

双黑洞并合与数值相对论

在 2011 年 10 月出版的 *Physics Today* 杂志上,刊登了美国布伦瑞克(Brunswick)的鲍多因学院(Bowdoin College)的 Baumgarte 教授和伊利诺斯大学(University of Illinois)的厄本那一香槟分校(Urbana-Champaign)的 Shapiro 教授合写的《双黑洞并合》一文.文中简要介绍了和引力波探测相关的双黑洞并合数值相对论研究的发展历程、已取得的成果和仍面临的问题.

黑洞(黑洞是强引力场中不能对外界产生因果影响的时空区域)和引力波(引力波是时空背景曲率的涟漪,并以光速传播.它和电磁波一样可以带走系统的能量、动量和角动量)都是爱因斯坦广义相对论美妙的理论预言,众多的天文观测已给出它们存在的间接证据,如星系中心的超大质量黑洞和双中子星能量损失进度(1993 年的诺贝尔物理学奖)等.但至今为止还没有对它们的直接观测.不过这种状况正在逐步改变,在世界范围内已经建造了多个直接观测引力波的探测器,包括在美国的激光干涉引力波天文台(LIGO),意大利的 VIRGO,德国的 GEO600 和日本的 TAMA 等.除了这些地面探测器外,人们还设计了太空探测器,如 LISA 等.双黑洞并合是这些探测器最重要的引力波源之一.引力波探测困难的原因有二,一是宇宙中存在的引力波强度极弱,二是人们对引力波的理论认知不够.以双黑洞并合为例,如果人们能够准确知道其所发射引力波波波形,匹配滤波数据分析方法将大大提高引力波观测的能力.为了对双黑洞并合进行完整的理论描述,数值计算的方法是目前唯一可行的理论方法.但即使是数值计算,该问题也给人们提出了极大的挑战.这促使了爱因斯坦方程数值计算——数值相对论作为一个独立学科的形成.黑洞包含了物理上的时空奇点,这是一片引力场(曲率)变为无限大的区域.于是,选择一个可以避免遇到这些奇点的计算方法很重要,但这绝非易事.另外,大部分的计算资源通常用在解决黑洞附近的强引力场区域,而对于引力波,它对背景引力场扰动很小,需要延伸到引力场很弱的远处区域,所以数值方法必须能够成功应对这样的大动态范围的问题.最后,不同的爱因斯坦方程形式在进行数值计算时的表现很不一样,数值相对论学家们还需找到合适的方程形式以求得到稳定的数值解.

早在上个世纪中后期,人们就开始了爱因斯坦方程的数值计算研究.在基于球对称和轴对称模型的研究中,人们完成了两个黑洞沿对称轴方向直接碰撞的模拟.它揭示了直接碰撞、并合两个视界时的几何结构,并且指出大约只有 0.1% 的黑洞质量在碰撞中以引力波的形式辐射出去.这与霍金面积理论所允许的上限 29% 相去甚远,也比通过准圆周旋进的并合过程所释放的能量少很多.另外一个重要的发现是在引力塌缩中的临界现象,还有一些模拟则针对旋转的中子星的塌缩,无碰撞的物质团以及这些物体之间的直接碰撞.

在经历了这些成功之后,看起来好像下一步可以丢掉球对称或者轴对称的假设,来真实地模拟准圆周轨道双黑洞的旋进和并合.引力波探测器的发展更是迫切需要这样的模拟,因此在 1990 年代中期,美国国家自然科学基金资助了一项宏伟的挑战性工程来加速代码的发展.然而,丢掉对称性会引入一个新的意想不到的困难.当模拟发展到三维空间时,甚至在弱引力场条件下,爱因斯坦方程的数值计算也会遇到数值不稳定的问题,在很短的数值计算时间里,程序就会遇到发散而崩溃.对黑洞的模拟则更是糟糕得多.

接下来,人们花了 10 多年的时间,研究工作在多方面取得了进展.数值相对论学家克服了早期模拟过程中遇到的很多困难.第一个重要的进步涉及到爱因斯坦方程的重新改写.成功的例子有 Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura(BSSN)形式和广义调和坐标形式. BSSN 形式可以用来模拟不包含任何时空奇点的并合双中子星.也可以模拟黑洞系统,但必须小心处理其内部的时空奇点.有一种途径采用了黑洞切除的办法,即把黑洞内部区域从计算网格中直接去掉.因为黑洞内部并不会影响外部的行为,所以这种切除是有物理意义的.另外一种途径是移动穿刺坐标法,对数值计算的坐标强加了一些特殊的规定.用这样的坐标模拟的空间切片不会到达时空奇点,所以也就不需要做黑洞切除.其他一些计算技术上的进展,包括高阶近似方法和自适应网格细化的方法等.

经过几十年的努力和期待,结合上述方法,人们

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与 *Physics Today* 合作的项目

第一次成功地模拟了双黑洞的旋进和并合. 首先是由加州理工大学的 Pretorius 完成的, 很快 Campanelli 所在德克萨斯大学布朗斯维尔分校的数值相对论小组和 Baker 所在美国国家航空和航天局(NASA)高达德太空飞行中心的数值相对论小组也做到了. 这些模拟结果的公布鼓舞人心, 为人们探究与黑洞并合相关的物理以及天体物理问题打开了大门.

引力波形是双黑洞并合模拟的第一批结果之一, 如图 1 所示. 它被用来在引力波探测匹配滤波数据分析时使用. 有趣的结果是, 这些真实的波形与对高自由度对称双星系统的早期定性描述很类似. 但真正让人惊奇的是对不等质量双黑洞、自旋方向不一致的双黑洞或者不等质量且自旋方向不一致的双黑洞的模拟. 其中一个惊奇是双黑洞合并所形成的最后黑洞的反冲. 这个反冲来源于引力波的非对称分布导致其带走系统的动量. 而动量守恒给辐射后留下的黑洞一个反冲的速度. 首次模拟反冲是对非自旋、不等质量双黑洞进行的. 模拟质量比为 0.36 的双黑洞, 其最大反冲速度约为 175km/s, 这与早期的后牛顿估计结果一致. 然而惊讶的是, 对于有自旋的黑洞, 反冲速度会大很多. 对一种等质量、自旋在轨道平面上有很大且方向相反分量的情况, 反冲速度可以超过 4000km/s. 这么大的速度甚至超过了逃逸出最大星系的速度, 这个结果对于天体物理学很重要. 根据分层结构形成模型, 大星系是由一系列小星系并合而成. 当它们并合时, 其中的超大质量黑洞也会并合, 如果这些超大质量黑洞导致的反冲速度大于离开残余星系的逃逸速度, 那么含有超大质量黑洞的有核球结构的星系会比实际观测到的更少. 这个问题已经引发了一些宇宙学研究, 其中关键就是会导致非常大反冲速度的并合. 即使对于一个随机的自旋微扰, 这种可能性也非常小. 另外, 一些研究表明, 与周围气体的相互作用会使黑洞的自旋方向与轨道角动量方向一致, 这样就会减小最后得到的反冲速度. 黑洞自旋也在一些其他有趣的方式上影响着双黑洞并合. 假设忽略引力波带走的角动量, 并合剩余的自旋是原来两个之和, 角动量也同样如此, 并合形成黑洞的自旋方向可能与原来黑洞的自旋方向不同. 这样一种自旋方向的改变可能会有可观测的结果, 因为目前理论确定射电星系源的辐射是沿星系中央黑洞的自转轴发出的. 实际上, 一些射电喷流表现为一种 X 形的模式. 这表明在过去的某个时候, 黑洞的自旋使这些射电喷流发生了翻转.

要完全掌握各种不同质量比和自旋的双黑洞情况, 数值模拟还有很长的路要走. 探索高维的参数空

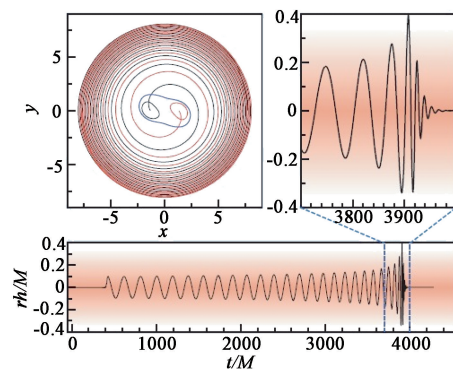


图1 双黑洞并合轨道和引力波形. 左上图显示的是两个等质量高自旋黑洞(黑线和红线分别对应两个黑洞的轨道, 见《物理》网刊彩图)旋进并合过程的轨道. 图中还显示了并合刚完成时两个独立黑洞和并合形成黑洞的情况. 下图显示了整个过程所释放出来的引力波波形. 右上图是并合阶段引力波波形的放大

间是一项艰巨的任务, 但至关重要的一个工作是建立匹配滤波数据分析中的波形模板. 关于双黑洞质量比问题, 当前的计算资源还不能够模拟质量比小于 10^{-2} 的双黑洞系统. 质量比小于 10^{-5} 的极端质量比双黑洞系统可以用黑洞微扰理论来解析处理, 这种理论用引力辐射的反作用来推动旋进. 这样的—个恒星质量黑洞围绕一个超大质量黑洞旋转的系统很有可能形成在星系的中心, 并为引力波探测器提供低频引力波源. 但不管是后牛顿方法还是微扰理论, 还不能够提供中等质量比的双黑洞系统的波形模板, 而这种双星系统很可能是在中等质量黑洞被螺旋吸入超大质量黑洞时形成的.

在对真空中的双黑洞并合问题有了很好的掌握之后, 数值相对论学家们已经转向了下一个来自环境的挑战. 这个挑战包括数值求解爱因斯坦方程、相对论性磁流体动力学方程以及光子的辐射输运方程. 引力波引起的黑洞反冲和质量损失都对吸积的气体会有很大影响. 初步的相对论性模型可以用来粗略估计大的气体云中或者是双星圆盘中在早期以及在余辉阶段并合所发出的辐射. 一些多波段设备, 比如大视场全景巡天望远镜, 可以观测到这样的短暂喷流. 双中子星以及黑洞—中子星都是短周期的高能伽玛暴的候选者. 吸积盘会产生磁场以及沿转轴喷出的物质也可能引发伽玛暴. 另外, 超大质量中子星也可能引发伽玛暴. 相对论性的数值模拟可以用来研究这些可能, 并且探讨同时观测到来自宇宙中同一个源的引力波和伽玛暴的可能性.

(华中科技大学 孙宝三、中国科学院应用数学研究所 曹周键
编译自 Thomas W. Baumgarte, Stuart L. Shapiro, *Physics Today*, 2011, (10):32, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)