

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

孙昌璞

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 010101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212307

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212307>

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*

孙昌璞[†]

(中国工程物理研究院研究生院, 北京 100193)

(北京计算科学研究中心, 北京 100193)

(2021年12月14日收到; 2021年12月27日收到修改稿)

欣逢杨振宁先生百年诞辰, 已有不少文章总结了杨先生对当代物理学发展的重要科学影响. 笔者认为, 作为当代最伟大的理论物理学家之一, 杨先生不仅以诸多具体的科学贡献推动了当代物理学革命性的进步, 而且其独特的科学风格在国际学术界独树一帜, 其学术思想更是深邃隽永、对中国和世界的物理学发展有长远的启发作用. 笔者将结合学习杨振宁科学思想的体会, 联系自己在理论物理研究方面的科学实践 (包括在1992—1994年跟随杨先生对量子开系统、超导相变和冷原子物理方面的探索), 对当代理论物理发展趋势提出一些个人的看法. 文章将通过具体实例, 阐述为什么要做“美或有用”的理论物理; 为什么基本物理的理论在一段时间内可以与直接的实验验证保持距离? 对于后者, 本文还从科学方法论 (哲学) 的角度就理论预言与实验证实的关系进行较为深入的讨论. 着眼于“有用”的理论物理-应用理论物理, 笔者强调了国家需求驱动的科学研究与自由探索一样, 也会导致基础物理的重要突破.

关键词: 杨振宁, 理论物理, 发展趋势, 科学风格**PACS:** 01.55+b, 01.60.+q, 01.65.+g**DOI:** 10.7498/aps.71.20212307

1 从物理理论到理论物理

物理学是研究物质及运动规律的科学. 其研究内容可以概括为两大方面: 1) 在更高的能量标度和更小的时空尺度上, 探索物质世界的深层次结构及其演化规律; 2) 面对由大量个体组元构成的复杂体系, 探索超越个体的、“演生”出来的有序和合作现象. 上述两方面的追求体现了两种基本的科学观——还原论 (reductionism) 和演生论 (emergence)^[1,2].

“还原论”物理把物质性质归结为最基础组元间的基本相互作用 (电、弱、强相互作用和引力).

基于杨-米尔斯 (Yang-Mills) 规范场理论发展起来的标准模型, 通过局域对称性统一了电-弱相互作用, 也描述了强相互作用. 人们期待进一步把引力也统一到更大的对称性模型之中, 实现一代又一代物理学家期待的终极大统一理论的科学梦想^[3-5]. “演生论”物理主要研究多体复杂系统的整体有序和合作效应, 把较高层次“演生”出来的规律当成基本定律加以探索^[6,7]. 其研究对象涉及从固体、液体到生命软凝聚态等各种多体系统, 甚至包括人工创造的复杂系统 (如交通网络、流行病传播演化结构和复杂的科学装备) 在内的非自然系统. 演生论可以概括为“多者异也”的核心思想, 强调不同物质层次或能量尺度下都存在各自的基本物理

* 国家自然科学基金 (批准号: L1924037) 和国家自然科学基金委员会-中国科学院学科发展战略研究联合项目 (批准号: XK2019SLC002) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: suncp@giscaep.ac.cn

规律,如自发对称性破缺和热力学熵增决定自发演化的方向等问题.

围绕着“还原论”和“演生论”,物理学形成了不同的学科分支.前者有粒子物理、核物理和原子分子物理等,而后者包含凝聚态物理、等离子体物理和激光物理等.物理的理论基础是“四大力学”,但它们又各自发展出相关的理论,如激光理论、固体理论等.作为物理学的分支学科,理论物理常常被质疑:既然物理学不同的学科分支有各自的物理理论,为什么还需要有理论物理?理论物理的典型学科特征是什么?关于发展物理理论还是理论物理在我国曾经有过一些学术争论.

事实上,物理学基于“还原论”和“演生论”描述物质世界,其科学手段是利用实验进行主动的观测.它通过建立理论模型或哲学思考,提出初步的科学理论假设,然后借助新的实验进行判定性检验,并用严格的数学语言精确、定量地表达其一般的科学规律——物理定律,由此可以进一步预言新的物理效应,并应用到新的领域.物理学研究方法的这些内禀特征,决定了理论物理学作为一门独立学科存在的必要性,也预示着它在物质科学中具有核心的地位.王竹溪和郝柏林^[8]明确定义什么是理论物理:“理论物理是物理学的一个分支.理论物理学把物理学各个分支领域对物质运动规律的研究成果,作出高度概括,表述为基本的定量的关系,建立起统一的深刻的理论体系,说明和预见新的物理现象.许多实验和理论的集体,既分工又配合,在理性认识和感性认识的多次循环往复中,使物理研究工作步步深入,揭示和应用自然界的客观规律……”.他们还进一步强调,“一方面,物理学的各个分支都有相应的理论,另一方面贯穿于各个方面的理论又形成体系,构成理论物理学科.理论物理又起到沟通各个分支学科的桥梁作用”.由此看来,理论物理学是一门跨越物理学各个分支领域乃至其它物质科学领域的综合交叉学科.

按照还原论的观点,凝聚态物理学之所以能发展成当代物理学最大的分支学科,是因为它把量子力学和统计物理成功地运用到固体和液体等凝聚态系统,奠定了材料、信息、生物科学和能源技术的科学基础.然而,从演生论角度看,凝聚态的相互作用多体理论对基础物理也有本质的贡献:从凝聚态体系的研究提炼出来的普适概念和方法,对包括高能物理等其它物理学科的发展也会起到根本

性的推动作用.大家知道,满足局域规范对称性的要求,原初的杨-米尔斯场是没有质量的.泡利曾经据此对当时杨振宁关于规范场的报告提出质疑.后来,受BCS超导理论启发,南部(Yoichiro Nambu)把其中蕴含的对称自发破缺机制应用到基本粒子物理,通过Higgs-Anderson机制使得规范场获得质量,由此建立了杨-米尔斯规范场论描述的电弱统一标准模型和关于强相互作用的量子色动力学(QCD).因此,对称自发破缺机制的发现是物理学发展历史上的一个重要里程碑,它已经成为当代理论物理必不可少的基础理论.

需要指出的是,与对称自发破缺机制等价的非对角长程序(off-diagonal long-range order, ODLRO)是对演生现象更严格的数学描述,它也是由杨振宁先生在Oliver Penrose和Lars Onsager工作的基础上发展起来的普适理论,既可以描述玻色子体系的玻色爱因斯坦凝聚和超流,也可以刻画费米子体系的超导以及复合体系的演生现象.

总而言之,理论物理具有内涵上本质交叉的明显特征.它不仅仅是把物理学的各个分支理论集合起来,而是把它们相干地融合成一个理论总体.贡献于理论物理综合交叉融合的基本属性的形成,杨振宁先生不仅建立了还原论的基本内核——规范场论(图1),而且从统计物理的基础研究出发,发展了描述对称性自发破缺、支配“演生”的“严格数学”——非对角长程序.

2 理论物理多元价值观基于“美”的统一

物理学不同分支领域的价值观必定会有差异.基于“还原论”的高能粒子物理需要昂贵的大型科学装置,其成功需要更长的时间(如证实Higgs机制用了50多年).因此,判断一个基于“还原论”的物理理论(如量子场论和弦论)的“好/坏”,并不能仅仅依据是否能被即时验证,而必须考量理论的基础性和预言的深度、广度.而凝聚态物理等演生论领域贴近日常生活,大多采用相对经济、易实现的桌面实验系统,能否有即时的证实有时会成为一个可操作的价值判断标准.既然理论物理学是这些分支学科理论综合交叉,判断一个理论好坏的价值观自然就是多元化的,而多元化必有一定程度的价值观冲突.

二十世纪八九十年代,安德森与温伯格的隔空

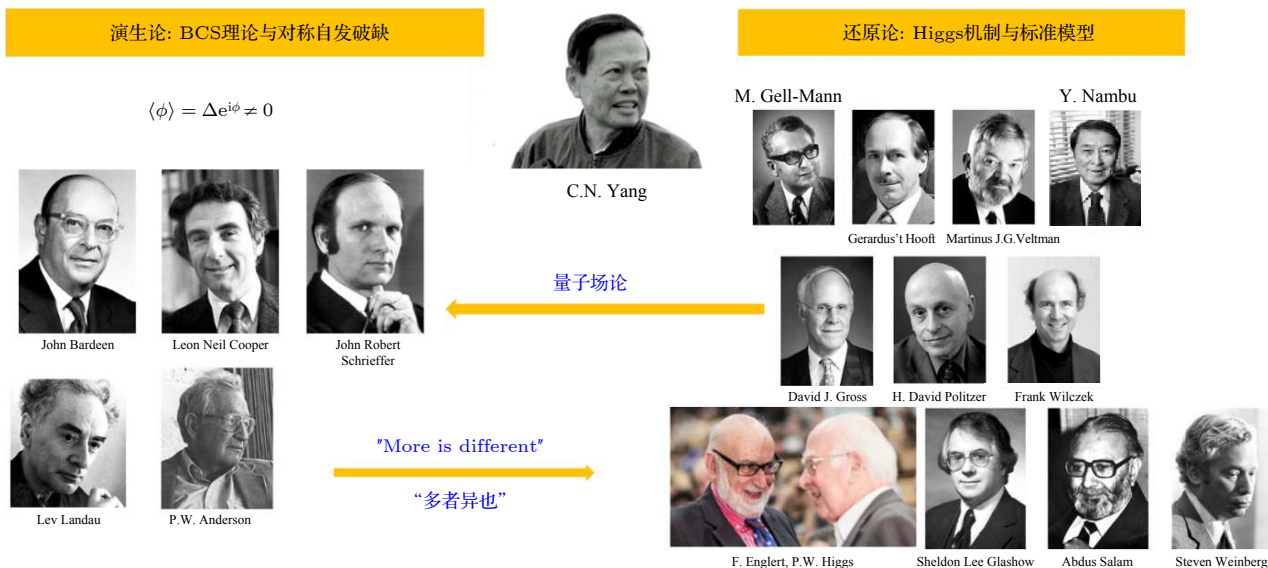


图1 杨振宁的规范场论通过对称性自发破缺机制(等价于他的非对角长程序理论),本质上统一了理论物理学两大方面——还原论和演生论

Fig. 1. By the spontaneous symmetry breaking mechanism (equivalent to his theory of off-diagonal long-range order), Chen-Ning Yang's gauge field theory essentially unifies the two major aspects of theoretical physics—reductionism and emergence theory.

争论,在强化了“多者异也”(“more is different”)的“演生”观点的同时,以某种方式影响了美国SSC(超导超级对撞机)下马事件.而早年从事高能理论研究的人经常会把有诸多近似的凝聚态理论视为“dirty physics”.理论物理学价值观多元化困境会直接影响物理学的和谐发展^[8].那么是否存在一种“粗粒化”的价值选择可以突破理论物理多元价值冲突的困境呢?我的答案是,杨振宁先生多次强调的“美”的价值判断可以作为统一其多元化价值观更高层次的标准^[9,10].而爱因斯坦、狄拉克和杨振宁本人的具体科学实践可以佐证“美”的标准的合理性.

“美”看上去是主观的东西,它怎么可以作为理论物理学价值标准呢?杨振宁没有直接定义物理学中的美是什么,但他先复述了玻尔兹曼的说法:物理理论有美妙的地方,每一位物理学家对这种美妙有不同感受,形成自己的风格,这种不同的感受就是杨先生所说的“taste”(品味).杨先生比较了狄拉克和海森堡,他更欣赏狄拉克数学上“唯美”的风格:“性灵出万象,风骨超常伦”(引自高适《答侯少府》).有了这种风格,狄拉克可以不惧玻尔、海森堡和泡利等权威,以有深刻物理考量的“数学之美”写下狄拉克方程,预言反物质世界.杨振宁也正是在这种“美”的价值观驱动下,基于对称性的考虑,和米尔斯一道,勇敢地提出了杨-米尔斯规范场论,

而不“介意”泡利基于规范场尚无质量的反对.

需要指出的是,泛泛地谈“品味”和“风格”并不能给出“美为什么能够统一理论物理多元价值观”的理由,但其基本的部分可能包含在数学的价值观当中.王元先生认为好的数学和艺术一样,美学是第一标准,数学美在于大道至简^[11].“理当则简,品贵则简”.物理理论之美在于自然物质有结构之美,而描述它的理论框架必有数学之美.这种美有与艺术之美相同的地方,也有不同的地方.数学美可能是不可言说的艺术之美和(物理)科学美的理性分野:数学美不是人造的,是天道自然的基本属性,亘古有之.

杨振宁是理论物理之美的创造者和实践者,规范场和杨-巴克斯特(Yang-Baxter)方程方面堪称其美之创造典范.在很多非常具体的工作中,杨先生创造和把握“美”的能力可谓登峰造极.王元先生曾经回答我关于杨先生数学如何的提问.他说:杨先生在非对角长程序文章的“定理6”的证明中^[12],其“数学技巧之漂亮超越了数学家”.值得一提的是,杨振宁在*Physical Review*系列杂志发表的第一篇文章^[13]是关于时空量子化如何满足平移对称性要求的研究,这个工作导致了不可对易几何的发展,但开始却长时间不被物理学界注意.当然,细分之下,数学美和物理美有同根的地方,也有差别.杨振宁对数学家在不知道物理背景的情况下发明

了“规范场”-纤维丛上的联络感到惊讶,认为数学家“凭空梦想出了这些概念”. 数学大师陈省身先生的回答并非如此,他认为“它们是自然的,也是实在的”. 因此,虽然数学和物理学关系密切,但它们各有各的价值观和传统,“有着不同的发展方向”.

综上分析,数学不仅为理论物理发展提供了必不可少的工具,而且为理论物理多元价值观的统一提供了一个重要视角——数学和逻辑之美. 那么反过来,理论物理对数学的影响是什么? 首先,理论物理学提出的需求可以牵引数学的发展,数学要为理论物理学发展提供更严谨的分析推理手段和更精密的计算模拟方法,这导致了传统的数学物理和计算物理的诞生和发展;进而,理论物理学本身引申出来的概念方法会启发新的数学思想和学科分支的产生. 这也将是今后理论物理发展的新趋势,而这个趋势主要是由狄拉克最初发动的,并在二十世纪六、七十年代后,主要由杨振宁和威腾等把理论物理牵引数学发展的研究又一次推向了一个新的高潮.

事实上,由于狄拉克关于量子力学的 q 数- c 数理论,人们发展了算子代数;由于他进一步在量子力学中引入了 δ 函数,人们才建立了广义函数理论. 可以说,算子代数和广义函数理论是理论物理学家对数学发展的划时代贡献. 杨先生秉承了狄拉克的学术精神,基于对物理学之美与数学之美的关系的深刻理解,对数学发展同样做出了完全可以比

肩狄拉克的开创性工作,成为 20 世纪以来少数几个对数学学科拓展有实质性影响的物理学家之一. 杨先生的规范场理论和杨-巴克斯特方程实质上推动了两个新的数学分支发展,如 Hopf 代数和量子群,四维可微流形分类,还有非阿贝尔磁单极跟陈类和纤维丛的联系. 因此,用理论物理学问题引导数学本身发展,20 世纪以来的物理学家只有狄拉克和杨振宁做到了这一点. 维格纳也是几乎同时代一位重要的数学物理学家,但是他只把数学中的群论方法用到了物理,在促进数学自身发展上并没有实质性的大贡献.

杨先生不仅对数学和物理之间的关系有深刻独到的见解,对如何开展数学物理研究(特别是如何在中国开展数学物理的研究)有前瞻和务实的建议. 早年他亲力亲为、与国内学者(如谷超豪、杜东生等)合作,推动经典规范场与磁单极的研究. 后来,杨先生在南开数学研究所设立理论物理研究室,调入葛墨林教授主持工作,开展了可积系统、辫子群、量子群及其应用的研究. 50 年来,杨先生在推动了中国数学物理研究快速走向世界领先水平的同时,造就了几代在数学物理领域有国际影响的理论物理学家(见图 2).

3 理论物理与实验关系“非常谈”

在阐述爱因斯坦关于理论物理思想方法时,杨

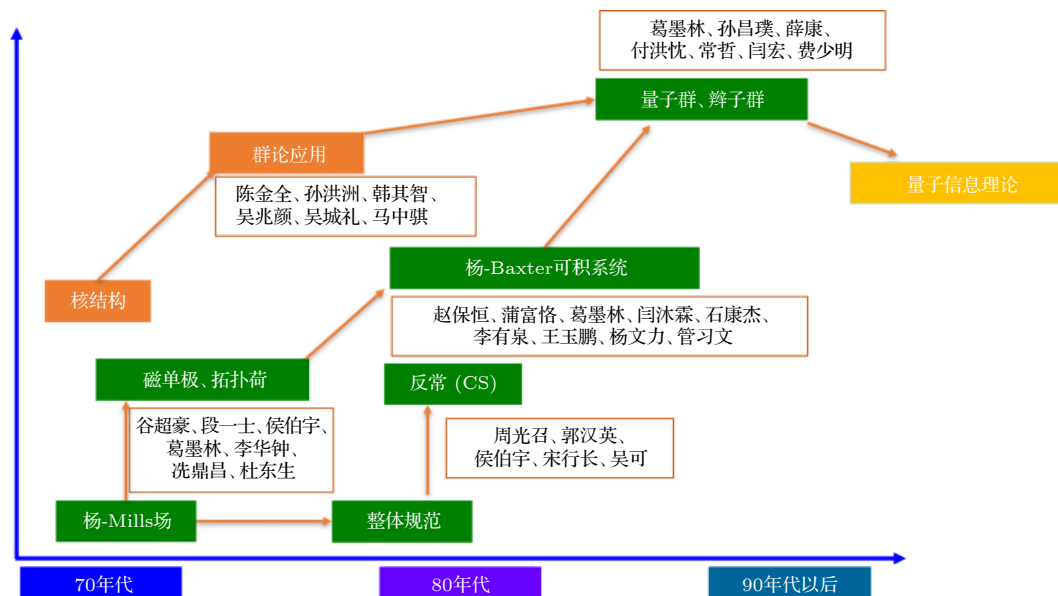


图 2 数学物理在中国的发展和相关人才的成长

Fig. 2. The development of mathematical physics in China and the growth of relevant talents.

振宁^[14]认为：“爱因斯坦从自己的经验及 20 世纪初物理学的几次大革命中认识到，虽然实验定律一直是（而且继续是）物理学的根基，然而，数学的简和美对于基础物理概念的形成起着越来越大的作用”。他进一步引述了爱因斯坦的观点：“如果一个理论的基本概念和假设接近于经验，它就具有一种重要的优越性，人们对这样的一种理论自然就有更大的信心。...然而，随着认识的深入，我们要寻求物理理论基础的逻辑简单性和一致性，因而我们要放弃上述的这种优越性”。

鉴于以上的观点，对理论和实验的关系，我们有必要做进一步的追问：理论物理是不是需要有即时的实验验证？是否需要考量实验中验证的是不是我们要验证的理论？从科学哲学的角度甚至还可以进一步的追问，理论本身能够被证实吗^[15]？我可以举几个例子来说明这些追问并非平庸，而且不是钻牛角尖的形而上学。

在李政道、杨振宁发现宇称不守恒并建立中微子二分量以前，关于 μ 子到正负电子衰变的实验分支比在一定范围内是 random。后来，李政道和杨振宁的 1956—1957 年理论预言的分支比是 $3/4$ 。此后 10 年，人们进行多次实验，最后分支比的测量值稳定逼近 $3/4$ (图 3)。意味深长的是，每一次实验的误差条都落在前一个实验误差条里边^[16]。这个事例告诉大家，如果“理论-实验-再实验”不能“背靠背”地进行，单次实验观察一定不能独立于理论去无偏地验证理论预言，仅凭一次实验通常无法给出理论正确性的客观检验，只有多次实验才能逼近理论描述“客观实在”。

关于理论预言实验验证的科学内涵常常被误解为“眼见为实”——希望理论中出现的“实体”必须立即被观测到。然而，在 QCD 的实验中“看”不到自由的夸克。看上去，没有作为物理实体的夸克就不会有 QCD，那么“看不见”自由的夸克是不是说 QCD 就不对了呢？事实上，作为具有更高对称性的规范理论，基于夸克建立起来 QCD 能够预言渐进自由效应和夸克禁闭现象：由 QCD“计算”出的夸克间吸引作用力随距离变小而变小、变大而变大，从而把夸克束缚起来，QCD 在逻辑上自证自由夸克不存在，实验自然看不到它们了。所以，对实验证实问题，我们要有理论和逻辑上的自信：自由夸克不存在的预言这正是杨-米尔斯规范理论美妙之处。

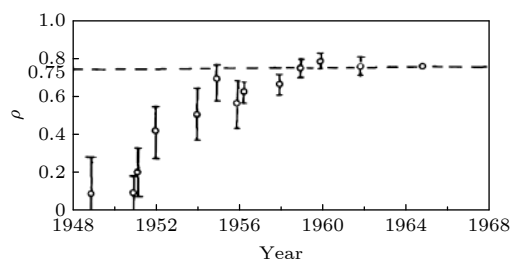


图 3 1957 年李-杨的理论预言影响了测量 μ 子到正负电子衰变的分支比的误差处理：测量每一次实验的中值都落在前一次实验误差范围内，10 年后逼近预言 $3/4$ 而稳定

Fig. 3. Li and Yang's theoretical prediction in 1957 had affected the error processing in measurement about the branching ratio of decays of μ to positron and electron: the median value of each experiment fell within the error range of the previous experiments, and after 10 years, it approached and became stale on the predicted value of $3/4$.

另外一个典型例子是关于量子力学测量的 Everett 多世界诠释：被测量的对象与观察者的相互作用把“世界”（被测系统加上观察者及其环境的总系统）状态“分裂”成不同分支的叠加，观测者得到一个测量结果被解释为他“碰巧”出现在包含这个特定结果分支中。质疑者对多世界诠释的批评通常是实验上看不到世界不同的分支。然而，与 QCD 类比，即使有“分支”也不能当成实体，它只是诠释中间的“自由夸克”，“世界被分裂为不同的分支”本来就不是 Everett 理论预言结果，而是不少人没有仔细了解 Hugh Everett II 的博士论文“Relative State Formulation of Quantum Theory”^[17] 给出的形象化的臆想。其实，量子力学不需要附加任何假设，在逻辑上能够自证不同分支中无法交换信息——“看不到分裂”而无需波包塌缩的假设，可以解释量子力学相关的全部实验结果^[18,19]。因此，与“自由夸克不存在”的预言异曲同工，这正是来自量子力学的“逻辑美”的力量！

需要指出，理论物理中并非每一个理论（推论）都需要实验证实，只有理论中有假设和无明显理由近似的地方才需要实验。量子力学建立在大量实验基础上，需要检验的只是其反直观的推理或预言——非定域性；超导 BCS 理论本质是平均场理论，但要预先假设超导的非零序参量，这与粒子数守恒系统的 $U(1)$ 规范对称性预言的结果看上去有矛盾。因此，我们需要量子隧穿实验（约瑟芬森效应）直接证实序参量的存在。

实验物理学家对“理论”有时会盲目地深信不疑，从而导致实验数据使用主观倾向错误理论预言

的严重科学问题. 其实, 实验物理学家看到的“理论”预言有可能只是某种“有效理论”的结果, 或只是近似简化模型对实际系统的描述, 可能忘记了近似成立的条件有时会十分苛刻. 笔者认为, 最近关于 Majorana 零模实验有很多的争论都源于盲目相信超导-纳米线紧邻复合系统理论上一定会约化到 Kitaev 模型^[20], 从而具有 Majorana 零模的. 然而, 在实际的强场条件下, 它到底能不能约化到理想 Kitaev 模型, 人们并没有深入细致地探究. 如果不能约化到 Kitaev 模型, 即使观察到的零偏压信号, 也不能代表 Majorana 零模. 最近研究表明, 在化学势 μ -磁场 h 平面上, 磁场很弱时的“理想拓扑相图”边界是开口向上的类抛物线, 超导导线中的虚激发通过紧邻效应在纳米线上诱导出的配对不依赖磁场. 然而, 如果仔细做更精确的解析分析或从头严格计算会发现, 有效配对强度一定依赖磁场, 它使得“相图”边界变得封闭. 磁场强度超过“相图”边界顶部, 拓扑相变不会发生, 也就不会有 Majorana 激发(图 4). 如果实验家相信了并不符合实验条件

的有效模型理论预言, 有取向地处理数据 (甚至可以在误差范围内), 就可能得到与理论相符合的错误结论.

笔者认为, 可以在更一般的层面上看待上述类似的问题, 问题的深层次根源在于这个领域中的一些人不能正确地理解理论和实验关系: 1) 有理论上的严重误解——错把有效模型当实际系统; 2) 有理论上的跟风——没人细致地考察理论预言成立的条件; 3) 实验上的结论盲从“理论”——过分相信实验发现重要性依赖“理论”; 4) 实验数据使用不客观——有取向地处理数据以拟合已有的“理论”. 由此看来, 谈及理论预言的实验验证, 我们必须追问到底实验“验证”了什么? 一个真实的物理系统, 一个实际的实验, 跟理想模型都是有距离的, 理论结果到模型给出的预言也是有距离的(图 5). 很多时候验证的只是近似化后模型的预言, 而非关于真实系统的理论结果. 在量子物理模拟的实验中, 此类问题甚多, 必须提高警惕. 如, 用光学(或光子)系统去模拟电子系统的行为. 由于它们统

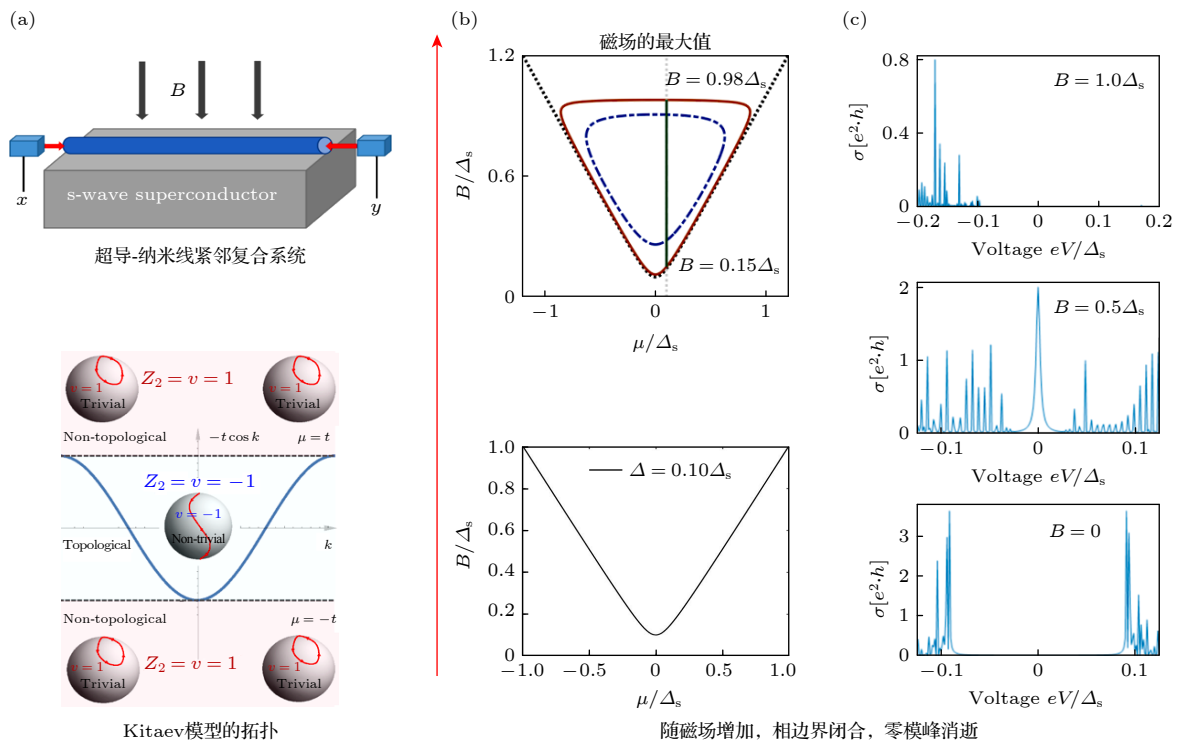


图 4 实际纳米线-超导紧邻系统-Kitaev 模型与 Majorana 零模实验观察 (a) 实际系统(上)和期望约化到的理想 Kitaev 模型的相图拓扑结构(下); (b) 更高阶微扰论方法预言的相图——随磁场变化由开到闭; (c) 微分电导随磁场变化的严格计算

Fig. 4. Experimental observations about Majorana zero modes and the Kitaev model for the practical system of nanowire proximity-coupled superconductor: (a) The practical nanowire-superconductor system (top) and the topological phase diagram determined by the ideal Kitaev model(down); (b) the topological phase diagram predicted by the approach based on higher-order perturbation, which goes from open hyperbolic to closed triangle region as the magnetic field changes from weak to strong; (c) Exact calculation of differential conductance with change of the magnetic field.

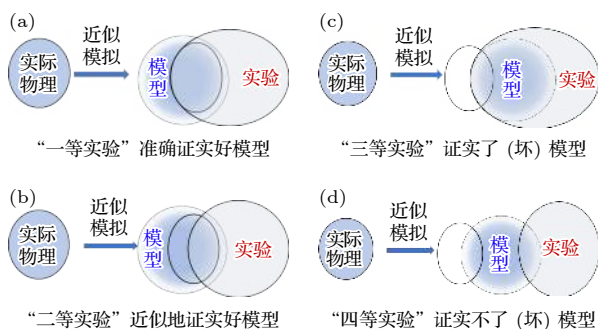


图5 证实“理论”实验的分级(实际物理-模型-实验的“距离”决定了“实验证实”工作的好坏) (a)模型预言覆盖了实际系统的全部物理,实验正好证实了模型预言;(b)虽然模型预言覆盖了实际系统理论结果的全部,但实验只是证实了基于模型预言的一部分;(c)模型预言覆盖了关于实际系统理论结果的一部分,实验也只是证实了“模型预言”;(d)模型预言不能覆盖实际系统物理的全部,实验也只是符合模型部分不准确预言,证实与否甚至与实际系统无关

Fig. 5. Ranking of experiments that confirm “theory” (the “distances” between the actual physics and model (experiments) determine how well the “experimental verification” works): (a) The model based prediction covers all the physics of the actual system, and the experiment just confirms the model based prediction; (b) Although the model based prediction covers all the theoretical results about the actual systems, the experiment only confirms part of the model based predictions; (c) The model based prediction covers part of theoretical results about the actual system, and the experiment only confirms “model based predictions”; (d) The model based prediction cannot cover all the physics of the actual system, and the experiment only conforms some inaccurate predictions from the model, and even whether it is confirmed or not even has nothing to do with the actual system.

计行为完全不同,电子系统存在费米面而光子没有,模拟费米面决定的物性(例如,电子费米面附近低激发的普适行为可以描述为朗道费米液体或 Tomonaga-Luttinger 液体)的任何实验必定有问题,不考虑费米面的光子模拟经常只是一个“运动方程”相似的演示而已. 还需要强调的是,能够基于已经被证明的理论精确计算出来的东西也无需模拟,顾此失彼的模拟实验没有任何判定性的意义.

一个好的理论-实验的结合工作,必须是双盲的、背靠背的,否则的话就会出现互相人为拟合趋同的科学诚信问题. 评价实验验证理论工作的优劣,可以根据图5所示的理论-模型-实际物理三者关系分为4个级次. 很明显,到了第3、4级很可能就走进了学术诚信的灰色地带. 著名化学家 Irving Langmuir^[21]曾经指出:“可能科学家完全是诚实的,十分热衷于自己的研究……但完全自己欺骗了

自己”,“这些事件中没有任何弄虚作假,但由于作者不了解作为一个人完全可以被主观的因素、一厢情愿的想象,而引入歧途,以致完全陷入错误的泥塘之中”. 这些主观的因素,完全有可能驱使科学家依据第3、4级的“实验验证”做出“重大科学结论”. 一个好的理论物理成果,要独立放在那里,实验物理学家背靠背独立地验证它的预言. 一个好的实验,要开放所有认真测量得到的数据,最好让不同理论组背靠背地解释新发现. 事实上,当代物理学的重大发现几乎没有几个是理论和实验直接合作在一起发表的.

毫无疑问,物理学本身是一门基于实验的科学. 既然理论物理是物理学的学科分支,其正确与否最终就必须回归到实验检验. 然而,作为一个综合交叉的核心学科,理论物理发展必须立足于遍历整个发展过程、足够多的实验总和之上、发现共性规律,一时一地的处理个别实验现象不是理论物理的核心任务. 因此,在物理学发展过程中,有的阶段性理论研究,开始可能看不到实验检验的可能,但其进一步拓展和改进却可以导致重大突破和科学革命,广义相对论和规范场论是这方面的典型例证. 必须强调,虽然理论必须联系实际、实验必须基于理论,但实验的目的也不只是去证实理论,理论的目的不只是去解释实验. 实验应该去发现新现象、新效应和新物质,理论要找到新规律、建立新方法.

4 走向“美而有用”的科学研究——“应用理论物理”

杨振宁先生多次谈及理论物理的未来,对理论物理的发展倾注了诸多的人文社会关怀. 1961年,他在一个有关“物理学的未来”的演讲^[22],对理论物理未来提出了看似悲观的观点. 从他新近修订出版的《晨曦集》和《曙光集》新附的后记可以看出,他的观点今天仍然没有改变. 以高能物理为例,虽然他一直在大力推动高能物理加速器的研究,但他仍然认为,高能物理实验越来越复杂、费用越来越高,发展需要的钱越来越多,而理论和实验之间“越来越充满隔膜,而且距离物理的现象越来越远”,而“物理现象说到底是物理学的源泉”. 因此,虽然“过去的二十年,无论是实验物理或者是理论物理都取得了令人兴奋的进展”,但他“感到今日物

理学所遇到的困难有增无减”,担心“爱因斯坦和我们曾经的大统一的梦想在 21 世纪可能无法实现”。

既然如此,那么基础物理学或理论物理的出路在哪里呢?杨先生讲^[23]，“虽然实验定律一直是物理学的根基,但物理学的简单和美对于基础物理的影响起到越来越大的作用”。在这种情况下,他继续追问,“21 世纪理论物理学的主旋律是什么呢?”,“在充分明白其中可能涉及的风险后”,他做了如下的“猜测”：“由于人类面临大量的问题,21 世界物理学很可能被各种应用问题主导.这些当然非常重要,但是与 20 世纪的主旋律相比较,它将缺乏诗意和哲学的品质”。

除了对“缺乏诗意”的提法稍有保留,我基本同意杨先生的总体看法,并进一步强调理论物理未来的发展趋势是“应用理论物理 (Applied Theoretical Physics)”:借助理论物理的思想、模型和数学工具,以应用为目的,研究主要包括人工复杂系统在内的客观系统,探索其物质-能量、时间-空间和结构及其相互作用和运动演化规律,从中概括和归纳出具有普遍意义的基本理论,大大拓展传统理论物理只是关于自然物质系统的探究.这样的研究,也许没有像麦克斯韦电磁学、相对论、量子力学和规范场理论 (标准模型) 那样,具有荷马史诗《伊利亚特》和《奥德赛》一般的宏大英雄叙事主题,或具有但丁《神曲》三部曲直面重大问题的梦幻主义的蓬勃旋律,但可以有“小桥流水”的意境之美和“一沙一世界”的诗意。

从学科属性角度看,应用理论物理学属于应用基础的基础研究,是跨系统的综合交叉.几乎与自由探索的科学研究一样,面向需求的基础研究不仅会导致技术革命,也会引发科学理论原始创新^[24].巴斯德研究酿酒技术相关的酒石酸的偏光行为,导致了微生物的发现,诞生了生物学的重要分支微生物学.二战前后关于改进雷达性能研究,导致从微波激射器到激光的重要发现^[25].而激光理论后来催生了量子光学,影响了今天的精密测量的理论与技术.在应用领域,也有诸多的理论具有诗意之美,例如激光产生也是对称性自发破缺的完美体现.其实,“诗意”的高远与否,依赖于个人的“品味”,而杨先生上述谈及的物理上的诗意主要是指对称性、量子化和规范场那样的英雄史诗,应用理论物理的研究能否衍生出这样的主题,今天并无确定的答案。

以上关于“应用理论物理”的提法,一定程度上契合了 6 年前笔者为科学出版社《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》写的序言中关于理论物理的重要作用 and 学科发展趋势的描述^[26].笔者认为,理论物理未来的研究会更趋纵深和广泛,更要立足于全部实验和现象的总和之上,而不是只对个别实验和偶然现象,但具体的研究工作却要大处着眼,细小处着手,这也是杨先生提倡且身体力行的.面对当代实验科学日趋复杂的技术挑战和巨大经费需求,理论物理对物理学发展必须发挥更大的引领作用,对高新技术的发展方向提供判定性的科学依据;理论物理学面对非自然的人工系统,要适应物质科学从观测解释阶段进入自主调控的新时代,变自在之物为为我之物.同时还要强调,理论物理学未来将会在对具体系统的实际应用中实现自身创新发展.事实上,近二十年来,在材料、能源乃至生命方面的实验发现 (如生物磁导航、光合作用中的量子效应等),在传统的理论物理框架下难以得到解释,新的理论物理创新也迫在眉睫,以此让相关应用研究跨上一个新的历史台阶,反过来也提供更多理论物理的引领作用发挥到极致的场所.2021 年诺贝尔物理学奖颁发给作为复杂系统的地球物理和气候的研究,或多或少代表了一种趋势。

当然,由于物质世界极为纷繁复杂,理论物理问题的解析求解不足以涵盖复杂系统的全部特征,如非微扰和高度非线性.因此,理论物理的一个重要发展趋势是基础理论与强大的现代计算手段相结合,使得理论物理预言更加定量化和精密化.计算物理和计算数学因此应运而生,成为连接物理实验和理论模型必不可少的纽带.由于应用理论物理面临的对象复杂而多变,这些计算技术相关的发展,也是应用理论物理应着力倚重的。

最后指出,应用理论物理学在国防安全等国家重大需求上会有更大的用武之地,发挥更大的作用.其实,无论决胜第二次世界大战、维持冷战时代的战略平衡,还是在不同时期提升国家战略地位,理论物理学都发挥了不可替代的作用.在这方面,理论物理学家爱因斯坦、奥本海默、费米、彭桓武、于敏、周光召等也因其理论物理应用的贡献彪炳史册.这方面一个典型事例是我国原子弹研究中“九次计算”的故事:周光召利用理论物理中的最大功原理,断定了此前我国自己不同于苏联所给结果

的“九次计算”的正确性, 确定了原子弹研究的方向. 的确, 与战略武器发展息息相关, 二战后美欧开启了物理学大科学工程发展的新时代, 基于大型加速器的重大科学发现也反过来为理论物理学提供广阔的用武之地, 例如, 标准模型的建立和加速器理论的发展. 国防安全方面等国家重大需求往往与大科学工程密切联系, 由此会提出自由探索中不易产生的重要基础科学问题, 如由雷达发展催生的激光理论与对称性自发破缺机制有关. 统计力学的最大熵原理可能会在奠定可靠性分析的理论基础方面发挥重要作用^[27]. 总之, 国防和国家安全方面的重大需求在对理论物理不断提出新挑战的同时, 也可能为理论物理研究提供了持续源头创新的平台: 在实践应用中, 凝练和发掘理论物理能够发挥关键作用的科学问题, 在理论的原始创新方面取得重大突破, 这方面的研究将成为理论物理发展的一个新趋势.

衷心感谢于涿、朱邦芬、卢建新、罗民兴、张芑、全海涛和董辉等教授的宝贵意见, 也感谢与向涛、王亚愚、刘雄军和陈宇教授就相关专业问题的讨论. 最后, 深深感谢杨振宁教授多年来诸多方面的指导与教诲.

参考文献

- [1] National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences Chinese 2009 *Discipline Development Strategy for the next 10 Years-Physics* (Beijing: Science Press) pp1–2 (in Chinese) [国家自然科学基金委员会, 中国科学院 2009 未来10年中国学科发展战略·物理学 (北京: 科学出版社) 第1—2页]
- [2] Academic leading group of the special funds for theoretical physics in the National Natural Science Foundation of China 2013 *Summary and Perspective of the ten-year Work on the Special Funds for Theoretical Physics in the National Natural Science Foundation of China* (Beijing: Science Press) pp18–54 (in Chinese) [理论物理专款学术领导小组 2013 发展理论物理促进学科交叉——国家自然科学基金理论物理专款20周年纪念文集 (北京: 科学出版社) 第18—54页]
- [3] Weinberg S (translated by Li Y) 2018 *Dreams of a Final Theory* (Changsha: Hunan Science & Technology Press) (in Chinese) [S. 温伯格(李泳译) 2018 终极理论之梦 (长沙: 湖南科学技术出版社)]
- [4] Weinberg S (translated by Huang Y H, Jiang X D) 2004 *Facing Up: Science and Its Cultural Adversaries* (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) (in Chinese) [S. 温伯格(黄艳华, 江向东译) 2004 仰望苍穹: 科学反击文化敌手(上海: 上海科技教育出版社)]
- [5] Weisskopf V F 1967 *Phys. Today* **20** 23
- [6] Anderson P W 1977 *Science* **177** 393
- [7] Zhang G M, Yu L 2010 *Physics* **39** 543 (in Chinese) [张广铭, 于涿 2010 物理 **39** 543]
- [8] Hao B L 2009 *Fu Ji Yin Xiao Lu* (Singapore: Global Publishing) p98 (in Chinese) [郝柏林 2009 负戟吟啸录(新加坡: 八方文化创作室) 第98页]
- [9] Yang C N 1997 *Twenty-First Century* **40** 71 (in Chinese) [杨振宁 1997 二十一世纪 **40** 71]
- [10] Yang C N 2015 *NAMOC* **3** 34 (in Chinese) [杨振宁 2015 中国美术 **3** 34]
- [11] Song C D <http://www.inewsweek.cn/people/2021-05-31/12699.shtml> [2021-10-26]
- [12] Yang C N 1962 *Rev. Mod. Phys.* **34** 694
- [13] Yang C N 1947 *Phys. Rev.* **72** 874
- [14] Yang C N 1980 *Phys. Today* **33** 42
- [15] Sun C P 2021 *Bull. Chin. Academ. Sci.* **36** 296 (in Chinese) [孙昌璞 2021 中国科学院院刊 **36** 296]
- [16] Qing C R, He Z X 1996 *Mod. Phys.* **1** 29 (in Chinese) [庆承瑞, 何祚庥 1996 现代物理知识 **1** 29]
- [17] Everett H 1957 *Rev. Mod. Phys.* **29** 454
- [18] Sun C P 2017 *Physics* **46** 481 (in Chinese) [孙昌璞 2017 物理 **46** 481]
- [19] Li S W, Cai C Y, Liu X F, Sun C P 2018 *Found. Phys.* **48** 654
- [20] Qiao G J, Li S W, Sun C P 2021 *arXiv* 2112: 13568
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Pathological_science
- [22] Yang C N 2018 *Shu Guang Ji* (Beijing: SDX Joint Publishing Company) pp1–7 (in Chinese) [杨振宁 2018 曙光集 (北京: 三联出版社) 第1—7页]
- [23] Yang C N, Weng F 2018 *Chen Xi Ji* (Beijing: China Commerce and Trade Press) pp3–19 (in Chinese) [杨振宁, 翁帆 2018 晨曦集 (北京: 商务出版社) 第3—19页]
- [24] Zhang H Q, Wang X, Wang X, Sun C P 2021 *Strateg. CAE* **23** 8 (in Chinese) [张慧琴, 王鑫, 王旭, 孙昌璞 2021 中国工程科学 **23** 8]
- [25] Wang X, Sun C P 2019 *Physics* **48** 1 (in Chinese) [王旭, 孙昌璞 2019 物理 **48** 1]
- [26] <http://blog.Science.net.cn/blog-528739-1135541.html>
- [27] Du Y M, Ma Y H, Wei F Y, Guan X F, Sun C P 2020 *Phys. Rev. E* **101** 012106

VIEWS AND PERSPECTIVES

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

Sun Chang-Pu †

(*Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100193, China*)

(*Beijing Computational Science Research Center, Beijing 100193, China*)

(Received 14 December 2021; revised manuscript received 27 December 2021)

Abstract

On the occasion of the centennial birthday of Mr. Chen-Ning Yang, many articles have summarized his important scientific influences on the development of contemporary physics. The author thinks that, as one of the greatest theoretical physicists, Mr. Yang in many scientific contributions has promoted the revolutionary progress of physics, and his unique style of science with deep and meaningful thoughts in academia has a long-term inspiration on developments of physics. Learning from Chen-Ning Yang's scientific thoughts, the author will put forward some personal opinions on the development trend of theoretical physics with his own experiences in researching theoretical physics for 30 years, *e.g.*, studies of quantum open system, superconducting phase transition and cold atom physics by following Mr. Yang in Stony Brook from 1992 to 1994. This article will elaborate why it is important to pursue “beautiful or useful” theoretical physics through some concrete illustrations; Why could the good theories in fundamental physics be kept at a distance from experiments for some time? For the latter, this article also argues the relationship between theoretical prediction and experimental confirmation from the perspective of scientific methodology (philosophy). Focusing on “useful” theoretical physics-the applied theoretical physics, the author emphasizes that scientific research driven by the national demand, as well as free exploration, can also lead to important breakthroughs in fundamental physics.

Keywords: Chen-Ning Yang, theoretical physics, development trend, scientific style

PACS: 01.55+b, 01.60.+q, 01.65.+g

DOI: [10.7498/aps.71.20212307](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212307)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. L1924037) and National Natural Science Foundation of China-Chinese Academy of Sciences Disciplinary Development Strategy Research Joint Project (Grant No. XK2019SLC002).

† Corresponding author. E-mail: suncp@g scaep.ac.cn