

前沿物理与工程

认识和探测宇宙的基本方法介绍

李泽琴 宁长春 杨 瑞 冯有亮

(西藏大学宇宙线教育部重点实验室(西藏大学), 西藏 拉萨 850000)

摘 要 人类对宇宙最早的认识和观测始于可见光,之后由于有 1865 年麦克斯韦对电磁波的预言,1887 年赫兹的证实,以及 1933 年杨斯基发现银河系的射电辐射,可见光观测自此扩展到电磁波多波段观测,出现了多波段天文学。1912 年,赫斯发现宇宙线,使得天文观测在电磁波观测之外多了一种手段,拉开了多信使天文学的序幕。1987 年,戴维斯和小柴昌俊发现了来自超新星爆发的中微子信号,这也是人类首次探测到了来自宇宙的中微子,至此又多了一种认识和观测宇宙的信使。此后,2016 年美国激光干涉引力波观测站 LIGO 探测到引力波,在补齐对于验证爱因斯坦广义相对论的最后一块拼图的同时,也使得引力波成为多信使天文学中最新引入的一种信使。本文介绍了电磁波、宇宙线、中微子、引力波这四种信使的基本概念、发现历史以及探测宇宙的基本原理,对其代表性的实验进行了收集整理,并就其中的一个典型实验进行了简要介绍。期望能够就多波段多信使天文学的发展历程给出一个比较完整的描述。

关键词 电磁波;宇宙线;中微子;引力波;多信使天文学

INTRODUCTION TO THE BASIC METHODS OF UNDERSTANDING AND PROBING THE UNIVERSE

LI Zeqin NING Changchun YANG Rui FENG Youliang

(Key Laboratory of Cosmic Rays, Ministry of Education, University of Tibet, Lhasa, Tibet 850000)

Abstract The earliest understanding and observation of the universe began with visible light. Subsequently, due to Maxwell's prediction of electromagnetic waves in 1865, Hertz's confirmation in 1887, and Jansky's discovery of radio radiation in the Milky Way in 1933, visible light observation has been expanded to multi-band electromagnetic wave observation, leading to the emergence of multi-band astronomy. In 1912, Hess discovered cosmic rays, providing an additional means in addition to electromagnetic wave observation, and opened the prelude to multi-messenger astronomy. In 1987, Davis and Koshiba discovered neutrino signals from supernova explosions, which was the first time that humans detected neutrinos from the universe, and since then there has been another kind of messenger to understand and observe the universe. Later, in 2016, the Laser Interferometric Gravitational-wave Observatory in the United States detected gravitational waves, which completed the last piece of the puzzle for verifying Einstein's general theory of relativity and made gravitational waves the last messenger known to multi-messenger astronomy. This paper introduces the discovery history, basic

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 西藏自治区科技计划项目资助(JDRC2023000009);西藏自治区教育科学研究 2023 年度一般课题(XZEDGP230022);西藏自治区教育科学研究 2022 年度教学研究课题(XZEDTP220101);西藏大学 2022 年硕士研究生《极简天文课》课程建设项目。

通讯作者: 冯有亮,西藏大学宇宙线教育部重点实验室特聘研究员,xzdxyl@163.com。

引文格式: 李泽琴,宁长春,杨瑞,等. 认识和探测宇宙的基本方法介绍[J]. 物理与工程,2024,34(1):16-29.

Cite this article: LI Z Q, NING C C, YANG R, et al. Introduction to the basic methods of understanding and probing the universe[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 16-29. (in Chinese)

concepts, and basic principles of detecting the universe of the four messengers of electromagnetic waves, cosmic rays, neutrinos and gravitational waves. The representative experiments are collected and organized. A brief introduction is given to one of the typical experiments. It is expected to give a relatively complete description of the development of multi-band multi-messenger astronomy.

Key words electromagnetic wave; cosmic ray; neutrino; gravitational wave; multi-messenger astronomy

人类观测宇宙最早的手段是肉眼观测。这其中最伟大也是最后一位用肉眼观测天空的人就是第谷(Tycho Brahe),他编纂的星表的数据已经接近了肉眼分辨率的极限。1609年伽利略(Galilei)首次将望远镜指向天空,发现了之前肉眼观测所不能看到的土星光环、太阳黑子、金星和水星的盈亏等现象,从此结束了人类肉眼观测宇宙的时代,天文观测开始进入到望远镜观测的新纪元。1865年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)写下麦克斯韦方程组并预言了电磁波的存在^[1],1887年,赫兹(Heinrich Rudolf Hertz)用实验方法证实了麦克斯韦的预言^[2],这是人类第一次意识到可见光只是电磁波的一部分。此后在1933年,美国贝尔电话公司的一位工程师卡尔·杨斯基(Karl Guthe Jansky)意外发现了来自银河系的无线电波^[3],天文观测至此进入多波段时代。之后的几十年中,相继诞生了红外天文学、紫外天文学、X射线天文学和 γ 射线天文学。1912年,奥地利物理学家赫斯(Victor Franz Hess)发现宇宙线^[4],除电磁波之外,人类又多了一种认识和探测宇宙的信使。多信使天文学由此拉开序幕。1930年,奥地利物理学家泡利(Wolfgang Ernst Pauli)为了解释 β 衰变提出中微子假说^[5]。1987年,小柴昌俊(Masatoshi Koshihira)所领导的神冈实验(Super-Kamiokande)探测到超新星SN1987A爆炸时所发出的中微子^[6],这也是人类首次探测到了来自宇宙的中微子,它也成为人类认识和观测宇宙的新信使。2016年,美国激光干涉引力波观测站LIGO宣布探测到引力波的存在^[7],至此多信使天文学的四大信使全部亮相,造就了目前多波段多信使天文学的新时代。

以上所述,或者可以理解为多波段多信使天文学的发展简史,或者也可以理解为人类认识和探测宇宙的简要介绍。但毋庸置疑的是,电磁波、宇宙线、中微子和引力波四大信使,是目前人类所

知的能够认识和探测宇宙的四种基本手段。本文将对电磁波、宇宙线、中微子、引力波这四种信使的基本概念、发现历史、探测宇宙的基本原理进行比较详细的介绍,同时将举例每种信使的代表性实验,并就其中一个实验,结合其科学目标、实验原理、运行状况以及取得的科学成就进行简要介绍,期望能够就多波段多信使天文学的发展历程给出一个比较完整的描摹。

1 电磁波

1.1 电磁波的基本概念

1864年,麦克斯韦在总结奥斯特(Hans Christian Oersted)、法拉第(Michael Faraday)、安培(André-Marie Ampère)等前人工作的基础上,采用了法拉第涡旋电场的设想,创造性地提出涡旋电场、位移电流的假设,写出麦克斯韦方程组。从中我们可以得知:空间位置固定、电量不随时间变化的电荷产生的电场称为静电场,恒定电流产生的磁场称为恒定磁场^[8]。当电荷、电流随时间变化时,产生的电场和磁场也要随时间变化,形成统一的时变电磁场,即随时间变化的电场要在空间产生磁场,随时间变化的磁场也要产生电场^[1]。1865年,麦克斯韦进一步从麦克斯韦方程组中推导得到

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2)$$

发现以上关于 E 和 B 的方程,与经典波动方程 $\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ 的形式一模一样。与经典波动方程中的速度项类比,得出电磁波波速 $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$,

从而预言了电场和磁场都满足波动方程并以波的形式在空间中传播,即电磁波^[1]。这一预言在1887年被赫兹验证。

而直到此时,人们才意识到光的本质就是电磁波,而可见光只是电磁波的一个频段。也意识到从人类抬头仰望星空那一刻开始,从1609年伽利略利用望远镜观测天象,再到后来利用口径越来越大、性能越来越精良的光学望远镜观测天体及其活动,从始至终都只是在利用电磁波当中可见光这一小小的窗口在观测宇宙。

1932年,美国无线电工程师杨斯基首次探测到了来自银河系中心的射电信号^[3],打开了可见光之外的电磁波观测宇宙的其他窗口,射电天文学的序幕由此拉开。射电天文学的诞生不仅为天文学这门古老的自然科学开辟了一条全新的探测手段和研究路径,还催生了“20世纪60年代天文学四大发现”——类星体、脉冲星、星际有机分子和宇宙微波背景辐射,更让天文学从持续了那么久远的光学时代进入到多波段天文学的时代。

如今我们知道,电磁辐射可按照波长范围划分为几个波段:射电波段($>1\text{mm}$);红外波段($0.77\sim 1000\mu\text{m}$);可见光($390\sim 770\text{nm}$);紫外波段($10\sim 390\text{nm}$);X射线波段($0.01\sim 10\text{nm}$); γ 射线波段($<0.01\text{nm}$)^[9]。所以在杨斯基的发现之后,自20世纪40年代以来的几十年间,射电天文学、红外天文学、紫外天文学、X射线天文学和 γ 射线天文学相继诞生并得到一定发展,使得人类对天体辐射的观测实现了全波段覆盖。同时,多波段天文学的诞生,也让宇宙及其内部各种天体和天象的物理本质以一个全新的面孔进入了人类的视野。

然而,如果我们要在地球上去观测宇宙,由于地球大气有选择性地吸收电磁辐射,只有部分波段的辐射能到达地面并被接收到,这些波段所在的范围被称为大气窗口。如图1所示,大气窗口主要有两个:(1)光学窗口,波长为 $390\sim 770\text{nm}$;(2)射电窗口,波长为 $1\text{mm}\sim 20\text{m}$,但毫米波段还有水气和二氧化碳的一些吸收带。此外,在红外波段除了一些水气和二氧化碳的吸收带外还有几个小窗口^[9]。

当然,即便是能够通过大气窗口到达地球上的望远镜的电磁波,也会受到地球大气的其他影响,诸如大气折射、大气抖动、大气色散、大气闪烁以及大气消光等,所以这也是在地面观测之外开展空间天文观测的原因。这一类实验一般是将天文望远镜及所有后端设备置于卫星或其他空间探测器上,从而在大气层外进行观测,这样就可以彻底克服地球大气对于观测的影响。

1.2 电磁波作为探测手段的物理原理

电磁波作为人类认识和探测宇宙最主要的基本手段,其主要原因是:电磁波在宇宙中广泛存在,并且其波长和频率具有重要的特征。不同的物质、不同的天体(如行星、恒星、星系等)和不同的温度发出的电磁波频率不同,这使得我们能够通过观测和分析这些电磁波来深入了解遥远恒星的各种特征。通过电磁波的反射、折射、衍射和干涉等物理性质,我们可以利用不同的接收方式、实验方法来研究宇宙中的各种天体。例如,天文观测中使用的望远镜可以接收电磁波并反射、折射、放大图像,从而观测星系、恒星、行星和其他天体的大小、形状、距离、表面温度、主要物质构成、年龄和寿命等信息。不同类型的天体发出的电磁辐射频率和波长的分布也有所不同,这使得我们能

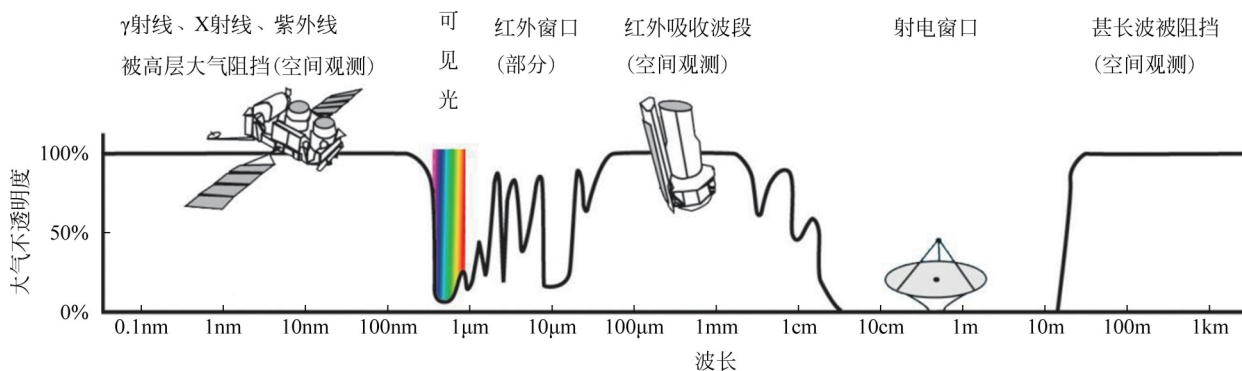


图1 电磁辐射和大气“窗口”^[9]

够通过电磁波的特征来区分它们。同时,我们又可以在各个波段去观测同一种天体,各个观测结果又可以相互引导、验证、互补,了解不同的物理过程,从而获得完整、准确的天体图像。

此外,电磁波的一些天然属性,诸如以光速传播、不带电从而不会在传播路径上受到电场和磁场的作用而偏转,以及具有多普勒效应,使得人类可以用最高效、最直接的方式去观测宇宙中的各种天体,并获知其相对于我们运动的方向。

1.3 电磁波作为探测手段的大型实验

以电磁波为探测手段的主要实验仪器,就是天文望远镜。表1列出了各波段一些典型的天文望远镜。这里重点介绍一下我国500米口径球面射电望远镜(Five hundred meters Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)

表1 各波段世界著名天文望远镜列举

波段	波长范围	望远镜列举
伽马射线	$<0.01\text{nm}$	康普顿伽马射线空间天文台 CGRO
X射线	$0.01\text{nm} \sim 10\text{nm}$	钱德拉 X 射线天文台 Chandra
紫外线	$10\text{nm} \sim 390\text{nm}$	远紫外光谱探测卫星 FUSE
可见光	$390\text{nm} \sim 770\text{nm}$	凯克望远镜 Kerk I 和 Kerk II
红外线	$0.77\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$	哈勃空间望远镜 HST
射电波	$>1\text{mm}$	500 米口径球面射电望远镜 FAST

就任何一个大科学工程而言,都存在科学、技术、经济造价之间的综合考量,FAST 选址在贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县,就是考虑到:(1)当地人口密度低、经济发展滞后,加之喀斯特山峰的地方屏障^[10],可以在一定程度上屏蔽各种射频信号,如来自雷达、卫星等外界对电磁辐射的干扰,在最大程度上保证在其所探测的频段范围内有干净的背景。(2)当地拥有大量各种口径的天然喀斯特洼坑,完美的洼坑形态天然地契合了FAST 所要求的球面,可以大大减少土方开挖量,降低了工程造价^[11]。

FAST 的主要结构,是由主动反射面系统、馈

源支撑系统、测量与控制系统、接收机与终端系统构成。接收机与终端系统包括频率覆盖 $70\text{MHz} \sim 3\text{GHz}$ 的9套高性能多波束馈源和终端设备^[11]。当来自宇宙的电磁波信号到达时,首先由主反射面将收集到的信号汇聚到焦点上,接着由低噪音前置放大器将这些信号放大到足够水平,再由射频放大器、混频器和中频滤波器对信号进行进一步处理得到中频信号,最终,中频信号通过光纤传输到达地面的观测室内,供数据处理终端进行处理^[11]。通过对这些信号的分析,FAST 可以实现以下这些科学目标:

(1)研究快速射电暴(FRB)的物理机制,FRB 是一类持续时间为毫秒量级的超亮射电脉冲信号,然其起源未知,FAST 能够对 FRB 定位,助力科学家综合其他数据,研究其成因。(2)利用FAST 独特的电波环境、极少受衍射限制的巨大口径和振子天线的低旁瓣水平等优势探测宇宙边缘中性氢,进一步回答星系及星系团演化与成因、暗物质空间分布及宇宙低峰扰动等一系列天文学热点问题^[10]。(3)发现“星际介质的探针”——脉冲星,同步进行脉冲星偏振、单个脉冲等方面的研究,揭示脉冲星辐射的成因^[10],建立脉冲星定时阵列,参与未来脉冲星导航和引力波探测。(4)加入国际甚长基线干涉测量 VLBI,提高 FAST 的分辨率,更精确地研究恒星类天体的形成和演化^[10]。(5)FAST 工作带宽涵盖了羟基(OH)、甲醇(CH_3OH)和甲醛(HCHO)等17种分子谱线,利用其高灵敏度,可对超强红外星系、高红移星系、活动星系和类星体进行 OH, HCHO , CH_3OH 分子超脉泽的广泛搜寻,推动宇宙早期演化的研究,探寻生命的奥秘^[10]。(6)FAST 的搜索距离达27光年,可观测的恒星达40颗,利用FAST 可检测微弱的空间信号,参与寻找地外文明。

从2020年1月11日通过国家验收至今,FAST 在中性氢宇宙研究、FRB 起源与物理机制、脉冲星测时、脉冲星搜寻与低频引力波探测等领域取得了丰硕的科学成果,进一步加深了人类对宇宙的认知。2021年10月,《自然》杂志发表了FAST 取得迄今最大FRB 爆发事件样本的成果。该研究揭示了FRB 爆发率的完整能谱和其双峰结构,其爆发事件总量超过了此前在该领域发表的所有文章。2021年5月,国内学术期刊《天文和

天体物理学研究》发表了 FAST 持续发现毫秒脉冲星的成果。2021 年 12 月,国内学术期刊《中国科学》以封面编辑点评文章的形式发表了 FAST 开展多波段合作观测的成果。2023 年 6 月,中国脉冲星测时阵列(CPTA)依托中国天眼收集的 57 颗毫秒脉冲星组成的银河系尺度大小的引力波探测器,通过分析时间跨度为 3 年 5 个月的数据,进而在 4.6σ 置信度水平(误报率小于五十万分之一)上发现了具有纳赫兹引力波特征的四极相关信号的证据^[12]。由于测量数据较短的时间跨度,科学家并未确定纳赫兹引力波的主要物理来源,但可以肯定的是,随着观测数据的累积,FAST 将在助力打开利用纳赫兹引力波探测宇宙新窗口上发挥举足轻重的作用。

2 宇宙线

2.1 宇宙线的基本概念

宇宙线的发现可追溯到 20 世纪初对大气导电性的探索,科学家发现置于密闭容器中的验电器可以自发放电。很多物理学家在地面上、海里、铁塔上、隧道里、高山上和高空气球上等多种环境下都相继开展了大气电离实验。在 1911—1913 年期间,奥地利物理学家赫斯做了十次高空气球实验。其中,在 1912 年 8 月 7 日的飞行实验中,他发现空气电离率随着海拔的升高而明显增加,进而得出“有来自外部空间的高能射线不断降落到地球上”这一革命性的结论,这也标志着宇宙线的发现^[4],并因此获得了 1936 年的诺贝尔物理学奖。“宇宙射线”是 1925 年美国物理学家密立根(Robert Andrews Millikan)第一次将其命名而得^[13]。

宇宙线是来自宇宙空间的一种重要物质样本,主要由亚原子粒子构成,其中质子、氦核占了主要的部分,剩下的包括一些重核、正负电子、中微子、 γ 光子和反质子等成分。宇宙线能量从 $10^9 \sim 10^{20}$ eV ($1\text{GeV} = 10^9 \text{eV}$, $1\text{TeV} = 10^{12} \text{eV}$, $1\text{PeV} = 10^{15} \text{eV}$, $1\text{EeV} = 10^{18} \text{eV}$),跨越 11 个量级,流强下降了 30 个量级。在 $10^{11} \sim 10^{20}$ eV 宇宙线能谱大致可用一个幂率谱描述,谱指数约为 -2.7 ,但细看图 2,科学家发现了一些细微的结构,如:在 $3 \sim 4\text{PeV}$ 能谱变陡,形似人的膝盖,被称为“膝区”^[14];在 $300 \sim 400\text{PeV}$ 出现了第二个“膝”^[15];在 $3 \sim 4\text{EeV}$ 附近有一个向上的拐折,形似人的脚

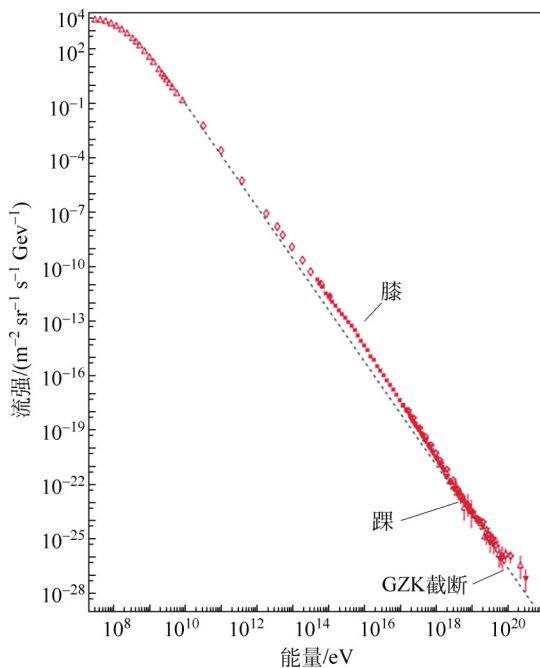


图 2 宇宙线全粒子微分能谱^[16]

踝,被称为“踝区”^[17]以及理论上预言的 GZK 截断效应^[18],即能量超过 50EeV 的质子可以通过和微波背景光子的反应形成核子共振态,然后衰变为核子和 π 介子,从而损失原先的能量,使能谱快速下降,这被称为 GZK 截断。通过宇宙线实验研究,正电子、 μ 轻子、 κ 介子、 π 介子、 Δ 、 Σ 、 Ξ 超子等许多“基本粒子”相继被发现,这些发现为粒子物理的发展奠定了基础,为人类深入了解物质的构成及它们间的相互作用提供了重要的线索。

在天体物理源中加速产生的粒子流被称为“初级宇宙线”,当这些初级宇宙线与星际空间气体发生相互作用时,产生的粒子称为“次级宇宙线”。初级宇宙线和次级宇宙线统称为原初宇宙线,即能够抵达地球大气层的宇宙线粒子。一个高能原初宇宙线粒子进入大气层后,会与空气中的原子核发生相互作用,通过强子级联簇射和电磁级联簇射过程,产生大量的次级粒子,这些粒子通常包含强子、电子、光子和 μ 子等成分,并广泛的散播在数平方公里的面积上,这种现象被称为“广延大气簇射”。

对宇宙线的探测主要分为直接探测和间接探测两种。直接探测,即探测器探测的粒子就是大气顶层的原初宇宙线粒子。由于宇宙线粒子在大气中要发生广延大气簇射过程,所以在地面无法直接探测宇宙线原初粒子,对宇宙线原初粒子的

直接探测只能在大气层外,即气球、卫星和空间站上进行。直接探测可得到原初成分准确信息。间接探测是通过探测原初宇宙线粒子与大气相互作用后产生的次级粒子,通过重建和分析次级粒子的某些特征来给出原初宇宙线信息,能够实现宇宙线高能端的测量。但是,有关原初粒子种类的信息需要借助于相互作用模型,因而具有较大的模型依赖和不确定性。目前来讲,直接探测覆盖了约 $200\text{MeV}\sim 100\text{TeV}$ 能区,间接探测覆盖约 $5\text{TeV}\sim 100\text{EeV}$ 能区,其重叠的能区则为两类探测手段提供相互检验。宇宙线能量低于 10^{14}eV 时,由于流强较高,通过卫星实验和高空气球实验就能够对这些原初宇宙线的成分进行直接观测。而能量高于 10^{14}eV 的粒子,由于其流量太小,受到空间实验有效荷载面积的限制,目前主要通过地面阵列实验进行间接观测^[19]。两种观测方法互相补充,共同揭示宇宙线的本质。

2.2 宇宙线作为探测手段的物理原因

宇宙线成为人类认识和观测宇宙的又一个基本手段的理由,主要体现在两个方面:

(1) 宇宙线是太阳系以外唯一的物质样本。宇宙线由各种天体演化过程,尤其是高能天体物理过程所产生,它们携带着这些过程中的丰富信息。太阳及其他恒星表面的高能活动、脉冲星、超新星遗迹、活动星系核和类星体等,都可能是宇宙线源。通过观测和研究它们的起源和宇宙环境中的微观变化从而获得宇宙大部分奇特环境中天体的剧烈活动过程的大量信息。宇宙线的研究,关乎于我们从何而来,又将去向何处的终极问题。

(2) 迄今为止,人类已经探测到的最高能量的宇宙线粒子能量达到了 $3\times 10^{20}\text{eV}$,这个能量水平比目前最大的粒子加速器 LHC 所能加速的粒子能量高出了数千万倍。这首先使得宇宙线成为我们研究极高能粒子物理非常重要的,而且目前看来是唯一的工具。其次,如此高能的粒子起源于什么天体? 是什么样的剧烈天体物理过程加速的? 在如此极高能的状态下,已知的物理学规律是否仍然适用? 现代物理的理论有什么新突破? 这些问题都是宇宙线研究的主要科学问题。

2.3 宇宙线作为探测手段的大型实验

宇宙线发现至今 100 多年中,对宇宙线的起源、加速和传播问题的研究一直是广大物理学家们非常关心的问题。世界各国的科学家都开展了

不同类型、不同探测方式的实验,表 2 列出了一些典型的宇宙线实验。在这里简要介绍我国刚刚建成的高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)。

表 2 宇宙线重要实验列举

探测方式	探测类型	典型实验列举
直接探测	气球实验	ATIC、CREAM、JACEE
	空间实验	AMS、Fermi、AGILE
间接探测	地面广延大气簇射阵列	AS γ 、ARGO、LHAASO
	大气切伦科夫光探测	H. E. S. S.、MAGIC、VERITAS
	大气荧光探测	Fly's Eye

LHAASO 位于中国四川省稻城县海子山,平均海拔 4410 米,可以说是占据了宇宙线实验的制高点。选址在高海拔地方的优势旨在于减少大气对宇宙线粒子的阻挡,海拔越高的地方,大气越稀薄。虽然说中国青藏高原有更高海拔的地址都符合实验海拔的要求,但实际上较低海拔受到大气层的干扰较小,使其拥有较高的能量分辨率和较低的背景辐射,更易获得准确可靠的宇宙线观测结果。同时,稻城地势平坦,为放置宇宙线探测器提供了宽阔的场地,足够多的探测器也就可以采集更多的宇宙线粒子。

LHAASO 是目前世界上海拔最高,且在 20TeV 能量以上灵敏度最强的宇宙射线探测装置。LHAASO 由 5195 个电磁粒子探测器和 1188 个缪子探测器组成一平方公里地面簇射粒子阵列、7.8 万平方米水切伦科夫探测器、18 台广角切伦科夫望远镜交错排布组成复合阵列。该观测站采用四种探测技术,可实现全方位、多变量地测量宇宙线。

LHAASO 的核心目标^[20]:第一是寻找宇宙线的起源,以实现宇宙线能谱和成分的精确测量,进而探索宇宙线加速和传播机制。第二是开展全天区伽马源的扫描搜索,大量发现新伽马源,并研究其辐射机制。捕捉宇宙中的高能伽马暴事例,进而研究其爆发机制。第三是探索量子引力、暗物质和洛伦兹不变性破坏等新物理现象,发现新物理规律。

LHAASO 用 11 个月的观测数据就在银河系内发现 12 个超高能伽马射线源,并记录到能量达到 1.4 PeV 的伽马光子,这是人类迄今观测到的最高能量光子^[21],突破了人类对银河系粒子加速的传统认知,开启了“超高能伽马天文学”的时代。首次精确探测到了伽马射线暴高能光子爆发的完整过程,并记录了万亿电子伏特伽马射线流量增强和衰减的整个阶段^[22],这是人类首次完整记录到这一高能爆发现象的全过程,这一观测结果大大增进了人类对伽马暴辐射机制以及喷流结构等方面的理解。

3 中微子

3.1 中微子的基本概念

中微子是构成物质世界最基本的单元之一。根据标准模型,物质世界由 12 种基本粒子组成,分别为:上夸克、下夸克、奇夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克共 6 种夸克,电子、缪子、陶子共 3 种带电轻子,以及电子中微子 ν_e ,缪子中微子 ν_μ 和陶子中微子 ν_τ 共 3 种中微子。这其中,中微子自旋为 1/2,质量至少小于电子质量的 $1/10^6$,且每一种中微子都有与其对应的反粒子($\bar{\nu}_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu$ 、 $\bar{\nu}_\tau$)。

中微子产生于由弱相互作用支配的 β 衰变,从核子层面看,来自于中子与质子的相互转变,从夸克层面看,来自上夸克与下夸克之间的转变。所以存在 β 衰变的过程,均有中微子产生,它散布于宇宙每一个角落,其空间数密度约为 $330 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ^[23],在数量上超过电子、中子和质子达百亿倍,然其被原子核俘获的截面约为 10^{-45} m^2 ,这在极大程度上增加了人类对它的探测难度。

简要来讲,中微子物理学的发展历程大致如下。1896 年贝克勒尔(Antoine Henri Becquerel)发现放射性,1898 年居里夫人(Marie Curie)发现钋和镭,开始推动科学家们进一步研究放射性,并最终意识到元素辐射分为 α 、 β 、 γ 三种辐射。 α 辐射出的是氦原子核, β 辐射出的是电子, γ 辐射出的是光子。此后对于 β 衰变电子能谱的测量所出现的电子连续谱,使得奥地利物理学家泡利于 1930 年提出中微子假说。1956 年美国物理学家莱因斯(Reines Frederick)和柯恩(Clyde Cowan)首次探测到了核反应堆释放的电子反中微子 $\bar{\nu}_e$ ^[24]。1962 年,美国物理学家莱德曼(Leon Led-

erman)、施瓦茨(Melvin Schwartz)、斯坦博格(Jack Steinberger)等人在布鲁克海文实验室利用加速器发现了第二种中微子 ν_μ ^[25]。1968 年,布鲁克海文实验室的戴维斯(Raymond Davis)在美国南达科他州霍姆斯泰克的一个废旧金矿首次成功地探测到了来自太阳的中微子,然而他却发现所探测到的中微子数量只有预期数量的 1/3,这一现象被称为“太阳中微子失踪之谜”^[26]。1987 年,小柴昌俊主持的神冈实验 II 和美国 IMB 实验探测到在大麦哲伦星云中爆发的一颗超新星(SN1987A)所释放出来的中微子,这也是人类首次“捕获”到来自宇宙的中微子^[6]。1988 年,日本物理学家梶田隆章(Takaaki Kajita)与他的两位导师小柴昌俊和户冢洋二(Yoji Totsuka)在神冈实验中观测到大气中微子低于预期,这一现象被称为“大气中微子反常”^[27]。1989 年,通过对 Z_0 衰变截面的测量,欧洲核子研究中心证明了存在且只存在 3 种中微子。然而,最后一种中微子 ν_τ 直到 2000 年才被美国费米实验室的 DONUT 实验成功探测到^[28]。1998 年,小柴昌俊在升级后的超级神冈实验中率先证实了大气中微子振荡。在 2001—2006 年间,加拿大的萨德伯里中微子观测站(SNO)、日本的 KamLAND 实验、日本的 K2K 实验和美国的 MINOS 实验相继证实了太阳中微子的振荡模式。

由于在基本粒子标准模型的假设里,中微子的静止质量为零,而中微子振荡的证实表明中微子具有微小质量,引发了物理学家们对标准模型的思考。若将中微子质量纳入标准模型中,需要解答一系列未知问题^[23]:(1)它是狄拉克费米子(反粒子与自身不同)还是马约拉纳粒子(反粒子就是它本身)?(2)它的质量顺序是正的还是反的?(3)它的绝对质量大小是多少?(4)电荷宇称破坏角(δ_{CP})大小是多少?(5)惰性中微子(一种标准模型之外的、不参与弱作用的粒子)是否存在等等。而这些问题,很可能成为进一步更新粒子物理标准模型的突破口,对完善粒子物理理论体系至关重要。

正因为如此,中微子振荡成为当前中微子研究的关键着力点,它主要由中微子混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} 、两个独立的质量平方差 $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ 和 $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$ 、 δ_{CP} 等六个振荡参数来表示。目前,六个振荡参数已测得四个半,剩下 δ_{CP} 还未

知,以及不能确定 Δm_{32}^2 的符号(即 m_2 和 m_3 谁更重,又称为质量顺序问题)。质量顺序在影响振荡概率的同时,也进一步影响了 δ_{CP} 的确定。 δ_{CP} 是解释宇宙中物质与反物质的不对称的依据,而它的测定需要在 θ_{13} 的基础上进行。因此, θ_{13} 的符号、 δ_{CP} 值的确定和进一步提高 δ_{CP} 的精度是目前粒子物理研究的重大问题。

3.2 中微子作为探测手段的物理原因

目前大家普遍认为,中微子的产生主要有以下7种方式:(1)宇宙大爆炸时遗留下来的宇宙背景中微子(现在温度为 1.95K);(2)在超新星爆发等巨型天体活动过程中,质子和电子合并形成中子,产生出来的中微子;(3)在太阳这一类恒星上,通过热核反应产生的十几 MeV 以下的电子中微子;(4)高能宇宙射线射到地球大气层,与其中的原子核发生核反应,产生 κ 介子或 π 介子,这些介子再衰变成 μ 子及中微子;(5)地球这一类行星上 ^{238}U 自发裂变或 ^{235}U 诱发裂变产物 β 衰变所产生的 $\bar{\nu}_e$;(6)核反应堆发电过程中产生的中微子;(7)加速器产生的中微子。所以作为联系微观世界和宇观世界的重要环节,有极强的穿透能力且携带着宇宙早期最丰富信息的中微子在寻找超高能宇宙线的起源、研究超新星爆发的机制、研究太阳模型、利用超新星背景中微子研究宇宙大尺度结构、利用地球中微子研究地球演化等方面有着极为重要的意义^[23],也因此成为了我们认识和探测宇宙的重要信使。

3.3 中微子作为探测手段的大型实验

在三代中微子的框架下,人类通过太阳中微子实验(测得 $\sin^2 2\theta_{12}$ 和 Δm_{21}^2)、大气中微子实验(测得 $\sin^2 2\theta_{23}$ 和 $|\Delta m_{32}^2|$)、加速器中微子实验、反应堆中微子实验(测得 $\sin^2 2\theta_{13}$)等多种实验对中微子的振荡参数进行测量^[29],表3列出了一些典型的中微子振荡实验。

大亚湾反应堆中微子实验(Daya Bay Reactor Neutrino Experiment)是一个以我国科学家为主导的国际合作实验,中微子探测器安放在大亚湾核电站附近,利用其核反应过程产生大量的电子反中微子,来确保足够的中微子统计量。另外,由于大亚湾核电站处于百米深的花岗岩山体中,这对低事例率、高精度的中微子实验来说,很大程度上降低了宇宙射线和天然放射性本底对实验数据的影响。

表3 中微子振荡典型实验列举

实验类型	典型实验列举
太阳中微子实验	Homestake、GALLEX、SNO、SAGE
大气中微子实验	Super-Kamiokande
加速器中微子实验	T2K、NovA、MINOS、K2K、Gran Sasso
反应堆中微子实验	大亚湾反应堆中微子实验、KamLAND、Double Chooz

如图3所示,大亚湾实验在距离核反应堆很近的地方(近点)和中微子振荡最大值处(远点)共放置了8个探测器(布局如图3所示)。为了降低宇宙射线本底的影响,每个探测器都包括中微子探测器和宇宙线探测器两部分,均放置于地下实验厅内。探测器为3层同心圆柱结构,分为内层——中间层(集能层)——外层三部分,依次为20t 掺钎液体闪烁体、20t 普通液体闪烁体、40t 矿物油,分别放置在直径3m、高3m的有机玻璃罐、直径4m、高4m的有机玻璃罐和直径5m、高5m的不锈钢罐内。探测器整体置于水池中,保证探测器在各个方向都至少被2.5m厚的水屏蔽,最终由水池内壁安装的192只8in(1in=2.51cm)光

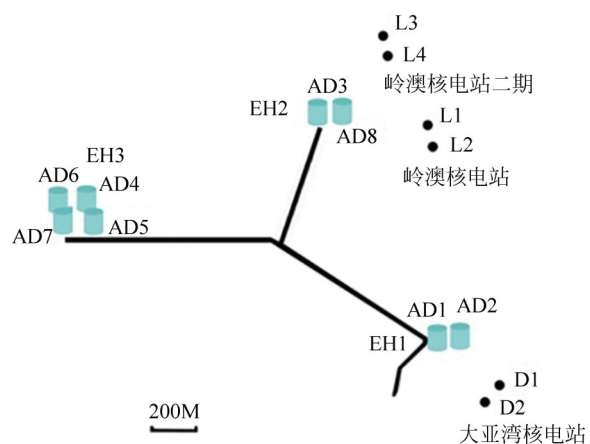


图3 大亚湾实验布局示意图^[30](6个圆点表示6个反应堆,其中D1和D2是大亚湾核电站的两个堆,L1~L4是岭澳和岭澳二期核电站的4个堆。EH1表示1号实验厅,距大亚湾反应堆360m,安装了两个中微子探测器AD1和AD2。EH2表示2号实验厅,距岭澳和岭澳二期的反应堆平均约500m,安装了两个探测器AD3和AD8。EH3是远点实验厅,距大亚湾1900m,距岭澳1550m,安装了4个探测器。)

电倍增管(PMT)读出信号^[30]。该实验采取了相对测量的方法^[30],通过计算近点和远点之间的中微子的流强差(即 $\bar{\nu}_e$ 的通量差值),再由通量差值计算出 $\bar{\nu}_e$ 振荡的转化概率 P ,通过公式(3)即可计算出 θ_{13}

$$P = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m_{31}^2 L / E) \quad (3)$$

其中, L 为中微子的传播距离,即近点和远点探测器之间的距离, E 为 $\bar{\nu}_e$ 的能量。

究其科学目标,大亚湾中微子实验旨在通过研究反应堆中微子源来精确测量中微子振荡参数—— $\sin^2 2\theta_{13}$ 和 $|\Delta m_{32}^2|$,助力于未知的中微子振荡参数的测定,并通过核燃料的演化对反应堆的中微子流强和核燃料各组分的中微子能谱进行精确测量,为一系列中微子相关问题提供数据支撑,完善人类对物质世界基本规律的认识,促进中微子天文学的发展。

大亚湾实验是我国对中微子振荡研究的首次尝试,2012年大亚湾实验以5.2倍标准偏差的置信水平首次探测到第三种中微子振荡模式,同时精确测量了中微子参数 θ_{13} 的数值^[31],被美国*Science*杂志评为当年的十大科学突破^[32],也被誉为“中国有史以来最重要的物理成果”。继大亚湾实验取得一系列科学研究成果后,我国开始建设精度更高、规模更大的液体闪烁体探测器——江门中微子探测器。

为提高测量质量顺序灵敏度,除需要使反应堆中微子振荡概率极大以外,江门地下中微子观测站(Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO)的选址考虑了诸多因素。一方面,为保证各

个反应堆距离实验探测器的基线一致以避免不同基线距离造成振荡中的干涉效应相互抵消^[29],观测站位于广东省江门市开平市,距广东阳江和台山反应堆群约53km,且两个核电站的有效反应堆群功率世界第一,总热功率约为26.6GW_{th},一定程度上保证了足够的反应堆中微子源。另一方面,江门实验将探测器置于700m的岩石覆盖下,将宇宙线本底控制在合理的范围内的同时,将探测器的muon事例率降低至0.004Hz/m²,提高了信噪比。

如图4所示,江门探测器系统主要包含中心探测器(CD)和反符合探测器,反符合探测器由水切伦科夫探测器(WCD)与顶部径迹探测器(TT)组成。CD由基准质量为2万吨的液体闪烁体(LS)组成,设计的能量分辨率为 $3\% \sqrt{E(\text{MeV})}$,装在一个通过球形不锈钢网架支撑结构进行固定的内直径为35.4米的有机玻璃球中。考虑到LS自身放射性和周围岩石的天然放射性,LS配方采用与大亚湾实验类似的配方,但并未掺入Gu络合物,同时将整个CD浸泡在一个直径43.5m、高44m、内部填充3.5万吨超纯水的圆柱形的水池中^[33]。为提高光信号的收集和探测效率,JUNO实验在网架结构上安装了一系列光学附件:(1)Tyvek反射膜:将水池分割成内外两部分,形成光隔离,提高光收集效率;(2)PMT:网架结构上配置17612个直径为20英寸的PMT和25600个直径为3英寸的PMT,并将它们面向水池,用于收集液闪发出的光信号;(3)地磁屏蔽线圈:尺寸较大的PMT光电子探测效率易受地磁场影响的问题,

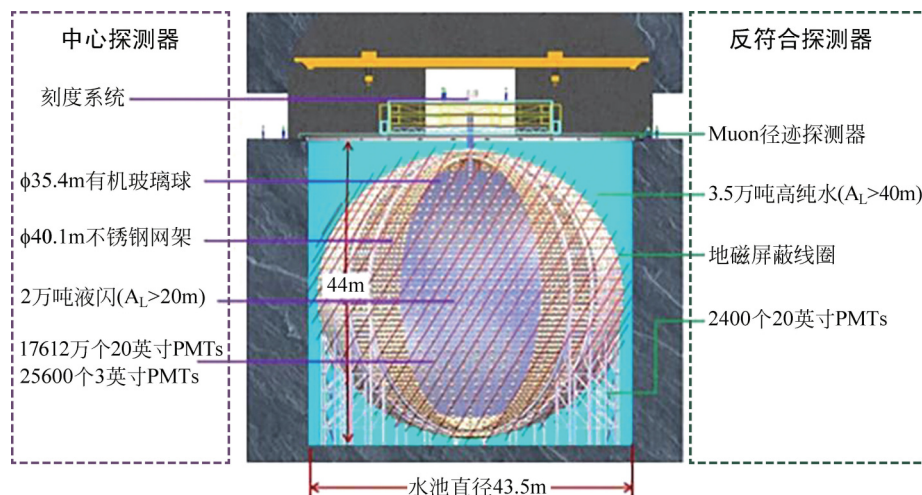


图4 江门中微子实验探测器示意图^[33]

因此在网架结构上安装了地磁屏蔽线圈^[34]。在中心探测器顶部,通过一根直径为 80cm 的有机玻璃管(“管子”)将刻度系统与中心探测器相连。江门探测器在水池上方覆盖了由 OPERA 实验中塑料闪烁体组成的顶部径迹探测器(TT),TT 总共由 62 个灵敏体积为 $6.7\text{m} \times 6.7\text{m}$ 的模块组成。为降低周围环境的天然放射性对 TT 的影响,将模块分为多层并平行间隔放置,多层模块之间进行符合以探测 muon。经模拟计算 muon 径迹的重建角度分辨率可以达到 0.2° ,更高的 muon 径迹重建精度可以更好地测量中子或宇生同位素与 muon 的距离或时间分布,利于扣除中微子数据分析中的 muon 引入的本底^[29]。

江门中微子实验是一个多物理目标实验。与大亚湾实验类似,江门中微子实验同样利用液体闪烁体(液闪)作为灵敏介质去探测中微子,其原理是通过测量和质子(P)发生反 β 反应(IBD)产生的正电子和中子的方法来计算中微子的通量和能谱,主要目标是确定中微子的质量层次和精确测量振荡参数。此外,江门探测器还能够观测来自陆地和外陆源的中微子/反中微子,包括超新星爆发中微子、扩散超新星中微子背景、地球中微子、大气中微子和太阳中微子。由于 JUNO 的大尺寸、优异的能量分辨率和径迹重建能力,可以收集到关于这些主题的有趣的新数据。基于江门实验探测器独特的高能量分辨率、超底的本底水平、巨大的灵敏体积和低能量阈值等特点,为我们解决

粒子物理、核物理和天文物理等领域中一些待解问题提供重要帮助。

4 引力波

4.1 引力波的基本概念

引力波的存在是广义相对论最重要的预言之一^[35]。在广义相对论中,引力被视为是时空弯曲的一种效应,这种弯曲是质量存在所导致的结果。质量越大所导致的时空曲率也越大,当一个有质量的物体在时空中运动时,也会对周围的时空造成扰动,并且能够用波的形式向外释放能量,类似于在平静的水面投石激起的波纹,这种现象被称为引力波^[35]。它可以在宇宙中以光速传播,使时空发生轻微的扭曲,因此引力波也被称为时空的涟漪。当引力波通过观测者时,观测者就会发现时空变形,亦即两个物体之间的距离会以与引力波频率一致的方式增加和减少,但是由于这种效应的强度与引力波源的距离成反比,引力波源距离我们非常遥远,所以在地球上观测到的形变效应非常微弱,大约是 $1/10^{21}$ 。由此探测引力波要求实验的精度非常高,这也正是引力波的观测为何如此困难的关键原因。

引力波的起源主要分为天体物理起源和宇宙学起源两部分^[36],表 4 列出了两种不同起源的主要波源及特点;而表 5 恰恰说明了天体物理起源和宇宙学起源的探测频段不同,故而对这两类引

表 4 引力波探测的主要波源及特点^[37,38]

频段	引力波信号的搜索类型	主要波源	特点
天体物理起源	引力波暴	超新星爆发	脉冲式 强度大 时间短暂
		中子星或黑洞形成 新生中子星的“沸腾” 坍缩星核的离心悬起	
	双星并合引力波	中子星-中子星	密近双星的并合过程分为旋绕、并合、余波三个阶段,每个阶段辐射的引力波波形不同
		中子星-白矮星 中子星-黑洞 黑洞-黑洞	
宇宙学起源	连续引力波	旋转的致密星体	频率确定
	随机背景辐射	早期宇宙的残留引力波 宇宙弦等量子引力来源的瞬时波源	宇宙中引力波源发射的引力波相互叠加形成

表 5 引力波探测手段及典型实验列举^[39]

频段	探测手段	典型实验列举
高频(约为十赫兹至几千赫兹)	地基激光干涉仪	LIGO、Virgo、KAGRA、ET
低频($10^{-4} \sim 10^{-1}$ 赫兹)	空间激光干涉仪	天琴计划、太极计划、eLISA
甚低频($10^{-9} \sim 10^{-7}$ 赫兹)	脉冲星计时阵	PPTA、FAST-PTA、EPTA
极低频($10^{-18} \sim 10^{-15}$ 赫兹)	宇宙微波背景辐射的偏振测量	Planck、BICEP2、阿里计划

力波的探测要用不同的探测手段。其中,天体物理过程产生的引力波基本都在中、低频段,主要依靠表中前三种探测手段进行探测,而遗留到今天的原初引力波基本都在 10^{-17} Hz 以下,主要依靠其在宇宙微波背景(Cosmic Microwave Background,CMB)上产生的偏振效应而获知(即 B 模式,因类似于磁感应线的分布,故因此得名)。CMB 是宇宙大爆炸后遗留下来的光子,它包含 E 模式和 B 模式两种偏振模式。其中 B 模式偏振是由原初引力波引起的,因此用 CMB 望远镜对 B 模式偏振的观测是探测原初引力波的直接途径,我国西藏阿里天文台正在建造一台小口径高灵敏度 CMB 望远镜,目前正在寻找原初引力波信号^[36]。

由于大质量天体剧烈的加速和并合活动在宇宙空间无处不在,应该说引力波遍布于整个宇宙空间,但引力波在地球上的观测效应极其微弱,即引力波的辐射强度非常微弱,如两个质子构成的旋转体系辐射出的引力波强度仅为其辐射的电磁波的 $1/10^{37}$ 。再加上各种噪声的影响,从 1916 年爱因斯坦(Albert Einstein)发表了广义相对论,建立了引力场方程,预言了引力波的存在开始,人类用了整整一个世纪才目睹引力波的真容。

世界上最早探测引力波的实验,当属 20 世纪 60 年代美国马里兰大学的物理学教授约瑟夫·韦伯(Joseph Weber)领导的韦伯共振棒探测器^[40]。1969 年 6 月,J. 韦伯在美国辛辛那提举行的相对论学术会议上报告成功探测到了来自银河系中心的引力波信号,但后续经过数据分析被否定了。20 世纪 70 年代开始,世界各国纷纷建设并运行了多个共振棒探测器,比如:位于意大利帕杜瓦附近的 AURIGA(御夫座)和弗拉斯卡蒂的 NAUTILUS(鹦鹉螺)、位于瑞士日内瓦的 EXPLORER(探险者)等,我国中山大学也建立起常温共振棒探测器。但由于引力波信号极其微弱、共振棒探测器灵敏度的局限性和其探测频带过窄

(只有几赫兹到几十赫兹)等因素,这些尝试暂时还未达到预期结果。

引力波存在的间接证据来源于美国物理学家赫尔斯(Russell Alan Hulse)和泰勒(Joseph Hooton Taylor)对射电脉冲双星的观测。1974 年,他们利用位于波多黎各的 Arecibo 射电天文望远镜,发现了脉冲双星 PSR1913+16^[41],它是由两颗半径约为 10 千米、质量与太阳质量相当的中子星组成^[41]。其中一颗已经没有电磁辐射,而另一颗仍处于活动期,它的射电脉冲可以在地球上被观测到^[41]。根据广义相对论,当两个质量体绕其质心转动时,体系的质量四极矩会随时间发生改变,从而产生引力辐射。辐射出的引力波带走能量使系统的总能量减小,从而使轨道的长半轴变小,公转周期变短。持续观测了 PSR1913+16 十四年后,泰勒和赫尔斯发现其轨道的长半轴逐渐减小,绕质心转动的周期逐渐变短,这与广义相对论按引力辐射造成的周期变小率每年在极小的误差内吻合地极好^[42],第一次间接验证了广义相对论对引力波的预言。这个双星系统后来就被称为“赫尔斯-泰勒双星”,并为师徒二人赢得了 1993 年的诺贝尔物理学奖。

美国当地时间 2016 年 2 月 11 日,激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational Wave Observation,LIGO)召开发布会,宣布人类历史上第一个引力波事件探测的结果,这次引力波被命名为 GW150914^[7],由两个质量分别为 36 倍和 29 倍太阳质量的黑洞并合生成了一个质量为 62 倍太阳质量的黑洞,中间消失的 3 倍太阳质量转变为了引力波的能量。这次事件验证了爱因斯坦的广义相对论对于引力波的预言,是人类探索宇宙的一次新的里程碑。引力波的成果探测为天文学家提供了前所未有的方式观察宇宙,人类从此可以利用引力波来观测天体、研究宇宙,人类终于打开了引力波天文学的第一扇窗。

4.2 引力波作为探测手段的物理原因

将引力波作为人类认识和观测宇宙的又一个基本手段主要基于以下几方面原因。

(1) 相较于电磁波,光子在传播过程中会被宇宙学介质吸收、散射,从而难以到达地球,而引力相互作用弱,引力波在传播过程中受到的干扰就比较小,基本上不被吸收、不被散射、不被屏蔽,它能够将观测范围扩展到被宇宙尘埃弄暗或被其他物质屏蔽的宇宙区域,向我们提供天体源深处、高密度部分所发生的物理过程的完整信息。

(2) 引力波产生于波源整体的宏观运动,因此引力辐射所揭示的信息与电磁辐射观测到的不同,主要是波源宏观尺度的信息。例如对于一个双星绕转系统发射的引力波观测可以获得双星轨道的倾角,这类关于波源运动的宏观信息通常无法从电磁辐射观测中取得。

(3) 并非所有的天体物理活动都有相应的电磁对应体,比如双黑洞在完全真空的环境下并合,并不会释放电磁波辐射。这是因为双黑洞在旋近过程中会吸净、掏空周围的物质,导致电磁波信号无法释放出来。引力波的成功探测让人类首次观测到黑洞的碰撞和并合,可见,引力波能探测没有电磁辐射的、传统的电磁辐射天文学无法探测的天体及暗物质等,可帮助人类深入理解极端天体物理环境下的动力学过程。

4.3 引力波作为探测手段的大型实验

前文表 5 列举了一些经典的引力波探测实验。其中,长基线激光干涉仪引力波探测器已成为目前引力波直接探测的主要手段。下面简要介绍一下 LIGO 实验。

为了复合观测,LIGO 有两台探测器,一台位于美国西北角华盛顿州的汉福德,另一台位于美国东南角路易斯安那州的利文斯顿,两地相距 3002 公里且均属于人口稀少的偏僻地点。这两台探测器非常灵敏,它们可以“感觉到”地球上最微小的振动,也能够做到将引力波与局部噪声(地震、人类活动等)区分开来。

在设计上,每个 LIGO 探测器由两个臂组成,每个臂长 4km,由 1.2m 宽的钢制真空管组成,排列成“L”形,并由 10ft 宽,12ft 高的混凝土土庇护所覆盖,保护管道免受环境的影响。激光干涉仪引力波探测器是由光学、机械和电子学三部分组成。光学部分的主体结构如图 5 所示,它包括激光器、

清模器、臂上法布里-珀罗腔、光循环镜以及辅助光学系统与器件(如:调制解调器、光隔离器、波片、光信号引出系统、光探测器等)^[38,43]。

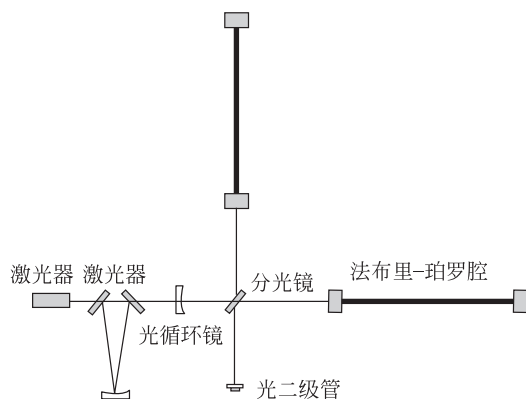


图 5 激光干涉光学部分主体结构示意图^[38,43]

激光干涉引力波探测器的原理是从激光器发出的一束单色的频率稳定的激光,在分光镜上被分成两束强度相等的光束,其中一束经分光镜反射进入干涉仪的一臂,而另一束透过分光镜进入与前一束光束垂直的另一臂。两束光在经历了相等的渡越时间后,发生干涉相减,若输出口呈现暗条纹,则表明光探测器没有进入光线,输出信号“0”,这是探测器的初始工作状态。当引力波来临时,由于其独特的极化性质,干涉仪两个臂的长度会发生相反的变化,即一臂伸长时,另一臂相应缩短,这导致两束相干光产生新的光程差,打破了相干减弱的初始条件,有一定数量的光线进入光探测器,使它有信号输出,该信号的大小与引力波振幅成正比,探测到这个信号即表明探测到引力波^[38]。

1991 年,第一代 LIGO 正式开始建设,2008—2015 年 LIGO 完成升级改造,取名为 Advanced LIGO,探测灵敏度提高了 10 倍,捕捉到了数次引力波信号(见表 6)。2017 年,欧洲处女座干涉仪 VIRGO(位于意大利比萨市)加入了 LIGO,LIGO 和 VIRGO 探测器的配合,实现了引力波探测器观测的网络化,力求对引力波的来源方位定位更加精准。LIGO 项目从第一个探测原型样机到得到实验结果,时间跨度 50 年,牵涉到上千名科学工作者,这在科学史上既是奇迹,又是莫大的启示。随着 LIGO 的节节胜利,引力波天文学成为一个热门的研究方向。在 LIGO 之后,更多引力波的探测项目被提出,引力波的探测也由此向更弱、更深、更宽频段的未来前进。我国也在积极推

进引力波探测项目,包括“太极”计划、“天琴”计划、阿里计划都在稳步推进。引力波天文学的研究将进入一个崭新的阶段。

表 6 LIGO 探测引力波事件列举

事件名称	事件
GW150914	LIGO 和 Virgo 探测到双黑洞并合
GW151226	LIGO 和 Virgo 探测到第二个双黑洞并合
GW170104	LIGO 和 Virgo 探测到第三个双黑洞并合
GW170814	LIGO 和 Virgo 探测到双黑洞并合
GW170817	LIGO 和 Virgo 首次探测到双中子星并合
GW190425	LIGO 和 Virgo 探测到双中子星并合
GW200105	LIGO 和 Virgo 探测到另一次双中子星并合

5 结语

电磁波、宇宙线、中微子、引力波,作为获取天体信息的四大信使,由于产生于不同的天体物理过程,携带了天体活动的不同信息,所以对于认识和探测宇宙而言,四大信使不仅是最基本的手段,而且只有在它们相互补充、互相联合的前提下,才能够通过“望闻问切”对宇宙进行综合观测,从而了解宇宙的奥秘。这种联合势必能够为我们带来全新的认知和理解,尤其对于一些复杂的天体物理过程。

在这四种信使当中,电磁波的探测最为成熟,宇宙线的探测已有百年历史,中微子的探测也已数十年,唯有引力波的探测才刚刚拉开序幕。目前我们将使用至少两种信使来对同一天体进行的观测研究称为“多信使天文学”,而真正的同时利用四大信使对同一天体进行观测研究的时代尚在未来。

参 考 文 献

[1] MAXWELL J C. A dynamical theory of the electromagnetic field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865, 155: 459-512.

[2] HERTZ H R. On electromagnetic effects produced by electrical disturbances in insulators[J]. Sitzungsber. d. Berl. Akad. d.

Wiss. 1887, 34: 273.

[3] JANSKY K G. Electrical disturbances apparently of extra-terrestrial origin[D]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1933, 21(10): 1387-1398.

[4] HESS V F. Penetrating radiation in seven free balloon flights[J]. Z. Phys., 1912, 13: 1084.

[5] COWAN Jr C L, REINES F, HARRISON F B, et al. Detection of the free neutrino: a confirmation[J]. Science, 1956, 124(3212): 103-104.

[6] HIRATA K, KAJITA T, KOSHIBA M, et al. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(14): 1490.

[7] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102

[8] MAXWELL J C. On physical lines of force[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1861, 21(141): 338-348.

[9] 胡中为,孙扬.天文学教程[M].上海:上海交通大学出版社, 2019.

[10] 南仁东.500m 球反射面射电望远镜 FAST[J].中国科学 G 辑:物理学、力学、天文学,2005(5):3-20.

NAN R D. 500m spherical reflector radio telescope FAST [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics, Astronomy, 2005(5): 3-20. (in Chinese)

[11] 南仁东,李会贤. FAST 的进展——科学、技术与设备[J].中国科学:物理学力学天文学,2014,44(10):1063-1074.

NAN R D, LI H X. Progress of FAST—Science, technology and equipment[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 44(10): 1063-1074. (in Chinese)

[12] LEE K. Searching for the nano-Hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2023.

[13] MILLIKAN R A. High frequency rays of cosmic origin [J]. Science, 1925, 62(1612): 445-448.

[14] KULIKOV G V, KRISTIENSEN G B. On the size spectrum of extensive air showers[J]. J Exp Theor Phys, 1958, 35: 441-444.

[15] APEL W D, ARTEAGA J C, BADEA A F, et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: Update on the KASCADE unfolding analysis[J]. Astropart Phys, 2009, 31: 86-91.

[16] NAGANO M, WATSON A A. Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays[J]. Reviews of Modern Physics, 2000, 72(3): 689.

[17] LINSLEY J. Primary cosmic rays of energy 1017 to 1020eV, the energy spectrum and arrival directions[C]. The International Cosmic Ray Conference. 1963, 4: 77.

[18] ZATSEPIN G T, KUZ'MIN V A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays[J]. J Exper Theor Phys Lett, 1966, 4: 78.

- [19] 厉海金,陈天禄,刘茂元. 宇宙线“膝区”物理简介及国内观测研究进展[J]. 天文学进展, 2013, 31(3): 361-374.
- LI H J, CHEN T L, LIU M Y. Overview of cosmic ray “knee region” physics and research progress in China[J]. Progress in Astronomy, 2013, 31(3): 361-374. (in Chinese)
- [20] 曹臻,陈明君,陈松战,等. 高海拔宇宙线观测站 LHAASO 概况[J]. 天文学报, 2019, 60(3): 3-18.
- CAO Z, CHEN M J, CHEN S Z, et al. Overview of high altitude cosmic Ray Observatory LHAASO[J]. Acta Astronomologica Sinica, 2019, 60(3): 3-18. (in Chinese)
- [21] CAO Z, AHARONIAN F A, AN Q, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray galactic sources[J]. Nature, 2021, 594: 33-36.
- [22] LHAASO Collaboration, CAO Z, AHARONIAN F, et al. A tera-electron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst[J]. Science, 2023, 380(6652): 1390-1396.
- [23] 中国科学院“江门中微子实验”战略性先导科技专项研究团队. 打开通往新物理世界的大门——“江门中微子实验”先导科技专项及进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(5): 685-692+707.
- Chinese Academy of Sciences “Jiangmen Neutrino Experiment” strategic pilot science and technology research team. Opening the door to a new physical world: The Pilot project and progress of the Jiangmen Neutrino Experiment [J]. Proceedings of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(5): 685-692+707. (in Chinese)
- [24] COWAN JR C L, REINES F, HARRISON F B, et al. Detection of the free neutrino: a confirmation[J]. Science, 1956, 124(3212): 103-104.
- [25] DANBY G, GAILLARD J M, GOULIANOS K, et al. Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos[J]. Physical Review Letters, 1962, 9(1): 36.
- [26] DAVIS JR R, HARMER D S, HOFFMAN K C. Search for neutrinos from the sun[J]. Physical Review Letters, 1968, 20(21): 1205.
- [27] HIRATA K S, KAJITA T, KIFUNE T, et al. Search for correlation of neutrino events with solar flares in Kamio-kande[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(23): 2653.
- [28] KODAMA K, USHIDA N, ANDREPOULOS C, et al. Observation of tau neutrino interactions[J]. Physics Letters B, 2001, 504(3): 218-224.
- [29] 张永鹏,杨长根. 从大亚湾到江门中微子实验[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(9): 6-17.
- ZHANG Y P, YANG C G. Neutrino experiment from Daya Bay to Jiangmen[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2019, 51(9): 6-17. (in Chinese)
- [30] 曹俊. 大亚湾与江门中微子实验[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, 44(10): 1025-1040.
- CAO J. Daya Bay and Jiangmen Neutrino experiments[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 44(10): 1025-1040. (in Chinese)
- [31] AN F P, BAI J Z, BALANTEKIN A B, et al. [Daya Bay collaboration] Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108: 171803.
- [32] CHO A. Crash project opens a door in neutrino physics. Science, 2012, 338: 1527.
- [33] ABUSLEME A, ADAM T, AHMAD S, et al. JUNO physics and detector [Z]. arXiv preprint arXiv: 2104.02565, 2021.
- [34] ADAM T, AN F, AN G, et al. JUNO conceptual design report[Z]. arXiv preprint arXiv: 1508.07166, 2015.
- [35] EINSTEIN A. Sitzungsberichte der Physikalisch-mathematischen Klasse[M]. Berlin: Preuss. Akad. Wiss., 1916: 688.
- [36] 张新民,苏萌,李虹,等. 宇宙起源与阿里原初引力波探测[J]. 物理, 2016, 45(5): 320-326.
- ZHANG X M, SU M, LI H, et al. The origin of the universe and the detection of gravitational waves in Ali Primorph[J]. Physics, 2016, 45(5): 320-326. (in Chinese)
- [37] 范锡龙. 贝叶斯引力波多信使天文学[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2018, 48(7): 57-68.
- FAN X L. Bayesian gravitational wave Messenger Astronomy[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2018, 48(7): 57-68. (in Chinese)
- [38] 王运永,朱兴江,刘见,等. 激光干涉仪引力波探测器[J]. 天文学进展, 2014, 32(3): 348-382.
- WANG Y Y, ZHU X J, LIU J, et al. Laser interferometer gravitational wave detector[J]. Progress in Astronomy, 2014, 32(3): 348-382. (in Chinese)
- [39] 朱兴江. 脉冲星计时阵列探测引力波[J]. 现代物理知识, 2016, 28(2): 10-14.
- ZHU X J. Pulsar timing array detection of gravitational waves[J]. Knowledge of Modern Physics, 2016, 28(2): 10-14. (in Chinese)
- [40] WEBER J. Evidence for discovery of gravitational radiation [J]. Physical Review Letters, 1969, 22(24): 1320.
- [41] TAYLOR J H. Discovery of a pulsar in a binary system [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1975, 262 (Seventh Texas Symposium on Relativistic Astrophysics): 490-492.
- [42] WEISBERG J M, NICE D J, TAYLOR J H. Timing measurements of the relativistic binary pulsar PSR B1913+16[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 722(2): 1030.
- [43] 朱宗宏,王运永. 引力波的预言、探测和发现[J]. 物理, 2016, 45(5): 300-310.
- ZHU Z H, WANG Y Y. Prediction, detection and discovery of gravitational waves[J]. Physics, 2016, 45(5): 300-310. (in Chinese)