

从流浪地球到宇宙迷航

——2019年诺贝尔物理学奖解读

蔡一夫[†] 鄢盛丰

(中国科学技术大学物理学院天文学系 合肥 230026)

2019-10-25收到

[†] email: yifucai@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200101

From wandering earth to space trek

——Interpretation of the 2019 Nobel Prize in Physics

CAI Yi-Fu[†] YAN Sheng-Feng

(Department of Astronomy, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 2019年诺贝尔物理学奖同时授予了系外行星和宇宙学领域, 诺奖委员会给出的理由是“为我们理解宇宙的演化和地球在宇宙中的位置做出的贡献”。这两个领域在近二三十年内展现出了蓬勃的生机, 系外行星和外星生命的研究到了本世纪伴随先进技术的发展有了爆发式的发现; 进入新世纪后, 宇宙学领域已经获得4次诺贝尔奖, 分别是宇宙背景探测器卫星、宇宙加速膨胀的发现、引力波的探测, 以及此次诺贝尔物理学奖, 它们使当代宇宙学获得了广阔的发展前景。文章就本次诺奖热点话题展开, 对系外行星和宇宙学两大领域做概括性的科普解读。具体介绍马约尔和奎洛兹在系外行星领域的发现, 系外行星的探测手段和发展前景, 以及宇宙学领域的发展简史, 皮布尔斯在该领域的贡献, 和目前宇宙学领域的一大研究热潮, 即原初引力波的探测。作者借此文抛砖引玉, 期待更多年轻学者能加入到天文学和宇宙学的研究中, 在新时代的浪潮下推动该领域获得更重大的突破。

关键词 诺贝尔物理学奖, 系外行星, 宇宙学, 原初引力波

Abstract In 2019 the Nobel Prize in physics was awarded to three scientists for their work on exoplanets and cosmology. The Nobel Committee gave the reason "for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos". With the development of technology in the past twenty-odd years, the study of exoplanets and extra-terrestrial life has seen explosive discoveries. Since the beginning of this new century, four Nobel Prizes in Physics have been awarded for the field of cosmology, namely, for the Cosmic Background Explorer satellite, the discovery of the accelerated expansion of the universe, the detection of gravitational waves, and the one mentioned above, all of which encompass broad prospects for cosmology. This article begins with the recent Nobel Prize in Physics, and provides a general overview of the areas of exoplanets and cosmology. With respect to the former, the discovery and detection methods of Mayor and Queloz as well as future prospects are reviewed. A brief history of the development of cosmology, the contributions of Peebles, and an introduction to one of the current hot topics of cosmology, the detection of primordial gravitational waves, are also presented.

Keywords Nobel Prize in Physics, exoplanets, cosmology, primordial gravitational waves

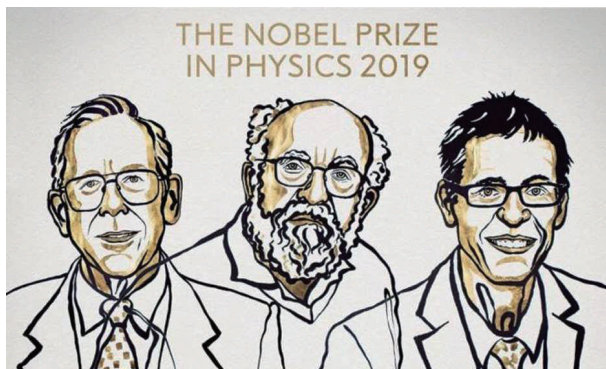


图1 2019年诺贝尔物理学奖获得者：James Peebles(左)、Michel Mayor(中)、Didier Queloz(右)

2019年诺贝尔物理学奖授予天文学家米歇尔·马约尔(Michel Mayor)与迪迪埃·奎洛兹(Didier Queloz)以及理论宇宙学家詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles)(图1),以表彰马约尔和奎洛兹在系外行星发现上做出的突出贡献,还有皮布尔斯从理论角度为现代宇宙学物理体系的建立做出的杰出贡献。以他们三人为代表的科学家们为人类在现代科学的框架下重新认识自身与宇宙的关系提供了重要思路。一方面让人类重新思考我们所生活的这个星球在宇宙中是否是独一无二的,这对探索系外宜居星球和寻找外星生命非常重要;另一方面让我们能够更加精准地把握宇宙演化的历史脉络,能更加清楚地了解宇宙的前世今生。此三人中,实验天文学家马约尔和奎洛兹一起发现了飞马座51b,这是人类发现的第一颗绕着类太阳恒星飞马座51运转的系外行星;而理论宇宙学家皮布尔斯在原初核合成、暗物质、宇宙微波背景辐射(CMB)和大尺度结构形成等现代宇宙学的重要领域做出了关键的理论贡献,是开拓精确宇宙学时代的标志性领军人物。

1 流浪地球篇——系外行星

人类自诞生之日便开始了解我们生活的这个星球,虽然中间经历了一段自认为全宇宙独一无二的时期,但后续的发展让我们也重新认识到了自身的不唯一性,更甚者还有多宇宙假说。行星是指自身不发生核聚变反应发光并围绕恒星运转

的天体。这样的天体有可能适合生命的存在,例如,地球和火星。自19世纪以来便有观测报道声称有发现系外行星的踪迹,但是都未曾被确切证实过,而且有一些由于光度太低,无法辨别是系外行星还是其他恒星的变种,例如低质量的褐矮星。

早在1988年,加拿大天文学家布鲁斯·坎贝尔(Bruce Campbell)等人就曾报道过发现系外行星的疑似证据,他们利用视向速度法发现距离地球大约45光年外的恒星双星系统少卫增八(仙王座 γ , Gamma Cephei)存在一枚绕其公转的行星。然而由于当时的观测技术有限,导致观测数据质量不佳,因此,包括发现者本人在内的大批天文学家都对这一观测结果有所保留。随后,越来越多的天文观测倾向于支持少卫增八拥有行星,并最终于2002年在麦克唐纳天文台的新测量数据支持下,这枚系外行星的存在才获得了天文学界的公认,但也因此使它错过了成为首枚被人类发现的系外行星。

1995年10月6日,日内瓦大学的马约尔和奎洛兹师徒二人宣布首次发现一颗普通主序星(飞马座51)的行星(飞马座51b),该行星距离地球大约51光年。这一发现打开了当代系外行星发现的先河。先进的技术,特别是高分辨率光谱学,大大加速了新系外行星的发现。这些新技术让天文学家可以凭借行星对恒星的引力影响或光度变化来实现间接探测系外行星的存在^[1]。

飞马座51b是被发现的第一颗围绕类似太阳的主序星(飞马座51)公转的系外行星,也是典型的热木星。这一重大发现当年发表在《自然》杂志上,作者们宣称利用径向速度法,通过普罗旺斯天文台的埃洛迪摄谱仪发现了这颗行星。紧接着几天后,美国天文学家们使用加州圣何塞附近的利克天文台的汉密尔顿摄谱仪也证实了这一发现。自其被发现后,许多天文团队通过观测证实了该行星的存在,并获取了大量数据。该行星的轨道周期为4个地球日,其轨道与母星的距离比水星到太阳的距离近得多,轨道速度为136 km/s,质量下限是木星质量的一半。当时,一颗如此靠近其母星的巨行星的存在是与行星形成理论相悖

的，因此被认为是一种反常现象。然而，在此之后又陆陆续续发现了众多的热木星，这使得天文学家开始研究行星的轨道迁移现象并重新审视了之前传统的行星形成理论。

对于地球上的观测者来说，系外行星相较于母恒星一般都非常暗淡，所以它们普遍是很难探测到的。直接通过拍照获得影像的系外行星不仅很大，而且离母星也相对较远，多数还很热，因此它们会发出强烈的红外辐射，这样通过红外辐射和可见光都可以进行观测，然而绝大多数系外行星都只能间接地进行观测，所以这里简单介绍一些非常有用的间接观测方法^[2]。

行星围绕恒星公转时，实际上它们构成了一个双体系统，共同围绕质量中心运转，这样在我们的视线方向上，恒星就有微小的径向速度，即接近和远离地球，那么它的谱线上就会出现微小的多普勒效应而被捕捉到。这种方法被称为径向速度法(图2)，适用于各种性质的恒星，但是无法确知行星的质量，是发现系外行星最有成效的方法。第二种是凌日法，顾名思义，这便是当一颗行星从母星前方经过时，能够观测到母星的亮度有十分微小但可探测的变化。但是当恒星系统中存在多个行星时，行星凌日的周期就会有微小的摄动，这个摄动就可能是其他行星存在的证据，这种方法叫凌日时间变分法。除此之外，恒星可以产生微引力透镜，会放大背景天体的光，如果我们发现探测到的光度会随时间产生异常放大，那么就有可能透镜天体有行星造成的，这种方法叫引力透镜法。如果中心恒星是脉冲星，那么其行星会使脉冲星有轻微的运动，这样通过测量脉冲星脉冲周期的微小变化也可以探测到其行星的存在。目前也有很多在发展的探测方法，不过它们都是伴随着观测技术的进步而发展的。

值得强调的是，我们发现太阳系外存在行星，特别是如果这些行星的轨道恰好位于宜居带并且表面极有可能覆盖液态水的话，那么孕育出生命的概率就会大幅提高，这也大大增强了人类探索外星生命的兴趣。截至目前，已经发现并确认了超过4000颗系外行星，而在这些行星中处于

疑似宜居带的类地行星不在少数(图3)，在这些流浪于太空中的星体上会不会也存在其他生命体，长期被科学家们所关心。那么，不妨回顾一个古老的问题：“在这广袤的宇宙中，我们人类是不是唯一存在的高等智慧生命体呢？”

2 宇宙迷航篇——物理宇宙学

人类对宇宙的近代认知，自文艺复兴后日心说的兴起为起点，紧接着牛顿力学的建立为宇宙学和天文学的发展在理论上打下了坚实的基础。20世纪初以量子力学和广义相对论为标志的物理学革命开始后，以相对论时空观为基础的真正意义上的宇宙学开始被建立起来。1929年美国天文

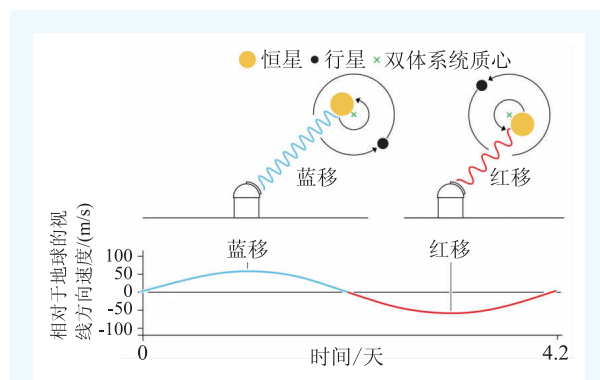


图2 径向速度法示意图。在我们的视线方向上，恒星会轻微的接近和远离地球，它的谱线上就会因出现微小的多普勒效应而被捕捉到(图源：The Royal Swedish Academy of Sciences)

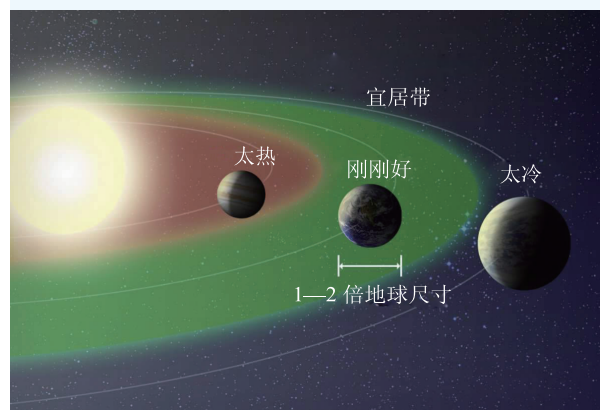


图3 地外行星系统示意图。绿色条带为宜居带，适合生命存在，靠恒星太近就太热，太远则太冷(图源：ScienceDaily.com)

学家哈勃做出了一项令爱因斯坦都为之震惊的里程碑式的发现，那就是他发现了宇宙正在膨胀。这一观测结果直接促使在20世纪40年代伽莫夫等人建立起了热大爆炸宇宙学说，这一理论描述宇宙创生于一个时空奇点的大爆炸，在极早期宇宙中充斥着由微观粒子构成的辐射流体，温度极高且密度极大，这一温度在整个宇宙背景下是统一均匀的，也就是宇宙背景温度^[3, 4]。

宇宙创生之后温度逐渐降低，辐射粒子逐渐冷却，迅速通过聚变反应合成了氢、氦等轻元素的原子核，并在38万年以后通过与电子的复合逐渐形成中性原子。随着膨胀的持续，宇宙温度进一步下降，最早的一批恒星慢慢形成。伴随着这一批恒星的诞生与死亡，宇宙中又逐渐通过超新星爆发等机制合成了碳、氧、硅、铁等元素，同时老一批恒星死亡时抛出的星际尘埃又为新一代恒星的诞生创造了原料，此后，星系结构逐渐出现，直到最后生命的诞生，我们开始思考宇宙^[4]。热大爆炸宇宙演化历史如图4所示。

在皮布尔斯所作出的一系列开创性工作中，最重要的当属在20世纪60年代参与了宇宙微波背景辐射的理论预言及发现。热大爆炸宇宙学说预言宇宙有一个背景温度，即2.73 K的绝对温度，这说明宇宙背景辐射应该具有一个特别的分布规律。正当研究工作进行地如火如荼时，两位无线电科学家找到皮布尔斯小组，说他们发现了一个奇异的信号，后经证实，这正好就是宇宙微波背景辐射的信号^[5]。这两位无线电科学家就是

1978年诺贝尔物理学奖得主彭齐亚斯和威尔逊，这是宇宙微波背景辐射也可以说是宇宙学领域的第一个诺奖。

1989年，美国宇航局(NASA)发射了一颗专门探测CMB的观测卫星，即宇宙背景探测者卫星(COBE)。这一实验在当时以极为完美的精度验证了CMB的黑体谱分布律以及背景温度。不仅如此，在这个辐射背景上人类首次观测到了均匀温度背景中的扰动，即 10^{-5} 的温度涨落。这一微小涨落后来在第二代和第三代CMB实验中，即美国宇航局的威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)和欧洲空间局(ESA)的普朗克(Planck)卫星，得到了极高精度的测量并被完美验证。由于COBE卫星实验所带来的巨大影响，COBE卫星项目的两位首席科学家马瑟和斯穆特被授予2016年诺贝尔物理学奖。这一领域的科技成就和其他宇宙学观测实验一起标志着所谓的“精确宇宙学”的来临。此前有关宇宙学的诺奖都被授予了实验发现，而这次皮布尔斯获奖是理论宇宙学第一次被诺奖垂青，这是对自上世纪中叶以来日益发展成熟的热大爆炸宇宙学以及相关的宇宙学扰动理论为人类呈现新的宇宙观的极大肯定。

到了20世纪90年代，热大爆炸宇宙学说所描述的宇宙热膨胀演化历史已经深入人心，根据当时热大爆炸学说的观点，如果我们的宇宙是由冷物质，例如星际尘埃所主导，则现在的宇宙是在做减速膨胀。为了验证这一点，宇宙学家通过Ia型超新星对其进行了一系列天文观测。然而，

1998年国际上两个超新星观测实验组通过独立观测得出了同样的结论，即今天的宇宙正在加速膨胀。这说明似乎存在某种负压强物质作用于整个宇宙中的星系并将其推开，这一行为是通常的物质所做不到的，这种物质被叫做暗能量。尽管宇宙加速膨胀给物理学界带来了令人极为头疼的问题，但这一

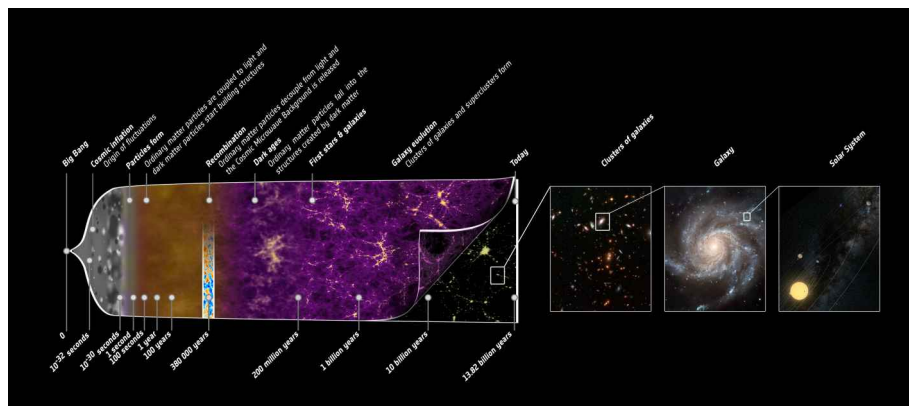


图4 热大爆炸宇宙历史图与地球的定位图(图源: ESA)

颠覆性的科学发现仍然被誉为20世纪自然科学最伟大的发现之一。为此，领导两个超新星观测实验的科学家珀尔马特、里斯和施密特荣获2011年诺贝尔物理学奖。

热大爆炸宇宙学说所遇到的困难并非只有暗能量，事实上另一个棘手的问题早在20世纪30年代就已经开始困扰以兹威基为首的宇宙学家了。到了20世纪70年代，天文学家通过精确测量星系的旋转曲线发现，星系自转速度在较大尺度上并不符合理论预测，在标准理论框架下可见物质的引力太弱，无法维持星系周边正常天体的稳定演化。因此，理论家猜测宇宙中可能存在大量不可见的所谓的暗物质，正是这些暗物质提供了更多的引力来维系宇宙中的星系和星系团的稳定存在。和暗能量类似，暗物质的物理本质至今仍然尚未得知。理论学家相信暗物质似乎是超出粒子物理标准模型的一类新物质，并且这类物质仅仅参与到引力相互作用，而几乎不参与粒子物理中的其他相互作用。此外也有很多疑似观测信号表明，这类物质是以新的粒子态存在于宇宙当中，并对宇宙极早期的大尺度结构形成产生了不可或缺的影响。目前关于暗物质的理论解释仍然众说纷纭，宇宙学家致力于通过各种直接或者间接的实验手段来探测暗物质，例如加速器、地下实验室、空间观测等方法^[6]。

暗物质以及最近发现的暗能量无疑对我们认识宇宙演化有极其重要的影响，这一切都要归结到对大尺度结构形成的认识上。上世纪六七十年代，皮布尔斯将兴趣转向了宇宙的大尺度结构形成，参与研究宇宙的各种物质组分以及宇宙本身的演化，并做出了重要贡献。在此之前宇宙学的研究都比较定性，在此之后宇宙学理论进入了可以通过扰动理论定量研究的精确宇宙学时代，我们可以对宇宙的物质、暗物质等物质组分的演化分布进行计算。不仅如此，皮布尔斯和前苏联苏尼亚耶夫、泽尔多维奇等人还发现宇宙大尺度结构的种子来源于宇宙微波背景辐射中的扰动，这对宇宙学的理论发展至关重要。

虽然传统的热大爆炸宇宙学精确描述了宇宙

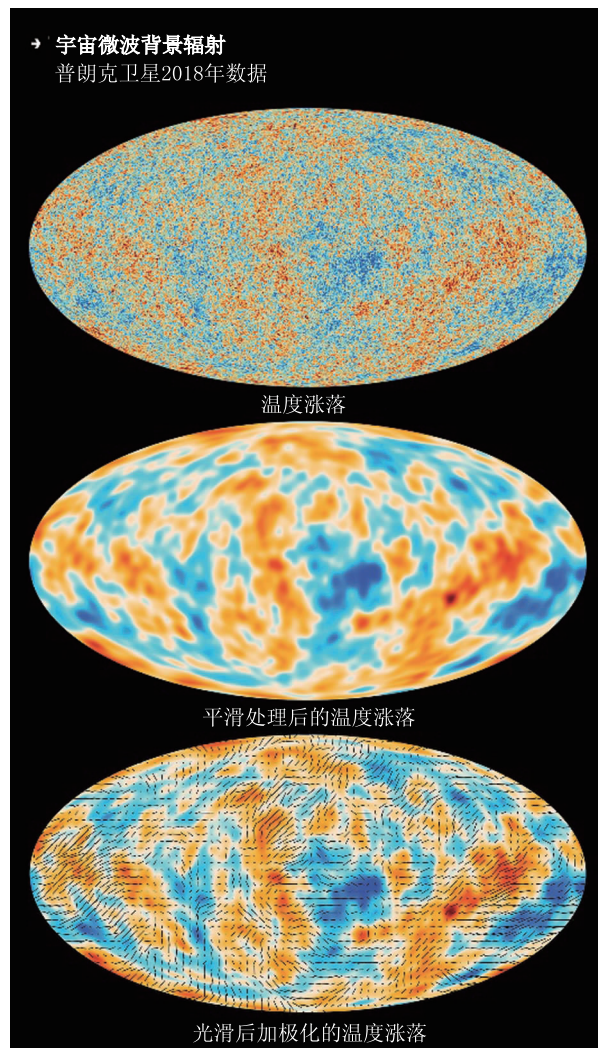


图5 Planck 卫星实验组公布的CMB温度涨落图。上图为精细结果展示，中图为平滑处理后的温度涨落，下图为平滑后加极化的示意图(图源: ESA)

从创生后几分钟到当前138亿年的演化历程，但这一学说却面临了若干理论短板。例如，该学说无法解释宇宙为什么在所有方向上看起来都如此均匀和平坦，CMB中的扰动来源于何处，等等。为了解答这一系列的理论问题，美国宇宙学家古斯于1980年提出了暴胀学说。这一学说指出我们的宇宙在刚刚诞生约 10^{-36} — 10^{-32} s期间曾经历过一次极为剧烈的加速膨胀，这一想法与暗能量解释宇宙晚期加速膨胀极为类似，因此它需要一个动力学的标量场，被称为暴胀场。该场也具有与暗能量极其类似的能力，可以将宇宙空间在短时间内放大至少 10^{25} 倍。因此，这个过程十分有效

地抹平了宇宙空间可能存在的任何不平坦性和不均匀性。

暴胀期间，暴胀场自身在不断产生着微小的量子涨落，这些量子涨落的波长又因为暴胀而被拉伸到极大尺度并且能退化成经典扰动。这些经典扰动最后演变成了CMB(宇宙微波背景)中的温度涨落，并且在暴胀结束之后为宇宙中大尺度结构形成提供了种子。此外，由宇宙学扰动理论所预言的近标度不变的温度扰动功率谱和大尺度结构物质功率谱，都在后来宇宙学观测实验中得到了极高精度的检验。在现代宇宙学中，宇宙学扰动理论是基于爱因斯坦提出的广义相对论进行微扰展开，并通过研究这些微小的原初扰动的演化行为去确定星系及星系团等大尺度结构的最终形成过程。

正是基于广义相对论，热大爆炸宇宙学说和暴胀框架下的宇宙学扰动理论结合在一起，给出了一个只含有6个基本参数的宇宙学模型，即“和谐宇宙模型(cosmological concordance model)”。这个模型也被普遍认为是宇宙学框架下的标准模型，当前宇宙学家们正在致力于通过各种宇宙学观测实验更精确地检验这个宇宙学标准模型。通过皮布尔斯等人早年对宇宙演化的理论研究，宇宙学或者说整个理论物理，已经进入了一个全新的黄金时代。物理学的交叉，特别是曾经的物理

学金矿——粒子物理学与现代宇宙学的交叉尤为深刻，宇宙学的发展也会对粒子物理的未来发展产生重要影响。

暴胀宇宙学的一个重要预言是，除了暴胀场产生的标量型原初密度扰动以外，宇宙时空本身的真空量子涨落也会迅速扩张到视界外形成张量型的原初扰动，即原初引力波。暴胀结束后，一部分原初引力波又逐渐进入视界。因为暴胀发生在整个可观测宇宙中，原初引力波在宇宙中应该处处存在，形成引力波背景并遗留至今(图5)。原初引力波与暴胀期间的物质成分没有直接关系，是纯时空涨落，而且是一种量子效应。因此，一方面，探测原初引力波有利于检验暴胀这样一个极高能标的早期宇宙过程，甚至有机会触及到宇宙最接近大爆炸那一刻的动力学性质，例如反弹宇宙学的检验^[7]；另一方面，它是引力(即时空的)量子产物，有助于推进人们对量子引力这些基本物理问题的理解。

2017年的诺奖授予了韦斯、索恩和巴里什，以表彰他们带领LIGO团队发现引力波信号的贡献。然而由于原初引力波是宇宙本身这一极大尺度对象产生的，其波长早已超过地球尺度，所以无法使用和LIGO类似的实验方法进行探测，需要求助于宇宙的自拍照——CMB的偏振进行探测。

从观测角度来看，CMB偏振图像可分解为两种独立的模式，一种是E模式，一种是B模式。某一点附近的偏振模式图像如图6所示，中心周围的线段表示偏振取向。明显可以看出B模式偏振是“有旋”的，因而它在空间反射作用下具有与E模式不同的性质。在图中沿着通过中心并垂直于纸面的轴作空间反射，将会发现E模式图像保持不变，而B模式的 $B>0$ 和 $B<0$ 的两个图像会互换。换句话说，E模式具有偶宇称，B模式具有奇宇称。

目前探测引力波事件的实验都是用激光干涉仪，对于这类实验，引力波引起的变形使得两个垂直的臂发生伸长和缩短，从而使得两臂交汇处的激光干涉条纹发生改变。人们通过观测干涉条纹的移动来记录引力波，看的其实是激光信号。

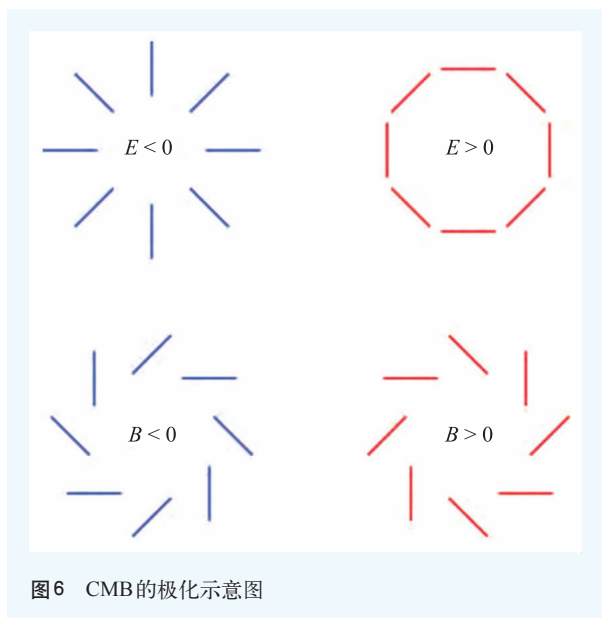


图6 CMB的极化示意图

对CMB来说,宇宙中的原初引力波经过时使得散射前电子周围的时空变形,散射出来后就产生了CMB光子的B模式偏振,同样是通过光信号来记录引力波,因此对原初引力波探测来说CMB是最直接的方式。不同的地方在于激光干涉仪测的是高频引力波,目前针对的是天体物理波源;CMB探测的原初引力波的频率非常低,波长是宇宙学尺度,来源于早期宇宙。激光干涉仪利用的是光的干涉,实现干涉的主要实验仪器是人造的;CMB利用的是光的散射,实现散射的“实验装置”是天然的。相对来说原初引力波有一个优点是作为信号源它非常稳定,因为原初引力波充满整个宇宙空间,在同样充满整个宇宙空间的CMB上留下的印记也长久存在,可重复验证。而LIGO探测的黑洞并合这样的事件偶然性比较大,而且同一事件无法由后续其他实验来验证^[8]。

参考文献

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/51_Pegasi_b

[2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Exoplanet>

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Physical_cosmology

[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_nucleosynthesis

2014年春,美国哈佛大学领导的BICEP2合作组宣布测量到原初引力波产生的CMB的B模式偏振信号,引起了世界科学界的震动。但此后空间望远镜的进一步研究发现,BICEP2观测的天区受到较强银河系本身的尘埃干扰,无法确证信号来源,这也说明了探测原初引力波在实验上的极大难度。这使得进一步改进探测器灵敏度,实现全覆盖提高信噪比,寻找“最干净”的天区降低银河系的前景干扰,迫在眉睫。目前,中国的宇宙学家们正在迎头赶上这场宇宙学研究领域的汹涌巨浪,例如在西藏阿里高海拔地区中国科学家夜以继日建设着以搜寻原初引力波为主要科学目标的宇宙微波背景辐射探测项目。期待我们国家也能迎头赶上,在这个领域做出属于中国人自己的重大发现!

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background

[6] 蔡一夫,朴云松,张新民. 现代物理知识,2015,27(5):26

[7] Cai Y F. Sci. China-Phys. Mech. Astron.,2014,57:1414

[8] 张新民,苏萌,李虹等. 现代物理知识,2016,28(2):3

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑部

户名:中国科学院物理研究所

帐号:11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

