

利用高能中微子探索 宇宙线起源之谜

陈明君 黄天奇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、引言

早在1912年,科学家就观测到了宇宙线,其主要成分是质子(约90%)和氦核(约9%)的高能微观粒子。迄今为止,观测到的宇宙射线中最高能量接近 3×10^{20} 电子伏特,约等于48焦耳,相当于一颗时速150千米的网球的动能。一个直径远远小于原子的微观粒子被加速到如此惊人的宏观能量,比地球上最大的粒子加速器LHC所能产生的最高能量大7到8个量级。这让我们很自然地产生疑问:如此高能的宇宙线来自哪里?它们是怎么被加速到这么高能量的?

我们知道,将匀速运动的带电粒子放入均匀磁场后,粒子会在垂直于磁场的平面中做匀速圆周运动,轨迹半径(拉莫半径)正比于粒子能量。我们所在的银河系的银盘厚度为千秒差距量级(约 3×10^{21} 厘米),星际磁场的磁感应强度为微高斯量级。根据Hillas标准:当宇宙线质子达到 10^{18} 电子伏特后,质子的拉莫半径与银盘厚度相当,很容易逃离银盘;能量低于 10^{17} 电子伏特时,宇宙线质子的拉莫半径远小于银盘厚度,粒子将被束缚在银盘中打转,难以离开银盘。因此,我们预测 10^{17} 电子伏特以下的宇宙线主要是在银河系内起源的。

太阳是离我们最近的宇宙线源,这些宇宙线以太阳风的形式扫过地球,干扰乃至损坏人造卫星的电子设备。然而,太阳宇宙线的能量仅有区区 10^7 到 10^{10} 电子伏特,能量更高的宇宙线是由什么天体产生的呢?遗憾的是,我们很难通过直接观测来寻找来自太阳系之外的宇宙线源头。这是由于在宇

宙线到达地球前的漫长旅程中,其运动方向不断被星际磁场偏转,逐渐偏离源的方向,我们只能采用间接的手段探寻宇宙线源所在。

宇宙线在传播过程中可以和星际介质(比如氢原子气体)或者星际辐射场(比如来自恒星的光子)碰撞并产生大量次级粒子,其中的中性 π 介子会迅速衰变成伽马射线光子,带电 π 介子则会衰变产生中微子(见图1)。伽马射线光子的能量约为原初宇宙线质子能量的20%,中微子的能量约为原初宇宙线质子能量的10%。如果宇宙线源附近的气体或者光子场比较致密,我们期待在宇宙线源的方向上观测到伽马射线和中微子辐射。值得注意的是,伽马射线不仅可以由宇宙线质子等强子成分产生,也可以由高能电子(比如来自脉冲星发射的相对论性电子)产生。高能电子通过逆康普顿散射,将能量传递给被散射的低能光子,产生高能的伽马射线。虽然高能电子也是宇宙线的一部分,但是考虑到质子、氦核等强子成分在宇宙线中占据了主要成分,如果没有特殊说明,我们在讨论宇宙线起源的时候,一般是指质子等强子成分的起源。

强子过程产生的伽马射线与电子产生的伽马射线相比,具备两个特征。首先,在60到200兆电子伏特的能量上,中性 π 介子衰变产生的伽马射线能谱 $E^2F(E)$ 会快速上升,并在几千兆电子伏特之后近似遵循宇宙线质子的能谱形状,这个结构被称为“ π 介子衰变峰”。Fermi-LAT曾在超新星遗迹IC443和W44的方向上观测到“ π 介子衰变峰”,间接证实超新星遗迹可以产生 10^9 到 10^{12} 电子伏特的宇宙线质子。

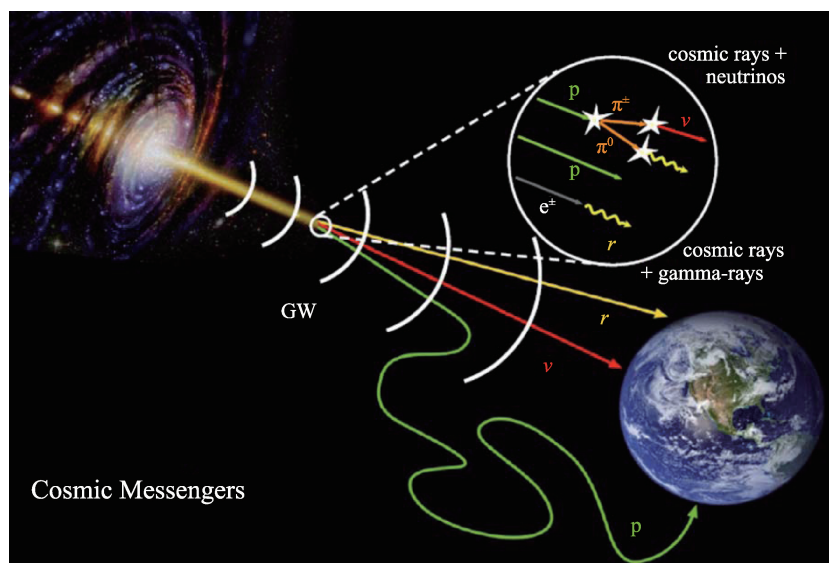


图1 多信使天文示意图,包含宇宙线(p)、中微子(v)、伽马射线(γ)和引力波(GW)。宇宙线质子(p)与气体或者光子碰撞产生 π 介子, π 介子衰变产生中微子和伽马射线。正负电子对($e^\pm$)同样可以产生伽马射线(比如通过逆康普顿散射)

其次,电子的逆康普顿散射截面在高能处会被压制(被称为Klein-Nishina效应),严重阻碍 10^{14} 电子伏特以上的伽马射线辐射,而强子过程的伽马射线不会遇到类似压制。也就是说, 10^{14} 电子伏特以上的伽马射线观测更容易发现强子过程产生的信号,对应着 10^{15} 电子伏特(拍电子伏)以上的宇宙线质子。我们将能够产生拍电子伏宇宙线的天体称为拍电子伏加速器(PeVatron), 10^{14} 电子伏特以上的超高能伽马射线源自然地成为了拍电子伏加速器的候选体。

高海拔宇宙线观测站(LHAASO)通过近一年曝光量的数据积累,在2021年发现12个超高能伽马射线源(见图2),并在蟹状星云和天鹅座区域观测到拍电子伏的超高能伽马光子。这是人类首个超高能伽马射线源表,也是规模最大的源表。这些观测表明银河系内部存在着大量的拍电子伏加速器: 10^{14} 电子伏特的光子只能由拍电子伏的父辈粒子产生,比如通过质子与星际气体碰撞(强子过程),会同时伴生出中微子;而若是电子与低能光子逆康普顿散射(轻子过程),将没有中微子产物。这些粒子(比如电子、宇宙线质子)如何被加速到PeV甚至10 PeV以上,都是对现有理论的巨大挑战。我们目前还无法确认这些超高能伽马射线是轻子过程还是强子过程产生的,而相伴生的中微子存在与否,就成为

一个决定性的观测证据,有望彻底解决困扰人们上百年的宇宙线(质子、氦核等原子核)起源问题。然而,现有的高能中微子望远镜实验尚未看到与超高能伽马射线源相关的中微子对应体。

观测高能中微子,不仅可以帮助我们认证银河系内的拍电子伏加速器,了解宇宙线的加速和传播机制,还可以帮助我们了解银河系以外的广阔宇宙。与伽马射线相比,中微子的反应截面更小,在星系际的传播过程中,更不容易被吸收。这意味着,同样的能量区间,中微子可以看到更遥远的宇宙,这对我们了解银河系外的宇宙线有很大的帮助。

在知道高能中微子观测的重要性之后,我们接下来会在第二章介绍如何观测高能中微子,并在第三章将介绍主要的高能中微子望远镜实验和取得观测结果,最后在第四章,我们将为银河系内的拍电子伏加速器的认证,提出我们的解决方案:建设规模达 30 km^3 的高能中微子望远镜计划。

二、如何抓住高能中微子

中微子是一种很神奇的粒子,除了三种质量本征态(对应三种中微子的静止质量),还具有三种味本征态,分别是电子中微子、缪子中微子和陶子中

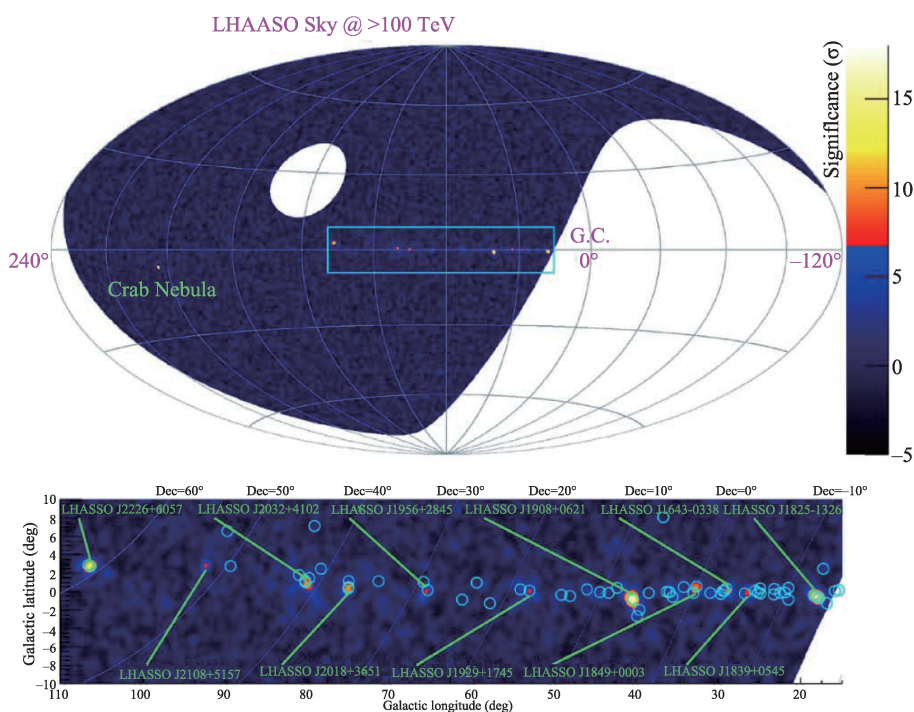


图2 LHAASO 伽马射线天图(能量在0.1拍电子伏以上)。绿色圆圈指示了已知的甚高能伽马射线源的位置

微子(对应三种轻子:电子、缪子和陶子)。这意味着三味中微子处于三种质量本征态的叠加态,即传播过程中的中微子的味是不确定的。观测上的效果是:三味中微子在传播过程中会互相转换。这一现象被称为“中微子振荡”。中微子振荡会导致中微子源处三味中微子的比例与到达地球时的比例不同。宇宙线与气体或光子碰撞产生的中微子,在源处味比近似为1:2:0(如果磁场较弱);经过长距离传播后,到达地球后的中微子味比为1:1:1。

高能中微子在穿过探测介质时,与原子核发生非弹性碰撞并产生大量的次级粒子,其中包含很多带电粒子(比如电子、缪子、 π 介子等)。带电粒子的速度如果超过了介质中的光速,这些粒子将辐射切伦科夫光子。切伦科夫光集中在紫外到可见光(偏蓝色),在不同介质中会略有差异。我们可以用光电倍增管来捕获这些切伦科夫光子,记录下光子数,并据此推测入射中微子的方向、能量和味道。这要求探测介质对切伦科夫光子比较透明,环境完全黑暗,光电倍增管的环境噪声尽可能低等。此方法主要应用于百拍电子伏以下的高能中微子观测。

中微子与核子的非弹性碰撞有两类,分别是中性流反应和带电流反应。中性流反应中,中微子幸存下来,将部分能量传递给核子。被撞碎的核子继续和观测介质中的核子碰撞并引发连锁反应(被称为级联过程)。级联过程产生的大量次级粒子迅速冷却,这导致切伦科夫光只能照亮中微子-核子反应顶点附近小范围内的光电倍增管。这一类事件被称为级联事件。带电流反应中,除了反应顶点处的级联过程外,中微子还会转化成对应的轻子(比如缪子中微子转化成缪子,电子中微子转化成电子,陶子中微子转化成陶子)。轻子将继承原中微子50%~80%的能量。不同的轻子会引发后续不同的观测信号:电子会引发电磁级联(级联事件);缪子寿命很长,在能量完全损失之前可以传播很长一段距离(径迹事件),以0.1拍电子伏的缪子为例,在水中可以传播10千米;陶子寿命比缪子略短,在传播一段距离后,会衰变成陶子中微子和其他次级粒子(比如 π 介子)并引发第二次级联过程(双级联事件),以拍电子伏的陶子为例,在衰变前可以传播50米。

中微子与核子的非弹性散射截面非常小,对于

0.1 拍电子伏的电子中微子而言,带电流反应的散射截面在 10^{-34} 平方厘米左右。假设 LHAASO 发现的超高能伽马射线源在 0.1 拍电子伏以上都是强子过程产生的,那么其中微子对应体的典型流量约为弥散中微子总流量的千分之一,即每年每平方千米约有 1000 个中微子(0.1 到 0.2 拍电子伏)射向探测器。由于级联事件只能照亮局部的光电倍增管,为了每年探测到一个事例,我们至少需要在数十立方千米的水中部署光电倍增管。这等规模的探测介质,只能在自然环境中获取。再加上介质足够透明、环境足够暗的要求,可以修建高能中微子望远镜的地方只有自然形成的深湖、深海,以及南极的巨大冰层。

不同的科学目的应当采用不同类型的事件样本。如果想搜寻银河系内拍电子伏加速器的中微子对应体,我们主要采用径迹型事例,这是因为径迹事件的方向定位比级联事件更好。径迹事件的背景由大气中微子和大气缪子构成。大气中微子和大气缪子是宇宙线在地球大气中产生的。根据已有的高能中微子观测经验,天顶角大于 85 度时,背景以大气中微子为主,天顶角小于 85 度时,背景以大气缪子为主。我们可以借由信号事件和背景事件在空间分布与能量分布上的差异,来搜寻来自中微子源的信号。如果想搜索来自银盘的弥散中微子,我们主要采用级联事件,这是因为级联事件的大气背景比径迹事件更少。IceCube 中微子望远镜借助理论模版已经观测到银河系的弥散中微子,显著性超过四倍标准偏差。这促使我们更加期待不依赖模版的测量结果。

三、国际研究现状

早在 1930 年,Pauli 提出了中微子粒子的假说,直到 50 年代中期,Fred Reins 和 Clyde Cowan 才用靠近军用核反应堆的探测器首次观察到中微子。1960 年,前苏联物理学家 Moisey Markov 等提出:去水下或透明冰里,部署立体探测器可以测量地外中微子产生的带电粒子的切伦科夫辐射。1993 年 12 月,作为第一个开拓性实验的美国 DUMAND 项目,在夏威夷岛 Keahole Point 附近的 4800 米深处,投入

了第一套探测器设备。但由于当时防水封装技术水平的限制,探测器很快发生短路故障而无法正常运行,随后该项目被终止。在这个过程中,俄罗斯也在贝加尔湖开始探索部署探测器(Baikal-NT),并在几年后,发现了第一个水下中微子事例。DUMAND 项目深刻影响了后续的实验,比如位于地中海的 NESTOR,ANTARES 和 NEMO,以及南极 AMANDA/IceCube 等。这些实验的探测器方案均为三维立体光电探测器阵列,具备重建初级粒子的方向、能量和类型等能力。这些项目测量了大气缪子的通量和给出了高能地外中微子扩散通量的第一个上限,由此开创了中微子天文观测的实验工作。

目前国际上正在运行的中微子天文实验有 IceCube 和 Baikal-GVD,以及正在建设当中的 KM3NeT。另外,还有一些正在推动立项的项目,比如 P-ONE、TRIDENT 和我们团队提出的高能中微子望远镜计划等。美国南极中微子天文台 IceCube 是有史以来建造的第一个千兆吨级中微子探测器,历经六年建设并于 2011 年完成,总耗资为 2.8 亿美元。它的整个探测器由 5160 个数字光学模块组成,每个模块都有一个 10 英寸的光电倍增管和相关的电子设备。这些光学模块附着在 86 根垂直的“绳子”(弦)上,排列在 1450 米到 2450 米深的一立方千米内。其中,弦间距为 125 米,每根弦有 60 个光学模块,而模块之间的垂直间距为 17 米。位于阵列中心的 8 根弦(DeepCore)部署得则更紧凑,水平间距约为 70 米,模块垂直间距为 7 米,它可将中微子能量阈值降低到约 10 GeV,为研究中微子振荡提供了可能。这些立体布置的光学模块收集到光信号后,将其数字化并打上时间戳,在计算服务器中进行事例筛选和重建,从而测量缪子和中微子的方向和能量。位于地中海的 KM3NeT 实验有两个站点,分别是位于意大利西西里岛附近的 ARCA 和法国土伦港附近的 OCRA。ORCA 是利用地球大气层中产生的中微子,研究中微子的本征特性。而借助 ARCA 望远镜,科学家将从遥远的天体物理源中搜索中微子。ARCA 计划部署 230 串弦,截至目前只完成了 21 串的投放工程量。位于俄罗斯贝加尔湖

的Baikal-GVD实验已经部署了8组探测集群,约为0.4立方千米,计划到2027年完成近1立方千米的规模建设。

IceCube于2013年首次探测到了能量在TeV以上的天体物理起源中微子辐射。这些高能中微子能量远高于来自太阳热核反应的中微子和超新星1987A中微子,打开了高能中微子天文学研究的新时代。在中微子起源天体类型的研究中,IceCube发现中微子和伽马射线耀变体(blazar)列表缺乏明显的相关性,这些耀变体最多贡献30%的弥散中微子观测流量(100 TeV以下);同时伽马射线暴(Gamma-Ray Burst)与中微子观测间也缺乏空间和时间的相关性,最多贡献1%的弥散中微子观测流量;活动星系核(Active Galactic Nuclei)核心方向上的中微子信号相对背景有2.6倍显著性的超出,在100 TeV处可以贡献27%~100%的弥散中微子观测流量;星暴星系(Starburst Galaxy)和星系团(Galaxy Cluster)也被认为是中微子源的候选天体,由于伽马射线会伴随中微子产生,河外伽马射线背景观测也能限制这些天体产生的弥散中微子流量,以至于这些天体很难解释全部的IceCube中微子观测。在点源探测方面,IceCube实验通过十二年(2008~2020)的数据积累,只发现在两个天体的方向上中微子事件有大于3倍显著性的超出,分别是耀变体TXS 0506+06(3.5σ)与活动星系NGC 1068(4.2σ)。潮汐瓦解事件(Tidal Disruption Event)AT2019dsg也被发现与一例高能中微子事件相关,但是显著性较低。

国际上同类型的实验至今没有探测到明确的中微子源,其根本原因是受限于探测器设计和成本,即中微子探测的有效体积不够大,导致其灵敏度不足以探测单个源的中微子流强。美国主导的下一代实验IceCube-Gen2,计划在2034年前完成探测器建设,旨在观测从TeV到EeV能量的中微子天空,对单个源的灵敏度至少比IceCube高五倍。它每年将收集至少十倍于IceCube的中微子事例,并能够详细研究它们在天空的分布、能谱和味道组成,以及在宇宙基线上测试新物理。IceCube-Gen2探测器

将结合光学和射电两种技术,即用于探测光学切伦科夫光的光学阵列和用于观测极高能中微子的500 km²射电阵列。其中的光学阵列将部署间距为240米的120根新弦,每根弦配备80个光学模块,垂直长度为1.25千米,该阵列的体积是当前IceCube的7.9倍。另外,光学阵列在PeV能量下的角度分辨率为10角分,射电阵列对100 PeV能量中微子的角度分辨约为几度,预计能较好地定位单个中微子的方向。IceCube和IceCube-Gen2的探测器结构见图3。

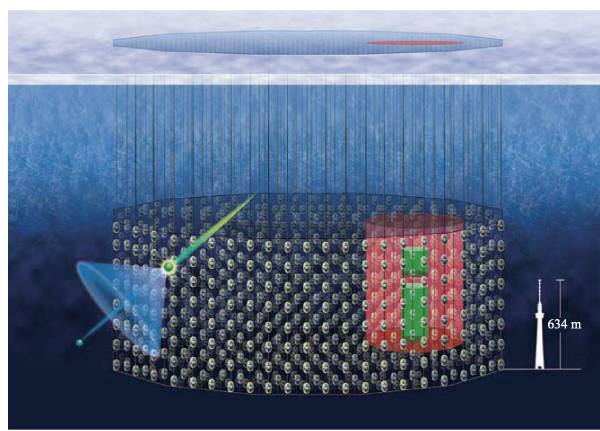


图3 美国南极中微子天文台的示意图。其中红色区域为圆柱体区域为IceCube, 地下其他部分为IceCube-Gen2的光学阵列

四、未来发展的思考

IceCube实验至今未能有效证实高能天体源中微子与现有已观测到其他波段的天体源成协,即尚未有效确认到高能天体中微子源。其根本原因在于该实验的有效探测体积仅为1 km³,实验灵敏度不足以探测到单个源的中微子流强,即不具备对单源的中微子信号实现统计意义上观测的能力。LHAASO实验目前给出12个100 TeV以上的伽马射线源的观测结果,它们是PeV宇宙线起源的潜在候选源。100 TeV及以上的中微子观测则有助于为认证这些宇宙线起源提供决定性的证据,而天体物理起源的高能中微子在百TeV以上显著地超过了大气中微子的背景。参考其中最亮的天体LHAASO J1825-1326的超高能(>100 TeV)伽马射线流量的测量,假设其伽马射线流量完全由强子过程产生,如果要在较为可行的观测时间内对源的中

微子辐射进行显著测量(如每年探测到至少1个缪子中微子事件),要求缪子中微子探测有效面积在100 TeV处超过1000 m²,而IceCube对缪子中微子的有效探测面积在100 TeV约为100 m²。这意味着需要将探测器的有效体积扩展到 $\sim 10^{3/2} = 30$ 倍以上。即使是IceCube-Gen2,在比较理想的情况下,也不能对来自天鹅座恒星形成区域、LHAASO J1825-1326或者LHAASO J1849-0003等中微子候选源的百TeV中微子给出足够显著的观测。

因此,为了提升对百TeV以上中微子的有效观测,高能所LHAASO项目团队提出在贝加尔湖或中国南海,建设规模达30 km³的高能中微子望远镜计划,大型深水高能中微子望远镜,英文翻译为Huge Underwater high-energy Neutrino Telescope,简称HUNT。IceCube每年可以给出约12例“黄金事件”的实时预警,这些事件有50%及以上的概率是信号,即通过天体物理过程产生的中微子,这些中微子的最概然能量主要集中在100 TeV以上。30 km³规模的探测器有望每年探测到约360例“黄金事件”。即本计划发展的目标是在中微子点源灵敏度

至少比目前的IceCube阵列高1.5个数量级以上,达到至多几年就可以积累到对单个源的有效观测灵敏度。根据初步的模拟,我们预期HUNT可以在10年内以五倍标准偏差的显著性,观测到来自拍电子伏宇宙线加速器候选体HESS J1702-420A的中微子(50 TeV以上),如果该源40%以上的伽马射线是中性 π 介子衰变产生的。

考虑到实验的物理目标及建设成本,以贝加尔湖站址为例,高能中微子望远镜的布局如图4所示:在6千米×6千米的范围内,均匀部署约2300根弦,弦间隔在100米以上,每串上配置24个光学模块。基于这样的设计,探测器几何总体积达到30立方千米。为增强弱光探测灵敏度,大幅降低实验造价,光学模块中将采用国产20英寸光电倍增管。2023年2月,本团队在中国南海西沙海域展开了探路者实验,在水下1100米到1800米测试了LED时间标定系统、国产23英寸玻璃球壳的耐压性能,并且利用伽马谱仪测量了深海中的放射性同位素含量。这些放射性同位素是本实验重要的背景噪声来源。本实验的三个主要目标均圆满完成。

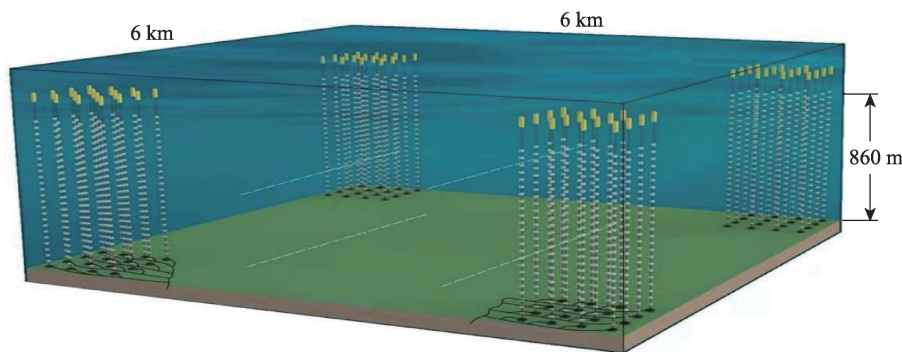


图4 高能中微子望远镜的整体布局示意图

总的来说,美国南极实验的站址中由于冰层中含有较多气泡,导致了中微子事例的角分辨率较差。Baikal-GVD由于经费和人才处于严重短缺,而KM3NeT则是单元探测器设计复杂和海上作业成本高昂等原因,这两个项目的进展均较为缓慢。另外,国际上的这些探测装置即使按期建设完成,也因探测器有效体积远不够,难以在10年观测期内探测到LHAASO发现的超高能伽马射线源伴生的

中微子。这些都给我们在迅猛发展的多信使天文领域,留下了一个后发的难得机遇。预计通过三至五年的预研,五年的装置建设,即在IceCube-Gen2之前建成国际上最灵敏的望远镜,在第一阶段的五年运行期内,因在单源探测灵敏度方面有明显优势而有望探测到高能中微子源,为解决宇宙线起源的百年谜题找到最后一块拼图。