



规范粒子获得质量之路: 解读 2013 年诺贝尔物理学奖

王青

清华大学物理系, 北京 100084

E-mail: wangq@mail.tsinghua.edu.cn

2013 年的诺贝尔物理学奖毫无悬念地授给了众望所归的比利时物理学家 François Englert 和英国物理学家 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, 这个机制最近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 实验发现的希格斯粒子所证实. 这使得从 2011 年底起一直沸沸扬扬的“上帝粒子”发现之事初步尘埃落定.

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希格斯粒子. 此次授予诺贝尔奖的工作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 4 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, 或者叫作 U(1)阿贝尔规范理论. 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. 强作用的问题直到 20 世纪 70 年代后才开始逐步被解决, 本文不再涉及. 对于弱作用, 人们当时发现可以被化为 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, 因而似乎只能传递长程力. 若强行在理论里人为引入规范粒子的质量, 则会破缺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, 是本文开始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, 他因此获得了 2008 年的诺贝尔物理学奖. 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, 相应的粒子叫 Goldstone 玻色子. 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, 这被看作本文开始提到的第二个零质量粒子问题.

针对第一个零质量问题, 获得 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^[1]. 在此基础上, 获得 1977 年诺贝尔物理学奖的凝聚态物理学家 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^[2]. Anderson 的工作并未得到粒子物理学家的重视, 因为他的工作未指出原有 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, 但后来发现证明总有这样或那样的漏洞. 到 1964 年, 三组人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.

首先是布鲁塞尔自由大学的 F. Englert 和 R. Brout^[3]在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表的文章中讨论了阿贝尔规范理论耦合到复标量场的情形. 复标量场可看作由两个独立的实标量场组成. 他们发现若其中一个实标量场(对应激发希格斯粒子)因为某种原因发生了玻色-爱因斯坦凝聚, 则理论上原来的相互作用项中可以产生两个新的特殊项: 第一项是正比于这个凝聚平方的规范场质量项, 第二项是规范场的纵向分量和另一个实标量场(对应激发 Goldstone 玻色子)的耦合项. 第二项产生两个效应: 首先产生 Goldstone 玻色子的场和规范场的纵向分量相互直接有耦合, 因而可以相

互转换. 这直观地解释了 Anderson 所说的两种零质量问题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, 是该项诺贝尔奖工作的核心. 或者通俗地说, 规范场“吃掉”Goldstone 玻色子获得了质量. 实际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, 它会抵消第一项(也就是纯规范场质量项)对传播子大动量行为不好的贡献, 这种贡献原来是导致有质量的规范场不可重整的根本原因, 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. 遗憾的是, F. Englert 和 R. Brout 的工作忽略了对对应激发希格斯粒子的那个实标量场的讨论.

然后是爱丁堡大学的 P. Higgs^[4,5]先在 *Phys. Lett.* 上发表的文章中指出, 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. 随后在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表的文章中针对与 F. Englert 和 R. Brout 相同的相对论性模型进行讨论. 在该文章中, 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希格斯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表达式. 这是这个场的激发之所以被取名为“Higgs 粒子”的重要原因. 到此为止, 涉及到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, 而更喜欢叫对称性“隐藏”的核心原因. 因为这样称呼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 的第二篇文章作为此次诺贝尔物理学奖的核心工作先投稿到 *Phys. Lett.* 杂志, 因编辑没看懂而被拒稿; 后来转投 *Phys. Rev. Lett.* 杂志, 得到当时作为评审人的南部阳一郎的鼓励和支持才得以发表.

最后, 1964 年由 G. S. Guralnik, C. R. Hagen 和 T. W. B. Kibble^[6]共同在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表的文章对 F. Englert 和 R. Brout 提出的模型进行了更仔细的讨论. 实际上当时在苏联的两位 19 岁的本科生 A. Migdal 和 A. Polyakov 也做了类似的研究^[7], 但他们的结果受到权威的压制, 经过大约一年的斗争才得以提交杂志. 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. 直到 1967 年, S. Weinberg 把所有结果积聚起来应用于讨论弱作用和电磁作用, 建立起了著名的电弱统一理论. 到 1971 年, 't Hooft 进一步证明了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, 它同时还肩负起给夸克和轻子以质量的任务. 据此, 这个标量场就实实在在地担负起给所有基本粒子以质量的重任, 因而成为基本粒子质量起源的核心. 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, 它是直接联系所有基本粒子质量起源的标量场的激发, 因此被称为“上帝粒子”. 但在标准模型中 Higgs 玻色子的质量是任意参数, 它和其他基本粒子之间的耦合又十分微弱, 这导致实验对它的探寻极其困难, 这也是人们历经几十年努力才最后找到它的根本原因. 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 粒子的过程并做出了自己的贡献. 目前, 粒子物理学家还在继续对 Higgs 玻色子的各种行为做更深入和仔细的探究, 国内的粒子物理学家和加速器专家们正在积极研究在中国建立“Higgs 工厂”的现实可能性, 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 Schwinger J S. Gauge invariance and mass. *Phys Rev*, 1962, 125: 397–398
- 2 Anderson P W. Plasmons, gauge invariance, and mass. *Phys Rev*, 1963, 130: 439–442
- 3 Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of the gauge vector mesons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 321–323
- 4 Higgs P W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys Lett*, 1964, 12: 132–133
- 5 Higgs P W. Broken symmetries and the mass of the gauge bosons. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 508–509
- 6 Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 585–587
- 7 Migdal A A, Polyakov A M. Spontaneous breakdown of strong interaction symmetry and the absence of massless particles. *Sov Phys JETP*, 1967, 24: 91–98