

弦理論と宇宙論の接点 はあるのか？

早田次郎
天体核研究室



弦理論サイドから見ると

加速器はミクロを見る顕微鏡

現実の世界

$U(1)$ 対称性

対称性の自発的な破れ

ヒッグス粒子

ミクロの世界

$SU(2) \otimes U(1)$ 対称性

ワインバーグ・サラム理論

加速器でヒッグス粒子を発見することが必要

弦理論は10次元を予言

現実の世界

4次元の時空

自発的コンパクト化

ラディオン
KK粒子

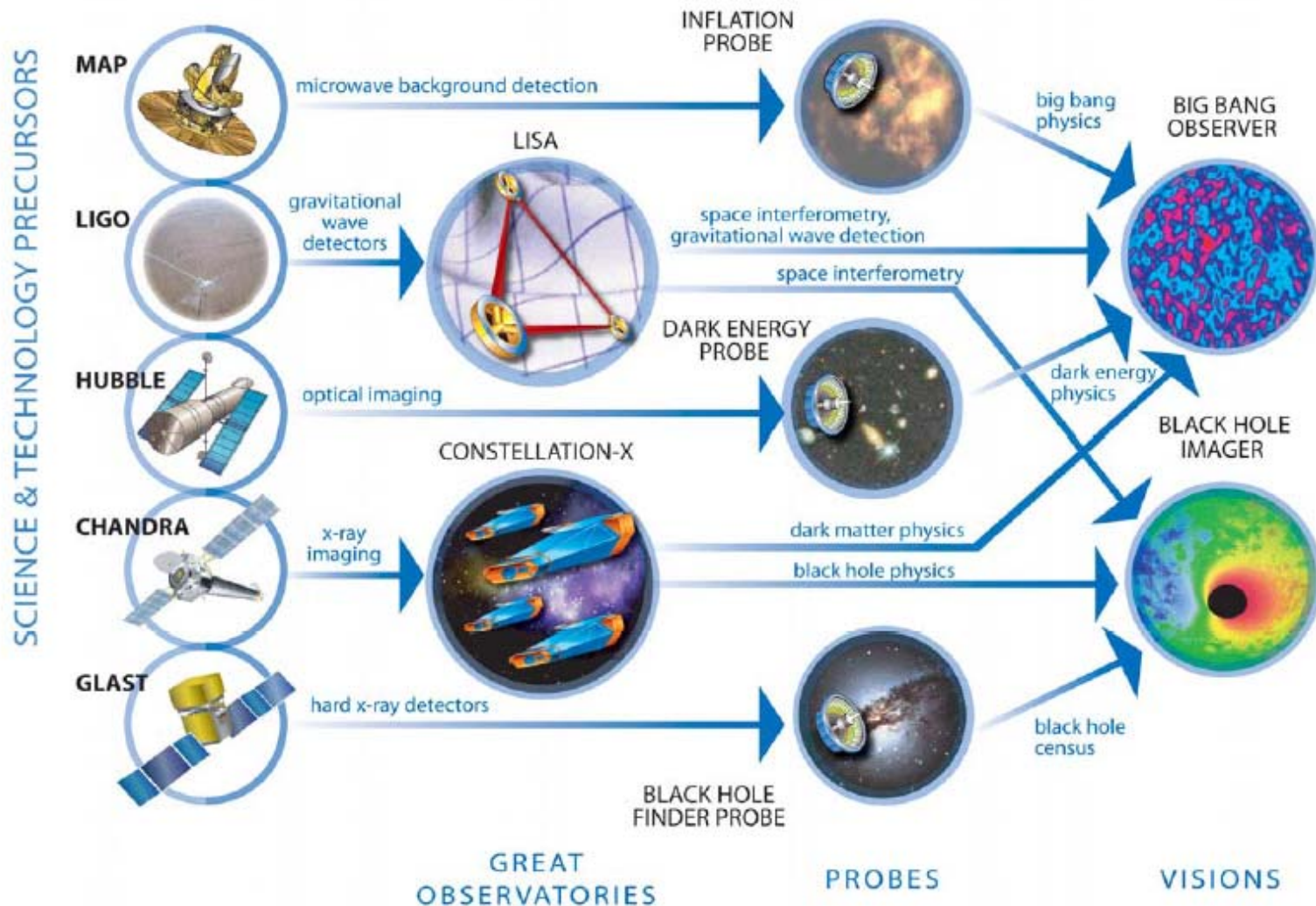
ミクロの世界

10次元の時空

超弦理論

宇宙はミクロを見る顕微鏡

BEYOND EINSTEIN PROGRAM





弦理論が宇宙論に期待することは

スモーキングガンの発見

Three balloons (green, blue, and purple) are positioned on the left side of the slide. Each balloon has a string and several small yellow triangular flags attached to it. The green balloon is at the top, the blue one is in the middle, and the purple one is at the bottom.

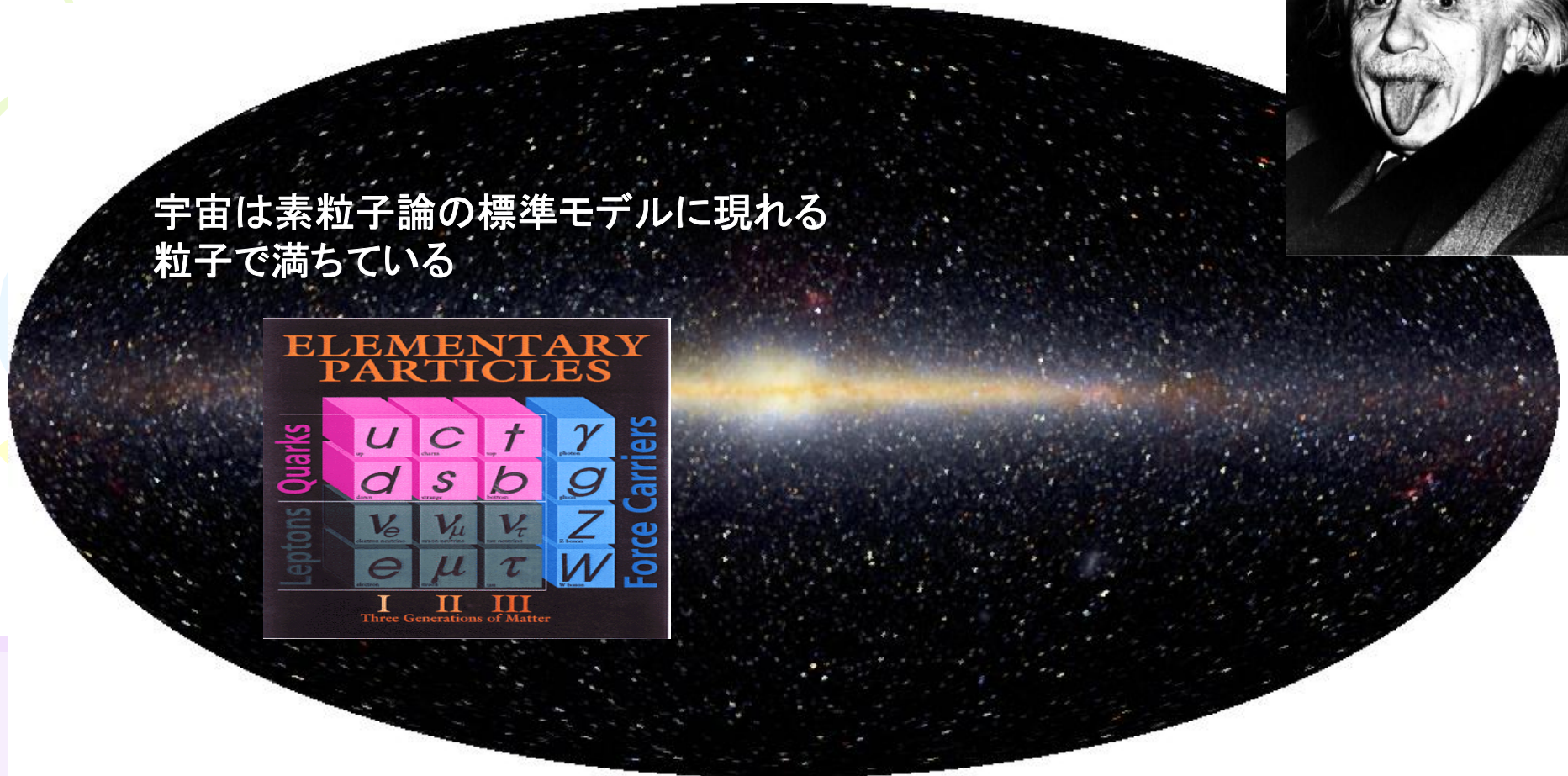
一方、

宇宙論サイドから見ると

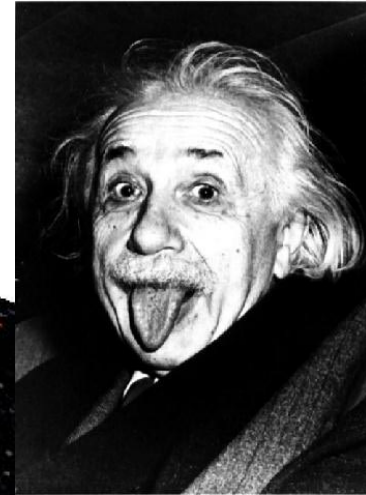
宇宙の標準モデル

4次元宇宙は一般相対性理論によって記述される

宇宙は素粒子論の標準モデルに現れる
粒子で満ちている

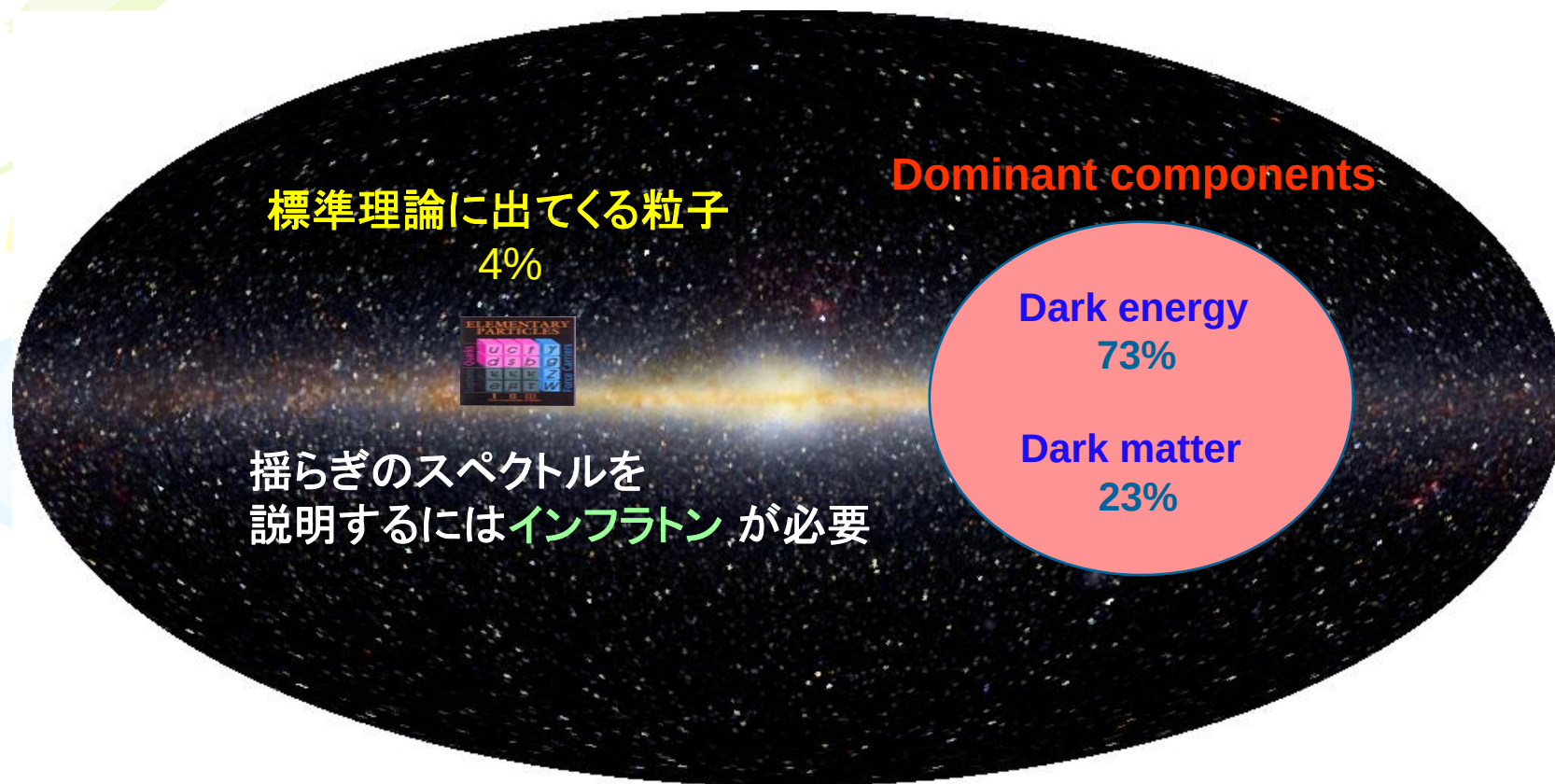


ELEMENTARY PARTICLES						
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force Carriers	
	d down	s strange	b bottom	g gluon		
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z Z boson		
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson		
I Three Generations of Matter			II	III		

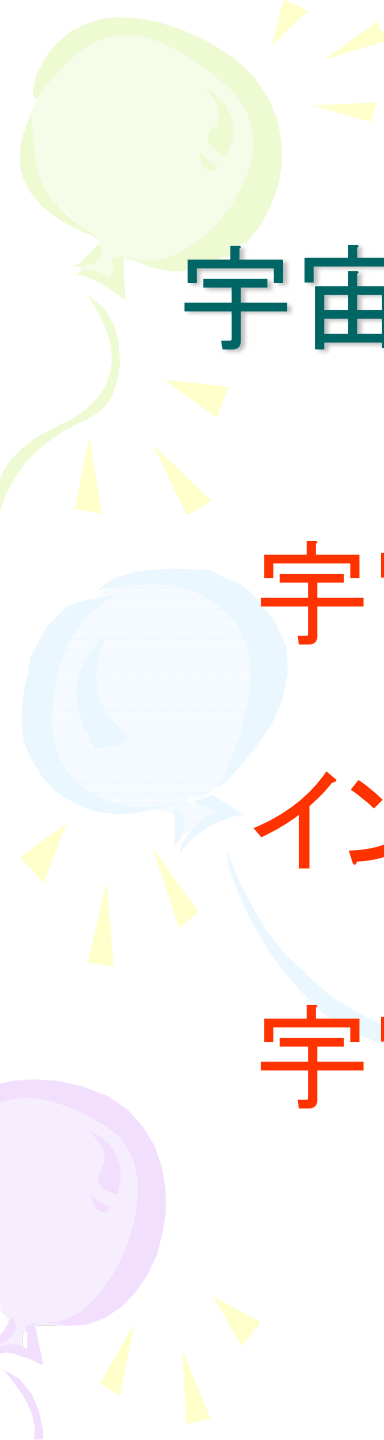


ただし、一般相対性理論では宇宙初期特異点は避けられない

WMAPが解き明かした現実の宇宙



一般相対性理論の**限界**を示している

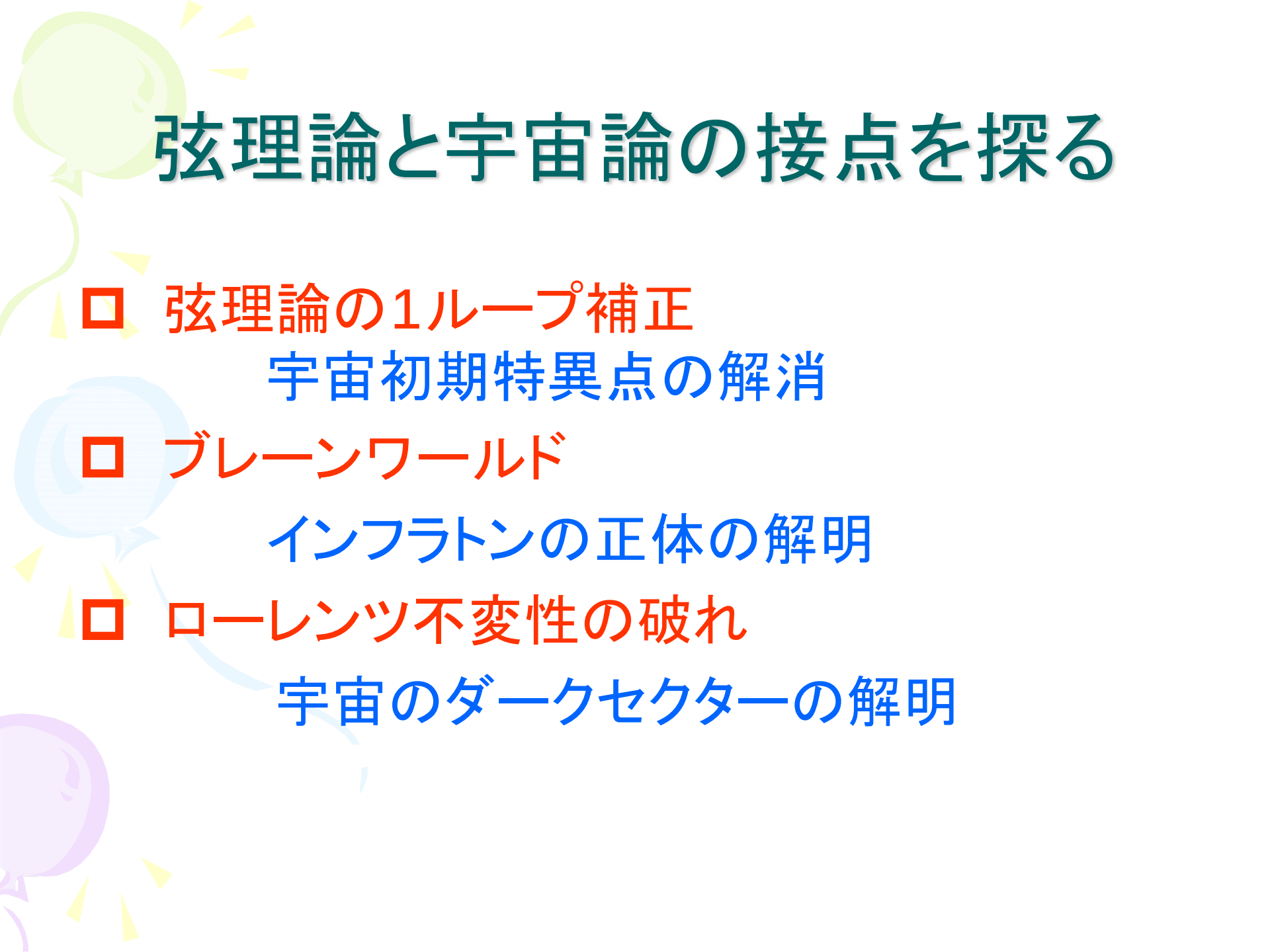


宇宙論が弦理論に期待すること

宇宙初期特異点の解消

インフラトンの正体の解明

宇宙のダークセクターの解明



弦理論と宇宙論の接点を探る

□ 弦理論の1ループ補正

宇宙初期特異点の解消

□ ブレーンワールド

インフラトンの正体の解明

□ ローレンツ不変性の破れ

宇宙のダークセクターの解明

宇宙初期特異点の解消

一般相対性理論では

S.Kawai & J.Soda, 1998,1999

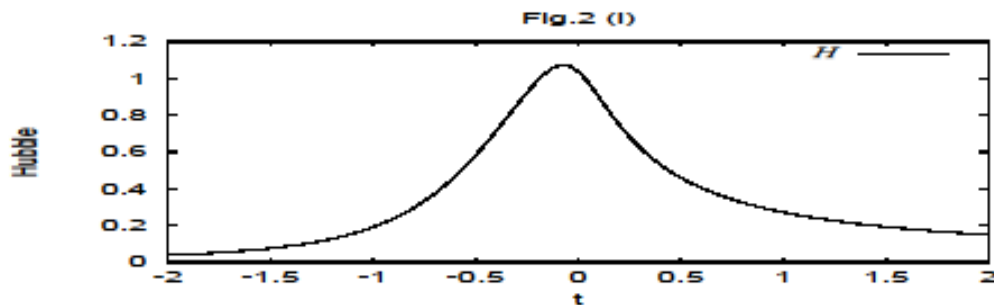
エネルギー条件 $\rho + 3p > 0$ $\longrightarrow$ 特異点が存在する

ヘテロティック超弦理論の1ループ補正理論では

$$\mathcal{S} = \int d^4x \sqrt{-g} \left\{ \frac{1}{2} R - \frac{1}{4} (D\Phi)^2 - \frac{3}{4} (D\sigma)^2 + \frac{1}{16} [\lambda_1 e^\Phi - \lambda_2 \xi(\sigma)] R_{GB}^2 \right\},$$

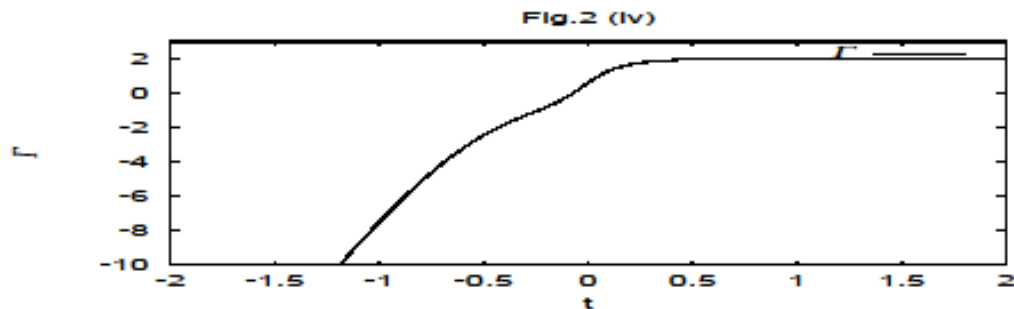
$$R_{GB}^2 = R^{\mu\nu\kappa\lambda} R_{\mu\nu\kappa\lambda} - 4R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} + R^2,$$

$$\xi(\sigma) = -\ln[2e^\sigma \eta^4(i e^\sigma)] = -\ln 2 - \sigma + \frac{\pi e^\sigma}{3} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \ln(1 - e^{-2n\pi e^\sigma}).$$

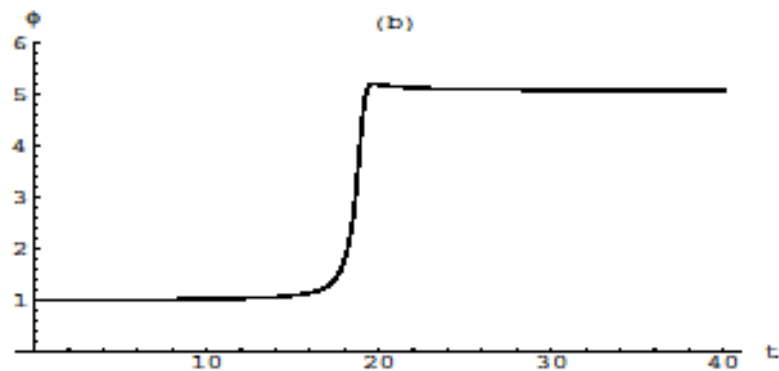


背景重力波の生成？

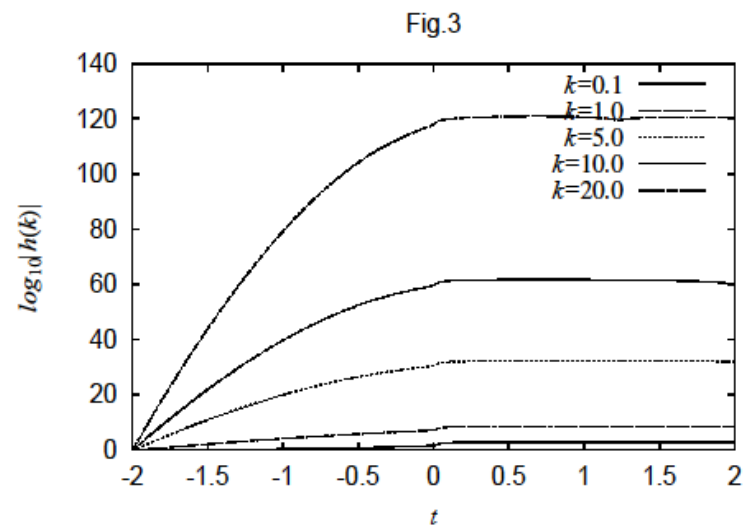
$$p = (\Gamma - 1)\rho$$



曲率揺らぎの時間発展

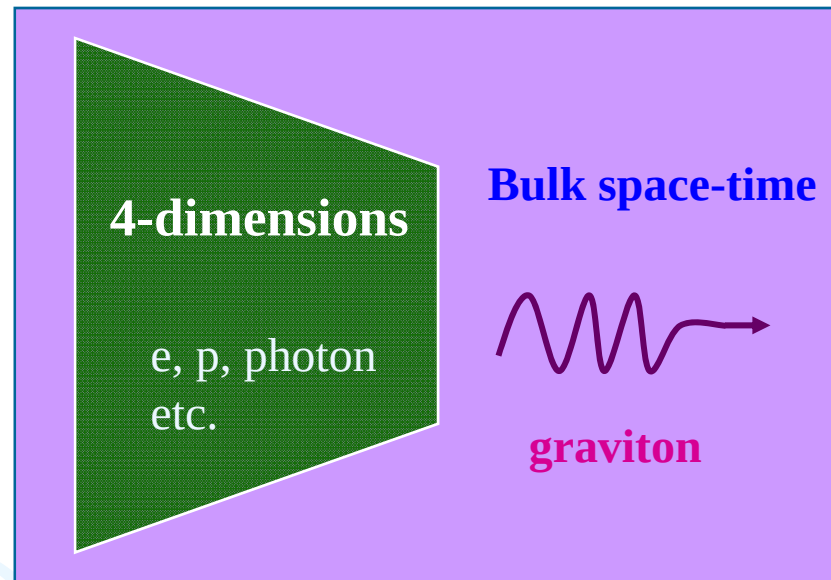


重力波揺らぎの時間発展



インフラトンの正体の説明

弦理論によると、我々は10次元時空に浮かぶ4次元超曲面上に住んでいるかも



インフラトンの正体は？

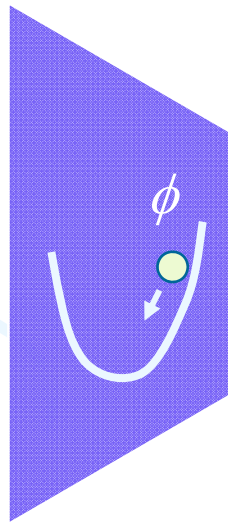
Inflation in the RS braneworld

brane tension

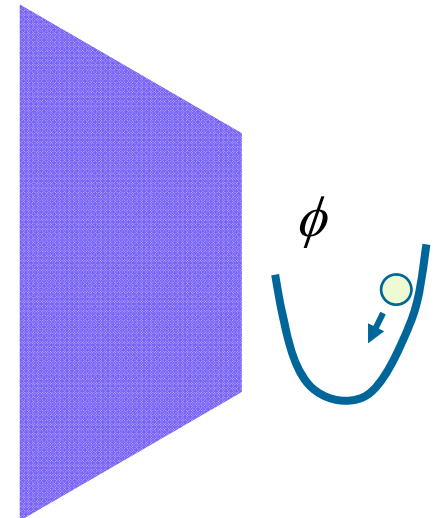
bulk cosmological constant < 0

$$H^2 = \frac{\kappa^4 \sigma^2}{36} + \frac{-\Lambda}{6} + \frac{8\pi G}{3} \rho + \underbrace{\kappa^4 \rho^2}_{\text{High Energy Effect}} + \underbrace{\frac{C}{a^4}}_{\text{Bulk Effect}}$$

inflaton
on the **Brane**



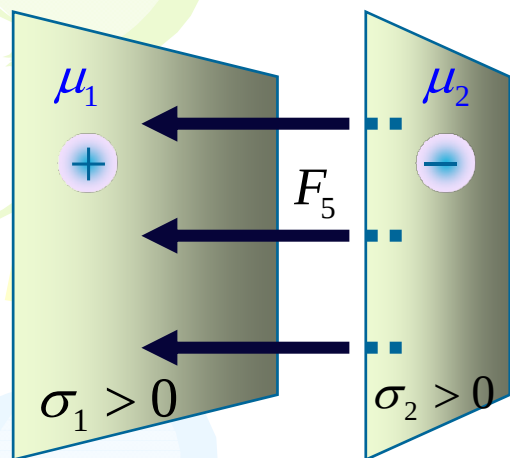
inflaton
in the **bulk**



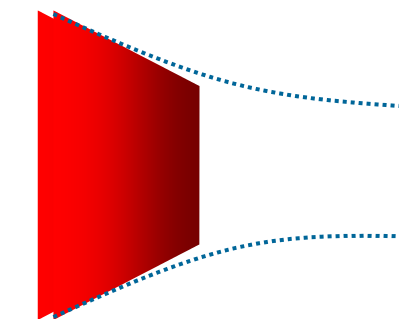
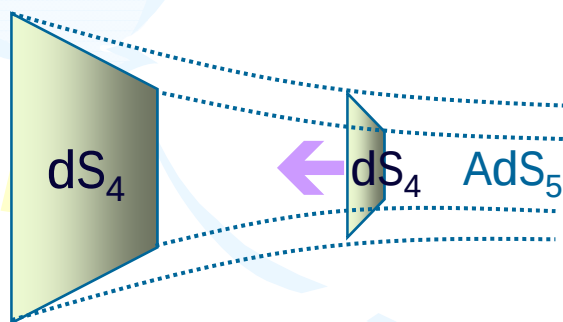
S.Kobayashi, K.Koyama, J.Soda, 2001
Y.Himemoto & M.Sasaki

フラックスが引き起こすインフレーション

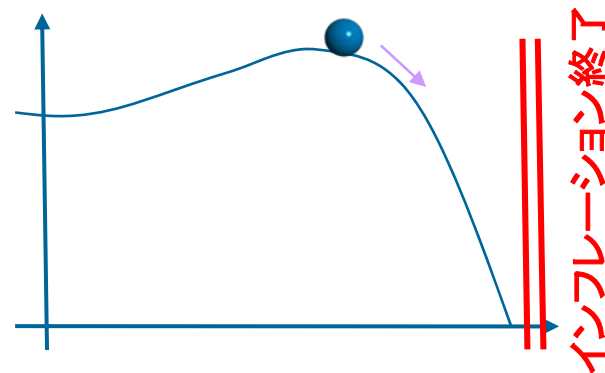
S.Kanno, J.Soda & D. Wands, 2005



インフラトンの幾何学化に成功



再加熱



衝突の痕跡として背景重力波が存在する可能性がある

宇宙のダークセクターの解明

ダークセクターの存在は低エネルギーでの重力理論が一般相対性理論とはかなり違ったものであることを示唆している

ローレンツ不変性の破れが無い場合

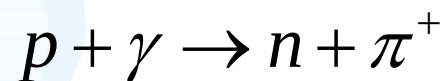
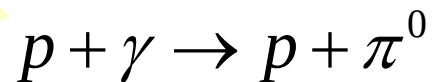
ブランス・ディッケ理論が唯一の可能性であった

弦理論は最小の長さの単位を予言している
すなわち、ローレンツ不変性は
少なくともプランクスケールでは破れている

ローレンツ不変性の破れを許す重力理論の中で
ダークセクターの解明が可能か？

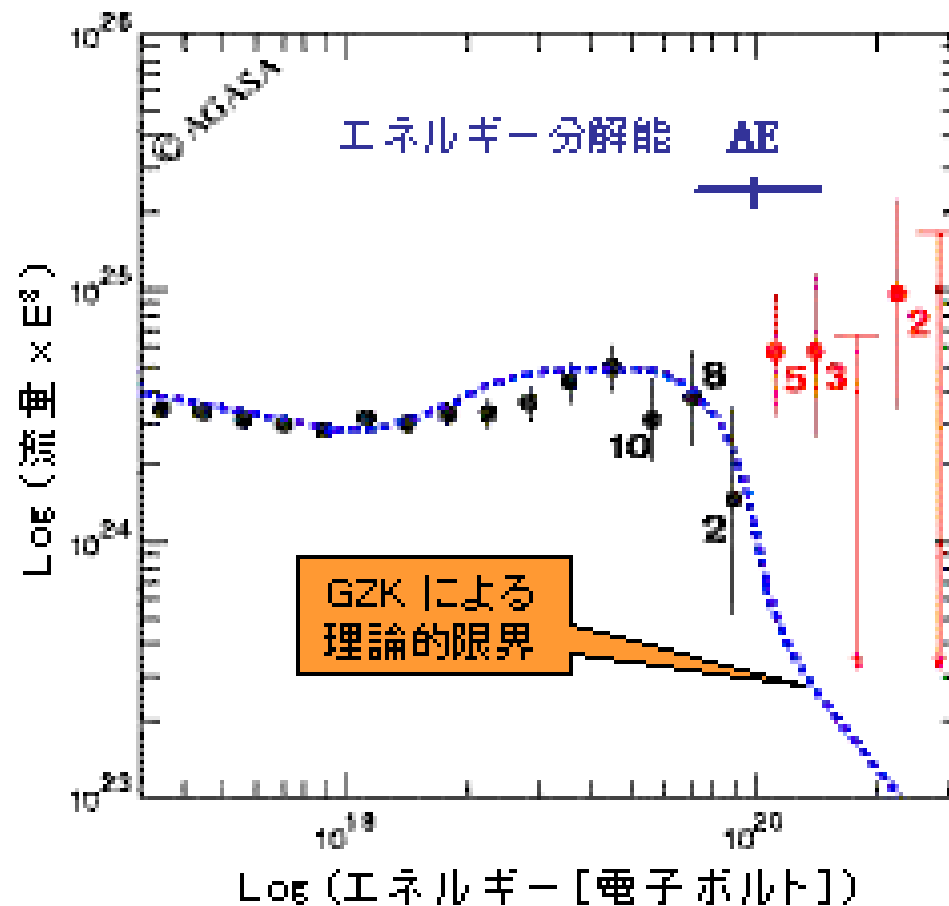
高エネルギー宇宙線の観測

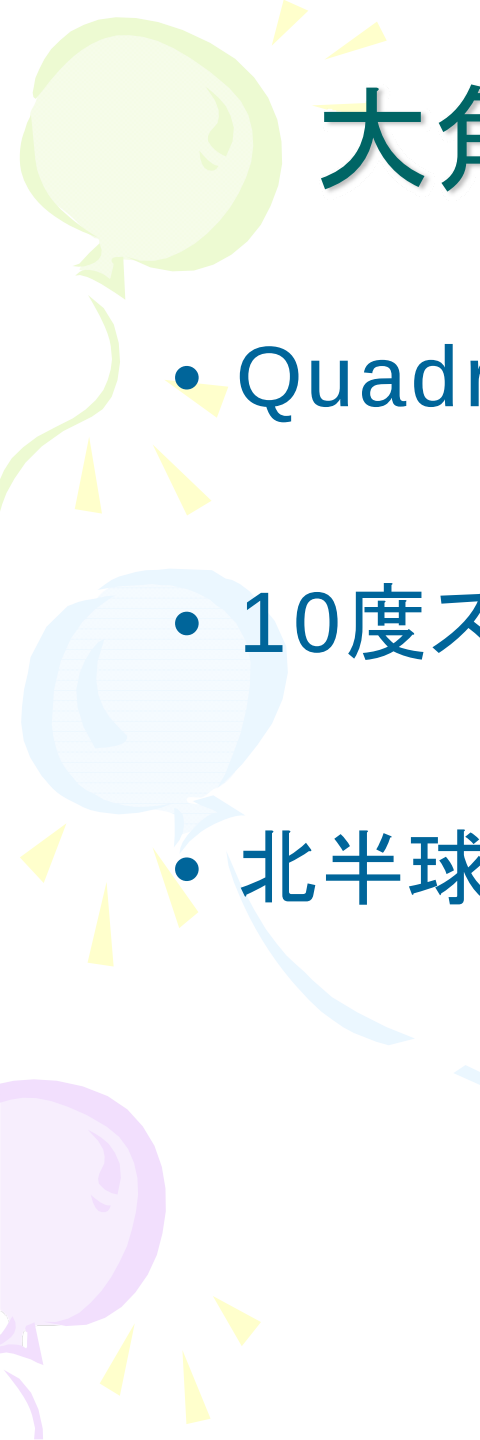
閾値 $\approx 10^{20}$ eV



平均自由行程 ≈ 30 Mpc

GZK カットオフ





大角度宇宙背景輻射異常

- Quadrupoleとoctopoleの軸の相関

Tegmark et al. 2004

- 10度スケールのコールドスポット

Vielva et al. 2004

- 北半球と南半球の非対称性

Erikson et al. 2004

Bianchi Type VII(h) Universe?

ローレンツ不変性の自発的な破れ

真空期待値

$$\langle 0 | u^\mu u_\mu | 0 \rangle = -1$$

universal rest frame

Nambu-Goldstone boson

$$u^\mu = \frac{1}{\sqrt{1 - \vec{\psi}^2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \vec{\psi} \end{pmatrix}$$

Low energy effective theory

$$L = \beta_1 \partial_\mu u^\nu \partial^\mu u_\nu + (\beta_2 + \beta_3) \partial_\mu u^\mu \partial_\nu u^\nu + \beta_4 u^\mu u^\nu \partial_\mu u^\lambda \partial_\nu u_\lambda$$

with

$$u^\mu u_\mu = -1$$

2階微分までを含む最も一般的な作用

スカラー・ベクトル・テンソル理論

最も一般的な現象論的フレームワークは

S.Kanno & J.Soda, 2006

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{16\pi G} - \beta_1(\phi) \nabla^\mu u^\nu \nabla_\mu u_\nu - \beta_2(\phi) (\nabla_\mu u^\mu)^2 - \beta_3(\phi) \nabla^\mu u^\nu \nabla_\nu u_\mu \right. \\ \left. - \beta_4(\phi) u^\mu u^\nu \nabla_\mu u^\lambda \nabla_\nu u_\lambda + \lambda (u^\mu u_\mu + 1) - \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 \right] + \int d^4x \sqrt{-\bar{g}} L_m(\bar{g}, \psi)$$

Preferred frame

$$u^\mu u_\mu = -1$$

Universal coupling

$$\bar{g}_{\mu\nu} = f(\phi) [g_{\mu\nu} + h(\phi) u_\mu u_\nu]$$

理論の拡がり → ダークセクターの解明の可能性

加速膨張解・・・現在進行中

一様等方宇宙

$$u^\mu = (1, 0, 0, 0)$$

$$ds^2 = -dt^2 + e^{2\alpha(t)} \delta_{ij} dx^i dx^j$$

モデル

$$1 + \beta_1 + 3\beta_2 + \beta_3 = A^2 \phi^2$$

$$\sqrt{6} A < -1$$

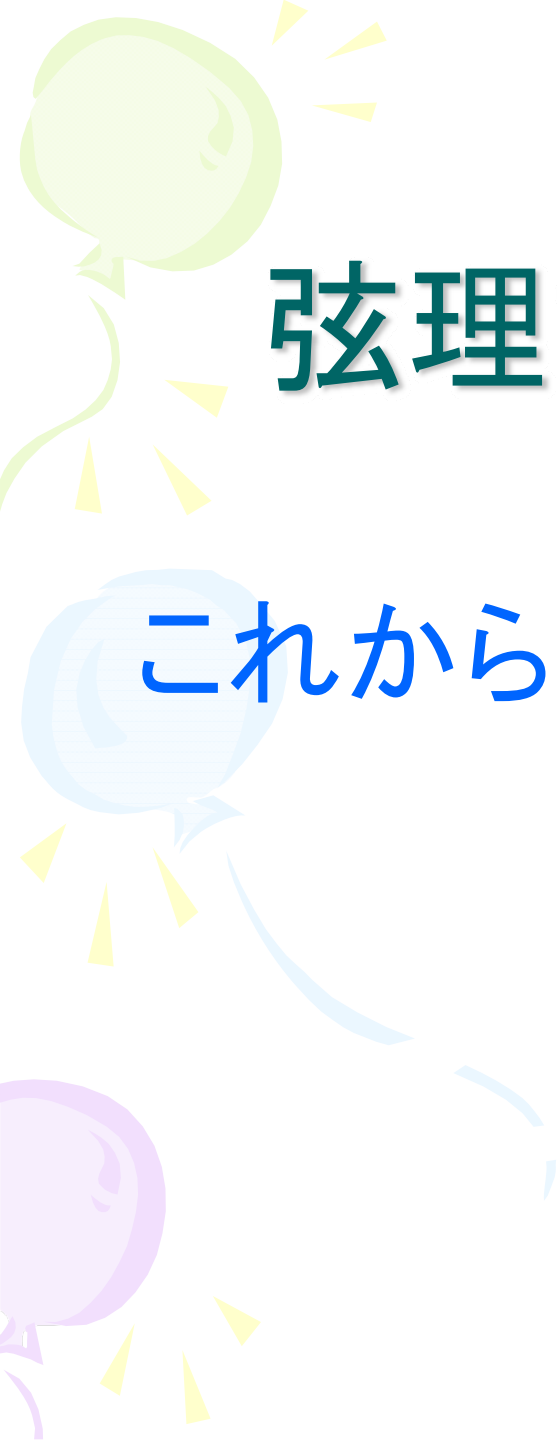
加速膨張宇宙

$$a(t) = e^{\alpha(t)} = t^{\frac{1}{2\sqrt{6}A+3}} \equiv t^p, \quad p > 1$$

$$\phi(t) = -t^{\frac{1}{2}(1-3p)}$$

$$\bar{g}_{\mu\nu} = f(\phi) \left[g_{\mu\nu} + h(\phi) u_\mu u_\nu \right]$$

を通してダークマターを説明したい



弦理論と宇宙論の接点

これからもっと拡がりを見せるはず