高能中微子天文观测进展

汪斌^①, 黎卓^{①②*}^① 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;^② 北京大学物理学院天文与天体物理研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhuo.li@pku.edu.cn

收稿日期: 2015-06-05; 接受日期: 2015-07-07

高等学校博士学科点专项科研基金 (编号: 20120001110064)、国家自然科学基金 (批准号: 11273005) 和国家重点基础研究发展计划 (编号: 2014CB845800) 资助项目

摘要 高能宇宙线在宇宙加速器中的产生和在宇宙空间的传播通常会伴随高能中微子的产生. 高能中微子天文学是了解高能天体物理现象的独特的窗口. 最近, 位于南极的立方公里级的中微子探测器 IceCube 探测到了一批高能 ($> \text{TeV}$) 事例, 在 5.7σ 的置信度之上排除了大气背景的起源. 这是人类第一次探测到的来自地外的高能中微子事例, 开启了人类探索宇宙的一个新的窗口, 标志着高能中微子天文学的诞生. 本文简要介绍了高能中微子的探测历史, 高能中微子探测器 (特别是 IceCube) 的探测原理及现状, IceCube 中微子探测结果, 中微子起源的理论探讨以及高能中微子天文的未来展望.

关键词 中微子, 宇宙线, IceCube**PACS:** 95.85.Ry, 98.70.Sa, 95.55.Vj**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00293

1 引言

自 1912 年人类发现宇宙线^[1] 至今的百余年来, 人们对这些来自太空的粒子起源于何处, 以及其起源天体的物理性质仍未完全清晰. 除对宇宙射线的探测外, 20 世纪中叶以来, 人类亦开启了伽玛射线天文学, 以及发展了引力波探测实验. 目前, 人类对高能天体物理现象的探索, 已进入多信使时代. 2010–2012 年, IceCube 探测到了第一批来自地外的高能 ($> \text{TeV}$) 中微子事件, 开启了人类探索高能天体物理现象的一个新的窗口——高能中微子天文学.

中微子是粒子物理标准模型中的基本粒子 (三代轻子与三代夸克) 之一, 质量极低, 小于电子质量

的 10^{-6} [2], 只参与弱相互作用与引力相互作用. 由于穿透力极强, 且不会被背景光子吸收, 以及不会被星际或星系际的磁场偏折, 所以中微子是研究高能天体物理现象的绝佳信使. 人类第一次探测到的来自地外的中微子为太阳热核反应中微子, “太阳中微子难题” 的解决导致了中微子振荡及中微子质量的发现, 揭示了超出标准模型的新物理 [3]. 超新星 1987A 核心坍缩中微子的探测, 则提供给我们了解核心坍缩过程的直接观察, 验证了恒星死亡过程中的核物理过程 [4].

太阳中微子与超新星中微子的特征能量为 MeV, 很多高能天体物理过程也会伴随宇宙线的加速与传播过程产生高能中微子. 高能宇宙线与背景物质或

引用格式: 汪斌, 黎卓. 高能中微子天文观测进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 119508

Wang B, Li Z. Observational progress in high energy neutrino astronomy (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 119508, doi: 10.1360/SSPMA2015-00293

者光子场相作用产生带电 π 介子, $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$, $p + p \rightarrow N[\pi^+ + \pi^- + \pi^0] + X$, 而带电 π 介子的衰变导致中微子的产生, $\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \rightarrow \nu_\mu + (e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e)$, $\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + (e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e)$. 宇宙射线由于带电, 传播过程中会被宇宙磁场偏折, 而高能光子容易被宇宙背景软光子场吸收, 相较而言中性且只参与弱作用的中微子几乎成了可以探测高能天体加速器的唯一信使. 下面将简述高能中微子天文的历史, IceCube 中微子的观测现状及起源的理论探讨, 最后是对高能中微子天文的未来展望.

2 高能中微子天文的历史

利用大体积的水来探测中微子的想法可以回溯到 1960 年^[5,6], 也就是通过观测透明介质中中微子产生的次级带电粒子的切伦科夫光来探测中微子. 一方面, 探测低能量中微子需要较密的探测器阵列, 导致了超新星 1987A 中微子和中微子振荡的发现. 另一方面, 高能中微子的探测虽然有多方面的应用, 但是主要目的就是为了寻找宇宙线起源天体, 而高能中微子极低的流量使得需要相对更大型的探测器阵列. 在 1970 年代, 人们就已经知道需要 km 量级的探测器^[7] 探测由宇宙线与宇宙微波背景作用产生的极高能中微子^[8]. 后来对于各种天体如伽玛射线暴、活动星系核和超新星遗迹等的中微子流量的估计, 也都证实了需要 km 量级的探测器^[9].

对于 km 尺度探测器要求的一个简单估计如下. PeV 能量的中微子与核子的相互作用截面为 $\sim 1 \text{ nb}$ ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$), 该能量的中微子穿过核子数密度为 $N_A \sim 6 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 的冰时, 每穿越 1 km 的长度将有约 10^{-5} 的概率与核子反应. 如果介质透明且反应生成的荷电粒子的速度超过介质中的光速, 则会发射切伦科夫光. 根据地球上观测到的极高能宇宙线的流量, 假定宇宙线通过介子产生过程损失了全部能量, 即可推导出一个高能中微子的流量上限, 即 Waxman-Bahcall 上限^[10]. 在这个上限的流量水平上, PeV 中微子流量约为 $10^5 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. 所以, 为了观测事例达到足够统计量, 即至少每年探测到数个中微子事例, 需要 km 尺度的透明探测物质.

最早的设想是利用海水作为切伦科夫探测器来探测天体物理起源的中微子^[11]. 1970 年代开始的 DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detector) 计划^[12] 曾经希望在夏威夷附近海域布置一个 0.1 km 量级的光电倍增管阵列. 历经 20 年此计划最终宣告失败, 但是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^[13], 以及位于地中海的深海中微子探测器 NESTOR^[14], NEMO^[15] 和 ANTARES^[16]. 这 3 个地中海实验目前正在计划合并成 km^3 级的中微子探测阵列 KM3NeT^[17].

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, 即南极的 AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)^[18]. 经过 9 年的运行 (2000–2009), AMANDA 把之前的 (单味) TeV–PeV 中微子流量上限压低了两个量级, 达到

$$E_\nu^2 \Phi_\nu \leq 5 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, \quad (1)$$

并证实了 km 尺度探测阵列的可行性. 在 2010 年实验升级为 km^3 级的中微子探测实验 IceCube^[19], 达到了预期的灵敏度, 并导致了高能中微子天文的开始. 以下将简要介绍高能中微子实验的组成与探测手段, 以及近来高能中微子探测的发现.

3 IceCube 中微子实验简介及探测原理

3.1 IceCube 的组成

IceCube 利用南极的冰层作为探测切伦科夫光的媒介以探测来自天体物理过程的高能中微子. 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 (DOM) 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 (弦) 上, 位于冰下 1450–2450 m 之间. 每两个 DOM 之间的垂直距离为 17 m, 相邻两根弦之间的水平距离为 125 m. 数字化光学模块的时钟精度超过 3 ns, 可以用来重建中微子的入射方向及能量. IceCube 地下冰层深处有一块极为透明的冰区, 这块区域多安置了 8 根探测电缆. 除

图 1 (网络版彩图)IceCube 实验组成示意图 [20]

Figure 1 (Color online) The schematic plot of IceCube configuration [20].

了深入冰下的探测阵列外, IceCube 还有 80 个冰面之上的探测站组成的广延大气簇射阵列. 每个探测站均由两个装满冰水混合物的切伦科夫探测水箱组成, 每个水箱中装有两个数字化光学模块. 冰面探测阵列可以用来帮助排除大气簇射产生的 μ 子背景, 以及通过探测这些 μ 子来协助宇宙线的研究.

3.2 切伦科夫光模式及探测原理

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. 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, 即 $\bar{\nu}_e e^- \rightarrow W^- \rightarrow X$ [21], 增加了作用概率 (目前 IceCube 并未探测到该能量处的中微子).

不同的荷电粒子产生的切伦科夫光辐射形态有所不同, 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 (Shower/Cascade)、径迹型 (Track) 及混合型. 级联型事例由中微子与核子的带电流相互作用产生的高能电子或 τ 子, 或者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 m), 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. 混合型事例由 > 2 PeV 的 ν_τ 产生. 这时由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^[22], 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, 探测到的事例和电子中微子类似^[23]. 混合型事例目前 IceCube 尚未探测到.

IceCube 探测到的能量只是原始中微子能量的下限. 其中对于级联型事例, 由于几乎全部位于 IceCube 探测阵列内, 探测到的能量接近原始中微子的能量; 对于径迹型事例, 有效探测体积则大于 IceCube 的范围, 探测器探测到的能量比原始中微子的能量要低. 由于事例的分布形状不同, 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° ^[23].

3.3 大气中微子背景

IceCube 探测到的背景事例主要来自高能宇宙线引发的大气簇射中的 K 介子或 π 介子衰变成的 μ 子及中微子, IceCube 平均每天探测到 100 个这种事例, 特征能量为 1 TeV, 谱指数为 ~ -3.7 (由于 K 介子或 π 介子寿命随能量而增加, 高能 K 介子或 π 介子在衰变前更容易和别的粒子发生反应, 因此其衰变成的 μ 子或中微子的谱指数比原始宇宙线的谱指数要软). 除此之外, 100 TeV 之上还有一个理论上预言的瞬时背景 (Prompt Background), 大气簇射中的粲介子 (含有一个粲夸克的介子) 衰变成的中微子, 由于这些粲介子的寿命极短, 粲介子的衰变成的中微子的能谱和原始宇宙线的能谱一致, 为 -2.7 . 由于粲介子的产生截面极低, 当能量为 10–100 TeV 时粲介子衰变的中微子背景才会和传统中微子背景相当^[24, 25], 目前并未从实验上探测到这种中微子背景. 大气簇射中的背景可以用来检验 IceCube 是否工作, 也给 IceCube 自身的中微子探测带来了干扰. IceCube 冰面之上的广延大气簇射探测阵列可以用来探测大气簇射中的背景 μ 子及中微子, 以及协助排除大气中微子背景. 图 2 显示了目前大气中微子背景的探测结果.

4 其他高能中微子实验

除了 IceCube 以冰为介质, 还有一些高能中微子实验以水为介质, 例如安装在地中海深海的

图 2 (网络版彩图) 大气中微子背景^[20]. 数据为不同实验组的探测结果. 红色宽线为理论预言的粲介子衰变的中微子背景

Figure 2 (Color online) Atmospheric neutrino background. The data are measurements from various experiments, and the magenta band is the predicted charm-induced neutrino background^[20].

ANTARES, NEMO 和 NESTOR 实验. ANTARES 位于法国南部近海^[16], 在 2002–2008 年建造完成, 由分布于 12 根弦上的 885 个光学模块组成, 体积为 10^{-2} km³. ANTARES 在完全竣工之前就开始了数据的采集, 获得了一些探测结果. KM3NeT 实验将是 3 个地中海实验的升级, 按设计将达到几个 km³ 的尺度^[17]. 它将应用改进的光学模块, 一共 12000 多个, 分布于 600 多根弦上. KM3NeT 将分为 6 个部分, 分别安装在法国、意大利和希腊附近. 预计 μ 中微子的定位精度在 高能区 达到 0.1° , 而级联型的事例也能在 10 TeV 达到 3° , 在 100 TeV 优于 2° . KM3NeT 位于北半球, 更适合于探测银河系起源的中微子, 与 IceCube 在覆盖天区上很好地互补. 另外, 贝加尔合作组也计划在贝加尔湖中逐步建造 km³ 尺度的阵列, 称为 GVD (Gigaton Volume Detector)^[26].

5 IceCube 的探测结果

5.1 高能弥散中微子的发现

发现通常都伴随着意外, 天体物理高能中微子

的发现也不例外. IceCube 对 2010 年 5 月至 2012 年 5 月的数据进行分析, 目的是要寻找 GZK 中微子, 所以把能量卡在 PeV, 结果却发现了两个事例, 能量都是大概 1 PeV, 远远小于预期的 EeV 量级 [27]. 两个事例都是中微子在 IceCube 实验阵列内部发生反应产生的级联型事例, 并且都来自南天区.

此发现之前, IceCube 对 TeV 到亚 PeV 的中微子搜寻都是针对北天区的 μ 中微子—— ν_μ 在阵列之外反应产生 μ 子 km 量级的轨迹, 进入阵列区域. 虽然这样能增大探测有效体积, 但是需要利用地球过滤大量的大气 μ 子背景, 所以这种方法只能探测单一的、来自半个天区的中微子. 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体积之中的事例. 他们把 IceCube 阵列空间分成了外侧的“排除区”和内部的探测区 [28]. 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 μ 中微子打入时必同时伴随大气簇射中的 μ 子, 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, 能把大气背景 μ 子和 μ 中微子事例降低到每年十几个, 以及保留 98% 的信号; 能提高中微子能量测量精度; 能较均匀搜寻来自全天区和所有味的中微子.

对于两个 PeV 中微子同时段的数据进行分析, IceCube 发现了 28 个能量区间位于 30 TeV 到 1.2 PeV 的事例, 对于 10.6 个预计的大气背景事例是 4σ 置信度上的超出, 揭示了是来自地外高能中微子起源 [28]. 这些中微子在空间中的分布大致符合各向同性, 以及与流量比 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 1 : 1$ 不矛盾. 以 E^{-2} 的能谱形状进行拟合, 得到高能中微子流量 (单味) 为 $E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 这些中微子是人类探测到的第一批来自地外的高能 ($> \text{TeV}$) 中微子事例, 为人类了解高能天体物理现象打开了一个新的窗口, 标志着高能中微子天文学的诞生.

在最新发布的结果中, 利用 2010–2013 年共 998 天的数据 IceCube 探测事例增加到 37 个, 图 3 展示了能量及入射方向的分布情况. 相比预计的 8.4 ± 4.2 个大气 μ 子及 $6.6^{+5.9}_{-1.6}$ 个大气中微子, 在 5.7σ 置信度上排除了大气簇射的起源 [29]. 通过对 60–2000 TeV 事例的分析发现, 各味中微子流量比仍符合 $1 : 1 : 1$,

图3 (网络版彩图)IceCube 探测到的事例的入射方向 (赤纬) 和在探测器中释放的能量的分布 [29]

Figure 3 (Color online) Arrival angles (declination) and deposited energies of the IceCube detected events [29].

单味中微子流量的平谱拟合结果为

$$E_\nu^2 \Phi_\nu = (0.95 \pm 0.3) \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}. \quad (2)$$

图 4 和 5 分别显示了 37 个事例的能量分布和赤纬分布. 与纯背景的预言相比, 能谱明显更硬, 方向的分布趋于各向同性. 这些性质都支持它们是地外起源的天体物理中微子.

更仔细的能谱分析发现, 若假定谱指数为 -2 的平谱, 中微子各向同性分布且各味中微子流量比为 $1 : 1 : 1$, 则预计会探测到 3.1 个超过 2 PeV 的中微子. 目前探测到的最高能量的中微子为 2 PeV, 这预示着超过 2 PeV 有一个中微子能谱的截断, 或者能谱较软. 以单一幂率且没有截断的能谱进行拟合, 获得的最佳拟合谱指数为 -2.3 (图 6).

5.2 中微子点源的寻找

探测到高能中微子以后下一步自然是要找起源. 由图 7 可见, 这 37 个事例除了在银河系中心有微弱超出, 没有看到明显成团, 其天区分布大致呈各向同性分布. IceCube 亦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, 其结果仍然与背景符合, 没找到点源或延展源 [30]. IceCube 以及 ANTARES 还对一些已知候选天体进行中微子搜寻, 例如一些耀变体、星系团和超新星遗迹等, 也没有找到信号 (如图 8 中 IceCube 和 ANTARES 给出了一些候选天体的

图 4 (网络版彩图) 探测到的事例数随所测能量的分布以及与背景预计值的对比 [29]

Figure 4 (Color online) The detected event number as function of the detector-deposited energy in comparison with predicted background [29].

图 5 (网络版彩图) 探测到的事例数随赤纬的分布 (> 60 TeV) 以及与背景预计值的对比 [29]. 灰线为假设各向同性分布的地外中微子的拟合结果

Figure 5 (Color online) The declination distribution of detected events (> 60 TeV) in comparison with predicted background [29]. The grey lines are the best fit assuming an isotropic extraterrestrial neutrino emission.

图6 IceCube 探测到的中微子能谱 [29]. 黑色 (灰色) 圆点对应于不考虑 (考虑) 大气背景中粲介子的产生

Figure 6 The energy spectrum of IceCube detected neutrinos [29]. The black (grey) data points denote the results without (with) charm atmospheric background taken into account.

图7 (网络版彩图)IceCube 探测到的 37 个事例在银道坐标中的分布 [29]. 其中 + 标记级联型事例, × 标记径迹型事例

Figure 7 (Color online) The sky map of the 37 IceCube detected events in the Galactic coordinate [29]. Symbol + denotes shower-like events and × muon tracks.

流量上限).

通过积分更长的探测时间可以增加对点源寻找的灵敏度, 但是还有另外两种方法可以增加探测点源的几率. (1) 时间依赖探测: 对于例如活动星系核耀发或者伽玛射线暴等暂现源, 在给定的时间范围内 (以及给定方向) 搜寻可以极大降低大气中微子背景. 至今为止对活动星系核和伽玛射线暴 [31,32] 等源的搜寻结果仍然为零, 但是已经对模型有一定的限制, 虽然较强的结论仍需要更多的观测 [33]. (2) 叠加

探测: 即某类天体虽然单个源均在探测灵敏度之下, 但是使用叠加手段作为整体可能被探测到. 不过至今最新的结果显示, 对耀变体、星暴星系、超新星遗迹等等可能中微子起源天体的叠加分析仍然没有信号 [30].

6 高能弥散中微子起源的理论探讨

IceCube 中微子的发现引发了许多关于其起源的理论模型, 主要可以分为河内起源和河外起源两

图 8 (网络版彩图)IceCube 和 ANTARES 对点源的探测灵敏度随赤纬的变化, 以及候选点源的中微子流量上限 (90% 置信度) [30]. 黑点是 IceCube 对候选天体 μ 中微子流量的上限, 而加号是 ANTARES 的上限

Figure 8 (Color online) The point source detection sensitivity of IceCube and ANTARES as function of declination, and the muon neutrino flux upper limits (90% C.L.) [30] for candidate point sources. Dots are from IceCube observation and plus from ANTARES.

大类. 河内起源解释包括银河系点源的贡献, 例如一些 TeV 未认证源 [34], 以及银河系内宇宙线在传播过程中与星际介质碰撞产生的弥散中微子 [35–40], 甚至有人提出的来自扩展的银晕中的弥散中微子 [41]. 河外起源的解释包括河外的点源, 例如伽玛射线暴 [42, 43]、活动星系核 [44, 45] 和恒星形成或星暴星系 [46–48], 也包括来自极高能宇宙线传播过程产生的 GZK 中微子等 [49, 50].

在各种高能辐射过程中, 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 $\pi^\pm$ 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 $\pi^\pm$ 能量成正比, 所以 π^0 衰变导致的伽玛射线流量和 $\pi^\pm$ 衰变产生的中微子流量存在正比关系; (3) 加速过程产生的高能电子和宇宙线能量可能成正比, 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. 在现今多信使的时代, 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 [51, 52], 结果发现以上提到的多种中微子产生模型, 除了星暴星系之外都不被支持.

我们依据 Waxman 的观点 [53] 作一个较为宽泛的讨论. 本地宇宙极高能 (10^{19} – 10^{21} eV) 宇宙线的产生功率密度为 [54] $E^2 \frac{d\dot{n}_0(E)}{dE} \approx 10^{43.5} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ a}^{-1}$. 假定极高能宇宙线是以质子为主, 通过 pp 碰撞或者与背景光子的 p γ 反应将能量转化为中微子, 则探测到的中微子流量不会超过 Waxman-Bahcall 上限 [10],

$$E_V^2 \Phi_{\text{WB, all flavor}} \sim 3 \times 10^{-8} \frac{\xi_z}{3} \times \left[\frac{(E_p^2 d\dot{n}_p/dE_p)_{z=0}}{0.5 \times 10^{44} \text{ erg/Mpc}^3 \text{ a}} \right] \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}, \quad (3)$$

其中 ξ_z 为宇宙学演化因子. 若极高能宇宙线源随红移的分布遵从恒星形成率或活动星系核的分布, 则 $\xi_z \sim 3$.

IceCube 探测到的高能中微子的流量和 Waxman-Bahcall 上限相一致, 如果不是巧合则预示着这些中微子和极高能宇宙线可能拥有共同的起源. 比较简洁自然的解释是起源天体的质子产生的功率密度从 $\sim 10^{15}$ eV 至 $\sim 10^{20}$ eV 均为 $E^2 \frac{d\dot{n}_0(E)}{dE} \approx 10^{43.5} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ a}^{-1}$, 产生的宇宙线在源区或周围环境中通过介子产生过程损失了几乎所有能量. 流量在 2 PeV 之上的截断有可能是因为 $\sim 10^{17}$ eV 的质子 (介子产生过程最后生成的中微子的能量仅为质子能量的 $\sim 5\%$) 很容易从源区或周围环境中逃逸, 并不意味着起源天体产生的质子能谱有截断. 另外, π 介子衰变产生的中微子味比为 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$. 经过较长的传播距离, 各味中微子间进行了充分地振荡混合, 地球上探测到的中微子的各味流量比应为 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$ [22], IceCube 的探测也与这一结果吻合.

结合前面伽玛光子探测的限制结果, 我们进一步提出星暴星系中的伽玛射线暴可能是高能中微子和极高能宇宙线的共同起源. 伽玛射线暴产生极高能宇宙线, 同时 $< 10^{17}$ eV 的宇宙线在星暴星系中传播损失大部分能量产生中微子 [51].

7 展望

IceCube 建造的主要目的为探测天体物理起源的高能中微子, 以及寻找极高能宇宙线的起源. IceCube 的设计寿命超过 15 年, 未来将会积累更多的观测数据. 但是为了增加 100 TeV 以上能区的统计量, 需要把 IceCube 升级到更大的体积. 位于地中海的立方公里级的深水中微子探测器——KM3NeT 在建设中, 将与南半球的 IceCube 互补, 覆盖南北天区.

由于中微子方向的定位就算是径迹型的中微子也只能到达约 1° 的精度, 对应的天区包含了, 例如约 10^4 个星系, 很难找到对应起源天体. 通过同时探测暂现源的光子和中微子可能是更好的证认中微子起源的途径. 这有赖于用广角的多波段, 伽玛射线、X 射线和紫外光学等, 望远镜来同时监视天空中随机出现的暂现源. 对于伽玛射线暴 PeV 中微子, 由于探测背景较低, 已知方向的延迟数月的中微子事例也能被证认为与该暴关联.

由于 Askaryan 效应, 冰介质中的簇射会产生射电切伦科夫辐射, 能有更长的衰减长度. 在南

极洲, 利用射电手段进行中微子探测的射电阵列 ARA(Askaryan Radio Array)^[55] 和 ARIANNA(The Antarctic Ross Ice Shelf Antenna Neutrino Array)^[56] 也在计划和建设中. 建成后每年预计探测到几十个 EeV 中微子事例^[55,56], 将对预言的 GZK 中微子的流量进行检验, 以及在更宽的能量范围内寻找及验证极高能宇宙线的起源.

高能中微子源的探测不仅能帮助我们了解激波加速及黑洞吸积等天体物理过程, 还能帮助我们限制基本物理. 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流量比可以帮助我们测量中微子振荡混合角^[57]、确定中微子质量等级以及 CP 破坏相角^[58]. 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^[59](之前通过对超新星 1987A 的观测, 得到的限制精度分别为 10^{-8} 和 10^{-2} ^[60]), 以及限制量子引力效应造成的洛伦兹不变性破缺^[61].

参考文献

- Hess V F. Penetrating radiation in seven free balloon flights. *Phys Z*, 1912, 13: 1084
- Thomas S A, Abdalla F B, Lahav O. Upper bound of 0.28 eV on neutrino masses from the largest photometric redshift survey. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 031301
- Bahcall J N. Solar Models and Solar Neutrinos. *Phys Scripta*, 2005, T121: 46–50
- Raffelt G G. Supernova neutrino oscillations. *Phys Scripta*, 2005, T121: 102–105
- Greisen K. Cosmic ray showers. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 1960, 10: 63–108
- Reines F. Neutrino interactions. *Ann Rev Nucl Particle Sci*, 1960, 10: 1–26
- Roberts A. The birth of high-energy neutrino astronomy: A personal history of the DUMAND project. *Rev Modern Phys*, 1992, 64: 259
- Berezinsky V S, Zatsepin G T. Cosmic rays at ultra high energies (neutrino!). *Phys Lett B*, 1969, 28: 423
- Gaisser T K, Halzen F, Stanev T. Particle astrophysics with high energy neutrinos. *Phys Rep*, 1995, 258: 173
- Waxman E, Bahcall J. High energy neutrinos from astrophysical sources: An upper bound *Phys Rev D*, 1999, 59: 023002
- Markov M A, Zheleznykh I M. On high energy neutrino physics in cosmic rays. *Nucl Phys A*, 1961, 27: 385–394
- Peterson V Z. Deep underwater muon and neutrino detection (DUMAND). *NATO Adv Sci Inst (ASI) Ser C*, 1983, 107: 251–268
- Balkanov V, Belolaptikov I, Budnev N, et al. The BAIKAL neutrino project: Status report. *Nucl Phys B Proc Suppl*, 2003, 118: 363–370
- Aggouras G, Anassontzis E G, Ball A E, et al. A measurement of the cosmic-ray muon flux with a module of the NESTOR neutrino telescope. *Astropart Phys*, 2005, 23: 377–392
- Randazzo N. NEMO project: Studies on the feasibility of a km³-scale underwater neutrino telescope in the mediterranean area. *American Institute of Physics Conference Series*, 2000, 513: 302–305
- Aguilar J A, Albert A, Ameli F, et al. First results of the instrumentation line for the deep-sea ANTARES neutrino telescope. *Astropart Phys*, 2006, 26: 314–324
- Migneco E. Progress and latest results from Baikal, Nestor, NEMO and KM3NeT. *J Phys Conf Ser*, 2008, 136: 022048

- 18 Halzen F. Neutrino Astronomy and the AMANDA South Pole Telescope. In: Shapiro M M, Silberberg R, Stanev T S, et al, eds. *New Vistas in Astrophysics*. Singapore: Word Scientific, 2000. 3–48
- 19 Halzen F. IceCube: The rationale for kilometer-scale neutrino detectors. *arXiv*: 0910.0436
- 20 Anchordoqui L A, Barger V, Cholis I, et al. Cosmic neutrino pevatrons: A brand new pathway to astronomy, astrophysics, and particle physics. *J High Energy Astrophys*, 2014, 1: 1–30
- 21 Glashow S L. Resonant scattering of antineutrinos. *Phys Rev*, 1960, 118: 316–317
- 22 Learned L G, Pakvasa S. Detecting ν_τ oscillations at PeV energies. *Astropart Phys*, 1995, 3: 267–274
- 23 Aartsen M G, Abbasi R, Ackermann M, et al. Energy reconstruction methods in the IceCube neutrino telescope. *J Instrum*, 2014, 9: P03009
- 24 Enberg R, Reno M H, Sarcevic I. Prompt neutrino fluxes from atmospheric charm. *Phys Rev D*, 2008, 78: 043005
- 25 Martin A D, Ryskin M G, Stasto A M. Prompt neutrinos from atmospheric $c\bar{c}$ production and the gluon at very small x . *Acta Phys Polonica B*, 2003, 34: 3273
- 26 Avrorin A D, Avrorin A V, Aynutdinov V M, et al. The prototyping/early construction phase of the BAKAL-GVD project. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sec A-Acceler Spectrom Detect Assoc Equip*, 2014, 742: 82–88
- 27 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 021103
- 28 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science*, 2013, 342: 1242856
- 29 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 101101
- 30 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Searches for extended and point-like neutrino sources with four years of IceCube data. *Astronophys J*, 2014, 796: 109
- 31 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. Time-dependent searches for point sources of neutrinos with the 40-string and 22-string configurations of IceCube. *Astronophys J*, 2012, 744: 1
- 32 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. An absence of neutrinos associated with cosmic-ray acceleration in gamma-ray bursts. *Nature*, 2012, 484: 351–354
- 33 Li Z. Note on the normalization of predicted gamma-ray burst neutrino flux. *Phys ReV D*, 2012, 85: 027301
- 34 Fox D B, Kashiyama K, Mészáros P. Sub-PeV Neutrinos from TeV Unidentified Sources in the Galaxy. *Astronophys J*, 2013, 774: 74
- 35 Ahlers M, Murase K. Probing the galactic origin of the IceCube excess with gamma rays. *Phys Rev D*, 2014, 90: 023010
- 36 Guo Y Q, Hu H B, Yuan Q, et al. Pinpointing the knee of cosmic rays with diffuse PeV-rays and neutrinos. *Astronophys J*, 2014, 795: 100
- 37 Gupta N. Galactic PeV neutrinos. *Astropart Phys*, 2013, 48: 75–77
- 38 Joshi J C, Winter W, Gupta N. How many of the observed neutrino events can be described by cosmic ray interactions in the Milky Way? *Month Not R Astrono Soc*, 2014, 439: 3414–3419
- 39 Lunardini C, Razzaque S, Theodoseou K T, et al. Neutrino events at IceCube and the Fermi bubbles. *Phys Rev D*, 2014, 90: 023016
- 40 Neronov A, Semikoz D, Tchernin C. PeV neutrinos from interactions of cosmic rays with the interstellar medium in the Galaxy. *Phys Rev D*, 2014, 89: 103002
- 41 Taylor A M, Gabici S, Aharonian F. Galactic halo origin of the neutrinos detected by IceCube. *Phys Rev D*, 2014, 89: 103003
- 42 Liu R Y, Wang X Y. Diffuse PeV Neutrinos from gamma-ray bursts. *Astronophys J*, 2013, 766: 73
- 43 Murase K, Ioka K. TeV-PeV neutrinos from low-power gamma-ray burst jets inside stars. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 121102
- 44 Murase M, Inoue Y, Dermer C D. Diffuse neutrino intensity from the inner jets of active galactic nuclei: Impacts of external photon fields and the blazar sequence. *Phys Rev D*, 2014, 90: 023007
- 45 Stecker F W. PeV neutrinos observed by IceCube from cores of active galactic nuclei. *Phys Rev D*, 2013, 88: 047301
- 46 He H N, Wang T, Fan Y Z, et al. Diffuse PeV neutrino emission from ultraluminous infrared galaxies. *Phys Rev D*, 2013, 87: 063011
- 47 Liu R Y, Wang X Y, Inoue S, et al. Diffuse PeV neutrinos from EeV cosmic ray sources: Semirelativistic hypernova remnants in star-forming galaxies. *Phys Rev D*, 2014, 89: 083004
- 48 Tamborra I, Ando S, Murase K. Star-forming galaxies as the origin of diffuse high-energy backgrounds: gamma-ray and neutrino connections, and implications for starburst history. *J Cosmology Astropart Phys*, 2014, 9: 043
- 49 Laha R, Beacom J F, Dasgupta B, et al. Demystifying the PeV cascades in IceCube: Less (energy) is more (events). *Phys Rev D*, 2013, 88: 043009
- 50 Roulet E, Sigl G, van Vliet A A, et al. PeV neutrinos from the propagation of ultra-high energy cosmic rays. *J Cosmology Astropart Phys*, 2013, 1: 028
- 51 Wang B, Zhao X, Li Z. Implications of Fermi-LAT observations on the origin of IceCube neutrinos. *J Cosmol Astropart Phys*, 2014, 11: 028
- 52 Wang B, Li Z. Can FSRQs produce the IceCube detected diffuse neutrino emission? *arXiv*:1505.04418
- 53 Waxman E. IceCube's neutrinos: The beginning of extra-Galactic neutrino astrophysics? *arXiv*: 1312.0558

- 54 Waxman E. Cosmological origin for cosmic rays above 10^{19} eV. *Astronphys J*, 1995, 452: L1
- 55 Gorham P W, Saltzberg D, Field R C, et al. Accelerator measurements of the Askaryan effect in rock salt: A roadmap toward teraton underground neutrino detectors. *Phys Rev D*, 2005, 72: 023002
- 56 Barwick S W. ARIANNA: A new concept for UHE neutrino detection. *J Phys Conf Ser*, 2007, 60: 276–283
- 57 Xing Z Z. Neutrino telescopes as a probe of broken $\nu - \tau$ symmetry. *Phys Rev D*, 2006, 74: 013009
- 58 Winter W. How astrophysical neutrino sources could be used for early measurements of neutrino mass hierarchy and leptonic CP phase. *Phys Rev D*, 2006, 74: 033015
- 59 Waxman E. Extra galactic sources of high energy neutrinos. *Phys Scripta*, 2005, 121: 147–152
- 60 Bahcall J N. Neutrino astrophysics. *Am J Phys*, 1990, 58: 9
- 61 Jacob U, Piran T. Neutrinos from gamma-ray bursts as a tool to explore quantum-gravity-induced Lorentz violation. *Nat Phys*, 2007, 3: 87–90

Observational progress in high energy neutrino astronomy

WANG Bin¹ & LI Zhuo^{1,2*}

¹ *Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

² *Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China*

The production and propagation of cosmic rays in the universe are usually accompanied by high energy neutrino production. High energy neutrino astronomy is a unique window for high energy astrophysics. Recently, the south-pole neutrino experiment IceCube has reported the detections of 37 high energy ($> \text{TeV}$) events, which reject pure atmospheric origin in 5.7σ confidence level. This is the first detection of extraterrestrial high energy neutrinos, opening a brand new window to observe the universe, and marking the birth of the high energy neutrino astronomy. In this paper, we briefly introduce the history of high energy neutrino astronomy, the high energy neutrino experiments, the recent results from IceCube, and then we make general discussion on the origin of IceCube detected neutrinos, and finally some prospects in high energy neutrino astronomy.

neutrino, cosmic rays, IceCube

PACS: 95.85.Ry, 98.70.Sa, 95.55.Vj

doi: 10.1360/SSPMA2015-00293