

· 访谈 ·



陈雁北，引力波专家，美国加州理工学院教授、LIGO科学联盟的核心组成员。

## 陈雁北：2个黑洞相互碰撞发出引力波的理论模型与思想细节

2016年2月11日，美国国家科学基金会在华盛顿特区国家媒体中心发布消息称，位于美国利文斯顿与汉福德的2座激光干涉仪引力波天文台(LIGO)，首次直接探测到引力波。

这次由双黑洞碰撞发出引力波的事件的起因是一个质量为29倍太阳质量的黑洞与另一个质量为36倍太阳质量的黑洞碰撞并合，产生引力波，然后被地球上的LIGO探测到。但是，对于双黑洞碰撞发出引力波所涉及的理论模型EOBNR及其思想细节，还需要进一步澄清。科普作家张轩中为此采访了美国加州理工学院的相对论物理学家陈雁北教授。陈雁北是LIGO科学联盟的核心组成员，一直在深度参与LIGO探测引力波的工作。

### 双黑洞碰撞的理论模型与数值相对论

对于2个黑洞碰撞理论模型，在经典的相对论书籍与文献中就少有研究与报道，其主要困难在于，描述单个黑洞的度量相对比较简单，一般是所谓的“史瓦西解”或者“克尔解”这些爱因斯坦引力方程的解析解。但是，因为爱因

斯坦引力方程天生的高度非线性性质，使得一般情况下找不到“2个黑洞待在一起”的解析解。于是，相对论学者想到了用电脑来计算“2个黑洞待在一起”的数值解，这一方法被发展了几十年，目前已经形成数值相对论这一前沿学科。数值相对论的英文是numerical relativity，简称为NR。目前在国内，中国科学院数学研究所的曹周键等在从事这一方向的研究工作。

从目前的实际情况来看，对比传统的韦伯型共振棒探测器，LIGO的优势在于它的宽频带探测能力。以刚公布的引力波事件GW150915为例，LIGO探测到的35~250 Hz全部落入LIGO的敏感频带。(准确地说信号比较强的地方跟敏感地带吻合。而这是天文观测中的一个特别常见的“偏见”现象。即：我们最有可能看到的信号，往往是我们对其灵敏度很高的信号。)

LIGO的这种宽频带特点使得在雷达数据处理的成熟技巧——匹配滤波(matched filtering)方法可以被用到引力波数据处理中来。该数据处理方法能在既定硬件灵敏度前提下成百上千倍地提高信号探测能力。但该方法能

够工作的前提条件是对要探测的引力波信号拥有准确的理论模型。这样的模型早已在20世纪40年代成熟。但对于引力波这个新鲜事物也是一样，建立理论模型变得十分重要。为了建立引力波信号的理论模型，人们要求解爱因斯坦的引力方程。前面提到，爱因斯坦方程作为自然科学中最为复杂的方程之一，针对现实引力波源解析求解不能实现，于是科学家就寻求数值求解之道。

经过约半个世纪的苦苦挣扎，数值相对论在2005年后得到突破性发展，并在2005至今年的这10年内日臻完善。最终结合广义相对论的后牛顿近似，为LIGO量身打造的有效单体数值相对论理论模型(EOBNR)被建立起来。这次LIGO成功探测到引力波信号正是基于此理论模型。

### EOBNR到底是什么？

陈雁北教授给予了科学的回答。

1999年，陈雁北从北京大学本科毕业，飞赴美国加州，加入了著名相对论学家基普·索恩的研究组。陈雁北说：“还记得1999年，那时候我刚到美

国,在基普·索恩领导的研究组组会上,我遇见了一个身材娇小的红头发的意大利女博士后,她叫 Alessandra Buonanno,目前她是德国马普引力物理所分管相对论天体物理的所长”。

“Alessandra Buonanno 的研究工作,笼统一点说,就是引力波理论模型 EOBNR 中的 EOB。而 EOBNR 中的 NR,则是数值相对论的意思。”陈雁北介绍说,“这是法国人 Damour 和 Alessandra Buonanno 共同发明的一种方法,简单的说就是把牛顿万有引力中的二体问题变成一体问题的方法推广到了广义相对论的双黑洞系统。”

所谓牛顿万有引力中的二体问题,就如地球与月球之间的关系,其实在万有引力下,地球与月球都是在运动的,所以称为二体问题,但我们一般可以把地球看成是静止的,只需要稍微修正一下月球的质量为所谓“等效质量”,那么这个二体问题就变成了一体问题,在一体问题中,我们一般说:月球绕着地球“在椭圆轨道上运动”。在广义相对论中,也可以做类似的处理。

Damour 和 Alessandra Buonanno 发明的这个方法用到类似的“椭圆轨道运动”。他们可以把广义相对论中的后牛顿近似的计算推广到 2 个点粒子距离很近的时候,然后可以在后面增加一个 ringdown 部分。以前传统上用的后牛顿近似的两体运动,2 点之间到了比较近就完全发散了, Damour 和 Alessandra Buonanno 个可以比较好地避免这种发散困难。

陈雁北:“我当时也学习了这种方法。”

张轩中:“2 个黑洞在靠近的时候,引力场不发散吗?”

陈雁北:“对,不应该发散,因为会形成一个大黑洞。但是一般的后牛顿近似的展开不能很好的描述这个后来的大黑洞,而这个 EOB 模型就很好。因为 EOB 模型里面本来就有一个黑洞在那里。我跟 Alessandra 和另外一个研究生 Michele Vallisneri 把这个 EOB 之内的一些后牛顿方法综合研究,然后制定了第一代 LIGO 搜索双黑洞的一个

方案,叫做 BCV 方案。这个方案后来被用到了第一代的 LIGO 数据里面。可惜那时候没有探测到引力波。后来 EOB 又被逐渐推广到更高阶的后牛顿近似,以及包括黑洞自旋的情况,我也参与了一些这方面的理论工作。”

张轩中:“听说潘奕也参加了这个工作?”

陈雁北:“对,潘奕是我的师弟,他是北京大学物理系毕业的,后来在研究工作上一路追随 Alessandra,他在 EOB 模型上起了举足轻重的作用。”EOB 模型的本质还是出自广义相对论的后牛顿近似,其实只是把后牛顿近似的展开方式改了改。所以这种方式的准确性没有根本上的保障,因此需要数值相对论的介入。

2003 年,陈雁北拿到了博士学位,同时遇见了另外一个做数值相对论的专家——南非籍加拿大博士后 Frans Pretorius,他加入了基普·索恩和 Saul Teukolsky 组织的数值相对论合作组织,这个合作组织的工作目标非常干脆——就是用计算机数值解法解爱因斯坦方程。“Pretorius 接手课题之后,就有了个大突破——让 2 个黑洞在计算机成功碰撞。”陈雁北说,“美中不足的是他的代码精度比较差,对 LIGO 的指导性不是特别强。加州理工学院以及康奈尔大学的其他科学家用一种叫做谱方法的数值方法,大大增加了数值计算速度和精度。”

张轩中:“Pretorius 大突破以后就去普林斯顿当教授了,还被评选为 2007 年美国的杰出青年?”

陈雁北:“是的。他从此搞一些更牛的黑洞问题。用更高精度高效率模拟黑洞的这个事,还是有其他科学家,比如 Mark Scheel 和 Lee Lindblom,后来还有 Bela Szilagyi。这几个人把黑洞碰撞的模拟推到了极致。当然,还有其他学生博士后的参与。在这期间,潘奕和 Alessandra 就把 EOB 理论模型的结果和数值相对论计算的结果相比较,把 EOB 理论模型中的参数用数值相对论来矫正,得到了这两者的合体,那就是 EOBNR,这个 EOBNR 比直接数值模拟

在计算速度上要快很多很多。”

## 引力波的能量与量子干涉仪

对于在遥远宇宙中的双黑洞相互接近时候的广义相对论知识,很多报道中并没有涉及,本文将在这里涉及一二,供各位读者思考。

张轩中:“目前看到的那个 29 太阳质量的黑洞,与另外一个 36 太阳质量的黑洞,它们靠近碰撞以后大黑洞的质量是 62 个太阳质量,这个 62 个太阳质量也是可以用 EOBNR 模型算出来吗?”

陈雁北:“这可以用 EOBNR 模型,也可以用直接的数值模拟。”

张轩中:“如果要学习 EOBNR 模型,是不是需要看钱德拉赛卡《黑洞的数学》那本书做基础?”

陈雁北:“当然可以看,但也可以自己推导。”

张轩中:“直接推导很多人估计不行,我是想问建 EOBNR 这类模型需要学什么知识,参考什么书会比较快。”

陈雁北:“先学广义相对论,然后读一些后牛顿近似的文献,然后读 EOB 的原始文献。最近 Cliff Will 和 Eric Poisson 出了一本书,好像可以让读者快速进入后牛顿和黑洞微扰论。”

张轩中:“广义相对论很多人学过,在中国国内的话,北京师范大学梁灿彬老师的广义相对论课程,有讲课的全部录像在网络上播放,很多人看了这个录像,也学了一些广义相对论。关键他们学了以后还是不会处理二个黑洞在一起碰撞并合的事情。”

陈雁北:“那就再仔细看看广义相对论的后牛顿近似的书。或者直接读原始文献就可以。”

张轩中:“那在这 2 个黑洞相互碰撞并合的物理图像中,我们一般需要什么物理直觉呢?这个碰撞过程不像以前我们在高中里学的 2 个小球的弹性碰撞,存在很清晰的动量与能量守恒定理。在 2 个黑洞碰撞过程中,什么守恒量也没有,能量与动量都不守恒,感觉与日常学的物理学大相径庭。”

陈雁北:“日常的物理学,比如烧开水,也没有守恒量吧——水蒸气也跑掉

了,带走了一部分能量,这不跟黑洞碰撞辐射引力波带走能量类似吗?”

张轩中:“是的,那我们谈谈能量问题,在广义相对论中,引力场的能量的定义也是有问题的,比如我们只能定义一些准局部的能量,关于引力波的能量,引力波带走的能量是什么参考系里说的,如何精确描述这部分能量?”

陈雁北:“严格说来广义相对论的引力场的能量是没有一个局部定义的,但是在一些特定的条件下可以近似的定义引力波的能量。想要在全空间定义和描述引力波的能量,在双黑洞系统的早期,可以利用后牛顿近似的方法。在末期,可以利用黑洞微扰论。但是,在无穷远处,是可以定义一个引力波的能量流的。这个能流,可以由引力波的波形计算出来。”

张轩中:“从引力波信号中从提取出最后剩余黑洞的角动量数据与质量数据,您觉得哪个更准一些,更可靠一些?”

陈雁北:“最后的黑洞的质量和角动量的测量,我没有很多直觉说哪个更精确一些。当然,具体的测量精度可以从我们的文章里面读出。”

张轩中:“我感觉双黑洞接近光速的速度相互绕转在一起,感觉这个物理图像有点象玻尔的氢原子模型——电子围绕着质子运动。当然玻尔后来搞出了离散的光谱,也就是最后导致了量子力学。所以,作为一个科学历史的类比,双黑洞系统辐射的这种引力波是否也可能体现量子引力特性?”

陈雁北:“双黑洞辐射引力波,这是个经典系统,跟波尔模型没关系,也不体现量子引力的特性。”

张轩中:“那么原初引力波可能体现量子引力的特性吗?”

陈雁北:“原初引力波可以体现量子引力的特性。”

张轩中:“具体怎么体现?”

陈雁北:“原初引力波一般认为是宇宙大爆炸后的量子涨落被放大产生的。”

张轩中:“对宇宙大爆炸的原初引力波的探测还会有多久才能实现?是

通过对宇宙微波背景辐射来检测引力波快一些还是通过升级改造 LIGO 来得快一些?”

陈雁北:“一般认为 LIGO 希望很渺茫。”

张轩中:“如果 LIGO 用上你设计的量子干涉仪后呢?”

陈雁北:“还是不行,主要是 LIGO 的探测能力主要是在高频,这个频段的单个引力子能量很大,一般来说宇宙大爆炸后产生的原初引力波的波长已经被拉长,其对应的引力子没那么多能量,所以不太能够被 LIGO 看到。”

张轩中:“是的原初引力波的波长太长,但是一共有很多引力子啊,难道这些引力子全部是低频,就没高频的?”

陈雁北:“按道理都有,但是振幅是低频比高频的大很多。整个原初引力波是一个噪声谱,各个频率都有。”

张轩中:“听说你最近在研究的量子干涉仪原理上是一个薛定谔的猫?”

陈雁北:“我提出的量子干涉仪不是薛定谔的猫,只是镜子运动的尺度和海森堡的不确定原理一致,大致来说就是宏观物体的位置和速度不确定度是在海森堡的不确定原理的量级。Advanced LIGO 只要再提高一些光强,到达设计灵敏度时,这个海森堡不确定原理就会起到很大作用。我和 Alessandra 在 15 年前的计算就是这个设计灵敏度时由海森堡不确定原理导致的噪声。”

按照陈雁北的研究,如果用上他参与设计的量子干涉仪, LIGO 的检测能力会有更大的提高。这就是 LIGO 下一次升级的一个可能的技术方向。

按照陈雁北的研究,如果用上他参与设计的量子干涉仪, LIGO 的检测能力会有更大的提高。这就是 LIGO 下一次升级的一个可能的技术方向。

### 引力波涉及的其他问题

陈雁北表示,以后他的工作目标是围绕黑洞引力波信号中信息的提取、以及相对论的检验、量子干涉仪中的精密测量物理进行研究。但是,因为大众对霍金表示引力波的测量检验了他在 1970 年代提出的黑洞面积不减定理与黑洞的唯一性定理,这一说法让人诧异。

张轩中:“引力波扫过 LIGO 这个激

光干涉仪的时候,干涉仪中的时间是怎么波动的,空间拉伸被引力波拉伸这点容易理解,但时间怎么变? 这里好像涉及到对时空的 3+1 分解?”

陈雁北:“这个问题不是‘引力波经过干涉仪改变了时空’这么简单,是一种科普文章中把技术问题一带而过的方法。在实际的计算中,要在时空中建立一个坐标系(网格),考虑引力波对这个坐标系的‘度规’(即网格的形状)的改变,然后分别考虑时钟、光线和检验质量这三种不同的物质在这个网格中的运动规律,最终计算出,当光线从时钟处出发,在网格中传播,从检验质量上反射回来,并且打回时钟位置上时,时钟所指时间的变化。在这个计算中,我们要考虑在引力波影响下时钟的快慢、光线的弯折、以及检验质量的运动。在三个因素都考虑以后,才能正确得出信号对引力波的依赖关系。所以这是一个打包处理时间与空间的方法,而不是仅仅处理空间的拉伸。”

张轩中:“这样说就清晰了。”

陈雁北:“单说所谓的引力波对时间空间的改变,有点泛泛而谈,没法从这样的文字里面抽出很多逻辑。”

张轩中:“以前我们已经聊过引力波能量到底是什么。针对这次探测到的引力波事 GW150914,你们在 PRL 发表的文章中说的损失了相当于 3 个太阳质量的能量到底应该如何理解?”

陈雁北:“关于引力波携带走的相当于 3 个太阳质量的能量这个问题,一定要先定义什么是引力波,什么是能量,只是在具体的一些时空中,具体的一些坐标系里面,才可以说清楚。”

张轩中:“其实我想问的就是引力质量与  $E=MC^2$  的质量的问题。这黑洞的质量是引力质量吧,  $E=MC^2$  中的  $M$  是惯性质量吧? 我们说放出的 3 个太阳质量的能量,是惯性质量还是引力质量?”

陈雁北:“它们是相等的。”

张轩中:“这叫等效原理?”

陈雁北:“黑洞在时空曲率很小的时空中传播是满足强等效原理的,但是黑洞在彼此接近的时候,这个原理是不

好定义的。”

张轩中：“这2个黑洞它们接近的情景下，如何定义黑洞质量？2个黑洞靠近的情况下，这2个黑洞的质量就不是原来的29与36了吧？”

陈雁北：“这里的29与36是牛顿万有引力的概念，如果想严格的用在广义相对论上，势必要有严格的定义，和具体的适用范围。29和36都是在黑洞远离对方的时候的引力质量，也是它们的惯性质量。”

张轩中：“到底放出了是不是3个太阳质量的能量？放出的3个质量是在无穷远处定义的。但当2个黑洞靠近的时候，质量的定义是模糊的。”

陈雁北：“是的，在黑洞相互靠近的地方没法定义质量。我们说的29与36倍太阳质量这些都是一些牛顿物理的概念，只能在很窄的范围内用在广义相对论上。”

张轩中：“另外，我想知道双黑洞碰撞并合的过程中，黑洞视界面融合的过程与细节，最后是不是还是依靠霍金的黑洞无毛定理来决定这次碰撞的归宿？”

陈雁北：“不用这个无毛定理，就直接用EOBNR理论模型算出来的时空几何正好就是kerr几何就可以了。而且这个定无毛定理在这里也根本不适

用。无毛定理本身只是说有视界的真空爱因斯坦方程解的唯一性。现在是两个黑洞碰撞的动态过程，这个定理根本没法用在这里。”

张轩中：“直接用EOBNR理论模型算出来？如何理解？”

陈雁北：“就是计算出时空的几何结构，最后验证它就是kerr几何。”

张轩中：“霍金老师前几天在你们这个事情上说——引力波的实验证明了1970年代他的面积定理与黑洞唯一性定理是对的。”

陈雁北：“我们不评论霍金，到底2个黑洞碰撞会不会形成一个最后的黑洞，这个叫做cosmic censorship，中文翻译叫宇宙监督猜想，是彭罗斯提出来的。”

张轩中：“宇宙监督猜想就是不要出现裸奇点，无非就是说黑洞不要转得太快，还有别的内涵吗？”

陈雁北：“有，比如2个黑洞碰撞为啥出不了裸奇点？这也是宇宙监督的范围。”

张轩中：“2个黑洞碰撞过程中，2个奇点一直被视界包裹起来了？这个事情可以测出来？你们也不知道到底这两个黑洞碰撞的细节是什么吧？也许裸奇点曾经出现过？”

陈雁北：“在数值模拟中都没有奇

点，我们也都只模拟奇点旁边的东西。不能涉及到奇点本身。奇点不是超越人类的能力，奇点超过了逻辑的范围，必须要改正理论，才可以继续模拟。”

张轩中：“奇点超越了爱因斯坦的框架，需要其他方程来描述它，建模它。”

陈雁北：“是这个意思。我们需要深层次的物理规律。”

张轩中：“黑洞内有奇点的存在，您觉得符合您的直觉与感觉吗？”

陈雁北：“我觉得彭罗斯和霍金的证明奇点存在是比较符合直觉的。”

## 尾声

对陈雁北教授的采访持续了4个小时，中间过程可以说澄清了很多未曾披露的引力波技术与思想细节。这些细节的完善为我们对双黑洞碰撞出引力波提供了更丰富的资讯，也可以激励一代年轻学子在前人的探索脚印下跟进，目前在中国正在调研立项阶段的引力波项目有“天琴”计划与“太极”计划，这些计划在不久的将来也许会真正在中国大规模实施起来。

感谢陆俊、吴宝俊在文字处理等方面的帮助。

文/张轩中  
(编辑 祝叶华)