

百年预言成真：引力波的存在被证实

朱宗宏¹ 王运永^{1,2}

(1 北京师范大学天文系 100875; 2 中国科学院高能物理研究所 100049)

美国当地时间 2016 年 2 月 11 日, 美国国家科学基金委员会 (NSF) 召集来自加州理工学院、麻省理工学院以及美国的激光干涉引力波天文台 (LIGO) 科学合作组织的科学家代表在华盛顿国家新闻中心向世界宣布: 加州理工学院、麻省理工学院和 LIGO 科学合作组 SLC 的科学家利用设在华盛顿州汉福德的高级激光干涉仪引力波探测器 (Advanced LIGO) H1 和位于路易斯安娜州利文斯顿的相同的实验设备 L1 发现了引力波存在的直接证据, 困扰科学家 100 年来的物理学难题得到破解。这是一项划时代科学成就, 具有极其深远的意义。



图 1 发布会上科学家在欢呼 (左起: 路易斯安娜州立大学的冈萨雷斯 (G. González), 麻省理工的韦斯 (R. Weiss), 加州理工的索恩 (K. Thorne))

一、引力波事例 GW150914

LIGO 科学家宣布, 美国当地时间 2015 年 9 月 14 日 9 点 50 分 45 秒位于华盛顿州的汉福德和位于路易斯安娜州利文斯顿的两台高级激光干涉仪引力波探测器, 同时探测到一个短暂的引力波信号, 他们把这个引力波事例命名为 GW150914, 以纪念这个人类科学史上极不寻常的日子。

1. 主要参数

该信号的频率范围为 35~250 Hz, 峰值应变幅度为 1.0×10^{-21} , 该事例与广义相对论预言的两个相互旋绕的黑洞 (图 2) 在旋进、并合及最后生成新的单个黑洞衰荡时引发的引力波波形相匹配。

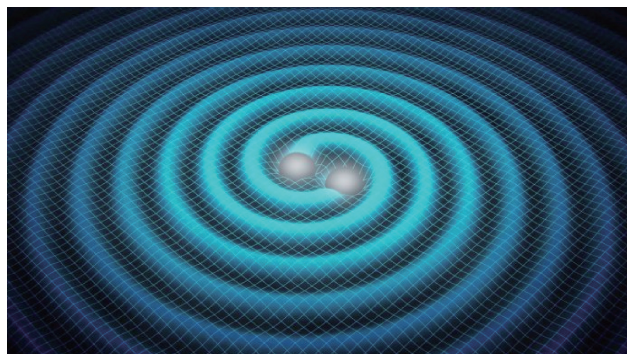


图 2 双星旋绕与引力波发射示意图

深入分析后得知, 波源的亮度距离为 410^{+160}_{-180} Mpc (pc 为秒差距, 是天文学中的长度单位, 另一个长度单位是光年 ly, 即光在真空中传播一年走过的长度, 有的报道中说这个波源的距离为 13 亿光年, 就是根据 $1 \text{ pc} \approx 3.262 \text{ ly}$ 换算来得的), 相应红移 $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$, 波源中初始黑洞的质量分别 $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ 和 $29^{+5}_{-4} M_{\odot}$, $M_{\odot}$ 是太阳质量, 最后形成的科尔黑洞的质量为 $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, 这表明有 $E = 3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ 的能量在并合过程中以引力波的形式辐射出去。用匹配过滤器观测到这个事例, 组合信号噪声比为 $\text{SNR}=24$, 误报率小于每 20300 年 1 次, 相应于显著性 5.1σ , 按照科学上的惯例, 显著性在 5.0σ 以上即可定义为确定的新发现, 例如, 举世闻名的希格斯 (Higgs) 粒子被发现时其显著性是 5.2σ 。

该信号最初是用低延迟搜寻软件系统发现的, 这个低延迟软件系统适用于寻找通用的引力波瞬变事

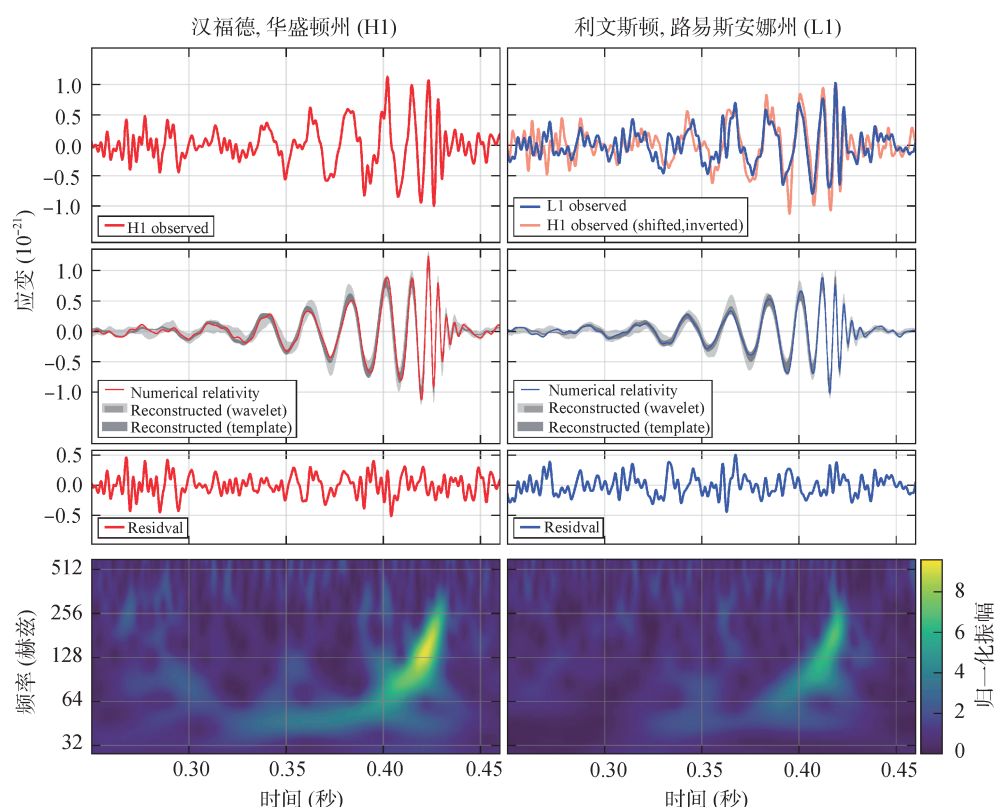


图3 高级 LIGO H1 和 L1 探测到的引力波信号波形（本图来源于 LIGO）

件，并不对某类引力波特别青睐。当该系统察觉到有能量超过阈值的大信号出现时，会发出警示，提醒我们有异常事件发生。事实的确如此，在数据获取过程中，当激光干涉仪引力波探测器对 GW150914 有响应 3 分钟时它给出了警示。

随后，用匹配过滤器对该事例进行了详细分析，复原了这个事例（图3），这个匹配过滤器是专门为研究致密双星引力波波形而设计的。GW150914 在两个场地间的传播时间在 10 毫秒以内。

由于 Virgo 还没有完成升级改造，GEO 虽然正在运转但未处于观测模式，所以都没有探测到这个事例，仅利用 H1 和 L1 两个探测器的时间差，可以把该波源的位置确定在一个面积为 600deg^2 的区域内。

在位于汉福德的高级激光干涉仪引力波 H1 和位于利文斯顿的探测器 L1 上探测到的引力波信号及探测器的本底波形如图 3 所示。

图 3 左列各图是位于汉福德的高级激光干涉仪 H1 的探测结果（红色），右列各图是位于利文斯顿

的高级激光干涉仪 L1 的探测结果（蓝色），为了便于观看，所有时间序列数据都用一个带宽为 35~350Hz 的带通过滤器进行了过滤，以便压低探测器最灵敏的频带外的大涨落，同时也使用了频带拟制过滤器以便移走很强的仪器谱线。

第一排左图为 H1 的应变曲线，第一排右图为 L1 的应变曲线，GW15914 首先到达 L1，并在 $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ 毫秒后到达 H1。这个时间差与两个探测器之间的距离相符，并表明引力波是从南部天区传来的。

为了进行直观比较，在把 H1 数据移动了时间差 $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ 毫秒后也画在 L1 的应变曲线上。第二排表示在 35~350Hz 频带内每个探测器上的应变曲线，实线是一个双星旋绕系统的数值相对论波形，这个系统具有的参数与从 GW150914 复原的参数一致。深灰色曲线是用双黑洞模板波形模拟了测得的信号重建的，浅灰色曲线没有使用天体物理模型，而是像正弦高斯小波的线性组合那样计算应变信号重建的。这些重建的应变曲线有 94% 是重叠的，第三排是从过滤后的探测

器输出的时间序列波形减去过滤后的数值相对论波形后残存的波形，第四排表示的是应变数据的时间-频率曲线，给出信号频率随时间增加的情形。

2. 双黑洞旋绕系统的确立

1916年，德国天文学家史瓦西（K. Schwarzschild）通过计算得到了爱因斯坦引力场方程的一个真空解，这个解表明，如果将大量物质集中于空间一点，其周围会产生奇异的现象，即在质点周围存在一个界面——“视界”，一旦进入这个界面，即使光子也无法逃脱，这种天体被美国物理学家惠勒（J. Wheeler）命名为黑洞。根据黑洞本身的物理特性：质量、角动量、电荷来划分，可以将黑洞分为以下几大类：

A) 不旋转不带电荷的黑洞，它的时空结构于1916年由史瓦西求出，称为史瓦西黑洞。

B) 旋转且带电荷的黑洞，时空结构于1965年由纽曼求出，叫做克尔-纽曼黑洞。

C) 不旋转但带电荷的黑洞，时空结构1916年至1918年由赖斯纳（Reissner）和纳自敦（Nordstrom）求出，称为R-N黑洞。

D) 旋转不带电黑洞，称克尔黑洞，时空结构由克尔于1963年求出。

E) 双星黑洞，与其他恒星一块形成双星的黑洞。

根据 GW150914 的性质可以说明它是由双黑洞坍缩产生的，即相互旋绕的双黑洞在轨道旋进、并合最后形成单个黑洞衰荡时产生的。实验表明，在0.2秒内信号经历8次循环，频率从35Hz增加到150Hz，幅度也增加到最大值。这种演变看起来最有道理的解釋是两个质量体 m_1 和 m_2 在做轨道旋绕时发射引力波造成的。

在频率较低时，这种演变以所谓“鸟鸣”质量 M 来表征

$$\bar{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5},$$

公式中 f 和 $\dot{f}$ 是观测到的频率及其对时间的导数， G 是万有引力常数， c 是光速。从图3中的数据我们可以估算出 f 和 $\dot{f}$ 的值，从而得到“鸟鸣”质量

$\bar{M} \approx 30M_\odot$ ，这暗示在探测器框架内，双黑洞的质量和 M 为

$$M = m_1 + m_2 \geq 70M_\odot$$

m_1 和 m_2 分别是双黑洞系统中两个子黑洞的质量。这个数值把双黑洞组分的史瓦西半径的和界定为 $2GM/c^2 \geq 210\text{km}$ ，为了达到75Hz的轨道频率，两个质量体必须已经靠得很近，而且必须非常致密。两个在这个频率上做轨道运动的相等的牛顿点质量应该分开大约350km，一对致密的中子星没有上面要求的那样大的质量，而具有上面推导出的“鸟鸣”质量数值的中子星-黑洞系统需要有非常大的总质量，而且也由于这个原因，应该在非常低的频率上并合，这样，测得的引力波事例就只剩下双黑洞系统一种可能。它与实验结果相符合：它足够致密以达到75Hz的轨道频率而又不相互接触，再者，在达到峰值以后波形的衰变也与最终形成的稳定科尔黑洞的阻尼震荡相符合。

3. 分析结果

利用得到的波源参数对事例 GW150914 进行广义相对论分析，得到的结果在图4中给出。

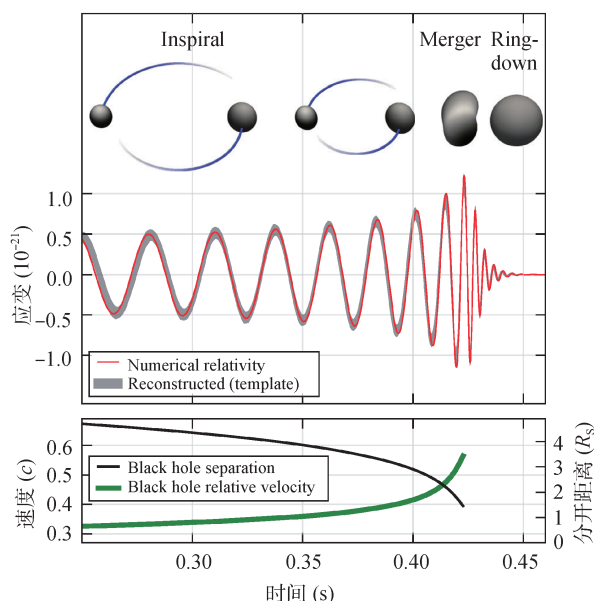


图4 利用波源参数计算得到的引力波波形

图4是用位于汉福德的激光干涉仪引力波探测器H1上测得的数据计算出来的，顶图表示估算的引力波应变幅度曲线，它显示了波形的全部频带宽度，没

有使用图 3 中所用的过滤器。图中插入的影像显示了黑洞坍缩时黑洞界限的数值相对论模型。底图黑色曲线表示开普勒有效黑洞分开的距离，单位是史瓦西半径 R_s （右边的坐标）， $R_s = 2GM/c^2$ ，绿色曲线表示由后牛顿参数 v/c 给出的相对速度， $v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$ ， f 是用数值相对论计算得到的引力波的速度， M 是系统的总质量。

二、符合测量

在引力波这样的稀有事件探测中，利用建在不同地点的两台（或多台）探测器进行符合测量是非常重要的，在地面震动噪声影响非常严重的实验中更加突出，它能帮助科学家判断事例的真伪并确定事件发生的位置。两台探测器分开的距离越远越好。LIGO 在开始设计时就充分注意到这一点，因此他们把一台建在美国西北角华盛顿州的汉福德，另一台建在美国东南角路易斯安娜州的利文斯顿，两地相距 3030 多千米（图 5），这是一种十分合理，十分高明的实验安排。

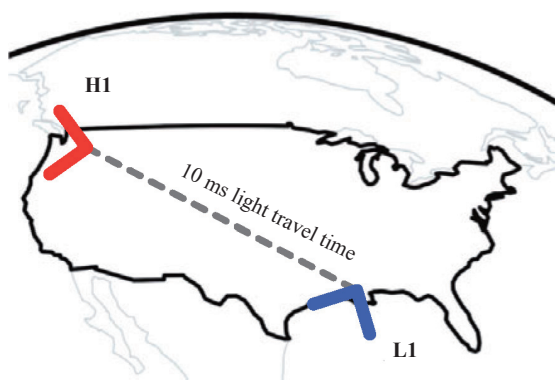


图 5 高级 LIGO H1（位于华盛顿州汉福德）和高级 LIGO L1（位于路易斯安娜州利文斯顿）

1. 判断事例的真伪

将两个或多个探测器联合起来进行符合测量与分析，可以降低虚假信号的干扰，极大地提高事例的真实性。对引力波探测来说，如果只用一台激光干涉仪进行探测，当探测器中出现能量超过阈值的信号时，这个信号可能是真实的引力波事例，也可能是某个噪声源发出的虚假噪声，这些噪声源可能是火山爆发和地质活动、微弱地震、月球潮汐、海浪、大风引起的房屋及树木的晃动对地基的影响、大雨及冰雹等自然

现象引起的地面震动以及交通运输、工农业生产、矿山开采、森林砍伐、工程建设等人类活动引起的地面震动、电器打火、开关的开启闭合等，历史上发生类似误判的教训是存在的。

当用位于不同地域的两个探测器（如 LIGO）联合起来进行符合测量时，若真正的引力波到达地球，这两个探测器势必都会一致性地有所反应。它们不仅会“同时”观测到这个信号（信号的大小与探测器的位置和引力波极性的相对关系有关），而且它们的信号还会有相互关联的相位，噪声信号通常是不会有任何关联的；更重要的，如果两个探测器分开的距离很远，上述虚假噪声在两个探测器中同时出现的几率是非常低的，甚至是 0。如果从不同的探测器上得到的信号能够被相干组合的话，就可以认为该事例是引力波而不是噪声的可能性非常高。根据 LIGO 发布的数据我们知道，该引力波事例是在美国东部时间 2015 年 9 月 14 日 5 时 51 分探测到的，这个信号首先在位于利文斯顿的高级 LIGO 上出现，7 毫秒后，位于汉福德的另一台相同的探测器也记录到它。根据简单的几何计算确认，两台相距 3000 多千米的探测器探测到的是同一个事例。

2. 确定引力波源的空间位置

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。因为在以探测器为原点，以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圆，但是，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。

利用设在不同地域的两个探测器进行测量，如高级 LIGO H1 和 L1，若两个探测器的输出信息是相互关联的，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圆环（图 6）。很明显，时间差测量的越精确（如提高信噪比以减小随机误差，精确设置波形和极化状态以减小系统误差）定位精度越高。引力波信号是从这个带状环内发出的，分析表明，忽略

壳的厚度, GW150914 位置可以被确定在一个面积为 600deg^2 的区域内。

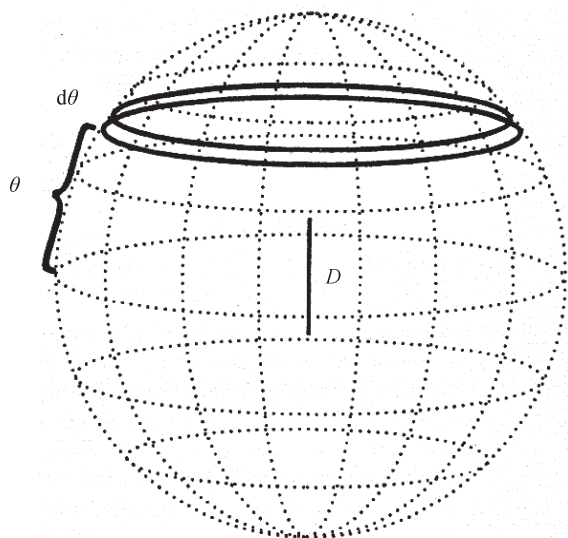


图6 利用两个探测器得到的定位环

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7所示。引力波信号可能是从这两个“补丁”中的一个内发出的。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“补丁”缩小, 提高波源的定位精度。

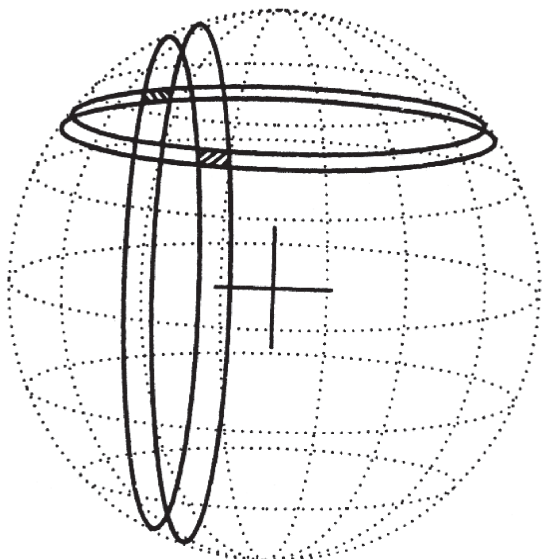


图7 利用三个探测器得到的定位“补丁”

三、旋绕双星系统与引力波发射

LIGO 合作组宣称, 他们探测到的引力波是两个相互旋绕的黑洞在旋进、靠近进而并合成一个新黑洞的过程中发射的。相互旋绕的致密双星是宇宙空间中最丰富的引力波源, 这种双星主要包括中子星-中子星, 中子星-黑洞, 黑洞-黑洞。根据广义相对论计算可知, 在两个黑洞相互接近绕转的过程中, 系统的质量四极矩会随时间变化, 因此会不断向外辐射引力波, 而引力波的辐射会把两个黑洞之间的引力势能降低, 损失系统的轨道能量使两黑洞越来越靠近, 随着两个黑洞的距离变小, 它们之间相互绕转的频率会变得更高, 所辐射的引力波的振幅也越来越大, 最后两个黑洞相互碰撞进而并合在一起。计算表明, 双黑洞系统辐射的引力波的功率是如此之大, 以至于一个彼此相距几千米的双星, 会在几分钟甚至几秒钟或更短的时间完成上述过程, 其物理图像如图8所示。

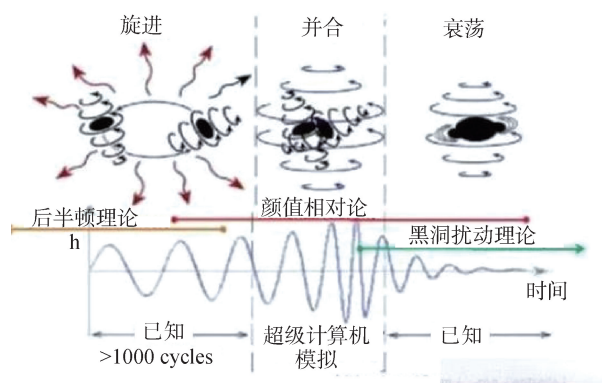


图8 密近双星的旋进、并合、衰荡阶段辐射的引力波波形示意图

下面对各个阶段做简要的介绍

(1) 旋进阶段

见图8, 由于引力辐射带走能量, 密近双星的旋绕轨道逐渐从椭圆变成圆形, 其辐射的引力波频率也逐渐进入我们在地球上建立的探测器的测量范围之内。在此阶段, 由于引力辐射不断带走轨道能量, 旋绕轨道不断收缩, 引力波幅度增大, 频率也不断增高, 发射的引力波波形具有“鸟鸣”(chirp)信号特征(图9)。这个阶段的物理图像是清楚的, 可以根据动力学公式精确地计算出它辐射的引力波的信息。

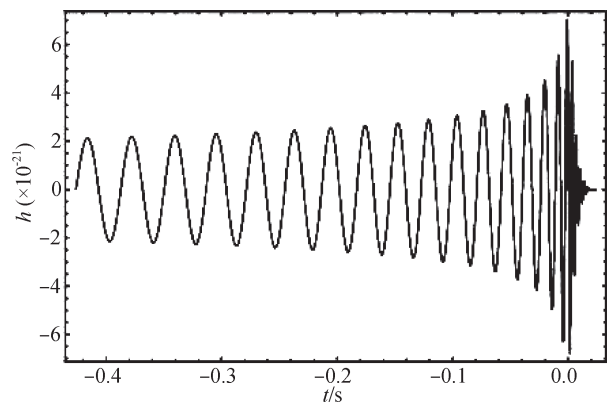


图9 相互旋绕的双黑洞系统发射的引力波信号波形示意图

(2) 并合阶段

第二阶段是并合阶段，当双星的旋绕轨道达到最内稳定圆时，两个星体将动态地并合在一起，并合过程的引力辐射是剧烈的、爆发性的，并合阶段的物理机制我们是不知道的，只能根据自己的知识和经验，建立物理模型，利用超级计算机进行模拟计算，估计出该阶段发射的引力波波形。这时的引力波携带大量与星体内部结构和质量有关的信息，为研究此类天体的内部结构和特性参数提供有用的数据。

(3) 余波阶段（或称衰荡阶段）

当两个黑洞并合成高速旋转的科尔黑洞时，其发射的引力波具有“余波”特点，幅度逐渐衰减，类似于摇铃后铃声逐渐变小直至消失的情况，它会给出并合体的质量、自旋等信息。

致密双星旋绕系统在宇宙空间中是大量存在的，到目前为止，科学家们利用电磁辐射已经发现了很多的中子双星系统（表1），但是它们离并合时间还很

表1 相对论效应明显的脉冲双星系统

名称	轨道周期 (h)	轨道椭率	主伴星质量 ($M_{\odot}$)	并和时间 (Myr)
J0737-3093	2.4	0.09	1.37/1.25	85
J1141-6545	4.7	0.17	1.30/0.98	600
B1534+12	10.1	0.27	1.34/1.33	2700
J1756-2251	7.7	0.18	1.40/1.81	700
J1906-0746	4.0	0.09	1.32/1.29	300
B1913+16	7.7	0.62	1.41/1.39	300
B2127+11C	8.0	0.68	1.36/1.35	220

遥远，例如，著名的双中子星 PSR B1913+16 要 3 亿年之后才能并合，如果想看到表中的双中子星 J0737-3093 并合时发射的引力波，恐怕也要等 8500 万年了。

四、高级 LIGO

古人云：“工欲善其事，必先利其器”，高级 LIGO 在引力波发现中起了关键作用，可以毫不夸张地说，没有第二代激光干涉仪，就没有今天引力波的发现。激光干涉仪引力波探测器是一种结构复杂、精密度极高的大型实验装置，由于篇幅关系，我们在这里只能做简单的介绍。

1. 基本光学结构

激光干涉仪引力波探测器主要由光学、电子学和机械三大部分组成，图 10 给出了高级 LIGO 光学部分的示意图。

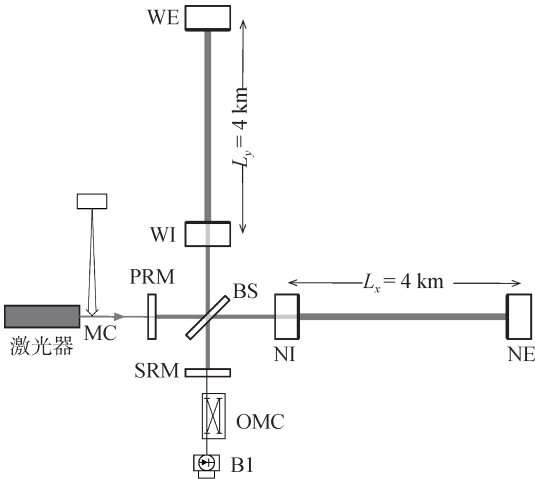


图10 高级 LIGO 基本光学结构示意图

高级 LIGO 的基本光学系统包括如下几个部分：激光器、臂上法布里-珀罗腔（NI 和 NE 是南北向法布里-珀罗腔的输入镜和终端镜，WI 和 WE 是东西向法布里-珀罗腔的输入镜和终端镜）、清模器 MC、分光镜 BS、功率循环镜 PRM、信号循环镜 SRM，输出清模器 OMC 和光探测器 B1。其中法布里-珀罗腔的作用很重要，因为干涉仪的灵敏度与臂长成正比，而建造几十千米臂长的干涉仪是很不现实的，使用法布里-珀罗腔，让激光束在腔内共振相当于把臂折叠起来。清模器的作用是清除输入激光束的

高阶模式，因为在激光干涉仪引力波探测器中，为了减小光量子噪声，提高运行稳定性，光束横截面必须是 TEM00 模式。为了降低散弹噪声，提高灵敏度，需要干涉仪内有很高的激光功率，除了使用大功率激光器外，可以使用功率循环技术把从干涉仪亮纹口射出的光反射回来循环利用。信号循环技术的使用是第二代激光干涉仪引力波探测器升级的重要措施，通过信号循环共振腔可以提高信号幅度，降低光量子噪声，提高灵敏度，同时还能使探测器的工作状态在宽频带和窄频带之间进行切换，以适应不同的实验要求。

2. 工作原理

我们仍利用图 10 来讨论激光干涉仪引力波探测器的工作原理。原则上讲，激光干涉仪引力波探测器是一台“变异”的迈克尔逊干涉仪，其相互垂直的两臂各有一个法布里-珀罗腔，并带有功率循环腔和信号循环腔。不考虑法布里-珀罗腔的前端镜、功率循环镜和信号循环镜的作用，即暂且认为它们是不存在的，图 10 就可以简化成一个标准的单次往返的迈克尔逊干涉仪。从激光器发出的一束单色的频率稳定的激光，在分光镜上被分为强度相等的两束，一束经分光镜反射进入干涉仪的一臂（如东西走向的 X 臂），另一束透过分光镜进入与其垂直的另一臂（如南北走向的 Y 臂）。在经历了相同的度越时间之后，两束光返回，并在分光镜上重新相遇，产生干涉。若两束光的度越时间相等（或时间差为光振动周期的整数倍），由于它们之间的相位差为 π ，两束光干涉相减，输出是暗条纹，意味着没有光线进入光探测器。激光干涉仪引力波探测器的输出信号为 0，这是探测器的初始工作状态。

当引力波到来时，由于它独特的极化性质，干涉仪两个臂的长度做相反的变化，即一臂伸长时另一臂相应缩短，从而使两束相干光有了新的光程差，破坏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，该信号的大小正比于引力波的振幅，探测到这个信号即表明探测到引力波。

3. 灵敏度

A. 引力波强度

引力波的强度用无量纲振幅 $h(t)_g$ 表示， $h(t)_g$ 的

物理意义是引力波引起的时空畸变与平直时空度规之比。 $h(t)_g$ 又称为应变，应变的定义是这样的：设想在无引力波存在时，在空间划定有一个圆，半径为 L ，该圆表示无引力波存在的空间状态。当引力波穿过时，圆内的空间将随引力波的频率 w 在一个方向上被拉伸（或压缩）；相应地，在与其垂直的方向上被压缩（或拉伸），变成一个椭圆。其长半轴为 $L+\delta L$ ，短半轴为 $L-\delta L$ 。引力波的强度以此圆畸变的尺度来表示：

$$h(t)_g = \delta L / L,$$

引力波的强度非常弱一般说来 $h(t)_g \approx 10^{-22}$ 。

B. 干涉仪的灵敏度

引力波能否被探测到，关键在于探测器要有与引力波强度相适应的灵敏度。过去数十年来全世界几代科学家都没能探测到引力波的根本原因就是探测器的灵敏度不够高，激光干涉仪引力波探测器由于灵敏度高，探测频带宽，给引力波探测带来巨大希望。它的应变灵敏度可以用图 11 来说明。

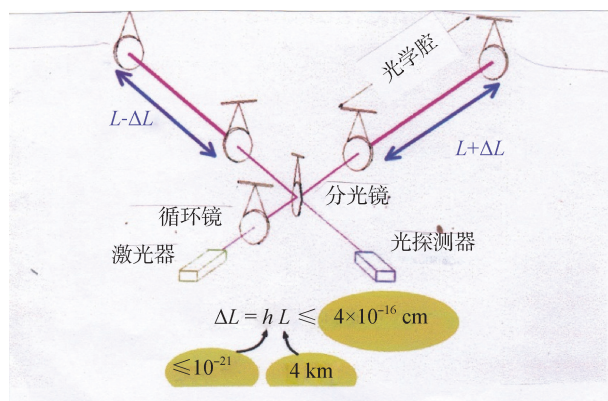


图 11 激光干涉仪引力波探测器灵敏度定义的示意图

设干涉仪的臂长为 L ，当引力波到来时，根据引力波的特性，相互垂直的两臂一个伸长另一个相应地缩短，设臂长的变化量为 ΔL ，则两臂的长度分别变为 $L+\Delta L$ ， $L-\Delta L$ ，干涉仪的应变灵敏度 h_d 定义为

$$h_d = \Delta L / L,$$

如果想要探测到应变强度 $h(t)_g$ 为 10^{-22} 的引力波，考虑到一定的信号噪声比，干涉仪的灵敏度 h_d 最好为 10^{-23} 左右，主流理论分析认为，引力波的强度大概为 10^{-22} 。这就是世界上各引力波实验室（包括 LIGO, VIRGO, GEO600, TAMA300）将第一代激光干涉仪引力波探测器（灵敏度为 10^{-22} ）升级为第

二代（包括高级 LIGO，高级 VIRGO，KAGRA，GEO-HF，灵敏度为 10^{-23} ）的根本原因。正如作者在《现代物理知识》2013 年第 4 期的一篇文章《引力波天文学，一个观测宇宙的新窗口》中说过的这样，“作者相信，第二代探测器建成并运行 1 到 2 年之内，人类将看到引力波探测的第一道曙光，而以第三代引力波探测器为基础的引力波天文台的建立，必将迎来一门崭新的交叉科学——引力波天文学蓬勃发展的新时代”。事实证明，高级 LIGO 运行不到一年，这道曙光就看到了，而引力波天文学蓬勃发展新时代的到來也为期不远了。

第一代激光干涉仪引力波探测器（Initial LIGO）与第二代光干涉仪引力波探测器（Advanced LIGO）灵敏度的比较如图 12 所示。

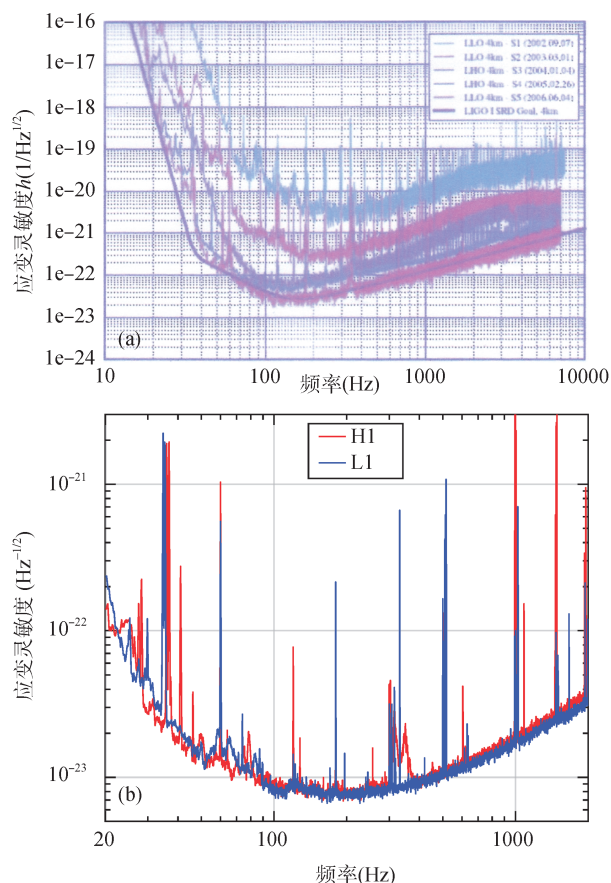


图 12 (a) 第一代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度；(b) 第二代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度

我们知道，灵敏度提高一个数量级，可探测的区域会提高到 1000 倍（图 13），假设引力波波源在宇宙空间中的分布是均匀的，那么初级 LIGO 每一百年才能探测到一个的事例，在高级 LIGO 中每年就可以找到 10 个。因此，发现引力波事件的几率会大大增加。

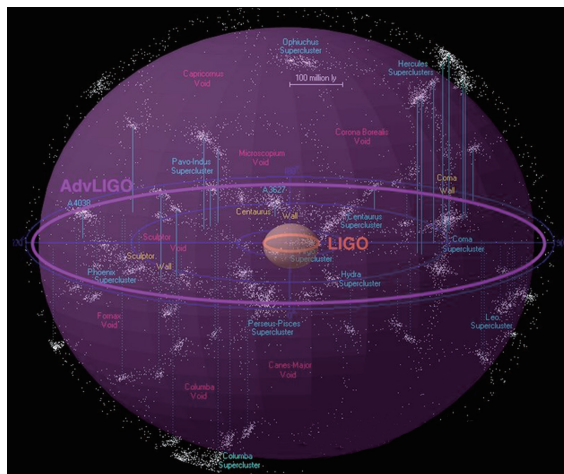


图 13 LIGO 与高级 LIGO 探测空间大小的比较

4. 第二代激光干涉仪引力波探测器的结构和技术特点

将激光干涉仪引力波探测器的灵敏度提高一个数量级并非易事，为了达到设计要求指标，高级 LIGO 采用了很多新材料、新技术、新方法，主要有：

1) 信号循环系统

在干涉仪的“暗纹”输出口增加了一个信号循环镜，形成一个信号循环腔，同时改变初级 LIGO 的信号读出及控制系统。信号循环腔允许把引力波产生的旁频储存起来，也允许把它抽取出去，取决于信号循环腔的共振状态。这就是说，有了信号循环系统，干涉仪的频率响应就可以根据天体源的特性（主要指它辐射的引力波的频率特性）进行调整，“量身订做”。我们知道，激光干涉仪引力波探测器一般工作在“宽频带”模式。但是，我们可以把它调成一个“窄频带”探测器，使它在较窄的特殊频带内具有较高的灵敏度，提高探测该波段事例的可能性。

2) 大功率激光器

从统计物理可知，激光器发射的光子数目本身是

有涨落的，它遵从泊松分布。也就是说在激光束中，光子数并非在每个时间点都是相同的，激光束的强度是有起伏的。当激光束射入光探测器时，产生的光电流强度是有涨落的，这种涨落在干涉仪输出端引起的

噪声，称为霰弹噪声，霰弹噪声正比于 $\sqrt{\frac{1}{P_{\text{in}}}}$ ，输入光束功率 P_{in} 越大，霰弹噪声越小。为了降低霰弹噪声，改善量子噪声对灵敏度的影响，激光器的功率从初级 LIGO 的 10 瓦增大到 200 瓦。

3) 测试质量的尺寸和重量

在激光干涉仪中，辐射压力噪声导致测试质量位置的直接晃动。自由质量对力的机械易感性（位移/施加的力）为

$$1/(M\Omega)^2。$$

增加测试质量可以减小光辐射压力噪声，高级 LIGO 的测试质量为 40 kg，比初级 LIGO 的 11 kg 重得多。为了减小测试质量的热噪声，高级 LIGO 采用大尺寸的镜子（直径 34 cm），以加大散热面积，而初级 LIGO 的测试质量直径是 25cm。

4) 熔硅悬挂丝

为了减小悬挂丝的热噪声（琴弦模式），高级 LIGO 用熔硅丝作为悬挂丝，而不像初级 LIGO 那样用不锈钢丝。由于采用这种材料，在宽频带工作模式下，悬挂丝的热噪声可小于光辐射压力噪声，而且在 10 Hz 频率时，可以减小到与引力梯度噪声相比拟的水平。

5) 隔震系统

高级 LIGO 的地面震动隔离系统虽然是在初级 LIGO 的地基上建立起来的，但却是一套全新的设计。它采用了倒摆技术，而且测试质量悬挂链含有四级单摆。高级 LIGO 的隔震系统把地面震动的截止频率从初级 LIGO 的 40 Hz 降低到 10 Hz 左右，对于频率低于 10Hz 的地面运动，它用主动隔震伺服技术来减小。通过这套隔震系统，期望在整个探测频带内，能把地面震动噪声压低到可以忽略不计的程度。通过隔震与悬挂系统的联合作用，与初级 LIGO 相比，需要加在测试质量上的控制力，将降低几个数量级，而且也减小了在测试质量上产生非高斯噪声的可能性。

五、匹配过滤器

引力波事例 GW150914 的发现与数据分析方法有极大的关系。LIGO 合作组在数据处理中使用了匹配过滤器。匹配过滤器是引力波数据分析中功能最强大的软件工具之一，它是在搜寻致密双星并合信号中逐步发展和健全起来的。在这个方法里，将干涉仪的输出信号与模板进行相关分析，如果一个信号事件与一个模板的相关值较高，就说明观测到的信号不完全是噪声的可能性比较高，而且有可能是与该模板所关联的引力波信号。进而，用多个模板与信号进行相关性计算，以检查该信号是某个特定的引力波波形的可能性有多大。在用激光干涉仪进行引力波探测时，噪声是一个需要解决的主要问题。匹配滤波器有一个非常有用的性质：由于干涉仪的输出信号可以表示为单纯的引力波信号和随机噪声的和，在干涉仪输出信号与给定模板的相关性计算得到的相关值中，可能找到一个最优的信噪比，它就是需要选出的、值得进一步分析的有用“事例”，从这个意义上来说，匹配滤波器对数据进行过滤是一个不错的选择。

匹配滤波器的核心问题是建立“模板库”，模板库的建立要利用物理模型，在引力波的理论研究中，有些研究对象的结构和作用机制是清楚的，物理图像是直观的，如密近双星旋转问题的旋进阶段和衰荡阶段，它们辐射的引力波可以用一个确定的时间函数，如 $S(t)$ 来表示。有些研究对象在理论上研究得并不透彻，对其结构和物理机制了解得不太清楚，但是可以根据已有的知识建立起一个恰当的物理模型，推导出所辐射的引力波的时间函数 $S(t)$ 和图像。如密近双星旋转的并合阶段。无论哪种情况，我们都认为这个引力波函数具有已知的形式 $S(t)$ ，它是在理论上的预言，我们认为它是真实的，一旦碰到它，我们能认出来。我们称这些函数是要探测的引力波的“模板”，在实际应用时，通常把模板写成由成百上千个分立子模板构成的一个模板组合。在物理分析过程中，以模板为标准逐一筛查获取的带有噪声的数据，寻找与模板类似的图样。含有这种图样的记录，其强度和式样均与噪声单独存在时不同。可以看出，以这种方法做引力波的数据分析，实际上是一个研究从探测器上获得的

时间信号与我们建立的模板之间的匹配关系的过程。可见匹配过滤器中模板起着核心作用,下面我们就对模板的应用原理进行扼要的介绍。

我们首先从函数的互相关运算说起。设 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 是两个时间函数,这两个函数的互相关运算定义为

$$S_1 \cdot S_2(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2(t+\tau) dt。$$

互相关运算的涵义是:对于每一个给定的时间,先让函数 $S_2(t)$ 在时间上偏移 τ 后与函数 $S_1(t)$ 相乘,乘积运算针对时间范围 $[-\infty, \infty]$ 内所有被记录的数据,运算进行完之后,再把得到的所有乘积加在一起。对于不同的 τ 值,这些乘积之和不同,它随 τ 值的变化而变化,即 $S_1 \cdot S_2(\tau)$ 是偏移时间 τ 的函数,我们称其为时间函数 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的互相关函数。求解互相关函数 $S_1 \cdot S_2(\tau)$ 的过程称为函数 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的互相关运算,互相关性是表示两个函数 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 相互关联程度的量度。

当 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 是同一个函数 $S(t)$ 时,我们定义它的自相关运算函数为

$$S \cdot S(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} S(t) S(t+\tau) dt,$$

$S \cdot S(\tau)$ 是时间函数 $S(t)$ 的自相关函数,自相关函数是测量一个时间函数的两个副本之间、在各种不同的时间偏移时函数自身相关程度的方式。显然,当函数自身在时间上对准时,即当 $\tau=0$,它的自相关函数 $S \cdot S$ 有最大值。若该函数 $S(t)$ 是一个周期性函数,则在多个周期中自相关函数将有多个最大值。 $S \cdot S$ 的宽度给出函数 $S(t)$ 随时间变化的快慢。

现在回到原来的讨论。设我们建立的模板为 $S(t)$,它是我们要寻找的信号。设从探测器上获得的时间记录为 $V(t)$,则它们之间的互相关函数为

$$V \cdot S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V(\tau) \cdot S(t+\tau) d\tau。$$

上式表明,我们要对每一个可能的探测器输出信号的出现时间 τ 求值。现在我们考虑一个无噪声的时间序列,即探测器的输出是由真实信号自己引起的(等效于真实信号就是模板引起的信号)。设模板函数为 $S(t)$,则模板自己引起的探测器输出信号为

$$V(t) = \alpha S(t - t_0)。$$

很明显,当模板 $S(t)$ 与探测器输出的时间记录 $V(t) = \alpha S(t - t_0)$ 出现符合时,互相关函数的值为

$$V \cdot S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha S^2(\tau) d\tau。$$

此值大于偏离完全符合时的值。如果模板对准了无输出信号的时间段(此时既无信号也无噪声输出),即 $V(t)=0$,则互相关函数的值也为零。由于我们的探测器总是有噪声的,模板的互相关函数值基本上不为零,且互相关函数 $V \cdot S(t)$ 是另一个有噪声的时间序列函数。如果探测器输出的噪声具有高斯分布

$$P(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-v^2/(2\sigma^2)},$$

那么只要没有信号存在, $V \cdot S(t)$ 的分布也是高斯型的。如果我们足够幸运,碰到一个足够大的信号,则探测器的输出就与模板匹配得很好,这时 $V \cdot S(t)$ 有一个特别大的值。在 $V \cdot S(t)$ 的直方图中,它会明显地落在由噪声事例填充的各个道之外,任何一个这样的事例都是一个合适的候选信号,因为如果互相关值很大,就不太可能是由噪声自身单独生成的。

对于给定的模板 $S(t)$,我们可以把噪声定义为

$$N^2 \equiv \sqrt{\langle (V \cdot S(\tau))^2 \rangle},$$

它是噪声与模板之间互相关值的均方根值,是 $V \cdot S(\tau)$ 的直方图宽度的量度。

我们用 S^2 表示在任意时刻 t 出现的信号的强度,它用期待的输出形式 $V(t)$ 的互相关函数表示

$$S^2 \equiv |V \cdot S(t)|。$$

信号噪声比 SNR 是信号存在时的 S^2 值与噪声单独存在时的 N^2 之比的平方根

$$SNR \equiv \sqrt{\frac{S^2}{N^2}}。$$

信号噪声比 SNR 给出了在探测器的输出中,出现只有噪声没有其他信号的事例的不可能性有多大,也就是说, SNR 给出了在探测器的输出中出现含有噪声以外其他信号的可能性有多大。 SNR 越大,输出中含有其他信号的可能性越大。也就是说,大的 SNR 值指明,在该输出时间序列函数中,存在着噪声以外的东西,它可能是要探测的引力波信号,也可能是其他

干扰信号。分析表明，GW150914 事例的信号噪声比 $SNR=24$ 。

上述讨论表明，从噪声中把信号挑拣出来的方法之一，是在带有噪声的探测器输出 $V(t)$ 和我们认为真实的信号模板之间建立互相关函数。因为，我们要做的就是从多种噪声混杂体中抽取某些具有特殊形态的事例。

六、结束语

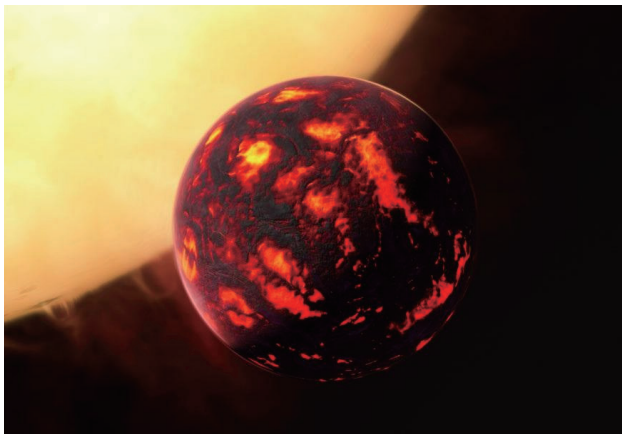
1916 年爱因斯坦发表了广义相对论，建立了著名的引力场方程，开创了近代物理研究的新纪元。广义相对论深刻地解释了引力相互作用的本质，并对引力波、光线弯曲、水星近日点进动以及引力红移做出了重要的预言。引力波的发现使这些预言全部得到证实，完美无缺地对广义相对论进行了验证。引力波是物质

运动或物质体系的质量分布发生变化时产生的一种引力辐射，引力波源遍布整个宇宙空间。我们知道，天文学的观测和研究基于天体辐射，以引力波探测为基础的引力波天文学是一门正在崛起的新兴交叉科学，由于引力辐射独特的物理机制和特性，使得引力波天文学研究的范围更广泛、更全面，物理分析更精确、更深刻。它以全新的探测理念和探测方法揭示宇宙的奥秘，探寻未知的天体和物质。它能提供其他天文观测方法不可能获得的信息，加深人们对宇宙中天体结构的认识，是继以电磁辐射（包括射电、红外线、可见光、紫外线、X 射线和伽玛射线）为探测手段的传统天文学之后，人类观测宇宙的一个新窗口。对研究宇宙的起源和进化，拓展天文学的研究领域都有极其重要的意义。随着引力波的发现，人类必将迎来引力波天文学蓬勃发展的新时代。

科苑快讯

超级地球大气中存在氰化物

天文学家首次探测超级地球（55 Cancrie）的大气成分，这个奇异的外星球与我们太阳系的任何成员都大相径庭。它比地球大，却又比气态行星小。不过 55 Cancrie 可不是什么度假胜地，其表面温度高达 2000°C ，空气中充斥着氢气、氦气和氰化氢。



留下行星结构的印记。研究小组利用哈勃太空望远镜进行观测，他们在《天体物理学报》（*The Astrophysical Journal*）上描述道，哈勃的宽视场相机 3 号快速掠过恒星表面捕捉到了许多光谱。结合复杂的图像处理软件，他们拣选出几个信号。

自该行星在 20 年前被发现时起，天文学家就对超级地球着了迷，因为我们实在没有模拟其外形的模型。尽管已发现许多类似行星，而且它们也是银河系中数量最多的一类系外行星，但是目前的望远镜却无法提供更多的信息。目前最佳的技术手段就是，当行星掠过其恒星前方时（见艺术想象图）研究恒星的光谱。其中一些光线会穿过行星大气，被其中的原子吸收，

像地球这样个体较小的行星，会失去氢和氦这样的轻元素，而像 55 Cancrie 这样的大行星，其巨大的引力却可以将这些轻元素抓住不放。氰化氢的存在说明其大气富含碳，是一个与地球截然不同的星球。

（高凌云编译自 2016 年 2 月 16 日 www.sciencemag.org）