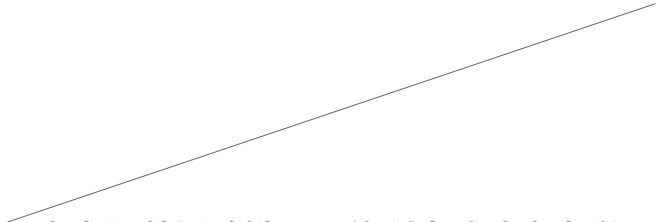


引 言



宇宙深处泛涟漪——从引力波谈宇宙学

2016年2月11日,星期四,上午10点30分,是一个在物理学界值得纪念的日子,美国的激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational wave Observatory, LIGO)与加州理工学院、麻省理工学院等各处的专家们,在华盛顿召开了新闻发布会,向全世界宣布于2015年9月14日首次直接探测到了引力波的消息^[1]。公众称之为GW150914事件,全世界都为之振奋,天文界和物理界的专家们更是激动不已。

为什么GW150914事件如此震动科学界?物理学家们对探测引力波期待已久,而这个事件中探测到的引力波就是来自宇宙深处的时空涟漪。我们说这个涟漪泛起于宇宙的极深、极远处毫不夸张,因为它们发生于13亿年前,来自于距离我们13亿光年之遥的两个“黑洞”的碰撞。

黑洞碰撞、时空涟漪、13亿年前……这些如梦幻、如诗歌一般的语言,突然转化成2016年春天到来之前的第一声惊雷。大概连天国

里的爱因斯坦也会止不住开怀大笑起来吧,没想到啊,人类真的探测到了引力波。那是爱因斯坦在 100 年之前,建立了广义相对论一年后的一个精彩预言!

天地广阔,乾坤永恒;茫茫宇宙,万物之谜,这些对人类好奇心的永恒诱惑,又何止让人类探寻了 100 年!

不过,谈到引力波和黑洞,倒是让笔者回想起了 30 多年前在美国得克萨斯大学奥斯汀分校读博士的日子。我当年博士论文的课题是有关引力波在黑洞附近的散射问题,著名物理学家、引力理论专家约翰·惠勒是我的毕业论文委员会成员之一。记得在当时的一次讨论会上,有人提到何时能探测到引力波的问题时无人作声,只有惠勒笑嘻嘻、信心满满地说了一句“快了”。我当时只知道推导数学公式,对探测引力波的实验一无所知,但惠勒这句“快了”在脑海中却记忆颇深,也从此关心起引力波是否真正存在,以及何时能探测到的问题。

1993 年,传来了两位美国科学家获得诺贝尔物理学奖^[2]的消息。他们便是因为研究双星运动,即两颗双中子星相互围绕着对方公转,而间接证实了引力波的存在。笔者当时便立即想起了惠勒的话,心想:果然“快了”!

2000 年,听说惠勒早年的一个学生,就是和惠勒一起合作《引力》这本书的加州理工学院教授基普·索恩(Kip Thorne, 1940—),几年前启动了一个叫 LIGO 的项目,专为探测引力波。1999 年 10 月的 *Physics Today* 有一篇文章是关于此项目,我看了之后,脑海里又浮现出“快了”这句话。

2007 年,在加利福尼亚州偶然碰到一个原来一起在相对论中心

学习的同学，他在某天文台做天体物理研究。谈及引力波，他也说“快了”，因为 LIGO 将在一年后再次升级，升级完成后就“快了”。

2014 年，又一次传来探测到引力波的消息。

由于普通物体，甚至太阳系产生的引力波都难以探测，所以科学家们便把目光转向浩渺的宇宙。宇宙中存在质量巨大又非常密集的天体，如黑矮星、中子星，或许还有夸克星等。超新星爆发、黑洞碰撞等事件将会产生强大的引力波。此外，在大爆炸初期的暴胀阶段，也可能辐射强大的引力波。

2014 年有人提出哈佛大学设在南极的 BICEP2 探测器探测到了引力波，但这种“探测”指的并不是直接的接收，而是大爆炸初期暴胀阶段发出的“原初引力波”在微波背景辐射图上打上的“印记”。但是，后来证实这是一次误导，是一次由尘埃物质造成的假“印记”^[3]。据索恩所言，至少有一半的观测信号事实上是由星际尘埃导致的，而不是完全由尘埃所致目前还不清楚。

直到 2016 年年初 LIGO 的发布会，才正式宣告人类真正接收到了引力波。当初惠勒的这句“快了”，兑现起来也至少花了 30 多年，爱因斯坦就更不用说，已经整整等待 100 年了！

探测到引力波对基础物理学意义非凡，它再一次为广义相对论的正确性提供了坚实的实验依据。为天体物理和现代宇宙学研究，开启了一扇大门，必将掀起相关领域的研究热潮，或许导致一场革命也说不定。

宇宙学是最古老的学科，也是最现代的学科。从物理的观点来解释宇宙，称为物理宇宙学。物理宇宙学是一门年轻科学。从远古时代开始，人们就对茫茫宇宙充满了猜测和幻想：诗人和文学家们

仰望神秘的天空，用诗歌和故事来表达抱负、抒发情怀；哲学家们哲思深邃、奇想不断；科学家们却要探索宇宙中暗藏的秘密。尽管人类的天文观测历史已经有几千年，但是将我们这个浩瀚宏大、独一无二的宇宙作为一个物理系统来研究，继而形成了一门称之为“宇宙学”的现代学科，却只是近 100 年左右的事情。这个推动力来自理论和实验两个方面：爱因斯坦的广义相对论和哈勃的天文观测结果。

近年来，随着科学技术的进步，物理宇宙学从神话猜想发展到理论模型，至今已经发展成为一门精准的实验科学。由于现代天文观测手段日新月异的发展，宇宙学进入了它的黄金年代，理论发展似乎已经难以跟上大量观测数据积累的速度，各种模型和猜想不断涌现。并且，宇宙学中近十几年来的一系列重大发现对现有物理基础理论也提出了诸多挑战，比如，暗物质和暗能量的研究已经成为现代物理的重要课题。

宇宙学可以说已经有过好几次革命：哥白尼的日心说第一次将人类的宇宙观移到地球之外；哈勃通过大型望远镜确定了数不清的星系；而近代的物理宇宙学则让人类开始思考和研究宇宙的起源。

近代宇宙学到底研究些什么？有哪些具体的重要进展？这个领域的发展实在太快，广大民众可能还知之甚少。即使是在学术界，大多数人对近年来宇宙学的事件也只是知其然，而不知其所以然，存在着很多的迷惑和误解（特别是对大爆炸理论）。有些人认为大爆炸是毫无证据的假说，甚至将其称为“西方宇宙学”。然而这不是事实，科学并无东西之分，尽管我们无法直接验证宇宙的“大爆炸”，也不能断定它就一定是宇宙演化历史的正确描述，但是由于航天实验卫星得

到的大量数据的支持,主流学界的大多数人已经承认和接受了这个理论。作为一名科学工作者,有必要科普现代宇宙学的知识,让广大民众正确认识大爆炸理论,了解其来龙去脉,以及其中存在的疑难问题。

中国是一个古老的文明大国,中国人自古就有谈天说地、思辨宇宙哲学问题的追求和习惯。宇宙到底有多大?宇宙长什么样子?宇宙来自何处?将来如何演变?宇宙是否也有生有死、有开始有结束?牛顿描述的宇宙与现代的宇宙观有何不同?宇宙到底有限无限?无穷大的哲学观点和数学思想给我们的宇宙观造成了哪些佯谬和悖论?这些互相关联的种种宇宙奥秘,无论对有智慧、有思想的知识界,还是对好奇心强、幻想联翩的青少年,都是一种永恒的诱惑。读完这本小书,你会对上面提出的问题有一些基本的认识。更为重要的是,你可能会产生许多自己的想法,对茫茫宇宙,对这个环绕在我们周围的最大、最神秘的未知世界产生浓厚的兴趣。

让我们借助于引力波的阵阵涟漪,走向已经敞开的宇宙学大门。作者将用通俗易懂的语言和深入浅出的例子,带你轻松、愉快地涉足于宇宙学最前沿。

作者首先从太阳系开始,在第一章中介绍了行星、恒星、星系等基本天体物理知识。第二章介绍牛顿的宇宙图景。第三章介绍无穷的概念引起的数学和物理中的佯谬,激发读者对物理理论的哲学思考。第四章则用最少的篇幅让读者认识两个相对论的基本思想。

第五章的目的是使读者更深刻地理解2016年初探测到的引力波。作者从天文学中的距离测量谈起,使读者了解天文学中测量技术中的困难。然后,介绍引力波强度的微弱,进一步将它的各种性质

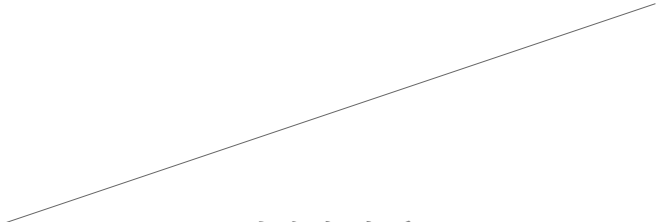
与电磁波相比较,使大家认识到探测引力波的困难和重大意义。第六章则对黑洞的基本物理性质及分类进行探讨。

第七章到第九章,将对现代宇宙学标准模型的基本原理、数学基础、大爆炸理论、重要结论和疑难、暗物质和暗能量、宇宙的未来等有趣的问题略作探讨。第十章简单介绍作为标准模型补充的宇宙早期暴胀理论。

该书的读者定位于文理各个领域的大学本科生和研究生,对天文、数学、物理感兴趣的初高中学生,以及所有爱好科学、渴求了解宇宙历史及本质的广大群众。具有高中数学水平的读者,便可完全读懂书中内容。但考虑到中国学生的数学能力较强、擅长逻辑思维,书中保留了少量的公式和简单推导,以便某些喜欢数学的读者能从中获益,能够对物理内容得到更深刻的理解。一般读者,则可跳过这些公式,不会影响阅读效果。

书中也提到当今宇宙学标准模型存在的许多疑难,启迪人们对宇宙问题的思考。物理学的天空从来就不是晴空万里,20 世纪初的两朵乌云掀起了经典物理的革命,从中诞生了相对论和量子论。如今,近代宇宙学天空中的重重疑云和片片暗点又将带给我们什么呢? 人类期待着下一个爱因斯坦,期待着宇宙学及物理学的新一轮革命。

第一章



去宇宙逍遥

1. 从地球出发

夜空中的满天繁星，总能给人类带来无限的遐想。闪烁星星的背后是什么？这个世界从何而来、向何处去？外星人，或外星生命存在吗？……深不可测的宇宙中似乎暗藏着无穷多的奥秘，这是对人类永恒的诱惑！无论古人还是今人，无论老耄或者年轻，只要你还保持着一颗天真好奇的心，你便会对地球之外的茫茫世界疑问不断并且想要穷根究底。

古人仰望苍穹，不明就里，于是编出了一个一个的神话故事来寄托他们的梦想和遐思。幸好我们生活在现代的文明社会，人类发展至今，已经积累了足够多的天文资料。今天，我们就跟随天文学家，做一个快速又简洁的“宇宙漫游梦”，去宇宙逍遥一下。

所谓“快速又简洁的宇宙旅行”的意思是说，我们不会详细介绍太阳系、银河系以及相关的基本天文知识，想要更详细了解这方面的

读者请阅读参考文献^[4]。我们只是各处浏览,挑几个有趣的、特别的事例做简单说明,主要目的是为了介绍和解释天文学及宇宙学中一些必要的物理概念,为读者理解今后的章节打下一定的基础。

从地球出发后,最快能到达的星球当然是地球的卫星:月亮。孩子们最早的天文知识,一定是开始于白天的太阳和晚上的月亮。然后再进一步,才了解了其他一些常见的星星。古代中国人将离地球最近的肉眼可见的几颗星星命名为“金星、木星、水星、火星、土星”,西方则大多数以罗马神话中的诸神来称呼它们。我们现在知道,天空中最亮的天体:太阳、月亮,还有其他和地球一样绕着太阳转圈的星星一起,组成了“太阳系”大家庭。

在这个大家庭中,最重要的主角是太阳。太阳是一个会发光发热的庞然大物,大到可以放下 100 万个地球。它供给我们必不可少的赖以生存的能量。因为有了太阳,地球上才孕育出生命,低级生命才得以进化为高等智慧的人类,人类又发展了引以为傲的高科技及现代文明。然而,如果没有太阳,或者太阳某一天突然停止发光发热,地球上的这一切都将化为乌有。

地球在太阳系中的确小得可怜,不仅是相对于太阳而言,即使在八个兄弟姐妹中,地球也只是一个很不起眼的“小个头”,(图 1-1-1(a))。不过,尽管大小不一,绕太阳转圈的八大行星和谐共处,各行其“椭圆轨道”,各有其不同的“性情特色”。

水星离太阳最近,也许人们想象它最能探听太阳的秘密,所以把它的英文名字“Mercury”取为神话中的情报商业之神。水星并不是一个适合居住的地方,因为它的表面温度白天可达 425°C ,晚上冷到零下 175°C 。在水星之外,离太阳第二近的是金星。她在黑暗的天