



# 基于文献计量学方法的 引力波研究国际发展态势分析

董璐\* 魏韧 郭世杰 李宜展 李泽霞

中国科学院文献情报中心 北京 100190

\*通讯作者 E-mail: donglu@mail.las.ac.cn

**[摘要]** 自2016年2月美国LIGO探测到了双黑洞并合所产生的GW150914引力波信号以来,国际上引力波科学研究和观测工作开展得如火如荼。该文对引力波领域SCI论文进行文献计量分析,从整体态势、高频关键词、高被引论文等维度展开,旨在了解引力波领域国际发展态势。

**[关键词]** 引力波 发展态势 文献计量 激光干涉引力波观测台

DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.201806001

## 1 引言

1915年阿尔伯特·爱因斯坦提出了广义相对论。1916年他在广义相对论的基础之上预言了引力波的存在。引力波是广义相对论最重要的理论预言之一,自1974年起,美国天文学家泰勒(Taylor)和赫尔斯(Hulse)利用位于波多黎各的Arecibo射电天文望远镜对双中子星PSR 1913+16开展了长达14年的连续观测,发现了引力波存在的间接证据,并因此获得1993年诺贝尔物理学奖。2016年2月11日,美国激光干涉引力波观测台(LIGO)及处女座重力波团队(Virgo)宣布他们利用高级LIGO探测器,首次探测到了来自于双黑洞合并的引力波信号。2017年10月16日,LIGO和Virgo联合宣布探

测到双中子星并合所产生的名为GW170817的引力波信号,并同时观测到并合产生的电磁信号。引力波提供了全新的手段探寻宇宙中众多的未解之谜,引领人类进入了引力波天文学的新时代。

本文利用文献计量学方法对引力波领域研究论文的产出规模、高被引论文表现、国际合作、分支学科领域布局等相关指标进行分析,旨在了解引力波领域的国际发展态势。本文分析所用数据来源于科睿唯安(Clarivate Analytics) Web of Science平台的科学引文索引数据库(SCIE),利用引力波研究领域相关检索词构建检索策略并依据学科研究方向对结果进行精炼(见附表1),共检索到11 241篇论文(检索时间2017年11月30日),并对检索出的数据采用TDA和Excel等工具进行分析。



## 2 整体态势分析

### 2.1 年代变化趋势

从SCI检索结果看,1916年,爱因斯坦在《普鲁士科学院会刊》(物理数学卷)上发表论文“引力场方程组的近似积分”,他根据广义相对论预言了引力波的存在,并且给出3种不同的引力波(“纵纵波”、“纵横波”与“横横波”)。1918年,爱因斯坦在同一期刊发表了第2篇关于引力波的文章,详细探讨了这种奇特的弯曲时空中的涟漪。1936年爱因斯坦和纳森·罗森(Nathan Rosen)合作发表论文,证明引力波并不存在。统计显示,1916—1991年发文量较少,年发文量少于100篇,研究进展缓慢。该阶段的研究主要集中在理论上论证引力波的存在。1992年起发文量增长趋势逐渐明显,呈现快速增长态势。2016年首次直接探测到引力波,当年高发文量达842篇,掀起新一轮的引力波研究热潮(见图1)。

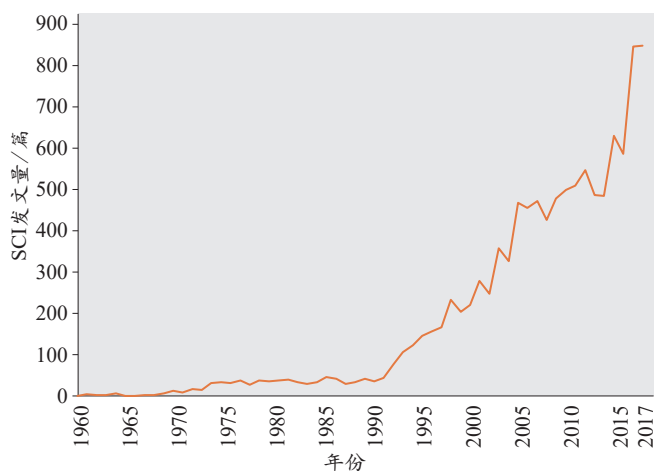


图1 引力波领域基础研究论文产出年代分布

### 2.2 国家/地区分布

全球共有80多个国家/地区开展了引力波相关的基础研究,其中发文量排名前10位的国家(表1)依次是美国、英国、德国、意大利、日本、法国、澳大利亚、俄罗斯、中国和西班牙。上述10个国家在引力波基础研究

表1 引力波研究领域基础研究发文量排名前10的国家/地区

排名	国别	发文量/篇	发文量占比/%
1	美国	4130	36.74
2	英国	1667	14.83
3	德国	1633	14.53
4	意大利	1538	13.68
5	日本	1114	9.91
6	法国	1020	9.07
7	澳大利亚	677	6.02
8	俄罗斯	663	5.90
9	中国	659	5.86
10	西班牙	583	5.19

注:统计数据基于全作者统计。

的发文量占总量的77.01%。美国在该主题的研究中占有明显优势,其发文量占全部论文的36.74%;中国发文量为659篇,占该领域全部论文的5.86%。

2002年,美国在该领域发表SCI论文数量突破100篇,此后发展速度相对较快。1999年美国LIGO探测器建成启用,于2002年开始真正探测,在2002年至2010年之间,LIGO进行了多次探测实验,搜集到大量数据,但并未探测到引力波。2011年探测器开始升级,2015年9月升级测试完成后开始运行。2016年2月11日,LIGO科学协作和Virgo协作组共同发表论文表示,在2015年9月14日探测到引力波信号,其源自于距离地球约13亿光年处的两个质量分别为36太阳质量与29太阳质量的黑洞并合。

英国和德国在引力波基础研究的发文量非常接近。两国均在1920年代起步,研究时断时续的情况延续至1980年代末期,随后发文量呈现平缓增长趋势,但年发文量少于美国。

中国科学家早在1970年代就开始了引力波研究,然而由于多种原因,其间停滞了十几年。1990年中国科学院数学与系统科学研究院应用数学研究所在*General Relativity and Gravitation*(《广义相对论和引力》期刊)发表了引力波天线的相关研究。自1998年起中国在引力



波研究领域开展了持续相关研究，但相较于欧美国家发展缓慢，近5年发展速度相对加快，2016年发文量突破100篇。

随着科学研究涉及的领域及其分工越来越精细，科学实验的操作、科学数据的处理越来越需要科学共同体合作完成，国际合作日趋紧密。文献计量方法中，可以通过对自主研究（论文作者全部来自同一国家）和合作研究（论文来自不同国家）的统计分析来揭示一个国家

科学合作战略及发展现状。从引力波研究领域主要国家的自主研究与国际合作论文数据中（表2）可以看出，引力波国际合作研究为研究的主要形式，各国国际合作论文数量占比均超过50%，尤其是英国、德国、意大利和西班牙4个欧洲国家国际合作论文所占份额相对较高。从表2列出的篇均被引频次指标可以看出，各国自主研究成果的学术影响力均低于同期国际合作成果，说明国际合作可有效提升学术研究成果的显示度。

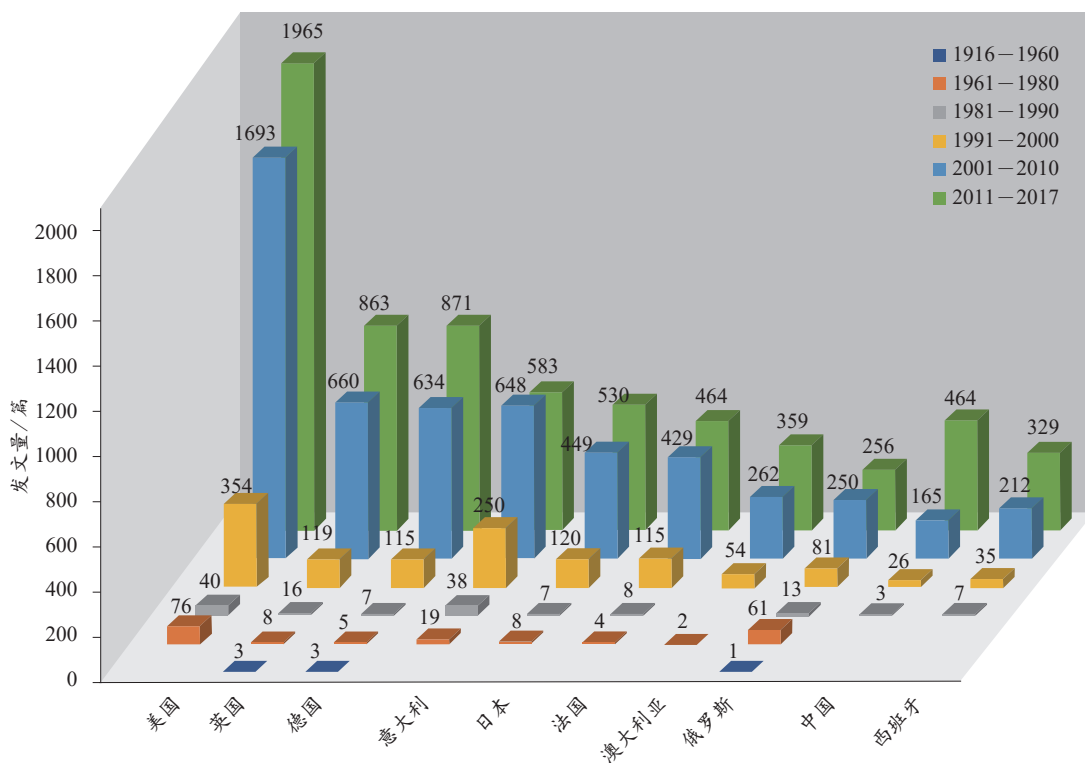


图2 引力波领域基础研究发文量前10位国家的发文趋势

注：由于SCI是回溯数据库，1916-1980年期间的论文数据字段标注不完整，部分字段缺失，国家地区和作者地址信息不全，只有出版商的信息，故此期间的数据不完整。

从引力波研究领域基础研究发文量前10位国家的合作关系图中（图3）可以看出，该领域发文量前10位国家均与其他9个国家在该领域开展了相关合作，其中美国与英国、德国的合作强度相对较高。从合作的研究方向来看，美国与英国、德国的合作研究方向主要集中在对LIGO科学数据分析<sup>[1]</sup>、引力波及高能中微子探测<sup>[2]</sup>、

脉冲星<sup>[3]</sup>、黑洞<sup>[4]</sup>等。2005年北京大学与美国得克萨斯大学、澳大利亚联邦科学与工业研究组织合作发表了用脉冲星定时检测引力波的随机背景<sup>[5]</sup>，中国与美国合作研究主要集中在近5年，研究方向涉及引力波探测<sup>[6]</sup>、伽马射线暴<sup>[7]</sup>等。



表2 引力波研究领域主要国家的自主研究与国际合作论文数据

国别	论文总数/篇	自主研究			国际合作		
		论文数量/篇	份额/%	篇均被引频次	论文数量/篇	份额/%	篇均被引频次
美国	4130	1943	47.05	43.71	2187	52.95	54.93
英国	1667	399	23.94	41.77	1268	76.06	54.41
德国	1633	348	21.31	38.48	1285	78.69	54.78
意大利	1538	575	37.39	27.67	963	62.61	49.71
日本	1114	536	48.11	37.38	578	51.89	57.90
法国	1020	256	25.10	35.17	764	74.90	53.14
澳大利亚	677	214	31.61	35.00	463	68.39	51.30
俄罗斯	663	316	47.66	29.91	347	52.34	52.62
中国	659	290	44.01	43.35	369	55.99	62.37
西班牙	583	83	14.24	40.33	500	85.76	57.83

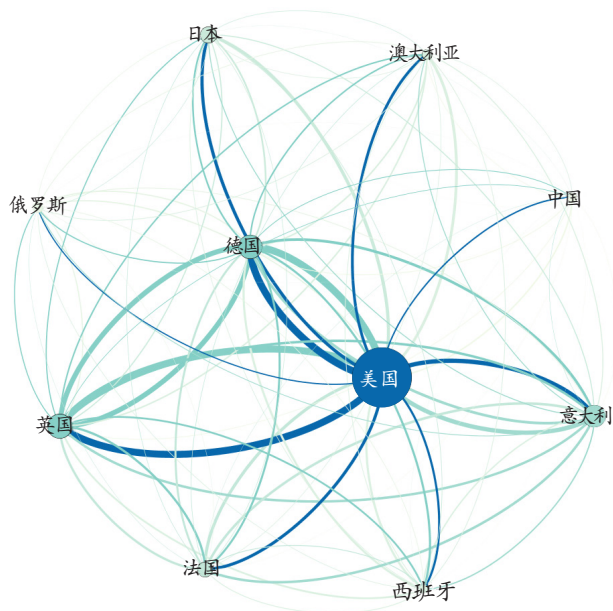


图3 引力波领域基础研究发文量前10位国家合作关系图  
注：两个节点间连线代表有合作关系，线的粗细代表合作强度强弱，颜色深浅代表节点大小。

### 2.3 机构分布

引力波研究领域基础研究发文量前21位机构中（表3）美国有13家，英国有4家，德国、意大利和日本各有2家，法国和澳大利亚各有1家，说明美国在该领域基础研究产出相对较多，拥有较明显的优势。发文量排名前

5位的机构分别是美国加州理工学院、德国马克斯·普朗克引力物理研究所、意大利国家核物理研究院、日本东京大学和英国格拉斯哥大学，其中美国加州理工学院发文量高达1 190篇，麻省理工学院发文量为440篇，分别位居世界的第1和第6位。这与加州理工学院与麻省理工学院共同管理与营运LIGO密不可分，也反映了重大科技基础设施建设的重要性。

该领域发文量前100位机构中来自中国的机构有3家，分别是中国科学院、清华大学以及台湾清华大学。其中中国科学院理论物理研究所、国家天文台、紫金山天文台、高能物理研究所与中国科学院大学等机构均在该领域展开了相关研究。

引力波研究领域基础研究发文量前21位机构间存在非常紧密的合作关系（图4），各个机构均与多个机构间存在合作发文情况。其中，德国马克斯·普朗克引力物理研究所的合作强度最高，与其余20个机构合作发表论文679篇，占其发文总量的73.64%。其与汉诺威莱布尼茨大学、加州理工学院合作关系较为紧密。发文量排名第1位的加州理工学院的合合作论文占其发文总量的57.56%，低于马克斯·普朗克引力物理研究所。中国科学院与前21位机构合作发文篇数相对较少，仅有54篇，占其发文总量的22.25%，与马克斯·普朗克引力物理研究所合作发文23篇。



表3 引力波研究领域基础研究发文机构分布情况

排序	机构	国家/地区	论文量/篇	篇均引用次数
1	加州理工学院	美国	1190	50.66
2	马克斯·普朗克引力物理研究所	德国	922	48.95
3	意大利国家核物理研究院	意大利	799	38.19
4	东京大学	日本	483	47.51
5	格拉斯哥大学	英国	459	44.14
6	麻省理工学院	美国	440	48.69
7	宾夕法尼亚州立大学	美国	415	56.36
8	伯明翰大学	英国	403	52.81
9	汉诺威莱布尼茨大学	德国	392	45.07
10	法国国家科学研究中心	法国	375	49.82
11	卡迪夫大学	英国	372	62.11
12	马里兰大学	美国	364	67.03
13	美国国家航空航天局	美国	360	58.77
14	威斯康星大学	美国	354	57.89
15	罗马大学	意大利	345	49.87
16	西澳大学	澳大利亚	343	46.00
17	斯坦福大学	美国	337	50.61
18	哥伦比亚大学	美国	329	63.35
19	剑桥大学	英国	322	72.31
20	京都大学	日本	321	50.95
21	路易斯安那州立大学	美国	321	57.10
.....	.....	.....	.....	.....
31	中国科学院	中国	240	52.96
85	清华大学	中国	117	70.61
92	台湾清华大学	中国台湾	103	72.58

## 2.4 发文作者分布

引力波研究领域基础研究发文量前10位作者(表4)主要分布在英国格拉斯哥大学、英国伯明翰大学和德国马克斯·普朗克引力物理研究所。值得注意的是,上述10位科学家均与多个机构研究人员合作发表

相关论文。马克斯·普朗克引力物理研究所所长Karsten Danzmann是欧洲空间引力波计划LISA探路者号(全名为激光干涉空间天线,其主要目的是用作引力波观测平台)的共同负责人,从事空间引力波物理研究,发文量位居第1位。

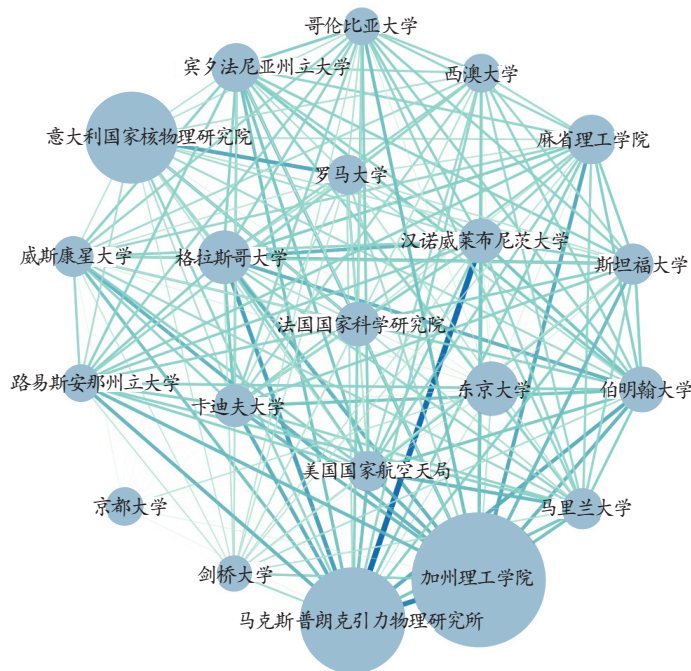


图4 引力波研究领域基础研究发文量前21位机构合作关系图

注：连线粗细表示合作强度高，圆点大小表示发文数量多少。

表4 引力波研究领域基础研究发文量前10位发文作者

序号	作者	所属机构	国家/地区	发文量/篇
1	Danzmann, Karsten	马克斯·普朗克引力物理研究所	德国	330
2	Hough, Jim	格拉斯哥大学	英国	299
3	Rowan, Sheila	格拉斯哥大学	英国	256
4	Vecchio, Alberto	伯明翰大学	英国	252
5	Freise, Andreas	伯明翰大学	英国	240
6	Schnabel, Roman	汉堡大学	德国	238
7	Buonanno, Alessandra	加州理工学院	美国	232
8	Coccia, E	马克斯·普朗克引力物理研究所	德国	230
9	Christensen, Nelson	卡尔顿学院	美国	227
10	Hild, Stefan	格拉斯哥大学	英国	227

### 3 高频关键词分析

根据检索出的引力波研究论文数据，采用Thomson Data Analyzer (TDA) 软件，提取出所有论文的关键词 (key words) 字段<sup>1</sup>，并对高频关键词<sup>2</sup>进行统计后得到

本领域高频关键词分布如图5所示。其中圆圈的大小代表关键词出现的频率高低。

从图5中可以看出，引力波研究论文大体可以分为4个领域：(1) 引力波源双中子星并合产生的伽马射线

<sup>1</sup> 关键词字段为作者关键词 (Author Keywords) 与WOS补充关键词 (Keywords Plus) 合集。

<sup>2</sup> 依据频率高低去除无实体意义的词语。

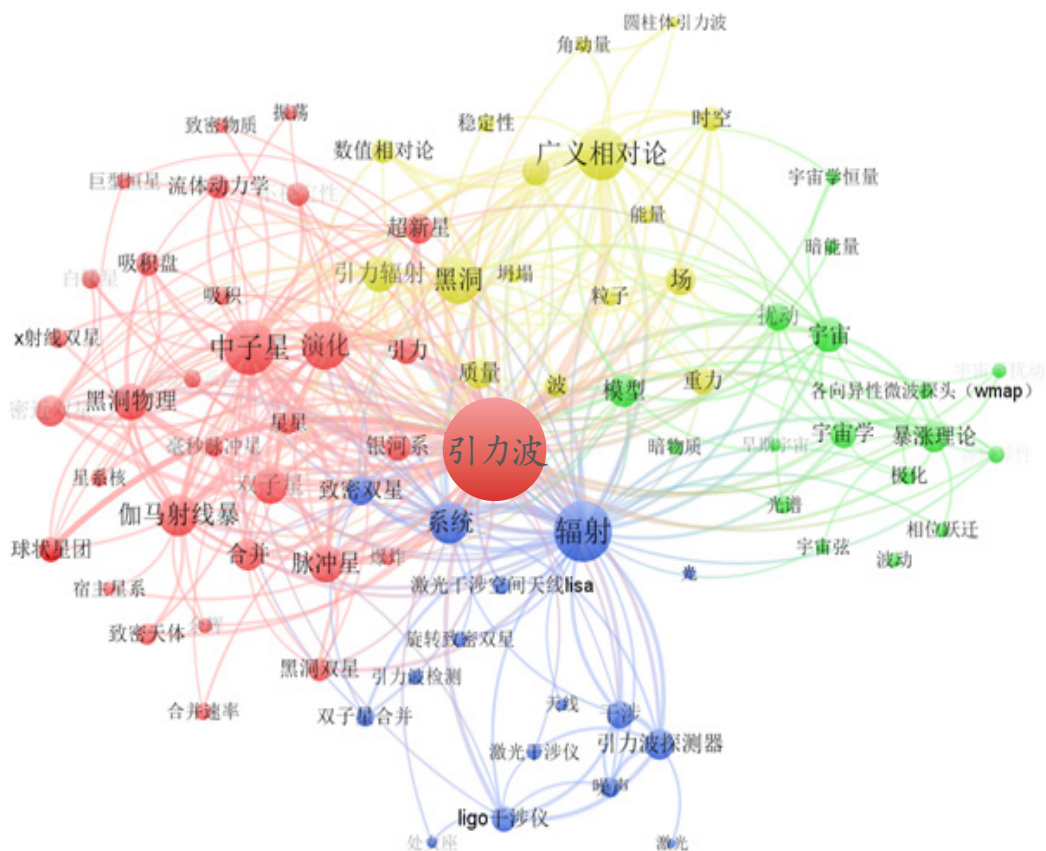


图5 引力波研究高频关键词分布

注：节点大小与词频高低有关，相同颜色的节点为一个聚类，节点间连线表示共现关系关联度。

暴、双星合并相关研究（红色）；（2）引力波探测相关研究（蓝色），涉及LIGO干涉仪、Virgo干涉仪等；（3）相对论相关研究（黄色）；（4）宇宙学相关研究（绿色）。其中，“引力波”、“引力波探测器”、“辐射”、“伽马射线暴”、“一般相对论”、“黑洞”是出现较多、与其他关键词联系最为密切的几个热点词汇。

#### 4 高被引论文分析

ESI高被引论文 (highly cited papers) 是ESI数据库的22个学科里近10年来被引次数最高的文献，排序列表基于按照年代该论文被引用次数的高低排在前1%的论文而给出。引力波研究领域基础研究检索结果中有173篇ESI高被引论文，其中LIGO团队与Virgo团队于2016年合作发表的首次直接探测到引力波事件GW150914被引频次高达1467次（表5）。LIGO团队由1000多位科学家组成，三

位创始人分别为罗纳德·德雷弗 (Ronald W. P. Drever)、基普·索恩 (Kip S. Thorne) 和雷纳·韦斯 (Rainer Weiss)，当中也包括GEO合作组的成员。Virgo团队由280多名来自20个欧洲研究团队的物理学家及工程师组成，包括法国国家科学研究中心 (CNRS)、意大利国家核物理研究院 (INFN)、荷兰国家核物理与高能物理研究所 (NIKHEF)、匈牙利维格纳物理学研究中心 (MTA Wigner RCP)、波兰POLGRAW小组、西班牙瓦伦西亚大学 (the University of Valencia) 及邻近意大利比萨的欧洲引力波天文台 (European Gravitational Observatory)。

#### 5 结语

以引力波探测为基础的引力波天文学是一门正在崛起的新兴交叉学科。由于引力辐射独特的物理机制和特性，使得引力波天文学研究的范围更广泛、更全面，物



表5 引力波研究领域基础研究排名前10位的高被引论文

发表年	机构/团队	通讯作者	论文题目	被引频次
2016	LIGO团队; Virgo团队	Abbott, BP	Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger	1467
2008	瑞士联邦理工学院	Kippenberg, TJ	Cavity Optomechanics: Back-action at the Mesoscale	972
2014	BICEP2团队	Ade, PAR	Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2	848
2011	那不勒斯腓特烈二世大学	Capozziello, S	Extended Theories of Gravity	727
2010	LIGO团队	Abbott, BP	Advanced LIGO: The Next Generation of Gravitational Wave Detectors	720
2007	美国石溪大学	Lattimer, JM	Neutron Star Observations: Prognosis for Equation of State Constraints	701
2009	LIGO团队	Abbott, BP	LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory	675
2010	LIGO团队; Virgo团队	Abbott, BP	Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by Ground-based Gravitational-Wave Detectors	674
2013	德国马克斯·普朗克引力物理研究所	Antoniadis, J	A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary	656
2009	美国密西西比大学	Berti, E	Quasinormal Modes of Black Holes and Black Branes	496

理分析更精确、更深刻。它能提供其他天文观测方法不可能获得的信息，加深人们对宇宙中天体结构的认识。随着引力波研究的发展，人类必将迎来引力波天文学蓬勃发展的新时代。目前，中国在引力波观测方面尚没有自主建设的引力波天文台，随着国际上引力波直接观测的成功和引力波天文学时代的开启，中国亟需自主建设引力波天文台。中国在引力波基础研究方面还相对薄

弱，一方面应建立和培养在引力波研究方面的研究团队，另一方面需继续加大对引力波研究的支持力度。

#### 致谢

中国科学院国家天文台苟利军研究员和陆由俊研究员审核了本报告的数据采集策略，提出了宝贵的修改意见和建议，谨致谢忱！

#### 参考文献

- [1] Harry G M. Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2010, 27(8):084006.
- [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] Antoniadis J, Freire P C C, Wex N, et al. A massive pulsar in a compact relativistic binary [J]. *Science*, 2013, 340(6131):1233232.
- [4] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226:

- Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 241103.
- [5] Jenet F A, Hobbs G B, Lee K J, et al. Detecting the stochastic gravitational wave background using pulsar timing [J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 625 (2):L123-L126.
- [6] Aasi J, Abbott B P, Abbott R, et al. Advanced LIGO [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(7):074001.
- [7] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Binary black hole mergers in the first Advanced LIGO observing run [J]. *Physical Review X*, 2016, 6(4):041015.





## Development Trends Analysis of Gravitational Wave

Dong Lu\*, Wei Ren, Guo Shijie, Li Yizhan, Li Zexia

National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

\*Corresponding Author, E-mail: donglu@mail.las.ac.cn

**[Abstract]** Since the first observation of gravitational waves GW150914 was announced by the LIGO and Virgo collaborations on 11 February 2016, which was made on 14 September 2015, scientific research and observation of gravitational wave have received more and more attention. The paper analyzes the aspects of overall situation, high-frequency keywords and highly cited papers about SCI papers in gravitational waves. The paper aims to understand the international development trend in the field of gravitational waves.

**[Keywords]** gravitational waves, development trend, bibliometrics, LIGO

附表1 检索策略

序号	子检索目标	子检索策略	检索结果
1	检索标题中包含引力波的论文;	TI=("gravitational wave*")	5697
2	检索主题(含标题、摘要和关键词)中同时包含引力波与引力辐射或引力子、广义相对论、多信使天文学、时空的论文;	TS=(("gravitational radiation" or (gravitons or graviton) or "general relativity" or multi-messenger astronomy or space-time* or spacetime*) "gravitational wave*")	4077
3	检索主题(含标题、摘要和关键词)中同时包含引力波与黑洞合并或双黑洞、双中子星、激光干涉仪、CMB B-mode、脉冲星时序阵列、双脉冲星的论文;	TS=(("black hole*" NEAR/5 mearg*) or "binary black hole*" or "binary neutron star*" OR "Laser interferometer*" OR (CMB NEAR/5 B-mode*) or "Pulsar timing array*" or "Binary pulsar") "gravitational wave*")	2383
4	检索主题(含标题、摘要和关键词)中同时包含原初引力波或平面引力波、引力波形的论文;	TS=("primordial gravitational wave*" or "plane gravitational wave*" or "gravitational waveform")	697
5	检索主题(含标题、摘要和关键词)中同时包含引力波与LISA或VIRGO、LIGO、AIGO、GEO600等引力波观测设施的论文;	TS=((LISA or "Laser Interferometer Space Antenna" or VIRGO or LIGO or AIGO or GEO600 or CLIO or MiniGrail or "Mario Schenberg" or AURIGA or INDIGO or IndIGO or KAGRA or "Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope" or LCGT or "Weber bar" or "TAMA 300" OR ALLEGRO OR "Big Bang Observer" OR DECIGO OR BBO OR "Einstein Telescope" OR tianqin or "Torsion-bar antenna" or toba) "gravitational wave*")	3224
6	检索主题(含标题、摘要和关键词)中同时包含引力波与测量或观测、探测(且字符间隔不超过5个单词)的论文;	TS=(("gravitational wave*" near/5 (MEASUREMENT* or measure or observator* or detector* or detection or search or searching)))	4704



续表

序号	子检索目标	子检索策略	检索结果
7	检索主题中包含LISA激光干涉仪空间天线或LIGO激光干涉引力波天文台、VIRGO处女座干涉仪的论文;	TS=("Laser Interferometer Space Antenna" or "Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory" or "Virgo interferometer")	799
8	考虑到少部分学者将引力波 gravitational wave 误写为重力波 gravity wave 的情况 (其中包含部分较高引用的论文), 检索主题中包含重力波, 且考虑到2-7的子检索目标, 并去掉在流体力学中重力波常出现的相关关键词, 并排除了大气科学、地球科学等学科的论文;	(TS=(("gravitational radiation" or (gravitons or graviton) or "general relativity" or multi-messenger astronomy) "gravity wave*") OR TS=((("black hole*" NEAR/5 mearg*) or "binary black hole*" or "binary neutron star*" OR "Laser interferometer*" OR (CMB NEAR/5 B-mode*) or "Pulsar timing array*" or "Binary pulsar") "gravity wave*") OR TS=("primordial gravity wave*") OR TS=((LISA or "Laser Interferometer Space Antenna" or VIRGO or LIGO or AIGO or GEO600 or CLIO or MiniGrail or "Mario Schenberg" or AURIGA or INDIGO or IndIGO or KAGRA or "Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope" or LCGT or "Weber bar" or "TAMA 300" OR ALLEGRO OR "Big Bang Observer" OR DECIGO OR BBO OR "Einstein Telescope" OR tianqin or "Torsion-bar antenna" or toba) "gravity wave*") or TS=(("gravity wave*" near/5 (MEASUREMENT* or measure or observator* or detector* or detection or search or searching)))) Not TS=(("internal gravity wave*" or "acoustic-gravity wave*" or "acoustic gravity wave*" or "atmospheric gravity wave*" OR "ATMOSPHERIC GRAVITY-WAVE*" or "surface gravity wave*" or "SURFACE GRAVITY-WAVE*" or "capillary-gravity wave*" or "momentum flux" or "mesosphere" or "acoustic-gravity" or "acoustic gravity" or "inertia-gravity" or "induced gravity wave*" or "meteorology and atmospheric dynamics" or "gravity-wave drag" or "gravity wave drag" or "lower stratospher*" or "tropospher*" or "ionospher*" or "middle atmospher*" or *atmospher* or ocean* or sea or cloud* or wind* or mountain* or water or mesopaus* or "surface flux" or hydrostat* or mesospher* or airglow or nightglow or acoustic* or eclips* or infra-sonic or airborne or "lidar measurement*") not (wc=(meteorology atmospheric sciences or engineering aerospace or geosciences multidisciplinary or oceanography or history philosophy of science or chemistry inorganic nuclear or engineering manufacturing or acoustics))	366
检索结果总计			11241