

南极冰层捕捉“宇宙信使”

2026诺贝尔物理学奖开启中微子天文学新窗口

10月6日,瑞典皇家科学院宣布,将2026年诺贝尔物理学奖授予科学家弗朗西斯·哈尔岑,以表彰其对冰立方中微子天文台的决定性贡献和发现具有天体物理起源的高能中微子。

在南极点之下约一立方公里的古老冰层里,冰立方中微子天文台静静等待着来自宇宙深处的中微子。这种被称作“宇宙中最害羞的粒子”,几乎不与任何物质发生反应,借助它们,人类开启了一扇前所未有的中微子天文学观测新窗口。

“宇宙信使”:中微子的独特之处

中微子是宇宙中最没“存在感”的粒子,每秒约有650亿个来自太阳的中微子穿过人的小指甲,但是,人体却完全感受不到。它不带电荷,质量很轻,不参与强相互作用;与普通物质发生可被探测的反应时主要依靠弱相互作用,让科学家难以探测。

一些中微子也来自宇宙的其他区域,携带着解开某些宇宙谜团的线索。如果研究人员成功捕获到这些能量远高于太阳中微子,数量却更为稀少的宇宙中微子,就可能获取它们诞生之地的信息。长久以来,天文学家寻找它们,是为了追问:宇宙中的一些粒子,究竟在什么地方、

依靠何种过程,获得了远超地面人造加速器所能赋予的能量?这些天然的粒子加速器,又是怎样工作的?

过去人类为了观测宇宙,发展出射电、红外、X射线等观测手段,逐步补全人眼看不见的波段。但这些方法仍然依靠电磁波,也就是光。宇宙射线中的带电粒子在磁场作用下进行方向会发生偏转,抵达地球时已无法追溯原始来源。而中微子是独一无二的“宇宙信使”,不带电的属性让它既不会被磁场影响而偏转,又拥有极强的穿透能力,能够从光线无法逃逸的天体环境中突围而出,把遥远宇宙的消息带到地球。诺贝尔物理学委

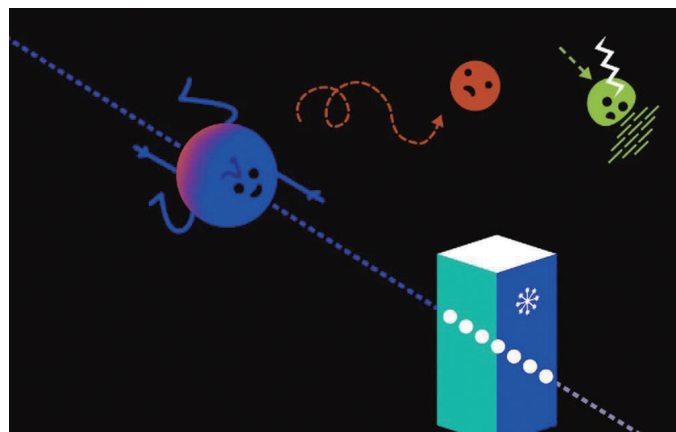
员会主席马克·皮尔斯解释说,这意味着,观测宇宙不一定只能依靠光,也可以借助中微子带来的信息。

但想捕捉这位悄无声息的访客绝非易事。只有在极个别情况下,中微子才会和原子核碰撞,产生可探测的微弱信号。1988年,在波兰举行的一场会议上,哈尔岑与同行首次提出在南极利用冰层搭建中微子天文台的构想,希望依靠超大探测体积捕捉微弱信号。哈尔岑曾表示,这是一场不能保证成功的冒险。人们无法确定,1立方千米规模的探测器是否足够捕捉来自地球大气层之外的宇宙中微子。



“冰立方”外观图

图源“冰立方”中微子天文台官网



在巨大冰块中探测中微子的示意图

图源诺贝尔奖官网

南极冰层:打造粒子探测器

中微子难以捕捉,那么就需要准备足够多、足够大的靶物质,并耐心等待足够长的时间。对高能天体中微子而言,探测体积要达到立方公里量级,才有机会每年积累起可供分析的样本。要是从零建造这样一座容器,成本几乎难以承受。幸运的是,大自然已经准备好了现成的材料:深海的海水和极地的冰层,既庞大又透明。它们既是与中微子发生反应的靶,也能把反应产生的微光传到传感器上。

中微子本身不会发光,可一旦偶然撞击冰层内的原子核,就

可能产生一些带电粒子。当这些带电粒子在冰中的运动速度超过冰介质中的光速,就会产生切伦科夫辐射,发出微弱的光,类似快艇驶过水面激起的尾波,这便是冰立方寻找的信号。要捕捉这种微光,需要在冰层中布设光传感器。哈尔岑把这些传感器比作“反向灯泡”:与灯泡相反,它们接收光后,会把光变成电信号。根据接收到的光量,研究人员可以估算粒子在冰中留下的能量,再根据光到达不同传感器的时间差,推算中微子的来向。

如何把大量传感器送到数

千米深的冰层之下?科研人员向冰川学家学习技术,使用高压热水在冰层上熔出深邃孔洞,再将串接大量光传感器的长缆缓慢下放进钻孔。钻孔会在数周内重新冻结,整套设备就此永久被封存在冰里,后期无法取出检修。前期先导实验AMANDA验证了冰层探测技术的可行性。经过多年工程攻坚,冰立方在2011年达到完整运行规模:86条长缆搭载5160个光传感器,整套阵列被安置在冰面1450米至2450米深处,覆盖约1立方千米冰体,相当于十亿吨南极冰成为探测靶材。

破译“来信”:天体源头仍成谜

仪器建成后,还要辨认信号:宇宙射线也会在大气层中产生中微子,要寻找来自遥远宇宙的中微子,需要科学家对探测到的事件进行筛选,分析粒子的能量、方向等特征,判断数据是否超出了大气背景所能解释的范围。

2013年,冰立方研究团队报告了两个能量极高的中微子事件,获得了具有天体物理起源的高能中微子的首批证据。后来研究团队识别出更多高能事件,来自大气层外的高能中微子得到确认,中微子天文学就此跃上新高度。

但是,破译这些宇宙“来信”远比捕捉信号更困难。星系NGC 1068是受到关注的候选来源之一,这是距离地球4700万光年的活动星系,核心超大质量黑

洞正吞噬周边物质。冰立方观测到该方向出现中微子信号过剩,但现有证据还不足以一锤定音。2023年,研究团队在银河盘面方向识别出高能中微子辐射,这是人类第一次用光以外的粒子“窥见”银河系的轮廓。这类信号并非来自某个孤立的天体,而是宇宙线穿行星际空间时,与星际气体持续碰撞产生的弥散辉光,它让我们能够比较银河系不同区域的粒子密度与传播方式。这张统计意义上的“地图”还很模糊,尚不能逐一指认其中的每座加速器。

尽管这些宇宙“来信”的具体出处仍待追索,但中微子探测的边界已被拓宽。人类此前已经探测到来自太阳和超新星爆发的中微子,冰立方则把探测推

广到更高能量范围。诺贝尔物理学委员会委员、瑞典乌普萨拉大学教授奥勒·埃里克松表示,冰立方探测到的高能中微子带来了遥远宇宙事件的信息,帮助人类更深入地认识所处的世界。这不只是深奥的科学,很多时候,这类科学成就最终还会产生实际应用。

面对中微子天文学能解答哪些宇宙问题,项目主导者哈尔岑给出了出人意料的回答:“真正令人兴奋的是,我还无法回答这个问题。”从最初的设想到冰中的微光,数十年的坚持并没有为所有疑问画上句号,南极深冰中的传感器仍在记录,那些遥远的天体源头尚未显露身份。但一些过去无从追问的问题,如今已经有了寻找答案的可能。

前瞻布局:中国探索新机遇

更大的观测体积有助于积累事件,更准确的方向与能量重建则有助于辨认来源。地中海KM3NeT、贝加尔湖Baikal-GVD也在通过分阶段建设,扩大观测能力。

我国科研团队已提前布局这一前沿赛道。中国科学院高能物理研究所院士曹臻带领团队提出的高能水下中微子望远镜HUNT方案,研发了以微通道板光电倍增管为核心的探测单元,团队先后在贝加尔湖和南海布放样机。2025年初,团队将南海样机部署于水下约1600米深处,并接入海底观测网络。HUNT瞄准30立方公里级阵列,按2026年公开的规划,这座大阵列将与俄罗斯Baikal-GVD合作组共同建在贝加尔湖,目标在2040年前后建成。同时,曹臻也是高海拔宇宙线观测站LHAASO的首席科学家。从陆地伽马观测延伸到水下中微子探测,两类设施可以共同检验银河系加速器的性质。

除水下中微子探测布局之外,我国地下中微子探测同样拥有硬核大科学装置。江门中

微子实验(JUNO)位于广东省江门市附近的地下700米处,实验以阳江、台山两座核电站作为中微子源,依靠良好的地质条件减少宇宙射线干扰。核心探测器是有效质量达2万吨的液体闪烁体,被安置于地下实验大厅44米深的水池中央。直径41.1米的不锈钢网壳作为主支撑结构,承载了直径35.4米的有机玻璃球、2万吨液体闪烁体、数万个光电倍增管,以及前端电子学、电缆、防磁线圈和隔光板等众多关键部件。数万只光电倍增管能够捕捉中微子发生反应时产生的闪烁光,再将其转化为电信号读取数据。该装置2025年8月正式运行取数,首要目标是测定中微子的质量顺序。装置设计寿命30年,后期可升级改造为世界最灵敏的无中微子双贝塔衰变实验,将用于探测中微子绝对质量。

科学进步常常蕴藏在点滴积累之中,无论是冰下、深海还是地下,全球天文学家正在搭建观测设施,静静等候更多中微子“来信”。

综合报道:王琳
素材来源:新华社、中国科学院理论物理研究所、中国科学院物理研究所