

# 高能中微子与宇宙线的 多信使研究

王祥玉 薛 瑞

(南京大学天文与空间科学学院 210023)

宇宙线是来自地球之外的高能带电粒子,约99%为原子核,1%为电子。此外,在传播过程中,宇宙线通过与星际介质作用,产生少量次级核子及反质子、正电子等次级宇宙线粒子。宇宙线的发现始于1912年,迄今为止观测到的宇宙线粒子的最高能量已达到 $3 \times 10^{20}$ 电子伏特,是最大的粒子加速器LHC (large hadron collider)所能加速粒子能量的千万倍。但宇宙线的起源至今仍是未知之谜<sup>①</sup>。近些年研究表明,高能宇宙线应来自于宇宙中的天体,因而宇宙线研究属天体物理和粒子物理的交叉学科<sup>②</sup>。

宇宙线由于是带电荷的粒子,它们在从源传播到地球的途中会受到宇宙空间磁场的偏转,导致我们不能通过宇宙线的方向直接追溯其起源天体。但宇宙线在源内部会伴随产生高能伽马射线和中微子,而伽马射线和中微子是沿直线传播,从而能帮助确定宇宙线的起源天体。利用伽马射线和中微子等手段来研究宇宙线的起源被称为“多信使”研究,是研究宇宙线起源的重要手段。本文主要对宇宙线的中微子信使进行介绍。

## 一、中微子简介

1930年泡利为解释 $\beta$ 衰变能谱的连续性,从能量守恒定律的需要出发,假设在原子核衰变时有一种电中性的微小粒子与电子同时发出,并带走一部分能量。1933年费米首次把这种中性粒子命名为中微子,提出原子核中子衰变成质子的同时放出一个电子和一个中微子的 $\beta$ 衰变理论。后来科学家在

反应堆旁观测到了(电子)反中微子,证明了中微子的存在。1960年戴维斯首次测量太阳中微子。1987年以小柴昌俊为首的小组在日本神冈的实验观测到了来自超新星1987A的中微子暴。2002年戴维斯和小柴昌俊因在中微子天文方面的开创性成就获得诺贝尔物理学奖。

中微子是构成物质世界的最小单元之一。已知构成物质的最小单元包括12种基本粒子:6种夸克和6种轻子,每一种都有自己的反粒子。6种轻子可分成三代,分别是电子、电子中微子( $e, \nu_e$ ), $\mu$ 子、 $\mu$ 中微子( $\mu, \nu_\mu$ ), $\tau$ 子和 $\tau$ 中微子( $\tau, \nu_\tau$ ),加上它们各自的反粒子。粒子物理中把三种中微子称作中微子的三种味道(flavor)。

## 二、高能中微子与IceCube中微子天文台

上述提到的太阳中微子和超新星1987A中微子来自星体内部的热核反应过程,中微子的能量在MeV量级。宇宙线在源内部或在传播路径中通过与光子或周围物质的碰撞反应产生中微子,中微子的能量约占宇宙线能量的5%左右。由于宇宙线的能量很高,产生的中微子的能量也就很高,因此称为高能中微子。理论上,高能中微子产生机制有两种机制。第一种是宇宙线与光子反应(也称 $p\gamma$ 反应),产生不稳定的带电荷的 $\pi^+$ 介子, $\pi^+$ 介子会衰变为 $\mu^+$ 子及相应的中微子,而 $\mu^+$ 子会进一步衰变为正电子及相应的中微子。此反应过程可以表达为:

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} n + \pi^+ \\ p + \pi^0 \end{cases}, \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

第二种过程是宇宙线与物质粒子(质子或中子)反应(也称 $pp$ 反应),产生带电荷的 $\pi^\pm$ 介子, $\pi^\pm$ 再衰变产生中微子。此反应可以表达为:

$$p + p/n \rightarrow \pi^\pm + \text{其他粒子}.$$

值得注意的是,这两种过程都会同时产生中性 $\pi^0$ 介子,而 $\pi^0$ 介子会衰变产生高能伽马光子: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ 。高能中微子最有利于探测的能量段在 $\text{TeV} \sim \text{PeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ,  $1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$ ),这是由于1)大气中微子背景流量随能量降低迅速升高,所以 $\text{TeV}$ 以下的中微子很难与大气中微子背景区分;2) $\text{PeV}$ 能量以上的中微子的事件数变得很小,也不利于探测。

位于南极的IceCube(冰立方)中微子天文台在2013年首次探测到了来自地球之外的高能中微子,开创了高能中微子天文的新时代<sup>③</sup>。这个发现被欧洲物理学会的新闻网站*Physics World*评选为2013年突破性进展之首。IceCube是第一个重量为1G吨级别的中微子探测器,它把5000多个光电倍增管安装在共86根弦上,而这些弦分布在一立方公里的冰层内(如图1所示)。

当一个中微子到达探测器时,它有可能与冰里的原子核作用并产生带电粒子,光电倍增管通过测量带电粒子的切伦科夫辐射从而间接地测得中微子的信息。中微子事件共分为两种,一种叫做“ $\mu$ 子径迹”(muon track),另一种叫做“簇射”(shower)。“ $\mu$

子径迹”是由(反) $\mu$ 子中微子的带电流反应(charged current interaction)造成,生成的 $\mu$ 子由于质量较大,与原子核或电子的韧致辐射效率比较低,因而有较强的穿透能力,在冰中穿行较大的距离并伴随有切伦科夫光子的辐射。这样它的整个运动轨迹会被光电倍增管清楚的记录下来(如图2左边所示),这个入射中微子的到达方向就可以比较精确的还原出来,方向误差可以小于1度。簇射事件则是由(反)电子中微子或(反) $\tau$ 子中微子的带电流反应以及任意种类中微子的中性流反应(neutral current interaction)造成。因为生成的电子质量小,通过韧致辐射损失能量的速度快,因此穿透深度较小。而且通过韧致辐射发射的高能光子也会引起电磁级联过程,形成一块团状的结构(如图2中间所示)。簇射事件虽然对于中微子到达方向的测量并不准确,却比较容易测定中微子的能量,因为大部分的中微子的能量都沉积在了探测器内。(反) $\tau$ 子中微子的探测原理如图2的右边所示,由于反应生成的 $\tau$ 子的寿命非常短,会很快的衰变成次级带电粒子,并引发级联过程,具有所谓的“double-bang”的结构。

为了过滤掉巨大的大气 $\mu$ 子背景,IceCube搜寻那些在探测器内部开始发生反应的高能事件(High Energy Starting Events),或者搜寻从北半球方向来的高能事件(以地球自身来过滤大气 $\mu$ 子)。IceCube至今已探测到一百多个能量在 $100 \text{ TeV} \sim 10 \text{ PeV}$ 的高能中微子。中微子的能谱如图3所示,可以看出,在能量大于 $100 \text{ TeV}$ 之上,探测到的高能中微子流量显著高于大气中微子背景的流量,因而这些高能中微子来自地球之外。另外,在考虑仪器对不同味道中微子的接受程度后,从观测到的中微子数目推算到达地球的不同味道中微子的数目比例与 $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 1 : 1$ 相一致,这也跟天体起源的中微子的预期相符合。

由于这些中微子的到达方向呈现近似各向同性的分布(如图4),没有发现在银盘方向有显著超出,因此通常认为绝大部分的高能中微子应来自银河系之外的天体。但具体是什么天体人们仍不清

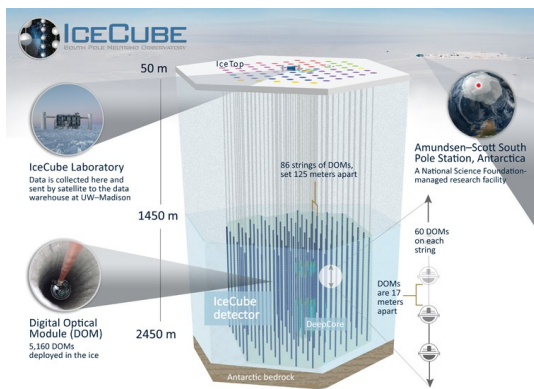


图1 中微子天文台IceCube示意图(取自IceCube官方网站)

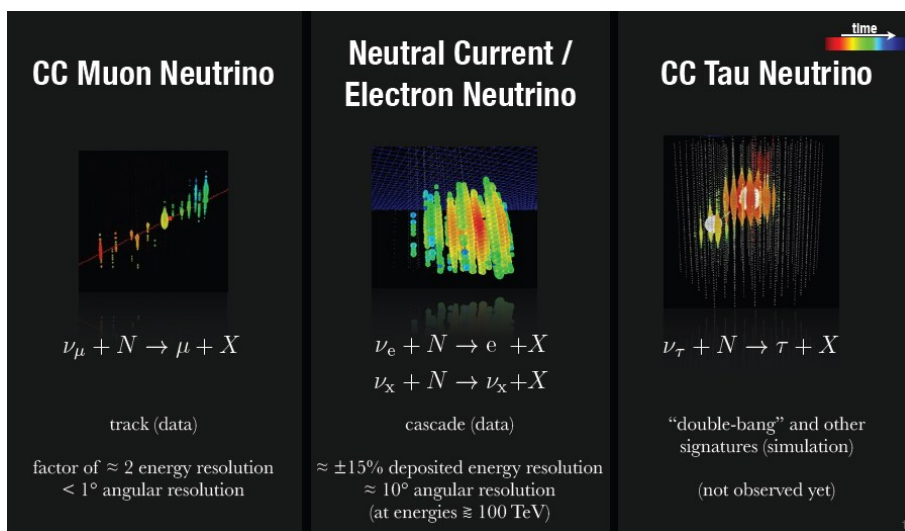


图2 IceCube探测不同中微子的原理

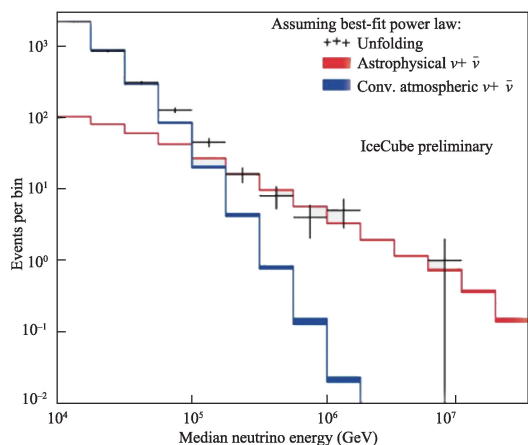


图3 IceCube探测到的来自北半球方向的 $\mu$ 中微子的能谱分布。黑色十字代表IceCube的实验数据,蓝色代表大气中微子背景,红色代表从最佳拟合得到的来自天体的中微子。图片取自文献④

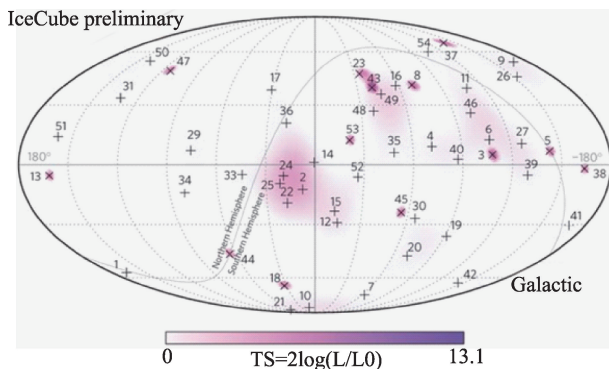


图4 IceCube前4年探测到的高能中微子的方向分布。“+”符号表示“簇射”中微子事件,“x”符号表示“ $\mu$ 子轨迹”中微子事件。颜色表示对到达方向各向异性分析得到的TS值。图片取自文献④

楚,可能的候选天体包括星暴星系、射电星系、耀变体、低光度伽马射线暴等河外天体。

IceCube也对于能量高于100 PeV的极高能中微子进行了搜寻,目前仍没有探测到。理论预言,这些极高能中微子由极高能宇宙线在星系际空间传播时与宇宙微波背景光子(CMB)作用产生,也称“cosmogenic”中微子。未来如能探测到它们,将对极高能宇宙线的研究具有重要价值。

### 三、高能中微子起源天体的搜寻

自南极IceCube探测器发现高能中微子以来,中微子的研究在国际上掀起了一轮高潮,高能中微子起源的起源问题则是中微子天文学的研究重点之一。

伽马射线暴具有极高的爆发能量和极端相对论的运动,所以理论上被认为是产生高能宇宙线和中微子的候选天体。由于伽马射线暴的爆发时间较短,且有很好的方向定位,科学家很容易研究IceCube高能中微子与伽马射线暴的相关性。IceCube团组对数百个伽马射线暴进行了成协中微子的搜寻,没有发现置信度高的成协事例。这就要求伽马射线暴所贡献的中微子流量应小于探测到的高能中微子的百分之一<sup>⑤</sup>。由于这些探测到的伽马暴基本都是正常光度的伽马射线暴,目前尚不能排除一类特殊的伽马暴(即低光度伽马暴)贡献较多中微子

的可能。

耀变体(Blazars)是相对论喷流指向地球的一类活动星系核,也被认为是高能宇宙线和中微子的候选天体。科学家对多个耀变体进行了成协中微子的搜寻,也没有发现置信度高的成协事例。同时,由于大部分伽马射线明亮的耀变体源都已经被认证,可以用叠加分析(stacking analysis)的方法对多个耀变体进行分析,但也没有发现置信度高的成协中微子事例。利用这些分析可以限制耀变体对IceCube中微子的贡献。IceCube团组的分析表明耀变体对高能中微子的贡献应小于7%~27%<sup>⑥</sup>。

另一方面,科学家在中微子到达方向的误差范围内寻找成协天体时,发现个别高能中微子有成协的耀变体。在2017年9月22日,IceCube探测到一个能量约为290TeV的高能中微子事件(后面称为IceCube-170922A)<sup>⑦</sup>。这是一个“ $\mu$ 子径迹”中微子,它的坐标误差小于1度。随后,Fermi卫星发现在IceCube-170922A的坐标误差范围内有一个耀变体(TXS 0506+056),此耀变体的伽马辐射正处于爆发态。图5展示了TXS 0506+056与IceCube-170922A的方位关系,可以看出耀变体和中微子的方向一致。除了Fermi卫星在伽马射线波段看到了强烈的爆发之外,X射线波段、光学波段以及甚高能伽马波段都表现出了不同程度的增亮。考虑到耀变体处于爆发态的概率,这次成协事件的置信度为 $3\sigma$ 。由于这种成协的偶然概率不能忽略,科学家尚不能确定是否是真实成协。在发现IceCube-170922A与TXS 0506+056的多波段爆发成协后,IceCube团组调研了在TXS 0506+056方向上9.5年的历史观测数据<sup>⑧</sup>。他们发现在2014年9月到2015年3月之间,还出现了一次能量相对较低(10 TeV左右)的中微子爆发,但奇怪的是TXS 0506+056的伽马射线在此期间并无增亮。这个2014~2015年期间中微子爆发事件在一定程度上增强了人们对TXS 0506+056与高能中微子成协的相信程度。*Science*杂志把发现TXS 0506+056与高能中微子可能成协的研究工作评为2018年度十大进展之一。

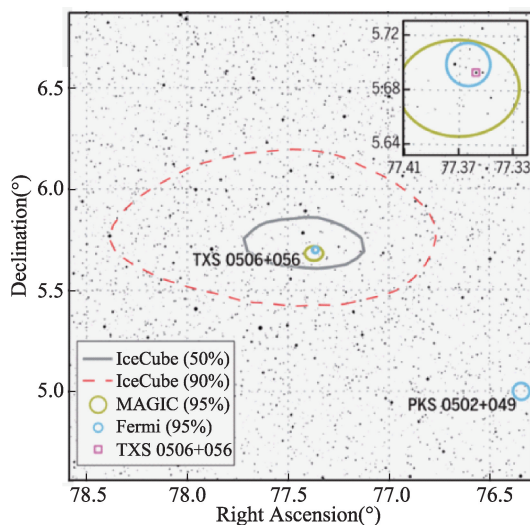


图5 IceCube 170922A与TXS 0506+056的方位图。红色虚线和灰色实线分别代表IceCube 170922A中微子的90%和50%误差的覆盖区域。粉色方块表示的是TXS 0506+056的光学观测位置。蓝色和黄色的圆分别表示Fermi和MAGIC在TXS 0506+056方位探测到的GeV和TeV伽马射线的位置。图片取自文献<sup>⑦</sup>

科学家同样对其他候选天体(星暴星系、射电星系等)也进行了成协中微子的搜寻,但都没有找到置信度高的事件。科学家也对中微子自身成团性(multiplet)进行分析,没有发现可靠的两个或多个中微子成团的事件。这就要求单个中微子源应比较弱、中微子源的密度比较大,从而对中微子源的密度给出了限制。由于星暴星系和射电星系的数密度比较大,从理论上预期单个星系产生的中微子流量就很小,所以没有发现成协事件并不奇怪。另一方面,耀变体是活动星系核中一个非常特殊的子类,它在宇宙中属于稀有天体,因此如果高能中微子由这样的稀有天体产生,那么预期会观测到中微子的成团性事件,而这与成团性分析的结果相违背。因此目前一般认为耀变体不应该是高能中微子的主导起源天体。高能中微子的主要贡献更可能来自密度更大,强度更弱的天体(如星暴星系、射电星系等)。

#### 四、展望

高能中微子的发现开创了中微子天文学的新时代,但由于高能中微子的事件数仍相对较少,目前仍不能确定高能中微子的起源天体。要确定高能中

微子是否来自一些弱源(如星暴星系)的贡献,需要更大的中微子探测器。未来更为大型的高能中微子探测设备已被提出,如第二代IceCube探测器、计划在地中海建设的KM3NeT(cubic kilometre neutrino telescope)等项目。当中微子事件数增加后,高能中微子的起源问题预计能得以真正解决。同时,科学家亦能真正利用中微子信使来研究源本身的性质。

高能中微子的产生一般伴随高能伽马光子的产生,因此高能中微子的研究跟伽马天文研究密切相关。伽马光子跟中微子一样,是宇宙线研究的重要信使。目前,费米(Fermi)卫星、H.E.S.S. (The High Energy Stereoscopic System)、VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)、MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes)、HAWC (High-Altitude Water Cherenkov Observatory) 等伽马探测设备在宇宙线研究方面不断取得新的进展。国际上正在建设下一代的大气切伦科夫望远镜CTA (Cherenkov Telescope Array),其探测能力将比目前的探测器提高一个量级以上。我国正在建设的大型高海拔空气簇射观测站LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) 将发挥高海拔的优势,拥有覆盖更宽广能谱、大有

效面积、大视场和全天候等优势。LHAASO等伽马探测设备对河内和河外TeV伽马射线源的观测将有助于研究其辐射机制是宇宙线强子模型还是轻子模型,从而判断这些源是否是宇宙线的起源天体。未来把伽马探测和中微子探测两种手段联合起来,对于解决宇宙线的起源问题必将发挥重要作用。

### 参考文献

- ① 胡红波、王祥玉、刘四明, 超高能宇宙线从何而来? 科学通报, 2018, 63
- ② 柳若愚, 王祥玉, 张冰. 河外极高能宇宙线的起源. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 119507
- ③ IceCube Collaboration, Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science*, 2013, 342:6161
- ④ Halzen, F., *Nature Physics* volume 13, pages 232-238 (2017)
- ⑤ IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 805, Issue 1, article id. L5, 7 pp. (2015).
- ⑥ IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Abraham, K., Ackermann, M., et al. 2017, *ApJ*, 835, 45
- ⑦ IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. 2018, *Science*, 361, eaat1378
- ⑧ IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. 2018, *Science*, 361, 147

