

·科技纵横·

风乍起,吹皱一池春水

——爱因斯坦预言百年的引力波来了

春天来了,风从东方来,也从太空来,吹皱了时空的涟漪。LIGO收到了引力波迟来的问候,恰好是引力波百年生日的礼物——爱因斯坦最早预言引力波就在1916年2月与史瓦西(Karl Schwarzschild)的通信中。然而,爱因斯坦对引力波是否存在,一直都很纠结。在1916年6月发表的第一篇引力波论文^[1]里,他认为:“在所有能想得得到的情况下,引力波的辐射都可以忽略。”在这一点上,他显然不像对光线偏折和水星轨道进动那么重视,而且他也没有把引力波作为广义相对论(GR)的基本实验证据——在GR的第一篇完整论文里,他只列了3个实验:引力红移,光线弯曲和行星轨道的进动^[2]。当然,那时他可能没想到引力波是真实的物理效应,因为两年后他才计算了引力波的能量流^[3]。

即使引力波携带能量,它也没令人感觉更实在。如相对论的大功臣爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)就认为它是“虚”(spurious)的,嘲笑它“以思想的速度传播”^[4]。1936年,爱因斯坦自己也差点否定引力波的存在。他在给玻恩(Max Born)的一封信中说,他和一个年轻人(Nathan Rosen)得到一个“有趣的结果”:引力波不存在(I arrived at the interesting result that gravitational waves do not exist),因为他没能得到场方程的非奇异精确解(他大概也没想到区分坐标奇点与物理奇点)^[5]。幸好,从帕萨迪纳来的年轻人Howard Percy Robertson及时帮他纠正了错误,用柱坐标系消除了解的奇异性^[6]。虽然引力波被勉强“留下”,爱因斯坦还是认为它的发射不会减缓波源的运动^[7]。

引力波的疑惑是非线性的(而且是张量的)引力场带来的^[8,9],爱因斯坦甚

至怀疑场方程说明不了多少东西。他的数学感觉远不如物理直觉,他对引力波的态度,以及他在寻求场方程过程中的曲折和他对Weyl规范理论的态度等,都反映了他对物理直觉的自信和对数学形式的迟疑。就像彭罗斯(Roger Penrose)在新版《爱因斯坦传》^[10]的序言中写的,“这时候,爱因斯坦失去了从前工作所表现的自信,只有犹豫和迟疑:他一直说他相信他发现了理论的最终形式,结果却是过几个月就否定了前面的东西,然后又满怀信心提出一个完全不同的纲领。”费曼(Richard Phillips Feynman)也曾对戴森(Freeman Dyson)说过,爱因斯坦的创造力都来自他的物理直觉,当他成为“解方程手”(manipulator of equations)时,创造也就停止了^[11]。40岁以后的爱因斯坦逐渐“淡出”物理学舞台中央,直到最后被主流“晾”在一边,不仅是因为他失去了早年的物理直觉,更是因为他的直觉把他领得太远,走进了“他自己都不能做出可靠的专业判断的领域”^[10]。

在给玻恩的那封信中,爱因斯坦接

着(也许顺便)说,他“仍然不相信统计的量子理论”。可他在1918年的文章里说过:“一个完备的量子理论也一定会修改引力理论”^[9]。他心目中的“完备的”量子理论是以因果律为基础导出的量子理论——这是他自己设立的三大要务(three desiderata)之一。另外两个要务是:统一引力与电磁力,用连续场论的无奇点解描述基本粒子。所以当得到有奇点的引力波解时,会不惜否定它的存在。这几个要务显然都是他“自己都不能做出可靠的专业判断的领域”。

今天我们见证引力波的“存在”,可以说是替爱因斯坦完成了他的“未完成交响曲”。这是一部大曲,相比之下,GR的其他几个实验只是小插曲——它们只是对确定现象的确定计算的检验。引力波的舞台是整个宇宙时空,不同来源的波有不同的频率(如脉冲星 $\sim\mu\text{Hz}$,超大质量黑洞 $\sim\text{mHz}$,一般黑洞 $\sim 100\text{Hz}$),产生不同的效应,需要不同的模型和工具来观测。1974年发现的脉冲双星PSR1913+16只是间接透露了引

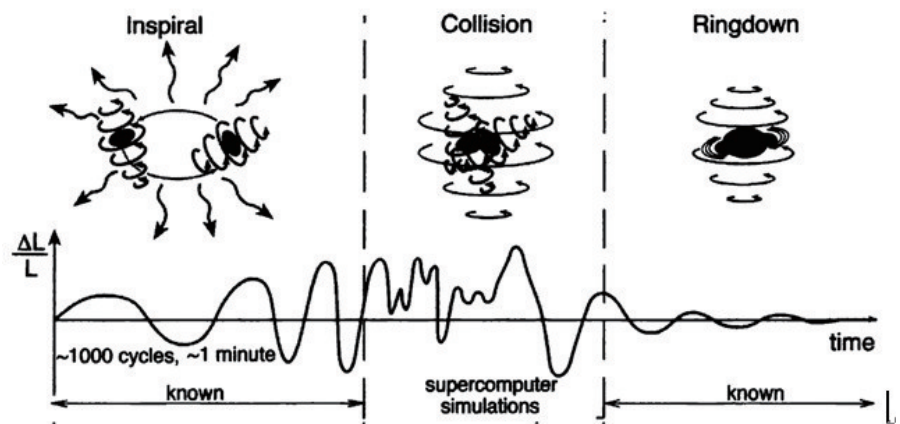


图1 黑洞从相约到结合的引力波过程

力波的信息^[12],对GR的意义更像水星近日点的进动,因为拉普拉斯(Pierre-Simon marquis de Laplace)和庞加勒(Henri Poincaré)早就想到引力系统会失去能量(当然,两位前辈的想法都有“特设”(ad hoc)的意味,犹如狭义相对论之前的以太和曳引系数)。

GW150914是对相对论的多重检验,不仅证明引力波的存在,也检验相对论的数值模型。Kip Thorne就一直相信最可能首先看到2个黑洞“约会”^[13]。根据2个黑洞飞旋着相互靠拢(inspiral)时发出的引力波,可推测黑洞的质量、自旋和表面积。根据它们碰撞(collision)时产生的引力波,可了解强烈弯曲状态下的时空动力学。最后2个黑洞合二为一,爆发一声铃响,然后铃声衰减(ringdown),根据“渐行渐远”的波,可推测合并后的黑洞的质量、自旋和表面积。图1是数值模拟的黑洞碰撞过程的引力波形的草图^[14]。从GW150914还知晓了黑洞的形成背景、大小和距离,推测了双子黑洞约会的几率(单位时空里的黑洞相遇事件)。一般说来,引力波会透露更多的消息:黑洞如何失去“多余的毛”,约会后留下一个洞还是一个裸露的奇点——引力波的数值模拟可以生成裸奇点,霍金因此承认“宇宙监督”输了^[14]。

观测引力波当然不是为了“检验”,而是为了发现。1989年,Kip等在向美国科学基金会申报LIGO项目时,提出2个终极目标(ultimate objectives),一个是检验:检验GR的预言,测量引力子的静止质量和自旋,研究引力的非线性动力学;一个是发现:为宇宙打开不同于电磁天文学和粒子天文学的新窗户。

引力波能打开窥天的新窗户,是因为它能看得更远、更深。引力波可能“看见”黑洞和奇点,这是电磁波和其他基本粒子做不到的。电磁波的眼睛能看到宇宙爆炸10万年以后的景象(如CMB),粒子的眼睛(如中微子)能看到大爆炸1s之后的景象。只有引力波,从大爆炸出来而不会丢失原始信息,才

能看到宇宙大爆炸的开始(图2)^[14]。

2000年,Kip在60岁时预言和猜想引了引力波的愿景:精细的时空弯曲地图,黑洞碰撞、中子星碰撞以及中子星与黑洞的碰撞编目(犹如恒星和星系的编目),致密星体核的物态方程,大爆炸奇点的引力波,原初黑洞(霍金认为的暗物质候选者)。这些将促进我们认识极早期宇宙和探索Planck尺度物理学,判别不同的宇宙模型。来自大爆炸的引力波可能让我们认识暴胀期的一级相变(对称自发破缺)和宇宙弦(时空拓扑缺陷)(图3)^[15]。而更激动人心的是,我们能画出犹如CMB那样的大爆炸背景引力波分布,像Penrose从CBM“看见”共形循环宇宙一样^[16],透过原初的

引力波看见新的宇宙图景。

爱因斯坦相信“完备的”量子论会修改引力论,超弦理论因为“预言”了自旋为2的引力子而成为可能的“量子引力论”。在超弦图景中,引力子是弦圈,不受膜的束缚,能跑到高维空间,于是引力波还肩负着探索额外维空间的使命,而额外维是否存在,也决定着超弦论的命运。有趣的是,也有人认为引力子是一种暗物质(它的引力波信号也许藏在脉冲星里),如果LIGO真的如Kip期待的那样测出引力子的质量,那必然拉开真正的量子引力论的大幕。

当广义相对论与量子论联姻时,引力波的观测原理和方法也可能发生革命性的变化。例如,伯克利加州大学的

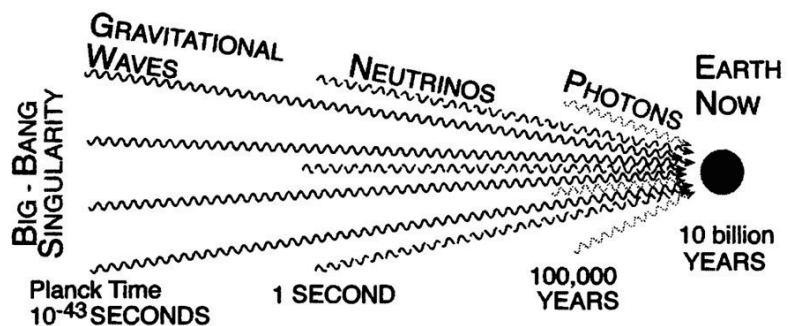


图2 引力波能带来大爆炸的消息

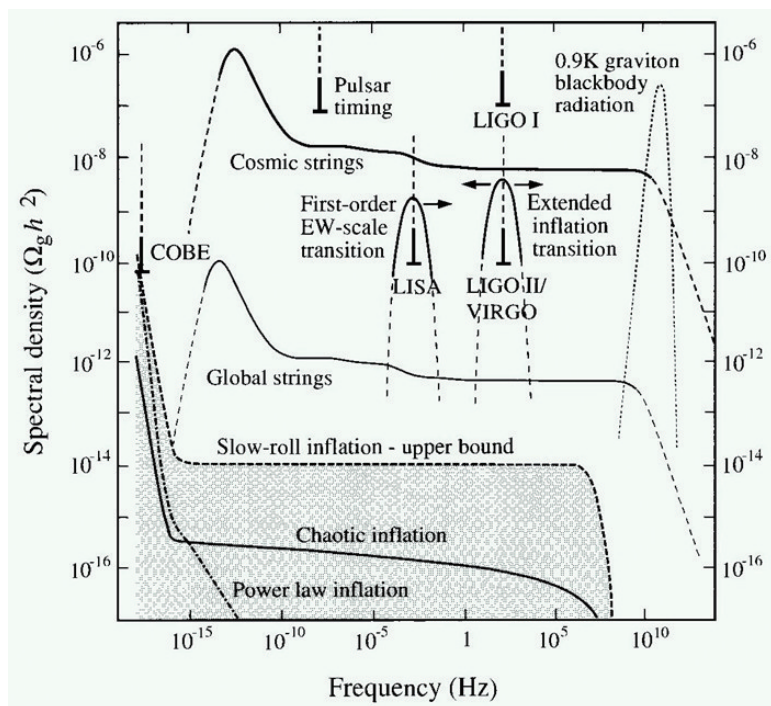


图3 原初引力波背景和对应的实验观测

乔瑞宇 (Raymond Y. Chiao) 就考虑将电磁波转换成引力波, 用超流氦的量子液滴的振动来探测引力波。通过电磁场与引力波的转换, 还可能直接在引力波中看到 CMB^[17]。

引力波从爱因斯坦的思想体操进化为当代大科学, 当年没找到以太的 Michelson-Morley 干涉仪如今升级为大尺度的 LIGO 和 LISA, 令人惊叹科学和技术的进步; 然而千百万人追逐一个百

年前的“幽灵”, 又不禁令人慨叹今天的思想的苍白。LIGO 申请报告的开头引用了马基雅维利 (Niccolò Machiavelli) 《君主论》的一句名言: “没有比引领事物的新秩序更难把握、更冒险和更不确定的了。” (There is nothing more difficult to take in hand, more perilous to conduct, or more uncertain in its success, than to take the lead in the introduction of a new order of things.) 我们

今天缺的也许正是引领新秩序的思想, 引力波的春浪能激起思想的波澜吗?

文/李泳

作者简介 李泳, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所研究员, 研究方向为地表过程动力学、数学物理的普及等, 电子信箱: ylie@imde.ac.cn。

参考文献 (References)

- [1] Albert Einstein. Näherungsweise integration der feldgleichungen der gravitation[J]. Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte, 1916a, part 1: 688–696.
- [2] Albert Einstein. Die Grundlage der allgemeinen relativitätstheorie[J]. Annalen der Physik, 1916b, 49: 769–822.
- [3] Albert Einstein. Über gravitationswellen[J]. Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte, 1918: 154–167.
- [4] Eddington A S. The mathematical theory of relativity[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1960: 130.
- [5] Max Born. The einstein born letters[M]. Letter no.71. London: MacMillan, 1971: 124–125.
- [6] Kennefick D J. Traveling at the speed of thought: Einstein and the quest for gravitational waves[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2007.
- [7] Albert Einstein, Nathan Rosen. On gravitational waves[J]. Journal of the Franklin Institute, 1937, 223: 43–54.
- [8] Thorne K S. Multipole expansions of gravitational radiation[J]. Reviews of Modern Physics, 1980, 52(2): 299–340.
- [9] Maggiore M. Gravitational waves. Volume 1: Theory and experiments[M]. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- [10] Pais A. Subtle is the lord: The science and the life of Albert Einstein[M]. New York: Oxford University Press, 2005: 552.
- [11] Gleick J. Genius, the life and science of Richard Feynman[M]. United Kingdom: Vintage, 1993: 531.
- [12] Taylor J H, Weisberg J M. A new test of general relativity—Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16[J]. Astrophysical Journal, 1982, 253: 908–920.
- [13] Brady P R, Creighton J D E, Thorne K S. Computing the merger of black-hole binaries: The IBBH problem[J]. Physical Review D, 1998, 58: 061501.
- [14] Thorne K S. Warping spacetime[M]//Gibbons, Shellard E P S, Rankin S J. The Future of Theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Stephen Hawking's 60th Birthday. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2003: 74–118.
- [15] Battye R A, Shellard E P S. Relic gravitational waves class[J]. Classical and Quantum Gravity, 1996, 13: A239–A246.
- [16] Penrose R. Cycles of time: An extraordinary new view of the universe[M]. New York: Knopf, 2010: 288.
- [17] Chiao Raymond Y. Conceptual tensions between quantum mechanics and general relativity: Are there experimental consequences?[M]//Barrow J D, Davies P C W, Harper C L, Jr. Science and Ultimate Reality. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004: 254–278.

(责任编辑 王媛媛)