

三重探测,寻找惰性中微子

海容译

今年夏天,两艘装载量270立方米的运输船从欧洲的CERN出发,穿越大陆、海洋、河流,于5个星期之后到达美国的费米实验室。这两艘船上各装载了一个含有27000道精密多丝室的ICARUS探测器,该探测器采用了先进的液氩技术用来探测中微子。2010至2012年间,CERN输送至Gran Sasso的中微子束流已成功运行,经过两年的改装CERN的ICARUS探测器将与费米实验室其他两个同类的探测器一起开拓出新的物理机遇:揭示中微子物理实验中神奇的反常现象,并对eV能标的惰性中微子进



图1 ICARUS探测器是费米实验室短基线中微子项目的三个探测器之一,图中所示为2016年下半年,作为项目改造一部分,用于ICARUS上的低温恒温器在今年夏天运往美国之前在CERN各建筑之间转运

行迄今为止最高灵敏度的探测。这一新的尝试由三个大型液氩探测器(SBND, MicroBooNE和ICARUS)组成,它们被安置在费米实验室的一个高强度中微子束流线上,称之为短基线中微子(SBN)项目。

惰性中微子最初由蓬泰科尔沃(B. Pontecorvo)于1967年提出,它是一个假想粒子,不参与标准模型中任何一种已知的相互作用。惰性中微子态如果存在的话,不能被直接观测到,因为它不与任何普通物质发生相互作用,但是通过中微子振荡现象可以对超出标准模型的新物理进行深入探索。有效-惰性中微子混合,类似于三种常规中微子的混合,会在标准的中微子味道之间产生额外的振荡形式,其波长与已精确测量的“太阳”和“大气”中微子振荡明显不同。在过去的中微子实验数据中出现的反常现象是对可能存在的新物理的奇妙暗示。现在我们需要进一步的精确实验来验证或排除这个新增惰性中微子态的存在。

追寻惰性中微子的足迹

二十年前中微子味振荡的发现使人们认识到

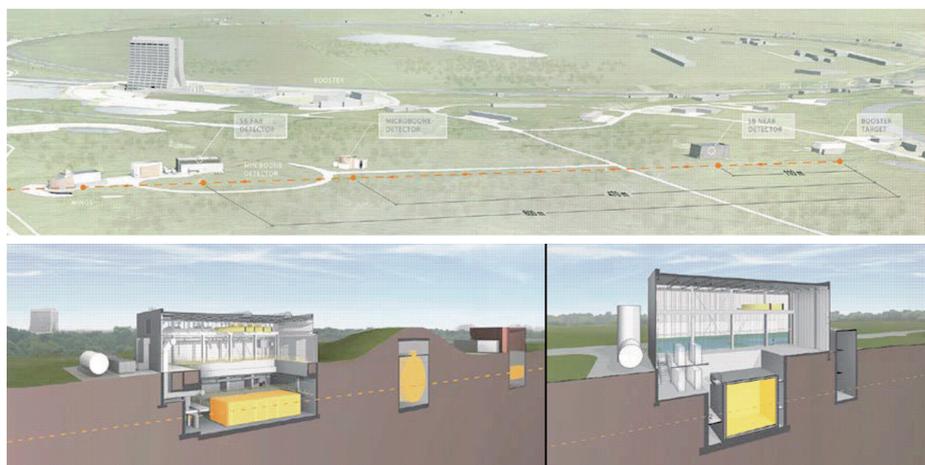


图2 描述短基线中微子项目束流线(上面)和费米实验室探测器(下面)的示意图

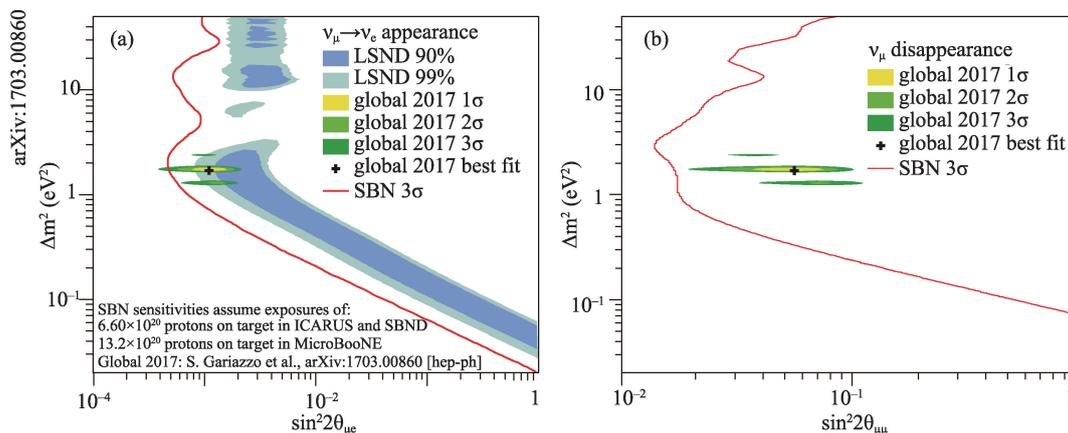


图3 SBN项目探测电子-中微子出现道(左)和 μ 子-中微子消失道(右)的灵敏度与最近对惰性中微子研究数据做全局分析得到的允许振荡参数区间相比较。对于 ν_e 出现道,由最初的LSND数据单独得到的参数值也在图中显示用于比较

每个熟悉的味本征态(ν_e, ν_μ, ν_τ)实际上都是由不同的质量本征态(ν_1, ν_2, ν_3)线性组合而成。每一种振荡的波长由参与振荡的质量本征态的质量平方差确定: $m_i^2 - m_j^2$ 。相关的发现获得了2015年诺贝尔物理学奖:大气中微子质量劈裂 $\Delta m_{\text{ATM}}^2 = |m_3^2 - m_2^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 以及太阳中微子质量劈裂 $\Delta m_{\text{solar}}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$,获奖是因为它们分别是在大气中微子和太阳中微子中首次观测到。因此任何新增的惰性质量本征态都将产生一个由新质量标度确定的独特振荡: $m_{\text{mostly sterile}}^2 - m_{\text{mostly active}}^2$ 。暗示新物理存在的最有意义的实验是20世纪90年代在洛斯阿拉莫斯国家实验室进行的LSND实验,该实验在预计标准混合不会很有效的区域,观测到在基本 μ 子反中微子束流中出现超出3.8 σ 的电子反中微子。不久之后,2000年,费米实验室的MiniBooNE实验同时观测到电子中微子和电子反中微子超出,尽管与LSND最初的观测有些不符。其他的一些线索包括在离核电站反应堆几百米范围内基线中电子反中微子的明显反常消失(即反应堆反常),以及基于镅的太阳中微子实验GALLEX和SAGE中放射源刻度数据低于期望值(即镅反常)。在不同的中微子实验中,已经进行了大量的关于出现和消失道的研究(包括在CERN向Gran Sasso传输中微子束流期间ICARUS运行的实验),虽然都没有得到预期的结果,但这些实验结果可对轻惰性中微子隐匿的参数空间

做出一定的约束。通过对有效数据的全局分析,目前已经将可能的惰性-有效劈裂 $m_{\text{mostly sterile}}^2 - m_{\text{mostly active}}^2$ 限制在1~2eV²这样一个小的区间。

长基线加速器中微子实验,例如:费米实验室的NOvA,日本的T2K以及美国的深地中微子实验(DUNE)(含距离源1300千米的探测器),这些实验被转向用于观测与大气中微子质量劈裂 $\Delta m_{\text{ATM}}^2 \sim 10^{-3} \text{eV}^2$ 相关的中微子振荡。同时,因为参与振荡态的质量平方差和产生的振荡波长互为反比,所以SBN这种探测距离在1km量级的短基线加速器实验,对质量平方差在1eV²量级的振荡产生非常敏感,而这正是我们想要研究的领域。

三个探测器 一个束流

SBN项目被设计用来定向研究短基线中微子振荡问题,并以前所未有的精度探测轻惰性中微子是否存在。SBN研究的关键在于采用多个高精度中微子探测器,这些探测器利用相同的技术,沿同一个高强度中微子束流安置在不同的距离。使用加速器中微子源的好处在于可以同时研究电子中微子出现道和 μ 子中微子消失道。

中微子源来自费米实验室的加速器中微子束流(BNB),该中微子源于2002年开始高频运行并为多个实验提供束流。BNB是由加速器出来的8

GeV 质子轰击铍靶产生,并对产生的强子进行磁聚焦,强子衰变产生宽能谱的中微子束流,其峰值大概在 700 MeV 左右,大约由 99.5%的 μ 子中微子和 0.5%的电子中微子组成。

三个 SBN 探测器都是液氩时间投影室(LArTPCs)并沿 BNB 中微子束流安置。Micro-BooNE——一个有效质量为 87 吨的 LArTPC——被安置在距离中微子产生靶 470 米的位置,并已于 2015 年 10 月开始采集数据。短基线近探测器(SBND)——一个有效质量为 112 吨的 LArTPC——设计安装在距离靶 110 米的位置——目前正在建设中,该探测器将提供非振荡 BNB 中微子流的高统计量样本,为控制下游振荡研究中的系统不确定性提供必要条件。最后一个探测器,ICARUS,有效质量 476 吨,被安置在距离 BNB 靶 600 米的位置,负责在可能出现震荡信号的下游区域采集足够的事例数。在过去几年中,CERN 完成了多项对 ICARUS 的升级改造,以应对在地表附近运行 LArTPC 所带来的特殊困难,这些困难在之前的 Gran Sasso 地下实验室运行时并不存在。SBN 项目是通过各国研究人员的大型国际合作实现的,对探测器的贡献主要来自于 CERN,意大利的 INFN,瑞士的 NSF、UK、STFC 和美国的 DOE、NSF。在费米实验室,容纳了 ICARUS 和 SBND 探测器的实验大厅已于 2016 年建造完成,正等待 LArTPCs 的到来。ICARUS 和 SBND 分别计划于 2018 年和 2019 年开始运行,大概需要三年左右的时间 ICARUS 能够采集到达到项目设计灵敏度的足够数据。

一个物理丰富的项目

通过综合分析,三个 SBN 探测器能够消除常见的系统误差,因此能以 5σ 或更高水平检验 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振荡假设,超过原来由 LSND 数据得到的全参数空间 99%置信度。近期的测量,主要是来自 NEOS、Ice-Cube 和 MINOS 的实验数据,对可能的惰性中微子参数进行了明确的约束,并且在最被认可的 Δm^2 值附近 SBN 项目的灵敏度最高。除了 ν_e 出现道,SBN

对 ν_μ 消失道也有足够的灵敏度,该道对确认观测到的出现信号的振荡解释非常必要,因此能够给出一个关于惰性中微子引发振荡更加可信的结果(图3)。

SBN 最初设计用于揭示轻惰性中微子物理,但是该项目的研究范围不断扩展,已不再局限于短基线中微子振荡研究。SBN 探测器将记录数百万的中微子相互作用,因此可以用来对中微子-氩相互作用进行精确测量,并且能够对中微子与大型原子核(例如氩原子核)散射的复杂物理进行深入研究。以 SBND 探测器为例,每月将观测到 100000 量级的 μ 子-中微子相互作用事例和 1000 个左右的电子-中微子相互作用事例,作为比较,现有的对 μ 子-中微子相互作用的测量一共只有几千个事例,而对电子-中微子根本没有类似的测量。ICARUS 探测器的位置也使其能够对费米实验室中两束同时运行的中微子束流(Booster 和 Main Injector 束流)相互作用进行观测,从而对高能区的 μ 子和电子中微子进行大统计量测量,这对未来的实验至关重要。

实际上,SBN 的科学项目与未来费米实验室、DUNE 的长基线中微子实验存在着重要的关联。距离费米实验室 1300 千米,位于南达科塔地下 1.5 千米的 DUNE 计划采用多个 10 千吨重的 LArTPCs。SBN 的三个探测器为推进这项令人振奋的技术提供了研发平台,并为全球 DUNE 共同体提供直接的实验活动。此外,SBN 具有挑战性的多探测器振荡分析将成为复杂事例重建、最大化利用优质径迹数据分析技术、以及检验 LArTPC 量能器性能的极好检验场。从物理的角度出发,在 DUNE 的能力范围内发现或排除惰性中微子对于解释中微子振荡中电荷-宇称破坏效应有着重要的意义,也是这项实验的主要物理目标。同时,对 SBN 的中微子-氩散射截面的精细测量将有助于控制长基线测量所面临的最大系统不确定性来源之一。

收官在即

对于轻惰性中微子的探寻已经持续了几十年,目前,利用最新的结果对全球分析进行更新已经成

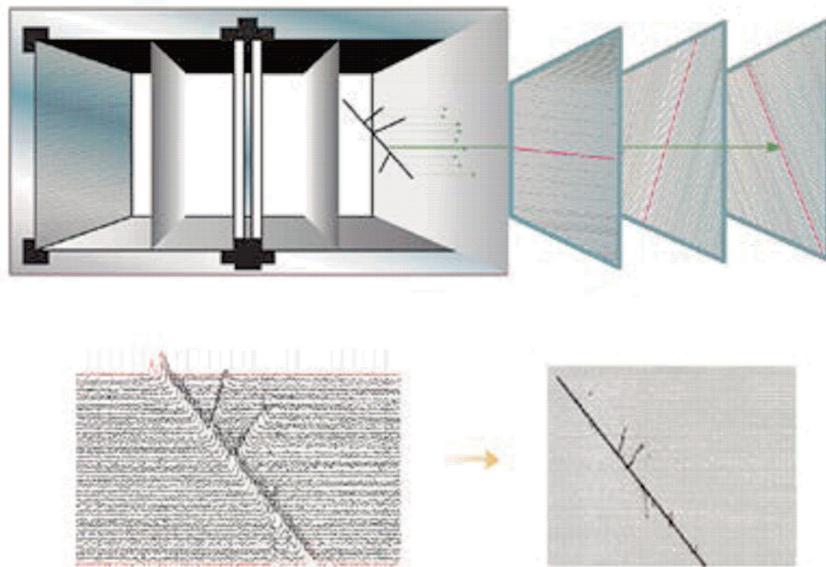


图4 ICARUS 液氩时间投影室(LArTPC)探测器的示意图,电子通过三个转动的线圈平板产生信号。1977年,鲁比亚(C. Rubbia)首次提出用LArTPC探测中微子的设想,随后的几年开展了一系列开创性的研发工作,并于2010年和2012年成功的在CNGS束流中运行了ICARUS探测器,并最终演示了单相LArTPC技术探测中微子的有效性。LArTPC既可以实现精确的量能器取样,也能够完成与泡室卓越显像特征类似的3D寻迹,同时因为它完全是电子的,可以进一步升级为更大的,几吨的质量。带电粒子在液氩中传播,使氩原子发生电离,并且自由电子在遍布探测器的强、均匀电场作用下发生偏转。偏转的电离电子触发信号,或者被安装在探测器周围一侧紧密排列的读出线圈收集,线圈信号正比于一个小单元内的能量沉积。电子偏移的速度非常低,大概在1.6 mm/ μ s,要求探测器每米截面的连续读出时间为1~2毫秒。正如SBN探测器将在费米实验室运行一样,如果这些探测器在地表运行,将是个挑战,所以光子-探测系统将被用于收集每个事例的快速闪烁光和时间

为常态。最初的LSND数据仍然包含最显著的信号,但是对 Δm^2 的分辨率太低,因此在99%置信度区间值的范围超过三阶量级。当前,只有小部分质量平方值与全部有效数据兼容,精确排除该区域惰性中微子振荡的新一代改进实验,包括SBN项目,正在陆续开展或提议建造。

目前,惰性中微子领域的研究非常活跃。日本的nuPRISM和JSNS也提议对 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出现道进行检验,而同样在日本的一些新的议案,例如KPipe实验则将致力于 ν_μ 消失道的研究。MINOS+和IceCube在已经对 ν_μ 消失道设定很强限制的情况下,仍在进一步分析更多的数据。最近,一系列在反应堆检验短基线电子反中微子消失道的实验正在逐步开展(NEOS, DANSS, Neutrino-4)或者规划中(PRO-

PECT, SoLid, STEREO),另外还有一些计划中的实验将采用大功率辐射源(CeSOX, BEST)。这些电子-中微子和电子-反中微子消失道的研究是对SBN研究工作的有效补充。

正如之前的数据表明,费米实验室的SBN项目在相关质量劈裂标度的研究中,利用两种不同的道,对中微子振荡的研究达到了世界领先的灵敏度。很快我们会得到关于eV能标惰性中微子是否存在的关键信息,这或者将给粒子物理领域带来近些年最令人振奋的重大发现,或者将揭示中微子物理中的长期未解之谜。

本文译自 CERN COURIER 2017年第5期的“Search for sterile neutrinos triples up”