

·学术聚焦·

# 爱因斯坦在1916: 从引力波到量子电磁辐射理论

施郁

复旦大学物理学系, 上海 200433

**摘要** 1916年, 爱因斯坦预言引力波, 并提出量子电磁辐射理论、完善光子概念、指出量子过程的内在随机性。百年之后, 爱因斯坦预言的引力波通过激光的干涉被探测到, 而激光正是基于爱因斯坦的量子电磁辐射理论。引力波探测技术还与爱因斯坦的光子概念和布朗运动理论相关。因此引力波首次被直接探测是对爱因斯坦广义相对论、量子电磁辐射理论2方面工作的100周年纪念。本文梳理引力波探测技术中的“爱因斯坦元素”, 即激光、光子和热噪声, 然后通过对第一手资料特别是爱因斯坦那段时期的信件的分析考证, 回顾爱因斯坦在1916年的研究历程, 寻找爱因斯坦在引力波和量子电磁辐射理论2方面工作的历史联系。

**关键词** 爱因斯坦; 引力波; 量子电磁辐射理论

2015年9月14日, 美国的激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)探测到来自13亿光年外的2个黑洞并合所产生的引力波。该事件被记作GW150914。论文于2016年2月12日发表<sup>[1,2]</sup>。而在100年前的1915年11月, 爱因斯坦完成了广义相对论的创立, 并算出太阳附近光线偏折和水星进动的正确结果<sup>[3,4]</sup>; 1916年6月, 爱因斯坦预言了引力波<sup>[5]</sup>。

有趣的是, 在LIGO探测引力波的技术中, 激光以及爱因斯坦1905年首先在理论上发现的光子扮演了重要的角色, 而激光的理论基础和光子概念的完善正是爱因斯坦1916年提出的量子电磁辐射理论。另外, LIGO的探测技术也涉及爱因斯坦的布朗运动理论。

更有趣的是, 爱因斯坦量子电磁辐射理论的建立正好紧接引力波的工作。

这些伟大工作的过程是什么样的? 它们是如何发生的? 它们的发生有没有关联? 本文梳理LIGO技术中的“爱因斯坦元素”后, 试图勾勒出爱因斯坦当时在引力和量子论2方面的工作情况。

## 1 引力波探测技术中的“爱因斯坦元素”

### 1.1 激光与光子

根据LIGO官网的介绍<sup>[6]</sup>, LIGO目前在美国有2个相距3002 km的探测器, 而每个探测器是一个巨大的迈克尔孙干涉仪(Michelson interferometer), 有2条4 km长、相互垂直的长臂。在干涉仪中, 一束激光被分成2束, 分别在两臂中传播, 最后再重新汇聚, 从而发生干涉, 干涉的情况取决于两臂的长度之差。引力波是时空度规的扰动, 是横波(传播方向垂直于振动平面), 当它通过引力波探测器时, 引起这两臂长度的不同改变, 而光速保持不变, 因此导致干涉信号的改变。LIGO由此测量两臂长度的改变, 从而探测引力波。而2个探测器协同工作, 可排除单个探测器附近其它因素导致的长度改变。在排除其它原因后, 通过与理论计算结果比较, 可把两臂长度变化归因于引力波。

2束相同频率的单色光发生干涉, 总强度取决于二者的相位差。假设这2束光从同一初始位置出发, 花费不同时间经过不同路径, 最后到达同一位置。它们的相位差就等于两者经历的

时间差乘以频率, 再乘以 $2\pi$ 。时间差就是距离差除以光速, 频率是周期的倒数, 光速乘以周期(即光速除以频率)就是波长。因此相位差也等于距离差除以这两束光的波长, 再乘以 $2\pi$ 。光的波长和周期都很短, 所以干涉仪可以测量很小的距离差或时间差。1880年, 美国物理学家迈克尔孙设计出后来以他名字命名的干涉仪, 在2条互相垂直、长度相等的路径末端放置反射镜, 使得2束光汇聚到起始的分光镜。他用它来测量光波的媒质(以太)相对于地球的速度。如果存在以太, 因为地球在运动, 那么对于不同方向的相同距离, 光传播的时间就会不同, 从而导致相位差。1887年, 迈克尔孙和莫雷(E. W. Morley)确定了地球相对于以太的速度为0。荷兰物理学家洛伦兹(H. A. Lorentz)曾用同一坐标系中长度的物理变化来解释这个结果。而作为相对论的另一位先驱, 法国数学家兼物理学家庞加莱(H. Poincare)注意到不同地点的同时性概念存在问题。1905年, 爱因斯坦提出狭义相对论, 以光速不变原理和相对性原理取代了以太假说, 即以太不存在, 光的传播不需要媒质。迈克

尔孙因“光学精密仪器以及用它们所作的光谱与计量学工作”获得1907年的诺贝尔物理学奖,成为第1个获得诺贝尔奖的美国人,虽然颁奖词里未提迈克尔孙-莫雷实验。

迈克尔孙-莫雷实验奠定了狭义相对论的实验基础,有趣的是,今天的LIGO又是用迈克尔孙干涉仪直接验证了广义相对论关于引力波的预言。在这之前,1974年胡尔斯(R. A. Hulse)和泰勒(J. H. Taylor)发现的距地球21000光年的脉冲双星(PSR1913+16)已经被跟踪了40多年,轨道变化体现的能量损失与根据广义相对论计算的引力辐射相一致。

现代的迈克尔孙干涉仪当然要用激光,因为它具有高度的空间相干和时间相干,在空间上和频率上都很集中。以激光为基础的迈克尔孙-莫雷实验的精度达到 $10^{-15}$ ,<sup>[7]</sup>而LIGO能够测量到 $10^{-19}$  m的长度变化(这次引力波事件导致 $4 \times 10^{-18}$  m的变化<sup>[2]</sup>),这对探测到引力波起到了关键作用。

激光的英文laser是Light amplification by stimulated emission of radiation的缩写,意思是受激辐射引起的光放大。这里的辐射是指量子电磁辐射(即电磁波,但正如爱因斯坦在理论上首先发现的,也具有粒子性),光是指可见光,是某个频率段的电磁波。历史上先有微波激射(maser),然后又发展到可见光。微波激射的英文全称就是将激光(laser)全称的第一个单词光(light)换成微波(microwave),这是另一频率段的电磁波。汤斯(C. H. Townes)、巴索夫(A. Basov)和普罗克罗夫(A. Prokhorov)因研制出微波激射器获得1964年的诺贝尔物理学奖。汤斯和肖罗(A. L. Shawlow)也作了激光的理论工作。第1个激光器是梅曼(T. H. Maiman)在1960年发明的。

激光的基础就是爱因斯坦的量子电磁辐射理论中首次提出的受激辐射。爱因斯坦指出,电子在电磁场中存在吸收、自发辐射、受激辐射3种过程,他通过考虑它们的平衡,给出了普朗克辐射公式的新推导。在激光器中,增益

介质中的电子在入射光中被激发到高能态,导致高能态的电子多于低能态的电子,即所谓的粒子数反转。高能态电子回落到低能态时,又辐射出电磁波,这就是爱因斯坦首先指出的受激辐射,也是激光全称中“放大(amplified)”一词的由来。受激辐射发出的光的频率、相位和偏振都是一致的,从而具有高度相干性。

LIGO的光学系统由激光、镜子和光探测器组成,其稳定性由抗干扰的衰减系统和超真空(真空度仅次于大型强子对撞机,即LHC)保证。从激光二极管产生的4 W、波长808 nm的激光进入到一个被称作非平面圈振荡器的晶体激光装置,产生2 W、波长1064 nm的受激辐射,然后它再进入另一个放大装置,变成20 W、波长1064 nm的激光。据称在这个波段,这是世界上最稳定的激光<sup>[6]</sup>。然后借助于在分束器前面的若干“能量循环”(power recycling)半透镜,将激光的功率提高到700 W后进入分束器<sup>[1]</sup>。

入射激光被分束器分到相互垂直的两臂。每个臂都在一个法布里-珀罗(Fabry-Pero)腔里,借助于两端的镜子使得激光在里面来回反射很多次,从而光路从单程4 km放大到约等于引力波的波长的1/4,使得测量效果最佳。对于100 Hz的引力波来说,这个长度是750 km。光程越长,对仪器的振动也越敏感。因为每束光要被镜子发射很多次,所以为了光路的精确,镜面的制作被控制到原子量级。同时,在法布里-珀罗腔里,激光功率放大到100 kW(将来可以达到750 kW)<sup>[2]</sup>,从而使参与探测的光子大大增加,降低噪声并提高灵敏度。

镜子会吸收光,而LIGO的镜子(又称测试质量,test mass)由氢氧化物含量低的超纯度石英玻璃制成。每330万个入射光子中,只有一个光子被吸收致热。有一个辅助系统用二氧化碳激光加热,精确抵消主激光导致的形变<sup>[6]</sup>。

电磁场的量子基态(在量子场论中经常称作“真空”,这不是上文所说的代表没有空气的“真空”)具有固有的量子

涨落(经常称作“真空涨落”),导致光子到达镜子的时间和光子的数目的涨落。这说明光是由光子组成的。光子到达时间的涨落被称作光子颗粒噪声,与量子基态的相位涨落相关,频率较高(200 Hz以上),是LIGO的高频噪声的主要来源,因此决定了LIGO测量微小距离的基本极限。光子数目的涨落与量子基态的振幅涨落相关,频率较低,导致光对镜子的辐射压的涨落,从而又导致镜子位置的涨落。它们统称为量子噪声。量子噪声可以通过调节光学系统(比如激光功率和镜子的质量)和空腔的参数来克服,也可以用处于压缩态(振幅和相位的涨落的乘积达到海森堡不确定关系所允许的最小值)的激光来解决。所以引力波探测与量子测量这2个领域有密切关系。比如,量子测量的专家布拉津斯基(V. Braginsky)和凯夫斯(C. Caves)原来都是从事引力波探测的。

而这些物理问题可以追溯到爱因斯坦1905年提出的光量子概念以及他1916年的量子电磁辐射理论。

## 1.2 热噪声

LIGO的光学系统非常敏感,因此需要克服非常小的干扰。为克服环境扰动,LIGO设置了一套有几百个层次的复杂反馈控制系统。首先是要克服镜子内部和周边原子的无规运动。每个镜子(40 kg重)吊在一个360 kg的4极单摆中。悬挂系统由2个链(主链和反应链)组成。主链从上到下有4个质量,上面2个是钢,下面2个是石英玻璃。这个材料的力学损耗低。最下面的石英玻璃是镜子,尺寸34 cm×20 cm,由整体的石英玻璃纤维悬挂,以尽量降低热噪声。反应链最下端与测试质量平行的是反应质量。干涉仪的每个臂两端的镜子之间的距离的稳定(变化不超过 $10^{-12}$  m)通过反应质量来保证。反应质量与测试质量之间由磁体联系。

防振的第一道防线是一个主动衰减隔离系统,通过位置和振动传感器与永磁体调节器共同抵消外部运动。这将系统与10 Hz以上的地面运动隔离3

个数量级,导致悬挂系统受到的振动干扰小于 $2 \times 10^{-13}$  m。上节所述的悬挂系统作为被动隔离系统,再继续将噪音降低7个数量级,从而达到 $10^{-19}$  m的敏感度。

频率在10~100 Hz的热噪声也是主要噪声之一,它来自镜子与悬挂系统中经典布朗运动,以及镜子光学涂层的力学损耗<sup>[26]</sup>。所以镜子涂层所用的材料(硅和掺钛的钽氧化物的介电多层膜)既有高反射率,也尽量降低热噪声。

热噪声的物理学也可以追溯到爱因斯坦的奠基性工作,那是他1905年关于布朗运动的论文。在那篇论文里,爱因斯坦给出了流体中粒子的位置涨落与流体粘滞间的关系,即涨落与能量耗散的关系。耗散将运动转化为热。在LIGO中,能量耗散来自于悬挂镜子的石英玻璃纤维以及镜子的光学涂层。

LIGO设计如此精密,技术性的和非基本的噪声已远小于基本的量子噪声和热噪声。而历史上这2种噪声的物理本质都是爱因斯坦首先揭示的。

## 2 爱因斯坦的光量子假说

1905年是爱因斯坦的奇迹年,这一年他发表了5篇重要论文,按照时间顺序,分别是光量子假说、测量分子大小的方法、布朗运动、狭义相对论、相对论质能关系。

在唯一被爱因斯坦本人称作他的“革命性”文章中,他的光量子假说提出单频率的电磁辐射由分立的光量子构成,每个光量子的能量正比于频率,正如普朗克1900年给出的能量-频率关系。但是普朗克只是假设在振子产生电磁波的过程中,能量是一份一份的。1907年普朗克曾经致信爱因斯坦:“我不在真空中,而只是在吸收和发射的地方寻求作用量量子的含义,我认为真空中的电磁波严格由麦克斯韦方程描述。”所以需要强调爱因斯坦对早期量子论的关键贡献<sup>[8]</sup>。后来从美国化学家莱维斯(G. Lewis)1926年的一篇文章开始,光量子被简称为光子<sup>[4]</sup>。

1906年爱因斯坦又从光量子假说推导出普朗克黑体辐射公式。1909

年,通过黑体辐射能量涨落的研究,爱因斯坦提出,光量子可以看成“以光速运动的分立点”,“不能认为波和量子性不相容”<sup>[4]</sup>。但是,至此爱因斯坦的光子说还不完备,爱因斯坦还没有说明光子有没有动量。

1907到1911年是爱因斯坦的一段沉默期,但是他主要在思考量子问题。1911年5月他在给老朋友贝索(M. Besso)的信中写道<sup>[4]</sup>:“我不再问这些量子是否真实存在。也不再试图构造它们,因为我知道我的脑子不能够这样弄清它们。”这时,他的主要精力转移到广义相对论。

## 3 爱因斯坦1916年的广义相对论工作

关于爱因斯坦1915年11月创立广义相对论的紧张工作,以及他的很多幸运之处,可参见文献[9]。

1916年3月,爱因斯坦完成了对于广义相对论的一个综述<sup>[10]</sup>,文章最后讨论了3个预言:引力红移、光线弯曲、水星进动。

当时水星进动已有观测数据。1915年11月11日与18日之间,爱因斯坦得到与观测一致的水星进动计算结果。他因激动而心悸,而且“兴奋激动了好几天”<sup>[4]</sup>。1915年12月9日在给德国物理学家索末菲(A. R. Sommerfeld)的信中写道:“水星进动的结果给了我极大的满足。”<sup>[11]</sup>1916年元旦在给洛伦兹的信中写道:“好不容易获得的清晰以及与水星进动的一致让我比前任何时候都高兴。”<sup>[11]</sup>

1919年光线弯曲被英国天文学家爱丁顿(A. Eddington)和克罗姆林(A. Crommelin)等人的观测所证实。当时从洛伦兹的电报得知消息的爱因斯坦特地将这“快乐的消息”发电报给他病重住院的母亲,并告知《自然科学杂志(Naturwissenschaften)》<sup>[4]</sup>。

引力红移直到1960年才由美国物理学家庞德(R. V. Pound)和雷布卡(G. A. Rebka)完成。显然,广义相对论的验证需要精密的技术,因此广义相对论长期与现象脱节,直到20世纪后

半叶天体物理大发展之后。间接证明引力波存在的脉冲双星是1974年发现的。而在这些进展之前,爱因斯坦1955年已经去世。他后来越来越强调理论本身的优点,比如他在1930年写道<sup>[4]</sup>:“我认为广义相对论的主要长处不在于预言微小的观测效应,而在于基础的简单和自洽。”

回到1916年。1916年6月,爱因斯坦完成广义相对论框架下第1篇关于引力波的论文<sup>[5]</sup>。在引力场比较弱的时候,时空度规是在没有引力的情况即平直时空基础上的一个小扰动。爱因斯坦发现这个小扰动可以是以光速传播的波,这就是引力波。他还发现引力波只有2种螺旋态。在爱因斯坦相对论之前,洛伦兹在1900年猜测,引力传递需要不超过光速的有限速度。而1905年,庞加莱将洛伦兹变换推广到有引力的情况下,并首次使用“引力波”一词。

在关于引力波的这篇文章中,爱因斯坦还试图算出引力辐射能,但是有错。正确的结果在他1918年的一篇文章中给出,即著名的4极矩公式<sup>[12]</sup>。他下一篇也是最后一篇关于引力波的论文是多年后与罗森(N. Rosen)合作的工作,最初是质疑引力波的存在性,在被物理评论退回后改投到富兰克林学会会刊,1937年发表时改为关于圆柱状引力波的存在<sup>[13-15]</sup>。

1916年10月,爱因斯坦讨论了广义相对论里的能量动量守恒<sup>[5]</sup>。这导致了广义相对论的一系列课题,比如,能量动量的定义是不是与坐标系无关。后来人们知道当在无穷远时空趋于平直时,答案是肯定的。在其它相关问题中,有一个问题是,引力系统的总能量是不总是正的。肯定的答案由丘成桐和舍恩于1979年证明<sup>[17]</sup>。

## 4 爱因斯坦1916年完成引力波论文后建立量子电磁辐射理论

现在我们讨论本文的一个焦点。1916年,在完成引力波论文后,爱因斯坦在3篇论文中,提出了本文2.1节已

介绍的量子电磁辐射理论,给后来的量子电动力学和量子光学打下基础<sup>[18-20]</sup>。这些论文还告诉人们,光子的动量反比于波长,等于普朗克能量量子除以光速,从而一举完成了光子说。

他的第1篇文章已经包含了前面已介绍过的吸收、自发辐射、受激辐射3种过程和普朗克公式的新推导<sup>[18]</sup>。在第2篇文章中,爱因斯坦通过对在辐射中处于平衡态的原子或分子的布朗运动的分析,论证了辐射过程是一个定向的过程,从而确立了光子是具有动量的微观粒子,而且还特别指出,自发辐射发出的光子的方向是随机的<sup>[19]</sup>。爱因斯坦提出的这种随机性后来成为量子力学的核心概念。

1916年8月24日,爱因斯坦致贝索的信表明,第2篇文章发表在纪念克莱纳(A. Kleiner, 苏黎世大学教授,曾负责审核爱因斯坦的博士论文)的一个期刊特辑上。而发表于1917年的第3篇文章其实完全是第2篇在另一期刊的重印。然而爱因斯坦的传记作者、著名理论物理学家派斯(A. Pais)似乎没有注意到第2篇和第3篇是完全一样的,而把理论的完成定位在1917年<sup>[4]</sup>。而最近讨论爱因斯坦对量子论的贡献的理论物理学家斯通(A. D. Stone)似乎不知道1916年已经发表的第2篇文章的存在<sup>[21]</sup>。很多人不但不知道第2篇文章的存在,而且根据第3篇文章,以为量子电磁辐射理论是1917年创立或者发表的。所以笔者在这里澄清,爱因斯坦的量子电磁辐射理论是在1916年发表的。这3篇文章碰巧每篇都发表于某期刊的第18卷,这可能也是人们混淆不清的原因之一。

除了激光,爱因斯坦的量子电磁辐射理论还与今天很多科学研究直接相关,比如获得2014年诺贝尔物理学奖的研究<sup>[8]</sup>。

那么,是什么驱使爱因斯坦在1916年回到量子论研究的?

在1916年6月预言引力波的论文中,计算了引力波引起的能量损失后,爱因斯坦写道:“由于电子在原子内部的运动,原子将不仅辐射电磁能,还要

辐射引力能,即使很小。因为这事实上不大可能是正确的,似乎量子论不但要改变麦克斯韦电动力学,还要改变新引力理论。”<sup>[2]</sup>派斯猜测,可能是这个问题激励爱因斯坦几个月后作出他的量子电磁辐射理论<sup>[4]</sup>。

量子力学要到1925年才创立。1916年,量子论还处于早期量子论阶段。对于原子中的电子,人们使用玻尔的轨道概念——电子在轨道上是稳定的,只有在不同轨道之间跃迁时,才会有电磁辐射。这样可以解决经典电磁理论预言的电子轨道会不断缩小的困难。爱因斯坦1916年这篇引力波文章中这段话的意思是,引力辐射的情况也是类似的,也应该受到量子论的限制。事实上,用1925年开始发展出的量子力学可以算出,放出引力辐射的原子跃迁的几率是放出电磁辐射即光子的几率的10~50倍。另一方面,我们至今还没有一个理想的引力场量子化的理论。

不过,派斯似乎没有注意到,爱因斯坦的引力波论文是基于他1916年6月22日在普鲁士科学院的报告,而量子电磁辐射理论的工作紧接着引力波工作,第1篇文章1916年7月17日就被德国物理学会会刊编辑部收到,第2篇文章在8月份也已经完成。所以,爱因斯坦是很快作出了量子电磁辐射理论。

而斯通注意到,索末菲1915年12月曾寄给爱因斯坦他的关于他对玻尔模型的改进,将圆轨道推广到椭圆,其中用到狭义相对论,解释了氢原子精细结构<sup>[22]</sup>。索末菲问爱因斯坦广义相对论会不会影响他的结果。笔者查到,1915年12月9日,在前面引用过的给索末菲的信的开头,爱因斯坦写道:“广义相对论不大会对你有帮助,因为对这些问题,实际结果与狭义相对论一致。”<sup>[11]</sup>

1916年2月8日,在给索末菲的信上,爱因斯坦说:“你的信让我很高兴,你关于谱线理论的介绍让我着迷。”<sup>[11]</sup>这是在广义相对论的综述完成之前,因为1916年2月28日爱因斯坦致信维恩(W. Wien):“我正在完善广义相对论的全面发展。文章大概2个月后写好。”<sup>[11]</sup>

1916年8月3日,在给索末菲的信上,爱因斯坦说:“你的谱线分析是我在物理上的最佳体验之一。正是通过它们,我相信了玻尔的想法。”<sup>[11]</sup>这已经是在第1篇量子电磁辐射论文发表之后。

因此可以认为,1916年爱因斯坦回到量子论,建立了量子电磁辐射理论,首先是索末菲的来信激发的,即使不排除后来引力波工作起了进一步的激励作用。关键是,索末菲的工作让爱因斯坦接受了玻尔模型,这是他作出量子电磁辐射理论的基础。至于索末菲关于广义相对论效应的问题有没有影响爱因斯坦后来在引力波论文里对量子论的评论,我们还无从得知。

爱因斯坦在1916年3月和6月都发表了广义相对论的论文,所以在1916年的这段时间,爱因斯坦在广义相对论和量子论2方面都做了工作,而不是如斯通所说:“1916年2月爱因斯坦已经将广义相对论放在一边,去追赶原子的量子论。”<sup>[21]</sup>可以想象,完成引力波论文后的2个月里,爱因斯坦的主要精力是在量子论,因为2篇量子辐射论文分别在1916年7月和8月完成。但是在这之前,收到索末菲的论文后,他开始关注量子论了,虽然那时他的主要精力放在广义相对论。

## 5 爱因斯坦这段时期的其它一些信件

笔者还发现下面这些爱因斯坦在这段时期的信件。

1916年6月17日,在给洛伦兹的信中,爱因斯坦写道:“我自己在研究场方程一级近似下的积分,并检查引力波。结果有部分令人惊讶。有3种波,虽然只有一种传递能量。我还没有全部完成材料系统辐射理论的研究。但是已清楚的是:量子难题也影响新引力理论,正如影响麦克斯韦理论。”<sup>[11]</sup>这个难题显然就是爱因斯坦在引力波论文中提到的问题。爱因斯坦这封信是在他1916年6月22日在普鲁士科学院报告他的引力波工作之前。

1916年7月19日,在给朋友赞格(H. Zangger)的信中,爱因斯坦写道:

“我研究了引力波,还有最近的光辐射和吸收的量子理论,以及飞行中抬升的原因。”<sup>[22]</sup>这说明,爱因斯坦的量子电磁辐射理论紧随其引力波工作之后。

1916年8月11日,在给贝索的信中,爱因斯坦写道:“我得到关于辐射吸收和发射的一个精彩想法。一个惊人简单的推导,普朗克公式的正确推导,完全是量子的,我正在写文章。”<sup>[14]</sup>这里的文章是第2篇。

1916年8月24日,在给贝索的信中,爱因斯坦写道:“引力波和普朗克公式的论文在你那里长时间了。你会喜欢后者。推导方法完全是量子的,得到了普朗克公式。与此相联系的是,可以令人信服地证明,发射和吸收的基本过程是定向过程。只需要对辐射场中的分子的(布朗)运动进行分析。这个分析中没有考虑边界条件。正在苏黎世物理学会会刊纪念克莱纳的那一期里发表。”<sup>[14]</sup>这说明当时爱因斯坦紧随引力波论文,已经完成关于量子电磁辐射的两篇文章。与上封信比较,可见第2篇文章是在11日和24日之间完成。

1916年9月6日,在给贝索的信

中,爱因斯坦又写道:“(还没有包含在寄给你的论文里的)结果是,每次辐射和物质之间传递基本能量时,动量 $h\nu/c$ 传给分子。因此每个这样的基本过程是一种完全定向的过程。这样光量子就确定了。”<sup>[14]</sup>这说明爱因斯坦这时已经解决了光子动量问题。这个内容发表在量子电磁辐射的第2篇文章中。当时寄给贝索的文章只是第1篇。

1916年12月6日之后,在给贝索的信中,爱因斯坦写道:“总的来说,引力和电磁力之间的联系还很肤浅。我也难以相信,上帝不嫌麻烦地引进两个根本不同的空间状态。”<sup>[22]</sup>这说明爱因斯坦在思考引力与电磁力的关系。

1917年3月9日,在给贝索的信中,爱因斯坦写道:“我寄给你的量子论文使我重新回到辐射能的空间量子性观点。”<sup>[14]</sup>这是指第2篇文章。

引力波论文中的那段评论和这些信件表明,爱因斯坦在研究引力波后,认为也要考虑量子论对引力辐射的限制,他也开始思考引力和电磁力是否可以统一。引力和电磁力的统一问题耗费了爱因斯坦后半生很多精力,至今还

是没有解决的难题。爱因斯坦后来也希望这能够解决他所认为的量子力学的不完备性。

爱因斯坦大概没有想到,100年后,量子电磁辐射成了测量引力波的关键工具。

## 6 结论

1916年,爱因斯坦预测了引力波,还提出量子电磁辐射理论、完善光子论,包括受激辐射的概念,为未来的激光的发明打下了理论基础。而100年后,他预言的引力波被人们利用他的量子电磁辐射理论所导致的激光所发现。而且,引力波探测技术也与他的光子概念和布朗运动理论密切相关。LIGO探测到引力波不但是对爱因斯坦的广义相对论和引力波理论的百年纪念,也是对他的量子电磁辐射理论的百年纪念。这是爱因斯坦的独特的幸运。

**致谢** LIGO合作组成员胡一鸣博士对本文第2节内容提出修改建议。

## 参考文献

- [1] LIGO Scientific collaboration and the virgo collaboration. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [2] LIGO Scientific collaboration and the virgo collaboration. The advanced LIGO detectors in the era of first discoveries [J]. <http://arxiv.org/abs/1602.03838>.
- [3] Einstein A. The field equations of gravity[J]. Sitzungsber K Preuss Akad Wiss, 1915(2): 844-847.
- [4] Pais A. Subtle is the Lord[M]. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- [5] Einstein A. Approximate integration of field equations of gravitation [J]. Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss., 1916(1): 688-696.
- [6] LIGO. <https://www.ligo.caltech.edu/>
- [7] Brilliet A, Hall J L. Improved laser test of the isotropy of space[J]. Physical Review Letters, 1979, 42: 549-553.
- [8] 施郁. 庆祝2015国际光之年、纪念早期量子论——从2014年诺贝尔物理学奖与化学奖谈起[J]. 现代物理知识, 2015, 27(1): 32-34;
- [9] 施郁. 从引力波谈爱因斯坦的幸运[J]. 自然杂志, 2016, 38(2): 120-124.
- [10] Einstein A. The foundation of the general theory of relativity [J]. Annals of Physics, 1916, 49 (7): 769-822.
- [11] Einstein A. The collected papers of Albert Einstein[M]. Volume 8, Princeton: Princeton University Press, 1998.
- [12] Einstein A. Concerning gravitational waves[J]. Sitzungsber K Preuss Akad Wiss, 1918(1): 154-167.
- [13] Einstein A, Rosen N. On gravitational waves[J]. Journal of The Franklin Institute, 1937, 223: 43-54.
- [14] Kennefick D. Einstein versus Physical Review[J]. Physics Today, 2005, 58(9): 43-48.
- [15] 刘奇星. 爱因斯坦和同行审稿制度的一次冲突[J]. 物理, 2005, 34(7): 487-490.
- [16] Einstein A. Hamilton's principle and general relativity theory[J]. Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss., 1916, (2): 1111-1116.
- [17] Schoen R, Yau S T. Positivity of the total mass of a general space-time[J]. Physical Review Letters, 1979, 43: 1457.
- [18] Einstein A. Emission and absorption of radiation in quantum theory[J]. Verh Deutsch Phys Ges, 1916, 18: 318-323.
- [19] Einstein A. On The quantum theory of radiation [J]. Mitt Phys Ges Zurich, 1916, 18: 47-62.
- [20] Einstein A. On The quantum theory of radiation [J]. Phys Z, 1917, 18: 121-128.
- [21] Stone A D. Einstein and The Quantum[M]. Princeton: Princeton University Press, 2013.
- [22] Einstein A. The collected papers of Albert Einstein[M]. Volume 10, Princeton: Princeton University Press, 2006.

## Einstein in 1996: from gravitational waves to quantum theory of electromagnetic radiation

Yu Shi

Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

**Abstract** In 1915, Einstein predicted gravitational waves, presented the quantum theory of electromagnetic radiation and completed his concept of photon. In one hundred years, gravitational waves were directly detected through the interference of lasers, which are exactly based on Einstein's quantum theory of electromagnetic radiation. The techniques of gravitational wave detection are also related to Einstein's concept of photons and theory of Brownian motion. The first direct detection of gravitational waves was a commemoration of the centenaries of both contributions of Einstein, one being general relativity and prediction of gravitational waves, the other being quantum theory of radiation. After a review of the "Einsteinian elements" in gravitational detection techniques, that is, the lasers, the photons and the thermal noises, we survey Einstein's research activities in 1916 and look for the historic connections between Einstein's work on gravitational waves and his work on quantum theory of electromagnetic waves, by analyzing the first-hand materials, especially the correspondence of Einstein during that period.

**Keywords** Einstein; gravitational wave; quantum theory of electromagnetic radiation

(编辑 祝叶华)