

规范, 相位因子和杨 - 米尔斯场 ——规范场理论在中国续记*

李华钟

(中山大学高等学术研究中心 广州 510275)

摘要 文章是在杨 - 米尔斯场^[1]50 周年学术报告会上的报告^[3]的精简部分. 它和作者发表的一组评述^[2-6]互相补充, 目的是引介非亚贝尔规范场和量子不可积相位因子, 解说作为 20 世纪物理学主旋律之一的相位因子的物理意义.

关键词 规范, 量子相位因子, 杨 - 米尔斯场

1 引言

1994 年 11 月 23 日, 纽约的一份华文报纸刊出一则消息, 两天后(11 月 25 日), 中国北京的《参考消息》报道了这则新闻, 标题是杨振宁荣获美国奖金最高的“鲍尔奖”. 内容是: 美国富兰克林研究所宣布 1994 年将“鲍尔奖”颁给华裔科学家杨振宁, 除了 25 万美元外, 同时颁发一座 2.5 英尺高的金质奖牌, 颁奖仪式将在 1995 年 5 月费城举行……这次“鲍尔奖”之所以颁给杨振宁是为了表彰他发明的“杨氏磨坊”理论, 以及他在促进中美关系方面的贡献.“杨氏磨坊”理论是研究凝聚原子核的力的精深理论¹⁾. 评奖评价说: 该理论是 20 世纪里解释亚原子粒子相互作用的概念的一个主要观念, 在过去 40 年间, 这一理论主导着物理学和现代几何学的发展. 这一理论同牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦的学说一样, 肯定会对几代人产生同样深远的影响²⁾.

这里说的“杨氏磨坊”理论, 就是我们称为杨 - 米尔斯(Yang - Mills)场理论, 或称非亚贝尔规范场理论. R. L. Mills 是杨振宁获奖论文的合作者, Mill 英华大词典载有多种解释, 其一为姓氏, 又一为磨坊, 这里的英文写是 Mills. 于是编辑记者们便以为 Mills 是磨坊的众数, 这个译文大概可以给一个“搞笑工程”奖吧!

Yang - Mills 的论文题目是《同位旋守恒和同位规范不变》^[1], 发表于 1954 年 10 月 1 日, 到今年(2004 年)是 50 周年, 对这个理论的认识和意义我

已发表了一篇专题的文章^[2]. 本文只是一个补充性记述, 同以前我写的综述论文, 构成一组对规范场理论的非专业的引介^[2-7]. 以前讲过的不作重复.

2 20 世纪理论物理的主旋律之一

在纪念中国科学院成立 50 周年所举行的著名学者学术报告会中, 杨振宁教授作了题为《量子化, 对称和相位因子——20 世纪物理学的主旋律》的学术报告^[8]. 2002 年, 在巴黎国际理论物理讨论会上, 他又作了“Thematic Melodies of Twentieth Century Theoretical Physics: Quantization, Symmetry and Phase Factor”的报告^[9]. 本来“量子化”和“对称”, 这两者在 20 世纪物理学中的支配和主导作用是物理学者们都已熟悉的, 作为“主旋律”容易理解, 但是把“相位因子”作为主旋律之一的观念, 相信对不少人是陌生的. 杨振宁在他的报告中^[8,9]已经作了解说, 不过对于一般的学者来说, 作为一个追随者把它的解说演绎为显浅的导引, 或许会有些帮助. 本文要在初等水平上解说下面的问题.

问: 为什么“相位因子”是主旋律之一?

答: 它就是规范场(相位因子内含规范场). “规

* 在杨 - 米尔斯场 50 周年学术报告会上报告, 2004 年 5 月 29 日于广州南沙

2004 - 09 - 22 收到

1) 原文如此, 准确一点说, 是宇宙总从宏观到微观结构物质间一切相互作用的基础理论

2) 关于“鲍尔奖”, 请参看马中骥. 物理, 1995, 24, 458

规范场是相位因子规范不变的体现。”

问:为什么规范场是主旋律之一?

答:20世纪下半叶以来,实验发现它是宇宙一切物质的相互作用的媒介物质。

问:为什么规范场会有如此主要的地位?

答:它将现时所知的一切基本相互作用纳入它的理论框架之中。

我们曾介绍过量子力学不可积相位因子^[4],并根据规范不变的原理,引入的不可积相位因子,引出亚贝尔规范场,即电磁场和电子与电磁场的相互作用。文献[2,5,7]进一步从杨振宁的不可积相位因子,根据规范不变原理引出非亚贝尔规范场,即杨-米尔斯场(以下面记为YM场)。文献[2]说明了在YM理论框架下的理论和实验的重要进展。现在我想从量子力学相位因子概念的发展历史的角度来阐明上述第一个问题。杨振宁不止一次强调^[10-12]H. Weyl的规范、规范变换和规范不变物理思想的深刻影响,我们就跟随他的思路论述³⁾追溯到Weyl 1919年“规范”理念,勾划一点线条。

3 从标度变换到复相位变换

大家知道,在曲面上的矢量沿闭合曲线作平行移动一周后,矢量方向会有改变。Weyl提出的问题是:矢量长度是否也会有改变?Weyl的答案是:如果假定沿曲线每一点空间的标度(scale)有改变的话,平移一周后矢量长度也有相应的改变。Weyl(1919)的意图是由定义这定域的标度变换,要求物理的电磁和引力作用(这是当时知道的一切相互作用)对于标度变换不变统一电磁和引力作用。他把这种标度变换称为“规范变换”。Weyl引用空间度规 $g_{\mu\nu}$ 的定域改变来表征标度变换,也就他所说的“规范变换”。然而这个观念既无力解释电磁现象,又受到许多大物理学家包括爱因斯坦的反对,因而放弃。以后经过Fock和London对量子力学的研究,引入广义动量和波函数复数相位变换,这就是今天我们所知道的规范变换。Weyl坚持这种规范不变性导致电荷流守恒。然后是1931年Dirac引入依赖路径的复相位因子,规范不变性导致电磁场的相互作用,电磁场也就是规范场^[3-7,13,14]。

Weyl早期(1919)的“规范变换”^[14]:

$$g'_{\mu\nu} = e^\lambda g_{\mu\nu},$$

$$A'_\mu = A_\mu - \frac{\partial\lambda}{\partial x^\mu}.$$

Weyl后来(1929)的“规范变换”:

$$\psi' = \psi \exp(ie\lambda/\hbar c),$$

$$A'_\mu = A_\mu + \frac{\partial\lambda}{\partial x^\mu}.$$

到1954年,杨振宁和Mills把这规范变换推广到非亚贝尔情形,成为现今的规范场论^[2]。从Weyl(1919)到Fock(1927),London(1927),P. Dirac(1931)再到Yang-Mills(1954),历时35年^[15]。1974年,杨振宁提出从非亚贝尔的不可积相位因子出发,建立了规范场的积分表述^[16]。1975年,吴大峻、杨振宁^[17]从规范场的整体(global)方面了解到规范场的几何本质,它就是纤维丛上的联络,抽象的拓朴学与物理实在的Yang-Mills场结合。

故事并不到此为止,有趣的是从1954年起又过了30年,即1984年,M. Berry发现这个依赖路径的复相位因子,在闭合环路情形下,同Weyl 1919年的最初的理念,即本文第3节开始时所讲Weyl最初的设想,闭路平移矢量转动的观念吻合。不过现在平行移动的是波函数的态矢,而这平行移动导致态矢转动,相位改变是几何性的,它也包含了“诱导的规范场”^[19]。

倚赖路径的不可积相位因子本身显然依赖规范,它不是规范不变量。但是环路的相位因子是规范不变的。这是一个重要的量,对电磁作用来说,环路相位因子就是描述电磁的最合适的量^[11],它在带有电磁场的电子波函数依赖路径的表述下是规范不变的,亚贝尔或非亚贝尔规范场的环路相位因子理论是规范理论近年重要的发展。它们已应用到粒子理论统计物理和引力物理中。但是建立在环路相位因子基础上的规范场理论则仍然是在探索中。^[18]

从上述的历史来看,规范场同复相位因子密不可分。当然,物理上的相位因子有可积的和不可积之分,可积的相位导致物理的干涉现象。我们这里所讲的是不可积的相位。杨振宁曾经说过,“规范场”这个命名不是恰当的名称,如果重新命名,应该称为“相位场”(phase field)。

4 规范场理论在中国续记

在这个主旋律乐章中,中国学者虽然一直孤立在国际研究主流之外,但是仍然作出了一些前沿工作。我们曾经在文献[3]中记述了Yang-Mills规范场理论在1970—1980时期在中国的发展。记述到

3) 我又写了另一篇题为《规范变换和量子相位因子》的文章^[13],本讲稿是该文的简要,需要了解较详细的解说和推导请参考文献[13]。

1980年广州国际粒子理论会议为止。事实上,以后还有一些应该记述的关于规范场理论在中国的事件。这里就是对1980年以后的发展作一些回顾。中国大陆关于规范场的专题讨论会始于1978年广州,然后是1982年上海,1984年北京。

1978年,在广州召开了“规范场专题讨论会”(1978年5月,中山大学粒子理论研究组主办),出版会议文集《规范场专题讨论会述评报告汇编》。这是第一次全国性的规范场专题学术讨论会。这次会议前,杨振宁寄来一份当时尚未见刊出的报告,题目是《磁单极,纤维丛和规范场》。这论文的中译文刊于上述会议文集中。英文稿发表在Annals of New York Academy of Science 1977, 294-36上,后收录在杨振宁论文选集^[10]。

1982年,在上海召开了“规范场及其他物理问题学术讨论会”(1982年9月4—5日,复旦大学主办),出版会议文集《规范场及其他物理问题讨论会文集》(主编者:李华钟、周光召、谷超豪)。这一次会议也是为杨振宁先生60寿辰举行的学术会议。由于当时国内不提倡为个人祝寿的活动,因此会议没有为此正名,但不少报告人在文中或口头上致祝词。

1984年,在北京召开了“杨-米尔斯场理论研讨会”(1984年12月21—23日,北京大学主办),出版会议文集:Proceeding of Symposium on Yang-Mills Gauge Theories。会议组织委员会主席为周光召。文集作为《理论物理通讯》(Communication of Theoretical Physics, Vol. 4 No. 5)附刊,杨振宁和Mills参加出席了会议,这次会议是作为Yang-Mills论文发表30周年的学术会议。

2002年,在珠海召开了“杨振宁80华诞学术报告会”(2002年9月26—27日,中山大学主办),这次会议同广东省物理学会年会一并举行。连同2003年全国量子力学研讨会合并出版会议文集“三会文集”,由中山大学高等学术研究中心主编。

2004年,在广州召开了“杨振宁-米尔斯场50周年学术报告会”(2004年5月28日)。这次会议同宇宙学与太空粒子物理讨论会同时举行,也出版了会议文集。

除了学术会议外,中国大陆第一个理学博士学位在1982年授予中国科学院高能物理研究所马中骥。论文题目是“ $SU(N)$ 静态球对称规范场”。导师是胡宁教授。

1982年,国家科委授予国家自然科学基金三等奖给“经典规范场理论研究”,获奖单位是3个课题的联

合,获奖人分别为⁴⁾：

复旦大学谷超豪、胡和生,内容是关于杨-米尔斯方程的数学结构及解。

中山大学李华钟、郭硕鸿,内容是 $SU(2)$ 无奇异弦磁单极, N 维 $SO(N)$ 规范场及瞬子解。

西北大学侯伯宇,兰州大学段一士、葛墨林,内容是关于杨-米尔斯场和Higgs场的拓扑结构。

中国科学院高能物理研究所洗鼎昌、理论物理研究所吴咏时,与李华钟、郭硕鸿合作上列项目。

20世纪50—80年代,国内粒子理论研究有两次大的进步,一是60年代层子模型的大协作,以北京为核心,包括北京大学,中国科学院原子能研究所(即现今的高能物理研究所和理论物理研究所的原始研究组所在单位)和数学研究所及全国有些高等院校参加。集中表现在1966年在北京召开的亚洲太平洋地区科学会议上,另一是全国几处高等院校为主力的规范场研究,集中表现在1980年广州粒子理论国际会议上(这在文献[3]和本文中记述)。应当记叙一件事,是70—80年代国内粒子理论研究的蓬勃展开是前辈学者和组织者的远见和努力倡导的结果。1977年,中国科学院二局建立了一个粒子理论组,作为组织调协全国这一个领域的研究(组长为朱洪元,副组长胡宁、何祚庥、张厚英、李华钟)。在中国科学院副院长钱三强领导下,科学院二局(局长邓照明,副局长张厚英)具体领导这项工作。就当时全国粒子理论中之规范场研究而言,上海、广州、兰州、西安是活跃之点。1980年广州国际粒子理论研讨会之后,由于海外华人粒子理论学者已经认识到国内的研究力量,因此接受了许多中国访问学者。国内的规范场研究衍化为弦理论,场的大范围性质,格点规范理论,量子几何相位等多个领域。20世纪80年代,大量中国留学生赴美,其中有些现在已经成为知名的出色学者,老一辈的研究者老矣,1979年钱三强曾为现在的老人当时的中青年研究者赋诗鼓励：

春 潮

钱三强

生逢时世畅心怀,海阔天高尽舒才。
长途故自多险隘,贵有遥力闯关开。
遍是春潮催号鼓,猛攻“四化”站头排。
喜看后生成虎将,神州锦绣放异彩。

4) 这里所列的是根据国家科委主任方毅签发的证书上所写,相信是当时教育部科技司上报时所定。我事前并不知道,一直也没有参与讨论。

这诗原刊于《中国青年报》1979年2月10日。收入“粒子诗抄”(李华钟、冼鼎昌编)《物理》第31卷(2002年)第1期。本应薪火相传,可是,历史已经被忘却,老一代与新一代的研究者所处的条件、环境和观念极其不同,在中国,规范场同其他的科学研究几乎在完全与国际没有交流的环境下磨练出来,据说没有值得传递的传统。但是,这一诗对新一代的中年青年粒子理论研究者,相信也同样是合宜的。

参 考 文 献

[1] Yang C N, Mills R L. Phys. Rev. ,1954 ,96 :191
 [2] 李华钟. 物理, 2004 , 33 : 137[Li H Z. Wuli(Physics) , 2004 , 33 : 137(in Chinese)]
 [3] 李华钟. 物理, 2002 , 31 : 249[Li H Z. Wuli(Physics) , 2002 , 31 : 249(in Chinese)]此文转载于“全球华人专业人士网 www. network. chinese. com ”2003 年
 [4] 李华钟. 物理, 2001 , 30 : 668[Li H Z. Wuli(Physics) , 2001 , 30 : 668(in Chinese)]
 [5] 李华钟. 物理, 2003 , 32 : 192[Li H Z. Wuli(Physics) , 2003 , 32 : 192(in Chinese)]
 [6] 李华钟. 杨振宁学术成就——“三大贡献之外”. 庆祝杨振宁教授 80 华诞学术论坛报告. 刊于全国高等学校量子力学研讨会年会(2003) , 三会文集. 17

[7] Li H Z. Modern Phys. Lett. , 2002 , A17 : 1995
 [8] 杨振宁. 量子化, 对称和相位因子——20 世纪物理学的主旋律. 中国科学院成立 50 周年学术报告. 路甬祥主编. 百年科技回顾与展望. 上海 : 上海教育出版社, 2000. 97 - 108
 [9] Yang C N. Int. J. Mod. Phys. , 2003 , A18 : 3263
 [10] Yang C N. Magnetic monopoles , Fiber bundles and Gauge fields. In : Selected Paper , 1977. 519(中译文载《杨振宁演讲集》. 天津 : 南开大学出版社, 307)
 [11] 杨振宁. 韦耳对物理学的贡献——在韦耳 100 周年诞辰纪念会上的演讲. 杨振宁演讲集. 天津 : 南开大学出版社, 451
 [12] Yang C N. Complex Phase in Quantum Mechanics(Proc. 2nd). Tokyo : Int. Symp. Foundation of Quantum Mechanics , 1986. 181(负一的平方根, 复相位与薛定谔. 杨振宁演讲集. 天津 : 南开大学出版社, 516)
 [13] 李华钟. 物理学进展, 2004 , 24(4)
 [14] Pais A. Inward Bound of matter and Field in physical World. Oxford : Oxford University Press , 1986. 344
 [15] Jackson J D, Okun L B. Rev. Mod. Phys. , 2001 , 73 : 663 ; Wu A C T, Yang C N. to be published in Rev. Mod. Phys.
 [16] Yang C N. Phys. Rev Lett. , 1974 , 33 : 445
 [17] Wu T T, Yang C N. Phys. Rev. , 1975 , D12 : 3845
 [18] Chan Hong-Mo, Tsou Sheung Tsun. Some Elementary Gauge Theory Concepts. World Scientific , 1993
 [19] 李华钟. 简单物理系统整体性——贝里相位及其他. 上海 : 上海科技出版社, 1998



· 物理新闻和动态 ·

在容器内仿制星球磁场

科学家们一直很关心星球的构造以及它们之间的各种运动形态。最近美国马里兰大学完成了一个新的实验。他们将一个棒球大小的铜球安放在装有液态钠的容器中, 并让其能自由转动。这个装置的目的是想模拟在星球的核心部分、星球的外壳层以及包围或附着在黑洞附近的各种圆盘层的成分及其运动状态, 因为导电流体在各种部位是具有不同的转动和磁力特性的。例如在星球内部, 电流体的旋转要比在星球的外壳处快得多。有关这样的物理问题直到现在只有一些理论探讨和计算机模拟方面的工作。而马里兰大学的这项研究是第一次的实验研究。

他们的实验结果显示, 在一个有结构的磁场内可以激发起电流体的涡旋运动, 他们观察到了一种磁涡流不稳定性。这种运动的本质是由于导电流体处于一个有层次的磁场中, 电流体的涡旋运动感生了一个磁场, 从而引发了磁涡流不稳定性。实验组中的一位科学家 D. Lathrop 教授指出, 这个新的实验方法为科学家们去研究运动着的流体间的相互影响开辟了道路, 从而可找出一条通道来研究涡流是如何产生的, 流体的旋转又是如何停止的。

(云中客 摘自 Physical Review Letters , 10 September 2004)

化学环境能否影响核的性质

日本 Tohoku 大学和国立横滨大学的科学家们在 Ohtsuki 博士的领导下进行了一项新的实验, 他们将铍-7 原子核安置在碳-60 分子内, 这时铍-7 核的衰变寿命会发生 1% 的改变。这是一个由于化学环境的改变而引起核衰变寿命显著变化的结果。过去也作过类似的研究, 但最好的结果是使核衰变寿命改变了 0.15%。所以新实验显然给出了核衰变寿命的最大的改变。

铍-7 是一个不稳定的核, 通常它都是俘获一个自身的电子而使核内的一个质子转化为一个中子。现在由于铍-7 核是处在碳-60 分子的空穴内, 在其周围的碳原子的电子云必然会影响到铍-7 核与其电子的联合波函数的性质和它们的“相空间”。这个作用使铍-7 核对电子的俘获率明显地增大了。这个实验启示我们应该如何去减轻辐射物质的存储问题。在近期利用碳-60 分子的富勒球结构来安放辐射物质的方法可以应用到医学上的“放射线疗法”上, 还可以对人体新陈代谢特征示踪探测方面发挥作用。

(云中客 摘自 Physical Review Letters , 10 September 2004)