代表团正式发表了“蓝皮书”(访问总结报告),其中专门提到我们的工作:“.....这项研究运用重正化群理论和图形分析,这类在西方和苏联现代最前沿研究中使用的方法.....这些研究在中国固体理论学者普遍只关注经典、半经典的唯象描述的背景上是引人注目的例外.”

改革开放以后,国际交流开始恢复.1977年,郝柏林去法国访问见到 Brezin,介绍了我们的工作,后来他回访中国时,我全程陪同,并结下深厚的友谊.1978年,我赴布鲁塞尔参加了第17届索尔威(Solvay)会议.这个系列的会议在20世纪初是国际物理学界的顶级会议.会议现场,我们有机会向国际同行介绍自己在“文化大革命”期间的工作,并赠送他们《连续相变临界指数的骨架图展开》一文的抽印本(附上标题和摘要的英文翻译),包括 Phil Anderson, Leo Kadanoff 和哈佛大学的 Paul Martin.后来 Paul Martin 邀请我到哈佛大学去做访问学者.这样的交流机会对我非常难得.“文化大革命”期间,除了前面提到的相变临界指数计算以外,我对整个凝聚态物理的最新发展了解

很少. 1979—1980 年, 访问哈佛大学 B. Halperin 研究组时, 我接受了真正意义上的“再教育”, 经过这段“回炉”, 我重新找到了研究工作的感觉. 1981 年, Bob Schrieffer 又邀我到加州大学 Santa Barbara 分校新建的理论物理所工作半年, 参与了导电高分子中孤子和极化子的研究, 后来我还编纂了该方面的英文著作.

1983 年, 我应隆德奎斯特 (Stig Lundqvist) 邀请访问了在意大利的国际理论物理中心 (ICTP), 隆德奎斯特是 ICTP 的学术委员会主任. ICTP 由巴基斯坦出生的粒子物理学家萨拉姆 (Abdus Salam) 1964 年创建, 是联合国组织领导下的, 主要服务于发展中国家青年科学家的国际学术机构, 大部分资金由意大利政府提供. 萨拉姆把毕生精力贡献给这个伟大创举, 让青年科学家既能从事一流的研究, 又不离开自己的祖国. 那次访问中我积极参与了学术交流, 得到同行认可, 当年就被选拔为 ICTP 协联成员 (associate fellow), 6 年中可访问 ICTP 3 次, 每次不超过 3 个月.

1984 年我作为协联成员第二次访问 ICTP, 时间比较长, 除学术交流外开始参与学术活动的组织, 与当时主持凝聚态物理的同事有了更深入的接触. 这次访问期间得知, 由于意大利政府增加了对 ICTP 的支持力度, 可建立固定编制的科研职位, 隆德奎斯特向萨拉姆推荐我担任凝聚态物理部主任一职. 1985 年这项任命落实, 萨拉姆给我写了一封很长的委任信, 让我很震撼. 他在信中说:“我们期待通过你的任职和影响, 在发展中国家的凝聚态研究中产生第二次革命.” 看到这番话, 我诚惶诚恐, 如履薄冰. 1986 年 1 月, 我正式赴意大利到 ICTP 担任凝聚态物理部主任, 我是第一个来自发展中国家、在 ICTP 全时任职的科学工作者. 除了努力从事研究工作, 我就兢兢业业完成中心委托给我的重任, 精心策划组织学术活动, 邀请国际顶级专家在 ICTP 的学术会议和讨论班讲课、做报告, 让发展中国家有才华的青年学者能参与一流的研究, 从中选拔优秀的博士后和访问学者, 他们中的佼佼者逐步成长为发展中国家的杰出人才, 以不辜负萨拉姆的信任与厚望.

ICTP 对我国人才的培养发挥了很重要的作用, 特别是 20 世纪八九十年代和 21 世纪初. 根据截止到 2012 年参与 ICTP 活动的统计, 总共有 5000 多人/次中国学者访问过 ICTP, 有近 200 人

被选拔为协联成员. 我国许多年长一辈的科学家都从 ICTP 学术活动中受益过, 多位参与了学术活动的组织和授课, 包括郝柏林、苏肇冰、王育竹、蒲富恪、陶瑞宝、张恭庆、李大潜、葛墨林、洪家兴、田刚、朱邦芬, 等等. 一批优秀的中青年科学家通过 ICTP-SISSA (国际高等研究院, 与 ICTP 合作, 相互支撑的意大利研究生院) 平台培养了许多优秀的中国青年学者, 让他们走到了世界学科前沿, 参与国际学术交流, 如陈鸿、郑杭、冯世平、龚新高、王孝群、张广铭、卢仲毅、吴白玉、景益鹏、吴长勤, 等等.

在萨拉姆、隆德奎斯特两位先驱的鼓励、带领和 ICTP 同事、访问学者的支持下, 我比较完满地完成了我的任务, 并得到国内外同行的广泛认可. 2007 年被美国物理联合会 (American Institute of Physics) 授予“John T Tate 国际物理领导才能奖”, 以表彰我“四十年来为荟集世界凝聚态物理学界、扶持青年科学家、创办重要国际会议所做的里程碑式贡献, 及对理论物理学界的国际领导才能”. 1978 年萨拉姆教授曾获此奖项.

最近这 70 年是我们国家发展壮大, 从落后走向强盛的历史过程, 我有幸成为见证者. 对科学工作者来说, 成长和命运都离不开国家, 离不开时代. 回顾我的科学生涯, 能够多少做点事情, 确实得益于一些重要的机遇和一些重要的人. 在关键的节点上, 党和国家, 科学院和物理所提供的这些条件不可或缺. 感恩是我生命的主线, 我特别感激那些曾经提携、帮助过我的贵人和合作者, 也包括物理工作者自己的期刊《物理学报》交流平台的强有力支持.

我物理生涯中的两篇具有关键意义的文章都发表在《物理学报》上, 可以说, 我和《物理学报》有着不同一般的缘分和感情, 在《物理学报》创刊 90 周年之际, 撰写此文表示纪念和祝贺! 衷心祝愿我们的期刊越办越好, 百尺竿头更上一层楼, 努力办成国际的顶级期刊, 成为我国开创性成果发表的首选.

参考文献

- [1] Yu L 1965 *Acta Phys. Sin.* **21** 75 (in Chinese) [于禄 1965 物理学报 **21** 75]
- [2] Yu L, Hao B L 1975 *Acta Phys. Sin.* **24** 187 (in Chinese) [于禄, 郝柏林 1975 物理学报 **24** 187]

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

My happy fate with *Acta Physica Sinica*

Yu Lu †

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 1 November 2023)

Abstract

My scientific career has been closely associated with *Acta Physica Sinica*, receiving from her forceful support at crucial moments, with deep gratitude. My maiden work opening up independent exploration is still widely cited in frontier research after 60 years; the up-to-date frontier calculations, surviving disruptions and isolation during the “cultural revolution” have laid down the ground for the international scientific exchange after reforms and opening up.

Keywords: *Acta Physica Sinica*, bound state, continuous phase transition

PACS: 01.60.+q

DOI: [10.7498/aps.72.20231739](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231739)

† Corresponding author. E-mail: lyu@aphy.iphy.ac.cn



我和《物理学报》

于渌

My happy fate with *Acta Physica Sinica*

Yu Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 230104 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231739

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231739>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

当代理论物理发展趋势之我见 — 杨振宁学术思想启发的若干思考

My prospective on the contemporary trend of theoretical physics inspired by Chen-Ning Yang

物理学报. 2022, 71(1): 010101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212307>

杨振宁先生和冷原子物理

Impact of Chen-Ning Yang's theoretical work on ultracold atomic physics

物理学报. 2022, 71(18): 186701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221322>

基于波动与扩散物理系统的机器学习

Machine learning based on wave and diffusion physical systems

物理学报. 2021, 70(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210879>

基于相对论自由电子的量子物理

Relativistic free electrons based quantum physics

物理学报. 2022, 71(23): 233302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221289>

转动双星同步和轨道圆化的物理过程研究

Physical process of tidal synchronization and orbital circularization in rotating binaries

物理学报. 2018, 67(19): 199701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181056>

新型超导量子比特及量子物理问题的研究

Novel superconducting qubits and quantum physics

物理学报. 2018, 67(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180845>