

探索上帝粒子与质量起源

何红建[†] 邝宇平

(清华大学 近代物理研究所 高能物理研究中心 北京 100084)

God particle and origin of mass

HE Hong-Jian[†] KUANG Yu-Ping

(Institute of Modern Physics, Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2013-12-26收到

[†] email: hjhe@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140102

摘要 欧洲大型强子对撞机(LHC)上发现的125 GeV新希格斯粒子可能成为标准模型预期的“上帝粒子”。这一革命性发现开启了探索宇宙中一切基本粒子质量起源的新时代,成为21世纪粒子物理学的转折点。文章着重介绍:(1)探寻上帝粒子的重大科学意义;(2)探索质量起源的历史,以及为什么牛顿力学和爱因斯坦相对论均未解决质量起源问题;(3)神秘的真空与希格斯机制;(4)上帝粒子是如何提出的和怎样在LHC上发现的;(5)展望21世纪质量起源的探索与新物理定律的革命。

关键词

上帝粒子, 质量起源, 对称性破缺与希格斯机制, LHC, 高能对撞机, 新物理探测, 暗物质

Abstract The new Higgs boson discovered at the CERN LHC could be the God particle expected from the standard model. This revolutionary discovery opens up a new era of exploring the origin of masses for all elementary particles in the universe. It becomes a turning point of the particle physics in 21st century. This article presents the following: (1) Scientific importance of searching and testing the God particle(s); (2) The history of studying the origin of mass, and why Newton mechanics and Einstein relativity could not resolve the origin of mass; (3) The mysterious vacuum and the mechanism of spontaneous symmetry breaking; (4) How the God particle was invented and how the LHC might have discovered it; (5) The perspective of seeking the origin of mass and new physics laws.

Keywords God particle, origin of mass, symmetry breaking and Higgs mechanism, LHC, high energy colliders, new physics searches, dark matter

1 一份沉甸甸的诺贝尔物理学奖

这是一份沉甸甸的诺贝尔物理学奖,它的颁发直接源于2012年7月4日在欧洲核子研究中心(CERN)的新闻发布会上公布的振奋人心的实验结果:正在运行之中的大型强子对撞机(LHC)的两个实验组ATLAS和CMS宣布发现了一个质量为

125—126 GeV的疑似希格斯玻色子(Higgs boson)的粒子,这大概就是物理学家们等待近半个世纪的“上帝粒子”(God Particle)^[1]。今年的诺贝尔物理学奖与众不同,特别引人注目,因为这个上帝粒子无比关键,它是宇宙中一切基本粒子的质量之源。

本文第一作者在这个发布会前的周末在CERN的现场拍摄了一张照片(图1中左图),上面

除了参加合作的各个成员国飘扬的彩旗之外，还能看到厚重的乌云与阳光交错的天空和衔接云层的山峦，这很能够描述当时在即将揭开一个惊天秘密之前 CERN 的物理学家们的紧张与兴奋的心情。三天之后的7月4日新闻发布会现场，83岁高龄的英国理论物理学家彼得·希格斯(Peter Higgs)禁不住老泪纵横，在长达45年的耐心等待之后感叹道，“这真是我生命中最不可思议的奇迹”。英国物理学会主席彼得·奈特(Peter Knight)说，“LHC的这一成就堪与人类发现DNA和登陆月球媲美”。图1中右边照片是希格斯与比利时理论物理学家弗朗索瓦·恩格勒(Francois Englert)在发布会现场兴奋交谈的情景，十分感人。

2012年7月4日之后，LHC的运行马不停蹄，对撞机上的数据源源不断地发送到ATLAS和CMS组的计算机群里进行系统整理和分析，到了2012年底，已经积累了大约4倍于7月4日发布的数据，在三个主要探测道中得到的结果继续证实了这个125—126 GeV新粒子的存在，而且其主要性质与标准模型中预期的希格斯粒子基本一致。紧接着，全世界奖金额度最高的“基础物理学奖”(Fundamental Physics Prize)委员会把300万美元的大奖颁给了对发现这个类希格斯粒子作出重要贡献的七位实验家，分别是Peter Jenni, Fabiola Gianotti (ATLAS), Michel Della Negra, Tejinder Singh Virdee, Guido Tonelli, Joe Incand-

la (CMS) 和 Lyn Evans (LHC)。2013年7月，欧洲物理学会又把具有“诺贝尔奖风向标”的高能与粒子物理学奖颁给了ATLAS与CMS两个合作组以及三位作出重要贡献的实验家 Michel Della Negra, Peter Jenni 和 Tejinder Virdee。其实，相关理论家的获奖要早得多。Englert, Brout 和 Higgs 三人在9年前就荣获声誉仅次于诺贝尔奖的Wolf物理学奖(2004)；而美国物理学会又把2010年的理论物理 Sakurai 奖发给了与此相关的六位理论家 (Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble)。

到了2013年夏天，国际高能物理界一致预期2013年的诺贝尔物理学奖发给希格斯粒子或者希格斯机制(亦称BEH机制)已经没有任何悬念，具体问题是颁发给谁：是理论家？还是实验家？还是两者的组合？此疑难的谜底终于由瑞典皇家科学院在10月8日揭晓：弗朗索瓦·恩格勒和彼得·希格斯。诺贝尔奖委员会的颁奖贺辞中说，他们的获奖是因为“发现了一个理论机制，对人类理解基本粒子的质量起源作出了贡献；这个机制预言的粒子最近被CERN大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS和CMS实验发现所证实”^[2-6]。这一诺贝尔奖是众望所归，全世界物理同行为之庆贺。唯一的遗憾是，恩格勒的合作者罗伯特·布劳特(Robert Brout)于2011年辞世，不幸与获奖无缘。LHC的这个新发现可能就是科学界已经盼望长达

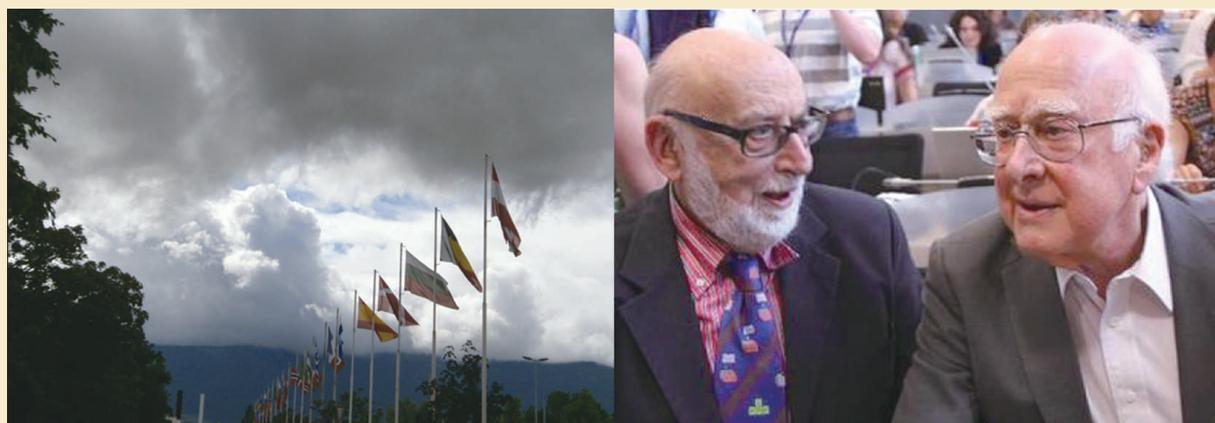


图1 左图是LHC发布会前的周末本文作者之一在CERN拍摄的阳光与乌云交错的天空和衔接云层的山峦，飘扬的彩旗来自参加LHC实验合作的CERN的成员国。右图是2012年7月4日CERN LHC新闻发布会现场恩格勒与希格斯兴奋交谈的情景

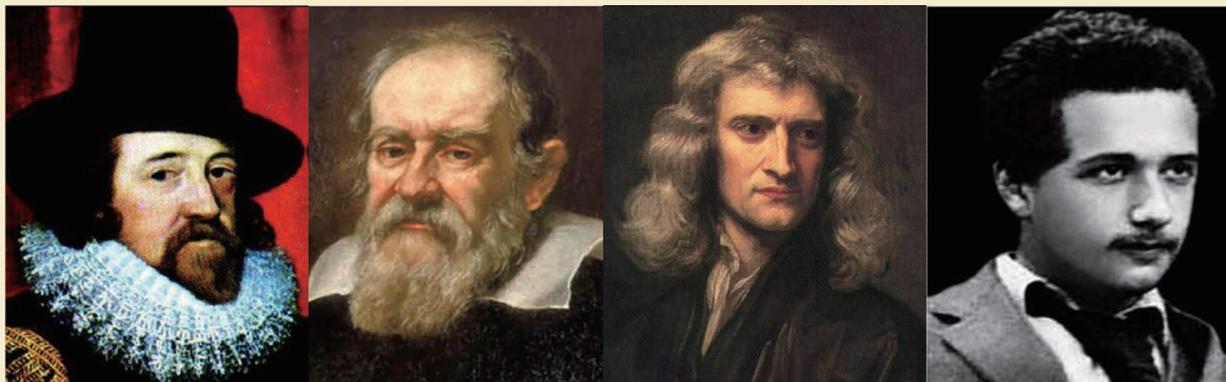


图2 探索质量本质的大师们。从左至右：培根(1561—1626)，伽利略(1564—1642)，牛顿(1643—1727)，爱因斯坦(1879—1955)

45年的“上帝粒子”？从而找到了所有基本粒子质量起源的线索？高能物理学界为了这个革命性发现的到来已经拼搏了近半个世纪，加之LHC两个国际合作组共6000多人的辛勤工作，其科学意义和影响早已大大超出了一个普通诺贝尔奖所能褒奖的范畴。因此，这是一份沉甸甸的诺贝尔物理学奖。CERN主任罗尔夫·霍伊尔(Rolf Heuer)在2012年7月4日的新闻发布会上总结道，“今天是历史性的里程碑，但还只是一个开始。”

2 超越牛顿与爱因斯坦：质量如何起源

质量是什么？质量是怎样起源的？这个如此基本而又古老问题至今仍是未解之谜。

关于质量概念的科学定义可以追溯到弗兰西斯·培根(Francis Bacon)1620年出版的《新工具》一书，他把质量定义为物体所含物质的多少。牛顿(Isaac Newton)在《自然哲学之数学原理》一书中首次引入了惯性质量的概念，定义为物体惯性大小的量度。牛顿第二定律表明， $F = ma$ 或 $m = F/a$ ，即可对不同物体施以同样的力 F ，从它们获得加速度 a 的大小来测定质量大小。这种确定物体质量的方法就是根据惯性大小来量度的，故所测质量称为“惯性质量”。质量的另一重要属性是量度物体引力作用的大小，表现出这一属性的质量称为“引力质量”。牛顿万有引力定律揭示，任何两物体之间都有引力作用，其方向沿两物体(质点)连线，大小与两物体质量 m_1 和 m_2 乘积

成正比，与两者距离 r 的平方成反比： $F = G_N m_1 m_2 / r^2$ ，其中 G_N 为万有引力常数，质量 m_1 和 m_2 是引力之源，反映引力作用的大小，称为“引力质量”。惯性质量和引力质量均是对“物质的多少”这一关于质量的基本内涵的刻画。牛顿从自由落体实验和单摆实验中推断了引力质量与惯性质量的等价性。爱因斯坦(Albert Einstein)通过对自然界的敏锐洞察，由这个等价性出发推广了相对性原理，于1916年创建了广义相对论，奠定了现代物理学与宇宙学大厦的基础。在此理论中，惯性质量与引力质量的严格等价性表明，引力的本质是一种惯性力。广义相对论在今天看来也只是一个有效理论，但依然是人类科学史上一个登峰造极之作。

牛顿力学中不存在零质量的粒子，因为零质量在经典意义上意味着“物质的量”为零，即什么也没有。但是，1905年爱因斯坦构建的狭义相对论是又一个划时代的杰作，它预言了以光速传播的粒子均有等于零的静止质量，并揭示了质量与能量的本质联系，由爱因斯坦震惊世界的方程式所刻画： $E = mc^2$ 或 $m = E/c^2$ ，后者可以作为对粒子等效质量(常称动质量)的定义；很显然， $m = E/c^2$ 与粒子的运动速度有关。换言之，应该用粒子包含的能量来刻画“物质的量”。静止质量为零的粒子(如光子)永远以光速运动，因此具有非零的能量，从而包含非零的“物质的量”： $m = E/c^2$ 。

狭义相对论揭示，能量 E 表征粒子所含物

质的量($m = E / c^2$), 但它与粒子在具体过程中的运动速度相关, 故不是普适常量。静止质量才是真正描述基本粒子内禀特性的普适常量。粒子静止质量的平方等于其四维动量的平方, 它是洛伦兹群的一个基本不变量, 独立于参考系选取或粒子的运动状态。仅仅知道这些还远远不够, 我们要问: 为什么自然界中有些粒子(如光子)的静止质量恰好严格为零? 而另一些粒子(如电子)却具有非零静止质量? 这些非零静止质量是如何起源的? **这是牛顿力学与爱因斯坦相对论均无法回答的跨世纪难题!**

基本粒子物理学的“标准模型”

是描述宇宙中电、弱、强三种基本相互作用力的理论, 从上世纪50年代发源以来取得了惊人的成功。物理学家们为建造和奠定标准模型所做的系列工作已先后获得18次诺贝尔物理学奖。这个理论包含两大基本对称性: 时空对称性(即洛伦兹对称性)和内部对称性(即规范对称性)。洛伦兹对称性是时空中的一种整体对称性, 它不对应于任何基本作用力。而规范对称性是关于粒子系统内禀空间的局域对称性, 每一种规范对称都对应于一种相互作用力。表征标准模型的强、弱、电三种基本作用力的规范对称群是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, 通常简称“321”对称性。看来自然界非常喜欢简单与优美, 而且异常节俭。他用3个最小自然数来刻画自然界中三种基本作用力: (1, 2, 3) 分别对应于电磁力、弱力和强力; 传递这三种力的粒子是自旋为1的规范玻色子, 分别称为光子(γ)、弱中间玻色子(W^+ , Z^0)和胶子(g)。所有参与相互作用的物质粒子是自旋1/2的费米子, 包括三代夸克[(u, d), (c, s), (t, b)]、轻子(e, μ , τ)和中微子(ν_e , ν_μ , ν_τ)。其中夸克(quark)带分数电荷(+2/3, -1/3) e , 轻子(lepton)带电荷 $-e$ (这里 e 为电子电荷的绝对值), 中微子(neutrino)为电中性; 这说明夸克和轻子参与电磁规范作用, 而中微子不发光, 只参加弱规范作用。此外, 夸克和

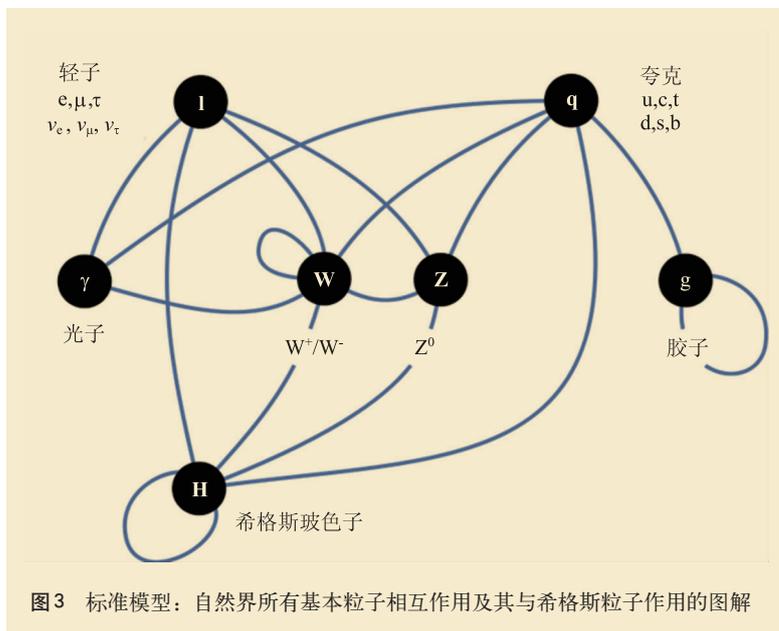


图3 标准模型：自然界所有基本粒子相互作用及其与希格斯粒子作用的图解

轻子均参与弱规范作用, 只有夸克享用强规范作用。我们在图3中对此作了直观表述, 其中的每一条连线各自代表它所连接的费米子(夸克、轻子)或者希格斯粒子与某一种规范玻色子发生相互作用。同一粒子上的封闭曲线表征该粒子自作用。

电磁力由著名的麦克斯韦方程定量描述。1929年, 数学家与理论物理学家赫尔曼·外尔(Hermann Weyl)发现这组方程具有阿贝尔 $U(1)$ 局域规范对称性^[7]。理论家们在20多年后把它成功地发展为量子电动力学(QED, 1965年诺贝尔奖)^[8]。60—70年代, 理论家们逐步发现强力和弱力都是非阿贝尔规范作用^[9]的不同表现形式。强力是 $SU(3)$ 的规范理论, 称为量子色动力学(QCD, 2004年诺贝尔奖)^[10]; 弱作用与电磁作用由规范群 $SU(2) \times U(1)$ 统一描述, 称为电弱统一理论(1979年诺贝尔奖)^[11-13]。引力也被确认为定域规范理论, 而且是一种最复杂的规范理论, 至今尚未找到成功的量子引力方案。任何规范对称性均要求相应的规范玻色子的质量严格为零, 除非它因某种原因被破缺。麦克斯韦方程组的电磁规范对称性确保光子质量严格为零。传递强力的胶子和传递引力的引力子质量为零, 也是由于其相应的规范对称性所要求。

标准模型规范群 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 完全确定了一切自旋 1/2 物质粒子通过交换三类规范粒子所发生的相互作用。这些物质场均有非零质量。1930 年理论物理大师泡利(Walfgang Pauli)提出中微子时假设其质量为零, 实验家们经历了将近 70 年的努力, 终于在 1998 年通过大气中中微子振荡实验首次发现了中微子具有微小非零质量, 大小为 0.1 eV 量级, 大约是电子质量的 500 万分之一。但是标准模型中由于规范对称性的限制, 所有物质粒子均无法获得质量。这是因为自旋 1/2 费米子具有手征性(左手与右手), 对应于自旋投影的两个分量, $+1/2$ 和 $-1/2$; 左手费米子处于弱作用规范群 $SU(2)$ 二重态, 右手费米子为 $SU(2)$ 单态。无法形成满足弱规范对称性的质量项, 所以其质量为零。值得强调, 弱作用力是短程力, 因而其弱规范玻色子(W^\pm, Z^0)具有非零质量, 大约为 (80 GeV, 92 GeV) (1983 年诺贝尔奖)^[14]。这意味着弱规范群必须被破缺。然而在此规范理论中人为放入(W^\pm, Z^0)质量项和费米子质量项会在量子修正计算中产生困难, 使理论不可重整化。这与电磁作用和强作用恰恰相反, 其规范粒子(光子和胶子)质量严格为零, 费米子的左右手分量参加相同的规范作用因而允许具有非零质量。因此我们要问: 为了符合实验观测结果, 怎样才能使得弱规范玻色子和所有费米子获得质量呢?

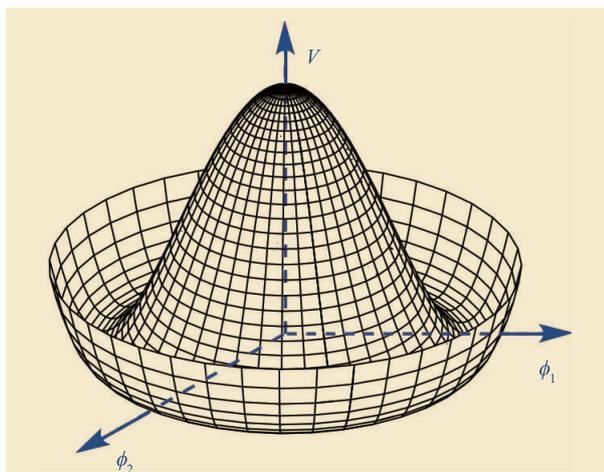


图4 希格斯势阱 $V(\phi)$: 物理真空处于最低能量态, 导致对称性自发破缺

3 真空与对称性破缺: 南部的遗憾与希格斯们的幸运

解开弱规范玻色子和所有费米子质量起源的关键线索来自对称性自发破缺(spontaneous symmetry breaking)的重要概念。这个概念源于 1950 年的 Ginzburg—Landau 超导理论(2003 年诺贝尔奖)^[15]和 1957 年的 BCS (Bardeen—Cooper—Schrieffer)超导理论(1972 年诺贝尔奖)^[16]。1961 年, 著名理论家南部阳一郎(Yoichiro Nambu)从对超导性和 BCS 理论的研究中发现了对称性自发破缺的关键概念, 并首次在相对论性量子场论中给予定量表述, 提出了动力学模型(即 Nambu—Jona—Lasinio 模型)^[17]描述对称性自发破缺(2008 年诺贝尔奖), 实现了费米子配对的真空凝聚, 预言了零质量的南部—戈德斯通(Nambu—Goldstone)粒子, 这是连续整体对称性自发破缺的直接后果, 通常称为戈德斯通定理^[18]。1961 年, 南部与约纳-拉西尼奥(G. Jona-Lasinio)把这个机制应用于强作用的低能有效理论, 分析核子(整体)手征对称性的自发破缺, 推导了产生核子质量的能隙方程, 成功解释了 π 介子作为南部—戈德斯通玻色子比核子具有更轻的质量^[17, 19]。

南部在 1959 年 7 月 23 日寄给 *Phys. Rev.* 杂志的一篇文章中系统研究了超导中电磁规范不变性问题^[20], 但是他没有注意到规范对称性的自发破缺, 即著名的迈斯纳(Meissner)效应^[21], 实质上是超导体内的光子因电磁规范对称性自发破缺获得了质量, 使得外磁场进入超导体时发生指数衰减^[22]。所以, 南部那时是距离发现“希格斯机制”和“希格斯玻色子”最近的理论家, 他只差一小步, 非常遗憾地错过了这一机会, 不然这两个学名需要更名为“南部机制”和“南部玻色子”。值得提到的是, 南部正好是恩格勒—布劳特和希格斯于 1964 年夏天先后投到 *Phys. Rev. Lett.* 期刊上的两篇论文^[2, 3]的审稿人, 是他在评审报告中请希格斯说明其论文与恩格勒—布劳特论文的关系, 于是希格斯才注意到恩格勒—布劳特

的独立工作，并在论文中对此加了一个脚注^[23]。很显然，*Phys. Rev. Lett.* 期刊的编辑选对了审稿人，南部迅速理解了这两篇文章及其物理意义，给予了公正评判，这也是恩格勒—布劳特和希格

斯的幸运。我们无法知道南部当时审阅这两篇论文的心情，他是否为自己早在五年前提出的研究超导体电磁规范不变性的论文^[20]中错过这一重大发现而遗憾呢？南部在2008年的诺贝尔奖演讲稿中提到^[24]，“BCS理论也能解释电磁场的伦敦质量的产生。这个问题通过希格斯标量场变得简单。”由此看来，后来南部的确领悟了BCS超导中发生的电磁场获得质量的希格斯机制，这就是电磁 $U(1)$ 规范对称性的自发破缺。

在相对论性量子场论体系中，连续整体对称性自发破缺最简单的实现是考虑可重整的复标量场 ϕ 的势能函数 $V(\phi) = -\mu^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$ ，选取它的二次质量项与四次自作用项反号，从而导致势函数在基态(能量最低态)偏离原点，位于非零真空凝聚 $\langle\phi\rangle \neq 0$ ，如图4所示。沿着简并真空基态的激发产生零质量南部—戈德斯通玻色子，而沿着 ϕ 场的径向激发产生质量不为零的希格斯玻色子。注意到标量势函数 $V(\phi)$ 具有某种连续整体对称性，而系统的真空基态因标量场凝聚 $\langle\phi\rangle \neq 0$ 导致了对称性自发破缺。图4中的原点保持系统的对称性，但已成为一个势能极大值点，无法稳定，系统的基态将位于势阱的一个特殊位置，处于最低能量的简并真空态，从而破坏了整体对称性。沿着势阱低谷的简并真空态的激发对应于零质量的南部—戈德斯通玻色子。需要强调，希格斯场产生的凝聚 $\langle\phi\rangle \neq 0$ 遍布整个宇宙真空。在真空中传播的粒子(如弱规范玻色子、夸克和轻子)只要与希格斯场发生耦合，就不得不因“粘滞”效应变慢速度并获得非零质量。

早在49年前，三个研究组^[2-4]分别考察了这个标量场耦合到规范场的后果，他们的分析表明：零质量南部—戈德斯通玻色子转换为规范场

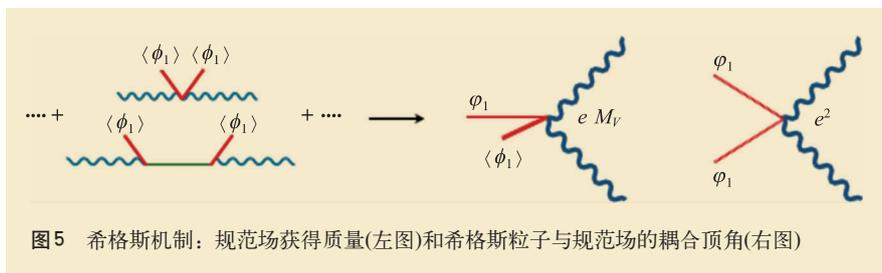


图5 希格斯机制：规范场获得质量(左图)和希格斯粒子与规范场的耦合顶角(右图)

的纵向极化分量，于是给规范场产生非零质量。这个巧妙的机制一箭双雕：不仅消除了严格零质量的南部—戈德斯通玻色子，而且使规范粒子获得质量，规范力因此变为短程力。这就是著名的“希格斯机制”(见图5)。理论物理大师史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)1967年^[11]率先将希格斯机制引入电弱相互作用，给出弱规范玻色子质量，完成了电弱统一理论。虽然文献[2—4]包含6位理论家，但因一些偶然的历史因素，这个机制被冠以英国人彼得·希格斯的名字^[25]。

4 上帝粒子的诞生与LHC的新突破

恩格勒—布劳特和希格斯等人的文章^[2-4]既未研究电弱理论弱规范玻色子的质量产生，也未分析费米子质量的产生。标准模型中所有费米子的质量是通过与希格斯场的汤川相互作用(Yukawa interaction)^[19]产生的，这是温伯格1967年论文率先提出的^[11]。正是因为标准模型的希格斯粒子同时给出弱规范玻色子和所有费米子(夸克、轻子和中微子)的质量，才成为名符其实的“上帝粒子”。所以，预言“上帝粒子”，温伯格居功至首。但是，汤川相互作用也是标准模型中最不可靠的地方之一，因为它的任意性太大，每一种费米子都有独立的汤川耦合常数，完全是自由参数，只有输入费米子质量的实验值才能确定。1973年，小林诚(Makoto Kobayashi)和益川敏英(Toshihide Maskawa)表述了标准模型三代费米子质量矩阵对角化诱导的带电弱规范流包含的 3×3 混合矩阵，揭示了唯一一个可观测CP相位，成为标准模型的一个要素，被实验证实(2008年诺贝尔奖)^[26]。但是，这并没有对希格斯与费米子的

汤川耦合给出任何检验。

值得注意的是，标准模型希格斯场的非零真空凝聚 $\langle\phi\rangle$ 由刻画弱作用力的费米常数 G_F 唯一确定： $\langle\phi\rangle = (2\sqrt{2} G_F)^{-1/2} = 174 \text{ GeV}$ 。这恰好是弱规范玻色子质量的尺度，即 10^2 GeV 量级。费米常数 G_F 是标准模型中唯一具有质量量纲的参数。(另一个具有质量量纲的基本常数来自于刻画引力相互作用的牛顿引力常数 $G_N = 1/M_P^2$ ，它确定了普朗克能量尺度 $M_P = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$ ，这是自然界已知的最高能量尺度。)在标准模型中，希格斯场的一个基本特征是保证高能散射 S 矩阵元的么正性，由此么正性可进一步推导出希格斯粒子质量的上限为 $(32\pi/3)^{1/2} \langle\phi\rangle = 10^3 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV}$ [27]。所以电弱对称性破缺机制中新物理出现的尺度应该低于这个上限。由此 LHC 的对撞机能量需要设计在 TeV 能量尺度，因为必须保证 LHC 发现或排除希格斯粒子，并探索电弱对称性破缺机制的新物理。2012 年春清华组研究了标准模型电弱规范群的一个最小推广 $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$ (称为 221 模型) [28]，能够给出 125 GeV 质量的轻希格斯粒子，还预言了超标准模型的新规范粒子 (W' , Z') 和第二个较重电中性希格斯粒子 H ，导出 H 质量上限为 1.8 TeV 。我们揭示了新规范粒子与希格斯粒子的“共同参与机制”，它保证理论的么正性 [28]。

保证电弱理论的可重整性是希格斯机制的另一个重要性质，即在微扰圈图展开的每一阶，都可以系统地消除紫外发散，无需树图拉格朗日量 (Lagrangian) 以外的新抵消项。理论家特霍夫特 (Gerard 't Hooft) 和维尔特曼 (Martinus J. Veltman) 在 1971—1972 年期间率先完成了电弱统一理论的量子化与重整化证明 (1999 年诺贝尔奖) [29]，标准模型由此成为粒子物理学的正统理论，并成功经受了大量精确实验数据的考验，其预言的粒子谱也逐一得到证实 [30]。

标准模型中弱规范玻色子质量产生的一个本质特征是其纵向极化分量成为第三个可观测物理自由度。规范对称性自发破缺可以通过关于 S 散射矩阵元的一个斯拉夫诺夫—泰勒 (Slavnov—Tay-

lor) 恒等式进行定量表述 [31]。原始规范不变性要求弱规范粒子的非物理标量分量与被该规范粒子“吃掉”的南部—戈德斯通玻色子发生“囚禁”，从而对物理 S 矩阵元不产生可观测效应，这恰恰是希格斯机制的定量表征 [31]。在极高能极限下可以证明，弱规范玻色子纵分量的散射振幅等于相应南部—戈德斯通玻色子散射振幅，这一重要性质称为“等价定理” (Equivalence Theorem) [31, 32]。它成为 LHC 上通过弱规范玻色子纵分量散射来探索希格斯机制和相关新物理的理论基础。

标准模型中费米子 (夸克、轻子和中微子) 的质量产生是通过希格斯粒子与费米子的汤川相互作用得以实现的。由于没有可信的基本原理迫使希格斯粒子与费米子耦合，费米子完全可能通过其他新物理机制获得质量，但是这个新物理发生的能量标度在哪里？与模型无关的普遍分析是研究包含费米子的 $2 \rightarrow n$ 散射过程 [33]，我们导出所有费米子质量产生标度的新上限为 $3\text{—}170 \text{ TeV}$ [33]，均在 TeV 能区。这比费米子质量产生标度的传统上限 [34] 大大增强，对于电子质量产生的标度上限，我们的新结果比传统结果增强了 200 万倍 [33]。这为目前国际上设计新一代环形高能强子对撞机 ($50\text{—}100 \text{ TeV}$) [35] 以有效地探索所有费米子质量起源提供了可靠的理论基础 [36]。

标准模型的理论结构建造完成于上世纪七十年代初，粒子物理学家们从那时起开始了近四十年的辛勤探索，做出了一系列重大发现，其中所有规范玻色子于 1983 年发现完毕，所有三代费米子于 2000 年发现完毕。最神秘的是自旋为零的被称为“上帝粒子”的标量希格斯玻色子 [2-4]，它最难探测。2011 年 12 月 13 日，LHC 的实验家们终于捕捉到了疑似希格斯粒子的蛛丝马迹，通过双光子衰变道发现 $125\text{—}126 \text{ GeV}$ 区域的事例数比背景明显超出大约 3 个标准偏差。2012 年春夏之间，LHC 在 8 TeV 对撞能量重新运行大约 3 个月后，进一步数据分析结果 [6] 于 7 月 4 日的发布会确认 $125\text{—}126 \text{ GeV}$ 区域发现了新粒子共振峰，超出背景大约 5 个标准偏差。从纯统计学看，这意味着仅有千万分之六的概率来自背景的统计涨落。

在LHC的质子—质子对撞实验中产生标准模型希格斯粒子的一个重要反应是图6所示的夸克圈图诱导的双胶子熔合过程： $gg \rightarrow H$ ，其中顶夸克(t)与希格斯粒子的汤川耦合最强，起主导贡献。发现由此产生的希格斯粒子需要探测其衰变产物。最灵敏的衰变道是双光子道 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 和弱规范玻色子道 $H \rightarrow ZZ^* (\rightarrow 4l)$ ， $WW^* (\rightarrow l\nu l\nu)$ ($l = e, \mu$)，而费米子衰变道 $H \rightarrow bb$ 的实验误差依然很大，在1个标准偏差(68%置信度)内与零信号(背景)完全符合。图7总结了目前两个LHC合作组ATLAS和CMS分别测得的这个新粒子在各主要衰变道与标准模型希格斯粒子的信号比^[37, 38]。ATLAS的结果显示 $H \rightarrow \gamma\gamma$ ， ZZ^* 两个道比标准模型有显著超

出；而CMS的结果与标准模型预言更为接近。因此，目前LHC的数据还不足以确定这个新粒子是否就是标准模型希格斯玻色子，或者是别的新粒子。特别是此粒子在费米子衰变道(除了 $\tau\tau$ 以外)的信号还远未得到证实。

5 展望上帝粒子与新物理定律的革命

我们强调指出，标准模型希格斯粒子参与了三大类基本相互作用：**(1) 希格斯粒子的规范作用**；**(2) 希格斯粒子与费米子的汤川作用**；**(3) 希格斯粒子的自作用(h^3 和 h^4)**。可以对希格斯粒子参与的这三类相互作用进行模型无关的分析和检验^[36]。

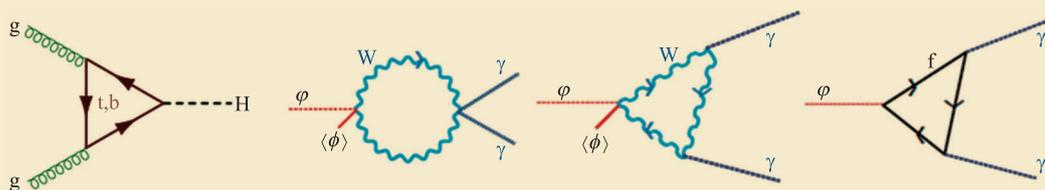


图6 左图是LHC上双胶子熔合(gluon fusion)产生希格斯粒子的费曼图，顶夸克(t)三角图起主要贡献；右边三张图是希格斯粒子衰变到双光子末态的费曼图，最后一张费米子三角图也是顶夸克给予主要贡献

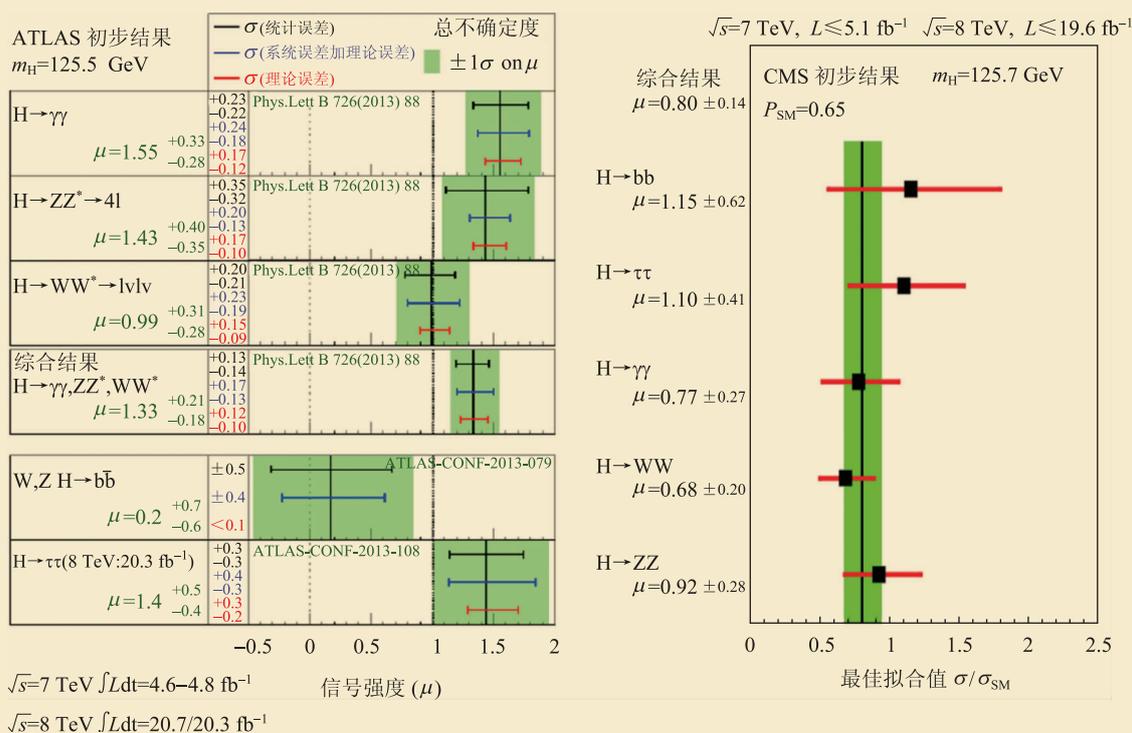


图7 总结ATLAS和CMS已测得的新粒子在各衰变道信号与预期的标准模型希格斯粒子信号之比^[38, 39]

目前LHC在7—8 TeV对撞能量上仅仅对希格斯粒子的第(1)类作用给予了初步检测；但是对于第(2)，(3)类作用还无法给予有效探测。**如何探测希格斯粒子的第(2)，(3)类相互作用是下一代高能对撞机的主要任务^[36]。**

图7表明LHC运行至2012年底(Run-1)的实验数据(每个探测器约25/fb)还不足以甄别这个新粒子是否就是标准模型的“上帝粒子”(希格斯玻色子)。但是LHC将于2015年在14 TeV对撞能量上重新运行，2015—2018年期间(Run-2)将积累75—100/fb的数据；2020—2022期间(Run-3)将积累约350/fb数据；2025—2035年期间，LHC的高亮度升级版实验(HL-LHC)计划将积累约3000/fb的数据量。这将有助于进一步甄别这个新粒子的各种基本性质，特别是与弱规范玻色子和第三代费米子的耦合强度，因为这关系到这些基本粒子的质量如何起源。然而，更为艰巨的任务是测量这个新粒子的自相互作用，鉴定其标量势是否都与标准模型一致。LHC的高亮度升级版实验(HL-LHC, 14 TeV, 3000/fb)仅能探测希格斯粒子自耦合 h^3 到50%的精度^[39]。下一代新的正负电子直线对撞机(linear collider)的建造会对此给出进一步探测^[39—41]，但是500 GeV直线对撞机仅能探测 h^3 自作用到83%的精度。进一步研究发现，下一代高能质子—质子对撞机(50—100 TeV)可以大大提高对希格斯粒子自作用的探测；在100 TeV对撞能量和3000/fb积分亮度下，通过 $gg \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 反应道能够探测 h^3 自作用到8%的精度^[42]。要进一步探索第一代和第二代轻费米子(夸克和轻子)的质量起源，即，它们是否均从与标准模型希格斯粒子的汤川耦合而获得质量，需要在高能对撞下研究 $2 \rightarrow n$ 散射过程(其中 n 体末态由若干规范玻色子组成)^[33]。我们预期^[33, 36]一个能量为50—100 TeV的超级强子对撞机将对此提供有效的探测手段^[35]。

125 GeV希格斯粒子在LHC上的发现成为一个历史转折点，人类由此进入了一个探索质量起源的新时代。那么我们将预期何种超标准模型的新物理呢？理论家们做过大量尝试，然而经得起

推敲的理论却少见。我们列举以下几个新物理前沿方向，它们相当自然、简单和诱人，值得深入思考和研究。

(1)希格斯粒子与引力的相互作用。毫无疑问，标准模型和广义相对论构成了现有物理学大厦最为坚实和成功的理论基础；但是二者均有缺陷，只是在一定范围内成立的有效理论(Effective theory)，必将被更深层次理论所取代。清华组系统研究了这两者交叉结合的有效理论的新物理^[43]，特别是希格斯场与里奇张量(Ricci scalar curvature)的耦合作用， $\zeta H^2 RR$ 。清华组定量导出对希格斯引力耦合常数 ζ 的幺正性上限，比目前LHC通过胶子熔合反应道给出的上限增强达14个数量级^[43]。清华组同时提出在LHC(14 TeV)上通过WW散射实验对希格斯引力耦合作用进行直接检验^[43]，还进一步提出在下一代环形高能pp对撞机(50—100 TeV)上通过WW散射实验对希格斯引力耦合进行更灵敏的探测^[36]。

(2)标度不变的新希格斯机制和暗物质。LHC发现125 GeV的轻希格斯粒子，一个非常自然的解释就是它的质量在微扰展开的领头阶(树图)被标度不变性所禁戒，于是只能通过圈图辐射修正产生(即Coleman—Weinberg机制)，自动保证了希格斯粒子质量很轻；而且标度不变性仅被希格斯粒子质量软破缺，从而为解决希格斯粒子质量精细调节问题(不自然性问题)提供了一个崭新途径^[44]。然而基于Coleman—Weinberg机制标准模型本身却不足以产生125 GeV的希格斯粒子质量，因此必须被扩充。清华组在2013年夏天首次提出了^[45]标度不变的最小现实模型，既给出了与LHC观测一致的125 GeV希格斯粒子质量，又同时预言了两个新的标量粒子：一个是较轻的标度不变性自发破缺导致的赝戈德斯通粒子，另一个是O(TeV)质量的标量暗物质粒子^[45]，后者可以成功解释宇宙中暗物质丰度。这些关键预言都将在LHC(14 TeV)和暗物质直接探测中得到定量检验。

(3)规范群结构的扩充。几乎可以肯定一个更加基本的理论的规范群会超越标准模型的321结

构。清华组最近的工作^[46, 47]提出和研究了规范群的最小扩充“3221”的两类实现,并给出了与目前LHC发现的125 GeV数据吻合的轻希格斯粒子信号,同时预言了第二个较重的非标准模型新希格斯粒子,以及新规范玻色子。这两者都将在LHC(14 TeV)运行中得到系统探测。关于新规范粒子在LHC(8 TeV)上的检验已在文献[48]中给出。

(4)费米子代结构的扩充。为什么仅仅有三代费米子?上世纪70年代初,实验上尚未完成第二代费米子的发现,小林诚和益川敏英就大胆提出了第三代费米子假说,直到2000年才完全得到证实。那么是否存在第四代费米子?早期研究表明^[49],第四代费米子的存在与电弱精确测量数据很好地吻合,后来更新的数据继续支持该文的分析。2012年初,清华组进一步研究了^[50]第四代费米子模型(含两个希格斯二重态),预言的希格斯粒子信号与LHC于2012年7月份发布的实验结果^[6]一致。

(5)宇称恢复,物质与暗物质的共同起源,LHC新希格斯粒子信号。自然界的一切物质由引力与强、弱、电四种基本规范力支配,但唯有弱力对物质粒子(费米子)的左右手分量偏爱不一,破坏了宇称^[51, 52]。宇称是一种空间镜像对称性。探索宇称的自发破缺是一个诱人的前沿研究方向。清华组独立建立了一个宇称恢复及其自发破缺的新方案^[53],论证恢复宇称的镜像世界(mirror world)中的镜像物质恰好提供了质量为GeV量级的新暗物质候选者,这正是中国锦屏暗物质探测实验(CDEX)^[54]的高纯锗探测器所灵敏的质量区域,其预言正在得到CDEX实验的直接检验^[53]。与此同时,恢复的宇称保持我们的世界与镜像世界两者的CP相位相等,从而通过中微子seesaw与leptogenesis机制实现物质与镜像暗物质的共同起源^[53]。此理论还预言了LHC上可检验的希格斯粒子信号,包括目前LHC发现的125 GeV的轻希格斯粒子和一个较重的新赝标量希格斯粒子^[53];这将在LHC(14 TeV)上得到进一步检验。

以上几个新物理方向全是依据现有的实验事实和可信的理论论证,对标准模型进行的几种相当自然的最小推广,能够给出可以定量检验的新

物理预言。我们把它们称之为**保守的新物理**。

展望未来,我们对LHC进一步发现新物理和揭示自然界新物理定律保持乐观。值得反思的是,标准模型的希格斯粒子通过汤川作用产生所有费米子质量是相当任意的,每一种费米子都有各自的汤川耦合常数,无法从基本原理确定,只能由输入费米子质量实验值反过来推出汤川耦合常数,这与普适的规范耦合常数完全不同。例如,顶夸克与电子的汤川耦合常数之比等于其质量比: $m_t / m_e = 3 \times 10^6$,为百万分之三!为什么电子的汤川耦合常数如此微小?因此,标准模型希格斯粒子作为“上帝粒子”提供所有基本粒子的质量起源是非常牵强的,还远不是最终答案。文献[33]通过系统研究发现,自然界所有费米子质量产生标度的模型无关的普适上限均位于3—170 TeV能区,这为下一代高能对撞机探索费米子质量起源及相关新物理提供了重要理论依据。

不仅如此,标准模型无法提供占宇宙中全部物质83%的暗物质,而已知标准模型粒子组成的可见物质仅占宇宙物质的17%。而且,宇宙密度的72%由同样神秘的暗能量充当。暗物质粒子必须是某种非标准模型的未知新粒子。宇宙中暗物质与暗能量的本质是什么?作为质量起源的上帝粒子是否与如此巨大的暗物质和暗能量有本质联系?上帝粒子究竟在宇宙中扮演什么样的终极角色?相当可能,真正的“上帝粒子”不是标准模型假设的最简单的希格斯粒子。

人类真的“读懂”大自然了吗?人类能够真正“读懂”大自然吗?

爱因斯坦相信,物理学家的终极目标就是要“读懂”上帝的思想^[55]。与艺术家很不相同,物理学家的首要任务不是去“创造”,而是“理解自然”和“发现自然”。对于物理学家来说,大自然是一本精美而艰深的书,上面的密码记载着“上帝”的思想,她等待人类去阅读、理解和发现。很显然,物理学家们还远未真正读懂大自然这本博大精深的书,远未彻底理解大自然的思想。品味和风格对于一流艺术家来说是致命的重要。现代艺术家创作中的想象力、感受力、选题

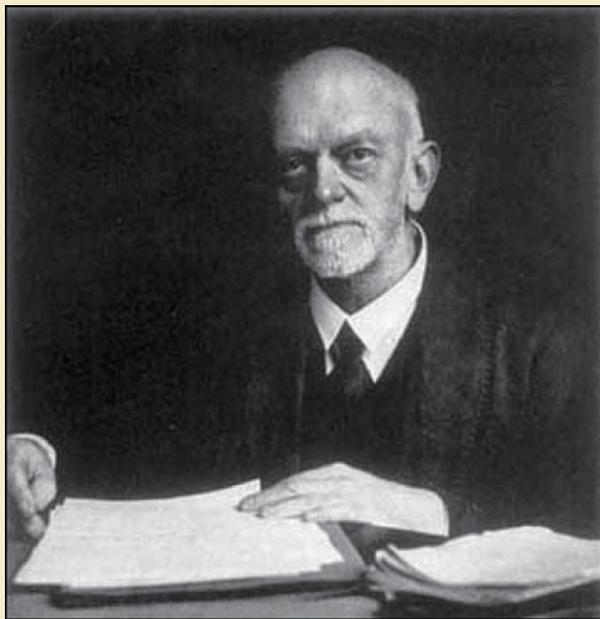


图8 大卫·希尔伯特(1862—1943):“我们必须知道,我们必将知道!”右图中这句镌刻在希尔伯特墓碑上的充满激情与斗志的宣言将永远激励后人

和表现手法都是致命的要素,然而,对于物理学家来说却远远不够。因为物理学家的创作还必须遵从“上帝”的意志,这个“上帝”就是真实存在的大自然。形象地讲,物理学家探索与创作的终旨就是要倾听大自然的声音,追寻大自然的呼吸,记录和整理大自然的思想。

物理学与数学的交叠有着源远流长的历史。17—18世纪间这两个分支的结合在牛顿(1643—1727)身上达到了登峰造极的成功。牛顿也许是科学史上第一位和最后一位融合一流的实验物理、理论物理与数学研究为一体的科学大师。随后三百多年来科学探索深入细致的发展导致它们成为相对独立的学科。然而必须注意到,理论物理与数学的深刻联系和相互依存及促进仍然具有致命的重要性。20世纪伟大的数学家大卫·希尔伯特(David Hilbert, 1862—1943)成为数学家关注物理学的一个光辉典范,他单单以其对广义相对论(爱因斯坦—希尔伯特作用量)和量子力学(希尔伯特空间)的两项贡献就足以在物理学界名留青史,超越任何一份诺贝尔奖的水准。不仅如此,希尔伯特于1900年在巴黎国际数学家大会上题为《数学

问题》的著名演讲中提出的23个最重要的数学问题为二十世纪数学的发展产生了深远的影响和巨大推动。一百多年来这23个难题的绝大部分在众多数学精英的奋斗下逐一获得突破和解决。这样的历史经验对理论物理学家们也许是一个鼓舞,虽然理论物理学家面临更为艰巨的形势,因为要首先定义什么是理论物理中有真正价值和希望的难题本身就是一个艰深的难题;而且无论何等美妙的物理理论都必须接受大自然这个上帝的考验与仲裁,而非仅仅遵循单纯逻辑的推演。虽然如此,还是令人想起了希尔伯特在退休演说中发表的著名宣言,它印刻在希尔伯特的墓碑上(见图8),“Wir müssen wissen. Wir werden wissen”^[55]。中文翻译表述为:

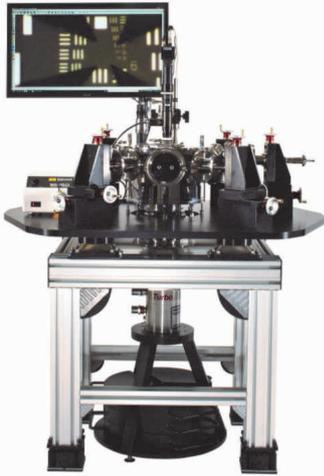
我们必须知道,我们必将知道!

在LHC作出第一个革命性发现的破晓黎明,在21世纪初叶粒子物理学的转折点上,在2013年这份迟到的诺贝尔物理学奖的一丝欣喜之中,我们谨以大卫·希尔伯特这句充满激情与斗志的宣言结束本文。

参考文献

- [1] Lederman L M, Teresi D. *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question*. Boston: Houghton Mifflin Company, 1993
- [2] Brout R, Englert F. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 13: 321
- [3] Higgs P W. *Phys. Lett.*, 1964, 12: 132; *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13: 508
- [4] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13: 585
- [5] Anderson P W. *Phys. Rev.*, 1963, 130: 439
- [6] ATLAS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, 716: 1; CMS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, 716: 30
- [7] Weyl H. *Z. Phys.*, 1929, 56: 330
- [8] Tomonaga S. *Prog. Theor. Phys.*, 1946, 1: 27; Schwinger J. *Phys. Rev.*, 1948, 73: 416; Feynman R P. *Phys. Rev.*, 1949, 76: 769. 他们三人因建立QED而分享了1965年诺贝尔物理学奖。
- [9] Yang C N, Mills R L. *Phys. Rev.*, 1954, 96: 191; Straumann N. *Space Sci. Rev.*, 2009, 148: 25, arXiv: 0810.2213
- [10] 关于建立QCD的决定性突破是1973年发现紫外渐进自由(2004年诺贝尔物理学奖): Gross D J, Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30: 1343; Politzer H D. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30: 1346
- [11] Weinberg S. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 19: 1264
- [12] Salam A. *Elementary Particle Physics*. edited by N. Svartholm. Stockholm: Almquist and Forlag, 1968
- [13] Glashow S L. *Nucl. Phys.*, 1961, 22: 579
- [14] C. Rubbia 和 S. van der Meer 因1983年从实验上发现电弱统一理论(见文献[10—12]) 预言的弱规范中间玻色子(W^+ , Z^0)而荣获1984年诺贝尔物理学奖。
- [15] Ginzburg V L, Landau L D. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1950, 20: 1064
- [16] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. *Phys. Rev.*, 1957, 108: 1175
- [17] Nambu Y. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, 4: 380; Nambu Y, Jona-Lasinio G. *Phys. Rev.*, 1961, 122: 345; *Phys. Rev.*, 1961, 124: 246. Nambu 因此分享了2008年诺贝尔物理学奖。
- [18] Goldstone J. *Nuovo Cimento*, 1961, 19: 154; Goldstone J, Salam A, Weinberg S. *Phys. Rev.*, 1962, 127: 965
- [19] 值得提到, π 介子是汤川秀树(H. Yukawa)在1935年预言的传递核力的介子, 可参见文献: Yukawa H. *Proc. Phys. Math. Soc. Jap.*, 1935, 17: 48. 实验家在1947年终于发现 π 介子, 汤川秀树因此荣获1949年诺贝尔物理学奖。值得强调的是, 虽然 π 介子作为夸克的束缚态并非真正的基本粒子, 但是它与费米子(核子)的汤川型相互作用后来被推广到标准模型中产生轻子和夸克的质量(见文献[11]), 成为与规范力完全不同的
- 一种新相互作用。
- [20] Nambu Y. *Phys. Rev.*, 1960, 117: 648
- [21] Meissner W, Ochsenfeld R. *Naturwissenschaften*, 1933, 21: 787
- [22] Ranninger J. *The Conceptual Heritage of Superconductivity— from Meissner—Ochsenfeld to the Higgs Boson*. arXiv: 1207.6911
- [23] Higgs P M. Nobel Lecture “Evading the Goldstone Theorem.” Dec-8, 2013, Stockholm, Sweden; the talk “My Life as a Boson”. Nov-24, 2010, Kings College London, UK
- [24] Nambu Y. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81: 1015
- [25] Weinberg S. *The Crisis of Big Science*. In: *The New York Review of Books*, May 10, 2012; *Nature*, 2012, 483: 374
- [26] Kobayashi M, Maskawa T. *Prog. Theor. Phys.*, 1973, 49: 652. 二人因此分享了2008年诺贝尔物理学奖的另一半。关于文中提到的CP相位, 其中C表示电荷共轭变换, 它把粒子变换为反粒子; P是空间反演变换, 亦称为宇称。
- [27] Dicus D A, Mathur V S. *Phys. Rev. D*, 1973, 7: 3111; Lee B W, Quigg C, Thacker H B. *Phys. Rev. D*, 1977, 16: 1519
- [28] Abe T, Chen N, He H J. *JHEP*, 2013, 01: 082 [arXiv: 1207.4103]
- [29] 't Hooft G. *Nucl. Phys. B*, 1971, 35: 167; 't Hooft G, Veltman M J G. *Nucl. Phys. B*, 1972, 44: 189; *Nucl. Phys. B*, 1972, 50: 318. 二人因此荣获了1999年诺贝尔物理学奖。
- [30] 1971—2012年间实验家们先后发现了第二代费米子中的粲夸克(1974年发现, 获1976年诺贝尔奖), 第三代费米子中的 τ 轻子(1974—1977年发现, 获1995年诺贝尔奖), τ 中微子(2000年发现), 底夸克(1977年发现)和顶夸克(1995年发现), 以及弱规范玻色子(1983年发现, 获1984年诺贝尔奖), 和标准模型的最后一个粒子——希格斯粒子(2012年发现, 获2013年诺贝尔奖)。
- [31] He H J, Kuang Y P, Yuan C P. *DESY-97-056 and arXiv: hep-ph/9704276* (p. 1-116); He H J, Kuang Y P, Li X. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69: 2619; *Phys. Rev. D*, 1994, 49: 4842; *Phys. Lett. B*, 1994, 329: 278; He H J, Kuang Y P, Yuan C P. *Phys. Rev. D*, 1995, 51: 6463; He H J, Kilgore W B. *Phys. Rev. D*, 1997, 55: 1515
- [32] Cornwall J M, Levin D N, Tiktopoulos G. *Phys. Rev. D*, 1974, 10: 1145; Lee B W, Quigg C, Thacker H B. *Phys. Rev. D*, 1977, 16: 1519; Chanowitz M S, Gaillard M K. *Nucl. Phys. B*, 1985, 261: 379
- [33] Dicus D A, He H J. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94: 221802; *Phys. Rev. D*, 2005, 71: 093009
- [34] Appelquist T, Chanowitz M S. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 2405
- [35] Wang Y F. *Introduction to CEPC-SPPC*; Zimmermann F. *CERN Future Circular Collider Study*. Plenary talks at International Workshop on Future High Energy Circular Colliders, December 16-17, 2013, IHEP, Beijing, China. Bicer M *et al.* [TLEP Col-

超低温真空探针台



- 无需制冷剂
- 直流, 微波, 光纤
- 4K-800K
- 可增加磁铁
- 多达8个探针臂
- 客户定制
- 模块化设计

实验室低温制冷系统



4K-1100K
光谱学应用



<1.7K冷头
非光学



**Advanced Research
Systems**

Email: ars@arscryo.com

www.arscryo.com

laboration]. First Look at the Physics Case of TLEP. JHEP (2014), in Press, arXiv: 1308. 6176 [hep-ex]

- [36] He H J. Physics Case for Circular Colliders. Plenary talk at International Workshop on Future High Energy Circular Colliders, December 16-17, 2013, IHEP, Beijing, China
- [37] Fiorin L [ATLAS Collaboration]. ATLAS Status Report; Maravin Y [CMS Collaboration]. CMS Status Report. presentations at the 116th LHCC Meeting, December 4-5, 2013, CERN, Geneva
- [38] Jakobs K [ATLAS Collaboration]. Higgs Boson Physics at ATLAS; Roeck A D [CMS Collaboration]. Higgs Physics at CMS. presentations at 26th International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energies (Lepton-Photon-2013), June 24-29, 2013, San Francisco, CA, USA
- [39] 新任直线对撞机项目的主任是林恩·埃文斯(Lyn Evans), 他是领导LHC项目的前任主任。欧洲核子研究中心(CERN)目前正在积极研究和推动紧致直线加速器(Compact Linear Collider, CLIC), 其正负电子对撞能量为3 TeV。另一种流行的直线加速器方案是超导直线加速器ILC, 其对撞能量为0.5 TeV。具体哪种方案会被批准实施将取决于今后3—5年内LHC上进一步发现什么样的新物理粒子。
- [40] Brau J *et al* [ILC Collaboration]. ILC Reference Design Report: ILC Global Design Effort and World Wide Study. arXiv: 0712. 1950 [physics. acc-ph]
- [41] Peskin M E. Comparison of LHC and ILC Capabilities for Higgs Boson Coupling Measurements. arXiv: 1207. 2516 [hep-ph], Snowmass-2013
- [42] Yao W. Studies of Measuring Higgs Self-Coupling with $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ at the Future Hadron Colliders. arXiv: 1308. 6302. In: Proceedings of Snowmass Community Summer Study (CSS), 2013
- [43] Xianyu Z Z, Ren J, He H J. Phys. Rev. D, 2013, 88: 096013
- [44] Bardeen W A. On Naturalness in the Standard Model. FERMI-LAB-CONF-95-391-T
- [45] Farzinnia A, He H J, Ren J. Phys. Lett. B, 2013, 727: 141
- [46] Abe T, Chen N, He H J. JHEP, 2013, 01: 082
- [47] Wang X F, Du C, He H J. Phys. Lett. B, 2013, 723: 314
- [48] Du C, He H J, Kuang Y P *et al*. Phys. Rev. D, 2012, 86: 095011
- [49] He H J, Polonsky N, Su S. Phys. Rev. D, 2001, 64: 053004
- [50] Chen N, He H J. JHEP, 2012, 04: 062
- [51] Lee T D, Yang C N. Phys. Rev., 1956, 104: 254. 吴健雄等人的实验(见文献[52])于1956年底首次证实了李政道和杨振宁关于弱作用宇称不守恒的理论猜想, 李政道和杨振宁因此荣获1957年诺贝尔物理学奖。
- [52] Wu C S *et al*. Phys. Rev., 1957, 105: 1413; Garwin R L *et al*. Phys. Rev., 1957, 105: 1415; Friedman J I, Telegdi V L. Phys. Rev., 1957, 105: 1681
- [53] Cui J W, He H J, Lv L C *et al*. Phys. Rev. D, 2012, 85: 096003; Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser., 2012, 10: 21
- [54] Zhao W *et al* [CDEX Collaboration]. Phys. Rev. D, 2013, 88: 052004
- [55] 爱因斯坦: “I want to know the God's thoughts, the rest are details”(我要知道上帝的思想, 其余都是细枝末节)。
- [56] 这是希尔伯特对一句拉丁文箴言的反语, 原文 Ignoramus et ignorabimus, 即: “我们不知道, 我们不可能知道”。