



Quintom Theory Of Dark Energy After DESI DR2

暗物质暗能量研究现状发展趋势及对策专题研讨会

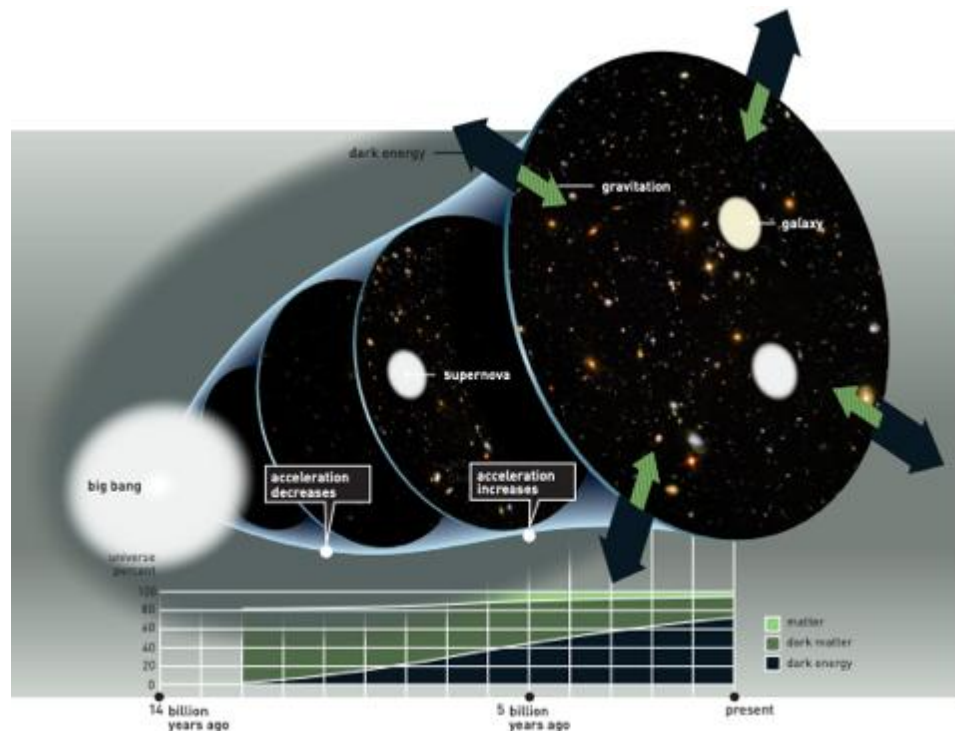
汇报人：蔡一夫

2025年6月25日

Chapter 1: 暗能量

- 暗能量的发现
- 从宇宙学常数到动力学暗能量

我们的宇宙在加速膨胀!



白矮星通过质量吸积机制塌缩爆炸时的质量相同，因此Ia型超新星能产生稳定的峰值亮度，从而超新星的视星等主要取决于距离因素，这类爆炸现象可作为测量其所处星系距离的**标准烛光**。

2011年诺贝尔物理学奖



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Saul Perlmutter

分享1/2



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt

分享1/4



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Adam G. Riess

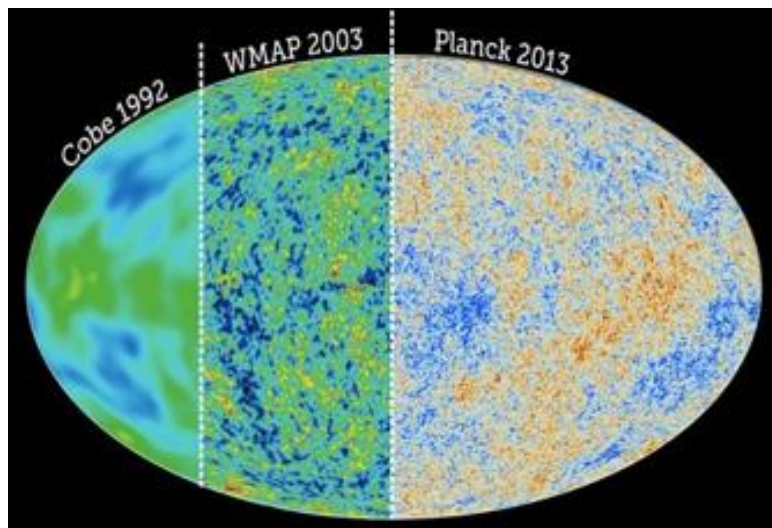
分享1/4

“因观测遥远超新星发现宇宙加速膨胀而获奖”

观测窗口

曾经试图测量减速参数 q , 发现其为**负**!

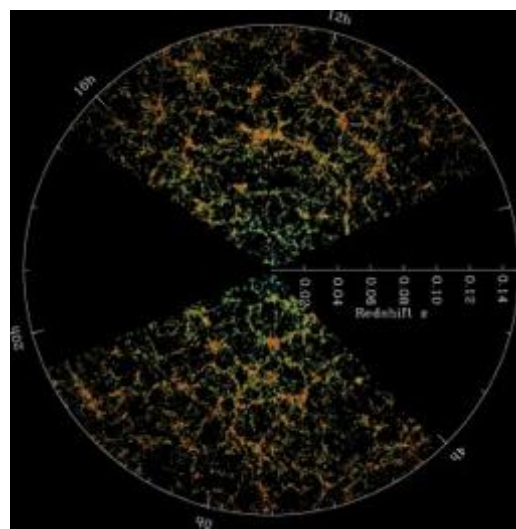
什么机制导致宇宙加速膨胀? → 提出**暗能量**的概念



宇宙微波背景辐射 (CMB):

原初扰动的直接探测

时期: 宇宙年龄 0.003%



重子声波振荡 (BAO):

大尺度结构的直接探测

时期: 二者之间



超新星 (SN):

宇宙膨胀的直接探测

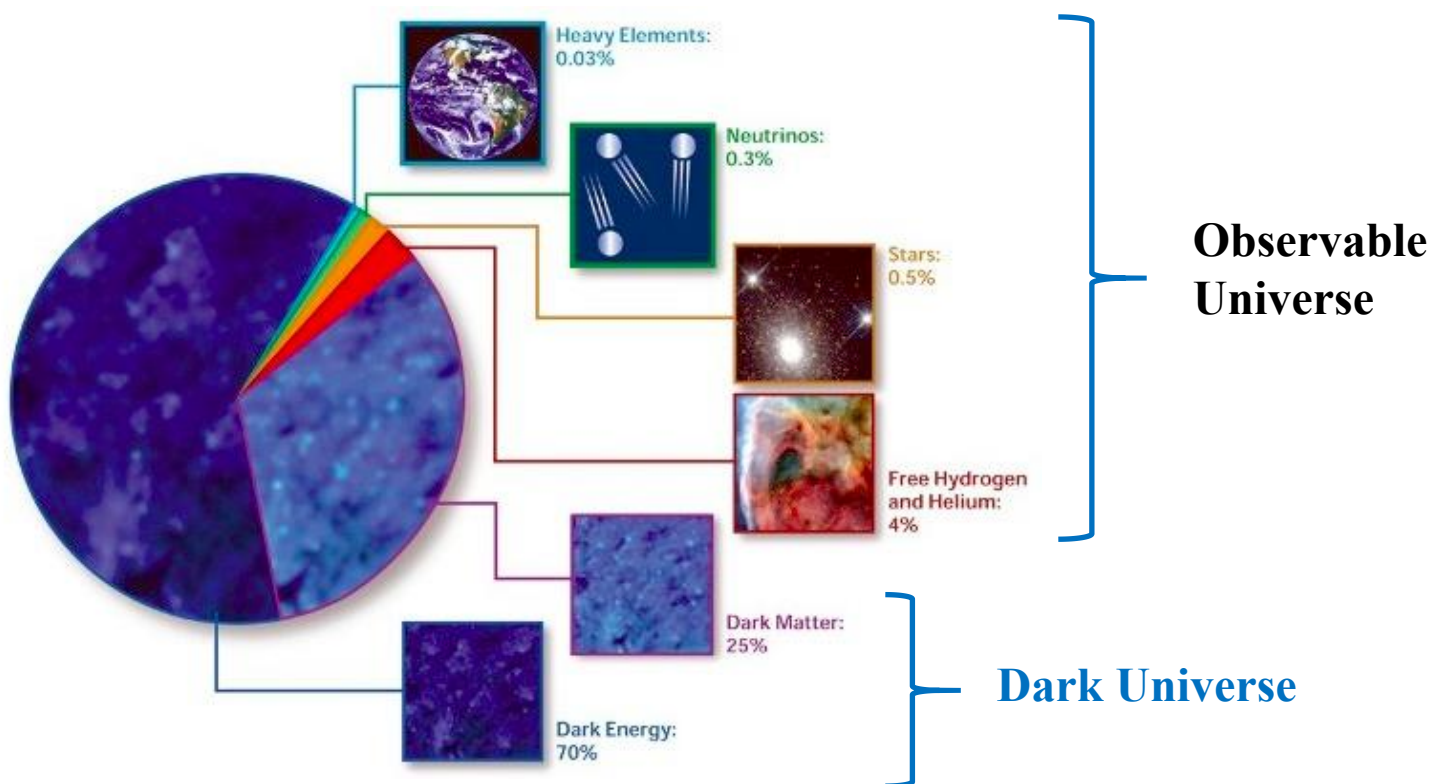
时期: 宇宙年龄 30-100%

宇宙学常数

宇宙学常数是解释宇宙加速膨胀最简洁的暗能量模型

➤ 标准宇宙学模型（ Λ CDM 模型）：

Λ 表示宇宙学常数 其状态方程参数为 $w_{\text{de}} = -1$ ，能量密度恒定 $\rho = \rho_{\Lambda}$

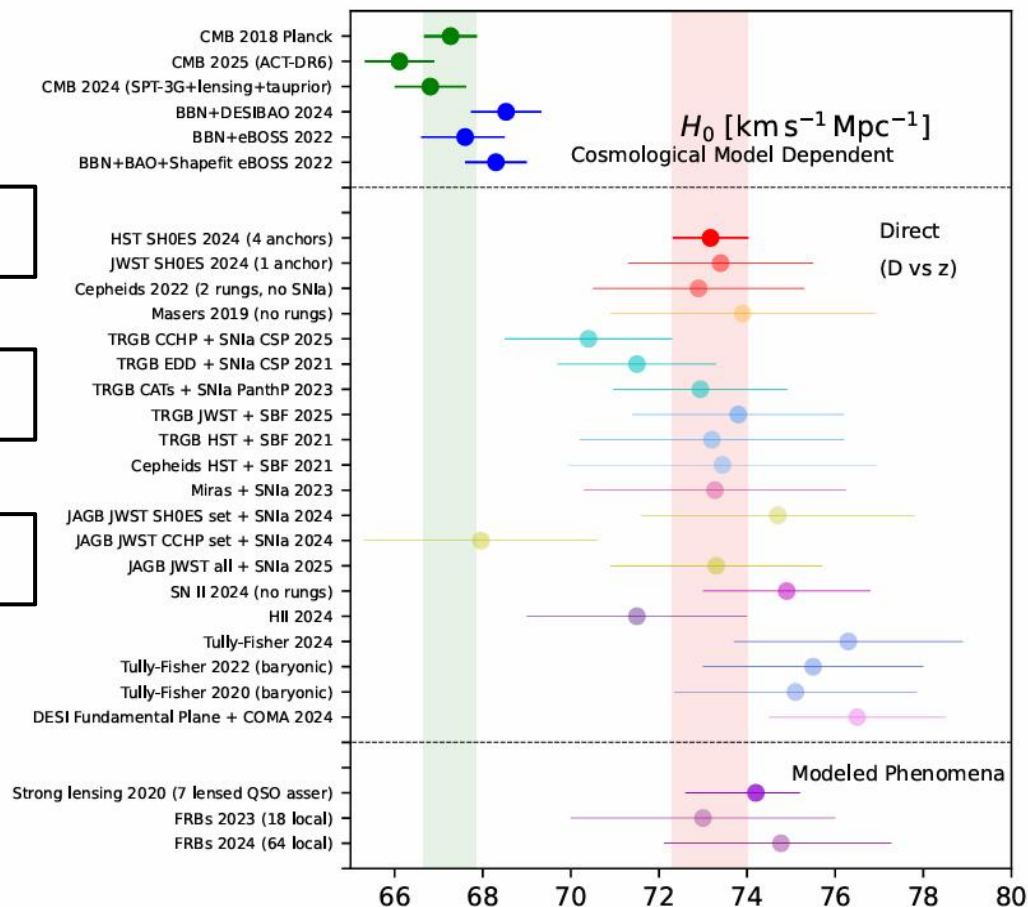
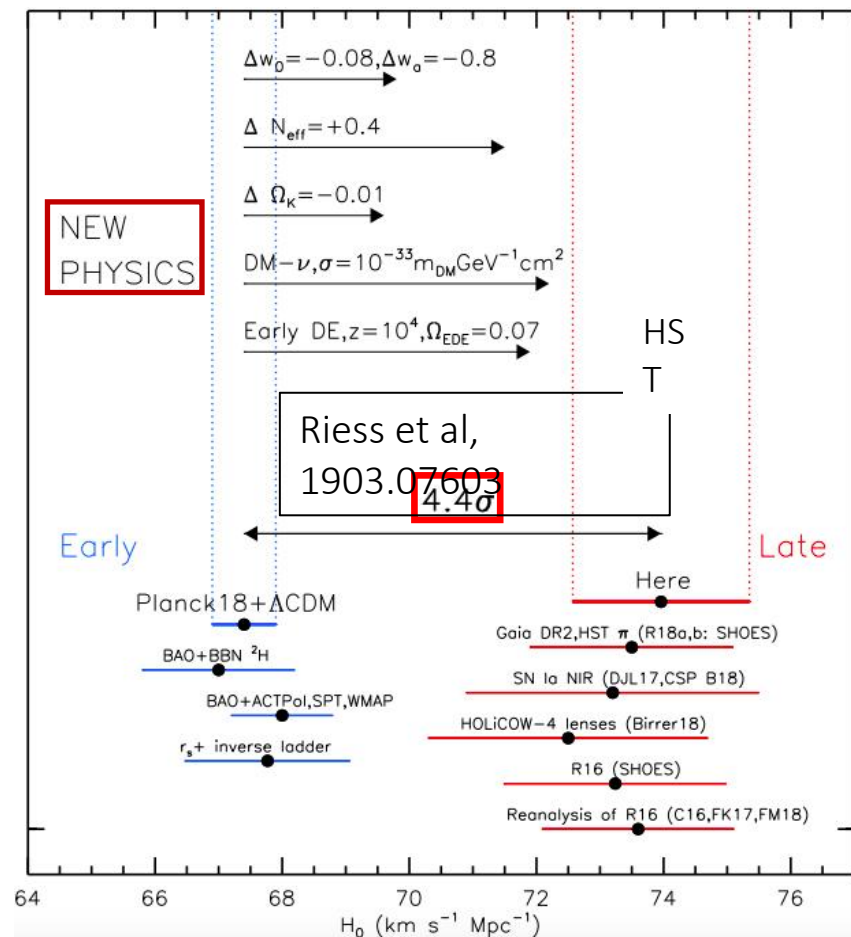


Λ CDM真的是标准的吗？

观测：哈勃争议

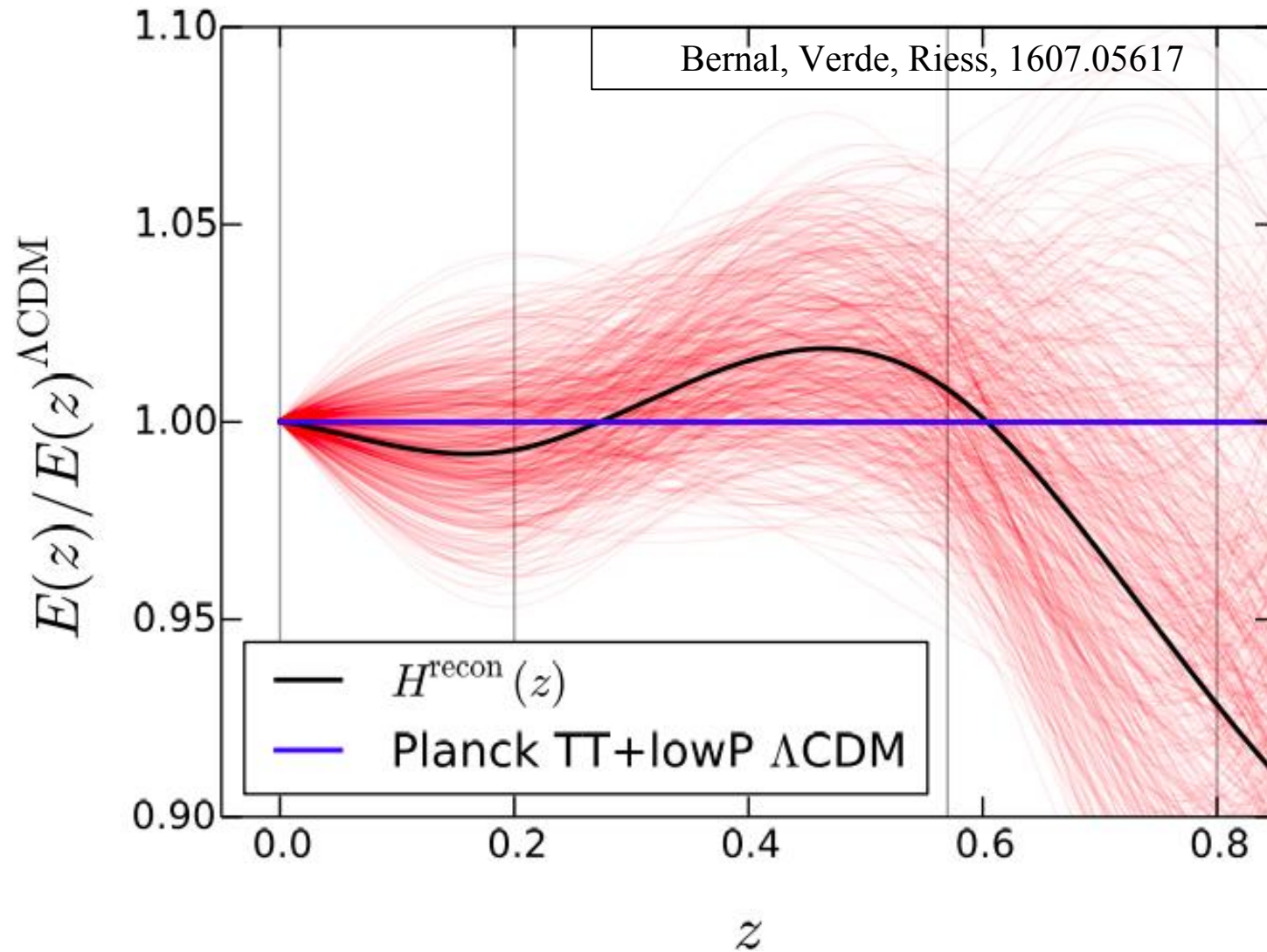
Riess, 1801.01120 ; Valentino et al, 2103.01183; Abdalla et al, 2203.06142; ...

CosmoVerse Collaboration, 2504.01669



标准 Λ CDM模型似乎不再那么”标准”！ 我们是否需要新的物理学理论, 即 **动力学暗能量**?

观测：哈勃争议



CYF, Khurshudyan, Saridakis, 1907.10813 on reconstruction;
CYF, et al, 1909.06388 on effective field theory

暗能量动力学类型

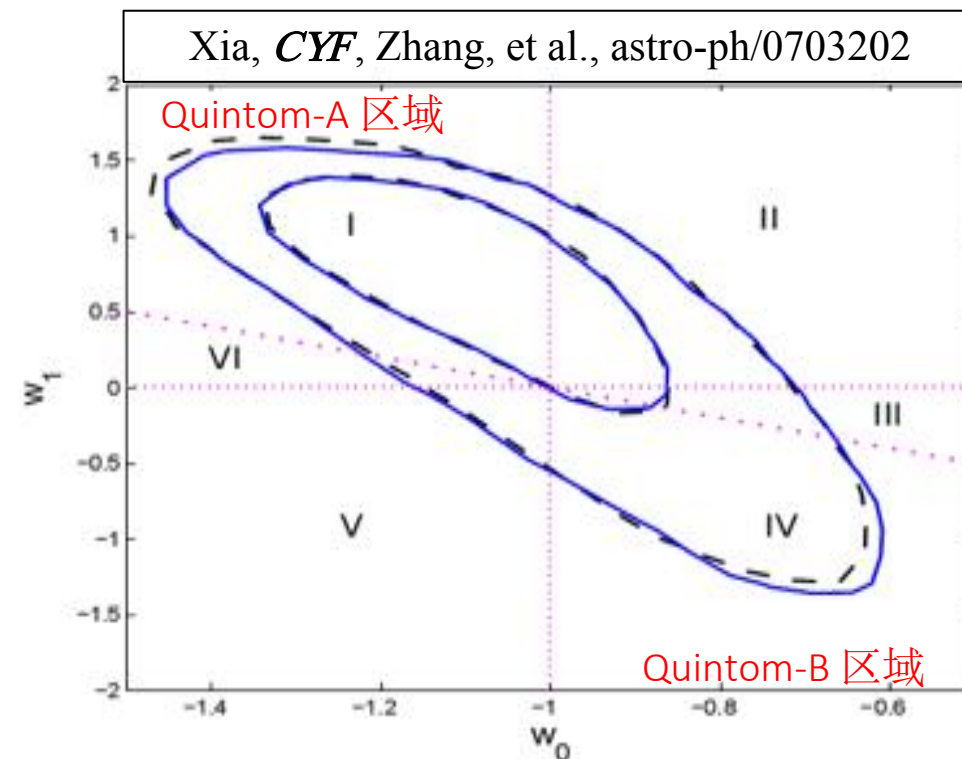
暗能量的动力学演化特性关键性地取决于状态方程参数 w ，即压强与密度的比值

一类简单的参数化:

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a) ,$$

分类:

- Λ : $w=-1$ Λ CDM
- Quintessence (精质): $-1 < w < -1/3$ II 和 III
- Phantom (幽灵): $w < -1$ V 和 VI
- Quintom (精灵): w 穿过 -1 I 和 IV



Feng, Wang, Zhang, astro-ph/0404224; Hu, astro-ph/0407158; Huterer, Cooray, astro-ph/0404062; Xia, et al., astro-ph/0511625; Zhao, et al., 1207.3804, 1701.08165, 2504.06118;

Chapter 2 : DESI结果对精灵模型的支持

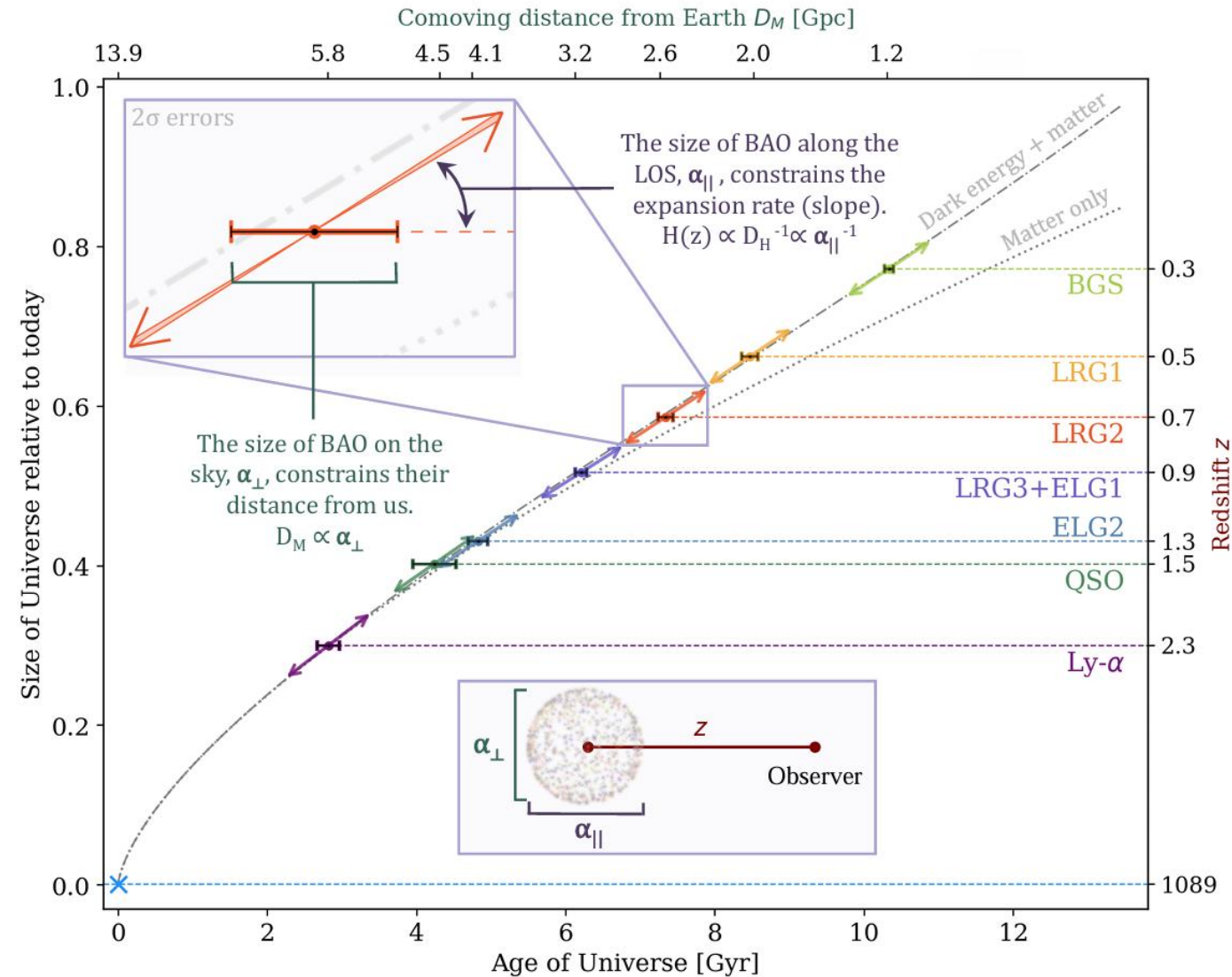
- DESI实验组的结果
- 基于DESI观测数据的数据重构

BAO data

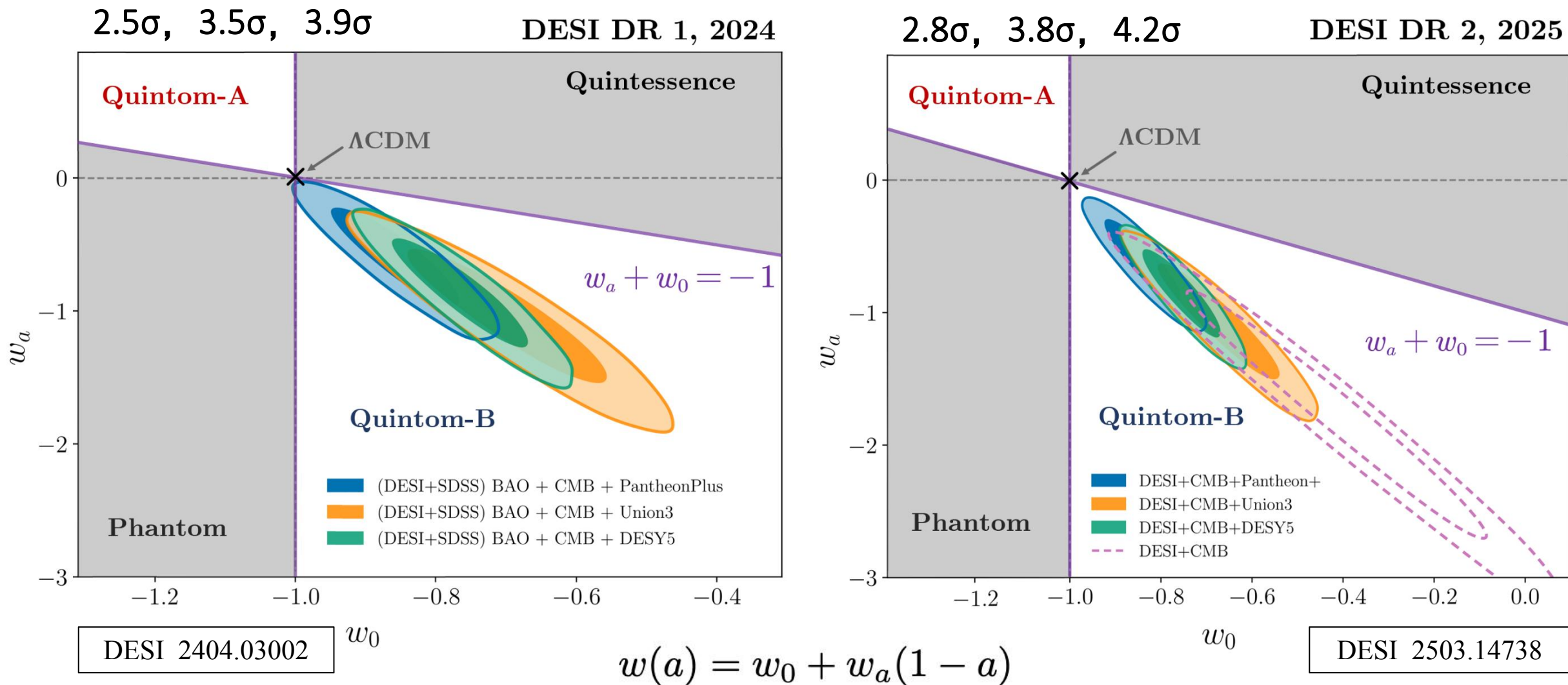


© 2023 DESI Collaboration. All rights reserved.

DESI Collaboration,
2503.14738,
2404.03000,
2404.03001,
2404.03002



近期观测



DESI 观测显示出对于 Λ CDM的偏离
这是否暗示新的暗能量理论, 即**Quintom-B** 类型动态暗能量?

高斯过程

暗能量状态方程的演化:

➤ Λ CDM

$$w = -1$$

➤ w CDM

$$w = \text{const}$$

➤ $w_0 w_a$ CDM

$$w = w_0 + w_a(1 - a)$$

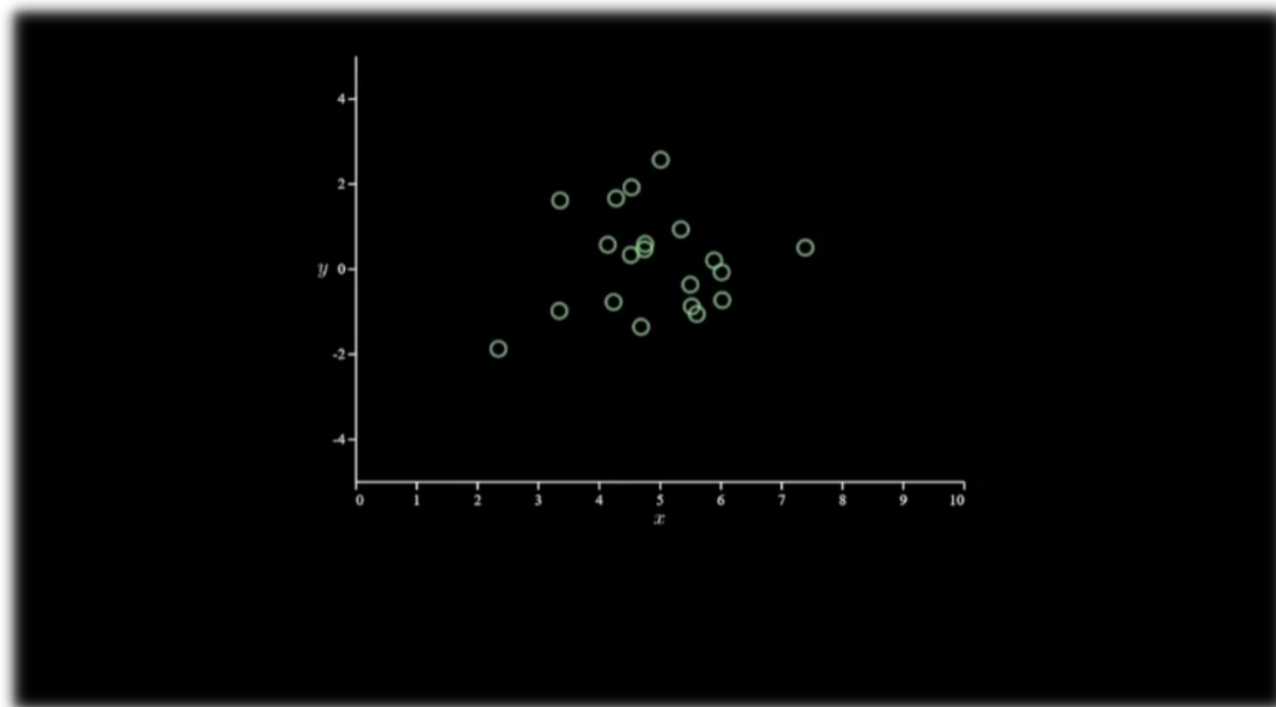


➤ $w(z)$ CDM

更加一般的非参数化 $w(z)$

如何得到不依赖于参数形式的 $w(z)$?

从线性回归到贝叶斯线性回归



高斯过程

方法: **高斯过程** (Gaussian Process)

Seikel, et al., 1204.2832; Shafieloo, et al., 1204.2272

通过观测数据获取函数高斯分布的随机建模方法

➤ 关键点:

观测数据: 在不同红移处独立带误差棒的数据点,

$$y = \{y(x) : x \in \mathcal{X}\}$$

考虑所有 $n \in \mathbb{N}$ 的有限维分布 (FDDs) ,

$$\mathbb{P}(y(x_1) \leq c_1, \dots, y(x_n) \leq c_n)$$

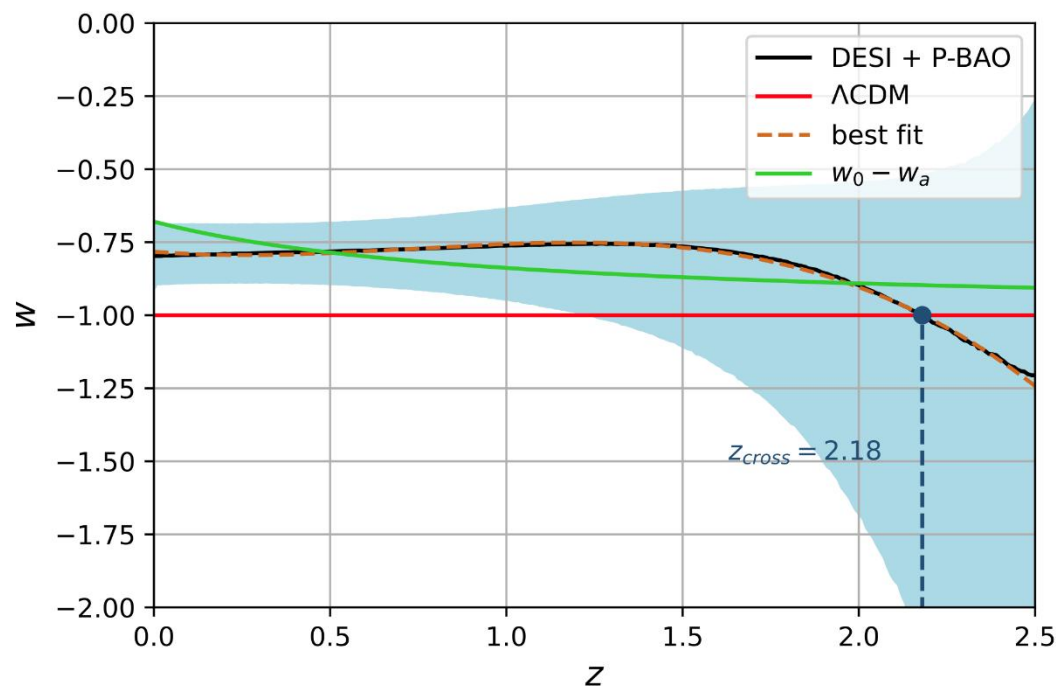
高斯过程: 一种具有高斯有限维分布的随机过程,

$$(y(x_1), \dots, y(x_n)) \sim N_n(\mu, \Sigma)$$

使用GAPP (Gaussian Processes in Python)程序包, 通过观测数据重构 $H(z)$ 及 $w(z)$ 。

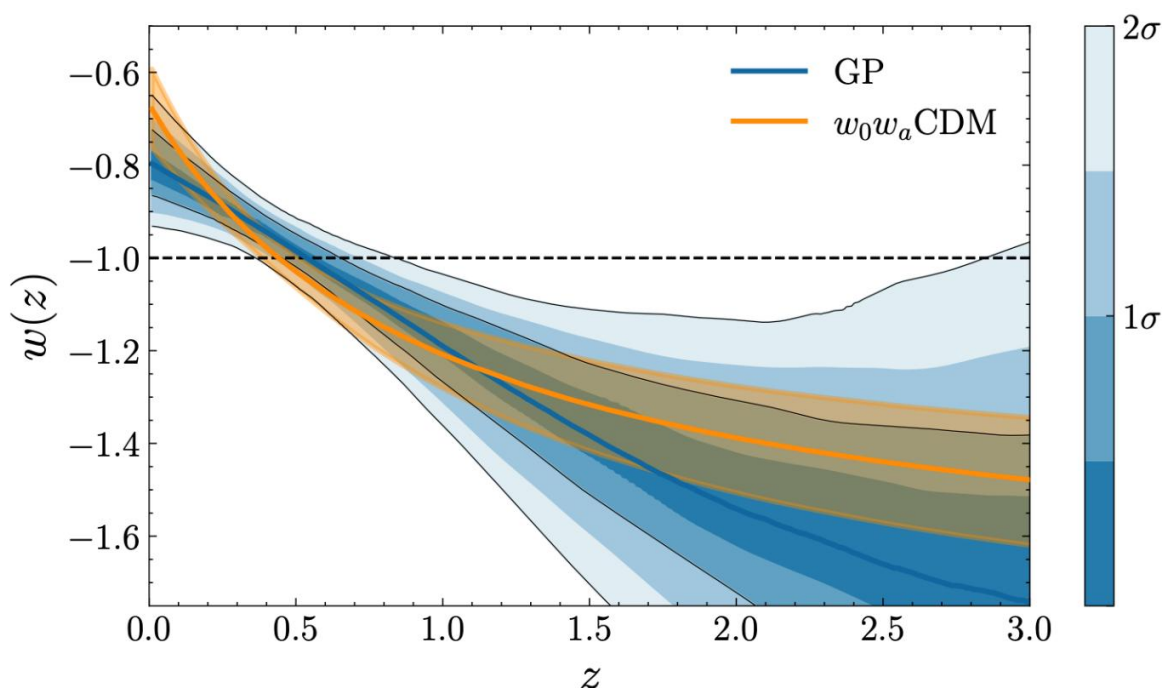
$w(z)$ 的非参数化方法重构

2024年蔡一夫团队通过高斯过程方法分析DESI DRI数据，首次**重构**发现疑似“**Quintom-B**”的暗能量动力学行为(2024, Sci.Bull. 69, 2698)，该工作在2025年被DESI组引用，DESI组也使用高斯过程方法对DESI DR2数据进行研究。



之前的BAO数据 + DESI DRI BAO (2024)

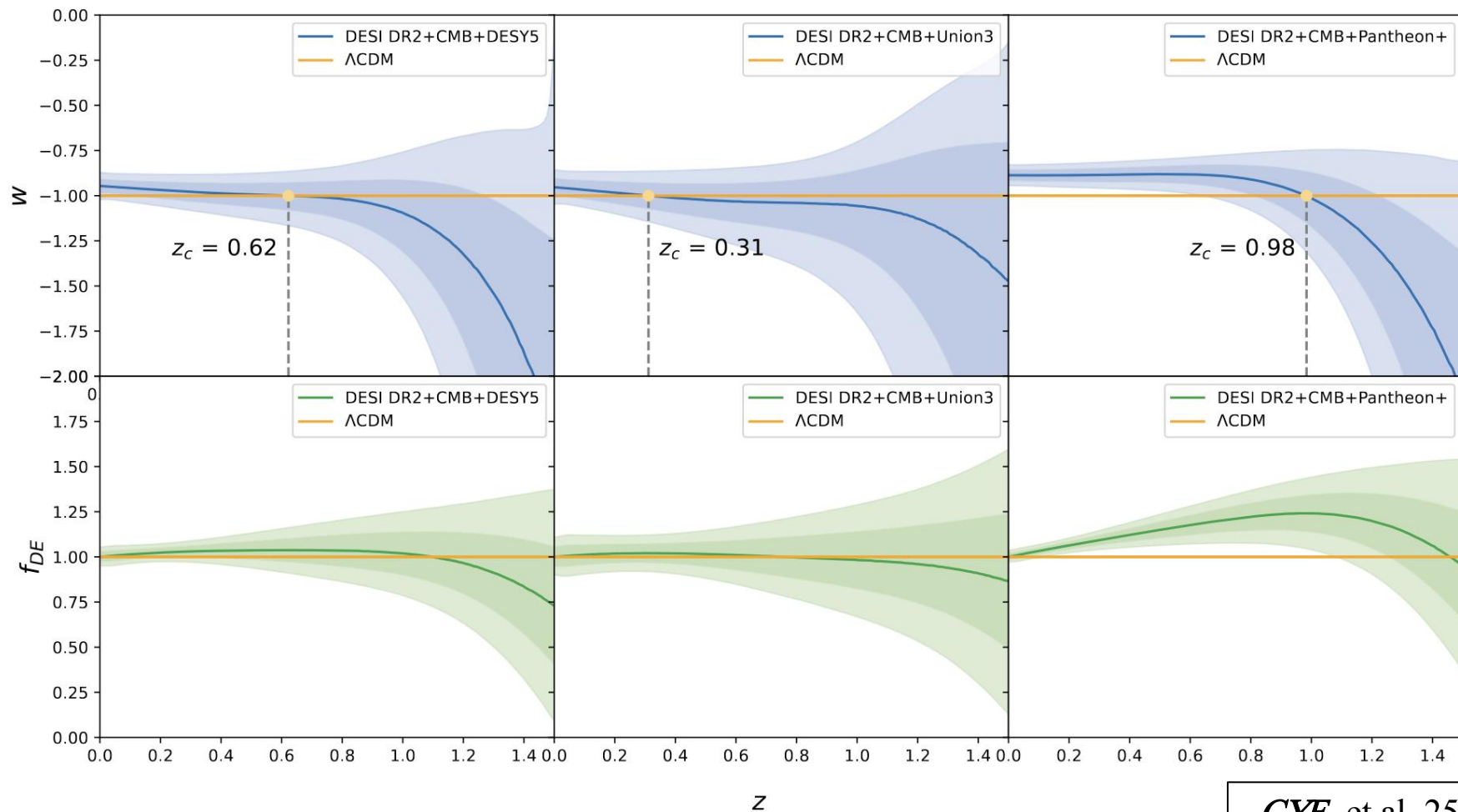
CYF, et al., 2404.19437



DESI DR2 BAO + CMB + Union3 (2025)

DESI Collaboration, 2503.14743

$w(z)$ 的非参数化方法重构

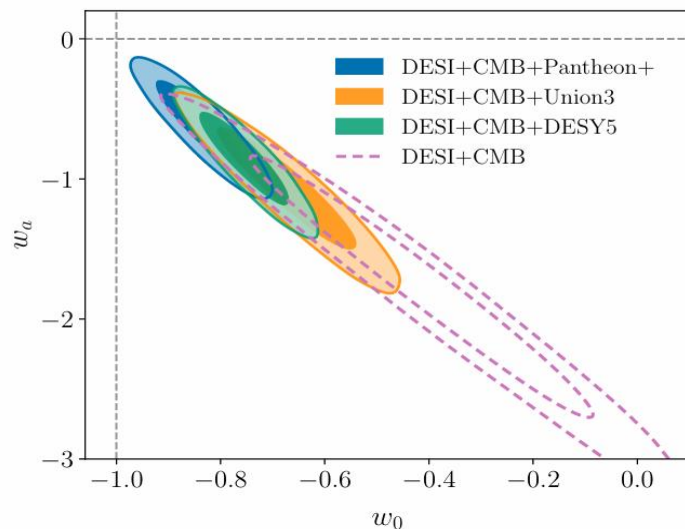


CYF, et al. 2504.06784

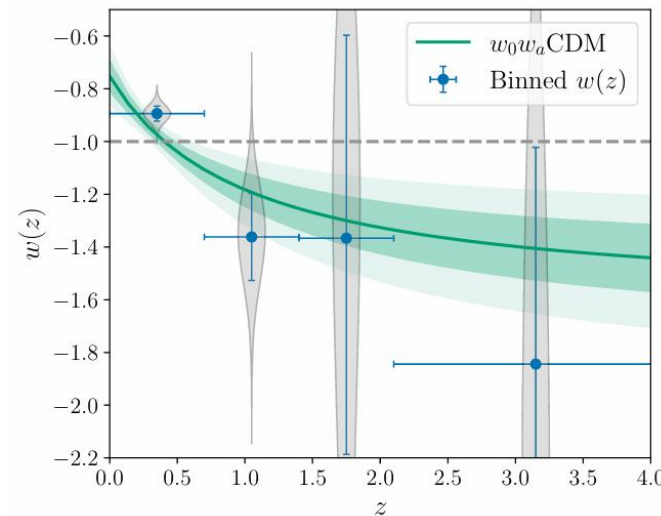
利用最新的DESI DR2的数据对其进行限制
我们发现 $w(z)$ 总是从下方穿过-1，从而表现出Quintom-B行为。

不同分析的一致性

- $w_0 - w_a$ 参数化: DESI Collaboration, 2503.14738

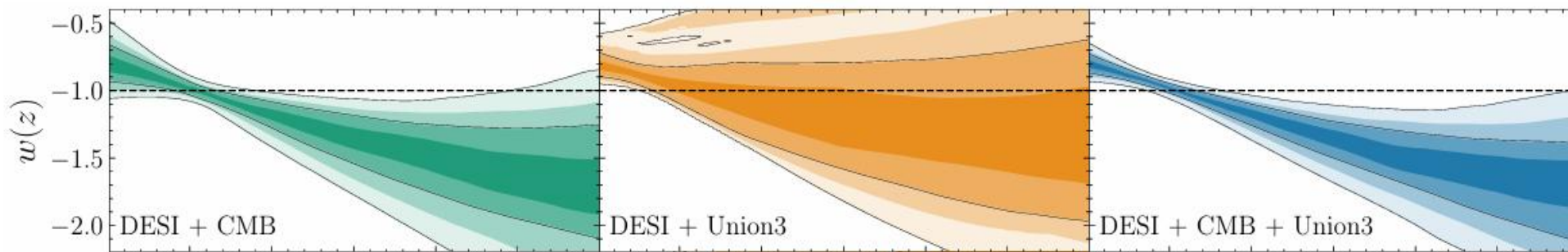


- 分区间重构:



- 高斯过程重构 (DESI 2025): DESI Collaboration, 2503.14743

都是Quintom-B!



如何从理论上理解并实现这种Quintom-B动力学行为?

Chapter 3: 精灵暗能量的模型实现

- No-Go定理
- 理论模型实现
- 未来展望

止步定理 (No-Go Theorem)

➤ 止步定理

在**3+1 维平坦FLRW宇宙**中，假如暗能量理论由具有一般K-essence拉格朗日量的**单一理想流体**或者**单标量场**描述，并且与广义相对论(GR) **最小耦合**，那么其状态参数**不能穿过 $w=-1$ 幽灵分界线**

➤ 证明概要

- 对于单理想流体：当 w 穿越 -1 时，声速发散

$$c_s^2 \equiv \frac{\delta p}{\delta \rho} = w - \frac{\dot{w}}{3H(1+w)}$$

- 对于正则单标量场：扰动的普遍色散关系同样在穿过 $w=-1$ 时发散

$$\omega^2 = c_s^2 k^2 - \frac{z''}{z} \quad z \equiv \sqrt{\phi'^2 |\rho, X|}$$

CYF et al., 0909.2776;
Feng et al., astro-ph/0404224; Vikman,
astro-ph/0407107;
Hu, astro-ph/0407158;
Xia, *CYF*, Zhang, et al., astro-ph/0703202

Quintom的模型构造

要实现越过 $w=-1$ 线的动力学，应该至少打破暗能量止步定理中的一个条件

见最新综述文章：

CYF, Xin Ren, Taotao Qiu, Mingzhe Li, Xinmin Zhang.

[The Quintom theory of dark energy after DESI DR2](#) arxiv:2505.24732 [astro-ph.CO]

可能模型：

- 多标量场—Feng et al., astro-ph/0404224; Hu, astro-ph/0410680 ...
- 高阶导数—Li et al., hep-ph/0503268; Matsumoto, 1712.10015 ...
- 修改引力—Tsujikawa et al., 0705.0396; *CYF*, et al., 2404.19437...
- 费米场—*CYF*, et al., 0806.3890; Dil 1610.07870 ...
- 有效场论形式—Gubitosi et al., 1210.0201; *CYF*, et al., 1803.09818, 2505.24732 ...
- 与中微子、暗物质相互作用—Wang, et al., hep-th/0506069; Khoury, et al., 2503.16415, ...

多标量场模型

第一个**Quintom**暗能量模型是张新民老师于**2004年4月**提出

Feng, Wang, Zhang,
astro-ph/0404224

➤ 作用量形式为:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} \nabla_\mu \phi \nabla^\mu \phi + \frac{1}{2} \nabla_\mu \sigma \nabla^\mu \sigma - V(\phi, \sigma) \right]$$

➤ 有效能量密度 ρ , 有效压强 p 和有效状态方程参数 w 为:

$$\rho = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 + V(\phi, \sigma), \quad p = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 - V(\phi, \sigma),$$

$$w = \frac{p}{\rho} = \frac{\dot{\phi}^2 - \dot{\sigma}^2 - 2V(\phi, \sigma)}{\dot{\phi}^2 - \dot{\sigma}^2 + 2V(\phi, \sigma)}$$

➤ 广义的多标量场模型也可实现Quintom行为:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} \sum_i \epsilon_i \nabla_\mu \phi_i \nabla^\mu \phi_i - V(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n) \right] \quad w_{\text{total}} = \frac{\sum_i \epsilon_i \dot{\phi}_i^2 - 2V(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)}{\sum_i \epsilon_i \dot{\phi}_i^2 + 2V(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)}$$

高阶导数标量场模型

在DHOST、Horndeski以及Galileon等理论中，特殊的作用量形式可以实现高阶导数单标量场Quintom模型，使动能项 X 与高阶导数项 ϕ 形成耦合，从而使状态方程能够穿越-1，并且不出现如鬼场不稳定性等问题。

$$L = -X + c_1 X \square \phi + c_2 X \phi^2$$

有效能量密度 ρ ，有效压强 p 和有效状态方程参数 w 为：

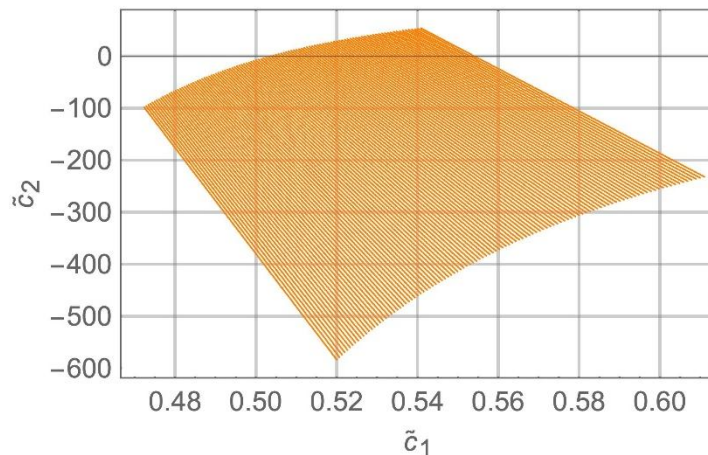
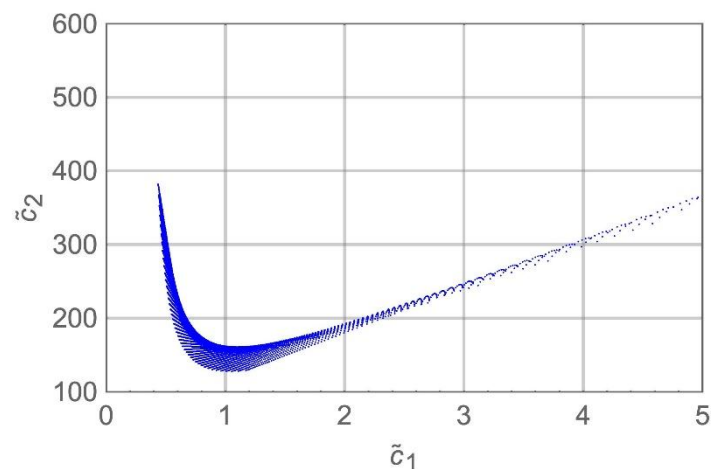
$$\rho = (c_2 \phi^2 - 1 + 6c_1 H \dot{\phi}) X ,$$

$$p = (c_2 \phi^2 - 1 - 2c_1 \ddot{\phi}) X ,$$

$$w \equiv \frac{p}{\rho} = \frac{c_2 \phi^2 - 1 - 2c_1 \ddot{\phi}}{c_2 \phi^2 - 1 + 6c_1 H \dot{\phi}} ,$$

Li et al., hep-ph/0503268;
Li et al., 1112.4255;
CYF et al., hep-th/0701016;
Matsumoto, 1712.10015;

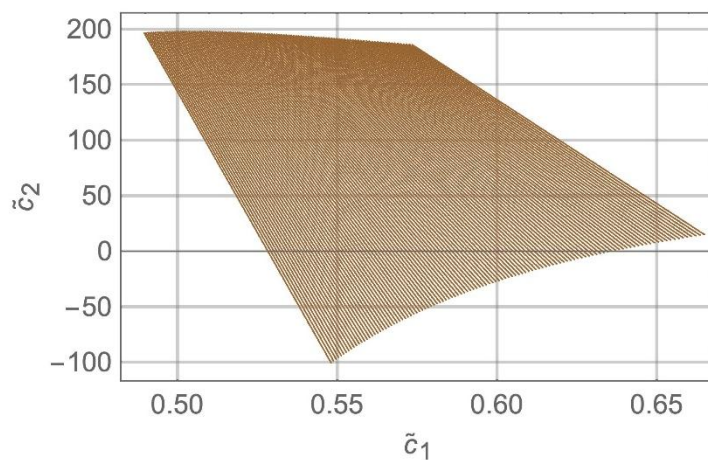
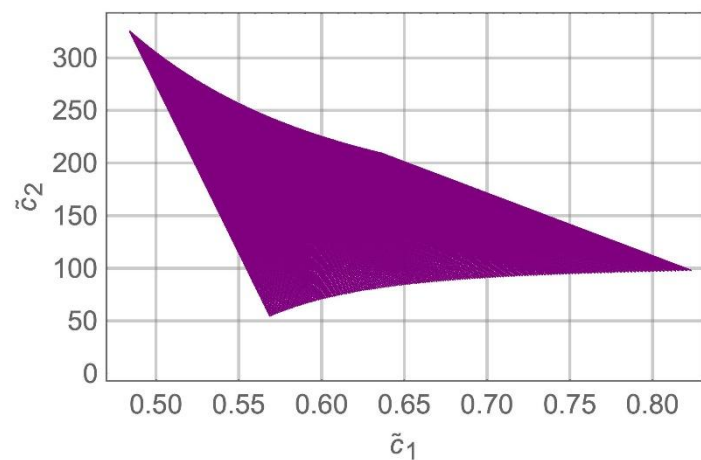
高阶导数标量场模型



$$w \equiv \frac{p}{\rho} = \frac{c_2 \phi^2 - 1 - 2c_1 \ddot{\phi}}{c_2 \phi^2 - 1 + 6c_1 H \dot{\phi}},$$

$$\phi' = A/aH^2 \quad \text{'表示对 } a \text{ 的导数}'$$

$$\tilde{c}_1 \equiv c_1 A, \quad \tilde{c}_2 \equiv c_2 A^2$$



基于不同数据组合分别对系数 $\tilde{c}_1$ 和 $\tilde{c}_2$ 的约束结果:

- DESI +CMB (蓝色)
- DESI+CMB+Pantheon+ (橙色)
- DESI+CMB+Union3 (紫色)
- DESI+CMB+DESY5 (棕色)

该模型存在充分的参数空间能够良好地拟合当前观测数据

修改引力模型

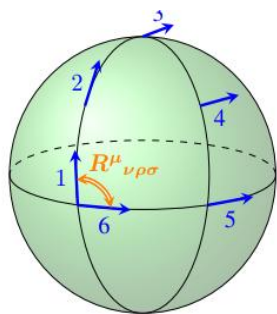
➤ 度规-仿射 引力理论

度规-仿射 { $f(R)$ 引力——曲率
 $f(T)$ 引力——挠率
 $f(Q)$ 引力——非度规

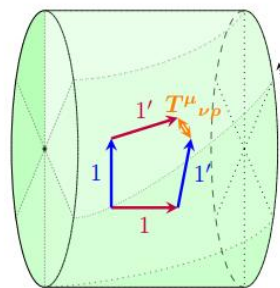
对于 coincident gauge 下（所有联络都为零）的 $f(Q)$ 引力理论，其宇宙学背景演化与 $f(T)$ 引力理论的表现形式一致

一般的作用量形式，X 代表 R, T 或者 Q

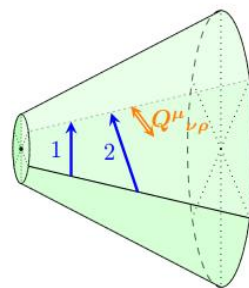
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} f(X) + \mathcal{L}_m \right],$$



曲率



挠率

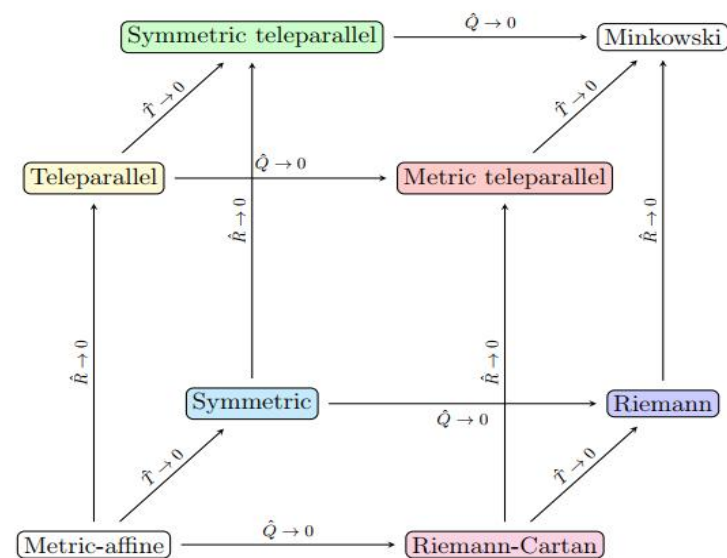


非度规

时空几何



Bahamonde et al., 2106.13793



度规-仿射 时空

修改引力模型

- 通过高斯过程可以对多个修改引力模型进行数据重构

CYF et al., 2404.19437

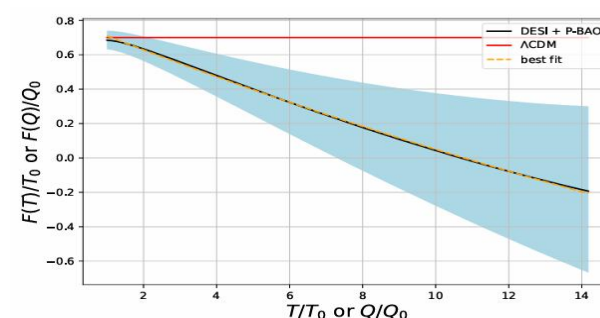
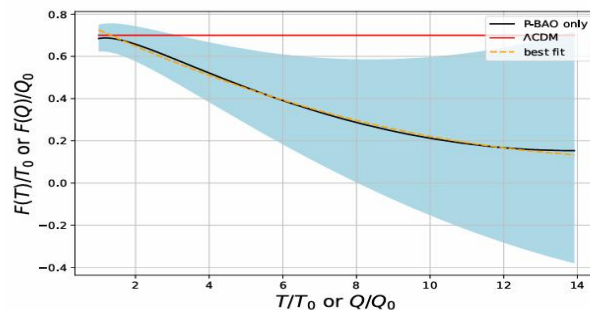
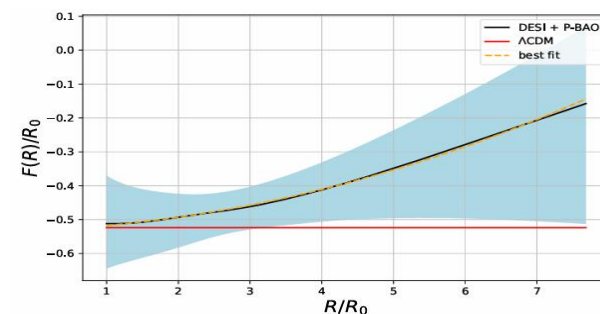
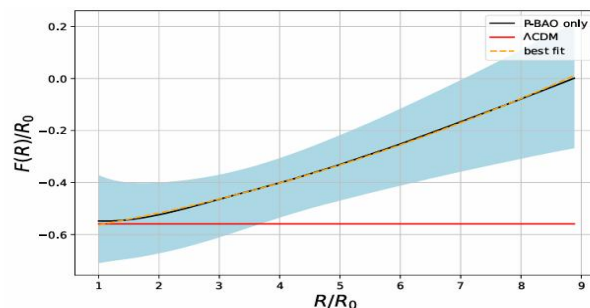
以 $f(T)$ 引力为例

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int e [T + F(T)] dx^4$$

$$\rho_{f(T)} = \frac{1}{16\pi G} [2TF_T - F(T)]$$

$$p_{f(T)} = \frac{1}{16\pi G} \left[\frac{F(T) - TF_T + 2F_{TT}T^2}{2F_{TT}T + F_T + 1} \right]$$

$$\omega_{f(T)} = \frac{F(T) - TF_T + 2T^2F_{TT}}{(2TF_T - F(T))(2F_{TT}T + F_T + 1)}$$



从 DESI 2024 重构的 $f(X)$ 可以有效地参数化为

$$F(X)/X_0 = A + BX/X_0 + CX^2/X_0^2,$$

- 重构结果表明 $f(X)$ 超出了标准 Λ CDM
- 对于所有情况， Λ CDM 的二次偏差都略占优势
- 模型需要实现 quintom 行为

修改引力模型

- 通过解析模型构造对实现Quintom行为的修改引力模型进行深入研究

幂律模型 + 指数模型
Quintessence-like Phantom-like



Quintom $f(T)$ 模型

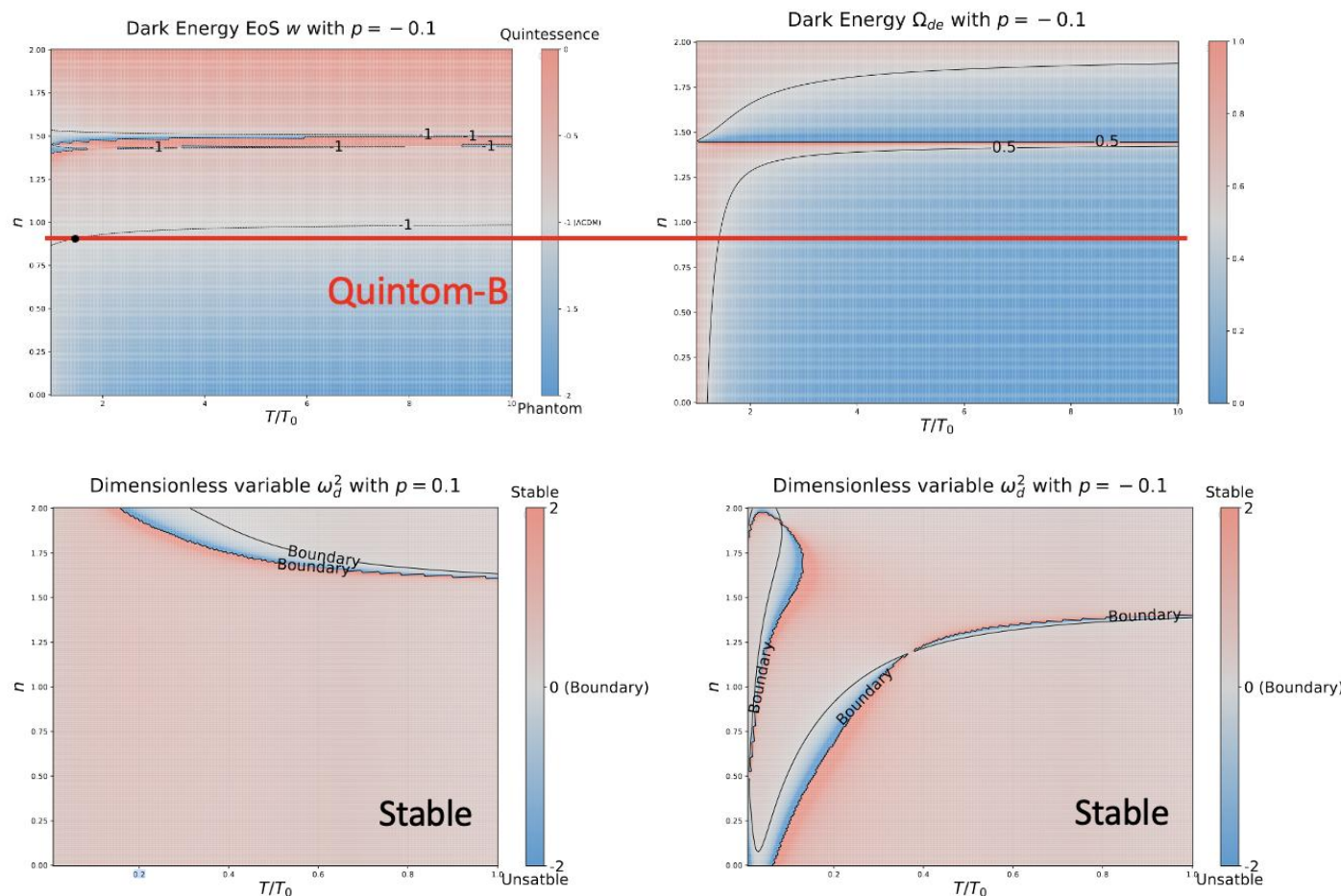
$$f(T) = T + \alpha(-T)^n \left[1 - e^{pT_0/T} \right] - 2\Lambda,$$

模型的稳定性要求

$$\ddot{\Phi}_k + \Gamma \dot{\Phi}_k + \Omega^2 \Phi_k = 0.$$

$$\Omega^2 = \frac{-\frac{f}{4} - T^2 f_{TT}}{f_T + 2T f_{TT}} \geq 0.$$

CYF et al. 2504.06784



展望：扰动阶对引力理论的限制

➤ 从背景到扰动阶约束 (BAO+RSD+SNe)

CYF et al., 2501.18336

引力修正反映在有效引力常数或修正引力参数中，由 $\mu(k, a) = G_{eff}/G$ 给出。

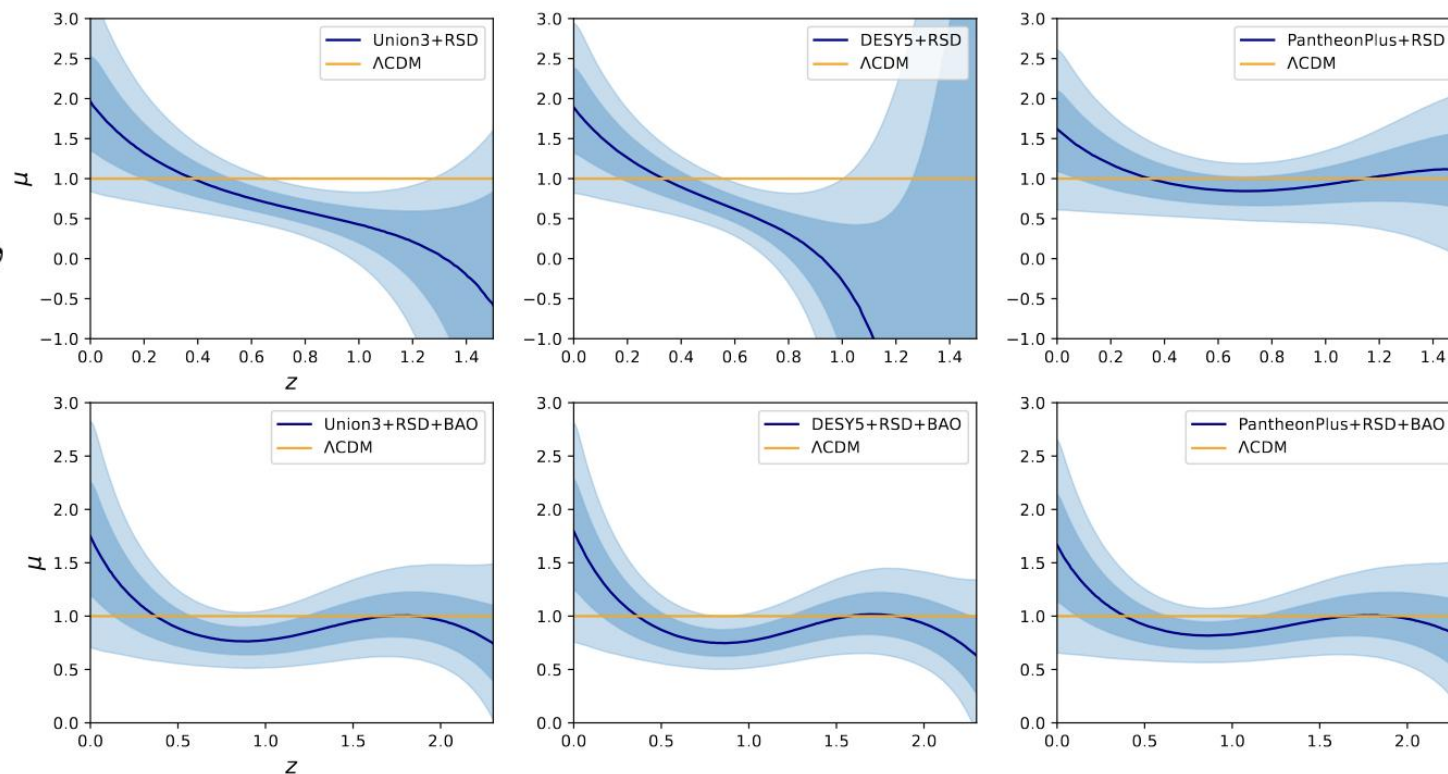
$$k^2 \Psi = -4\pi G a^2 \mu(k, a) \bar{\rho}_m \delta_m.$$

$$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m - \frac{3}{2}\mu\Omega_m H^2 \delta_m = 0,$$

➤ 广义相对论: $\mu = 1$

➤ $f(T)$ 修改引力:

$$\mu(z) \approx \frac{1}{f_T}$$



μ 偏离意味着修改引力的存在，对于当前的观测约束而言小幅的修正似乎更受数据青睐，但扰动阶对修改引力的检验还需未来更精确的观测

展望：有效场论方法

- 么正规范 (Unitary gauge) 下的一般有效场论

CYF et al. 1803.09818;
2504.06784; ...

Curvature based EFT

Torsion contribution

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{M_P^2}{2} \Psi(t) \dot{R} - \Lambda(t) - b(t) g^{00} + \frac{M_P^2}{2} (d(t) T + g(t) T^0) \right. \\ \left. + \frac{M_P^2}{2} (e(t) Q + h(t) Q^0 + j(t) \tilde{Q}^0) - k(t) Q^{000} + \frac{M_P^2}{2} m(t) C \right] + S_{DE}^{(2)},$$

Non-metricity contribution

Mixing

$$f(Q) \xrightarrow{\text{unitary}} f_Q(Q^{(0)}) \dot{R} + \dot{f}_Q(Q^{(0)}) (\tilde{Q}^0 - Q^0) - Q^{(0)} f_Q(Q^{(0)}) + f(Q^{(0)}).$$

$$\Psi(t) = f_Q(Q^{(0)}), \quad j(t) = -h(t) = \dot{f}_Q(Q^{(0)}),$$

$$\Lambda(t) = -\frac{M_P^2}{2} \left[f(Q^{(0)}) - Q^{(0)} f_Q(Q^{(0)}) \right]. \quad (\text{Coincident gauge})$$

展望：与普通物质的相互作用

作为动力学自由度，Quintom暗能量有可能与宇宙中的普通物质直接耦合，例如与电磁场可存在Chern – Simons耦合

CYF et al., 2505.24732

$$\mathcal{L}_{CS} = \frac{c}{M} \partial_\mu \phi A_\nu \tilde{F}^{\mu\nu}$$

对于单一光源而言，在光子从源传播至观测者的过程中，其偏振方向会在Chern-Simons耦合作用下发生偏转。该旋转效应可用Stokes参数表示

$$(Q \pm iU)' = \exp(\pm i2\chi)(Q \pm iU)$$

$$\chi = \frac{c}{M} \Delta\phi \equiv \frac{c}{M} [\phi(x_s) - \phi(x_o)]$$

通过Chern-Simons耦合，Quintom场的演化会诱导光子的CPT破坏效应，这一现象可能通过CMB偏振实验（如AiCPT）被检验，旋转后CMB谱的完整方程组为

$$C_l'^{TE} = C_l^{TE} \cos 2\bar{\chi} ,$$

$$C_l'^{TB} = C_l^{TE} \sin 2\bar{\chi} ,$$

$$C_l'^{EE} = C_l^{EE} \cos^2 2\bar{\chi} + C_l^{BB} \sin^2 2\bar{\chi} ,$$

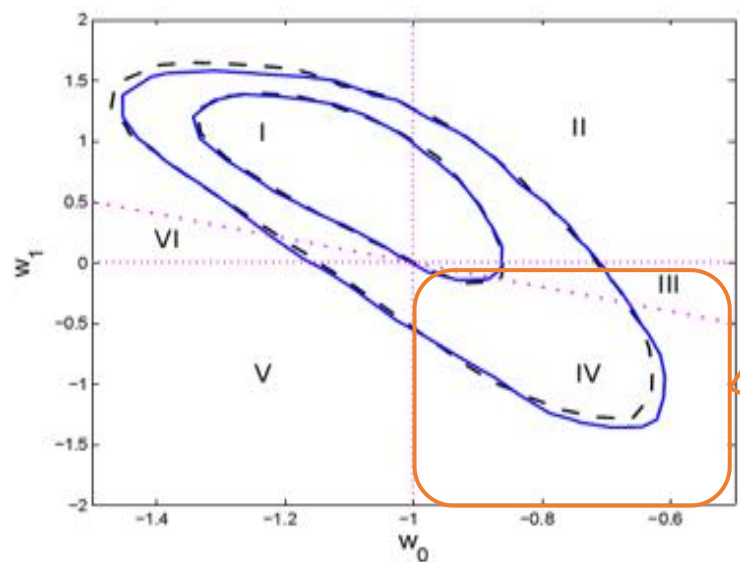
$$C_l'^{BB} = C_l^{EE} \sin^2 2\bar{\chi} + C_l^{BB} \cos^2 2\bar{\chi} ,$$

$$C_l'^{EB} = \frac{1}{2} (C_l^{EE} - C_l^{BB}) \sin 4\bar{\chi} .$$

To B or not to B ?

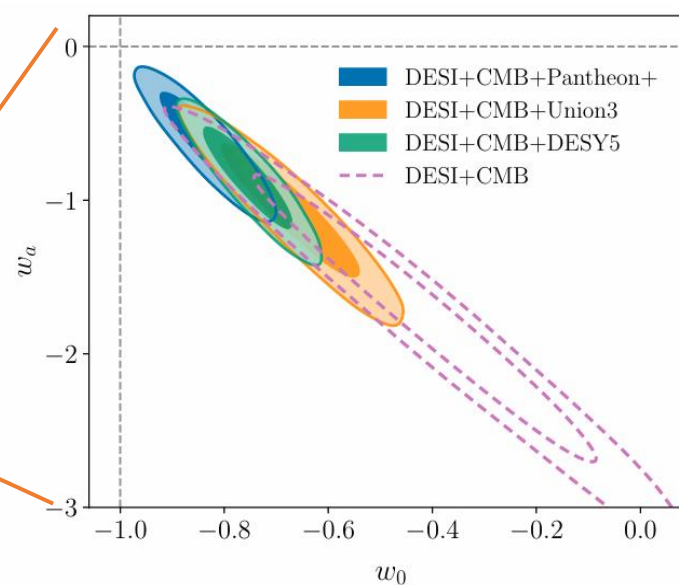
$w_0 - w_a$ 参数化:

过去



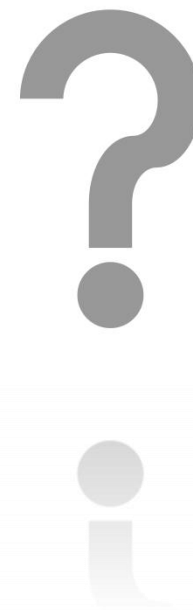
2007

现在



2025

未来五年



未来 Quintom-B 动力学的置信度是否会更大?

→ 宇宙学新物理: 精灵暗能量理论?

小结

- 人类对当前宇宙加速膨胀的动力学认知取得了阶段性的重要进展
 - DESI 数据解读:
 - 标准宇宙学模型 Λ CDM 面临挑战
 - $w(z)$ 呈现出 Quintom-B 行为, 从 phantom 区域跨越 -1 到 quintessence 区域
 - Quintom暗能量模型的探索:
 - 多标量场, 高阶导数标量场, 修改引力等理论可以实现Quintom行为并且可以解释DESI数据
 - 精确测量暗能量状态方程, 深入研究Quintom暗能量理论, 研究动力学暗能量与通常物质的相互作用开展暗能量探测实验新方法

谢谢! 敬请各位专家指正!