

纯粹的探索：索利斯是践行科学精神的榜样

敖平^{1,2,†}

(1 上海大学 定量生命科学国际研究中心和物理系 上海 200444)

(2 上海交通大学 系统生物医学研究院 上海 200240)

2016-11-21收到

† email: aoping@sjtu.edu.cn

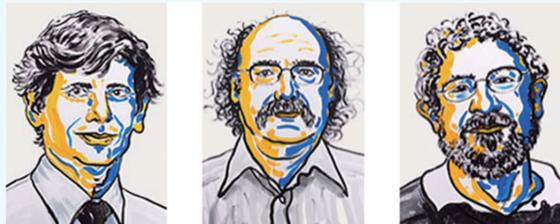
DOI: 10.7693/wl20161203

2016年诺贝尔物理学奖授予戴维·索利斯(David J. Thouless)、邓肯·霍尔丹(F. Duncan M. Haldane)、迈克尔·科斯特利兹(J. Michael Kosterlitz)(图1),对他们不平常物质形态及其转化探索的赞赏实至名归,从物理学本身的发展状况表彰时机也很恰当:相应领域正处于蓬勃发展中。随着时间的推移得奖工作在物理中的重要性会越来越明显。但对索利斯却是迟来的嘉奖。他在物理学的其他领域也做出了很多原创、杰出的贡献。我从一个后学的角度,尝试理解今年得奖工作在物理和科学中的意义,对索利斯的研究作风发表一些非常个人的观感。

物态转变是自然界中的普遍现象。今年得奖的主要工作是预测一类相变——拓扑相变——的存在,人类已知的第三类相变。人类对相变——物质形态之间的变化——并不陌生。可以肯定地说从文明曙光出现人类就理解第一类相变,至今恐怕已有10万年,现在称为不连续性相变。众所周知的例子是开水在沸腾下变成蒸汽,液体到气体的转变。在温带和寒带地区人们还应该明了冰块受热溶化成水,固体到液体的转变,另一个著名的第一类相变例子。人类对第二类相变,连续性相变,认识得比较晚,是在工业革命时期。科学家和工程师在研究如何提高蒸汽机效率的过程中发现,在足够高的压强和温度下,水与蒸汽的区别消失了——连续

性!连续性相变在日常生活中不常见。而拓扑相变则发现于当代,首先由理论上预见。

科学是要理解现象并发现其中的规律,要知其然,更要知其所以然。最重要的一步是建立定量理论,克服日常语言描述的模糊性,让科学理论具有预测能力,更能指导实验和技术的进一步发展。描述相变的定量物理理论基础是统计力学。可以毫不夸张地说,统计力学是目前适用范围最广泛的物理理论,超过狭义相对论和量子力学。像许多其他科学理论,它的建立也是一个艰辛和漫长的过程,始于19世纪中叶,始于研究没有相变的理想气体。代表性的物理学家有麦克斯韦、玻尔兹曼和吉布斯。最重要的结果是发现了配分函数和正则系综,总结在吉布斯1902年的《统计力学》中。20世纪初期,玻尔兹曼的学生Ehrenfest提出可用配分函数来描述相变,很长时间物理学界不相信这个说法,理由之一是配分函数看上去像一个很光滑的函数,似乎不可能产生不连续性。1933年Ehrenfest的学生Kramers建议取热力学极限来实现建立配分函数的不光滑性,从而有描述相变的可能。1944年Onsager找到第一个严格的例子,1952年李政道和杨振宁厘清了热力学极限的物理含义,其结果通常称为李-杨定理。至此,第一类相变,不连续性相变,的完整定量理论描述才建立:从实验观测到理论建立花了不下一万年。而连续性相变的完整理论直到1971年才由Wilson完成,同时做出重要贡献的还有Fisher, Kadanoff, Pokrovsky, Widom,从现象发现到恰当理论描述花了约150年。至此,统计力学描述相变的完整理论框架才完成。运用统计力学和最新的理论进展,索利斯和科斯特利兹在1973年*Journal of Physics C*论文中预测了第三类相变,拓扑相变,的存在。一个相对简单的物



David J. Thouless F. Duncan M. Haldane J. Michael Kosterlitz

图1 2016年度诺贝尔物理学奖获得者

理系统，二维超流膜，可能会实现这个相变。它的物理图像是量子涡旋和量子反涡旋对的分离：低于相变温度量子涡旋总是成对，黏滞系数为零，超流存在；高于相变温度，有自由的量子涡旋和反涡旋，黏滞系数不为零，超流不存在。5年之后预测得到实验完全证实，现称为K-T相变，用他们名字第一个字母组成。由于人们不知道有第三类相变，更由于对于索利斯和科斯特利兹研究的系统已经早就从理论上证明第一和第二类相变不存在，造成了对接受新预测的一个负面背景，结果之一是在实验证实之前他们的重要工作不被同行重视。

索利斯、霍尔丹和科斯特利兹的探索显然加深了人类对物质形态和它们之间转化的认识。自然界中物质形态多姿多样、千奇百怪，可目前我们只知道不连续性、连续性和拓扑共3类相变，这个数目小于已清楚的基本作用力的数目——相反方向的、把系统分成更小部分的微观物理探索，引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用共4种。他们的工作有力地揭示了物理规律深刻的简单性和统一性。

经过40多年的发展，拓扑相变对应领域已从涓涓细流变成了滔滔大河。研究表明它也有巨大应用前景，对新材料的开发和器件的发展，包括计算机，会有深远的影响。大家也可能听到关于中国在这方面的工作会得诺贝尔奖的热议。确实，中国近年来的相关工作相当出色。从相变理论的发展历程中，我们很清楚地看到，首先，理论可以完全走到实验前面，甚至拉着实验前进。其次，它表明基础研究的长期性，并和应用研究有出人意料的相互促进：第一类相变是实验和应用完全走在理论前面，但理论对设计新的复合材料及其他应用有指导；第二类相变是典型的理论—实验相互促进，而第三类相变则给应用研究开辟了一个新天地，它的宝藏还等着被发现。

在我关键的几个科学研究阶段，我非常有幸受到索利斯(图2)的言传身教和直接帮助。1990年初和导师Leggett讨论我博士后的可能选择，许多有名的地方他认为不适合我，西雅图的索利斯却

是他的推荐之一。正巧得知索利斯要到邻近州的一个大学去做学术报告，我便开车去听他的报告。报告后我向他介绍我的博士阶段的工作和今后的打算。他觉得尚可，让我回去后请我导师给他寄封推荐信。一个月后索利斯让我到西雅图



图2 David J. Thouless

华盛顿大学物理系做一个面试报告。像很多年轻研究者，我在报告中过度呈现技巧和细节，对整体物理讲解不够，被问得张口结舌，头晕脑胀，好像不能自圆其说，很紧张。报告后他把我叫到办公室，继续就我没回答清楚的地方提问。这时我已清醒过来，给出了条理清晰的论证。听后他评价说，你现在的表现比你一个小时前好得太多。

我于1990年底到西雅图做索利斯的博士后。开始尝试几个题目，要么他不满意，要么我不满意。有一天，我对他说，我想研究量子拓扑缺陷，如涡旋的动力学。他想了一会，说这是一个很有意思的方向，但很难，你得准备下功夫。难点之一是，不是没有量子涡旋动力学理论，而是很多，但没有一个能一致地解释相关实验现象，如已有近30年的第二类超导体中的反常霍尔效应，大家不知原因在哪里。接下来近两年我就研究各式理论，理解各种相关实验现象。我们的结论是，实验观察没有问题，但现有量子涡旋动力学理论要么不完整，要么有错。我们得重新建立理论。

量子涡旋作为最简单的一类拓扑缺陷在很多系统中都出现。我们需要一个坚实可靠的理论出发点来描述量子涡旋。不幸的是有的系统，如超流态氦，的微观理论至今仍未完善。他建议从多体波函数出发。他提示我只要对称性和很少几个一般性质在多体波函数里，结论很少会错，并

且，我们已有两个非常成功的多体波函数：BCS波函数和Laughlin波函数。此外，Feynman用多体波函数处理超流态氦也很成功。从这里开始借助几何相位或贝利相位我们很容易地计算出量子涡旋动力学最有争议一项——涡旋运动的横向力。我们发现它就是经典的Magnus力，和带电粒子在磁场中的洛伦兹力类似^[1]。

量子涡旋的运动很奇怪。我和索利斯研究了它在两维空间中的一般量子隧道效应^[2]。另外还让人疑惑的是有效宏观波函数遵从的运动方程。超导体和超流体都能用多体波函数描述，它们都有有效宏观波函数，但遵从不同对称性的方程：超导体是当时公认的随时变化G—L方程，而超流体是所谓的非线性薛定谔方程。我们需要证明超导体中超导部分的有效宏观波函数实际上也遵从非线性薛定谔方程。在Aitchison和朱晓梅的帮助下我们做到了：必须包括一个容易丢掉的对称项^[3]。和牛谦一起，用多体波函数我们证明量子涡旋的“裸”质量是有限的，可能还很小。我们发现涡旋和声子的耦合导致量子涡旋的运动是耗散的，并估算出耦合项^[4]。牛谦是索利斯的学生，当时刚成为助理教授，经常利用假期回到西雅图和索利斯一起工作——索利斯不但对他的学生和博士后很爱护和提携，对其他年轻学者也一样。

有一天，索利斯给我一个预印本，一个著名俄国学者的最新工作。这个学者声称证明了量子涡旋运动的横向力几乎是零：另一个拓扑效应，能谱流动，几乎抵消贝利相位。索利斯希望尽快听到我的意见。我花了一天一夜搞明白了这位学者的论证。我认为他错了。第一，他确实发现了量子涡旋运动拓扑效应的一个新表示。但是，在量子涡旋运动中能谱流动完全等价于贝利相位，它们是同一物理现象的两种不同描述：贝利相位是广延描述；能谱流动是局域描述。这在量子霍尔效应中已发现类似描述：Laughlin多体波函数是广延描述；Landauer—Buettiker是局域边缘态描述。两种描述可以用Stokes类型的定理联系。第二，这位学者声称抵消会不完全，由一非拓扑量称之为弛豫时间所控制，这在逻辑上是不自治

的。索利斯同意我的意见，告诉我以后要用微理论明确地演示这种等效性。我完成这项任务几乎是5年以后^[5]，在我建立反常霍尔效应模型以后，早已离开西雅图。几年后我在瑞典遇到这位俄国学者，告诉他我对能谱流动的看法，他当时同意我的意见。索利斯对我们的量子涡旋动力学工作很满意。他告诉我在他心中近30年的疑惑得到了回答。

1990年代后期我发现新兴的系统生物很有意思。里面的复杂生物和医学现象，如癌症、发育、代谢等等，很有物理中多体问题的特征，只是更不容易定量描述，很有挑战性。我告诉索利斯我打算研究系统生物。他听后表示支持。我在系统生物研究中发现了一个重要的随机过程结构，我怀疑这个结构在任意维数都是成立的，但它在数学上没有被人讨论过。一维很容易证明我是对的。很快我也证明我的想法二维也成立，但卡在三维。有一天索利斯问我有什么新的问题，我便告知最近碰到的难题。他说他可以帮忙。他刚有一个以前的韩国学生来访问，在找题目，这个前学生对生物问题也感兴趣。也许我们一个前学生和前博士后就把问题解决了。遗憾的是我们试了近一年证明不能突破三维，但计算机模拟表明我的想法可以在高维成立。这引起索利斯的好奇。他让我们给他讲讲近一年的努力，并让我说明生物上的理由为什么我的想法会正确。听完后他认为我的期望可能太高，但他愿意来试试。不到两个星期，索利斯告诉我问题解决了，我的期望是对的，可以在任意维数成立^[6]。现在这个结果是我很多应用的基础。

通过以上讲述，相信读者能够感受到索利斯是如何为人，做学问和培养新人。以下几点我想多着墨几笔，也许对我国目前的科研现状有一些意义。

独立思考。索利斯对事物有自己独立的看法，诚实地对待物理，对待同事和他自己。在科学报告会上，在讨论中，他会如实地、有根有据地提出自己的问题和看法，直指核心，没有国内常见的客套。由于学问的深度和高度，他很容易看到隐蔽的不足之处甚至错误所在。这对一些人

是一个灾难，对更多的人却是一个学问精进的机会。他对自己也一样。他偶尔也有搞错的时候，他会认错。我就碰到过这种情形，当时我有些吃惊。他反而给我解释道，这个问题你已思考了几个月(事实上我想了不止一年)，你不能指望我一个小时就弄明白。

好奇敏感。好奇的例子前面已举。索利斯是一个富有平等精神的人，他对各种歧视很敏感，很不喜欢。

专注彻底。索利斯对工作非常专注，对问题喜欢探索到它的逻辑终点。我想是这种精神引导他和科斯特利兹发现拓扑相变，为物理打开了一道大门。诺贝尔奖委员会引证他在1982年的一项工作。他一直在研究其中的问题，世界上大概只有一双手都数得过来的研究小组在研究它，大多还与他有直接学术传承关系。大家都觉得索利斯钻了牛角尖。我记得在1990年代中期贝利问他为什么还专注于这个问题，索利斯想了一想，淡淡地回答说，这像珠穆朗玛峰，它在那里。老实地说，当时我希望听到一个“热血沸腾”的论证，对这个回答是有点失望。

学养厚实。索利斯的学术修养非常深厚，不管是物理还是数学，基础训练非常扎实。我反思过我和他的前学生为什么不能突破三维，发现自己学到的常微分方程理论太浅。在研究量子涡旋动力学时，我感觉用弛豫时间近似处理拓扑效应有问题，但一直找不到抓手：这个近似在凝聚态物理及其输运过程中应用广泛，很多情况下也很成功，似乎不可能有根本性问题。他建议我去重新研究Green和Kubo是如何建立输运理论的，在重读原始文献中我才注意到这些先驱者已经知道弛豫时间的局限性，有时甚至会引入定性错误。经过反复思考，我和朱晓梅找到一个不用弛豫时间近似的方法同时计算了量子涡旋的拓扑效应和耗散效应：贝利相位和摩擦系数，并显式地演示了贝利相位与能谱流动的等效性^[5]。这个方法最近在冷原子系统中被重新发现。

心怀实验。索利斯总是跟我说，当我们构造一个物理理论时，至少要想到该理论的原则上的

实验检验手段。如果它原则上不能被检验，那就不是一个物理理论。我想正是这个理念让他的许多工作走在实验的前面。

学术传承。创新工作很少是凭空出现的。良好的传承和适当的环境很重要。索利斯的博士导师是Bethe，Bethe做过Fermi的博士后，Fermi跟Ehrenfest学习过，等等。Fermi和Ehrenfest都是公认的伟大导师。Bethe写了凝聚态物理的第一本教科书，提出恒星，如太阳，演化的标准模型，知识渊博，科学判断力强。他们发表的东西只是他们考虑过的一部分。索利斯当时的工作环境是Peierls所营造，是当时著名的物理研究中心，加上英国一直对学术研究的宽容，我们都知道她收容了马克思，不太为人所知的是她也收容了Bohm。他告诉过我他从1960年代中期就在思考相关问题，1970年代初和Anderson的讨论对他拓扑相变想法的发展帮助很大。

索利斯30年前到中国来过，我的一些国内朋友还记得他的尖锐问题。他的两个儿子都在中国工作过。他的一个儿媳是华裔。我回到上海交通大学后曾邀请他和夫人再访中国，告诉他中国已有巨大变化。他也原则上同意。遗憾的是由于一些细节问题以致邀请计划没有在国内通过。也许以后可以再试。

不是最后的最后，中国传统文化不鼓励刨根问底、为规律而规律，我想索利斯的榜样告诉我们应该和如何独立思考、自信工作。这些是目前中国在文化发展上，特别在科学研究中，相当缺乏的。这对我们突破思想的樊篱又多了一些助力。

参考文献

- [1] Ao P, Thouless D J. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70:2158
- [2] Ao P, Thouless D J. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72:132
- [3] Aitchison I J R, Ao P, Thouless D J *et al.* *Phys. Rev. B*, 1995, 51: 6531
- [4] Niu Q, Ao P, Thouless D J. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72:1706
- [5] Ao P, Zhu X M. *Phys. Rev. B*, 1999, 60:6850
- [6] Kwon C, Ao P, Thouless D J. *Proc. Nat' l. Acad. Sci. (USA)*, 2005, 102:13029