

时空的乐章——引力波

百年漫谈(四)

卢昌海

七、拯救大兵爱因斯坦

我们迄今介绍的引力波研究都是近似研究,基本理论框架未超出爱因斯坦1918年的原始论文《论引力波》(具体参阅第四、五两节)。跟某些其他领域注重严格解不同,引力波由于只在天文体系,且往往是相当极端的天文体系中才有被探测到的希望,而那樣的体系具有高度的复杂性,无法满足严格解所要求的苛刻条件,因此引力波的严格解在很长的时间里对物理学家来说是个冷门。

不过例外总是有的。1936年,已落户普林斯顿高等研究院的爱因斯坦就亲自展开了对引力波严格解的研究。

那项研究是跟他的助手、美国物理学家罗森(N. Rosen)合作进行的^①,其最出名的地方不在于研究本身的重要性,而是发表过程的戏剧性。

那项研究完成后,爱因斯坦和罗森将之写成一篇题为《引力波存在吗?》(*Do Gravitational Waves Exist?*)的论文寄给了美国学术刊物《物理评论》(*Physical Review*),后者于6月1日收到论文。论文中写了什么呢?爱因斯坦在给德国物理学家玻恩(M. Born)的一封信中作了披露:

与一位年轻合作者一同,我得到了一个有趣的结果,那就是引力波尽管在初级近似下被确信过,其实却并不存在。这显示出非线性的广义相对论波动场方程所能告诉——或者毋宁说限制——我们的比我们迄今以为的还要多。

这是一个相当出人意料的结果。尽管引力波的存在远非当时的实验或观测所能验证,但从我们前几节的介绍中不难看出,它不仅“在初级近似下被确信过”,而且称得上是引力的非瞬时传播及广义相对论时空描述的必然推论。而现在,爱因斯坦这位广义相对论的奠基者兼引力波先驱居然亲自宣称引力波“其实却并不存在”,实在很出人意料。

爱因斯坦为何会得出如此出人意料的结果呢?很不幸,如今只能通过间接资料来推测了,因为那篇论文的原始版本,如我们即将看到的并未发表,且很可能已不复存在。但不幸中的大幸是:从爱因斯坦的书信、合作者的回忆,以及后续论文等诸多资料中可以作出相当有把握的“复盘”。原来,爱因斯坦和罗森所研究的严格解是平面引力波的严格解,但在求解过程中遇到了所谓的“奇异性”(singularity),即度规张量的某些分量发散或无法确定。更糟糕的是,“奇异性”出现的地方是真空,从而得不到任何物理缘由的支持。爱因斯坦和罗森据此断定平面引力波的严格解不存在,并继而认为引力波不存在^②。

爱因斯坦和罗森的那篇论文并非爱因斯坦初次与《物理评论》打交道。自20世纪30年代起,随着欧洲政治局势的日益严峻,爱因斯坦在论文发表上渐渐“脱欧入美”,《物理评论》则差不多是美国刊物中他的首选,他此前不久完成的两项重要研究——即著名的“EPR佯谬”(EPR paradox)和“爱因斯坦-罗森桥”(Einstein-Rosen bridge)——都是发表在

《物理评论》上的(均发表于1935年)。从这个意义上讲,爱因斯坦可算是《物理评论》的老朋友了。

然而此次投稿却让老朋友有些“莫名惊诧”。

论文寄出后,隔了两个月左右才有消息,却并非情理之中的发表消息,而是《物理评论》编辑泰特(J. Tate)7月23日所撰的一封意料之外的来信:

亲爱的爱因斯坦教授:

我不揣冒昧地将您和罗森博士关于引力波的论文连同审稿人的评论一同寄回给您。在发表您的论文之前,我希望看到您对审稿人的各种评论和批评的回应。

您的忠实的约翰·泰特

后来的研究显示,这种对今天的学者来说习以为常的来信很可能是爱因斯坦生平第一次遭遇学术刊物的“审稿人制度”(referee policy)——也称为“同行评议制度”(peer-review policy)。在那之前,哪怕在他还是一名专利局的小职员时,也从未遭遇过论文被审稿的事情,而在他成名之后,发表论文更是成了刊物的殊荣,自然更不曾遭遇审稿。就连此前发表的有关“EPR 佯谬”和“爱因斯坦-罗森桥”的论文,虽也是寄给《物理评论》的,且编辑也是泰特,却也并未遭遇审稿。在这种情形下,泰特的来信显然不是爱因斯坦“喜闻乐见”的,他于7月27日作出了如下回复:

亲爱的先生:

我们(罗森先生和我)将手稿寄给你是意在发表,而不是授权你在付印之前呈视给专家。我看不出有什么理由回应你那匿名专家的——且还是错误的——评论。有鉴于此事,我宁愿将论文发表到别处。

此致

从称谓的冷淡,语气的生硬,署名的缺失,以及将论文“发表到别处”的决定来看,爱因斯坦显然生气了,后果也很严重:他从此再没给《物理评论》投过论文^③。失去爱因斯坦的投稿大概是“审稿人制

度”在推行过程中,单一刊物付出过的最大代价。

从《物理评论》撤稿后,爱因斯坦将论文转寄给了《富兰克林研究所杂志》(*Journal of the Franklin Institute*),后者当然毫无悬念地接受了论文。不过在论文付印之前,又一件意料之外的事情发生了。

在爱因斯坦和罗森的引力波研究完成后,罗森接受了一个由爱因斯坦推荐的基辅大学的临时教职,赴苏联任了职。接替罗森成为爱因斯坦助手的是波兰物理学家英菲尔德(L. Infeld)^④。在爱因斯坦的主要合作者中,英菲尔德是唯一写过回忆录的,他的回忆录《探索:我的自传》(*Quest: An Autobiography*)是有关那一时期爱因斯坦生活和工作的重要资料。据英菲尔德回忆,当他得知爱因斯坦证明了引力波并不存在时,起初不无吃惊和怀疑,然而经过爱因斯坦的解说,他不仅“皈依”了爱因斯坦的结论,还“脑洞大开”地提出了自己的论证方法。

另一方面,英菲尔德在普林斯顿结交的朋友之中有一位刚从加州理工学院结束学术休假回到普林斯顿的相对论专家,名叫罗伯逊(H. Robertson)。罗伯逊比英菲尔德年轻五岁,在相对论领域却资深得多,是相对论宇宙学上著名的“罗伯逊——沃尔克度规”(Robertson-Walker metric)的提出者之一^⑤。这两人一人跟随爱因斯坦做研究,一人在爱因斯坦开辟的领域里工作,自然很快谈起了爱因斯坦和罗森的引力波研究。但与英菲尔德的“皈依”不同,罗伯逊对这一研究表示了高度怀疑。英菲尔德于是就介绍了自己的论证方法,结果却被罗伯逊推翻。

铩羽而归的英菲尔德将此事告知了爱因斯坦。但有意思的是,爱因斯坦非但没替他出头,反而表示前一天晚上他在自己的证明中也发现了错误(可惜英菲尔德在记述此事时未提及爱因斯坦发现的是什么错误)。两人的证明都被发现错误,引力波不存在的结论自然就不得不重新斟酌了。但发现错误不等于订正错误,后者还需进一步的工作。正确的结论是什么呢?爱因斯坦一时尚无头绪。



罗伯逊(1903~1961)

不巧的是,爱因斯坦当时已安排了一个报告,介绍他对引力波不存在的论证。临时取消已来不及了,怎么办呢?爱因斯坦便既来之,则安之,干脆转而介绍了自己论证中的错误。在结束报告时,爱因斯坦表示:“如果你们问我引力波到底有没有,我必须回答说我不知道。但这是一个高度有趣的问题。”

科学史上有各种各样的故事,最亮丽的无疑是成功的故事,但更能反映科学真谛的,其实往往是那些诚实地对待错误,坦然宣布“我不知道”的故事。因为成功只是历史,诚实地对待错误,坦然宣布“我不知道”才是未来所系。

发现错误后的爱因斯坦是如何订正错误的呢?英菲尔德的回忆并未谈及,不过罗森在1955年所作的一次题为“引力波”(Gravitational Waves)的学术报告中给出了说明。这一说明显示罗伯逊在其中起了很直接的作用,在他的提示下,爱因斯坦意识到了他和罗森发现的带奇异性的平面波解可以诠释为柱面引力波的严格解。在那样的诠释下,原本出现在真空中,从而得不到物理缘由支持的奇异性转移到了柱面的轴心上,也就是波源物质的分布之处,那样的奇异性就像人们熟悉的点电荷的奇异性一样,乃是物质分布——确切地说是物质分布的理想化——造成的,从而是有物理缘由并且意料之中的。

1936年11月13日,爱因斯坦致信《富兰克林研究所杂志》表示论文需作大幅修改。1937年初,修改后的论文正式发表,标题由《引力波存在吗?》这一不怀好意的设问改为了“论引力波”(On Gravitational Waves),与爱因斯坦1918年那篇奠定引力波四极辐射公式的论文同名,论文中的柱面引力波严格解后来被称为了“爱因斯坦-罗森度规”(Einstein-Rosen metric)。在论文的末尾,爱因斯坦向罗伯逊表示了感谢:“……我们原先曾错误地诠释了我们的公式结果。我要感谢我的同事罗伯逊教授友好地帮助我澄清原先的错误。”^⑥

就这样,在罗伯逊的帮助下,爱因斯坦订正了一个颠覆性的错误,这个错误若被发表,他那“引力波先驱”的身份不免会有所失色。当然,假如英菲尔德的回忆可靠,那么爱因斯坦其实是比英菲尔德从罗伯逊那里得知论文错误更早,就独立发现了错误,而错误既被发现,则哪怕没有罗伯逊的帮助,爱因斯坦也有可能自行纠正。退一步说,哪怕爱因斯坦意识不到他和罗森的平面波解可以诠释为柱面波解,起码也该不会发表“引力波不存在”这一错误结论。从这个意义上讲,真正从错误边缘上“拯救”了爱因斯坦的其实是《物理评论》的那位审稿人,若没有此人造成的“耽误”,爱因斯坦和罗森的论文早就在《物理评论》上发表了。

那位审稿人究竟是谁呢?这一问题引起了我们在第五节中提到过的《爱因斯坦全集》的编者之一、美国阿肯色大学的物理学家坎尼菲克的兴趣,于20世纪90年代中期展开了追根溯源的查索。

坎尼菲克首先前往最显而易见的目标《物理评论》,查询当年的稿件处理记录,可惜却被告知1938年之前的记录——包括编辑泰特的个人资料——已经缺失。他于是又到罗伯逊的母校兼主要工作地加州理工学院查询罗伯逊档案。之所以要查罗伯逊档案,是因为1936年前后美国的广义相对论专家并不多,其中能快速帮助爱因斯坦订正错误的罗

伯逊本人自然有很大的“嫌疑”。

坎尼菲克的判断看来是正确的,在罗伯逊档案中他有了很大收获,发现了罗伯逊1937年2月18日写给物理评论编辑泰特的一封信,写那封信时,爱因斯坦和罗森修改后的论文已经发表,罗伯逊向泰特介绍了与之有关的动态:

……论文被寄往了另一份杂志(连你的审稿人指出过的一两处数值错误都未订正),在校样寄回时则作了彻底修改,因为在此期间我已使他确信论文所证明的跟他以为的相反。

你也许有兴趣看看1937年1月的《富兰克林研究所杂志》第43页的论文,并跟你审稿人的批评意见的结论作个比较。

这封信虽然只是以旁观者的语气提及了审稿人,但明显表明罗伯逊知道审稿人报告的内容。由于《物理评论》的审稿是匿名且具保密性的,能知道审稿人报告的内容显示罗伯逊极有可能正是审稿人。

但罗伯逊的“嫌疑”虽显著加大,坎尼菲克的线索到这里却也中断了。

时光又过了10年左右,2005年,科学界迎来了盛大的“爱因斯坦年”(因为是爱因斯坦逝世50周年,狭义相对论问世100周年,广义相对论问世90周年的共同纪念)。巧得很,坎尼菲克也迎来了新线索:《物理评论》当时的编辑布卢姆(M. Blume)发现了原以为缺失了的二十世纪三四十年代《物理评论》的稿件处理记录。那些记录显示,爱因斯坦与罗森的引力波论文于1936年6月1日收到,7月6日寄给审稿人,7月17日收到审稿人意见,7月23日将审稿人意见转给作者。而最重要的是,在审稿人一

栏中,赫然写着罗伯逊的大名!如果说此前发现的罗伯逊给泰特的信还只能算分析证据,那么审稿人一栏中的罗伯逊大名可就有铁证意味了——虽然理论上还存在重名的可能,但审稿人精通广义相对论这一额外条件足以排除重名。

被这一新证据所鼓舞,坎尼菲克再次来到加州理工学院查询罗伯逊档案,结果发现这10年间罗伯逊档案也有了新的汇集,其中有两封罗伯逊与泰特的通信跟《物理评论》的稿件处理记录同样有力地显示了罗伯逊的审稿人身份。那两封信都写于1936年7月这个关键的月份,其中一封是7月14日罗伯逊给泰特的,日期正好处于《物理评论》将爱因斯坦和罗森的论文寄给审稿人的7月6日与收到审稿人意见的7月17日之间。罗伯逊在信中这样写道:

……这是件大工作!如果爱因斯坦和罗森能确立他们的结论,这将构成对广义相对论最重要的批评。但我已对全文作了仔细查验(主要是为我自己的灵魂!),我完全看不出他们确立了那样的结论。……我只能建议你将自己的批评呈给他们考虑。……

另一封则是泰特7月23日给罗伯逊的,日期跟泰特将审稿人报告寄给爱因斯坦为同一天。泰特在信中明确写道:

非常感谢你对爱因斯坦和罗森论文的仔细阅读。我已将你的详细评论寄给了爱因斯坦教授……

这两封信与《物理评论》的稿件处理记录一同构成了罗伯逊审稿人身份的完美证据,坎尼菲克将之写成文章发表在了2005年9月的《今日物理》

1936							
NAME	DATE IN	REFeree	DATE IN	TO AUTHOR	TO N.Y.	ISSUE	RE-JECTED
Chalmers	7/24	Thompson 6/16	6/18				6/12
Einstein & Rosen	6/1	Robertson 7/6	7/17	7/23			
U. S. ...	7/6		7/6	7/7	7/14	MAY 15, 1936	
Robertson, Einstein	7/23		7/6	7/7	7/17/36	JUNE 15, 1936	

《物理评论》的稿件处理记录

(*Physics Today*)杂志上,为自己的查索画上了圆满句号^⑦。

尘封了大半个世纪的历史至此真相大白,罗伯逊戏剧性地接连两次帮助了爱因斯坦,不仅保住了后者“引力波先驱”的成色,且还增添了一个以他名字命名的“爱因斯坦-罗森度规”(Einstein-Rosenmetric)。当然,有没有这些东西爱因斯坦都毫无疑问是20世纪最伟大的物理学家,不过在广义相对论的应用领域,确切地说是理论上的应用领域中,爱因斯坦的“战绩”相对逊色,几个深具潜力的新方向被他错过。比如后来炙手可热的黑洞被他因坐标奇异性而判定为不存在;比如作为近似定律几乎是广义相对论必然推论的哈勃定律(Hubble's law)被他因青睐静态宇宙而失之交臂^⑧;比如目前已成重要观测手段的引力透镜(gravitational lensing)被他视为过于细微而不可观测。在这种近乎“全军尽墨”的背景下,对引力波的预言可谓是力挽狂澜的重大“战绩”,而他在这一方向上避免颠覆性错误的罗伯逊则起码在此类应用领域中算得上是“拯救大兵爱因斯坦”的人物。

在结束本节之前,再补充一些花絮。

在罗伯逊档案中,还有一封罗伯逊给泰特的信也值得一提,那封信写于泰特将罗伯逊的审稿人意见转给爱因斯坦之后,罗伯逊在信中建议,对于像爱因斯坦那样的物理学家,“如果他坚持,他的声音被听到的权利应高于任何一位审稿人的否决”。在整个故事中,没有第二句话比这句话更让我对罗伯逊生出敬意,他对爱因斯坦的尊敬而不盲从,直言而不失谦逊,与时常能遇到的小人物因找到大人物破绽而流露的轻佻自得迥然不同。不仅如此,这句话还显示出罗伯逊在科学的敏锐之外还有科学史视野,他的这一建议其实直到今天也不无借鉴意义。审稿人制度作为保障学术刊物质量的系统制度,在科学已成庞大产业、作者队伍鱼龙混杂的今天,其重要性是显而易见的。但另一方面,对于足

够知名的科学家,记录他们的错误本身就深具科学史价值,从这个角度讲,早年很多欧洲刊物——比如德国刊物——的没有审稿人制度也并非全无益处,爱因斯坦研究广义相对论期间的很多“半成品”也许正是因为没有审稿人制度才得以留存,如今都是珍贵的史料。

不过罗伯逊的建议在当时却为时已晚,因为爱因斯坦虽有随和的一面,却同时也是个有脾气的人,直接就作出了永久放弃《物理评论》的决定,而不曾留出任何回旋余地。当然,爱因斯坦始终也不知道“友好地帮助”他订正错误的“我的同事罗伯逊教授”与审稿人是同一人,否则或许能稍稍改观对审稿人制度的恶感。罗伯逊的审稿人意见长达10页,其中分析了他替爱因斯坦订正的错误,可惜爱因斯坦盛怒之下未予细察就判定其为“且还是错误的”,从而失去了更早订正错误的可能。

关于爱因斯坦和罗森修改后的论文也有一些可以补充的。如前所述,那篇论文给出了柱面引力波的严格解。不过,这个如今被称为“爱因斯坦-罗森度规”的严格解其实早在1925年就被奥地利物理学家贝克(G. Beck)所发现,却不幸被忽略了。这种忽略在一定程度上是时代使然,因为同一时期兴起的量子力学的风头显著盖过了广义相对论。从那时起的数十年时间里,广义相对论作为研究领域是相当冷清的,除爱因斯坦等少数物理学家外,只有一些数学家仍在从事广义相对论研究,而无论爱因斯坦还是数学家对物理文献的涉猎都比较粗疏,从而造成了某些非著名物理学家的的工作被忽略。

在本节的最后,还有一个遗留问题值得交待,那就是爱因斯坦和罗森将原先的平面波解诠释为了柱面波解,但他们原先研究的平面引力波到底存不存在呢?在这个遗留问题上继续追索的是罗森。由于远赴苏联,罗森没有参与爱因斯坦、英菲尔德和罗伯逊之间的交流,他是先从报纸上,后来从杂志上才得知论文被修改的。罗森对全盘放弃

他和爱因斯坦原先的结论并不完全认同,于1937年在苏联独立发表了一篇论文,提出平面引力波不存在。那篇论文被认为很可能非常接近爱因斯坦和罗森论文的原始版本,两者的实质区别也许仅仅是将原先过于宏大的“引力波不存在”的结论缩减为了论文直接针对的平面引力波的不存在,理由则依然是求解过程中遇到的奇异性。不过罗森的这一论文后来被英国物理学家邦迪(H. Bondi)、皮拉尼(F. Pirani)、美籍英裔物理学家罗宾逊(I. Robinson)等人证明为是错误的,因为罗森遇到的奇异性乃是所谓的坐标奇异性,而非具有实质意义的物理奇异性,其所显示的只是坐标系的缺陷,而非平面引力波的不存在^⑧。那几位物理学家并且直接证明了广义相对论允许平面引力波,从而解决了遗留问题。

以上就是我们故事的全部,也基本上是爱因斯坦本人研究引力波的尾声。在那之后,引力波研究作为我们刚才提到的广义相对论冷清的一部分,一度陷入了沉寂。这一切直到1955年才开始有所改变,那一年爱因斯坦去世了,对他的纪念以及对狭义相对论问世50周年和广义相对论问世40周年的研讨逐渐使一小部分物理学家重新关注起了广义相对论。

① 除早年与老同学格罗斯曼(M. Grossmann)的合作外,爱因斯坦本质上是“个体户”,合作者或学生中没有特别出色的,略有名头的都是因跟他合作而出的名,独立研究的水平则一般。罗森就是其中之一,其最出名的工作是“EPR佯谬”(EPR paradox),其次是“爱因斯坦-罗森桥”(Einstein-Rosen bridge),再其次就是这项引力波严格解的研究,全都是“以爱因斯坦同志为核心”的。

② 原则上讲,哪怕平面引力波的严格解不存在,也并不等同于引力波不存在。爱因斯坦和罗森为何会作出如此普遍的断言?由于原稿很可能已不复存在,答案也就很可能无法查考了。不过从前面引述的爱因斯坦给玻恩的信中或许可以作出一种猜测,那就是他们从这一特例中得出了“非线性的广义相对论波动场方程所能告诉——或者毋宁说限制——我们的比我们迄今以为的还要多”的结论,并进而认为在其他情形下这种“比我们迄今以

为的还要多”的“限制”也会导致引力波的不存在。

③ 唯一的一次算不上例外的例外是1953年发表的一篇并非论文的简短反驳,驳的是针对他“统一场论”(Unified Field Theory)的一篇批评。

④ 跟罗森类似,英菲尔德也主要是因跟爱因斯坦合作而出的名,其中最出名的是跟爱因斯坦合撰了《物理学的进化》(*The Evolution of Physics*)一书。

⑤ “罗伯逊-沃尔克度规”的提出者除罗伯逊及英国数学家沃尔克(A. Walker)外,还有俄国物理学家弗里德曼(A. Friedmann)和比利时天文学家勒梅特(G. Lemaître),因此名称也特别繁多,几乎涵盖了这四人名字的任意组合。

⑥ 不过,尽管修改后的论文放弃了“引力波不存在”的错误结论,爱因斯坦对引力波的疑虑却依然以相对隐晦的方式体现了出来,比如他认真考虑了引力波不造成能量损失的可能性,为此不惜引进超前解。爱因斯坦的这种疑虑对罗森、英菲尔德及他们的学生产生了长时间的影响。

⑦ 顺便说一下,《物理评论》的稿件处理记录还显示,爱因斯坦此前不久发表的有关“EPR佯谬”和“爱因斯坦-罗森桥”的论文——如前文已提到过的——都是未经审稿就被接受了,由此可见当时的《物理评论》对爱因斯坦并未严格执行审稿人制度。另一方面,引力波论文虽遭审稿,但从收到论文到论文被寄给审稿人之间相隔一个多月看,似乎颇有犹豫。爱因斯坦那两篇未经审稿就被接受的论文其实也是很有争议性的,尤其“EPR佯谬”是跟当时如日中天的量子力学哥本哈根学派对着干的,所有这些论文的编辑都是泰特,他为何放过了那两篇,却对引力波论文另册对待?这其中的原因已很难确知,倘若是因为他判断出了引力波论文更可疑,那眼光无疑是值得赞赏的。

⑧ 虽然当时青睐静态宇宙并不与观测相冲突,但爱因斯坦不曾注意的是,他所青睐的静态宇宙是不稳定的,从而实际上是不可能维持静态的。而静态宇宙一旦被排除,则由哈勃定律所近似描述的膨胀或坍缩宇宙就几乎是广义相对论的必然推论(当然,假定宇宙在大尺度上是均匀和各向同性的)。不过另一方面,爱因斯坦因青睐静态宇宙而引进的宇宙学常数(cosmological constant)后来倒是有了很大的重要性,可谓意外收获。

⑨ 在平面引力波的度规中会出现坐标奇异性其实早在1926年就被英国数学家鲍德温(O. Baldwin)和杰弗里(G. Jeffery)所发现。坐标奇异性是类似于在地球的南北极上经度值不唯一那样的奇异性,是纯粹来自坐标而不具有实质意义的。将坐标奇异性错当成物理奇异性是早期广义相对论研究中的常见错误,前文提到过的黑洞被爱因斯坦因存在坐标奇异性而判定为不存在也是一个例子。