

· 科学家在想什么 ·

“科学家在想什么”是本刊在专家的建议下开辟的新栏目，将不定期刊出。本栏目试图通过介绍科学家对自身研究领域的关注热点、研究计划、研究目标及其对研究前景的展望，来提升读者对相关科学领域的认知高度和深度。希望有关专家、学者踊跃投稿，以保证此栏目繁荣。

希格斯玻色子找到后， 美国物理学家在想些什么

童国梁

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、具有划时代意义的希格斯粒子的发现引发物理学家的新一轮思考

2012年7月4日，法国和瑞士边境上的欧洲核子研究中心(CERN)宣布，在大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS和CMS两个实验组分别发现了一个新的基本粒子，被称为希格斯(Higgs)粒子。2013年10月8日，比利时物理学家恩格勒特(Francois Englert)和英国物理学家希格斯(Peter Higgs)因1964年的理论工作被授予2013年度的诺贝尔物理学奖。这是高能物理和基本粒子物理近四十年来最重大的发现。大家知道，粒子物理学的标准模型是一套描述强力、弱力及电磁力这3种基本力及组成所有物质的基本粒子的理论。在这框架下，基本粒子中的费米子包括夸克和轻子：夸克有6味，考虑它们的“色”以及正反粒子，自然界一共有36种夸克，而轻子(如电子、 μ 子、 τ 子及其相应的中微子，加上每种粒子还都

有反粒子)则有12种，规范粒子(如光子、3个传递、控制夸克和轻子衰变的弱相互作用的中间玻色子 W^+ 和 Z^0 、8个传递强(色)相互作用的胶子 g ，如果再加上新发现的希格斯(H^0)粒子，那么标准模型的基本粒子就是61种。

弱相互作用和电磁相互作用的统一是标准模型迈向成功的重要一步。1961年，格拉肖(S.Glashow)提出了一个 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一模型。1964年英国物理学家希格斯提出了希格斯机制：希格斯场引起自发对称性破缺，并将质量赋予规范传播子和费米子。这样就扫清了电弱统一理论发展的绊脚石。在此后的半个世纪，希格斯粒子的寻找一直成为高能物理学界的最重要目标之一。找到了希格斯粒子，基本粒子标准模型也就圆满了，希格斯粒子的发现也就有了划时代的意义。在此重要时刻，各国粒子物理学界都在总结、检讨，找出自己在该领域的未来发展方向。2013年美国科学家也为此举办了研讨会，

商讨粒子物理的未来方向。

二、2013斯诺马斯会议折射出美国粒子物理的困境

希格斯粒子找到了，粒子物理学家下一步的目标是什么？他们在想些什么？当然，科学家的想法不能脱离实际。2008年经济危机爆发以来美国经济一直低迷，美国科学家的雄心不会不受到影响。

从1982年开始，每隔几年，美国粒子物理学会都会在科罗拉多州著名游览胜地斯诺马斯(Snowmass)召开夏季研讨会。这类研讨会是美国物理学会粒子和场分会为高能物理界发起的一项长期活动。它的目标是激励粒子物理学家的宏大志向。斯诺马斯会议也通过报告的方式把高能物理发现的机会及其重要意义传递给科学界和政府层面，以扩大高能物理的影响。2013年夏天这样的研讨会又一次举行，不同的是，这次会议并没有在豪华的游览胜地斯诺马斯举行，而是选择在明尼苏达大学双子城分校召开，有将近七百位高能物理学



图1 2013年夏天数百位物理学家出席斯诺马斯会议，研讨该领域的长期规划

家与会，其中大多数来自美国。从7月29日至8月6日用了9天时间聚集在一起对粒子物理研究领域进行梳理和检讨，讨论了美国粒子物理未来的发展方向（图1）。这次会议离上次会议已时隔多年，那次会议还是在2001年召开，而会址仍在科罗拉多州的斯诺马斯举行，会议足足开了3个星期。

这次会议地点的变更主要原因是受到美国政府对于公务员参加会议费用的限制，选择在一所大学校园里开，无疑可以保证便宜的膳宿及相关费用。为了节约开支，有些来自费米和阿贡（Argonne）国家实验室的参会人员甚至采用了拼车的出行方式。这里似乎也折射出美国粒子物理所面临的困境。美国

能源部（DOE）划拨给高能物理学的预算费用目前为7.52亿美元，跟过去10年相比缩水了15%。这次会议尽管不在斯诺马斯召开，但鉴于研讨会性质、任务以及会议组织者、参会者的一致性，这次会议仍被称为斯诺马斯会议。

三、这次会议关注热点

这次斯诺马斯会议上，强调了对希格斯粒子性质的研究，要全面探测和理解它。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。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，比如超对称性理论预言的奇异粒子。他们还将对希格斯粒子做

更深入的研究。科学家们正在确定它不同衰变方式的分支比，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。余数可能预示着希格斯粒子衰变到了探测器看不到的粒子，比如暗物质粒子。我们从宇宙观测中推测暗物质有质量，而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之间有什么关系。如果找到了，这些不可见衰变就将打开一扇探索新世界的大门。

这次会议还谈及最近测得的中微子混合角 θ_{13} 比预期的大，这类实验探测3种不同类型的中微子如何从一种类型转变为另一种类

型,称作中微子振荡。会议认为这样的测量结果将为未来的研究设置了平台。

会议关注的另一个大问题仍然是为什么宇宙中物质远比反物质多。暗物质问题也是大家关注的热点,暗物质的质量比物质要大5倍,但我们并不知道它是什么。

会议认为,对希格斯玻色子,中微子以及暗物质都需做更精确的测量。它们是被发现的一个个岛屿,但可能彼此存在很深的联系。

这次斯诺马斯会议也对美国 and 全球意义重大的实验项目进行了评述,认为有希望的领域包括可能在日本建造的国际直线对撞机(ILC),与会者建议美国就应该在该项目中起重要的作用,而希格斯玻色子性质的精密测量也将会在那儿进行。与会物理学家同时也要美国继续它在LHC上的投资,支持LHC升级至更高的能量和亮度来研究希格斯玻色子以及寻找新粒子。长基线中微子实验(LBNE)作为一个全球性项目也赢得参会物理学家的赞赏。人们也为在提高两个量级的水平下寻找暗物质而激动,这样的水平已经达到中微子本底所给出的极限。

再看远一点,斯诺马斯的参会者还谈到CLIC——正在CERN研发的100 TeV的直线对撞机;TLEP,一台高亮度的环形正负电子对撞机;以及一个中微子工厂。

上述是些主要领域。另外还有一些较小的项目也同样使人兴奋。例如费米国家实验室的一个研究稀有的K介子衰变实验。宇宙微波

本底实验也许可以测量极化;膨胀模型之间的区分;除暗能量测量外,推断不同中微子的质量之和。在宇宙前沿的项目中,包括许多暗物质寻找和CMB实验,对这些项目,会议认为它们都需要发展、成长,但是它们规模足够小,不需要全球合作。

四、正确给自己定位,找准未来的发展方向

今天,美国仍是世界上经济和科学最发达的国家。但是在粒子物理领域,美国的地位已经显著削弱,这是一个不争的事实。可以简单回顾一下历史:20世纪40年代,即第二次世界大战时,在基础科学研究领域,美国已经取代了欧洲,成为世界的领导者。20世纪50年代在美国兴起的发展和新建各类加速器热更展现了美国科学的欣欣向荣。这样的情况一直维持了半个世纪。但到1989年欧洲的CERN建成周长27千米的大型正负电子对撞机LEP以及随后的成功运行,表征CERN已成为世界粒子物理研究的最前沿阵地。20世纪80年代以后,两个类似的强子对撞机,即美国的名为超级超导对撞机SSC(Super Superconductive Collider)和CERN的大型强子对撞机LHC(Large Hadron Collider)同时进行预研。但1993年10月美国参众两院联席会议表决停建SSC,而欧洲科学家却以坚定的行动显示了对基础研究的决心,并取得了成功。不同的态度得到了不同的结果。最近几年CERN又在最前沿的希格斯玻色子寻找中取得了重大突破,

领导了粒子物理的前进方向。

“美国在很长时期曾经是粒子物理的领袖”,“今天,除了其他大玩家以外,我们仍然是大玩家,要一块分享领导职责。虽然我们不能单独确定其航向。但站在刀刃处,我们必须参加科学活动,而不管它在何地。”这是美国科学家在这次斯诺马斯会议上发出的声音,给出了自己在粒子物理领域的定位。应该说,这个定位还是比较靠谱的。找到了定位,也就能正确决定自己未来的发展方向。美国已不可能在该领域的各个方向上全面出击。

2008年5月,美国的一个独立粒子物理项目优化小组(P5,即Particle Physics Project Prioritization Panels)把粒子物理领域分成能量、强度和宇宙学3个“前沿”,这样的分类也被能源部和国家科学基金会认可。根据目前的规划,在能量前沿上,美国物理学家参加了LHC实验。在宇宙学前沿上,他们将致力于地下实验,探测暗物质或天文学实验。在强度前沿,费米实验室的实验要求高强度的质子束,以产生足够强度的中微子。这些年来,高能物理的焦点已经从费米实验室的加速器Tevatron转到了在瑞士日内瓦的CERN的LHC。而位于南达科他州一个矿井中的装置LBNE将用来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。LBNE将使美国在强度前沿中领先。这也许是美国维持作为粒子物理一方领袖的唯一选择。

美国科学界视LBNE为其优

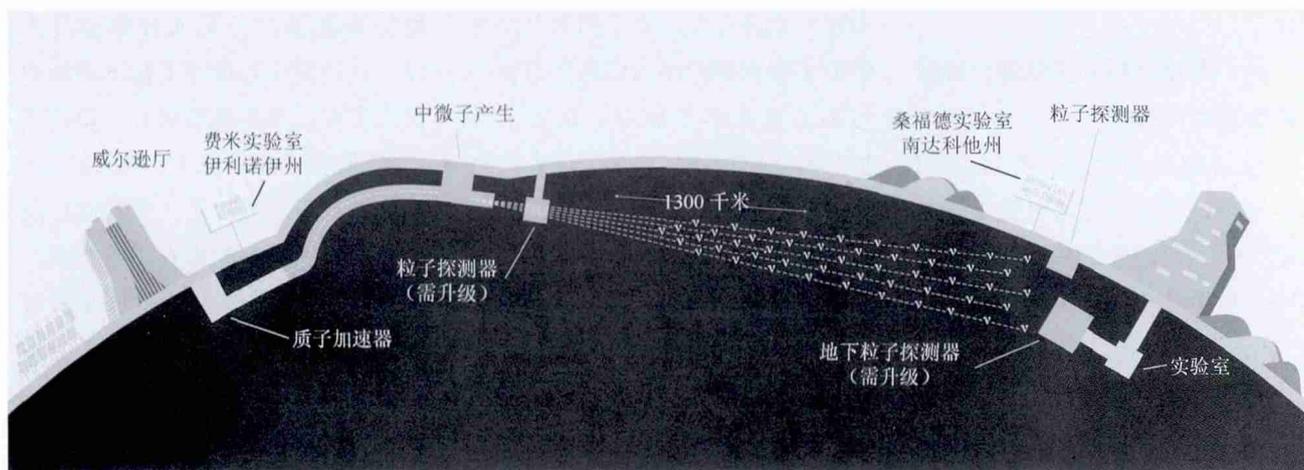


图2 长基线中微子实验装置示意图(图片来源: <http://www.fnal.gov/>)

先发展项目,而且也可能是其在未来相当长时期内在美国本土上建造的一项重点项目。我们在这里对其做一个简单介绍。图2给出长基线中微子实验的示意图。

LBNE 计划是一项全球中微子合作项目,该实验将高精度地测量基本物理参数以及揭示超标准模型物理。LBNE 将大大加深我们对于中微子的理解以及它们在宇宙中所扮演的角色,从而阐明物质和反物质的性质。

LBNE 将把世界上最高强度的中微子束流透过地球的覆盖层轰击一个几千吨大体积靶物质探测器,探测器用来记录中微子和靶物质之间发生的相互作用。中微子是无害的,能够通过物质,而与其他物质粒子发生极稀有的碰撞。因此,不需要隧道;绝大多数中微子将通过大地的覆盖物,通过探测器。由于中微子相互作用是如此的稀有,于是需要收集一二十年的数据。

伊利诺伊州巴达维亚(Batavia)的费米实验室是LBNE实验坐落的地点,也是LBNE未来束流的位置,而南达科他利达

(Lead)的桑福德(Sanford)地下实验装置则是选作安放大质量远地探测器的地点。而“基线”的长短则与中微子源和探测器之间的距离相关。

尚未很好理解的中微子可能提供回答一些关于自然基本问题的钥匙。发现中微子并不像以前想象那样是无质量的,这就对高度成功的粒子物理标准模型攻开了一条裂口。中微子可能成为解决宇宙为何只由物质而不是反物质组成之谜的关键角色。

长基线中微子实验现有来自75个研究所的450位物理学家参加,他们在一起规划和发展实验设备和物理。LBNE 预期在2022年完全建成并准备运行。参加合作组的队伍还在不断扩大。

五、美国物理学家的愿望和担忧

为了保持科学上的竞争力,美国物理学家在上一次的斯诺马斯会议上曾达成共识:优先建造一台巨大的国际直线对撞机(ILC)。但事实证明,那是一个不现实的错误决定,2007年,能源部就表示,他

门无法负担该项目50%的资金份额——约为70亿美元。

2012年下半年,LBNE得到了DOE的批准,但是批准的经费只能建造一台10000吨的远地探测器,代替34000吨的地下探测器。与会物理学家普遍认为如果开始就能得到一个足够大的远地地下探测器,该项目将会产生许多物理。

此外,对于LBNE项目,也存在不同的声音。批评者指出,中微子研究领域过于狭窄,不足以支持美国国家计划。即使我们测量了所有的参数,该计划也终将走到尽头。从事科学工作的人主要集中在大学,他们习惯“用脚投票”,即他们将会到LHC工作。

与会物理学家普遍赞成费米国家实验室应该有个旗舰。而掌管该实验室的洛克耶(Nigel Lockyer)说,实验室的全面建设也许需要外国参加者提供4~5亿美元资助,但该实验可能会揭示在轻子领域中是否会发生CP破坏。“一旦我们知道此事,世界就会大不同了。轻子和夸克领域之间的对称性就会让你相信应该存在大统一

理论”。

六、斯诺马斯会议欢迎一种新型的全球合作模式

粒子物理的全球合作在 2012 年迈进了一大步，这次会议上，他们把 LHC 合作模式称为老模式，这类合作模式被描述为：“我们正在建造，来吧，加入我们”。而他们更喜欢 ILC 将采取的新合作模式，“让我们一块儿干，一起设计”。

现在人们的注意力集中于世界的 3 个主要地区：日本为争取主持 ILC 建设做了很多努力，投资一半的建设费用，机器将建在北见山区。这样日本很有可能成为 ILC 的东道主。欧洲的 CERN 被视为能量前沿的中心。而美国领导的 LBNE 则视为强度前沿中心。其实日本在强度前沿上同样还有一个很强的项目，包括 T2HK (Tokai to Hyper Kamiokande)，这也是个大型探测器，但是一个比 LBNE 较短基线的中微子实验。与会者一致认为，“如果全世界的物理学家愿意发展一种国际合作的共同战略，那么上述 3 个前沿的所有目标应该是可以达到的”。

与会者认为，欧洲和日本主要

着眼于全球合作；而中国和其他可能的主要强手的角色还尚不清楚。日本不仅显示了做 ILC 东道主并把其科学队伍国际化的兴趣，而把全球共同努力视为其解决财政方面问题的诀窍。欧洲粒子物理的代表 CERN 则于 2013 年宣布，它的中、长期的优先项目为 LHC 的升级和一个未来加速器项目；欧洲的战略目标还包括愿意在欧洲以外的 ILC 和长基线中微子项目上投资。

争取政府和人民对粒子物理的理解和支持十分重要。斯诺马斯与会者很重视这方面的宣传。他们列举了重要论据来说明必须继续粒子物理的研究：“粒子物理把人们吸引到科学中来，并且我们的生活水平也都依赖于科学和工程。粒子物理推动了加速器科学。”“粒子物理绝不是一种奢侈品。”他们强调“对我们的挑战是需要让政府认识到发展粒子物理对美国经济有好处，也对美国科学家在参加本土和境外的项目中都能起到显著作用有好处”。

美国科学家在 2013 年的斯诺马斯会议上并不轻松，他们已认识到自己已不是粒子物理的领导者，

他们需要争取与别人分享领导责任；认识到今后世界上粒子物理学家大多不会来美国做研究，而美国的物理学家却要去 CERN 或日本工作。世道真的变了。作为同行的过来人，本人对此也有不少感慨。20 世纪七八十年代，那时如果谁要做高能物理实验，马上就会想到 BNL、费米实验室、SLAC 或者阿贡，现在可不是了，这些美国实验室关闭的关闭，转行的转行，LBNE 竟然已成了美国本土较长期中的唯一前沿项目。人们很容易联想到“衰落”两字。就美国和欧洲比较，经济情况差不多，那么粒子物理领域地位互变是怎么发生的呢？这里面，原因当然很复杂，但转折点似乎就发生在 20 世纪八九十年代双方在强子对撞机项目中的 PK：一方坚守，一方退却；一方积极合作，一方盲目大包大揽；一方精打细算，一方大手大脚，就这样赛出完全不同的前景。这样的教训的确是很深刻的。

本文对于 2013 斯诺马斯会议的介绍多采用 Toni Feder 的报道，详见 *Physics Today*, 2013 年 10 月期。

封底照片说明：

照片上是美国洛克希德-马丁公司正在研制的超音速飞机模拟图，它是标志性的“黑鸟”远程侦察机 SR-71 的后继者“黑鸟之子”SR-72。人们一直梦想制造出一款 5 倍于音速的超高速飞机，目前随着科学技术的不断进

步，新材料的产生，使得实现这个梦想成为可能。SR-72 根据科学家们的设计，其速度可达到 6 马赫，相当于每小时 4567 英里（约合每小时 7350 千米）。它的飞行高度可以达到 8 万英尺左右（约合 2.4 万米），能够在 6 小时内环游世界。这同时也是件足

以让军方垂涎的重要作战武器，SR-72 凭借其惊人的速度配以现代化的电子设备，没有哪件武器能够与之匹敌。但 SR-72 的研制需要巨大的经费支持，这也使得人们何时才能一睹它的风采成为悬念。

(李之 / 供稿)