

暗能量研究新进展

蔡一夫¹ 张新民^{2,3}

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

3. 中国科学院大学 100049)

近日,国际暗能量光谱巡天(DESI, Dark Energy Spectroscopic Instrument)合作组发布了关于暗能量的最新研究成果。他们发现,基于不同的数据组合,在2.8至4.2 σ 的置信区间内表明暗能量状态方程随时间演化,和爱因斯坦的宇宙学常数存在根本的矛盾,并且在演化过程中存在越过宇宙学常数限($w=-1$)的特征。

1. 暗能量状态方程

自20世纪初以来,人类对宇宙的了解以及地球在宇宙中的定位都有了极大的改变。通过了解发现太阳系所在的银河系只是众多星系中的一个,也观察到宇宙正在加速膨胀。基于此我们发展出了一套理论模型,即广义相对论,用来准确地解释对宇宙的观测,以及宇宙是如何从过去高温、高密度的时期演化成为我们现在所观测到的网状星系结构。

尽管这一理论如此的成功,它还是未能解答一些基本问题。其中两个问题与宇宙中的能量有关:普通物质只占了宇宙总能量的5%;暗物质占了27%,且只能通过其引力效应来推断;而造成宇宙加速膨胀的暗能量,则占了68%。

自1998年发现宇宙加速膨胀后,对暗能量物理本质的探讨是物理和天文界一个重大的科学前沿。暗能量不同于普通物质或暗物质,它具有负压的特性,既不发光也不吸收光,因此无法直接观测。它的存在只能通过其对宇宙膨胀的影响间接推断出来。在过去的二十多年间,国内外科学家提出了多种理论来诠释暗能量,其中最常用的就是宇宙学常数暗能量,即在爱因斯坦场方程中人为添加一个常数项用来解释宇宙的加速膨胀。宇宙学常数暗能

量加上冷(非相对论性)暗物质构成了我们当前宇宙学常用的“标准”模型, Λ CDM模型。

描述暗能量物理属性的一个重要量是它的状态方程 w (即压强与能量密度之比),不同的暗能量模型将预言不同的状态方程 w 的演化行为。比如,对于宇宙学常数来说, w 不随时间变化并且 $w=-1$ 。对于动力学暗能量模型来说, w 是随时间而变化的,但不同模型预言的变化区间不一样:Quintessence(译为精质)理论预言 $w \geq -1$,Phantom(译为幽灵)理论预言 $w < -1$,而Quintom(译为精灵)理论则预言 w 在宇宙演化过程中越过-1。

2. 国际暗能量光谱巡天 DESI

DESI是一个由美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室牵头,包含了全球70多家机构的900余名科研人员共同参与的国际暗能量实验,其位于美国亚利桑那州基特峰国家天文台的4米Mayall望远镜上,通过收集遥远星系、类星体以及星际间氢气云的光谱数据,构建了迄今为止最精确的三维宇宙地图。DESI项目的核心目标是通过观测重子声波振荡(BAO)和红移空间畸变(RSD)来研究暗能量的性质,其中BAO(重子声波振荡)是宇宙大尺度结构中由早期声波形成的周期性密度波动,可作为“标准尺”测量宇宙膨胀历史,而红移畸变是由于星系本动速度导致其在红移空间的位置分布扭曲,用于研究物质分布和引力增长速率。DESI合作组利用目前最大规模的宇宙三维地图(涵盖近1,500万个星系与类星体)追踪了过去110亿年间暗能量对其演化所产生的影响,通过测量大约四千万个星系的位置以及它们的退行速度,综合分析宇宙微波背景辐

射(CMB)、超新星(supernova)等数据来对暗能量状态方程 w 进行联合限制。

一般来说,暗能量状态方程 $w(z)$ 为红移 z 的函数。但在数据拟合时,DESI合作组首先采用了参数化的方法,他们引入两个参数 w_0 和 w_a ,暗能量状态方程 $w(z)$ 定义为 $w(z) = w_0 + w_a * z / (1 + z)$,由此测定了 w_0 和 w_a 就确定了暗能量状态方程 $w(z)$ 的演化行为。

3. 实验结果与 Quintom 理论

图1是DESI合作组给出的 w_0 和 w_a 的二维联合分布图。其中,DESI结合CMB和DESY5给出最好的测量结果,最高在 4.2σ 置信度上排除了宇宙学常数作为暗能量的理论模型。其中 w_0 和 w_a 的最佳拟合值分别为 -0.752 和 -0.86 ,由此给出暗能量状态方程在高红移时 $w < -1$,低红移时 $w > -1$,在红移 $z \sim 0.4$ 时越过 -1 。图2,DESI合作组使用一种非参数化的方法,高斯过程(GP),即假设暗能量的状态方程在不同红移处满足多维正态分布,模型无关地重构出了暗能量状态方程的演化。其中虚线代表了 Λ CDM模型,蓝色代表了误差范围,颜色的深浅代表了误差的多少,黄色代表了最佳拟合的线性参数化的 $w(z)$ 的演化。图3,中国国家天文台团队联合DESI合作组使用了一种由独特的,基于贝叶斯统计的重构方法,给出了暗能量状态方程的演化,其中蓝色部分代表了重构的结果以及其68%的置信区间,绿色的范围代表了根据 $w_0 w_a$ 参数化给出的最佳拟合曲线。

1) 状态方程穿越

图1,图2和图3都显示暗能量状态方程是随红移而变化的,并且在演化过程中越过宇宙学常数线。特别是图2和图3尤为直观清晰,展示了暗能

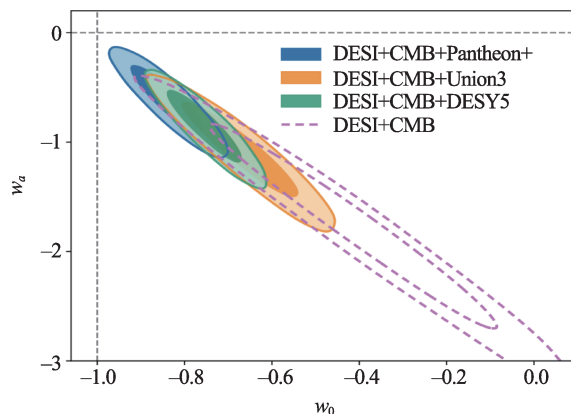


图1 源自 *DESI Collaboration, DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints, arXiv. 2503.14738*

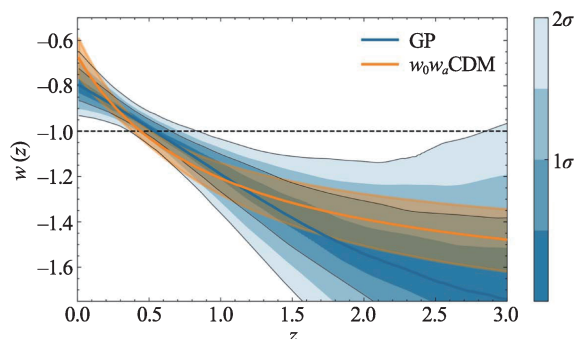


图2 源自 *DESI Collaboration, Extended Dark Energy analysis using DESI DR2 BAO measurements, arXiv. 2503.14743*

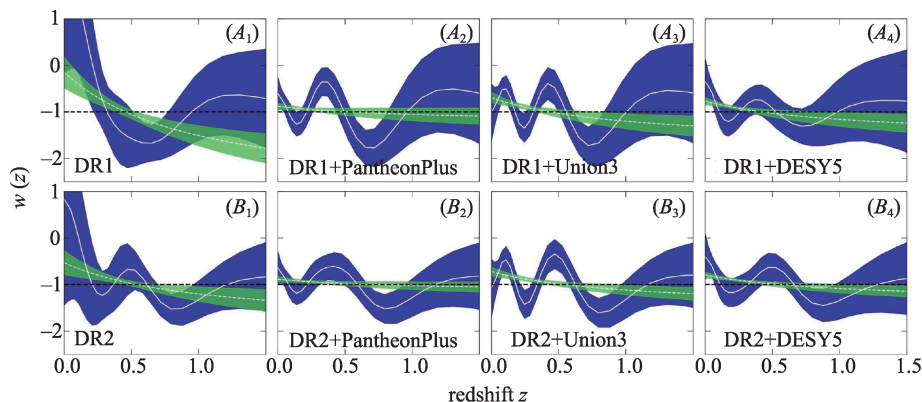


图3 源自 *Gan Gu et.al, Dynamical Dark Energy in light of the DESI DR2 Baryonic Acoustic Oscillations Measurements, arXiv. 2504.06118*

量状态方程随时间演变的过程,明确指向了穿越-1的现象,与 Quintom 理论的预言是一致的。

2) Quintom 暗能量理论

Quintom 暗能量理论最早于 2004 年在国际上首次提出[arXiv. astro-ph/0404224]。随后这一特殊的暗能量现象迅速引起了广泛的研究,并于 2010 年首次系统地给出暗能量止步定理的证明[arXiv.0909.2776],其严格限制了一般的理想流体和非最小耦合的单标量场模型实现越过-1的情况。在过去的二十年间,一批中国的宇宙学家围绕 Quintom 理论进行了深入的研究,引领了状态方程越过-1的暗能量理论的国际研究前沿。2010 年,国际权威综述期刊《Physics Reports》登载专文介绍了

Quintom 宇宙学[arXiv.0909.2776]。随着 DESI 数据的发布,Quintom 暗能量的研究迎来另一波热潮。

4. 两暗乌云仍在飘荡

暗物质和暗能量的存在被称为 21 世纪现代物质科学中两朵新的“乌云”,科学家们至今仍未清楚它们的本质到底是什么。DESI 的发现为理解暗能量的本质提供了新的视角。尽管目前的对于动力学暗能量的偏向结果尚未达到 5σ 的统计显著性,但不久的将来,随着 DESI 的持续运行以及更多数据的积累,科学家们有望进一步揭示暗能量的秘密。同时,即将开展的天文实验,如 Euclid、LSST 等天文大科学装置也将为检验暗能量理论提供更精确的观测数据。

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神,设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者,以公众喜闻乐见的文字,深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事,共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

2025 年《现代物理知识》每期定价 15 元,全年 6 期 90 元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款:

2010~2021 年单行本每期 10 元;2022~2024 年单行本每期 15 元;2010~2021 年合订本每本 60 元,2022~2023 年合订本每本 90 元。

订阅方式

- (1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)
名称:中国科学院高能物理研究所
开户行:工商银行北京永定路支行
账号:0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;淘宝、微信购买二维码:



淘宝网购刊



微信购刊