

21 厘米强度映射实验的联合巡天策略助力 暗能量精确测量

武鹏举 张 鑫

(东北大学 110819)

1. 氢原子的 21 厘米辐射用于探索宇宙演化

氢原子实际上可以在射电波段辐射,对应的光子的波长为 21 厘米,因此该辐射通常被称为 21 厘米辐射。这个辐射是由氢原子基态电子的自旋翻转跃迁导致的。由于原子核(在氢原子的情况即质子)的磁矩的影响,基态电子的自旋取向不同会导致能量有极微小的劈裂,这就是氢原子基态能级的超精细结构。

具体来说,当电子的自旋与核自旋平行的时候,形成的自旋三重态的能量会比二者反平行时形成的自旋单态的能量高那么一点点,因此当电子自旋翻转时,会发射或吸收一个波长为 21 厘米的光子(对应的频率为 1420 兆赫兹)。

这个跃迁的概率非常低,属于禁戒跃迁,因此在实验室中是探测不到的。但是,在宇宙中存在超大量的氢原子,如此微弱的跃迁信号也会汇集成可观测的宇宙学信号。目前,21 厘米辐射已在银河系旋臂结构测量等方面发挥了重要作用。天文学家普遍认为,21 厘米辐射未来将成为一种极为强大的宇宙学探针,在探测宇宙早期天体和结构形成以及探索暗能量本质等方面展现重要价值。

氢原子的 21 厘米辐射被认为是探索宇宙最初十亿年的几乎唯一手段。在宇宙的复合时期(原子核俘获电子,形成中性氢原子),光子退耦,形成宇宙微波背景,此时宇宙的年龄为 38 万年。在此之后的大约十亿年期间,宇宙中的发光天体逐渐形成,包括最早的星系和恒星、黑洞(类星体)等,从星系中

溢出的紫外光子逐渐把星系际介质中的中性氢原子电离掉,因此在晚期宇宙中,星系际中的氢几乎都是电离状态的。

在宇宙的最初十亿年,特别是在最早的一亿年中,发光天体还未形成,宇宙中几乎没有任何可观测的信号;后来即便形成了一些天体,但离我们太过于遥远,其光学信号也几乎不可观测。因此,在宇宙的这一阶段,大量中性氢原子的 21 厘米辐射信号就成为了我们探索这一关键时期的唯一手段。在“黑暗时代”和“宇宙黎明时期”,氢原子气体比宇宙微波背景更冷,它们会从微波背景中吸收 21 厘米光子;在“宇宙再电离时期”,气体已被加热,因此氢原子会发射 21 厘米信号。这些 21 厘米吸收和发射信号会帮助我们理解宇宙的早期演化历史。

早期宇宙中氢原子的 21 厘米辐射的波长会随着宇宙的膨胀被拉伸得更长。例如,宇宙再电离时期的 21 厘米信号的波长在今天已经被拉伸到 1.5~2.3 米;黑暗时代对应的 21 厘米信号波长已在 6.5 米以上。因此,我们需要用低频射电天线来接收这些信号。

在宇宙再电离之后的时代(后再电离时代),星系际介质中已经几乎没有中性氢了,但宇宙中仍然存在大量的中性氢原子,它们都藏身于星系之中。因此,在现代宇宙中,星系中的中性氢仍在不断地辐射 21 厘米信号。如果可以用射电望远镜探测这些信号,那么就可以用 21 厘米信号追踪星系;从宇宙学的角度来看,就有了一个利用射电手段测量宇宙大尺度结构的新方法。

简单总结一下,中性氢原子的 21 厘米辐射为我

们探索宇宙提供了巨大的机遇。首先,为我们打开了观测宇宙的新窗口,让我们能够利用氢原子的21厘米谱线作为探测信号在射电波段对宇宙演化进行探索。其次,由于静系波长(或频率)是固定的,波长的拉长程度自动就给出了源的红移,因此利用这种谱线巡天可以有效对宇宙的演化进行断层扫描。第三,原则上我们可以利用21厘米信号对宇宙复合时期以后的整个宇宙演化历史进行探索。

但同时,21厘米宇宙学的开展也一直面临巨大的挑战。最主要的挑战来自于前景污染。银河系中以及河外星系中存在各个不同频率的同步辐射和韧致辐射,这些辐射对同频率段的21厘米信号造成强烈污染,它们通常比21厘米信号要强好几个数量级,使得我们很难分辨和提取出真正有用的来自氢原子的辐射。当前,对21厘米宇宙学来说,最大最艰巨的任务就是如何从这种强烈污染中提取微弱的21厘米宇宙学信号。

2. 中性氢强度映射实验与暗能量的射电探测

在晚期宇宙中,可以利用21厘米信号开展星系巡天,从而测量宇宙的大尺度结构。在过去的几十年,人们已经利用光学望远镜通过星系红移巡天对物质在宇宙大尺度上的分布开展了大量的观测。在这些观测中,通常需要通过光谱分析来测量每个

星系的红移,这要消耗大量的望远镜观测时间。而通过中性氢21厘米谱线进行巡天观测则可以有效回避掉依赖光谱(或测光)分析的红移测量(图1)。

此外,由于谱线巡天的特性,我们甚至不需要解析单个星系。宇宙学研究主要关心物质在大尺度上的分布,小尺度上的信息可以在一定程度上忽略,因此我们可以采用一个低角分辨率的方法来进行巡天。具体来说,可以考虑较大的体像素,每个像素中可以包含许多个星系,我们来测量这些星系的总的(在某个频率上的)辐射强度。这种方法被称为“强度映射”(intensity mapping)巡天,采用这种方式,可以高效地开展中性氢巡天。相比于光学星系巡天,中性氢强度映射巡天的速度要快得多,而且能够达到的红移深度也是光谱(或测光)红移巡天完全不能比的。

利用宇宙大尺度结构的观测可以对暗能量的性质进行探索。一般认为,宇宙的加速膨胀是由暗能量驱动的。暗能量弥漫于整个宇宙中,它只在宇宙大尺度上起作用,其最奇怪的特性是产生排斥性的万有引力。对于暗能量本质的研究是当代基础物理和宇宙学前沿的重大课题。要破解暗能量之谜,当前最关键的一步是精确测量暗能量的斥力是如何演化的。用更为准确的语言来说,目前的首要任务是利用宇宙学观测来精确测量暗能量的状态方程。

精确测量暗能量状态方程是一个无比艰巨的

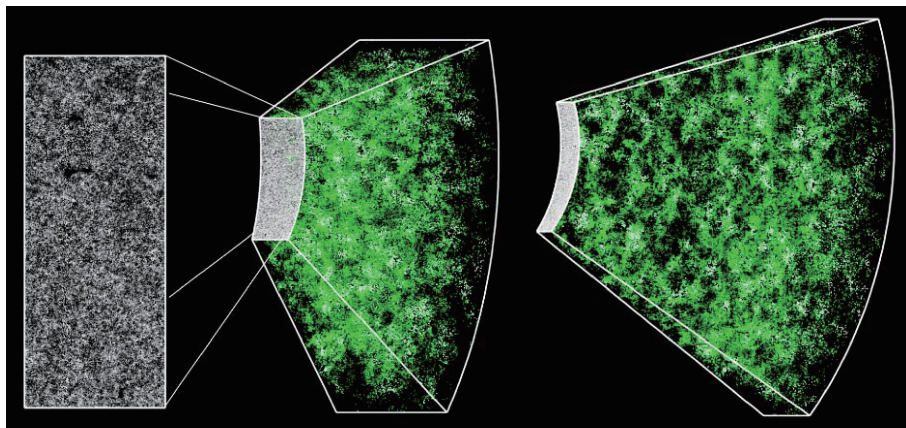


图1 星系红移巡天示意图(图片来源:BOSS)

任务。一般来说,我们需要非常精确地测量宇宙的演化历史(比如膨胀历史和各尺度上的结团历史),特别是晚期宇宙的膨胀历史。

“宇宙标准尺”是一个非常重要的手段。宇宙的大尺度结构观测就为宇宙学距离测量提供了一把标准尺,其尺寸大约为150百万秒差距。由于“重子声波振荡”(baryon acoustic oscillation, BAO)效应,星系在这样的一个尺度上结团程度更强一些,因此在星系巡天数据中可以通过统计学方法把这一“标准尺”信号提取出来,用于宇宙膨胀历史的测量。

通过中性氢强度映射巡天可以有效开展大尺度结构观测,并从中提取BAO标准尺信号,进而对暗能量状态方程进行精确测量。也就是说,除了通过光学巡天手段,我们现在还将拥有一个通过射电手段精确测量暗能量的方法。

当前对暗能量状态方程最好的测量来自于宇宙微波背景联合光学星系巡天BAO(标准尺)和Ia型超新星(标准烛光)观测(简记为CMB+BAO+SN),对于常数状态方程(用 w 来表示),其精度大约为3%;对于状态方程有演化的情况(用两个参数来刻画, w_0 和 w_a), w_0 的精度约为8%, w_a 的误差约为0.3(图2)。目前这样的测量精度还远不足以让我们深刻理解暗能量的本质属性。我们需要在未来的几十年中大幅度提高对暗能量状态方程的测量精度。

有了中性氢强度映射巡天,能否帮助我们大幅

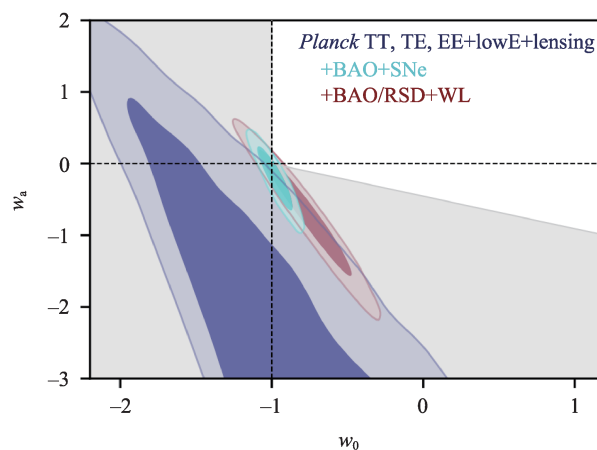


图2 观测数据的联合对暗能量状态方程参数的限制。

目前最好的限制来自于CMB+BAO+SN

(图片来源: Planck 2018)

度提高暗能量测量精度? 当前在全球范围内,已经在建设若干个中性氢强度映射实验,其中已有几个处在初步运行状态。它们是:CHIME、Tianlai(天籁计划)、HIRAX、FAST(中国天眼)、BINGO、SKA-Mid。其中,BINGO、FAST和SKA是用单碟模式测量;HIRAX、CHIME和Tianlai是用干涉阵模式测量(图3)。我们迫切需要了解它们未来在暗能量测量方面究竟能力如何以及在与其它观测联合时能够发挥什么作用。

3. 中性氢巡天实验的互补性与联合巡天策略

我们在最近的一系列工作中对中性氢巡天实



图3 正在建设或调试运行中的21厘米强度映射实验

验开展了系统性的分析。我们团队在2023年6月发表于《中国科学:物理学 力学 天文学》的工作中提出,由于不同的强度映射实验能力非常互补,在不同的红移范围(频率段)有各自的优势,因此可以考虑一个联合巡天策略,让它们各自发挥所长,从而节约宝贵的望远镜巡天时间。一个最佳的方案是FAST ($0 < z < 0.35$) + SKA1-Mid ($0.35 < z < 0.8$) + HIRAX ($0.8 < z < 2.5$)。

首先,只有FAST和BINGO覆盖低红移段的测量(图4)。而FAST是世界上灵敏度最高的单口径射电望远镜,其中性氢巡天方面的能力明显高于同类设备。用FAST开展中性氢强度映射巡天可探测红移0至0.35的区间,这是暗能量主导宇宙演化的时期,但是仅利用FAST的观测显然很难对暗能量进行有效的测量(图4)。

其次,SKA-Mid将覆盖非常宽的红移范围(0.35~3)。当前SKA-Mid的先导阵列MeerKAT已经建成并运行,它包括64个13.5米口径的碟形天线;SKA在2022年底已经开始正式开工建设,对于中频阵列将增建133个15米口径碟形天线,最终形成包括197个约15米口径碟形天线的阵列。由于该阵列主要为疏散构型阵列(以长基线为主),因此在进行中性氢强度映射巡天时采用单天线模式(而不是干涉阵模式)。SKA-Mid虽可覆盖很宽的红移范围,但是它真正有优势的红移段是0.35至0.8,在这一区间它的测量精度远好于其他实验,而在红移0.8至3的区间它只能以很低的精度进行BAO测

量。红移0.35~0.8这一范围对于暗能量测量是非常重要的,因为这正是宇宙从物质为主转变为暗能量为主的时期,因此SKA-Mid在红移0.35至0.8这一范围的优势有利于测量暗能量演化(对 w_0 和 w_a 限制最紧)。

最后,密集干涉阵CHIME、Tianlai(此处指设计中的全规模阵列)、HIRAX对于高红移BAO测量比较有优势。它们在红移0.8至2.5的范围内与SKA-Mid有重叠,但是在这—红移范围,干涉阵相比于单碟模式有非常明显的优势。因此,尽管SKA-Mid可以覆盖如此宽的红移范围,但是其在高红移的巡天相比于密集干涉阵劣势明显;如果能够将这些实验进行有效的协同,就可以节约大量的宝贵的望远镜巡天时间(图5)。

利用这个联合巡天策略,作者发现,21厘米强度映射单独即可精确测量暗能量状态方程。例如,对于状态方程为常数的暗能量模型, w 的精度可以达到约2%,明显好于当前最好的来自CMB+BAO+SN的限制。对于动力学演化的状态方程,联合巡天对 w_0 和 w_a 的限制能力与CMB+BAO+SN相当。该工作表明,利用联合巡天策略,21厘米强度映射巡天单独即可成为强大的宇宙学工具,在暗能量精确测量方面可发挥重要作用。进一步,21厘米强度映射巡天如果与其他有潜力的晚期宇宙观测(如引力波标准汽笛、快速射电暴、强引力透镜等)联合,将有望实现晚期宇宙精确探针,而且21厘米观测将在其中发挥主导性作用(图6)。

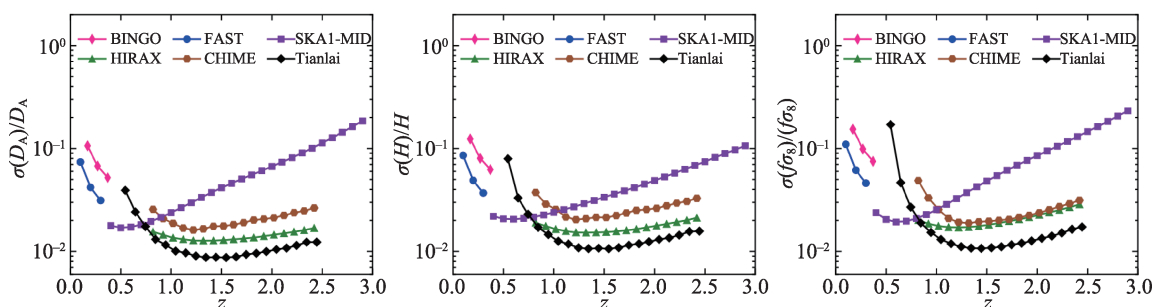


图4 BINGO、FAST、SKA1-Mid、HIRAX、CHIME和Tianlai测量重子声波振荡和红移空间畸变效应的预期测量误差(图片来源:JCAP 01 (2022) 060)

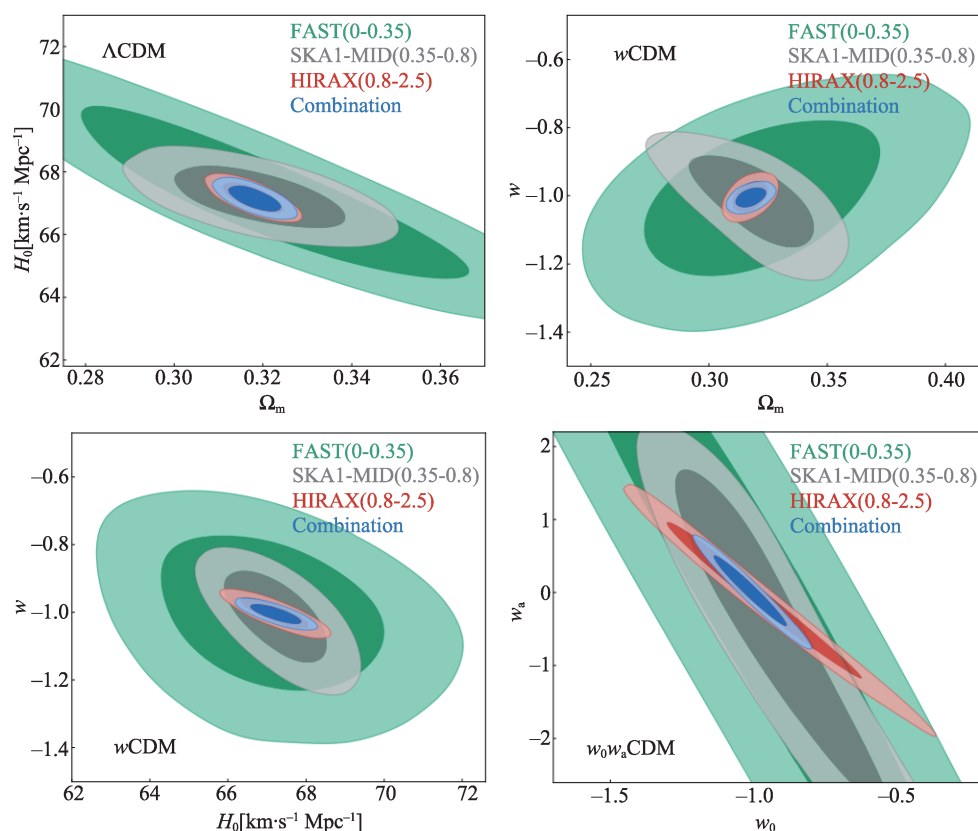


图5 FAST、SKA1-Mid和HIRAX的联合巡天观测对暗能量模型的限制结果
(图片来源: Sci. China Phys. Mech. Astron. 66 (2023) 7, 270413)

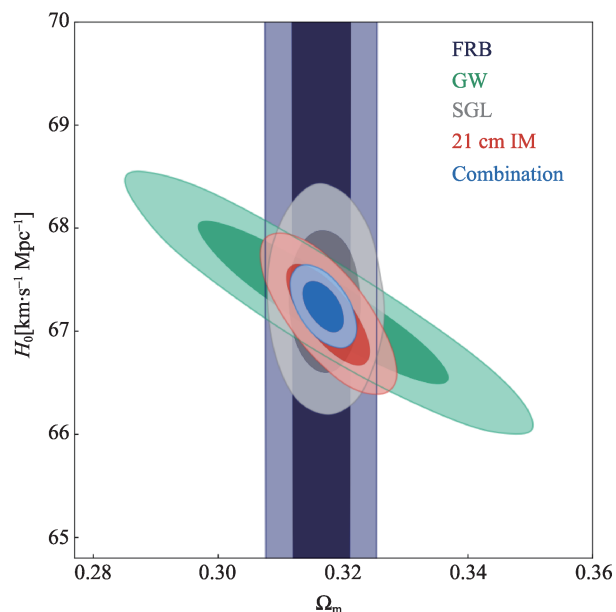


图6 21厘米强度映射巡天、引力波标准汽笛、快速射电暴和强引力透镜的协同观测对宇宙学参数的限制。
21厘米强度映射观测在其中发挥主导性作用
(图片来源: JCAP 06 (2023) 052)

4. 结语

21厘米观测将成为探索宇宙的强大工具,利用这一信号可以探测宇宙的整个演化历史。在晚期宇宙中,中性氢原子气体藏身于星系中,因此可以利用21厘米信号追踪星系及物质的大尺度分布。我们团队在2023年6月发表于《中国科学:物理学 力学 天文学》的工作中提出了一个FAST ($0 < z < 0.35$) + SKA1-Mid ($0.35 < z < 0.8$) + HIRAX ($0.8 < z < 2.5$)联合巡天方案,发现利用此联合巡天策略,21厘米强度映射单独即可精确测量暗能量状态方程。

对于中性氢的宇宙学观测来说,目前最大的挑战来自于前景减除,而在前景减除中最难对付的部分则是望远镜的各种系统效应。该团队也在致力于21厘米宇宙学观测的系统效应研究以及利用FAST对中性氢强度映射宇宙学信号的实际探测。展望未来,21厘米观测中的各种困难问题必然会逐

步得到解决,其宇宙学信号也必将被成功探测到并在宇宙学研究中发挥重要作用。

参考文献

[1] P.-J. Wu, Y. Li, J.-F. Zhang, and X. Zhang, Prospects for measuring

dark energy with 21 cm intensity mapping experiments: A joint survey strategy, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 66, 270413 (2023).

[2] X. Chen, A joint survey strategy helps 21 cm intensity mapping become a powerful cosmological probe, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 66, 270431 (2023).

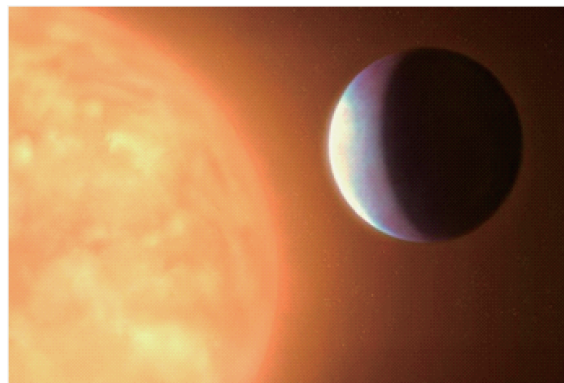
科苑快讯

天文学家一直在错误的地方寻找生命

一项新研究挑战了传统的宜居带边界,表明液态水可能存在于潮汐锁定行星的暗面或遥远世界的厚冰下面。几十年来,天文学家一直在“宜居带”中寻找行星,“宜居带”即恒星周围可以保留液态水的区域。然而,由于许多新发现的行星围绕的恒星与我们的太阳不同,导致宜居带过于狭窄。

《天体物理学杂志》(*Astrophysical Journal*)上的一项新研究,则不再把宜居带当作一个严格的边界,而是开始更仔细地观察真实的行星是如何分配热量的,会发生什么。他们的研究集中在潮汐锁定的系外行星上,这些行星总是向它们的恒星显示同一面。一个半球一直处于白昼,而另一个半球则永远处于黑暗中。这种极端条件,通常被认为不利于维持地表液态水或维持生命。这项研究使用了一个分析气候模型,来计算潮汐锁定行星表面的温度模式。结果表明,围绕m矮星和k矮星运行的行星,可以在它们的液侧保持液态水,即使它们的轨道比传统的宜居带模型所允许的更靠近它们的恒星。

来自永久光照白昼面的热量,可以穿过大气层和黑暗半球的温暖部分。在某些地区,这种转移的热量,可以使温度保持在水的冰点以上。这种机制扩大了液态水可能存在的环境范围。对宜居带更广泛的定义,也有助于解释詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)最近的发现。来自JWST的预测发现,在围绕m矮星



运行的温暖而接近的超级地球的大气中,存在水蒸气和其他挥发性气体。这些行星之前被认为不在地表水可能存在的安全范围之内。

这项研究还探索了位于传统宜居带外边界之外的行星。即使在远离恒星的非常寒冷的星球上,液态水也可能存在于厚厚的冰层之下。

在这种环境下,冰下的冰内湖泊或融化可能会在冰冻的表面下产生液态水。这种可能性进一步扩大了水基环境可能存在的地点范围,并大大增加了可能承载水基环境的行星数量。通过重新审视宜居带背后的假设并重新计算其极限,这项研究改变了天文学家寻找适宜生命环境的方式。结果表明,曾经被认为太热或太冷的星球可能仍然存在液态水存在的地方。

(高凌云编译自2026年3月6日SciTechDaily网站)