

定域内对称和规范场^{* 1)}

——为杨-米尔斯场五十周年而作

李华钟[†]

(中山大学高等学术研究中心和物理系 广州 510275)

摘要 文章为杨-米尔斯的历史性论文发表 50 年而写,扼要阐述非阿贝尔规范场理论这篇原创论文的主要思想和它的巨大影响.

关键词 规范场,定域内对称,杨振宁-米尔斯场

“Symmetry Dictates Interaction”

——For the Jubilee of the Non-abelian Gauge Fields

LI Hua-Zhong[†]

(Advanced Research Center and Physics Department, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract The article is written for the Jubilee, 50 years after the birth of non-abelian gauge field theory which was proposed by C. N. Yang and R. Mills in 1954. The main ideas initiated in the paper and great influences are briefly outlined.

Key words Gauge field, local internal symmetry, Yang-Mills field

1 引言

杨振宁和米尔斯划时代的关于定域非阿贝尔规范理论的论文发表于 1954 年 10 月 1 日出版的 *Physical Review*^[1,2]. 到 2004 年是论文发表 50 周年. 杨振宁在 1982 年他 60 岁时,从 1945—1980 年他发表的科学论文中,选出 75 篇辑为“杨振宁论文选集”^[3],并且对每篇论文都写一简短的评注,记述该论文的思想来源、背景、合作和创作心路历程等. 这都是极为重要珍贵的资料,思想见解的记录. 杨振宁喜欢用艺术的语言去描述、评价伟大物理学家和科学著作^[4,5],恐怕他是第一个人运用“意境”、“品味”和“风格”等艺术概念来描述狄拉克、海森伯等大物理学家的科学论文. 在杨振宁论文选集序言他引了唐代杜甫的诗句:“文章千古事,得失寸心知”. 这两句诗我想正好表述他完成 1954 年论文的心态. 这篇划时代的论文发表于 1954 年,而其重要性被物理学界真正认识在二十年后,但是杨振宁在他的自注中^[3]所表达和论文集导言所表达,他是坚信他的发现的重要和正确. 虽然当时很少人注意和认同他的思想. 第一个也是为数很少的一个对他论文有兴趣

的 Pauli,虽然不似是反对者,但肯定却是个怀疑者. 杨振宁相信他的“文章千古事”,所以不管他人如何;“得失寸心知”. 这两句诗,放在英文出版的“杨振宁论文选集”的序言. 到今天,杨-米尔斯场的原始论文可说是奠定了宇宙到微粒子的基本作用的人类认识自然界的进程中的一座里程碑.

2 “读出对称性就写出互作用”(Symmetry dictates interaction)

杨振宁曾经把 20 世纪物理学的主导思想概括为三个“主旋律”——量子化、对称性和相位因子^[6]. 对称性的最主要的体现,当然首先是时空对称性的相对论. 这不是本文讨论之点. 我们主要讨论的是对称性的另外一个方面,这就是杨振宁常常讲到的“Symmetry dictates interaction”,意思是对称性决定互作用¹⁾. 杨-米尔斯的非阿贝尔规范理论的原始论文就是体现这一思想. 20 世纪 30 年代实验

* 2003-04-15 收到初稿 2003-08-19 修回

1) 本文同《物理》2002 年第 4 期 249 页《规范场理论在中国》相补充

† E-mail: puaaz@zsu.edu.cn

建立“核力与电荷无关”之后,引入同位旋概念,质子和中子成为同位旋的双重态,杨-米尔斯在导言一节开宗明义指出,核力的研究显示了,如除开电磁作用,只就核子间的强作用而言;“核子相互作用同位旋空间转动不变”。同位旋空间不变性就成为杨-米尔斯理论的出发点。杨-米尔斯的两篇论文^[1,2]的标题强调“同位旋守恒”,即是同位旋空间转动不变性,也就是同位旋空间的对称性。这是一个理论上推广的概念,应该说在当时实验上,核力与电荷无关只能启示推广到三维同位旋空间总体不变性。在这个程度上,还做不到“dictate”(相互作用),重要的是定域化的对称性。

20世纪50年代以前,物理学的对称性大多都与时空有关。例如相对论不变性(洛伦兹变换),三维空间转动不变性,时空平移对称,空间反演,时间倒逆,等等。这些可以称为外对称性(external symmetry),杨振宁-米尔斯考虑的同位旋空间的对称性,是与物理系统的内部禀赋(intrinsic)性质有关。如同粒子自旋,这可以称为内对称。杨-米尔斯论文可能是最先严格地研究定域内对称得出主要结果的论文。定域的二维同位旋空间对称就给出了出带同位旋核子的基本相互作用。杨-米尔斯理论实际上是任何定域内对称的理论。

3 定域(local)对称性

杨-米尔斯论文中第二个主导思想就是对称性定域化。从电动力学知道了如果把电子波函数的位相变换,也就是亚贝尔规范变换定域化,就会引导出电磁场的出现并且也给出互作用的形式(参看文献[11]的简明介绍)。一般来说对称性是系统原来在时空一点上定义了一种对称性,那末对一切时空点都有相同的对称性,并且有相等的变换参数。因此电动力学中电子波函数的相位变换不依赖时空点,

$$\Psi \xrightarrow{G} \Psi e^{i\alpha}, \quad (1)$$

α 是个不随时空点改变的常量,这一变换不变性导致电荷守恒。如果取 α 依赖时空 $\alpha(x)$, x 是四维时空 (x_0, x_1, x_2, x_3) ,即是每一时空点的位相变换都可以不同,换句话说每一时空点的变换是相互独立的, $\alpha(x)$ 是任意的。对这个变换不变性导致要求引入四维矢量势 $A(x)$ ($A(x), A_0(x)$),并且给出电子与矢量势间的耦合互作用。 $A(x)$ 被认证为电磁场势^[7]。应该说这种认识是杨-米尔斯理论之后,反过来对电动力学的认识。杨-米尔斯理论之前,这一思路并

不是已经弄得很清楚。(1)式称为电子波函数的规范变换,当 α 为 $\alpha(x)$ 时称为定域的, α 为常量时称为总体的。由于变换的可交换性 $G_1 G_2 = G_2 G_1$ 称为阿贝尔规范变换。

如果将这个定域对称性概念施用于同位旋空间,这时同位旋的对称变换——三维同位旋空间转动。它两个的变换是不可对易的。这称为非阿贝尔规范变换。从阿贝尔到非阿贝尔规范变换的推广不是平庸的(trivial)推广,是有很重要和深刻的实质性的。新物理的发掘出来,当然并不是说在杨-米尔斯论文中已有了阐述全部这些新物理,揭示新的物理是经过了许多二十年代物理学家的努力的结果。这也表明了杨-米尔斯论文的内涵的深邃。下面列举一些新的物理²⁾:

(1)矢量势是实质的,规范场量子是一族新的矢量介子。

(2)非阿贝尔规范场是现在已知惟一的渐近自由的场论。

(3)自发破缺(SBS)非阿贝尔规范对称理论,是可重整的。“非常对称”的理论,在这个框架下,引入新的标量场(Higgs场)。

(4)在非阿贝尔规范场理论的基础上才成功地解决弱作用问题,建立弱-电统一的理论。

(5)规范场真空结构。

(6)非阿贝尔规范场是非线性的,它的运动方程是本质上非线性,不可以线性简化。

以上的新物理是1954年杨-米尔斯理论发表到20世纪80年代二十多年间的重要发展,已经导致三项诺贝尔物理学奖和一项数学菲尔兹奖的产生。

定域的不变性原理是说时空任一点 A 与另一点 B 之间是互相独立的。 A 上的事件与 B 上的事件各自无关,互不影响。如果 A, B 之间的事件有关系就必须在 A, B 之间有联络——叫它做规范场。 A, B 两时空点之间最普遍最基本的关系就是因果关系,

1)杨振宁在一次演讲中说^[6],他在1979年纪念爱因斯坦诞生一百周年的会议上演讲,提出了“Symmetry dictates interaction”这个命题,这一演讲后来写成一篇文章,解释了这个含义^[7]。1980年^[8]他用中文写成《对称决定力量》。1982年^[9,10]他的另一次演讲中又写成《对称决定相互作用》。到2000年在北京的一次演讲^[6]中又写成“对称支配相互作用”,但他的英文提法写作“Symmetry determines interaction”。无论用什么文字表达,实质的意义是:对称是统辖相互作用的主要因素。本文用的标题虽然看起来有点累赘,但我认为比较贴切物理原意。

2)本文中部分物理名词请参看本文附录。

A 处一个电子 B 处一个电子,它们之间的因果关系就是电磁场(光子)传递。一般而言,规范场是因果关系,信息的传递者。时空两点的事件如果存在因果关系,定域对称性本来每一点上的对称操作互相独立,规范场的存在正好补偿两点事件间的联系。定域对称性和因果性竟然是密切相关。

从物理学理论的发展历史看,往往重大理论的出现,就是删除先前理论中的多余概念和元素的历史,狄拉克称之为“放弃偏见^[12]”。这些多余的因子往往是被人们普遍地默认,并习以为常。例如相对论的建立,删去了时空的绝对观念。麦克斯韦电磁场理论删去了“以太”的概念,量子论放弃了微观粒子经典轨道的概念。定域对称性的引入就是排除要求时空每一点上的内对称具有相同的参数。时空每点上选取的同位旋空间可以自由地采取任意取向的标架,即否定了要求时空每一点的同位旋坐标转动变换具有相同坐标取向(orientation)。在公式化表述这一理念时,关键一步引入了不可积的相位因子。本来狄拉克在 1931 年引入了电动力学电子波函数的不可积相位因子^[11]。1954 年杨-米尔斯推广到非阿贝尔的情形。在阿贝尔情形杨振宁、吴大峻证明了环路相位因子不多不少地恰好描述电磁场的定理^[11,12]。杨振宁认为规范场的命名应该为“相位场”。非阿贝尔情形,杨-米尔斯通过相位因子引入了同位旋群。

$$\Psi = S\Psi', \quad (2)$$

S 是群的变换元,对于无穷小变换

$$S \cong 1 - iT \cdot \delta\omega,$$

有限变换表为相位因子

$$S = e^{i\int_{\mu} \lambda_{\mu}^{\alpha}(x)} \rightarrow e^{i\int_{\mu} \lambda_{\mu}^{\alpha}(x)}, \quad (3)$$

其中 T_{μ}^{α} 是同位旋群的生成元, $\lambda_{\mu}^{\alpha}(x)$ 是参数, α 为同位旋空间指标, μ 为时空指标。杨-米尔斯理论是规范场的微分形式。1974 年基于量子不可积相位因子杨振宁发展了规范场的整体表述^[13-16]。把非阿贝尔规范场理论置于严格的数学基础上,规范场理论的数学架构就是拓扑学纤维丛理论。

物理学史上这类数学和物理的结合,将物理学的理论架构建立在严格和严密的数学基础上。举其荦荦者,如微积分,微分方程与牛顿力学,偏微方程与法拉第-马克斯威尔电磁场,黎曼几何与广义相对论,量子力学与广义函数,泛函空间分析等。非阿贝尔规范场理论沟通物理学与拓扑学的重要分支——纤维丛理论的结合。从大范围、整体和拓扑的视野来研究物理现象成为 20 世纪 80 年代的潮流。

4 “保守的革命者”的功勋

杨-米尔斯的论文是开创性的工作,解决了物理学界的一个根本问题,开拓了一个领域,打开了宽广的通道。当然不会是把问题做尽做清,它在非阿贝尔定域对称的架构经历了 15 年几代物理学家的完善和补充才变为像现在这样的完美。这里我们举出整整一个时代系列的重要的补充:

(1)1954 年 Yang-Mills SU(2)规范场,下列问题尚待完善 (i)量子化问题 (ii)规范场量子质量问题 (iii)可重整化问题;

(2)1964 年 Higgs-Kibble-Brout-Englert 规范场自发破缺机制;

(3)1967 年 Faddeev-Popov 规范场路径积分量子化;

(4)1970 年 Veltman-'tHooft 自发破缺规范场论可重整的证明。

(3)解决了问题(i)(2)解决了问题(ii)(4)解决了问题(iii),至此非阿贝尔规范场论经历 15 年成为完善的理论。在这个基础上发掘了在本文第 2 节中叙述的许多新的物理和应用于探究粒子物理的新现象。然而杨振宁对这一架构并不完全满意,也有不少其他物理学家持此相似观点,引入一个新的标量场——Higgs 场去完成规范场的自发破缺机制,显得人为和牵强。正因为实验上迄今 30 年未能发现这一粒子的踪迹,这个问题成为从 20 世纪遗留到现在悬而未决的重大物理问题。Higgs 场问题虽然悬在那里,但自发破缺机制解决了 1954 年泡利念念不忘的规范场量子的质量问题,给物理学历史上留下的一段有趣的“对决”作了一次裁判。

杨振宁 vs. 泡利:二比 0 杨胜

这是物理学家中有许多流传的趣事之一,泡利对于杨振宁的两项伟大贡献,在提出而未被实验证实前都持怀疑或否定的态度。人所共知的 1956 年杨振宁与李政道共同宣称弱作用宇称可不守恒时,泡利打赌说愿“豪赌”一注“上帝不会是左撇子”。1954 年,杨振宁在普林斯顿高等研究院应奥本海默邀请报告非阿贝尔规范场理论。泡利两次插问规范场量子的质量问题。当杨答,尚未有肯定的结论时,泡利说那是不成其为理由的托辞。以致杨不得不停止报告,最后还是奥本海默圆场,杨振宁才继续讲完报告。看来泡利对规范场是有兴趣的,但是他对杨-米尔斯的工作并不抱肯定和正面的意见。这两次泡利对杨的“对抗赛”可说最后杨以 2:0 获胜。在杨-米

尔斯理论发表五十周年之际,对这伟大的贡献,我们援引戴逊(F. Dyson)在1999年杨振宁在纽约石溪荣休晚宴上的讲词^[17]:

“杨教授是继爱因斯坦和狄拉克之后,20世纪物理学的卓越设计师……他对物理学最深远和最首创的贡献——和米尔斯发现的非阿贝尔规范场……今天,当代理论所描述并为当代实验证实的物质的本质,是各种规范场的组合.它们为杨在45年前首先猜测的数学对称性所支配。”戴逊结论说:杨是一位“保守的革命者”,他既摧毁了旧的思维结构¹⁾又建议了新的结构.他创建的比摧毁的多,他对西方科学的杰出思维传统和对中国祖先的杰出文化传统同样崇敬^[18].“他是一位保守的革命者.”²⁾

参 考 文 献

- [1] Yang C N, Mills R L. Phys. Rev. ,1994 95 631
- [2] Yang C N, Mills R L. Phys. Rev. ,1954 95 :191
- [3] Yang C N. Selected Papers 1945—1980 with Commentary. Freeman W H & Co N Y. 1982 ,19—21 ,171 ,172
- [4] 杨振宁. 物理 2002 31(4) :194
- [5] 杨振宁. 在香港中文大学为庆祝杨振宁八十寿辰的学术论坛上的演讲. 2002年8月28日香港中文大学
- [6] 杨振宁. 百年科学回顾和展望. 路甬祥主编,上海教育出版社 2000. 97
- [7] Yang C N. Phys. Today ,1980 33(6) #2
- [8] Yang C N. Einstein and contemporary physics. A lectures delivered at the University of HongKong. 1980
- [9] 杨振宁. 对称与二十世纪物理学,在香港中文大学的演讲, 1982 ,1. 21 ;《二十一世纪》,1990 ,No. 1
- [10] 杨振宁. 对称和物理学. 二十一世纪,1991 ,No. 6
- [11] 李华钟. 物理 2001 30 668
- [12] Yang C N. Some Concepts in Current Elementary Particle Physics in “ selected paper ”. 445
- [13] Yang C N ,Phys. Rev. Lett. ,1974 33 #45
- [14] Wu T T ,Yang C N. Phys. Rev. D ,1975 ,12 3845
- [15] 李华钟. 物理 2002(4) 249
- [16] Li H Z. Mod. Phys. Lett. 2002 ,A17 1955
- [17] Dyson F. “ 杨振宁——保守的革命者 ”. 译载于二十一世纪,1999年8月
- [18] 李华钟. 物理,2002,31 :249,此文被“全球华人专业人士网”杨振宁专栏所转载 2003 A. 1 ,又此文第249页脚注上的引文号[1 I 2]应该互调,校稿时漏校

附 录 :名词注释

1 非阿贝尔规范场量子化, Faddeev - Popov 量子化

规范不变性使一般使用正则量子化方法时,需选定一定的规范,在一定规范下进行量子化.于是本来规范不变的理论,在一定规范下完成的量子化,就

是在约束条件下的量子化,沿用电子电动力学(阿贝尔规范场)的方法引起严重困难.这个问题,到1967年前苏联的 Faddeev 和 Popov 用路径积分量子化方法完成了量子化.此外 DeWitt B S, Mandelstam S 等也作出量子化方法.现今通用的是 Faddeev-Popov 的量子化方法.

2 规范场量子的质量

规范场理论中出现的基本物理量并没有质量纲的量,在理论中没有质量的标度,因而很难理解规范场量子是有质量的,反而可以认为它的质量为零是合理的.但是零质量矢量粒子在自然界中已知的只有光子,而没有其他粒子,因而当时的实验也不支持零质量规范场.可是从另一方面看,零质量的规范场,阿贝尔情况20世纪50年代时已知是可重整的,非阿贝尔情况在50—60年代有不少研究,但有质量的非阿贝尔规范场,则找不到重整的方法,这就是在60年代,非阿贝尔规范场的质量困难的问题.这问题的解决就是60年代中期对阿贝尔规范场自发破缺对称机制的研究,可以使规范场量子带质量而不影响它的重整化性(参看下文各条).

3 对称性自发破缺

量子力学对称性的存在受到外界或内部因素影响失去了一部分或全部原有的对称性,这是通常所谓对称性破坏(symmetry breaking).有三种方式导致对称性失去:

(1)明显破坏——外加作用,如系统哈密顿量 H_0 , 有对称性 S , 外加作用哈密顿 H'

$$H = H_0 + H'$$

H' 对原先 S 对称破坏了, H 只具有比之 H_0 低的对称性.这种由外加作用导致的破坏,有时叫做明显破坏(explicit breaking).

(2)量子化破坏——物理系统在未量子化的经典情况下的哈密顿量 H_c 具有对称性 S_c , 量子化后系统的哈密顿量 H_q , 有时会出现多一项 H_α

$$H_q = H_c + H_\alpha$$

这时 H_q 的对称性比 S_c 低,失去了一部分对称.这是由于 H_α 引起的.这种情况称为对称的量子破坏(quantum symmetry breaking) H_α 常被称为量子“反常”(anomaly).

1)戴逊这里指的是与李政道共同发现弱作用宇称不守恒.

2)有少数文献引用说,与“杨-米尔斯”论文同时,英国的 Shaw 在博士学位论文中引入非阿贝尔规范场.事实上,Shaw 的学位论文并未发表,我所见到的引用都只是提到一下,并未见到清楚说明和推演.另外有建议认为在20世纪30年代, Klein O 等在 Kaluza - Klein 理论框架中,曾提到过 $SU(2)$ 同位旋规范变换.我认为历史上 Kaluza - Klein 理论在当今的超弦理论有它的意义,而作为非阿贝尔规范场的理论而言,我们讲到现代非阿贝尔规范场理论,以杨-米尔斯场的理论框架为起点,因为这个理论特别重要的是它以对称性决定相互作用作为一种原理,这一思想发展域内对称的系统理论,这是本文从标题到内容所强调的.杨-米尔斯场的物理思想和表述与 Klein 工作未见有什么渊源关系.对此注的重要补充请参阅本文末[后记].

(3)自发破缺对称(spontaneously broken symmetry)——基态对称破坏。当量子系统哈密顿是 H 有对称 S , 它的基态可以也同有 S 对称, 但是也会出现基态不具有 S 对称, 而具有比 S 低的对称 S' , 失去了 H 原有的对称。这时叫做 H 对称的自发破缺。这种失去对称其实是表面的, 特定挑出一个基态时, 这个基态失去 H 的对称。但是可以证明, 这种情况, 系统的基态是简并的, 它有多个简并的基态, 这些基态的每一个都没有 S 对称, 但是这全部简并基态的总体却仍然保持 H 原有的 S 对称, 因此又称为“隐蔽对称”(hidden symmetry)——(Coleman S)或说它是“非常对称”——(杨振宁)。这都强调对称性不是被破坏了。自发破缺连续对称必定伴随有零质量粒子的激发——goldstone 玻色子, 正是这些激发场保留维护了基态总体具体 H 原先的对称性。这个概念在某些刊出的出版物中有误解。把几种方式的对称破坏混淆。

4 规范场自发破缺的 Higg-Kibble-Brout-Englert 机制

对阿贝尔规范场可以引入一个标量场 φ , 它的真空期待值不为零 $\varphi_0 \neq 0$, 导致规范对称性的自发破缺。这个标量场被规范场量子吸收去(吃掉)成为它的一个分量。这就可以使原来零质量的规范场带有质量。这个机制被好几位理论物理学者研究过, 都获得相类似结果, 后来通称为 Higgs 机制。但是这里开列的一串名字都有相当的贡献。弱电统一理论就建立在这自发破缺对称的非阿贝尔规范场的架构之中。

5 自发破缺非阿贝尔规范场理论的重整化

荷兰人 'tHooft G 和 Veltman M 为此获得 1999 年诺贝尔物理学奖。证明(1970 年)自发破缺的非阿贝尔规范场理论是可以重整化的。他们证明: 在弱电作用情况下用微扰论方法计算规范场理论时出现的发散(divergence)可以用已经很成熟的量子电动力学重整化方法从理论中排除去, 而得到有限的计算结果。其后韩国人 Lee B W(李焕辉)更细致证明了理论的可重整、么正性等问题, 从而彻底解决非阿贝尔规范场理论构架中存留问题, 开通了同实验测量数值比较的途径。

6 渐近自由(asymptotic freedom)

1973 年 Gross D J 和 Wilczek F, 同时 Politzer H D 分别证明非阿贝尔规范场的重要性质, 当两费米子以非阿贝尔规范场相互作用时, 在高能极限或大动量极限下, 或在极近距离内, 粒子有效相互作用强度对数下降, 能量愈高粒子愈接近在自由粒子状态。渐近自由成为粒子强作用的量子色动力学(QCD)的基础之一。

7 红外囚禁(infra-confinement)

杨-米尔斯场的低能行为, 在低能极限或小动量极限下, 与高能行为的渐近自由相反, 互作用趋于愈强, 两粒子的距离增大, 互作用愈强。在吸引力作用下, 粒子存在于被囚禁(confinement)状态。人们曾设想这种红外奇异性可以解释夸克囚禁, 但是至今还没有彻底解决。

8 规范场真空结构

1975 年, 前苏联 Polyakov A M 等人和 1976 年 'tHooft 先后提出在四维欧氏里得空间 $SU(2)$ 规范场的无源方程存在有一种很特别的解。定域在时空局部区域, 有点像粒子, 其欧

氏总能量为零, 这称为赝粒子(pseudo particle X Polyakov)或瞬子(instanton X 'tHooft)。这种欧氏空间解解释为在 $SU(2)$ 规范场的真空具有多种结构。这种解就使不同真空之间以隧道效应互相沟通。从而开始了真空结构对 QCD 的物理影响的研究。

9 规范场矢量介子

规范场量子是矢量介子, 有质量, 带电荷或中性的玻色子, 具有这些性质的粒子, 在 20 世纪 70 年代先后被实验发现它们是传递弱作用的矢量介子称为 W 玻色子, 传递电磁作用的光子也是规范场矢量介子。杨-米尔斯场原先是从强作用同位旋 $SU(2)$ 对称性开始。在弱电统一作用的 $SU(2)$ 是弱相互作用, 但不论强或弱作用, 规范场理论的基本框架是普适的, 强作用的量子色动力学(QCD) $SU(3)_c$ 也是同样是规范场理论的框架。 $SU(3)_c$ 规范场矢量介子被认为就是实验发现的胶子(gluon)。

[后记]

作者在此稿付印前, 得到美国梁培德(P. T. Leung)教授寄来的一些资料, 这是本文在注中提到但当时未能读到的资料[1][2][3]。从这些资料看来, R. Shaw 的剑桥大学博士论文完成于 1955 年 9 月^[1]。Shaw 在文中自注说他的规范场结果在 1954 年 1 月完成, 一直未发表。从他的论文中看到, 写成博士论文在 1955 年 9 月, 在博士论文参考文献中 Shaw 引用了 Yang-Mills 1954 年论文。在阅读了 R. Shaw 博士论文的有关部分之后, 我认为本文中强调 Yang-Mills 主要的物理思想: 定域内对称支配相互作用是 Yang-Mills 在二十世纪物理学发展的主旋律中重大贡献。其次, R. Shaw 在写出博士论文的内容时, 已经知道 Yang-Mills 发表了的论文。

至于 O. Klein 1938 的理论^[2], 同样并没有“定域内对称”的物理思想。“规范不变性原理”作为给出电磁与物质相互作用一般追溯到 Weyl 1929 的理论。这一规范不变性是从电磁的规范变换而来。同样没有“定域内对称不变性”的思想。[2]只说明 O. Klein 曾几乎得到 $SU(2)$ 规范变换, 但 Klein 本人并不领悟到。现代规范场理论都以 Yang-Mills 为起点^[3]。时空对称性起重要作用这一思想追溯到爱因斯坦。但“定域内对称支配相互作用”这一思想始和自体现在杨-米尔斯规范理论。杨振宁曾指出“规范场”这个名词并不恰当, 正确的选择应称为“相位场”。

本文作者感谢梁培德教授有益的讨论和寄来资料。

- [1] Shaw R. The problem of particle types and other contribution to the theory of elementary particles(Cambridge Doctor Thesis). Taylor J C (ed). Gauge Theories in the Twentieth-Century, Imperial college press, 2001
- [2] O' Raifeartaigh L, Straumaun N. Rev. Mod. Phys., 2000, 72, 1
- [3] Jackson J D, Okun L. Rev. Mod. Phys. 2001, 73, 663