

寻找希格斯玻色子的一生

彼德·希格斯 著

肖润喜 译 杨建邨 校

(本文根据我在 2010 年 11 月 24 日提交给国王学院的演讲记录改编)

这次演讲的安排是，我将首先介绍对称自发破缺的思想，再讨论这些思想的形成与发展过程：在凝聚态物质中，如何经由南部阳一郎 (Yoichiro Nambu) 和杰福瑞·戈德斯通 (Jeffrey Goldstone) 的研究工作，发展到罗伯特·布鲁特 (Robert Brout) 和弗朗索瓦·恩格勒特 (Franois Englert) 的研究以及我自己在 1964 年的工作。这是演讲的主要部分。其他的涉及这些思想在电弱理论中的应用，由于各位听众都相当熟悉，我将一带而过。

我从事对称自发破缺相关工作始于 1960 年 10 月，当时我被任命为爱丁堡大学讲师。我还被告知：接受这个职位时，还得以伙食管理员的身份参加苏格兰大学第一届暑期物理学校的工作。因为有一些钱，可以买一点儿酒在晚餐招待客人。我的任务是买酒并且保管好。但是我没有管理好。这是因为学生中有一个四人团伙，他们现在都已经是名人，他们分别是尼古拉·卡比波 (Nicola Cabibbo) (很不幸，他最近去世了)，谢尔登·格拉肖 (Sheldon Glashow)，德里克·罗宾逊 (Derek Robinson) (牛津大学的公理化场理论家) 以及虽是最后一位却同样有名的蒂尼·韦尔特曼 (Tini Veltman)。他们通常一起讨论理论物理问题直至深夜，因而第二天早上不能按时起床，第一节课常常迟到。直到卡比波大约在 19 年后告诉我时，我才知道他们在讨论问题时拿了我在储藏室里的剩酒当助兴剂。噢，他们不是从我的储藏室，而是从我的柜子里拿走的，然后把它藏在纽巴特神学院 (Newbattle Abbey College) 地下室的老爷钟里。

现在让我回到对称自发破缺的早期历史。在凝聚态物理中，这是早为人知的现象。最早的例子可能追溯到 1928 年海森伯 (Werner Heisenberg) 所提出的铁磁理论。对称自发破缺的特征是某些连续的对称性被凝聚态系统的基态所破坏。如果铁磁体具有无穷体积 (当然铁磁体不具有这个特点)，其基态

是简并的。但是，在一个无穷大的铁磁体内，在任意方向上都可能产生自发磁化，该系统则不再保持旋转不变性。

与粒子物理关系最密切的例子是超流性和超导性。超流性源自玻色凝聚的形成，尼古莱·博戈留波夫 (Nikolay Bogoliubov) 1947 年在理论上做过描述。此处所破缺的对称性不是一种时空对称性，而是与相变相关的对称性，即玻色子波函数的 $U(1)$ 对称性。如果把这个波函数乘以 $e^{i\alpha}$ ，那通常也是一种对称性。然而，在超流中，当凝聚形成时该对称性自发地破缺。

超导性稍微复杂一点。这与带电粒子玻色凝聚的形成有关，第一个有这一想法的人是维塔利·金茨堡 (Vitaly Ginzburg) 和列夫·朗道 (Lev Landau)，他们在 1950 年发表了观点认为：如果存在一种无自旋带电粒子的玻色凝聚，问题可迎刃而解。金属中没有这类粒子，所以这是一个相当奇特的思想，但 7 年后，约翰·巴丁 (John Bardeen)、列昂·库珀 (Leon Cooper) 和罗伯特·施里弗 (Robert Schrieffer) (BCS) 提出了现在形式的 BCS 理论。库珀认为电子可能会通过电子-声子相互作用配对。这样，我们就得到了一个玻色子，这种电子对可以形成玻色凝聚，如此以来我们就获得了带电粒子的玻色凝聚。

这些观念渗透进粒子物理学的方式之一是通过铁磁性，我认为铁磁性也曾一直影响着海森伯，导致他在 1957 年提出一个短命的非线性旋量理论。粒子物理学家们得知这些观念的主要途径，则是通过 BCS 三人中的施里弗在芝加哥大学一次会议上的报告。南部也是在这次会议上才知道 BCS 理论的，该理论由此指导着南部与他的合作者随后几年的工作。南部的工作才是关键的突破口，因此，我们来看看南部做过什么。

1960 年，南部在《物理评论快报》上发表过一

篇文章，第二年又同乔瓦尼·乔纳-拉希尼欧（Giovanni Jona-Lasinio）联名发表了一篇内容详尽的论文，名为《与超导性类比所得的基本粒子的动力学模型》。文中所涉及的对称性是一种作用于零质量费米场的手征对称性，即 $SU(2) \times SU(2)$ ，真空态可以使其自发破缺。这种破缺为费米子产生质量，不仅是产生质量，而且还产生质量差异。南部的费米子是质子-中子对，因为这时还没有发现夸克。现在，发生过程可以用图 1 解释。在常态金属中存在一条导带（conductive band），该导带只有一半填满了电子。这些电子可以被声子散射后进入导带中空余部分中的邻态，正是由于声子的散射作用才使金属具有正常的电阻。然而，在 BCS 超导体中，凝聚态的形成把导带撕裂成两半。位于低处的电子被限制在低端部分，它们没有可供被散射进入的邻近能态，结果这些自由电子形成了电的导体；另一方面，凝聚态本身也是一种良好的导体，实际上是一种完美的导体。

论的论文，文中他引入了元标量场（elementary scalar fields）。在概念上，它比 BCS 型理论清晰得多。他引入了所谓的酒瓶势或墨西哥帽势，从而很容易看到对称自发破缺是如何发生的，因为系统中的最低能态在酒瓶的底部，而不是在对称点上。在超导历史上，这种戈德斯通模型与金茨堡-朗道理论相似。

布鲁特回想起 1960 年在康奈尔研讨会上维克多·韦斯考普夫（Victor Weisskopf）曾说过：“粒子物理学家如今感到如此绝望，以至于他们不得不向多体理论，如 BCS 理论借用新东西。这可能会有些结果。”由此看来，对于这种奇异的场论是否管用当时还存在许多疑虑。

有一段时间，由于一个后来称之为戈德斯通定理^①（Goldstone theorem），这种理论失去效用。南部、乔纳-拉希尼欧和他们的后继者发现，他们从该理论总是得到一些无质量的标量粒子。在破缺的手征 $SU(2) \times SU(2)$ 中，他们得到一个无质量的三重态，它们好像是束缚态。因为当时基本粒子只有质子和中子，这些态看起来像 π 介子，并且除了它们没有质量以及如果不破坏模型将无法产生质量外，其他都很好。戈德斯通模型使这种现象一目了然，因为戈德斯通玻色子是在酒瓶势能底部周围的激发态。

戈德斯通、阿布杜斯·萨拉姆（Abdus Salam）和斯蒂芬·温伯格（Steven Weinberg）在 1962 年正式证明了该定理。大致上讲，如果存在一个具有拉格朗日不变量的连续对称性，那么，要么真空态是一个不变量，要么就存在零质量且自旋为零的粒子。这一结果十分令人意外，因为这种粒子很可能在实验上已经被发现。再者，它们将扰乱恒星体能量的平衡，因为恒星将很容易发射戈德斯通玻色子，而不是发射光子。

随后两年，问题出现了：我们能回避戈德斯通定理吗？由凝聚态理论物理学家菲利普·安德森（Philip Anderson）发表的重要论文，开始时并没有受到应有的注意。他指出，在超导体中由于电磁相互作用，戈德斯通模式变成了有质量的等离子模式。这种模式得到的正是横向极化电磁模式的纵向配偶子（partner），后者也有质量，并且与迈斯纳-奥森菲尔德（Meissner-Ochsenfeld）效应有关。

从这篇论文的上下文来看，我把安德森进一步的见解看作一种推测：“戈德斯通零质量问题并不

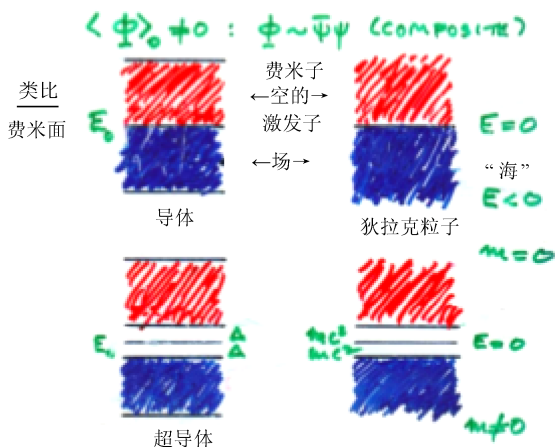


图 1 根据超导 BCS 理论建立的基本粒子的南部模型示意图

我认为南部采用的类比是与半自旋费米子的狄拉克理论的对比。对于无质量的狄拉克粒子，就会有正能量的激发态，还有电子海，并且他们之间没有间隙；但如果粒子有质量，它们将被撕裂开。在海与费米子的能级间有一能量差，因此存在一个宽度为 $2mc^2$ 的类 BCS 间隙。这就是关于对称自发破缺的南部模型产生费米子质量的基本方式，正是南部最先做到这点。

戈德斯通曾在《物理评论快报》上看到了南部的文章，他在 1960 年发表了一篇用超导方法处理场

是一个大的难题，因为我们可以比照一个等价的杨-米尔斯零质量问题把它消去。”但为什么它是一个推测呢？因为安德森从没有讨论过这个定理，也没有讲它有什么问题，并且也没有清晰地讨论过相对论性模型。

现在我们看看在 1964 年发生了什么。如何避开戈德斯通定理？从技术上来说，戈德斯通、萨拉姆和温伯格所提出的证明是这样的：它是以一种对称生成元对易式的谱表示为基础的，生成元算符有一个场分量，在“多标量场”模型里按不同的群形成多重态。一个守恒定律和洛伦兹不变性的微分形式的结果是，你将被迫得出结论：在粒子谱中存在一个零质量极点。

然而，在 1964 年三月的《物理评论快报》上，亚伯拉罕·克莱因（Abraham Klein）和本·李（Ben Lee）指出，在超导体中的谱表示比相对论不变性所强加的情形下具有更普遍的形式。这是因为超导体或任何凝聚态物质系统都有一个从优参考系，并且存在一个从优单位类时矢量，它能精确定义离子背景下的静止参考系。这允许你有几个附加项，使你能避开戈德斯通定理。克莱因和李推测，在真正的相对论情况下这也许实际可能发生。

三个月后，沃尔特·吉尔伯特（Walter Gilbert），当时他正处于从一个粒子理论学家转变成分子生物学家过程中，他对这项提议作了回应：“不，在相对论理论里你们不能这样做。你不可能有一个那样的从优单位类时矢量。”我就是在这时进入这一研究领域的，因为在下一个月我对吉尔伯特的论文做出回应：“你可以有”，但只有在一个规范场与电流耦合起来的规范理论内有可能。于是，我们在 1964 年迈出了关键的一步。我曾按事件发生先后顺序记录下了我的经历。

六月中旬的《物理评论快报》星期四到达爱丁堡，那天是 1964 年 7 月 16 日。我当时的一项工作是接收来自中心图书馆的现行期刊，快速浏览后，在上面写上收到的日期，然后把他们放在期刊架上。我翻开了《物理评论快报》，看到了吉尔伯特的论文。我想我当时的反应是骂了一声，因为他似乎已经关上了通往南部设想的大门。然而过了周末，我逐渐想起一个具有这种特征的量子场论；而吉尔伯特说不可能有这种场论，实际上那个量子场理论就是朱利安·施温格（Julian Schwinger）最喜欢的一种

量子电动力学理论。

我曾看过朱利安·施温格在 1962 年关于规范不变性和质量的几篇论文。施温格喜欢电动力学中的库仑规范，这种规范不具有相对论性的不变性，它与一个特殊的参考系有关，而我的库仑规范与另一个以一定的速度做相对运动的参照系里的人的库仑规范不一样。因此，一整个周末，我都沉浸在不断变换角度的思考中。我明白最可能的是我必须要有个规范理论，因为在规范理论中，如果你使用库仑规范，洛伦兹变换在场里就不再仅是线性的，还有一个伴生规范变换将会使得一个库仑规范转换为另一个库仑规范。

7 月 24 日，星期五，我给在 CERN 的《物理快报》投一篇短文，编辑告诉我文章被采纳了。我写完这篇文章后，知道自己该干什么了。我应该采用最简单的 U(1) 对称性来处理最简单的与标量场有关的对称自发破缺模型，并且把它与麦克斯韦场耦合起来。换言之，戈德斯通与麦克斯韦相遇了。

第二个周末，即 7 月 31 日，星期五，我把第二篇短文发给了在 CERN 的《物理快报》。这篇文章却遭到拒绝，这使我倍感震惊。我不懂他们为什么接受一篇讲一种可能避开戈德斯通定理的论文，却又拒绝一篇解释如何做到这一点的文章。因此，我认识到把文章修改完后发给 CERN 的《物理快报》不是明智之举，CERN 的人不懂这类事情（我的同事尤安·斯奎尔斯（Euan Squires）后来证实了这种看法，事后不久他从 CERN 回来）。

在八月份我对这篇十分粗糙的文章做了修改，该文包含现在大家所知的希格斯模型也是首次被提出。我在修改时加了几段，实质上是想强调一点：这一理论有实验结果。倘若《物理快报》接受了原来的文章，关于希格斯玻色子的文章或许永远不会出现。在增加的段落中有一句话：“值得注意的是这种理论的一个重要特征，是它预言标量和矢量玻色子有不完全的多重态（incomplete multiplets）。”

《物理评论快报》在八月底收到了我修改后的文章，并同意发表。我后来发现，文章的审阅人是南部，是他使我注意到恩格勒特和布鲁特刚刚发表在《物理评论快报》上的文章。《物理评论快报》是在 6 月 22 日收到而在 8 月 31 日才出版他们的文章，而六月份我才刚开始这项工作。在这之前，我从未想到布鲁特是一位理论粒子物理学家，因为我把他

与相变联系在一起了。因此我在论文中增加了一个脚注：本质上相同的东西已经由恩格勒特和布鲁特完成。我们之间的最主要区别在于恩格勒特和布鲁特从费曼图出发，并在检查他们理论的规范不变性时遇到困难，因为规范不变性要分配到所有费曼图；而我则从传统的经典拉格朗日场论出发，只要我在把它转变成量子理论时加倍小心，规范不变性应该没有问题。我认为恩格勒特和布鲁特从未提到所谓的希格斯玻色子是因为他们认为这是显而易见的，因为如果你想系统陈述这套理论，显然需要一个具有质量的标量模型。这一点与场在波谷上下方的变化，而不是在波谷周围变化是一致的。

以上就是我在玻色子工作方面的基本经历，接下来我将简略介绍随后几年历史的发展。直到1965年9月，我才完成《物理评论快报》上发表的论文的全文，当时我在查珀尔山（Chapel Hill）的北卡罗利纳大学。那篇论文作为预印本被分发给邮寄名单上的人，弗里曼·戴森（Freeman Dyson）也收到一份预印件。1966年1月，我收到一封来自戴森的信件，信中他讲我的论文帮助他理解了一些困扰他很久的问题，他问我是否愿意来普林斯顿作报告。我于是在3月15日到普林斯顿作了一次演讲。在学术休假年准备横穿全美之前，我对斯坦利·德塞尔（Stanley Deser）谈了我的计划，他说如果我有去东海岸作报告的计划，请通知他，他将为我在哈佛安排一场报告会。因此，第二天，即3月16日我在哈佛也作了一场报告。

那里的反响怎样呢？在普林斯顿会议前，一位曾经在苏格兰第一暑期学校任教过的公理化场理论学家克劳斯·赫普（Klaus Hepp），对我说，我准备讲的东西一定是错的，因为戈德斯通定理已经由 C^* 代数获得了严格的证明。我不懂 C^* 代数^②，但我认为如果在他们的公理中没有隐瞒什么东西的话，他们不可能做出证明。在哈佛气氛大不一样，它更像是一场对话而不是一次学术研讨会。后来，有人告诉我，当我再一次与西德尼·柯尔曼（Sidney Coleman）见面时，他们准备撕碎那个自以为可以避开戈德斯通定理的白痴。他们真逗，我听了后也乐了。

唯一真正没有做好的地方是我没有强调任何应用的可能。我们所有人，布鲁特、恩格勒特和我都曾走错了方向，只盯着强子对称性。在哈佛研讨会

后，格拉肖走到我身边说，“彼得，这是一个非常好的模型”，但他没有看出它与他1960/1961年的工作也有关联。由于我在苏格兰大学暑期学校做伙食管理员时，没有参加卡比波、格拉肖、罗宾逊和韦尔特曼夜间讨论会，因而在1960年我错过了听说他们讨论的机会，否则我可能会想到把我的对称自发破缺思想应用到电弱相互作用中。温伯格和萨拉姆在1967年把我的和布鲁特与恩格勒特的模型应用于格拉肖的 $SU(2) \times SU(1)$ 的轻子模型。故事的其余部分大家都知道。

在寻找一个适用的理论过程中，韦尔特曼和赫拉尔杜斯·特霍夫特（Gerardus't Hooft）的工作标志着这一研究终于取得突破性的进展。1970年，他们证明了纯杨-米尔斯理论的重整化，1971年，特霍夫特把它推广到有质量的杨-米尔斯理论，该质量是在标量场系统中由于对称自发破缺而产生的。1972年，本·李（Ben Lee），在罗切斯特大学的一个派对上听说这个消息，当时我们都拿着一杯红酒和一碟三明治，后来他把我的名字写到了所有与对称自发破缺相关的事情上，而把其他的人塞到脚注里。

最后，让我再谈谈1975年，这是开始找寻希格斯粒子的起始时间，尤其值得注意的是约翰·埃利斯（John Ellis）、M. K. 盖拉德（Mary K. Gaillard）和D. 纳洛泊罗斯（Dimitri Nanopoulos）在1976年联名发表的论文的最后一句话：“我们或许应以道歉和告诫的方式来结束这篇论文。因为我们对希格斯粒子的质量完全没有在意，不像发现粲（charm）时那样注意质量，还因为我们除了知道它们可能全都很小以外，对与其他粒子的耦合也没有十足的把握，为此我们要向实验物理学家道歉。由于这些原因，我们没有鼓励人们用庞大的实验去搜寻希格斯粒子，但我们确实认为那些愿意为寻找希格斯粒子而做实验的人，应该知道它会出现”。这段话讲得有点长，但也是给搜寻希格斯玻色子的实验物理学家们的有益建议。14年后的情况大不一样了，沙利·道森（Sally Dawson）、杰克·古利安（Jack Gunion）、霍威·哈伯（Howie Haber）和哥迪·凯恩（Gordy Kane）编写出版了《希格斯猎手指南》（*Higgs-Hunters Guide*），他们写道：“标准模型的成功令人惊叹。现在粒子物理的中心问题是去设法理解希格斯部分（Higgs sector）。”

1989年到1999年期间，从在单圈图辐射修正

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔

中对数依存的发现开始，到在大型电子-正电子对撞机（LEP）中对 Z 玻色子的精确测量等，给希格斯粒子的质量确定了范围。这些成就又由于费米实验室的高能粒子加速器在 1994/1995 年发现顶夸克而得以巩固加强，表明它的质量小于 200GeV。大型电子-正电子对撞机在 1999/2000 年的运行，排除了一个质量高达 114GeV 的希格斯粒子。有迹象表明存在大约 115GeV 希格斯粒子，但是后来发现其背景比预想的要糟得多。在 2001 年，改进后的高能粒子加速器开始启用，已经排除了能量介于 158 和 175GeV 区间的粒子。现在我们正在等待大型强子对撞机（LHC）来完成这段历史。

谢谢！

致谢

我对没有亲自到伦敦国王学院作报告而深感遗憾。还要感谢阿兰·沃尔特（Alan Walker）安排了爱丁堡大学转播和营销系所作的电视录像，有了这个录像这篇文章才可能完成。我还要感谢米歇尔·康诺（Michelle Connor）录制了我的发言。

和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。

2013 年《现代物理知识》每期定价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007~2011 年单行本每期 8 元；2007~2011 年合订本每本 50 元。

译者按：2012 年 7 月 2 日，美国能源部下属的费米实验室宣布，该实验室最新数据接近证明被称为“上帝粒子”的希格斯玻色子的存在。

2012 年 7 月 4 日，欧洲核子研究中心（CERN）宣布大型强子对撞机探测到疑似希格斯粒子的新玻色子。

本文是英国物理学家彼德·希格斯本人回忆半个世纪前，他自己所参与的玻色子的发展经历的一篇文章，还涉及希格斯玻色子的提出与杨-米尔斯理论的关系，对国内物理学界有一定的参考价值。

（肖润喜，武汉小螺号英语培训中心 430081；杨建邺，华中科技大学物理系 430074）

① 戈德斯通定理：又称南部-戈德斯通定理，是指连续整体对称性被自发破缺后必存在零质量玻色子这一定论。此粒子被称为戈德斯通玻色子。——译者注

② C*代数（或读作“C 星代数”）是数学数分支中泛函分析的重要研究对象。一般认为 C*代数主要是应用在量子力学中可观察量的模型模代数中。——译者注