

双中子星圆舞曲

文 / 高勇、邵立晶、徐仁新

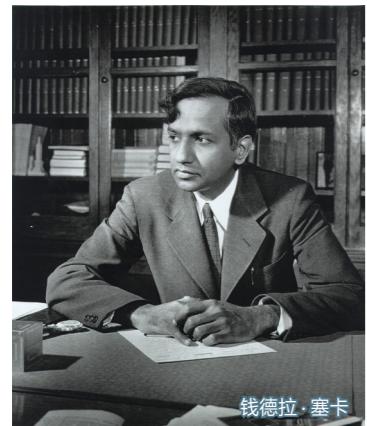
探测到双中子星并合就像挖到宝藏一样难。

2017年8月17日，人类首次“听到”了1.3亿光年外的两颗中子星旋近的引力波信号。大约1.7秒后，在同一天区观测到了一个仅持续2秒的伽马射线爆发。很快世界各地的天文学家将几十架望远镜都指向引力波的方向。在11个小时的沉寂之后，南半球的多架望远镜陆续看到了两颗中子星并合喷射物发射的紫外、光学、红外等波段的辐射。人类第一次在“听到”引力波的同时“看到”了绚丽多彩的电磁辐射。接下来，笔者就带领大家重新踏入这一段激动人心的旅程，一同领略双星圆舞的魅力，探寻其中丰富的物理学与天文学内涵。

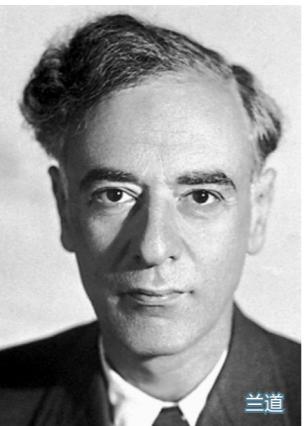
中子星的世界

开始这段旅程之前，我们先来了解一下故事的主角——中子星。一颗恒星从诞生到死亡，就是内部热压力与自身引力作斗争的一生。当核燃烧结束，强大的引力导致星体塌缩，往往会留下一个致密的残骸。一般来说，如果原初恒星的质量超过20倍太阳质量，死亡后会直接塌缩成黑洞；在8~20倍太阳质量之间的恒星，死亡后形成中子星；而更小质量的恒星，则只能形成白矮星。

早在二十世纪初，人们发现天狼星有一颗奇怪的伴星。这颗星的质量和太阳相当，辐射显白色且很暗，半径和地球差不多。由于具有又“白”又“小”的特征，著名天文学家艾丁顿给它取名为“白矮星”。



钱德拉·塞卡



兰道

白矮星的平均密度约为水的100万倍。若认为星体内部的所有粒子都像经典物理中的气体一样提供压强，并不足以抵抗白矮星自身强大的引力。在经典物理的框架下，白矮星不可能稳定存在。这在当时被称为“白矮星之谜”。

二十世纪20年代，量子力学和量子统计的发展，为解决“白矮星之谜”提供了契机。物理学家泡利在研究原子核外电子分布时提出“在一个量子态上至多拥有一个电子”的理论。换句话说，电子必须从基态开始往更高的能量状态一层层向上排布。费米和狄拉克先后将该理论应用到了统计物理的多电子系统中。

在阅读了狄拉克的论文后，剑桥大学的福勒教授很快意识到这种统计理论可以解决“白矮星之谜”。他敏锐地指出，当星体塌缩时，所有的原子都被挤压在一起。电子的密度急剧升高。由于泡利不相容原理，电子的能级排得很高。这部分能量引起的压强足以抵抗白矮星的自引力，人们称之为“简并压”。

钱德拉·塞卡在此基础上建立了更加完善的理论。1930年，在从印度前往英国剑桥大学留学的途中，他考虑了一个有趣的问题：如果恒星质量继续增大，星体在死亡后继续收缩，内部的电子会以接近光速运动，此时会发生什么现象？经过推算，他得出了一个惊人的结论：如果白矮星的质量超过1.4倍的太阳质量，其内部的电子简并压不足以抵抗引力，它会继续塌缩下去。这就是著名的“钱德拉极限”。钱德拉也因此工作而获得了1983



安东尼·休伊什



乔瑟琳·贝尔

年的诺贝尔物理学奖。

钱德拉并没有说明质量更大的恒星会塌缩成什么。如今，人们知道它会形成一颗中子星。但对于中子星的认识，却经历了更加漫长的时间。

中子星的相关概念，最初由前苏联物理学家兰道提出。针对钱德拉极限质量，兰道思考了这样一个问题：若星体因自身引力太强而收缩，以致原子核逐渐靠近并最终连成一片，会发生什么？鉴于密度越来越高时电子的能级急剧升高，兰道认为电子会跟质子“紧密”地结合成一种中性粒子以保持系统稳定。1932年，他发表论文阐述了这一想法。不久后，查德维克同年宣布发现“中子”。1934年，巴德和兹威基指出超新星爆发之后可能残留中子星。

虽然兰道的这一构想后来被质疑，他关于电子和质子紧密结合的理论违背了量子力学的基本原理。但他大胆提出了存在“密度和原子核差不多的物质”组成的星体（后称“中子星”）。在此基础上，由中子简并压（类似于上文提到的电子简并压）抵抗星体自身的引力、形成稳定天体的概念也建立了起来。1939年，奥本海默和沃尔科夫利用广义相对论详细计算了中子星的结构，发现它的大小仅有几公里到几十公里。

1967年，剑桥大学的博士生乔瑟琳·贝尔正在导师安东尼·休伊什的指导下建造行星际闪烁阵列。贝尔偶然发

现，每天同一恒星时，这个阵列都会从天空的同一位置接收到一些看似像无线电的干扰。几个月后，贝尔和整个团队开始分析这个奇怪的信号，惊讶地发现这些信号是间隔1.3秒的、非常有规律的脉冲。贝尔和休伊什给这种脉冲源取名为脉冲星。人们很快意识到它应该就是理论上推测已久的中子星。

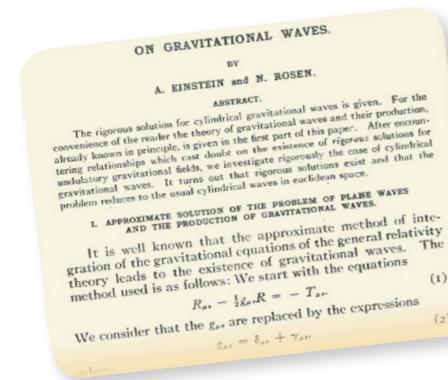
贝尔和休伊什的工作第一次证明了这类致密天体的存在。休伊什获得了1974年的诺贝尔物理学奖，以表彰他在无线电天文的发展和脉冲星发现方面作出的卓越贡献。贝尔虽然没有位列获奖名单，但她在发现脉冲星这一工作上得到了全世界天文学者的肯定和赞扬。

如今主流观点认为：在大质量恒星演化晚期，电子简并压已经不足以抵抗星体的引力。但电子的能量又太高，星体为了平衡就会想办法“杀掉”这些电子。电子和原子核中的质子通过弱作用反应生成中子，中子星的名称由此而来。此时所有的原子核连成一片，可以粗略地认为它是一个“大原子核”。其平均密度和原子核密度相当，约为 10^{14}g/cm^3 。一颗典型的中子星质量约为1.4倍的太阳质量（ $M_\odot \approx 2 \times 10^{33}\text{g}$ ），而半径仅约10千米，相当于把太阳压缩到了一座小型城市的大小。

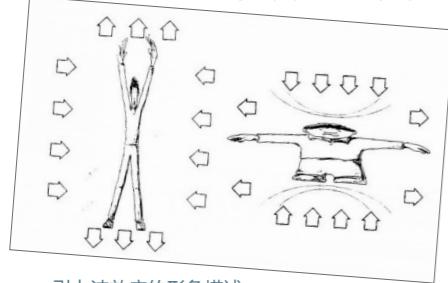
中子星内部是一个非常复杂的系统。虽然人们叫它中子星，但并没有足够的证据证明在内部的密度与压强下，简并中子构成的中子星就是唯一的答案。它的内部还有可能是包含奇异夸克的重子物质。中子星内部到底有哪些粒子？这些粒子间有哪些具体的相互作用形式？还是一个未解决的重大科学问题，涉及到我们对强相互作用低能行为的理解。令人欣喜的是：引力波为我们认识中子星内部结构打开了一扇新的大门。

时空的涟漪——引力波

物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质怎样运动，这是广义相对论的要义。物质的变化或运动会引起时空弯曲程度的变化。于是这随时间而起伏的弯曲便如同水面上荡漾的涟漪，这就是引力波。但是，作为物理学家，这种直觉的图像不能代替



最终发表的“论引力波”论文



引力波效应的形象描述

严谨的逻辑。爱因斯坦在1915年确立了广义相对论的场方程后不久，就开始和他的同行们一起探索，几经波折终于得到了弱场近似下的引力波解。

引力波是以光速传播的横波。当引力波传播时，垂直于波传播方向的空间被拉伸或者压缩。这样正常的物体看起来会被不断地压缩变胖、拉伸变瘦。我们自然会想，利用这一可观测效应，就能探测到引力波。然而事情并没有那么简单。实际上引力波的效应非常微弱。一个1米的物体，在实际的引力波的影响下，变化尺度比原子核还要小，探测难度可想而知。

但巨大的困难没有阻挡科学家探索自然的勇气与决心。在上世纪60年代，约瑟夫·韦伯首先意识到可以利用共振原理探测引力波：如果将探测器简化为一对以轻弹簧相连结的质点，引力波经过时会引起弹簧做受迫振动，振动频率就是引力波的频率。当此频率恰好与体系的固有频率一致时，振动幅度就会被明显放大。

于是，韦伯建造了一个金属“大棒”，作为探测器的主体。为了探测“大棒”的振动，韦伯等人在“大棒”的“腰”部绑上了一些压电晶体，并且利用放大电路对压电晶体产生的电流进行放大。但遗憾的是，经过多年尝试，这种方法并没有探测到令人信服的引力波信号。

在大家对“韦伯棒”逐渐失去信心的时候，麻省理工学院的雷纳·韦斯开始构想另一种探测方法——迈克耳孙干涉仪。迈克耳孙干涉仪的基本原理是将光源发射的光波分成相互垂直的两路，分别在两条干涉臂内经历反射，最终重新汇合且形成干涉。而干涉的结果取决于两路光波的光程差。当引力波经过时，两条臂分别被拉伸和压缩，改变了两路光波的光程差，干涉结果也会发生变化。

1975年夏天，雷纳·韦斯在华盛顿参加美国航天局的会议时遇到了基普·索恩。索恩一直对引力波比较关注。两人在华盛顿的一家旅馆内彻夜长谈，韦斯成功向索恩“兜售”了利用迈克耳孙干涉仪探测引力波的想法。

索恩回到加州理工便开始招揽技术人才，着手计划建设干涉仪。由于引力波引起的长度变化非常细微，实验室米量级的干涉仪已经不能满足要求。而且普通光源没有足够的相干性，这样的设备不可能探测到引力波。因此索恩、韦斯等人计划建设两座臂长达4公里，光源为激光的大型干涉仪。在这份提案中，干涉仪正式被命名为LIGO（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory），意思是激光干涉引力波天文台。

LIGO是一个大科学项目，申请经费未免要和其它领域竞争。而人力资源的协调也遇到了重重困难，先后有多位核心成员由于交流不顺离开了LIGO，项目也一度被搁置。故事在1994年有了转机，高能实验物理领域的专家巴里·巴里什接管了LIGO。巴里什具有带领团队建设大科学装置的丰富经验。在他的带领下，LIGO不仅“讨债”成功，而且鬼使神差般地申请到



约瑟夫·韦伯

了一笔接近4亿美元的经费。索恩盛赞其为“全世界最高超的大型项目管理者”。很快，在巴里什的领导下，先后建设了位于华盛顿州的汉福德观测台和位于路易斯安那州的利文斯顿观测台。

功夫不负有心人。经过成千上万人的努力，2015年9月14日，LIGO终于探测到了第一例双黑洞并合的引力波。人类打开了观测宇宙的新窗口。雷纳·韦斯、基普·索恩和巴里·巴里什也因此获得了2017年的诺贝尔物理学奖。

来自双中子星的“啁啾”

探测两个黑洞并合就像听故事，波澜壮阔的画面全靠想象；而中子星并合更像声画并茂的电影，图像声音精彩丰呈。不同的方式传递出的信息，能让我们更加全面地理解并合的物理过程。探测到双中子星并合就像挖到宝藏一样难。人们热切期盼它的到来，但没想到它来得这么快——2017年8月17日，LIGO/Virgo合作组探测到了两颗中子星旋近的引力波信号。相互绕转的两颗中子星不断辐射引力波并逐渐靠近，最终合为一体。根据发现日期，这个事件被命名为GW170817。

何为“声画并茂”？所谓“画”，就是望远镜代替人眼看到了电磁辐射。但用“声”来形容引力波该如何理解？发声体产生的振动在空气或其它物质中的传播叫做声波。而引力波也能引起时空的振动，只不过这个振动幅度太小了。双中子星并合的引力波在探测器的敏感频段的频率是从几十Hz到几千Hz，而人耳能听到的声音频率范围是20Hz到20000 Hz。两个频率段有很大的重叠。倘若将LIGO探测到的引力波信号放大并输出，或许就能让人听到。

双星演化的最后阶段可以分为旋近



位于华盛顿州的汉福德观测台和位于路易斯安那州的利文斯顿观测台

(inspiral)、并合 (merger) 和铃宿 (ringdown) 三个过程。此次双中子星事件只探测到了“旋近”，并没有测到“并合”和“铃宿”的信号。这是因为，双星并合时的引力波频率反比于系统的质量。中子星比黑洞轻，所以并合和铃宿阶段的引力波频率比较高，超出了现在LIGO探测器的频率敏感范围。

当两颗中子星逐渐靠近，星体绕转的速度加快，引力波的频率和振幅也会急剧升高。人们将这个过程形象地称作“啁啾”(chirp)。它像一声鸟鸣，划破寂静而又喧闹的噪声背景。

通过对测得双星绕转的引力波信号和理论计算的结果进行相互匹配，推断出星体的质量都在0.86–2.26倍的太阳质量之间。这个质量范围应该是中子星，而非黑洞。通过“啁啾”信号可以比较准确地确定一个双星质量的组合参数，叫做“啁啾”质量(chirp mass)，为1.188倍的太阳质量。有了啁啾质量，结合引力波振幅可以确定出双中子星的距离，约为40Mpc (1.3亿光年)。

黑洞是广义相对论的真空解。中子星则不同，有物质分布。在旋近时，双星在对方的强引力场影响下发生潮汐形变。人们对中子星内部的核物理尚不清楚，提出了许多不同的模型。不同的模型具有不同的质量半径关系。一般来说，相同质量的中子星，半径越大，物质分布越松散，形变也就越厉害。GW170817的引力波信号表明潮汐效应不能太大，星体形变量较小。这为探究中子星内部结构提供了重要的信息。

双中子星并合的电磁辐射

说完“声”，我们再来看“画”。两颗中子星在并合时激烈地相撞、撕裂，喷射出高速的物质，产生了色彩绚丽的电磁辐射。从频率看，涵盖了包括射电、红外、可见光、紫外、X射线、伽马射线在内的整个电磁波段。全球70多个天文台参与了观测，得到了丰富的数据。结合电磁波段的观测，GW170817



开启了一个崭新的天文、物理和宇宙学交叉的研究领域。

短伽马射线暴（Short Gamma Ray Burst）

伽马暴是上世纪60年代美国用于核爆炸监测的Vela卫星偶然发现的。这种爆发现象发生在宇宙学距离上，其激烈程度仅次于宇宙创生时的大爆炸。大约在收到引力波信号1.74秒后，费米卫星监测到了一个短伽马射线暴，其持续时间仅有2秒。

在广义相对论中，引力波速度和光速相同。伽马射线却迟到了。人们认为迟到的主要原因是产生喷流并到达辐射区需要时间。目前这些时间的计算仍存在很大的不确定性。在一些替代引力理论中，传递引力相互作用的引力子有质量。引力波的速度小于光速。若假定产生伽马暴和双中子星并合的时间差不超过10秒，则通过GW170817可以得到引力波速度和光速的相对差异不超过10~15%。

引力波和伽马暴的联合观测找到了双中子星的源头。引力波是“听声辨位”。LIGO两个探测器“听”强度知距离。

“听”到达的时间差，将源头限制在天空中两个长条状的区域。结合意大利的引力波探测器Virgo，最终将源锁定在28平方度的天区里。伽马射线也给出了一个定位区域，和引力波的结果是相容的。

千新星（Kilonova）

两颗中子星并合时速度可达到接近光速。可以想像，碰撞过程是多么猛烈。撞出的中子星“碎片”以百分之几到百分之几十的光速抛射出去。因为是中子星，抛射物富含中子，原子核赶在衰变前会迅速“吃进”很多中子，形成大量质量数（质子数加中子数）大于100的放射性重元素。这个过程叫做“快中子俘获（r process）”。这些中子数远高于质子数的原子核不稳定，通过衰变把部分中子变为质子，形成中子数和质子数差不多的稳定原子核，并且释放大量能量。

对光子来说抛射物都很“厚”，能充分吸收衰变产生的

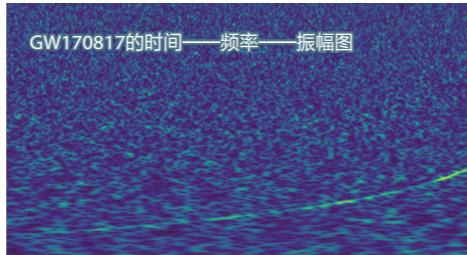
能量。这就好比人在冬天的时候裹紧被子睡觉，热量很难跑出去。数天之内，被热化的抛射物会发出明亮的紫外、光学、红外波段的辐射。由于其峰值亮度约为典型新星（novae）的一千倍，所以称它为千新星。

引力波与宇宙学

距离的测量在宇宙学中具有非常重要的意义。正是哈勃测量了仙女座星云的距离，才证实了河外星系的存在。对红移和距离的测量才发现了著名的哈勃定律：宇宙在不断膨胀，远方的星系在离我们远去。退行的速度正比于星系离我们的距离，比例系数叫做哈勃常数。

天体测距方法中，造父变星和Ia型超新星等被称为“标准烛光（standard candle）”，在发现宇宙加速膨胀中扮演着重要的角色。经过恰当处理后，它们被认为具有近似恒定、已知的绝对光度。有了绝对光度和直接观测到的视亮度，就能推算出它们的“光度距离”。

引力波提供了一种新的测距方法，人们称之为“标准汽笛（standardsiren）”。通过“聆听”频率越来越高、振幅越来越大的引力波测量距离。这种方法不依赖于任何宇宙阶梯，误差主要来自于引力波的测量精度，具有得天独厚的优势。GW170817通过引力波测得了双中子星的距离。依靠引力波和电磁波的联合定位锁定了宿主星系NGC 4993，确定出了红移。有



了距离与红移，就能推算出哈勃常数。

近些年来，随着哈勃常数测量的精度逐渐提高，人们发现了一个新问题：在近邻宇宙和基于宇宙距离阶梯测量的哈勃常数更大；而基于宇宙微波背景辐射的观测和宇宙学标准模型，测量的哈勃常数却比前者小了百分之九。两者的差异过大，这就是近几年愈演愈烈的H0危机。原因何在？是测量的误差还是有新物理？GW170817对哈勃常数的测量恰逢其时。它证实了标准汽笛的可行性，其精度已达到了15%。可以预见的是，随着类似引力波事件的增多，测量精度会越来越高，未来有望解决这一危机。

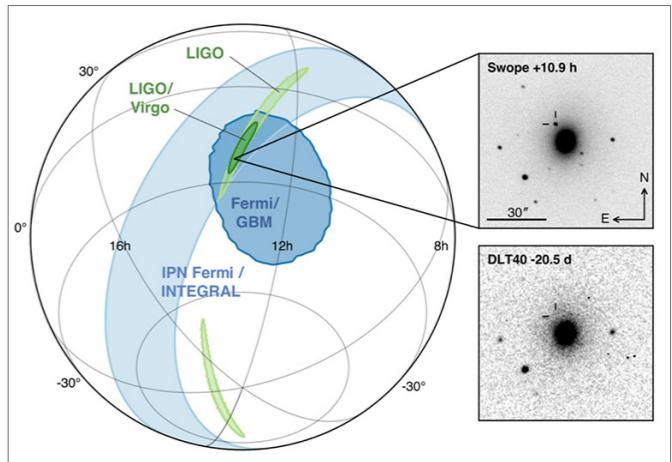
双中子星并合的产物

旅途的最后，让我们把目光再次投向GW170817的主角——中子星。当两颗中子星经历了剧烈的并合后，最后留下的产物是黑洞还是中子星？目前还没有答案。一颗静态球对称的中子星，极限质量记为MTOV。不同模型的中子星给出的极限质量也不相同。当星体转动起来时，离心作用可以支撑更大的质量。但若并合产物的质量Mrem大于静态中子星的极限质量，最终还是逃脱不了塌缩成黑洞的命运。塌缩的时间与动力学过程取决于星体转动的方式和转动能量损失的快慢。

通过电磁波段的辐射特征，可以推测并合产物，但具有一定的模型依赖性。随着引力波探测仪器的提升，如果未来能观测到更多双中子星并合产物所产生的引力波信号，很有可能揭开并合产物的神秘面纱。

结语与展望

1887年，赫兹发现了电磁波。他在论文末尾写道：“我不认为我发现的无



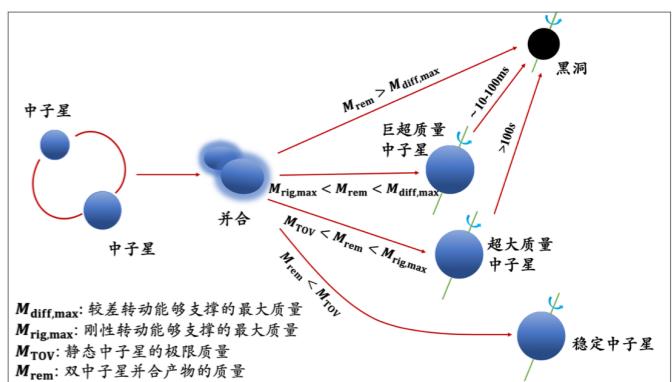
引力波和电磁波的联合观测定位双中子星的宿主星系

线电磁波会有任何实际用途”。而当时仅20多岁的两位年轻人——马可尼和特斯拉，却在赫兹论文的启发下，将电磁波用于通讯领域。如今，他们的贡献已经深刻地影响到人类文明的发展。爱因斯坦预言引力波曾悲观的表示，人类恐怕永远也无法探测到引力波。但科学的发展经常是出人意料的。如今，人类不仅观测到了引力波，而且让它和电磁波“联姻”，共同探索这个未知的世界。至于引力波有何实际的用途，谁知道呢？也许未来就在我们意想不到的地方！

双中子星并合事件标志着多信使天文学的开端。它推动了恒星演化、致密物态、相对论天体物理、天体物理辐射机制、引力检验和宇宙学等多个领域的发展。读者若想更深入地了解这些内容，可以参阅《物理》杂志2019年9月的“中子星并合专题”。

责任编辑 / 张超

作者简介：邵立晶，北京大学科维理天文与天体物理研究所研究员，中国科协青年人才托举工程入选者。研究方向为引力波、脉冲星、超出标准模型的新物理，在引力检验等方面做出了一系列前沿的科研工作；高勇，北京大学物理学院天文学系博士研究生。研究方向为中子星与引力波；徐仁新，北京大学物理学院教授，关注极致密物质的微观物理及其天文学表现。



双中子星并合的可能路径与产物（图片创意来自张冰教授的报告）