

# 暗能量之谜

杨荣佳

(河北大学 071002)

《自然》杂志2024年5月发文称,根据暗能量光谱巡天(DESI)国际合作组的观测,暗能量可能正在变弱。该文在当时并没有引起多大反响。2025年2月,DESI国际合作组发布暗能量的最新研究成果,发现暗能量可能并非像传统观点认为的是个恒量,而是可能随着时间变化<sup>[1]</sup>。这个结论尚未达到板上钉钉的程度,需要继续观测。要想判定宇宙是否会发生大塌缩也取决于后续对暗能量性质的测定。可以说,暗能量主导着宇宙的命运。

要想理解这个问题,有必要了解一点基础知识。下面来谈谈宇宙膨胀和暗能量。

自从天文学家哈勃通过光谱红移现象发现星系相互远离的时候,科学家就开始意识到宇宙在膨胀,后来又加上其他的天文观测结果,提出了宇宙大爆炸学说。但在暗能量发现之前,因为普通物质和暗物质产生的都是吸引力,天文界一直认为宇宙是在做减速膨胀。正如其一颗竖直上抛的小球,在引力的作用下上升速度会越来越慢,如图1所示。

Ia型超新星被认为是致密天体的热核爆炸,具有恒定峰值亮度可作为标准烛光进行距离测量(如图2所示),同时通过观测Ia型超新星的光谱可以测出其“红移”,将红移和距离一一对应起来就可以给出所谓的哈勃图,用这种方法可以研究宇宙到底是减速膨胀还是加速膨胀。1998年,美国加州大学伯克利分校劳伦斯实验室的波尔马特教授(Saul Perlmutter)领导的研究组和澳大利亚国立大学教授斯密特(Brian P. Schmidt)与赖斯(Adam G. Riess)研究组对50多颗遥远的Ia型超新星研究发现:宇宙竟然在加速膨胀!这一发现是当代宇宙学乃至物理学最重要的发现之一<sup>[2,3]</sup>。三位科学家为此获得了2006年



图1 排球在引力的作用下上升速度越来越慢

的邵逸夫奖和2011年的诺贝尔物理学奖。

## 1. 暗能量登场

宇宙近期加速膨胀现象的发现可能导致广义相对论稳态宇宙学的失效,也可能导致宇宙学新的革命。造成宇宙近期加速膨胀的机制是什么?如果假设广义相对论正确,那么需要一种新的能量成分才能解释这一现象。这种未知能量成分,通常被称为暗能量。暗能量必须具有负压强,以抵抗普通物质产生的引力,才能使宇宙加速膨胀。显然,这

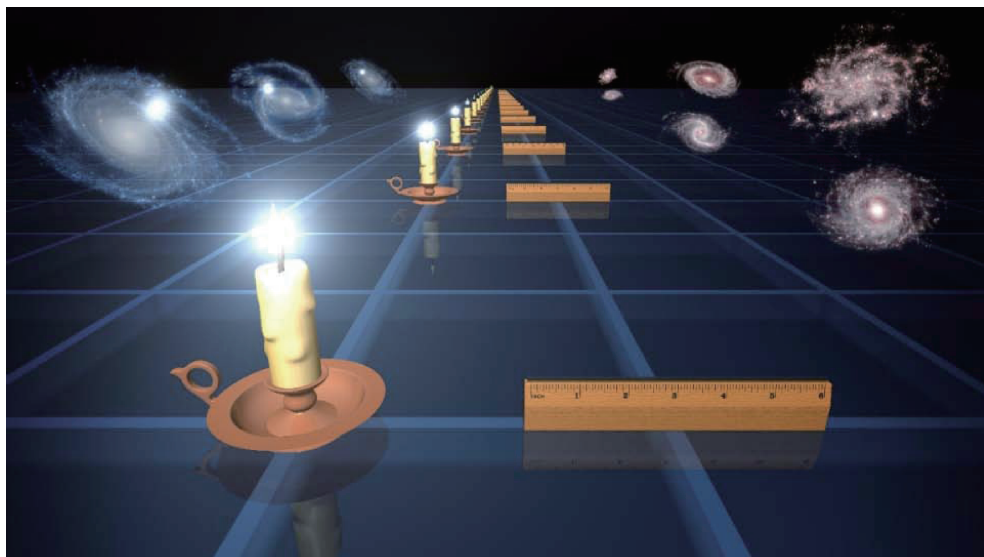


图2 标准烛光和宇宙距离阶梯

是一种非常奇怪的物质,它的本质是什么?人们一无所知。这些问题的研究进展,有可能导致新物理理论的发现。

自1998年以来,宇宙加速膨胀现象已经得到了各种天文观测和实验的证实。超新星样本数量的急剧增加,大大增强了这一发现的置信度;对于宇宙微波背景辐射的温度涨落及其极化的精确测量、大尺度结构巡天观测也都有力地证实了宇宙加速膨胀和暗能量的存在。

WMAP卫星和Planck卫星对宇宙微波背景辐射的精确观测(图3)结合其他天文观测,给出的宇宙

能量组分大致如下:暗能量约占70%,暗物质约占25%,剩余的5%是普通的重子物质<sup>[4,5]</sup>。也就是说,宇宙中约95%的成分是看不见的。寻找暗物质,揭示暗能量本质,已经成为21世纪天文学和物理学发展的两个重要方向。

## 2. 暗能量究竟是什么?

二十多年过去,科学家提出了很多种暗能量模型,然而暗能量的本质是什么,仍然是一个谜。最简单的最有理论根据的暗能量模型,是宇宙学常数模型。爱因斯坦创建广义相对论后,把它应用到宇

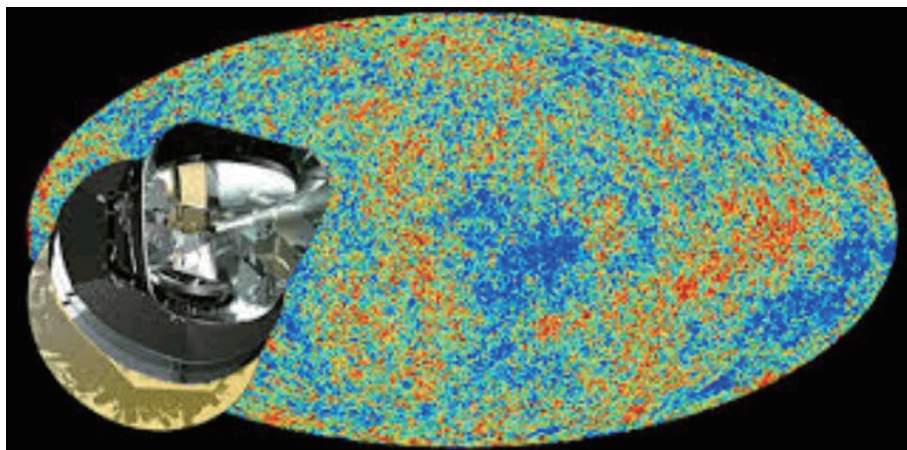


图3 WMAP观测的微波背景辐射温度各向异性全天图

宙,结果发现,宇宙不可能是稳定的。而他和牛顿一样,信仰一个稳态的宇宙。为了得到这样一个宇宙,他在现在以他名字命名的方程中加入了一个宇宙学常数项( $\Lambda$ ),以产生排斥力,抵抗普通物质产生的引力。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

这一理论——冷暗物质加宇宙学常数——几乎能解释所有的观测,科学家称之为宇宙学标准模型。如果暗能量是宇宙学常数,根据理论得到的值和观测得到的值,相差非常巨大,是一个极其巨大的天文数字。这一问题被称为宇宙学常数问题。除此之外,我和高能所的张双南研究员研究发现,宇宙学常数模型也不能解释一些古类星体的年龄问题<sup>[6]</sup>。

### 3. 标准宇宙模型的挑战

2019年,发现暗能量的赖斯利用哈勃太空望远镜对造父变星测距,结合 Ia 型超新星亮度校准,得到哈勃常数的值约为 74 km/s/Mpc<sup>[7]</sup>,而 2018 年 Planck 卫星根据宇宙学常数模型得到的哈勃常数数值约为 67 km/s/Mpc<sup>[5]</sup>,两者相差 5 个标准差。这就是所谓的哈勃冲突问题。这是另一个对宇宙学标准模型不利的证据。

2023 年,我经过对 63 个哈勃参数数据的分析发现,暗能量的密度可能不是常数,而是可能随时间演化,描述它的状态方程可能在较高红移时穿过 $-1$ <sup>[8]</sup>。这一发现让宇宙学标准模型面临更严重的挑战。

除了上面提到的哈勃冲突,当代宇宙学研究中还有一个著名的冲突: $S_8$  冲突。 $S_8$  是反映当前宇宙结构和物质分布的物理量,现在发现两种不同测量方法得出的宇宙密度分布结果不一致。通过测光巡天数据得出的结果显示宇宙的密度分布比微波背景辐射(CMB)观测预期的结果更加均匀。

为了解决这一冲突,科学家们展开了大量的分析和研究。其中,第三代大尺度巡天项目“千平方度巡天”(KiDS)发挥了重要作用。该项目组最近发布的第五次数据涵盖了约 1350 平方度的天区。他

们测量了宇宙学切变的信号,对 100 亿年前至今的大尺度结构的演化做了切片式分析。他们得到  $S_8$  值与暗能量巡天(DES)观测数据、DESI 观测数据、Planck 卫星的微波背景辐射观测数据得出的结果基本一致<sup>[9]</sup>,见图 4。

这意味 KiDS 的结果是和宇宙学标准模型相符的,但这一发现是否解决了  $S_8$  冲突还有待观察。

2025 年 3 月 20 日,全球 70 多个科研机构共同组建的暗能量光谱巡天(DES)合作组向全球公开了首年观测数据,构建了迄今最大的宇宙三维地图,包含了近 1870 万个星系、类星体和恒星的信息。宇宙学红移巡天通过测量河外天体的红移来构建宇宙物质的三维空间分布,可以为暗能量研究提供关键数据。

重子声波振荡是宇宙中可见重子物质的规则周期性密度涨落,起源于早期宇宙光子-重子等离子体中的声波振荡,退耦后声波轨迹固化形成周期性密度峰。在物质分布中形成的这种特征尺度(约 5 亿光年),可视作“标准尺”。通过测量不同红移处该尺度的实际角径,科学家可以精确推算宇宙膨胀速率的历史变化,进而分析暗能量的演化规律。DESI 合作组发现宇宙学标准模型难以解释所有观

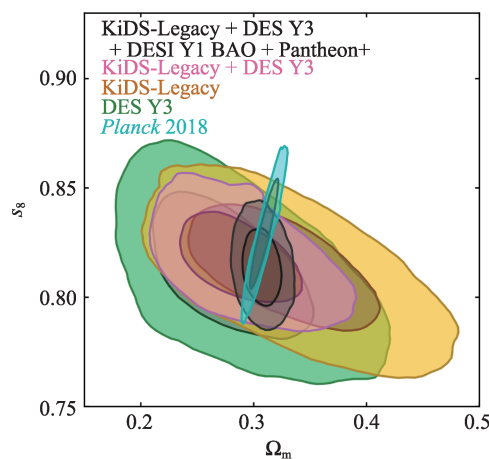


图4 观测数据对  $S_8$  和  $\Omega_m$  的约束:黄色代表 KiDS 数据限制的置信区域,绿色代表 DES 数据限制的置信区域,矢车菊蓝代表 Planck 卫星数据限制的置信区域,粉红色代表 KiDS+DES 联合数据限制的置信区域,黑色表示 KiDS+DES+DESI+Pantheon 超新星观测的联合数据限制的置信区域



测结果,而随时间变化的暗能量模型与这些数据的吻合更好。这一结果也是向标准宇宙学模型提出了挑战。

DESI 合作项目共同发言人、美国加利福尼亚大学圣克鲁斯分校教授莱奥托-哈尼特表示,研究团队看到的现象非常有趣,这意味着人类可能将迎来关于暗能量和宇宙基本性质的重大发现。

这些研究和观测,仍然有待进一步的考察和验证。暗能量有可能是宇宙学常数或真空能,也可能存在宇宙学标准模型之外的新物理。我们对暗能量的认识仍然充满迷惑。暗能量的研究,将对宇宙学产生重要影响,有助于人们更深入地了解宇宙的演化和未来命运。

## 参考文献

- [1] DESI Collaboration: A.G. Adame, etc., JCAP 02 (2025) 021.
- [2] Supernova Search Team: Adam G. Riess, etc., Astron.J. 116 (1998) 1009-1038.
- [3] Supernova Cosmology Project Collaboration: S. Perlmutter, etc., Astrophys.J. 517 (1999) 565-586.
- [4] WMAP Collaboration: G. Hinshaw, etc., Astrophys.J. Suppl. 208 (2013) 19.
- [5] Planck Collaboration: N. Aghanim, etc., Astron. Astrophys. 641 (2020) A6.
- [6] Rong-Jia Yang, Shuang Nan Zhang, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 407 (2010) 1835-1841.
- [7] Adam G. Riess, etc., Astrophys.J.Lett. 934 (2022) 1, L7.
- [8] Rong-Jia Yang, New Astron. 108 (2024) 102180.
- [9] Benjamin Stözlner, etc., e-Print: 2503.19442.

## 科苑快讯

### 科学家首次在实验室中制造出液态碳

德国罗斯托克大学(University of Rostock)、罗森多夫亥姆霍兹中心(Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR)组成的一个国际研究组开始在极端压力下研究物质。《自然》(Nature)期刊报道了他们的开创性实验成果,捕捉到了液态碳的行为。

液态碳自然存在于行星内部,可能在未来的能源技术(如核聚变)中发挥关键作用。然而碳在正常条件下不会融化,而是直接变成气体。只有在极端压力和4500℃左右的温度下,碳才能转化为液体,这是已知材料的最高熔点。因为没有任何物理容器能够承受这些条件,所以根本不可能在实验室中制备。

激光压缩提供了技术突破,汉堡附近的舍内菲尔德(schenefeld)有世界上最强大的X射线激光器欧洲XFEL,超短X射线脉冲也使实时探测液体状态成为可能。

在实验中,高能脉冲驱动压缩波穿过固体碳样品,并在纳秒( $10^{-9}$ 秒)内液化材料。同时用超短X射线

激光闪光照射。碳原子散射X射线类似于光被光栅衍射的方式,衍射图可推断出液态碳中原子的当前排列。这个实验只持续几秒钟,但要重复多次:每次都使用稍微延迟的X射线脉冲或在稍微不同的压力和温度条件下进行。许多快照组合成一部电影,就能让研究人员一步步追踪从固态到液态的转变过程。

测量结果显示,液态碳与固态钻石的体系结构相似,每个原子都有4个近邻。研究人员还设法精确缩小了熔点范围,这对行星建模和核聚变发电技术至关重要。

研究人员认为,现在拥有的工具箱可以在高度奇特的条件下以极致细节表征物质,未来只要有复杂的自动控制和足够快的数据处理,原来需要几个小时获得的实验结果仅需几秒钟就能得到。

(高凌云编译自2025年8月24日SciTechDaily网站)