

支撑引力波探测的信息技术基础设施： LIGO 的经验与启示*

唐 川** 房俊民 田倩飞
(中国科学院成都文献情报中心, 成都 610041)

摘 要:2016 年 2 月,美国“激光干涉引力波天文台”(LIGO)科学合作组织等机构共同宣布,人类首次直接探测到了引力波,这是前沿物理的重大进展,在多方面具有革命性意义。在 LIGO 探测到引力波的背后,超级计算、数据网格、志愿者计算等信息技术基础设施发挥了关键性支撑作用,关键经验包括:(1)构建多模式、多样化的计算资源体系;(2)打造便捷、高效的科学工作流系统;(3)探索先进算法、提高数据分析效率。我国正在推动“阿里”、“太极”、“天琴”等三大引力波探测计划,LIGO 如何通过建设和使用信息技术基础设施为引力波探测提供有效支持的成功经验,对于我国引力波探测计划取得成功具有重要的参考价值,包括:(1)从整体上构建信息技术基础设施支撑体系;(2)重视开发科学工作流系统;(3)将先进算法作为核心目标;(4)重视科研信息化人才队伍建设。

关键词:引力波探测;信息技术基础设施;超级计算;数据网格;志愿者计算

中图分类号:G35 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2017.12.002

IT Infrastructure behind Gravitational Wave Detection: LIGO Experiences and Implications*

TANG Chuan** FANG Junmin TIAN Qianfei

(Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract:The first confirmed detection of gravitational wave by LIGO in February, 2016 marks a revolutionary achievement for human beings. IT infrastructures, such as supercomputing, data grid and volunteer computing, play a key role in this breakthrough. A few experiences can be drawn in several research areas, including: (1) multi-mode and diverse computing systems; (2) scientific workflow system with high efficiency; (3) improving data analysis efficiency by exploring advanced algorithms. As China is advancing three projects (Ali, Taiji, Tianqin) targeting gravitational wave detection, the experiences of building and utilizing IT infrastructure from LIGO would provide valuable implications, including: (1) establishing the IT infrastructure from an overall perspective; (2) developing a highly efficient scientific workflow system; (3) exploring advanced algorithms as a key object; (4) improving the evaluation system and payment of IT infrastructure staff.

Key words:gravitational wave; IT infrastructure; supercomputing; data grid; volunteer computing

1 引言

引力波是 100 年前爱因斯坦广义相对论所预言的一种以光速传播的时空波动。引力波理论认为,和加速运动的电子可以产生电磁波一样,加速运动的质量或能量可以发射引力波,例如恒星坍缩成黑洞、致密双星的合并等天体运动都可以产生强大的引力波。而且,由于引力波和物质之间只有弱耦合相互作用,任何物质对引力波来说几乎都是透明的,因此引力波从波源发出后,所携带的能量和波源系

统的动力学信息永不消失^[2]。由于技术限制等原因,直到 2016 年 2 月,在美国国家科学基金会(NSF)的召集下,来自美国加州理工学院、麻省理工学院以及“激光干涉引力波天文台”(LIGO)科学合作组织的科学家才共同对外宣布:人类首次直接探测到引力波^[3]。这是前沿物理的重大进展,在多方面具有革命性意义,领导 LIGO 的三位主要科学家也因此获得了 2017 年诺贝尔物理学奖^[4]。在 LIGO 探测到引力波的背后,超级计算等信息技术基础设施发挥了关键性支撑作用。我国正在推动“阿里”(中科院主持)^[5]、“太极”(中科院主持)^[5]、“天琴”(中山大学主持)^[6]等三大引力波探测计划,研究 LIGO 如何使用信息技术基础设施为引力波探测提供有效支持的成功经验,对于我国引力波探测计划

2017-10-18 收稿,2017-12-18 接受,2017-12-28 网络发表

* 中国科学院文献情报能力建设专项“支撑综合性国家科学中心建设的关键情报能力与服务体系”资助

** 通讯作者,E-mail:tangc@clas.ac.cn

取得成功具有重要的参考价值。

2 LIGO 利用信息技术基础设施支持引力波探测的经验

引力波研究虽然涉及最前沿的理论物理,但就探测而言,主要依靠光干涉技术、星间通信技术、基于超算的海量数据分析技术等。LIGO 探测器由 10 个子系统组成,其中之一是数据与计算系统,该系统负责 LIGO 探测数据的采集、分配和计算等任务^[7]。LIGO 建设并利用该数据与计算系统为引力波探测提供有效支持的主要经验可归纳为以下三点:

2.1 构建多模式、多样化的计算资源体系

为满足科学家对计算资源的不同需求,LIGO 采用了四种模式来构建多样化的计算资源体系:

1) 专用计算。LIGO 的成员机构利用自己的计算资源构建了“LIGO 数据网格”^[8],负责常规性、需要及时处理的计算任务,即在数据产生的同时对其进行实时分析。

2) 机动计算。根据动态需求,LIGO 可通过 NSF 资助的“开放科学网格”(OSG)获取机动计算资源,OSG 可为 LIGO 提供大量高通量计算服务。

3) 分配式计算。LIGO 向 NSF 申请其“极端科学与工程探索环境”(XSEDE)计算资源,XSEDE 分配给 LIGO 的资源包括传统的超算环境(批量提交、用户登陆、共享文件系统),也包括基于虚拟化用户界面、无需再批量提交任务的超算环境^[9]。

4) 志愿者计算。LIGO 通过“伯克利网络计算机开放基础设施”(BONIC)项目开展了 Einstein@Home 计划^[10],可利用志愿者的个人计算机来寻找中子星信号。该计划适用于数据量较小、耗时很长的计算任务,负责搜寻连续的引力波信号(如脉冲星自转产生的引力波)。

在架构上,LIGO 的数据与计算系统分为两级,其中一级系统由位于探测站点(利文斯顿和汉福德)和加州理工学院的计算中心组成,探测站点的计算中心主要负责检测激光干涉仪的状态,加州理工学院的计算中心则负责处理一些需要及时完成的任务。原始数据经一级系统处理后,被分配给二级系统进行深入分析,包括 LIGO 成员机构、OSG、XSEDE、Einstein@Home 等。

2.2 打造便捷、高效的科学工作流系统

LIGO 的科学家通常需要组合不同领域、多个组

织的复杂应用程序,对海量数据进行查找、移动、分析、仿真及可视化等操作,这使得信息技术基础设施的易用性显得十分重要。LIGO 通过 Pegasus^[11](“飞马座”科学工作流管理系统)等管理工具来为科学家打造便捷易用的工作流管理系统,让科学家可以专注于科学问题,不被网络基础设施的底层问题所困扰。

Pegasus 是由美国南加州大学开发的工作流管理系统,支持应用程序在许多不同的环境计算中执行。Pegasus 通过自动把抽象的工作流描述映射到分布式执行环境中,将各个科学领域和实际运行环境联系起来。当 LIGO 将计算任务从内部的“LIGO 数据网格”向 OSG、XSEDE 等外部系统扩展时,Pegasus 提供了可靠、可伸缩、高效的跨站点数据传输与计算支持,最终帮助 LIGO 的科学家通过基于 Web 的控制版面及工具箱即可轻松完成工作流监控与分析。在 LIGO 最终发现引力波的数据分析工作中,Pegasus 帮助科学家完成了一个主要的工作流分析。

2.3 探索先进算法、提高数据分析效率

LIGO 需要分析的对象既包括激光干涉仪引力波探测器输出的数据,也包括有关各种环境条件和引力波探测器自身状态的监测数据。从 2015 年 9 月 14 日探测器接收到引力波信号到 2016 年 2 月 11 日 LIGO 正式宣布发现引力波,经历了近 5 个月的数据分析。由此可见,除了强大的计算资源,更需要探索先进的算法来提升数据分析的效率。在这方面,清华大学、剑桥大学等 LIGO 成员机构都在探索机器学习算法在引力波天文学中的应用,包括识别引力波信号中的噪声、评估设备运行状态和分析引力波的来源等^[12]。

此外,还需要研究先进算法来突破现有研究方法的局限。科研界目前主要采用匹配滤波技术来搜寻引力波信号。匹配滤波要求对引力波波源建立合理的物理模型,根据模型产生成千上万的模板,然后用这些模板去匹配引力波数据中的信号,从而找到相关引力波信号。但在引力波探测中,大量波形是未知的,无法用匹配滤波器技术来分析。LIGO 确认的几次引力波信号源于双黑洞并合和双种子星事件,这是理论上知道得最清楚的引力波源,但对是否有其他引力波源产生的信号,目前仍然在对数据进行分析处理。

3 对我国引力波探测工程的启示

我国目前已提出“阿里”、“太极”和“天琴”三项引力波探测计划,虽然各项计划的研究重点与实施方法有所不同,但都离不开信息技术基础设施的支持。信息技术基础设施在 LIGO 探测引力波的工作中起到了极其重要的作用,可为我国引力波探测工程带来以下启示:

3.1 从整体上构建信息技术基础设施支撑体系

作为一项前沿、跨机构、跨领域的大科学工程,LIGO 在顶层设计中就把信息技术基础设施支撑体系作为核心系统之一来构建。我国引力波探测工程应从整体上开展信息技术基础设施支撑体系的规划与部署,从软硬件系统、协调制度等方面实现信息技术基础设施与其他系统的有机结合。可从各相关方获取计算资源,构建灵活的多样化计算资源体系,以满足不同层次、不同类型的需求,打通引力波探测工程与相关信息化资源之间的壁垒,保障相关领域科研人员能够在信息化的科研平台上协同创新。

3.2 重视开发科学工作流程系统

为了扫除科学家在信息技术基础设施上高效开展协同创新的壁垒,LIGO 特别重视科学工作流程系统的开发与应用。我国引力波探测工程应为科学家打造符合自身需求特点的科学工作流程管理系统,有效降低科学家使用底层计算资源的门槛,提高计算资源的利用率,为跨领域、跨组织的大规模协同开发和交流合作提供便利,最终促进引力波探索。

应为科学工作流程开发与应用提供足够的经费和人力资源支持,充分研究国内外现有科学工作流程的关键技术,通过改进与优化来满足自身的需求,为引力波探测工程打造出满足以下要求的科学工作流程管理系统:具有友好的图形用户界面;与底层应用程序无缝集成;提供访问高性能计算资源的接口;对海量数据及其来源进行有效管理;对流程执行状态进行监控与容错以提高系统的可靠性。

3.3 将先进算法作为核心目标

虽然 LIGO 已通过数据分析成功发现了引力波信号,但其分析效率仍有待提高,且现有分析技术无法识别理论上未知的引力波,因此更加先进、更加智能的数据分析算法将成为未来引力波探索工作中的一个核心工作。可以采取以下措施开发有助于引力波探测的先进算法:1)为开发先进算法提供专项支

持,将其确立为引力波探测工程的一项核心目标;2)将人工智能技术应用于分析处理引力波大数据,结合有监督学习、无监督学习、半监督学习、增强学习、迁移学习等策略,发展高效的引力波数据分析算法,提高处理引力波大数据的速度与精度,增加识别理论上未知引力波的可能性;3)开放引力波天文数据、举办挑战赛,吸引企业和公民科学家参与,利用群体智慧攻克难题。

3.4 重视科研信息化人才队伍建设

引力波探测等大科学工程对信息技术基础设施的依赖程度凸显了加强科研信息化人才队伍建设的重要性。但长期以来,我国科研信息化人才队伍建设面临着多重困难,包括信息化负责人的组织地位不高、缺乏合理的人才绩效考核制度与薪酬制度等。

应加强科研信息化负责人的组织地位和权力,为其提供组织协调和配置相关资源的权限,切实保障信息化建设的延续性和统筹性、信息的共享性和统一性。

应改革信息化人才考核制度。我国的科研信息化人才在业绩考核时长期被论文指标等限制性条件所束缚,在职称评定等方面处于劣势,工作积极性受到极大限制。应根据中央 2016 年 3 月印发的《关于深化人才发展体制机制改革的意见》,建立符合科研信息化岗位特点的人才评价机制,对信息化人员和科研人员进行分类管理。

应调整信息化人才薪酬制度。在目前的薪酬制度下,科研信息化的优秀人才往往会因被 IT 产业的高薪岗位吸引而流失,这已成为科研信息化工作面临的一个突出问题。应根据信息化岗位及工作内容专业性、信息技术人才市场供需关系等因素调整薪酬制度,减小科研信息化人员与其他行业同等资质人员的薪酬差距,从而确保信息化队伍的稳定性。

参考文献

- [1] 黄玉梅,王运永,汤克云,等. 引力波理论和实验的新进展[J]. 天文学进展,2007(1):58-73.
- [2] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6):061102.
- [3] The Nobel Committee for Physics. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2017: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory and the First Direct Observation of Gravitational Waves [EB/OL]. 2017-10-03. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/

physics/laureates/2017/advanced-physicsprize2017. pdf.

[4]张新民,苏萌,李虹,等. 原初引力波与阿里探测计划[J]. 现代物理知识,2016(2):3-9.

[5]刘志国,朴云松,乔从丰. 多波段引力波宇宙研究和空间太极计划[J]. 现代物理知识,2016(5):28-33.

[6]刘志远. “天琴计划”太空中捕捉宇宙涟漪[J]. 科技导报,2016,34(3):53-54.

[7]AASI J, ABBOTT B P, ABBOTT R, et al. Advanced LIGO[J]. Classical & Quantum Gravity, 2015, 32(7):1-41.

[8]DEELMAN E, KESSELMAN C, WILLIAMS R, et al. A Virtual Data Grid for LIGO[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001, 2110:3-12.

[9]AARON D. Science powerhouses unite to help search for gravitational waves[EB/OL]. 2014-12-05. <https://phys.org/news/2014-12-science-powerhouses-gravitational.html>.

[10]ABBOTT B. The Einstein@ Home search for periodic gravitational waves in LIGO S4 data[J]. Physical Review D, 2008, 80(2009):198-218.

[11]DEELMAN E, BLYTHE J, GIL Y, et al. Pegasus and the Pulsar Search: From Metadata to Execution on the Grid[C]// Parallel Processing and Applied Mathematics. Berlin: Springer, 2003:821-830.

[12]王小鸽,ERIC L,都志辉,等. 引力波数据分析[J]. 天文学进展, 2016,34(1):50-73.



合成生物学和生物工程的机遇与风险

不管是从短期还是长期来看,各种合成生物学和生物工程技术带来的既是无限的机会也是巨大的挑战。2017 年 11 月 21 日,剑桥大学存在风险研究中心(the Centre for the Study of Existential Risk at the University of Cambridge)在 *eLife* 杂志上发表的一篇报告,汇总了合成生物学行业从业者、创新者、研究者以及英美两国国家安全界众多人士关于该领域主要新兴问题的观点,并为各行业决策者总结和预测了未来五到十年合成生物学领域最重要的研究热点以及可能涉及的问题,具体包括:

人造光合作用和碳捕获:其发展将极大地推动碳循环系统的变革,为人类社会提供可持续的商业化学品和生物燃料来源。

增强农作物的光合作用:通过减少收获前的能量损失、收获后的能量消耗和食用后的能量浪费,来实现农作物的能量最大化,有助于解决全球性粮食安全问题。

合成基因驱动:有利于促进整个物种优良性状的遗传,但同时也存在破坏生态系统稳定的潜在威胁。

人类基因组编辑:可为延长人类寿命和改善人体健康提供更多的可能性,但也存在诸多伦理道德方面的争议。

生物工程防御机制:在提供保护的同时,也可能被其他人用来实施破坏性目的。

3D 打印人体器官和组织工程:可用于减轻创伤性损伤和疾病带来的痛苦,但是否能够将其应用于逆转与年龄相关的功能衰退,在伦理、社会和经济等诸多方面都存在争议。

微生物疗法:可用于治疗帕金森病、结肠癌等疾病以及肥胖、2 型糖尿病等代谢疾病,但这一做法可能导致来自基因工程的微生物 DNA 扩散到人类微生物群体甚至更广泛的环境中。

信息安全和生物自动化的结合:可将数字信息被转化为 DNA 后储存在生物体内,需要时再在目标生物体中表达出来,但可能因为篡改 DNA 序列导致有害生物体的产生,以及通过攻击关键 DNA 序列数据库来破坏疫苗和药物生产等破坏性行为。

新的制造商进入制药市场:社区生物实验室和初创公司之间的生物实验定制、工具方法共享,加上开放的商业模式和开源技术,预示着跨国制药公司将无法在地区性疾病定制方面获利,这必将引起人们对现有制造业市场、原材料供应链以及药物监管等方面的担忧。

平台技术应对新的疾病大流行:通过可扩展的、灵活的诊断和治疗方法,使候选疫苗和植物抗体生产系统的快速识别和开发成为可能,可用于应对新出现的传染病以及潜在的生物武器的攻击。

生物技术所有权模式转变:通过开发非专利保护型通用工具、扫除工程生物学技术障碍,帮助那些处于资源匮乏环境中的研究者针对当地需求开发可持续生物经济,并从中受益。

吴晓燕(中国科学院成都文献情报中心) 编译自 <https://phys.org/news/2017-11-highlights-opportunities-synthetic-biology-bioengineering.html>
原文标题:Report highlights opportunities and risks associated with synthetic biology and bioengineering