

超高能中微子天文学实验现状

曹 臻 肖 刚

中微子是粒子物理标准模型中一组很特殊的粒子:它们质量最轻(在标准模型中没有质量),几乎不受引力影响;不带电荷,所以也不受电磁相互作用的影响;只参与弱相互作用;寿命却几乎是无穷长;遥远高能天体产生的中微子在到达地球的漫长传播过程中,其路径不会因遍布宇宙的磁场而发生变化。中微子的这些特性使它与光子一起成为绝佳的天文学信息传播者,是正在崛起的新兴中微子天文学学科发展的强劲原动力。与光子相比,中微子不会与弥漫全宇宙的温度约为 3K 的宇宙学背景光子发生作用,中微子天文学工作的能量区域要高于光子天文学,譬如在高于 10^{15} 电子伏特(记为 PeV)的“超高能”区,探测中微子成为唯一的天文观测手段。

然而正是中微子的这些特性,也加大了它的探测难度。因为中微子不易与探测器物质发生作用,换句话说就是很难“看见”它们。另一方面,宇宙中高能中微子的能量分布通常都相当“陡峭”,即能量越高的中微子流量也越少,比如每天大约只有 1 个能量为 10^{18} 电子伏特(记为 EeV)以上的中微子从 1 平方千米的面积上穿过!因此我们需要有相当大的

有效灵敏面积和包含巨大物质质量的庞大探测器才能捕捉到它们。

目前科学家非常清楚中微子的产生机制:高能强作用过程(例如被加速到 1PeV 的质子与高能源天体附近的气体物质的相互作用)中产生大量强子(主要是 π 介子),在这些强子的后续衰变(主要产物是 μ 子)过程中将产生相同数量的中微子(主要是 μ 子型),在进一步的 μ 子衰变过程中还要产生一对 μ 子型和电子型中微子。因此,高能天体理论模型应该可以准确预言宇宙中中微子的种类和相应流强。然而,虽然人类在近 100 年的宇宙线观测中已相当准确地测量了 1PeV 以上宇宙线的流强,却并不知道这些宇宙线源自何处,而观测现今已知高能 γ 光子源还远不足以判断这些光子是源自加速后的高能质子,还是如传统电子起源模型描述的那样,主要因电子的同步辐射和逆康普顿散射所致。因此,中微子天文观测将在如下三个层次对人类进一步理解宇宙线起源这一基本问题产生巨大影响:直接定位高能宇宙线的源天体;确定已知的高能天体(如超新星爆发、活动星系核、伽马暴等)的高能发光机制进而

硬化和癌症等,而且过高的负离子浓度对人体也有不良影响。目前第三代产品在清除室内有害气体的功能上有所改进,但对室内深度污染的净化效果还不显著。

电气石(又称“碧玺”,是一种用于首饰镶嵌的中档宝石)具有特殊结构,是一种独特的天然负离子功能矿物材料。电气石在某一方向的正负电荷无法重合,无对称中心,所以在晶体的两端形成正极和负极,且在外界无电场的情况下也不消失,是一种永久带电体。在受热、受压或者受到其他能量激发时都会产生电荷、释放负离子,所以可以利用电气石或其他负离子矿物材料的天然能量、激发空气电离、产生负离子。这种方法不需要外加的机械、热量或电能,是一种最经济实用的无源负离子材料。

由于电气石产地稀少、价格昂贵,所以负离子发生材料多采用人工合成的方式。即采用 2 种或 2 种以上的天然矿物质,通过一定加工而合成一种具有

释放负离子功能的材料,国内外在这方面都进行了广泛研究,并取得了一定成果。目前国内外学者研究的空气负离子材料母粒主要是天然矿物(如电气石、蛋白石、海底矿石等),其中又以电气石和蛋白石为多。此外,对吸附性能良好的竹碳纤维材料的研究也越来越多。

在研究开发负离子产生材料的过程中,负离子功能的评价是关键问题,方法不同其结果可能差之千里,测试仪器测试原理不同、精度稳定性差别也会严重影响测试结果。由于目前国内外都没有统一的评价方法与标准,因此行业内也存在一定程度的混乱现象。不过随着科技工作者的不懈努力,相信在不久的将来,各种负离子功能材料产品将使我们时刻都有漫步在森林里的感觉。

(王向华,天津工程师范学院数理系 300222;
高建云,天津职业大学基础课部 300402)

探索母粒子(即质子或核)的加速机制,也就是确定超高能宇宙线的起源;探索极高能条件下强相互作用的规律,如通过探测能量在 60EeV 以上的极高能宇宙线粒子与 3K 背景光子相互作用产生 π 介子进而衰变到 μ 子的过程中所伴生的中微子以确定相关过程的新物理机制等,这一过程将使极高能宇宙线损失能量变成较低能量的粒子,从而就此截断宇宙线能谱,这就是美国和前苏联物理学家格雷森(Kenneth Greisen)、扎采平(Georgi Zatsepin)和库兹明(Vadim Kuzmin)在 20 世纪 60 年代预言的 GZK 截断,伴生的中微子被称为“宇宙学起源(Cosmogenic)”中微子或简称为 GZK 中微子。根据人类已经掌握的关于高能 γ 光子源的测量资料,理论家已经预言活动星系核和伽马暴等可能中微子源的平均流强和能谱。根据宇宙线流强的最新观测结果和细致模拟计算 GZK 截断过程,理论家也预言了能量高于 1EeV 的中微子流强。

上述中微子探测实验的难度相当大,主要原因是相互作用很弱导致探测效率很低。现在仅很好地观测了距离最近的巨大中微子源——太阳,发现了中微子振荡现象,但是迄今为止仅捕捉了约 18 个来自太阳系以外、伴生于超新星爆发(1987A)的中微子,尚未测到银河系外的超高能中微子信号!根据上述理论预言,实验中最有可能探测到的超高能中微子是源自活动星系核的 PeV 中微子,国际间为此开始了前所未有的大规模探测器建设,竞相开展超高能、极高能中微子的探索性实验,力争在这场超高能中微子探测竞赛中力拔头筹,率先开启中微子天文学的这扇窗口。中国作为快速发展中的大国在逐年增加基础研究的投入,科学研究的规模和水平也在迅速增长,我们以全新思维已成功研制了第三代中微子望远镜的样机,并选定新疆巴里坤建造观测站,为探索活动星系核中微子打下牢固基础。本文将介绍国际超高能中微子探测实验的现状,简述相关物理理论方面的进展,展望未来探测手段的研发前景。

一、正在运行的实验

目前,极高能宇宙线探测实验有美国犹他州的 HiRes 实验和阿根廷门多萨省的 Auger 实验。两个实验都在寻找源自 GZK 截断机制的 1EeV 以上宇宙学起源超高能区中微子。在低一些的能区,有南极的第一代和第二代中微子望远镜 AMANDA 实

验。作为中微子天文学探测器的先驱,该探测器观测研究了主要源自宇宙线在地球大气层内相互作用的 10^{13}eV 以上次级中微子,其重要意义在于探测到穿透整个地球、来自地球另一面的大气中微子和太阳中微子,证明中微子望远镜可以探测来自遥远中微子源的中微子,开创了中微子天文学的先河。

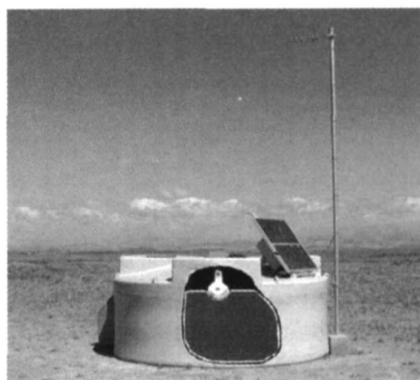


图 1 Auger 的水切仑柯夫探测器,大小约为 10 平方米、深 1.2 米,当宇宙线簇射中的次级带电粒子穿过时,水中产生的切仑柯夫辐射可被位于水面的 3 个光电倍增管探测到,并通过图右侧的微波天线将信号发射到中心站;整个探测器由图中的太阳能电池供电;背景即 ANDES 山脉

Auger 实验 Auger 实验是迄今世界上最大的国际宇宙线探测实验,有 17 个国家的 300 多名物理学家参与其中。该实验监测南天区 1EeV 以上的空气簇射,即宇宙线带电粒子或原子核与空气中原子核相互作用所引发的次级粒子级联过程,一个典型的 1EeV 宇宙线粒子将引发 10 亿个次级带电粒子(主要是电子)!截至 2006 年 3 月,已有约 1000 个水切仑柯夫探测器(图 1)安装调试完毕,并入地面阵列(SD)正式运行。每两个水切仑柯夫探测器相距 1.5 千米,整个阵列将占地约 3000 平方千米。另外,还有 3 个大气荧光探测器阵列监视地面阵列上方直到几十千米高的整个大气层,每个阵列由 6 个用于探测荧光的望远镜(FD)组成(图 2),其仰角范围是 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。由于地面水切仑柯夫探测器高 1 米,因此能够测量接近水平方向的簇射。整个探测器将 FD 和 SD 结合起来,对三类中微子事例非常敏感。A 类事例是掠过地壳的中微子,主要是 τ 型中微子(ν_τ)。当中微子掠过地壳时,与岩石相互作用产生 τ 子, τ 子逃出地壳,在贴近地平线的空气中产生向上发展的簇射;B 类事例叫做“安第斯掠过(Andes Skimming)”事例,也主要是 τ 型中微子,中微子与距探测器 60 千米远的安第斯山脉相互作用产生 τ 轻子,能够逃离山脉的 τ 轻子产生接近地平线的空

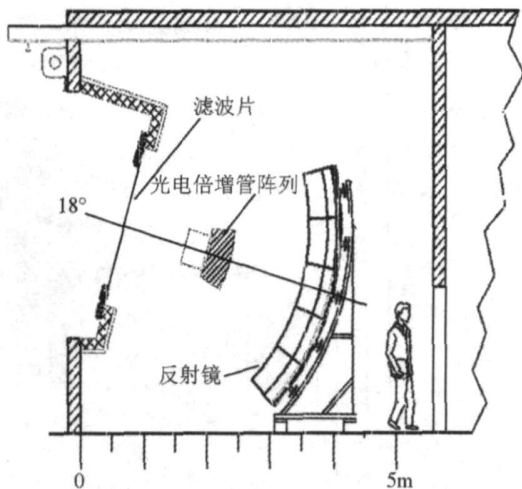


图2 Auger的荧光望远镜示意图,其中球面Schmidt光学反射镜的直径超过3米,位于焦平面的探测器由256个光电倍增管组成,每个像素约为 1.5° 直径2米的望远镜孔径以透紫外Fresnel光学改正薄膜覆盖,整个望远镜阵列置于洁净大厅内部气簇射;C类事例是中微子与大气相互作用直接形成的簇射。Auger实验估计出三种中微子事例的流强,根据Waxman-Bahcall通量计算式,若只用FD观测,能量大于 1EeV 的事例数是每年0.1个 ν_e 和 ν_μ 。使用表面探测器阵列已找到许多水平方向的候选事例,根据蒙特卡罗模拟,D脉冲的下降时间和上升时间都必须大于 100ns 并且还要很好地关联,所有这些候选者都不满足这一判选条件,因此至今尚未确认一例中微子簇射事例。

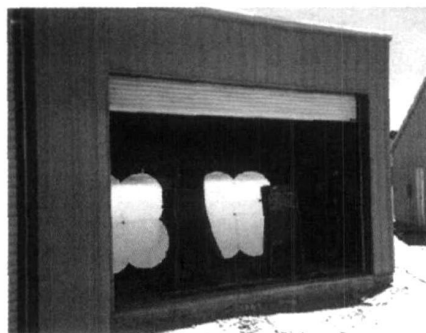


图3 HiRes实验的两面大气荧光望远镜及其附属建筑:望远镜由面积约5平方米的桃花形球面镜和位于焦平面的256个光电倍增管阵列组成,信号通过电缆传到位于右侧的VME电子学读出系统进行在线处理

HiRes实验 HiRes实验是以美国为主的国际宇宙线观测站,合作组由美国、日本和中国物理学家组成,该实验的前身是蝇眼(Fly's Eye)实验——世界上第一个宇宙线簇射大气荧光探测器阵列。它由两个相距12.6千米、装备荧光望远镜(图3)的观测站点组成:第一个观测站(HR1)有21台望远镜覆盖 $3^\circ \sim 17^\circ$ 的仰角范围,于1997年开始运行;第二个观

测站(HR2)有42台望远镜覆盖 $3^\circ \sim 31^\circ$ 的仰角范围,于1999年底开始运行。两个望远镜阵列均可覆盖全方位角。每一个望远镜阵列的孔径在阈能(0.6EeV)附近有几百 km^2sr (立体角单位),宇宙线能量高达 10^{20}eV 附近则超过 $10^5\text{km}^2\text{sr}$ 。由于工作在 $300\sim 400\text{nm}$ 的紫外波段,HiRes探测器只能在无月无云的晴朗夜晚观测。到2006年4月HiRes实验停止运行时,HR1探测器已累计运行20132360秒,HR2探测器已累计运行13096693秒,系目前这一能区最大的曝光量。掠过地壳和附近山脉的 τ 中微子以及 ν_e 和 ν_μ 在空气中相互作用都可产生空气簇射,都是这一实验探测的信号。蒙特卡罗模拟计算显示,预计每年HiRes宇宙线中微子通量在 10EeV 以上能区约有几个事例。初步数据分析结果显示,HiRes实验没有观测到向上和水平的事例。按照设计,HiRes探测器工作在立体模式,即对同时被HR1和HR2观测到的事例用三角法能够对宇宙线簇射精确定位,例如入射方向确定精度达到 0.4° ,从而准确测量簇射的物理参数,包括簇射发展极大在大气中的位置和簇射的大小,据此可相当准确地测量簇射能量和判断原初宇宙线粒子的成分等,特别适于探测极高能宇宙线中微子。对于迄今为止探测到并经仔细重建分析的最倾斜事例(图4,能量高达 40EeV),根据测量到的簇射发展极大在大气中的深度约为 $800\text{g}/\text{cm}^2$ (即相当典型的宇宙线质子引发的簇射极大位置),而不是中微子相互作用所引发的空气簇射约 $2000\text{g}/\text{cm}^2$ 左右的典型极大深度,因此该事例很难判断为由中微子引发的簇射,目前仍在进一步寻找水平事例。

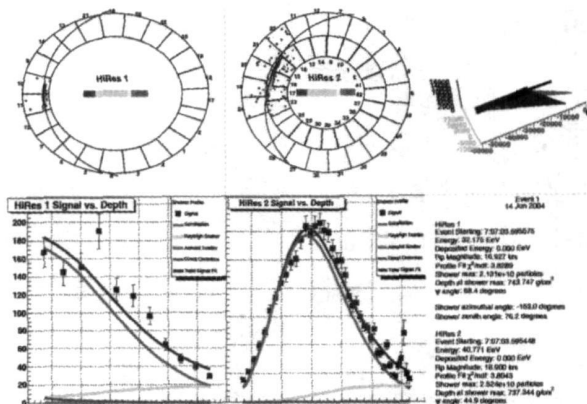
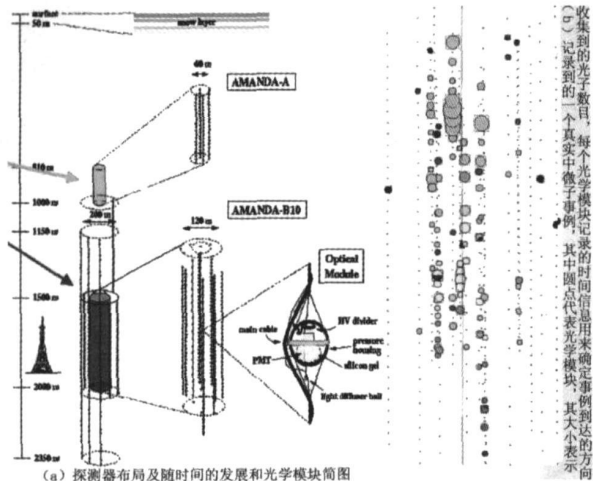


图4 经重建的最倾斜HiRes事例显示:圆形图形显示事例在探测器上所成之像,每个方框表示一台望远镜,其中每一点表示一个触发的光电倍增管;右上为簇射轴线的三维表示,不同颜色分别表示HR1和HR2的视线;下图是HR1和HR2对该簇射纵向发展过程的测量



(a) 探测器布局及随时间的发展和光学模块简图

图5 AMANDA 实验

AMANDA II 实验 AMANDA 实验是第一个以天然水/冰体为探测介质的中微子望远镜实验(图5), 位于南极, 距美国南极大本营仅数千米; 从上个世纪90年代初开始兴建。最早的设计是在南极厚达3千米的冰层里用热水钻一个深1千米、直径约1米的井, 然后将30个由光电倍增管和前端电子学组成的光学模块(OM)穿成500米长的串冻结在井中, 与原始自然冰体融为一体作为中微子穿过时与之作用的靶物质, 同时也是作用产物中带电粒子产生切仑柯夫光的探测介质, 然而在直径60米范围内埋入4串OM之后, 发现冰层里分布广泛的微型气泡产生的散射令切仑柯夫光迅速衰竭, 未能实现设计的探测有效体积。将10串光学模块埋入1.5~2千米的冰下后, AMANDA 实验终于克服气泡的影响, 于1997年开始取数。2000年从直径120米发展到直径200米、19串, 成为AMANDA II 实验, 成功开展了称为第二代中微子望远镜实验。综合2000~2003年的数据, 共得到3329个向上发展的中微子事例, 用于寻找北天区可能的点源。虽然全天扫描结果显示最大超出仅为3.4倍标准偏差, 未能确定任何已知的光子源, 进一步的实验数据分析结果显示与活动星系核产生的弥散中微子存在某种关联, 微微开启了中微子天文学的窗口。

二、正在建造的中微子实验

AMANDA 实验尝试开启中微子天文学新窗口的成功, 极大鼓舞了人类探索中微子天空的热情。根据3个基本事实(即诞生了近半个世纪的粒子物理标准模型)确定了中微子产生的原理并得到加速器实验的广泛验证, 近1个世纪的宇宙线观测证实

存在分布于从氢到铁所有稳定核谱、直到数百 EeV 的高能宇宙线粒子, 近30年来对高能 γ 点源的大量观测研究则证实存在剧烈活动的高能天体, 人们普遍认为广袤宇宙中存在分布于从几十 TeV 到数百 EeV 能量范围的弥散中微子。同时, 如果任何已知 γ 点源高能天体内最高可探测能量的 γ 光子产生于被加速质子相互作用产物 π^0 的衰变, 这些高能天体就应该是中微子的点源。换言之, 探测来自点源的中微子将为高能 γ 光子的质子起源提供直接证据, 从而破解宇宙线起源这一世纪之谜。由于中微子不与宇宙学微波背景(CMB)光子发生相互作用, 用中微子探测遥远源在理论上并非不可能。然而现有实验结果却显示, 对于存在于所有能量段和各类型, 包括活动星系核(AGN)、伽马暴(GRB)和宇宙线产生的中微子源而言, 现有探测器的灵敏度还不足以在有限观测时间内探测到这些中微子, 因为这些源实在太遥远! 唯一的解决办法是进一步大幅提高探测器灵敏度, 新一代中微子望远镜因此应运而生。

建造更大的同类探测器是第三代中微子望远镜的发展主流, 世界上很多实验组为此付出了巨大努力。探索新的探测方法、寻求更廉价有效的探测原理以便更大幅度地提高探测灵敏度, 是第三代望远镜研制的新思路。下面介绍几个正在建造的实验, 通过它们可以了解这一新兴学科的强劲发展潜力。

IceCube 实验 IceCube 实验预期将AMANDA II 探测器扩大100倍! 该实验已于2004年得到美国自然科学基金会(NSF)总量为3亿美元的支持, 这是世界宇宙线研究史上单项经费投资之最。总的探测器体积将达0.9立方千米, 光学模块(OM)共60串, 将

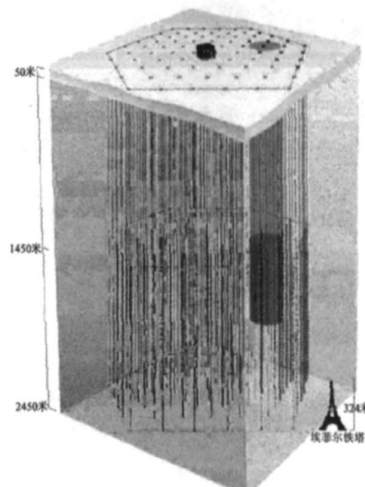


图6 IceCube 实验装置示意图, 其中每条线代表一串探测单元

埋入 1.45~ 2.45 千米的冰层,到 2007 年 3 月已安装 21 串(图 6)。IceCube 预期每年可探测到 4 个 GZK 中微子事例,有效面积在 100PeV 能段达 1.4 平方米,角分辨在 1P~ 100PeV 能区达 0.7° ,预计探测数十个弥散中微子事例。

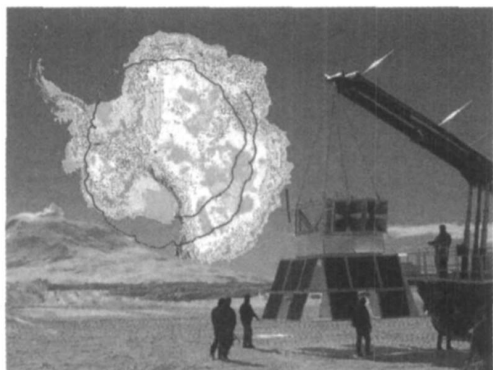


图 7 ANITA 的探测器及其环绕南极洲的飞行路线(地图上的曲线)

ANITA 实验 另一个南极实验是球载切仑柯夫微波探测器——ANITA(图 7),作为第三代中微子望远镜新思路的代表,引入了微波探测空气簇射的新探测手段,该实验项目得到美国航天局(NASA)101 万美元的支持。能量大于 0.1EeV 的中微子与南极冰层相互作用在冰中引起簇射继而产生切仑柯夫微波,这种微波信号在穿出冰层后继续传播,最后被 ANITA 探测器使用 32 个形状如同四角喇叭的天线检测到。由于微波信号在冰和空气中衰减微弱,所以 ANITA 在 37 千米高度上可覆盖 10^6 平方千米的广阔面积。携带两套天线系统的“小 ANITA”样机在 2003~ 2004 年间已有过一次试验飞行,样机在那次为期 18 天的飞行中工作状态良好,但并未探测到掠地中微子的信号。这一结果给极高能区宇宙线中微子流强设置了一个流强上限(图 8),并排除了 Z-暴模型。2006 年 6 月 ANITA 探测器已经过美国斯坦佛直线加速器(SLAC)电子束流标定,并在 2006 年底进行第一次正式放飞,实验数据分析仍

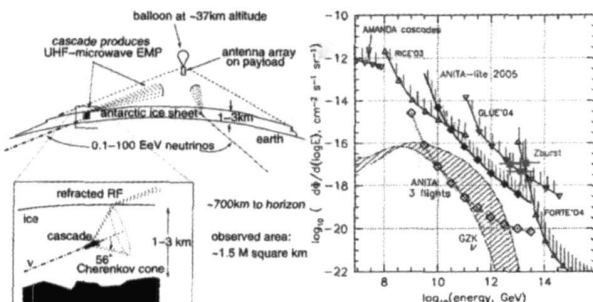


图 8 ANITA 实验的探测原理和样机试运行的观测结果

在进行之中。

Antares 实验 Antares 是在法国 La Seyne 附近的地中海进行的水下中微子望远镜实验。Antares 望远镜由安置于 2~ 2.5 千米深海中成串的光学模块(图 9)组成。其探测原理与第一代 AMANDA 实验类似,只是将中微子相互作用转换体和探测介质换成海水。2007 年底将有 12 串、共 900 个光学模块安装下水,每串分 25 层、每层 3 个模块,第一串已在 2006 年 2 月下水并已探测到第一条 μ 子径迹。全部建成后, Antares 实验有 $2/3$ 的观测时间能用于观测银心,与位于南极的 IceCube 实验有 0.5π 立体角的瞬时公共视场和每天约 1.5π 立体角的积分公共视场。Antares 在 100TeV 以上的角分辨是 0.2° ,在寻找点源时,这对于抑制背景光很重要。它将和大气切仑柯夫光望远镜 HESS 实验观测很好地互补。

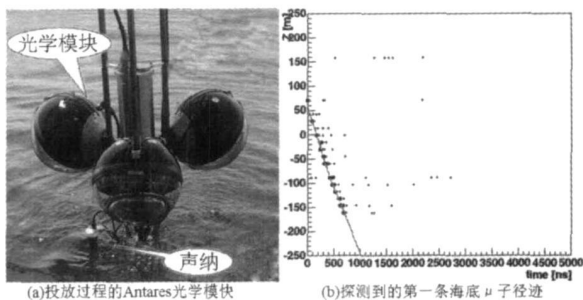


图 9

Nemo 实验 另一个水下中微子望远镜项目是位于意大利西西里岛附近的 Nemo 实验,与 Antares 实验类似,由若干层水平梁串成的一个塔状结构(图 10)组成,层高约 40 米;每层都有 15 米长的梁,光学模块固定在梁的末端;每个光学模块内部是几个朝下和朝向旁边的光电倍增管;塔的总高是 750 米。实验地点在 Capo Passero 附近约 3.35 千米的深海中。Nemo 实验已在浅水中完成测试,数据采集系统(DAQ)也已开始测试。

KM3 实验 另一个欧洲水下中微子项目是位于希腊 Pylos 的 Nestor 实验。以上 3 个地中海水切仑柯夫中微子望远镜实验正在积极探讨合并成一个更大规模的 1 立方

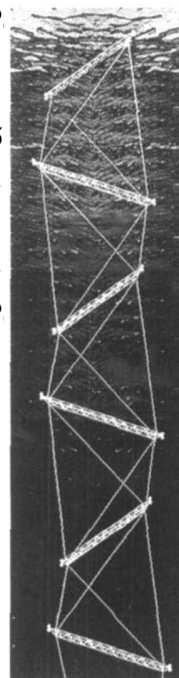


图 10 Nemo 的塔状结构模拟图

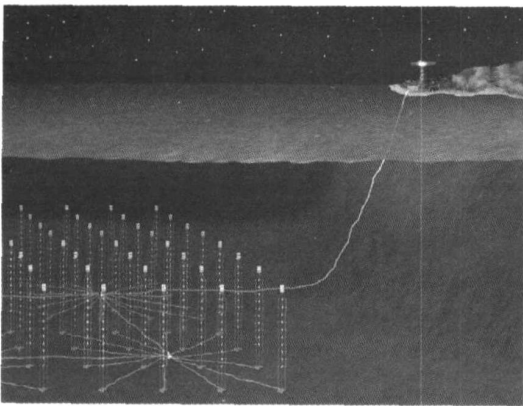


图 11 KM3 实验装置假想图

千米望远镜, 计划在北半球建成一个与南极 IceCube 实验互补的同等规模探测器——KM3 实验。如图 11 所示, KM3 实验计划建成 9×9 排列的 81 个塔状探测器阵列, 塔距 140 米、层距 40 米, 共有 5832 个光电倍增管, 角分辨达 0.19° 。弥散中微子探测的预期物理目标是: 预期 GZK 过程产生的中微子事例率约每年 0.5 个、伽马暴中微子事例率约为每年 50 个、活动星系核中微子事例率约为每年几个到 100 个以上(依赖于不同模型)。预期每年发现 1~10 个伽马暴点源、几个类似于 3c279 的活动星系核、几个银河系内超新星遗迹(SNR)和 1~100 个微类星体。

CRTNT 实验 近年来中微子振荡现象的发现, 给探测宇宙线中微子带来了新的启示。标准模型下质子与物质相互作用的产生机制、源区中微子的味道(中微子物理学名词, 种类之意)分布应为 $1:2:0$, 即产生一份电子中微子、两份 μ 中微子, 没有 τ 中微子(ν_τ)。然而在经历几十万甚至百万年的星系际飞行到达地球时, 由于中微子在不同味道之间不断振荡, 完全达到了味道间的平衡, 三种味道中微子各占 $1/3$ 。每种中微子与地球物质相互作用的概率相等, 其中 ν_τ 的主要反应产物 τ 轻子具有很强的穿透性而且寿命比较恰当。如果中微子入射厚度约几十千米的山体, ν_τ 作用产生的 τ 轻子有一定概率能够从山体岩石中逃逸并在空气中衰变, 其中 80% 的衰变产物(强子和电子)将在空气中产生级联簇射, 与通常的宇宙线广延空气簇射相同, 唯一的区别是这类事例基本都来自山体并且是几乎水平或向上的簇射。

经过几十年发展成熟的广延空气簇射探测技术可直接用于这种中微子作用引起的来自山体的空气

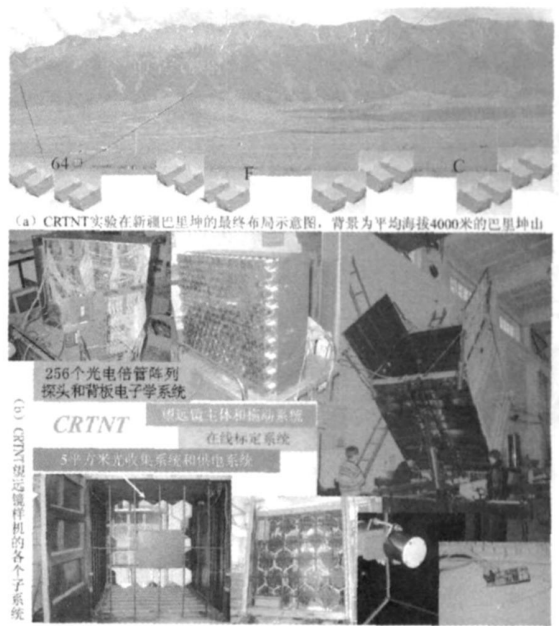


图 12

簇射, 而这类探测器的最大特点就是具有很大的探测有效面积, 而探测器单元却相对简单, 并且易于组合成探测器阵列, 扩大探测灵敏区域, 这正是探测中微子的必需条件。这类探测手段中的空气簇射契伦科夫光/大气荧光(C/F)望远镜阵列具有布局更集中、簇射测量精度高以及能测量多个簇射参数等优点, 这一探测原理代表了第三代中微子望远镜的另一种新思路。在山后一定距离处(约 10 千米)设置这样的望远镜阵列就可探测 ν_τ , 这就是中国 CRTNT 实验(图 12), 将探测能量大于 10TeV 的簇射。CRTNT 站址选在新疆巴里坤山北坡, 16 个 C/F 望远镜组成一个阵列。预期测量弥散活动星系核中微子灵敏度是 IceCube 的 $1/3$, 预计的事例率为每年 $8 \sim 10$ 个。目前已建成两台 CRTNT 样机, 并在西藏羊八井宇宙线观测站试运行, 在 2007 年 5 月观测期间又与中意合作 ARGO 全覆盖地面探测器成功实现了联合观测, 获得了第一批宇宙线事例(图 13)。

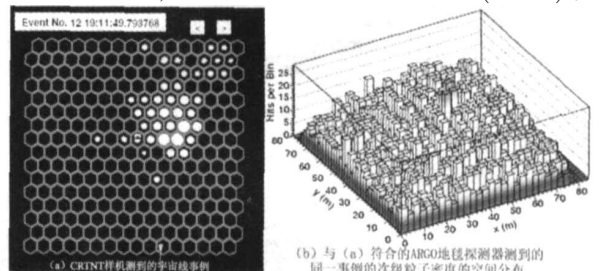


图 13

Nutel 实验 Nutel 实验是类似于 CRTNT 的 ν_τ 探测实验, 由台湾大学发起, 并与在美国夏威夷的

ASHRA 实验合作。2006 年 4 月已完成样机的整个电子学读出系统,正在制作反射镜和镜体。Nutel 实验组开发了一套 ν_t 相互作用和空气簇射的模拟程序 SHENIE。

三、物理进展

HESS 和 MAGIC 实验对银河系 VEH γ 源的成功观测扩大了银河系中微子源候选范围。靠近银河系中心的源,例如 SS433 和 GX3394,是非常有吸引力的中微子候选源。MAGIC 和 HESS 新发现的微类星体 LSi+ 61303 和 HESS J1826- 148 增加了银河系极高能(UHE)中微子候选名单。最新关于近距离伽马暴(红移 $Z < 0.03$)的观测暗示其数量可能是按原来观测结果预期的 500 倍,这可能导致 GRB 中微子能量向上偏移,宇宙学中微子可以通过与弥散红外背景光作用的光生过程产生,将传统的 GZK 中微子的能量降低。两种效应都会增大包括 CRT-NT 探测器在内的高能中微子望远镜探测到的可能性,提高中微子望远镜的探测效率。

超高能中微子的探测可能挑战标准模型。超对称粒子,如(中微子伴子 neutrino 和轻子伴子 sleptons),可能将极高能中微子能量从地球的一边传输到另一边,它们将使大视场宇宙线探测器(如 HiRes 和 Auger 等)看到奇异的空气簇射。类似地,不衰变的 sterile 中微子也能导致奇异空气簇射事例的产生。以上所有的这些粒子都是目前理论研究中广泛讨论的可能暗物质候选者。与超弦理论相关的高维空间效应,将导致 1PeV 以上中微子相互作用截面大幅度提高。这将改变对中微子事例率的估计,如果测量到能量大于 1PeV 的中微子事例率的明显超出,将提供对高维空间效应存在的间接证据。

作为一个“有保障的”极高能中微子源,GZK 过程产生的宇宙学中微子是“后 IceCube”项目的主要探测目标。但是 IceCube 探测器仍然太小,为了扩大有效探测面积,需要更廉价的探测器。IceCube 正在开发探测簇射微波信号和声学信号的全新探测技术,并计划将这两种技术融合起来在现有 IceCube 探测器上方的浅冰层中建设一个新阵列,它将比原有的光学探测器大 75 倍,这样才能实现对 GZK 中微子有统计意义的测量。Salsa 计划是另一个有趣的新想法,利用巨大而且纯度很高的地下盐层系良好的微波传导介质,探测超高能宇宙线中微子。这个想法是在盐层中钻 3000 米深的井并埋入微波天

线串组成一个 100~ 200 立方千米的超大体积阵列(图 14)。利用这样一个探测器,预计 GZK 中微子事例率将达到每年几百个。

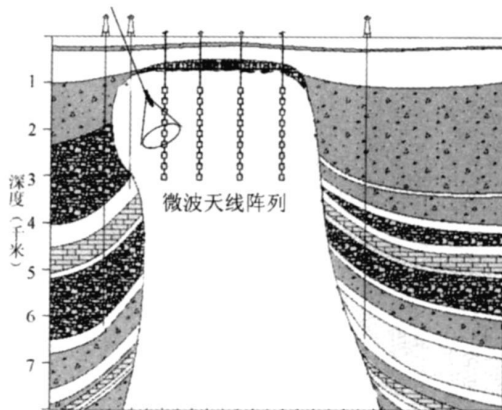


图 14 salsa 设想图

作为一个正在高速发展的领域,超高能中微子探测正在逐渐开启探究宇宙的新窗口。我们将能直接对中微子源定位,并研究能量光子不能到达的在 1PeV 以上的源。超高能中微子的探测研究必将进一步揭开宇宙神秘的面纱。

(北京市中国科学院高能物理研究所粒子天体物理研究中心 100049)

作者简介



曹臻,1982 年毕业于云南大学物理系。1994 年于中国科学院高能物理研究所获物理学博士学位。1994~ 1998 年在美国俄勒冈大学物理系任研究助理。

1998 年以来在美国犹他大学物理系参与超高能宇宙线 HIRES 实验研究,2003 年升为研究副教授。2004 年入选中国科学院“引进国外杰出人才”,现为中科院高能所研究员。启动宇宙线 τ 中微子(CRTNT)探测计划,两台望远镜已在西藏成功试运行;开始我国的极高能宇宙线观测,用 HIRES 实验测量了宇宙线高端能谱;同时负责在西藏的中意合作 ARGO 实验,开展包括甚高能伽玛射线天文在内的高能宇宙线实验研究。

