

2019年诺奖解读： 物理宇宙学

张新民¹ 毕效军¹ 李明哲² 李虹¹ 赵公博³ 夏俊卿⁴ 蔡一夫² 黄发朋⁵

(1. 中国科学院高能物理所 100049; 2. 中国科学技术大学 230026;

3. 中国科学院国家天文台 100101; 4. 北京师范大学 100875; 5. 美国华盛顿大学)

2019年10月8日,瑞典皇家科学院宣布将今年的诺贝尔物理学奖的一半授予詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles),以表彰他在物理宇宙学方面的理论贡献和发现。詹姆斯·皮布尔斯,1935年生于加拿大温尼伯,现为美国普林斯顿大学教授。在过去几十年中,他在宇宙微波背景辐射(CMB),宇宙中的结构形成,暗物质和暗能量等众多方向做出了重大贡献。他是现代宇宙学大厦的主要奠基者之一。

在基础科学研究领域,迄今我们已建立了描述基本粒子的标准模型和描述宇宙演化的大爆炸宇宙学模型,但是相对于粒子物理的研究,宇宙学研究的科学性,直到20世纪90年代中叶,一直不被看好,并时常被质疑。这一点,在我(张新民)1996年夏从美国回国后在高能所开始组建宇宙学团队时深有感触。皮布尔斯教授的工作使宇宙学从哲学思考,定性讨论,饭后茶余的闲谈,变成基于物理规律的具有理论和实验两方面的定量学科。自1998年,超新星发现宇宙加速膨胀,特别是21世纪WMAP, Planck卫星实验对微波背景辐射(CMB)温度和偏振谱的精确测量极大地推动了宇宙学进入到一个精确的时代,同时也极大地促进了高能物理与宇宙学的交叉研究。

自诺奖公布以来,国内学者已有很多的解读,详细介绍了皮布尔斯教授的生平及对物理宇宙学研究的贡献。本文,我们将主要介绍物理宇宙学领域的研究现状、发展趋势以及我国的研究情况,包括以下几个方向:宇宙大爆炸及起源,CMB与原初

引力波,暗物质,暗能量,宇宙大尺度结构和统计方法,精确宇宙学与基础对称性,弱电对称性破缺、正反物质不对称与宇宙相变引力波等。这些研究工作都离不开皮布尔斯教授的奠基和开拓。另外,在过去二十多年组建粒子宇宙学研究团队的过程中,皮布尔斯教授的三部著作《物理宇宙学》,《宇宙大尺度结构》和《物理宇宙学原理》,使我(张新民)和我的学生博士后们受益匪浅。在此,我们8人联合写此文,向皮布尔斯老先生致敬。

一、宇宙大爆炸及起源

随着加拿大裔美国宇宙学家、2019年诺贝尔物理学奖获得者詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles)教授几乎倾尽一生的努力,物理宇宙学越来越被人们广泛认识和肯定,其中最核心的热大爆炸宇宙学理论图像不仅影响了我们人类对宇宙的认知,它也同时成为了人类社会的一个文化符号,不断地辐射着方方面面。例如,基于大爆炸理论图像而衍生出来的科学艺术作品、影视文化层出不穷。然而,无论是科学界还是普罗大众都会自然而然地问出一个问题:宇宙在大约138亿年前到底经历了什么?这就是宇宙的起源问题。

让我们简要回顾一下热大爆炸宇宙学说。这一模型描述了,我们的宇宙创生于大约138亿年前的一个来自时空奇点的大爆炸。它从极高温度的混沌状态开始演变,逐渐产生基本粒子、核子,然后经过原初核合成产生氢和氦的原子核。之后约38

万年,宇宙中形成稳定的中性氢原子与早期CMB。接着在原初密度涨落的影响下,逐渐演化出大尺度结构雏形。到了4亿岁时,宇宙中终于诞生了第一代恒星,而最早的星系和类星体则诞生于大爆炸后约十亿年。之后,由星系和星系团等构成的宇宙大尺度结构开始形成。最终,我们的宇宙演化到当前由暗能量驱动的加速膨胀状态。

然而,这一图像中所描绘的大尺度结构的起源并没有被诠释。这导致了20世纪80年代,以Alexey Starobinsky、Alan Guth等人为首的宇宙学家提出了热大爆炸学说的升级版,引入了暴胀。暴胀学说是一种刻画极早期宇宙动力学的理论图像,人们相信它可能发生在大爆炸后约 10^{-36} 秒到 10^{-30} 秒这么短暂的时间内,这时候宇宙的单位空间尺度被放大了约 10^{80} 倍。这相当于瞬间把亚原子尺度的空间扩张到了太阳系尺度,这样可以抹平原初宇宙可能存在的不均匀性,很自然地解释了我们今天看到的均匀宇宙。在暴胀时期本该存在于微观世界的量子涨落也被拉扯到宏观尺度,导致了CMB温度涨落与原初密度扰动的产生,这恰好为大尺度结构的形成提供了起源。但是,大爆炸奇点在暴胀学说中依然是不可避免的。这意味着,暴胀学说本身是不完整的:我们不知道暴胀从何而始,也不知道暴胀之前会发生什么。

在这个历史背景下,一些大胆的替代理论应运而生。其中,最具代表性的就是反弹宇宙学说。实现反弹宇宙图像的理论模型有很多。国际上具有代表性的有:加拿大麦吉尔大学的Robert Brandenberger教授与英国朴茨茅茨大学的David Wands教授于1999年提出的物质反弹模型、美国普林斯顿大学的Paul Steinhardt教授与加拿大圆周研究所的Neil Turok教授等人于2001年提出的火劫模型。而中国的宇宙学家在这一时期也加入到国际反弹宇宙学研究的热潮中,例如,中国科学院高能物理所的张新民研究员及团队于2007年提出的精灵反弹模型、2008年提出的Lee-Wick模型等。在近十年来,国际上特别是中国的宇宙学家们多年努力下,基于这些反弹模型的宇宙学扰动理论逐渐发展成型,并揭示了一些反弹学说同样可以解释热大爆炸宇宙学所面临的初始条件疑难。在这类宇宙学图像中,大爆炸之前的宇宙处于一个收缩过程,体积越来越小,直到某一时刻宇宙收缩到一个极小值,然后反弹进入标准的热大爆炸膨胀阶段。由此可见,反弹学说的提出,不仅继承了热大爆炸宇宙学的成功之处,还避免了那个令人类百思不得其解的时空奇点。因此,近些年来反弹学说的研究大大推动了物理宇宙学的理论发展。

宇宙在极早期所经历的究竟是哪一种过程呢:

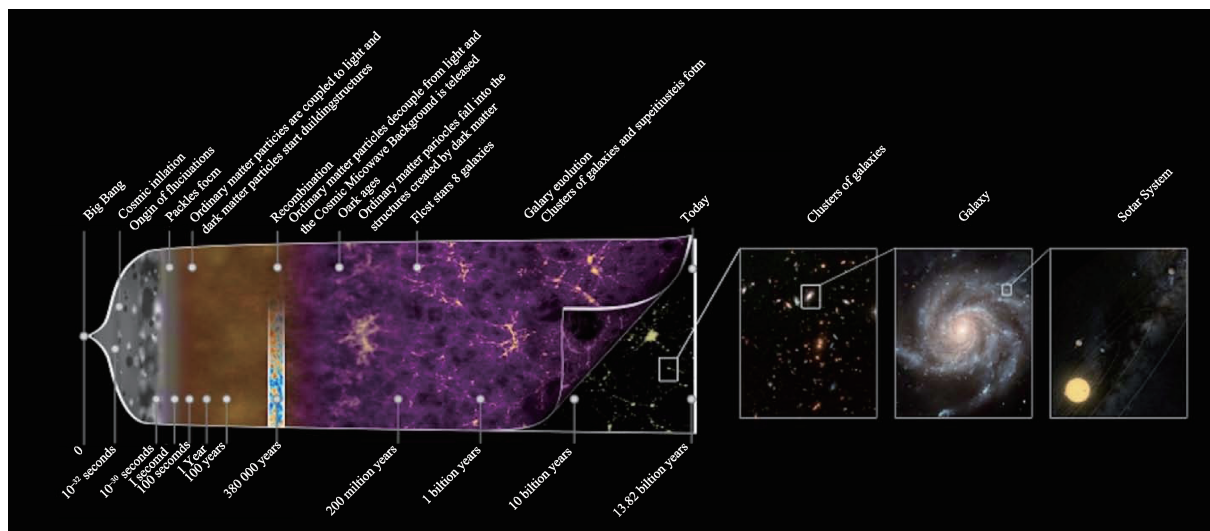


图1 物理宇宙学所描述的标准演化历史

暴胀,反弹,抑或二者的结合?对于研究极早期宇宙的物理学家来说,一个至关重要的任务就是通过实验观测来进行检验区分。这些模型给出的理论预言在原初密度扰动和原初引力波上存在着差异,而这些正好可以通过对CMB的高精度测量来加以检验。物理学家们观察CMB天图中不同光子携带的偏振信息,发现它们可以形成两种截然不同的图样:电场型的E-模式和磁场型的B-模式。如果我们能够精确测量CMB光子的偏振信息,我们就有机会检验这些有关极早期宇宙的理论模型,甚至一窥宇宙起源的奥秘。特别是,我们发现,来自接近宇宙起源的原初引力波可以直接在CMB中产生原初B模式偏振。这一发现正式响起了利用精确宇宙学实验探索、检验原初宇宙图景的战斗号角。然而遗憾的是,截止到目前原初B模偏振仍未被直接观测到。虽然对原初引力波的探索阴影重重,但是我们人类,特别是中国的宇宙学家们,不忘初心、牢记使命。

考虑到目前已经建造和正在规划中的地面CMB实验都集中在南半球,而北半球尚是空缺,为了推进中国的物理宇宙学发展,中国科学院高能所的宇宙学团队牵头,联合国内外多所顶级宇宙学研究机构,正在我国西藏阿里地区建造北半球首个CMB极化望远镜,即阿里原初引力波望远镜(AliCPT)。该项目一旦完成,便可以在北天区率先实现对原初引力波的探测,从而为我们认知宇宙建立新的宇宙观作出重要贡献。

二、宇宙微波背景辐射与原初引力波

詹姆斯·皮布尔斯以其对当代精确宇宙学所作出的杰出贡献被授予诺贝尔物理学奖,这一消息发布后,对当前宇宙学界的老中青几代科学工作者可以说是极大的鼓励,令人激动。他是老一辈科学家的代表,也是当前正活跃于前沿研究的中青代的楷模和榜样!为什么这么说呢,从一个晚辈的角度来看,我们是读着皮布尔斯的书,一步一步的钻进宇宙学研究领域的。皮布尔斯对宇宙学领域的奠基

工作之全面,让人叹服,几乎贯穿整个宇宙演化的历史长河的各个阶段,从起源,到原子核合成,到宇宙再复合,以及今天的加速膨胀,各个阶段无不能寻找到皮老的足迹。研究手段从宇宙微波背景辐射(CMB)到大尺度结构形成,无所不及。

皮布尔斯是最早推动早期宇宙辐射理论研究的科学家之一,早在20世纪60年代,他就开始了对宇宙早期辐射的研究。他们坚持不懈地推动和倾注,最终促成了人们对CMB长达几十年的精确测量,推动宇宙学研究进入精确的殿堂。

让我们简单回顾下CMB的研究历史。1965年微波背景被发现,之后先后有三代空间卫星,COBE、WMAP及Planck对CMB给出了精确测量,气球实验BOOMERanG-98,MAXIMA等,于21世纪初最先提供了大尺度上对CMB功率谱的高信噪比测量,并给出平坦宇宙的测量结果。之后的WMAP和Planck对温度功率谱更为精确的测量,进一步检验了标准宇宙学模型,成功将宇宙学研究推进到精确宇宙学时代。2002年,位于南极的DASI实验最先测量到E模式偏振,后来被WMAP实验进一步验证。位于南极极点的BICEP/KECK望远镜给出目前对B模式偏振最为精确的测量,与刚刚结束观测的Planck卫星的联合数据分析得到对原初引力波的上限为 $r < 0.06 (2\sigma)$ 。

开展对CMB B模式偏振的精确测量,探测原初引力波是CMB领域的下一个核心科学目标之一。现在正在开展观测的CMB实验包括BICEP/



图2 阿里原初引力波台址现状图

KECK、POLARBEAR, ACT, SPT 等,正在建设的有 Simons 天文台,以及正在规划的美国 CMB S4 计划等,均分布在南半球的南极极点和智利的阿塔卡玛沙漠台址。我国的阿里原初引力波探测计划是目前北半球的地面实验,主要科学目标为原初引力波以及检验 CPT 对称性。更大口径的 CMB 偏振望远镜——AliCPT-2 正在规划之中,计划将开展更多频段的观测,并在 CMB Lensing 扣除和前景分析能力上大幅提升,其科学目标将扩展包括中微子质量、暗能量物理本质等宇宙学研究。

三、精确宇宙学与基础对称性

以詹姆斯·皮布尔斯为杰出代表的宇宙学家为物理宇宙学的建立做了大量的奠基与建设工作。经过几代人的努力,到目前为止,宇宙学已经从类似于哲学范畴的小众定性学科成功地转变成有坚实物理基础、有确定的理论预言且能被实验检验的精确定量科学。对于这一点,笔者深有感触。当笔者在 20 世纪 90 年代末进入中国科学院高能物理研究所的宇宙学课题组做研究生时,宇宙学是鲜有人问津的高冷学科,当时国内从事宇宙学研究的人员更是凤毛麟角。国内外的宇宙学先驱们就是在这样十分孤寂的道路上艰难探索着。如今谁也无法否认物理宇宙学的成功与重要性,而国内的宇宙学研究队伍也越来越壮大。

宇宙的起源与演化是受基本的物理规律支配的,因此通过对宇宙学参数的测量可以对这些物理规律进行检验。根据物理宇宙学,在早期宇宙处于高温高密的等离子体状态,粒子间的微观相互作用起着决定性的作用,这样整个宇宙就形成了一个天然的高能物理实验室,人们可以用之来检验微观的高能物理过程。正如前苏联的宇宙学家泽尔多维奇所说:宇宙是穷人的加速器。在这台巨型“加速器”上进行的研究结出了丰硕的成果:例如通过原初核合成与宇宙微波背景辐射的研究推断出的中微子的代数与欧洲核子实验中心的加速器实验得到的结果非常一致,表明粒子物理的标准模型在电

弱能标以下的正确性;而同样通过原初核合成与宇宙微波背景辐射的观测得到的重子-反重子不对称性则与标准模型的预言不符,这表明在更高能标下存在着超出标准模型的新物理过程。

近年来人们发展了在宇宙这台“加速器”上检验更多基本物理对称性或者高能物理过程的方法。比如通过分析宇宙微波背景辐射以及大尺度结构的数据可以寻找早期宇宙中粒子间碰撞产生的新粒子的蛛丝马迹(Arkani-Hamed & Maldacena, 2015; Chen, Wang & Xianyu, 2017)。另一个新的进展是我国宇宙学家提出并发展了利用宇宙微波背景辐射的偏振实验检验电荷共轭(C)-宇称(P)-时间反演(T)联合对称性(简称 CPT 对称性)的新方法(Feng, Li, Li & Zhang, 2005; Feng, Li, Xia, Chen & Zhang, 2006)。CPT 对称性在粒子物理标准模型中是一种严格的对称性,具有基础性地位。检验 CPT 对检验标准模型本身很重要,同时也是一种非常有效的寻找新物理的途径。如果有 CPT 破缺,宇宙微波背景光子在传播过程中其偏振方向会发生旋转,其旋转角的大小衡量了 CPT 破缺的程度。这种旋转使得一部分 E 模偏振转化为 B 模偏振,改变微波背景辐射的偏振功率谱,尤其是会产生温度-B 模偏振(TB)与 E 模偏振-B 模偏振(EB)的关联谱。这使得人们可以通过测量微波背景辐射的偏振来探测其旋转角,从而对 CPT 对称性进行检验。2006 年,我国宇宙学家根据此方法并结合当时的观测数据对 CPT 破缺导致的旋转角作了国际上的首次测量(Feng, Li, Xia, Chen & Zhang, 2006),结果显示存在微弱的 CPT 破缺迹象。后来许多大型国际实验合作组如 WMAP, Planck, QUaD, BICEP 等都沿用此方法并结合各自新的观测数据对旋转角进行了测量。这些结果表明宇宙微波背景辐射的偏振实验是检验 CPT 对称性的强有力的方法,其检验精度比地面实验室里开展的 CPT 检验高很多。用微波背景辐射检验 CPT 对称性逐渐成为各实验组的例行工作之一,也是即将开展的我国阿里实验计划(AliCPT)的重要科学目标之一。

四、暗物质

20世纪70年代,随着大量天文观测的积累,特别是对漩涡星系旋转曲线的测量,暗物质的存在逐渐得到天文学界的承认。皮布尔斯和同期的其他一些天文学家都意识到暗物质应该非重子性质,只有和光子作用非常微弱的非重子暗物质的存在才能在引力作用下形成星系、星系团等结构。寻找非重子暗物质粒子的直接信号,研究其粒子属性则发展成为当今暗物质研究的主要内容。

在皮布尔斯提出的宇宙图景中,宇宙是一个天然的高能实验室,在宇宙早期的高温高密度状态下,所有物质都可能达到热平衡的状态。暗物质粒子同样可能在这个过程中达到了热平衡,随着宇宙温度的降低,暗物质粒子就和中微子、光子一样从热平衡的状态解耦出来,这个过程称为暗物质的热产生。定量的计算告诉我们,这样产生出来的暗物质要和今天的观测一致的话,则要求暗物质和普通物质之间存在“弱”作用类似的相互作用,这就是弱作用重粒子(WIMP, Weakly Interacting Massive Particles)的由来。由于粒子物理学家在研究超出粒子物理标准模型的新物理中,发现WIMP粒子自然存在于这些新物理模型中,其粒子属性、作用形式都可明确预言,因而这类粒子获得了广泛研究。

我国对暗物质的研究在经历了早期的以理论探索为主的阶段后,于2008年开始进入一个加速发展的过程。在2008年,由科学院基础局主持制定了我国暗物质暗能量探测研究的路线图,高能所张新民带领团队提出了“上天、入地、到南极”的战略规划。在此基础上,科学院支持了后来的“悟空”暗物质卫星计划、锦屏地下实验室计划和在南极DOME A建设光学红外望远镜等计划。目前,“悟空”已经升空近四年,获得了世界上最为精确的电子能谱。锦屏地下实验室开展了由清华大学领导的CDEX实验和上海交通大学领导的PandaX实验,这些实验都取得了国际一流的测量结果,对国际上暗物质直接探测有着重要的影响。

在将来的暗物质研究中,空间有在我国空间站的HERD实验,将比目前的“悟空”实验提高一个数量级的实验精度,地面有在我国四川稻城开展的LHAASO实验,是国际上最大、也是最为复杂的宇宙线实验,而在地下,CDEX和PandaX都有进一步的升级计划,继续保持国际一流的地位。总而言之,暗物质研究在我国取得了长足的发展,理论与实验多个领域从无到有,并取得了国际一流的研究成果。

五、暗能量

1998年发现的宇宙加速膨胀现象(该发现获2011年诺奖)意味着当前宇宙的主要能量组分可能是具有负压的暗能量。2006年美国暗能量特别工作组报告指出:“宇宙加速膨胀表明基本粒子和引力理论或不正确,或不完备,需要基础物理革命来全面理解”。对于暗能量的研究是2010年美国十年天文规划推荐的最高优先级项目,也是美国粒子物理十年规划(Snowmass 2013)高度推荐的研究领域。暗能量研究是第三代和第四代大规模星系巡天的主要科学目标之一。

在传统的宇宙学标准模型中,暗能量是爱因斯坦百年前提出的“宇宙学常数”,即真空能,其不具有任何动力学性质,其状态方程 w (压强与密度的比值)严格等于 -1 。此模型虽然可以在一定程度上符合观测,但却存在严重的“精细调节”等理论困难。为缓解宇宙学常数问题,20世纪80年代,皮布尔斯等人提出了“精质”动力学暗能量模型,即暗能量是由一个动力学标量场描述,其状态方程随时间演化但保持大于 -1 。2002年,Caldwell提出了“幽灵”暗能量模型,其状态方程随时间演化且小于 -1 。2004年,张新民研究员带领的课题组提出了“精灵”模型,其状态方程随时间演化,且可以越过 -1 。

在观测上,暗能量的时间演化历史可以结合多种观测手段重建,包括超新星(宇宙标准烛光)、重子声波振荡(宇宙标准尺)、引力波(宇宙标准汽笛)、宇宙微波背景辐射、引力透镜等。近期的天文观测表

明,最新的BOSS星系巡天数据在 3.5σ 水平支持 w 随时间演化,且越过 -1 ,与精灵暗能量模型的预言一致。基于模拟,未来的DESI巡天可以将这一信号提高至 6σ 以上,并且统计上将被Bayesian Evidence强烈支持。

揭示暗能量的本质是现代科学中最重大的研究课题之一,也是国际竞争的焦点。而对暗能量动力学性质的研究是探索暗能量本质的关键。未来5~10年,国际上第四代大型巡天(DESI, PFS, Euclid等)将为暗能量研究提供重要的观测支持,相信揭开暗能量的神秘面纱指日可待。

六、宇宙大尺度结构和统计方法

除了宇宙微波背景辐射,皮布尔斯在宇宙大尺度结构的研究中也做出了重要的贡献。虽然根据宇宙学原理,宇宙应该大致上是均匀且各向同性的,但是实际的巡天观测告诉我们,宇宙中物质能量密度的分布存在着明显的各向异性特征。那么,如何来描述这种各向异性呢?皮布尔斯在1973年和合作者发表了专门对于河外天体星表的统计分析的理论文章,在该文章中,皮布尔斯考虑了星系分布的相关函数和功率谱计算,来描述宇宙中物质能量密度分布的各向异性特征,而这也为后来的2dFGRS和SDSS巡天项目计算星系分布的三维功率谱奠定了基础。此外,皮布尔斯还研究了如何从统计上分析星系在二维天球上的性质,进而引入了角相关函数,并利用球谐函数展开来表征角功率谱。这些统计分析方法不光是针对河外天体的成团性分析,对于后来发现的宇宙微波背景辐射各向异性的统计分析也至关重要。目前,从低频的射电星系到高频的伽马射线辐射,从各类河外天体的自相关性质到天体之间的互相关性质,皮布尔斯提出的统计分析方法已经被广泛应用到宇宙学的各个领域,是目前研究宇宙大尺度结构成团性和宇宙微波背景辐射各向异性的统计性质的最重要手段。

七、弱电对称性破缺、反物质与宇宙相变引力波

皮布尔斯的先驱性工作为我们探索宇宙各个演化阶段提供了清晰的物理图像和实验手段。

宇宙的电弱相变发生在温度大约100 GeV左右(CMB光子退耦的温度为0.26 eV)。它和宇宙正反物质不对称性的起源以及欧洲核子中心大型强子对撞机(LHC)上发现的希格斯粒子的性质息息相关。QCD相变发生在大约100 MeV。它和宇宙中暗物质轴子(axion)的基本性质,以及Peccei-Quinn对称性的破缺相连。

2016年aLIGO引力波的发现开启了一个研究宇宙学和基础物理的新窗口,为研究粒子宇宙学中很多未解之谜提供了新的方法,特别是有关宇宙电弱相变和QCD相变的演化历史。这是因为各种新物理下,宇宙的电弱相变和QCD相变可能是强一级相变。而一级相变能够产生相变引力波。电弱相变产生的引力波可以被未来的空间引力波实验(欧洲已批准的LISA,以及中国正在积极推动的天琴和太极计划)探测到。QCD相变的引力波则可以通过SKA(平方千米阵列)精确的脉冲星计时能力探测到。这里以电弱相变演化历史为例简要讨论它的粒子宇宙学意义和实验探测。

在新物理模型下或者有效理论框架下,我们的宇宙在大概100 GeV的时候可能经历一个由希格斯粒子诱导的强一级相变。这是由希格斯势函数的性质决定的。

张新民研究员1993年在国际上第一次提出一种非常重要而有趣的模型无关的势函数,就是希格斯六次方描述的势函数,它能给出很强的一级相变。进一步,我们研究了一系列具有代表性的希格斯扩充的新物理模型,并通过协变导数展开的方法积掉重的自由度,从而得到所有可能的维数为六的有效算符。(我们的研究表明很多模型在电弱能标下都能约化到这个有效势,比如单态,二重态,三重态扩展的希格斯模型以及复合希格斯模型。)在考

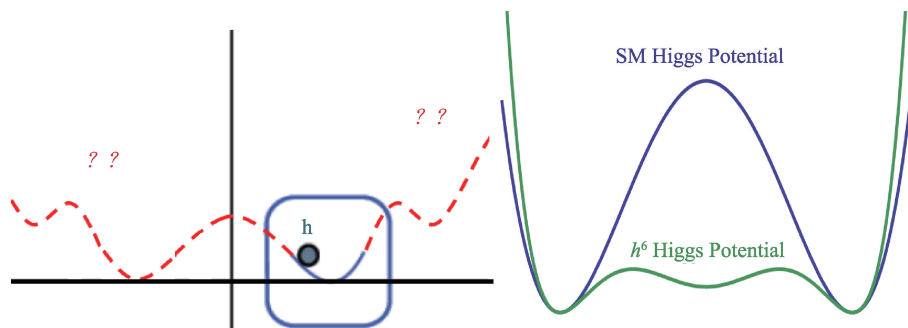


图3 希格斯粒子的势函数的形状与宇宙早期电弱相变类型

虑了已有的精确实验数据对所有维数为六的有效算符的限制后,我们证实希格斯六次方的相变图像仍然是被已有实验所青睐的,并且理论预言可以通过CEPC等未来轻子对撞机上希格斯和Z玻色子的联合产生来检验。

这一相变可以提供为解释宇宙正反物质不对称起源的电弱重子数产生机制需要的偏离热平衡的条件。相变引力波,源于宇宙早期各个阶段发生的强一级相变过程。这种引力波机制最早由普林斯顿高能研究所的Edward Witten等人在20世纪80年代提出。以电弱相变为例,如果发生强一级电弱相变,就会在早期宇宙的粒子汤中产生许多“泡泡”,就像水沸腾时产生很多的气泡一样。这些泡泡产生之后会诱发三类有趣的物理过程,分别对应三种产生引力波的机制:(1) 这些“泡泡”之间相互碰撞,原本球对称的“泡泡”是没有四极矩的,碰撞后不再是球对称的,会产生随时间变化的四极矩,进而产生引力波;(2) “泡泡”会诱发粒子汤的湍流;(3) “泡泡”会诱发声波,这是欧洲合作组在数值模拟中意外新发现的引力波产生新机制,而且常常占主导贡献。这三种过程都会产生比较强的随机引力波,并且能在空间引力波探测器上被观测到。

研究宇宙电弱相变是当前一个新的热门研究课题。这有助于理解电弱标度产生宇宙中正反物质不对称、探索希格斯粒子势函数性质,弱电对称性破缺机制、引力波等一系列基础问题。这些问题

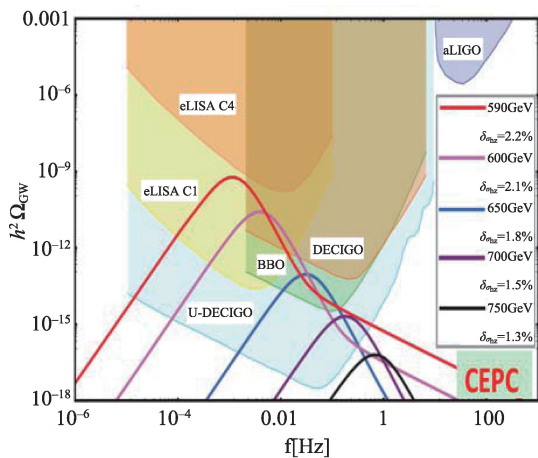


图4 引力波信号和CEPC信号互补的探索希格斯的势函数和宇宙早期电弱相变性质

将未来的引力波实验和对撞机实验神奇地联系在一起了。

