

高能宇宙线中微子的 IceCube 与 Ice Flower

邢志忠

(中国科学院高能物理研究所 100049)

对地球上的人类而言,来自遥远宇宙的高能信使包括质子、光子、中微子和引力波。由于质子携带一个单位的正电荷,它在宇宙空间的长途跋涉会受到磁场的影响而改变方向,使得我们很难追踪到它的起源之地。极高能的质子也会和宇宙的微波背景辐射发生反应,从而损失能量和它所携带的原始信息,这一现象就是著名的 Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK)截断效应,已经在高能宇宙线实验中被观测到了。来自宇宙深处的高能光子虽然可以直线传播,但它会在行进过程中被宇宙微波背景辐射吸收,因此只有能量相对较低的光子信使才有可能达到地球。近年来引力波天文学的兴起使得探测更遥远的宇宙深处成为可能,原因在于引力波作为时空弯曲的涟漪可以穿行更长的距离,但识别极其微弱的引力波信号需要极其精细的大型激光干涉仪器,技术上的挑战也是空前的。与质子、光子和引力波不同,高能中微子可能产生于活动星系核、伽马射线暴、双星合并和 GZK 截断反应等剧烈的天体物理学事件,并在宇宙空间几乎不受干扰地穿行。由于电中性的中微子不参与电磁相互作用,因此它在空间的传播不受星际磁场的影响,总是以直线行进,而且不会被宇宙微波背景吸收,是颇为理想的宇宙信使。不过,中微子这种只与物质发生弱相互作用的特性却使得它们很难被探测到。为了克服诸如此类的困难,需要在地球上建立超大型的探测装置,即中微子望远镜,以便测量那些来自遥远宇宙深处、数量相当稀少的高能中微子事例,并确定它们所对应的天体源方位。

理想的高能中微子望远镜至少需要满足如下几点要求:首先,它的体积要足够大,能够有效地捕捉到来自银河系内外的稀有中微子事例;其次,它要足够透明,以便于观察中微子与探测器中的物质发生相互作用后所产生的切伦科夫辐射在三维分布的光学传感器阵列中的传播径迹;第三,它要足够黑暗,以避免自然光的干扰;第四,它要足够深,最好安置在地表下几千米的深处,以屏蔽来自宇宙线的污染;最后,它的建造和运行费用不能太高,这样才有可能使之在科学预算允许的范围内成为现实。科学家们发现,满足上述要求的中微子望远镜可以建在冰层的深处或者黑暗的海底和湖底。目前世界上建在水中的中微子望远镜包括 BAIKAL (贝加尔湖)和 ANTARES(地中海);而建在冰下的中微子望远镜则是著名的 IceCube(南极),即“冰立方”,是当代中微子天文学的最先进探测器之一。

IceCube 探测器是一个体积达到一立方千米的庞然大物,置于南极冰层下一千四百米至两千四百米之处,其中安装了超过五千只光电倍增管,可以测量来自最遥远天体源的高能中微子与冰原子发生带电流相互作用后所产生的带电轻子发出的切伦科夫辐射信号。迄今为止, IceCube 望远镜已经观测到上百个高能中微子或反中微子事例,其中能量处于 60 TeV 以上的事例数约 60 个。特别值得一提的是, IceCube 合作组在 2013 年观测到两个能量达到 1 PeV(被命名为 Bert 和 Ernie)和一个能量达到 2 PeV(被命名为 Big Bird)的极高能中微子事例。2017 年 9 月 22 日,该探测器捕捉到一个能量为 290

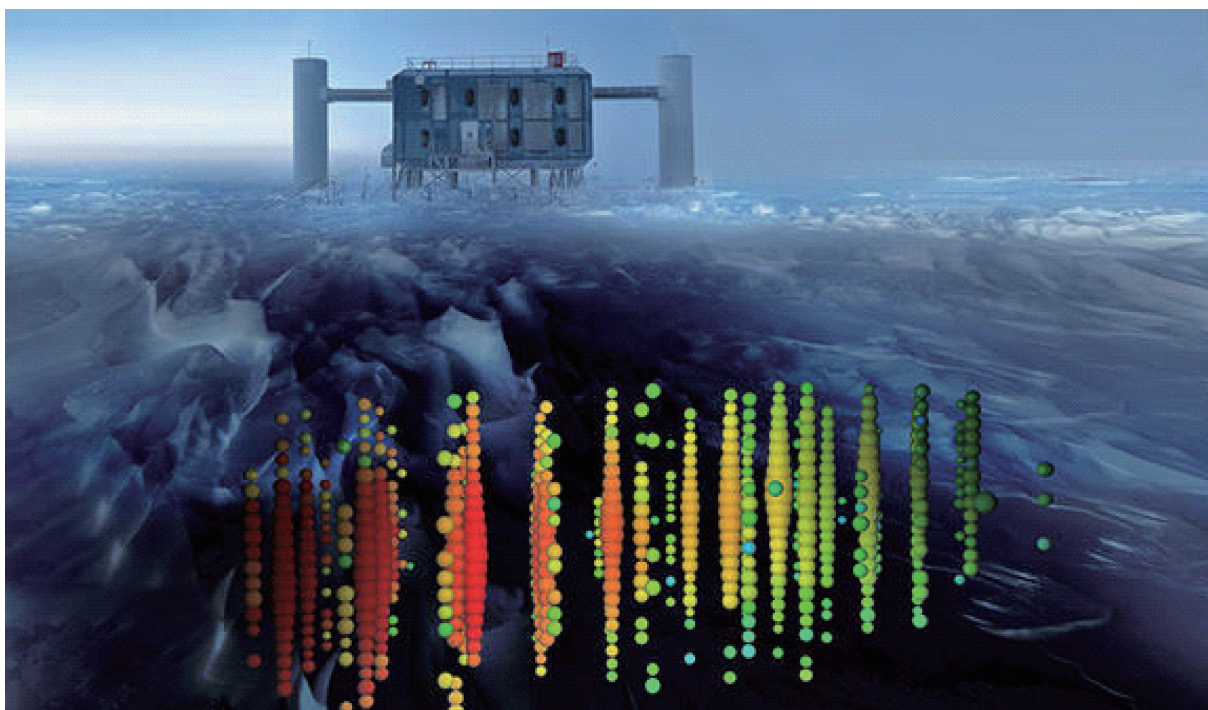


图1

TeV 的缪子型中微子事例,并在实现这一观测的 43 秒后发出了自动预警信息。几天之后,美国的费米卫星等探测电磁信号的望远镜在 IceCube 探测器给出的方向确认了一个特别明亮的耀变体(Blazar)。后者属于活动星系核的一种,是由星系中央的巨大黑洞吸积大量物质而产生的剧烈天文现象,释放出包括带电粒子、光子和中微子在内的高能粒子流。

由于味混合、味振荡和退相干效应,高能中微子的味分布在从宇宙深处到达地球的漫长旅途中会最终确定下来。物理学家和天文学家相信,绝大多数高能中微子起源于带电 π 介子的衰变链,而带电 π 介子是由极高能的质子与质子碰撞或者质子与光子碰撞而产生的。基于这一产生机制,原初的中微子和反中微子束流中电子型、缪子型和陶子型“味”数目之比约为 1:2:0。当它们到达地球上的探测器时,这一比值会由于中微子振荡和退相干效应而演变成 1:1:1。也就是说,尽管最初的中微子束流不含有陶子型中微子,但中微子望远镜却可以探测到与电子型中微子或缪子型中微子数量相当的陶子型中微子;反中微子的情形亦然。这一简单但奇

妙的理论预言得到了 IceCube 测量结果的初步检验。在 2015 年 5 月 1 日发表的学术论文中(Phy. Rev. Lett. 114 (2015) 171102),IceCube 合作组将他们的实验结果展示在如图所示的味分布三角形中,其中蓝色的圆圈代表的是原始的 1:2:0 味分布转化为地球上 1:1:1 的味分布的结果,红色的三角形和绿色的四边形分别代表 0:1:0 与 1:0:0 的原始味分布所对应的地球上的中微子和反中微子味分布,而黑色

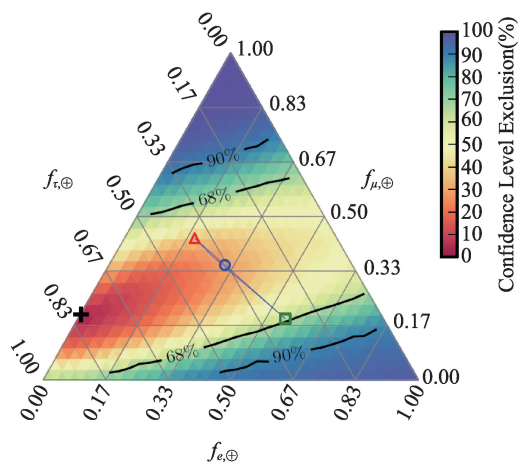


图2

的十字则代表IceCube测量数据的最佳拟合值。显然,这一最佳拟合值与蓝色的圆圈并不吻合,原因在于目前的实验测量结果仍然具有很大的误差,需要进一步提升其精度。

近日,在一篇题为 Cosmic Flavor Hexagon for Ultrahigh-energy Neutrinos and Antineutrinos at Neutrino Telescopes 的学术论文中(arXiv:2006.06181),中科院高能所的周顺研究员对上述味分布三角形的几何语言做了非常不平庸的扩展,得到了描述高能宇宙线中微子和反中微子在望远镜中的味分布六边形,如图3所示,其中 f_a^D 代表地球上的探测器所测量的中微子与反中微子之和的味分布 ($\alpha=e, \mu, \tau$),而 x_a^D 描述的是中微子所占的比重。换句话说,新的六边形超越原来的三角形之处在于它包含了如何区分高能宇宙线中微子与反中微子的味分布,这一点至关重要。事实上,前面提到的原初电子型、缪子型和陶子型“味”数目之比 1:2:0,其实包含了质子与质子碰撞情形的天体源所产生的中微子和反中微子各自的“味”数目之比 1:2:0;或者质子与光子碰撞情形的天体源所导致的中微子“味”数目之比 1:1:0 加上反中微子“味”数目之比 0:1:0。由此可见,如果中微子望远镜能够测量中微子与反中微子的味分布,就能够区分上述两种不同类型的天体源。因此周顺研究员提出的味分布六边形,将有助于下一代高精度中微子望远镜实验的测量数据分析和物理结果诠释。由于IceCube实验站的四周随处可见六边形的冰花,我建议将味分布六边形改称为“cosmic flavor ice flower”。

值得一提的是,早在1960年,美国理论物理学家 Sheldon Glashow 就指出:高能宇宙线中的电子型反中微子进入探测器后,可能与其中的电子发生“共振”带电流相互作用,产生传递弱相互作用的 W^- 玻色子,后者进一步衰变则会产生大量的强子或轻子事例。这就是著名的“Glashow Resonance”效应,对应的入射电子型反中微子的能量约为 6.3 PeV。考虑到标准的电弱统一理论直到1967年才

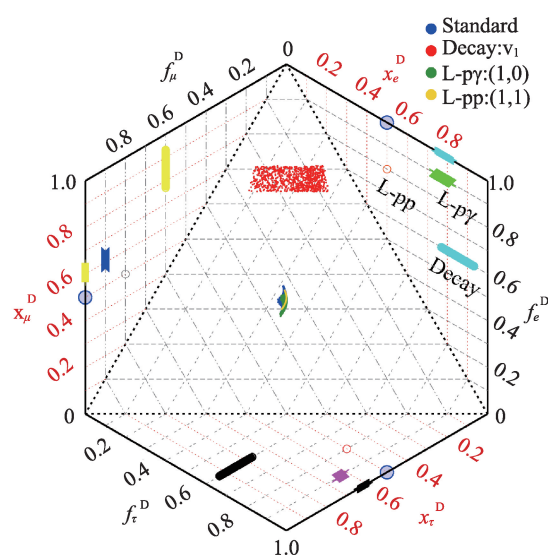


图3

建立,有的读者也许会好奇为什么 Glashow 早在1960年就研究了与 W^- 玻色子相关的物理现象。其实, Glashow 受他的博士导师 Julian Schwinger 的影响,攻读博士学位期间就坚信弱相互作用的传播子应该包含带电的 $W^\pm$ 玻色子和电中性的 Z^0 玻色子。这个小例子再次说明,名师出高徒,而且机会总是留给那些事先已经准备好了的人。

周顺研究员的上述研究工作得到了国家自然科学基金重点项目“中微子质量起源及相关新物理的理论研究”(11835013)的资助。

