

高能中微子天文

黎卓

(北京大学物理学院天文学系 100871)

2013年, 南极的 IceCube 中微子天文台报告首次探测到了来自地外的 TeV-PeV (注: $\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$, $\text{PeV}=10^{15}\text{eV}$) 高能中微子, 为人类探索宇宙打开了一扇全新的窗口, 标志着高能中微子天文时代的开启。此前人类已经探测到来自太阳和超新星 1987A 的地外中微子, 但是这些都是核反应层次的 MeV 量级的中微子, 而 IceCube 的中微子是粒子反应层次的, 至少是 TeV 量级以上, 所以需要强调是高能中微子加以区别。

一、为什么要探测高能中微子

这个问题还要从宇宙线说起。宇宙线是来自地外的高能带电粒子, 由赫斯 (V. Hess) 在 1912 年首次发现, 至今的观测表明宇宙线的能谱跨越很大的能量范围, 从 GeV 一直到 100EeV ($\text{EeV}=10^{18}\text{eV}$) 以上都有分布 (如图 1 所示)。但是宇宙线起源至今还是不清楚, 成为了一个百年难题。

寻找宇宙线起源需要媒介, 而天体物理中传统的信使包括四种, 光子、宇宙线、中微子以及引力波。这其中, 宇宙线本身带电, 在宇宙中传播会受到宇宙

空间无处不在的磁场所偏转, 到达地球的宇宙线已经不能指向原初的方向; 高能光子在传播中则容易跟宇宙背景软光子——例如宇宙微波背景、红外-光学背景等——相互作用转变为正负电子对而没法到达地球; 引力波至今人类还没有探测到, 而且理论上宇宙线起源天体不倾向于也是强引力波源。中微子电中性, 传播不受磁场影响, 到达方向指向起源天体; 跟物质作用弱, 则可以传播很远或从很致密的起源天体中逃逸出来, 所以中微子几乎成为寻找宇宙线起源的唯一信使。

高能中微子可以很自然地由宇宙线产生出来。高能宇宙线可以在起源天体中, 或在逃逸后的传播过程中跟背景的物质或光子相互作用, 产生带电 π 介子, 而带电 π 介子的衰变会产生中微子。

二、高能中微子天文的历史

中微子跟物质相互作用很弱, 探测起来也就特别困难, 需要大量的介质来进行捕捉。利用大体积的水来探测中微子的想法可以回溯到 1960 年, 当时就有人提出通过观测透明介质中中微子产生的高能次级带电粒子的切伦科夫光来探测中微子。利用较小型水切伦科夫探测阵列, 人们已经发现了超新星 1987A 中微子和中微子振荡。然而高能中微子的流量极低, 需要更大的探测器阵列。在 20 世纪 70 年代, 人们就已经预期需要立方千米量级的探测器来探测由极高能宇宙线与宇宙微波背景作用产生的极高能中微子。后来对于各种天体的中微子流量的理论估计, 如伽玛射线暴、活动星系核和超新星遗迹等, 也表明需要立方千米量级的探测器。

最早的设想是利用海水作为切伦科夫探测器来探测高能中微子。20 世纪 70 年代开始的深海 μ 子和中微子探测器计划 (DUMAND) 曾经希望在夏威夷附近海域布置一个 0.1 千米量级的光电倍增管阵列, 尽

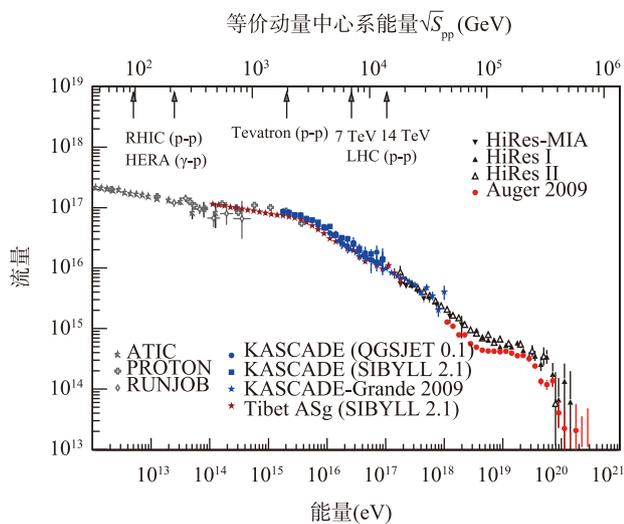


图 1 宇宙线能谱

管历经 20 年此计划最终宣告失败，仍然为以后中微子探测器的研发积累了很多关键技术。后来以水为媒介的探测器有位于贝加尔湖的小型中微子探测器，以及位于地中海的深海中微子探测器 NESTOR、NEMO 和 ANTARES。这三个地中海实验目前正在计划合并成千米级的中微子探测阵列 KM3NeT。

第一个与 DUMAND 同等量级的中微子探测实验是在南极的冰层里实现的，就是南极 μ 子和中微子探测器阵列 (AMANDA)。经过 2000 年至 2009 年的运行，AMANDA 成功地把之前的 TeV-PeV 中微子观测流量上限压低了两个量级，证实了千米尺度探测阵列的可行性。在 2010 年实验升级为千米级的中微子探测实验 IceCube，达到了预期的灵敏度，并最终开启了高能中微子天文的时代。

三、IceCube 天文台和探测方法

IceCube 中微子天文台利用南极的冰层作为探测切伦科夫光的媒介以探测来自地外的高能中微子。它建造于地理南极点，于 2010 年 9 月正式竣工。主要探测设备为埋藏于冰下的 5160 个数字化光学模块组成的探测阵列。每个探测模块均由光电倍增管及读出电子学系统组成。这些模块排列于 86 根垂直深入冰下的供电及读取信号的电缆上，位于冰下 1450 ~ 2450 米之间。每两个模块之间的垂直距离为 17 米，相邻两根电缆之间的水平距离为 125 米（如图 2 所示）。数字化光学模块的时钟精度小于 3 纳秒，可以用来重

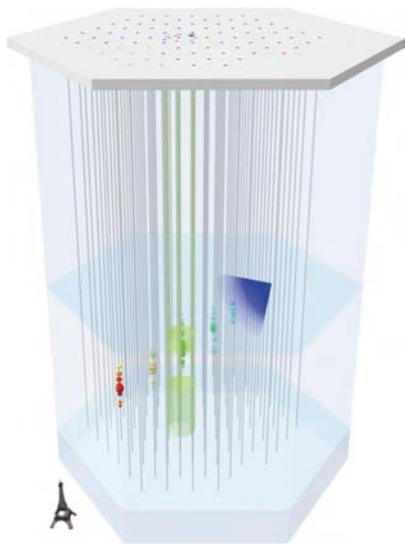


图 2 IceCube 中微子天文台的结构

建中微子的入射方向及能量。

与三代轻子 (e, μ, τ) 对应，中微子有三个弱相互作用本征态（味本征态），即电子中微子 (ν_e)， μ 中微子 (ν_μ) 和 τ 中微子 (ν_τ)。中微子穿过地球时，有极低的概率与地球中的物质反应。高能中微子与物质的反应，主要为与核子的深度非弹性散射，包括带电流相互作用及中性流相互作用。中性流相互作用中，通过交换 Z_0 ，中微子将动量传递给强子；带电流相互作用中，通过交换 W_\pm ，中微子转化为同味的带电轻子 (e, μ, τ)。对反电子中微子，在中微子能量为 6.3 PeV 处，还会有与电子的 Glashow 散射增加了作用概率。

不同的荷电粒子产生的切伦科夫光的光形态有所不同，可以借此来区分不同味的原始中微子。IceCube 探测到的事例依据切伦科夫光形态不同分为级联型、径迹型及混合型。级联型事例由中微子与介质中核子的带电流相互作用产生的高能电子或 τ 子引发，或者由中微子与核子的中性流相互作用产生的高能核子引发。由于其电磁级联产生的簇射只延展十几米，产生的切伦科夫光锥小于冰的光学散射长度（接近 20 米），故级联型事例的辐射形状大致为球形。径迹型事例由 μ 子导致，这些 μ 子则来自 μ 中微子与核子的带电流相互作用，或来自大气簇射产生的背景 μ 子。 μ 子能损长度为数千米，切伦科夫辐射形态呈直线形分布。混合型事例的切伦科夫光形态同时具有球状和线形两种形态，是由 >2 PeV 的 τ 中微子产生。带电流相互作用产生的 τ 子的衰变长度和 IceCube 两根弦之间的水平距离相当，因此 IceCube 能分辨出 τ 子衰变成强子产生的二次级联簇射，并由此与电子中微子区分开。对于能量小于 1 PeV 的 τ 中微子，其切伦科夫光的形态和电子中微子类似，不好区分。不过，IceCube 至今还没有探测到混合型事例。

中微子的能量可以通过总的切伦科夫光能量进行推算，但是 IceCube 探测到的能量只是原始中微子能量的下限。对于级联型事例，由于几乎全部级联过程发生于 IceCube 探测阵列内，所以探测到的能量接近原始中微子的能量。对于径迹型事例，由于径迹只是部分位于 IceCube 探测阵列内，所以探测到的能量比原始中微子的能量要低，只能是下限。然而也因此对

于径迹型事例的有效探测体积要大于 IceCube 的范围。

在中微子到达方向的确定方面，不同类型事例的切伦科夫光形态不同，导致方向定位精度也不同。IceCube 对级联型事例的角分辨率较低，约为 15° ，而对径迹型事例的角分辨率则精确到大致 1° 。

四、高能中微子的发现

发现通常都伴随着意外的发生，天体物理高能中微子的发现也不例外。IceCube 合作组对 2010 年 5 月至 2012 年 5 月的两年探测数据进行分析，原本目的是要寻找一种 EeV 量级的极高能中微子。理论上，这种中微子产生于极高能宇宙线 ($>10\text{EeV}$) 在传播过程中与微波背景光子相互作用产生（由于这种过程首先由三位物理学家格雷森 (K. Greisen)、杰特斯平 (G. Zatsepin) 和库兹闵 (V. Kuzmin) 预言，所以这种中微子又以三人名字字头命名为 GZK 中微子)。为了排除大气簇射产生的背景 μ 子和中微子事例，他们把筛选事例的能量判断定为 PeV 以上。他们发现了两个事例，然而意外的是，能量都是大概 1 PeV，远远小于预期的 EeV 量级。这两个事例都是在 IceCube 阵列区域内部发生的级联型事例，方向都来自南天区。

此发现之前，IceCube 对 TeV-PeV 的中微子搜寻都是针对北天区的 μ 中微子。它们在阵列之外发生反应产生 μ 子千米量级的径迹，再进入阵列区域。这样能增大探测有效体积，并且利用地球过滤大量的大气 μ 子背景，但是只能探测单味的、来自半个天区的中微子，实际事件数比较少。由两个 PeV 中微子事例的发现所提示，IceCube 工作组改进了搜寻方法，专门寻找碰撞顶点位于阵列区域之中的事例。他们把阵列空间分成了外侧的排除区和内部的探测区。当大气背景中的 μ 子从外部穿过排除区时，其发出的光信号会被排除区记录从而排除该事例。大气簇射产生大气 μ 中微子时必然

同时伴随大气 μ 子 ($\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$)，所以没有被排除的中微子事例必然是天体物理起源。这个方法有多个好处，能大大降低南天区的大气背景 μ 子和 μ 中微子事例，比较均匀地搜寻来自全天区和所有味的中微子，并提高了中微子能量测量精度。

利用新的方法对于两个 PeV 中微子同时段的数据进行分析，IceCube 合作组在 2013 年一下子发现了 26 个新的 30 TeV 以上的事例。最新发布的 2010 年到 2013 年三年数据的分析结果中，事例样本达到了 37 个，在 5.7σ 置信度上排除了大气簇射产生的 μ 子和 μ 中微子，无疑证实了地外高能中微子的存在（如图 3 所示）。通过对 60 ~ 2000 TeV 事例的分析表明，中微子的到达方向与各向同性分布一致，能谱也比较硬，中微子数的幂率谱指数约为 -2 ，各味中微子总流量可以表示为 $\epsilon^2 \phi \sim 3 \times 10^{-8} \text{GeV cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 。但是由于在 2PeV 以上没有探测到事例，似乎存在一个高能段的能谱截断。与纯大气背景的预期相比，能谱明显更硬，方向各向同性分布，这些性质都支持是地外起源的天体物理中微子。

另外，由事例的切伦科夫光形态统计可以获得各味中微子流量比的信息。 π 介子衰变产生的原初中微子的味比是 $\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau=1:2:0$ ，由现有的中微子振荡知识知道，在传播中的中微子振荡会导致到达地球时味比变为 $\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau=1:1:1$ 。分析结果显示，虽然目前事例统

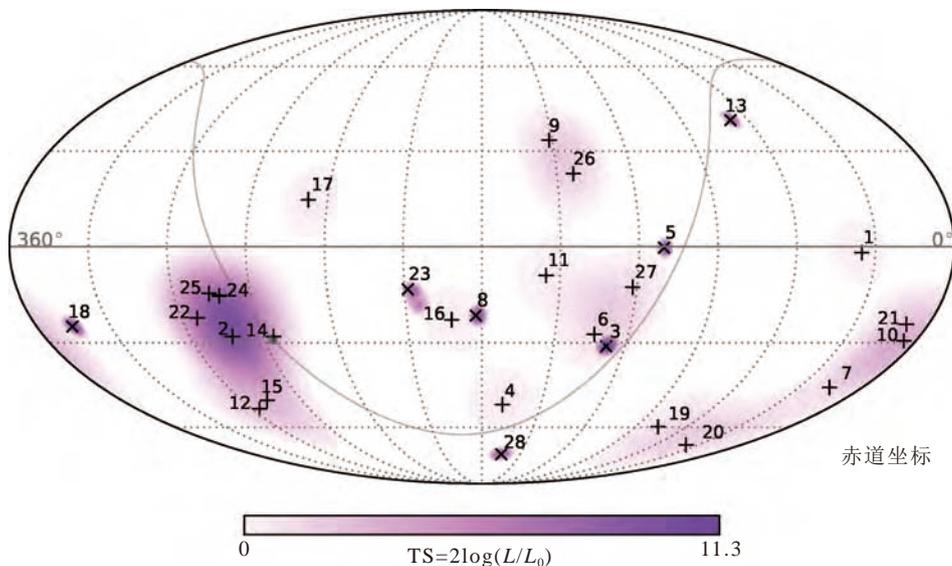


图 3 37 个探测事例的天空分布

计量不够，而且没有探测到混合型事例，不能精确确定味比，但是结果跟预期在误差范围内是一致的。

以上谈到的是弥散的中微子的发现，实际上也做了很多寻找中微子点源的尝试，但是目前结果都是零。首先，弥散中微子的天空分布表明，除了在银河系中心有统计上微弱的超出，没有看到方向成团。其次，由于径迹型事例使方位定位相对更好，IceCube 还对所探测到的径迹型事例的全天分布进行分析，以求发现天区的成团，但是最新的利用 4 年的数据进行分析，没找到点源或延展源。还有，IceCube 以及 ANTARES 还对一些已知候选天体进行中微子搜寻，例如耀变体、伽玛射线暴、星系团和超新星遗迹等，也没有找到中微子信号。

五、起源的理论探讨

研究高能中微子的起源紧密联系着高能宇宙线的起源问题，宇宙中的宇宙线加速器很可能也伴随着较强的中微子辐射（不过，也不能排除像有的人认为的，高能中微子由超出标准物理的奇异粒子的衰变和湮灭所产生）。在发现之前就已经有很多理论模型预言各种可能的高能中微子起源天体。基本图像是，获得加速的宇宙线在加速器天体内跟该天体本身很强的光子场或者较密的物质相互作用，有效地产生介子以及中微子；或者宇宙线逃逸出加速天体以后，在传播过程中与介质物质相互作用，产生介子以及中微子。前者主要是一些爆发性、暂现性天体，例如超新星、伽玛射线暴和活动星系核等，而后者是相对持续的过程，例如星系中宇宙线在传播中持续地损失能量产生中微子。

在 IceCube 中微子的发现之后，引发了许多关于其起源的讨论，又可以分为河内起源和河外起源两大类。河内起源观点认为主要来自银河系内点源天体的贡献，例如一些 TeV 伽玛射线未证认源、银心，以及银河系内宇宙线传播产生的弥散中微子。河外起源的解释包括河外的点源，例如伽玛射线暴、活动星系核和恒星形成或星暴星系。各种观点众说纷纭，如何判断是个问题。

一个比较有效的办法是借助多信使的手段，即伽玛射线、宇宙线和中微子等多种渠道互相联合观测。在 高能辐射过程中，伽玛射线和中微子的辐射流量很

可能存在着正比或相当的关系：（1）由于 π^+ 介子衰变产生的次级正负电子能量和中微子能量相当，正负电子电磁级联过程产生的伽玛射线流量与中微子流量将会相当；（2）由于强子过程产生的 π^0 和 π^+ 能量成正比，所以 π^0 衰变导致的伽玛射线流量和 π^+ 衰变产生的中微子流量存在确定比例关系；（3）加速过程产生的高能电子和质子能量可能成正比，那么它们分别辐射的伽玛射线流量和中微子流量统计上也可能存在正比关系。可以利用更完善的伽玛光子的探测结果，在伽玛光子与中微子存在相关性的假设下，对各种中微子起源候选者进行考察和限制。分析的结果表明以上提到的多种河内外起源观点中，除了星暴星系之外都不被支持。

一个值得注意的事情是，IceCube 探测到的弥散中微子流量与极高能宇宙线观测给出的中微子流量上限一致。地球上探测到的极高能 ($10^{19} \sim 10^{21}$ eV) 宇宙线流量和能谱，加上 GZK 效应告诉我们，极高能宇宙线在宇宙中的产生功率密度为 $E^2 dn/dE = 10^{43.5} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 。假定极高能宇宙线是以质子为主，通过与背景物质或者光子碰撞损失所有能量，给出一个来自宇宙线的中微子流量上限 (Waxmann-Bahcall 上限) 为 $\varepsilon^2 \phi \sim 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。这个上限是针对极高能宇宙线产生的 EeV 量级中微子的（中微子能量约为原初质子能量的十分之一），但是 IceCube 探测到的 TeV–PeV 中微子流量和能谱跟它一致，如果不是巧合，那么 10TeV \sim 10PeV 的宇宙线跟 10EeV 的宇宙线必然存在一定的联系，并且可能是存在共同的起源。比较自然的推断是，宇宙线起源于星暴星系中的天体，其能谱从 PeV 至 100EeV 分布在一个能谱指数约为 -2 的单一幂率上。宇宙线在星暴星系中传播，有效地损失了几乎所有能量。中微子能谱在 PeV 附近的截断可能是因为对应的 100PeV 的宇宙线传播速度比较快，较快从星系中逃逸而来不及产生中微子。这些猜测都需要以后观测的进一步验证。

六、展望

建造 IceCube 中微子天文台的主要目的是探测天体物理起源的高能中微子，从而探索极高能宇宙线的起源问题。IceCube 的设计寿命是 15 年以上，未来将

会继续以每年 10 来个中微子的速率积累更多数据。然而这不足以探测 100TeV 中微子的点源。为了达到足够统计量，需要把探测阵列的体积从量级上进行升级，例如正在讨论中的 IceCube-Gen2 计划。另外在北半球，位于地中海的立方千米级的深水中微子探测器 KM3NeT 在建设中，将与 IceCube 互补，覆盖整个天区。

由于中微子方向的定位就算是径迹型的中微子也只能达到 1° 左右的精度，对应的天区包含了大量的天体，例如约 10^4 个星系，很难从中找到中微子对应的起源天体。目前最好的证认中微子起源的途径应该是多信使的联合探测，比如同时探测暂现源的电磁和中微子辐射。这有赖于用广角的伽玛射线或 X 射线乃至紫外 - 光学的望远镜与中微子天文台联测，同时监视天空中随机出现的暂现源。对于 PeV 中微子，由于基本上无背景，对应光子方向就算前后误差数月的中微子事例也可以认为与电磁波事件有关联。

探测更高能的 GZK 中微子也是非常吸引人的一个课题，能在更宽的能量范围内寻找及验证极高能宇宙线的起源。目前也有一些计划利用新发展的射电手段来进行探测。阿斯卡瑞安 (G. Askaryan) 最早发现冰介质中的簇射会产生射电切伦科夫辐射，相比光学波段

的电磁波具有更长的衰减长度，有利于建造大范围的射电阵列来探测数流量更稀少的 GZK 中微子。目前在南极已有一些计划准备利用 Askaryan 效应来探测极高能中微子，包括 ARA 和 ARIANNA。它们建成后每年预计探测到几十个预言的 GZK 中微子。另外，还有一种想法是探测 τ 中微子产生的 τ 子在低空大气中的簇射。由于簇射产生的次级电子在地磁场中的运动会产生射电波段的同步相干辐射，可以通过地面射电阵列来探测极高能 τ 中微子，如我国天山的 GRAND 计划。

高能中微子的探测不仅能帮助寻找宇宙线起源，还能帮助了解宇宙线加速器中的物理条件，以及粒子加速过程，等等。但是除了在天体物理中很有意义之外，在很多物理研究方面也具有重大意义。比如，对中微子物理，地球上探测到的天体物理起源的中微子的味比可以帮助我们测量中微子振荡混合角、确定中微子质量顺序以及 CP 破坏相角。通过测量远距离暂现源辐射的高能中微子与光子之间的到达时间差——例如伽玛射线暴的 PeV 中微子和 MeV-GeV 光子——可以在更宽的能量范围内更高精度地验证狭义相对论的光速不变原理和广义相对论的弱等效原理，以及限制量子引力效应造成的洛伦兹不变性破缺模型。



科苑快讯

大部分工蚁是懒虫

蚂蚁和蜜蜂一直被认为是团队合作的典范。北美松树林中的棕色小蚂蚁切胸蚁中常见各种劳动分工，其中有担负觅食、筑巢和照料幼虫等特殊任务的工蚁。但是最新研究却表明，群体中的许多蚂蚁似乎无所事事。

为了近距离观察这些蚂蚁所有时间的行为，研究者对 5 个实验室蚁群中的所有蚂蚁都做了彩色标记。在为期两周的时间内，高分辨率摄影机一天内会拍摄 6 次，每次



时长为 5 分钟的视频片段，记录其行为。这些工蚁中的 71.9% 一半时间都很懒惰，25.1% 的工蚁根本不劳动。只有 2.6% 的一小部分蚂蚁一直很勤劳，研究者在《行为生态

学》(Behavioral Ecology) 上发表了相关论文。

以前的研究认为蚂蚁懒惰只是暂时的，是因生理节律而进行的必要工作轮替。但是最新的观察结果却是，懒惰蚂蚁在一天的任何时段都不劳动。这表明，不劳动不只是工间休息，而可能是蚂蚁劳动分工中的重要组成部分。至于懒蚂蚁在群体中起何种作用尚不清楚，不过有一种解释认为勤劳的蚂蚁正处于既不年轻也不衰老的年富力时期。未来更长时间的研究将探寻，蚂蚁在勤劳和懒惰状态间的转换机制。

(高凌云编译自 2015 年 10 月 6 日 www.sciencemag.org)