



宇宙論による重力理論の検証

小山和哉

ポーツマス大学

Institute of Cosmology and Gravitation

木村利栄理論物理学賞受賞記念講演

謝辞

- 修士、博士論文の指導教官であり、推薦を頂いた早田次郎さん並びに共同研究者の方々に感謝いたします。
- 略歴
 - 京都大学人間・環境学博士（2002年）
 - 博士論文のタイトル：Brane World Cosmology
 - 日本学術振興会PD研究員（東京大学、ポーツマス大学）
 - ポーツマス大学（2005年ー）

基礎物理学研究所との交流

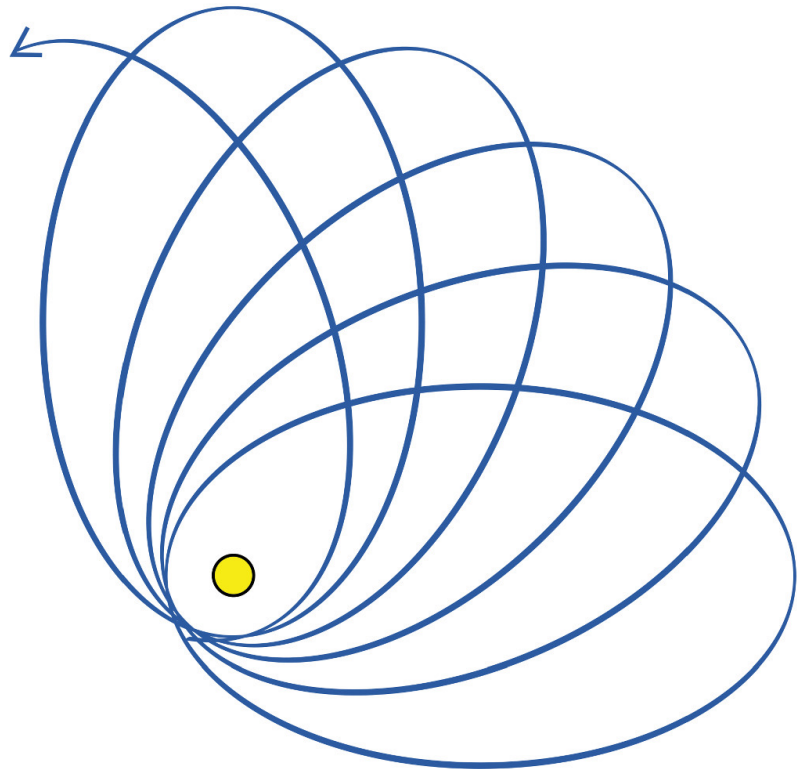
- Royal Society International project
(2009-2010, 佐々木節さん)
- Daiwa-Adrian award 2010
collaboration between Portsmouth and Kyoto
- 国際モレキュール型プログラム
2010 Non-linear cosmological perturbations
2014 Relativistic cosmology



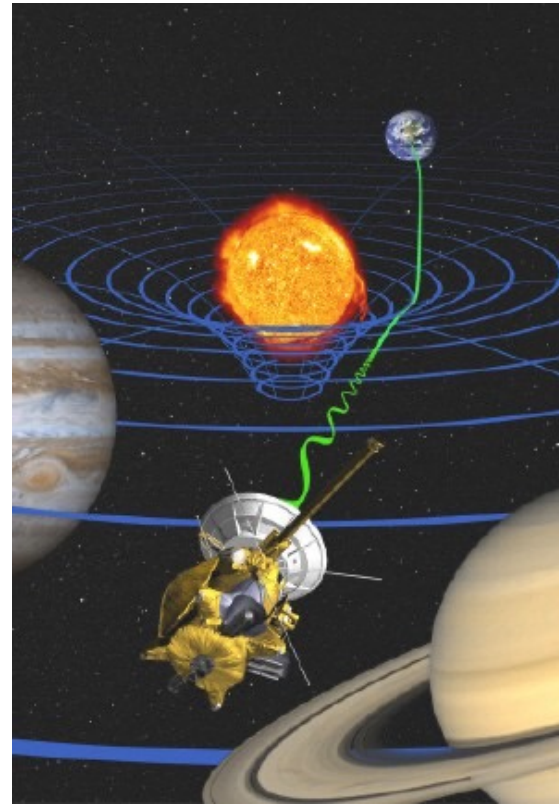
インフレーション宇宙論における非ガウス性の研究

太陽系での一般相対論の検証

惑星の近接点移動



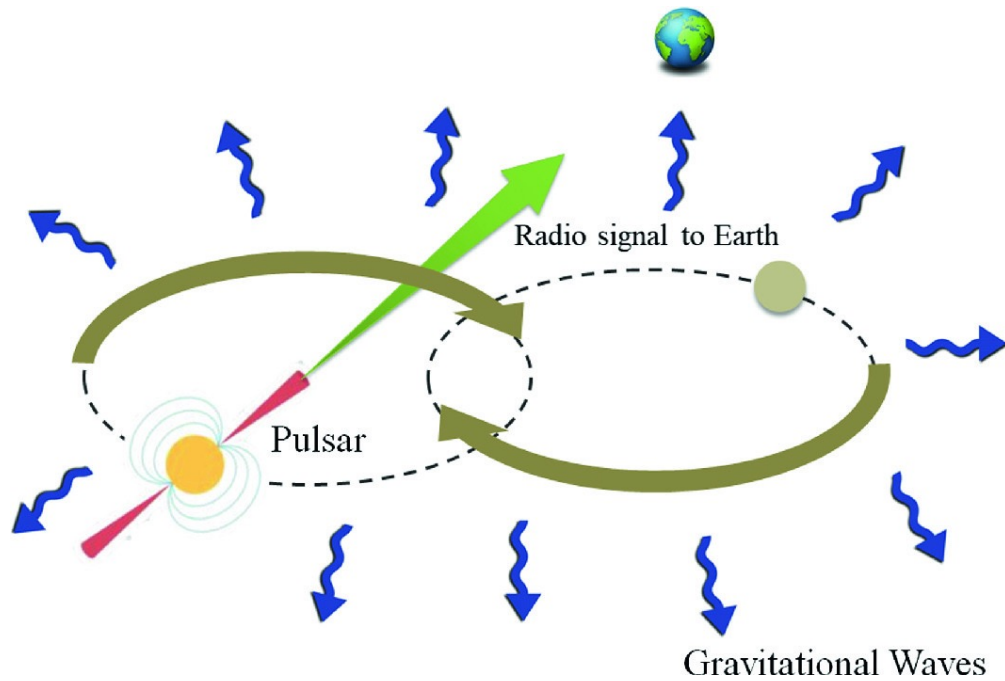
太陽の重力場による光への影響



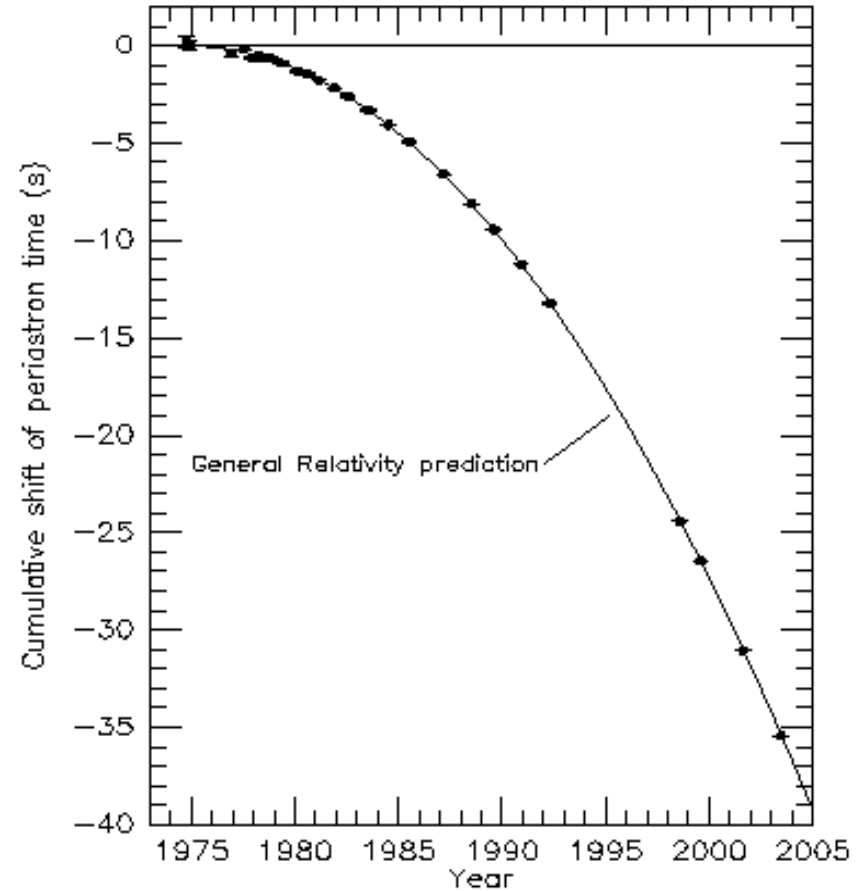
非常に高い精度で一般相対論からのずれが制限されている。

重力波による検証

- パルサーの観測



パルサー連星系の周期は重力波の放出によって短くなる。



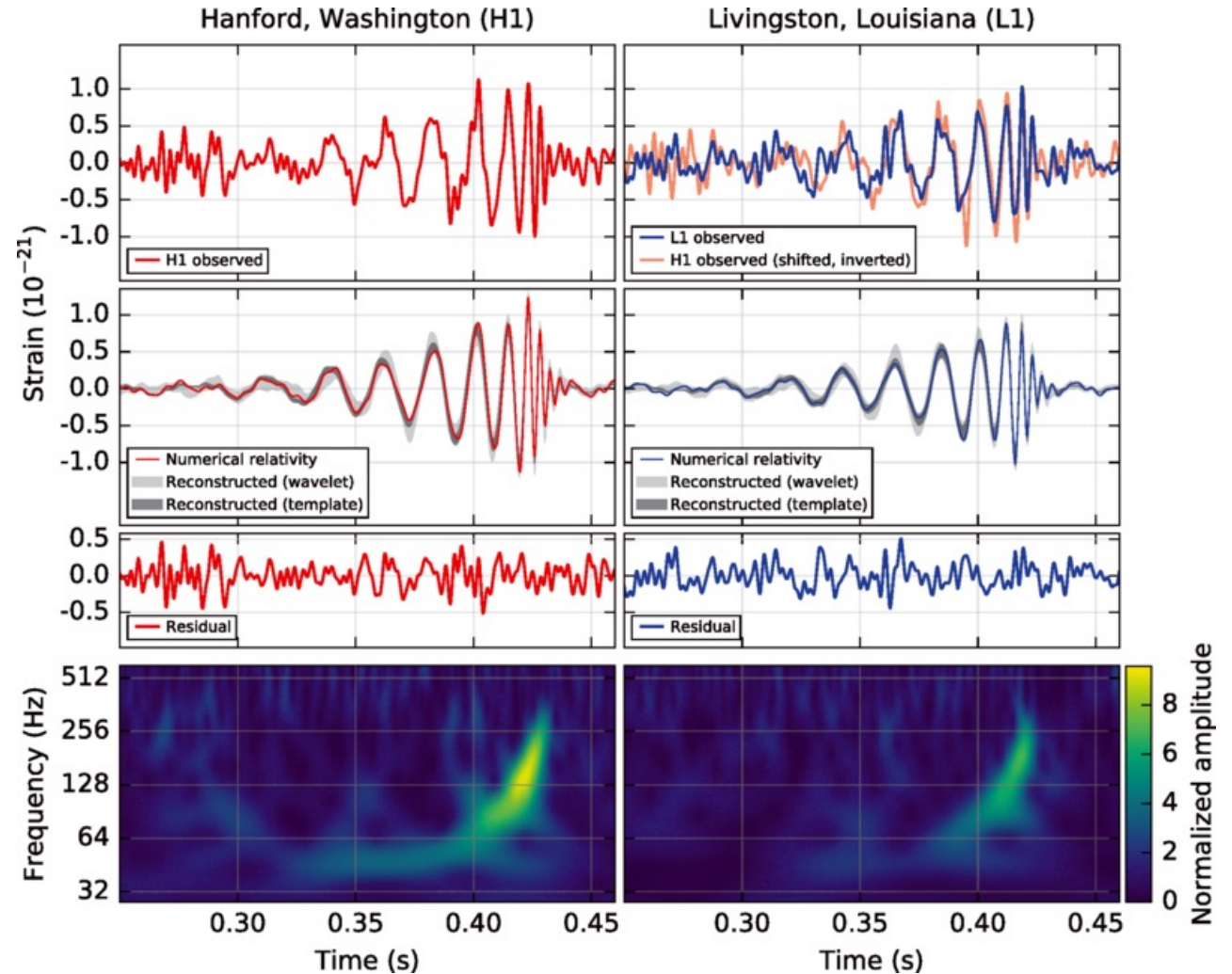
Hulse-Taylor パルサー

重力波の直接検出

- 連星ブラックホール合体
GW150914
初めての重力波直接観測

以後100に近い数のブラックホールまたは中性子星合体からの重力波が観測されている。

新たな一般相対論検証の機会を与えている。



重力理論の検証

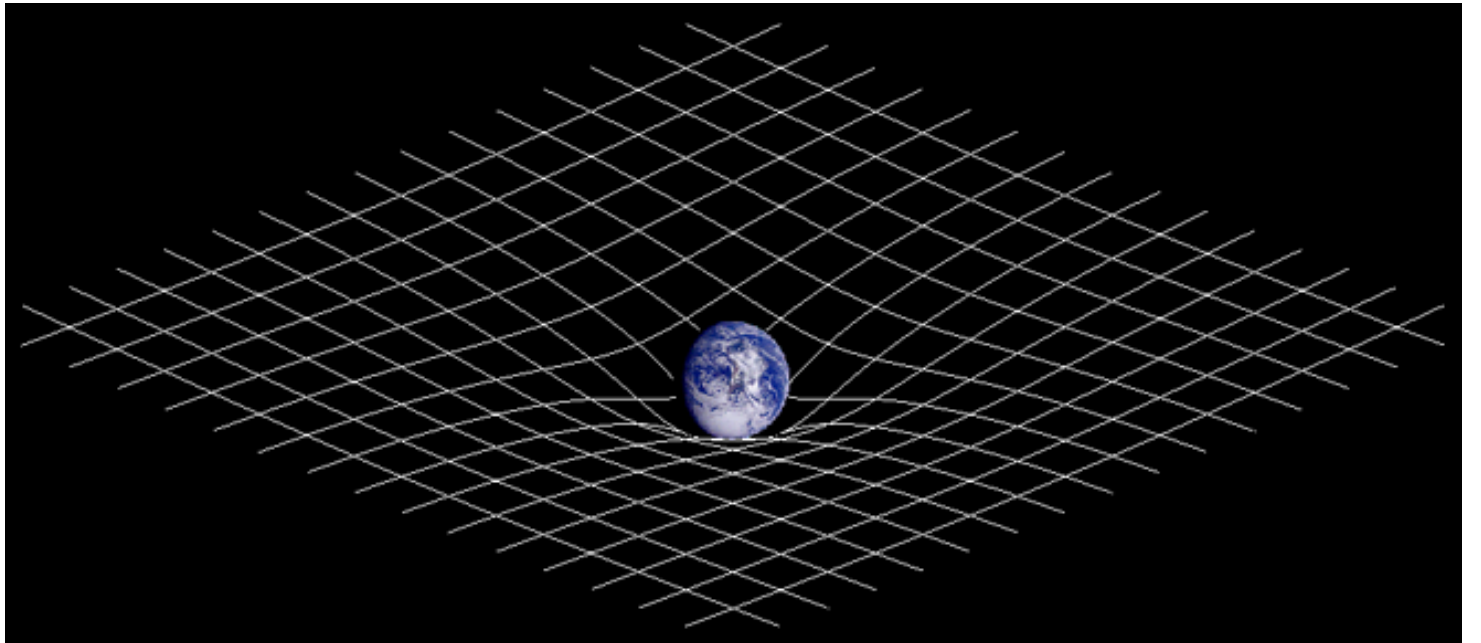
球対称な物体 (半径 r 、質量 M)

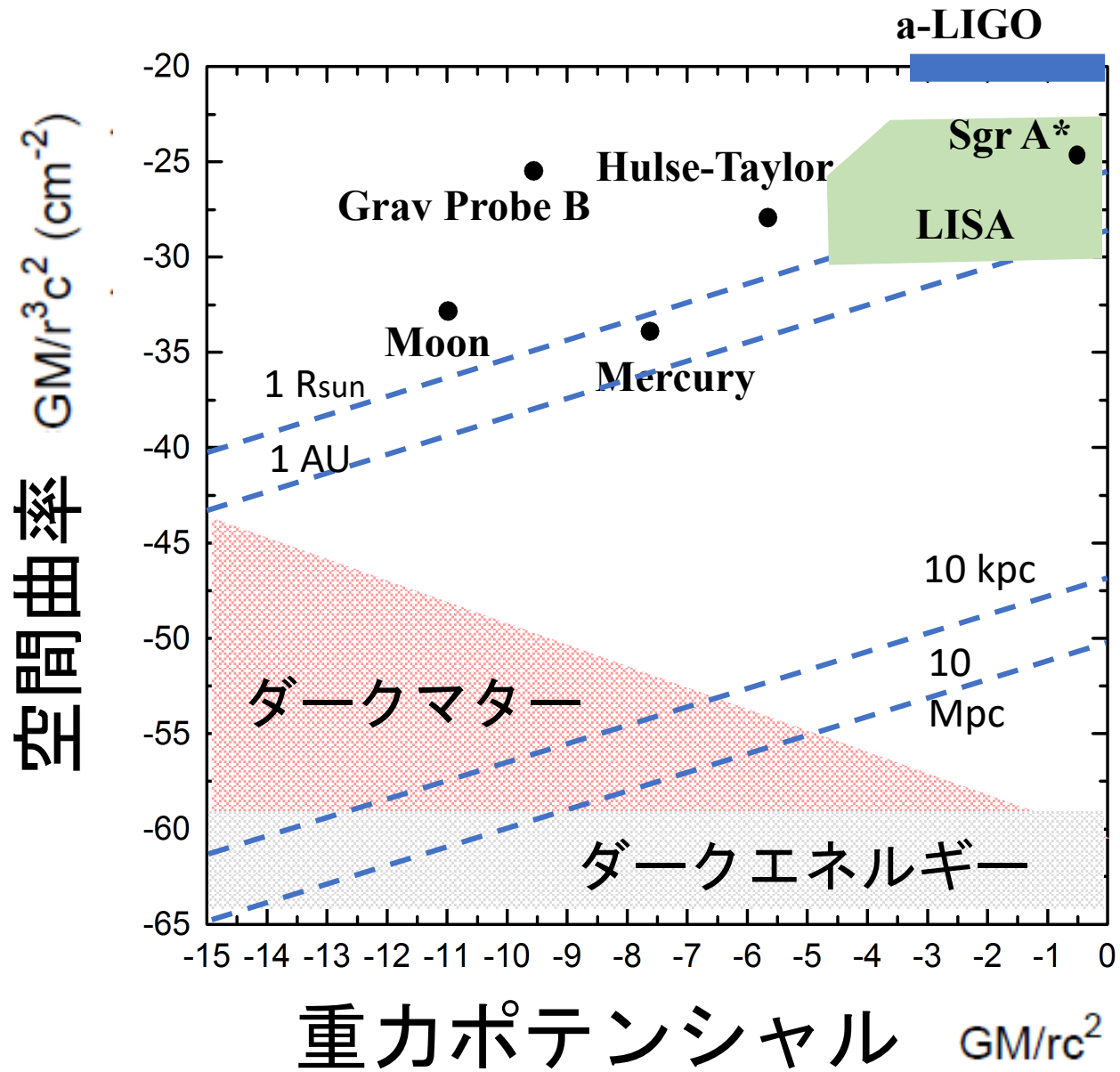
重力ポテンシャル

$$\frac{GM}{rc^2}$$

空間曲率

$$\frac{GM}{r^3 c^2}$$





空間曲率

$$\frac{GM}{r^3 c^2}$$

重力ポテンシャル

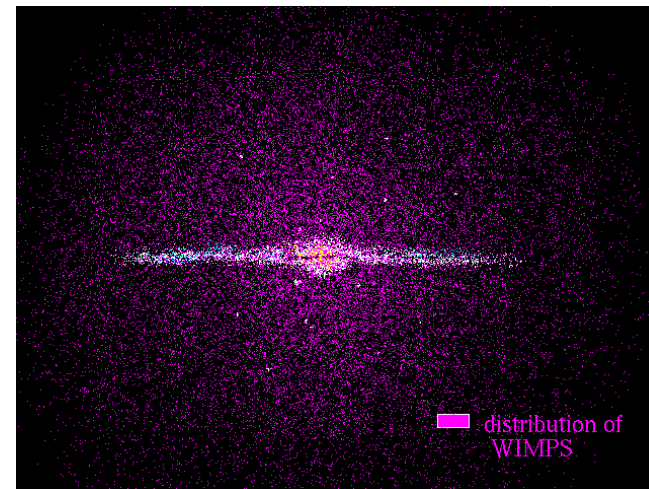
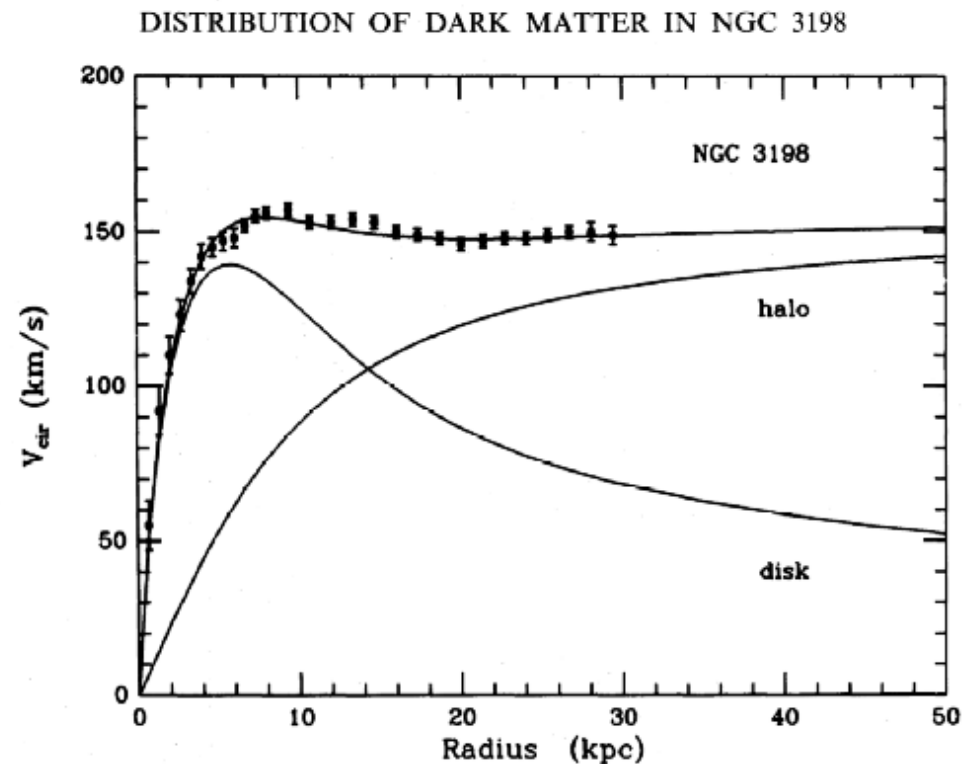
$$\frac{GM}{rc^2}$$

ダークマター

- 銀河の回転速度

光で観測される物質分布から予言される銀河の回転速度は、銀河中心から離れるにつれ低下するが、観測される回転速度は低下しない。

光では観測できない物質
暗黒物質（ダークマター）が存在する。



弾丸銀河団(Bullet cluster)

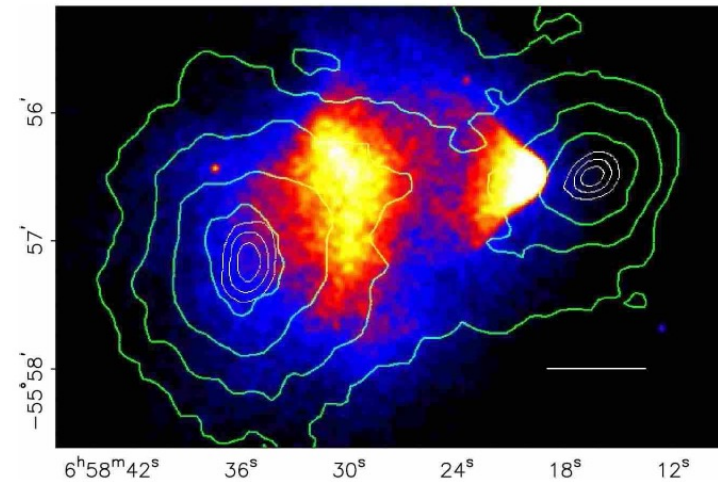
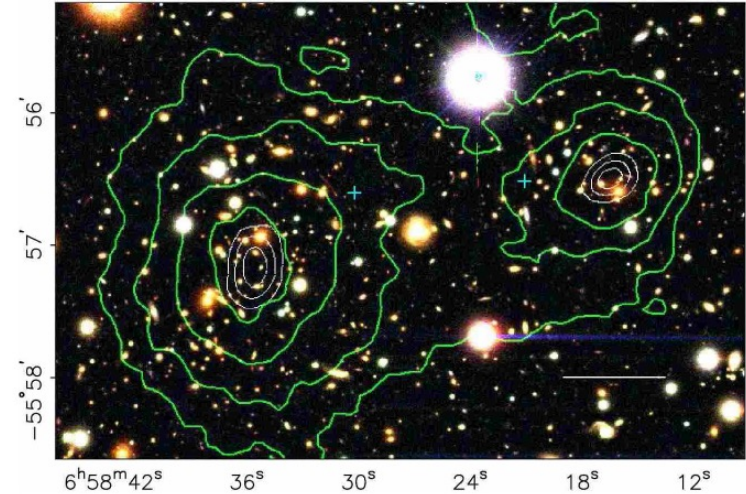
- X線の観測

銀河団の衝突による衝撃波

- 重力レンズ効果による質量分布

一般相対論によると光の進行は光源と観測者の間に分布する質量に影響される。

ガスとは異なる質量が存在する。



ダークエネルギー

- 宇宙の加速膨張

もし宇宙の膨張が加速しているなら、距離が長くなり、明るい物体は予想よりも暗く見える。



- 超新星爆発

連星系の白色矮星が起こす爆発より遠くの距離まで観測できる。

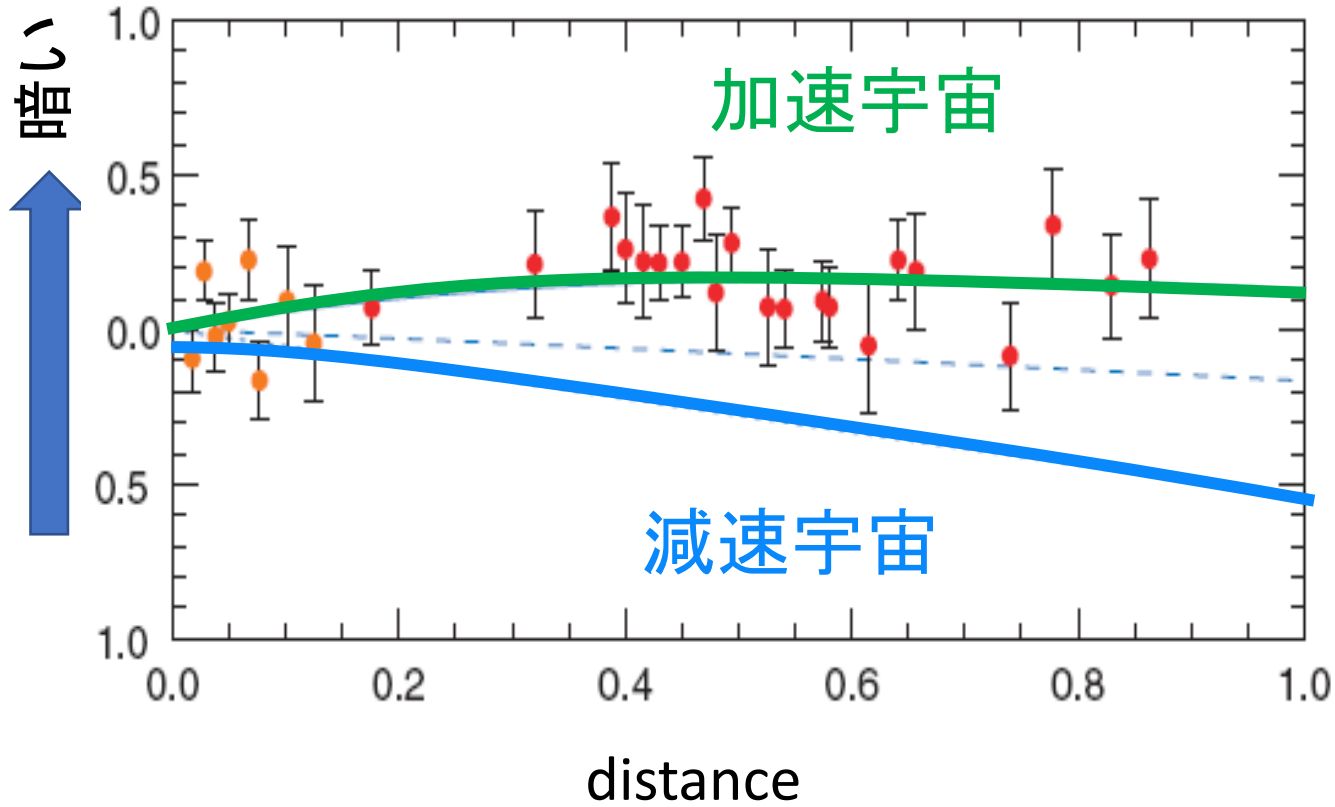
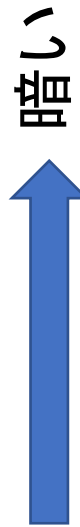


加速宇宙

減速宇宙



超新星の
みかけの
明るさ



宇宙の膨張は加速している。



Breakthrough of the year
1998 *Science magazine*

2011 ノーベル物理学賞
“宇宙の加速膨張の発見”

何が加速膨張を引き起こしている
かは不明

暗黒エネルギー（ダークエネルギー）
と呼ばれている。



Photo: Lawrence Berkeley National Lab

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



Photo: Scarpix/AFP

Adam G. Riess

宇宙定数

- ダークエネルギーの候補

宇宙定数は負のプレッシャーをもつ $P = -\rho$
 ρ は一定のエネルギー密度。宇宙が膨張しても密度が減少しない。

観測された加速膨張を説明するのに必要なのは $\rho \sim (0.002\text{eV})^4$

- 真空のエネルギー

場の量子論は真空のエネルギーの存在を予言するが、その大きさは高エネルギーの物理に依存する。素粒子理論がよく分かっているエネルギーを用いても観測に必要なエネルギー密度よりはるかに大きい。

(宇宙定数問題)

宇宙の標準モデル

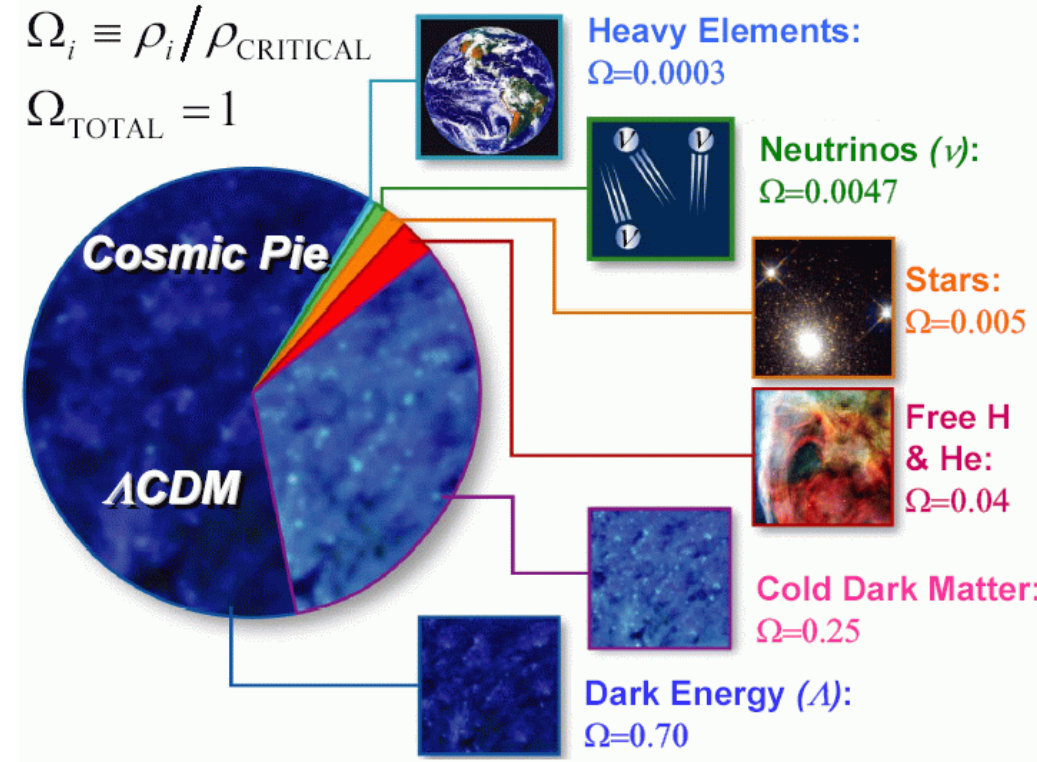
- 一般相対性理論に基づく宇宙モデル

$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 = \underbrace{\Omega_m}_{\text{物質}}(1+z)^3 + \underbrace{\Omega_\Lambda}_{\text{宇宙定数}} + \underbrace{\Omega_K}_{\text{空間曲率}}(1+z)^2$$

ハッブル関数（宇宙の膨張率） $H = \frac{\dot{a}}{a}$

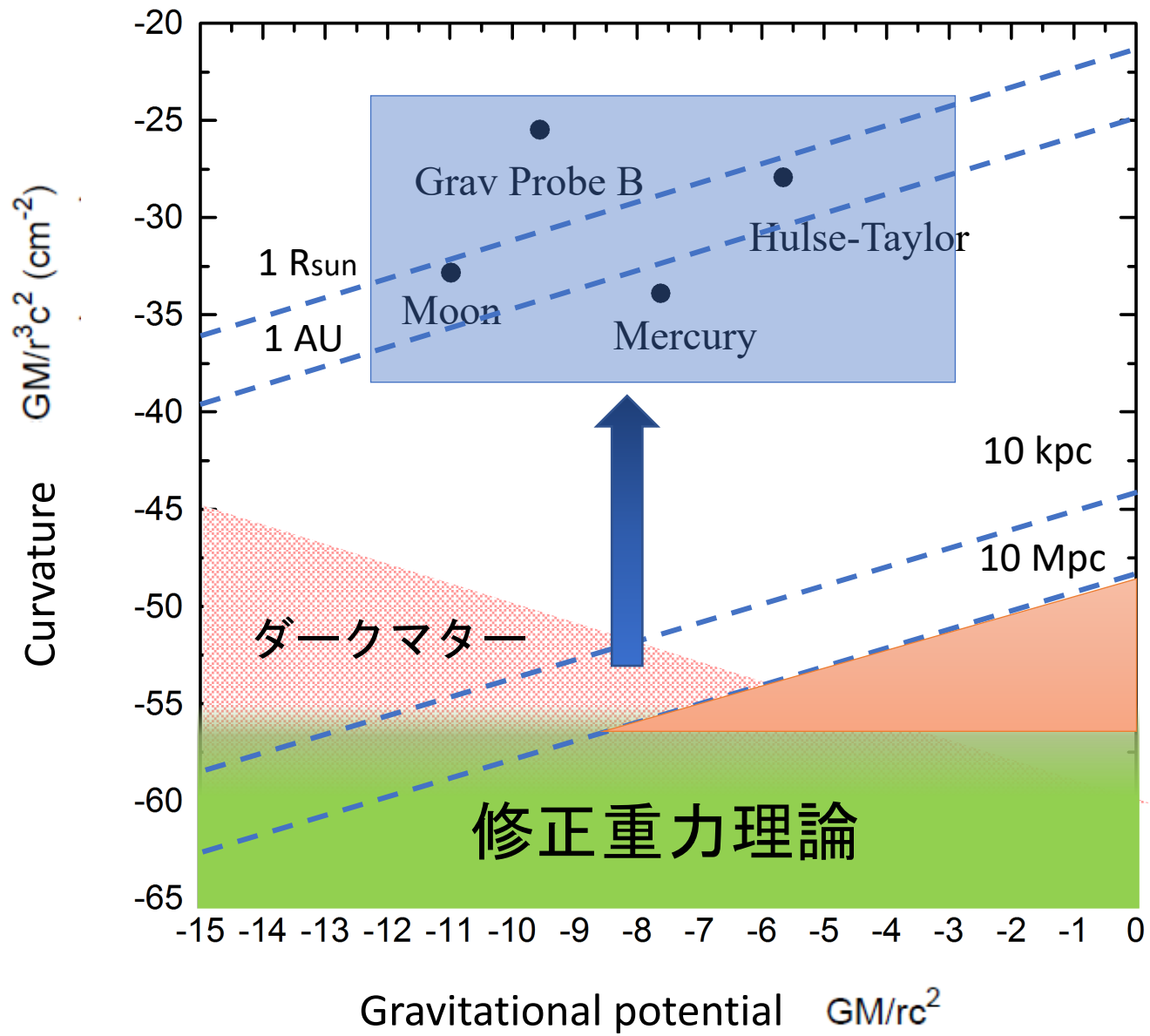
赤方偏移 $1+z = \frac{a_0}{a}$

現在、 $\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1$



5% 通常の物質
25% ダークマター
70% ダークエネルギー

一般相対論



宇宙論による
重力の検証



理論からのアプローチ

- 一般相対論の唯一性

Lovelockの定理によると 4次元理論で2階の微分運動式に従う唯一の計量のみによる理論

- 一般相対論の変更

高次元宇宙

スカラー、ベクトル場

多計量理論

.....

高次元宇宙ーブレーン宇宙論

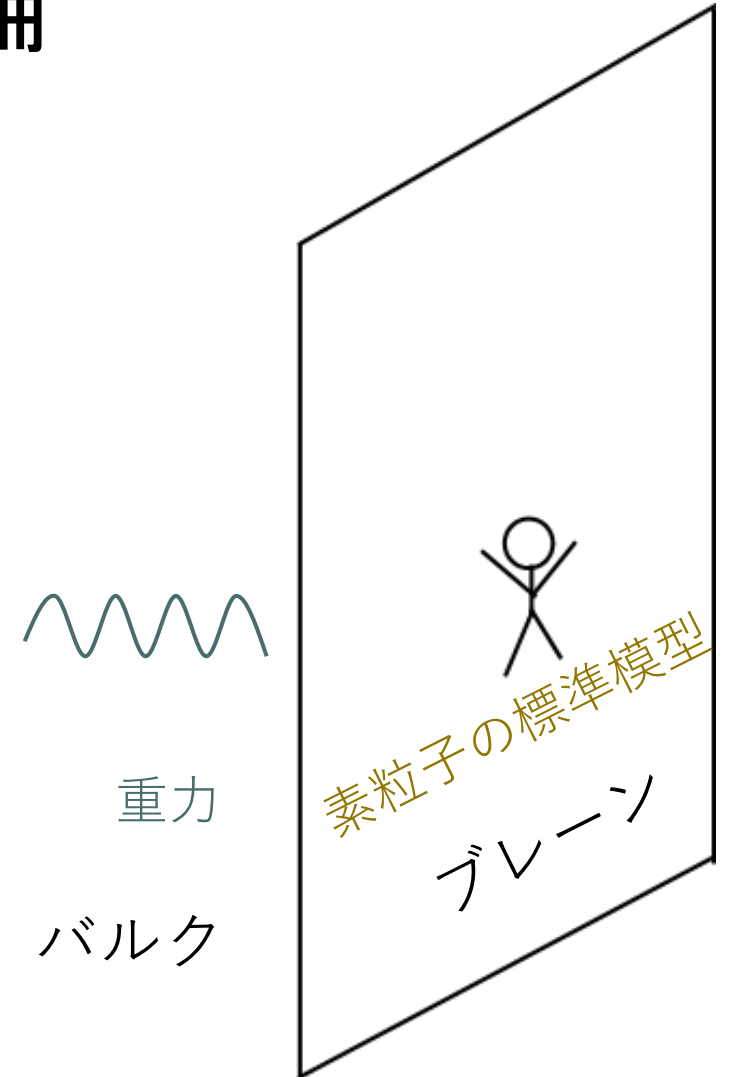
- ブレーンモデル

通常物質は4次元の膜（ブレーン）に拘束されている。

重力は高次元（バルク）を伝搬する。

- Randall-Sundrumモデル（1999年）

バルクが負の宇宙項をもつanti-de Sitterの場合、5次元が無限に広がっていてもブレーン上の重力は、低エネルギーでは4次元的に振る舞う。



ブレーンに基づくモデル

- Dvali-Gabadadze-Porratiモデル

5次元はMinkowski空間、4次元重力は
ブレーン上のinduced gravityで実現される。

$$M^3 \int d^5x \sqrt{-g} R$$

- Self-accelerating宇宙

宇宙項なしでも加速膨張が説明できる解
が存在する。



重力

バルク

- Vainshtein機構

4次元重力の再現は非線形効果が必要になる。



Self-accelerating宇宙

KK Phys.Rev.D 72(2005) 123511, Gorbunov, KK and Sibiryakov Phys. Rev. D 73 (2006) 044016

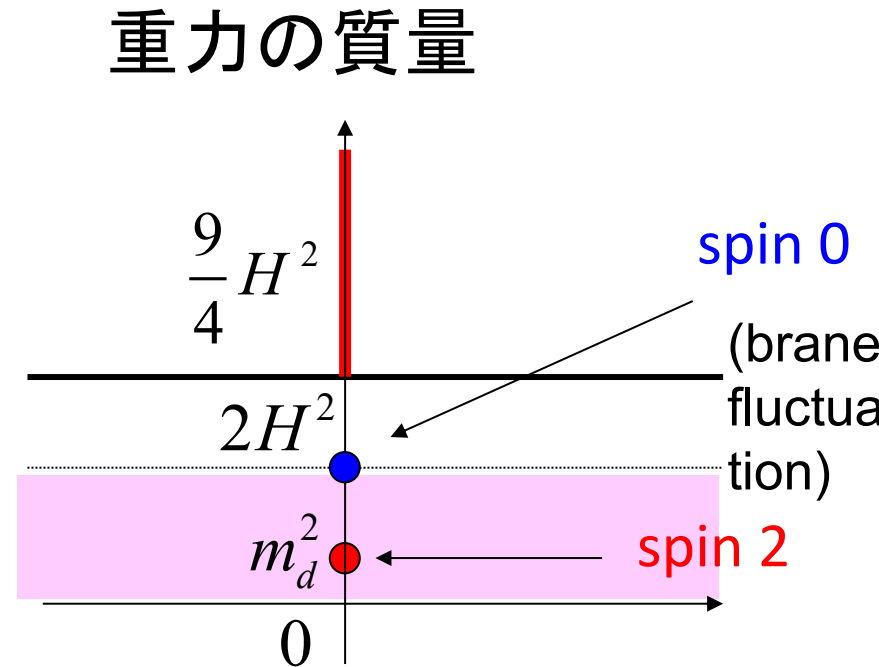
- Self-accelerating宇宙

$$H^2 = \pm H/r_c, \quad r_c = M_P^2/M^3$$

+ ブランチの場合宇宙項なしでも de Sitter 解が存在する。

しかしこの解は不安定 (ゴーストが存在)

質量をもつスピン 2 のモードが不安定 (de Sitter 時空中の Higuchi ゴースト)、または
ブレーンの揺らぎに対応するスピン 0 のモードが不安定



$$1 < Hr_c$$

Vainshtein機構

- 線形重力理論

線形重力の範囲では、ブレーン振動モードの寄与のため小さなスケールでも4次元の相対論の予言が再現されない。

- 非線形性

ブレーン振動モードの非線形を考慮すると、このモードの寄与は抑制される。この振動モードは **"Galilean"** 不変性をもつ。
(スカラー場の勾配に一定量を足しても理論は不変。)

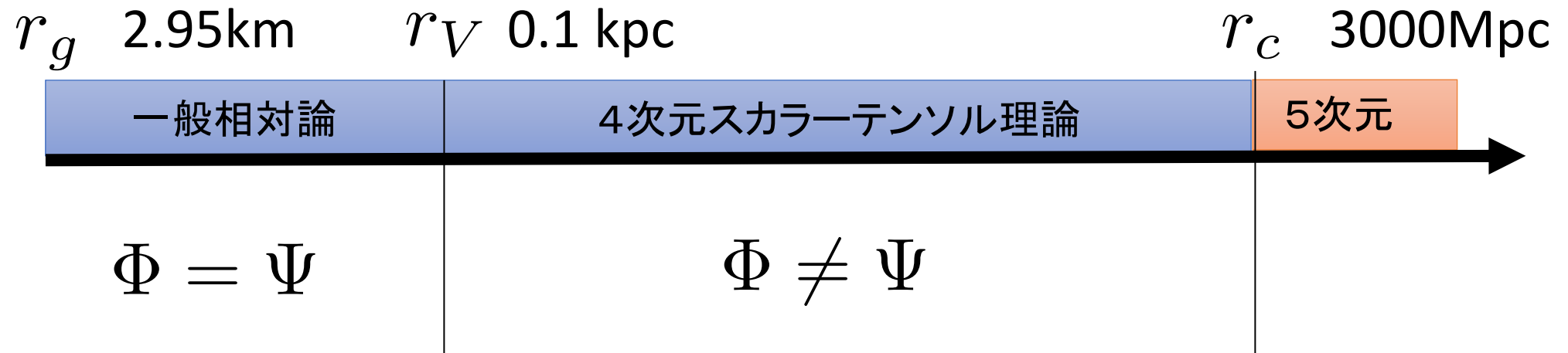
運動方程式

$$\nabla^2 \varphi + \frac{r_c^2}{a^2} \left[(\nabla^2 \varphi)^2 - (\nabla_i \nabla_j \varphi)^2 \right] = -8\pi G a^2 \rho$$

重力の振る舞い

KK and Maartens JCAP 01(2006) 016, KK and Silva Phys. Rev. D 75 (2007) 084040

- 太陽の重力 Ψ : 重力ポテンシャル Φ : 曲率揺らぎ



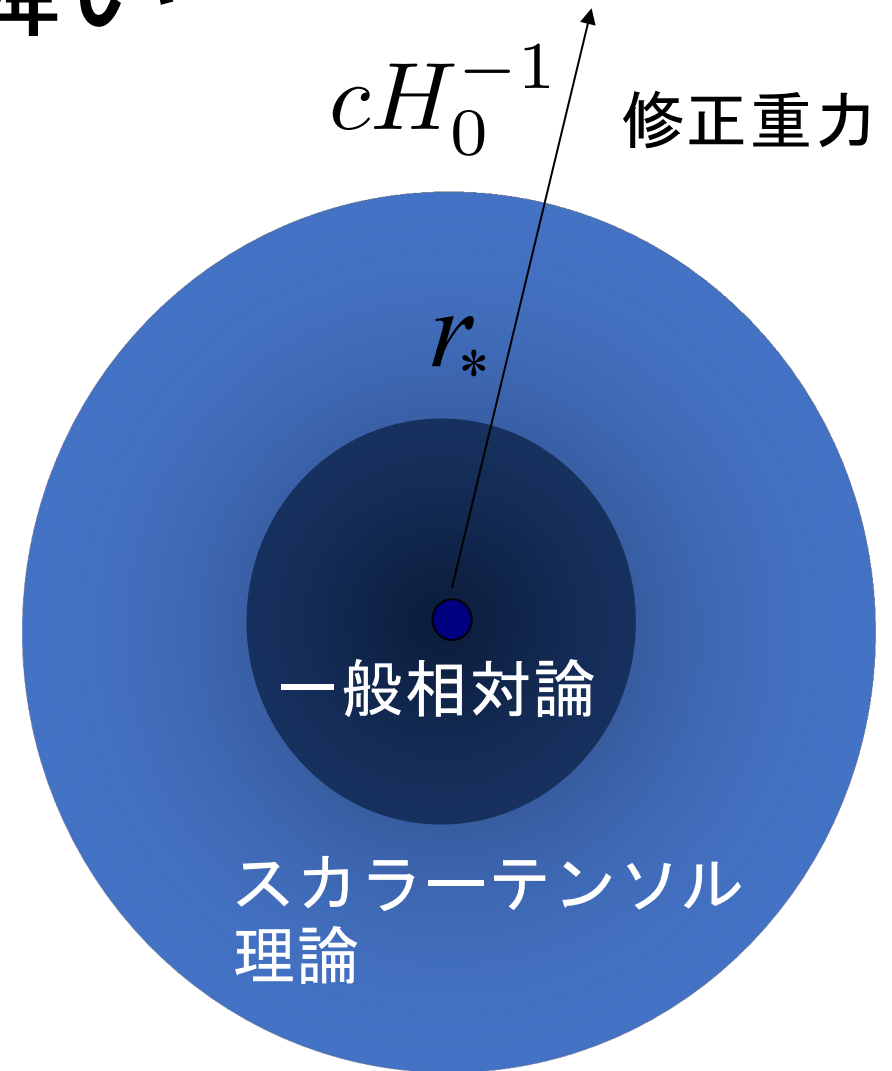
ブレーン振動モードが非等方ストレスを励起し、重力を変更する。
この効果はVainshtein半径以下では、振動モードの非線形によって抑制される。

理論の再発見と進展

- "Galilean" 不変性をもつ理論の拡張（ガリレオン）
 - 4次元スカラーテンサー理論
 - 2階の微分方程式をもつ理論の再発見（Horndeski理論）
 - 高階微分を含むが、縮退によって安定な理論（DHOST）
- Massive gravity
 - decoupling極限でガリレオンを実現する安定な非線形理論
 - 一般に安定なself-accelerating解を見つけるのは非常に困難

(理想的な) 重力の振る舞い

- **ホライズンスケール**
重力の変更で加速膨張が起こる。
- **大規模構造のスケール**
宇宙論的摂動の適用範囲では重力は修正される。
- **太陽系のスケール**
スクリーニングによって相対論の予言が再現される。



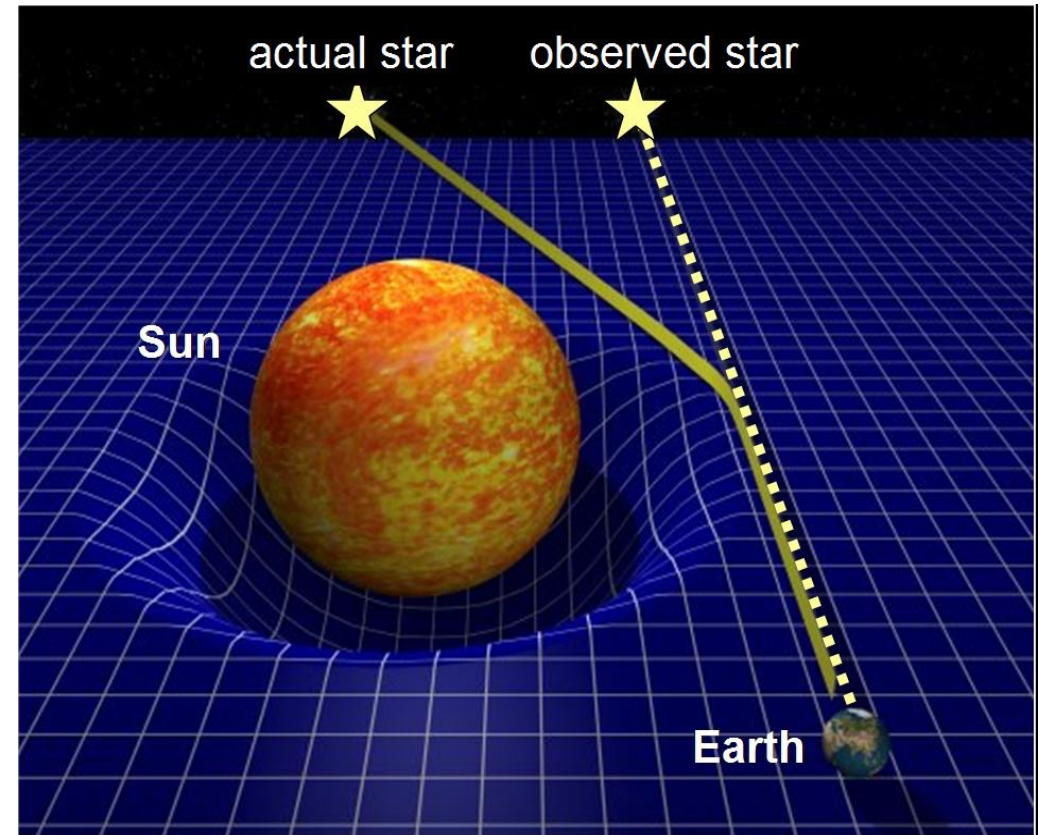
宇宙論による重力のテスト

- 重力ポテンシャル Ψ
銀河などの非相対論な物体の運動を決める。

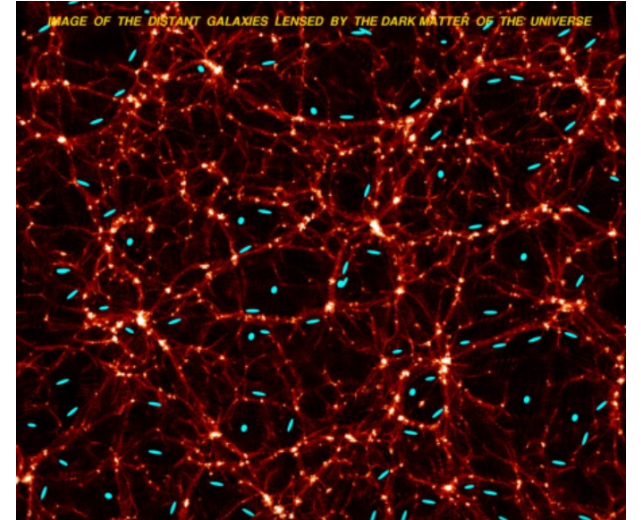
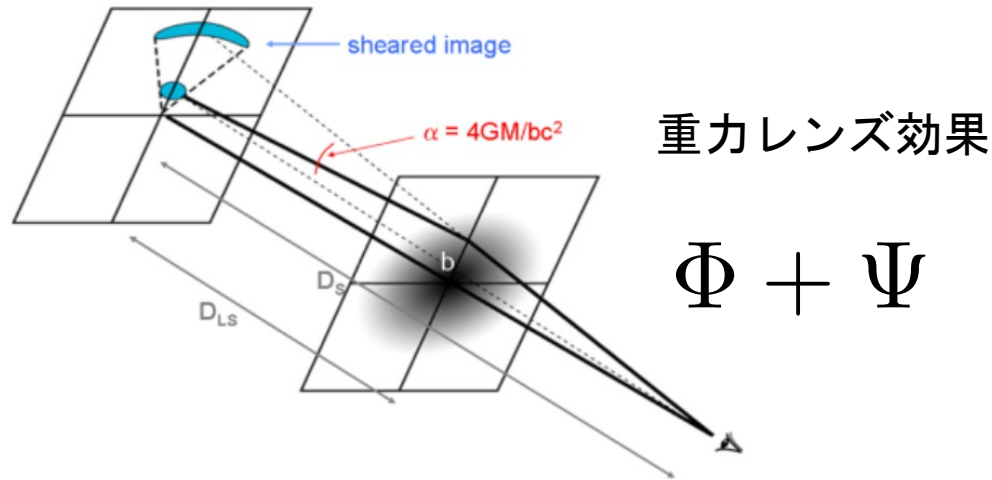
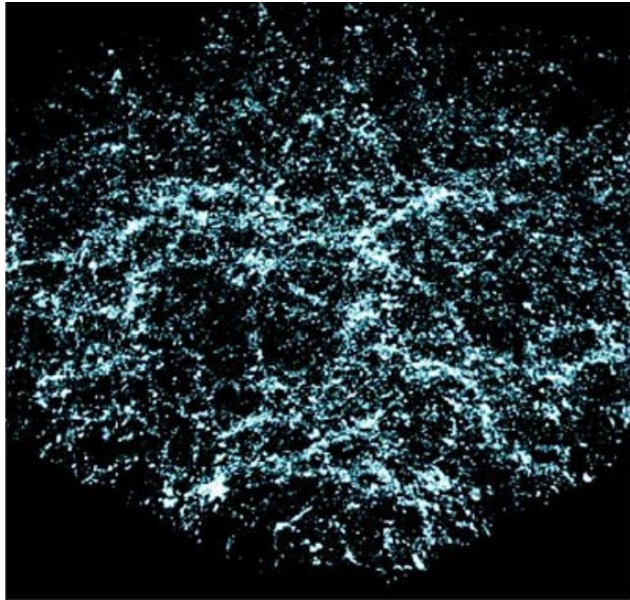
- 空間の曲率揺らぎ Φ
光の軌跡に影響する。

一般相対論の予言 $\Psi = \Phi$

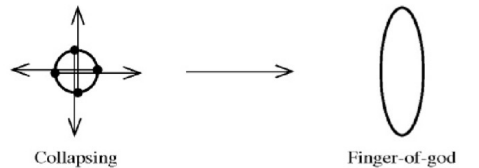
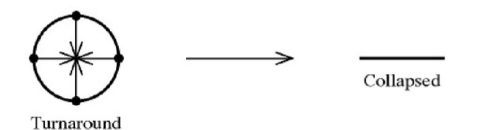
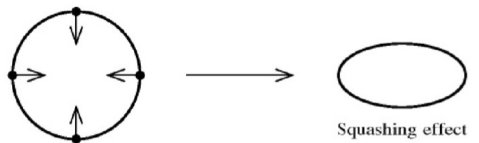
銀河の運動から推定される質量
は重力レンズ効果から推定される質量に等しい。



宇宙の大規模構造の観測

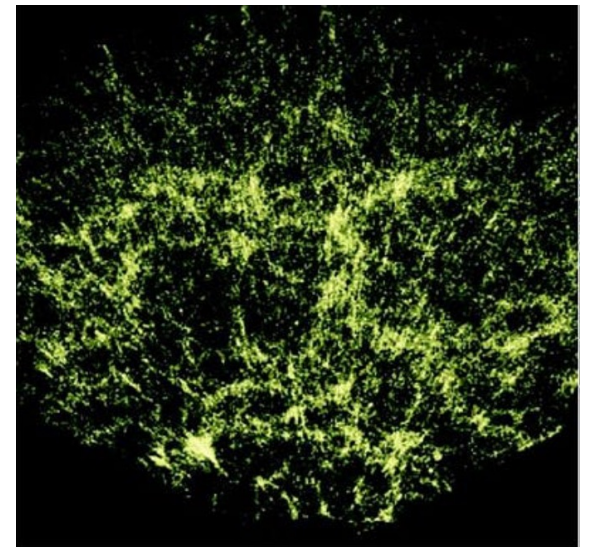


Real space: Keamsitt space:



赤方偏移歪み

Ψ



観測からの制限

- 背景宇宙の発展

$$F(H^2) = \frac{8\pi G}{3} \rho_m \quad \rightarrow \quad H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_m + \rho_{DE})$$

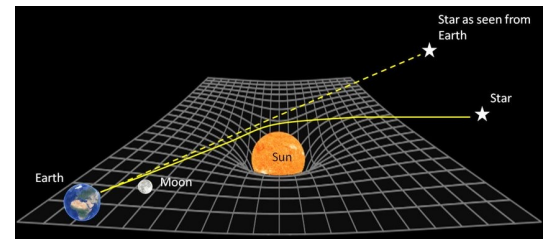
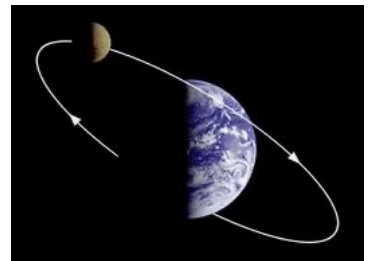
ダークエネルギーのエネルギー密度 $\Omega_{DE}(z) = \frac{\rho_{DE}(z)}{\rho_{crit}}$

- 宇宙論的摂動

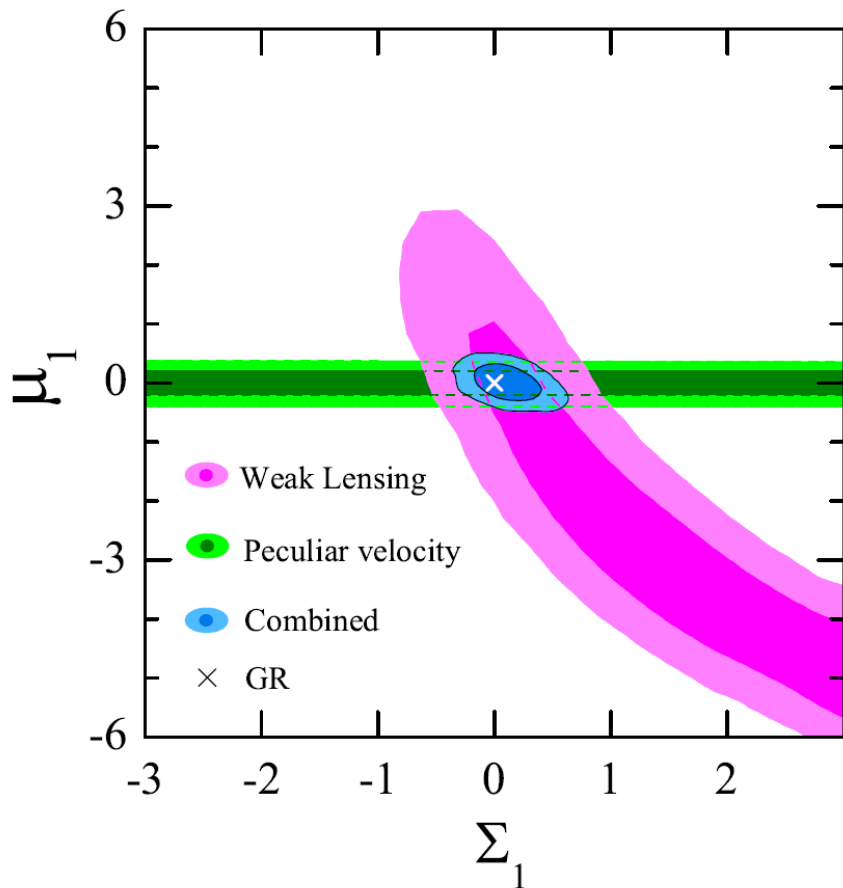
$$k^2 \Psi = -4\pi G a^2 \mu(z, k) \rho_m \delta_m : \text{重力ポテンシャル}$$

密度揺らぎ

$$k^2 (\Psi + \Phi) = -8\pi G a^2 \Sigma(z, k) \rho_m \delta_m : \text{重力レンズ効果}$$

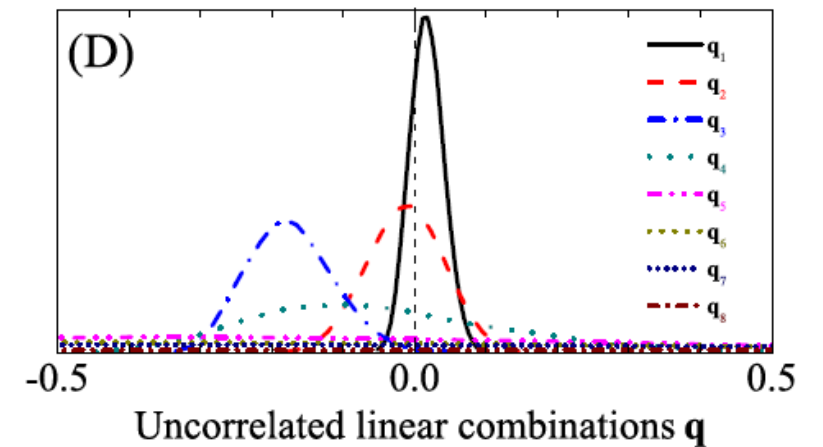
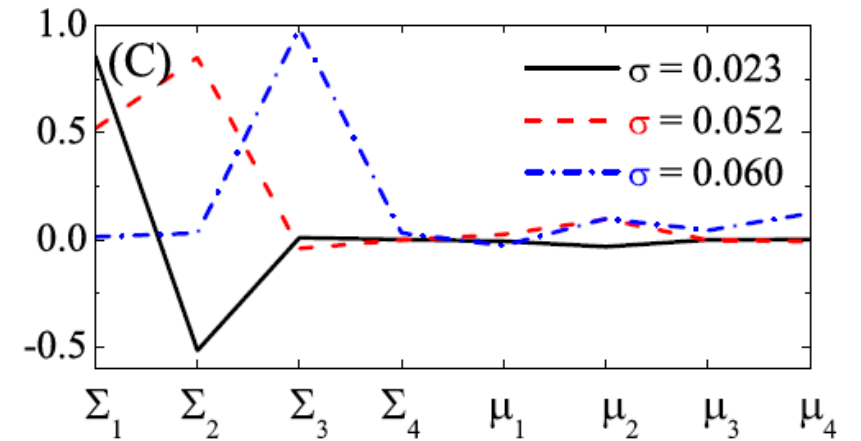
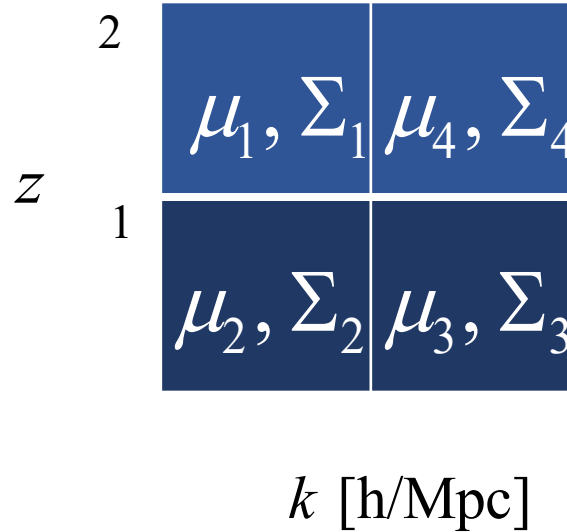


大規模構造からの制限



$$\mu(a) = 1 + \mu_1 a$$

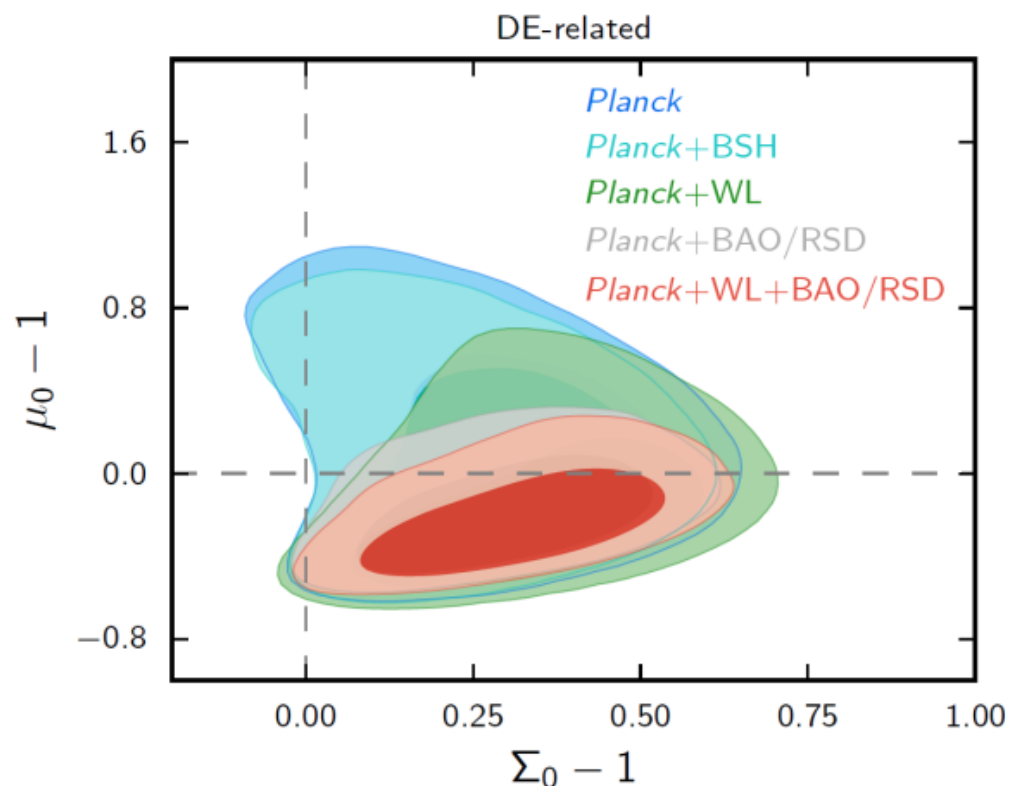
$$\Sigma(a) = 1 + \Sigma_1 a$$



大規模構造からの制限

Planck

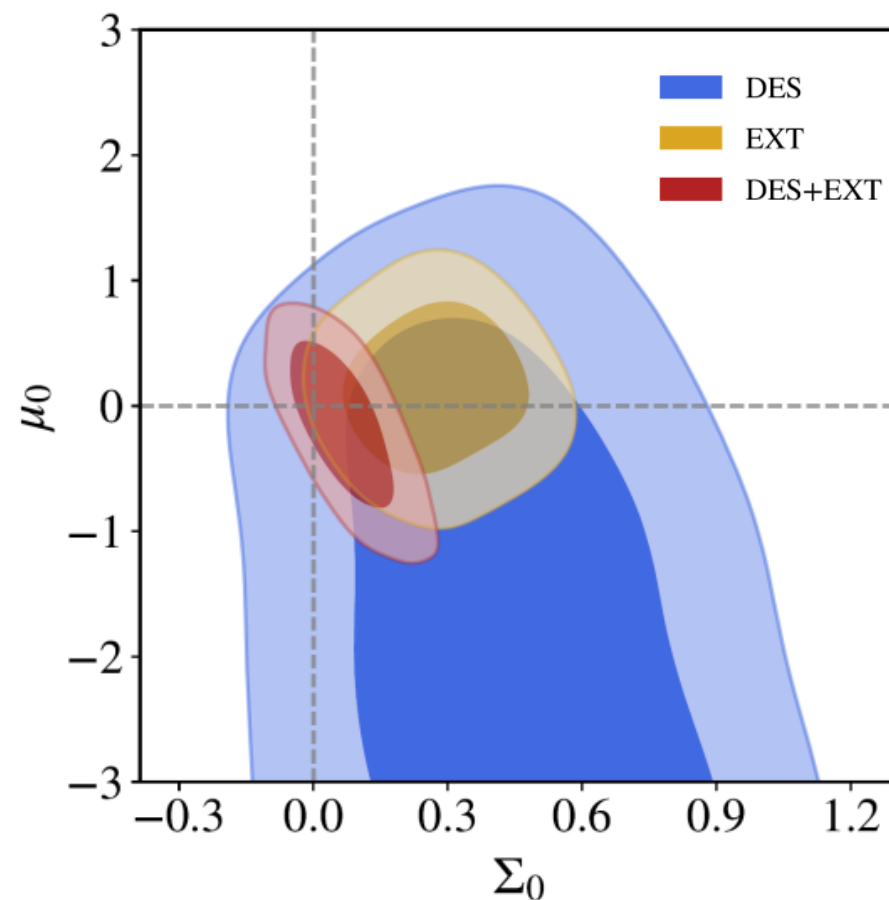
Planck 1502.01590



これらの制限は時間の関数に関する仮定に強く依存する。

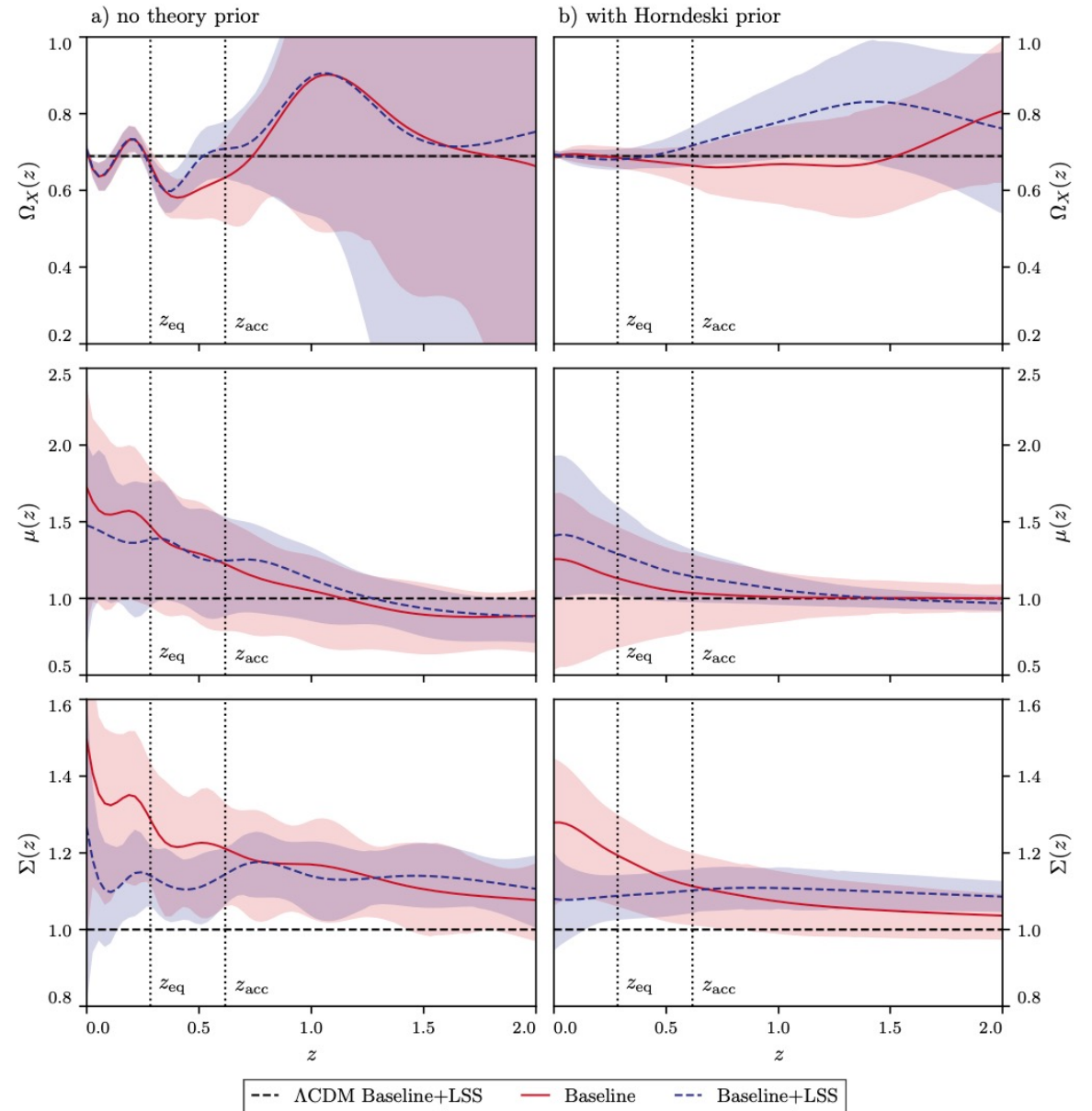
Dark Energy Survey

DES 1810.02499



理論に基づく再構築

- **Baseline**
 宇宙背景輻射 (Planck)
 バリオン音響振動 (eBOSS+)
 超新星爆発 (Pantheon)
- **LSS (大規模構造)**
 赤方偏移歪み
 eBOSS + BOSS
 弱重力レンズ効果
 Dark Energy Survey year 1



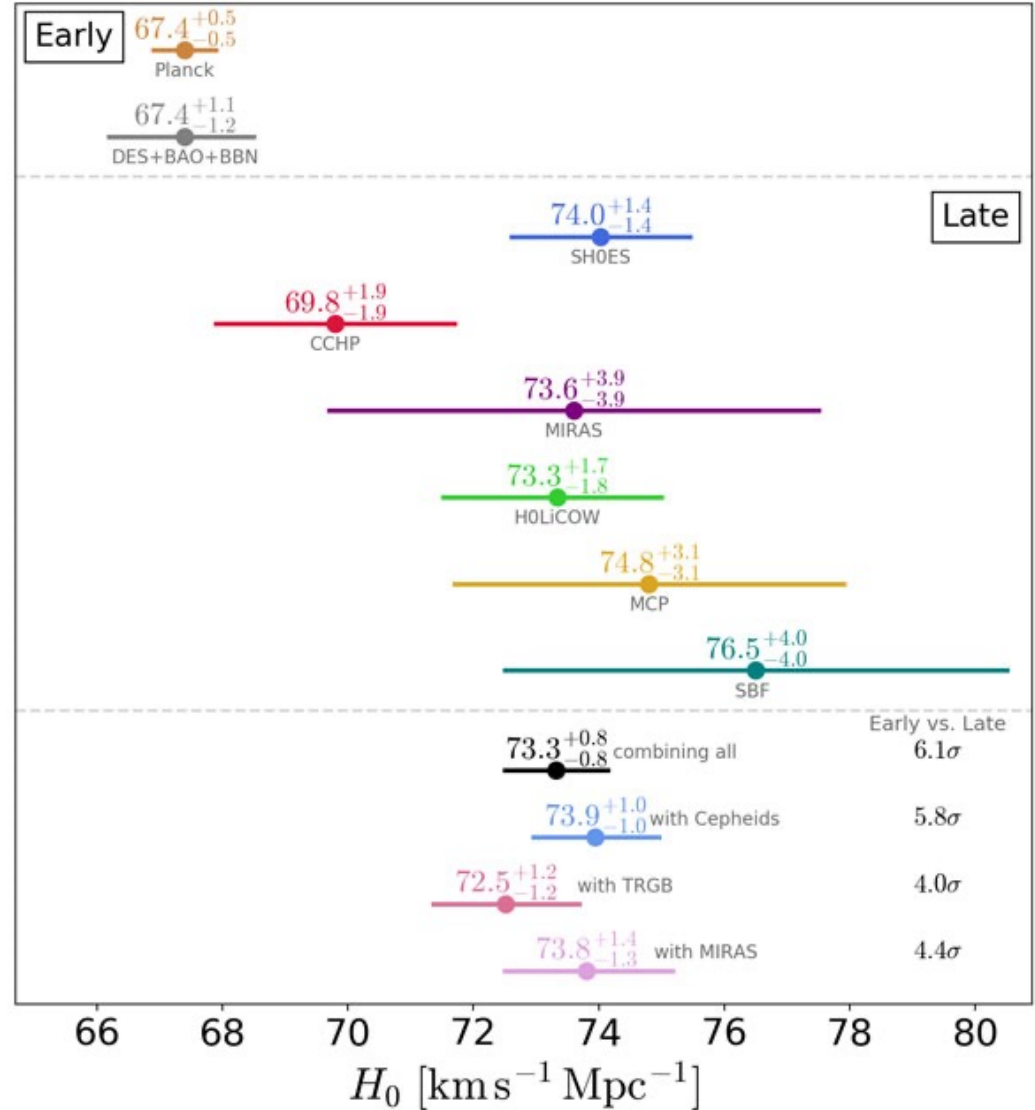
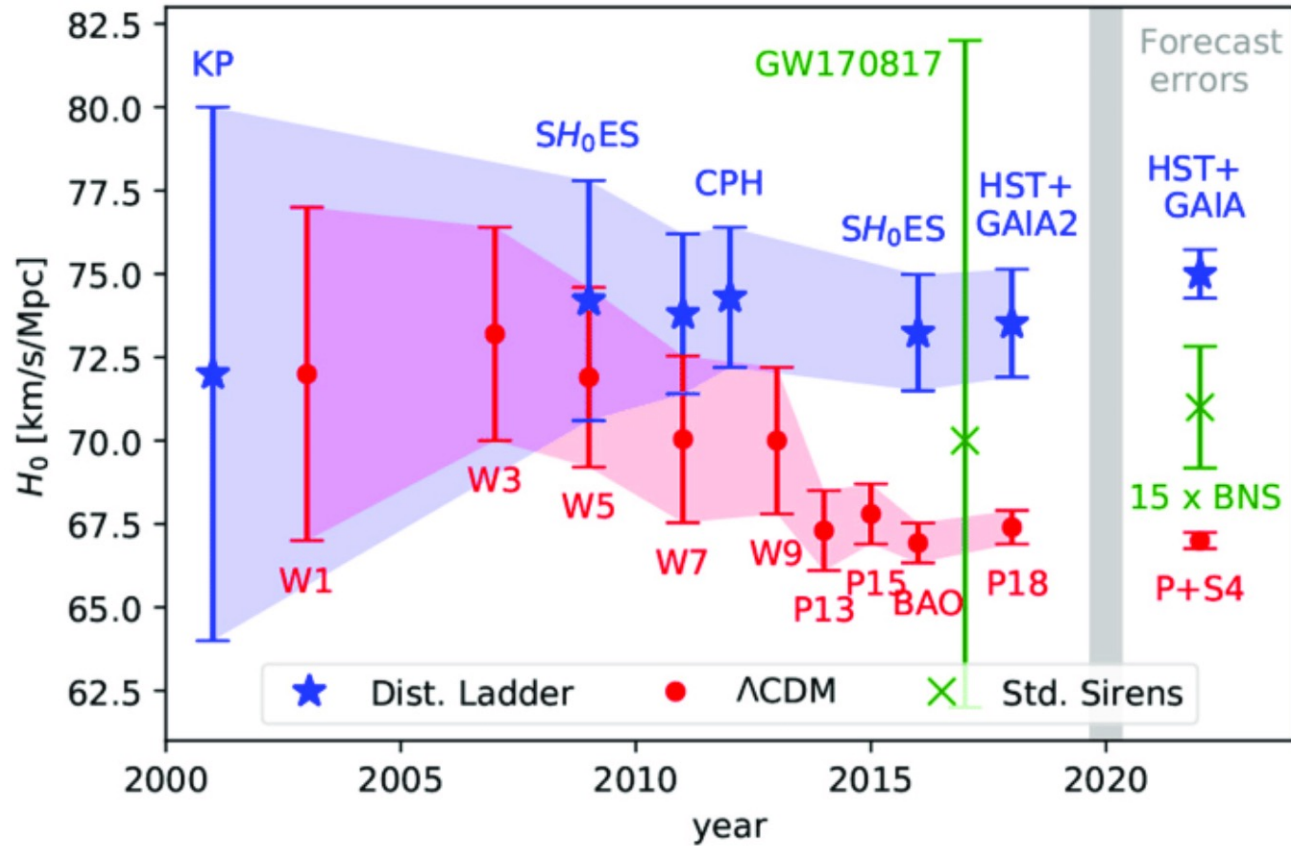
宇宙論の標準模型におけるテンション

- 宇宙定数に基づくモデル (Λ CDMモデル) におけるテンション
テンション

同じモデルパラメーターを1つ以上の観測から制限したときに誤差を超えて、制限が一致しない。

- ハッブル定数
- 弱重力レンズ効果の振幅
- 宇宙背景放射の温度揺らぎ相関の弱重力レンズ効果

ハッブル定数



宇宙背景輻射からの制限と、距離梯子を使った制限に 5σ のテンション

弱重力レンズ効果

- 弱重力レンズ効果

Λ CDMモデルでは振幅は

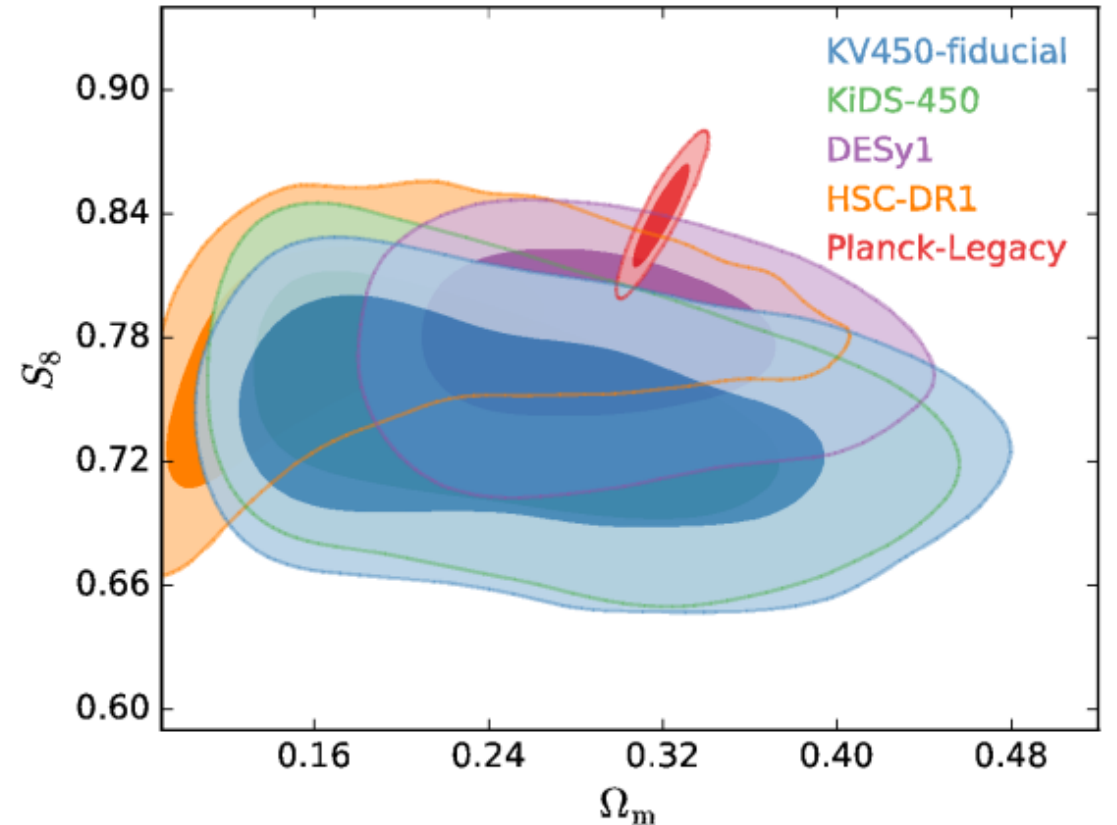
$$S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m / 0.3}$$

で決まる。

σ_8 : 揺らぎの振幅

宇宙背景輻射から予言される
値が弱重力レンズ効果からの制限
に比べてやや大きい。

DES: <https://www.darkenergysurvey.org/>; HSC: <https://www.naoj.org/Projects/HSC/>;
KiDS: <http://kids.strw.leidenuniv.nl/DR3/lensing.php>



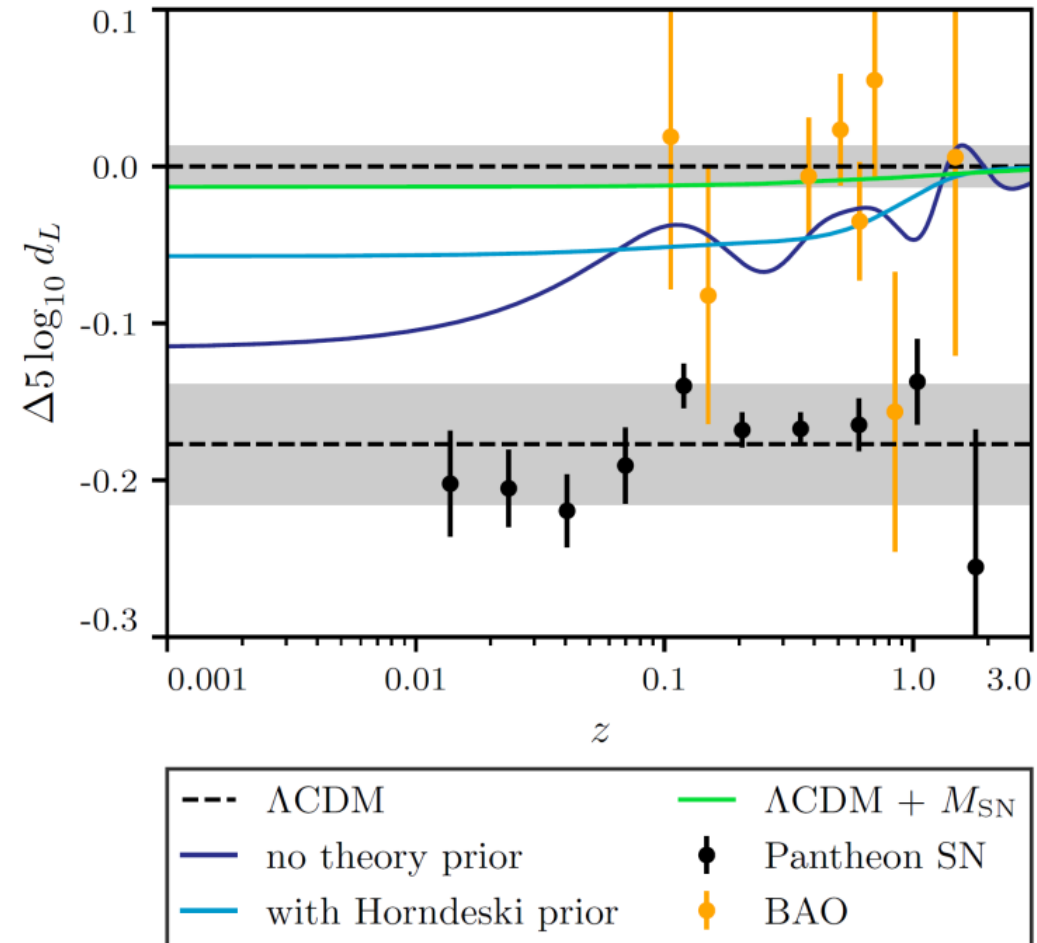
ハッブル定数

• ハッブル定数問題

宇宙背景輻射とバリオン音響振動から測った宇宙論的距離と超新星爆発から測った距離に矛盾がある。

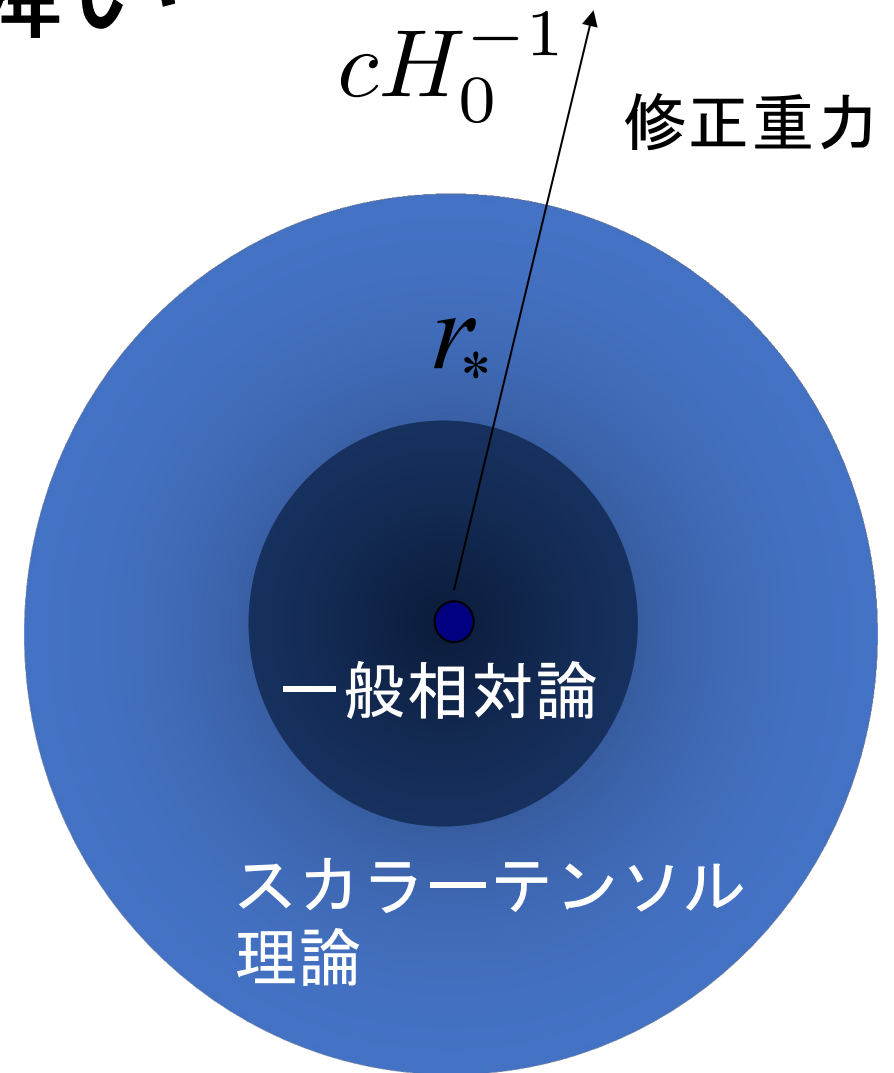
宇宙定数を時間変化するエネルギーに変更してもこの問題は解決しない。

初期宇宙（宇宙背景輻射が形成される時期以前）に変更が必要

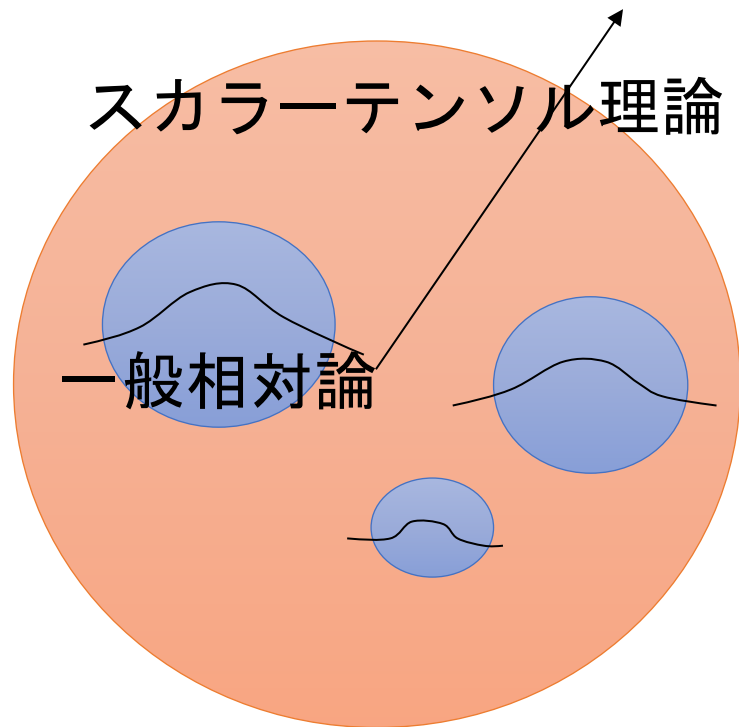


(理想的な) 重力の振る舞い

- **ホライズンスケール**
重力の変更で加速膨張が起こる。
- **大規模構造のスケール**
宇宙論的摂動の適用範囲では重力は修正される。
- **太陽系のスケール**
スクリーニングによって相対論の予言が再現される。



スクリーニング機構

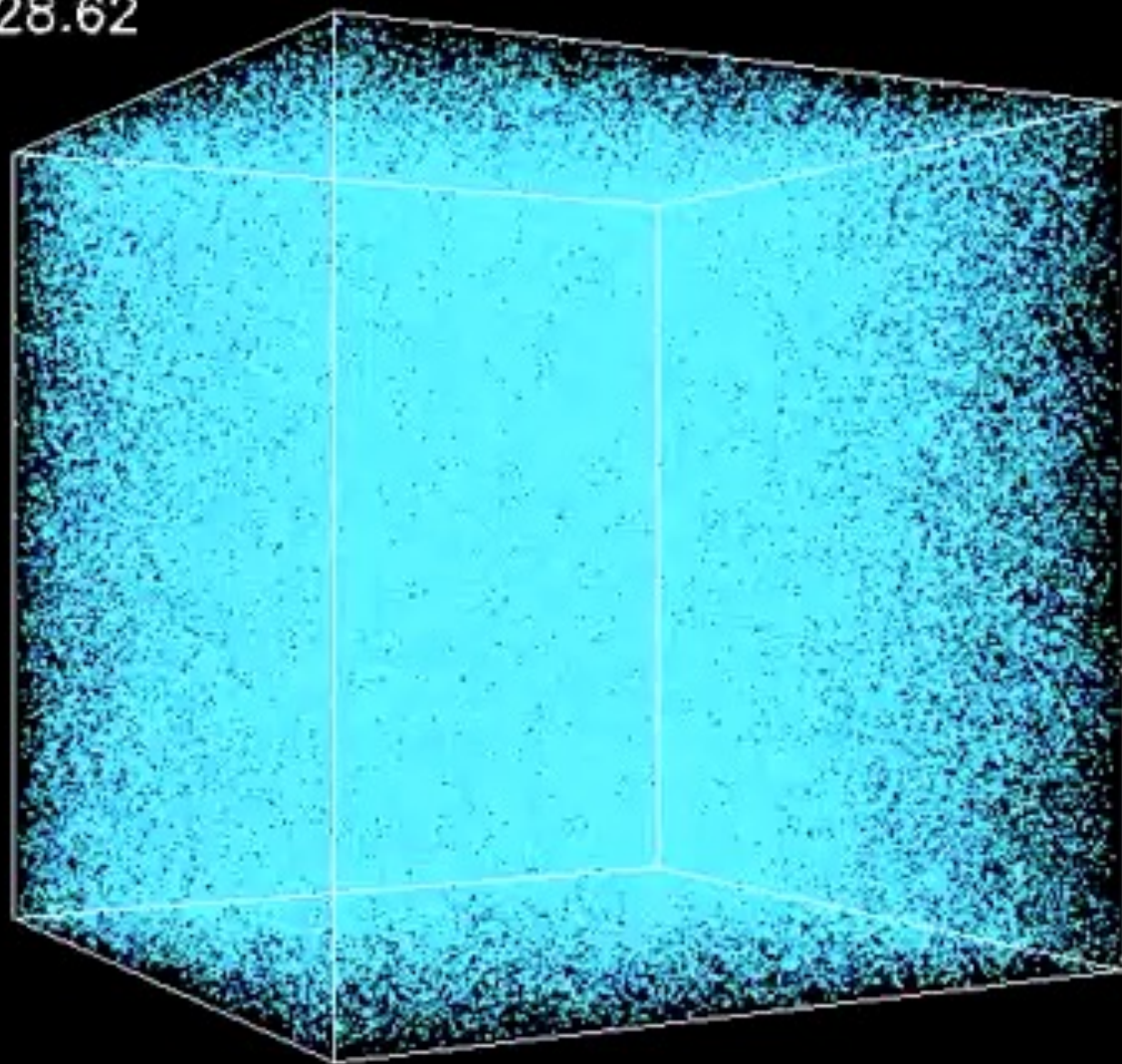


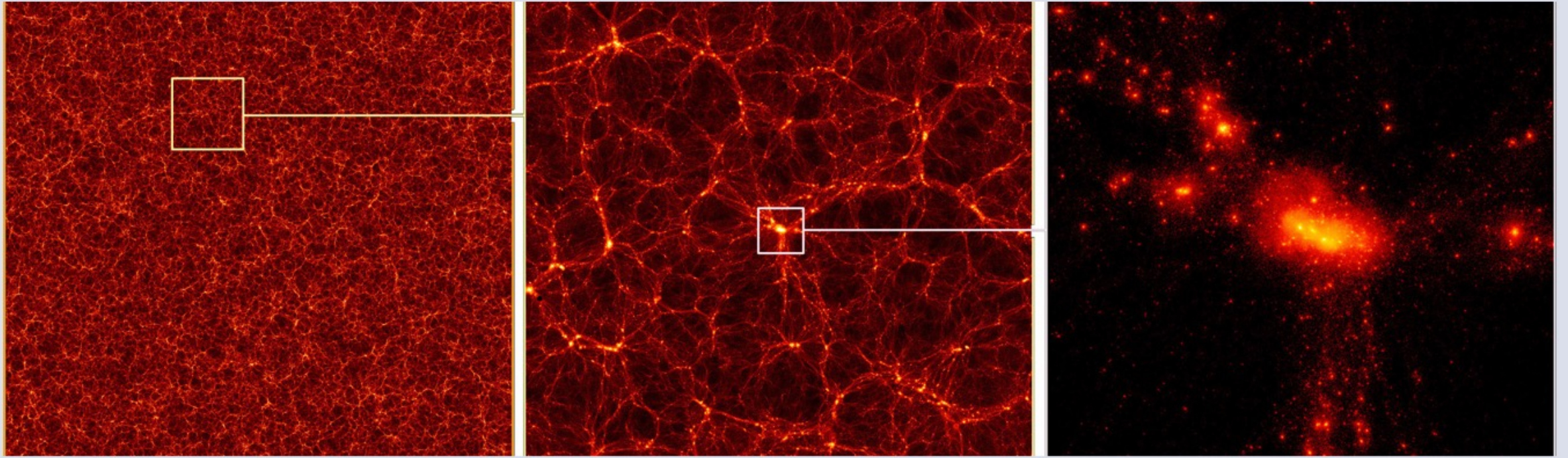
多くのモデルで、スカラー場は非線形な方程式に従う。

この非線形性によってスカラー場の性質が変わり、重力理論は修正重力から一般相対論に変わる。

宇宙の非線形な構造を理解するためにはN体シミュレーションが必要
非線形なスカラー場をN体シミュレーションの中で解く必要がある。

$Z=28.62$





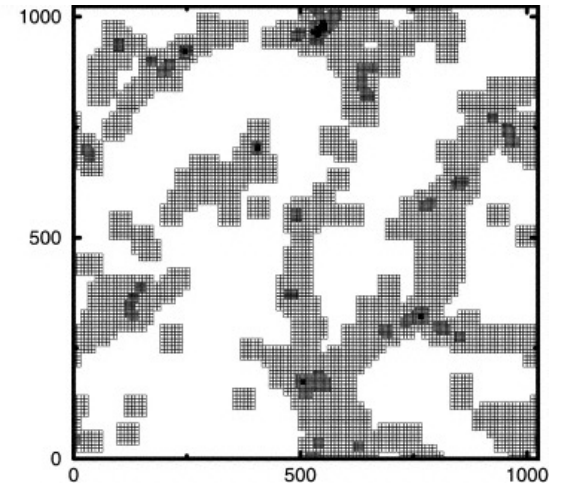
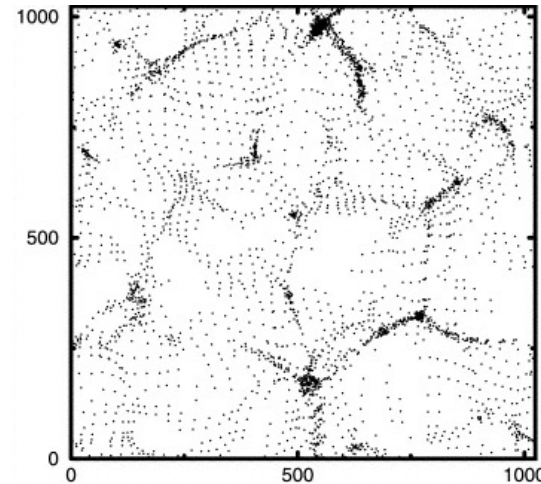
ダークマターハロー

スクリーニング機構のシミュレーション

- N体シミュレーション

密度揺らぎの大きさに基づいてメッシュのサイズを適応するN体コードを応用

同じメッシュを用いて非線形なスカラー場の方程式を緩和法を用いて解く。



[Li, Zhao, Teyssier, KK JCAP 01 \(2012\) 051](#)

近似的にスクリーニングを扱うN体も開発されている。

[Winther, KK et.al. JCAP 08 \(2017\) 006](#)

スクリーニング機構を持つモデル

- (n)DGP (Vainshtein機構)

$$S = \frac{1}{32\pi G r_c} \int d^5 x \sqrt{-g^{(5)}} R^{(5)} + \frac{1}{16\pi G} \int d^4 x (R - 2\Lambda)$$

小スケール ($r \ll r_c$) で4次元相対論が再現

- f(R)重力 (カメレオン機構)

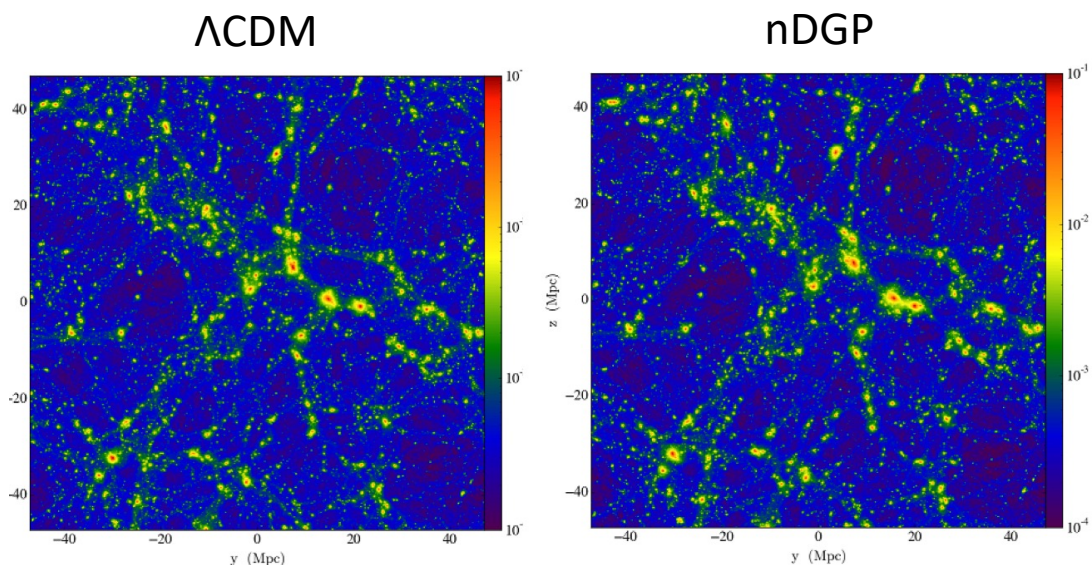
$$S = \frac{1}{16\pi G} \int \sqrt{-g} d^4 x F(R) \quad F(R) = R - 2\Lambda - |f_{R0}| \frac{R_0^2}{R}$$

曲率が高い極限 ($R \gg R_0$) で4次元相対論が再現

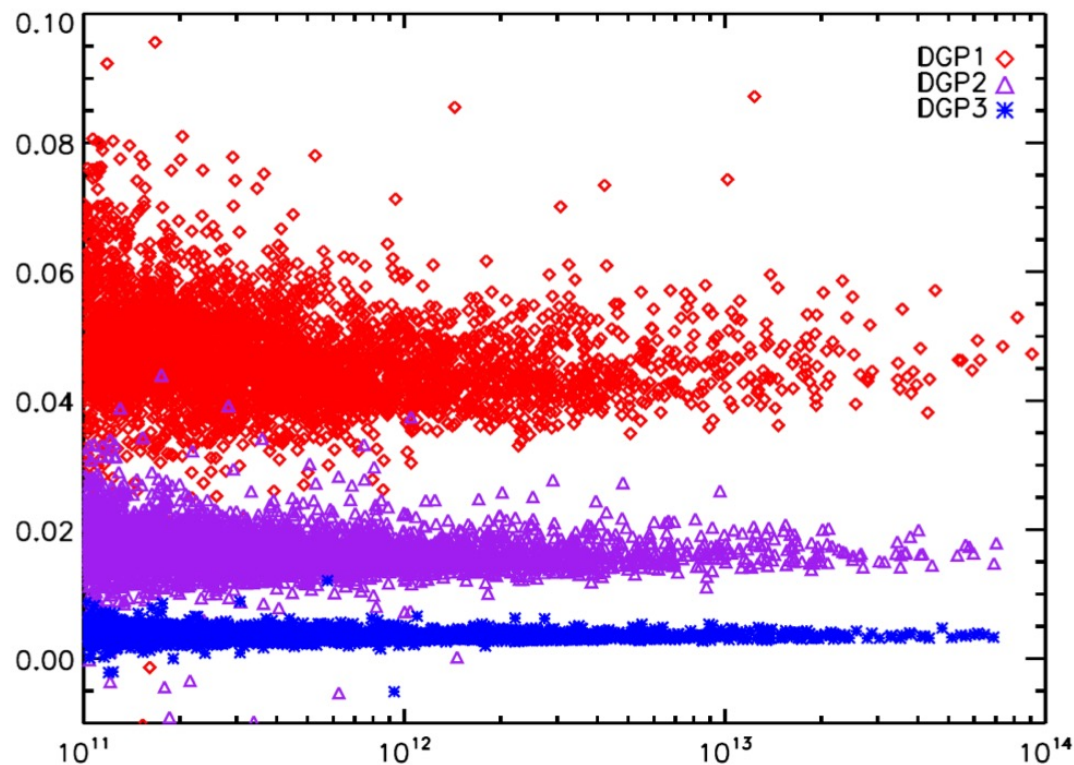
スクリーニング機構の影響

$$\Psi_{\text{lens}} = \frac{\Psi + \Phi}{2}$$

• (n)DGPモデル



$$\Delta M = \frac{d\Psi/dr}{d\Psi_{\text{lens}}/dr} - 1$$

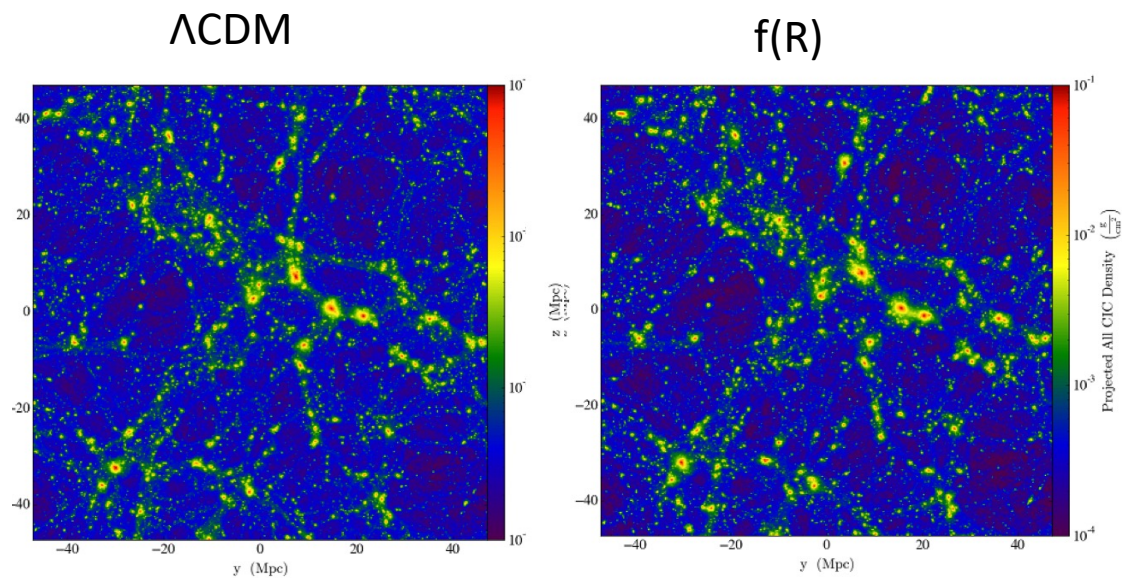
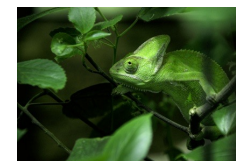


相対論からのずれはVainshtein機構
によって小スケールでは抑制される。

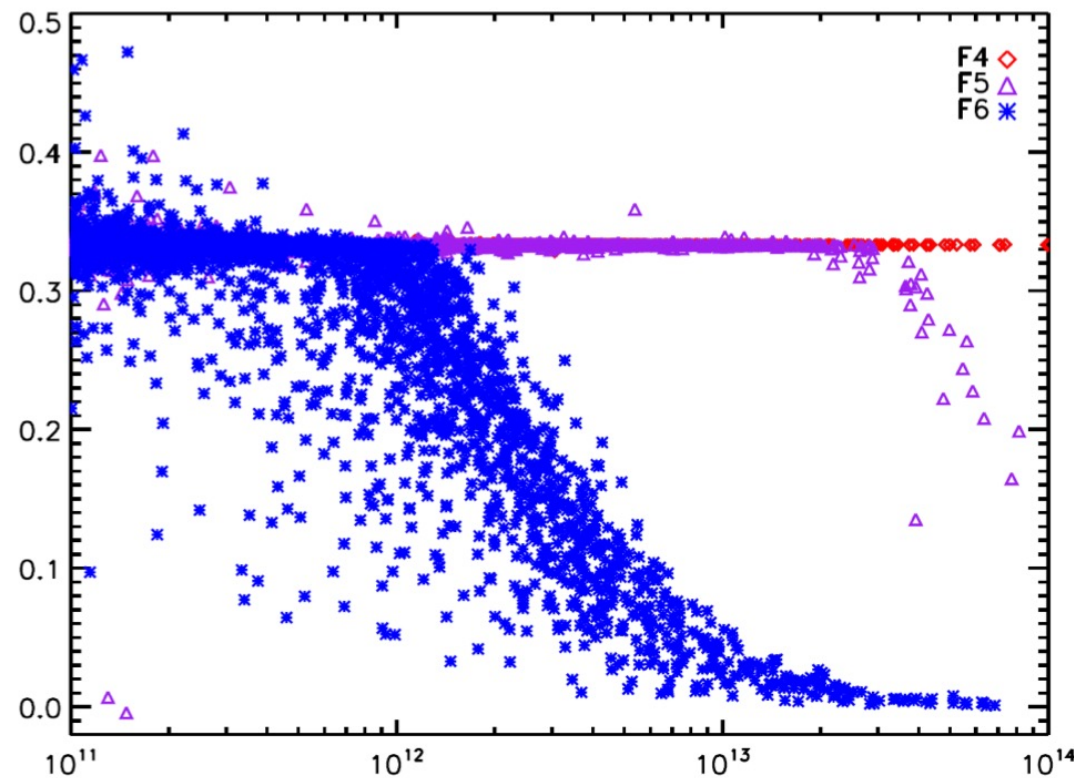
ダークマターハローの質量

スクリーニング機構の影響

- $f(R)$ 重力



$$\Delta M = \frac{d\Psi/dr}{d\Psi_{\text{lens}}/dr} - 1$$



相対論からのずれはカメレオン機構によって小スケールでは抑制される。

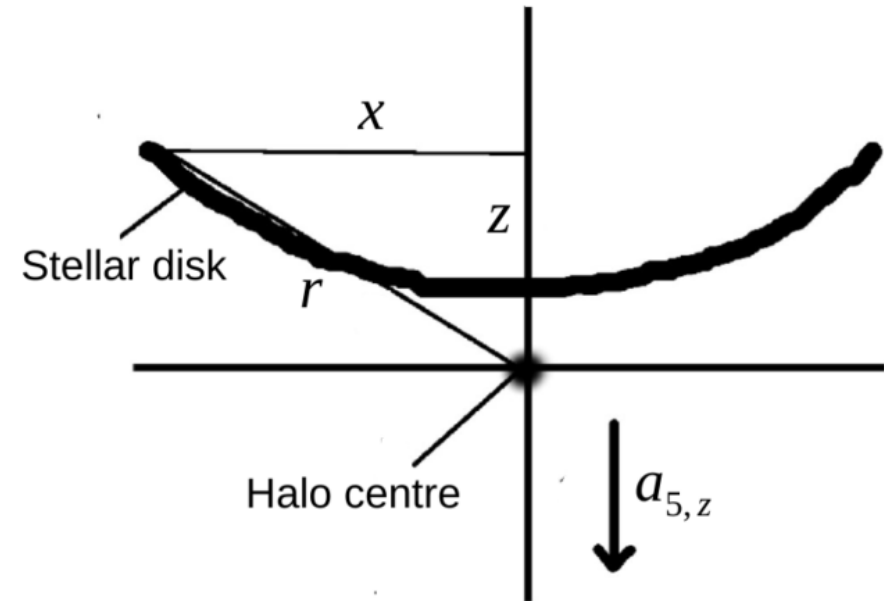
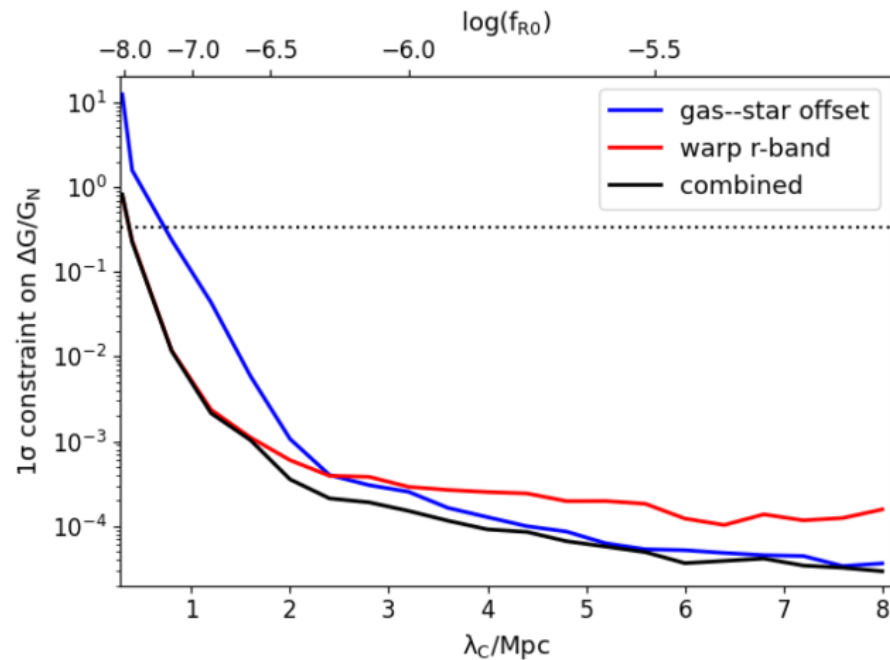
ダークマターハローの質量

カメレオン機構の制限

The novel probes project – tests of gravity on astrophysical scales 1908.03430

- 低密度領域（ボイド）の矮小銀河

強い修正重力の影響を受ける。ただし星でできている円盤部分は影響を受けない。



宇宙論的に面白いf(R)モデルは完全に排除される。

今後の展望

- 宇宙論的観測の進展

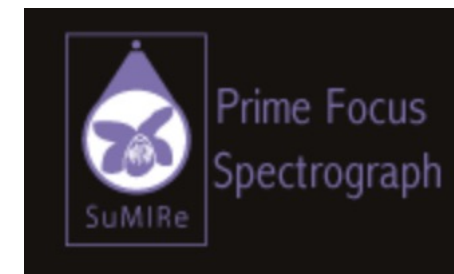
ステージIIIからステージIV ダークエネルギー探査へ



2024 Y1 data release

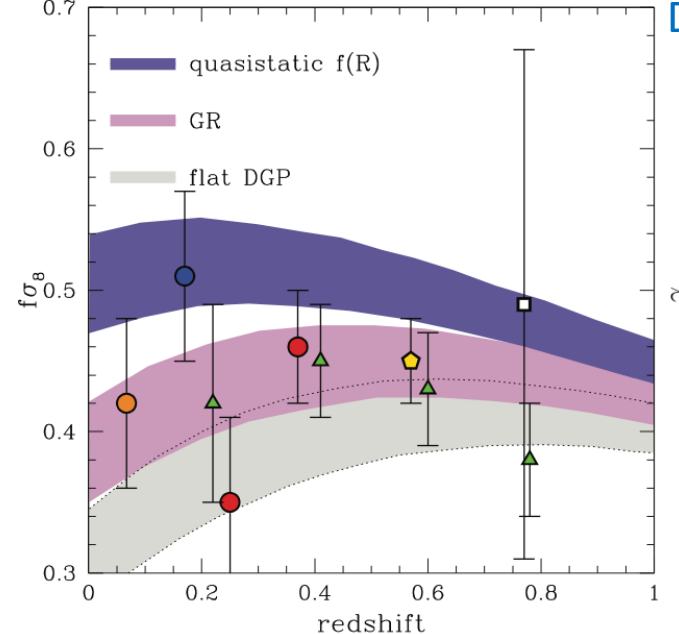
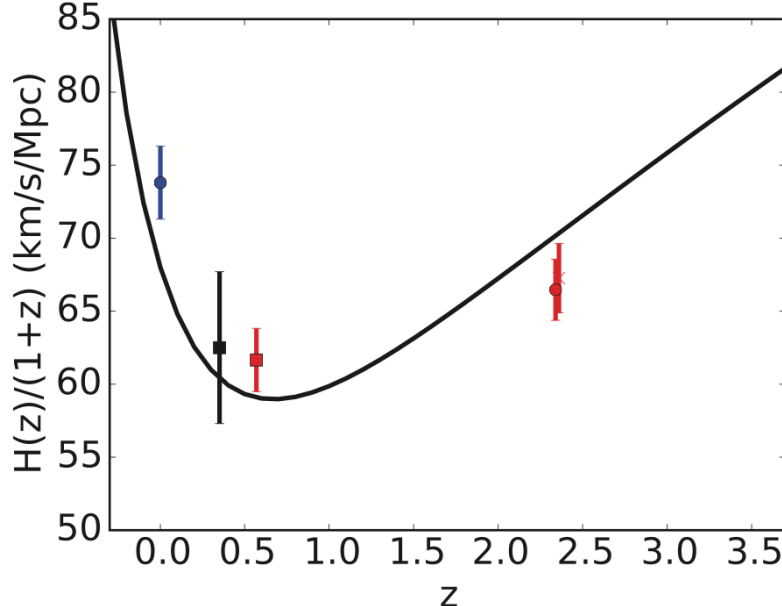


2026 DR1 data release

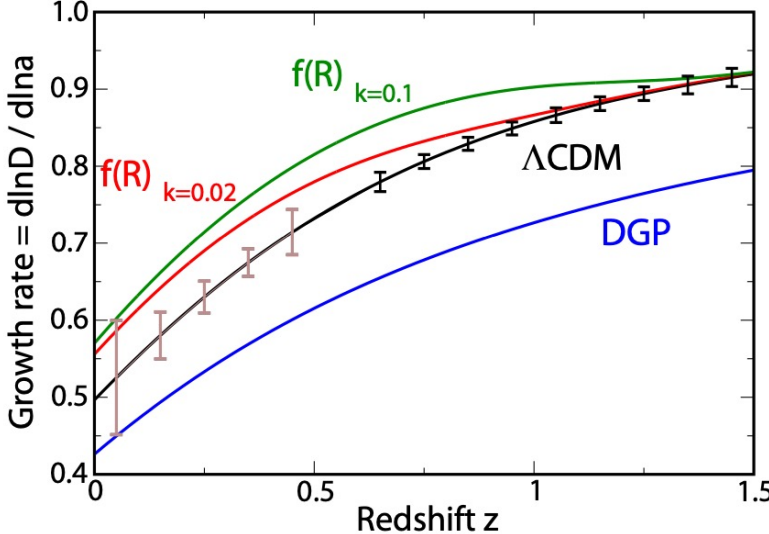
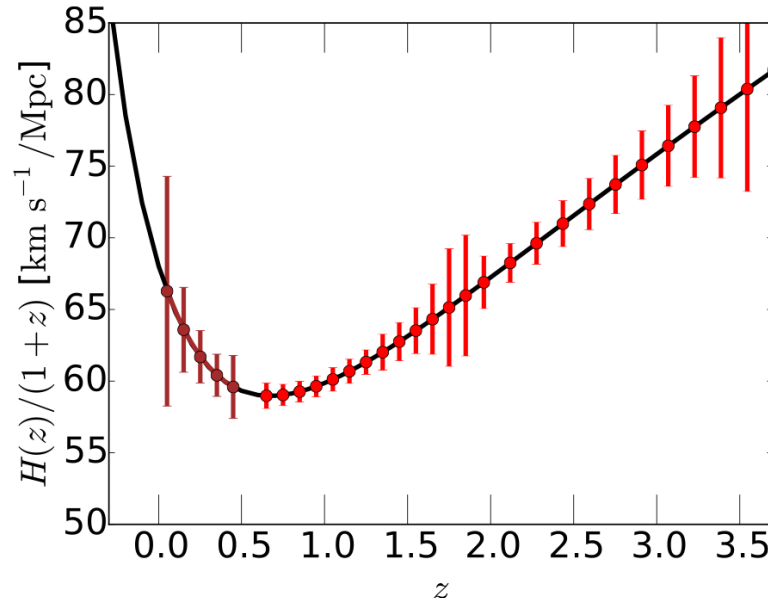


Λ CDMからのずれが統計的に有意に確立されるか。

Stage III



Stage IV



今後の展望

- 星や銀河を使った新しい重力理論の検証方法

すでにあるデータも見方を変えれば重力の検証に使える。

例) SDSS MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at APO)

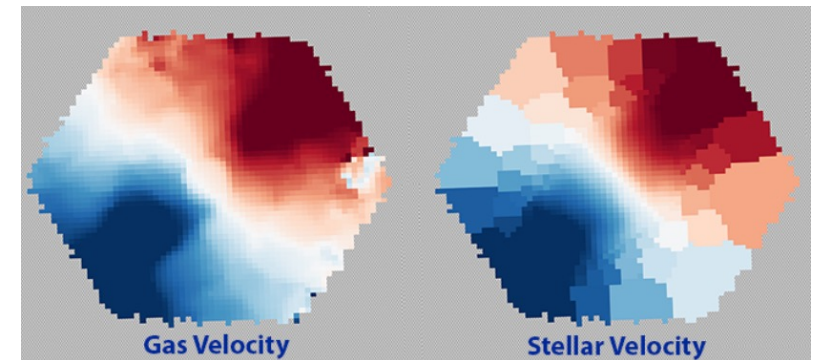
- 重力波

例) 中性子星合体からの重力波検出

重力波の速度の制限

ハッブル定数の測定

重力定数の時間変化の制限



今後の課題

- 理論の進展がさらに必要

多くのモデルが Λ CDMモデルを極限にもつ。

もし Λ CDMからのずれが統計的に有意に確立されなかった場合、どこまで精度を高めればいいのかの指標が必要。

重力理論の変更で宇宙の加速膨張は説明できるか？

宇宙定数問題は解決されていない。

今後も理論と観測両方からアプローチが必要になる。