穿越星际的信使

贺昊宁^{1,2*}, 吴雪峰^{1*}

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

2. Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan

* 联系人, E-mail: haoning.he@riken.jp; xfwu@pmo.ac.cn

宇宙射线为来自太空的高能带电粒子, 于 1912 年首次由 Hess 博士发现. 尽管已经被发现了超过 100 年, 宇宙射线的产生机制及来源至今仍未被确认, 这成为超过一个世纪以来高能天体物理领域的最大谜题之一. 研究宇宙射线起源的一个难点是, 宇宙射线在宇宙中传播时, 受到银河系内或银河系外磁场作用发生偏转, 因而从地球上观测到的宇宙射线方向已经偏离了最初源的方向. 幸运的是, 高能宇宙射线在其产生地或传播过程中与物质或光子发生重子反应, 能够产生高能中微子及次级光子. 在现代多信使天文时代, 科学家可以结合宇宙射线、高能光子及高能中微子等多个信使来研究宇宙射线起源. 然而, 高能光子容易在产生地或传播过程中与其他背景光子或物质发生反应, 使其传播距离受到限制. 中微子作为一种电中性的轻子, 很难在磁场中发生偏折, 也很难与物质发生反应, 能够从遥远的天体沿直线传播至地球. 因此, 中微子可以作为研究高能宇宙射线起源及揭示天体内部性质的一种非常重要的信使^[1].

1 IceCube 天文台对中微子的探测

中微子很难与物质发生反应这一特点在另一方面也增加了其探测难度. 因此, 冰立方(IceCube)中微子天文台^[2]建设在南极的冰层内, 以期利用冰层内大量的水分子作为探测中微子的介质. 探测器所占体积约为 1 km^3 , 位于冰下 1450~2450 m. 目前 IceCube 在冰层下有 5160 个数字化光学模块, 分布在垂直于冰面的 86 条弦(string)上. 当高能中微子(包括电子中微子 ν_e , 缪子中微子 ν_μ 和陶子中微子 ν_τ 味中微子)在冰中传播时, 有一定概率与冰中的水分子发生反应, 产生对应的次级粒子. 次级粒子在冰中传播时产生切伦科夫辐射(Cherenkov radiation), 从而被 IceCube 的数字化光学模块探测到. 这些在冰层空间中 3D 立体分布的光学模块能够探测到不同的切伦科夫辐射的拓扑形态, 包括级联型(cascades)、径迹型(tracks)和复合型(composites). 通过探测信号的拓扑形态及能量信息可以重建中微子的方向和能量. 由于级联型的光子信号是从中心向四周传播的, 很难重建得到准确的中微子入射方向. 而径迹型信号是一条细长的光子轨迹, 多为高能缪子中微子

贺昊宁 中国科学院紫金山天文台副研究员. 南京大学毕业, 获学士及博士学位. 2014~2016 年于美国加州大学洛杉矶分校做博士后研究. 2016 年至今于日本理化学研究所从事博士后研究. 研究兴趣为采用多信使手段研究高能中微子、高能光子及极高能宇宙射线的起源.

吴雪峰 中国科学院紫金山天文台研究员, 中国科学技术大学教授、博导, 中国天文学会空间天文和高能天体物理专业委员会主任. 南京大学毕业, 获学士及博士学位. 2006~2011 年赴美做访问学者和博士后研究, 2011 年回国工作, 入选中国科学院青年创新促进会会员和“百人计划”. 主持国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金和杰出青年科学基金、中国科学院前沿科学重点研究项目等.

与冰发生反应产生. 由这类细长的光子轨迹分布重建得到的中微子入射方向具有较小的角度误差. 能量约 30 TeV ($1 \text{ TeV}=10^{12} \text{ eV}$, $1 \text{ eV}\approx 1.6\times 10^{-19} \text{ J}$)的缪子中微子的角度不确定性中值(median)为 0.5° , 能量约 1 PeV ($1 \text{ PeV}=10^{15} \text{ eV}$)的缪子中微子的角度不确定性中值为 0.3° ^[3,4].

2008 年 4 月, IceCube 天文台的 40 条弦建设完成开始采集数据. 2011 年 5 月, IceCube 天文台所有 86 条弦建设完成. IceCube 于 2013 年发现了弥散的天体物理起源的中微子辐射^[5,6], 其能谱可延展至几 PeV^[7,8]. 然而, IceCube 小组对中微子数据的分析并未发现任何单个的高能中微子源^[3,9]. 这说明观测到的弥散中微子辐射可能主要由大量的银河系外天体贡献, 少量的单个亮源只能贡献观测总流量的一小部分.

2 中微子 IceCube-170922A 与耀变体 TXS 0506+056 成协

2017年9月22日, IceCube 天文台通过极高能在线事件过滤器(extremely high energy online event filter)筛选到一个高能中微子候选事件 IceCube-170922A^[10], 并通过天体物理多信使网络天文台(Astrophysical Multi-messenger Observatory Network, AMON)发布了公共警报^[11]. 这类警报被称为极高能(extremely high energy, EHE)警报, 发布率为每年4个, 主要为高能径迹型事件, 通常具有较小的角度误差, 其为大气背景的可能性低至约50%.

全球约20架望远镜对这一方向进行了后续观测. Swift 卫星很快识别出一个已知的伽马射线耀变体 TXS 0506+056(位置为赤经 77.36°, 赤纬+5.69°^[12])作为这一中微子事件的候选源. 耀变体是一类强大的活动星系核(active galactic nuclei, AGN), 中心有一个大质量黑洞, 具有相对论喷流且喷流指向我们视线, 其电磁辐射一般变化很大, 变化时标从几分钟到几年.

紧接着, 费米伽马射线空间望远镜(Fermi Gamma-ray Space Telescope)上的大面积望远镜(Large Area Telescope, 即 Fermi LAT)小组发现这一耀变体的伽马射线辐射从2017年4月起活动性增强, 与 IceCube-170922A 事件在时间上成协. MAGIC 望远镜(Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope)从2017年9月28日开始的后续观测探测到了能量延伸至400 GeV(1 GeV=10⁹ eV)的高能光子. 伽马射线及其他多波段的观测表明, 这一事件与伽马射线耀发在时间与空间上成协, 显著度约为3 σ ^[13]. 这是 IceCube 首次探测到显著度如此高的成协.

3 从历史数据中寻找中微子超

基于这一结果, IceCube 小组开始考虑耀变体 TXS 0506+056 产生了更多中微子的可能性^[14]. TXS 0506+056 位于北天, 每年约有来自北天的7万中微子产生的缪子径迹被记录. 然而, 其中少于1%的事件是天体物理起源的, 其他绝大部分为宇宙射线与大气反应产生的1 TeV 能量左右的大气中微子. 因此, 大气中微子在1 TeV 能量左右的流量远高于天体物理起源的中微子. 大气中微子的能谱指数约为-3.7^[8], 则大气中微子在高能能段(>100 TeV)流量降低很多. 而如果天体物理起源的中微子能谱指数为-2左右, 则其和高能能段的贡献可能超过大气中微子. 因此, 有可能在高能能段(>100 TeV)将天体物理起源的中微子与大气背景中微子区分开来.

IceCube 小组用时间积分(time-integrated)^[15]与时间依赖(time-dependent)^[16]两种方法分析了 IceCube 从2008年4月5日~2017年10月31日共9年半的数据. 时间积分分析方法并不考虑观测事件的时间信息, 而时间依赖分析方

法则假设来自点源的中微子遵循某一时间分布.

时间积分分析采用9年半的样本, 得到 TXS 0506+056 方向处存在一个点源的显著度是4.1 σ . 但是, 因为样本中包含了已知与 TXS 0506+056 成协的 IceCube-170922A 事件, 所以这是一个后验显著度估计. 如果除去包含 IceCube-170922A 的2015~2017年两年半的 IC86c 数据段, 只分析前7年的数据, 得到的显著度为2.1 σ . 这是因为, 7年数据中包含了大量的背景, 所以在时间积分分析方法中很难得到明显的超出.

时间依赖分析在2014年9月~2015年3月之间长约5个月的时间窗口中发现了一个明显的超出. 这一超出包含13 $\pm$ 5例事件, 高于预期的约5.8个大气背景缪子中微子数. 这一超出的显著度为3.5 σ , 其显著度依赖于样本中各个事件的能量大小、事件距 TXS 0506+056 的角距离以及它们在时间上的成团性. 具体来说, 因为大气中微子能谱指数为-3.7, 在高能能段的大气中微子流量较低, 所以能量越高的事件是大气中微子的可能性越小, 对显著度的贡献越大; 距 TXS 0506+056 的角距离越小的事件对显著度的贡献越大; 时间成团性越明显的事件对显著度的贡献越大.

4 TXS 0506+056 的特征及相关讨论

作为 IceCube 目前观测到的第1个中微子源, 耀变体 TXS 0506+056 有什么特殊之处? 首先, TXS 0506+056 是在 Fermi LAT 的第3个活动星系核星表^[17]中(含1773个天体)最亮的50个天体之一, 并且是红移 $z=0.34$ 内光度最大的天体, 其光度比邻近的耀变体 Markarian 421, Markarian 501 以及 1ES 1959+650 还要高1个数量级. 另外, TXS 0506+056 的赤纬为+5.69314°, 位于北天, 接近 IceCube 所在地的地平面方向, 而 IceCube 对来自接近地平面方向的中微子灵敏度最强. 所以, 很自然地, TXS 0506+056 产生的中微子更容易被 IceCube 探测到.

结合中微子和伽马光子辐射, 可以对中微子的起源获得更多了解.

TXS 0506+056 的红移为 $z=0.3365\pm0.0010$ ^[18], 中微子超的平均光度(32 TeV~3.6 PeV)为 $1.2^{+0.6}_{-0.4}\times10^{40}$ J s⁻¹. 这一光度高于同一时间段的伽马射线(0.1~100 GeV)光度, 后者约为 2.8×10^{39} J s⁻¹^[13]. 在高能宇宙射线与种子光子或物质发生的重子反应过程中, 反应产生的中性 π 介子衰变产生伽马光子, 反应产生的带电 π 介子衰变产生中微子和其他轻子. 对于一个平谱高能宇宙射线, 理论预期的单一能级的伽马光子光度与中微子光度之比约为4/(3K), 其中K为带电 π 介子数目与中性 π 介子数目之比. 对于 $p\gamma$ 反应, $K\approx1$; 对于 pp 反应, $K\approx2$ ^[19]. 因此, 理论计算得到的0.1~100 GeV能段的伽马光子光度约为32 TeV~3.6 PeV能段的中微子光度的1倍($p\gamma$ 反应)或2倍(pp 反应). 而这里观测到的伽马光子光度约为中微子光度的23%, 可能说明参与重子反应

的高能宇宙射线能谱较硬,然而这一点与 IceCube 拟合得到的中微子能谱指数有所矛盾.另外的可能解释为反应产生的大部分伽马光子在产生或传播过程中被吸收了,或传播到地球的大部分伽马光子的能量落在 Fermi LAT 探测器的探测能段之外.

尽管有以上几种可能性可以解释中微子光度与伽马光子光度的矛盾,但仍然存在疑问的是,中微子事件 IceCube-170922A 发生在 TXS 0506+056 的活跃期,而 2014 年 9 月~2015 年 3 月之间的中微子超对应了 TXS 0506+056 的平静期,很难用同一种模型解释这两种不同的情况.而 TXS 0506+056 附近的耀变体 PKS 0502+049 是一个平谱射电星系,其中微子超对应的时间段内处于活跃态,也有可能是中微子超的起源.这一疑问在 IceCube 的文章中并未被指出.

另一方面, TXS 0506+056 这一源只贡献了天体物理起源的弥散中微子流量的 1%.除 TXS 0506+056 这一源外, IceCube 曾对多年的观测数据进行了点源与延展源的搜索,然而并未识别出任何显著的点源或延展源^[3,20].可认为目前观测到的大部分天体物理起源的弥散中微子是由大量的中微子源共同贡献的.因为这些源作为个体对中微子的贡献较小,所以目前仍很难被 IceCube 单独识别出来.

Fermi LAT 小组将第 2 个 LAT 硬源表(the second catalog of hard Fermi-LAT sources, 2FHL)中 253 个赤纬绝对值大于 10° 的源(多数为耀变体)按流量分布进行外推,得到所有耀变体(含可探测到及不可探测到的源)对能量高于 50 GeV 的河外伽马光子背景(extragalactic γ -ray background, EGB)贡献为 $86^{+16}_{-14}\%$,其中光子流量超过 $1.3 \times 10^{-12} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的源对 EGB 的贡献约为 61%,光子流量低于 $1.3 \times 10^{-12} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的源对 EGB 的贡献约为 25%^[21].而 IceCube 曾发表了关于寻找来自耀变体的中微子的工作,提出 Fermi-LAT 第 2 个

活动星系核表(the 2nd Fermi-LAT AGN catalog, 2LAC)中的 862 个耀变体对目前观测到的天体物理起源的中微子流量贡献为 27%或更少(假设了耀变体的中微子能谱为单一幂律谱,能谱指数为 -2.5)^[22].这说明可能很大一部分中微子源很难在伽马射线波段被探测到.这可能是因为这些源距离遥远,伽马射线在传播至地球的过程中与宇宙背景光子发生反应而无法被观测到;又或者是这些源本身对伽马射线是光学厚的,使得伽马光子很难从源中逃逸出来^[23].

5 总结及展望

IceCube 小组的这篇文章中分析得到的 2014~2015 年周期为 5 个月的中微子超出的显著度为 3.5σ ,这一显著度并不依赖于其与 TXS 0506+056 的关系,只依赖于中微子事件的自相关.这一超出,结合 IceCube-170922A 与 TXS 0506+056 高能伽马射线耀发的成协性(显著度为 3σ),共同支持“TXS 0506+056 为中微子及宇宙射线的天体源”这一说法.

受益于现在的多信使的联合探测及全球范围内望远镜的快速响应, IceCube 首次发现了显著的中微子与耀变体伽马射线耀发的成协,从而进一步从海量的历史数据中找到了可能的中微子超出.计划中的 IceCube-Gen2 将把目前 IceCube 的探测器体积增大到 10 倍,能够探测到更多及更微弱的中微子源.相信在不远的将来,我们能够听到更多好消息.

未来更多中微子源的发现结合多信使的观测,不仅能够帮助科学家研究宇宙射线起源及宇宙射线在源中的加速机制、源的物理环境等,还能帮助科学家研究新物理,例如测量中微子振荡混合角、确定中微子质量顺序及 CP 破坏相角^[24]、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^[25,26]等.

致谢 感谢国家自然科学基金杰出青年科学基金(11725314)和日本理化学研究所特别博士后研究员项目资助.

推荐阅读文献

- 1 Reines F. Neutrino interactions. *Annu Rev Nucl Sci*, 1960, 10: 1–26
- 2 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and online systems. *J Instrum*, 2017, 12: P03012
- 3 Aartsen M G, Abraham K, Ackermann M, et al. All-sky search for time-integrated neutrino emission from astrophysical sources with 7 yr of IceCube data. *Astrophys J*, 2017, 835: 151
- 4 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Observation of the cosmic-ray shadow of the Moon with IceCube. *Phys Rev D*, 2014, 89: 102004
- 5 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science*, 2013, 342: 1242856
- 6 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
- 7 Aartsen M G, Abraham K, Ackermann M, et al. A combined maximum-likelihood analysis of the high-energy astrophysical neutrino flux measured with IceCube. *Astrophys J*, 2015, 809: 98
- 8 Aartsen M G, Abraham K, Ackermann M, et al. Observation and characterization of a cosmic muon neutrino flux from the northern

- hemisphere using six years of IceCube data. *Astrophys J*, 2016, 833: 3
- 9 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Searches for time-dependent neutrino sources with Icecube data from 2008 to 2012. *Astrophys J*, 2015, 807: 46
- 10 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. The IceCube realtime alert system. *Astropart Phys*, 2017, 92: 30–41
- 11 Kopper C, Blaufuss E. IceCube-170922A—IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. GRB Coordinates Network, Circular Service, 2017
- 12 Massaro E, Maselli A, Leto C, et al. The 5th edition of the *Roma-BZCAT*. A short presentation. *Astrophys Space Sci*, 2015, 357: 75
- 13 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science*, 2018, 361: 6398
- 14 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science*, 2018, 361: 147–151
- 15 Braun J, Dumm J, De Palma F, et al. Methods for point source analysis in high energy neutrino telescopes. *Astropart Phys*, 2008, 29: 299–305
- 16 Braun J, Baker M, Dumm J, et al. Time-dependent point source search methods in high energy neutrino astronomy. *Astropart Phys*, 2010, 33: 175–181
- 17 Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. The third catalog of active Galactic nuclei detected by the Fermi Large Area Telescope. *Astrophys J*, 2015, 810: 14
- 18 Paiano S, Falomo R, Treves A, et al. The redshift of the BL Lac object TXS 0506+056. *Astrophys J*, 2018, 854: L32
- 19 Murase K, Guetta D, Ahlers M. Hidden cosmic-ray accelerators as an origin of TeV-PeV cosmic neutrinos. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 071101
- 20 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Searches for extended and point-like neutrino sources with four years of IceCube data. *Astrophys J*, 2014, 796: 109
- 21 Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. Resolving the extragalactic γ -ray background above 50 GeV with the Fermi Large Area Telescope. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 151105
- 22 Aartsen M G, Abraham K, Ackermann M, et al. The contribution of Fermi-2LAC blazars to diffuse TeV-PeV neutrino flux. *Astrophys J*, 2017, 835: 45
- 23 He H N, Kusenko A, Nagataki S, et al. Neutrinos from choked jets accompanied by Type-II supernovae. *Astrophys J*, 2018, 856: 119
- 24 Li Z. High energy neutrino astronomy (in Chinese). *Mod Phys*, 2016, 27: 38–42 [黎卓. 高能中微子天文. 现代物理知识, 2016, 27: 38–42]
- 25 Wei J J, Wu X F, Gao H, et al. Limits on the neutrino velocity, Lorentz invariance, and the weak equivalence principle with TeV neutrinos from gamma-ray bursts. *J Cosmol Astropart Phys*, 2016, 2016: 031
- 26 Wei J J, Zhang B B, Shao L, et al. Multimessenger tests of Einstein's weak equivalence principle and Lorentz invariance with a high-energy neutrino from a flaring blazar. *J High Energy Astrophys*, 2019, 22: 1–4

Summary for “穿越星际的信使”

The messenger traveling across the universe

Haoning He^{1,2*} & Xuefeng Wu^{1*}

¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;

² Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan

* Corresponding authors, E-mail: haoning.he@riken.jp; xfwu@pmo.ac.cn

The era of multi-messenger astronomy has officially begun since the discovery of gravitational waves and electromagnetic radiation originated from the same source in 2017. Electromagnetic radiation, cosmic rays, neutrinos, and gravitational waves are the four basic messengers that are used to learn about our universe out of the Solar system. Unlike the other three messengers, high energy neutrinos, carrying no charges and reluctant to interact with most matter, are the messenger that is able to propagate from a distant source in a straight line. This allows them to be detected on the earth without a horizon, and enables us to trace back their astrophysical origin. As a result, neutrinos are essential to searching for the sources of the high energy cosmic rays and revealing properties of astrophysical objects.

While the properties of neutrinos make them ideal probes of the distant universe, the same properties also make them difficult to be detected. Astrophysicists have to reply on a billion tons of ice at the South Pole, called the IceCube neutrino observatory, to detect them. After years of efforts of collecting and analyzing data, a number of high-energy neutrino events have been detected. However, their astrophysical origin remains unknown. This situation has only been changed recently. A high energy neutrino event detected by IceCube on September 22nd, 2017, IceCube-170922A, was confirmed to be associated, both spatially and temporally, with a gamma-ray flare of the blazar TXS 0506+056 at a significance level of 3σ . This is the first time that IceCube observed an association with such a high significance.

Prompted by this association, the IceCube collaboration analyzed 9.5-year historical data at the direction of TXS 0506+056, to search for possible neutrino excess. Through time-dependent analysis, an excess of neutrinos (3.5σ significance) in the time window between September 2014 and March 2015 was revealed, with 13 ± 5 neutrinos detected while only 5.8 atmospheric background neutrinos are expected. This discovery of the neutrino excess, together with the association between the high energy neutrino and the gamma-ray flare from the same blazar, strongly supports that the blazar TXS 0506+056 might be the source of high energy neutrinos and cosmic rays. TXS 0506+056 is among the brightest blazars ever discovered, with a declination of $+5.69^\circ$. Since IceCube is most sensitive to high energy neutrinos from sources close to the equatorial plane, it is not surprising that TXS 0506+056 is the first blazar associated with a neutrino excess found by IceCube.

Combining information from both neutrino and gamma ray emission, we could obtain important insights into the physical mechanisms that produce such high-energy particles. First, the corresponding flux of the neutrino excess is a few times larger than the gamma ray flux, suggesting that the gamma rays either are absorbed or fall outside of the Fermi LAT energy band. Second, TXS 0506+056 contributes only 1% of the diffuse astrophysical neutrino flux, implying that most of the neutrino sources may be not bright enough to be resolved by current IceCube. On the other hand, all the blazars resolved by the Fermi LAT contribute a small fraction of the diffuse neutrino flux, albeit a large fraction of the diffuse gamma-ray flux. This indicates the existence of a population of neutrino sources that are either distant or faint in the gamma-ray band.

We are now in a golden age of the multi-messenger astronomy era. As the establishment of the Astrophysical Multi-messenger Observatory Network, the advancement of IceCube and other facilities, an increasing number of neutrinos and identifiable neutrino sources will be discovered in the near future. Studies on these events and sources will help us not only identify the astrophysical origin of neutrinos and cosmic-rays, but also understand physical conditions in distant astronomical objects and possibly, unveil new physics.

cosmic ray, gamma ray, neutrino, blazar

doi: 10.1360/N972019-00176