

双星并合揭示中子星结构

周恩平 徐仁新[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

2018-06-06收到

[†] email: r.x.xu@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180606

上世纪最伟大的科学成就之一是建立了粒子物理标准模型,认为自然界存在强力、弱力、电磁力和引力这四种基本相互作用。尽管引力未被成功地量子化,但它可被爱因斯坦广义相对论很好地描述(参见本刊2018年第2期第98页);弱力和电磁力被电弱理论统一地刻画;强力的理论框架则是量子色动力学(QCD)。研究发现,在能标较高时,QCD具有渐近自由属性,并已被高能实验定量检验;然而在较低能标下,如何理解QCD丰富的非微扰特性却是如今面临的严峻挑战。值得一提的是,类似于原子核,超新星爆发残留的中子星也是典型的低能QCD系统,相关天体物理研究无疑将有助于人们更好地理解非微扰QCD行为。

中子星平均密度跟原子核相当。鉴于对低能

强相互作用非微扰特性认识的不足,人们至今还很难依据QCD完整地计算出中子星的内部物质状态及其整体结构。一些基本问题尚未澄清:夸克可否解禁?奇异数是否起关键作用?是故,学者从各自角度出发推测若干中子星结构模型。

如何观测限制中子星结构无疑是天体物理学家拟解决的重大问题。原则上可以利用中子星在射电、X射线及 γ 射线丰富的观测表现来区分,但这些研究往往跟中子星内部结构不直接相关,所得到的结论大多是模型依赖的。考虑到不同的中子星模型预言特定的质量和半径关系(比如,越硬的物态给出越大的极限重量 $M_{\max}$),观测限制中子星的质量和半径就是一条有效途径。例如,可测量处于双星系统的中子星质量;如果测得的最大质量比模型预言的 $M_{\max}$ 还高,则能排除这类中子星模型。目前测到的最大中子星质量约为太阳的两倍(参见本刊2011年第1期第40页),而一些物态较软中子星模型预言的 $M_{\max}$ 明显低于两倍太阳质量,从而被观测排除。

LIGO发现GW150914标志着人类进入利用引力波提供的信息认识宇宙的新时代,韦斯、索恩和巴里什因此获得2017年度诺贝尔物理学奖。紧接着发现的双中子星并合引力波事件GW170817(参见本刊2017年第11期第758页),则为我们研究中子星内部结构提供了新的机遇。引力波时代解决的第一个重大基本问题,或许就是这个跟非微扰QCD相关的中子星结构之谜。

依据双星系统的总质量大小,双中子星并合后可能经历三种不同结局

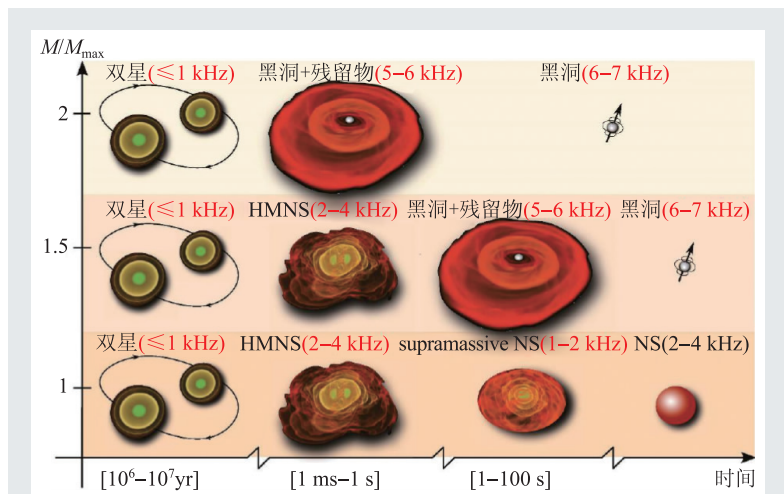


图1 质量相近两颗中子星并合的三种不同结局^[1]。横坐标是时间,纵坐标是以极限重量 $M_{\max}$ 为单位的总质量。总质量远大于极限质量的双星系统并合后直接坍缩为黑洞(上图);总质量与极限质量相当的系统并合后新形成的中子星将经历较差转动阶段(即超大质量中子星HMNS),之后成为依靠刚性转动而稳定存在的大质量中子星(Supramassive NS, 下图);总质量介于这两者之间时,并合产物会在较差转动耗散之后坍缩为黑洞(中图)。每个阶段持续的特征时标在横轴下标识,典型的引力波频率由图中括号内的红色数字标注

(图1)。总质量较大时并合后瞬即坍缩为黑洞,较小时最终可形成稳定存在的大质量中子星,介于其间的并合产物暂时为超大质量中子星,但最终坍缩为黑洞。

双中子星互相绕转时,会因为辐射引力波而逐渐靠近,称为双星并合过程的旋进阶段。在这一阶段前期,双中子星距离太远,半径约十公里的中子星可较好地被当作质点来处理;利用质点近似计算出的轨道运动足够精确地描述双星系统。然而在旋进后期,中子星本身的大小不能被忽略,中子星会因为伴星的存在而发生潮汐形变;这一形变的存在使得双星轨道运动显著地偏离质点近似的结果。旋进阶段的引力波信号可以给出这一偏离,从而测得中子星的潮汐形变能力。

一般认为中子星是引力束缚的。对于同样质量的中子星,如果其物态较软,则会因为自身引力的作用在较小半径时达到流体静力学平衡;这样的星体更致密,也更难以被外场作用产生形变。不过,软的物态预言较低的极限质量。反之亦然,较硬的物态可以给出大的极限质量,但是潮汐形变能力也会较大。GW170817的观测给出了中子星潮汐形变的上限,排除了许多太硬的物态模型。Annala等人利用潮汐形变上限定量地限制了中子星的质量和半径^[2]。

然而,对于表面自束缚的奇异星而言,星体的表面密度依然可以高达核物质密度,因而比同质量的中子星更致密。计算表明,某些奇异星模型不仅具有很大的极限质量,而且还可满足GW170817的潮汐形变限制^[3]。

除了引力波,与双中子并合事件相关的电磁信号也包含大量关于其内部结构的信息。GW170817双星并合事件后的1.7 s,人们观测到该处软而弱的短伽马射线暴。伽马暴火球的表现依赖于并合后的产物,而并合产物到底是什么、存在时间有多久,都跟中子星的物态,尤其是转动中子星能支撑的质量相关(图1)。

一些理论家认为, GW170817双星并合可能形成较差转动的超大质量中子星,其发电机作用产生强磁场后最终坍缩成黑洞。基于这种强磁场

黑洞快速吸积的中心引擎模型,不少研究也给出中子星极限质量的限制。不过,也有学者认为,短伽马射线暴中心引擎可能并非黑洞,而是并合后形成的强磁场中子星;这些模型给出不一样的中子星物态限制。

GW170817事件还伴随着光学和红外波段发现的“千新星”。一般认为,旋进后期及并合时将抛射大量富中子的物质,从而通过r过程合成大量的丰中子核。这些重核衰变时释放大量的能量,而其中的镧系元素具有较高的不透明度,从而形成持续时间久、光谱逐渐向红端演变的辐射。定性而言,越致密星体感受到伴星的影响就越小,因而抛射物的总量也较少;据此, Radice等人还结合抛射物质量和潮汐形变能力,限制中子星结构^[4]。不过值得注意的是:在奇异星模型中,双星并合时抛射的物质也会通过衰变或核合成来释放能量,类似的千新星辐射也是不能排除的^[3]。

总之,双中子星并合过程中的引力波和电磁波辐射,均包含了跟中子星内部结构相关的重要信息。基于GW170817单个事件,人们已经限制了中子星极限质量和潮汐形变能力,并否定了一些中子星模型。诚然,包括引力波在内的多信使手段研究中子星结构的时代已经到来。未来,随着更多双中子星并合事件的发现,人类终将彻底弄清中子星内部结构、深化关于低能强相互作用的理论。

参考文献

- [1] Baiotti L, Rezzolla L. Binary neutron-star mergers: a review of Einstein's richest laboratory. arXiv: 1607.03540 [gr-qc]. <https://arxiv.org/abs/1607.03540>
- [2] Annala E, Gorda T, Kurkela A *et al.* Physical Review Letters, 2018, 120:172703
- [3] Lai X Y, Yu Y W, Zhou E P *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2018, 18:024
- [4] Radice D, Perego A, Zappa F *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2018, 852:L29