

# 未来最有可能震动物理世界的实验

杨长根 译

(中国科学院高能物理研究所 100049)

当 CERN 的科学家 2013 年 7 月宣布他们发现了希格斯玻色子的时候,描述所有已知粒子和相互作用的标准模型理论被认为已经发现了它框架结构最后一点所缺少的东西,这个东西就是被认为给出所有粒子质量来源的希格斯玻色子。这意味着当今时代的粒子物理学已经划上了圆满的句号。

这是一件非常好的事情,对吧?慢着,也可能不是。科学家一直以为标准模型所缺憾的希格斯粒子是非常重要的,它将引导更好的理论出现。但是,它带来的却是困扰。

现在 LHC 的 CMS 实验上进行研究工作的加州理工学院粒子物理学家斯皮罗普鲁 (Maria Spiropulu) 说:“我们处在一个说不清楚的困扰里”。CMS 实验是发现希格斯粒子的主要实验之一。

说起来很奇怪,物理学家曾希望,更是期望,希格斯粒子不是像他们所预言的那样,至少希格斯粒子的性质不是标准模型所预言的那样,让大家可以建立一些新的模型。但希格斯粒子太正常了,几乎就以标准模型所预言的样式出现了。

更不幸的是,科学家本来希望能够找到其他奇特粒子存在的证据。这些奇特粒子可以指向超越标准模型的新理论,比如大家所喜欢

的超对称理论,它预期存在某些类似于像我们已知的电子、夸克和光子的重粒子。

他们对希格斯粒子完全符合标准模型这一结果感到失望。我们该如何走出这个困境?答案是需要更多的数据!

未来一些年,实验家会努力给出新结果,也许能够回答暗物质、中微子性质、希格斯粒子本性等问题或给出下一个时代粒子物理的轮廓。这里我们列出一些应该引起大家注意的实验项目。这些实验是科学家所最为关注的,因为它们可能给出近代物理的新曙光。

## ATLAS 和 CMS

现在大型强子对撞机 (LHC) 没有忙着进行质子对撞,而是由工程师们安装新的设备,把能量升级到更高。这个过程可能持续到 2015 年,但对撞机在早先已经获取了等待分析的海量数据。ATLAS 和 CMS 两个主要的搜寻希格斯粒子的实验可能会从这些数据中得到意外的发现。粒子物理学家米勒 (David Miller) 说:“我们过去在找软柿子捏,发现了希格斯。现在得做难的了”。

这些数据里可能埋藏着什么东西?现在谁也不知道,实验组将仔细梳理发现希格斯粒子的 2011 年和 2012 年数据。科学家希望能够找到存在其他粒子的线索,比如超对称

理论预言的奇异粒子。他们同时还将对希格斯粒子做更深入的研究。

你看,科学家们并没有某种红铃铛,每当他们发现一个希格斯玻色子,铃铛就“叮”的响一声。事实上,ATLAS 和 CMS 实验并不能真正看到希格斯。他们实际上是寻找希格斯粒子衰变后的不同粒子。最好测量的衰变包括了希格斯衰变到夸克和反夸克,或者两个光子。科学家们正在确定它衰变到各种不同粒子组合的百分比,这些数值将决定它的性质。

也有这样的可能性,经过仔细的分析,科学家们把所有的衰变道加起来后,这个数值不到百分之百。差值可能预示着希格斯粒子衰变到了探测器看不到的粒子。

粒子物理学家斯皮罗普鲁说:“我们把这叫作不可见道衰变”。它可能激动人心的原因是希格斯粒子变成了奇特的粒子,比如暗物质粒子。

我们从宇宙观测中已知暗物质有质量,因为希格斯粒子就是给出质量的粒子。因此 LHC 的数据就可以告诉科学家希格斯和暗物质的联系有多紧密。如果找到了,这些不可见衰变将打开一扇探索新世界的大门。斯皮罗普鲁说:“套用句流行语,这可以叫‘暗物质门’。”

## NOVA 和 T2K

中微子是标准模型里的怪物。

它们非常小，基本没有质量，几乎不与其他亚原子动物园的成员有作用。历史上，它们是实验意外结果的载体 (<http://www.wired.com/wiredscience/2012/03/stange-neutrinos-experiments>)，未来可能揭示出它们更为奇特的性质。目前对它的性质还不全清楚，科学家们正在研究。

阿贡国家实验室的物理学家古德曼 (Maury Goodman) 说：“下一轮实验里我们能对这些未知的性质给出答案” (<http://www.anl.gov/contributors/maury-goodman>)。

位于美国的 NOvA 实验 (<http://www.nova.fnal.gov/>) 将有可能确定中微子的一些性质，比如它的质量。世界上共有 3 种类型的中微子：电子、 $\mu$  子和  $\tau$  子类型的。我们只知道它们质量很小，最多是电子质量的一百亿分之一，但我们不知道它们具体有多重，也不知道哪一种最重，哪一种最轻。

NOvA 将把中微子束流从位于芝加哥附近的费米实验室打到位于 810 千米外的明尼苏达州 Ash River 的探测器上，尝试确定中微子质量的顺序。在日本也有一个叫作 T2K 的类似实验 (<http://t2k-experiment.org>)，把中微子束流送到 295 千米以外。当中微子通过地球的时候，中微子在 3 种不同类型之间发生振荡。比较中微子发出时的类型和到达远处时类型的不同，NOvA 和 T2K 就能够高精度的确定它们的性质。

T2K 已经运行了几年，NOvA 预期 2014 年开始获取数据并运行

6 年。科学家希望回答有关中微子的剩余问题。

## 暗物质直接探测

仅就暗物质是什么这个问题，科学家也不知道。有人说它是一种很重的粒子，它们影响银河系和星系的形状。另有些与众不同的人说这是由于我们错误理解引力或者还有未曾发现的巨大暗区的错觉 (<http://www.wired.com/wiredscience/2013/01/musket-ball-dark-force/>)。

无论如何，物理学家可能很快有些答案。但很不幸现在有的还只是问题。

现在有足够多的暗物质直接探测实验，问题是他们指向了不同的方向。一部分物理学家运转了他们的探测器，但完全没有测到暗物质信号，表明他们需要建设更大并且更灵敏的探测器。另一些物理学家使用小一些，但对其他种类暗物质候选者灵敏的探测器进行测量，他们说前一类实验家忽略了蛛丝马迹的暗物质信息。

LUX 是一个非常灵敏的探测器 ([http://lux.brown.edu/LUX\\_dark-matter/Home.html](http://lux.brown.edu/LUX_dark-matter/Home.html))，最近发表了他们第一轮测量结果 (<http://www.wired.com/wiredscience/2013/10/lux-dark-matter/>)。本来预期他们能够澄清这方面的困惑，但却增加了更多的谜团。看起来未来几年内，不同的实验需要获取更多数据，希望能够给出结论。

这些困局可能对美国的努力产生阻碍。经济的衰退意味着美国能源部会削减暗物质探测的实

验数目。芝加哥大学的物理学家科勒 (Juan Collar) 说：在未来的几个月里，能源部的机构很可能只支持两到三个主要的实验组 ([http://kicp.uchicago.edu/people/profile/juan\\_collar.html](http://kicp.uchicago.edu/people/profile/juan_collar.html))。他说：“这将使很多人不高兴。”

问题在于大家对于什么是探测暗物质的关键缺少共识。在大家使用同样的方法探测暗物质前，他们需要确定他们的仪器看到的是一样的东西。

他说：“在你想要限定你的测量技术前，在 10 到 15 年内你发现你只拥有这些不同实验技术之中的一种，你没法用一种技术去检验另外一种技术得到的结果。”

欧洲合作组，比如 XENON 组 ([http://xenon.astro.columbia.edu/XENON100\\_Experiment/](http://xenon.astro.columbia.edu/XENON100_Experiment/)) 将继续建设新探测器，提高测量灵敏度。未来的一个欧洲合作组 EURECA (<http://www.eureca.ox.ac.uk/>) 计划把已经看到某种可能是暗物质的几个合作组联合起来，以进一步研究这个可能性。因此没有资金的注入，美国很可能会落后。

## GERDA 和 MAJORANA

标准模型虽然取得了巨大的成功，但它同时也被打破了。科学家们过去从中微子有质量就知道这会发生，虽然从标准模型本身看起来这不应该，但未来中微子的研究将可能最终背离这一模型。

一类特殊的实验叫作无中微子的双  $\beta$  衰变，它可以解释一些标准模型还没能解释的事情：为什么世界仅是由物质组成的

(<http://www.simonsfoundation.org/quantum/20131010-neutrino-experiment-intensifies-effort-to-explain-matter-antimatter-asymmetry/>)?更确切的说,标准模型预言了大爆炸之初,物质和反物质是等量产生的。但因这两种形态相互湮灭的对立性,宇宙应该空无一物。可你往窗外看看,世界是如此的多彩。

当中子转变为质子和电子,以及同时放出一个反中微子时, $\beta$ 衰变发生了。这个过程的发生也可以稍微有点不同,中子也可以吸收一个中微子从而变为一个质子和电子。当第一个过程产生的反中微子被第二个过程的中子吸收后,极稀有的无中微子双 $\beta$ 衰变就会发生。

这个情况的发生只有当中微子和反中微子相同时才会出现,或者说中微子的反粒子就是它自己。现在还没有人知道这是否成立,如果它成立,那早期宇宙粒子衰变过程产生的物质就比反物质略多一点。有几个实验的目标设计为探明中微子是否是它的反粒子。

目前在运行的有错阵列探测器实验(GERDA)(<http://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/>),它于2013年9月份发表了第一篇文章。GERDA实验没有发现看到无中微子的双 $\beta$ 衰变,只给出了衰变可能性的严格限定。美国的MAJORANA合作组(<http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2012/05/16/majorana-demonstrator/>)以及加拿大的SNO+合作组(<http://snoplus.phy.queensu.ca/Home.html>)也在找寻

同样一个过程。在未来10年内,他们也许有希望找到答案。

### 奇异中微子

即使在研究中微子的性质方面,例如中微子的质量,科学家们也碰到了新问题。

物理学家古德曼说:“人们相信实际的中微子比我们已知中微子图像更为复杂。”

一个最新的例子就是反应堆中微子异常(<http://www.wired.com/wiredscience/2012/03/strange-neutrinos-experiments/?pid=3332>)。中微子的发现最早是从反应堆出来的,2011年一个更为仔细的分析提出:长久以来,科学家们测到的反应堆中微子其实少了一小部分。现在需要实验物理学家们确定这是否是真的。难点在于,你需要把探测器放得非常靠近反应堆。有几个非常勇敢的实验家也许能够帮助研究人员搞清楚这个问题,他们分别来自于日本的CeLAND组和欧洲的SOX组。

这个发现可能会很激动人心,因为它可能指向新类型的中微子,比如惰性中微子。我们几乎感觉不到的已知中微子参与4种相互作用中的两种(引力和弱相互作用)。惰性中微子只有通过引力与其他粒子相互作用才有所体现。想象一下引力是那么弱,而中微子又几乎没有质量,因此探测惰性中微子是极难的任务。

过去十来年也获得了中微子的另外一些反常特性。MiniBooNE实验(<http://www-boone.fnal.gov/>)本来预计要解决前一个实验的问题,

但它的几个奇怪发现却有可能给出新的中微子特性(<http://www.wired.com/wiredscience/2012/03/strange-neutrinos-experiments/?pid=3331>)。MiniBooNE实验仍在运行,继续寻找有趣的现象。

### 冰立方

冰立方(IceCube)中微子望远镜(<http://icecube.wisc.edu/>)是科学家设计出的最疯狂的观测站,它的上千个灵敏器件位于南极冰层下一立方千米的范围里。它是一个千真万确的望远镜,观测来自太阳系和银河系外的中微子。

冰立方于2010年建成,去年发表它的首次测量结果(<http://icecube.wisc.edu/news/view/121>)。研究人员实验的目的是回答太空远处的问题,但它的发现却使问题更加复杂化。考虑到这么大探测器的尺寸,这个望远镜应该能够看到来自宇宙的更多中微子,但它只看到两个。这样的事例很稀少,合作组命名它们为Bert和Ernie(<http://icecube.wisc.edu/news/view/164>)。今年又发现一个这样的高能中微子,命名为Big Bird。

这样的高能中微子被认为来自于天上极端的事件,比如神秘的 $\gamma$ 暴。天文学家也在利用其他观测站观测 $\gamma$ 暴,但冰立方的科学家并没有在天文学家观测到 $\gamma$ 暴的同时观测到极端中微子事例。

夏威夷大学的物理学家勒恩德(John Learned)说:“我们已经喝着啤酒,坐在一起讨论过多次了,无法解释这个问题”(<http://www.phys.hawaii.edu/~jgl>)。“这

其实也是我们所喜欢的，这说明我们的某些假设错了。”

冰立方将继续获取数据，也许他们将能够解释他们的测量结果。但他们的发现表明需要更大的中微子望远镜。科学家们已经提议在南极的 Ross Ice Shelf 建设 ARIANNA 观测站 (<http://arianna.ps.uci.edu>)，它的望远镜将覆盖近一千立方千米的大小。

## 长基线中微子实验

为了解决中微子的遗留问题或未来可能出现的新问题，美国的物理学家希望能够完成长基线中微子实验 (LBNE) (<http://lbne.fnal.gov/>)。这个装置位于南达科他州的一个矿井里，将测量从伊利诺伊州费米国家实验室用加速器束流产生的中微子，飞行距离近 1300 千米。

通过观测 3 种不同类型中微子间的振荡，LBNE 就是一个发现中微子特性的机器。你需要知道中微子质量吗？LBNE 会给你答案。惰性中微子什么样？LBNE 会给你帮助。不幸的是，这个项目估计花费 15 亿美元。在目前美国削减科研经费的情况下，能源部要求物理学家再进行讨论 (<http://news.sciencemag.org/2012/03/doe-scraps-plans-neutrino-experiment-mine>)，给出一个便宜些的方案。

这个领域许多人希望几年后经费吃紧的情况会有好转。也许在下一个十年，和 LBNE 相似的装置可以建起来，相关的问题可以被解释。当然也会碰到更多激动人心，值得探索的秘密。

## HL-LHC 和 ILC

大型强子对撞机最近才发现它的宝藏——希格斯粒子，但是科学家们已经在想怎么从这个机器上榨取更多令人印象深刻的成果。如果一切按计划实行，那么到 2020 年，这个机器将进行一次大的提升。

高亮度的大型强子对撞机将大幅度提高质子对撞能量到 30 TeV，这是现有峰值能量的 3 倍，仅比美国 20 世纪 90 年代中开工建设，但最终下马的超级超导对撞机略小一点。工程师们还需要提高束流的质子数目，产生更多的对撞和更多的末态粒子。

加州理工学院的粒子物理学家斯皮罗普鲁说：“高亮度的对撞对数据获取形成挑战，我们把这叫作堆积。”特别的，物理学家必须学会从噪音中筛出更高能量对撞产生的极为稀少的事例，后面几年他们会研究这些事例可能的形状。斯皮罗普鲁说：“我们还需要升级探测器成超级 CMS 或超级 ATLAS，我们过去从没有这么做过。”

处于构思阶段的计划还有国际直线对撞机 (ILC) (<http://www.linearcollider.org/>)，它的性能将超过大型强子对撞机。日本为争取主持这个机器的建设做了很多努力，投资一半的建设费用，机器建在北见山区。但是 ILC 的合作方，包括欧洲和美国，目前仍搁置该项目建设资金的需求，因为资金需求预计达近 70 亿美元。

ILC 能够产生巨大数目的希格斯玻色子，使科学家可以精确测量它的性质。它也可能发现其他的反

常事例，用以研究超越标准模型的异常理论。假定它的最终设计能够被批准并获得经费支持（这是很不确定的），ILC 就能够在 2016 年开始建设并在 10 年后完成。

## 暗能量测量

20 世纪最出人意料的一个发现是暗能量。宇宙在膨胀的理念，或者说恒星和星系间的距离在缓慢增加，是很奇怪的。但科学家们很早就有这个术语了。更确切的是，科学家们对远距离超新星的仔细观察表明一切事物间的距离不仅仅是增加，而且是加速增加。

物理学家们还没有确定的线索能说明宇宙膨胀的原因。暗能量是宇宙大谜题的一个替代术语。几个即将开展的实验至少会尝试发现宇宙当中正在发生的事情。

大部分实验将尝试精确的绘制夜空中数千的星系和超新星的图，暗能量测量 (DES) (<http://www.darkenergysurvey.org/>) 始于 2013 年，将得到 3 亿个星系和 10 万个星系团的图像。由于光传播有时间，因此我们看到的更远的星系在时间上也更早。通过确定大尺度结构随时间的变化 (<http://www.wired.com/wiredscience/2012/09/dark-energy-survey/>)，宇宙学者对暗能量如何起作用的历史就能形成一个更清楚的概念。Hobby-Eberly 望远镜暗能量实验 (HETDEX) 同样也在通过观测非常远距离的早期宇宙解决暗能量随时间演化的问题。

(本文译自 2013 年 11 月 11 日 [wired.co.uk](http://wired.co.uk)，作者 Adam Mann)