

宇宙深处:探索高能天文中微子之谜

——访冰立方中微子天文台徐东莲

本刊记者 傅雪,史永超

美国东部时间2018年7月12日11时,冰立方中微子天文望远镜团队宣布天文学领域的又一重大发现:架设在南极的望远镜实时预警系统于世界协调时间2017年9月22日20:54:30.43探测到一个能量约为290 TeV的高能缪子中微子(muon neutrino),并命名为IceCube-170922A。这是首个拥有银河系之外源头的超高能中微子事件。对此本刊专访了曾在冰立方中微子天文台工作的青年科学家徐东莲博士,目前是李政道青年学者和上海交通大学物理与天文学院特聘副教授,研究方向为高能天体中微子和中微子天文。

《科技导报》:请介绍一下冰立方这个项目的背景?

徐东莲:宇宙射线是高度电离的带电粒子,主要成分是质子,在1912年被维克托·赫斯(Victor Hess)发现。带电的宇宙射线在穿越星际空间时,运动方向会受到磁场作用发生偏转,被探测到时无法指回源头,科学家经过1个多世纪的研究,还没有弄清楚它的成因,尤其是所探测到最高能的宇宙射线的能量(10^{20} eV)比目前最大的人

造粒子加速器($10^{12}\sim 10^{13}$ eV)还要高7~8个数量级。因此宇宙射线起源问题是一个百年难题,被《Science》杂志列为125个21世纪前亟待解决的难题之一。

科学家普遍认为,高能宇宙射线来源于激烈变化的天体冲击波磁场的加速,PeV(10^{15} eV)能级以上的宇宙射线主要来源于银河系以外产能剧烈的天体环境,例如中心拥有超大质量黑洞的活动星系核。宇宙射线在活动星系核磁化的相对论性喷流中被加速到极高的能量,并与周围的光子或其他宇宙射线发生强子过程(hadronic process)反应(即超高能的宇宙射线原子核被打碎),产生伽马光子和高能中微子。同样的过程也会在宇宙射线撞击地球大气原子核的时候发生(图1)。因此,若能探测到高能的天体中微子,则能直接验证高能宇宙射线是被磁场加速而产生,这些剧烈的天

体源即是天然的“宇宙粒子对撞机”。然而,这些诸如活动星系核的天体离我们非常遥远,到达地球的高能中微子预期流量极低,加上中微子只与物质产生极度微弱的弱相互作用。要对微小的天体中微子流量有灵敏度,至少需要立方千米、10亿吨量级的探测器。坐落在南极地理极点上的冰立方中微子天文望远镜(IceCube Neutrino Observatory)正是符合条件的探测器,它于2010年建成,是目前世界上最大的中微子探测器。冰立方是由5000多个光敏元件组成的阵列,埋在深度为1450和2450 m的南极冰川中。通过观测中微子反

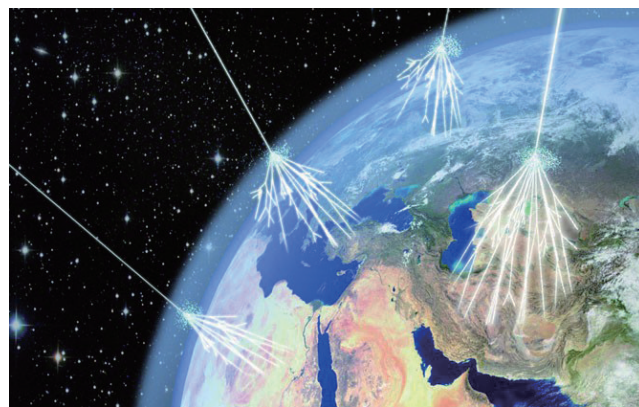


图1 宇宙射线与地球大气原子核碰撞示意
(图片来源:Asimmetrie/INFN)

收稿日期:2018-08-14;修回日期:2018-08-18

引用格式:傅雪,史永超.宇宙深处:探索高能天文中微子之谜——访冰立方中微子天文台徐东莲[J].科技导报,2018,36(18):105-108;doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2018.18.012

应产生的次级带电粒子在冰川中飞行所发射的契伦科夫辐射(Cherenkov radiation, 物体在介质中以超越光在该介质中的传播速度运动时所发出的一种电磁辐射), 来研究中微子。图2是冰立方冰面实验室, 内部主要存储数据读取的大型计算机阵列。下方蓝色晕染中的黑色圆点是探测器的基本元件DOM的想象图, 一共有5160个DOM埋在深冰里, 静待中微子与冰原子核反应后产生的切伦科夫辐射蓝光。

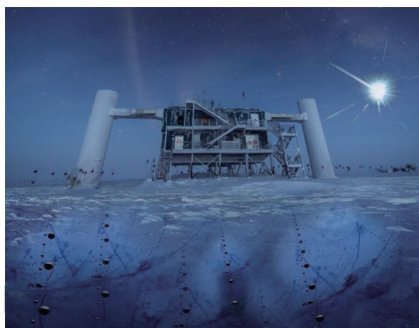


图2 冰立方冰面实验室

(图片来源: IceCube/NSF)

《科技导报》: 探测器为什么要埋在地下呢?

徐东莲: 因为宇宙射线撞击大气原子核产生了海量穿透力很强的缪子轻子, 是实验本底的主要来源。然而, 穿透力再强的带电缪子也无法穿越整个地球, 但绝大部分中微子可以轻松做到(1个TeV能级的中微子穿越地球过程中约发生1次反应)。所以, 冰立方是一个利用地球作“滤镜”而“俯视”北半球星空的中微子望远镜(图3)。

《科技导报》: 你们发现了什么?

徐东莲: 位于南极的冰立方中微子望远镜发现了高能天体中微子和蝎虎座BL型耀变体(BL Lac object) TXS0506+056 相关联的证据。这是除了太阳和1987年在

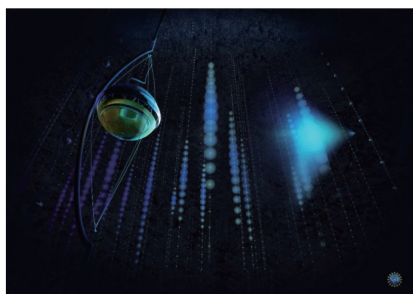


图3 1个缪子中微子与1个冰原子核发生反应产生的缪轻子, 在穿越冰层时发出蓝色的切伦科夫辐射
(图片来源: IceCube/NSF)

麦哲伦星云爆发的超新星SN1987A外, 人类探测到的第3个中微子天体源, 并且此次发现的中微子能量比之前两次发现的中微子能量高约1亿倍。耀变体(blazar)是活动星系核(AGN)的一种, 中心引擎是一个超大质量的黑洞, 在黑洞吸积的作用下形成相对论性喷流, 而喷流方向指向地球的活动星系核被称为耀变体。图4示意了耀变体喷流指向地球, 并发射伽马光子和高能中微子。中微子被南极的冰立方望远镜探测到, 而伽马辐射则被费米卫星伽马望远镜和地面的大气切伦科夫望远镜MAGIC探测到。

《科技导报》: 请介绍一下此次发现的过程。

徐东莲: 世界协调时间2017年9月22日20:54:30.43, 冰立方的实时预警系统探测到了一个能量约为290 TeV的缪子中微子事件, 并命名为IceCube-170922A(位于欧洲的大型强子对撞机LHC最高只能将质子加速到13 TeV)。

43 s内, 冰立方望远镜即将中微子的初估方向通过多信使天文望远镜网(Astrophysical Multi-messenger Observatory Network, AMON)向全世界的望远镜预警。HESS、VERITAS和MAGIC等非常

高能的(very-high-energy, VHE)大气契伦科夫影像伽马望远镜在收到预警后的数小时即对IceCube-170922A进行了跟进观测, 但是没有探测到VHE伽马光子。9月28日, 费米卫星伽马望远镜首先探测到该中微子方向上有增强的GeV能段伽马辐射, 并发现该辐射源是已知的耀变体TXS0506+056。受到费米发现的驱动, MAGIC在9月28日起又对该中微子方向跟进观测了累计13 h, 并最终探测到在80~400 GeV能级的高能伽马辐射。至此, IceCube-170922A与耀变体TXS0506+056相关联的证据已较为明显。但这个高能中微子与TXS0506+056耀变体是否有可能只是随机方向重叠而并没有直接物理关联, 综合考虑到目前已探测到的所有耀变体和冰立方已探测到的所有高能缪子中微子, 以及冰立方过去已发送过的所有高能中微子预警, 这个随机概率以 3σ (99.7%)的置信度被排除。

射电、光学、X射线等其他波段都探测到了信号, 并且与耀变体特征相符(图5)。尤其是, 耀变体TXS0506+056与地球的距离一开始并不知道, 直到2018年2月才通过10.4 m口径的GTC光学望远镜探测到一些微弱的金属发射线而确定红移为 $z=0.34$, 距离地球约40亿光年。尽管中微子有微小的质量, 只能以稍低于光速的速度飞行, 但是对于万亿电子伏特能级的中微子来说, 飞越40亿光年的中微子和光子到达地球的时间差可忽略不计。

在发现IceCube-170922A可能与耀变体TXS0506+056相关联时, 我们很自然地想到分析这个方向上的历史数据, 可能会有更多的中微子。果然, 在2014年12月前后共110天找到了19个几十TeV的中

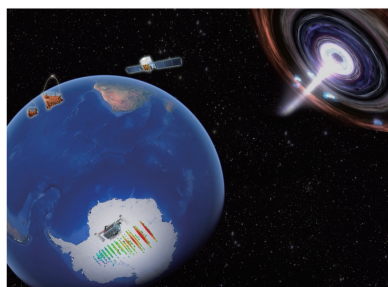


图4 耀变体喷流指向地球艺术图
(图片来源:IceCube Collaboration/
Google Earth: PGC/NASA U.S.
Geological Survey Data SIO,NOAA, U.
S. Navy, NGA, GEBCOLandsat/
Copernicus)

微子,但预期只有6个本底事件,显著性 3.5σ 。至此,多信使观测不仅看到了高能中微子与辐射增强耀变体的时间和空间关联性,且在同—个方向上不同的时间段独立发现了更多的高能中微子,因此可以确信,耀变体TXS0506+056确实能产生高能中微子。

《科技导报》:这个发现意味着什么?

徐东莲:高能宇宙射线的起源之谜百年未解,冰立方在2013年探测到的高能天体中微子源头也一直没找到。这个发现表明有一些耀变体确实能加速宇宙射线到几十PeV (10^{15} eV)到几十EeV (10^{18} eV)的能级,这些高能宇宙射线与耀变体源头的伽马光子反应产生了高能中微子,因此这也同时部分回答了冰立方所探测到的高能中微子的来源问题。

这也是人类首次探测到银河系外的超高能中微子源,并且实现了多信使的协作观测。验证了我们确实可以利用幽灵一般的中微子来研究遥远的宇宙,意味着高能中微子天文时代的到来。

《科技导报》:为什么说天体中微子让我们有了探索宇宙的“第六感”?

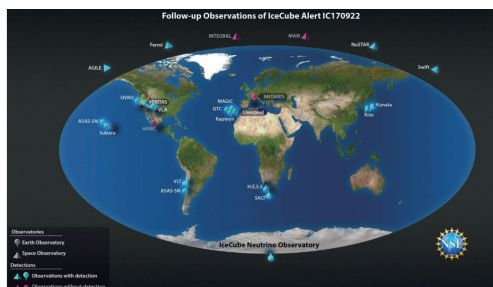


图5 对IceCube-170922A进行跟进观测的望远镜
(图片来源:Nicolle R. Fuller/NSF/IceCube)

徐东莲:不像高能伽马光子,天体中微子没有视界,可以穿越遥远的宇宙空间,带来发生在宇宙边缘的信息。另外,中微子甚至可以轻松穿透对高能伽马光子致密的天体环境,带来隐藏在这些高能致密的宇宙角落里的新信息,让科学家得以窥见这些“隐秘”的场所,或“暗源”。例如2014年12月在TXS0506+056方向上的中微子集聚事件,就没有伴随明显的伽马辐射增强,该现象现在还没有很好的模型可以解释。这种传统电磁望远镜“火眼金睛”也无能为力,鬼魅一般看不见摸不着的中微子却能提供全新的视角,就像人类开了“第六感”探索宇宙一样。

《科技导报》:为什么要在南极的冰中建中微子望远镜?北极的冰不可以吗?

徐东莲:最初的计划是要去北极,在北半球,交通费用也会低很多,但是初步考察发现北极的冰太“脏”,冰层里沉积了大量的尘埃,导致光子散射和吸收的程度太高,不适合建大型的中微子望远镜。而对南极的冰川冰研究表明,经过几万年的沉积和挤压,几百米以下的冰中已没有气泡,同时南极的冰

川冰对光子的散射和吸收长度平均达几十米和100米以上,是地球上最透明的介质之一,因此很适合建大型的中微子望远镜(图6)。

《科技导报》:您在这个项目中主要

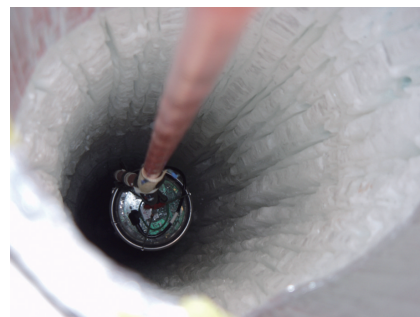


图6 冰立方探测器元件(DOM)被埋到南极冰川冰中
(图片来源:IceCube/NSF)

负责的工作是什么?

徐东莲:从2009年加入到2018年,我已经在冰立方合作组工作了9年,担任的角色和负责的工作也在不断变化。冰立方建设在2010年12月竣工,所以在2009到2010年,我主要负责探测器的几何位置刻度、并利用LED闪光刻度数据精确测量了南极冰川冰由于冰层温度差引起的相对切向位移。2011年春,得到了第一个物理课题——大气陶中微子的出现(atmospheric tau neutrino appearance),因为中微子振荡,绝大部分接近25 GeV的缪子中微子在穿越地球到达南极的冰立方探测器时已转变为陶中微子,而缪中微子到陶中微子的转变是一个较少被探索的通道,也是验证中微子震荡矩阵幺正性(unitarity)的重要通道。为了利用冰立方-深核(IceCube-DeepCore)探测器来探测这个信号,我负责了深核的级联(cascade)事件重建,10~200 GeV的中微子事件模拟和2012年度深核数据的质控。

冰立方在2012年首次探测到2

个 PeV 能段的级联事件,是科学家寻找多年的高能天体中微子出现的有力证据。而到达地球的天体陶中微子只能通过中微子在宇宙尺度基线上的振荡产生,因此探测到天体陶中微子既可以再验证冰立方探测到的高能中微子确实来源于地球之外,另一方面也可检验中微子在宇宙尺度上振荡是否符合已知规律,是否会出现标准模型无法解释的新现象。我因此转向并成功创建了甄选高能天体陶中微子的双脉冲波形算法,该算法至今还被冰立方合作组广泛应用于天体陶中微子的甄选。

2015 年秋,我到冰立方总部威斯康星-麦迪逊大学做博士后不久,即对快速射电暴 (fast radio bursts, FRB) 的起源问题很感兴趣,有些天体物理理论学家提出 FRB 可能跟磁星核塌超新星相关,有可能产生高能中微子。于是,我和几位合作者开发了一套模型无关的 (model-independent) 的统计方法来寻找高能中微子和 FRB 的关联,这套方法现在也被广泛应用于多信使信号的快速跟进观测;同时,我也在指导一位资深博士生继续改进天体陶中微子的甄选方法并分析新进的数据。

在一个国际合作组里,青年科学家是研究的中坚力量,除了富有洞见的项目领导人外,拥有一支朝气蓬勃,又充满竞争力的年轻科学家队伍是大科学项目成功的关键。2017 年初,我当选为冰立方青年科学家代表 (early career scientist representative),负责的工作又增添了新内容:列席冰立方董事

会,代表冰立方全球 180 多位青年科学家参与项目重要事务的决策,并提出有效方案来提升青年科学家团体和整个合作组的协作效率,提高技术性文章发表率等。

《科技导报》:你们完成这个实验最大的挑战是什么?迄今最让你满意的收获是什么?

徐东莲:最大的挑战是精确理解高能天体中微子反应的介质——南极冰川冰。因为冰川的形成经历了几万到几十万年的沉积,不同冰层间的杂质残留受当时全球气候的影响,火山多发的年代,冰层里沉积的灰尘就多一些。冰立方是通过探测中微子与冰原子核反应所产生的次级带电粒子在冰川中以超(冰中)光速速度飞行而产生的切伦科夫辐射(一种蓝光)来研究中微子,因此对冰川冰吸收、散射光子的精确建模,对于中微子反应事件重建起关键性作用。而要对 10 亿吨的冰川冰准确建模并不是一件易事,目前我们主要通过冰立方元件中的 LED 闪光装置向冰层里发射已知的光信号,并被附近的元件接收来产生大量的刻度数据,再通过全局拟合的方法来确定不同冰层的光学性质。

收获有很多方面。研究成果方面最满意的是提出的高能陶中微子双脉冲波形识别法被证实切实可行,并得到同事的一致认可。个人成长方面最满意的是和同事、朋友历经数不清场次的科学辩论后获得的思辨技能。团队协作方面最满意的是得到合作组的认可并高票当选青年科学家代表。

《科技导报》:在这样一个国际化的大合作组工作是什么样的感觉?

徐东莲:总的来说,跟很多聪明人聚在一起解决前沿的科学难题,感觉非常棒。然而在研究生早期,不时地要鼓起勇气去问资深同事一些比较“愚蠢”的问题却是很痛苦。但这也是一个非常磨炼人的过程,从一开始担心“被拒绝”,到坦然接受,到后来的不介意,再到现在积极去摸索提高与他人成功协作的方法。其实最好的合作方法也是老生常谈:平等互助,真诚相待。获得合作者的任何帮助,不要吝啬公开表达感谢,同时自己也不吝啬地去帮助他人。

另一个磨炼人的过程是课题的审查。对于每一个会产生可发表结果的课题,冰立方合作组内部有严格的审查规定,一般合作组领导层会指派至少两位资深专家对课题进行审查,过程通常会持续几个月。审查专家团一经成立,分析人与他们的“激战”就开始了,所有好的坏的问题像狂风暴雨一般袭来,分析人只能提剑迎战,见招拆招,这样“恶战”几十甚至几百个回合,直到专家团通过。所以,一个课题结题后,分析人一般都会去旅行一趟,恢复元气。

当然,这对科学结果却是极大的好事。经过如此严格的过程,冰立方合作组发表的结果,都一致获得杂志的高度评价,出错率和拒稿率几乎为零。

致谢:感谢何红建教授推荐采访选题和被采访人,以及对文章内容的把关和文字修改。