

特约稿件

2013 年诺贝尔物理学奖介绍：
规范粒子质量的起源

王 青

(清华大学物理系, 北京 100084)

摘 要 主要介绍 2013 年诺贝尔物理学奖的相关情况以及诺奖工作的背景、具体核心内容及后续发展。

关键词 质量起源; 规范相互作用; Higgs 玻色子; Higgs 机制; 对称性自发破缺

INTRODUCTION TO NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2013:
ORIGIN OF GAUGE BOSON MASS

Wang Qing

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract We introduce the backgrounds, detail key content and later developments of this year's Nobel prize in Physics.

Key words origin of mass; gauge interaction; Higgs boson; Higgs mechanism; spontaneous symmetry breaking

2013 年 10 月 8 日, 瑞典斯德哥尔摩时间中午 12 点 45 分(比预告的时间推迟了整整 1 个小时), 诺贝尔奖委员会宣布 2013 年的诺贝尔物理学奖授给 81 岁的比利时物理学家 François Englert 和 83 岁的英国物理学家 Peter W. Higgs, 以表彰他们在发现亚原子粒子质量起源的物理机制方面所做的杰出工作, 这个机制被位于瑞士日内瓦欧洲核子中心的大型强子对撞机 LHC 上的 ATLAS 和 CMS 实验发现的 Higgs 粒子所证实。

1 诺奖的预兆

早在 2000 年, 美国物理学会在粒子物理理论方面的樱井奖(Sakurai Prize)就被授予了与本次诺奖关系最密切的几位物理学家: Kibble, Guralnik, Hagen, Englert, Brout 和 Higgs. 由于诺奖按惯例最多只能授予 3 人, 著名理论物理学家 Luis Alvarez-Gaume 和 John Ellis 随后在 2011 年 1 月的 *Nature Physics* 第 7 卷上发表评论文章, 明确提出谁能最后获得诺贝尔奖的问题。不幸的是, 6 人之中的 Brout 在 2011 年 5 月 3 日提前

离开人世。Brout 比 Higgs 年长一岁, 他 25 岁就成为美国康奈尔大学的教师, 6 年后的 1959 年 Englert 成为 Brout 的博士后。1961 年 Brout 随 Englert 回到比利时布鲁塞尔自由大学, 并一直在那里工作直到去世。虽然他曾于 2004 年与 Englert 和 Higgs 一起分享 Wolf 物理学奖, 并进一步于 2000 年与其他 5 位物理学家荣获樱井奖, 但终未等到最后的诺贝尔奖。

由于诺贝尔物理学奖的工作一定是被实验所证实的, 因此樱井奖的工作能否最后被授予诺贝尔奖还要看实验上进展如何, 也就是是否能够最后真正发现 Higgs 粒子, 因为 Higgs 粒子是确认这些工作所提出的理论机制的最直接的证据。实际上实验物理学家寻找了这个粒子已经有二十多年了, 在粒子物理学界几位理论物理专家特别为这个粒子编写了名为《Higgs Hunter's Guide》的

收稿日期: 2013-12-15; 第 2 稿修回日期: 2013-12-22

作者简介: 王青, 男, 教授, 主要从事理论物理的科研和教学工作, 研究方向为量子场论与基本粒子理论, wangq@mail. tsinghua. edu. cn

探寻指导书,使得这个粒子享有了粒子物理标准模型中所有其他粒子都未曾享有的殊荣. 获 1988 年诺贝尔物理学奖的莱德曼教授为这个粒子专门写过《God Particle》的科普介绍书(据说此书的原名叫《Goddamn Particle》翻译成中文为“该死的粒子”,反映作者对持续找不到此粒子的愤懑情绪. 编辑为避免不雅把英文 Goddamn 的后半部 damn 去掉就变成了现在的名字),使得在社会上“上帝粒子”声名远扬. 2011 年《自然》杂志就“是否可能发现 Higgs 粒子”在部分著名理论物理学家中进行了投票,信者、将信将疑者众说纷纭. 传说霍金不相信能够在实验上发现 Higgs 粒子,为此还与美国密执根大学的凯恩教授打赌 100 美元. 2011 年 12 月 13 日,欧洲核子中心宣布发现找到了 Higgs 粒子的迹象. 2012 年 7 月 4 日,欧洲核子中心正式宣布发现疑似的 Higgs 粒子. 到 2013 年,物理学家们已经确认,所发现的就是寻找已久的 Higgs 粒子,疑似两字被正式去掉了.

为什么发现 Higgs 粒子对此次诺奖工作那么重要? 此次诺奖工作所涉及的亚原子粒子质量起源的物理机制又是什么意思? 我们以下按照历史发展的顺序作简要介绍.

2 诺奖工作的背景

在亚原子范围,目前人类能够了解到的物质最小组分是夸克、轻子、传递相互作用的规范粒子和新发现的 Higgs 粒子. 此次授予诺贝尔奖的工作最主要涉及的是规范粒子质量起源,历史上它因同时解决两种零质量粒子问题而诞生.

在 20 世纪 60 年代,物理学家们已经了解到自然界基本组分间具有四种基本相互作用: 引力作用、电磁作用、强作用和弱作用. 在亚原子领域,引力作用十分微弱,因此通常不考虑它的效应. 对电磁作用,那时人们已经在量子场论的框架下建立了描述它的系统理论——量子电动力学,或叫 U(1) 阿贝尔规范理论. 著名物理学家费曼编写的《量子电动力学》一书就是在 1962 年首次出版的. 剩下两种相互作用——强作用和弱作用都被发现是只限制在原子核内的短程作用,描述它们的量子场论碰到了很多严重的问题,导致在那个时代对量子场论的普遍不信任. 正像物理学家 Victor Weisskopf 于 1960 年在康奈尔的一次报告会上所说: “粒子物理学家这些日子感到很绝望,以至于

只好从多体物理中借用新的东西……”. 而正是这种“借用”(见后面关于南部阳一郎工作的讨论,实际上南部阳一郎本人也觉得当时的粒子物理有点儿表现得像化学了)导致了量子场论和粒子物理的新生. 这种多体导致的基本规律中所没有的层展现象正是获得 1977 年诺贝尔物理学奖的凝聚态大家 P. W. Anderson 所特别强调“多则不同”(more is different)的复杂性现象.

强作用的问题直到 20 世纪 70 年代后才开始逐步被解决,本文不再深入涉及. 以 S. Glashow 为代表的一些物理学家当时发现弱作用可以被化为 20 世纪 50 年代由杨振宁和米尔斯将阿贝尔规范理论推广得到的非阿贝尔规范理论,只要附加要求传递这种规范作用的粒子像早年汤川秀树提出的传递短程核力的 π 介子那样具有一定的质量. 不幸的是非阿贝尔规范理论所具有的规范对称性原本禁戒规范粒子具有质量,因而似乎只能传到长程力. 若强行在理论中人为引入规范粒子的质量,则既会破坏理论赖以为基础的规范对称性,还会导致理论无法像量子电动力学那样可以通过重整化克服高阶计算中出现的发散困难. 这个规范粒子必须零质量是本文前面提到的第一个零质量粒子问题,它是当时新生不久的非阿贝尔规范场面临的主要困难. 因提出不相容原理而获得 1945 年诺贝尔物理学奖的泡利就因为它而强烈质疑非阿贝尔规范场理论没有用处,因为现实世界没有发现相应的零质量粒子. 从今天的角度看人为引入理论以规范粒子质量导致的规范对称性破坏是一种“明显地”规范对称性破缺,逃避这个短处的出路在于将其改进为“自发地”规范对称性破缺. 体现在规范粒子身上就是其质量不是人为放到理论中的,而是理论自发产生的,这个产生的机制就是此次诺奖所涉及的最核心的问题——规范粒子质量的起源. 如何具体实现自发地破缺规范对称性,或自发地产生规范粒子质量? 在 1964 年的诺贝尔物理学奖工作发表之前人们是不清楚的.

在 1964 年诺贝尔物理学奖工作发表之前,关于对称性自发破缺的研究在独立于关于规范粒子质量起源讨论的另一条轨道上并行地发展着. 南部阳一郎在 20 世纪 60 年代初证明了凝聚态中的 BCS 超导态具有对称性自发破缺,并进一步把这个概念及方法引入到了量子场论中,他因此获得 2008 年的诺贝尔物理学奖^[1]. 在量子场论中,人们发现连续对称性若发生自发破缺会产生零质量的

粒子,这被称为 Goldstone 定理^[2],相应的粒子叫 Goldstone 玻色子.在直观图像上,当一个物理体系的最低能态不唯一时,若体系的相互作用具有某种连续对称性,则通过对称性变换可以把某个最低能态变换到其他的最低能态.如果确定某个最低能态为体系的基态(或叫真空态),从基态沿连续对称性变换方向做的无穷小变化相当于把体系变化到体系的另一个最低能态——现在可被称作激发态的状态上,它对应在体系的基态上激发了粒子,由于这个激发态和基态能量相同,这个激发出的粒子一定是无质量的粒子.因此只要有连续对称性自发破缺,就应在物理谱上观测到零质量粒子.由于当时在物理谱中没有看到那么多零质量粒子,这对将连续对称性自发破缺的概念应用于物理体系造成困难,这被看作本文前面提到的第二个零质量粒子问题.第二个零质量粒子问题除了下节将要介绍的此次诺奖工作给出的解决方案外,还有另一个解决方案是由南部阳一郎提出的(也是其 2008 年诺贝尔奖工作的一部分),即,使对称性具有一点点的明显破缺,也就是体系的相互作用不再是严格具有某种连续对称性,而只是近似具有这种连续对称性.这样导致的 Goldstone 定理也只是近似地成立,因而它导致的 Goldstone 玻色子也不再严格是零质量的粒子,而是近似零质量,或者是具有很小质量的粒子.这种粒子被称为赝 Goldstone 玻色子,其特点是质量远低于体系的特征能量尺度.强相互作用的赝标介子在粒子物理上就被解释成这样的粒子,以说明它们远低于强子的典型质量.在超出粒子物理标准模型的新物理理论中,有一类理论模型把目前发现的 Higgs 粒子也解释成为赝 Goldstone 玻色子,以说明它比在 TeV 能区的新物理能标低很多的事实.

3 两种零质量问题的联合解决方案:6 组物理学家的作品

针对第一个零质量问题,获 1965 年诺贝尔物理学奖的 J. Schwinger 在 1962 年首先提出阿贝尔规范场的质量可以通过将它和一个标量场耦合得到^[3].在此基础上,P. W. Anderson 在研究非相对论等离子体时发现上面两个零质量问题碰到一起可以相互抵消,最后衍生出一个有质量的规范粒子^[4].Anderson 从描述迈斯纳效应的伦敦理论

出发发现这个效应实际上是由自旋为 1 的有质量的光子——Anderson 称之为等离子体激元来实现的.和在自由空间传播的无质量光子相比,这个有质量的等离子体激元多出了纵向分量.而这个多出的纵向自由度就来自零质量的 Goldstone 粒子自由度(在本杂志 2013 年第 5 期,笔者专门就在电磁学和电动力学中如何介绍超导发表过专门的文章,详见文献^[5]).Anderson 的工作并未得到粒子物理学家的重视,按照 Higgs 的描述这主要是因为 Anderson 的工作既未指出原有 Goldstone 定理的漏洞在哪儿,又是非相对论的.粒子物理学家们反过来仍在不断试图证明相对论条件下的 Goldstone 定理,虽然后来发现证明总是有这样或那样的漏洞,但在当时却给人们感觉 Goldstone 定理即使在相对论的情形下也确实应该是正确的.

到了 1964 年,3 组开始互不知晓、相互独立工作的物理学家各相隔一两个月共发表了 4 篇文章,在相对论情形下实现了 Anderson 指出的同时解决两种零质量粒子问题的方案.首先是比利时布鲁塞尔自由大学的 F. Englert 和 R. Brout 在 *Physical Review Letters* 上发表的文章^[6]中讨论了阿贝尔规范理论耦合到复标量场的情形.按照标准的理论物理做法,规范作用可以通过在自由的复标量场的拉氏量中把普通微商置换成含规范场的协变微商引入,导致如下复标量场和规范场的相互作用哈密顿量密度

$$H_{\text{int}} = -e^2 \varphi^* \varphi A_\mu A_\mu + ie A_\mu \varphi^* \vec{\partial}_\mu \varphi \quad (1)$$

其中,复标量场 φ 可看作由两个独立的实标量场 φ_1 和 φ_2 组成: $\varphi = (\varphi_1 + i\varphi_2)/\sqrt{2}$. 他们发现若其中一个实标量场 φ_1 (对应激发 Higgs 粒子)因为某种原因发生了玻色-爱因斯坦凝聚 $\langle \varphi_1 \rangle \neq 0$,则理论上原来的相互作用项中可以产生两个新的特殊项:一项是正比于这个凝聚平方的规范场质量项: $-e^2 \langle \varphi_1 \rangle^2 A_\mu A_\mu$;另一项是规范场和另一个实标量场 φ_2 (对应激发 Goldstone 玻色子)的微商的耦合项: $ie \langle \varphi_1 \rangle A_\mu \partial_\mu \varphi_2$,这第二项产生两个效应:

首先产生 Goldstone 玻色子的场 φ_2 的微商 $\partial_\mu \varphi_2$ 和规范场 A_μ 相互直接有耦合,它意味着 A_μ 和 $\partial_\mu \varphi_2$ 可以相互转换.即规范场 A_μ 可以通过这种转换获得一个正比于 $\partial_\mu \varphi_2$ 的项,也就是获得其纵向分量.或者说 Goldstone 玻色子转化成了规范场的纵向分量.这直观地解释了 Anderson 说的两种零质量碰到一起会相互抵消衍生出有质量的规范

粒子这一现象. 因为 Goldstone 玻色子转化成了规范场的纵向分量, 零质量规范场原本就像光子场一样是没有纵向分量的, 现在通过从 Goldstone 玻色子转化过来的纵向分量变成有纵向分量因而有质量的规范粒子, 这就是著名的 Higgs 机制, 它是这项诺奖工作的核心. 或者通俗地说规范场“吃掉了”Goldstone 玻色子获得了质量. 实际上对自发产生规范粒子质量导致的规范对称性自发破缺, 一方面规范粒子获得质量需要具有原来零质量时所没有的纵向分量自由度, 另一方面对称性自发破缺又产生了“多余的”零质量 Goldstone 玻色子自由度. 一需一多, 正好形成互补. 而第二项说明这两个自由度可以互相转化, 实际是一回事.

再者第二项还会对规范粒子的两点格林函数(通常说的传播子)产生贡献. 若没有这一项, 第一项(也就是纯规范场质量项)会导致的规范场传播

子为: $\Delta_{\mu\nu} = \frac{g_{\mu\nu} - \frac{p_\mu p_\nu}{m^2}}{p^2 - m^2}$, 其中, m 为规范场的质量.

这个传播子在大动量区导致的是不衰减的行为

$\Delta_{\mu\nu} = -\frac{p_\mu p_\nu}{m^2 p^2}$, 它是导致有质量的规范场不可重整

的根本原因. 而考虑进第二项, 规范场传播子转而

变为: $\Delta_{\mu\nu} = \frac{g_{\mu\nu} - \frac{p_\mu p_\nu}{p^2}}{p^2 - m^2}$, 它在大动量区导致的是衰

减的行为 $\Delta_{\mu\nu} = -\frac{p_\mu p_\nu}{p^4}$. 这种改进了的大动量行为

使理论的紫外收敛性大大变好, 因此这也播种下理论可重整的种子, 虽然当时的研究尚未达到能证明这种理论可重整的地步(关于可重整的讨论见下节). 遗憾的是 F. Englert 和 R. Brout 的工作重点放在了讨论 Higgs 机制方面, 忽略了对对应激发 Higgs 粒子的那个实标量场的讨论. 这也是这个实标量场的量子激发最后的命名中没有出现 F. Englert 和 R. Brout 名字的原因之一.

然后是英国爱丁堡大学的 P. Higgs 先在 *Physics Letters B* 上发表的文章^[7]中指出在相对论情形下 Goldstone 定理确有漏洞可以不再成立, 为规范粒子获得质量在对称性的意义上奠定了基础, 也说明了本文前面提到的第二个零质量问题在某些情形下可能不存在. 再在 *Physical Review Letters* 上发表的第二篇文章^[8]中针对与 F. Englert 和 R. Brout 相同的相对论性模型进行讨论. 在此文章中, Higgs 通过重新定义明确地写

下了吃掉 Goldstone 玻色子获得质量的规范场, 并且特别地针对激发 Higgs 粒子的那个实标量场进行了仔细讨论, 给出了其运动方程和它的质量的表达式. 这是这个场的激发之所以被取名“Higgs 粒子”的重要原因. 到此为止, 涉及规范粒子质量起源的核心内容就都基本齐全了: 标量场的两个自由度, 一个自由度一方面产生玻色-爱因斯坦凝聚导致对称性自发破缺, 另一方面激发出有质量的 Higgs 粒子; 另一个自由度作为 Goldstone 玻色子变成了规范场的纵向自由度使规范场获得质量. 由于这两个自由度原本是通过理论的 U(1)规范对称性相互关联转化的, 因此它们之间有内在联系. 纵然现在对称性发生了自发破缺, 这种联系仍然隐含存在. 这也是很多粒子物理学家不太喜欢叫对称性自发破缺, 而更喜欢称对称性“隐藏”的核心原因. 因为这样叫更能体现对称性虽然失去但其导致的内在关联仍然存在的事实. 值得一提的是, Higgs 的第二篇文章相比第一篇文章明显更物理性并作为此次诺贝尔物理学奖的核心工作先投稿到 *Physics Letters B* 杂志, 确因在欧洲核子中心(CERN)的编辑认为此工作和物理无关而给予拒稿, 后来转投 *Physical Review Letters* 杂志得到当时作为评审人的南部阳一郎的鼓励和支持(据说南部阳一郎特别要 Higgs 指明他的工作与 F. Englert 和 R. Brout 文章的关系, 这促使 Higgs 特别在文章最后加了一段强调他的工作具有一个标量粒子的事实, 因而引发后来的 Higgs 粒子命名)才得以发表.

1964 年, 最后由 G. S. Guralnik、C. R. Hagen 和 T. W. B. Kibble 共同在 *Physical Review Letters* 上发表的文章^[9]对 F. Englert 和 R. Brout 提出的模型进行了更仔细的讨论. 虽然这 3 位的工作更完整和充分, 但诺奖委员会最后还是未在他们当中选择一人去填充此次诺奖空余的那个名额. 鉴于这 3 组人对 Higgs 机制及 Higgs 粒子的重要贡献, 现在有些专家开始将几位作者的姓名的第一个字母结合起来改称 BEH 机制及 BEH 粒子, 甚至还有叫 BEHGHK 机制及 BEHGHK 粒子的了.

实际上当年还有更多的人参与了研究, 当时在苏联两位 19 岁的本科生 A. Migdal 和 A. Polyakov(现在他们都是著名的理论物理学家)也做了类似的研究^[10], 但他们的结果受到权威的压制, 经过了大约 1 年的斗争才得以提交杂志. 本

节诺奖工作的介绍可以简洁地用表 1 表示.

表 1 6 组物理学家的诺奖相关工作

作者	文章题目	所发表的期刊及时间	说明
Schwinger	Gauge Invariance and Mass	<i>Physical Review</i> 1961-07-20 收稿 1962-01-01 发表	提出阿贝尔规范场的质量可以通过将它和一个标量场耦合得到.
Anderson	Plasmons, Gauge Invariance, and Mass	<i>Physical Review</i> 1962-11-08 收稿 1963-04-01 发表	在固态物理的研究中提出了解释质量起源的可能性,但他的工作是非相对论性的,没得到做基本粒子研究的人的关注.
Englert 和 Brout	Broken Symmetry and the Mass of the Gauge Vector Mesons	<i>Physical Review Letters</i> 1964-06-26 收稿 1964-08-31 发表	诺奖引用的两篇工作的第 1 篇. 首先在美国物理评论快报上发表解释质量起源的文章,但他们的文章没有研究 Higgs 粒子.
Higgs	Broken symmetries, massless particles and gauge fields	<i>Physics Letters B</i> 1964-07-27 收稿 1964-09-15 发表	第 1 篇文章指出 Goldstone 定理可能的漏洞. 第 2 篇文章是诺奖引用的工作的第 2 篇,与 Englert-Brout 的文章采用同样的模型解释质量起源. 当 Higgs 把第 2 篇文章和第 1 篇一样投稿到欧洲物理快报时,编辑部认为“工作和物理没有关系”拒绝接受,他只能进行修改并转投美国物理评论快报,受到评审人南部阳一郎的鼓励得以发表. 这篇文章特别研究了 Higgs 粒子,导致此粒子今天的命名.
	Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons	<i>Physical Review Letters</i> 1964-08-31 收稿 1964-10-19 发表	
Guralnik, Hagen 和 Kibble	Global Conservation Laws and Massless Particles	<i>Physical Review Letters</i> 1964-10-12 收稿 1964-11-16 发表	Guralnik 博士论文(1964 年答辩)作的是相关工作,早有想法. 哈佛大学毕业后到英国和 Hagen、Kibble 对相关理论作了系统研究,采用与前 3 位相同的模型更仔细完整地证明 Goldstone 定理不成立并得到相同的结论. 抱怨对业界极端的正确性和完备性不够重视.
Migdal 和 Polyakov	Spontaneous Break-down of Strong Interaction Symmetry And The Absence of Massless Particles	<i>Journal of Experimental and Theoretical Physics</i> 1965-11-30 收稿 1967-1 月(英文版)发表	这两位苏联本科生(当今的著名理论物理学家)也作了类似工作,但受权威压制,奋斗一年多到 1965 年底才把文章投稿到杂志.

4 诺奖工作的后续发展: 电弱统一与标准模型

后续几年人们对相关的理论又不断进行了各种深入的讨论. 但是直到 1966 年,在普林斯顿高等研究中心从事公理化场论的研究者仍然还在相信 Goldstone 定理是正确的,而 S. Glashow 听了 Higgs 的报告也只是称赞他发明了一个很好的模型,并未把这个机制与可能的电磁作用和弱作用的统一联系起来,虽然 S. Glashow 早在 20 世纪 60 年代初期就在强行引入弱作用规范粒子以质量的情形下提出过电弱统一理论(那样的理论是明显破坏规范对称性因而不可重整的). 当时 F. Englert、R. Brout、P. Higgs、S. Guralnik、C. R. Hagen、T. W. B. Kibble 都把注意力集中在把他们所发明的机制用于强相互作用的讨论,因而错过

了发现电弱统一理论的机会. S. Weinberg 当时也和他们 6 人一样,不断在强作用的领域里打转,虽有进展但成效并不令人满意,直到 1967 年的某一天在驱车去办公室的路上, S. Weinberg 突然想到为什么不把方向转到研究弱作用的领域呢,到办公室后他把所有结果积聚起来应用于讨论弱作用和电磁作用,很快就建立起了著名的电弱统一理论,随后 Salam 也独立地提出了相同的理论. 到了 1971 年, t' Hooft 进一步证明自发破缺的规范理论是可重整的,使得整个理论真正有了坚实的基础. 在电弱统一理论中,十分奇妙的是,标量场不仅像前面所述可自发破缺规范对称性给传递弱作用的规范粒子以质量,它同时还可以通过型为 $\langle \varphi_1 \rangle \bar{\psi} \psi$ 的所谓 Yukawa 耦合肩负起给夸克和轻子以质量的任

基本粒子质量起源的核心. 1976 年在 CERN 的理论物理学家 Ellis、Gaillard 和 Nanopoulos 意识到标量场的激发——自旋为零的 Higgs 粒子是对标量场本身的存在的最直接的验证, 因此开始写文章鼓励实验家们去寻找这个粒子, 由此开始了理论和实验家联合寻找 Higgs 粒子的艰难历程. 电弱统一理论和后面针对强作用发展起来的量子色动力学联合起来了形成今天的粒子物理的标准模型.

标准模型从 20 世纪 70 年代建立起, 直到今天, 各种实验不断对其给予了越来越精确的检验. Higgs 玻色子作为标准模型中最后一个被发现的粒子, 它是直接联系着所有基本粒子质量起源的标量场的激发, 它是标准模型中唯一的传递基本相互作用的非规范粒子, 在所有基本粒子中具有极其特殊的地位是真正的“上帝粒子”. 遗憾的是, 在标准模型中 Higgs 玻色子的质量是任意参数, 并且它和其他基本粒子之间的耦合十分微弱, 这导致实验对它的探寻极其困难, 这也是人们历经几十年的努力才最后找到它的根本原因. 这也是人们猜测为什么在诺贝尔奖宣布的历史上, 会罕见地出现推迟 1 小时发布的原因之一. 因为按照诺奖宣布人回答记者质询时所说, 2013 年的诺贝尔物理学奖的获奖者是在宣布当天上午才最后确定的. 按照诺奖的惯例, 最多只能 3 人获奖, 除了 Englert 和 Higgs 之外, 还有一个剩余名额, 是给为找到 Higgs 粒子做出实质性巨大贡献的实验家, 还是理论家, 给哪位? 有很多不同的可能选择, 因此可能很难统一意见需要讨论和协调. 实际上, 相比发现 Higgs 粒子, 很多物理学家像霍金一样更希望发现不了这个粒子. 因为从理论上可以证明, 若在 TeV 能区发现不了 Higgs 粒子, 标准模型的么正性就会被破坏, 那就意味着一定要有某些超出标准模型的新的物理现象出现, 而这正是物理学家所梦寐以求的.

值得一提的是, 中国的粒子物理学家们分别参与了 LHC 上的 ATLAS 实验和 CMS 实验, 介入了寻找 Higgs 粒子并做出了自己的贡献.

5 未来: 超出标准模型的新物理?

虽然 Higgs 玻色子的发现毁灭了那些期待发现不了它转而可以找到新物理的物理学家们的梦想, 但考虑到目前所发现的 Higgs 粒子和标准模

型所预言的 Higgs 粒子的各种性质仍不完全精确地符合, 目前人们仍称这个粒子为类标准模型的 Higgs 粒子, 而不就是标准模型的 Higgs 粒子. 目前粒子物理学家还在继续对 Higgs 玻色子的各种行为作更深入和仔细的探究, 期望在未来能确认它到底是不是标准模型所预言的 Higgs 粒子. 国内的粒子物理学家和加速器专家们在积极研究在中国建立“Higgs 工厂”的现实可能性. 据理论估计, 要能比较明确地进行鉴别, 需要仔细地探究整个的 10—100 TeV 的能量区间才有可能. 进一步粒子物理学家还在寻找可能的更多种的 Higgs 粒子, 并探寻它与暗物质相互作用的可能性; 宇宙学家试图理解在宇宙演化早期发生的对称破缺导致 Higgs 相变, 并探寻它是否可能解释为什么我们现在宇宙中物质远多于反物质. 目前的 Higgs 粒子的质量远远低于引力开始起重要作用的普朗克能标, 如何理解这个事实? Higgs 粒子的质量还意味着标准模型理论的真空是一个亚稳定的真空, 它的含义仍有待揭晓……, 大家都期望能更精确地检验粒子物理的标准模型, 或者努力试图发现超出标准模型的新的物理现象.

参 考 文 献

- [1] 王青. 对称性及其破缺与 2008 年诺贝尔物理学奖[J]. 物理与工程, 2009, 19(1): 2-6, 9.
- [2] Goldstone J. Field theories with “superconductor” solutions[J]. Nuovo Cimento 1961, 19: 154-164.
- [3] Schwinger J S. gauge invariance and mass[J]. Phys. Rev. 1962, 125: 397-398.
- [4] Anderson P W. Plasmons, gauge invariance, and mass[J]. Phys. Rev. 1963, 130: 439-442.
- [5] 王青. 电磁学与电动力学中的超导[J]. 物理与工程, 2013, 23(5): 1-4, 9.
- [6] Englert F, Brout R. Broken Symmetry and the Mass of the Gauge Vector Mesons[J]. Phys. Rev. Lett. 1964, 13: 321-323.
- [7] Higgs P W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields[J]. Phys. Lett. 1964, 12: 132-133.
- [8] Higgs P W. Broken symmetries and the mass of the gauge bosons[J]. Phys. Rev. Lett. 1964, 13: 508-509.
- [9] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles[J]. Phys. Rev. Lett. 1964, 13: 585-587.
- [10] Migdal A A, Polyakov A M. Spontaneous breakdown of strong interaction symmetry and the absence of massless particles[J]. Sov. Phys. JETP 1967, 24: 91-98, [Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1966, 51: 135].