

顶夸克的研究与展望

张华桥

(中科院高能物理研究所 100049)

20年前(1995年),费米实验室的Tevatron对撞机在175 GeV附近发现了一个全新的粒子,被称为顶夸克(top quark),这是标准模型中最重的基本粒子。在所有标准模型预言的基本粒子中,顶夸克是倒数第二被发现的,是最后被发现的费米子。中科院高能物理研究所对该粒子的发现作出了贡献。

标准模型中的顶夸克

顶夸克是一种什么样的粒子呢?顶夸克质量为1733亿电子伏特(173.3 GeV),比氢原子核重了大约175倍,几乎和钨原子核重量相当,而其直径却在钨原子核的万分之一以下;顶夸克甚至比第二重的费米子——底夸克——重近40倍。其巨大的质量是粒子物理学中关注的热点之一;其次,顶夸克的寿命非常短暂,只有 5×10^{-25} 秒,这么短的时间即使是最快的光,也前进了只有一个原子核直径1/7的距离,短得连顶夸克甚至都没有来得及和其他夸克发生反应,它就衰变成其他粒子了,而其他夸克则有足够的寿命互相结合成强子。顶夸克是唯一在形成强子之前衰变的夸克,从而使我们在实验上研究“裸”夸克成为可能。这些独特的性质让顶夸克在粒子物理中占有非常重要的地位。那么,为什么顶夸克的这些性质这么重要,就要从标准模型说起。

标准模型是20世纪60年代起发展起来的描述基本粒子分类和相互作用的理论。其主要观点是组成物质的最小不可分的粒子(基本粒子)有17种(如果考虑到费米子的正反物质,以及夸克,胶子所携带的色荷的差别,则有61种基本粒子),其中包括自旋为1/2的三代费米子,每代费米子有两个夸克,一个轻子和该轻子对应的中微子;四种传播作用力的自旋为1的矢量玻色子,即传播电磁相互作用力的光子,传播弱相互作用力的W和Z粒子和传播强相互作用力的胶子;以及赋予基本粒子质量的自旋为0的上帝粒子——希格斯标量玻色子(图1)。

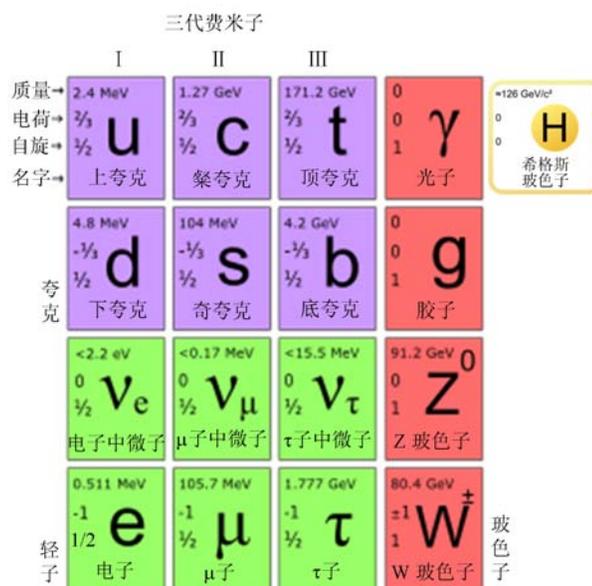


图1 标准模型中的基本粒子(图片来自百度百科和维基百科 <http://baike.baidu.com/picture/19449/10960724/0/b90e7bec54e736d162c88b0799504fc2d46269e1?fr=newalbum#aid=0&pic=b90e7bec54e736d162c88b0799504fc2d46269e1> <http://en.wikipedia.org/wiki/Matter>)

这些基本粒子之间存在遵循量子色动力学(QCD)的强相互作用;遵循量子电动力学(QED)的电磁相互作用;以及遵循V-A弱相互作用理论的弱相互作用。而这些粒子之间由于质量而产生的引力相互作用则由于其强度远小于上述三种作用力而并没有被标准模型所考虑。这一套理论几乎解释了我们在微观领域观测到的所有高能粒子现象,其理论预测与实验观测精确地相符合。因此,标准模型是粒子物理中最成功的模型。但是,标准模型无法解释天文中观测到的暗物质、暗能量,没法解释中微子质量问题,以及模型中存在的自然性问题,又让我们相信在标准模型之外一定存在新的物理,这就是我们不断增加实验测量精度,不断探索粒子物理各方面前沿的原动力。我们常见的物质都是由标准模型中第一代费米子的上夸克(u)和下夸克(d)所构成(图2)。

顶夸克是标准模型中第三代费米子夸克中的一种,单个顶夸克所带电荷为单个电子所带电荷绝对值

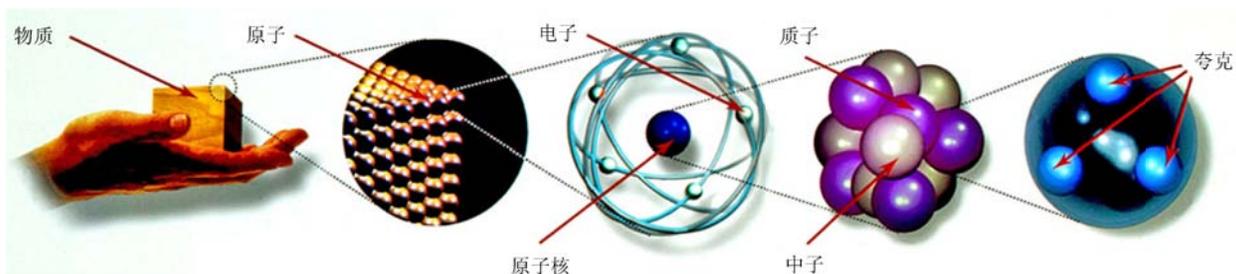


图2 物质结构的微观层次 (<http://ahamspeaks.blogspot.ch/2012/07/what-is-reality.html>)

的 $2/3$ ，电荷符号为正，自旋为 $1/2$ 。顶夸克可以带有三种不同的色荷，加上其带有不同色荷，电荷符号为负的反物质态，共有 6 种质量、自旋、寿命完全相同的形态。

顶夸克质量的问题

在标准模型当中，夸克的质量是夸克与希格斯粒子耦合的结果，其质量的大小正比于夸克与希格斯耦合常数。顶夸克的质量如此之大，以至于顶夸克与希格斯粒子的耦合常数接近于一，这就造成了计算希格斯粒子质量的时候，由顶夸克造成的对希格斯质量的修正远超过测量到的希格斯粒子质量，从而造成所谓的自然性问题。因此，直接测量顶夸克和希格斯粒子的耦合常数的大小，是目前实验中非常紧迫的课题。位于欧洲核子中心的大型强子对撞机在 2015 年重新开机取数后，将能够对顶夸克和希格斯粒子的耦合常数的大小做比较精确的测量，当然，需要耐心地等待大型强子对撞机的运行取数，以及实验物理学家们的细致分析。

顶夸克质量还与真空稳定性相关。难道空无一物的真空还会发生变化？这的确听起来有点天方夜谭。其主要原因是由于希格斯势能的性质。希格斯机制引入的希格斯势能的最小值不在零点上，而真空总是趋向于希格斯势能的最低点，这造成了真空相对于零点的自发破缺，从而使 W/Z 玻色子获得质量。取决于顶夸克质量和希格斯粒子质量的大小，顶夸克与希格斯粒子的相互作用对希格斯势能的修正有可能不改变希格斯势能的最小值，则真空是稳定的 (stability)。也有可能是在特高能量下，使希格斯势能变得比目前的最小值更小，从而使真空有可能通过隧穿效应从目前的希格斯粒子势能的最小值，跃迁到更小的希格斯势能的位置，同时释放出巨大的能量，这时真空就发生

了衰变。如果真空发生衰变所需的时间小于宇宙的寿命 (~ 137 亿年)，则真空是不稳定的 (instability)，反之如果真空衰变的寿命大于宇宙寿命，则真空是亚稳定的 (meta-stability)。按照标准模型已知参数的实验测量值，我们可以算出当前所处的真空正处于亚稳定状态 (图 3)，即经过远大于宇宙年龄的时间后，真空自己会发生衰变，从而形成与我们当前观测到的截然不同的宇宙。这个结论所依赖的参数中，目前带来最大不确定性的就是顶夸克质量的大小，虽然顶夸克的质量的测量已经综合了所有实验测量的结果，但是真空稳定性的研究，对顶夸克质量的测量提出了更高的要求，这可能需要通过和 Tevatron，大型强子对撞机完全不同的对撞机—正负电子对撞机—才能够达到对顶夸克质量测量精度的要求。

顶夸克的寿命和应用

虽说标准模型的理论给出了夸克的自旋、宇称、是否参与各种相互作用等性质，但是这些性质需要和

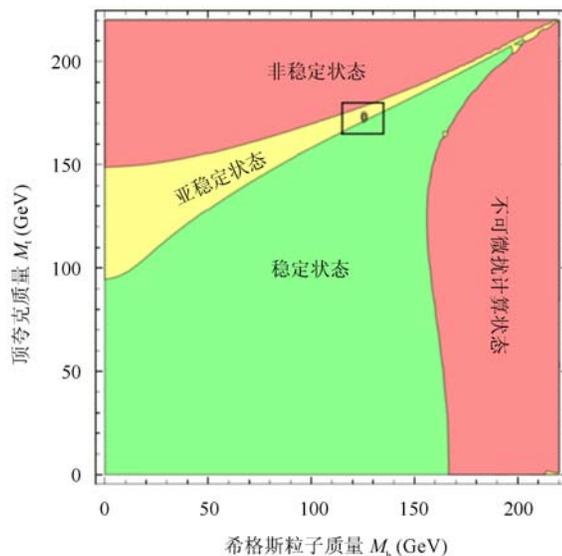


图3 真空稳定性研究发现我们的宇宙处于亚稳定状态，这是否预示了我们宇宙最终的命运？

实验的结果精确比较来检验。历史上很多重大发现就是通过实验找到与理论预言不一致的地方，才导致理论的大发展。而标准模型中的夸克禁闭效应，禁止了我们观测到单个的夸克。在所有的夸克中，只有顶夸克由于超短的寿命而在和其他夸克形成强子态之前衰变，从而把单个顶夸克的相关信息保留到了其衰变产物中。通过研究顶夸克的衰变产物，能够了解到单个顶夸克的性质。如自旋，宇称，以及顶夸克发生衰变时的信息，从而和标准模型的预言进行比较。因此，顶夸克是检验标准模型理论的理想场地。

顶夸克和新物理的关系

由于顶夸克的质量比其他夸克的质量至少高 1 到 2 个数量级，因此，顶夸克在与电弱破坏（质量）相关的新物理方面有着独特的作用。如很多新物理更加倾向于与顶夸克耦合，从而衰变到顶夸克。这样，精确研究顶夸克的性质、产生、衰变能有更大可能发现新物理的迹象。而顶夸克由于其巨大的质量，独特的衰变产物，是高能物理实验中比较容易鉴别的粒子，因此从实验的角度来说是比较容易和本底区分开来。这些因素决定了顶夸克在新物理中寻找的重要地位。

顶夸克 / 单顶夸克发现的历史

最早预言顶夸克存在的是小林诚 (Makoto Kobayashi) 和益川敏英 (Toshihide Maskawa)。为了解释在 K 介子衰变中观测到的 CP 破坏现象，他们提出了 CKM 矩阵理论，预言了第三代夸克——顶夸克和底夸克——的存在。然而，该理论无法预言第三代夸克的质量，人们并不清楚应该在哪个能量范围内寻找它们。四年之后，底夸克在费米实验室中被发现，使人们更加确信顶夸克的存在。很多人乐观地认为顶夸克很快就会被发现。而事实上，由于其巨大的质量，顶夸克很长一段时间藏匿在粒子物理实验所能达到的能量范围之外。在 SLAC, DESY 和 CERN 的 SPS 上的顶夸克寻找均以失败而告终，直到 22 年后的 1995 年，Tevatron 终于捕捉到了顶夸克的准确信号。小林诚和益川敏英也因为预言第三代夸克的工作而分享了 2008 年的诺贝尔物理学奖。

但是，这并不是寻找顶夸克故事的终结。在上述发现顶夸克的过程中，顶夸克都是通过强相互作用力成对产生的，而标准模型同时预言的顶夸克通过弱相

互作用力产生的过程，即单个顶夸克伴随其他粒子产生的过程的寻找一直持续到现在。单顶夸克有三种产生模式，分别为 t- 模式，s- 模式和 tW 伴随产生的模式。这三种模式都可以验证顶夸克是否参与弱相互作用，并直接测量 CKM 矩阵理论中的矩阵元 $|V_{tb}|$ ，从而进一步验证这一获得诺贝尔奖的理论工作。单顶夸克任何一种模式的产生与标准模型预言的显著差别将预示新物理的存在。

显然，寻找通过弱作用力产生的单顶夸克的过程也并不容易，弱相互作用的强度比强相互作用的强度小了 6 个数量级左右，通过弱相互作用产生的顶夸克相对于强相互作用产生的顶夸克来说是稀少的。直到 2009 年，单个顶夸克产生的 t- 模式才在 Tevatron 上被发现。但是发现其他两种模式的道路依然曲折。更大的希望寄托在 2010 年开始取数的大型强子对撞机上。到了 2012 年，大型强子对撞机上就观测到了 tW 模式的产生证据并在 2014 年得到确认；与此同时，Tevatron 也在停止运行 2 年之后，宣布确认了单顶夸克 s- 模式的产生。2014 年 6 月，美国物理学会发表了相关的观点文章，详细介绍了单顶夸克的发现历程。至此，顶夸克通过弱相互作用力产生的三种模式全部得到确认。

在发现顶夸克和单顶夸克各个模式的过程中，除了最后发现的 s- 模式是综合了 CDF 和 D0 的结果外，其他各项发现均有 2 个不同的实验发布结果，如顶夸克和 t- 模式分别由 Tevatron 上的 CDF 实验和 D0 实验独立地观测到；而 tW 模式则由大型强子对撞机上的 ATLAS 实验和 CMS 实验分别独立观测到。这种在相同对撞机上多个物理目标相同的实验之间存在极强的竞争关系，使每个实验上的人都尽力做得最好。同时，由于两个实验完全独立，能够互相验证对方的结果，使得其发布的能够互相印证的物理结果更加可信。

顶夸克探测的现状——实验和最新进展

到现在为止，世界上仅有 2 台粒子对撞机产生过顶夸克，一个是发现顶夸克的 Tevatron，现在已经停止运行了；一个是发现希格斯玻色子的大型强子对撞机。在大型强子对撞机的建设初期，顶夸克还没有在实验上观测到，而如今的大型强子对撞机，却是名副其实的顶夸克工厂。仅 2010 年到 2012 年 3 年间，大

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、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2015 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 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；合订本每本 50 元；2012 ~ 2014 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。

型强子对撞机上的 ATLS 和 CMS 实验各记录下了近 1000 万的顶夸克事例，远超 Tevatron 运行 28 年所获得的顶夸克事例总和。在大型强子对撞机上可以对顶夸克进行更加细致的研究。目前集中在顶夸克的质量测量，利用顶夸克检验标准模型，以及与顶夸克相关的新物理寻找方面。大型强子对撞机上顶夸克质量测量精度已经达到了 1 GeV；所有顶夸克的性质测量均与标准模型的预言相符合。虽然所有寻找与顶夸克相关的新物理均未观测到显著的新物理信号，但是却观测到了顶夸克在强子对撞机上的电荷不对称性超出标准模型的预期，这一实验结果最终还没有确定是否为新物理的信号，但是相关的研究已经大大推动了顶夸克理论的发展。

顶夸克探测的未来

随着对顶夸克的深入了解，理论学家们期望能够对顶夸克的性质做更精确的测量，包括顶夸克的质量，“裸”夸克的性质等，从而精确检验标准模型，

寻找新物理的蛛丝马迹。目前正在运行的大型强子对撞机已经获得了世界上最大的顶夸克样本，在未来二十年左右的时间内，大型强子对撞机将取得更多的顶夸克数据，从而对顶夸克的性质，对顶夸克各种产生模式做细致的研究。然而，无论是首次发现顶夸克的 Tevatron，还是现有的顶夸克工厂——大型强子对撞机，在精确测量顶夸克质量方面都受到了强子对撞机本底复杂，理论计算精度有限等因素限制。因此，要想大幅度地提高对顶夸克性质的测量，必需采用新的实验方案。未来多个正负电子对撞机的方案均提出了精确测量顶夸克质量的物理目标，如日本国际直线对撞机（ILC），欧洲的未来环形对撞机（FCC-ee）等。中国目前正在预研的希格斯工厂（CEPC），如果能够把加速器环建造到 80 千米以上，也将能够达到顶夸克对产生所需的 350 GeV 质心能量，从而能够精确测量顶夸克质量等参数。

无论如何，顶夸克性质的探测远未结束。