

杨振宁教授荣获富兰克林奖章和鲍威尔奖¹⁾

——杨-米尔斯规范场理论简介

马 中 骥

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 美籍华裔物理学家杨振宁教授, 由于他在非阿贝尔规范场理论方面的奠基性工作, 荣获富兰克林奖章和 1995 年鲍威尔奖。文章简要介绍非阿贝尔规范场理论及其在物理学发展中的重要地位。

关键词 富兰克林奖章, 鲍威尔奖, 规范场理论, 非阿贝尔规范场

Abstract C. N. Yang was awarded the Benjamin Franklin Medal and 1995 Bower Prize mainly for his fundamental work on nonabelian gauge field theory, A brief introduction to this theory and its important role in the development of physics is given.

Key words Franklin Medal, Bower Prize, Gauge field theory, Non-abelian gauge field

1 富兰克林奖章和鲍威尔奖金

1994 年末, 从美国传来令学术界轰动的消息, 美籍华裔物理学家杨振宁博士荣获互相独立的两项大奖: 一项是美利坚哲学学会颁发的本杰明·富兰克林奖章 (Benjamin Franklin Medal), 另一项是美国费城富兰克林研究所颁发的鲍威尔奖 (Bower Prize), 金额 25 万美元。后者是北美地区最高额奖金, 已于 1995 年 5 月初颁发。

美利坚哲学学会是美国最古老的学术团体, 是一个久负盛名的国际学术组织, 它由富兰克林和他的朋友们在 1743 年创立。目前该学会约有 700 位成员, 其中包括近 100 位诺贝尔奖金获得者。1906 年为纪念著名的科学家、思想家、政治家本杰明·富兰克林诞辰 200 周年, 美国国会授权制作 50 枚富兰克林奖章, 由美利坚哲学学会作为最高荣誉颁发。该学会执行官在总结杨振宁博士的成就时讲: “杨振宁教授

是自爱因斯坦和狄拉克之后, 二十世纪物理学的出类拔萃的设计师。从他在中国的学生时代, 到以后成为美国纽约州立大学石溪分校的圣贤, 一直喜爱严格分析和数学形式美, 并以此思想为指引。这导致了他对物理学深远和奠基性的贡献: 与李政道一起发现弱作用宇称不守恒, 并因此获得诺贝尔奖; 与罗伯特·米尔斯一起提出非阿贝尔规范场理论。随着时光的推移, 非阿贝尔规范场理论的提出逐渐成为物理学中最重要的事件之一。

杨振宁教授追求数学美的风格表现在他所有的研究工作之中, 这使得他的计算工作变为艺术的缩影, 使得他的深刻思索变为杰出的研究工作。这种风格使得他, 正如使得爱因斯坦和狄拉克一样, 在深入探索大自然的奥秘中能够比别人看得更远一些。”

美国费城富兰克林研究所在给杨振宁博士颁发鲍威尔奖的正式文告中说: “本奖金奖励

1) 1995 年 2 月 8 日收到第一稿, 1995 年 4 月 2 日收到修改稿。

他在规范场方面的研究工作。杨振宁的其他贡献包括弱作用宇称不守恒、统计力学、凝聚态物理和数学物理。他的一大片研究对二十世纪下半叶基础科学研究的广大领域产生了巨大的影响。杨振宁是获此奖金的第一位理论物理学家。他的研究工作为宇宙中基本作用力和自然规律提供了解释。

作为二十世纪阐明亚原子粒子相互作用的大师之一，他在过去四十年中深刻地重新塑造了物理并发展了现代几何。杨-米尔斯规范场理论已经与牛顿、麦克斯韦尔、爱因斯坦的研究工作并列，并且必然对未来的一代产生与这些学者们可相比拟的影响。

他对科学的贡献，他在为增进中国与西方世界的相互理解、促进世界各个角落青年的科学教育等方面都反映了富兰克林本人的科学与人道的精神。”

我们这篇短文试图向读者深入浅出地介绍什么是非阿贝尔规范场理论，这一理论在人类对宇宙中基本相互作用规律的认识上起什么重要作用。为了对这些问题有一个概括的了解，让我们先简短回顾一下物理学发展的历史。

2 阿贝尔规范场理论

牛顿三大定律是力学的基本运动规律。牛顿万有引力定律奠定了引力理论的基础。麦克斯韦尔方程揭示了电和磁两种相互作用的统一，指出了光是一种电磁波，从而使麦克斯韦尔方程成为电磁学和光学的理论基础。由于在测量光对传播介质(例如地球上的空气)相对速度的实验中出现牛顿定律无法解释的矛盾，爱因斯坦提出相对性原理和光速不变假设，建立了狭义相对论。狭义相对论克服了牛顿定理的局限性，揭示了高速运动物体的力学运动规律，并把麦克斯韦尔方程表达成更对称(协变)的形式。爱因斯坦建立的广义相对论发展了牛顿万有引力定律，成为现代引力理论的基础。爱因斯坦对光电效应的解释，和黑体辐射实验、康普顿散射实验一起推进了人类对光本质的认识：

光既具有波动性又具有粒子性。光的波粒二象性启发了人们对微观粒子运动规律的认识。经过包括狄拉克在内的一代物理学家的共同努力，创立了量子力学和量子场论。物理学的丰硕成果奠定了二十世纪高科技发展的基础。

量子力学中微观粒子的运动状态用波函数来描写。波函数是时间和坐标的复函数，它由模和幅角两部分组成，模的平方描写在该点附近该时刻发现粒子的几率。由于在全空间发现粒子的几率为1，波函数要满足归一化条件。几个波函数的幅角间发生干涉，在实验中可以测量，近年甚至发现它有宏观观测效应。波函数满足薛定谔方程。薛定谔方程包含波函数对时间的一阶微商和对空间的二阶微商。高速运动粒子的波函数满足狄拉克方程，它包含波函数对时间和对空间的一阶微商。薛定谔方程和狄拉克方程都是关于波函数的线性齐次微分方程。对满足方程的波函数，幅角增加一个常数，方程仍然满足。以单个粒子相对论波函数为例，当波函数作使幅角增加一个常数值的变换：

$$\psi(\mathbf{r}, t) \rightarrow e^{i\epsilon\alpha} \psi(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

狄拉克方程保持不变，其中指数上的 ϵ 是电磁作用耦合常数。物理上把这变换称为第一类规范变换，也称整体规范变换。狄拉克方程对整体规范变换保持不变。如果(1)式中的相角 α 依赖于时空坐标：

$$\psi(\mathbf{r}, t) \rightarrow e^{i\epsilon\alpha(\mathbf{r}, t)} \psi(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

则此变换称为第二类规范变换，也称局域规范变换。狄拉克方程对局域规范变换不再保持不变，因为波函数对时空的微商(记作 $\partial_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu}$)

产生对 α 的微商项：

$$\partial_\mu \psi \rightarrow e^{i\epsilon\alpha} \partial_\mu \psi + i\epsilon(\partial_\mu \alpha) e^{i\epsilon\alpha} \psi. \quad (3)$$

为了消去这附加项，可以把方程中的普通微商 ∂ 改成协变微商 D ：

$$D_\mu = \partial_\mu - i\epsilon A_\mu, \quad D_\mu \psi \rightarrow e^{i\epsilon\alpha} D_\mu \psi, \quad (4)$$

其中 A_μ 是四维电磁势，它在规范变换中作如下变换：

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \alpha. \quad (5)$$

而电磁场强在规范变换中保持不变:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \rightarrow F_{\mu\nu}. \quad (6)$$

把狄拉克方程中的普通微商改成协变微商后,它在局域规范变换下保持不变.方程中增加的项描写了电磁场对带电粒子的作用,同时它也规定了带电粒子所产生电流 J_ν 的形式.在麦克斯韦方程中,这电流又描写了带电粒子对电磁场的作用:

$$\partial^\mu F_{\mu\nu} = J_\nu. \quad (7)$$

局域规范变换不变性直接保证了电荷守恒.

局域规范不变的狄拉克方程和麦克斯韦方程描写了相对论带电粒子与电磁场的相互作用.此方程组二次量子化后得到量子电动力学,它的预言在极高的精度下与实验惊人地符合,从而证明了用这种方法处理带电粒子与电磁场的相互作用是正确的.

因为相因子变换构成 $U(1)$ 群,它是阿贝尔群,所以描写电磁相互作用的局域规范场理论称为阿贝尔规范场理论.在阿贝尔规范场理论中,电磁场称为规范场,它的量子,即光子,称为规范粒子.带电粒子间的电磁作用是通过交换规范粒子来实现的.麦克斯韦方程描写了在物质场(通过电流)的作用下电磁场的运动规律,而局域规范不变的狄拉克方程描写了在电磁场作用下物质场的运动规律.两个方程在局域规范变换下都保持不变.这组方程很好地描写了相对论带电粒子与电磁场的相互作用.除了狄拉克方程外,带电粒子还可能满足其他运动方程,例如薛定谔方程、克莱因-戈登(Klein-Gordon)方程等.利用阿贝尔局域规范不变性,可以唯一地确定满足各种运动方程的带电粒子与电磁场的相互作用形式.它的正确性已得到实验的检验.注意到规范粒子的质量项

$$m^2 A^\mu A_\mu \quad (8)$$

不满足局域规范变换不变性,因此在严格规范不变的局域规范场理论中,规范粒子一定是零质量的.大家知道,光子的静止质量正好为零.

3 非阿贝尔规范场理论

质子和中子的带电状态不同,它们的质量有很小的差别,质量的这一微小差别很可能是由带电状态不同造成的.除此以外,大量实验证明,它们的性质很相似,因此它们被统称为核子,看作核子的两种不同状态.这种对称性称为同位旋对称性,数学上属于 $SU(2)$ 群,是非阿贝尔群.随着其他微观粒子的发现,同位旋对称性在分析和理解实验数据,研究微观粒子的相互作用方面起着十分重要的作用.当然,与电磁作用相联系的 $U(1)$ 对称性相比,同位旋对称性是一种近似的对称性,因为质子和中子的电磁性质明显不同.但是,在研究强相互作用时,同位旋的概念十分重要.人们一直在思考,与同位旋相联系的相互作用是通过什么粒子来传递的,怎样建立它的相互作用形式.

杨振宁教授从研究生期间就开始钻研这一问题.如果能把同位旋相互作用纳入规范作用的轨道,那么它通过一种新的规范场来传递,相互作用形式就完全确定了.1954年他和米尔斯合作终于找到了一种优美的数学形式,把 $SU(2)$ 规范场理论表达了出来.这种 $SU(2)$ 规范场理论很容易被推广到其他非阿贝尔规范场理论,统称为非阿贝尔规范场理论,或杨-米尔斯规范场理论.

用两行一列的波函数来描写核子,上分量代表质子状态,下分量代表中子状态.当波函数作与时空无关(整体)的 $SU(2)$ 变换时,具有同位旋对称性的运动方程应保持不变:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) \rightarrow \mu \Psi(\mathbf{r}, t), \quad \mu \in SU(2), \quad (9)$$

其中 μ 是二行二列常么正矩阵.但当 μ 是时空坐标的函数时,只有当把普通微商改成协变微商后,运动方程才能保持不变:

$$D_\mu = \partial_\mu - igW_\mu, \quad D_\mu \Psi \rightarrow \mu(\mathbf{r}, t) D_\mu \Psi, \quad (10)$$

其中 W 是 $SU(2)$ 规范势, g 是相应作用的耦合常数. W 在 $SU(2)$ 局域规范变换中作如下变换:

$$W_\mu \rightarrow \mu W_\mu \mu^{-1} - ig^{-1}(\partial_\mu \mu) \mu^{-1} \quad (11)$$

对核子波函数来说, W_μ 是二行二列的矩阵, 矩阵的乘积次序是不能交换的。杨和米尔斯发现, $SU(2)$ 规范场强 $G_{\mu\nu}$ 必须由下式给出:

$$G_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu - ig\{W_\mu W_\nu - W_\nu W_\mu\}. \quad (12)$$

注意, 与(6)式相比, 此式后面引入了附加的二次项, 这是杨和米尔斯的重大突破。这附加项保证了规范场强在规范变换中“协变”地变换:

$$G_{\mu\nu} \rightarrow \mu G_{\mu\nu} \mu^{-1}, \quad (13)$$

从而使规范场强满足 $SU(2)$ 局域规范不变的杨-米尔斯方程:

$$D^\mu G_{\mu\nu} = J_\nu, \quad (14)$$

其中 J_ν 是由核子产生的同位旋流。与麦克斯韦尔方程不同, 杨-米尔斯方程关于规范势是非线性的。这说明非阿贝尔规范势本身带有荷, 它存在自身相互作用。与 $U(1)$ 规范粒子一样, 非阿贝尔规范粒子也必须是零质量的。考虑到 $U(1)$ 规范势的乘积次序可以交换, 阿贝尔规范场理论是非阿贝尔规范场理论的特殊情况。但是由阿贝尔规范场理论不能推演出非阿贝尔规范场理论来, 就象由牛顿方程不能推演出相对论运动方程一样。

后来知道, 规范场理论有着十分明显的几何意义。在现代微分几何的纤维丛理论中, 规范势相当于联络, 而规范场强相当于曲率张量, 但曲率张量满足的非线性杨-米尔斯方程则是从物理上提出来的。纯规范场(流为零)的杨-米尔斯方程求解问题已成为数学上一个新的热门研究领域。

杨-米尔斯规范场理论优美的数学形式使得很多物理学家相信它是研究各种基本相互作用的一个最好形式。但在理论刚提出的时候, 有一个重要问题还没有解决, 就是带荷的 $SU(2)$ 规范粒子为什么会没有静止质量, 而且它们在实验上也没有被发现。当然, 同位旋对称性的近似性问题也困扰着物理学家。这些问题后来都得到了解决, 使得杨-米尔斯规范场理论成为现代描写弱作用、电磁作用和强作用的共同理论基础。

4 弱作用和电磁作用的统一

50年代, 弱相互作用的实验和理论都有长足的发展。弱作用宇称不守恒的发现, 赝矢量流部分守恒理论和中间玻色子理论的提出, 促使格拉肖(Glashow)在1961年首先形式上提出弱作用和电磁作用统一的 $SU(2) \times U(1)$ 规范场理论。但是这一理论既没有解决规范势的零质量问题, 也不能解释为什么弱作用和电磁作用的耦合强度有如此大数量级的差别, 因此只能叫形式理论。

1964年, 黑格斯(Higgs)注意到, 一种近似的对称性, 其不对称的原因不一定来自相互作用形式, 真空状态的不对称也同样可以引起对称性破坏。例如电磁作用是各向同性的, 但由于永久磁体基态的磁畴现象, 造成永久磁体的各向异性。以同位旋 $SU(2)$ 规范场理论为例, 黑格斯引入一种标量场, 后来被称为黑格斯场, 它在同位旋空间是旋量场。黑格斯场的真空态是同位旋不对称的, 通过黑格斯场与 $SU(2)$ 规范场的相互作用, 沿同位旋不守恒方向的规范粒子可以获得质量, 同时, 整个理论同位旋不再严格守恒, 只有当能量高到可以略去规范粒子质量时, 理论才是同位旋守恒的。使规范粒子获得质量的这种机制被称为黑格斯机制。黑格斯机制同时解决了非阿贝尔规范场理论的两个困难问题。

1967年, 温伯格(Weinberg)和萨拉姆(Salam)把黑格斯机制用到 $SU(2) \times U(1)$ 规范场理论中去, 建立弱作用和电磁作用统一的规范场理论, 简称为标准模型。在 高能范围(几百 GeV) 弱作用和电磁作用是统一的。随着能量下降, 由于黑格斯场真空态造成的对称性破坏, 使弱作用和电磁作用的耦合强度发生很大的差别, 同时, 除继续守恒的 $U(1)$ 电磁规范粒子, 即光子仍无质量外, 其他规范粒子都获得了质量。这些有静止质量的规范粒子, 包括带电的 W^\pm 粒子和中性的 Z^0 粒子, 后来在实验中都已陆续发现。标准模型的理论预言也陆

续被实验所证实。提出标准模型的理论物理学家和发现规范粒子 W^\pm 和 Z^0 的实验物理学家都分别获得了诺贝尔物理奖。目前除黑格斯粒子尚未发现外，还没有一个判决性的实验证实标准模型需要修改。

5 量子色动力学

非阿贝尔规范场已成为现代强相互作用理论的基础。根据这一理论，强子由夸克构成，夸克间的强相互作用由 $SU(3)$ 规范作用来实现。这 $SU(3)$ 量子数被形象地称为“颜色”，描写强作用的 $SU(3)$ 非阿贝尔规范场理论被称为量子色动力学。夸克有红黄蓝三种颜色，传递强作用的规范粒子，称为胶子，也带有颜色。颜色 $SU(3)$ 对称性是一种严格的对称性，因而胶子的静止质量必须为零。虽然至今尚未直接观测到夸克和胶子，但实验上已观测到夸克和胶子存在的许多旁证。

按重整化群理论，规范作用的耦合常数随能量变化。 $SU(3)$ 规范作用的耦合常数随能量升高而减少，并趋于零，这称为渐近自由现

象。实验上已观测到这现象。反之，耦合常数随能量下降或作用距离变远而增大，这称为颜色禁闭现象，也就是说，目前实验的能量标度还不足以把带颜色的粒子分开，因此还无法直接观测到单独的夸克和胶子。此外，由于强相互作用不能用微扰方法计算，量子色动力学的许多预言还带有某些不确定性。尽管如此，实验已经检验了一些预言。更重要的是，目前还没有发现实验和量子色动力学有尖锐矛盾之处。

6 结论

微观世界的基本相互作用有四种：电磁作用、弱作用、强作用和引力作用。按照目前比较公认的看法，前三种理论已纳入规范场理论的轨道，不少人正努力用规范场理论来解释引力作用。由此可见，杨-米尔斯规范场理论的提出已引起了人类对微观世界基本相互作用认识上的一场革命，成为现代基本相互作用理论的基础。同时，杨-米尔斯规范场理论也已开辟了数学上一个崭新的研究领域。

激光冷却与囚禁的原子喷泉¹⁾

甘建华 王义道

(北京大学无线电电子学系，北京 100871)

摘要 本文介绍了激光冷却与囚禁的原子喷泉的主要环节，首先介绍了与原子喷泉有密切关系的
光学粘团和原子阱的原理和结构，然后介绍了原子喷泉的实验装置、实验步骤和实验结果。

关键词 原子喷泉，激光冷却与囚禁，光学粘团，原子阱

Abstract The main features of atomic fountains based on laser cooling and trapping are presented. The principles and experimental set-ups of optical molasses and atomic traps which are closely related to atomic fountains are given first, followed by a description of the set-up and results of atomic fountain experiments.

Key words atomic fountain, laser cooling and trapping, optical molasses, atomic trap

科学发展与技术进步取决于测量准确度与精密度的提高，后者在很大程度上取决于计量标准的准确与稳定。当代最精密和准确的计量

是频率及其倒数——时间的计量，目前其准确

1) 1994年9月2日收到初稿，1995年1月19日收到修改稿。