

顶夸克发现二十年

(北京大学 毛英男、朱守华 编译自 Dmitri Denisov, Costas Vellidis. *Physics Today*, 2015, (4): 46)

从希腊哲学家的时代起，人类就开始了对物质基本构成单元的探索。这个概念长期以来一直在被更新，认为不可分割的原子是物质基本组分的原始思想已经发展为现在的观点：认为一种叫做夸克的东西是所有物质的核心组分。1995年费米实验室发现了顶夸克——标准模型中第六种也是最后一种夸克，有些人甚至把它的发现誉为是科学上最长久搜寻之一的终结。

但是顶夸克的性质是奇特的，并且它带来了新的问题。尤其是，它的质量是所有已知基本粒子中最重的。如此重的质量可能暗示它在电弱对称性——要求所有基本粒子无质量的一种对称性——的破缺中扮演了一个特殊的角色。如果真是这样，顶夸克本身可能就是质量产生的根源。

失踪的家庭成员——顶夸克

1964年，Murray Gell-Mann和George Zweig分别独立提出了夸克假设，作为对1950年代和1960年代早期在加速器和宇宙线实验中发现的许多亚原子粒子的解释¹⁾。当时有超过100个粒子被发现，其中大多数参与较强的相互作用并且寿命很短。这些参与强相互作用的粒子，称为强子。它们并不是基本的，具有有限大小和内部结构。夸克假设的目标是用3种夸克——上(u)、下(d)和奇异(s)夸克——及其反夸克的不同组合理解所有已知的强子。每个夸克有 $(1/2)\hbar$ 的内禀自旋，并且它们被假设为是基本的。为了解释观测到的强子谱，夸克必须有分数电子电荷。

到1970年代中期，夸克已经被纳入粒子物理标准模型。但是起初，许多物理学家只是把夸克当作一种挽救粒子分类方便的概念。分数电子电荷看起来是奇怪的，并且实验上无法发现任何单独的自由夸克。然而，1970年代的两个进展确立了夸克的真实性。第一个进展是，高能电子与固定质子、中子靶的散射实验证明了靶强子包含点状的内部组分。第二个进展是在1974年，布鲁克海文国家实验室和SLAC发现了一个质量3.1 GeV的醒目的强

子；这个强子是一种新的夸克(c)及其反夸克构成的束缚态。

1977年，费米实验室的科学家们发现了一种新的质量约为10 GeV的强子，它被确认为一种新的夸克底(b)及其反夸克构成的束缚态。上、下夸克属于第一代夸克，奇异和粲夸克属于第二代夸克，底夸克属于第三代夸克，第三代夸克似乎还缺少了一名成员，其存在性和电荷($2/3$ 倍电子电荷)可以由已有的结果推断出来，物理学家们将它命名为顶(t)夸克。这开启了一段持续了将近二十年的寻找过程。

喷注与顶夸克的寻找

根据已知夸克的质量比，1970年代晚期的物理学家们认为顶夸克的质量大概有底夸克的3倍；所以他们认为它会以一个包含顶夸克及其反夸克构成的质量约30 GeV的新的强子形式出现。建在德国、美国和日本的正负电子对撞机争相捕捉这个战利品，可是他们没有发现任何顶夸克的迹象。

粒子物理的进展与建造更强大的加速器相关。CERN实验发现了传导弱作用的W和Z玻色子，也展示了夸克存在的新形态：喷注结构。夸克仍然会逃脱直接的探测，尽管它们在高能对撞实验中被剧烈地散射。脱离对撞区域的夸克会迅速被强子化，成为一簇大致沿着原始夸克运动方向的强子，并进入探测器，即成为喷注。

随着CERN对撞机和1988年费米实验室更强大的对撞机——单个

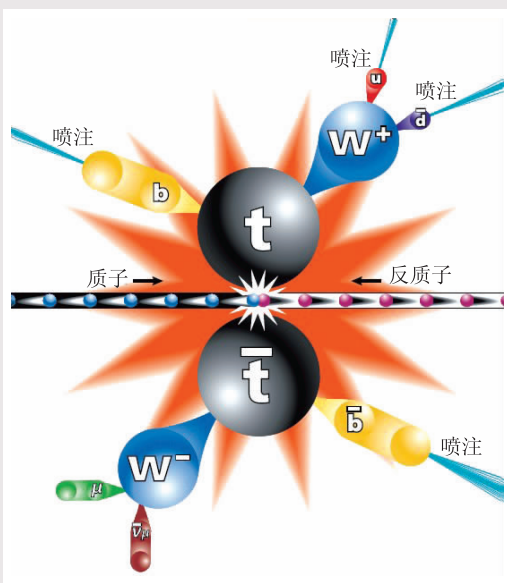


图1 强子对撞机上顶夸克主要产生机制是成对产生，产生的顶夸克迅速衰变

1) 值得一提的是，中国科学家几乎平行的提出了类似的“层子”模型。——译者注

粒子能量为 900 GeV 的质子—反质子对撞机，Tevatron——的到来，借助喷注来寻找顶夸克成为新的途径。对于现在已知的顶夸克质量，理论家们认为，在加速器上产生的顶夸克与反顶夸克来不及形成束缚态，就衰变掉了。而如果顶夸克比 W 玻色子轻，那么 W 玻色子到顶夸克和底夸克的衰变道会成为探测顶夸克最有力的模式，但是实验排除了这种假设。到 1990 年 CDF 组估计顶夸克至少有 91 GeV 的质量。

质量超过 100 GeV 的顶夸克将主要成对产生，根据标准模型，如此重的顶夸克几乎完全衰变到 W 玻色子和一个底夸克。产生的每个底夸克会强子化为一个喷注，而 W 玻色子会衰变到轻子和与之相伴的中微子，或者衰变到一对夸克并成为喷注，如图 1 所示。

竞赛以平局告终：发现顶夸克

Tevatron 的运行从 1992 年持续到 1996 年。在此期间，CDF 组与 D0 组进行了寻找顶夸克的竞争。1994 年，D0 组估计了顶夸克的质量至少有 131 GeV，随后 CDF 组确认了第一个产生顶夸克的证据。但是直到 1994 年夏天，Tevatron 的亮度仍然糟糕(不高)。费米实验室的加速器物理学家付出大量的努力去理解并调节对撞过程的每个部分。在 1994 年短暂的中期休整期间，他们发现了 Tevatron 上的一块磁体不小心被转动了。

一旦这个问题被解决，束流亮度就可以加倍了。利用这台表现更好的加速器，到 1995 年初物理学家抽取了额外加倍的事例。在很大程度上，CDF 与 D0 组在发现顶夸克方面的成功也是费米实验室加速器成员

的功劳。他们对 Tevatron 技术的改进使得到 1995 年初积累的事例几乎达到之前的 3 倍——并且这个进步对 CDF 和 D0 组是公平的。CDF 和 D0 组的顶夸克发现文章在 1995 年 2 月 24 日提交到 *Phys. Rev. Lett.*，并且在这一年的 4 月 3 日同期发表。CDF 给出的顶夸克质量为 176 ± 13 GeV，而 D0 给出的结果是 199 ± 30 GeV。

顶夸克性质的精确测量

随着 2001—2011 年 Tevatron 的数据不断积累，CDF 和 D0 组不断提高对这类夸克性质的测量精度，包括质量、电荷和寿命等。从 2010 年起，CERN 的大型强子对撞机(LHC)开始产生顶夸克事例。Tevatron 与 LHC 的科学家合并了他们的数据，从而来获得最新的顶夸克质量。他们合并的结果为 173.34 ± 0.76 GeV，具有 0.4% 的精度——这是所有夸克质量测量中最精确的，并且是唯一可以达到如此精度的测量，这是因为顶夸克在形成更复杂的粒子之前就衰变了。就我们目前所知，顶夸克是一个点粒子，它没有可辨识的内部结构。它的性质与上夸克和粲夸克类似，除了它 5×10^{-25} s 的短寿命和大质量——大约有质子质量的 200 倍，底夸克质量的 40 倍，几乎有金原子核那么重。显然，顶夸克极重质量可能为质量的起源提供重要的线索，那线索是什么呢？

一个亚稳定的宇宙？

2012 年 7 月 4 日，LHC 的 ATLAS 和 CMS 组公布了 Higgs 玻色子的发

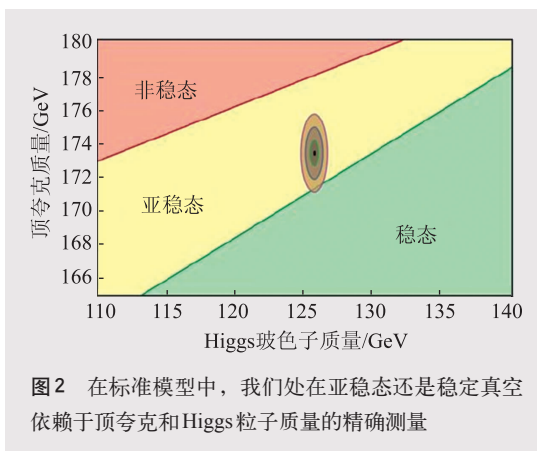


图2 在标准模型中，我们处在亚稳态还是稳定真空依赖于顶夸克和 Higgs 粒子质量的精确测量

现，与顶夸克的发现一样，这是粒子物理学的一个里程碑事件。Higgs 玻色子的质量为 125.15 ± 0.24 GeV，与顶夸克的质量和强相互作用耦合强度一道，成为一个可以使科学家研究所谓普朗克标度(10^{19} GeV)——远高于近期加速器可以达到的能量——上新物理的关键参数。对于目前实验允许的 Higgs 玻色子和顶夸克质量，Higgs 势具有独特的有趣行为。如图 2 所示，对于某些允许的顶夸克与 Higgs 玻色子的质量取值，Higgs 场现在所处的极小值并非势的最小值，并且可以通过量子隧穿到达能量更低的状态。这样的情形，粒子物理学家叫做亚稳定的电弱真空；宇宙可能处于一个可以持续很久但并非永远持续下去的状态。

因为真空的亚稳定性强烈依赖精确的顶夸克质量，理论物理学家对此有不同的解释²⁾。不幸地，系统和理论的不确定性限制了强子对撞机上顶夸克质量的精确测量。为了提高测量的精度，我们需要一台能够产生顶夸克的新对撞机³⁾。LHC 上的顶夸克研究，或许还包括未来对撞机，可能成为通向激动人心发现的大门。

2) 比如有理论学家把此行为解释为新物理存在的迹象，毕竟生活在亚稳真空让人不爽。对此的深入研究需要实验对于顶夸克和 Higgs 粒子的质量的精确测量。——译者注

3) 目前讨论的方案中包括中国的环形正负电子对撞机 CEPC 及其超级质子—质子对撞机 SppC，日本国际正负电子直线对撞机 ILC 等。——译者注