

【Café 速递】范锡龙：引力波天文学——量子力学与相对论的完美结合

核心提示：2015年9月14日探测到的首个引力波信号 GW150914 标志着人类认识宇宙的引力波多信使时代正式开始了。本次报告回顾了引力波探测漫长曲折又激动人心的经历，介绍了科学的微观世界以及时空观，探讨了引力波探测在物理学、天文学研究中的意义以及蕴藏的哲学意义。

主持：陈佳晟 摄影：罗慧娇 文字：罗慧娇

>>>人物名片

范锡龙，武汉大学教授，中国引力与相对论天体物理学会会员，Kagra-武汉大学工作组组长，湖北省天文学会副理事长。2016年基础物理学特别突破奖获得者（因参与发现引力波与LVC成员一同分享）及2018年湖北省先进工作者。主持国家自然科学基金优秀青年基金，湖北省自然科学基金杰出青年基金。

>>>嘉宾小语

脚踏实地，仰望星空。

>>>报告现场

2021年3月5日晚上19:00，武汉大学物理科学与技术学院教授范锡龙做客 GeoScience Café 第291期讲座。范锡龙以引力波天文学为主题，介绍了引力波的本质，引入了科学的时空观，阐述了引力波的探测历程，借此引发对引力波探测的哲学性思考。



图1 报告现场

引力波是什么？

随着 LIGO（激光干涉引力波天文台）宣告首例引力波信号 GW150914 的发现，引力波多信使时代正式开始了。要说明引力波是什么，需要明确引力的本质。对此，范锡龙首先从伽利略的比萨斜塔实验出发（比萨斜塔实验：站在同一个位置同时抛掷两个小球，其加速度相等而与两者的物质构成无关）引入等效原理的思想，接着介绍了在伽利略等效原理基础上扩展的爱因斯坦等效原理，即若站在一个加速度与重力加速度相同的火箭上，我们无法将其与地球进行区分；然后由等效原理引发关于“引力是否真实存在？”的哲学性思考，并通过潮汐现象论证地球引力无法由坐标变换进行消除，说明引力是真实存在的；最后，从牛顿的时间和空间是绝对独立的经典时空观过渡到爱因斯坦广义相对论下的时空观，说明引力的本质是一种时空几何的效应，并以此阐述了地球围绕太阳运动的原因：太阳本身的质量造成了其周围时空的弯曲，地球围绕着该弯曲时空进行运动。

时空告诉物质如何运动，物质告诉时空如何弯曲。在明确爱因斯坦广义相对论中引力的本质是一种时空几何效应之后，范锡龙引入了引力波和黑洞的概念。

黑洞一开始是一个数学概念，1916 年史瓦西根据爱因斯坦场方程得到一个数学解（称为史瓦西解），史瓦西的数学解揭示的物理含义为：任何静态的球对称物体只要坍缩到其对应的史瓦西半径内，就变成了史瓦西黑洞。从描述静态球对称黑洞的史瓦西解开始，人类逐步构建了对黑洞的认知，在数学上得到了各种各样的黑洞解。“黑洞无毛定理”指出根据质量、旋转角动量和所带电荷量这三个物理量可对黑洞进行较为准确而全面的描述。关于人类对黑洞的具体认知，Genzel 和 Ghez 及其团队通过观察银河系中心的恒星运动，推算出恒星围绕一个质量约为太阳质量的四百万倍的不发光物体运动。目前物理学上认为该银河系中心的超大质量星体为超大质量黑洞，Genzel 和 Ghez 因发现该星体获得了 2020 年的诺贝尔物理学奖。此外，2015 年首例引力波信号 GW150914 的检测反映了两个黑洞的合并过程，也证明了黑洞的存在。

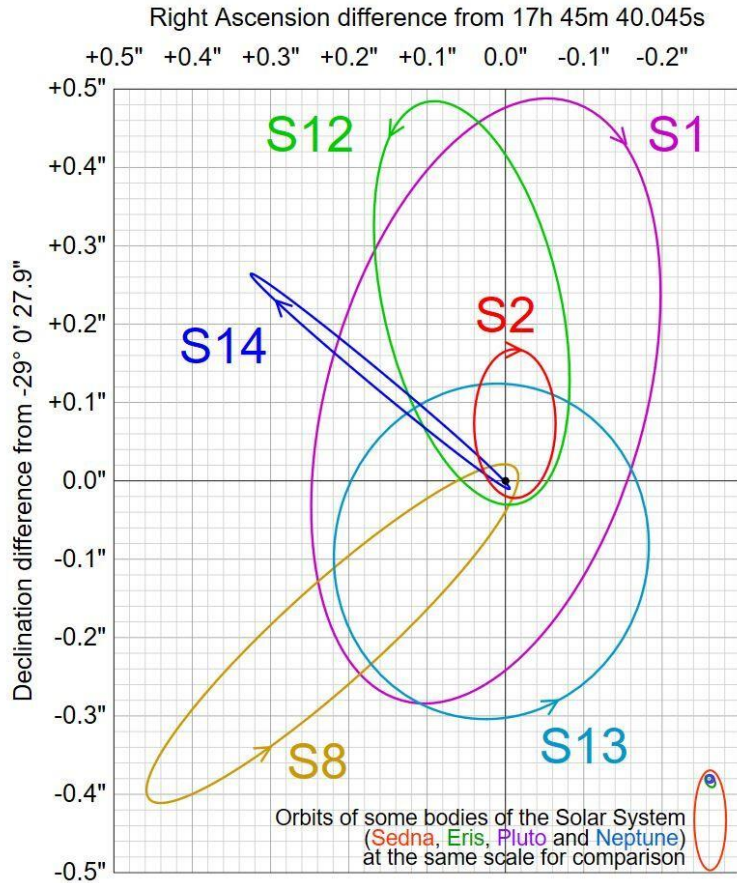


图2 银河系中心的超大质量黑洞 Sgr A*及其周围恒星

关于引力波的介绍,首先要说明波的概念。波在物理学上是一种扰动的传播,不同于电磁波、机械波等需要借助介质进行的波动现象,引力波的本质是时空以光速进行的扰动,其传播过程不需要借助任何介质。若将引力波之外的其他物理波动(电磁波、机械波等)比作舞台上的人产生的震动,则引力波就是舞台本身的震动。

THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM

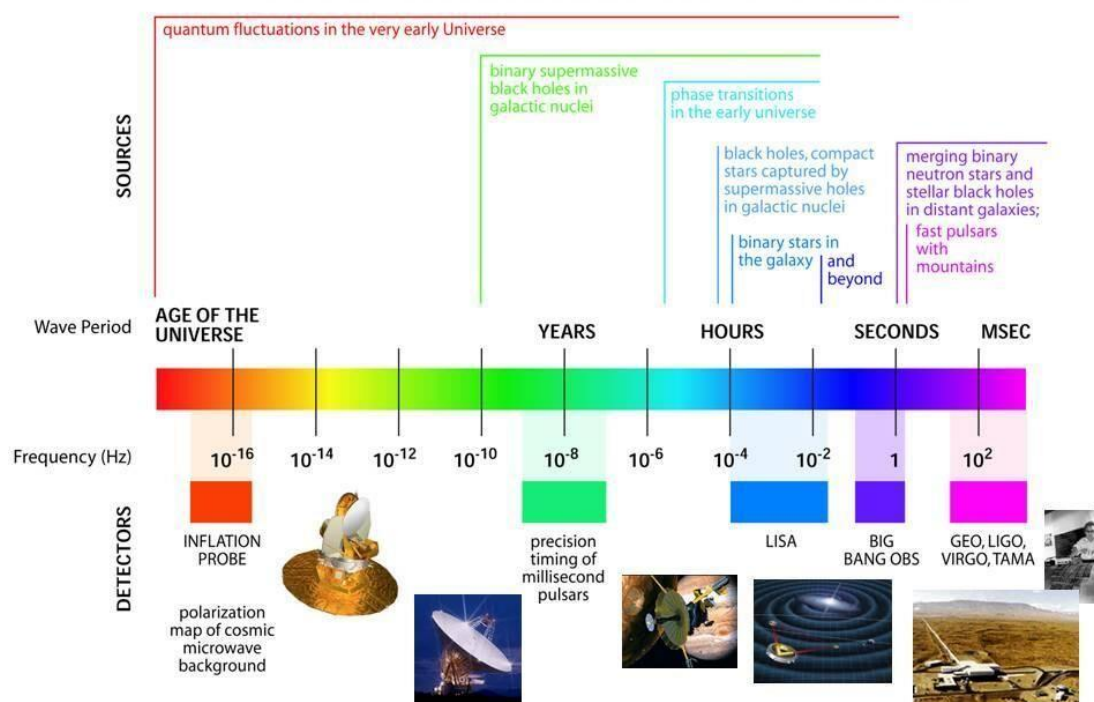


图3 引力波频谱

如何探测引力波？

范锡龙认为要在物理上证明一个物体或者现象为物理实在，需要证明该物体或者现象能与一个物理实在发生相互作用，即要在物理上证明引力波存在，就要证明引力波能与其他物质发生相互作用。理论上，对于空间中不受其他外力的自由粒子对，引力波可与其发生相互作用而使其相对位置发生变化，引力波是一种物理实在。尽管爱因斯坦在 1916 年就预言了引力波的存在，他本人却不相信引力波能够被探测到。根据引力辐射的最低阶是四极辐射可知，与传统的偶极辐射相比，引力波要微弱很多。爱因斯坦在文章中指出：在所有可能想到的情况下，引力波的辐射都可以忽略不计。关于引力波辐射强度的微弱程度，范锡龙以双中子星系统为例，当两个质量均为 1.4 个太阳质量的中子星以 200 赫兹的绕转频率进行并合时，系统辐射出的引力波仅使物体产生应变的程度是 10^{-21} ，即引力波只能使 1 公里长的物体变化 $10^{-18}m$ ，比 $10^{-15}m$ 的原子核半径还要小 3 个数量级。因此，探测引力波无疑是一件非常困难且有挑战性的工作。

要对引力波进行探测，除了明确其本质外，还需要明确其偏振模式。引力波为四极子结构，对应两个自由度，可分解为 h_+ , h_\times 两种偏振模式。其对应的典型波源有致密的双星系统、快速旋转的非球对称致密星体、超新星爆发和宇宙早期

暴涨留下的原处引力波背景。

关于引力波探测的实践，19 世纪 60 年代韦伯基于特定频率的引力波可使对应固有频率相同的物体长时间地发生“共振”效应的原理发明了“韦伯棒”进行引力波探测，并于 1968 年宣布利用共振棒探测到了引力波，但是他的实验结果并未得到重复验证，被学术界普遍认为是错误的。尽管韦伯并未探测到真正的引力波，他的首次实践却开启了引力波探测的新时代。可以说，没有韦伯，就没有引力波探测事业。



图 4 韦伯棒

19 世纪 70 年代赫尔斯和泰勒发现了脉冲双星系统 PSR B1913+16 并对其进行了观测，根据其向地球发射的精确周期性电脉冲信号计算出了该双星系统的周期变化，发现该双星系统的周期变化结果和根据爱因斯坦理论计算的引力辐射结果高度吻合，间接证明了引力辐射的存在，表明引力波携带能量。基于该发现，赫尔斯和泰勒获得了 1993 年的诺贝尔物理学奖。

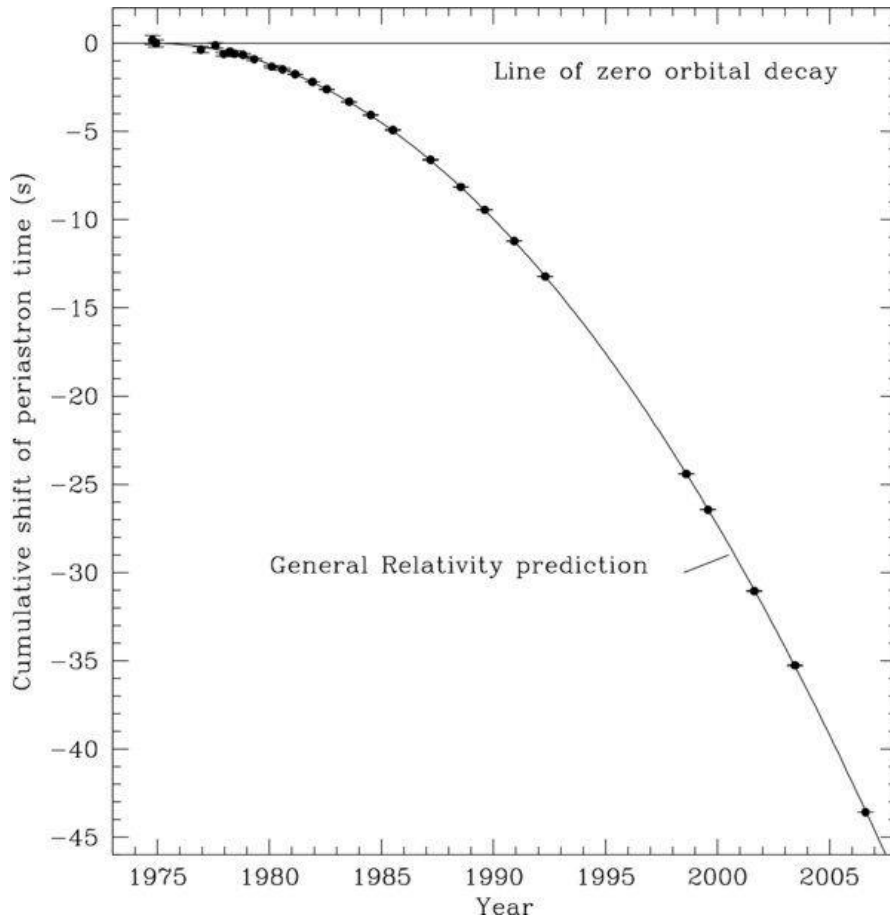


图5 PSR B1913+16 周期变化观测结果及对应理论计算的引力辐射

1992 年美国国家自然科学基金批准建设 LIGO 以进行引力波探测。LIGO 主要由两条长度为 4km 的干涉臂构成。探测器基于迈克尔逊干涉仪的原理，根据引力波经过时干涉臂周围时空由于信号偏振态的影响在物理尺度上会发生相应改变的现象，将仪器物理尺度上的变化转化为光线在两条干涉臂上走过时间的变化，获取相应携带引力波信息的相干图。

在实际设计中，LIGO 需要考虑包括环境因素在内的方方面面影响（如法布里珀罗干涉腔长度、减震系统、高强度激光真空装置和数据处理系统等），其建设不仅仅是物理学的问题，而是一个多学科合作的问题，涉及了机械学、电子学、光学和控制学等各个领域，挑战了人类仪器和技术的极限。2015 年 9 月 14 日 LIGO 探测到首例引力波信号 GW150914 不仅是引力波的胜利，而且也是多学科的胜利。

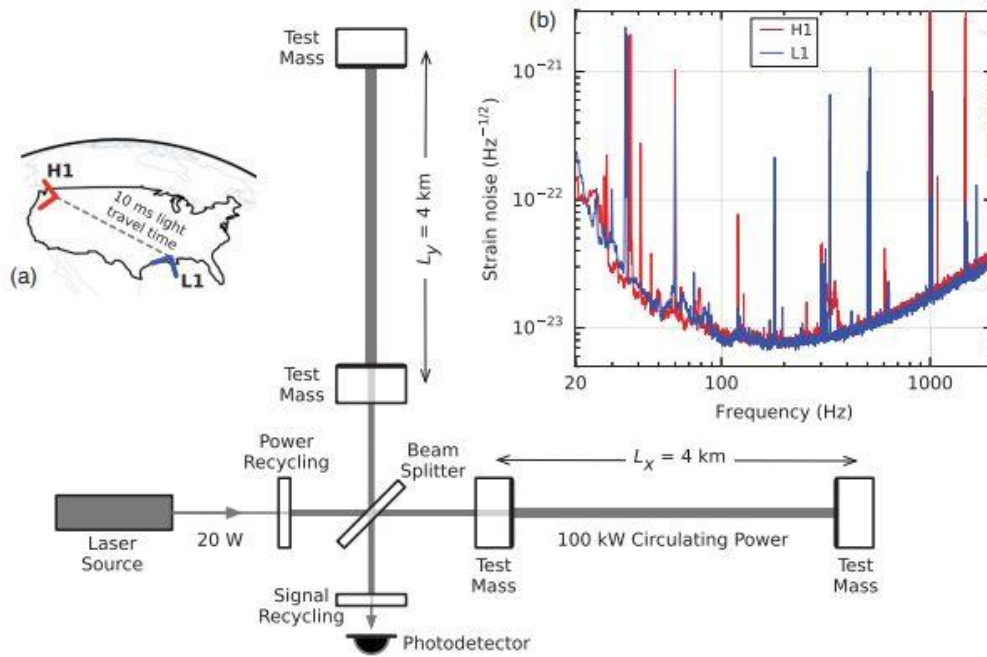


图 6 LIGO 工作原理及对应的噪声功率谱密度



图 7 第二代引力波探测器

目前，除了美国的 LIGO 之外，欧洲的 Virgo 也在进行探测，日本的 Kagra 最近也在科学运行，德国和印度也提出建设一个 600 米的探测器以构成第二代引力波探测网络。

此外，欧洲提出地下建设一个三条干涉臂长为 10 公里构成的三角形第三代探测器，相比于目前探测器，第三代探测器的灵敏度要高上 10 倍。在地面引力波探测的基础上，高灵敏度的空间引力波探测也在逐步推进。

回顾引力波的发展历程可知，首例引力波信号 GW150914 的发现是从 19 世

纪 60 年代到 2015 年历经三四代物理学家共同努力的成果, 宣告引力波可作为人类认识宇宙的新手段。

引力波信号 GW150914

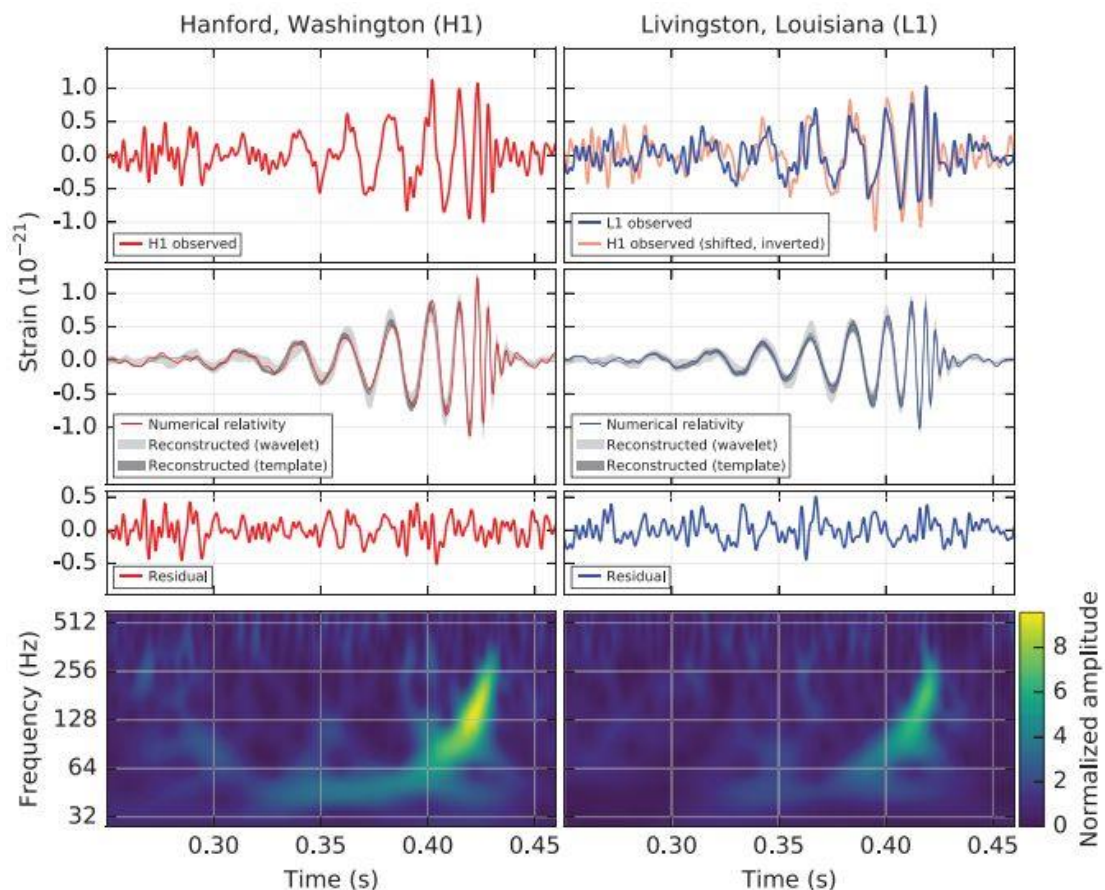


图 8 GW150914 的时间-应变关系及对应的时频变化关系

13 亿年前, 一个由质量为 39 个太阳质量的黑洞及 29 个太阳质量的黑洞构成的双黑洞系统经历旋进、并合和铃宕三个过程合并成了一个质量为 62 个太阳质量的黑洞, 并产生了携带能量为 3 个太阳质量的引力波信号 GW150914。尽管携带了如此巨大的能量, GW150914 经过 LIGO 时也仅使干涉臂长产生 10^{-21} 大小的应变。

关于 GW150914 的成功探测, 范锡龙指出其具有三个重大意义。首先, 证明了广义相对论中的预言, 发现引力波是真实存在的, 这也是 2017 年获得诺贝尔物理学奖的原因。其次, 发现了三十多个太阳质量的旋转黑洞是存在的, 即证明了黑洞的存在。最后, 证明了双黑洞系统的存在, 且系统中的双黑洞可在宇宙学年龄之内进行并合。

结合历史的发展进行思考, GW150914 的成功探测是无比震撼的。13 亿年前引力波信号 GW150914 已经产生, 而直到 8 亿年前地球上才出现多细胞生命,

6500 万年前恐龙灭绝，此后哺乳动物逐渐出现；254 万年前 GW150914 已经到达我们邻近的仙女座星系，而 80 万年前蓝田人才在地球上诞生；5 万年前 GW150914 已经进入银河系，而华夏文明直到 4000 年前才诞生；400 年前 GW150914 和北极星一样遥远，105 年前才有一个天才写了一个方程，能让我们理解这个信号的内涵；第一代 LIGO 探测器在 GW150914 到达地球之前的 5 年才建设成功，在最后的 4.5 个小时 GW150914 到达太阳系。在 2015 年 9 月 14 日北京时间 17:51，GW150914 穿越 13 亿年的光景到达地球，并被 LIGO 探测。结合历史的发展可知，期间任何一个环节出现问题，GW150914 都无法被探测到。

引力波信号 GW150914 的成功探测并不意味着故事的终结，而表明一个引力波多信使时代的开启。关于 GW150914，依然存在两个重要问题：第一，引力波信号的传播速度大小是多少？第二，引力波信号的偏振态是什么？对于第二个问题，解决方案相对简单，引力波偏振态测量可通过在地面上多建立几个探测器解决；对于第一个问题的解决方案相对复杂，引力波信号在宇宙中传播的整个过程无法被探测，其传播至地球的过程中可能出现各种各样的问题，可能途径大质量天体形成的引力透镜系统。针对引力波传播速度的问题，范锡龙指出他们团队研究出了一种测量方法，原理是构造一个路程相等的系统进行信号传播的时间差测量以比较引力波和电磁波的速率大小，若引力波和电磁波经过该系统的相等路程对应的时间差不同，即说明引力波传播速度与广义相对论预言不符，则可说明广义相对论的错误，借由引力波信号，人类可对广义相对论适应的边界进行探究。

思考与展望

除了首例引力波信号 GW150914 以外，LIGO 陆续探测到了包括双黑洞并合、双中子星并合及黑洞-中子星并合产生的引力波信号。在对目前已经探测到的引力波信号事件进行分析可发现中子星系统并合产生引力波信号的过程尤为重要，这是因为中子星在并合过程中产生了大量的“金子”，向外抛射各种各样的物质，其中就有构成人体所必须的微量元素。通过对引力波信号 GW170817 对应中子星并合过程中抛射的物质进行观测，人类明确了一些元素是从太空中来的，补全了元素周期表内各个元素的来源。中子星并合过程中抛射的这些物质对于人类生命的构成而言至关重要，人类是上一代恒星死亡的产物，从这个角度可以引申恒星是否真正“死亡”的问题，并对人类的存在进行进一步思考和联想。

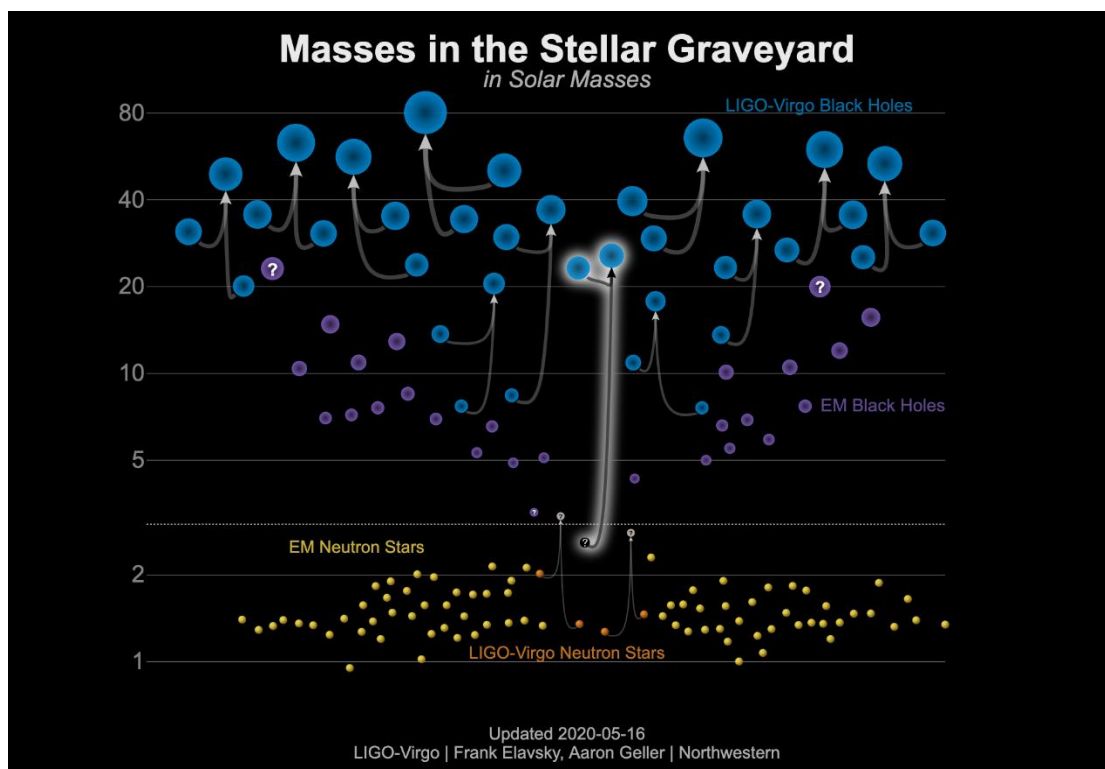


图 9 LIGO 探测到的引力波事件

生活中各种各样的物体大多是由分子原子构成的，而原子核由夸克组成，在量子物理学中，这些夸克因为费米能级而保持一定的距离，没有因为强引力作用完全合在一起。量子力学表明物质存在一定的致密程度，即致密程度是有限的。目前为止普遍认为中子星代表了量子力学中物体致密程度的一种极限情况。以北京天安门为中心，1.4 个太阳质量的中子星仅比四环大一点，这表明中子星是非常致密的；若在保持该物理尺度大小不变的情况下，天体的质量大于 1.4 个太阳的质量时，天体构成的有限空间无法抵抗如此强大的引力，只能坍缩成黑洞。引力造成了中子星的高度致密，量子物理决定中子星的致密程度是有限的，保证中子星内部的稳定。关于中子星和黑洞两者之间的界限，目前依旧不明朗。最近 LIGO 探测到一起由质量为 2.7 个太阳质量的天体并合产生的引力波信号引发科学界的关注，至今无法明确该信号对应的波源是中子星还是黑洞。

实际上，基于引力波信号可延伸出很多问题，除了物理层面上，引力波数据处理方面也存在很多挑战。不同波源系统产生引力波信号的性质有所差异，且引力波探测器在探测过程在受到包括仪器噪声在内的各种噪音的影响下会将引力波信号淹没，数据处理系统需要对各种复杂噪声进行锁定，并通过匹配滤波、机器学习等方法将引力波信号提取出来。第三代探测器的高灵敏度探测可能会获得引力波信号叠加的结果，目前的信号处理系统不适用于这种叠加信号，因此引力波信号处理方面也需要方法流程上的突破。

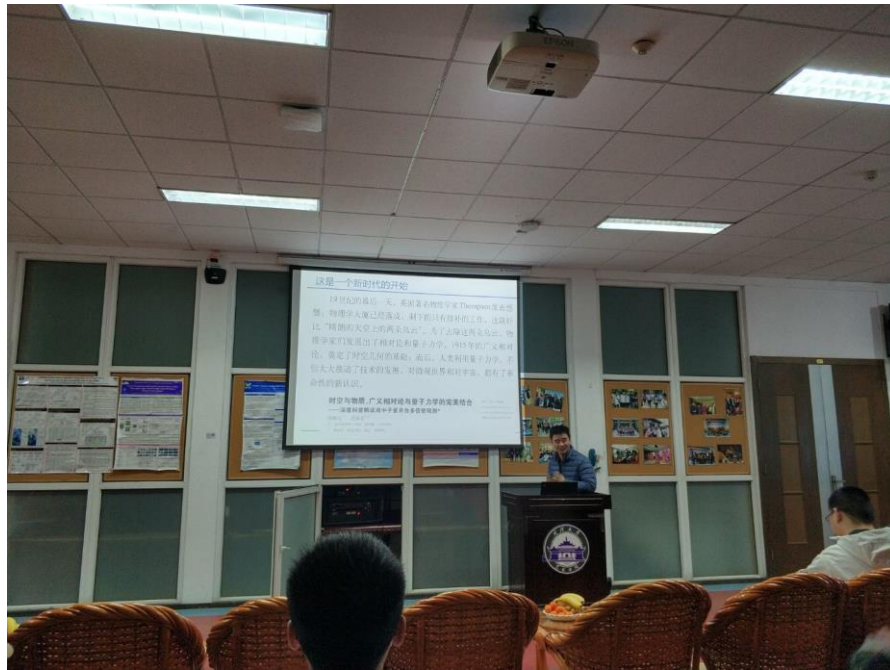


图 10 讲座结尾

>>>互动交流

提问人一：我们之前提到的引力波速度，现在可以确定是光速是吧？

范锡龙老师：关于引力波速度的测量，我在讲座过程中没有具体展开。我们在 2017 年的时候做了相关实验，现在只能说引力波传播速度在一定误差范围内是光速。17 年双中子星并合产生了一个引力波信号和一个电磁波信号，引力波信号比电磁波信号早 1.7 到达地球，但是特殊的物理机制，可以根据时间差进行限制。

提问人一：你的文章提出了引力波速度测量的新方法，请问采用的是什么样的数据呢？

范锡龙老师：目前探测器在信号检测方面存在局限性，我们的测量方法目前还没有找到合适的数据进行检测，只是理论上的。在第三代探测器建成之后的 20 世纪 30 年代，我们有机会检测到适用于这种方法的数据。

提问人二：我想问一个宽泛的问题，物理学认为这个世界的诞生起源于宇宙大爆炸，但是基督徒的创世说认为这个世界是由上帝创造的，如果是站在物理学的角度是您怎么看待就是不同的体系和信仰认识世界的观点？什么是真正的物理学真实？

范锡龙老师：物理学认识世界的观点是：存不存在取决于是否发生相互作用，真实的物理存在必须有相互作用。我没有说这一观点一定正确，对此我也可以举一个例子反驳自己的观点。爱情一定真实存在，我不认为它会在自己身上发生什么

相互作用，这个思想一定真实存在，但是它不是物理实在。有人提出思念是一种病，这能用物理学来解释吗？好像也不行。我只是说在物理学上，没有相互作用，我就说它不存在，但是我没有说你所说的那个东西到底是不是正确的，因为我们的判据都不一样，当判据不一样的时候，我不能说你是对的还是错的，但是我只能说我是因为物理学的判据才来这里做报告的，没有物理学就没有我的这个报告，其他所有判据都不能让我站在这做报告，对吧？这是第一，然后什么叫真正的物理学真实，我觉得可以演示一下什么叫真正的物理学。黑洞存不存在？对于数学家来说，这个方程解出来它就存在了，对天文学家来说，看到这个现象它就存在了。在物理学层面上，你得看到黑洞自身产生的引力波才存在。物理学另外一点就是实验要有可重复性，你不能说今天有，明天可能就没有了。

提问人三：老师，我想问一个问题，引力波的本质是时空的扰动，如果有两个不同方向的引力波同时到达地球，两者产生的时空扰动是否会发生相互作用？根据探测器探测的结果我们是否无法对信号进行区分？

范锡龙老师：非常好的问题。这实际上就是下一代引力波数据处理所要面临的问题。关于引力波信号的叠加，第一个问题是，引力波信号的叠加是线性叠加还是有干涉、衍射效应的影响？引力波信号叠加这个事情随着探测器灵敏度的增加一定会发生，只要物质运动，引力波就会产生。叠加的引力波信号如何处理？这就是 LISA data challenge。这是一个理论上的问题，实际上我无法回答，我现在正在研究这个问题，我不知道能不能做到，我个人是比较悲观的。然后另一件事情是引力波会不会产生干涉和衍射效应？这个方面我们发了各种文章来阐述引力波如何产生衍射和干涉效应，都处于研究的状态中，衍射应该一定会发生，只要引力波入射一个黑洞，一定会产生衍射和干涉效应，但是怎么观测目前也是在理论研究阶段，还没有学生来研究这个方面。

GeoScience Café 以“谈笑间成就梦想”为目标，于每周五晚 7:00 在实验室四楼休闲厅，邀请 1-4 位嘉宾，为大家带来学术报告或经验分享。报告内容包括摄影测量与遥感、地理信息系统、导航与定位服务等研究方向，听众可在报告结束后向嘉宾提问、与嘉宾交流探讨，同时每学期还会举办 2 期人文类讲座和 2 场导师信息分享会。每期报告会根据嘉宾意愿在 B 站开设直播，使不能来到现场的听众同步参与。报告 PPT 和视频会在征得嘉宾同意的情况下在 qq 群和 B 站上发布。

更多精彩内容（讲座预告、讲座回顾、报告 PPT、报告视频）敬请通过以下方式获取：



QQ群



微信公众号



B站直播