

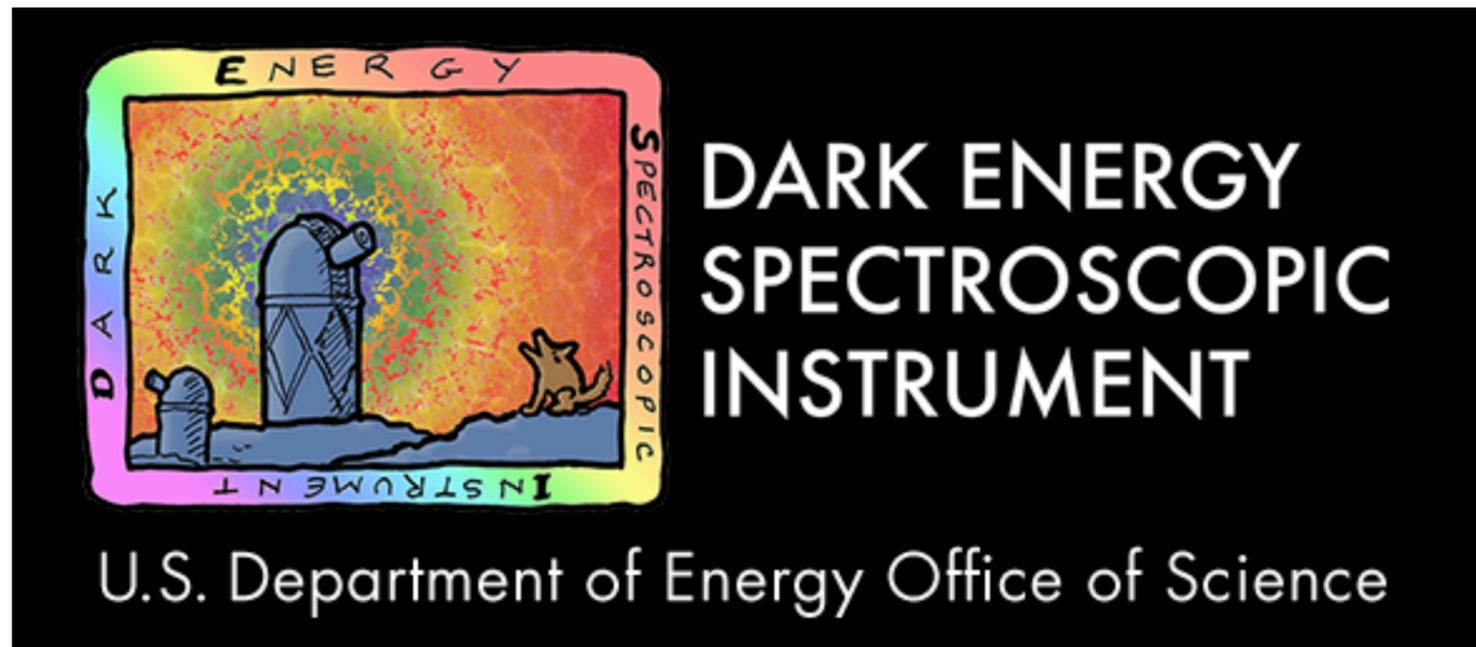
DESIが示唆する暗黒エネルギーの時間発展と そのスカラー場による解釈

Yuichiro Tada and Takahiro Terada,

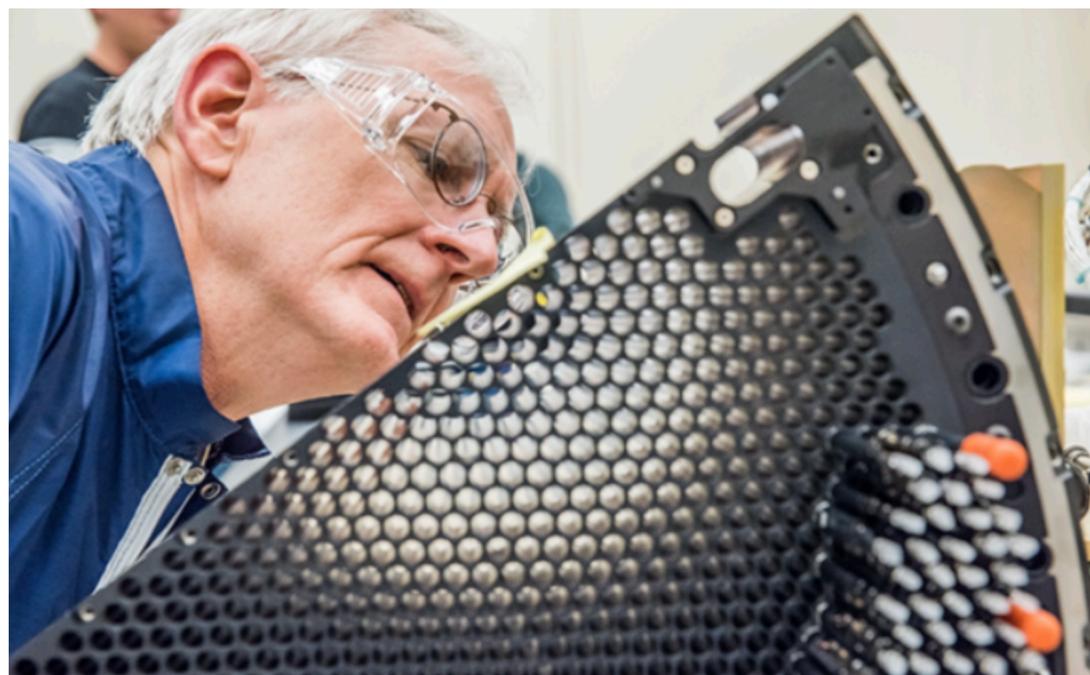
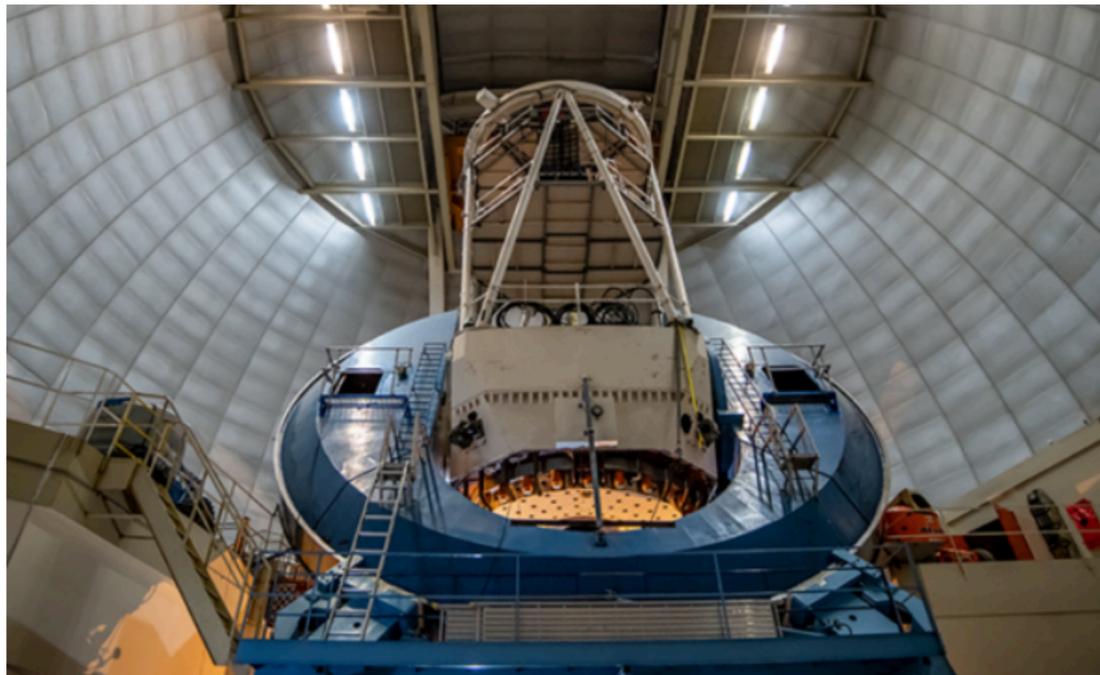
Phys.Rev.D 109 (2024) 12, L121305, arXiv:2404.05722 [astro-ph.CO]

寺田 隆広（東海国立大学機構名古屋大学素粒子宇宙起源研究所） 8/20 (火), 素粒子物理学の進展2024

Dark Energy Spectroscopic Instrument



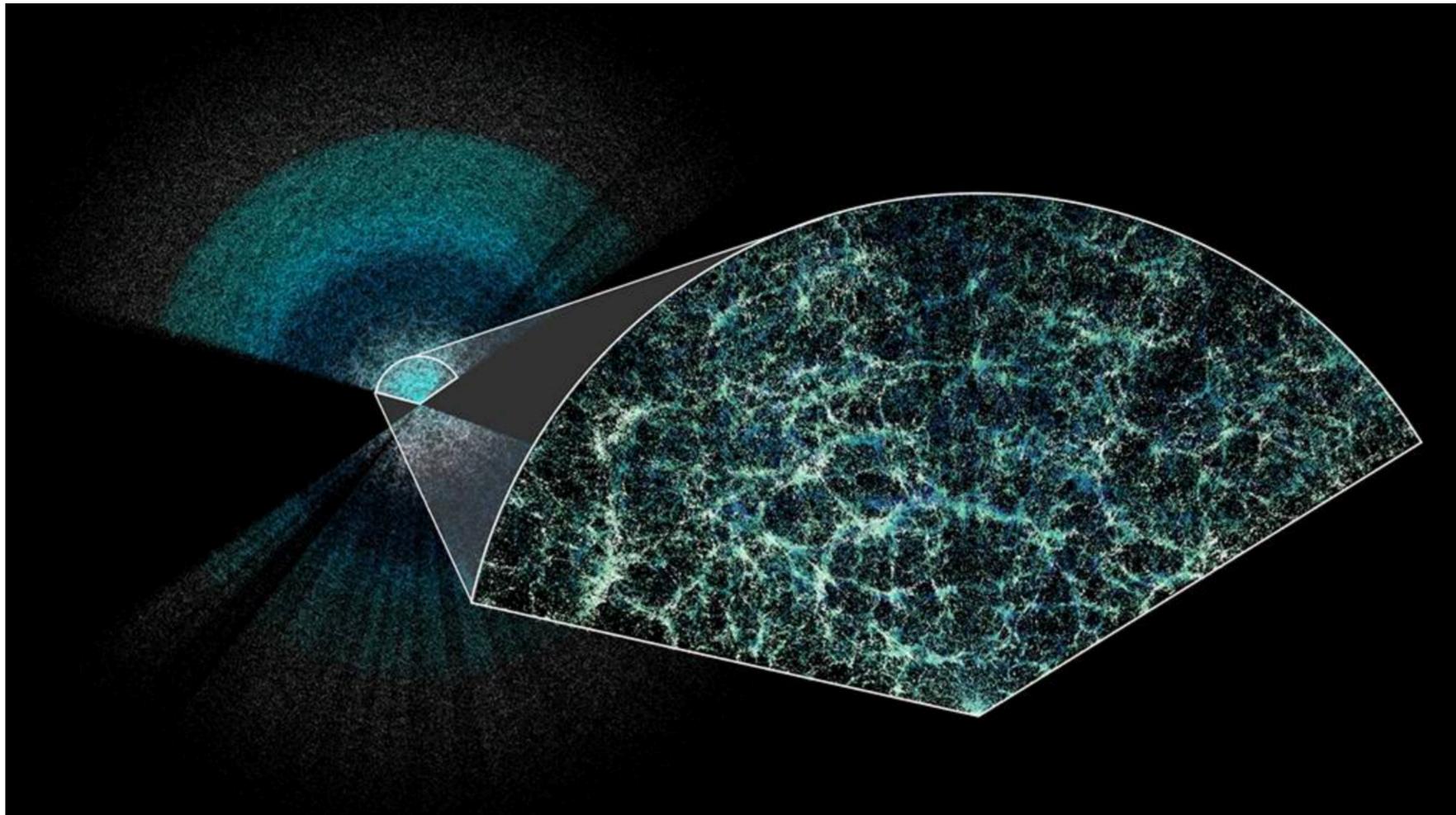
- アリゾナにある4m口径の望遠鏡
- ステージ4に分類される初の宇宙観測
- 5年の観測期間 (2021 – 2026)
- 数千万の銀河・クエーサーを分光観測する
- 5000の独立した機械式光ファイバー



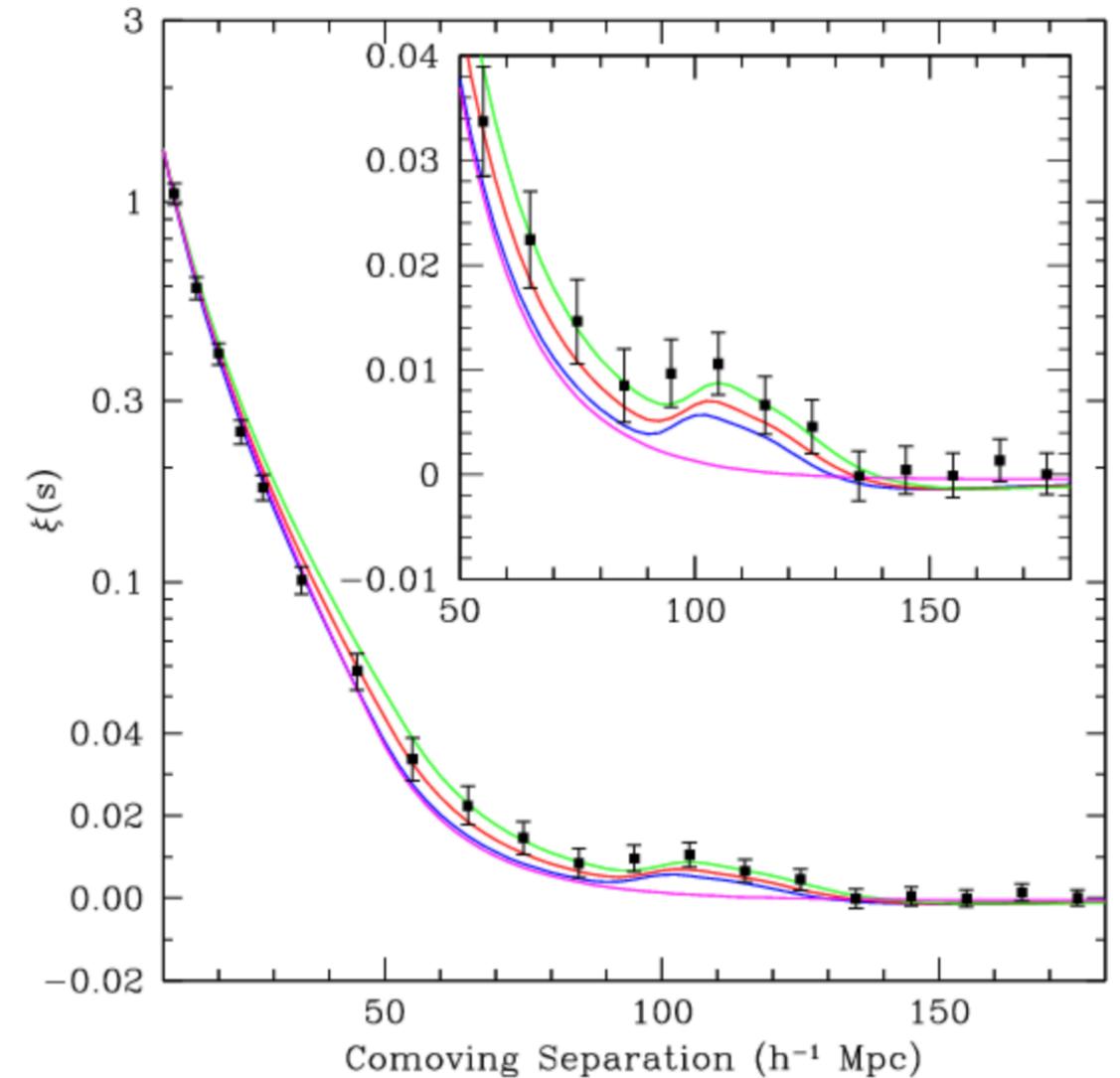
[Images from the web site of DESI]

バリオン音響振動 (BAO)

バリオンと光子の混合流体が持っていた典型的な揺らぎのスケール → 銀河間の典型的スケール



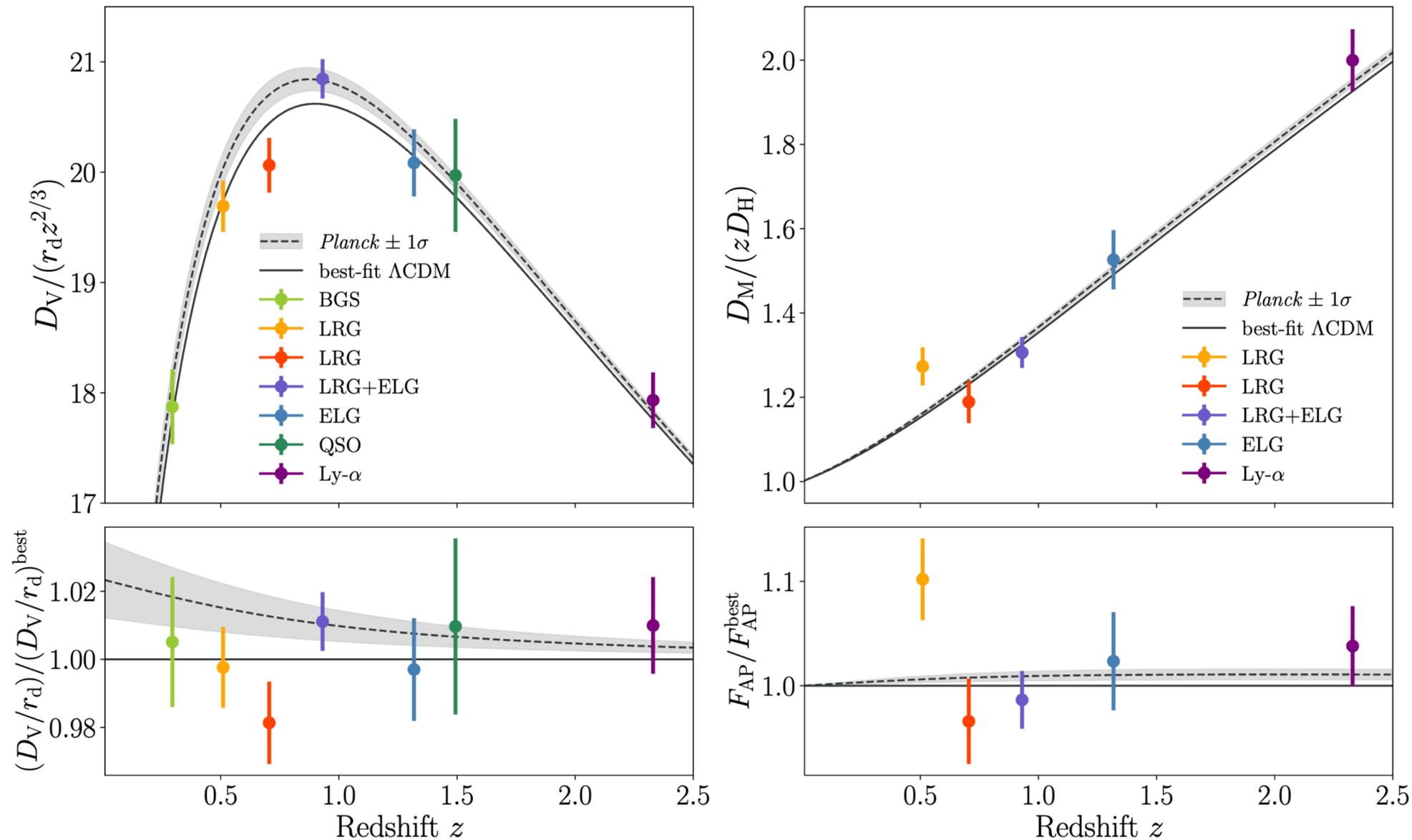
[Courtesy: Claire Lamman/DESI collaboration/custom colormap package by cmastro]



[Eisenstein et al. (SDSS), astro-ph/0501171]

DESI 一年目のデータリリース

DESI による異なる赤方偏移ごとの BAO 距離スケールの測定



$$D_M(z) = \frac{c}{H_0 \sqrt{\Omega_K}} \sinh \left[\sqrt{\Omega_K} \int_0^\infty \frac{dz'}{H(z')/H_0} \right] = \frac{r_d}{\Delta\theta}$$

$$D_H(z) = \frac{c}{H(z)} = \frac{r_d}{\Delta z} \quad r_d = \int_{z_d}^\infty \frac{c_s(z)}{H(z)} dz \approx 147 \text{Mpc}$$

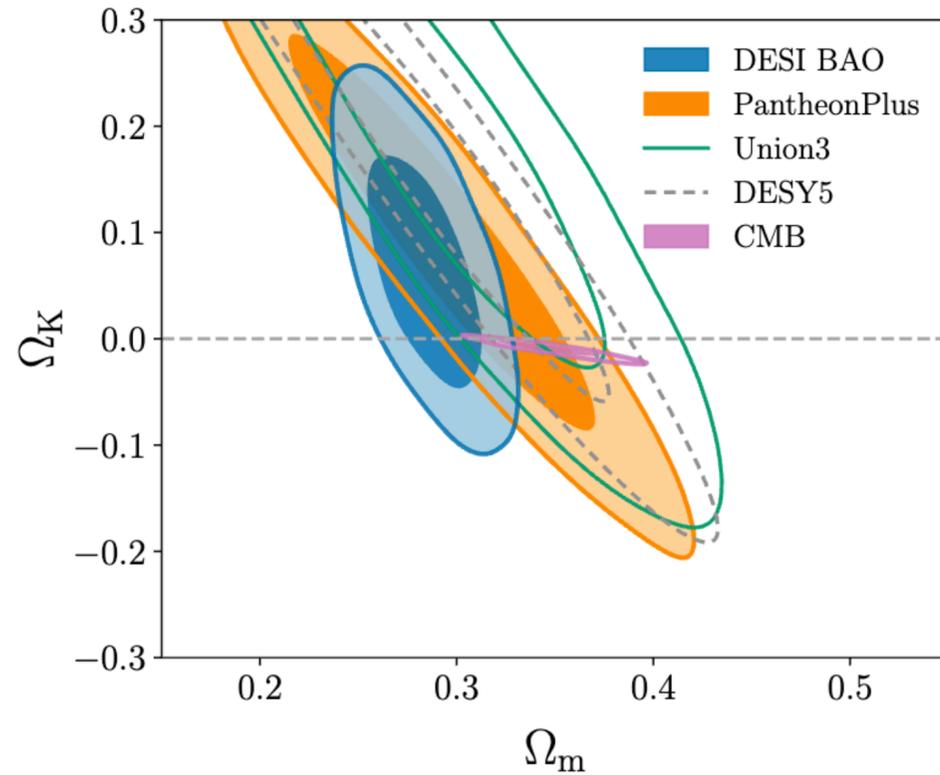
$$D_V(z) = (z D_M(z)^2 D_H(z))^{1/3}$$

$$F_{AP} = \frac{D_M}{D_H}$$

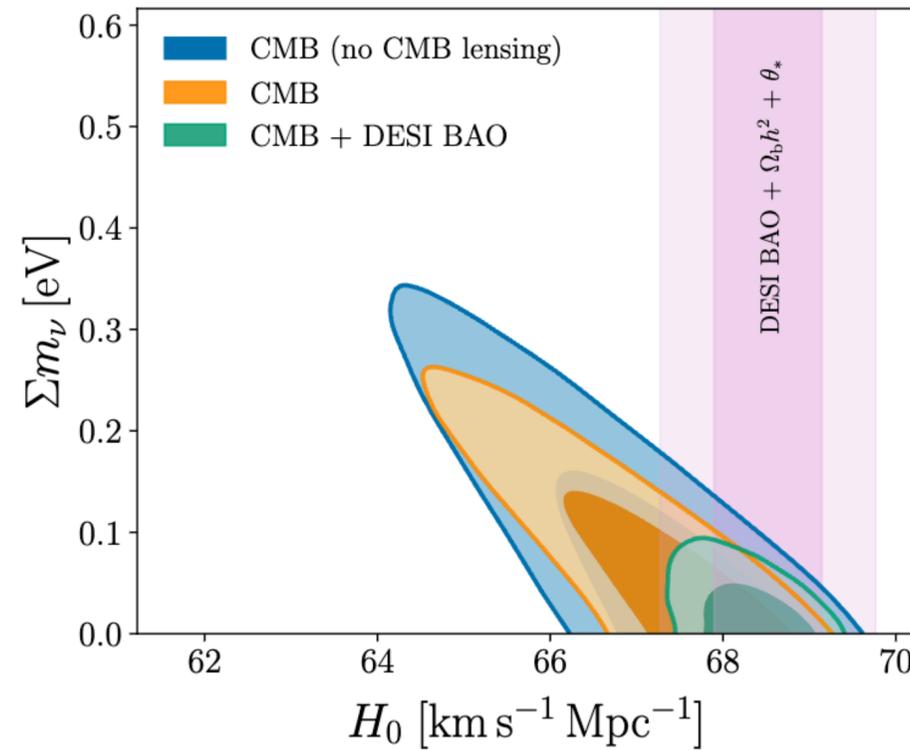
DESI 宇宙論の結果

[Adame et al., DESI 2024 VI, 2404.03002]

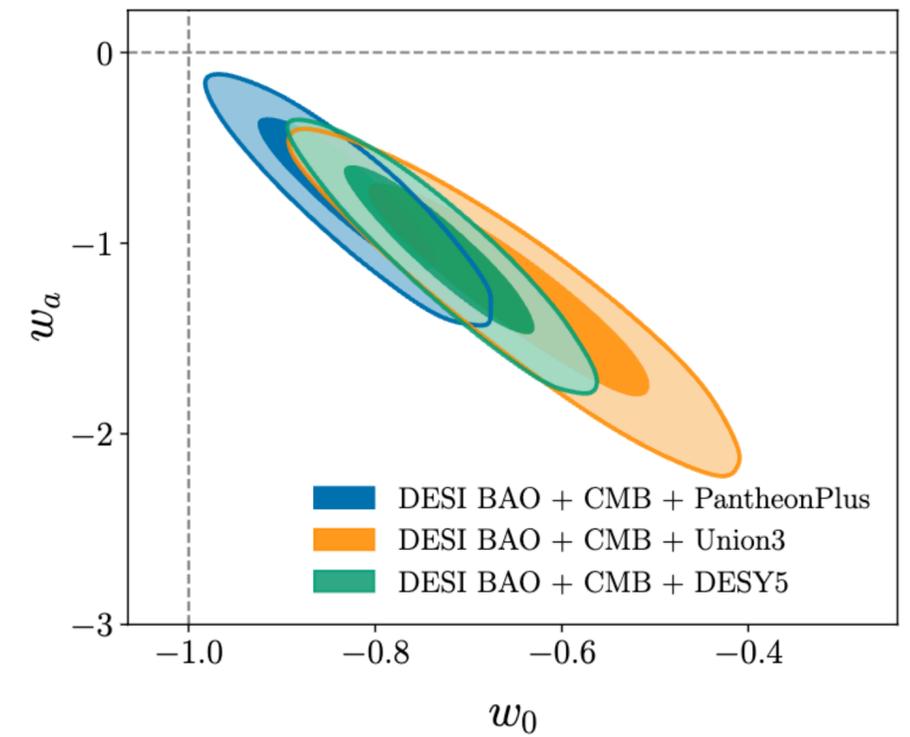
空間曲率, ニュートリノ質量, および時間変化する暗黒エネルギー



平坦な宇宙と整合的



事前分布への依存性が大きい



!?!?

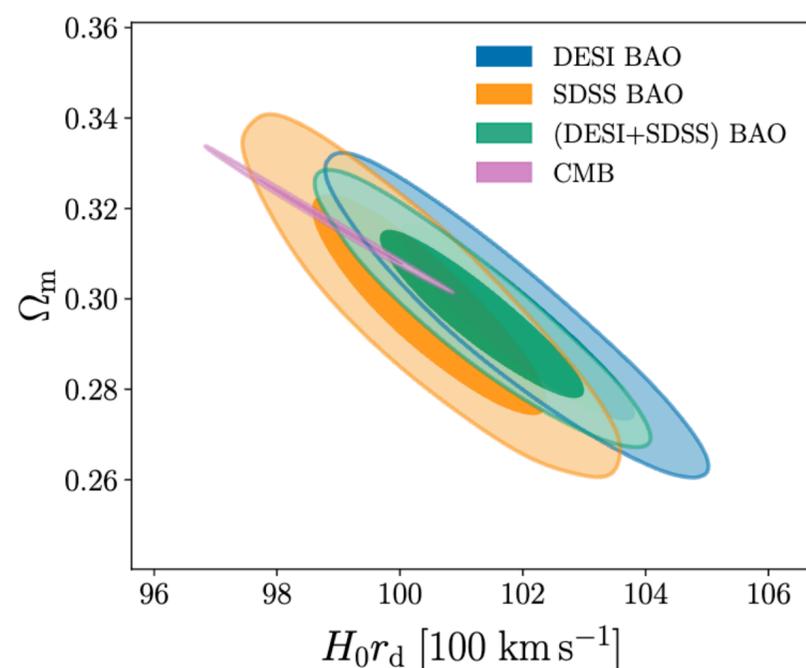
DESI 暗黒エネルギーの結果

[Adame et al., DESI 2024 VI, 2404.03002]

w_0w_a CDM 模型

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

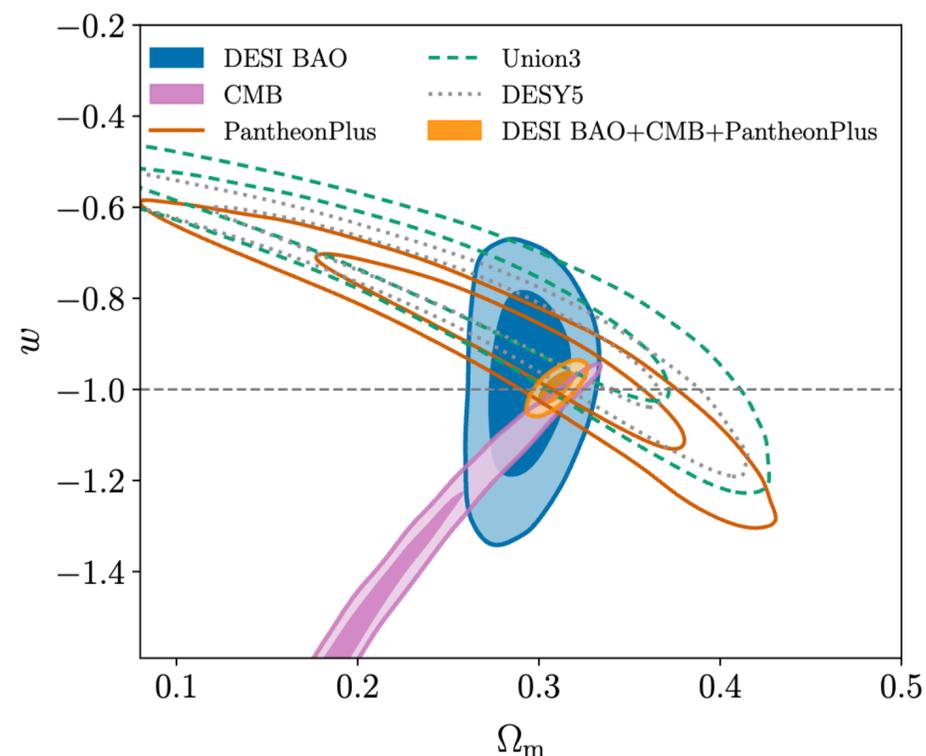
Λ CDM 模型 ($w = -1$)



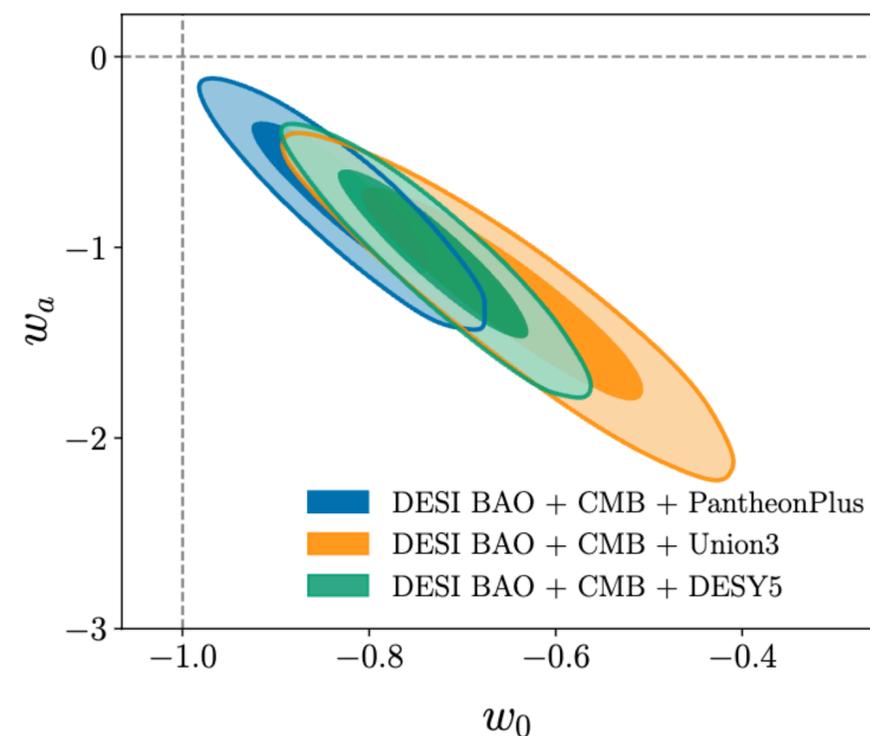
他の観測と整合的。

Λ CDM 模型とも整合的。

wCDM 模型 ($w = \text{const.}$)



やはり Λ CDM と整合的。



Λ CDM と非整合的。

$\Delta\chi^2_{\text{MAP}} = -8.7, -15.2, -18.1$

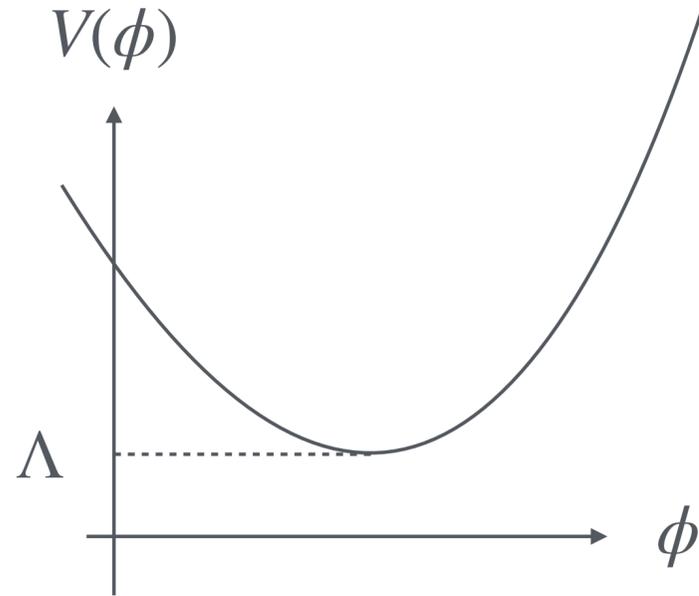
$2.5\sigma, 3.5\sigma, 3.9\sigma$

$\Lambda(t)?$

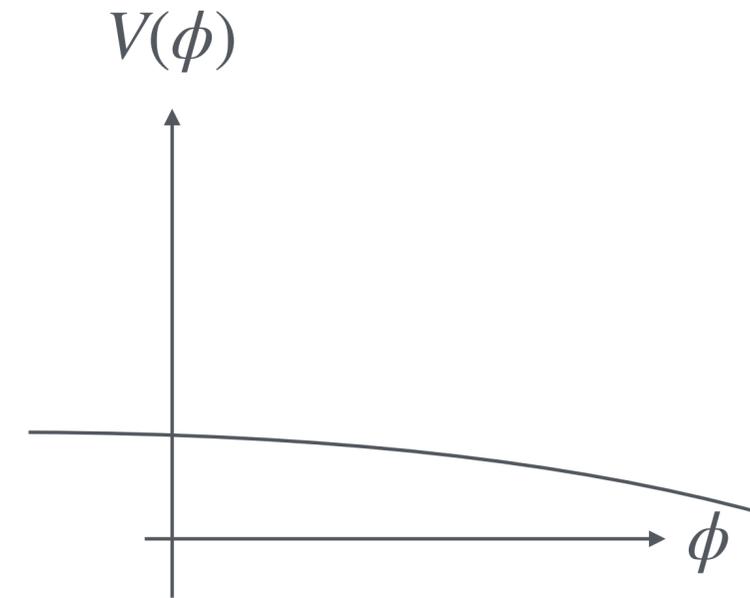
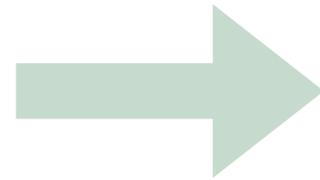
$\Lambda(t)?$

スカラー場による解釈

時間発展する暗黒エネルギー = スカラー一場？



宇宙定数



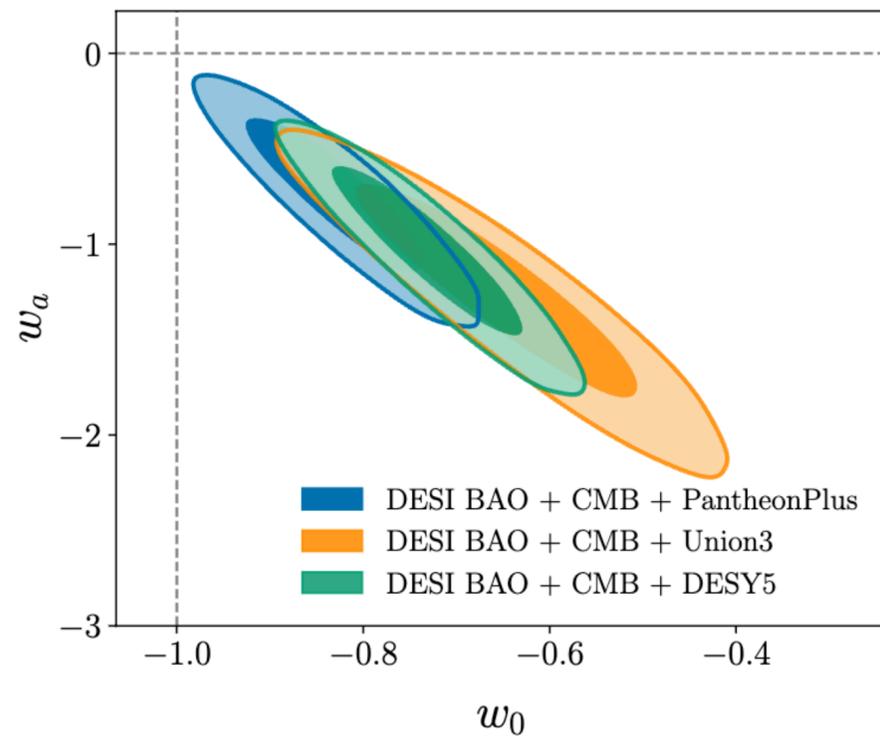
$\phi = \phi(t)$ を通して時間に依存

一様性 $\phi = \phi(t)$ を仮定して、正準規格化された実スカラー一場 $\phi(t, x)$ を考える。

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} R - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right)$$

$$w \equiv \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

スカラーポテンシャルの再構成



Friedmann eq.
(We used $\Omega_m = 0.3$.)

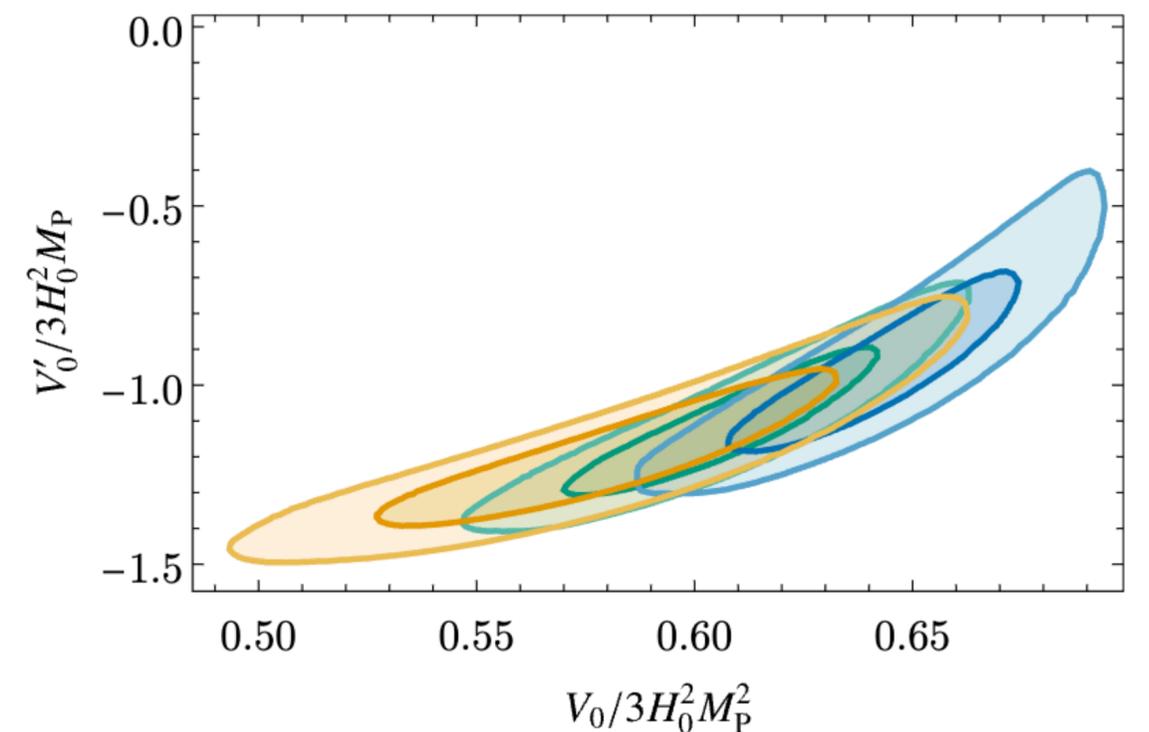
$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2}(1+w)\rho_{\text{DE}}$$

$$V = \frac{1}{2}(1-w)\rho_{\text{DE}}$$

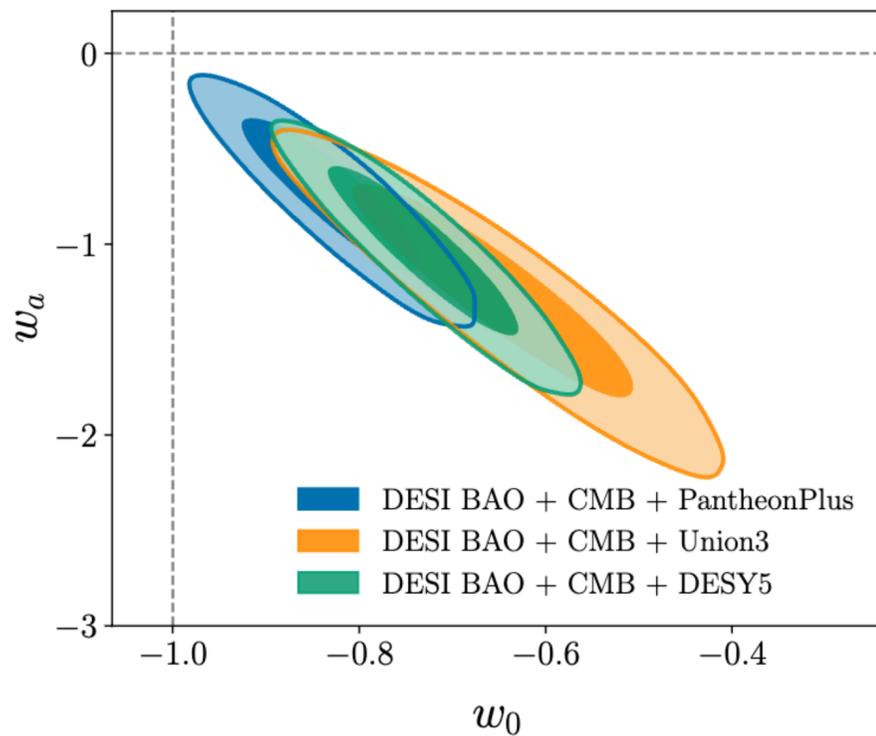
$$V' = \frac{1}{2}(w_a a - 3(1-w^2)) H \sqrt{\frac{\rho_{\text{DE}}}{1+w}}$$

$$\dot{\rho}_{\text{DE}} + 3(1+w)H\rho_{\text{DE}} = 0$$

$$\rho_{\text{DE}}(t) = \rho_{\text{DE},0} a(t)^{-3(1+w_0+w_a)} e^{3w_a(a(t)-1)}$$



スカラーポテンシャルの再構成



DESI BAO + CMB + DESY5
 most probable point:
 $w_0 = -0.717$ and $w_a = -1.05$.

Friedmann eq.
 (We used $\Omega_m = 0.3$.)

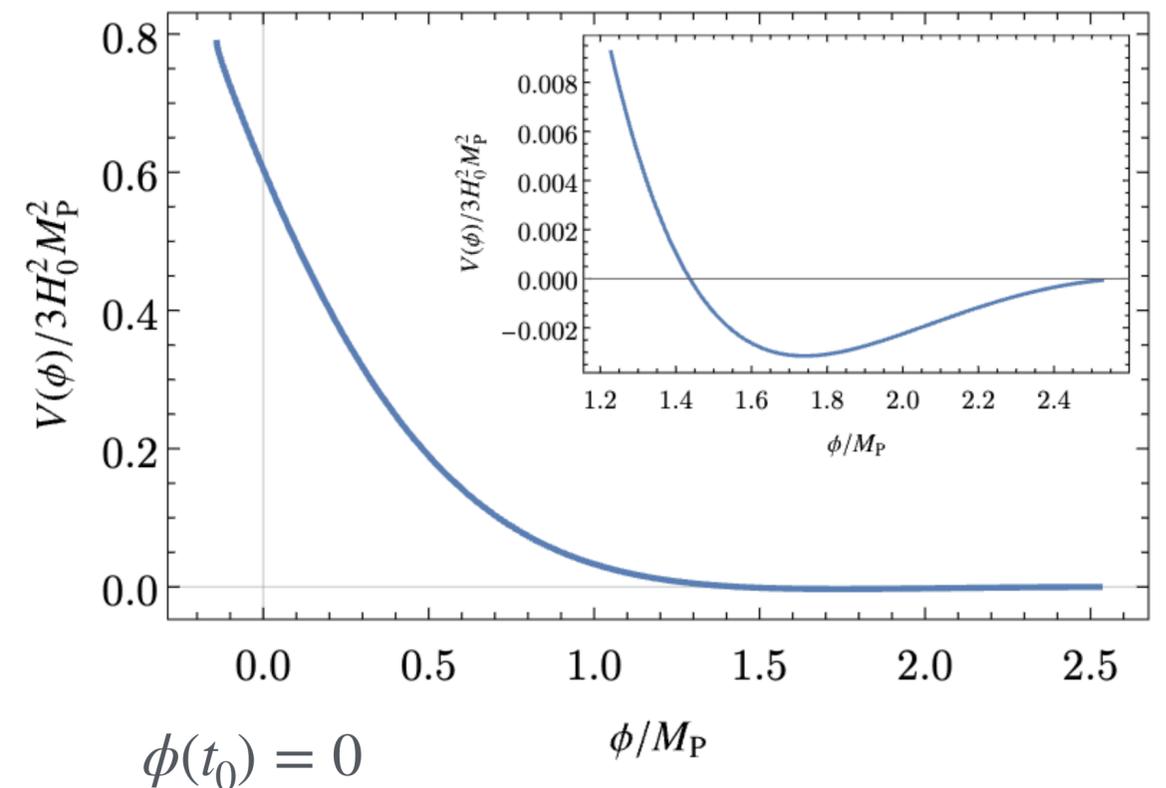
$$\dot{\rho}_{\text{DE}} + 3(1+w)H\rho_{\text{DE}} = 0$$

$$\rho_{\text{DE}}(t) = \rho_{\text{DE},0} a(t)^{-3(1+w_0+w_a)} e^{3w_a(a(t)-1)}$$

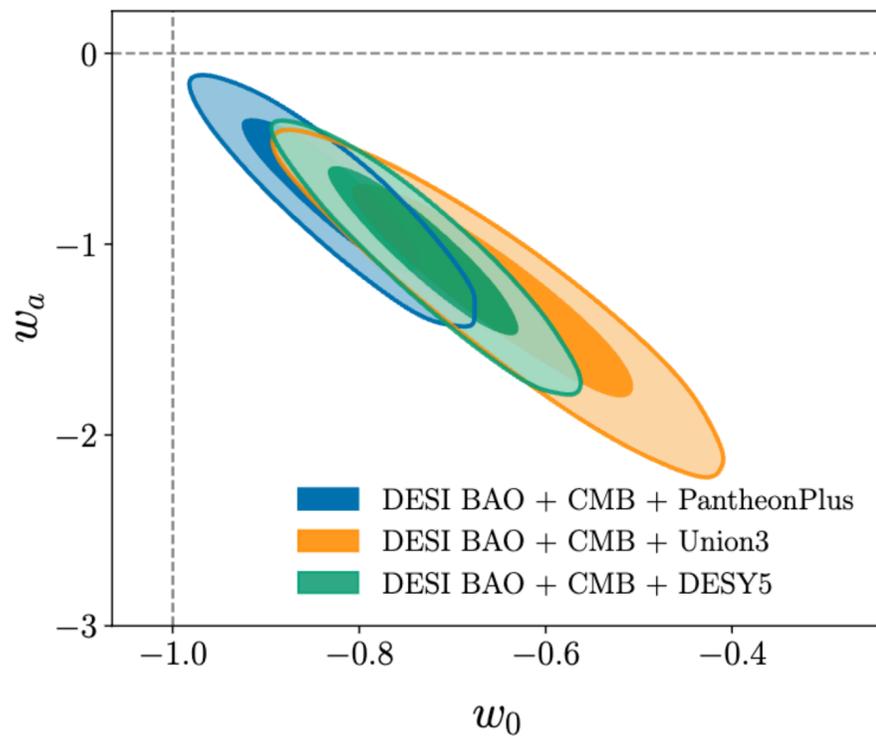
$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2}(1+w)\rho_{\text{DE}}$$

$$V = \frac{1}{2}(1-w)\rho_{\text{DE}}$$

$$V' = \frac{1}{2} (w_a a - 3(1-w^2)) H \sqrt{\frac{\rho_{\text{DE}}}{1+w}}$$



スカラーポテンシャルの再構成



DESI BAO + CMB + DESY5
 most probable point:
 $w_0 = -0.717$ and $w_a = -1.05$.

Friedmann eq.
 (We used $\Omega_m = 0.3$.)

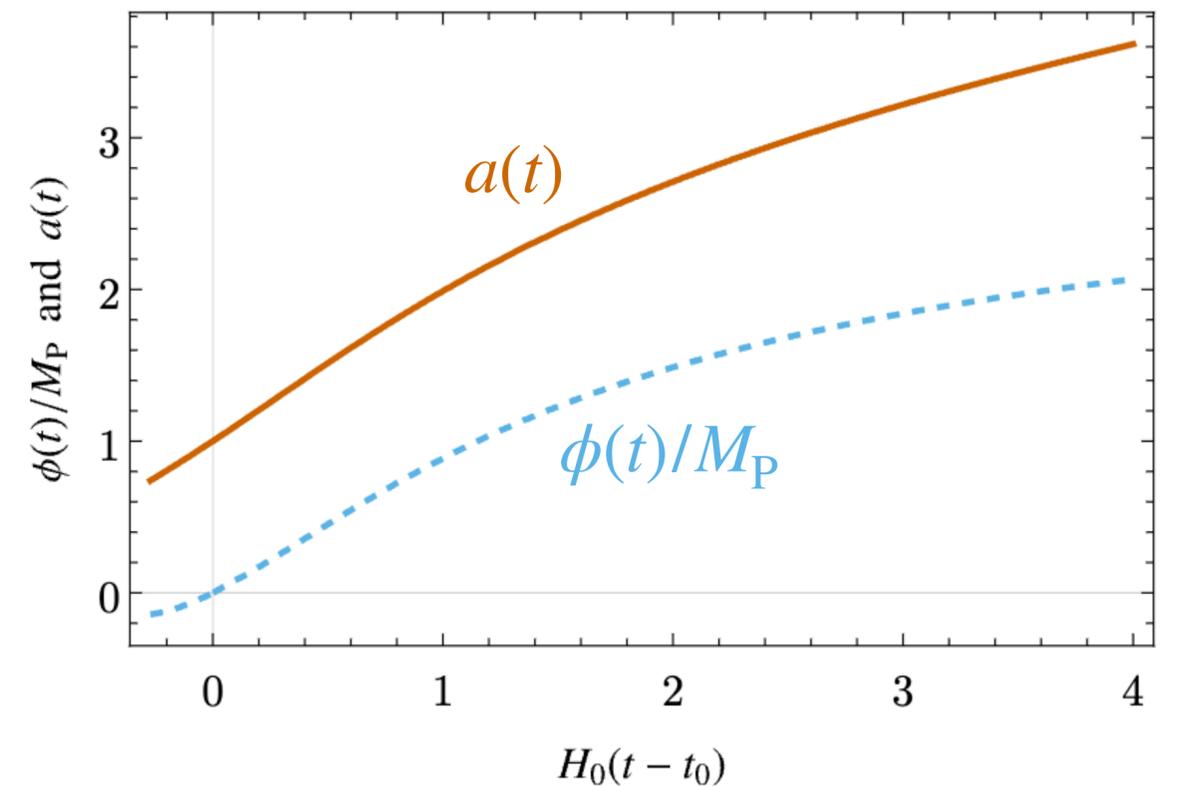
$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2}(1+w)\rho_{\text{DE}}$$

$$V = \frac{1}{2}(1-w)\rho_{\text{DE}}$$

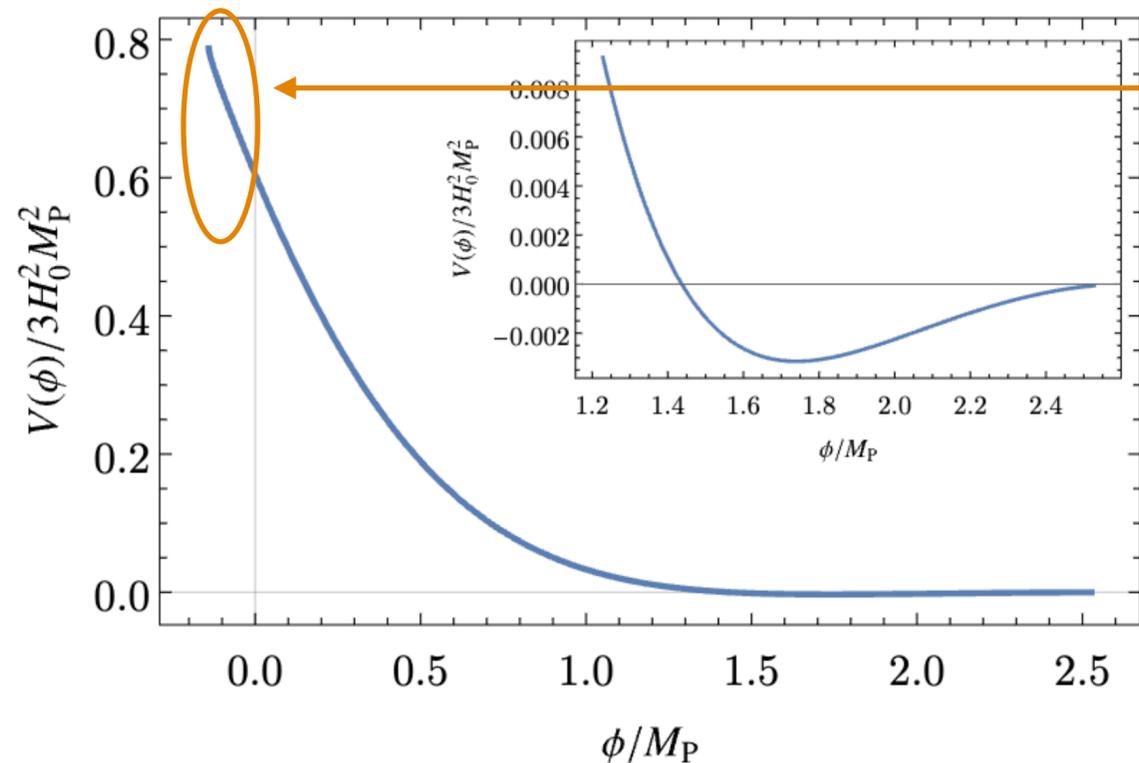
$$V' = \frac{1}{2}(w_a a - 3(1-w^2)) H \sqrt{\frac{\rho_{\text{DE}}}{1+w}}$$

$$\dot{\rho}_{\text{DE}} + 3(1+w)H\rho_{\text{DE}} = 0$$

$$\rho_{\text{DE}}(t) = \rho_{\text{DE},0} a(t)^{-3(1+w_0+w_a)} e^{3w_a(a(t)-1)}$$



宇宙複屈折との関係



この（Planckスケールの）大きな場の値の変化は最近観測された宇宙複屈折のデータを説明できる。

$$\beta = 0.34^\circ \pm 0.09^\circ$$

[Minami and Komatsu, 2011.11254]
[Eskilt and Komatsu, 2205.13962]

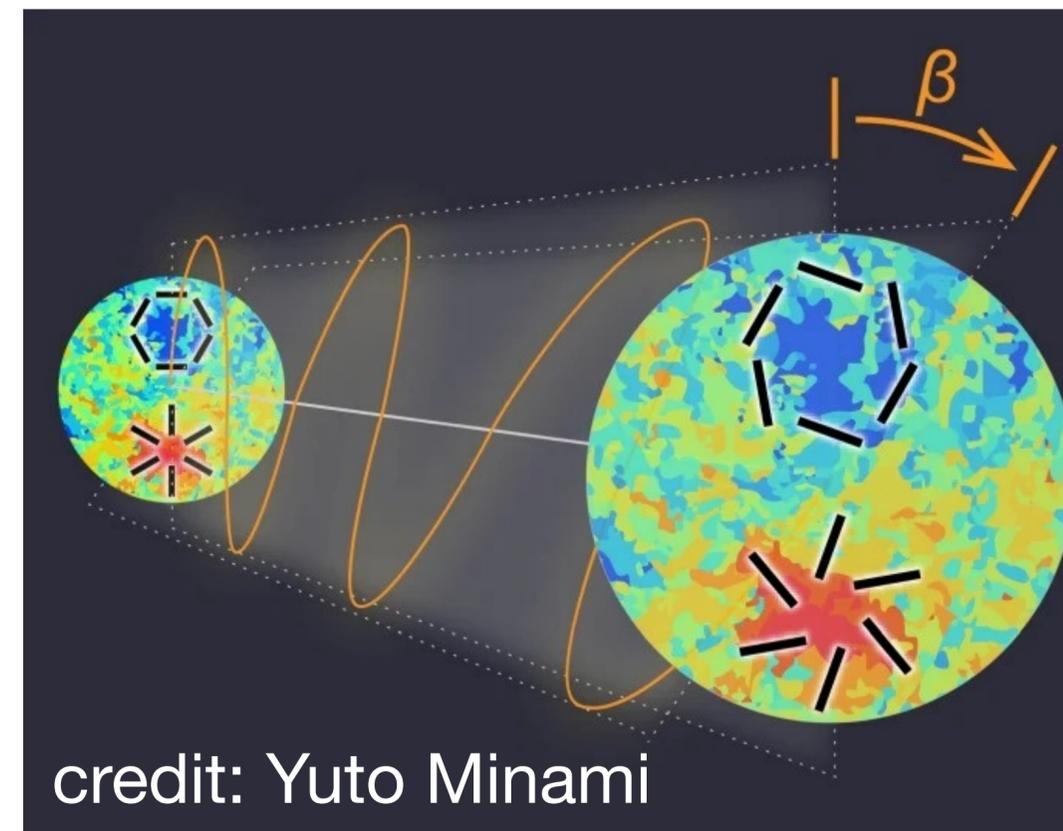
右記のような結合が必要：

$$\frac{1}{4} \sqrt{-g} g_{\phi\gamma\gamma} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} .$$

[Fujita et al., 2011.11894]

$$g_{\phi\gamma\gamma} = \frac{2\beta}{\Delta\phi} = 0.12 \left(\frac{0.1 M_{\text{Pl}}}{\Delta\phi} \right) M_{\text{Pl}}^{-1}$$

相互作用は Planck スケールで抑制されているので、他の実験等からの制限とも無矛盾。



credit: Yuto Minami

量子重力との関係

[Gasparotto and Obata, 2203.09409]
[Storm and Scherrer, 2008.05465]
[Schöneberg et al., 2307.15060]

沼地予想 — EFTが量子重力と整合的である為の必要条件 —

Distance conjecture (with the species scale)

[Ooguri and Vafa, hep-th/0605264] [Scalisi and Valenzuela, 1812.07558]

$$\Delta\phi \lesssim \frac{3}{d} M_{\text{Pl}} \log\left(\frac{M_{\text{Pl}}}{H}\right) = \mathcal{O}(100) M_{\text{Pl}}$$

de Sitter conjecture [Obied et al, 1806.08362]

[Garg and Krishnan, 1807.05193] [Ooguri et al., 1810.05506]

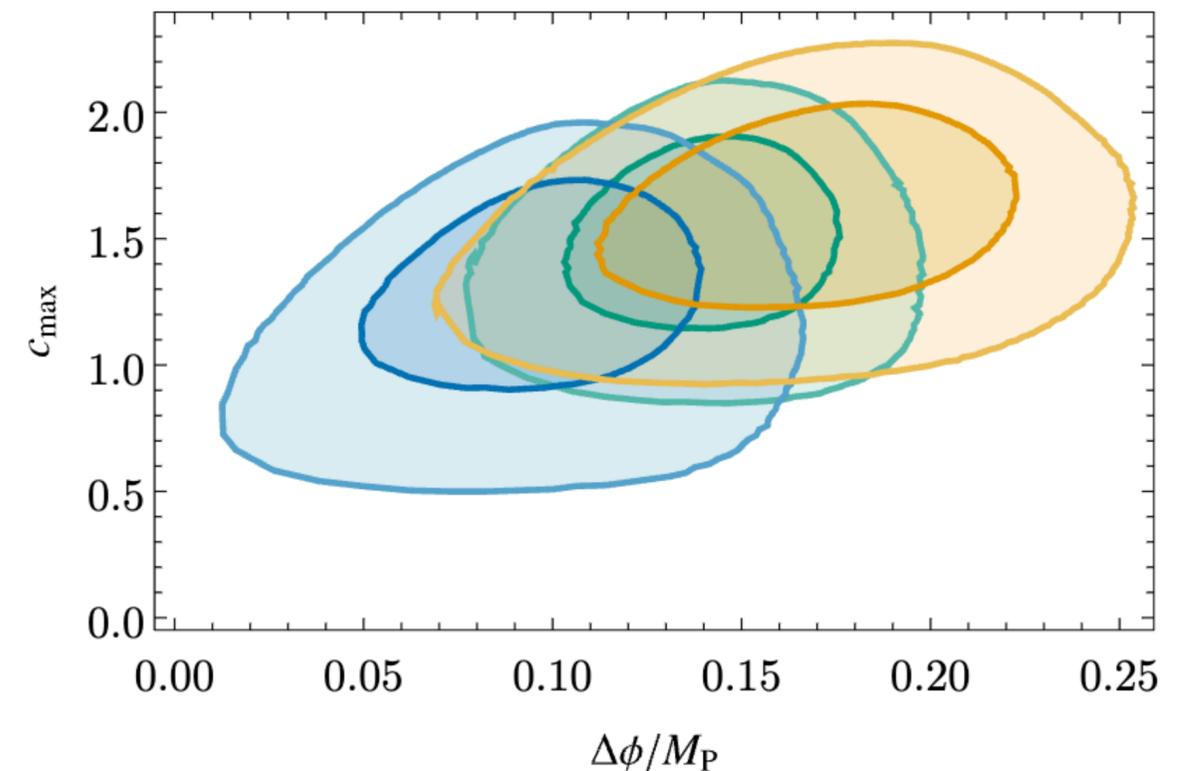
$$|V'| \geq cV \quad \text{or} \quad V'' \leq -c'V$$

We can put on c an upper bound $c_{\text{max}} \equiv \min_{V>0} |V'|/V$.

Weak gravity conjecture (applied to an axion)

[Arkani-Hamed, Motl, Nicolis, and Vafa, hep-th/0601001]

$$f \lesssim \frac{M_{\text{Pl}}}{S_{\text{inst}}}$$



$w_0 w_a$ CDM 模型の限界

[Linder, astro-ph/0208512]

[Chevallier and Polarski, gr-qc/0009008]

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

Chevallier–Polarski–Linder パラメトリゼーション

時間依存する最も単純な一般化に過ぎない。

[Scherrer, 1505.05781]

時間を過去に遡って外挿すると, $a \lesssim 0.7$ ($z \gtrsim 0.4$) で $w < -1$ (*phantom*) になる。

phantom matter の典型例: 負ノルムのゴースト

$$\mathcal{L} = +\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - V(\phi)$$

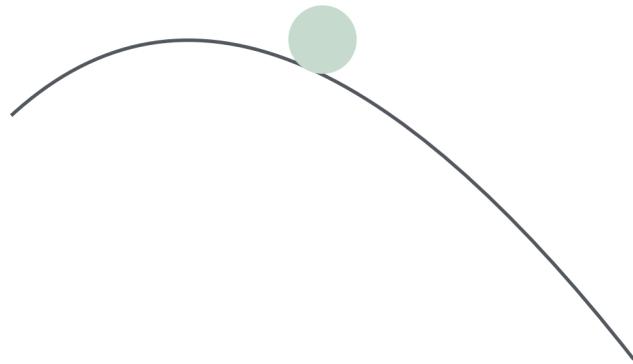
$$w \equiv \frac{P}{\rho} = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

ダイナミカルな暗黒エネルギーを記述する健全な模型が欲しい。

Thawing Quintessence

See a review [Tsujikawa, 1304.1961]

$$\dot{\phi}(0) = 0$$



$$V(\phi) \simeq \sum_{n=0}^2 \frac{V^{(n)}(\phi_i)}{n!} (\phi - \phi_i)^n$$

$$w(a) \simeq -1 + (1 + w_0) a^{3(K-1)} \mathcal{F}(a) \quad K = \sqrt{1 - \frac{4}{3} \frac{V''(\phi_i)}{V(\phi_i)}}$$

[Dutta, Scherrer, 0809.4441]
[Chiba, 0902.4037]

$$\mathcal{F}(a) = a^{-3K} \left(\frac{K \cosh \left(K \left(\sqrt{\frac{a^3 \Omega_{\phi,0}}{1 - \Omega_{\phi,0}}} \right) \right) - F(a) \sinh \left(K \left(\sqrt{\frac{a^3 \Omega_{\phi,0}}{1 - \Omega_{\phi,0}}} \right) \right)}{K \cosh \left(K \operatorname{arsinh} \left(\sqrt{\frac{\Omega_{\phi,0}}{1 - \Omega_{\phi,0}}} \right) \right) - \Omega_{\phi,0}^{-1/2} \sinh \left(\sqrt{\frac{\Omega_{\phi,0}}{1 - \Omega_{\phi,0}}} \right)} \right)^2$$

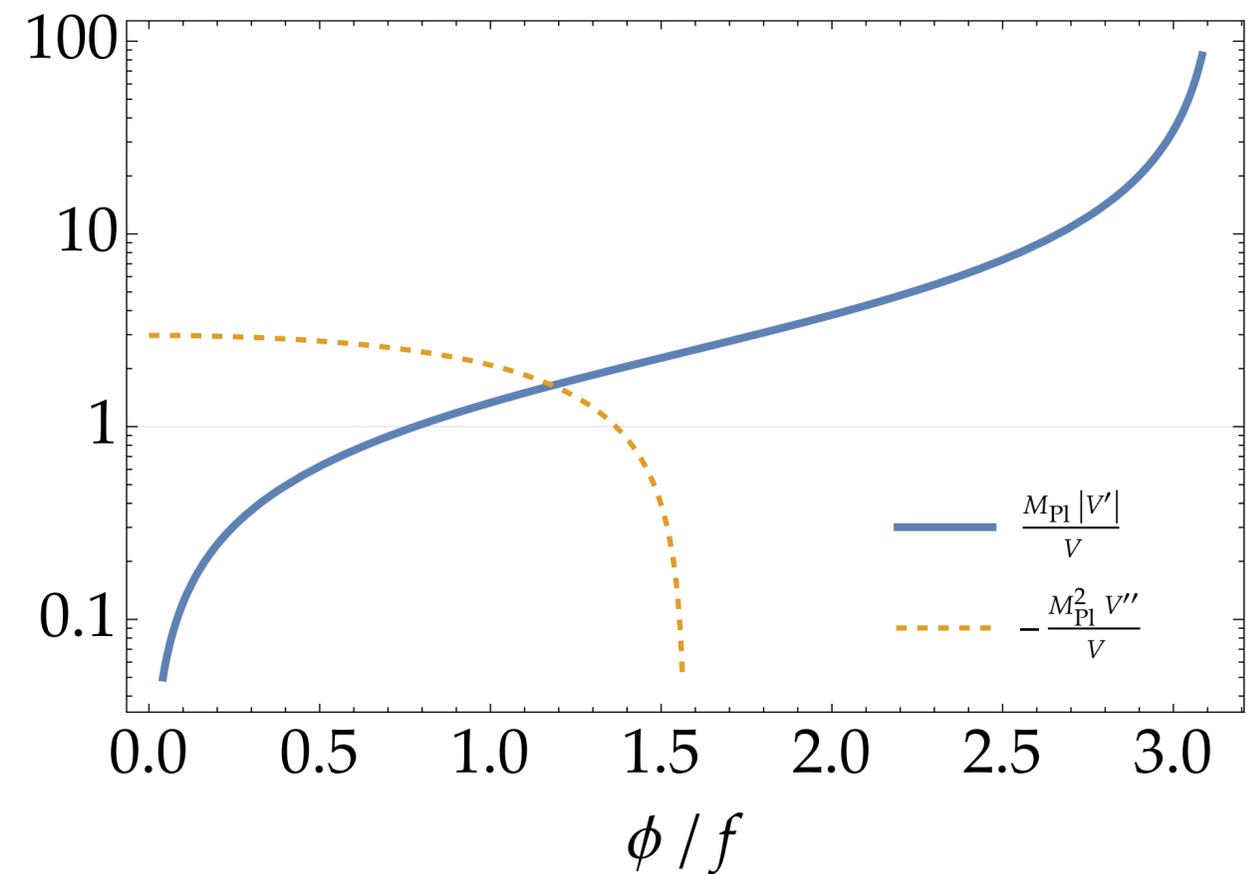
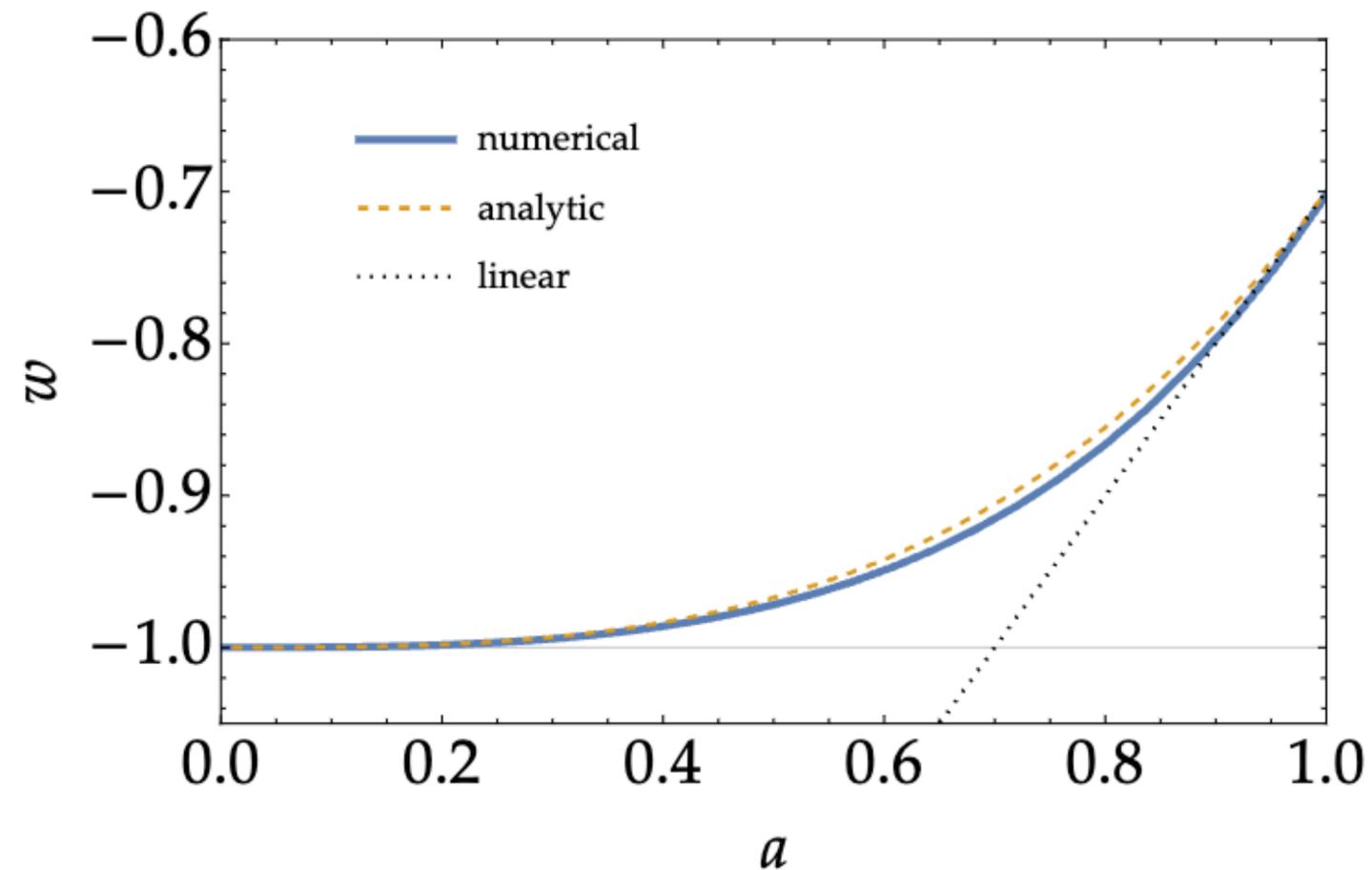
$$F(a) = \sqrt{1 + \left(\Omega_{\phi,0}^{-1} - 1 \right) a^{-3}}$$

Axion as Quintessence

$$V(\phi) = m^2 f^2 \left(1 + \cos \frac{\phi}{f} \right)$$

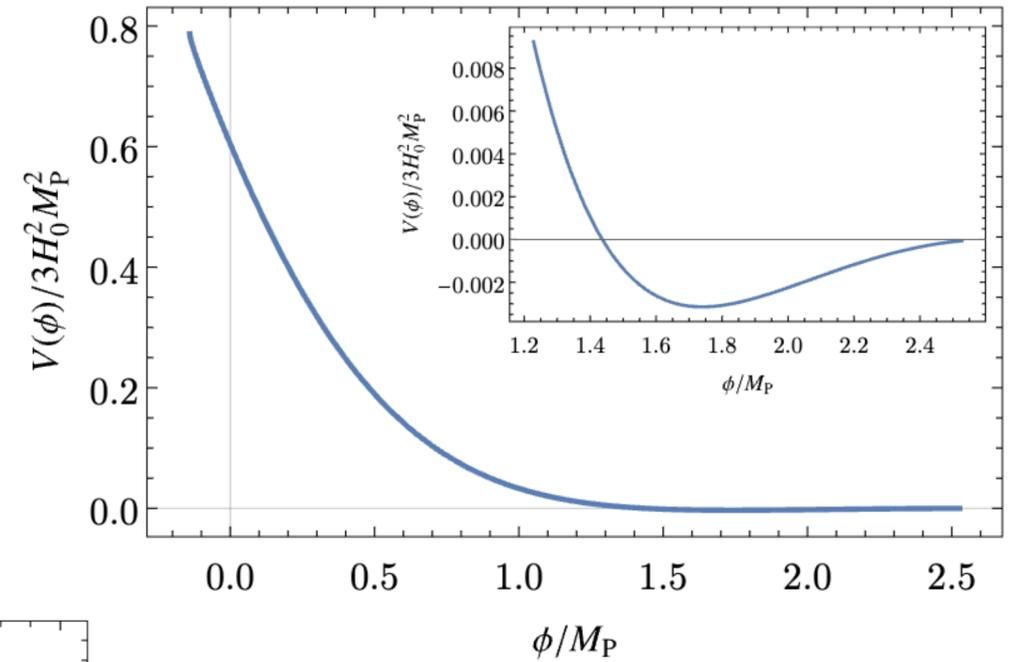
$$m^2 = 8.7 H_0^2 \quad f = 0.41 M_{\text{Pl}} \quad \phi_i = 0.55 f$$

$$\rightarrow w_0 = -0.7 \text{ and } w_a = -1$$

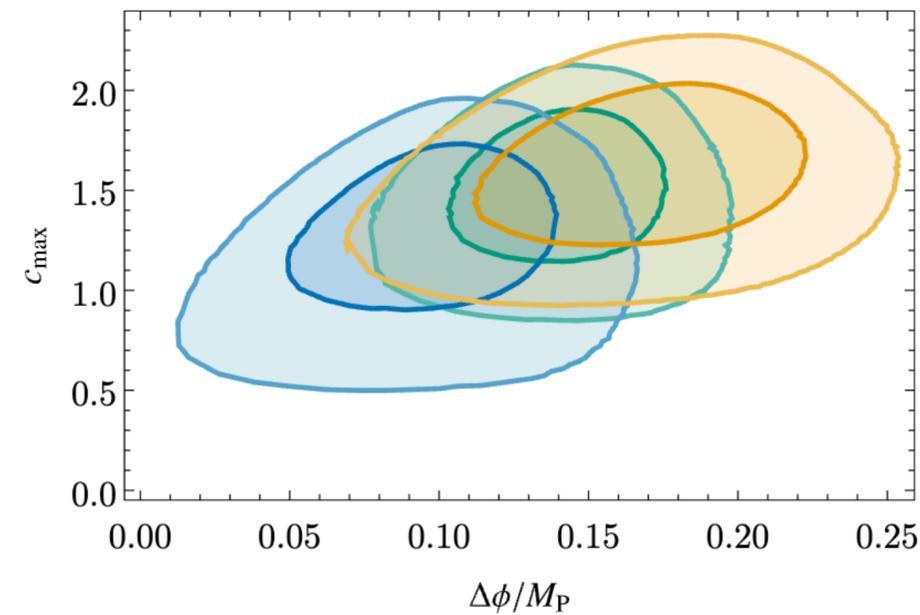
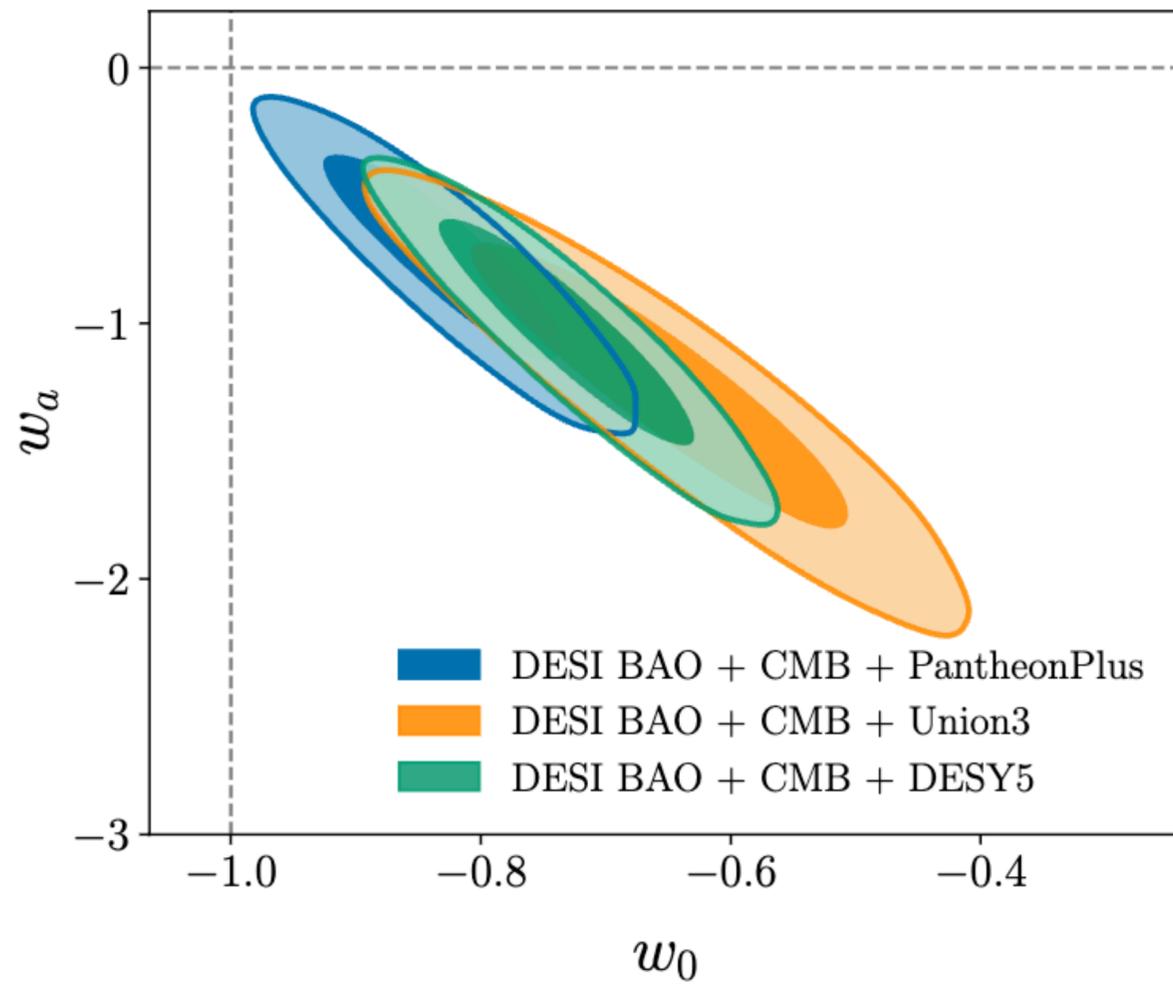


まとめ

再構成されたポテンシャル

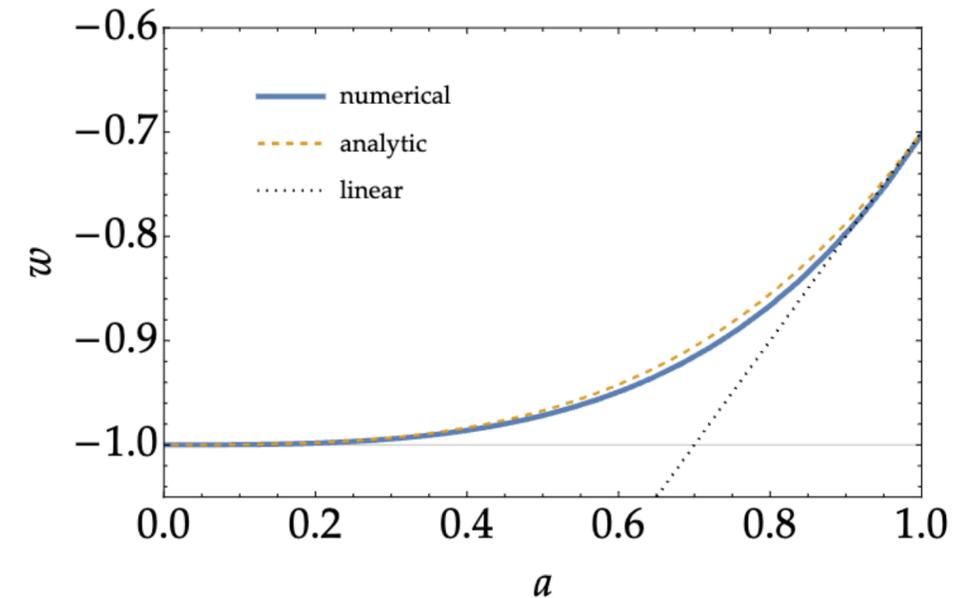


時間発展する暗黒エネルギーが示唆される



アクシオンモデルによる実現

- 宇宙複屈折
- 量子重力の沼地予想
との関連



付録

事前分布

[Adame et al., DESI 2024 VI, 2404.03002]

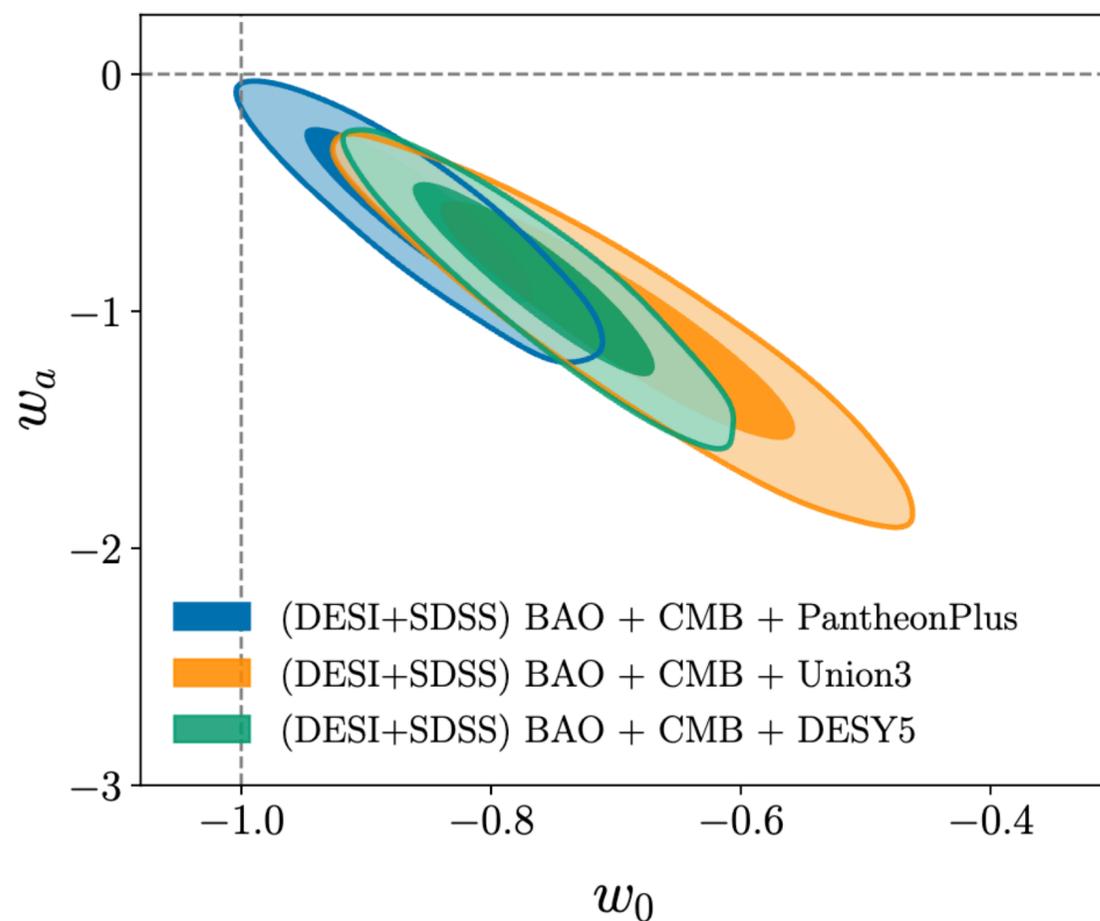
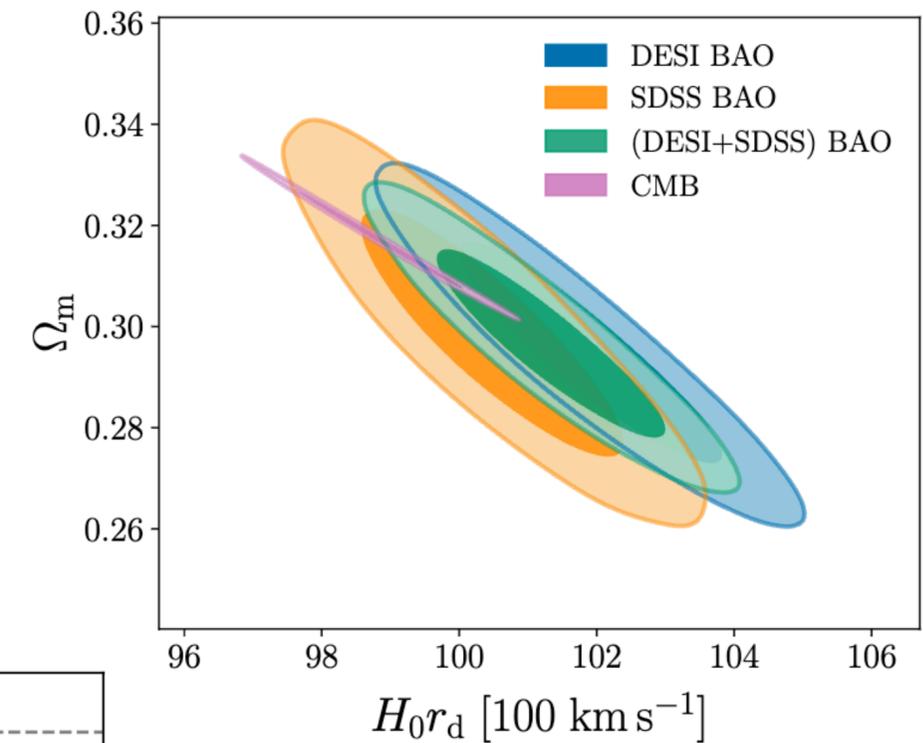
parametrization	parameter	default	prior
background-only	Ω_m	—	$\mathcal{U}[0.01, 0.99]$
no r_d calibration	$r_d h$ (Mpc)	—	$\mathcal{U}[\underline{10}, \underline{1000}]$
with r_d calibration	H_0 (km s ⁻¹ Mpc ⁻¹)	—	$\mathcal{U}[\underline{20}, \underline{100}]$
	ω_b	—	$\mathcal{U}[0.005, 0.1]$
CMB	ω_{cdm}	—	$\mathcal{U}[0.001, 0.99]$
	ω_b	—	$\mathcal{U}[0.005, 0.1]$
	$100\theta_{\text{MC}}$	—	$\mathcal{U}[0.5, 10]$
	$\ln(10^{10} A_s)$	—	$\mathcal{U}[1.61, 3.91]$
	n_s	—	$\mathcal{U}[0.8, 1.2]$
	τ	—	$\mathcal{U}[0.01, 0.8]$
extended	Ω_K	0	$\mathcal{U}[-0.3, 0.3]$
	w_0 or w	-1	$\mathcal{U}[-3, 1]$
	w_a	0	$\mathcal{U}[-3, 2]$
	$\sum m_\nu$ (eV)	0.06	$\mathcal{U}[0, 5]$
	N_{eff}	3.044	$\mathcal{U}[0.05, 10]$

SDSS との組み合わせ

$z = 0.7$ 付近での DESI の結果と SDSS の結果のずれが section 3.3 で議論されている。しかし、データは全体的に 1σ で整合的。

DESI と SDSS のデータは、重複無く組み合わせる事が可能。

SDSS と組み合わせると有意度は下がるが、依然として暗黒エネルギーの時間発展は示唆される。



超新星のデータにはばらつきがある

