

激光干涉引力波天文台探测到的引力波事件中的黑洞

张双南[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2016-05-03 收到

[†] email: zhangsn@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160505

The black holes in the gravitational event of the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory

ZHANG Shuang-Nan[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 2016年2月11日, 激光干涉引力波天文台(LIGO)发布了震惊世界的科学新闻: 爱因斯坦100年前预言的引力波终于被人类探测到了! 而且这个引力波事件GW150914来自于两个恒星级质量黑洞的并合! 众多大众和专业媒体都对此做了大量的报道和介绍, 引起了大众的普遍关注, 因此文章将从不同的角度简要回答有关产生这个引力波事件中的两个黑洞的几个问题: 为什么爱因斯坦不相信黑洞存在? 怎么知道这样的天体是黑洞? 物质是如何掉到黑洞里面的? 如何获得独立的证据证明这样的引力波事件的确来自于黑洞的并合? 探测这样的引力波事件对于我们理解黑洞有什么进一步的作用?

关键词 黑洞, 视界, 冻结星, 引力波, 爱因斯坦, 奥本海默

Abstract On February 11th, 2016, the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) announced the shocking science news: the gravitational wave predicted 100 years ago by Einstein is finally detected! And this event GW150914 came from the merging of two stellar mass black holes! There have been massive public and professional media coverage on this event, and thus this paper will answer from different perspectives several questions about the black holes that generated the observed gravitational waves, such as, why did not Einstein believe the existence of black holes? How to know such objects are black holes? How does matter fall into a black hole? How to obtain independent evidence that such gravitational wave events indeed come from merging black holes? How can our understanding of black holes be improved with the detection of such gravitational events?

Keywords black hole, event horizon, frozen star, gravitational wave, Einstein, Oppenheimer

1 美猴王驾到

2016年2月11日, LIGO宣布探测到了两个黑洞并合产生的引力波(图1)^[1], 如果最后得到验证, 我认为这就是人类探索宇宙的第5个里程

碑! 前4个里程碑分别是: (1)400多年前伽利略发明了光学望远镜, 使得人类的视野得到大大扩展; (2)20世纪30年代杨斯基发现了银河系的射电辐射, 使得人类首次能够在可见光波段以外探索宇宙; (3)20世纪60—70年代贾克尼使用火箭

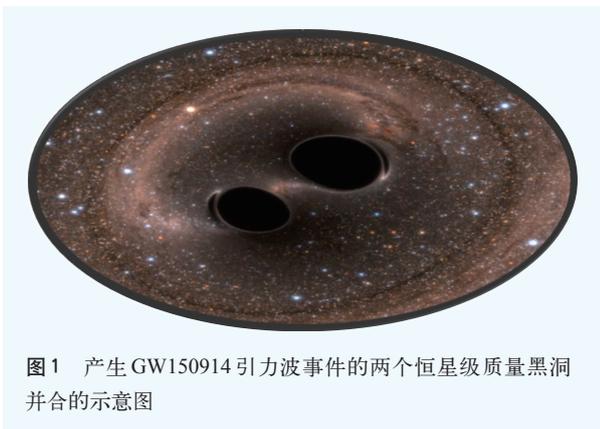


图1 产生GW150914引力波事件的两个恒星级质量黑洞并合的示意图

和卫星发现了太阳系外的第一批X射线源，使得人类首次能够在地球大气层以外探索宇宙；(4)20世纪80年代末戴维斯和小柴昌俊发现了来自超新星爆发的中微子信号，使得人类首次能够利用电磁波以外的信号探索宇宙。

我在第二天(2016年2月12日)发表于中国科学院高能物理研究所微信公众号的一篇文章里把这个引力波事件GW150914(也就是发生在2015年9月14日的引力波事件)称为“美猴王”，即猴年最美的科学事件。那么这件事和“美”有什么关系呢？

根据我研究发现的广义美的判断法则，审美的两个要素就是“没缺陷”和“不常见”。一个人的价值观决定某审美对象是否没缺陷，见识判断是否不常见，同时满足“没缺陷”和“不常见”两个条件的审美对象就被感觉是“美”的，这是判断“美”的充分和必要条件。以此类推，同时满足“没缺陷”和“很常见”两个条件的审美对象为“俗”，同时满足“有缺陷”和“很常见”两个条件的审美对象为“丑”，同时满足“有缺陷”和“不常见”两个条件的审美对象为“丑哭”，而“完全没缺陷极端不常见”的审美对象就是“美哭”！

我们首先考察一下在“没缺陷”方面GW150914的表现。这个事件验证了三件事情：(1)爱因斯坦广义相对论的引力波预言；(2)激光干涉引力波的探测原理；(3)我们论文中黑洞并合没有其他辐射的预言^[2]。其中第一件是大家广泛谈论的。但是第二件也非常重要，实际上很多人对

这样的引力波探测原理是否正确并没有完全的信心，因为历史上曾经有过也是根据广义相对论效应研制的引力波探测器摆了乌龙。第三件事情对我们(我和我的学生)非常重要，因为尽管众多的空间和地面的望远镜都进行了搜寻，这次的引力波事件看来确实没有伴随(强烈的)电磁波爆发，和我们2009年论文的预言一致^[2](后面我还会介绍我们预言的广义相对论基础)。因此GW150914满足了我们所有的期望，当然是完全的“没缺陷”(尤其是对我而言，因为审美完全是审美主体的主观感受！)

在“不常见”方面GW150914的表现更为突出：(1)这个项目团队经过了几十年的努力才获得了第一个科学成果，这在科学史上应该是史无前例的；(2)LIGO是地球上最精密的距离变化测量仪器，能够测量到在4 km的尺度上小于一个质子的直径千分之一的距离变化；(3)报道这个结果的学术论文由上百个单位的上千个作者的署名，同时这个事件至少导致上亿个手机被刷屏；(4)实现了五个“第一次”：直接探测到引力波；人类利用一种从来没有被直接探测到的信号——引力波——探索宇宙；发现两个黑洞的系统(以前有两个黑洞系统的一些线索，但是证据都不够充分)；“听”到两个黑洞的并合；以及发现了两个大约30倍太阳质量的黑洞(这的确是一个完全的意外，因为以前得到精确测量的黑洞质量都是几倍到十几倍或者远远大于上百倍太阳质量)；(5)宣布科学成果不到三个月就获得了“科学突破”大奖！因此GW150914的表现是极端的“不常见”。

既然GW150914的表现是“完全没缺陷极端不常见”，符合前面所讲的“美哭”的标准，被戴上“美猴王”的桂冠是恰如其分的！而GW150914的“完全没缺陷极端不常见”又和这个事件来自于两个黑洞的并合关系密切，所以本文的重点就是黑洞。由于最近媒体和很多文章都介绍了关于黑洞的很多知识，因此本文就从不同的角度回答有关黑洞的几个问题：为什么爱因斯坦不相信黑洞存在？怎么知道这样的天体是黑洞？物质是如何掉到黑洞里面的？如何获得独立的证据证明这样的引力波事件的确来自于黑洞的

并合? 探测这样的引力波事件对于我们理解黑洞有什么进一步的作用?

2 爱因斯坦不相信黑洞

1915年爱因斯坦发表了广义相对论理论后, 卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild)很快就给出了广义相对论场方程第一个解析解, 也就是不旋转的球对称分布质量周围的时空几何, 后来被称为史瓦西度规或者史瓦西解。这个解对应的就是黑洞, 它有两个重要特征: 一个就是在史瓦西半径处($R_s = 2GM/c^2$, 其中 G 是万有引力常数, M 是黑洞的质量, c 是光速), 光线的红移无限大, 也就是光线无法从此处以及更靠里的地方逃出去, 被称为事件视界(以下简称“视界”); 另外一个就是其中心的地方所有的物理量都发散, 也就是趋向于无穷大。如果把太阳这样质量的天体变成一个黑洞, 就需要把它压缩到半径只有大约3 km。爱因斯坦不认为视界的存在有什么问题, 但是他认为自然界中不能有发散的物理量(视界处光线的红移趋向于无穷大意味着光子的能量趋向于零, 所以不是发散), 因此爱因斯坦认为史瓦西解仅仅是一个数学的解, 不能对应自然界的物体。

从20世纪30年代开始, 广义相对论和量子力学应用到恒星演化的后期, 预言了具有不同质量的恒星在耗尽其热核能源后, 最终可能会塌缩成为性质完全不同的致密天体, 如白矮星、中子星, 或者黑洞。小质量的恒星, 例如太阳, 最终会成为一颗白矮星, 其内部的电子简并压力能够足以和其引力达到平衡。钱德拉塞卡指出, 当更大质量的恒星形成的致密天体的质量超过大约1.4倍太阳质量时, 也就是所谓的钱德拉塞卡极限, 该天体内部的简并电子气体的压力无法抗拒其自身的引力, 该天体因此将进一步收缩。兹维基(Fritz Zwicky)和朗道进一步指出, 在这种情况下, 其内部的自由电子被挤入质子形成中子, 该致密天体将进一步收缩成为一颗中子星, 依靠中子气体的简并压力和天体的引力达到平衡。

1939年, 奥本海默(Oppenheimer)和他的同事

发表的两篇开创性论文奠定了黑洞的存在和形成机制的物理基础。奥本海默和Volkoff的工作指出^[3], 中子星有质量上限。超出这个上限, 该致密天体将在引力作用下塌缩。奥本海默和斯奈德(Snyder)^[4]随后指出, 该引力塌缩将无限地继续下去, 最终必须形成黑洞。

但是爱因斯坦则认为应该存在我们尚未发现的自然规律阻止最后形成黑洞, 避免他担心的发散灾难的发生! 今天我们认为黑洞的确是存在的, 那么是爱因斯坦错了而奥本海默对了吗? 在回答这个问题之前, 我们首先看看天文观测如何寻找黑洞以及有没有找到黑洞。

3 黑洞的观测证据

在20世纪60年代, Zel'dovich开始考虑如何寻找黑洞的问题。根据定义, 黑洞是看不见的, 因此他的想法是, 通过测量双星系统中可见恒星的发射线的周期性多普勒变化, 来测量一个双星系统中看不见的天体的质量。如果其质量比中子星的质量上限还大, 那么这个看不见的天体就很可能是黑洞。同时, 他还考虑了致密天体吸积星际介质的问题, 得出了在致密天体附近产生X射线的结论。Zel'dovich和Novikov^[5, 6]结合上面这两种想法, 建议X射线双星是寻找黑洞的最佳候选系统。于是很快有人就于1972年发现了第一个黑洞的证据^[7], 也就是X射线双星天鹅座(Cygnus) X-1中的“看不见”的天体质量远大于中子星质量上限。由于Cygnus X-1的很多观测特征都明显有别于其他已知天体, 尤其是和也产生强烈X射线辐射的中子星双星明显不同, 此后就把具有Cygnus X-1的有些观测特征但是没有任何中子星的观测特征的X射线双星系统作为恒星级黑洞双星候选体。恒星级黑洞双星候选体并不一定是恒星级黑洞双星, 因此还必须对恒星级黑洞进行严格和可靠的观测证认。

对于黑洞的外部观测者来讲, 黑洞的本质特征是其引力质量都在其视界内, 而黑洞视界以内的现象是从外部无法观测到的。因此, 学术界和

公众普遍认为，对黑洞存在的终极检验就是找到黑洞视界存在的“直接”证据。但是，根据视界的定义，光无法从视界处逃逸到远处的观测者，因此远处的观测者永远无法获得黑洞的视界存在的直接证据。然而，在科学研究中，科学发现并不总是依赖直接证据。例如，我们从来没有“直接看到”粒子加速器实验中创造出的很多粒子，通常是通过它们的衰变产物来推断它们的存在。由于我们无法到达太阳系以外的几乎任何天体而进行实验来验证该天体的性质，所以确认某一个天体属性的基本途径就是收集一批“间接”但是“确凿”的证据。对于证认黑洞，既然放弃了找到黑洞视界存在的“直接”证据的希望，我们也只能这么做。几年前我提出了证认恒星级黑洞的五个判据^[8]：

(1)该天体表现的观测特征和其他已知类型的天体不一致；

(2)从该天体没有观测到其他已知类型的天体区别于黑洞的特征，也就是没有对基于该天体是恒星级黑洞的模型的反证；

(3)基于该天体是恒星级黑洞的模型能够解释已知的观测现象；

(4)从观测现象推测的恒星级黑洞的基本参数是自洽和合理的；

(5)没有替代的理论模型可以比恒星级黑洞模型对相同或者更多的观测现象解释得同样甚至更成功。

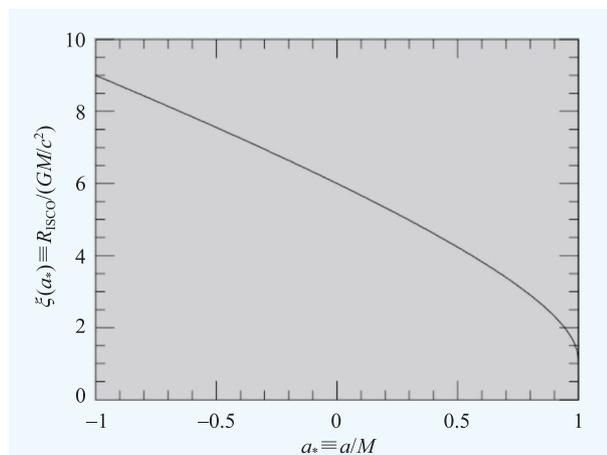


图2 黑洞的最内稳定圆轨道半径(R_{ISCO})是其自转参数(a_*)的单调函数。 $a_* < 0$ 对应吸积盘的转动方向和黑洞相反

只要把上面的“黑洞”或者“恒星级黑洞”换成任何其他类型的天体，上述判据也可以用来判定这些天体的发现。(关于论证物理宇宙中存在天文黑洞的一般性判据，请参考文献[9])。事实上，很少或者也许没有哪个天体的发现完全满足上述严格而且广泛的判据。所以，尽管这五个判据比较原则性而不是定量的，但是满足实验物理和观测天文承认新发现的最高标准。因为发现黑洞的重要性和影响都非同寻常，这些判据也满足卡尔萨根的原则，即“非凡的主张需要非凡的证据”。

由于我们在X射线双星中寻找黑洞，所以可以排除双星系统中两个天体都是普通恒星的可能性，其中一个天体必然是致密天体，也就是白矮星、中子星或者黑洞。而白矮星的质量上限低于大约1.4倍太阳质量，中子星的质量上限低于大约3倍太阳质量，所以如果该致密天体的质量超过3倍太阳质量，那么就可以认为“该天体表现的观测特征和其他已知类型的天体不一致”。这是上述第一个判据的应用。

因为中子星的质量在一个太阳质量的数量级左右，半径在10 km左右，也就是其“致密”程度实际上和黑洞差不多，所以和恒星级黑洞的基本性质最接近的就是中子星。如果通过第一个判据的黑洞候选仅仅是一个“大质量的致密天体”而不是一个“黑洞”，那么这个天体很可能会产生类似从中子星观测到的特征。我们已经知道，由于中子星的致密性、强磁场和具有固体表面，中子星的快速转动能够产生短周期脉冲，而在中子星的表面吸积物质的积累能够产生X射线爆发，所以如果没有观测到这些特征，就可以认为该天体通过了上述第二个判据。

满足前两个判据之后，实际上我们已经排除了该天体是任何已知类型的天体的可能性，而且也排除了该天体是新类型的、类似中子星的“大质量致密天体”。由于在所有其他可能性中，黑洞有确定的理论预言，而且是宇宙中最简单的天体(只有质量和自转)，所以初步认定该天体是黑洞是非常合理的。在这种情况下我们就把该天体称为黑洞候选体。(事实上，如果最后判定该天体

不是黑洞，而是另外一种新型天体，意味着我们对于物理规律和自然现象的认识又大大加深了一步，其科学意义更加重大。)而后几个判据的应用都需要研究当物质或者光线非常接近甚至落入黑洞时会发生什么。在黑洞附近，有几个重要的效应能够提供黑洞存在的间接证据：

(1)存在黑洞的最内稳定圆轨道，越过此轨道该物质将自由落入黑洞。如图2所示，这个轨道半径是黑洞自转角动量的单调函数。在某些情况下可以使用这个广义相对论效应测量黑洞的自转，例如，通过拟合黑洞周围吸积盘内区产生的谱线的相对论展宽或者吸积盘辐射的连续谱^[10, 11]；

(2)黑洞的视界或者击中黑洞的视界的物质不产生远处的观测者可以观测到的任何辐射，这是黑洞的视界的体现；

(3)黑洞周围极深的引力势使物质向黑洞吸积，在这个过程中物质的部分静止质量——能量被转换为辐射。吸积黑洞可以通过这个效应被探测到。在图3中，我们画出不同种类的黑洞吸积系统的转换效率，并与其他天体物理系统的转换效率做比较。黑洞吸积系统的最主要特征就是其辐射效率能够覆盖很多数量级^[9]。

为了定量计算这些观测效应并和观测结果进行比较，最重要的一个输入参数就是黑洞的质量，当然在上面应用第一个判据时我们就已经利用了该天体的质量，或者至少需要知道其质量的下限。黑洞的自转对于上述的两个(第(1)和第(3))效应都是必不可少的。

用目前普遍使用的测量这些双星中伴星的视线速度随轨道位相的调制，可以测量这些恒星级黑洞候选体的质量函数，也就是绝对质量下限，然后通过伴星的光谱型可以估算伴星的质量，从而进一步约束它们的质量下限。这样得到的很多质量下限都显著大于已知的中子星的质量、甚至理论上允许的中子星的质量上限，从而排除了这些天体是最接近黑洞的中子星的可能性。最后通过测量有些双星系统中伴星的辐射流强随轨道位相的变化得到双星系统的轨道倾角，从而可以得到恒星级黑洞候选体质量的有效估计，发现这些

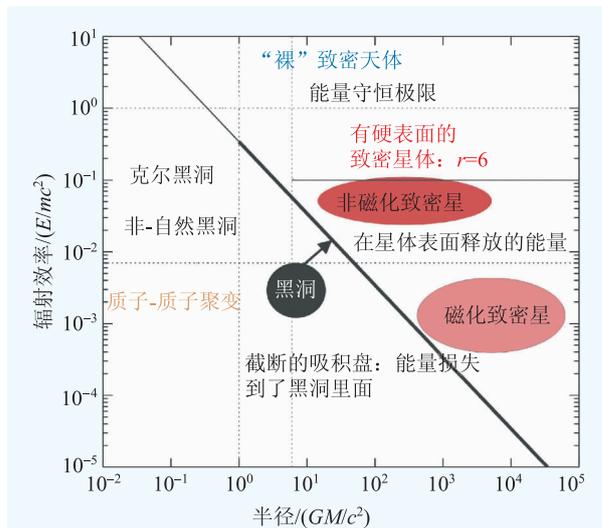


图3 不同内边缘半径(以引力半径为单位)的吸积盘的辐射效率(辐射的能量占其静止能量的比例)。对角线的粗黑线指的是黑洞吸积系统，其辐射效率能够覆盖很多数量级^[9]

天体的质量基本上都在几倍到十几倍的太阳质量之间，和大质量恒星演化到最后能够通过引力塌缩形成黑洞的质量范围一致。

利用广义相对论的黑洞存在最内稳定圆轨道的预言，我们提出了通过测量吸积盘内半径估算黑洞的自转的方法^[11]，并且得到了广泛的应用。而在很多恒星级黑洞X射线双星系统中观测到的在很大的亮度范围内稳定的吸积盘内半径也和广义相对论的预言一致，表明这种测量黑洞自转的方法是可靠的，所得到的黑洞的自转参数和广义相对论的克尔度规的要求一致，进一步提供了它们是黑洞的支持证据。

由于黑洞只有视界而不能和吸积盘发生作用，但是中子星的表面磁场会和吸积盘发生作用，所以当吸积盘的吸积率下降(也就是气压下降)时，中子星的磁压会迫使其吸积盘半径迅速增加，而黑洞则不会有这个效应，这和观测结果是一致的^[12]。同时，由于从吸积盘内边缘的物质掉入黑洞的时候不会产生显著的辐射，而当掉到有表面的天体(比如中子星)的时候会产生辐射，因此吸积盘内半径很大(也就是吸积盘的辐射比较弱)的黑洞系统就会比中子星系统暗很多，这也和观测结果一致^[12]。

综上所述，我们使用基于黑洞的模型能够成

功地解释所有观测到的数据，而且能够说明所有观测现象和中子星系统的区别，但是没有发现任何反例。尽管有不同的模型能够形成既不同于中子星也不同于黑洞的致密天体，但是没有比黑洞的模型更加简单而且能够解释所有这些观测数据的模型，因此根据证认恒星级黑洞的五个判据，我们确信恒星级黑洞X射线双星系统的致密天体的确是广义相对论预言的黑洞。

4 物质是如何掉入黑洞的

既然黑洞在宇宙中的确是存在的，而且我们已经确认的恒星级质量的黑洞完全符合奥本海默所预言的恒星演化到最后引力塌缩的过程所形成的天体，那么是爱因斯坦错了吗？其实未必！

实际上，奥本海默和斯奈德的结论是^[4]：对于共动观测者(也就是随着恒星的塌缩一起做自由落体的观测者)，塌缩将在有限的时间内结束，物质进入黑洞的视界并且到达中心奇异点。但是所有的天文观测者都不是共动观测者，而是外部观测者。由于外部观测者的时钟和共动观测者的时钟在塌缩开始之后就不能同步了，我们必须考察根据外部观测者的时钟物质能否掉入黑洞以及掉入黑洞最后会发生什么。

根据同一篇论文中奥本海默和斯奈德的广义相对论计算结果^[4]，在外部观测者的有限时间内，物质逼近视界但是永远不能进入，只能形成

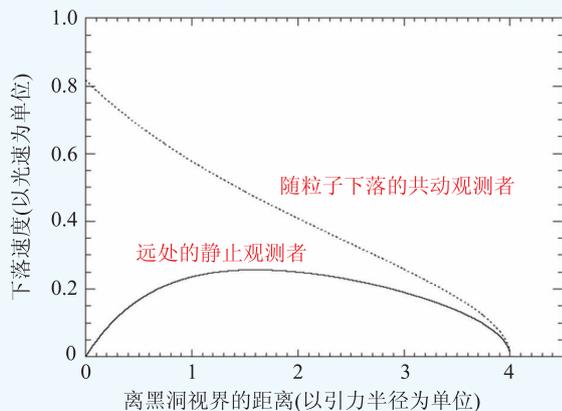


图4 两个不同坐标系的观测者所测量的粒子向黑洞下落的速度随距离黑洞视界距离的变化

一个“冻结”星，而不是黑洞。这和所有广义相对论的专著、教科书和科普书中对检验粒子向黑洞的下落的计算(如图4所示)以及宇航员到黑洞旅行的照片的描述都是一致的^[13]。因此，不但物质在外部观测者的有限时间内不能到达中心的奇点处(因此就不会产生发散的物理量，爱因斯坦担心的问题就不会发生了)，而且甚至都不能进入黑洞的视界。这难道不是很奇怪的事情吗？

这个问题从1939年开始就存在了，而且在引力物理界有过长时间的争论。那么为什么最近几十年似乎很少人提及了呢？原因就是大部分理论家认为，由于爱因斯坦认为所有的坐标系都是等权的(也就是所谓的广义协变原理，要求在所有坐标系下物理规律都是相同的)，那么如果能够找到一个坐标系，在这个坐标系下物质能够进入黑洞就说明黑洞能够形成。按照这个说法，在共动坐标系下奥本海默和斯奈德证明了能够形成史瓦西解对应的黑洞，那么这样的黑洞在宇宙中就能够形成！但是这样的说法其实有掩耳盗铃之嫌！

在不同的坐标系下有相同的物理规律并不表明有相同的物理现象！宇航员到黑洞附近转一圈回来就比等在外面的同事年轻了，这就是两者经历了不同的物理现象的体现。同理，自由落体的宇航员能够在有限的他自己的时间内进入黑洞到达奇点，并不表明外部观测者能到等到他进去到达奇点。而奥本海默和斯奈德的广义相对论计算表明，外部观测者的确不能等到宇航员进去：图4清楚地表明，无论外部观测者等多久，宇航员始终在黑洞视界的外面，因为他的相对速度趋近于零！而这就是黑洞视界的基本性质，尽管在别的坐标系中黑洞视界可能不存在，但是对于外部观测者来讲黑洞视界是真实存在的，无法回避前面的奇怪结论！

甚至很多理论家说，由于使用外部观测者坐标系会出现视界(也就是上面的麻烦)，所以这个坐标系有缺陷，我们不能使用这个坐标系研究黑洞。这就更加荒谬了：地球有很多缺陷，我们生活中的很多事情都或多或少有缺陷，难道我们就不能在地球生活了？理论家研究理论上的黑洞

可以使用任何方便的坐标系，但是我们必须使用外部观测者的坐标系研究真实宇宙中的黑洞！

那么到底是谁错了：广义相对论？爱因斯坦？奥本海默？

2009年，我当时的学生刘元和我重新思考了这个问题^[2]，发现图4的计算过程中有一个很小的缺陷：没有考虑检验粒子(比如向黑洞下落物体)的质量对史瓦西度规的影响。以前没有考虑检验粒子的质量的理由是：由于检验粒子的质量和黑洞的质量相比可以忽略不计，所以对度规的影响可以忽略不计。但是就是这个微小的影响导致了以前的计算结果的不自治！

我们发现，在考虑了所有下落物质和黑洞的质量的全局解之后，即使对于外部观测者，由于物质下落过程中黑洞的视界在膨胀，最终物质会遇到膨胀的视界而被吞噬进去，因此是膨胀的视界吞噬了下落的物质，而不是物质落入了黑洞。因此在外部观测者有限的时间内，物质能够进入黑洞，而以前计算的检验粒子不能进入黑洞的原因在于忽略了检验粒子的质量，因此视界不会膨胀，在外部观测者的有限时间内永远不能进入黑洞。我们计算得到的另外一个结论是，在外部观测者有限的时间内下落物质永远不会到达中心的奇异点！

由于目前知道的唯一可能形成黑洞的途径就是物质的引力塌缩，所以宇宙中的黑洞虽然质量都在视界以内，但是在宇宙的有限的寿命内黑洞中心的奇异点处不会有物质存在，当然也就没有物理量发散的问题，自然消除了爱因斯坦的担心。物质塌缩形成黑洞的过程如图5所示。所以最后的答案是：物质塌缩能够进入黑洞的视界，黑洞能够形成，但是中心没有奇异点。因此广义相对论没有错，爱因斯坦没有必要担心物理量发散，奥本海默等人的一个小疏忽导致了“冻结星”佯谬！

5 有GW150914引力波事件来自黑洞并合的独立证据吗

LIGO团队根据所探测到的GW150914引力波波，计算出这个事件来自于两个质量大约为

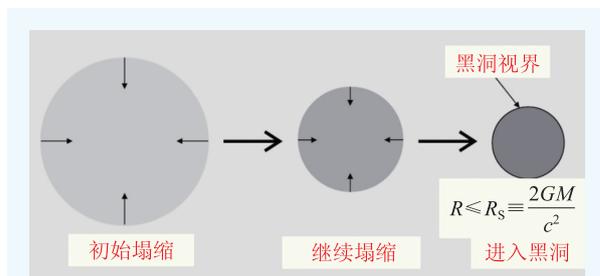


图5 根据外部观测者的时间，物质塌缩进入的示意图：在有限的时间内物质可以进入黑洞的视界，但是不会到达中心的奇异点，因此在奇异点处没有物质

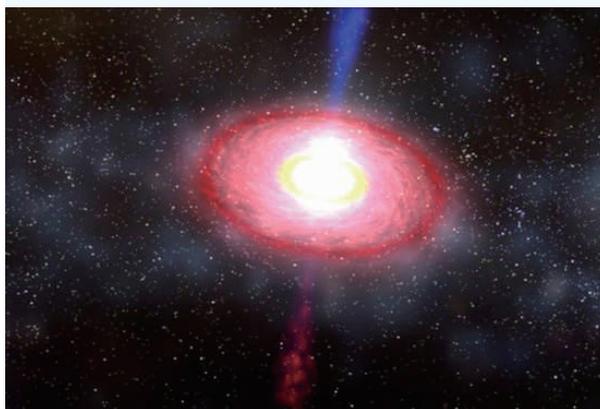


图6 两个“冻结星”并合产生伽玛射线暴的示意图

30倍太阳质量的致密天体，而目前已知的致密天体中只有黑洞能够有这么大的质量，因此断定这两个致密天体是恒星级质量的黑洞。但是根据前面的判断是否黑洞的5个判据，似乎因此断定这两个天体是黑洞并不充分。例如，如果这两个天体是以前计算得到的“冻结星”，那么也很可能产生和观测结果一致的引力波波形。

尽管我们根据广义相对论的理论计算排除了“冻结星”模型，但是能否从对GW150914的天文观测也排除“冻结星”模型？我们最近计算发现^[14]，如果这两个致密天体是“冻结星”，那么“冻结”在黑洞视界的这些物质在并合过程中将通过Blandford & Znajek机制^[15]提取最终形成的自转黑洞的自转能在很短的时间内释放至少 10^{55} 耳格的能量，这将是一个亮度非常高的伽玛射线暴(如图6所示)，但是并没有被当时运行的伽玛射线暴探测器观测到！考虑到宇宙中类似GW150914的事件会经常发生，即使大部分产生伽玛射线的相对论喷流可能没有对着观测者而不

被探测到，但是有些这么明亮的伽玛射线暴还是应该经常被伽玛射线暴探测器探测到。然而目前已经探测到的几千个伽玛射线暴中还没有一例有这么高的光度，因此可以断定GW150914不可能来自“冻结星”，符合我的学生和我在2009年的那篇论文中的明确预言^[2]：两个黑洞的并合只能产生引力波辐射而不会产生电磁波辐射，因为在外部观测者的坐标系中，物质不可能在黑洞的视界外面堆积，必须在很短的(外部观测者的)时间内进入黑洞。

事实上，只要这两个致密天体不是黑洞，那么就必然有大量的物质能够在并合的过程中产生强烈的伽玛射线暴，只不过产生的能量也许没有两个假想的“冻结星”那么多。未来会有更多的类似GW150914这样引力波事件同时被伽玛射线探测器所监测(比如2016年下半年中国将要发射的硬X射线调制望远镜卫星(图7)和天宫二号的伽玛射线暴探测器，以及预计2021年发射中法合作的伽玛暴多波段天文卫星，都具有很好的伽玛射线暴探测能力)，那么这些探测结果将能够彻底判定这样的引力波事件是否来自于两个黑洞的并合。

顺便指出，在报道GW150914引力波事件的新闻和学术论文中，包括LIGO团队在内的几乎所有学者都表示，两个黑洞并合应该不会产生强烈的电磁波辐射(包括伽玛射线暴)。但是他们都是隐晦地用了共动坐标系下物质能够进入黑洞的

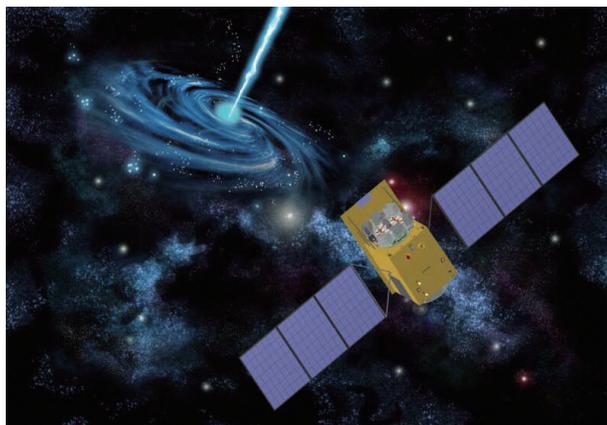


图7 计划于2016年11月发射的我国首个X射线天文卫星的示意图。该卫星除了能够观测黑洞和中子星等致密天体的X射线辐射之外，也具有探测伽玛射线暴的能力

计算结果，而不是我们在外部观测者坐标系下的计算结果。因此尽管他们的说法看起来和我们的计算结果一致，但是他们的出发点是错误的，因为在共动坐标系下得到的结论不能直接应用到外部观测者的坐标下。实际上，他们用的共动坐标系下得到的结论如果转换到观测者坐标系下就只能得到物质不能进入黑洞视界而只能形成“冻结星”的结论。因此他们的说法尽管是目前学术界的标准说法，但是完全属于“张冠李戴”。

6 引力波探测对理解黑洞的重要性

根据前面的简要介绍，我们知道即使是在观测者坐标系中，黑洞的视界外面也不会有物质的累积。因此两个黑洞组成的天体系统无论在并合之前还是在并合过程中都只会产生引力波，而不会产生强烈到能够被探测到的电磁波辐射。因此引力波是目前研究双恒星级质量黑洞的唯一手段，所以LIGO成为第一个发现双黑洞系统的天文台当然不是偶然的。只有通过系统的引力波巡天观测，我们才有可能了解这种双黑洞系统在宇宙中的分布以及形成和演化机制。

根据我们的计算结果，在外部观测者的有限时间内，物质进入黑洞之后并不会到达中心的奇异点，因此黑洞内部物质的分布就完全取决于物质掉入这个黑洞的历史，也就是这个黑洞的演化历史。当两个这样的黑洞离得比较远时，它们绕转产生的引力波和它们内部的质量分布无关。但是在并合的最后阶段，它们相互的潮汐力就和内部的质量分布有关了，因此就会影响到所产生的引力波波形和偏振。因此，将来更高精度的引力波探测将有可能探测到黑洞内部的物质分布，从而理解它们的形成和演化历史，而这也是任何其他天文观测手段都不可能做到的。

前面介绍了目前对恒星级质量黑洞的观测结果，已知的这些黑洞的质量都在几倍到十几倍太阳质量之间，都处于银河系内以及距离银河系很近的星系的由一个黑洞和一个恒星组成的X射线双星系统中。尽管在其他星系的极亮X射线双星

系统中发现了存在质量可能是20—30倍太阳质量的黑洞^[16]，但是由于观测数据的限制和这些系统的复杂性，尚不能完全排除其他的可能性。因此产生GW150914引力波事件的两个大约30倍太阳质量的黑洞是目前已知的这种黑洞的最可靠样本，而这种黑洞的形成和演化机制目前并不清楚，说明引力波的确为我们打开了一扇研究黑洞的新窗口。

7 总结和展望

LIGO宣布探测到了两个黑洞并合产生的引力波GW150914是人类探索宇宙的第5个里程碑。根据作者的美学研究成果，判断GW150914在审美的两个要素“没缺陷”和“不常见”方面表现出色，是“完全没缺陷极端不常见”的科学突破，因此毫无悬念地当选美猴王，也就是猴年最美的科学成果。然后讨论并回答了以下几个问题：

(1)为什么爱因斯坦不相信黑洞存在？

答案：以前认为黑洞的中心有奇异性，但是爱因斯坦认为自然界中不应该存在奇异性而导致物理量发散。

(2)怎么知道这样的天体是黑洞？

答案：根据我们提出的黑洞存在的5个判据，目前天文学家观测到的一批质量在几倍到十几倍之间的致密天体是黑洞。

(3)物质是如何掉到黑洞里面的？

答案：在外部观测者的坐标系中物质下落时黑洞的视界膨胀，下落物质和膨胀的视界相遇进入了黑洞。因此所有教科书和科普文章中宇航员被“冻结”在黑洞视界外面的结论都是错误的。

(4)如何获得独立的证据证明这样的引力波事件的确来自于黑洞的并合？

答案：我们的理论计算预言黑洞的并合不可能产生引力波之外的电磁波辐射，但是如果两个致密天体之一不是黑洞，就必然会产生电磁波辐射。因此未来的电磁波辐射的观测，尤其是伽玛射线暴的观测能够获得独立的证据证明这样的引力波事件的确来自于黑洞的并合。

(5)探测这样的引力波事件对于我们理解黑洞有什么进一步的作用？

答案：有可能探测到我们的理论计算预言的物质在黑洞内部的分布；能够研究双恒星级黑洞的宇宙中的分布；提供一个研究黑洞的全新的窗口。

2016年下半年中国将要发射的硬X射线调制望远镜卫星和天宫二号的伽玛射线暴探测器，2021年中法合作的伽玛暴多波段天文卫星将要发射运行，这些仪器都具有很好的伽玛射线暴探测能力，无论它们能否探测到来自未来LIGO的引力波事件的伽玛射线暴，都将对于我们深入理解产生引力波事件的黑洞的性质及其形成和演化带来新的进步。

参考文献

- [1] Abbott B P *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116:061102
- [2] Liu Y, Zhang S N. *Phys. Lett. B*, 2009, 679:88
- [3] Oppenheimer J R, Volkoff G. *Phys. Rev.*, 1939, 54:374
- [4] Oppenheimer J R, Snyder H. *Phys. Rev.*, 1939, 56:455
- [5] Zel'dovich Ya B, Novikov I D. *Uspekhi Fiz. Nauk*, 1964, 84:877.
English translation in *Soviet Physics Uspekhi*, 1965, 7:763
- [6] Zel'dovich Ya B, Novikov I D. *Uspekhi Fiz. Nauk*, 1965, 86:447.
English translation in *Soviet Physics Uspekhi*, 1966, 8:522
- [7] Webster B L, Murdin P. *Nature*, 1972, 235:37
- [8] 陆垓主编. 现代天体物理(下). 北京大学出版社, 2014. pp. 163—185
- [9] Zhang S N. *Astrophysical black holes in the physical universe*. In: York D G, Gingerich O, Zhang S N (eds). *Astronomy Revolution: 400 Years of Exploring the Cosmos*. Taylor & Francis Group LLC/CRC Press, 2011
- [10] Loar A. *Astrophys. J.*, 1991, 376:90
- [11] Zhang S N *et al.* *Astrophys. J. Lett.*, 1997:482:L155
- [12] Weng S S, Zhang S N. *Astrophys. J.*, 2011, 739:42
- [13] Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*. New York: Freeman, 1973
- [14] Zhang S N *et al.* arXiv:2016, 1604.02537
- [15] Blandford R D, Znajek R L. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1977, 179:433
- [16] Liu J *et al.* *Nature*, 2013, 503:500