

安东尼·莱格特的物理和风格

施 郁^{1,2}

(¹ 中国科学技术大学上海研究院维尔切克量子中心, 上海 201315;

² 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要 安东尼·莱格特爵士是低温理论物理和量子力学基础领域的领袖,也是严谨而善良的英国绅士。作者曾作为莱格特的访问学者在他身边工作一年,目睹莱格特获得 2003 年诺贝尔物理学奖。本文追溯与莱格特教授的学术渊源和交往,系统全面介绍了莱格特的物理和风格。

关键词 安东尼·莱格特;低温物理;凝聚态物理;量子力学基础;理论物理

DOI: 10.27024/j.wlygc.2026.04.10.is

PHYSICS AND STYLE OF ANTHONY LEGGETT

SHI Yu^{1,2}

(¹ Wilczek Quantum Center, Shanghai Institute for Advanced Studies, University of Science and Technology, Shanghai 201315;

² University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)

Abstract Anthony J. Leggett is a leader in theoretical low-temperature physics and foundations of quantum mechanics, and is a rigorous yet kind British gentleman. The author spent a year as Leggett's visiting scholar and witnessed he receive Nobel Prize in Physics in 2003. This paper traces the author's scientific connections and interactions with Leggett, and introduces comprehensively Leggett's physics and style.

Key words Anthony J. Leggett; low-temperature physics; condensed matter physics; foundations of quantum mechanics; theoretical physics

引言

安东尼·詹姆斯·莱格特爵士(Sir Anthony James Leggett, 1938. 3. 26—2026. 3. 8), 理论物理学家、美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(UIUC)教授, 不幸于当地时间 2026 年 3 月 8 日去世。大家一般称呼莱格特教授为托尼(Tony), 这是安东尼(Anthony)的昵称。

2003 年, 因为“对超导和超流理论的开创性贡献”(本文的英文引文均由本文作者翻译), 托尼与阿布里克索夫(Alexei A. Abrikosov)和金兹堡

(Vitaly L. Ginzburg)分享诺贝尔物理学奖, 诺贝尔奖委员会指出:“氦-3 被发现在极低温下成为超流后, 安东尼·莱格特提出一个理论来解释^[1]。”颁奖典礼上, 诺奖委员约翰逊(Mats Jonsson)指出, 氦-3 超流基于原子在内部自由度上的配对, 与轨道角动量和自旋都有关, 序参量有 18 个分量, 托尼成功解释了氦-3 超流与复杂的序参量之间的关系, 并提供了一个系统的框架。2004 年托尼被英国女王授予 KBE(Knight Commander of British Empire)。大英帝国勋章分 5 等(GBE, KBE/DBE, CBE, OBE, MBE), 获得前两等的英国公民可以称为爵士(Sir), KBE 是第二等。

收稿日期: 2026-04-10; 修回日期: 2026-04-12; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目号: T2241005, 12447214)。

通信作者: 施郁, yu_shi@ustc.edu.cn。

引文格式: 施郁. 安东尼·莱格特的物理和风格[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 33-44.

Cite this article: SHI Y. Physics and style of Anthony Leggett[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 33-44. (in Chinese)

2026年3月9日上午(北京时间),物理学界开始流传托尼去世的小道消息,国外社交媒体上也有零星议论。大概因为美国还是夜里,没有官方消息。后来日本 Riken 实验室主任五之濑诚(Makoto Gonokami)发了篇纪念网文^[2],英国的媒体也开始了报道。

作为理论物理学家,托尼的科学研究可以分成互相关联的两个方面,一是凝聚态物理,以超流、超导、玻色-爱因斯坦凝聚等多体系统的量子凝聚为主,二是量子力学基本问题,以检验和寻找量子力学的宏观边界为主。前者也是他研究后者的重要工具,所以他的量子力学基础研究重视实验,与丰富的凝聚态物理结合在一起。

1972年,康奈尔大学的实验家理查德森(Robert C. Richardson)带着他和同事李(David Lee)以及研究生奥舍罗夫(Doug D. Osheroff)刚获得的氦-3核磁共振结果,在英国萨塞克斯(Sussex)和托尼讨论。托尼看出,两个相变分别是正常态到超流A相的二级相变,和从超流A相到超流B相的一级相变^[3]。这最终导致这3位实验物理学家因“超流氦-3的发现”获得1996年诺贝尔物理学奖^[4],托尼本人则分享了2003年的诺贝尔物理学奖^[1]。

20世纪80年代初,为了研究量子力学是否适用于日常生活的尺度(能否造出薛定谔猫),托尼提出用超导系统检验量子力学基本问题的方案。特别是用超导电路实现宏观可区分状态的量子相干,比如,用基于超导约瑟夫森结的超导量子干涉仪(SQUID),实现不同通量态(对应相反的电流方向)的量子叠加。这在某种程度上类似于薛定谔猫。超导超流经常被称作宏观量子现象。这个说法在某种意义上是可以的,但是超导超流本身并不是宏观变量的量子化,而托尼的想法是借助于超导,在一定条件下实现宏观变量的量子化。

托尼的构想提出后,遇到过很多质疑。但是克拉克(John Clark)和他的博后德沃雷特(Michel H. Devoret)、学生马丁尼(John M. Martinis)在1984年至1985年取得突破,在超导电路中实现了粒子集体的能量量子化和量子隧穿,就像单个粒子一样。2025年,他们因“发现电路中的宏观量子隧穿和能量量子化”被授予诺贝尔物理学奖^[5]。

这个领域本来比较小众,但是20年后取得了很大进展,成了物理学的一个重要领域,结出了硕果。量子计算兴起后,提供了超导量子比特,大量

资源涌入,也促进了该领域的发展。

托尼还和合作者研究了量子耗散问题,和博士后加格(Anupam Garg)提出宏观实在论满足的莱格特-加格不等式,他还考察了非定域隐变量理论,提出莱格特不等式。他也研究了氦-3的非平衡性质。高温超导和冷原子研究兴起后,他又在这些领域帮助厘清概念。2010年后,托尼的兴趣包括玻璃的低温性质以及 $p+ip$ 超流中的马约拉纳费米子和拓扑量子计算。

托尼有一种为研究社区服务的热情,善于对他工作的领域写综述、做总结、澄清问题,善于与实验家互动,他的想法经常成为他们的行动指南。他也经常帮助别人审核的成果。谦虚的他自然成为大家爱戴的精神领袖。

本文第1章回忆本人与托尼的缘分,第2章介绍学生时代的托尼,特别是哲学训练的影响,第3章介绍他研究生和博士后期间的研究工作,都是关于液氦,即后来诺奖工作的领域,第4章介绍他在萨塞克斯大学的情况,第5章是关于诺奖工作是如何做出来的,第6章介绍他在量子力学基础方面的工作,包括提出用超导电路实现宏观量子相干,第7章综述他加入UIUC后的情况,第8章介绍他对若干问题的看法(可以从本文前几章中了解这些观点的依据),第9章是个小结。

1 我与托尼

世纪之交时,我同时对量子多体物理和量子力学基本问题很感兴趣,一方面学习研究玻色-爱因斯坦凝聚、非对角长程序、自发对称破缺等比较主流的物理概念,另一方面也学习研究贝尔定理、量子测量、量子纠缠、量子力学诠释等量子力学基本问题,关注正在兴起的量子信息科学。当时对这两方面同时有兴趣的人很少,我注意到,托尼似乎是唯一将凝聚态物理和量子力学基础问题深入结合的理论家,与我两方面的兴趣非常匹配,所以2003年,我去托尼那里做了一年访问学者。

我清楚地记得7月底,从英国剑桥去厄巴纳的旅程。我从纽约经过并停留,拜访了杨振宁先生。杨先生开车到我所住的宾馆接我。后来我又继续旅程,抵达厄巴纳。托尼开车去机场接我,还试图帮我拿行李。他虽然当时还没有获得诺贝尔奖,但是刚获得沃尔夫奖。

托尼的组会有个特色,要求主讲人也要向听

众提问,至少要问一个问题。我抵达不久后,在托尼的组会上介绍了自己前期的一些工作,是我将量子纠缠概念系统用于凝聚态系统的尝试^[7-9]。因为我对两方面都有所了解,所以是全世界最早有这个想法的人之一,但是当时这种想法显得有点另类。而现在这条路线已经成了众所周知的领域,量子纠缠成为多体理论的词汇,后来托尼还将这个看成凝聚态物理的范式突破^[6]。世纪之交时,我还想用玻色-爱因斯坦凝聚放大单粒子之间的量子纠缠,也就是让前者的序参量类似于量子态,实现不同凝聚体之间的量子纠缠^[10]。我后来注意到,这非常类似于托尼提出的借助超导约瑟夫森效应实现宏观量子相干的方案,所以我与托尼进行了邮件讨论。我到伊利诺伊后,经常和托尼交流。我一方面进一步推进量子纠缠在多体系统和量子场论中的应用^[11],另一方面寻找实现玻色凝聚序参量纠缠的实际途径,工作延续到回国之后,和牛谦教授合作发表了一篇论文,并在文末致谢了托尼^[12]。

2003年10月7日早晨,我像往常一样来上班,但整个凝聚态理论组人去楼空,只看到公共区域的小黑板上写着“托尼得了诺贝尔奖!去伊利尼楼”(Tony won Nobel, go to Illini)!原来托尼获得诺贝尔奖!我赶到伊利尼楼,校方和托尼正在开新闻发布会。下午,学校举办了一个招待会,我和斯通(Michael Stone)教授、从西北大学赶来的加格教授一起走过去,路上也碰到托尼本人,他穿着白衬衫,匆忙赶去。大家纷纷向托尼祝贺,并合影留念(图1)。几天后,托尼的小组成员(包括我)和部分同事还在一家意大利餐厅举办了一个庆祝晚宴。

我在UIUC物理系期间,还旁听了几门研究生课,包括托尼的课。教室就在物理楼,所以繁忙的托尼经常在上课前匆匆赶往教室。托尼得诺奖的第二天仍坚持上课,所以很多记者去了教室。另外,记得菲利普斯(Philip W. Phillips)教授曾在课上提过坊间一个说法,托尼只用“一次量子化”,不用二次量子化。这不准确,托尼确实重视物理图像,喜欢“一次量子化”,但是还是有二次量子化的。后面我将谈到,托尼博士后期间有个经历培养了他重视物理图像的风格,他当时推广了拉金(Larkin)和米格道尔(Migdal)的一个格林函数计算,但不满意,因为看不到物理图像。

托尼去斯德哥尔摩领奖前,问大家氦-3有哪些应用。那一年UIUC还得到另一个诺贝尔奖,



图1 2003年10月7日下午,UIUC举行招待会,庆祝托尼获得诺贝尔物理学奖,作者向他祝贺

劳特伯(Paul Lauterbur)与英国的曼斯菲尔德(Peter Mansfield)因为磁共振成像获得诺贝尔医学或生理学奖。所以,托尼的诺贝尔演讲中有段有趣的陈述^[13]:“我因为参与这些研究而获得诺贝尔奖以后,经常且合法地被问到超流氦-3有什么用。特别是站在UIUC同事兼共同获奖人劳特伯旁边,他的磁共振成像研究显然对人类有如此直接和立即的用处,我发现这个问题有点尴尬,因为在直接和实际的意义上,最诚实的回答是啥用没有。氦是化学上最惰性的元素,公众最了解的应用可能是在儿童聚会上填充气球,科学上的应用是制冷,但氦-3较稀缺昂贵,所以比不上更容易得到的氦-4。更有甚者,氦-3超流只在室温的十万分之一发生,这个温区对实际应用不利。所以虽然下面讨论的超流放大可能将来可以用于计量学(测量基本常数),从其他角度,氦-3超流很可能是最没用的。”不过,托尼接着讨论了很多氦-3超流在科学内部的用处:它是除了分数量子霍尔效应外,被定量了解的最复杂的物理系统;从中得到的概念有益于其他凝聚态物理、粒子物理和宇宙学、混沌和湍流、拓扑缺陷的产生;自发轨道—自旋对称破缺可用于弱相互作用宇称破坏信号的超流放大。

2004年我又去已定居清华的杨先生那里,做了一年高级访问学者。因此,我接连在两位伟大的理论物理学家、诺贝尔奖获得者身边各工作一年。最近,两位伟大的老师相继离世,令我痛惜。我与他们有很多交流,受到他们的思想的极大影响,也建立了深厚的忘年友谊。通过他们,我对物理学的主干是怎么做出来的有了更直接的感知。

2004年9月初,我刚到清华高研院,就收到托

尼传真来的他刚写的对最新超固体实验的评论^[14],因此开始关心超固体。我2005年回到复旦大学工作后,也一直保持和托尼的联系。2009年7月,在新加坡国立大学,我向托尼汇报了最近的工作。2010年2月21日至3月9日,托尼作为中国科学院上海应用物理研究所爱因斯坦访问教授,在几个单位巡回访问(敖平教授和怀平教授陪同)。我2月23日到他下榻的希尔顿酒店和他讨论问题(图2),也参加了他27日在浙江大学的专题报告“检验量子力学的极限:动机、最新进展、前景”和公众演讲“日常世界是否遵从量子力学”(杨卫校长主持),3月1日在上海交大的“超冷费米碱气体:玻色凝聚与库珀配对的相遇”(马红孺教授主持),以及3月8日在中国科大的“拓扑量子计算的前景”。

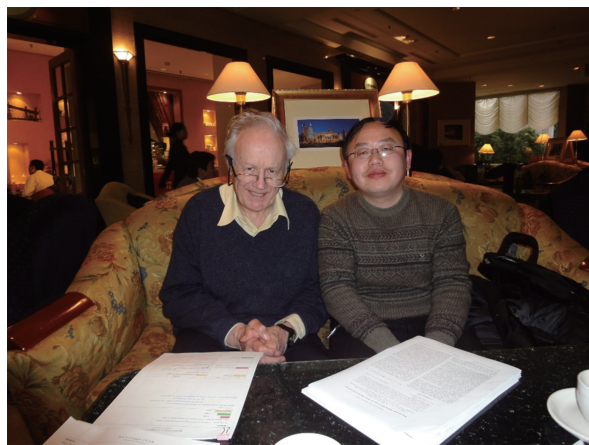


图2 2010年2月23日,本文作者和托尼在上海希尔顿酒店讨论物理

2013年4月15日,我去上海交通大学听托尼讲超导课(张杰校长主持)。这次我将托尼介绍给我的导师陶瑞宝院士和复旦大学物理系,我们邀请托尼4月25日来访问,他与物理系教师座谈,沈健教授介绍物理系状况,然后托尼做学术报告“超流,相位相干和新的玻色凝聚的碱气体”(周磊教授主持)。

托尼和杨振宁先生都喜欢用密度矩阵(波函数)来理解超导和超流。2014年,我在英文文章《物理学之美:杨振宁的13项重要科学贡献(Beauty and physics: 13 important contributions of Chen Ning Yang)》中^[15],引用了托尼专著《量子液体:凝聚态系统中的玻色凝聚和库珀配对》中的一段话:“我从一开始就采纳由杨振宁首先阐明的观点,即应该简单地考虑在对所有粒子的行为平均之下单粒子或者粒子对的行为,用术语说,就是单粒子或两粒子密度矩阵。”^[16]。杨先生反馈

“引用莱格特的话非常好”。我6月23日在新加坡召开的第8届全球华人物理学大会上的演讲中,以及后续文章和演讲中,也引用了托尼这段话。

2020年,中国科技馆委托我办一个“对话诺奖”线上系列活动,我邀请了托尼和温伯格(Steven Weinberg),他们都热心科学传播,爽快地答应。托尼和我确定题目是“日常世界真的服从量子力学吗?”由我即时翻译。我也邀请了潘建伟院士和陈宇翱教授作为对话嘉宾。活动于12月27日进行,很多观众观看了这个活动^[17]。

2022年2月底,2021年度墨子量子奖授予克拉克、德沃雷和中村泰信(Yasunobu Nakamura)。应墨子沙龙邀请,我写了一篇文章《超导量子比特实验的开端:2021年度墨子量子奖解读》^[18]。我发现,克拉克、德沃雷和马丁尼,加上另外两位合作者克莱兰德(Andrew Cleland)和埃斯特维(Daniel Esteve),1988年在Science发表过一篇论文,却没有引用前三位作者1985年的论文,而且,这篇1988年文章又没有被前三位作者在2020年的一篇综述文章中引用。我和托尼讨论,托尼说他以前在一篇综述中也只引用了他们1985年关于宏观量子隧穿的文章,而没有提他们同一年关于能量量子化的文章,因为觉得前者更重要,现在回想起来不应该省略。至于为什么他们2020年综述只谈能量量子化,托尼也不清楚,说也许因为理论也是他们自己做的。后来文章修改版发表在《低温物理杂志》时,我加了一句:莱格特教授认为宏观量子隧穿比能量量子化更重要^[19]。

2025年诺奖授予了前三位作者,宏观量子隧穿和能量量子化都在获奖理由中。在诺奖委员会的《科学背景》中^[20],1988年文章是被引用的,但只是从那里取了两张图,没有引用三位作者2020年的综述。

2025年10月6日,在诺贝尔奖公布前一天,我发了一封邮件给托尼,主题是“宏观量子的诺贝尔奖”(Nobel prize for macroscopic quantum),我说:“我感觉明天诺贝尔奖可能给宏观物体的量子行为,例如超导器件的量子行为。”托尼没回答。我发了一篇文章^[21],里面写道:“超导量子比特(或称超导电路的量子力学)这个领域发展的最初驱动也是为了得到宏观可区分态的量子相干,拓展量子力学适用范围,寻找量子力学的边界。这个构想来自Anthony Leggett……获奖理由统称为拓展量子力学适用范围,宏观系统的量子力学,重要的量子技术和量子计算载体……当然,从物

理贡献上讲,应由 Leggett 打头。但是第二次获诺奖的难度很大。”10月7日晚,诺贝尔奖真的授予了超导电路的量子隧穿和能量量子化。我用“祝贺您的创意”(Congratulation on your brainchild)为主题给托尼发了一封邮件“祝贺本次诺奖标志着对您开辟这个领域的认可”,并发给他一张照片(图3),我告诉他:“我今年去了黑尔格兰德岛(Helgoland)上的量子百年庆祝会,会上德沃雷特做了一个报告,他在其中一张幻灯片上放了您的照片。”



图3 2025年6月13日,黑尔格兰德岛上的量子百年庆祝会上,德沃雷特在他关于超导量子比特的报告中,展示这个领域始于托尼关于检验量子力学的建议,幻灯片上的照片是托尼1980年代在UIUC讲薛定谔猫。作者摄于现场

2025年9月,我参与筹划一个量子百年研讨会,邀请托尼参加,他说因为家庭健康情况,在可见的未来,不能进行洲际旅行。他也关心我的情况。11月,我问托尼能否作线上报告。托尼说他还在从重病中恢复,倾向于不做任何新的承诺。我说:“如果届时愿意说任何一点话,请告知。”他答应了。但我们的会后来没办,我告诉他,并向他祝福圣诞和新年。

2 托尼的哲学背景

关于托尼经历的信息有多处来自自传(不一标注)^[22],但也融入了其他内容。托尼生于伦敦郊区的一个天主教家庭,天主教在英国是少数派,这或许让他敢于在学术上做少数派。他有两个弟弟(已去世)和两个妹妹。父亲是中学理科教师,母亲曾教过中学数学,都是家里第一代大学生。托尼19岁或20岁之前,对科学基本无知,没有当科学家的想法^[25],20岁后不再信教^[22]。托

尼童年经历了德国飞机轰炸,但他们村子没有被炸,他喜欢的活动是远足、骑车、挖洞、下棋。

因为父亲在一个教会中学工作,因此托尼三兄弟可以免费入学。托尼因为学业优秀,被安排学习古典学。父亲没干预。托尼说过,如果和父亲学物理,可能反而会被吓走^[23]。托尼在中学时期最开心的两件事是:参加登山训练,登山成为终身爱好;1954年,竞争到牛津大学奖学金。等待大学入学后,向一位神父(原是大学数学老师)学习投影几何。1955年,托尼进入牛津大学贝利奥尔学院(Balliol College)。

托尼在牛津待了9年,既有学术成长,也广交来自世界各地的朋友,特别是来自亚洲的。一开始,他的专业是古典人文学(Literae Humaniores),学了很多分析哲学,如笛卡尔、洛克、贝克莱、休谟、罗素、维特根斯坦,等等。

托尼本来想读一个哲学专业博士,但注意到,哲学工作缺少客观判据,然后决定转行,先考虑纯数学,但觉得数学上犯错就是犯蠢,所以选择物理。

1958年夏天,托尼开始申请本科专业。1957年10月,苏联发射了世界上第一颗人造卫星斯普特尼克(Sputnik),引起西方政府鼓励文科生转到理科。在此氛围下,托尼成功转行,而且学院导师还说服征兵部门免除托尼服兵役的义务。作为考查,本学院的物理导师让托尼讲解柯朗(Courant)和罗宾斯(Robbins)的《数学是什么》,托尼表现不错,导师建议学院录取。托尼也申请了默顿(Merton)学院,默顿决定将一个本来不适用的奖学金给了托尼。所以他去了默顿。默顿的物理导师是实验家,而巴列奥尔的物理导师是理论家,所以托尼经常向巴列奥尔的导师请教。1961年,物理毕业考试,托尼得到一等,因此也自动获得研究生奖学金。

托尼的古典学经历当然不仅使他能分清希腊字母,更影响了他看待世界的方式,训练了他严谨的逻辑思维,使他注意科研中的隐含假设(熟悉他的人可以注意到),而他对于量子力学基础发生兴趣,也与哲学背景有很大关系^[22,24]。

3 为诺奖工作打下基础

鉴于自己特殊背景,托尼留在牛津读研。因为本科偏理论,所以选择理论物理,又听说粒子理论现状不佳,就选择了理论固体物理,被Magdalen学院的特哈尔(Dirk ter Haar)接收。特哈

尔是洛伦兹(Hendrik Lorentz)的弟子,同时从事凝聚态物理和天体物理研究^[6]。

特哈尔那时指导的博士论文题目都是“多体理论的一些问题”,学生有很大自由度,自己找题目,自己解决,毕业率 50%。他很关心学生的生活,为学生争取资助,帮助托尼获得了莫德林(Magdalen)学院的奖研金。托尼也啃过阿布里科索夫(Abrikosov),高可夫(Gorkov)和杰亚洛申斯基(Dzyaloshinskii)的《统计物理的量子场论方法》^[25]。

托尼的博士论文是关于液氦的,第一部分是超流氦-4 的高阶声子作用,第二部分是正常态氦-3 中的氦-4 稀溶液。这是在朗道-费米液体理论框架中的研究,托尼得益于阅读刚发表的朗道-费米液体理论方面的俄文论文,因为特哈尔曾建议托尼学点俄语,以便阅读俄文文献^[24]。托尼自己做导师后,也给学生很大自由度,但是不像特哈尔那样不给任何建议。而读研期间辅导本科生的经验使自己获益匪浅,因此后来也坚持让自己的研究生每年至少做一学期助教工作。

1964 年,莫德林学院给了托尼 3 年的研究基金(fellowship),可以以此到世界上任何单位做研究。托尼希望到世界一流的多体理论中心去,而且环境要尽量与牛津不同,因此去了 UIUC 的派因斯(David Pines)组(托尼觉得似乎是唯一解)。特哈尔给派因斯的推荐信说托尼文科很好,但是物理几乎都不懂,派因斯觉得物理可以现教,接受了托尼(当时只有一篇一页纸论文)。托尼在 UIUC 度过了一年,作为博士期间研究的继续,研究了氦-3,而他后来获得诺贝尔奖的工作就是关于氦-3。他曾经用惯性来描述博士和博士后期期间的研究到诺奖工作的这个连续性^[23]。

托尼从派因斯、巴丁(John Bardeen)、贝姆(Gordon Baym)、卡丹诺夫(Leo Kadanoff)等老师那里学到很多。当时凝聚态物理的两大范式是 BCS 超导理论和朗道的费米液体理论。BCS 就是 UIUC 的巴丁和当时的博士后库珀(Leon Cooper)和研究生施里弗(John R. Schrieffer)。

巴丁和卡丹诺夫告诉托尼,本系的惠特尼(John Wheatley)正在寻找氦-3 超流,建议托尼计算自旋扩散系数,以作为氦-3 超流的判据。从此托尼开始研究氦-3 超流,虽然并没有完成自旋扩散系数的计算。他发现要将 BCS 超导理论与朗道-费米液体理论结合。苏联的拉金和米格道尔用场论方法讨论了零温情形,托尼将它推广到有

限温度,发现费米液体效应改变了正常相的温度下自旋磁化率和密度的温度依赖关系。但是他对场论方法不满意,于是用分子场方法给出更清晰的物理图像。这个成名作给了托尼极大鼓舞,决心继续在学术界工作下去^[25,23]。

托尼又在京都大学松原武生(有限温度格林函数以他命名)那里待了一年。托尼深入了解了日本文化,住在日本学生的宿舍,日常生活尽量用日语。因为有实验论文说铌是双带超导,托尼研究了双带超导,发现类似于约瑟夫森效应导致的约瑟夫森离子共振,库珀对在两个带之间晃动。虽然实验上又发现铌不是双带超导,但这个工作为他后来研究氦-3 超流积累了重要经验。他还为日本杂志《理论物理进展(Progress of Theoretical Physics)》帮助改进文章英语,又在日本物理学会通讯上发表了一篇《给日本物理学家的科技英语写作讲义》,至今还被使用^[25,2]。

在莫得林研究基金的第三年,托尼在牛津、哈佛、伊利诺伊、阿斯本轮转。

4 一生最有价值的事

1967 年托尼获得萨塞克斯(Sussex)大学讲师职位,在这里度过 15 年,非常喜欢这里的自由和友好的氛围。这里没有学科壁垒,物理系不少同事转到其他方向。头 5 年,托尼主要教书,科研上研究超固体。这个讲师职位是永久职位,但是没有发表论文的任务。他需要完成每周 15 小时的教学量(比研究型大学多),晚上、周末和假期做研究完全是自己的事情,而不是工作职责,但是得到学校的鼓励、图书馆和秘书支持。假期经常在国外,其中最长的的是在慕尼黑的马普所。

托尼认为这里的放松气氛对他很重要,使他能够工作,是他职业生涯中的决定性因素。而且加入萨塞克斯大学是他一生所做的最有价值的事,否则不会做出获得诺奖的氦-3 超流工作^[23]。

同事伊兹利(Brian Easlea)受玻姆(David Bohm)很大影响,开了一门小课《量子测量问题》,引起托尼很大兴趣,20 世纪 60 年代末开始研究这些问题,但是 1980 年才开始发表这方面的论文。另一个同事所罗门(Aaron Sloman)是人工智能的早期支持者,对托尼的影响也很大。

因为这些同事的影响以及自己的哲学背景,托尼开始反思凝聚态物理究竟在做什么。很多人

以为理论科学如果不提出基本假设,就肯定归结为从这些假设推导出来,而这个过程基本上是逻辑或数学的,只受限于数学上的不可解以及近似处理的技术。托尼指出,“这忽略了科学的大量领域,比如凝聚态理论的很大一部分,那里的进展是通过中间层次上的概念创新而取得,即通过发明看待事物的新方式,这不能从目前的微观理论推导出来,通常也不直接挑战微观理论,而且友善共存,至少在一段时期内”^[25]。这预示了关于层展(emergence)的讨论,但是托尼认为对于凝聚态理论家,这是常识,他对于层展所引起的大惊小怪感到困惑,对于这个词的滥用感到恼火。

1972年6月,托尼和日本留学生金泽春子(Haruko Kinase)结婚。在日本东京度蜜月时,托尼在和田康(Yasushi Wada)组里做研究,认识了高木真(Shin Takagi),他后来成为托尼在萨塞克斯的博士后,和托尼一起研究氦-3超流。

1975年,托尼夫妇买了个小房子。3年后,女儿麻子(Asako)出生在这里,在这里生活到5岁。托尼说自己最难忘的事就是女儿的诞生,他觉得春子带来温暖,有让托尼激动的原创性,而春子认为托尼是个诚实、善良、值得信赖的好人^[23]。托尼认为,成功的婚姻需要双方有三个共同点:共同的基本价值观,共同的幽默感,共同的对卧室窗子是否关上的意见。近年来,他夫人中风后,他悉心照顾,大量减少外出。

5 诺奖工作的诞生

1972年也是托尼科研生涯的重要一年。本来他已经准备全力从事量子力学基础研究,但是康奈尔大学的李、奥舍罗夫和理查德森的实验新结果将他拉回了凝聚态物理。

1972年7月,他在苏格兰登山时,理查德森来访。先前康奈尔小组已发现低温下氦-3有两个相变:2.6 mK有个二级相变和2 mK的一级相变,但误以为发生于固体。现在,核磁共振表明相变发生于液体。托尼指出,这两个相变是从正常相到一种超流态,又到另一种超流态。他用自旋—轨道自发对称破缺的概念(每个库珀对的自旋和轨道角动量之间的夹角一样)来解释超流行为^[3]。

1973年春假,托尼访问康奈尔一个月,这是他整个职业生涯最激动人心的一个月,每天工作

16小时,弄清了核磁共振数据的微观基础^[13]。在他双带超导研究经验基础上,他将库珀对不同自旋构型的叠加看成内态约瑟夫森效应,用总自旋来描述库珀对,发展自旋动力学,论证了核磁共振行为相当于配对态的指纹,进一步证明了氦-3超流行为^[26]。1996年,3位实验家因为发现氦-3超流获得了诺贝尔物理学奖。2003年,托尼也分享了诺贝尔物理学奖。

托尼认为,他的成功不仅是因为知道背景知识和实验细节,包括氦-3在较高温的行为及其用朗道费米液体理论所做的解释、BCS超导理论,而且也因为不知道不需要知道的东西,即核磁共振的理论,否则就做不出当时自己做出的理论(当时很多人就是反例)。正因为不知道这些,才可以从头做起,用了其他人没有想到的方法,比如求和规则^[25,23]。

托尼发现核自旋之间的作用可以被氦-3超流态放大很多,于是将此特性推广到氦-3库珀对的磁矩,这一推广得到了实验证实。托尼进一步将此想法用于弱相互作用的中性流的宇称破坏。氦-3超流的B相因为“自旋—轨道自发对称破缺”,可以用 $L \times S$ 刻画,导致宇称是奇的,时间反演是偶的,有沿着这个矢量的电偶极矩。结果单个原子的微小的电偶极矩可以被B相放大很多(图4)^[27]。

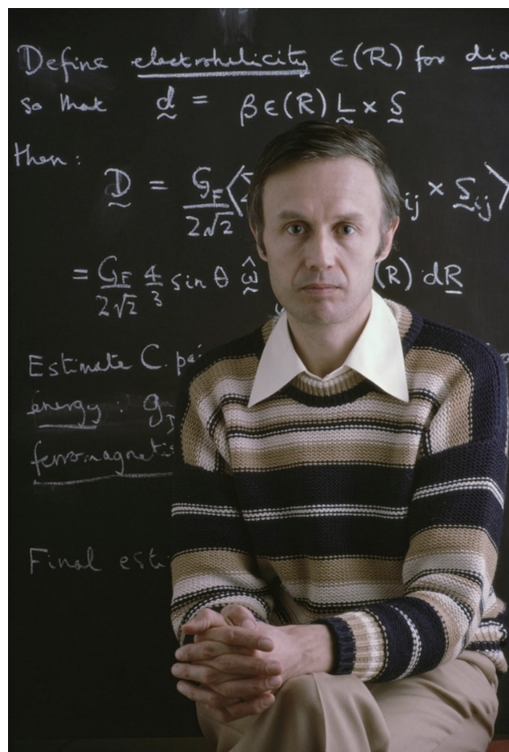


图4 1978年的托尼,黑板上写着用氦-3超流放大电子的电偶极矩信号

6 寻找量子边界

在萨塞克斯任教期间,托尼在德国和芬兰度过不少时光,还去波兰参加过两次冬季学校,得以会见到苏联同事。最不寻常的出国经历是1976年和1977年,因为教学交流,托尼一家在加纳分别生活一学期,在这里写了关于非定域隐变量的文章,提出了“莱格特不等式”,25年后才发表^[28]。

20世纪70年代末^[25],托尼开始研究量子测量:用贝尔(John S. Bell)的话说,“和”是如何转变成“或”的?如果量子力学原理适用于物理世界的所有层次,为什么在电子和原子层次上的量子叠加转化成了计数器和猫的层次上的明确结果?托尼认为有可能前提假设不对,也许量子力学并不能扩展到计数器和猫的层次。通常认为,退相干破坏量子叠加。所以要想找一个退相干程度可以降低的系统来检验。萨塞克斯同事科勒克(Terry Clark)认为SQUID是一个可能的系统。假设量子力学原理适用于SQUID通量和约瑟夫森结相位差,就会导致两个结果:相位(和通量)从亚稳态势阱的隧穿(被称作宏观量子隧穿),在两个简并势阱之间的振荡(宏观量子相干)。二者都可以在不是特别低的温度下实现。

但是对于真实的SQUID,需要考虑耗散(正比于电容,导致电阻分流的带电容的约瑟夫森结),所以问题是:耗散对于宏观隧穿和宏观相干有什么效应?托尼和学生卡尔德雷拉(Amir Caldeira)研究了这个问题^[29]。这当然可以用包含系统—环境耦合的量子力学去研究,得到被环境耦合压低的隧穿率,但当时并不清楚能否将量子力学原理用于SQUID,如果实验上测到了非零的隧穿率,当然很好,但是如果测不到,人们就会质疑哈密顿量写得对不对。幸运的是,这里可以用费曼(Feynman)和弗农(Vernon)的方法,将环境用一组简谐振子代表,使得退相干可以用经典耗散代表。托尼和卡尔德雷拉算出,耗散只是导致隧穿的WKB指数因子增加一个因子。所以如果看不到宏观量子隧穿,原因不在于耗散项,而在于量子力学不适用。几年后,他们的结果被伯克利的克拉克师徒三人定量证实(所以克拉克师徒获得2025年诺贝尔物理学奖)。托尼认为他的这个工作是他家庭之外最值得骄傲的事情^[22]。

7 UIUC

1982年,托尼第一次来中国访问,在此期间,得知UIUC要聘他为麦克阿瑟讲席教授^[25]。在康奈尔大学完成8个月的访问后,1983年年初,托尼去UIUC上任。托尼在萨塞克斯教过几乎所有本科生物物理课程(除了电子学和量子力学入门,后者由加纳教授)。而在UIUC主要教研究生课程,但是教过广义相对论和宇宙学、流体力学和李群,这些课离他本人特长较远,所以自然从零开始,而不会不自觉地用到学生不知道的知识^[30]。得益于这些经验,他写过一本书《物理学的问题》(The Problems of Physics)^[31]。

从萨塞克斯到UIUC,一个主要的改变是,每周教学量减少到8小时,不过托尼幽默地说,研究成果并没有相应的提高。

托尼一家在美国安顿,得到巴丁的帮助,巴丁是个善良有趣的人,不过交流也有不容易之处^[23]。在走廊上碰到时,问他一个问题,他先是没有反应,让人怀疑是不是没有让他的好耳朵听到,因为巴丁有一只耳朵聋了。但是过了一分钟,巴丁夸张地微笑起来,说出简单的几个词。巴丁去世前,记下几点,希望在他的告别仪式上能被提到。对于两次诺贝尔奖,只是简单提及,真正希望提到的是,作为热情的高尔夫球手,曾经一杆进洞(hole in one)。

初到美国,托尼和同时在康奈尔访问的查克拉瓦尔蒂(Sudip Chakravarty),以及到UIUC后的最早的学生费舍尔(Mathew Fisher)和多雷(Alan Dorey)、最早的博士后加格,访问学者茨韦格(Willi Zwerger)写了一篇关于量子耗散的自旋—玻色子模型的长文,说明自旋—玻色子行为依赖于系统—环境耦合谱,没有普遍行为,也表明耗散可能也不能完全破坏宏观量子相干^[32]。

托尼和加格还提出关于宏观实在的不等式,是一些双时关联函数满足的不等式,被量子力学违反^[33]。2016年,这个结果被实验用超导通量量子比特证实(托尼是合作者)^[34]。

托尼到UIUC不久,为了解释氦-3超流中的B相可以从亚稳的A相凝核生成,提出这是由宇宙线造成的,因为两个相的自由能相对差只有 10^{-8} ^[35]。当时有同事甚至怀疑他精神出了问题。1994年他的理论得到实验支持。托尼为此很自

豪,认为计算机程序做不出这种理论。他还和学生叶(Sunkit Yip)研究了 A—B 相边界的传播速度,边界的传播不能由两相之间微小的自由能差别驱动,而是由准粒子的反射所驱动。这是托尼最自豪的工作之一^[36]。

1984 年,托尼和加格向《物理评论通讯》反馈该杂志发表的一篇关于贝尔定理的文章很糟糕。结果托尼成为该期刊的量子基础方面的分支助理编辑(主要任务是处理争议,而且要署名),直到 1996 年。这个工作使托尼在做匿名审稿人时,也有似乎要署名的倾向。

1986 年,高温超导发现之后,派因斯等人的自旋涨落理论预言超导序参量的对称性是 $d_{x^2-y^2}$ 波,其他理论主要预言是 s 波。托尼找到一个方法,用一个直流 SQUID 与铜氧超导体的两个垂直的面各形成一个约瑟夫森结,从而确定序参量对称性。这显然得益于托尼为了检验量子力学而在超导电路上的丰富经验。UIUC 同事哈林根(Dale Van Harlingen)小组做出了这个实验(托尼也是论文合作者)^[37]。不过,他们当时不知道,格什肯贝因(Geshkenbein),拉金和巴罗内(Barone)曾用类似想法建议检测 p 波超导的对称性,而西格里斯特(Sigrist)和莱斯(Rice)分析别人的实验结果,也得到 $d_{x^2-y^2}$ 对称性^[25,38]。

1989 年,“冷核聚变”引起很多关注,也出现了很多理论文章试图用固体环境说明聚变率可以提高几个数量级。托尼和贝姆证明这些提高是不能实现的^[39]。

20 世纪 90 年代,超冷原子的玻色—爱因斯坦凝聚实现后,托尼也投身这个领域。这个系统比较干净。托尼说,这个领域没有高温超导那么令人激动,但是提供了很多研究生论文题目。他也对量子力学极限的检验做了综述^[40]。

2002 年,托尼父女获得美国国籍(同时保留英国国籍)。他的夫人一直是日本籍,没有加入美国籍,她在 UIUC 获得文化人类学博士学位,女儿从 UIUC 的地理和化学双学位毕业。

2010 年后,托尼对两个很不一样的问题感兴趣。一是玻璃(非晶固体)的低温性质,托尼和武拉尔(Vural)质疑传统的二能级隧穿模型,并提出实验检验方法^[41]。二是 $p+ip$ 费米超流里的马约拉纳费米子和拓扑量子计算问题。通常是在粒子数不守恒的框架下,用波戈留波夫—德让方程来讨论这个问题,托尼和林在粒子数守恒的前提下,发现

这个系统的激发可能不能用于拓扑量子计算^[42]。

2004 年后,托尼开始在加拿大滑铁卢的量子计算研究所、新加坡国立大学、日本东京大学、中国上海交通大学兼职。托尼还有更多短期的旅行,去过很多国家,他说过,作为逍遥派(或许可说佛系)理论物理学家,对此感到很幸运^[25]。

8 托尼对若干问题的看法

8.1 对凝聚态物理的反思

托尼借用库恩(Thomas Kuhn)的范式概念,反思整个凝聚态物理^[6]。托尼认为朗道—费米液体理论是 1955 年后凝聚态物理的第一个改变范式的重要概念突破,将宏观系统的不同物理性质联系起来,它最早用于氦-3,但是后来也用于相互作用电子系统,固体中的电子往往也是液体。第二个是 BCS 超导理论,它抓住主要因素,从一个简单的有效哈密顿量出发,取得巨大成功。托尼觉得这个成功将凝聚态理论工作者惯坏了,以为只要对高温超导,甚至任何凝聚态系统,找到等效哈密顿量后,就可以算出所有性质。第三个是重整化群和对称性破缺。托尼引用卡达诺夫的话:“它将物理实践从解决问题改为讨论不同问题之间的联系。”第四个是凝聚态中的拓扑,从分数量子霍尔效应开始,准粒子与原来的粒子的关系不再像朗道费米液体那样简单。第五个是 2000 年之后,量子信息的概念进入凝聚态物理,单量子态变得重要,他认为量子信息的影响是深刻的。

相比之下,托尼认为氦-3 超流、整数量子霍尔效应、高温超导、拓扑绝缘体并没有改变我们问问题的方式,谈不上范式改变。可以看出,托尼觉得,他在宏观量子叠加方面的工作重要性高于获得诺奖的氦-3 超流工作,他说“也许是不可见的范式转变”。

他认为流行语“层展”和“拓扑”的使用在大部分情况下是肤浅的。对于在凝聚态中实现与高能物理、引力和宇宙学中类似的现象,托尼提出,如果这些凝聚态实验结果与预言不一样,对高能物理不会有任何后果,而既然负结果没有影响,正结果也不会有。

他同意诺齐耶斯(Philippe Nozières)的话“只有定性简单的论证能够解释物理”,认为理论家太沉迷于复杂的数学形式了。

托尼觉得,凝聚态物理将会研究更复杂的有

序相、远离平衡的行为与更强更精致的纠缠态。但是真正引人入胜的不是已经有明确问题、只需寻找答案,而是不知道问什么问题、需要通过拓展凝聚态物理的边界来探寻的研究。一个方向是生物组织、大脑、意识,另一个可能方向是宏观凝聚态系统的量子统计力学的基础,比如,如何用量子力学描述制备过程?时间箭头是自发对称破缺吗?而宏观变量的量子力学是这个方向的一小步,也许是不可见的范式转变。

8.2 室温超导

对于由 6 个元素组成的化合物,有大概 1 万亿种可能,可以猜测,其中有室温超导材料。有了普遍接受的高温超导理论后,可以更好地寻找高温超导材料。他同意在铜氧化物家族中,不大可能有更高的超导转变温度,但是相信理解铜氧化物的方法将推动其他材料的研究,从而获得室温超导^[43]。

8.3 宏观尺度的量子力学

在某些情形下,如果始终如一地应用量子力学,那就应该存在宏观不同状态的量子叠加。例如对于封闭盒子里的猫,如果始终如一地应用量子力学,像用于原子层次那样,就得到,猫非死非活,是这两个状态的量子叠加,直到有进一步的观测。很难用经典语言描述这个结果。这就是著名的量子测量佯谬或者薛定谔猫佯谬。

完全可能在 3000 年时,我们仍然相信量子力学是关于世界的真理,那某种意义上,我们对待日常层次的物理世界的态度与今天将很不一样,因为我们将真正面对这个怪异的世界,我相信那时这个怪异性已经放大到日常层次。至少同样有可能,而且可能更有可能,当我们从原子层次到猫的层次时,量子力学失效了,被某种我们现在不知道的理论取代,托尼个人希望这是将要发生的^[43]。

8.4 量子计算机

退相干总是有原因的,比如与环境中的某个自由度的相互作用,所以孤立它、去除它,就行了,这也是实验上做的^[24]。如果量子力学描述整个宇宙的所有层次,原则上没有理由造不出量子计算机,但是可能实际困难太大,人们觉得不值^[43]。例如,量子计算机将 500 位数字因子化的代价很大,但不是无限的。也许人们觉得不值得去做,原因可能是太昂贵,或者需要太多人做太长时间的努力。至少现在,量子计算的挑战不是很深的概念问题,而是工程问题,以及是否有趣。我觉得,

这些观点也体现了托尼信奉的“凡能言者,皆可明言”(见本文末)。

8.5 交叉科学

在实际问题中,如果需要交叉,就将人找来,而不是为了交叉而交叉。如果用熟悉的方法(比如统计力学)研究一个新领域(比如生物学),应该和这个领域的专家讨论,因为他们了解什么是重要的问题。今天(2005 年)对大脑的了解并不比 19 世纪对原子层次的物质结构的了解更好,可以预见 21 世纪在这方面的革命和 20 世纪物理学的革命类似。如果托尼今天是从古典学转出来,会选择神经精神病学^[24]。

8.6 诺奖忠告

托尼代表三位获奖人在诺奖晚宴上致辞,给出几条肺腑忠告^[43]:

(1) 如果在常识中有不理解的东西,尽量多思考,不要因为其他物理学家保证这些问题已经理解得很好而退却。

(2) 如果发现有个问题有趣,不要担心文献中是否已经解决。如果不知道答案,你会从中得到很多乐趣,即使研究结果不值得发表,仍然能学到很多。

(3) 诚实做出的研究都不会浪费,即使暂时似乎如此。放在抽屉里,10 年,20 年,甚至 30 年之后,它以你没有预料的方式帮助你。

(4) 对待教学要完全像对待科研那样认真。

显然,这些忠告来自托尼很多经历和体会。

8.7 科学发现中的运气

托尼说,在科学发现中,运气起了很大作用,但如果没有持续思考一个问题,甚至可能为此失眠数周甚至数月,就不大可能获得发现的火花。理论的主要激发点来自一些奇怪的、完全荒谬、不自然的实验结果。实验通常领先于理论,如果幸运,理论就可以给出预言。为什么有人做出别人做不出的发现?运气很重要,但做出发现的人能摆脱通常的思考方式,从新的角度看问题。对于理论家,有些最有启发的实验就是没有按照期望发生的^[43]。托尼的诺奖工作集中体现了这些观点。

8.8 物理研究方法

跟随你的好奇心,不要在意其他人说你提出的问题愚蠢^[23]。做直接的简单的物理,方法要尽量简单,如果使用复杂的方法,只使用不得不用。科研上有些想法来自教学。

8.9 减压

在一个不太灵活的环境,做自己不喜欢的事情,是不好的。为了找工作而不断地制造论文,会失去想象力,这是一个糟糕的情况。托尼说,如果他能够,希望制造他当年在萨塞克斯时的情况,当时他科研是分外之事,1972年做出氦-3超流第一篇文章后,又专心教学,第二篇主要文章是9个月后来访问康奈尔时做出来的^[23]。在量子信息学早期,在美国,做得领先的人来自文理学院,例如威廉姆斯(Williams),汉密尔顿(Hamilton),等等,他们的主业是教学,而不是来自有名的研究型大学^[23]。这些人(比如 Philip Pearle)对量子力学基础问题感兴趣,故意在文理学院找工作,而且他们的教学任务也不比托尼在萨塞克斯时重。有恰当的图书馆资源和秘书支持,理论家就可以在晚上和周末做自己的研究。如果不能到文理学院,显然还可以去中学^[23]。

托尼对中国和中国物理的发展很熟悉很欣赏,也很理解在快速发展中出现的问题,特别是学术评价方面,但是对目前的学术环境感到忧虑,认为这迫使人们专注于短期出成果的问题,而这些不是真正有价值的^[25]。出现这种局面的一个原因是信息革命导致的学术平台升级,导致岗位数与申请人数的严重不平衡。作为对策,建议分出少部分精力用于不清楚是否会在两三年内有结果,或者是否会有结果的研究。

8.10 物质条件

基础研究很多是在不好的条件下完成的,比如爱因斯坦做出狭义相对论时,是专利局职员,工资不高,大概住在小房子里。量子信息的前驱想必也是。自己在萨塞克斯时,曾经和同事面对这样一个问题:如果工资减半,还继续做这个工作吗?他自己说,当然是。很多同事也说是。

8.11 家庭教育

建议家长让孩子有时间发展自己的兴趣,为孩子找一个有想象力、能鼓励孩子的高中老师,否则孩子很容易被高中课程吓走^[23]。

9 善良、谦虚而严谨的托尼

托尼是幸运的,苏联发射的世界第一颗人造卫星“斯普特尼克”带来英国对理科的重视,推动了他成功转行(他甚至说过,感谢斯普特尼克的负责人科罗廖夫),他一路上又遇到很多贵人相助。

他还说过自己从来没有发表论文的压力,如果不是萨塞克斯的放松气氛,也不会做氦-3超流。如果不是理查德森来访,他可能就离开了凝聚态物理。

但是托尼的话有谦虚的成分,他成功的首要原因是他有强大的自我驱动。他自己本来就要转学;在萨塞克斯,他自己有做科研的驱动力;而如果他不是相关领域的专家,也不能解释理查德森带来的实验结果。

托尼对他人充满善意,乐于助人。正如 UIUC 的长期同事弗拉德金(Eduardo Fradkin)所说,他是一个谦虚的人,有伟大的诚信,如果他说要做什么事,他就会做,获得诺奖后,成了科学大使,去过七十多个国家^[44]。

托尼更是严谨的科学家,深受维特根斯坦影响,曾经在一篇玻色-爱因斯坦凝聚的综述文章开头^[45],引用了维特根斯坦名言(体现于托尼的风格):

“凡能言者,皆可明言;凡不可言者,则应保持沉默(Whatever can be said, can be said clearly; and whereof one cannot speak, thereof one should keep silent)。”

参 考 文 献

- [1] Nobel Prize in Physics 2003, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2003/summary/>.
- [2] GONOKAMI M. Remembering Anthony J. Leggett (1938—2026), https://www.riken.jp/en/news_pubs/news/2026/20260309_1/index.html.
- [3] LEGGETT A J. Interpretation of Recent Results on He3 below 3 mK: A New Liquid Phase? [J]. Physical Review Letters, 1972, 29: 1227.
- [4] Nobel Prize in Physics 1996, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1996/summary/>.
- [5] Nobel Prize in Physics 2025, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary/>.
- [6] LEGGETT A J. Reflections on the past, present and future of condensed matter physics[J]. Science Bulletin, 2018, 63: 1019.
- [7] SHI Y. Quantum Entanglement in Many-Particle Systems, <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0204058v1>.
- [8] SHI Y. Quantum Disentanglement in Long-range Orders and Spontaneous Symmetry Breaking[J]. Physical Letters A, 2003, 309: 254.
- [9] SHI Y. Quantum Entanglement in Second-quantized Condensed Matter Systems[J]. Journal of Physics A, 2004, 37: 6807.
- [10] SHI Y. Entanglement between Bose-Einstein condensates[J].

- International Journal of Modern Physics B, 2001, 15: 3007.
- [11] SHI Y. Entanglement in relativistic quantum field theory [J]. Physical Review D, 2004, 70: 105001.
- [12] SHI Y, NIU Q. Bose-Einstein Condensation with an Entangled Order Parameter [J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 140401.
- [13] Anthony J. Leggett. Superfluid 3-He: The early days as seen by a theorist, Nobel Lecture, December 8, 2003.
- [14] Tony Leggett. Superfluidity in a Crystal? Science 305, 2004, 569224: 1921-1922.
- [15] SHI Y. Beauty and physics: 13 important contributions of Chen Ning Yang [J]. International Journal of Modern Physics A, 2014, 29(17): 1475001.
- [16] LEGGETT A J. Quantum liquids [M]. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [17] 施郁. 直播: 诺奖得主 Leggett、量子专家潘建伟和陈宇翱, 物理文化与施郁世界线, 2020 年 12 月 24 日, <https://mp.weixin.qq.com/s/u6l0ezmT7jTmMN6H3m38bg>
- [18] 施郁. 超导量子比特实验的开端: 2021 年度墨子量子奖解读, 墨子沙龙, 2022 年 3 月 3 日, <https://mp.weixin.qq.com/s/TbcQXrRRK19X-6T6LL2xaA>
- [19] 施郁. 超导量子比特实验的开端 [J]. 低温物理学报, 2022(2): 97-102.
- [20] 物理学诺贝尔奖委员会. 2025 年诺贝尔物理学奖科学背景, <https://www.nobelprize.org/uploads/2025/10/advanced-physicsprize2025.pdf>
- [21] 施郁. 量子力学百年之际的诺贝尔物理学奖, 物理文化与施郁世界线, 2025 年 10 月 7 日, <https://mp.weixin.qq.com/s/Mc8O6xDpfqWNNMXbzoRlXw>
- [22] Anthony J. Leggett. Biographical, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2003/leggett/biographical/>
- [23] YI B. Interview of Anthony J. Leggett, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Wvy7xbtgWl8>, <https://www.youtube.com/watch?v=KE3mgNC626A> https://www.youtube.com/watch?v=Hpl2_5q826k
- [24] Patrícia FN Faisca, Pedro Patrício. An interview with Sir Anthony Leggett [J]. Europhysics News, 2005, 37(2): 30-32.
- [25] Leggett A J. Physics Matchmaking Between Condensed Matter and Quantum Foundations, and Other Stories: My Six Decades in Physics [J]. Annual Reviews of Condensed Matter Physics, 2020, 11: 1-16.
- [26] Leggett A J. Microscopic Theory of NMR in an Anisotropic Superfluid (He3 A) [J]. Physical Review Letters, 1973, 31: 352.
- [27] LEGGETT A J. Physical Review Letters, 1977, 39: 587.
- [28] LEGGETT A J. Nonlocal hidden-variable theories and quantum mechanics: An incompatibility theorem [J]. Foundations of Physics, 2003, 33: 1469.
- [29] CALDEIRA A O, LEGGETT A J. Quantum tunneling in a dissipative system [J]. Annals of Physics, 1983, 149: 374-456.
- [30] LUÍS C B. Crispino, Interview with Anthony James Leggett (2003 Physics Nobel Prize Laureate)-Pt. II, <https://www.youtube.com/watch?v=7WXtA3fhkDg>
- [31] LEGGETT A J. The Problems of Physics [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1987.
- [32] LEGGETT A J, CHAKRAVARTY S, DORSEY A T, et al. Reviews of Modern Physics, 1987, 59: 1-85.
- [33] LEGGETT A J, GARG A. Quantum mechanics versus macroscopic realism: is the flux there when nobody looks? [J]. Physical Review Letters, 1985, 54: 857-860.
- [34] George C. Knee, et al. A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit [J]. Nature Communications, 2016, 7: 13253.
- [35] LEGGETT A J. Physical Review Letters, 1984, 53: 1096-99.
- [36] YIP S K, LEGGETT A J. Physical Review Letters, 1986, 57: 345-48.
- [37] WOLLMAN D A, Van HARLINGEN D J, LEE W C, et al. Physical Review Letters, 1994, 73: 1872.
- [38] Van HARLINGEN D J. Phase-sensitive tests of the symmetry of the pairing state in the high-temperature superconductors Evidence for $d_{x^2-y^2}$ symmetry [J]. Reviews of Modern Physics, 1999, 67(2): 515.
- [39] LEGGETT A J, BAYM G. Physical Review Letters, 1989, 63: 191-94.
- [40] Leggett A J. Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2002, 14: R415.
- [41] Leggett A J. "Tunneling Two-Level Systems" Model of the Low-Temperature Properties of Glasses: Are "Smoking-Gun" Tests Possible? [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117, 42: 12966-12971.
- [42] LIN Y, LEGGETT A J. Some questions concerning Majorana fermions in 2D Fermi superfluids [J]. Quantum Front 1, 4 (2022).
- [43] Nobel Prize, Interview, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2003/leggett/interview/>
- [44] HILL T. World-famous U of I physicist remembered for character as much as contributions, <https://www.yahoo.com/news/articles/world-famous-u-physicist-remembered-191238575.html>
- [45] ANTHONY J. Leggett. Bose-Einstein condensation in the alkali gases: Some fundamental concepts [J]. Reviews of Modern Physics, 2001, 73: 307.