

2017年诺贝尔物理学奖解读

安宇森 蔡荣根[†] 季力伟 刘同波 王少江

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2017-11-20收到

[†] email: cairg@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20171202

Introduction to the 2017 Nobel prize in physics

AN Yu-Sen CAI Rong-Gen[†] JI Li-Wei LIU Tong-Bo WANG Shao-Jiang

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 文章简单解读了2017年诺贝尔物理学奖, 获奖者的主要贡献, 目前观测到的几个引力波事件, 美国LIGO项目的简单历史, 以及引力波观测对基础物理、宇宙学和天体物理的科学意义。

关键词 引力波, LIGO, 诺贝尔奖

Abstract A brief overview is presented of the 2017 Nobel prize in physics, the key contribution of the laureates, gravitational wave events observed so far, the history of the LIGO project, and the scientific significance of gravitational wave observation for fundamental physics, cosmology and astrophysics.

Keywords gravitational wave, LIGO, Nobel prize

1 成功探测到引力波

2016年2月11日, 美国激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 以下简称LIGO)和美国国家科学基金会联合召开新闻发布会, 宣布人类第一次直接探测到了引力波, 一举证实了爱因斯坦广义相对论的两大预言: 黑洞和引力波的存在性。相关文章同一天发表在美国物理学会的《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)^[1]。

LIGO团队宣布, 在2015年9月14日协调世界时(UTC)9时50分45秒, LIGO的两台独立探测器(LIGO Livingston 和 LIGO Hanford)先后观测到了一个引力波瞬变信号(transient gravitational-wave signal)(图1)。该引力波信号的应变(strain)强度随着频率从35 Hz开始增强直到250 Hz达到峰值 1.0×10^{-21} 。该引力波信号持续约0.2 s, 共经历约10个周期。通过匹配滤波(matched-filter)方

法, 该引力波信号的信噪比(signal-to-noise ratio)达到24并且误报率(即该信号是由一致性随机噪音所产生的概率)低于二十万年分之一, 可以近似等效为大于 5.1σ 的置信度。用于匹配滤波的波形(waveform)模板符合广义相对论所预言的一对相互旋进(inspiral)、并合(merger)直至铃宕(ring-down)为单一黑洞的双黑洞(binary black hole)系统。该双黑洞系统到我们地球的光度距离(luminosity distance)为 410_{-180}^{+160} 百万秒差距(Mpc), 经宇宙学标准模型换算后对应于红移 $0.09_{-0.04}^{+0.03}$ 。双黑洞系统的两个黑洞的初始质量分别为 36_{-4}^{+5} 和 29_{-4}^{+4} 个太阳质量, 并合后的黑洞质量为 62_{-4}^{+4} 个太阳质量, 其中有 $3.0_{-0.5}^{+0.5}$ 个太阳质量以引力波的方式辐射出来。这次引力波事件的并合产物是一个旋转的克尔(Kerr)黑洞, 其自旋参数被限制在 $0.68_{-0.06}^{+0.05}$ 范围内。但是由于LIGO只有两台独立的探测器, 在天球上的方位只能被限制到一个590平方度的区域内。这次引力波事件被命名为GW150914, 它

宣告了引力波天文学新时代的到来。其重要意义在于：第一，确认了恒星级质量双黑洞系统的存在性；第二，首次直接探测到引力波；第三，首次观测到双黑洞系统的并合事件。

在第一次成功探测到双黑洞并合引力波事件 GW150914 之后的两年内，LIGO 团队又陆续发现了 5 起引力波事件，按照发现时间被分别命名为 GW151226^[2]、GW170104^[3]、GW170608^[4]、GW170814^[5] 和 GW170817^[6]。其中 GW151226、GW170608、GW170104 和 GW170814 均为双黑洞并合引力波事件，GW170817 为双中子星并合引力波事件。另外，还有一个疑似信号 LVT151012。下面简要介绍到目前为止观测到的 5 起引力波事件(图 2，图 3)。

GW151226 事件在 2015 年 12 月 26 日协调世界时 3 时 38 分 53 秒被 LIGO 的两个独立探测器成功探测到，且 Hanford 观测到的信号比 Livingston 观测到的信号滞后约 1.1 ms。该信号最初是在一次旨在搜索双黑洞并合的在线匹配滤波中被筛选出来，经过线下分析还原得到信号的信噪比已经达到 13 且置信度大于 5σ 。它在频带中存在的时间约为 1 s，其频率和振幅从 35 Hz 开始增大，直到 450 Hz 达到应变峰值 $3.4^{+0.7}_{-0.9} \times 10^{-22}$ ，其间共经历约 55 个周期。作为引力波源的双黑洞，初始质量分别为 $14.2^{+8.3}_{-3.7}$ 和 $7.5^{+2.3}_{-2.3}$ 个太阳质量，并合后的黑洞质量为 $20.8^{+6.1}_{-1.7}$ 个太阳质量，光度距离为 440^{+180}_{-190} 百万秒差距(Mpc)，对应红移为 $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ 。GW170104 事件在 2017 年 1 月 4 日协调世界时 10 时 11 分 58.6 秒被处在第二轮运行(second run)的 LIGO 的两个独立探测器成功探测到，信噪比达到 13 且误报率小于七万年分之一。黑洞双星并合前质量分别为 $31.2^{+8.4}_{-6.0}$ 和 $19.4^{+5.3}_{-5.9}$ 个太阳质量，并合后的黑洞质量为 $48.7^{+5.7}_{-4.6}$ 个太阳质量，光度距离为 880^{+450}_{-390} 百万秒差距(Mpc)，对应红移为 $0.18^{+0.08}_{-0.07}$ 。GW170608 在 2017 年 6 月 8 日由 Advanced LIGO 的两台探测器共同探测到。两个黑洞的质量分别为 12^{+7}_{-2} 和 7^{+2}_{-2} 个太阳质量，信噪比为 13，光度距离为 340^{+140}_{-140} 百万秒差距(Mpc)，对应红移为 $0.07^{+0.02}_{-0.02}$ 。这是目前引力波天文台观测到的最轻质

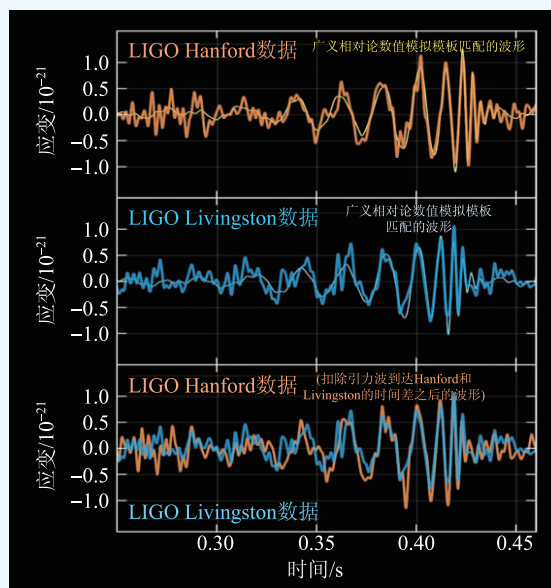


图1 引力波事件GW150914观测到的信号

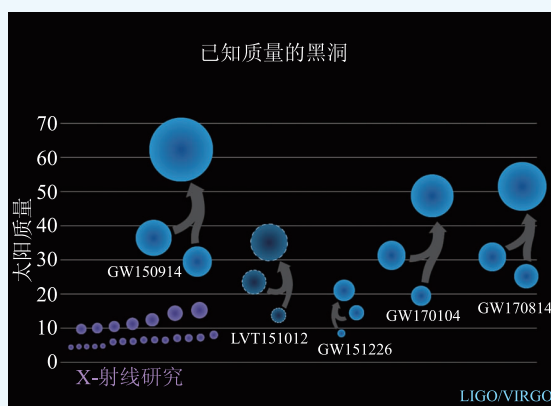


图2 几个观测到的黑洞并合事件



图3 几个引力波事件的观测时间和振幅

量的黑洞双星系统。GW170814 事件在 2017 年 8 月 14 日协调世界时 10 时 30 分 43 秒由新上线的 Advanced Virgo(处女座干涉仪, Virgo interferometer,

以下简称 Virgo) 探测器和 Advanced LIGO 的两台探测器共同探测到, 其信噪比在三探测器网络的匹配滤波下达到 18 且误报率约为每两万七千年一次。黑洞双星并合前质量分别为 $30.5^{+5.7}_{-3.0}$ 和 $25.3^{+2.8}_{-4.2}$ 个太阳质量, 并合后的黑洞的质量为 $53.2^{+3.2}_{-2.5}$ 个太阳质量, 光度距离为 540^{+130}_{-210} 百万秒差距(Mpc), 对应红移为 $0.11^{+0.03}_{-0.04}$ 。由于第三个引力波探测器即 Virgo 的加入, 本次引力波事件的定位可以确定到天球上一块 60 平方度的区域(图 4)。这几次引力波事件的成功探测表明 LIGO- Virgo 确实有能力在未来使得引力波的直接探测成为常态化。

GW170817 事件在 2017 年 8 月 17 日协调世界时 12 时 41 分 04 秒被升级后的正处于第二轮运行(second run)末期的位于美国的 Advanced LIGO, 和正处于第一轮运行(first run)初期的位于意大利的 Advanced Virgo 成功探测到。这次引力波探测的匹配滤波及其随后的电磁波全波段探测表明引力波源是一对相互旋进的双中子星, 其中主中子

星质量在 1.36 到 2.26 个太阳质量之间, 次中子星质量在 0.86 到 1.36 个太阳质量之间, 总质量在 2.73 到 3.29 太阳质量之间。考虑到双中子星的自旋参数在 -0.01 到 0.17 之间, 那么每个中子星质量应当在 1.17 到 1.60 个太阳质量之间且总质量在 $2.74^{+0.04}_{-0.01}$ 个太阳质量之间。这些质量值符合目前观测到的中子星质量范围。这次引力波事件的双中子星的光度距离为 40^{+8}_{-14} 百万秒差距(Mpc), 位于天球上长蛇座附近一个 2 度宽 15 度长的 28 平方度的区域, 宿主星系被确定为 NGC4993, 信号持续时间约为 1 分钟, 信噪比达到史无前例的 32.4, 误报率为每八万年一次。所以这次引力波事件也是迄今为止所观测到的离我们最近、定位最准、持续时间最长且信噪比最高的一次引力波事件。与之相伴随的伽马射线暴被命名为 GRB170817A, 它在中子星并合的引力波信号到达地球之后 1.7 s 即被美国国家航空航天局(NASA)的费米(Fermi)卫星和它所搭载的伽马暴监视器(GBM)所捕捉到, 后续的多波段余晖包括 10 小时 52 分钟后的明亮可见光源(千新星: kilonova)、11 小时 36 分钟后的红外辐射、15 小时后的紫外辐射、9 天后依然还可以观测到的 X 射线、以及 16 天后仍可见的射电信号, 但是在这次双中子星并合引力波事件方向上没有观测到中微子爆发信号。这次史无前例的引力波—电磁波联合观测的重要意义在某种程度上甚至超过了引力波事件 GW150914: 它不仅第一次观测到双中子星系统并合所产生的引力波信号, 还第一次观测到双中子星并合所产生的全波段的电磁波信号, 宣告了多信使(multi-messenger)天文学新时代的到来。值得一提的是, 我国南极巡天望远镜 AST3-2 和“慧眼”号硬 X 射线调制望远镜也参与了这次联合观测, 并作出了重要贡献。

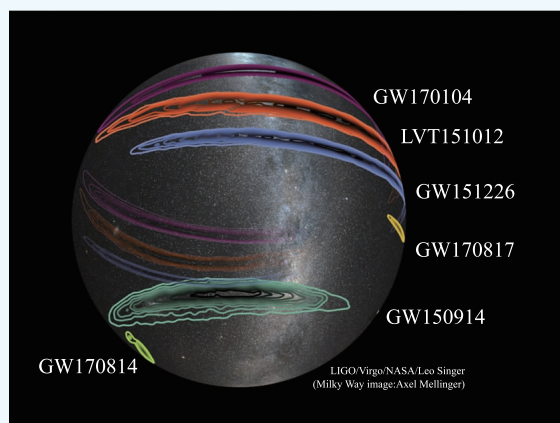


图 4 引力波源的天区



图 5 2017 年诺贝尔物理学奖获得者

2 诺贝尔奖得主

引力波的探测是人类科学史上的重要事件。不出所料, 2017 年的诺贝尔物理学奖授予了对引力波探测作出重要贡献的 3 位美国物理学家。

其中一半奖金授予麻省理工学院(MIT)的 Rainer Weiss 教授, 另外一半奖金由加州理工学院(Caltech)的 Kip S. Thorne 和 Barry C. Barish 教授分享(图 5), 以表彰他们在 LIGO 项目和引力波观测中的决定性的贡献(decisive contribution)。另一位需要被铭记的重要贡献者是同样来自加州理工学院的 Ronald Drever 教授(图 6), 他与 Kip S. Thorne 和 Rainer Weiss 一道是 LIGO 项目的共同创建者(cofounder)。Ronald Drever 教授非常遗憾地在今年 3 月 7 日离世, 未能分享这一荣誉。但是他在引力波探测中作出的巨大贡献应该被世人铭记。

下面简要介绍 4 位功勋人物的历史贡献。

Rainer Weiss 教授提出了利用激光干涉仪来检验自由悬挂的镜子之间的相对运动从而达到直接探测引力波的目的, 并将想法付诸实践, 制造了 1.5 m 的引力波探测器的原型机。1972 年, Rainer Weiss 在麻省理工学院的 *Quarterly Progress Report* 发表了题为“Electromagnetically Coupled Broad-band Gravitational Antenna”的文章, 详细论证了引力波激光干涉仪所面临的所有基本的噪声源并设计了相应的解决方法。这是 LIGO 项目的最早蓝图。

Ronald Drever 教授采用了 Fabry—Pérot 共振腔使光多次反射来达到增加臂长的目的, 更重要的是, 他还发明 Pound—Drever—Hall 激光稳频技术。这些技术对于之后 LIGO 大幅度提高探测灵敏度发挥了重要作用。他也曾制造过 40 m 的引力波探测器的原型机。



图 6 Ronald Drever 教授

Kip S. Thorne 教授在理论方面为 LIGO 提供支持, 包括确定了 LIGO 可以探测到的引力波源, 奠定了分析数据并从中提取引力波所用到的方法, 设计了可以控制激光管中激光散射的挡板, 以及

提出了如何降低探测器中的热噪声影响的方法。除了引力波方面的杰出贡献, Kip S. Thorne 还在相对论天体物理、虫洞和时间机器以及黑洞物理等领域作出了重要贡献。

Barry C. Barish 教授的主要贡献还包括对 LIGO 项目的领导。1994 年 Barry C. Barish 作为 LIGO 的新任主任成功说服了美国国家科学基金会(NSF)批准了对 LIGO 的资助, 从而使得项目步入正轨。1997 年 Barry C. Barish 将 LIGO 项目组织分为两部分: 一是在 Hanford 和 Livingston 的 LIGO 实验室, 负责运行干涉仪探测器; 二是 LIGO 科学合作组织(LIGO Scientific Collaboration, 简称 LSC), 负责科学研究、数据分析以及与国际其他科学家合作。

3 LIGO 项目

LIGO 是怎么探测引力波的呢? 我们试图通过以下 4 个问题来回答。

什么是 LIGO? 前文提到 LIGO 的全称为激光干涉引力波天文台, 但是它与普通天文台的不同之处在于: 首先, 与普通天文台观测电磁波不同, LIGO 对电磁辐射完全屏蔽; 其次, 与普通天文台的球形拱顶不同, LIGO 的每个探测器是由两条相互垂直的真空管道构成; 第三, LIGO 的两个探测器不能单独运行而必须协同工作。

什么是 aLIGO? aLIGO 即 advanced LIGO, 它是早期 iLIGO(initial LIGO)的升级版。iLIGO 通常指运行于 2001 年至 2010 年之间的 LIGO 探测器, 但是由于其并没有达到探测引力波所需的灵敏度, 因此在当时还不能探测引力波, 而是作为探路者(pathfinder)来验证建造 LIGO 所需的技术。在 iLIGO 退役前两年即 2008 年, aLIGO 开始安装升级, 镜子从原来的直径 25 cm、厚度 10cm、重量 11 kg 升级成直径 34 cm、厚度 20cm、重量 40 kg, 悬挂(suspension)系统由原来的单摆(single pendulum)金属丝(metal fibers)升级成四摆(quadruple pendulum)玻璃丝(glass fibers), 减震(seismic isolation)系统由原来的被动减震升级为主动和被动减

震。aLIGO耗时7年，直至2015年才升级完毕，投入第一轮运行，并马上实现了对引力波事件GW150914的直接探测。目前aLIGO处于第二轮运行，而且还将升级至2020年左右。

什么是迈克耳孙干涉仪(Michelson interferometer)(图7)? 迈克耳孙干涉仪是一种精密测量工具。首先一束入射激光经过一块分光镜，分裂成两束全同的出射激光，其中一束出射激光保持原来入射激光的传播方向，另一束出射激光则垂直于原来入射激光的传播方向。每一束出射激光沿着干涉仪的一条臂前进，在每条臂的末端放置反射镜，将两束出射激光反射回去，并在分光镜处合成一束新的激光，被光子探测器收集。如果两束反射激光合并前经过相同的光程，那么光子探测器将完全收集不到任何光亮，否则，光子探测器将收集到反射光束产生的不同干涉条纹。当引力波到来时，在垂直于波传播方向的平面内，由于其特殊的偏振行为，引力波会使得空间距离

在一个方向上被拉伸，而在与之垂直的方向上被压缩，由此在镜子之间造成的光程差有希望通过迈克耳孙干涉仪来探测。

LIGO的干涉仪是什么样子? LIGO的干涉仪就是一个放大加强版的迈克耳孙干涉仪(图8)，主要表现为以下几个方面：第一，臂长越长，对引力波测量就越灵敏。LIGO建在Hanford和Livingston的两个探测器的臂长都是4 km。但是即使是这样的臂长还是不足以测量引力波，因此LIGO还在每条臂上采用了Fabry—Pérot谐振腔(cavity)，让光束于合并前在腔内反射280次，从而等效地将臂长延长到1120 km；第二，激光功率越强，干涉条纹就越清晰，干涉仪的分辨率(resolution)就越强。但是LIGO的设计探测精度要求750 kW的激光，而LIGO只能做到200 W激光。解决办法是在光源和分光镜之间放置很多用来功率循环(power recycling)的镜子，使得激光在经过功率循环镜后被分光镜分光，由于镜子特殊的排位，使得被反射回来的激光再次经过分光镜时，几乎所有激光都再次进入功率循环镜而不是光子探测器，这样实现了功率放大的效果；第三，类似于功率循环镜来放大激光功率，LIGO还放置了信号循环镜来放大信号；第四，LIGO还可以消减不需要的震动噪音。综上所述，LIGO的干涉仪是一个有着双循环(Dual Recycled)的Fabry—Pérot迈克耳孙干涉仪，简称DRFPMI。

除了以上技术，LIGO还开发和使用了诸如减震系统(被动减震和主动减震)、真空系统(万亿分之一大气压)、光学系统(多级放大激光技术和原子量级瑕疵的镜子)、计算(千万服务机时处理中心)和数据收集技术(总数数据量4.5 Pb并以每年0.8 Pb速度增加)等先进技术来探测引力波。

4 引力波物理

引力波的直接探测为检验宇宙学模型和引力理论提供了全新的观测手段。

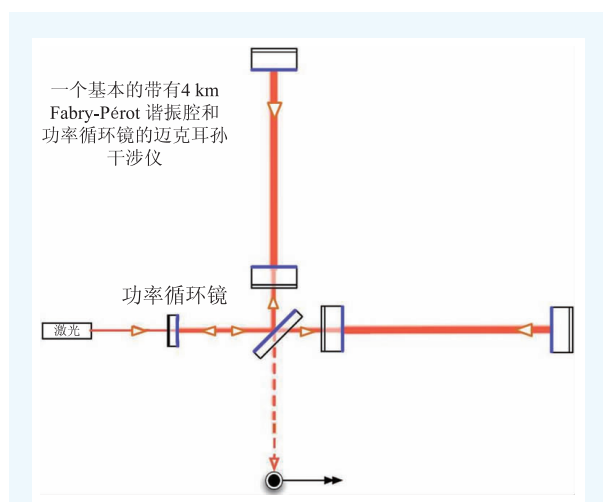


图7 迈克耳孙干涉仪原理图



图8 LIGO的两个干涉仪

引力波在宇宙学上的应用主要是通过所谓标准汽笛(standard siren)来实现测距。测距问题一直是天文学和宇宙学上的中心问题之一,而且每一次测距手段的进步都会带来天文学和宇宙学上的变革。对银河系内天体最基础的测距方法是三角视差法。此外还有分光视差法、星团视差法以及造父视差法。对银河系外天体最基础的测距方法是利用距离指示体(distance indicator)的绝对星等结合视星等得到距离模数从而实现测距。最常见的距离指示体包括造父变星、红超巨星、行星状星云、电离氢云团、球状星团、超新星等。利用Ia型超新星作为标准烛光(standard candle)测定距离与红移的关系,人们意外发现,宇宙不仅仅像哈勃定律所描述的那样膨胀,而且还是加速膨胀。这项突破性的发现也因此获得了2011年诺贝尔物理学奖。但是以上传统天文学的测距方法都依赖于对天体所发出的电磁波的红移测量,即使是利用本动距离和角直径距离这种本身与红移测量无关的方法,也需要利用红移信息才能把它们转换为光度距离。而且从红移到距离的推断本身还依赖于输入的宇宙学模型,因此利用电磁波观测的传统天文学在检验宇宙学模型方面有其先天的局限性。

B. F. Schutz在1986年发现^[7],致密双星系统的并合过程所发出的引力波波形(gravitational waveform)的振幅直接包含光度距离的信息,因此可以在不知道双星系统红移的情况下直接测定其光度距离。这种测距方法被称为标准汽笛。它的优点主要有两方面:第一,传统天文学利用电磁波的测距方法是一种距离阶梯(distance ladder),即总是利用近处的已经测量的距离指示体来测量远处的天体,然后这样一级一级地测量更远的天体,但是其误差也同样在一级一级累积。近年来对于哈勃常数的局域测量结果与宇宙微波背景辐射的全局限制结果存在较大差异,其原因可能就是对于传统测距方法的误差还了解不够,当然也可能是宇宙学标准模型需要修改。但是由于引力波可以轻易地在空间中进行远距离的传播而几乎不会受到物质的影响,因此标准汽笛测距方

法的误差来源单一而且可以很小;第二,如果双星系统存在电磁对应体(electromagnetic counterparts),比如双中子星系统或者黑洞—中子星系统,那么就可以通过电磁波段的天文学观测测定它的红移,并与标准汽笛对光度距离的直接测量形成互补优势,从而可以用来研究宇宙学模型,诸如哈勃参数的红移演化,暗能量状态参数的红移演化,空间曲率的测量,各向异性的测量等等此类以前只能用超新星数据进行的研究课题。此外联合红移观测还有利于破除光度距离和双星轨道相对视线方向的倾角之间的简并性。引力波在宇宙学上的其他应用还包括,确定致密星体和致密双星并合率的红移分布,超大质量黑洞对于星系形成的影响,原初背景引力波和相变引力波对暴胀模型和粒子物理模型的限制等。

引力波的探测为在强引力场区域检验各种引力理论提供了可能性。一方面,少数的几个在弱场低速区域的实验和观测,比如水星近日点进动观测、日全食光线偏折角观测、引力红移观测、时间延迟效应实验、引力透镜观测、等效原理实验检验等,都进一步验证了爱因斯坦广义相对论的正确性。另一方面在强引力场区域,爱因斯坦广义相对论是否正确一直缺乏验证。进一步地,时空的奇点定理和黑洞的霍金辐射发现又暗示了引力的最终理论形式并不是爱因斯坦广义相对论。因此如何突破爱因斯坦引力并提供有效的验证手段,就成为了至关重要的问题。引力波的波源一般处于强场高速区域,而引力波的观测又处于弱场低速区域,因此引力波观测本身就为我们提供了一个独一无二的同时检验引力理论在强场和弱场区域的手段。引力波可以用于检验引力波极化、引力波波速、引力子质量、时空的维度、标量—张量引力理论的Brans—Dicke系数、后牛顿理论参数检验、黑洞时空的唯一性定理检验、用黑洞准正则模式和多极矩分量研究黑洞无毛定理、致密星体最大质量限制、引力波记忆效应、黑洞视界附近的几何、黑洞对暗物质的吸积、引力波的引力透镜效应、原初黑洞丰度及其构成暗物质的比例限制等等。

在这里我们仅举利用引力波探测中的引力波传播速度来检验引力理论。在成功直接探测引力波之前，人们已经可以利用宇宙射线观测来限制引力波速度了。其原理是利用观测上没有观测到引力波的切连科夫辐射的观测事实来给出引力波速度的下限。现在，利用引力波直接探测，我们可以用以下几种方法来限制引力波速度：第一，如果某次引力波事件有电磁对应体，那么通过电磁波和引力波到达时间的差异可以获得引力波速度相对光速的一个允许的范围，但是这需要事先合理估计并合时辐射的引力波和电磁波之间的时间差；第二，如果某次引力波事件没有电磁对应体，但是由于引力波波本身可以包含有引力子质量信息，那么对于具体的某个修改引力理论，我们就可以通过修改的色散关系将对引力子质量的限制转化为对引力波速度的限制。但是这种方法目前达到的精度还不够；第三，如果某次引力波事件不仅有电磁对应体，并且还伴有引力透镜现象，那么只需要通过两个像的总共两组引力波和电磁波的到达时间，就可以消去并合时发射的引力波和电磁波之间的时间差，从而给出与具体的并合辐射机制无关的引力波速度的限制。

引力波在天文学上的应用主要通过多信使(引力波、中微子、宇宙线、电磁波包括伽马射线、X射线、紫外辐射、可见光、红外辐射、射电信号等)观测，它相对于传统的天文观测手段的优势主要体现在以下3个方面：

第一，预警和定位。大多数天文台一次只能观测到天空很小的一部分。所以在观测一些有趣的宇宙事件时，需要提前告知它们观测的角度。而这些预警则来自那些一次几乎可以探测全天区的探测器，比如引力波。LIGO和Virgo已经与世界上超过80个天文台建立了合作，包含整个电磁波段以及热和高能中微子的观测。LIGO和Virgo对双中子星并合事件GW170817的观测以及全球天文台对后续电磁对应体的观测，证明这样的合作是卓有成效的。目前引力波观测的事件数是大概每两个月一次，但这仅仅只是正在快速发展的引力波探测网络的开始。LIGO会按计划周期性

的开机和关机，在开机的期间进行观测而在关机的期间进行调整和升级，以提高灵敏度。到2019年，LIGO会达到它的设计灵敏度。届时，引力波探测的事件数期望达到每几天一次。其他引力波探测器也在紧锣密鼓的建设当中。2017年，位于意大利的aVirgo探测器已经入网与LIGO一起探测，并且在GW170814与GW170817两个引力波事件的观测中扮演了重要的角色，特别是在对引力波源的定位中。位于日本神冈煤矿山下深处的KAGRA将于2018年左右建成。LIGO-India已获印度政府批准并已开建。届时，多个探测器同时观测不仅可以提高探测事件的置信度，而且可以更加准确的定位引力波源。

第二，帮助天文学家获得诸如中子星、超新星、千新星、白矮星等致密天体完整的物理图像，从而促进我们对于核物理特别是强子物理的理解。引力波为人类观测宇宙提供了一个全新的窗口。它携带的宇宙事件信息是其特有的，无法通过别的窗口(电磁波、宇宙线、中微子等)观测到。像双黑洞并合这样的事件，如果周围没有别的物质，不会产生别的形式辐射，只有引力波。而双中子星的合并还会辐射光子和别的粒子。恒星塌缩会辐射引力波和热中微子。通常来说，引力波携带的是致密星体的形成和演化的信息，别的信使携带的是关于吸积、加速粒子及其相互作用的信息。如果我们想要得到更多的宇宙事件的信息，需要整合各个不同窗口的观测信息。电磁波、引力波、中微子和伽马射线等可以提供宇宙事件不同方面的信息，多信使的观测还可以提高观测的灵敏度和置信度。

第三，掀起天文学的革命。双黑洞并合与双中子星并合是理解比较好的引力波源，我们可以计算出它们的引力波形。利用这些波形，以模版匹配滤波的方法可以相对容易地从数据中提取出相应的引力波源信息。但是对于别的更加复杂的系统，比如致密星体的塌缩与爆发，它们所辐射出的引力波更加复杂，更加缺乏系统性。我们对它们的理解也比较欠缺，无法计算出相应的引力波形。这就需要建立一种新的不依赖于模版匹配

滤波的引力波数据的处理方法。回顾天文学的发展历史，我们会发现每一次天文学的革命都是发生在新的技术应用到天文学观测的时候，并且在这个新的观测窗口中发现了之前理论无法解释的新现象。GW150914虽然标记着引力波天文学的开始，但是要掀起天文学的革命还要等到我们通过引力波的窗口看到了之前理论所无法解释的新现象。而目前模版匹配滤波的引力波数据处理方法几乎无法做到这一点。引力波观测要想掀起天文学的革命，也有赖于不依赖于模版匹配滤波的引力波数据处理方法的建立。

接下来的几十年，伴随着各种大型探测器的建成与升级，我们将会见证多信使观测的大爆

发。LIGO、Virgo和其他引力波探测器将通过增强现有的仪器，发展和融合新的技术，提高它们的探测灵敏度。第三代地基引力波探测器 Einstein Telescope正在研发中。空间引力波探测也将开始：欧洲Lisa项目已经得到批准，其关键技术验证星已经发射，关键技术得到验证。中微子探测器IceCube也在计划进行一次大的升级。电磁波的探测也会因为Large Synoptic Survey Telescope以及别的大型探测器有很大的提高。微波的探测能力也会因为SKA建成提高50倍。这些空前的探测能力的提升以及各个组织间不断加强的合作一定会带来令人激动的发现。

参考文献

- [1] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116:061102
- [2] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116:241103
- [3] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118:221101
- [4] Abbott B P *et al.* arXiv: 1711.05578

- [5] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:141101
- [6] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:161101
- [7] Schutz B F. Nature, 1986, 323:310

用于质子治癌的室内直线加速器

质子和离子治疗对于许多癌症，如身体深部的肿瘤，是优选的治疗方法。世界上提供这种治疗的约100台设备，都使用回旋加速器或同步回旋加速器将带电粒子加速到所需的能量。与这些圆形的机器相比，直线加速器(linacs)在治疗上具有一定的优势，但是除了一些设计上的困难之外，因体积庞大而很难安装在医院里。西欧核子中心(CERN)的Stefano Benedetti和他的同事们设计了第一台全直线的加速器，克服了体积庞大的问题。

直线加速器优于圆形加速器之处，在于可以迅速(在几毫秒内)调节输出束流的能量，而且不会损失束流强度。束流能量决定着质子或离子能够穿入人体组织的深度，因此，能量的可调节性对于患者在呼吸时调

节束流在人体内的位置，以及精确地击中肿瘤上的不同位置是非常有用的。

在过去的几十年中，研究人员探索了各种不同的直线加速器方案。其中称作TULIP的方案将直线加速器与回旋加速器耦合，将加速器的一部分弯绕，使得整个加速器可以放置在患者治疗区域。Benedetti等提出了“全直线加速器”(all-linac)型的TULIP，消除了混合型TULIP某些技术上的复杂性。他们的设计基于一些技术上的进展，如改进的用于粒子注入及加速的射频技术、新的粒子跟踪方法。这种新的型号可提供能穿透组织33 cm的质子，这种深度与已有的其他设计在同一水平，而且体积小，可以安装在10 m×10 m的房间内。

有关论文发表在2017年第20卷第4010页的*Physical Review Accelerators and Beams*上。

(周书华 编译自Jessica Thomas. *Physics*, April 13, 2017)