

# 引力波探测中的标志性事例 GW170814和GW170817

王运永

(北京师范大学天文系 100875; 中国科学院高能物理研究所 100049)

金秋十月是收获的季节,引力波探测也频传佳音,不平凡的第四个事例GW170814和第五个事例GW170817相继发现。在引力波天文学的研究中具有里程碑式的意义。标志着引力波探测又跃上一个新台阶。

## 1. 第四个引力波事例GW170814

2017年9月27日,美国LIGO和欧洲VIRGO两个引力波项目组在意大利都灵召开新闻发布会宣布:2017年8月14日,从位于三个不同地点、相距遥远的引力波探测器,即位于美国路易斯安纳州利

弗斯通(Livingston)和华盛顿州汉弗德(Hanford)的两台激光干涉仪引力波天文台(LIGO)和位于意大利比萨附近的激光干涉仪引力波探测器VIRGO,几乎同时探测到一个新的引力波事例,这是人类发现的第四个引力波事例。随后该事例被命名为GW170814。图1给出了三个探测器测得的信号。

第四个引力波事例是由相互旋绕的两个黑洞并合产生的,两个黑洞的质量分别为太阳质量的31倍和25倍,合并后的黑洞质量约为太阳质量的53倍,剩余约3个太阳的质量转变成能量以引力波的形式释放出来。波源到地球的距离为18亿光年。

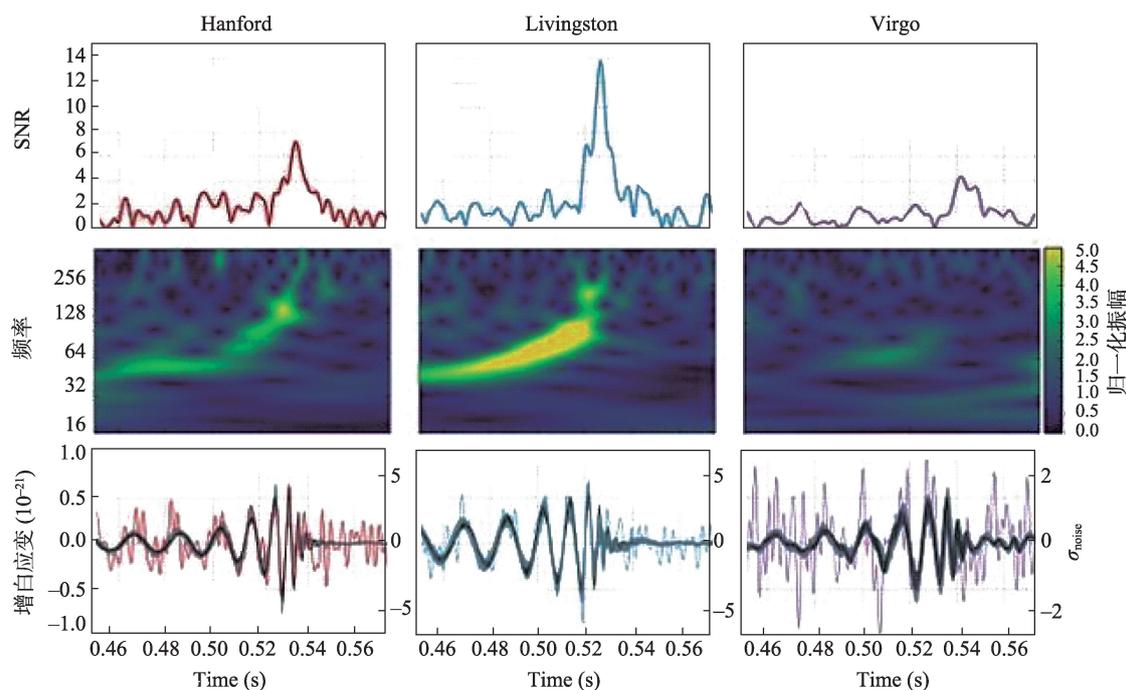


图1 三个探测器得到的第四个引力波事例GW170814信号

该事例的发现标志着引力波探测又向前跨越一大步,是一个“令人激动的里程碑”。

第四个引力波事件的发现具有十分特殊的意义,因为它被两个不同的实验组,在相距遥远的不同地点,利用结构相互有差异的探测器 LIGO 和 VIRGO 同时探测到的,前三个事例是都由 LIGO 自己发现的,虽然两台 LIGO 分别位于美国西北部的华盛顿州和东南部的路易斯安娜州,两地相距 3000 千米,由同一个噪声源产生同一个虚假信号的几率极小;但毕竟是由同一个实验组的两台结构相同的探测器发现的,难免引起某些人对事例真实性的怀疑。GW170814 的发现彻底打消了这些人对引力波事例真假的猜疑,直接导致了在探测结果正式发表一年多的时间内就获得诺贝尔物理学奖。这在历史上是十分罕见的。

引力波天文学是一个正在兴起的科学领域,像电磁辐射天文学一样,需要全世界的引力波天文台联网探测,分享数据,进行广泛的合作研究。GW170814 的发现迈出了第一步,开辟了引力波探测的新阶段,随着正在建造中的、位于日本神冈的地下低温引力波天文台 KAGRA 和印度的引力波天文台 LIGO-INDIA 的陆续建成并投入运转,国际引力波探测网和联合研究机制将被建立起来,通过共享数据及合作分析,引力波天文学的研究将取得更加辉煌的成就。

GW170814 是有史以来人类第一次同时使用三台探测器联手发现的,第三个探测器的加入大大提高了引力波源在太空中的定位精度。我们知道,利用单个探测器很难辨认引力波是从太空中哪个地方来的,因为在以探测器为圆心,以探测到的引力波源到探测器的距离为半径,我们可以在太空中划定一个球,由于测量精度是有限的,存在测量误差,我们在太空中划定的是一个壳很薄的空心球(空心球壳的厚度取决于探测器的精度)。被探测到的引力波源可能位于球壳上的任一点。如果利用设在不同地域的两个探测器进行测量,例如,位于美国路易斯安娜州和华盛顿州的两台激光干涉仪

引力波天文台 LIGO 同时进行测量,由于两个探测器的输出信息是同一个事件产生的,是相互关联的,我们可以很好地测量出两个探测器输出信息之间的时间差,而两个探测器之间的距离是已知的。利用两地的距离和时间差我们在空中划出的不是一个球壳而是一个带状圆环(图 2)。这个带状环内的任何一点都有可能是该引力波信号的发源地。

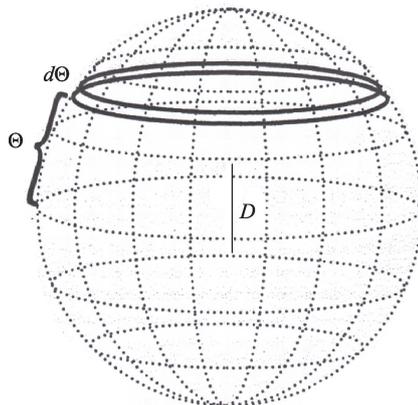


图 2 利用两个探测器得到的定位环

利用三个探测器进行符合测量时我们能够得到两个独立的时间差,利用距离及两个独立的时间差可以在太空中划定两个带状环,这两个定位带状环的交叉在太空中形成两个“补丁”,如图 3 所示。引力波信号可能是从这两个“补丁”中的任何一个内发出的。利用第四个探测器的观测将给出第三个时间差,它足以在太空中把引力波源定位在一个“补丁”内,利用更多的探测器联网测量,可以使“补

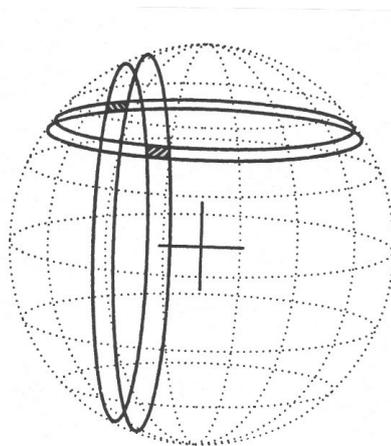


图 3 利用三个探测器得到的定位“补丁”

丁”缩得更小,使波源的定位精度得到极大的提高。

在图4中我们可以看到正式发表的第一个到第五个引力波事例及疑似事例LVT151012在宇宙空间的位置图,前三个事例和疑似事例都只能定位于一个圆环内,由于VIRGO的加入,第四个事例就可以定位于两个“补丁”之内了。这极大地提高了波源的定位精度。

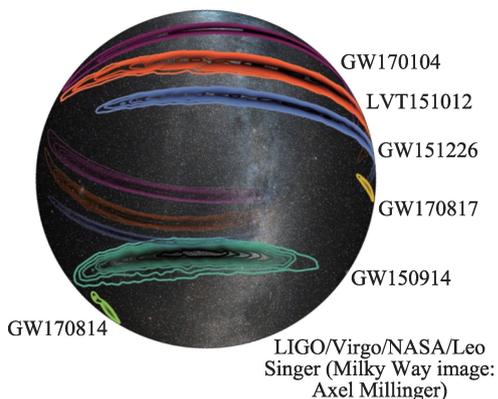


图4 第一到第五个引力波事例空间定位图

用位于世界各地的多台引力波探测器联合运转,科学家们能更加精确地判断引力波传播的角度方位,开展引力波极化方向的测量,为引力波理论的研究和验证提供重要依据。

## 2. VIRGO 引力波探测器简介

VIRGO是以法国和意大利为主的欧洲国家联合建立的一台激光干涉仪引力波探测器,位于意大利的比萨附近(图5),臂长为3千米,高级VIRGO的应变灵敏度为 $10^{-24}$ 量级,属于第二代激光干涉仪引力波探测器。



图5 激光干涉仪引力波探测器 VIRGO 鸟瞰

VIRGO也经历了与LIGO相似的发展历程,初级VIRGO几乎与LIGO同时开始建造,而且也在本世纪初建成并开始运转,在没有捕捉到引力波信号后,也像LIGO一样开始了第一次小规模升级改造,LIGO升级为加强LIGO(Enhanced LIGO)而VIRGO升级为VIRGO<sup>+</sup>,很小的改进见到了很大的功效,证明激光干涉仪引力波探测器具有极大的发展潜力,LIGO和VIRGO团队决定投入大量的人力物力对干涉仪进行大规模的升级,目标是把应变灵敏度从初级探测器的 $10^{-23}$ 提高一个数量级,达到 $10^{-24}$ 。第二次升级后的LIGO和VIRGO更名为高级LIGO(Advanced LIGO)和高级VIRGO(Advanced VIRGO),习惯上把它们称为第二代激光干涉仪引力波探测器,高级LIGO在建成后的试运行阶段就发现了三个引力波事例,而高级VIRGO也在今年8月的试运行阶段与高级LIGO一起发现了第四个引力波事例GW170814,标志着引力波探测进入了一个新的阶段。

虽然VIRGO与LIGO一样,是一个巨大的激光干涉仪,但它有非常讲究的地面震动噪声衰减系统(图6)和百米长的注入清模器,低频灵敏度比较高。作者有幸在VIRGO工作一年,参加了VIRGO的统调和数据分析,深知VIRGO结构的鲜明特点,对欧洲同事的友善和踏实、细致、一丝不苟的工作作风体会颇深。

## 3. 韦斯,巴里什和索恩荣获2017年度诺贝尔物理学奖

2017年10月3日瑞典当地时间上午11点50分,诺贝尔物理学奖评审委员会、瑞典皇家科学院秘书长约兰·汉森宣布,将2017年诺贝尔物理学奖授予3位美国物理学家韦斯(R. Weiss)、巴里什(B. Barish)、索恩(K. Thorne),以表彰他们对引力波探测器LIGO的决定性贡献及其对引力波的观测成果。这既是对三位科学家杰出贡献的奖励,也是引力波学术界的巨大荣耀(图7)。

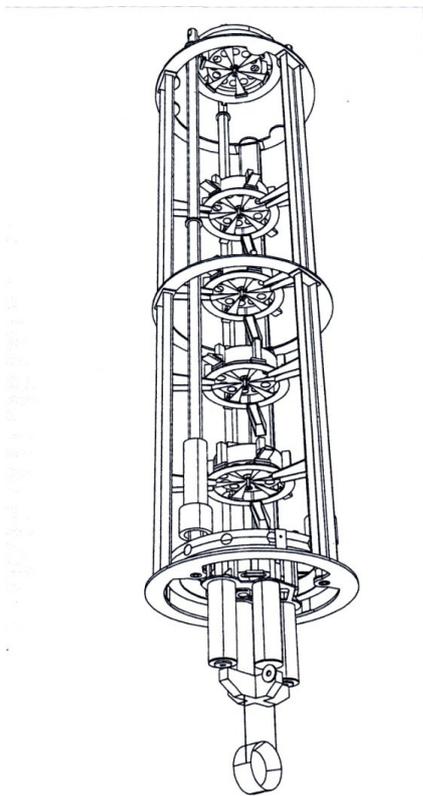


图6 VIRGO地面震动噪声衰减系统的镜子悬挂链



©视觉中国

图7 从左到右:巴里什、索恩、韦斯

利用干涉仪探测引力波的想法是1963年由苏联科学家杰特森斯坦(M. Gertsenshtein)和普斯特沃特(V.Pustovoit)首先提出来的,文章发表在俄文刊物*JETP*1962年第16期上,并未引起人们的注意。美国麻省理工学院教授韦斯也独立的想到了这个主意,他与他的学生福沃德进行过详细的讨论,虽然没有正式发表文章,但福沃德在实验室的正式记录本上做了详细的记录,并画有韦斯方案的草图。

1971年到1972年,韦斯对激光干涉仪进行了广泛深入的研究和设计,考虑了几乎所有的关键部

件,这是他第一次对激光干涉仪引力波探测器进行严格的技术检验。他还研究了干涉仪的噪声问题,指出了迄今为止研究人员仍然为之奋斗着的主要噪声来源,指出并全面论述了控制这些噪声的途径。韦斯全面而透彻的分析作为麻省理工学院(MIT)的一篇季度研究进展报告发表,至今仍被当作一篇里程碑式的论文发挥作用。韦斯出色的工作标志着激光干涉仪引力波探测器设计原型的诞生。在大型激光干涉仪引力波探测器LIGO的筹划和建造过程中,韦斯教授也起了关键作用。韦斯教授是位天才的实验物理学家,1932年生于德国,犹太人,1939年举家迁往美国。在实验物理方面有很深的造诣。

韦斯对中国人非常友好,本文作者在LIGO工作期间,有幸与他共事两年有余,彼此相当熟悉,经常一起讨论问题,一起值班,使作者深受教益。有一次值夜班,我对他说:“Ray,有一个问题我想了很久,一直想问问你。”“什么问题呀?”韦斯回过头笑眯眯地对着我,“加州理工学院和麻省理工学院一个在西部一个在东部,两者都是世界级名校,您和Kip都领导着一个很强的研究组,你们是怎样联合起来的?”这一问使我知道了LIGO名称的来历,并对两位知名物理学家韦斯和索恩的博大胸怀肃然起敬。

原来在1975年美国国家航空航天局NASA有意在太空进行广义相对论实验,组织了一个专门委员会进行论证,请韦斯担任该专门委员会主席,索恩是广义相对论方面的专家,韦斯邀请他参加6月份在华盛顿召开的论证会。由于时间紧迫,索恩没有订上酒店,韦斯把他接到自己的套房,刚在客厅内坐下两个人就有关引力波的问题攀谈起来,越说越激动,越谈越深入,内容涉及几乎所有引力波探测问题,后来干脆摊开一张大纸,把能想到的引力波探测中要做的一切实验都列了出来。等到两个人都有些倦意的时候,一缕阳光从窗帘缝里透了进来。经过彻夜长谈,两人决定正式联手,加州理工学院和麻省理工学院共同进行激光干涉仪引力波探测器的研发,并把这个引力波探测器的名称定为LIGO(Laser Interferometer Gravitational Observatory)。这是决

定 LIGO 命运的一个不眠之夜。在这次关键性的商谈之后,韦斯和索恩分别麻省理工学院和加州理工学院开始了 LIGO 的前期研究和团队建设。韦斯、索恩和德雷弗成为这个团队的负责人。随后更多高等院校加入进来,他们整合资源,着手筹建两台臂长 4 千米的激光干涉仪引力波探测器,一台位于华盛顿州的汉弗德,另一台位于路易斯安纳州利文斯顿。

索恩教授是美国知名物理学家,一直担任加州理工学院费曼理论物理学教授,在加州理工学院领导着全球顶尖的广义相对论研究中心。他与学生们一起力图把广义相对论与引力波结合在一起,找到一些实验物理学家们能够测量的参数,从而让广义相对论效应比较容易地进行测量。他们的研究奠定了引力波探测的理论基础,并在引力波波形计算以及数据分析的研究的方面进行了开创性工作。这个顶尖研究小组的加入极大地壮大了对引力波研究团队。1975 年在意大利西西里召开的引力波探测国际讨论会上,索恩对用激光干涉仪探测引力波的理论进行了深入分析,报告了对各种可能的引力波源所辐射的引力波强度的计算结果,引起广泛的关注。索恩教授搭建了整个 LIGO 的理论研究框架,对激光干涉仪引力波探测器在全世界的发展起了巨大的推动作用。

巴里什教授是美国著名的高能物理学家,具有惊人的组织才能。早在 20 世纪 70 年代,就领导着一个庞大的研究团队在美国斯坦福直线加速器中心的正负电子对撞机 PEP 上进行实验,80 年代,成为美国超级超导对撞机 SSC 上 GEM 实验项目的负责人,这是 SSC 上仅有的两个实验项目之一(另一个实验项目 SDC 的负责人是曾任美国物理学会主席的加州大学(伯克利)崔陵教授)。作者作为 GEM 合作组的成员,有幸与巴里什教授共事,研究探测器 GEM 的具体结构和实验方案,彼此留下深刻的印象。SSC 下马后巴里什教授受命于美国能源部,成为 LIGO 项目的负责人,对 LIGO 的建成作出了关键贡献。

应该说巴里什教授是临危受命,因为对具体方

案存在巨大分歧,两派互不相让<sup>①</sup>,LIGO 长期处于停顿状态并有中途夭折的危险。巴里什教授以胸襟宽阔著称,是矛盾双方都能接受的不二人选。他以快刀斩乱麻的方式迅速建立起新的 LIGO 实验室,自己担任主任,让得力助手、干练的加里·桑德斯为副主任,派得力干将马克·库尔斯去 LIGO 利弗斯通当台长,工作很快走上正规并使两台臂长 4 千米的激光干涉仪引力波探测器 LIGO 顺利建成并投入运转。取得了举世瞩目的成果。可以说,没有巴里什教授的努力,就没有今天的 LIGO,也没有今天引力波探测所取得的主要成就。他让 LIGO 成为了现实。他的获奖是众望所归,理所当然的。

巴里什教授对中国人民十分友好,关心中国的引力波研究,中美之间的一个引力波合作备忘录(即 MOU)就是由他和中国国家天文台台长艾国祥院士共同签署的。作者在 LIGO 工作期间受到巴里什教授的大力帮助和热情关怀,收获颇多并有幸在加州理工学院园内留下一张珍贵的合影(图 8)。



图 8 从左起,中科院地质地球所汤克云教授,Caltech 朱人元教授,LIGO 迪萨沃教授,LIGO 副主任桑德斯教授,LIGO 主任巴里什教授,本文作者

需要特别指出,作为 LIGO 创始人之一,苏格兰实验物理学家德雷弗(R. Drever)教授对激光干涉仪引力波探测器的发展作出了突出贡献。1976 年,他在英国格拉斯哥建造了一台小型激光干涉仪,第一次引进了法布里—珀罗腔,使激光干涉仪引力波探测器实现了质的飞跃。20 世纪 80 年代初,在美国国家基金委和加州理工学院的支持下,德里弗在加州

<sup>①</sup> 编者注. 具体背景请参考本期张双南的文章.

理工学院校园内建造了一个臂长40米、功能完备的激光干涉仪。应变灵敏度 $h \sim 10^{-15}$ 。上世纪90年代对它进行了升级,灵敏度达到 $10^{-18}$ 。随后经过长期的、持续不断地创新与技术改造,这台干涉仪渐近完美。虽然它尺寸不够长,难以算得上真正意义上的引力波探测器,但却是第一台真正意义上的激光干涉仪,是一个真正意义上的激光干涉仪实验室。激光干涉仪的很多新思想在这里诞生,很多新技术、新设备、新材料在这里制造、检验,然后推广到全世界。德雷弗的贡献是突出的、关键性的,他获得诺贝尔也是当之无愧的。但是,他于今年3月7日不幸去世,没有机会获此殊荣。

#### 4. 多信使天文学时代的到来

北京时间10月16日22点,美国国家科学基金会宣布:激光干涉引力波天文台LIGO和VIRGO于2017年8月17日美国东部时间8时41分(北京时间20时41分)发现一个引力波事例,命名为GW170817。经分析确定,第五个引力波事例是由相互旋绕的两个中子星并合产生的,两个相互旋绕的中子星的质量估计1.1到1.6倍太阳质量,比迄今为止观测到的黑洞的质量都要小得多,而恰好是中子星的质量范围,合并后形成一个新的中子星,有约0.025倍太阳质量转变成能量以引力波的形式释放出来。波源到地球的距离为1.3亿光年,这虽然是发现的第五个引力波事例,却是人类首次直接探测到由两颗中子星并合产生的引力波事件。长期以来引力波天文学家一直期待能够探测到双中子星并合产生的引力波信号,一则中子星在宇宙中很常见,有很多奥秘需要揭露;二则双中子星系统原在使用射电望远镜之前就已经用电磁辐射手段探测到。科学家热切希望能够找到既有引力辐射同时又有电磁辐射的天体源。GW170817就是这样的事例,它的发现具有十分重要的意义。

与双黑洞并合不同,双中子星并合过程不仅向外辐射出引力波,还会在多个波段发出电磁辐射,从而能被望远镜等电磁辐射探测装置观测到。这

种在发出引力波同时,又被电磁观测手段探测到的天体被称为引力波的电磁对应体。GW170817是人类第一次同时探测到引力波电磁对应体,是引力波研究中一个重要的里程碑,在天文学及物理学发展史上具有划时代的意义,标志着以多种观测方式特点的“多信使”天文学时代的到来。仅在LIGO观测到GW170817引力波信号1.7秒之后,美国宇航局的费米卫星上搭载的伽马暴监测器以及欧洲航天局INTEGRAL望远镜上搭载的SPI-ACS探测器,均探测到一个极弱的短时标伽马暴与该引力波事件相伴,随后,该伽马暴被编号为GRB 170817A。其后几天,光学望远镜还探测到该引力波源发出的X射线以及射电波段的电磁辐射。欧洲南方天文台(ESO)16日在网站上发布了用望远镜首次探测到引力波对应的光学信号,并公布了捕捉到的“引力波之光”的画面(图9)。



图9 欧洲南方天文台(ESO)的望远镜捕捉到的  
双中子星并合引力波之光

400多年来,人类观测宇宙的手段都是电磁辐射,包括射电、红外线、可见光、紫外线、X射线、伽玛射线等,探测装备是各种类型的天文望远镜,通过“成像术”来观察天体,认识宇宙,探测方法属于“类像”探测,用“无声电影”展现了宇宙的一个侧面。引力波的发现给我们提供了一个观测宇宙的新窗口。由于引力波的波长可以与天体源的尺寸相比拟,既不能用眼睛看,也不能用来照相或在电子屏上显示,引力波天文学的数据处理和手段与声波探测一样,用的是波形分析法,因此引力波

探测方法属于“类声”探测。引力波的频率范围很广,涵盖整个声音频率。通过这个窗口,我们可以用一首首动听的歌曲和美妙的交响乐展现宇宙的另一个侧面。引力波电磁对应体的发现让我们有机会用“有声电影”来观测宇宙,能够利用多种手段收集到的多种信息得到更丰富的资料,更深入、更精确地、更全面地揭示宇宙的奥秘。GW 170817的发现标志着多信使天文学时代的到来。

同时利用电磁辐射和引力辐射两种不同的探测原理和方法探测同一个天体,能更加精确地确定波源的空间位置,本事例利用 LIGO (Livingston), LIGO(Hanford)和 VIRGO 三台激光干涉仪引力波探测器可以把波源定位于空间的两个“补丁”之内,再加上美国宇航局的费米卫星上搭载的伽马暴监测器 Fermi/GBM 获取的电磁信号和其他探测器获取的电磁信号就可以将波源定位在一个较小的区域,图 10 给出了 GW170817 事例中引力波信号、短时标伽马暴和可见光源的位置。

### 短时标伽马射线暴的来源

伽马射线暴是天空中某一个方向伽马射线辐射突然增亮的现象。根据伽马射线暴时间长于或短于 2 秒,可分为长暴与短暴。科学家认为,长伽马

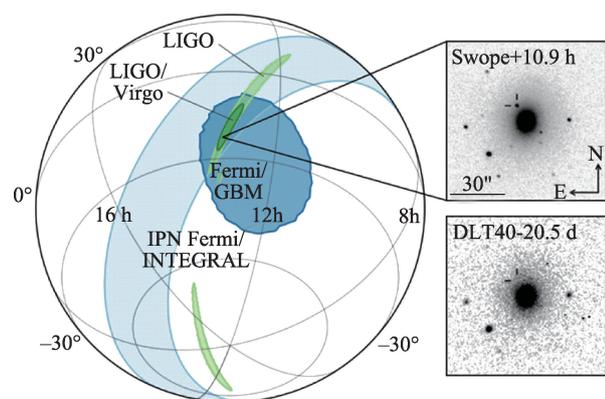


图 10 GW170817 事例中引力波信号、短时标伽马暴和可见光源的位置。在图中,浅绿色是两台 LIGO 的数据,深绿色来自两台 LIGO 和 VIRGO,浅蓝色来自费米与 INTEGRAL 时间延迟得到的三角定位,深蓝色来自费米的 GMB。右侧的放大图展示了宿主星系 NGC4993 的位置,右上图是双中子星并合后 10.9 小时的 Swope 光学发现图,右下图为双中子星并合 20.5 天前的图片

射线暴与大质量恒星塌缩形成黑洞的过程相关,短伽马射线暴则源自双中子星并合或中子星与黑洞并合。前者已被大量观测所证实,后者却一直没有找到直接观测证据。GW 170817 引力波电磁对应体的测量数据中人类第一次看到与引力波伴随的短伽马射线暴,支持了这种看法。

### 哈勃常数的测量

哈勃常数是衡量宇宙膨胀速度的重要参数。迄今为止,哈勃常数的值都是通过电磁辐射得到的。常用的方法有 Ia 型超新星测量、重子声波震荡、宇宙微波背景测量等。然而,随着探测精度的提高,不同方法测得的数值的差异越来越明显。例如,通过测量临近 Ia 型超新星得到数值,明显大于普朗克太空卫星通过宇宙微波背景观测得到的值,使天文学家深受困扰。引力波及其电磁对应体的发现,将提供测量哈勃常数的独立渠道。人们可以把由引力波测得的数据和由电磁波提供的信息联合起来,计算哈勃常数。以一种全新的方式和信息校准宇宙膨胀速度。

### 重金属的产生

理论认为,宇宙大爆炸产生了一些轻元素如氢、氦、氮、氧等,恒星燃烧又产生了一些较重的元素,但也只是到铁元素为止,而更重的元素如金银等的来源之一可能是双中子星并合(另一种来源可能是超新星爆发),但是没有实验根据。通过对此次事例中伴随的电磁辐射进行光谱分析,确实看到了重元素发出的光,为以前的理论提供了实验根据。

## 5. 结束语

GW170814 和 GW170817 事例的发现在引力波天文学研究中具有非常重要的意义,前者标志着全球多台引力波天文台联合研究的开始,后者标志着多信使天文学时代的到来,随着更多引力波天文台站的建成并投入运转,更多的引力波电磁对应体将被发现,更多的新数据、新现象、新奥秘将被揭示出来,引力波天文学将进入蓬勃发展的新时代。