

物理学之美：杨振宁的13项重要科学贡献

施郁[†]

(复旦大学物理学系 上海 200433)

2013-06-03 收到

[†] email: yushi@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140107

1 引言

1928年, 6岁的杨振宁在海滩捡贝壳, 与众不同地挑选极小却精致的。异于常人的独特的观察力、品味和风格在他成年后的物理学生涯中不断表现出来, 成就了一位当代最卓越的理论物理学风格大师和物理学基本理论结构的设计师^[1-7]。

2012年, 90岁的杨振宁收到的一件生日礼物是一个8 cm × 8 cm × 6.6 cm的黑色大理石立方体(见图1)。立方体的底部刻着“恭祝/杨振宁教授/九十华诞/清华大学”, 上平面刻着杜甫诗句“文章千古事, 得失寸心知”, 而4个垂直平面则从左侧开始顺时针依次刻着他对统计力学、凝聚态物理、粒子物理、场论等物理学4个领域的13项重要贡献, 这让人联想到所谓的朗道(Landau)十诫^[8]。

“文章千古事, 得失寸心知”这个诗句深刻反映了世纪物理大师杨振宁的研究心态, 以至于被他用在自己的论文选集的序言中^[9]。正如他在该书2005年再版序言中所说, 这本论文选集是一个人在物理学一个很激动人心的时代中的旅程的记录。这同时也是20世纪下半叶理论物理被一个关键参与者记下的发展史。每篇论文都在作者心中有其位置, 所以他谈到自己的某篇文章时, 经常熟悉地用该文在选集中的序号(出版年加上排序字母)来指称, 比如80b。下面我们按立方体上的排列方式, 分4个领域列出杨振宁的这13项重要贡献以及相关论文在选集中的序号, 然后分别作简要的评述, 最后作进一步的讨论。

(A) 统计力学

A1. 1952 Phase Transition(相变理论)。论文序号: 52a, 52b, 52c。

A2. 1957 Bosons(玻色子多体问题)。论文序号: 57h, 57i, 57q。

A3. 1967 Yang—Baxter Equation(杨—Baxter方程)。论文序号: 67e。

A4. 1969 Finite Temperature(1维 δ 函数排斥



图1 铭刻着杨振宁的13项重要科学贡献的黑色大理石立方体 (a)前面和右面; (b)左面和后面

势中的玻色子在有限温度的严格解)。论文序号：**69a**。

(B) 凝聚态物理

B1. 1961 Flux Quantization(超导体磁通量子化的理论解释)。论文序号：**61c**。

B2. 1962 ODLRO(非对角长程序)。论文序号：**62j**。

(C) 粒子物理

C1. 1956 Parity Nonconservation (弱相互作用中宇称不守恒)。论文序号：**56h**。

C2. 1957 T, C and P(时间反演、电荷共轭和宇称三种分立对称性)。论文序号：**57e**。

C3. 1960 Neutrino Experiment (高能中微子实验的理论探讨)。论文序号：**60d**。

C4. 1964 CP Nonconservation (CP 不守恒的唯象框架)。论文序号：**64f**。

(D) 场论

D1. 1954 Gauge Theory(杨—Mills 规范场论)。论文序号：**54b, 54c**。

D2. 1974 Integral Formalism(规范场论的积分形式)。论文序号：**74c**。

D3. 1975 Fibre Bundle(规范场论与纤维丛理论的对应)。论文序号：**75c**。

2 分项评述

2.1 相变理论

统计力学是杨振宁的主要研究方向之一。他在统计力学方面的特色是对扎根于物理现实的普遍模型的严格求解与分析，从而漂亮地抓住问题的本质和精髓。1952年杨振宁和合作者发表了3篇有关相变的重要论文。第一篇是他在前一年独立完成的关于2维 Ising 模型的自发磁化强度的论文，得到了 $1/8$ 这一临界指数。这是杨振宁做过的最冗长的计算。Ising 模型是统计力学里最基本却极重要的模型，但是它在理论物理中的重要性到

1960年代才被广泛认识。1952年，杨振宁还和李政道合作完成并发表了两篇关于相变理论的论文。两篇文章同时投稿和发表，发表后引起爱因斯坦的兴趣。论文通过解析延拓的方法研究了巨配分函数的解析性质，发现它的根的分布决定了状态方程和相变性质，消除了人们对于同一相互作用下可存在不同热力学相的疑惑。这两篇论文的高潮是第二篇论文中的单位圆定理，它指出吸引相互作用的格子模型的巨配分函数的零点位于某个复平面上的单位圆上。在统计力学和场论中，这个理论精品就像一个小而精致的贝壳至今魅力不减。

2.2 玻色子多体问题

起源于对液氦超流的兴趣，杨振宁在1957年左右与合作者发表或完成了一系列关于稀薄玻色子多体系统的论文。首先，他和黄克孙、Luttinger 合作发表两篇论文，将赝势法用到该领域。在写好关于弱相互作用中宇称是否守恒的论文之后等待实验结果的那段时间，杨振宁和李政道用双碰撞方法首先得到了正确的基态能量修正，然后又和黄克孙、李政道用赝势法得到同样的结果。他们得到的能量修正中最令人惊讶的是著名的平方根修正项，但当时无法得到实验验证。出乎他们的预料，近年来，这个修正项随着冷原子物理学的发展而得到了实验证实。

2.3 杨—Baxter 方程

1960年代，寻找具有非对角长程序的模型的尝试将杨振宁引导到量子统计模型的严格解。1967年，杨振宁发现1维 δ 函数排斥势中的费米子量子多体问题可以转化为一个矩阵方程，后被称为杨—Baxter 方程(因为1972年Baxter在另一个问题中也发现这个方程)。1967年，杨振宁还写了一篇于翌年发表的文章，进一步探讨了此问题的S矩阵。后来人们发现杨—Baxter 方程在数学和

物理中都是极重要的方程，与扭结理论、辫子群、Hopf代数乃至弦理论都有密切的关系。杨振宁当年讨论的1维费米子问题近年来在冷原子的实验研究中显得非常重要，而他在文中发明的嵌套Bethe假设方法次年被Lieb和伍法岳用来解出了1维Hubbard模型。Hubbard模型后来成为高温超导的很多理论研究的基础。

2.4 1维 δ 函数排斥势中的玻色子在有限温度的严格解

1969年，杨振宁和杨振平将1维 δ 函数排斥势中的玻色子问题推进到有限温度。这是历史上首次得到的有相互作用的量子统计模型在有限温度($T>0$)的严格解。最近这个模型和结果也在冷原子系统中得到实验实现和验证。

2.5 超导体磁通量子化的理论解释

1961年，通过和Fairbank实验组的密切交流，杨振宁和Byers从理论上解释了该实验组发现的超导体磁通量子化，证明了电子配对即可导致观测到的现象，澄清了不需要引入新的关于电磁场的基本原理，并纠正了London推理的错误。在这个工作中，作者将规范变换技巧运用于凝聚态系统中。相关的物理和方法后来在超导、超流、量子霍尔效应等问题的研究中广泛应用。

2.6 非对角长程序

1962年，杨振宁提出“非对角长程序(off-diagonal long-range order)”的概念，从而统一刻画超流和超导的本质，同时也深入探讨了磁通量子化的根源。这是当代凝聚态物理的一个关键概念。1989到1990年，杨振宁在与高温超导密切相关的Hubbard模型里找到具有非对角长程序的本征态，并和张首晟发现了它的SO(4)对称性。

2.7 弱相互作用中宇称不守恒

对称性是物理学之美的一个重要体现，是20世纪理论物理的主旋律之一^[9]。从经典物理以及晶体结构，到量子力学与粒子物理，对称性分析是物理学中的有力工具。杨振宁对粒子物理的诸多贡献表现出他对对称性分析的擅长。他往往能准确利用对称性，用优雅的方法很快得到结果，并且突出本质和巧妙之处。1999年，在石溪(Stony Brook)的一次学术会议上，杨振宁被称为“对称之王(Lord of Symmetry)”^[10]。

1950年，杨振宁关于 π^0 衰变的论文以及他和Tiomno关于 β 衰变中相位因子的论文奠定了他在此领域中的领先地位。1956年， $\theta-\tau$ 之谜是粒子物理学中最重要的难题，当时普遍讨论宇称是否可以不守恒。杨振宁和李政道从 $\theta-\tau$ 之谜这个具体的物理问题走到一个更普遍的问题，提出“宇称在强相互作用与电磁相互作用中守恒，但在弱相互作用中也许不守恒”的可能，将弱相互作用主宰的衰变过程独立出来，然后经具体计算，发现以前并没有实验证明在弱相互作用中宇称是否守恒。他们更指出了好几类弱相互作用关键性实验，以测试弱相互作用中宇称是否守恒。吴健雄于1956年夏决定做他们指出的几类实验中的一项关于 ^{60}Co β 衰变的实验。次年1月，她领导的实验组通过该实验证明在弱相互作用中宇称确实不守恒，引起全物理学界的大震荡。因为这项工作，杨振宁和李政道获得1957年的诺贝尔物理学奖。

2.8 时间反演、电荷共轭和宇称三种分立对称性

质疑弱相互作用中宇称是否守恒的论文预印本引起Oehme于1956年8月致信杨振宁提出弱相互作用中宇称(P)、电荷共轭(C)、时间反演(T)三个分立对称性之间的关系的问题。这导致杨振

宁、李政道和Oehme发表论文57e, 讨论P、C、T各自不守恒之间的关系。此文对1964年CP不守恒的理论分析有决定性的作用。

2.9 高能中微子实验的理论探讨

1960年, 为了得到更多弱相互作用实验信息, 利用实验物理学家Schwartz的想法, 李政道和杨振宁在理论上探讨了高能中微子实验的重要性。这是关于中微子实验的第一个理论分析, 引导出后来许多重要研究工作。

2.10 CP不守恒的唯象框架

1964年, 实验上发现CP不守恒后, 引出众多乱猜其根源的文章。杨振宁和吴大峻没有理会那些脱离实际的理论猜测, 而作了CP不守恒的唯象分析, 建立了后来分析此类现象的唯象框架。这反映了杨振宁脚踏实地的作风, 也明显显示出他受到的Fermi的影响^[11]。

2.11 杨—Mills规范场论

1954年, 杨—Mills规范场论(即非阿贝尔规范场论)发表。这个当时没有被物理学界看重的理论, 通过后来许多学者于1960到1970年代引入的自发对称破缺观念, 发展成今天的标准模型。这被普遍认为是20世纪后半叶基础物理学的总成就。

杨振宁和Mills的论文, 从数学观点讲, 是从描述电磁学的阿贝尔规范场论到非阿贝尔规范场论的推广。而从物理观点上讲, 是用此种推广发展出新的相互作用的基础规则。

今天知道, 在主宰世界的4种基本相互作用中, 弱电相互作用和强相互作用都由杨—Mills理论描述, 而描述引力的爱因斯坦的广义相对论也与杨—Mills理论有类似之处。杨振宁称此为“对称支配力量”^[3, 7, 9]。杨—Mills理论是20世纪后半叶伟大的物理成就, 杨—Mills方程与Maxwell方

程、Einstein方程共同具有极其重要的历史地位。

杨—Mills理论有“开天辟地”的崇高地位, 它的成功是物理学史上的一场革命。但是杨振宁的出发点并不是要搞革命, 而是要在复杂的物理现象背后寻找一个原理, 建立一个秩序。这种秩序的建立是杨振宁追求物理学之美的一个主要表现。作为保守的革命者, 他引起的革命是不得已而为之, 是建设性的, 而非破坏性的。但当革命性的思想确实需要时, 他又果断地采纳。虽然最初得到杨—Mills规范理论时, 规范粒子的质量问题不能解决, 但物理直觉、理论的美以及对规范对称性的重视使得杨振宁相信这个理论一定是正确的一步。

2.12 规范场论的积分形式

杨—Mills理论还把物理与数学的关系推进到一个新的水准。1970年左右, 杨振宁致力于研究规范场论的积分形式, 发现了不可积相位因子的重要性, 从而意识到规范场有深刻的几何意义。几年后, 在评述这篇论文时, 杨振宁感怀:

“我的大多数物理同事对数学采取实用主义的态度。也许因为我父亲的影响, 我对数学有更多的欣赏。我欣赏数学家的价值判断, 我崇尚数学的美和力量:既有战术操纵上的机智和复杂, 也有战略行动上的激动人心的扫荡。而且, 当然, 奇迹中的奇迹, 数学中一些概念竟提供了主宰物理宇宙的基本结构!”^[12]

2.13 规范场论与纤维丛理论的对应

1975年, 杨振宁和吴大峻发表了论文75c, 用不可积相位因子的概念给出了电磁学以及杨—Mills场论的整体描述, 讨论了Aharonov—Bohm效应和磁单极问题, 揭示了规范场在几何上对应于纤维丛上的联络。这篇文章里面附有一个“字典”, 把物理学中规范场论的基本概念准确地

“翻译”成数学中纤维丛理论的基本概念。这个字典引起数学界的广泛兴趣，大大促进了数学与物理学以后几十年的成功合作。

3 讨论

杨振宁是20世纪后半叶理论物理大师，具有极其鲜明独特的研究风格和品味。无论是场论和粒子物理，还是统计力学与凝聚态物理，杨振宁的研究工作都体现了他对物理学理论的美的追求。这种追求贯穿了他的整个研究生涯。从学生时代直到现在，杨振宁做研究不赶时髦，不随大流，不落俗套，而是从物理现象和从自己的物理思想出发，作出深刻的发现，展示物理之美。有些工作的重要性因为得到实验支持很快被承认，最著名的例子是关于弱相互作用中宇称不守恒的工作；而有些工作的重要性经过很多年以后才被其他物理学家认识到，并成为相关领域的奠基石，最著名的例子就是杨—Mills规范场论。因为醉心于自己的追求，他会把一时还不能完善或尚未显示出其重要性的想法放在一边，等待时机成熟^[13]。正所谓“文章千古事，得失寸心知”。

1954年，杨振宁和Mills从物理结构出发提出杨—Mills理论时，虽然知道这是一个极美的理论，但当时并没有意识到它如此重要，更不了解规范场的几何意义。杨振宁是物理学家，不是数学家，是从物理现象归纳基本理论，而这些基本理论的结构需要用数学表达。在追寻物理理论的美的过程中，他扎根于物理现实。但他又具有高超的数学能力，能够欣赏数学之美。

杨振宁着重追寻“物”之“理”，设计物理学的基本理论结构。但他又深刻地认识到实验现象是物理学之根本，十分关注新的实验发现，富有成效地同实验物理学家互动，对物理学各个领域保持兴趣，包括一些看似较“小”但反映了物理学精神的问题，从中提炼出美妙的物理，而对一些研究“大”问题但猜测性太强的领域不感兴趣。1970年代后，凝聚态物理的实验新发现层出不穷，而高能物理的进步则依赖于加速器的发展，因此他对凝聚态物理和加速器物理这两个领域特别关注，并鼓励青年人进入这些领域^[2, 6, 7]。

杨振宁的风格和品味中很多成分出自多年前埋下的“小的种子(seedling)”^[13, 14]。他对对称性的爱好与他天生的气质和幼时的经历不无关系，又与他本科生阶段在吴大猷的引导下对分子光谱对称性的学习以及在他父亲引导下对群论的学习密切相关。而统计力学方面的研究则起源于他硕士生阶段受到的王竹溪的引导。在很多工作中表现出的数学能力和对数学美的欣赏，与他少年时期在其父亲的影响下对数学的接触分不开^[7, 12-14]。受Fermi的影响，杨振宁又对很多领域保持兴趣。

科学家在科研上的风格与其作为一个人的个性往往很难分开。从杨振宁身上可以看到中西文化的交融，对社会进步的积极态度，天才与常人的结合，勤奋与智慧的结合，真诚实在，等等。这些都与他的学术风格有相通之处。

致谢 感谢杨振宁先生的讨论并提供照片。

参考文献

- [1] Dyson F. Int. J. Mod. Phys. A, 1999, 14: 1455; Dyson F. Notices of AMS, 2009, 56: 212
- [2] Goldhaber A, Shrock R, Smith J, Sterman G, van Nieuwenhuizen P, Weisberger W. (Ed.) Symmetry and Modern Physics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. (文章作者: F. Dyson, J. Zinn-Justin, 张首晟, W. Ketterle, G. E. Brown等, M. Veltman, L. Alvarez-Gaumé等, 丘成桐, B. Sutherland, A. Tonomura, E. D. Courant, 余理华, 吴大峻, G. 't Hooft, M. Goldhaber,

G. Sterman)

- [3] Yang C N. Selected Papers 1945—1980 with Commentary. W. H. Freeman and Company Publishers, 1983; 2005 Edition, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005
- [4] Yang C N. Selected Papers II with Commentary. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013
- [5] 杨振宁著作目录. 见 http://www.phy.cuhk.edu.hk/people/Yang_pub_list.pdf

- [6] Liu S H, Yau S T. (Ed.). *Chen Ning Yang: A Great Physicist of the Twentieth Century*. International Press, 1997 (文章作者: 沈君山, R. J. Baxter, G. E. Brown, A. H. Chamseddine 和 J. Frölich, 赵午, 乔玲丽, 郑洪, 郑国顺, 陈省身, 邹祖德, 朱经武, J. W. Cronin, B. S. Deaver Jr, M. Dresden, F. Dyson, D. Gross, 黄克孙, M. Jimbo, 高锟, 李炳安和邓超凡, R. Mills, 聂华桐, J. Smoller, A. G. Wasserman 和丘成桐, B. Sutherland, E. Teller, 丁肇中, J. S. Toll, A. Tonomura, P. van Niewenhuizen, E. Witten, 吴健雄, 吴大峻, 颜东茂, 张奠宙)
- [7] 张奠宙. 杨振宁文集. 华东师范大学出版社, 1998 (除杨振宁的文章和访谈外, 该文集也收入一些参考文献[6]中的文章的中文版以及刘秉均、杨振平、杨振汉、杨振玉、聂华桐等人的有关文章)
- [8] 1958年, 苏联物理学家朗道50岁时收到的一个生日礼物是两块

- 大理石板, 上面模仿摩西十诫 (Ten Commandments) 刻着朗道的10项贡献. 参阅 Kikoin I K. Landau's ten commandments. In: Khalatnikov I M. (Ed.). Sykes J B. (Trans.). *Landau, the Physicist and the Man: Recollections of L.D. Landau*. Pergamon Press, 1989. 284. 可以用“杨振宁十三诫”与“朗道十诫”相对应. 但是“诫”字在语义上并不恰当
- [9] Yang C N. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2003, 18: 3263; 已收入文献[4]中
- [10] Jarlslog C. *Speech at Chen Ning Yang Retirement Symposium*, 21-22 May 1999, 未发表
- [11] Pais A. *Inward Bound*. Oxford University Press, 1986. 533
- [12] Yang C N. 参考文献[3]第74页, 笔者翻译
- [13] 杨振宁. *物理*, 2012, 41 (1): 1
- [14] 施郁, 戴越. *物理*, 2011, 40 (8): 491

物理学家对低语的研 究得到新的结果

生物物理学家们长期以来一直对于耳朵能听到极轻柔声音的能力感到惊奇。虽然已经知道内耳中数以千计的毛细胞可将入射声波产生的机械振动转换成电信号, 再由大脑进行处理。但是, 耳朵究竟如何实现这种极高的探测灵敏度, 目前仍然是一个谜。如今, 美国的物理学家们所进行的实验表明, 那些毛细胞产生的自发振动可以与微弱的入射声音信号发生同步, 从而使声音信号能够被探测。研究人员还提出, 这种自发振动通过改变其位相对入射声音做出响应, 这也会使灵敏度提高。

人类和其他脊椎动物的内耳含有数千个毛细胞, 每个毛细胞含有30到50束静纤毛。这些静纤毛像头发一样, 从毛细胞表面长出, 并浸入到一种液体中。加利福尼亚大学的 Yuttana Roongthumskul 和他的同事们想弄清楚这些静纤毛如何对非常低的信号做出响应的。为此, 他们对牛蛙离体的静纤毛样品进行了研究。

物理新闻和动态

当研究人员观察离体的静纤毛时, 他们证实了以前的观测, 这些静纤毛自发地产生振动, 这种振动预期在活的牛蛙耳中也会发生。Roongthumskul 认为, 这种自发振动着的静纤毛与入射的弱信号同步, 从而产生一种主动的放大作用。

研究人员还研究了静纤毛对声音响应的变化位相动力学。他们刺激一束静纤毛, 同时记录其自发振动与入射的声音信号之间同步的程度。研究人员发现, 当刺激很强时, 自发振动与声音信号之间的位相差是不变的, 而对于较弱的信号, 自发振动与声音信号之间的位相发生间歇性的同步。这种同步忽而消失, 忽而又出现。

这些观测意味着有关的位相动力学所基于的方程式与以前所采用的方程式不同。新的方程式预言, 一旦施加刺激, 反应是非常快的和非常灵敏的。这一特点形成了可以探测极其微弱声音的机制。有关论文发表在 *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 148103 上。

(树华 编译自 *Physics World News*, 11 April 2013)