



FASER实验: 简介与研究进展

刘锦枫¹, 逢昊¹, 王驰², 艾小聪³, 陈新¹, 胡震^{1*}

1. 清华大学物理系, 北京 100084;

2. 清华大学致理书院, 北京 100084;

3. 郑州大学物理学院(微电子学院), 郑州 450001

* 联系人, E-mail: zhenhu@tsinghua.edu.cn

2023-10-08 收稿, 2023-12-19 修回, 2023-12-20 接受, 2023-12-25 网络版发表

清华大学自主科研项目和清华大学笃实专项资助

摘要 FASER(ForwArd Search ExpeRiment)是一个位于大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)上的前向粒子探测实验。LHC质子对撞产生的质量轻、能量高的粒子往往会沿着束流方向飞行, 并逃离传统粒子探测器的覆盖区域。对这些前向粒子的探测和研究是传统探测器实验很好的补充。FASER探测器(包括其专门用于探测中微子的子探测器FASERv)位于ATLAS对撞点处束流切线方向下游480 m, 物理目标包括可能的暗物质候选者和对撞机产生的中微子。2023年3月, FASER首次直接探测到约153个对撞机产生的高能中微子, 信号显著度为 16σ 。随后, FASER合作组又公布了其暗光子搜寻结果, 未发现显著信号, 但给出了质量在17~70 MeV范围内、 ϵ 在 $2\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-4}$ 范围内的暗光子可能性的世界最好限制。正在计划中的前向物理设施(Forward Physical Facility, FPF)或将成为未来HL-LHC时代前向物理研究的新阵地。本文将介绍FASER实验装置及其物理目标, 并简要介绍FASER初步的实验结果。

关键词 FASER, FASERv, FPF, 前向物理, 中微子, 暗光子

在欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)上, 正在运行着一系列的粒子物理实验。其中, 除了4个著名的大型国际合作实验ALICE (A Large Ion Collider Experiment)、ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)、CMS (Compact Muon Solenoid)和LHCb (Large Hadron Collider beauty)之外, 自然也有装置更为“小巧玲珑”的实验, 例如距离ATLAS对撞点约500 m远的FASER (ForwArd Search ExpeRiment)实验^[1]。

1 FASER的初衷和物理目标

LHC是一个周长大约27 km的圆环形粒子加速器,

位于地下约80 m深处。两束质子在加速器的束流管内被加速到99.9999991%的光速, 具有7 TeV的能量, 之后在圆环的某些位置交汇并对撞。对撞过程中, 发生对撞的粒子的能量能够转化为新的粒子, 它们当中就可能含有物理学家们感兴趣的粒子。4个大型粒子探测器(ALICE、ATLAS、CMS和LHCb)分别建在不同的对撞点处, 用于探测对撞之后产生的新粒子, 并测量这些粒子的各种物理性质。

对撞产生的粒子可能飞向空间的任何方向, 所以探测器通常也要从空间的各个方向包围住对撞点, 如同一个包住对撞点的“球壳”。而加速器束流管穿过“球壳”的位置, 是探测器无法覆盖的盲区。当粒子的飞行方向与束流管的夹角足够小时, 就会从探测器的盲区

引用格式: 刘锦枫, 逢昊, 王驰, 等. FASER实验: 简介与研究进展. 科学通报, 2024, 69: 1025–1033

Liu J F, Pang H, Wang C, et al. FASER experiment: An introduction and research progress (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 1025–1033, doi: [10.1360/TB-2023-1034](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1034)

逃逸出去,无法被收集和研究.根据动力学计算可知,质量较轻的粒子更倾向于沿着这个方向飞出.这一点不仅适用于已知的质量较轻的粒子,也适用于一些理论所预言的新粒子.正是这样的独特研究价值,催生了“前向物理”(Forward Physics)这一研究分支,也就是在粒子对撞机上,在与加速器束流夹角很小的方向(前向),对粒子进行探测和研究.FASER就是这一分支内的实验^[2].

前向粒子往往具有较高的能量和较轻的质量.已知符合这一特点的粒子有 π 介子、K介子、D介子和中微子等.其中,由对撞机产生的高能中微子,在FASER之前尚未被直接探测到过,所以FASER实验的一项重要物理目标就是寻找和研究对撞机中微子.除了上述标准模型框架下的已知粒子,更吸引人之之处在于,许多超出标准模型的理论给出的新的中性粒子也具有较轻的质量,更倾向于飞往前向,这当中有不少是暗物质的“候选粒子”^[3,4],如暗光子^[5]等.因而,FASER实验的另一项重要物理目标就是探测可能存在的暗物质.

2 FASER的启动和选址思路

基于上述研究思路和目标,国际物理学家联合设计并建造了FASER实验.2019年3月5日,FASER实验获得了CERN的正式批准并立项,FASER国际合作组正式成立.中国团队在FASER成立之初就加入了合作组,承担了径迹探测器研发、核乳胶探测器研发、实验数据分析等多项工作.

FASER实验设计的巧思从选址就开始体现.实验装置被安装在LHC的TI12隧道(此前闲置),处在ATLAS对撞点束流方向延长线上,距ATLAS约480 m.这个位置在地面以下约80 m,上方的岩层极大削弱了宇宙射线带来的本底信号;而来自ATLAS对撞点的粒子更是在抵达FASER实验装置之前,就已经过“层层筛选”:质子等带电粒子会被LHC储存环上的磁铁偏转,余下的中性强子则会被途中约10 m厚的水泥和90 m厚的岩石层充分阻挡.

如此筛选之后,最后抵达FASER的粒子大部分是不带电、质量较轻而且与物质相互作用较弱的粒子,如缪子、中微子、可能存在的暗物质粒子等.这些粒子恰是“前向物理”所研究的焦点.“层层筛选”的另一个结果,是FASER探测到事例的频率远小于ATLAS探测器处粒子的对撞频率:大致是从每秒4000万次对撞产生的海量粒子当中,筛选出每秒约1000个粒子.

实际上,FASER也因为离ATLAS“足够远”,而在暗物质探测上具有独特的优势.当前关于暗物质的模型当中,一个重要的分支是长寿命暗物质粒子^[3,4].而在对撞机上探测暗物质,当前只能通过探测它们衰变产生的标准模型粒子来实现.对撞产生的短寿命粒子数量远远多于长寿命粒子,因而对于对撞点周围探测器,长寿命粒子的衰变信号极易被覆盖.而FASER与ATLAS之间超长的距离使得短寿命粒子能够在抵达FASER前几乎衰变殆尽,此时可能存在的长寿命粒子的衰变信号就更容易被辨识出来.

3 FASER探测器简介

对于FASER实验,从对撞点到探测器的层层筛选不仅“富集”出了感兴趣的粒子,而且极大降低了对仪器响应速度的要求.同时,由于粒子运动方向极为集中,探测器截面可以做得足够小,仅有0.21 mrad(相当于离眼睛约20 cm处一根头发丝的截面直径).此外,由于粒子束流强度足够低,电子元器件也不需要做过多的抗辐照设计,进一步降低了设计难度和制造成本.

FASER实验的探测器设置,既要满足可能的暗物质粒子的探测需求,又要满足对撞机产生的中微子的探测需求.对于FASER的一个主要目标粒子——暗光子(暗物质粒子媒介子的重要候选者),按照理论模型,其将衰变为一对正负电子^[5].这就要求探测器配置相应的磁铁以使正负电子在磁场中可以按不同的径迹偏转,也要有足够的径迹重建能力分辨这对正负电子的径迹,同时还要有足够的能量测量能力以得到正负电子的能量,并进一步获得可能的暗光子的能量.对于对撞机中微子的探测,实验装置需要有足够的质量,以获得较高的中微子反应截面.类似于暗光子,也需要较好的径迹重建能力,以区分不同味道中微子.除此之外,FASER上还需要安装相应的模块来降低背景以便后续的物理分析.

在这样的要求下,FASER探测器的设计如图1所示.来自ATLAS对撞点的前向粒子将会从图1右侧到来,依次通过核乳胶探测器(emulsion detector)、衰变腔(decay volume)、径迹探测器(tracking station),以及最后的电磁量能器(electromagnetic calorimeter).在这些设备之间,还穿插了数个闪烁体探测器(scintillator)等^[6-8].

FASER衰变腔和径迹探测器的总长度约4 m,由3个圆柱形空心永磁体(图1中蓝色模块,长度分别为1.5、1、1 m)和3个径迹谱仪(图1中橙色模块)交错排列

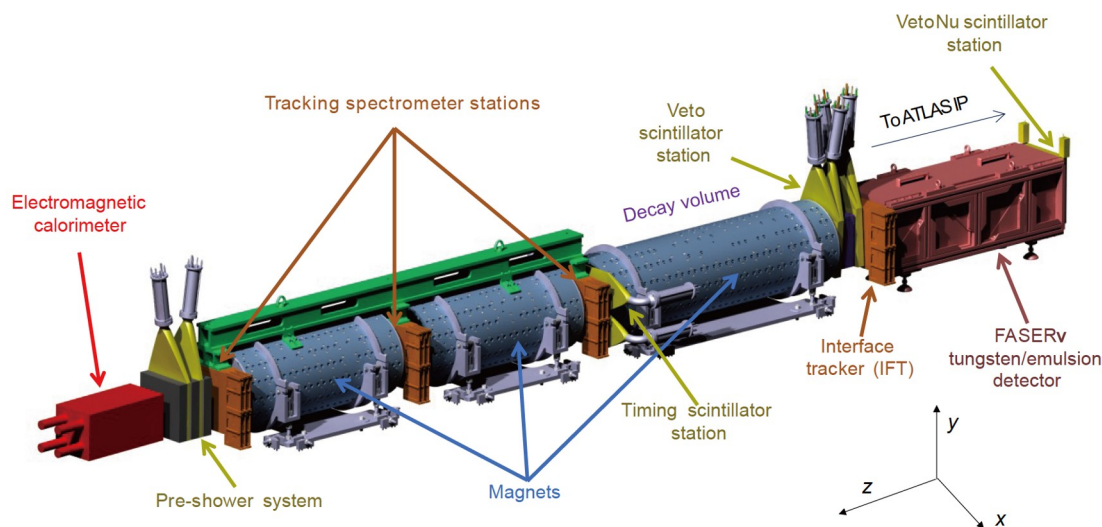


图 1 FASER探测器设计图^[7]
Figure 1 Design for the FASER detector^[7]

组成。第一个永磁体所包围的内部空腔区域就是可能的暗光子的衰变区域。永磁体将提供0.57 T的磁场，暗光子衰变产生的带电粒子将在磁场作用下偏转，并在穿过3个径迹谱仪时留下击中点。利用这些击中点可以重建出带电粒子的飞行径迹。FASER使用了ATLAS的模块化的硅微条探测器阵列(semi-conductor tracker, SCT)，具有良好的空间分辨能力，可以满足FASER实验的100 μm 量级的空间分辨要求。

带电粒子(或者光子)最终会到达FASER最末端的电磁量能器并产生电磁簇射。电磁量能器将对簇射进行全吸收测量，并得到粒子的能量。FASER的电磁量能器使用了LHCb的外层电磁量能器的模块(Shashlik)，其由数层铅板与闪烁体交替排列组成，并内置数个光纤，以将光信号传递至光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)，由光电倍增管输出电信号。根据电信号的幅度，可以计算出相应的入射粒子的能量。

除此之外，FASER实验中还布置了数个闪烁体探测器。为了获得较好的效率，FASER使用了塑料闪烁体作为探测材料(EJ-200)，并将其制作成10或20 mm厚的模块。其读出原理与电磁量能器类似，均是通过光纤与光电倍增管配合进行电信号的读出。闪烁体探测器负责了多项任务。比如，图1中最靠近右侧的闪烁体反符合系统(veto system)将用来排除由对撞点飞来的带电粒子。又比如，第一个磁铁后的闪烁体探测器将用来提供时间和触发(trigger)信息，以压低非对撞背景。

最靠近对撞点方向的核乳胶探测器FASERv在中

微子的探测中将发挥重要作用。它由近千层钨板与核乳胶层交替排列组成，来自ATLAS对撞点的中微子将在该探测器中发生反应，产生对应的带电轻子，带电轻子在一层层的核乳胶内留下径迹。

FASER所使用的径迹探测器单元和电磁量能器分别来自ATLAS和LHCb的备件，大大降低了建造成本，缩短了研发和建造时间。此外，由于FASER足够小，实验数据收集以及运行状态监测不需要单独的控制室，大部分的监控、维护和调试工作可以在电脑上远程完成。

“紧凑”一词对FASER装置做了高度概括：不仅在于其整体空间尺寸小，资金花费少，还在于它从最初的构想到产出研究成果历时相当短。表1对比了FASER和ATLAS从最初提出到各个重要时间节点历时。自2017年9月开始，仅耗时3年半即完成设备安装，而作为对比的ATLAS实验则耗时约16年。

FASER建造过程中受到了新型冠状病毒疫情带来的影响，一些时间节点因此而推迟。其中值得一提的是，为了把FASER设备安装在束流方向延长线上，需要在TI12隧道内挖出一道最深约46 cm的斜沟槽。这一沟槽于2020年3月完工，完工后仅仅数个小时，CERN就因为疫情而整体关闭。沟槽施工能够在这个时间点完工，以及整个探测器仍然以创纪录的速度建成投用，实属不易。

4 FASERv: “幽灵捕手”

在FASER实验装置朝向ATLAS的一侧，安装的是一个相对独立的子实验装置FASERv^[11]。这个名称当中

表 1 FASER与ATLAS实验进程比较

Table 1 Comparison between FASER and ATLAS experiment processes

	FASER(自2017年9月始)	ATLAS(自1992年10月始)
项目获批准	1年6个月	4年9个月
设备安装完成	3年6个月	16年
开始收集数据	4年10个月	17年2个月
第一批重要研究结果发布	5年6个月(按照文献[9]投稿日期算)	17年10个月(按照文献[10]投稿日期算)

的希腊字母 ν (nu, 读作“纽”)就代表着FASER ν 实验的目标粒子: 中微子. 更确切地说, 这项实验聚焦的是加速器上粒子对撞产生的高能中微子.

中微子名字里的“中”表示它不带电, 名字里的“微”说明它质量很轻(小于电子的百万分之一). 对于中微子, 几乎任何物质都是透明的, 因为它与常见物质极少发生相互作用, 仅参与非常微弱的弱相互作用. 此时此刻, 数千亿的中微子正在穿透着我们的身体, 但我们却浑然不知. 即使穿透地球直径那么厚的物质, 每100亿个中微子中也仅有大约1个会与地球发生反应, 因此中微子的检测异常困难, 以至于被物理学家起了“幽灵粒子”的绰号.

LHC上4个主要的大型探测器都无法直接探测到中微子, 仅能通过计算垂直于束流方向的缺失动量, 根据动量守恒原理来间接推测中微子的存在. FASER的电子学探测器也无法探测到中微子, 因为它缺少足够的靶物质材料来与中微子发生相互作用. 所以, 为了能够直接探测到这种神奇的“幽灵粒子”, FASER ν 实验装置使用了非常致密的钨: 其探测器主体由近千层钨板与核乳胶层交替堆叠构成, 可以既作为靶物质又作为探测器来观测中微子与物质的相互作用. 3种中微子(电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子)与钨相互作用产生不同类型的次级粒子, 它们的径迹可以被核乳胶层记录下来. 每隔几个月, 物理学家将FASER ν 探测器从地下隧道中取出, 对该段时间内留在核乳胶层上的印记进行扫描和分析, 就可以重建出粒子的径迹并获得原始入射中微子的信息^[12].

实际上, 许多粒子物理和核物理相关的反应都能够产生中微子, 例如太阳发光(核聚变)、核电站发电(核裂变)、天然放射(β 衰变)、宇宙射线等. 大部分中微子实验位于地下或冰下, 并在超纯水或液体闪烁体环境中布置足够体量的探测器, 比如中国的大亚湾反应堆中微子实验、日本的超级神冈中微子实验和美国的IceCube实验. 中国在建的江门中微子实验将具有两

万吨液体闪烁体, 是世界上能量精度最高、规模最大的中微子探测器, 有望解决中微子质量之谜等难题.

然而, 上述这些中微子实验有其自身的局限性: 来自反应堆或者固定靶实验的中微子的产生相对受控, 但是能量较低, 最高不过数百个GeV; 来自宇宙线的中微子虽然能量足够高(如南极IceCube实验检测到的中微子的能量高达10 PeV量级), 但是很不受控. 到目前为止, 能够主动、可控地产生大量高能的中微子并且进行直接探测的最佳方案, 就是LHC与FASER ν 的组合.

早在2021年, 用于验证实验方案的小型FASER ν Pilot探测器已经公布了2018年收集的数据的研究结果, 探测到了来自对撞机的6.1个可能的中微子“候选事例”^[13]. 2022年, FASER实验的正式运行与LHC第三阶段取数同步启动. 2023年3月举行的第57届Rencontres de Moriond电弱相互作用和统一理论会议上, FASER合作组宣布, 通过分析质心对撞能量为13.6 TeV、统计量为35.4 fb⁻¹的“质子-质子”对撞数据, 首次直接探测到了153 $^{+12}_{-13}$ 个来自大型强子对撞机的高能中微子^[9], 如图2所示. 被探测到的中微子首先和FASER ν 探测器作用产生 μ 子或电子, 然后再被FASER ν 的核乳胶探测器和FASER的电子学硅微条探测器所探测到.

FASER实验联合发言人杰米·博伊德(Jamie Boyd)解释道: “我们的统计显著性约为16倍标准偏差, 远超过5倍标准偏差这一可以宣布发现的门槛”(https://home.cern/news/news/physics/new-lhc-experiments-enter-uncharted-territory). 本次FASER实验结果标志着人类首次在粒子对撞机中明确探测到了中微子. “我们从一个全新的来源‘粒子对撞机’中发现了中微子, 在那里两束粒子以极高的能量撞击在一起形成中微子.” FASER实验另一位联合发言人、项目发起者、加州大学欧文分校粒子物理学家冯孝仁(Jonathan Feng)评论道(https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/102463.htm).

上述研究仅采用了电子学探测器中的信息. 而在2023年8月欧洲物理学会高能物理会议(EPS-HEP2023)

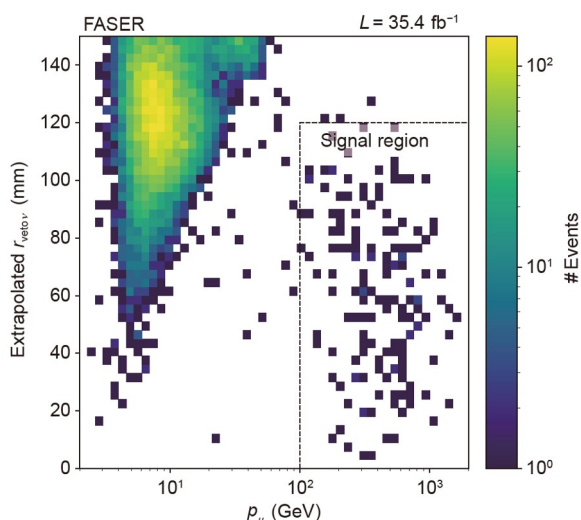


图2 FASER探测到的对撞机中微子事件^[9]
Figure 2 Neutrino candidates detected by the FASER^[9]

上公布的针对核乳胶探测器数据的研究中, FASER以超过5倍标准偏差的显著度观测到了电子中微子^[14]。核乳胶和电子学的联合分析尚在进行中, 将于后续发表。FASER合作组观测到的这些高能中微子填补了数百GeV到几个TeV之间的实验空白能区, 引起了物理学家的关注和兴趣, 因为该能区中微子与其他粒子相互作用尚未得到详细的研究, 其反应截面也还没有被测量过。

清华大学物理系教授、高能物理研究中心主任王青认为: “在人类制造的能量最高前沿产生并探测幽灵粒子, 为基础科学开辟了新的方向”(https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/102463.htm)。FASER的实验结果为我们理解中微子产生机制、质子在small-x区的行为、对撞点前向区物理等打开了一扇门。

从天体粒子物理学角度来看, 中微子是宇宙中最丰富的粒子之一(大约每立方厘米300个), 它们可以从宇宙深处经过漫长的旅行后与地球碰撞。FASER的研究结果对于理解天体中微子的大气背景, 进而了解宇宙中最遥远的部分提供了窗口。宇宙射线与大气分子的碰撞产生了大量中微子背景, 这些碰撞转换到质心参考系的能量与LHC的对撞能量是相仿的, FASER对这一能区中微子的研究将为天体物理中微子的观测铺平道路。根据目前的实验结果, FASER观测到统计上如此显著的从几百GeV到几个TeV能量的中微子, 类似于把IceCube实验观测到来自宇宙的TeV高能中微子带回到了实验室, 使得通过高能宇宙线中微子来研究宇宙

线起源进一步迈向了精密测量的时代。

未来, 我们期待FASER对来自对撞机的其他类型中微子的探测, 精确测定不同类型中微子之间的比例关系(这是通过中微子来验证和测量粒子物理标准模型的一个重要课题), 并为可能存在的惰性中微子等新物理信号的寻找提供线索。

5 FASER: 探索暗物质

FASER实验的另一个重要物理研究目标是探索暗物质。暗物质看不见摸不着, 却大量地存在于宇宙中的各个角落, 其质量大约是宇宙中全部可观测天体质量总和的5倍。暗物质之所以“暗”, 是因为它不与我们已知的物质发生除引力之外的其他相互作用。但它以引力的形式影响着天体运动、引力透镜效应、宇宙大尺度结构的形成、微波背景辐射等许多宇宙学观测结果, 比如旋星系中星体旋转速度测量结果与不考虑暗物质时理论预测结果存在很大差异, 可见暗物质是解释星体运动的关键部分。但是, 尽管种种天文现象都表明了暗物质存在的必要性, 科学家们却一直未能在实验中探测到暗物质。

目前, 实验上探测暗物质的方法主要分为3类: (1) 加速器中普通物质粒子对撞, 产生暗物质(加速器实验); (2) 普通物质与暗物质反应(地下直接探测, 如锦屏地下实验); (3) 暗物质与暗物质反应, 产生普通物质(空间间接探测, 如Alpha Magnetic Spectrometer, AMS等)。这3种方法分别对应图3所刻画的3种过程, 依次是从右半到左半、从下半到上半和从左半到右半。FASER实验采用的是第一种, 即利用大型强子对撞机使质子发生高能对撞, 人为产生暗物质粒子, 然后用FASER探测器来捕捉这些暗物质粒子的蛛丝马迹。这种方法之所以可行, 其背后的一种理论解释是, 暗物质的一个候选者可能是“弱相互作用有质量粒子(weakly interacting massive particle, WIMP)”, 即它参加弱相互作用, 并且它的质量也在弱相互作用能标。人类只能通过大型粒子对撞机才能制造出如此大质量的粒子, 并对其物理性质进行观测。

对撞产生的暗物质粒子与普通物质相互作用的媒介子也有多种, 其中既可能在LHC上大量产生, 又容易被FASER探测器捕捉到的候选者之一是暗光子。暗光子在对撞机上有很多产生机制, 如可以通过中性 π 介子或 η 介子的衰变、质子质子对撞时的暗韧致辐射等来产生。暗光子质量较轻, 主要沿着束流方向飞往向前,

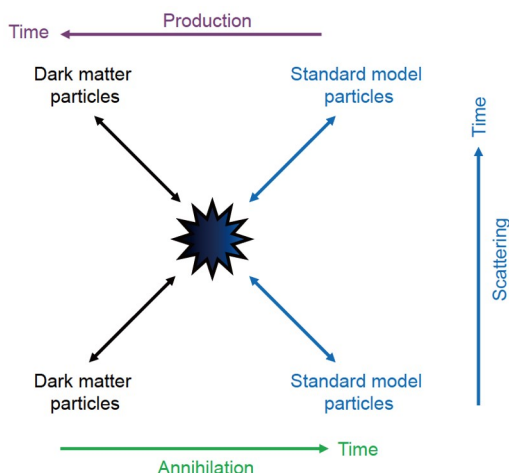


图 3 暗物质探测的3种方式
Figure 3 Three methods to detect dark matter

正是FASER所在的位置. FASER对于暗光子的探测区间为几十到一百MeV, 这一能量区间内的暗光子只能衰变到正负电子对(两个电子质量约为1 MeV, 两个缪子质量约为200 MeV, 两个 π 介子的质量约为270 MeV), 因而信号的几何结构十分简单(如图4所示)^[15]. 由于暗光子与普通物质相互作用极其微弱, 因此在FASER的

闪烁体反符合器上不会产生任何信号. 之后暗光子在FASER的衰变腔中发生衰变, 产生一对几乎平行的并且能量非常高的正负电子, 这对正负电子在径迹探测器上留下了两条靠得很近的径迹, 最终在量能器中留下了很高的能量沉积. 此信号的背景干扰有可能来自探测器的误鉴别、中微子以及宇宙线, 经过严格的事例筛选条件以及蒙特卡洛模拟研究, FASER在2022收集的 27.0 fb^{-1} 质子质子对撞数据样本的预期背景事例仅为 2×10^{-3} 个^[15], 可以近似认为没有背景. 尽管FASER探测器的衰变腔所覆盖的立体角很小(10^{-8}), 并且暗光子在1.5 m长的衰变腔中发生衰变的概率小于 10^{-3} , 但是FASER探测器对敏感区域的信号探测效率很高, 而且事件的背景很小, 信噪比很高, 所以FASER探测器在暗光子搜寻上有独特的优势.

根据2022年LHC运行期间收集的数据, FASER实验并没有观测到任何信号事例, 但给出了质量在17~70 MeV范围内、暗光子动力学混合参数 ϵ ^[15]在 $2 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ 范围内的暗光子可能性的世界最好限制, 并给出了在90%置信水平下, 质量在10~80 MeV范围内、 ϵ 在 $4 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-4}$ 范围内的排除线, 如图5所示^[15], 尚未出现激动人心的物理结果. 寻找暗物质的道

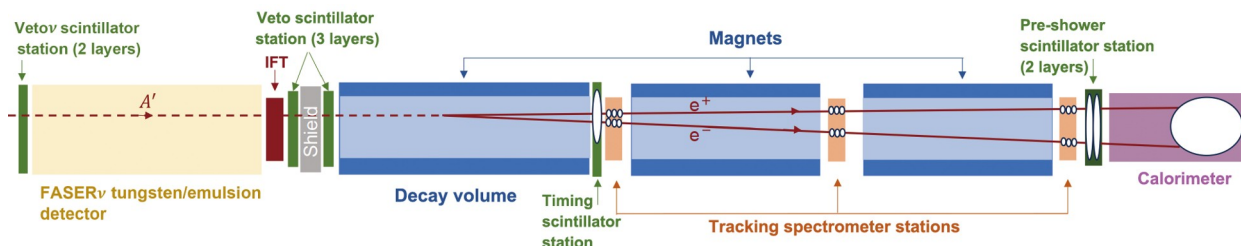


图 4 暗光子在FASER探测器各个模块中不同的响应^[15]
Figure 4 Response of a dark photon candidate in each module of the FASER^[15]

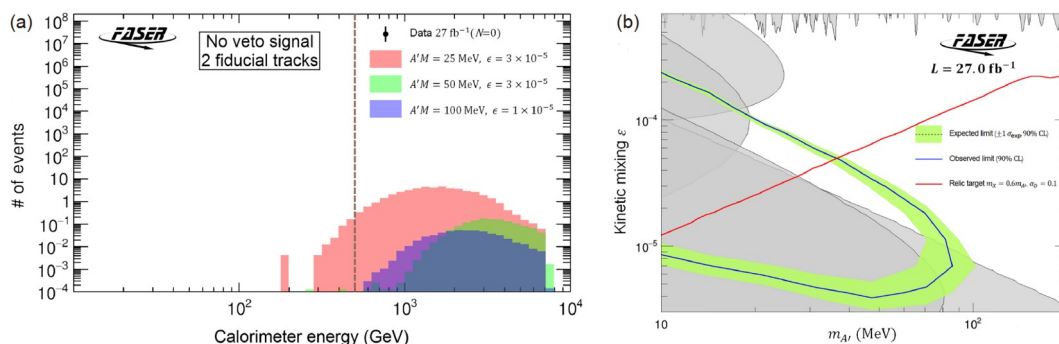


图 5 FASER实验探测暗光子的结果^[15]. (a) 没有发现信号数据(黑色点), 直方图为不同能量下期暗光子事例数; (b) 90%置信度下的排除线
Figure 5 Search of dark photons with the FASER^[15]. (a) Zero observed signal (black spot) and expected number of candidates under different energies (histograms); (b) exclusion line under 90% confidence

路漫长且曲折, 希望在以后更大的数据统计量下, FASER实验能在暗物质的寻找上有所突破。

6 FPF: 前向物理的新阵地

在之前的对撞机物理研究中, 人们对前向粒子的性质知之甚少。但在近几年, 科学界对于前向物理的研究兴趣愈发浓厚, 其包含了广泛而深刻的研究方向。比如, 对撞机中微子预计包含大量其他中微子源难以提供的 τ 子中微子, 这对于一些基础物理重要参数的精确测量将提供很大的帮助, 包括部分子分布函数(parton distribution function, PDF)、W玻色子的质量等。又比如, 对于前向产生的较低能的粲夸克及其后续衰变产生的轻子的测量, 将补充传统对撞实验中对较高能粲夸克的测量。这将开辟QCD研究的新领域。再比如, 如图6所示, 前向物理将可以在多个方向上推进超出标准模型的新物理的研究, 例如可能的暗物质粒子的搜寻、正反物质不对称等。

FASER合作组现在已有来自全球25个合作单位(其中包括中国的清华大学和郑州大学)的约90名研究人员, 往前向物理的探索与研究迈出了重要的一步, 并将在之后的数年时间内, 在前向物理领域产生更多更重要的新进展。原计划FASER将于2026年LHC第三期取数结束时完成自己的历史使命, 但2023年12月, CERN正式批准了FASER在未来的高亮度LHC(high luminosity LHC, HL-LHC)阶段继续运行取数的申请。与此同时, 另一个正在计划中的前向物理设施(Forward Physics Facility, FPF)或将成为高亮度LHC阶段前向物理的新阵地^[16]。FPF将被设置在ATLAS对撞点束流另一方向延长线上, 并且将专门挖掘一个新隧道用于放

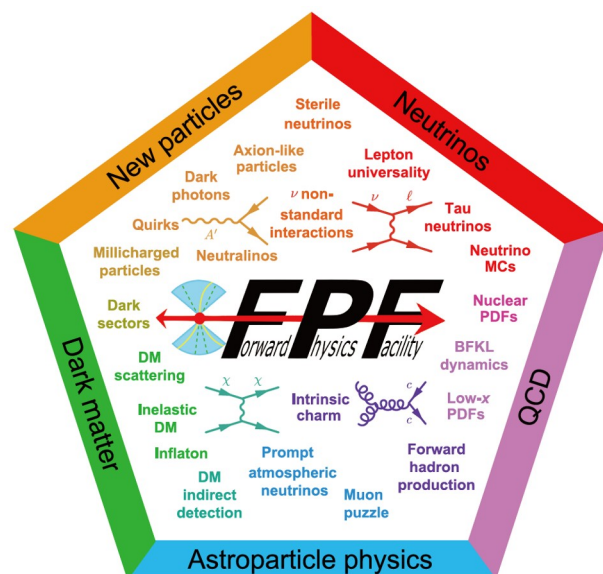


图6 前向物理将要探索的新物理领域^[16]

Figure 6 New domain will be explored by the forward physics^[16]

置未来的前向探测器。

FPF项目计划中可能包含数个新的前向探测器。这其中既包含FASER的升级项目FASER2与FASERv2, 也包含一系列全新设计建造的探测器, 例如FLArE(Forward Liquid Argon Experiment)、FORMOSA(FORward Microcharge SeArch)等。其中, FLArE的探测目标类似于FASER, 即对撞机中微子与可能的暗物质粒子; 而FORMOSA的目标是探索超出标准模型的新粒子——携带小于一个电荷的粒子(millicharged particles, mCPs)。整个FPF项目将充分利用将来的HL-LHC提供的前向粒子, 由此对中微子展开更深入的研究, 并试图寻找更多新粒子。

参考文献

- 1 Feng J L, Galon I, Kling F, et al. ForwArd Search ExpeRiment at the LHC. *Phys Rev D*, 2018, 97: 035001
- 2 Ariga A, Ariga T, Boyd J, et al. FASER's physics reach for long-lived particles. *Phys Rev D*, 2019, 99: 095011
- 3 Bertone G, Hooper D, Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Phys Rep*, 2005, 405: 279–390
- 4 Feng J L. Dark matter candidates from particle physics and methods of detection. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 495–545
- 5 Holdom B. Two $U(1)$'s and ϵ charge shifts. *Phys Lett B*, 1986, 166: 196–198
- 6 FASER Collaboration. The FASER detector. 2022, arXiv: 2207.11427
- 7 Abreu H, Antel C, Ariga A, et al. The tracking detector of the FASER experiment. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Detect Assoc Equip*, 2022, 1034: 166825–166844
- 8 Abreu H, Amin Mansour E, Antel C, et al. The trigger and data acquisition system of the FASER experiment. *J Inst*, 2021, 16: P12028
- 9 Abreu H, Anders J, Antel C, et al. First direct observation of collider neutrinos with FASER at the LHC. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 031801
- 10 Aad G, Abbott B, Abdallah J, et al. Search for new particles in two-jet final states in 7 TeV proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 161801–161819

- 11 Abreu H, Antel C, Ariga A, et al. Detecting and studying high-energy collider neutrinos with FASER at the LHC. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 61
- 12 FASER Collaboration. Technical proposal of FASER ν neutrino detector. 2001, arXiv: [2001.03073](https://arxiv.org/abs/2001.03073)
- 13 Abreu H, Afik Y, Antel C, et al. First neutrino interaction candidates at the LHC. *Phys Rev D*, 2021, 104: L091101
- 14 FASER Collaboration. Observation of high-energy electron neutrino interactions with FASER's emulsion detector at the LHC. <https://cds.cern.ch/record/2868284>
- 15 Abreu H, Anders J, Antel C, et al. Search for dark photons with the FASER detector at the LHC. *Phys Lett B*, 2024, 848: 138378–138387
- 16 Feng J L, Kling F, Reno M H, et al. The forward physics facility at the high-luminosity LHC. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2023, 50: 030501

Summary for “FASER实验: 简介与研究进展”

FASER experiment: An introduction and research progress

Jinfeng Liu¹, Hao Pang¹, Chi Wang², Xiaocong Ai³, Xin Chen¹ & Zhen Hu^{1*}

¹ Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Zhili College, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³ School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

* Corresponding author, E-mail: zhenhu@tsinghua.edu.cn

The paper introduces the FASER experiment at CERN and its research progress. FASER, the ForwArd Search ExpeRiment, is an experiment dedicated to searching for light, forward direction particles at Large Hadron Collider (LHC). Such particles often fly along the LHC beam and escape the coverage of traditional particle detectors. The detection of these forward particles is a good complement to other experiments at LHC. The FASER detector is located 480 m downstream of the ATLAS interaction point, aligned with the beam collisions axis. It consists of multiple modules, including an emulsion and tungsten detector, three permanent magnets, four tracking spectrometer stations, four scintillator detectors, and an electromagnetic calorimeter. The emulsion and tungsten detector, FASERv, is designed to detect high energy neutrinos produced at LHC and to study their properties.

The physics motivation of FASER is mainly to search for potential dark matter candidates and study neutrinos produced by the collider. Back to 2018, a pilot emulsion detector was installed in the far-forward region from the ATLAS interaction point and observed the first candidates of the neutrino interactions at the LHC. Recently, using the proton-proton collision data collected at center of mass energy $\sqrt{s}=13.6$ TeV in 2022 in LHC Run-3, first physics results from FASER have been released. In March 2023, FASER reported the first direct observation of collider neutrinos at LHC. Using the active electronic components of FASER, approximately 153 neutrino interactions in the tungsten-emulsion detector were observed, with a signal significance of 16 standard deviations. Five months later, FASER reported the direct observation of electron neutrino interactions in the FASERv sub-detector, with a statistical significance of 5 standard deviations. The signal events include neutrinos with TeV energies, which are the highest energy electron neutrinos detected from an artificial source, the particle collider. In August 2023, FASER also presented its first dark photon search result. Although no signal events were found, it provided world-leading constraints on dark photons with mass within the range of 17 to 70 MeV and couplings ϵ within the range of 2×10^{-5} to 1×10^{-4} .

As an important milestone in forward physics, FASER will continue data-taking during the full LHC Run-3. In December 2023, FASER has been officially approved to run in the future HL-LHC era. In the meantime, the recently proposed Forward Physical Facility (FPF) might become a new frontier for forward physics research for HL-LHC. FPF will house several forward experiments, such as FASER2, FASERv2, FLArE and FORMOSA, with physics potential not only on collider neutrinos and dark photons, but also on other beyond the standard model (BSM) particles, such as millicharged particles. In this paper, we present an overview of the FASER experiment, encompassing its instrumentation and physics objectives, and briefly report the preliminary experimental results of the FASER.

FASER, FASERv, FPF, forward physics, neutrino, dark photon

doi: [10.1360/TB-2023-1034](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1034)