

最有可能撼动物理学未来的实验

本报记者 刘霞 综合外电

美国《连线》杂志网站近日报道指出,希格斯玻色子的发现标志着现在的粒子物理学已经终结。接下来的几年内,物理实验将集中在厘清暗物质、中微子和希格斯粒子的属性等之上。以下十大实验获得的数据和结论或许会开启一个全新的物理学时代。

发现希格斯粒子:开启物理学新时代

2012年7月4日,欧洲核子研究中心(CERN)的科学家们宣布,他们发现了一种新粒子,其行为方式和标准模型中的希格斯粒子相似,疑似“上帝粒子”。2013年3月14日,CERN发布公告称,对更多数据的分析显示,该中心2012年宣布发现的新粒子“看起来越来越像”希格斯玻色子,计算结果“强有力地表明它就是希格斯玻色子”。

希格斯玻色子被认为是物质的质量之源,有“上帝粒子”之称,它是粒子物理学标准模型“缺失的一环”。自20世纪60年代发展起来的物理学标准模型,是一套描述强作用力、弱作用力及电磁力这三种基本力及组成所有物质的基本粒子的理论,其依赖于希格斯玻色子的存在。

物理学家们认为,希格斯粒子的发现将有助于他们在未来收获更重大的理论,其中包括能解决困扰标准模型问题的理论。但也有人认为,希格斯玻色子的发现,让物理学置身于更令人困惑的境地。据媒体报道,2013年11月初,英国著名物理学家斯蒂芬·霍金在伦敦科学博物馆举行的对撞机上表示,“上帝粒子”的发现令他失望,如果没有发现这种粒子,物理学研究将变得更有意思。

或许,这听起来有些匪夷所思,但其实,有些物理学家甚至期盼希格斯粒子最终被证明与他们预测的并不一样,至少,希格斯粒子的属性与标准模型预测的迥然不同,这样,希格斯粒子将成为科学家们创建新模型的“见证人”。但结果表明,希格斯粒子的质量几乎与标准模型预测的一样。另外,科学家们曾经希望会发现其他新奇粒子存在的证据,指向其他理论,比如,目前流行的超对称理论。这一理论假定,所有已知的亚原子粒子(电子、夸克和质子等),都存在着一个质量更大的“孪生兄弟”,但结果却是一场空欢喜。

发现希格斯粒子反倒让我们更加失望了,那么,我们该如何摆脱这种困境呢?科学家们的回答是:获得更多的数据。在接下来的几年内,他们将专注于以下十大实验,希望其能回答与暗物质、中微子和希格斯粒子的属性等有关问题,为我们勾勒出未来物理学的大致轮廓。

ATLAS和CMS升级:调查希格斯粒子和暗物质的关系

超环面仪器(ATLAS)与紧凑渺子线圈(CMS)是通用型的粒子探测器,也是LHC的两大关键实验。ATLAS的研究人员、芝加哥大学的物理学家戴维·米勒认为,这两大探测器在发现希格斯玻色子的过程中发挥了重要作用。目前,工程师们正在紧密密切地对其进行升级,预计到2015年重新启动。

实际上,ATLAS和CMS根本无法看见希格斯粒子,它们看见的是希格斯粒子衰变成的夸克、反夸克或者两个光子等。科学家们现在试图通过对已有数据进行分析,厘清希格斯粒子衰变成不同粒子所需的时间,以进一步确定希格斯玻色子的属性。同时,他们或许也能发现,希格斯粒子衰变成了这两台探测器没有发现的其他粒子。美国加州理工学院的物理学家玛丽亚·斯皮罗普鲁表示,“希格斯粒子或许会变成某些真正奇怪的东西,比如暗物质粒子等”。

天文观测结果告诉我们,暗物质拥有质量,而希格斯粒子会赋予其他粒子质量,因此,希格斯粒子与暗物质之间很可能有关, LHC提供的数据能告诉我们它们之间的关联有多强。如果科学家发现这种关联,将会打开一个全新的研究领域。

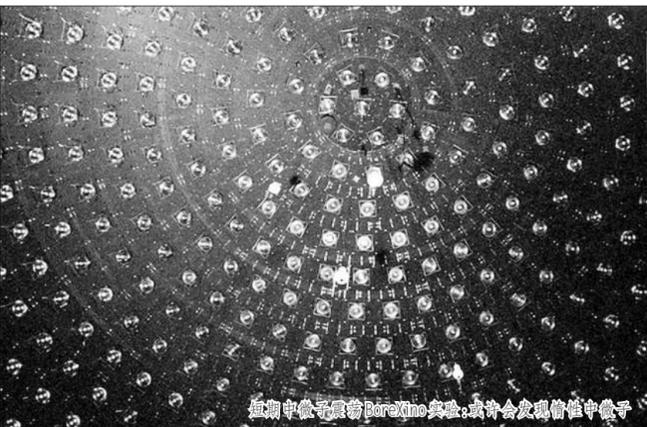
NOVA和T2K:确定中微子的属性

轻如尘、快似光,神出鬼没,能够轻易穿越各种物种,还可以不时变身一中微子无疑是标准模型里描述的基本粒子世界里的“世外高人”;此外,它们或许还背负着有关宇宙大爆炸的惊世之谜,因此,中微子也被称为宇宙的秘密信使,所以,任何与它有关的线索都可谓价值连城。

中微子它们很小,几乎没有质量,而且也很少同其他亚原子粒子“交往”,或许比我们所认为的还要奇特。目前,物理学家们正试图确定它们的某些属性,从而让一些悬而未决的问题盖棺定论。美国阿尔贡国家实验室的物理学家莫里·古德曼说:“这些问题都有答案,或许在下一轮实验中,我们就可以获得这些答案”。

这些实验包括美国费米国家实验室的NuMI离轴中微子实验(NOVA)和日本领导的T2K中微子国际合作组。

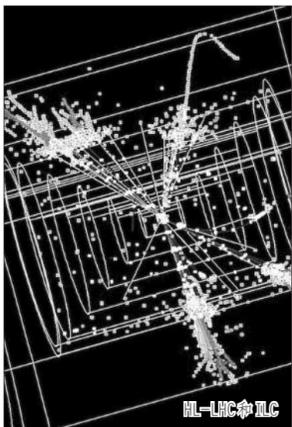
NOVA是北美地区最大、最先进的中微子探测实验计划,主要研究中微子的性质,尤其是它们的质量等信息,以及它们是否在宇宙大爆炸时期中微子与反物质以同等数量出现后介入了物质与反物质不对称机制中。



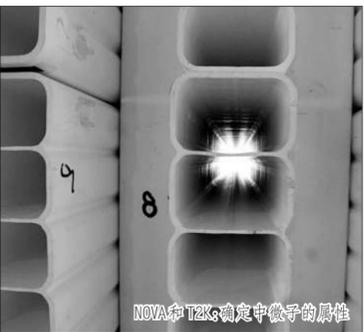
短期中微子震荡Borexino实验:或许会发现惰性中微子



长基线中微子实验



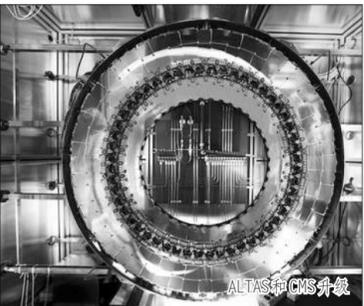
HL-LHC和ILC



NOVA和T2K:确定中微子的属性



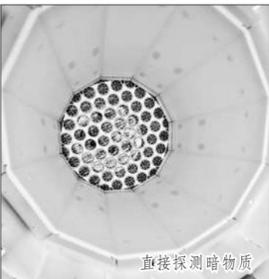
冰立方中微子天文台



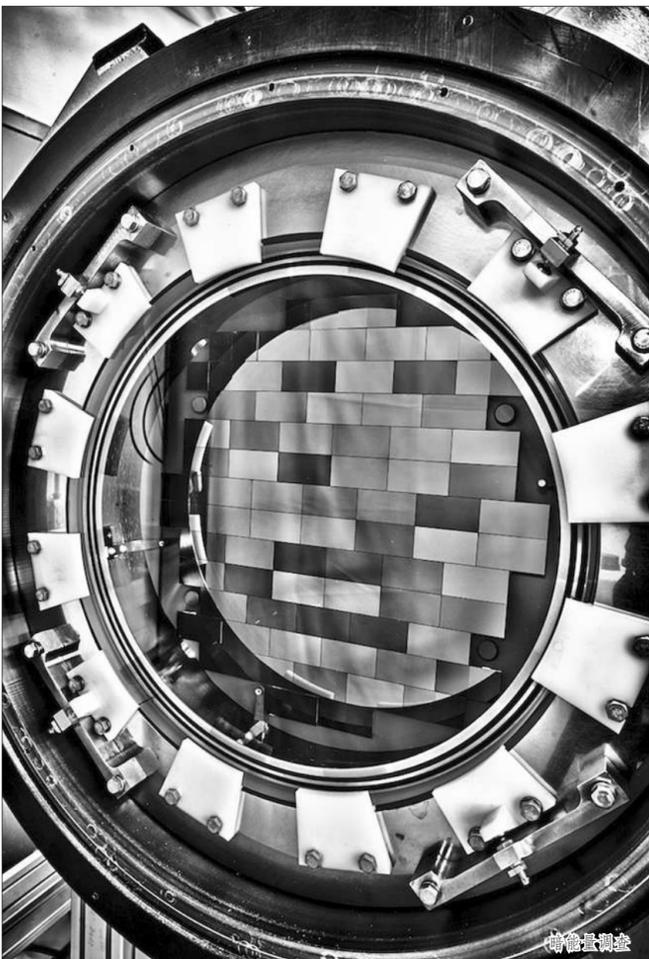
ALTA和CMS升级



GERDA和MAJORANA



直接探测暗物质



暗能量调查

据科学家们目前所知,电子中微子、μ中微子和τ中微子这三类中微子的质量微乎其微,至少不到电子质量的百分之一,但我们并不知道具体是多少以及孰最孰轻孰重。

在NOVA实验中,费米实验室会朝800公里外的位于明尼苏达灰河(Ash River)的中微子探测器发射中微子束,在不到三毫秒的时间内,生成世界上最强大的中微子束。

在日本的T2K实验(T2K是To-kai-to-Kamioka的缩写,即从东海到神冈的中微子实验)中,中微子束“旅行”的距离为295公里。当这些中微子穿过地球时,三种类型的中微子之间会发生“震荡”(即一种中微子转换为另一种中微子)。通过比较射出点的中微子和遥远的探测器探测到的中微子之间的区别,NOVA和T2K将能非常精确地确定中微子的属性。

T2K已经工作几年,NOVA据信会在2014年开始收集数据并继续运行6年。科学家们希望这两大实验能帮助他们揭开笼罩在中微子头上的神秘面纱。

直接探测暗物质

暗物质究竟是什么?科学家们仍然毫无头绪。有人说,暗物质是一些大质量弱相互作用粒子(WIMP),影响了星系和星系簇的形状;也有人认为,暗物质只是一个幻想,源于我们对重力的错误理解;还有人表示,暗物质可能是宇宙中庞大的黑暗部分,等着我们去探索。

虽然暗物质占据了宇宙80%的质能组成,但迄今为止,我们从来没有发现暗物质粒子的踪影。不过,物理学家们坚信,不管暗物质是“何方神圣”,都逃不出他们的“火眼金睛”。

探索暗物质的方法有多种,比如使用间接和直接探测,间接探测暗物质的方法主要是依据暗物质粒子的特点,如果大质量弱相互作用粒子与自身的反粒子发生碰撞,就会发生湮灭,该过程可释放出伽马光子,目前科

学家发现在银河系中央附近天区存在与暗物质粒子行为有关的特殊“光束”,能量在130GeV左右。直接探测暗物质的实验室几乎都处于地下深处,这样可以屏蔽宇宙背景噪声的干扰。

位于美国南达科他州的大型地下氙气(LUX)暗物质探测器是目前全球最先进的暗物质探测设备之一,其位于地下1.6公里的地方,核心装置是一个1.8米高的钛容器中,内部充满了液态氙气,并冷却到零下101摄氏度,如果大质量弱相互作用粒子与氙原子作用,探测器就能发现其信号。

2013年10月30日,LUX的科学家宣布了其首次对暗物质研究结果,结果没有解决问题,反而使暗物质更加神秘。在此前不久,国际空间站阿尔法磁谱仪(AMS)也进行了暗物质探索实验,结果同样差强人意。科学家认为,当前的探测设备可能距离暗物质粒子所需的级别还有一段距离。

另外,在意大利格朗萨索国家地下实验室进行的XENON暗物质计划团队也将继续建造新的探测器并提高其灵敏度。与此同时,欧洲研究协调机构(EURECA)也计划让几个已经看见过或许是暗物质信号的研究团队携手合作,以便最终揭开暗物质的神秘面纱,建立欧洲在粒子物理学研究地位。

GERDA和MAJORANA:搜寻反中微子

尽管标准模型取得了巨大成功,但其并非固若金汤,小小的中微子就让它溃不成军——标准模型认为,中微子应该没有质量,但我们现在都知道,中微子其实有小小的质量。所以,对中微子的进一步研究或许会让科学家们进一步攻破标准模型的防线。

“无中微子双β衰变”实验或许有助于解释标准模型试图解释的问题:为什么宇宙由物质组成?标准模型预测,在整个宇宙大爆炸期间,制造出来的物质和反物质应该一样多,但由于这两种物质形式相遇后会相互湮灭,所以,宇宙应该充满了“无”,但实际情况是,宇宙充满了很多物质。

当原子核内的一个中子自发衰变成一个

质子和一个电子,并在这一过程中释放出一个反中微子,就发生了β衰变。但这一过程或许会发生稍许变化:一个中子吸收一个中微子并变成一个质子和一个电子。而“无中微子双β衰变”则是一种更罕见的情况,第一种情况下产生的反中微子被第二种情况下产生的中子吸收。

但只有在反中微子是其自己的反粒子时,“无中微子双β衰变”才能发生。目前还没有人知道这是否是真的。如果情况的确如此,那么,在早期宇宙中,中微子衰变产生的物质粒子可能比反物质粒子多一点,从而解释为何宇宙中物质比反物质多。

目前,有几项旨在确认中微子是否就是自己的反粒子的试验正在如火如荼地进行,正在意大利格朗萨索国家实验室地下1.4公里深处操作的暗物质探测器阵列(GERDA)就是其中之一。2013年9月份,GERDA公布了第一批研究结果,结果表明,新研究没有发现任何支持“无中微子双β衰变”的证据。当然,这个结果并不能证明这种衰变不可能,只能说迄今为止,这种事件似乎还没有被观测到过。与此同时,美国的马约拉纳(MAJORANA)和加拿大萨德伯里的中微子观测站(SNO)也试图厘清“无中微子双β衰变”这一过程的细节。他们有望在接下来的十年内获得答案。

短期中微子震荡Borexino实验:或许会发现惰性中微子

物理学家莫里·古德曼说:“中微子比我们想象的更加复杂。”最近的一个例子是中微子反应异常。2011年的分析表明,很长一段时间以来,科学家们一直遗漏了探测核反应堆中的小部分中微子。实际上,科学家们第一次发现中微子,是1956年使用核反应堆发射出的中微子“洪流”才探测到这些粒子。物理学家弗雷德里克·莱因斯因此还荣膺1995年的诺贝尔物理学奖。

所以,现在,科学家们需要进行试验以查看核反应堆流出的中微子。日本的CeLAND和意大利国家核物理研究院(INFN)进行的

投资高达35亿欧元的短期中微子震荡Borexino实验(SOX)正在这样做。

最终的结果可能会非常有趣,因为这些实验有望发现新的中微子类型:“惰性中微子”。目前广为人知的三种中微子会通过已知的四种力中的两种(重力和弱作用力)相互作用,然而,惰性中微子仅仅通过重力来向其他粒子宣告它的出现。鉴于重力是弱作用力,中微子的质量微乎其微,所以,探测到惰性中微子实际上是一个非常困难的任务。

“冰立方中微子天文台”:探测高能中微子

“冰立方中微子天文台”是科学家们迄今设计的最疯狂的观测台之一,其位于南极洲约2.4公里深的冰层下1立方公里的冰块内,由86根装备了传感器的电缆所组成,每根电缆包含有60个光学传感器,这5160个传感器的使命就是搜寻太阳系和我们所在的星系外的中微子。

2012年4月,“冰立方中微子天文台”竣工。2012年,其发布了首个观测结论。尽管这一观测台的初衷是帮助科学家们回答宇宙深层次的问题,但其发现让人更加困惑。按照道理来说,这一天文台应该可以看见很多中微子在其前面鱼贯而过,但实际上很少。

2012年4月,该天文台探测到两颗能量约为1千万亿电子伏特的中微子,这是科学家自1987年(这一年,天文学家首次探测到来自与我们的银河系为邻的大麦哲伦云内一颗超新星内的中微子)以来首次确定探测到来自于太阳系外的中微子。科学家们将其命名为“伯特”和“厄尼”(电视剧《芝麻街》中的人物),其能量为1987年观测到的中微子的100万倍。2013年,科学家们发现了一颗能量更高的中微子,并将其命名为“大鹏(Big Bird)”。

这样的高能中微子被认为是在一些极度狂暴的天体事件(比如伽马射线爆发等)中形成。尽管天文学家们发现其他观测台上探测到了伽马射线爆发,但冰立方中微子天文台并没有看到任何中微子粒子。

夏威夷大学的物理学家约翰·勒尼德说:“迄今为止,还没有好的模型可以解释这一发

现,实际上,我们喜欢这种情况,因为这意味着,我们的假设真的在某处出了错。”

冰立方中微子天文台将继续收集数据,但其目前得出的结论表明,我们或许需要建造一台更大的中微子望远镜(或者我们需要更多时间)。也有科学家认为,覆盖南美洲罗斯冰架1000立方公里范围的阿里安娜(ARIANNA)天文台,或许能够探测到更高能量的中微子。

长基线中微子实验:探测中微子振荡

为了真正解决与中微子和未来可能出现的新粒子有关的问题,美国物理学家们希望制造“长基线中微子实验(LBNE)”。这一设备位于南达科他州一处煤矿中,能够探测到距离此地1300公里远的费米国家实验室发出的中微子束。

科学家们试图通过这一实验,探测三种不同类型的中微子之间的振荡,从而发现与中微子的性质有关的信息。另外,LBNE也将回答“惰性中微子究竟是什么”这一问题。但不幸的是,这一项目的成本可能高达15亿美元。随着美国不断压缩科研开支,能源部要求物理学家们重新提供一些比较廉价的计划来代替。

不过,这一领域的很多科学家乐观地认为,资金问题会在未来几年内得到解决。或许,在接下来的十年内,LBNE这样的探测器会被成功建造并帮助科学家们解答问题及提供更多需要他们去探索的线索。

LHC的继任者:将产生更多希格斯玻色子

LHC找到且只找到了希格斯玻色子,它没有发现任何奇异的粒子,比如我们所猜想的已知粒子的“重量级”伙伴——超对称粒子。这些粒子也许依旧在那里,只是因为太重了,以至于LHC也有心无力,所以,科学家们开始对LHC进行升级。如果一切按计划行事,那么,到2020年,升级后得到的高亮度大型强子对撞机(HL-LHC)将成为科学研究的助推器。

高亮度大型强子对撞机将显著增加对撞质子的能级,达到30万亿电子伏特,为LHC目前最大对撞能级(7万亿电子伏特)的三倍多。不过,这与美国于上世纪90年代中期因故“夭折”的超导超级对撞机(SSC)相比还是相形见绌,SSC将能达到40万亿电子伏的能量。

加州理工大学的粒子物理学家玛丽亚·斯皮罗普鲁说:“从这么庞大的机器那儿收集数据将成为一个巨大的挑战”。而且,科学家们也将不得不学会如何更好地对实验中的蛛丝马迹进行分析,从而发现极端罕见的事件。

另外一个已纳入科学家们的议事日程,被列为后LHC时代首选方案的是国际直线对撞机(ILC),这是一对长达11千米的电子枪,枪口相对,像是要进行一场亚原子级别的决斗。2013年年初,项目组在日本北部拟选了地址。日本政府也将这一计划看作振兴当地经济的一剂强心针,为此,负担了一半的建造成本,另外可能高达35亿美元的资金将由美国和欧洲提供。

ILC有望制造出大量的希格斯玻色子,使科学家们能精确确定其属性。它或许也会揭示另外一些反常的事件,引导科学家们发现其他理论。ILC有望于2016年开始建造,10年后竣工。

暗能量调查

20世纪末最令人意想不到的发现之一是发现暗能量。科学家们对遥远的超新星所进行的大量观测表明,宇宙在加速膨胀。按照爱因斯坦引力场方程,科学家们推论出宇宙中存在一种压强为负的“暗能量”。

暗能量究竟是什么?科学家们也是一头雾水。不过,有几项正在进行的研究或许会告诉我们些许答案。

其中之一就是“暗能量调查(DES)”项目,这一项目由美国芝加哥大学的乔舒亚·弗里曼领导。弗里曼计划对天空八分之一的范围进行扫描,对10万个星系团进行调查,测量这些星系团内的3亿个星系与地球的距离。DES项目的最终目标是追踪星系团的大小和形状随时间如何发生变化,从而为科学家提供重力和暗能量之间如何角力的详情。重力会让宇宙的膨胀减速,导致星系团变得更加紧密;而暗能量则会让宇宙的膨胀加速,导致星系团分离崩析。因此,星系团收缩或膨胀的速度就显示了重力和暗能量之间的相对强度。

以前的观察已经表明,在宇宙长达137亿年的生命中,有一半的时间里,重力占据了主动,但在大约60亿年前,暗能量开始掌权。DES项目尤其希望能对这一过渡期进行研究,他们的想法是通过研究大约100亿光年远的星系团这一简单的办法来获得100亿年前宇宙的情况。

另一个正在进行的霍比-埃伯利望远镜暗能量实验(HETDEX)测试试图通过观察早期宇宙中非常遥远的星系来厘清暗能量的演化过程。