

# インフレーション起源の 重力波で探る初期宇宙物理

黒柳 幸子 (東大宇宙線研)

2011/11/18 重力波研究交流会

# Contents

## ■ Introduction

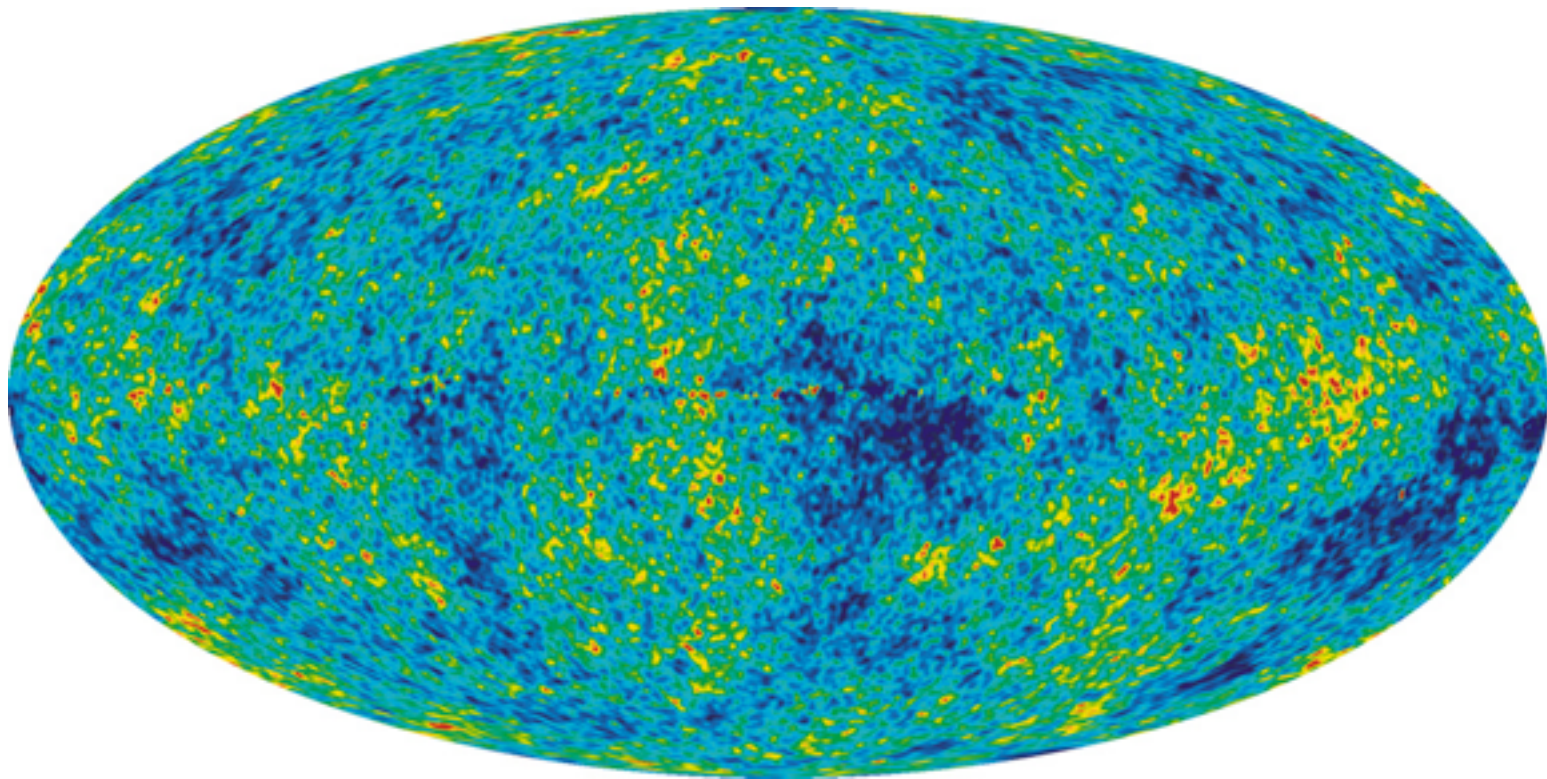
- インフレーションとは

## ■ Observational aspects of the inflationary GW background

- スペクトルの形
- インフレーションへの制限
- 再加熱への制限
- 状態方程式への制限

## ■ Summary

# ■ Introduction

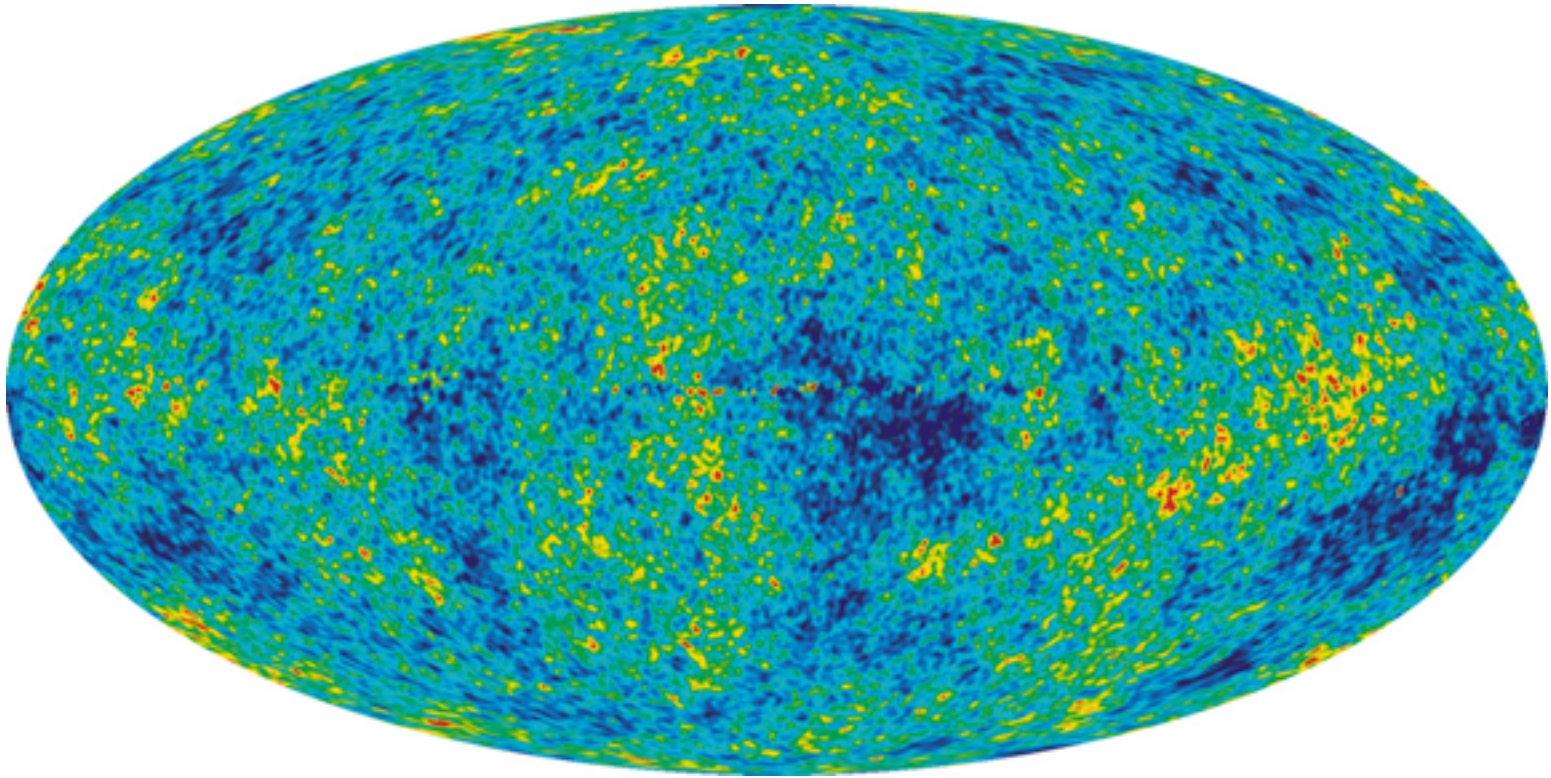


## 宇宙背景放射 (CMB)

WMAP衛星により精度良く観測された宇宙の38万年前の姿

$3K \pm 0.00001$  の密度揺らぎ → 宇宙の大規模構造へ進化

# ■ Introduction



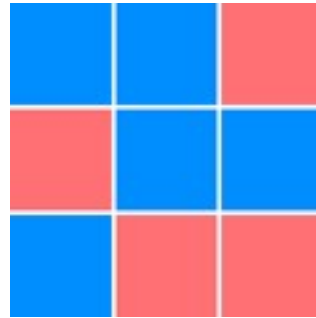
なぜ宇宙はこんなに一様か？

密度揺らぎの起源は何か？

→ インフレーションが解決

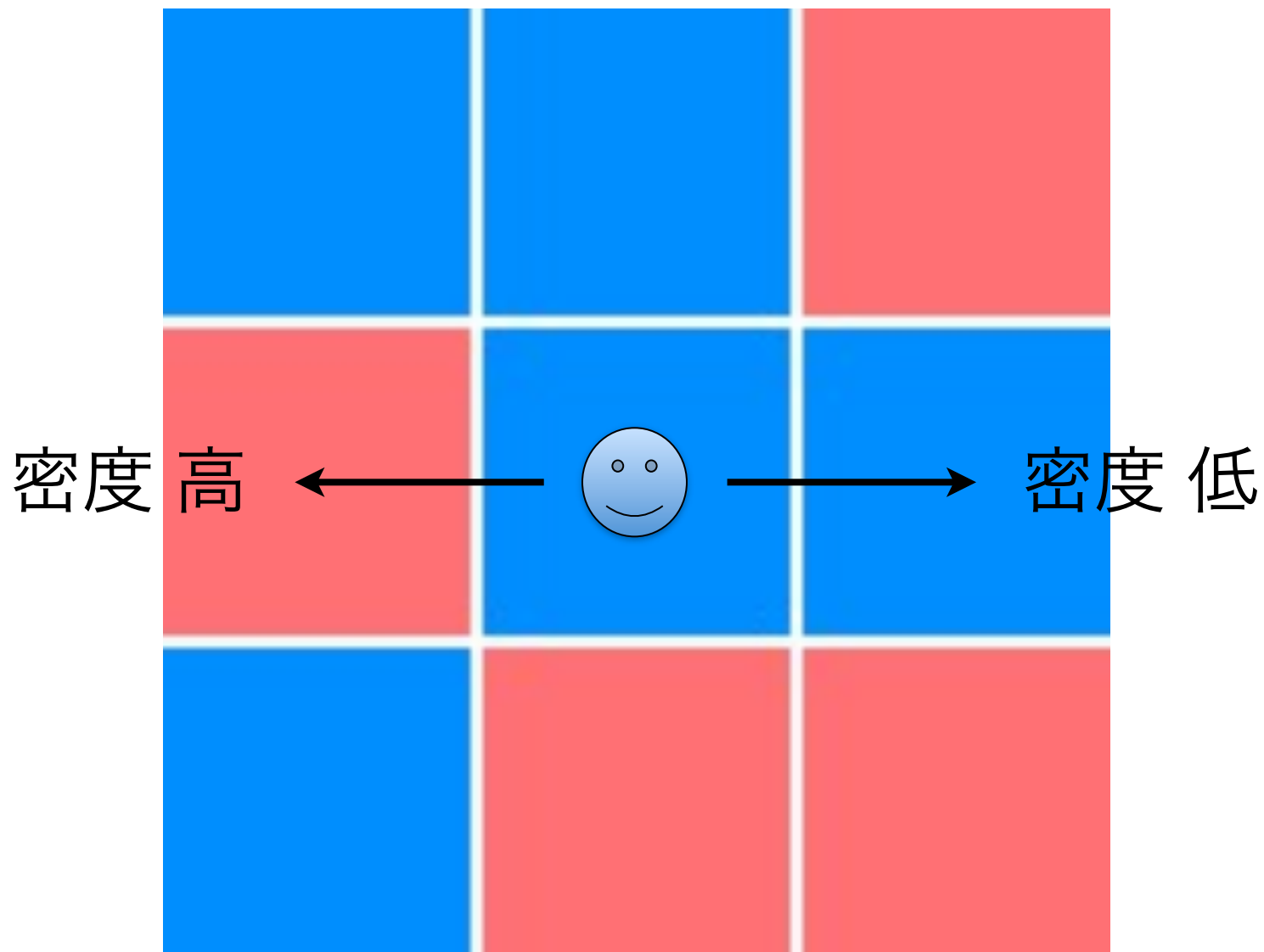
# ■ Standard BigBang

任意の初期条件

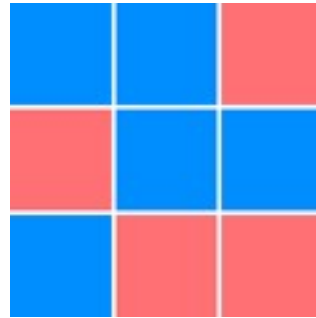


温度

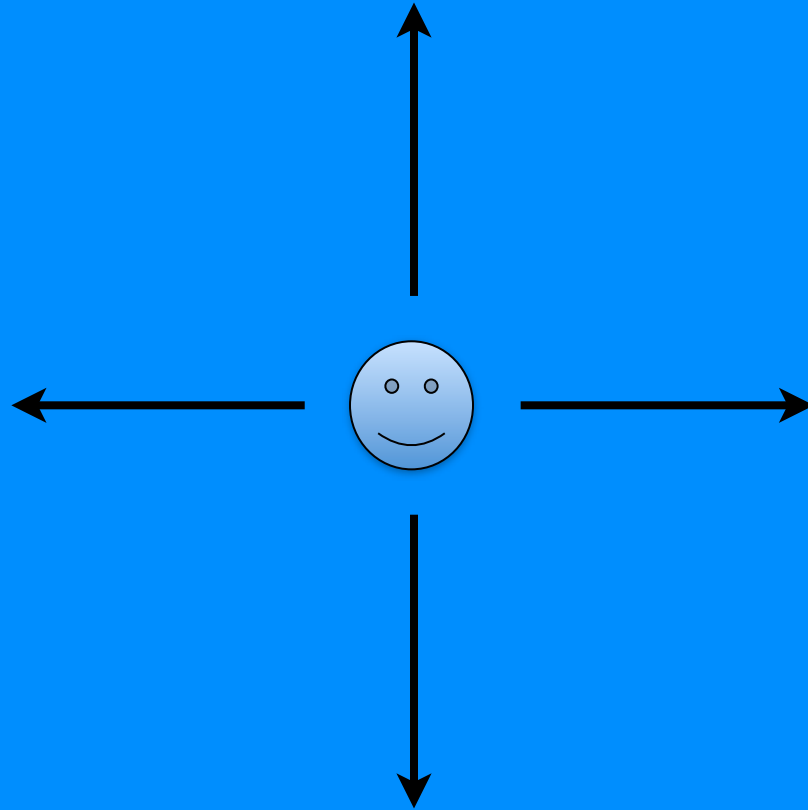
|             |   |
|-------------|---|
| Red square  | 高 |
| Blue square | 低 |



# ■ インフレーションのアイデア



# 一樣宇宙





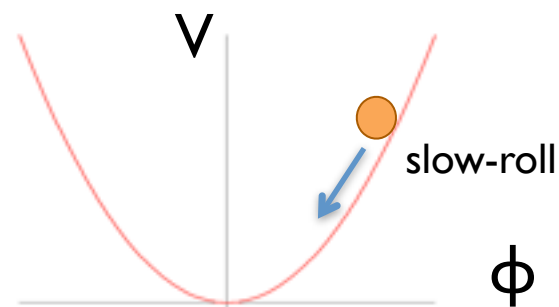
# ■ Inflation

宇宙初期の宇宙空間の加速度的膨張

→ 宇宙の一様等方性、平坦性をうまく説明できる

どうやってインフレーションを起こすか？

一般的なインフレーションの描像



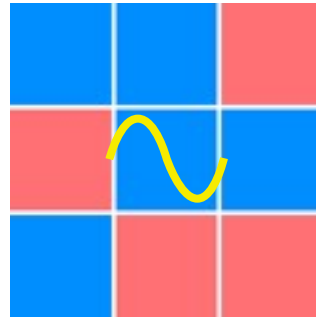
- ・ スカラー場  $\phi$
- ・  $\phi$  がポテンシャル中をゆっくり転がることでインフレーションが引き起こされる

さらに...

スカラー場 $\phi$ の量子揺らぎを考えることで  
密度ゆらぎの起源も説明

# ■ The origin of the density perturbations

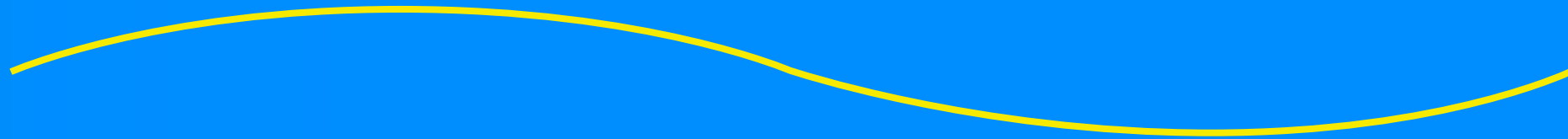
量子揺らぎ



古典化



# 古典化



スカラー場の量子揺らぎ → 密度揺らぎ  
重力場の量子揺らぎ → 重力波

# 宇宙の歴史

**BIG BANG**

**インフレーション**

密度揺らぎ（+重力波）を生成

Big Bang plus  
 $10^{-43}$  seconds

宇宙の大規模構造へと進化

Big Bang plus  
300,000 Years

Light

Gravitational  
waves

Big Bang plus  
15 Billion Years

Now

# 宇宙の歴史

BIG BANG

## インフレーション

密度揺らぎ（+重力波）を生成  
観測してインフレーション  
の証拠をつかみたい！

宇宙の大規模構造へと進化

Big Bang plus  
 $10^{-43}$  seconds

Big Bang plus  
300,000 Years

Gravitational  
waves

Big Bang plus  
15 Billion Years

Light

Now

## BIG BANG

### インフレーション

密度揺らぎ（+重力波）を生成  
観測してインフレーション  
の証拠をつかみたい！

宇宙の大規模構造へと進化

Big Bang plus  
 $10^{-43}$  seconds

Big Bang plus  
300,000 Years

Gravitational  
waves

Big Bang plus  
15 Billion Years

Light

Now

しかしそもそも  
インフレーションとは何なのか？

## BIG BANG

### インフレーション

密度揺らぎ（+重力波）を生成

CMB以前の時代：  
光は飛び回る電子に邪魔  
されてまっすぐ進めない

Big Bang plus  
 $10^{-43}$  seconds

Big Bang plus  
300,000 Years

Gravitational  
waves

Big Bang plus  
15 Billion Years

Light

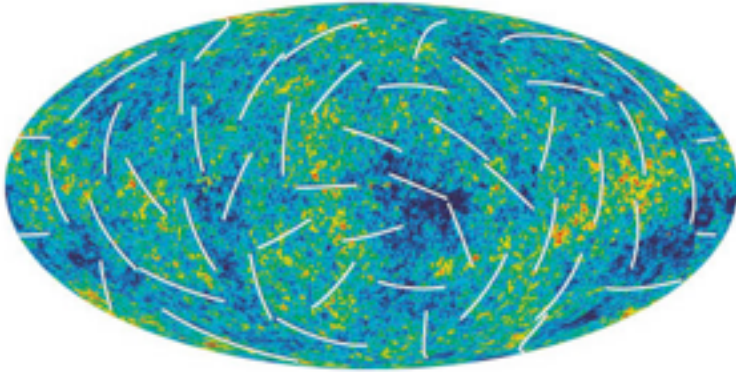
Now

重力波は物質と相互作用  
せずまっすぐ進む

→ インフレーションを直接観測する唯一の手段！



# ■ インフレーション起源重力波検出に向けた取り組み



WMAP Three Year Polarized CMB Sky (<http://wmap.gsfc.nasa.gov/>)

## CMB Bモード偏光

Planck (launched on 2009)

LiteBIRD, CMBpol, COrE (2020?)

地上実験

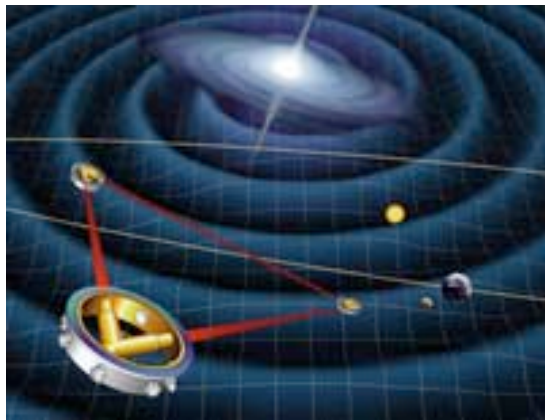
## 直接検出

地上実験: LIGO, LCGT, VIRGO

→ 感度が足りない

BBO (post LISA, 2025-30???)

**DECIGO (2027)**



LISA image (<http://lisa.nasa.gov/>)

→ インフレーションを探る次世代の観測

# **Observational aspects of the inflationary gravitational wave background**

# ■ 重力波の発展方程式

アインシュタイン方程式から

振動

$$\ddot{h}_{ij} + 3H\dot{h}_{ij} - \frac{1}{a^2}\nabla^2 h_{ij} = 16\pi G\Pi_{ij}$$

宇宙膨張の効果

物質からの寄与

膨張宇宙のmetric: Robertson-Walker

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)(\delta_{ij} + h_{ij})dx^i dx^j,$$

重力波：空間成分の摂動として表す

$a(t)$ : スケールファクター  
宇宙空間の膨張度合い

物質からの寄与（右辺）はとりあえず無視してフーリエ変換

$$\ddot{h}_{\mathbf{k}}^{\lambda} + \underline{3H\dot{h}_{\mathbf{k}}^{\lambda}} + \underline{\frac{k^2}{a^2}h_{\mathbf{k}}^{\lambda}} = 0$$

- $H > k/a$       $h_{\mathbf{k}}^{\lambda} \propto \text{const.}$
- $H < k/a$       $h_{\mathbf{k}}^{\lambda} \propto a^{-1} e^{-ik\tau}.$

H: 宇宙の膨張率     k: 周波数 ( $f=k/2\pi$ )

→ 宇宙の膨張率 (H) が重力波の運動を決める

# 宇宙の歴史

BIG BANG

インフレーション

宇宙再加熱 (?)

Big Bang plus  
 $10^{-43}$  seconds

Big Bang plus  
300,000 Years

Gravitational  
waves

Big Bang plus  
15 Billion Years

Light

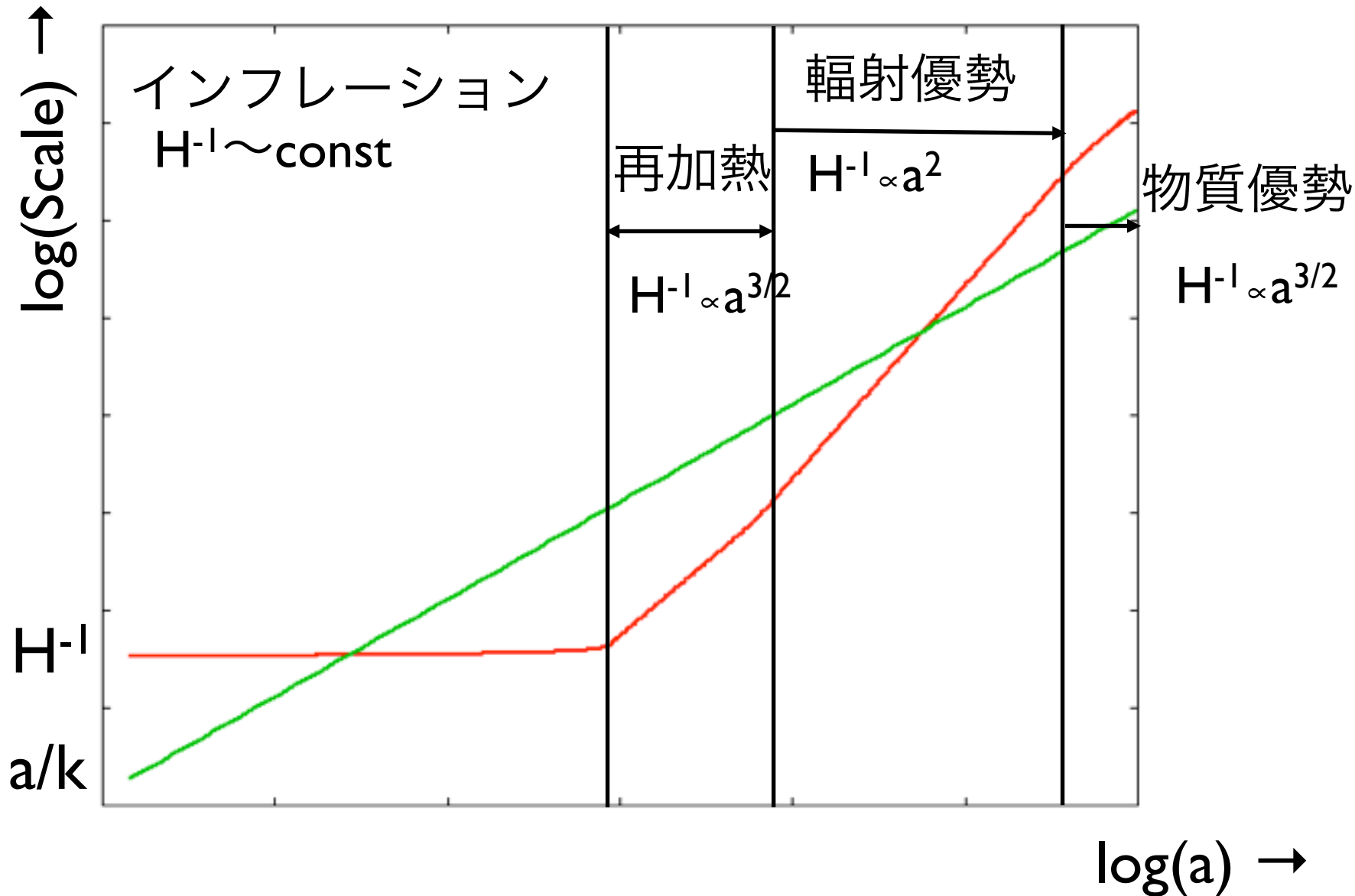
Now

輻射優勢期

物質優勢期

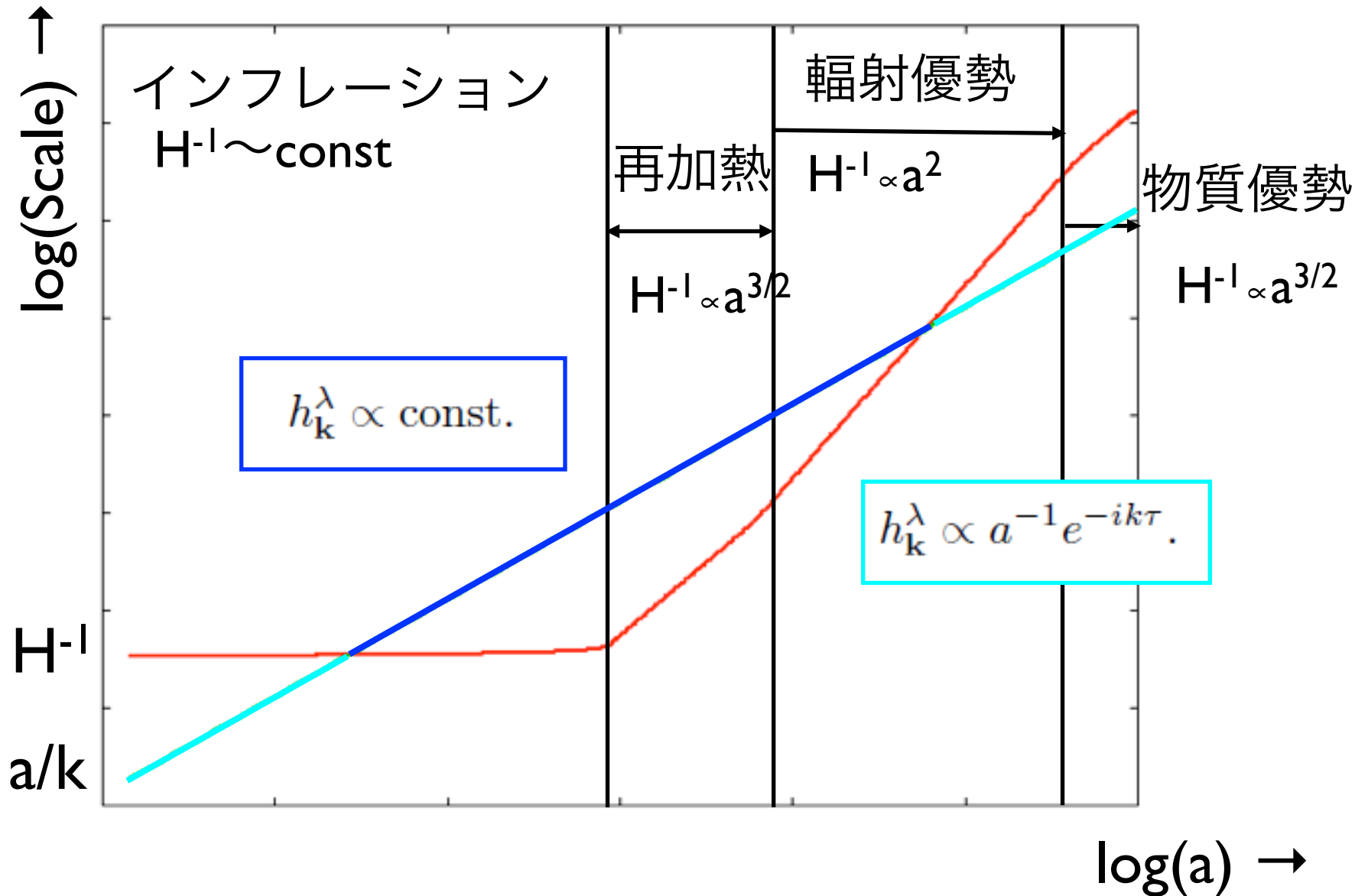
# ■ 宇宙膨張の歴史

$$\ddot{h}_k^\lambda + \underline{3H\dot{h}_k^\lambda} + \underline{\frac{k^2}{a^2}h_k^\lambda} = 0$$



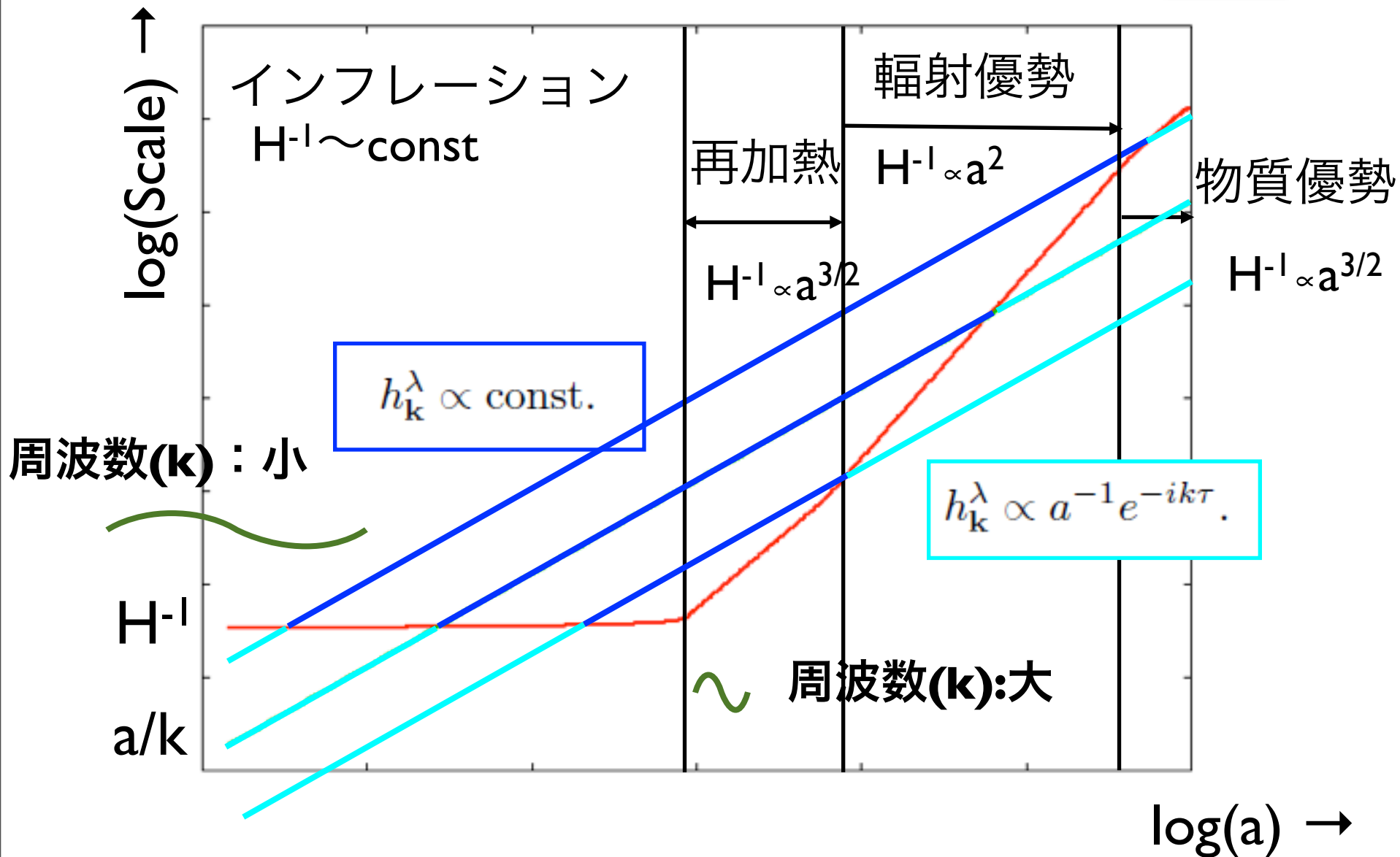
# ■ 宇宙膨張の歴史

$$\ddot{h}_k^\lambda + \underline{3H\dot{h}_k^\lambda} + \underline{\frac{k^2}{a^2}h_k^\lambda} = 0$$



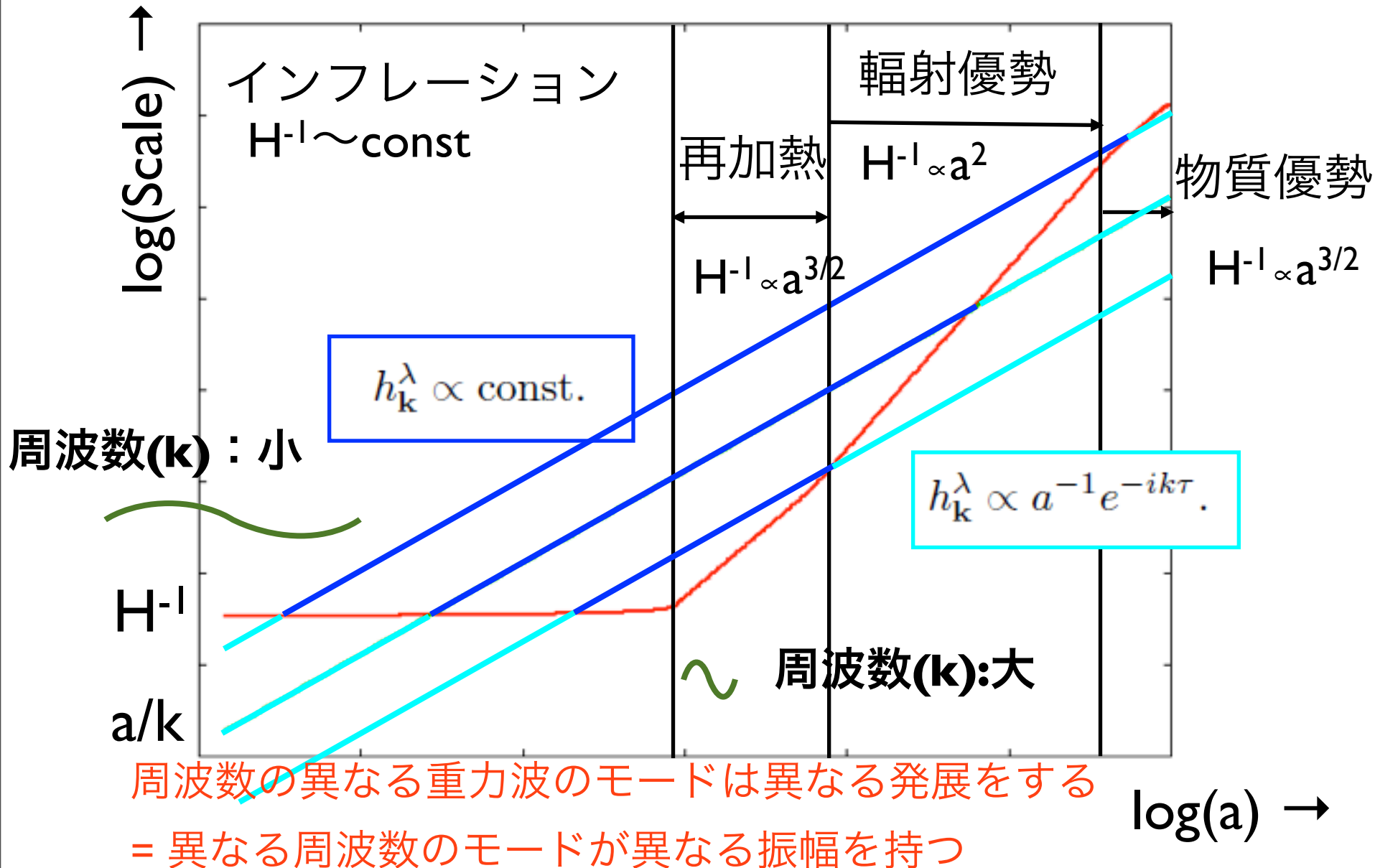
# ■ 宇宙膨張の歴史

$$\ddot{h}_k^\lambda + \underline{3H\dot{h}_k^\lambda} + \underline{\frac{k^2}{a^2}h_k^\lambda} = 0$$



# ■ 宇宙膨張の歴史

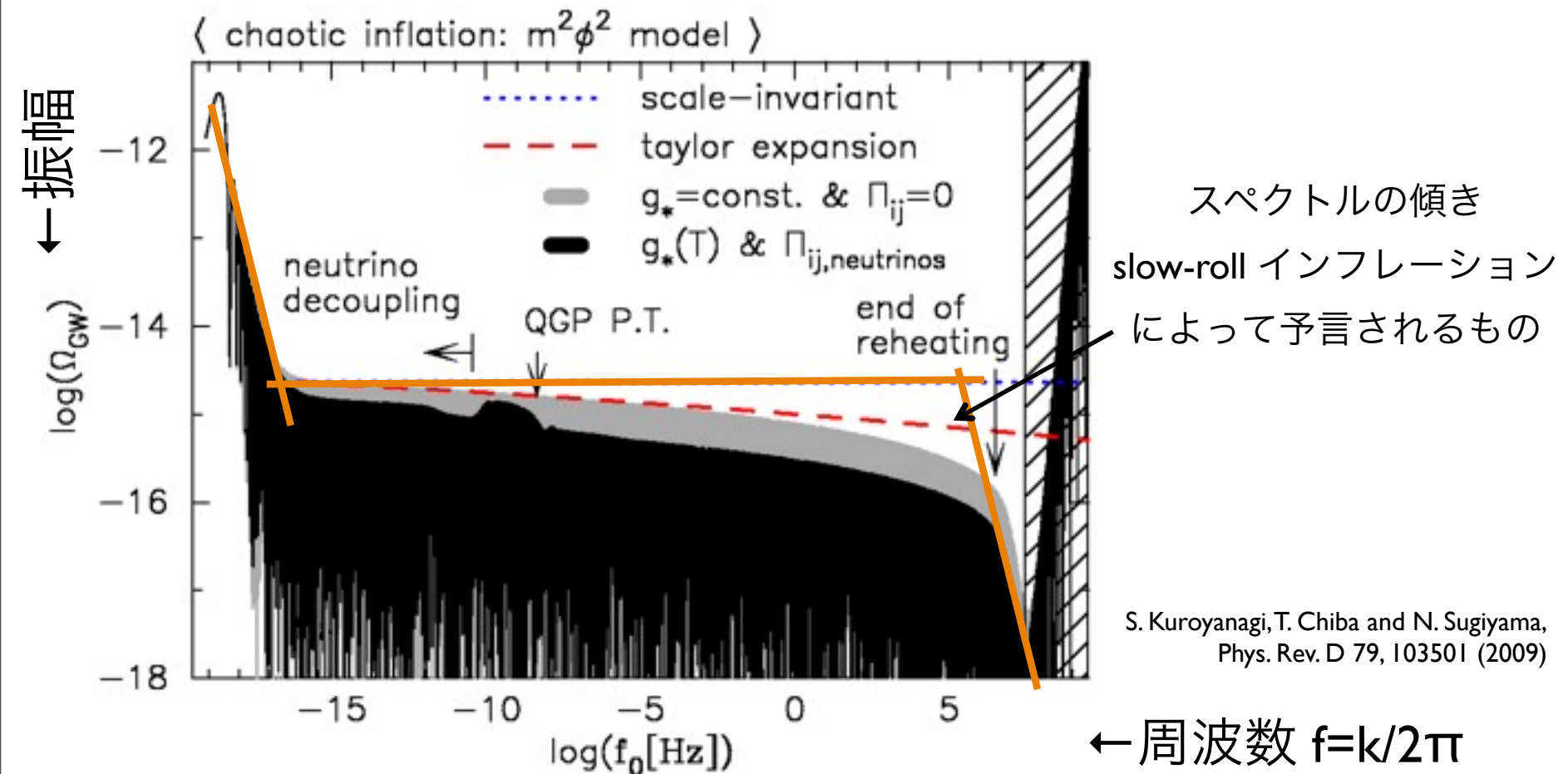
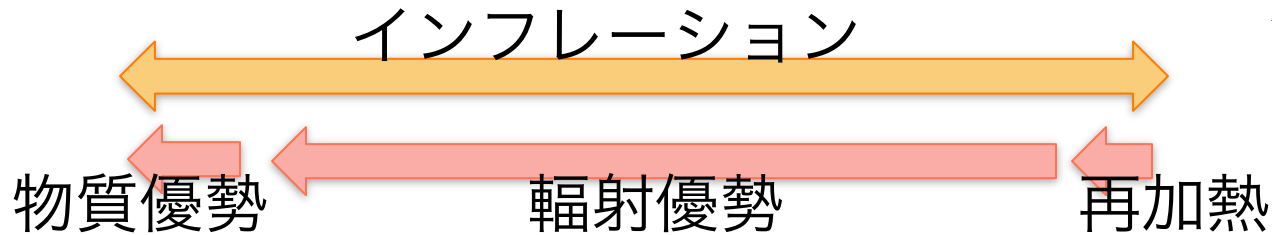
$$\ddot{h}_{\mathbf{k}}^{\lambda} + \underline{3H\dot{h}_{\mathbf{k}}^{\lambda}} + \underline{\frac{k^2}{a^2}h_{\mathbf{k}}^{\lambda}} = 0$$





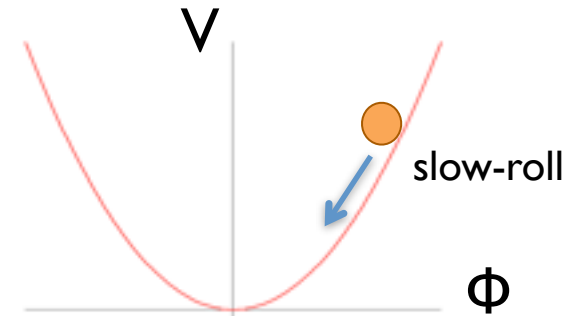
# ■ 重力波のスペクトル

宇宙膨張の情報が  
スペクトル上に  
刻まれている

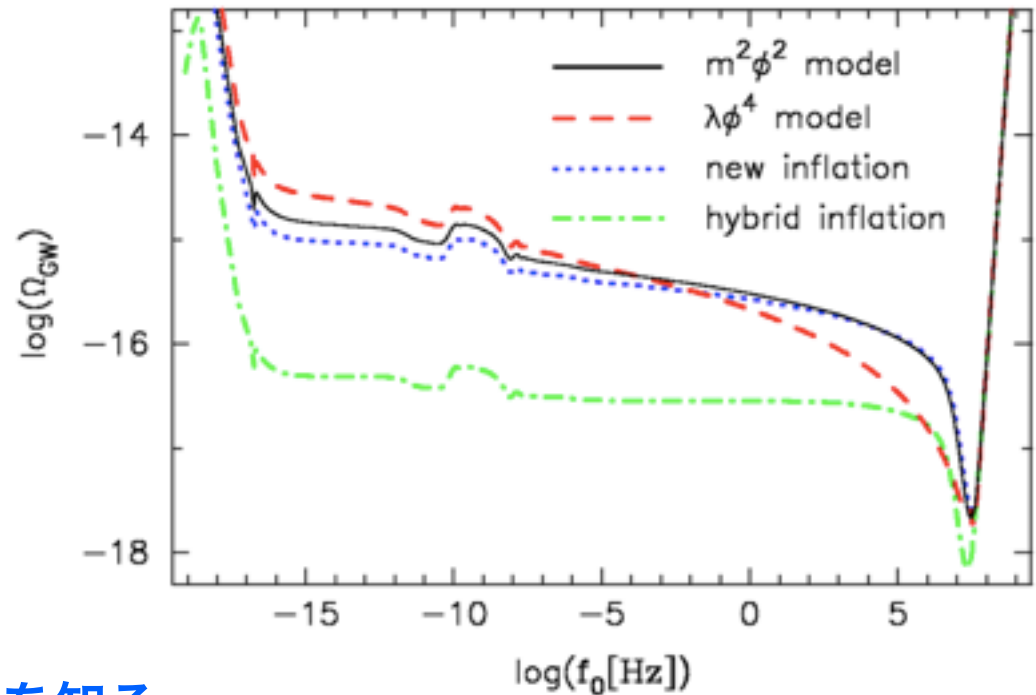
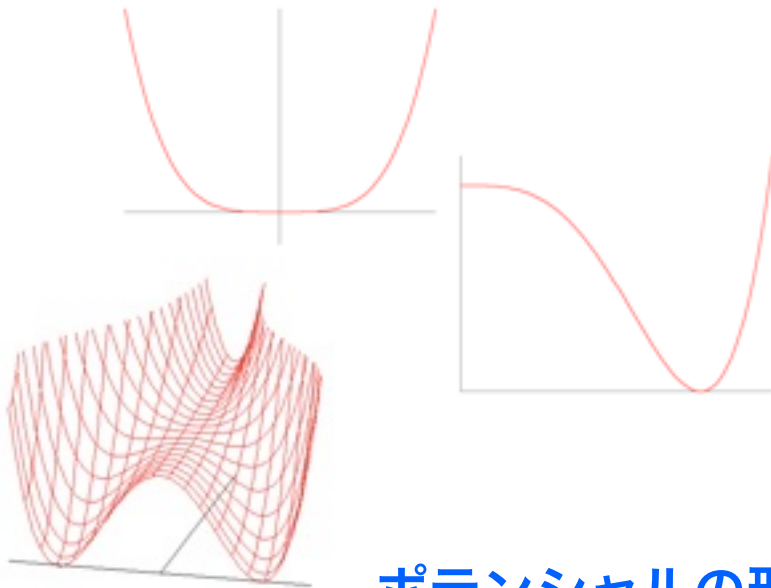


# ■ インフレーションの情報を引き出す

スカラー場がポテンシャル中を転がって  
いく中でわずかにスピードが変わる  
→ 生成される重力波のスペクトルに傾き



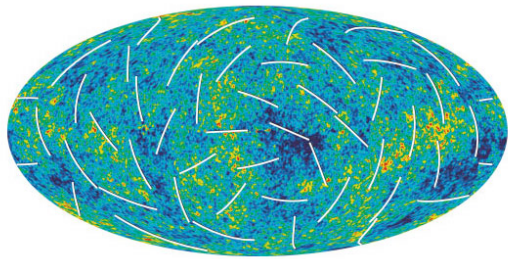
インフレーションモデルによって  
ポテンシャルの形はいろいろ



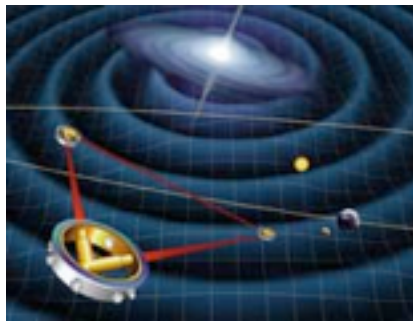
ポテンシャルの形を知る

=インフレーションを引き起こす高エネルギー物理へのヒント

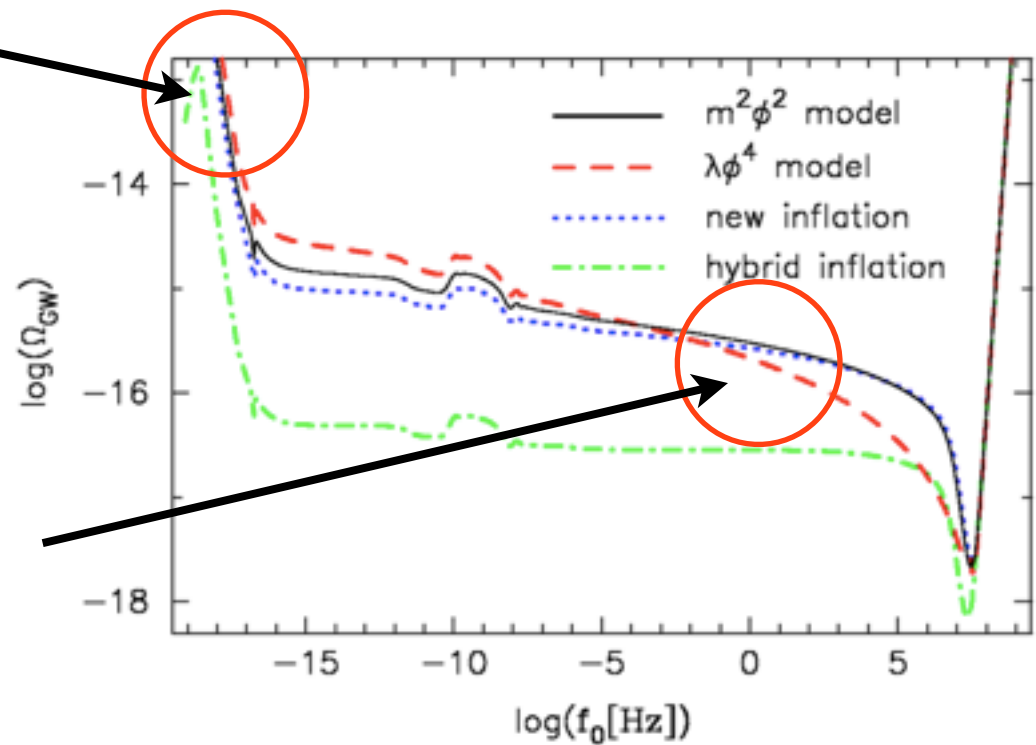
# ■ インフレーションの情報を引き出す



CMB Bモード



直接検出  $\sim 0.1 \text{ Hz}$



→ 傾きを測れる！

# ■ インフレーションパラメータへの制限

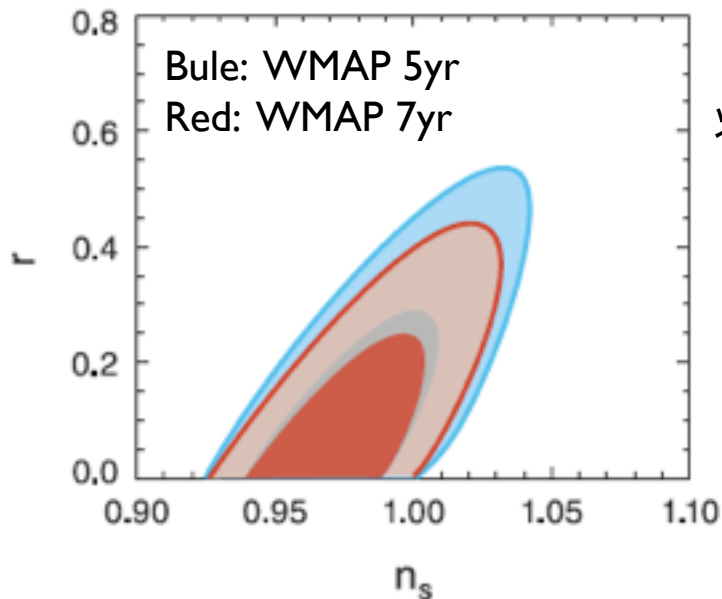
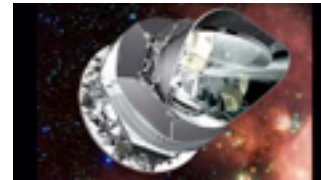
CMBの場合  $n_s$ : 密度揺らぎのスペクトルの傾き

$r$ : tensor-to-scalar ratio (重力波／密度揺らぎ)

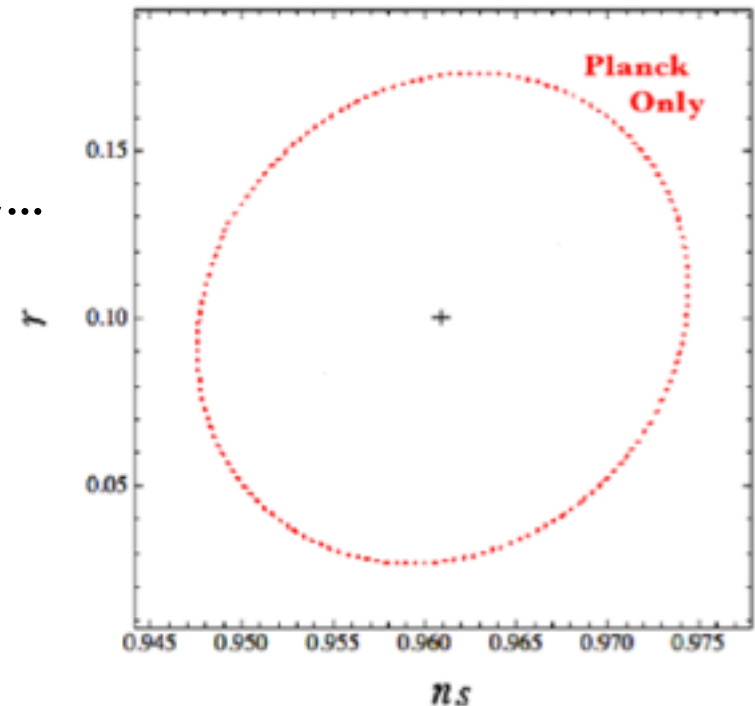
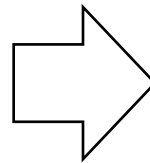
WMAP



Planck



将来的には...



WMAP 7yr constraint: E. Komatsu, et al. APJ Suppl. 192, 18 (2011)

S. Kuroyanagi, C. Gordon, J. Silk and N. Sugiyama, Phys. Rev. D 81, 083524 (2010)

# ■ インフレーションパラメータへの制限

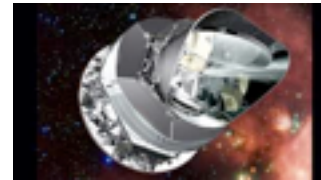
CMBの場合  $n_s$ : 密度揺らぎのスペクトルの傾き

$r$ : tensor-to-scalar ratio (重力波／密度揺らぎ)

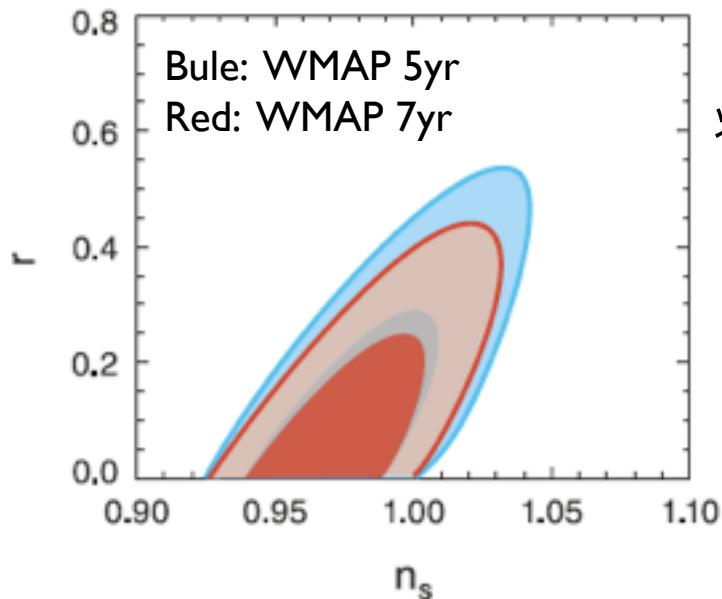
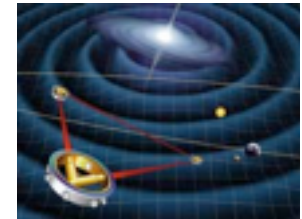
WMAP



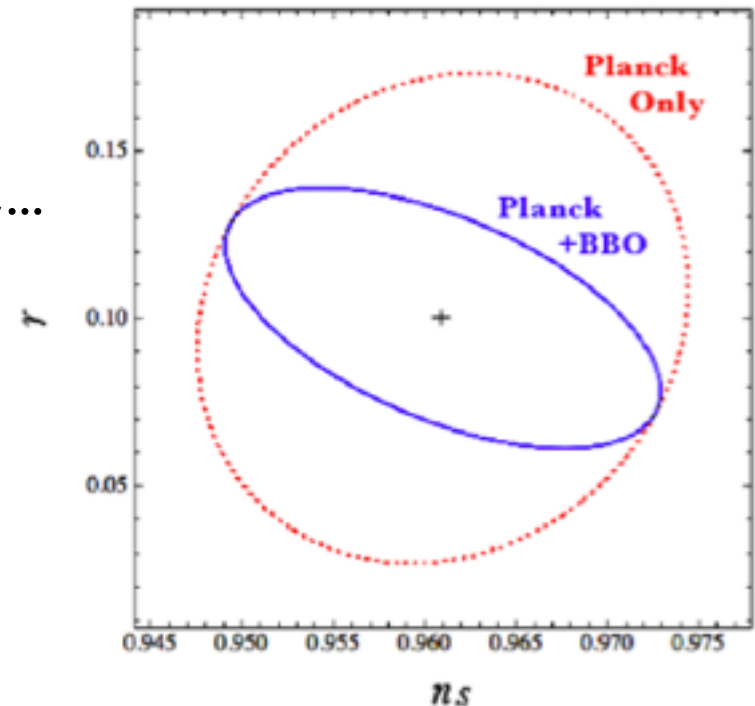
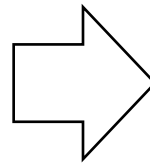
Planck



+



将来的には...



WMAP 7yr constraint: E. Komatsu, et al. APJ Suppl. 192, 18 (2011)

S. Kuroyanagi, C. Gordon, J. Silk and N. Sugiyama, Phys. Rev. D 81, 083524 (2010)

# ■ もっとfundamentalな量に制限を付けてみる

例えば観測がChaotic inflation  
モデルを支持したとしたら...

## Chaotic inflation ( $\Phi^2$ potential)



$$V(\phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2$$

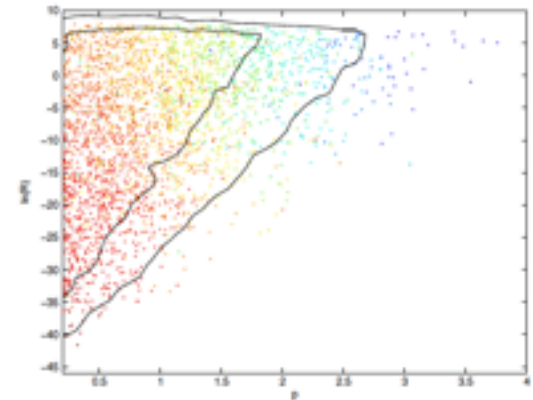
## 制限をつけられるパラメータ

m: スカラー場の質量

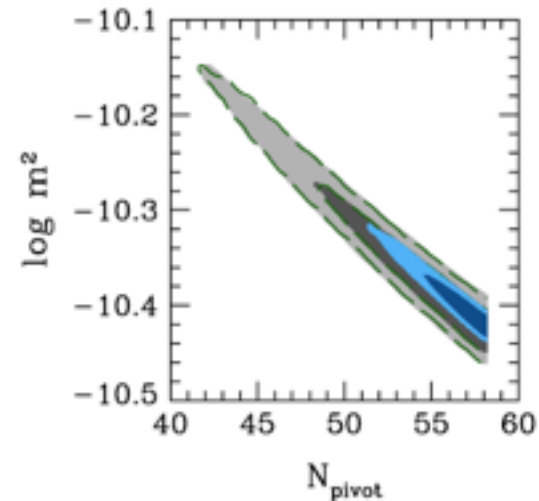
N: インフレーションの長さ

→ 再加熱が起こった時期にも示唆

## WMAPからの制限

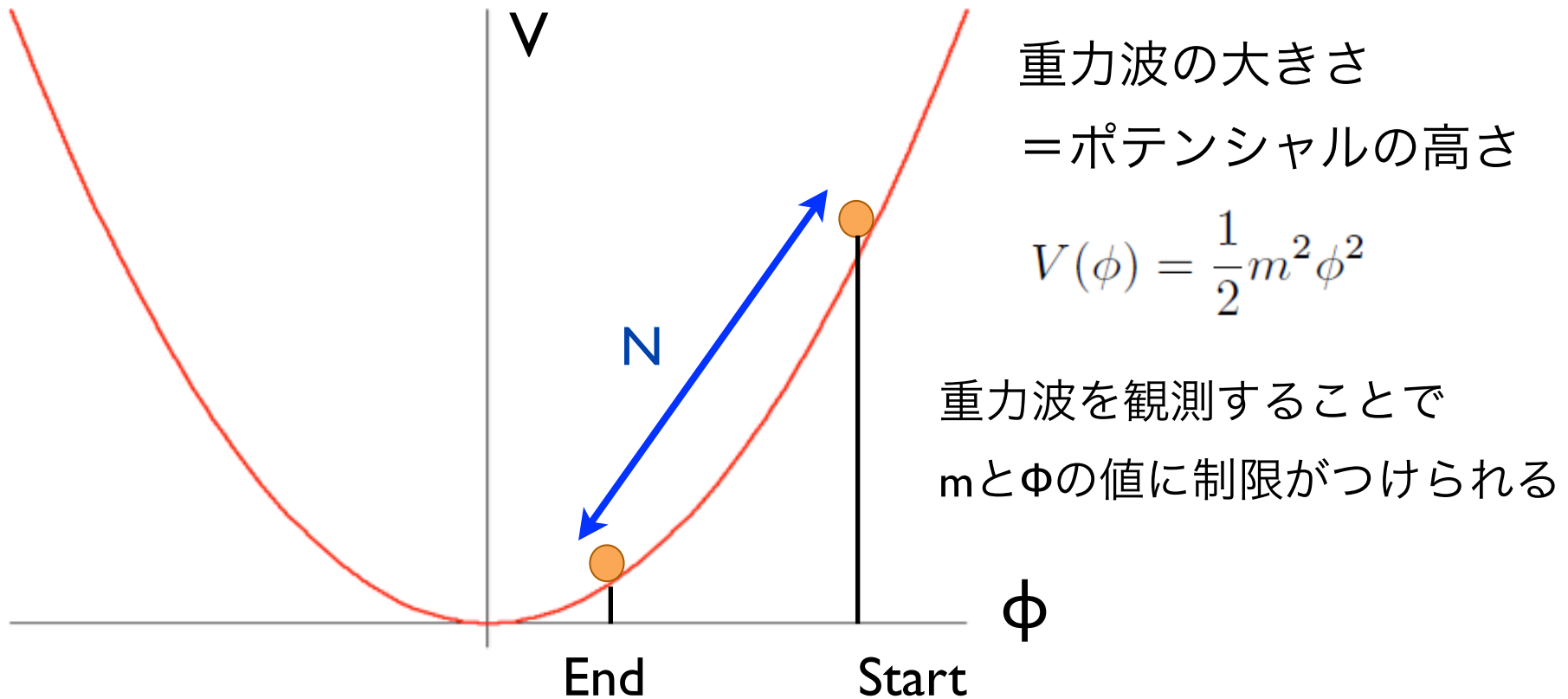


Martin and Ringeval, PRD 83, 043505 (2011)



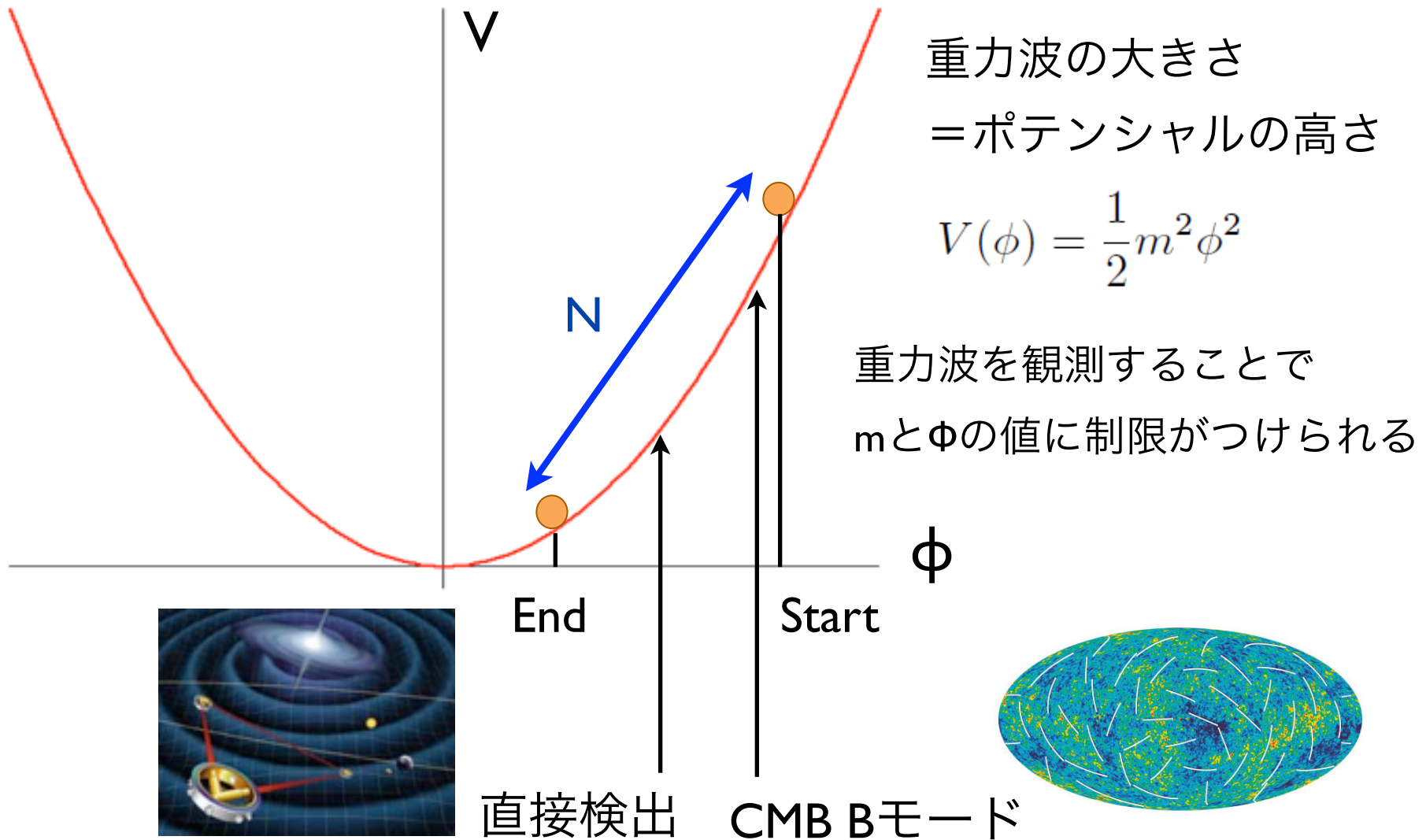
Mortonson et al. PRD 83, 043505 (2011)

## ■ インフレーションパラメータへの制限





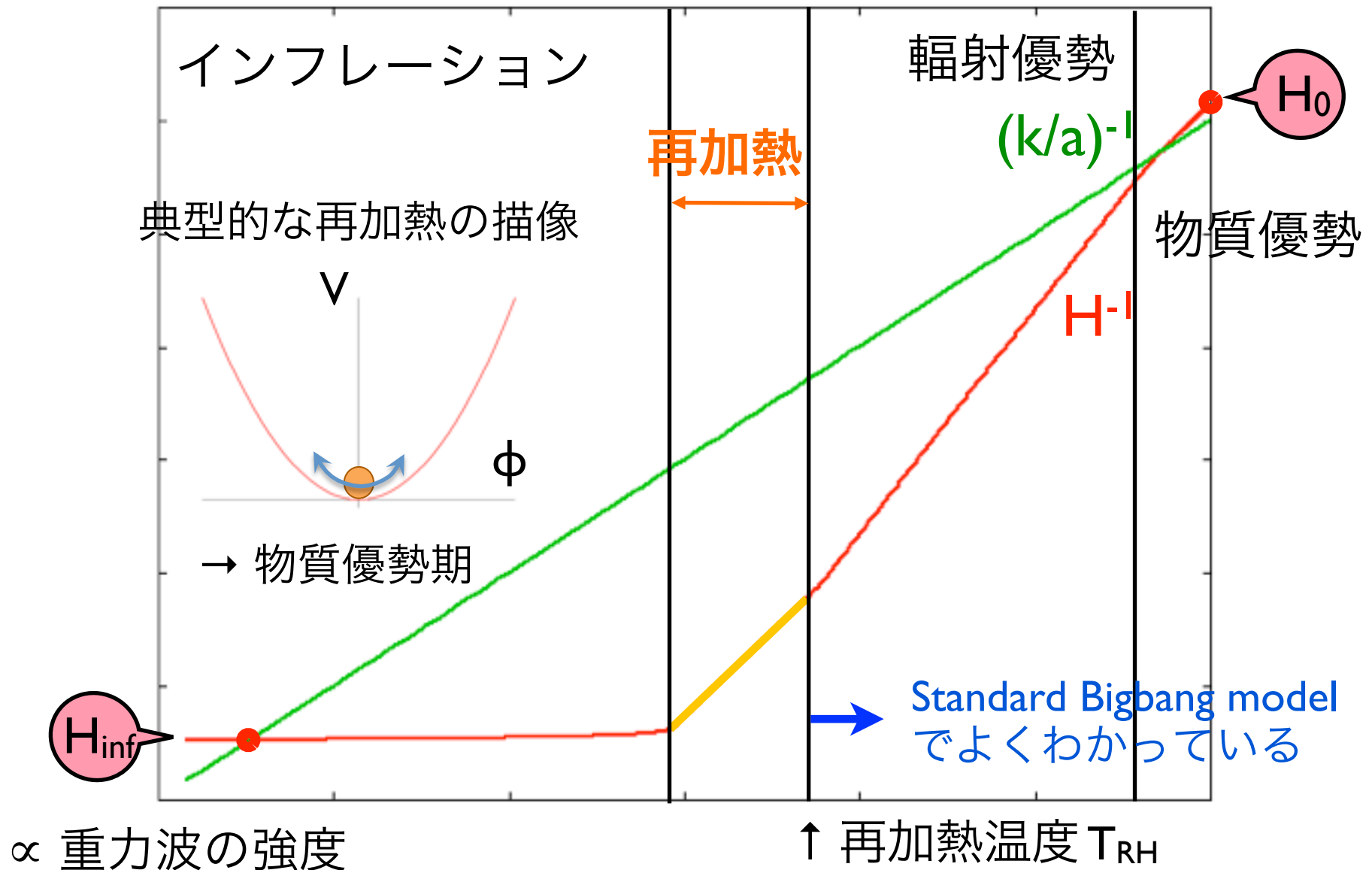
# ■ インフレーションパラメータへの制限



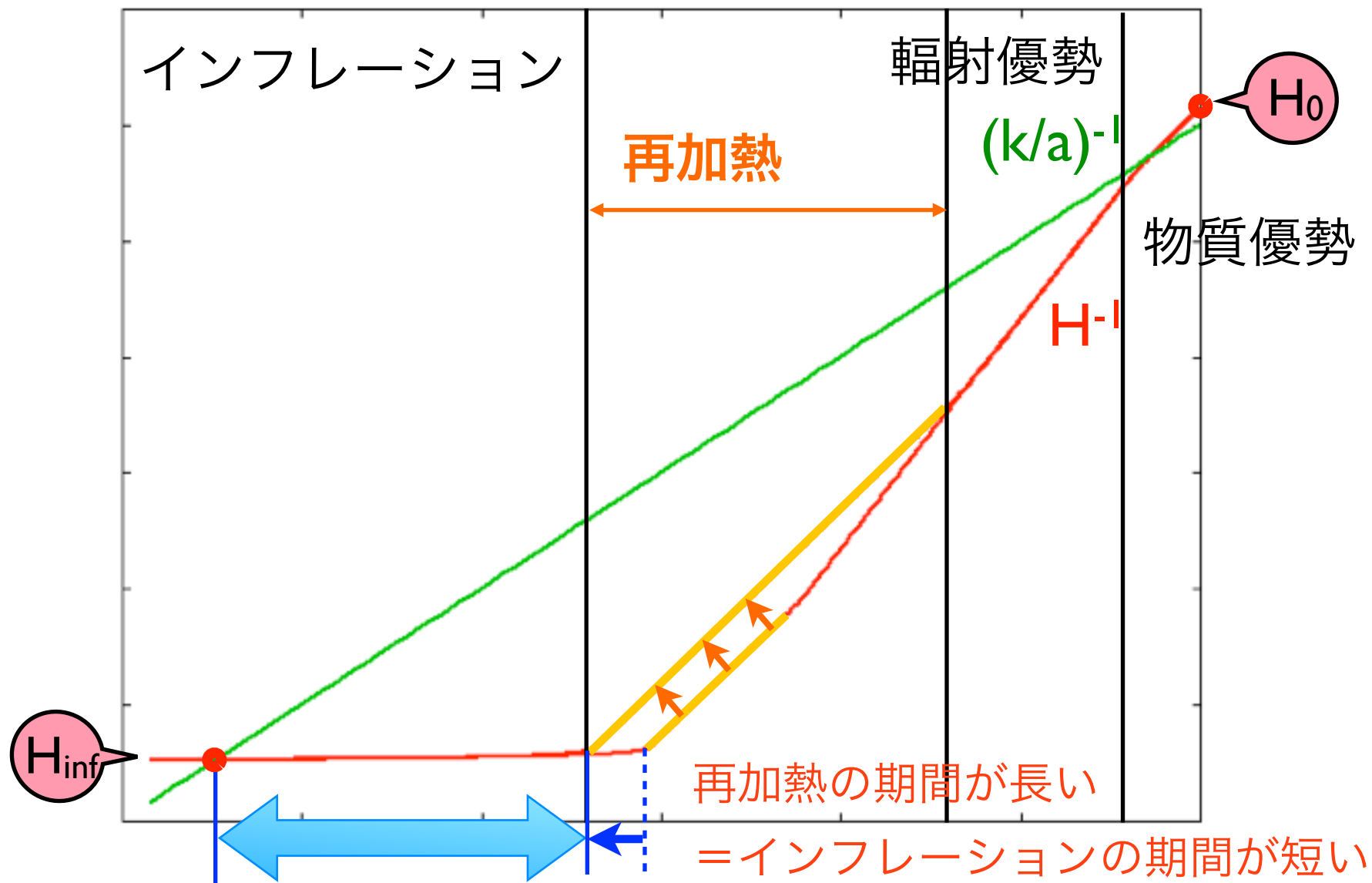
→ インフレーションの長さ ( $\phi$ ) に関して独立な情報！



# ■ インフレーションの長さがわかるとうれしいこと

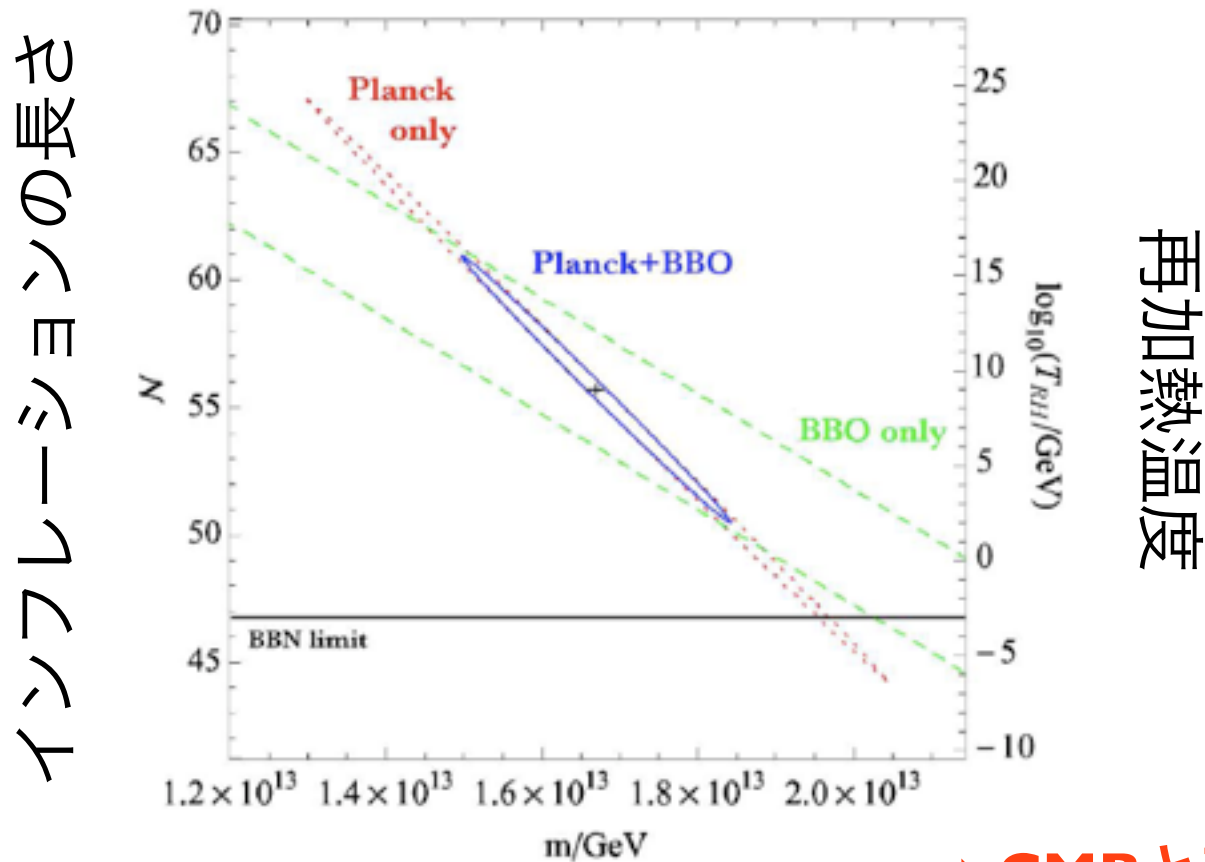


# ■ インフレーションの長さで再加熱の関係



# ■ パラメータへの制限：Chaotic inflationの場合

S. Kuroyanagi, C. Gordon, J. Silk and N. Sugiyama, Phys. Rev. D 81, 083524 (2010)

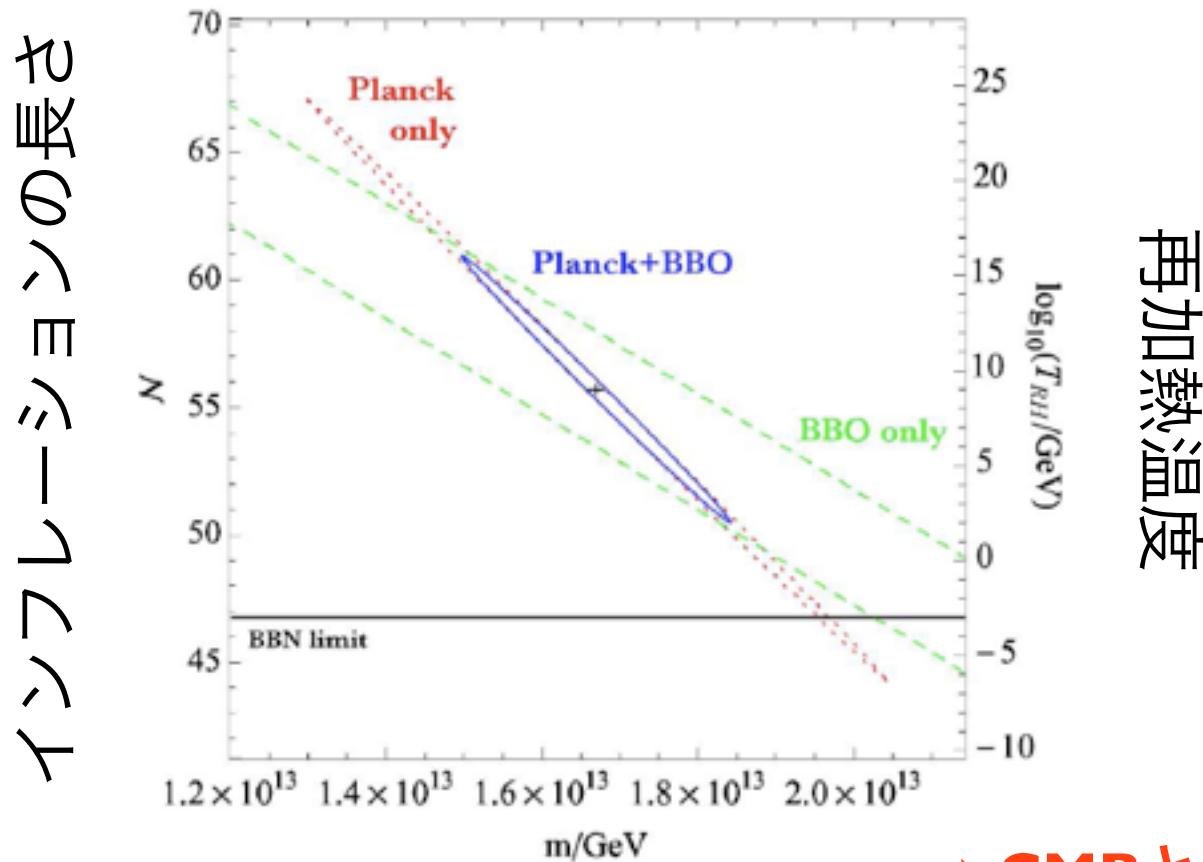


スカラー場の質量

→ **CMBと直接検出で  
相補的な制限！**

# ■ パラメータへの制限：Chaotic inflationの場合

S. Kuroyanagi, C. Gordon, J. Silk and N. Sugiyama, Phys. Rev. D 81, 083524 (2010)



スカラー場の質量

→ **CMBと直接検出で  
相補的な制限！**

インフレーションだけでなく

現状で観測的情報が全くない再加熱についても示唆を与えられる

# ■ パラメータへの制限：Natural inflationの場合

$$V(\phi) = \Lambda^4 [1 \pm \cos(N\phi/f)].$$

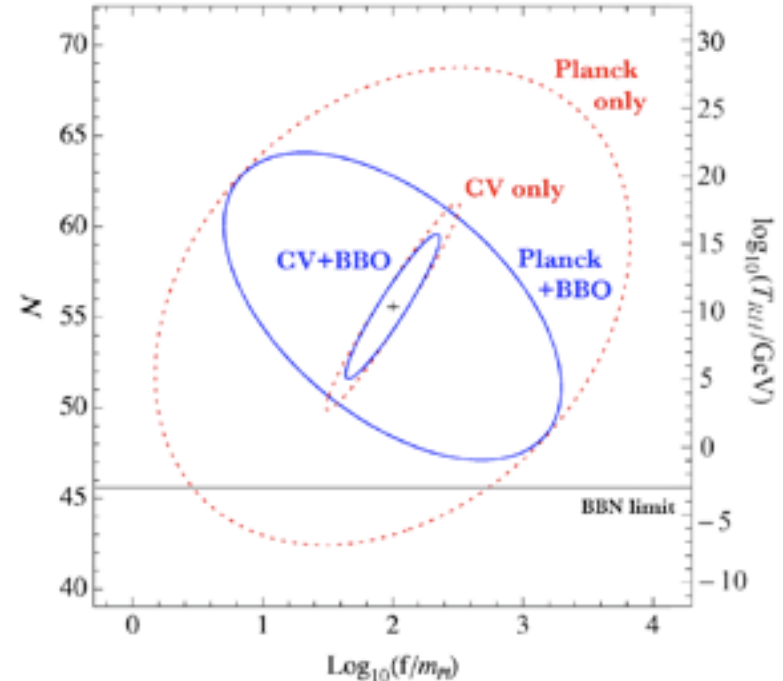
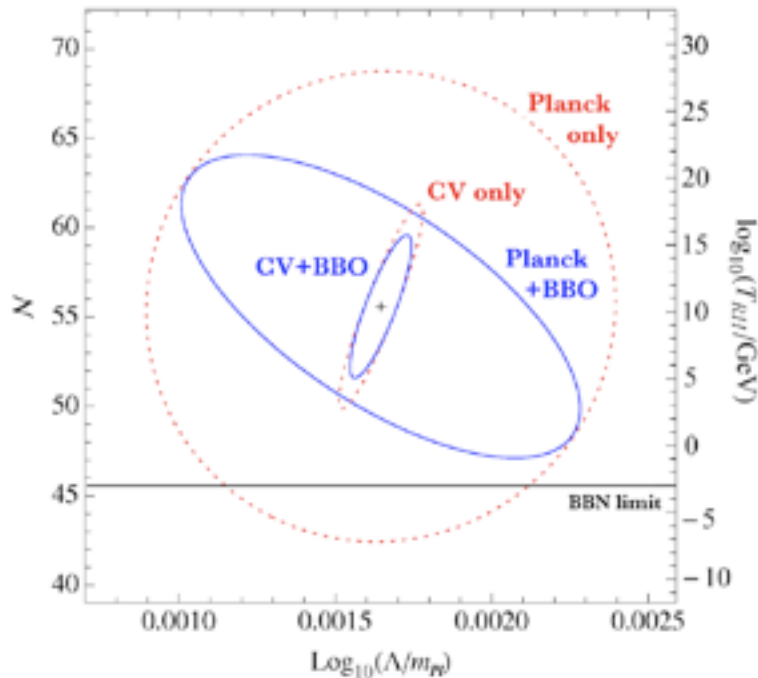
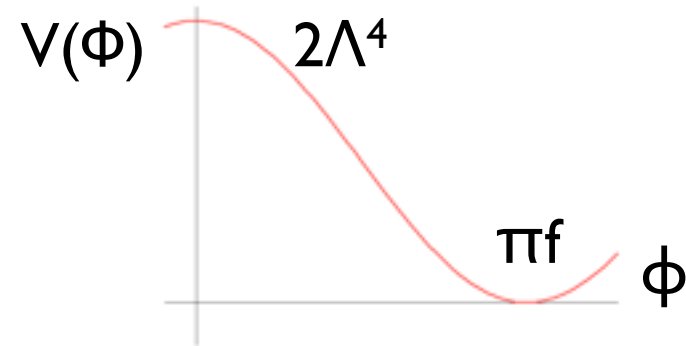
S. Kuroyanagi, C. Gordon, J. Silk and N. Sugiyama, Phys. Rev. D 81, 083524 (2010)

制限をつけるパラメータ

$\Lambda$ : ポテンシャルの高さ

$f$ : ポテンシャルの底の位置

$N$ : インフレーションの長さ

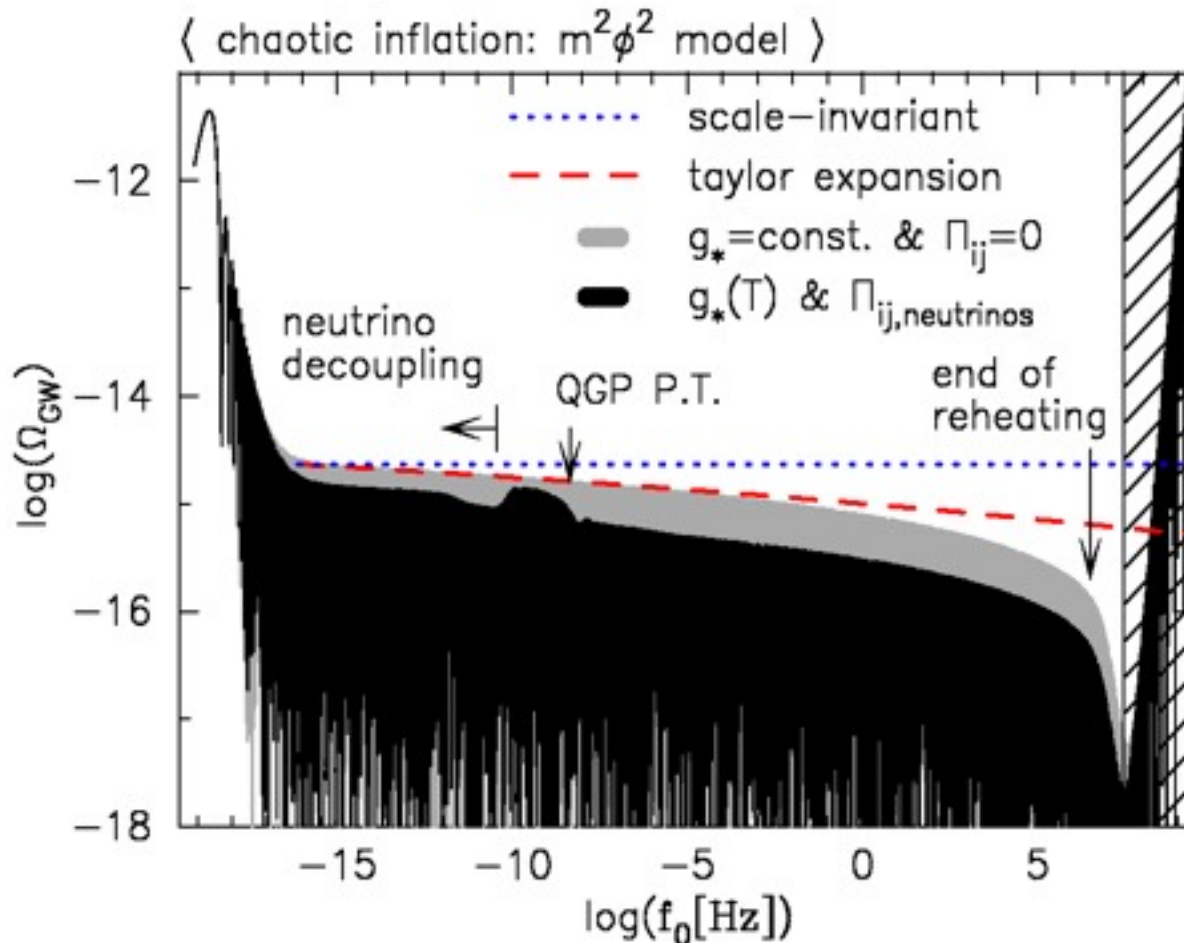


CV: CMB実験で究極の感度を想定 → それでも直接検出は制限を強めるのに役に立つ

# ■ もっと強力な宇宙再加熱への制限

再加熱の長さはスペクトルの形にも直接影響

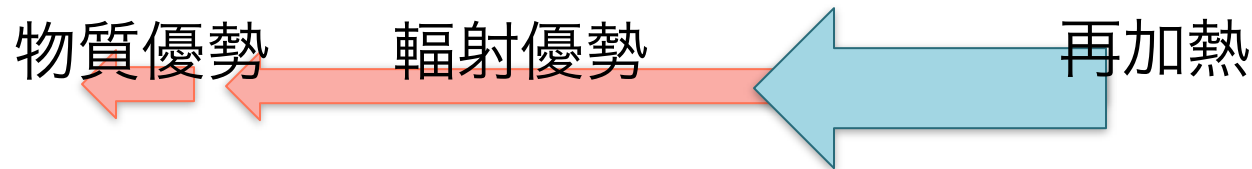
物質優勢 ← 輻射優勢 ← 再加熱



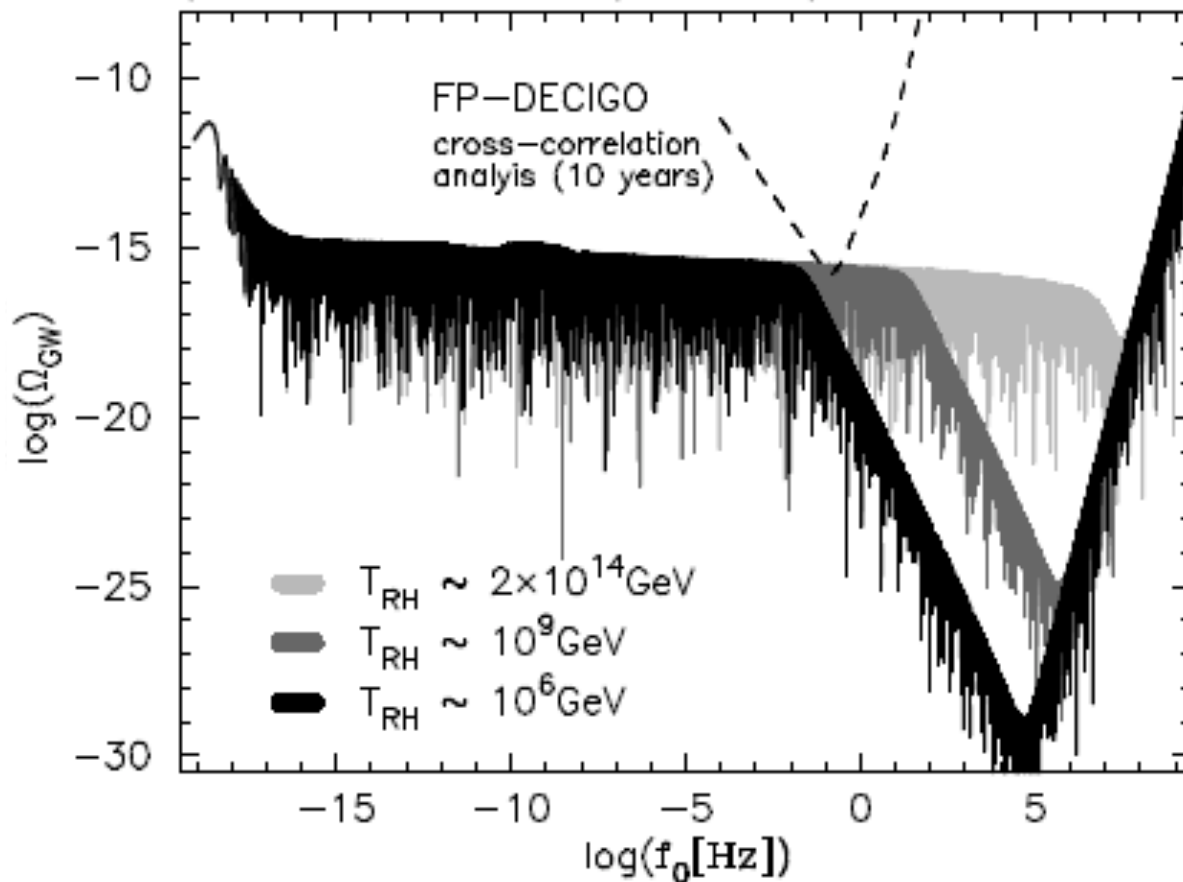
S. Kuroyanagi, T. Chiba and N. Sugiyama,  
Phys. Rev. D 79, 103501 (2009)

# ■ もっと強力な宇宙再加熱への制限

再加熱の長さはスペクトルの形にも直接影響



( chaotic inflation:  $m^2\phi^2$  model )

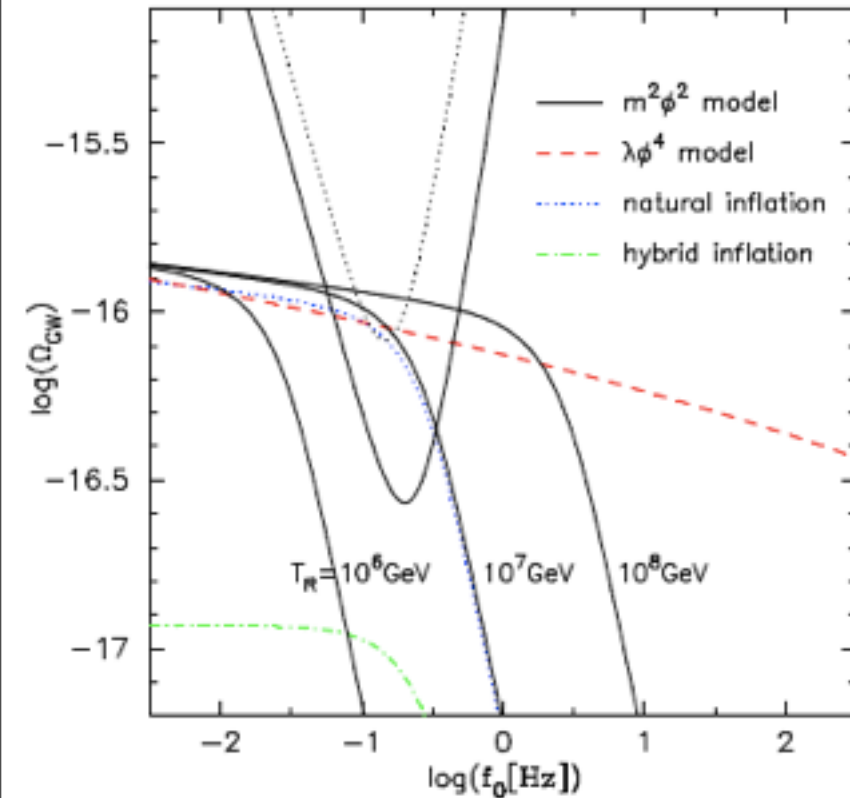


折れ曲がりを直接検出  
することで再加熱の証  
拠を捉えられるかも？

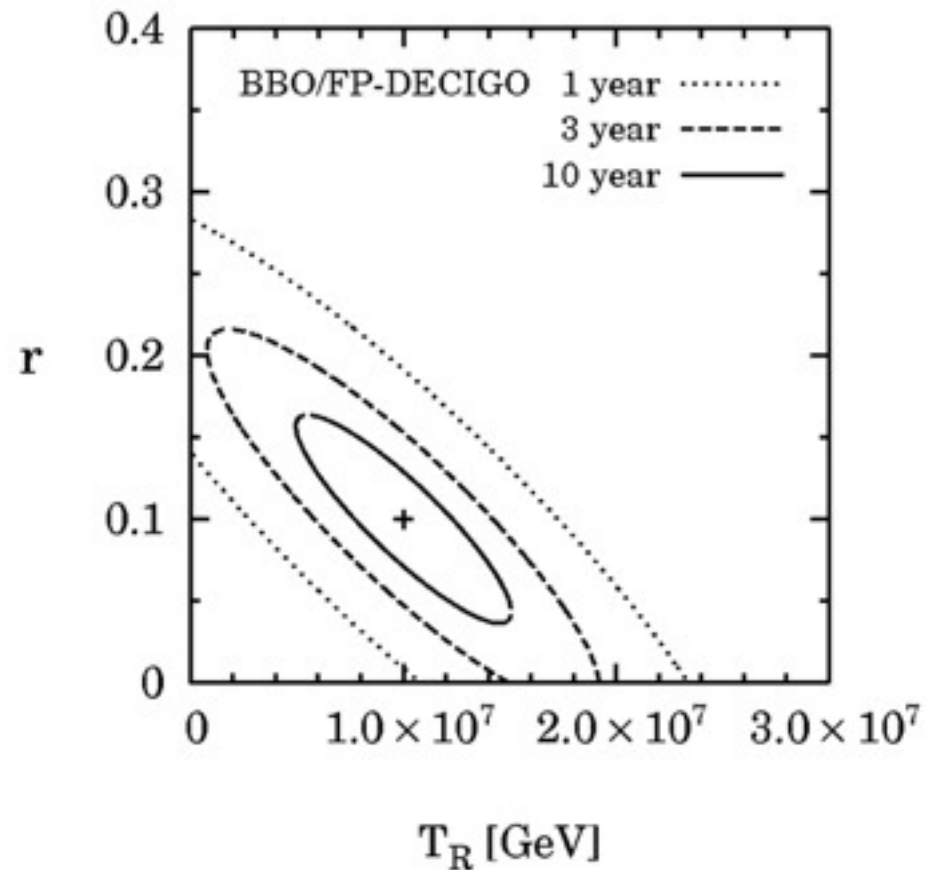
S. Kuroyanagi, T. Chiba and N. Sugiyama,  
Phys. Rev. D 79, 103501 (2009)

# ■ 宇宙再加熱への直接的な制限

再加熱による折れ曲がり或直接検出可能なのは $T_R \sim 10^7 \text{ GeV}$ くらい



$r=0.1$ を仮定

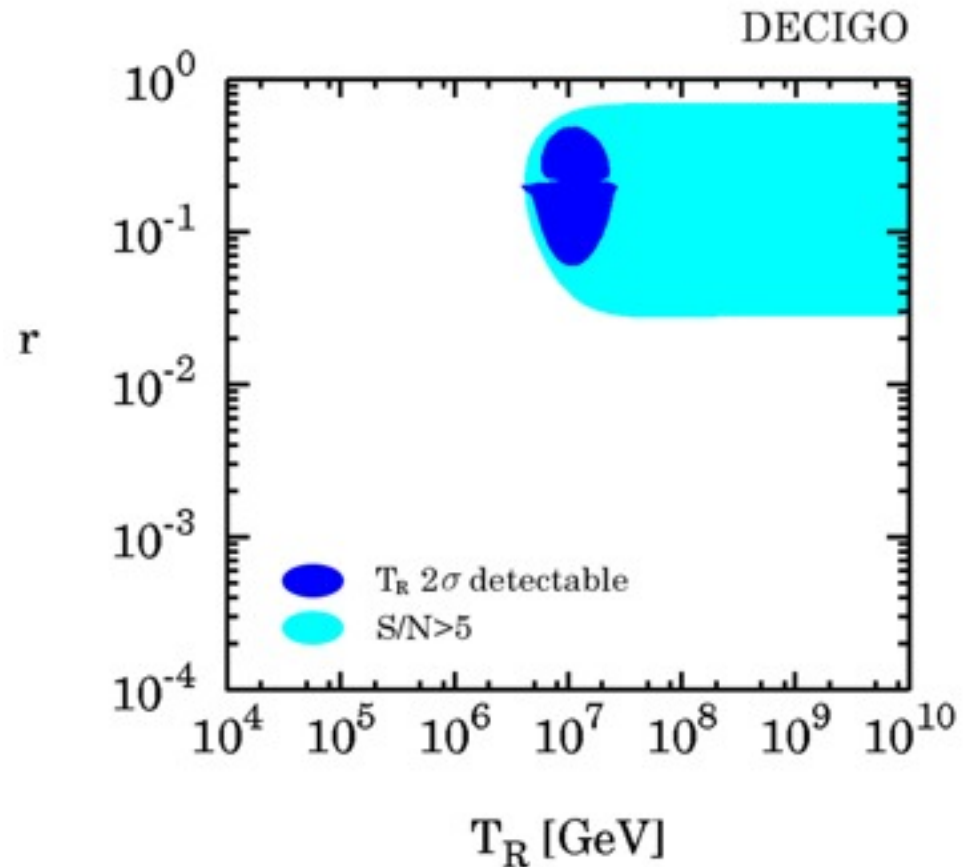
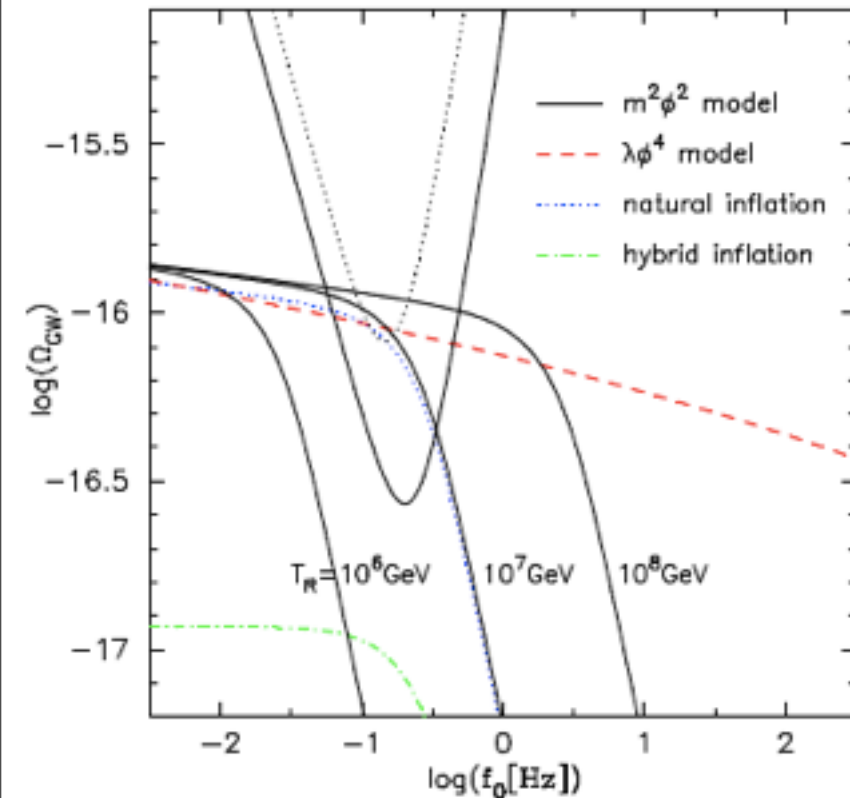


S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito,  
arXiv: 1110.4169 [astro-ph.CO]



# ■ 宇宙再加熱への直接的な制限

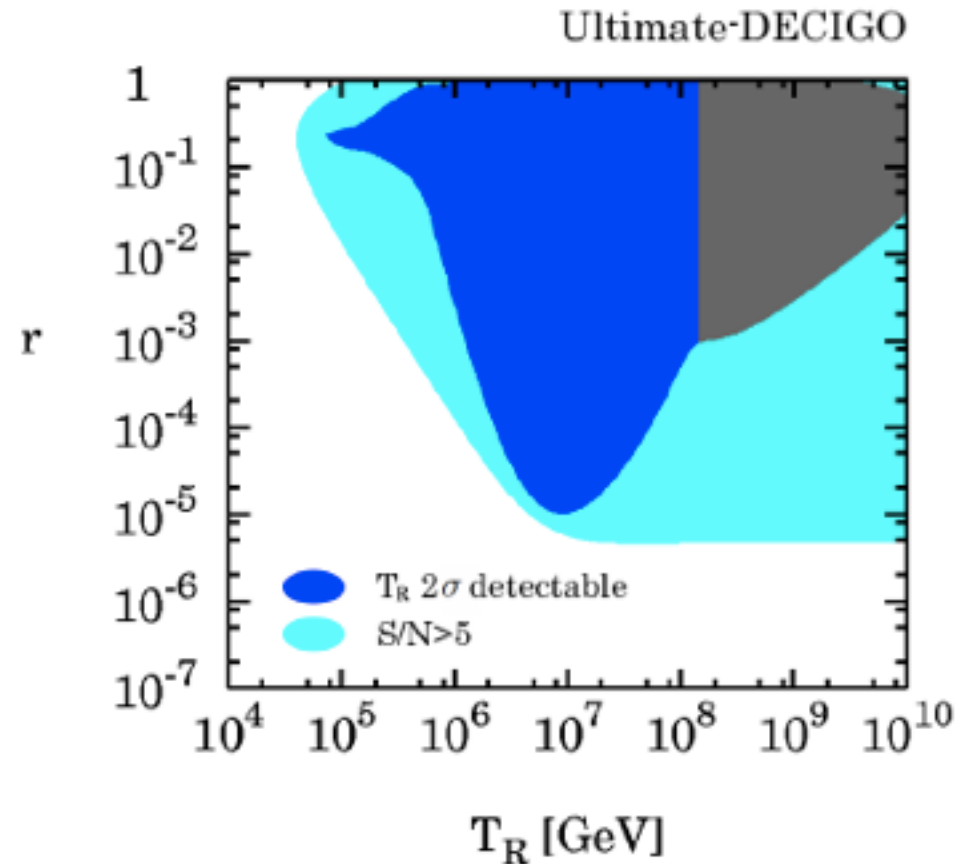
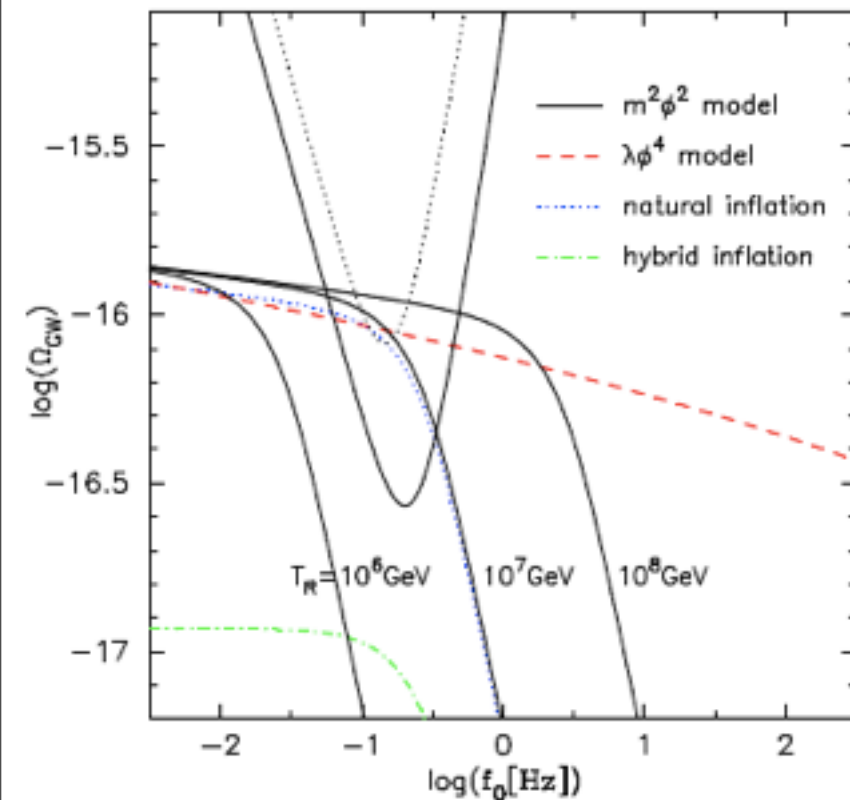
再加熱による折れ曲がり或直接検出可能なのは $T_R \sim 10^7 \text{ GeV}$ くらい



S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito,  
arXiv: 1110.4169 [astro-ph.CO]

# ■ 宇宙再加熱への直接的な制限

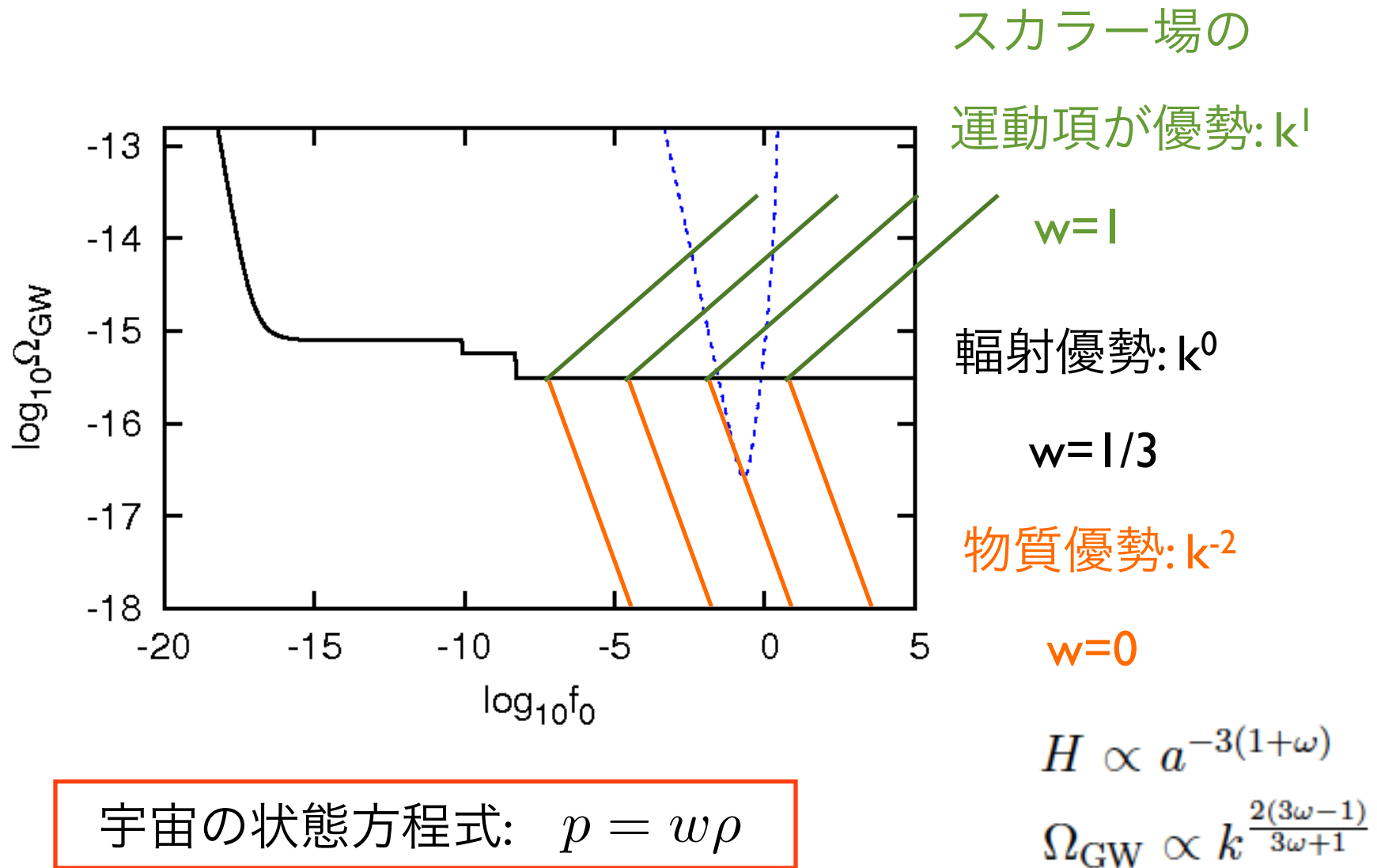
再加熱による折れ曲がり或直接検出可能なのは $T_R \sim 10^7 \text{ GeV}$ くらい



S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito,  
arXiv:1110.4169 [astro-ph.CO]

# ■ 直接検出の更なる可能性：状態方程式への制限

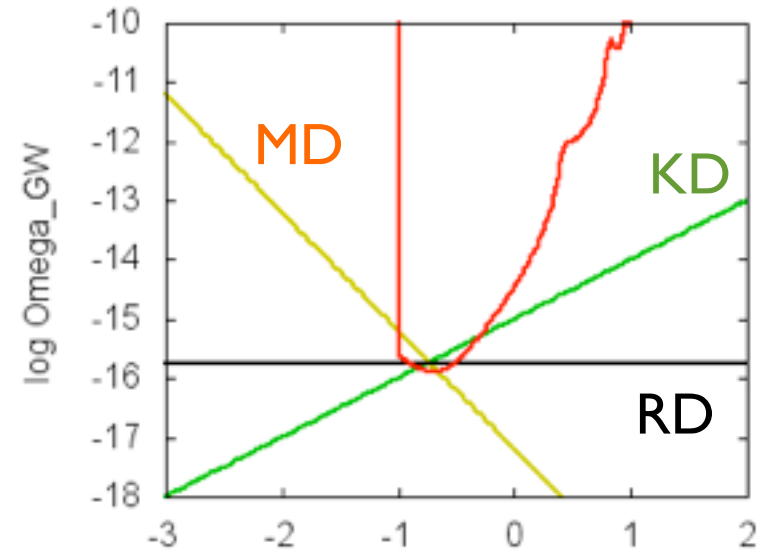
極初期宇宙の膨張則にも示唆を与えることができる



# ■ 直接検出の更なる可能性：状態方程式への制限

S. Kuroyanagi, K. Nakayama and S. Saito, arXiv: 1110.4169 [astro-ph.CO]

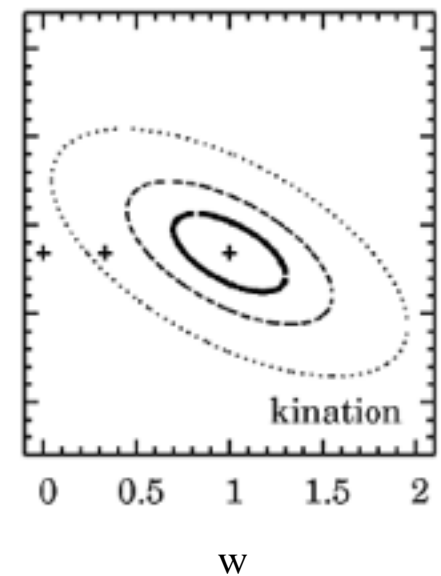
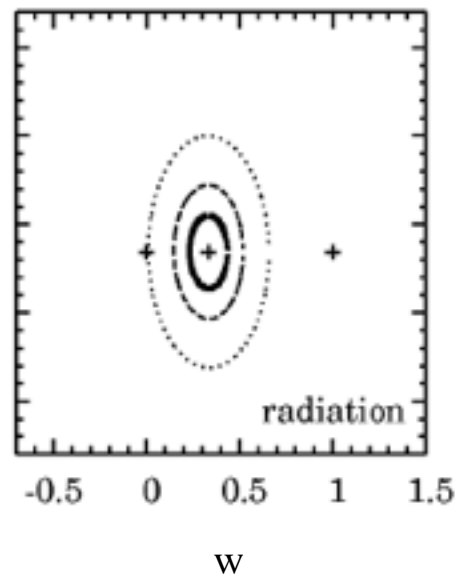
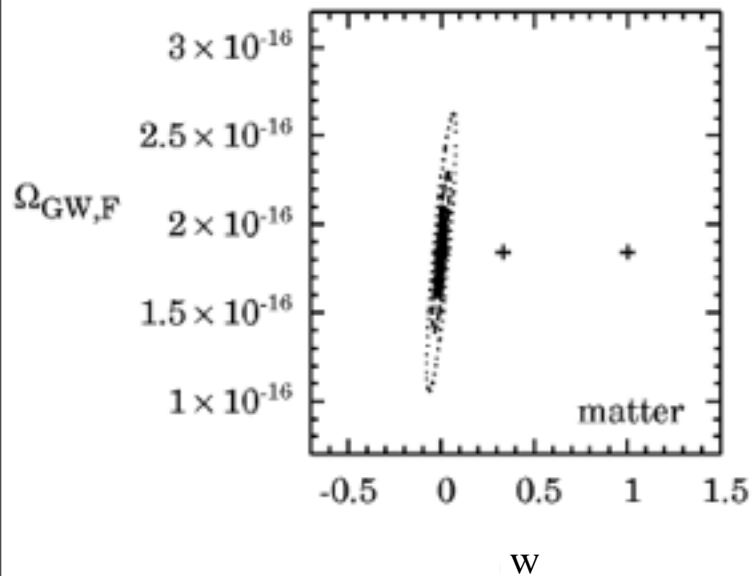
初期宇宙の状態方程式に制限



物質優勢:  $k^{-2}$

輻射優勢:  $k^0$

運動項優勢:  $k^1$



## ■ Summary

- ▶ インフレーション起源の重力波の検出することでインフレーション理論が確固たる理論に。
- ▶ インフレーション起源の重力波を通してインフレーションの時代を直接観測できる。
- ▶ CMBと直接検出は異なる情報を持っており、双方で捉えることは非常に意義がある。
- ▶ インフレーションだけでなく、再加熱などの我々の未だ知らない極初期宇宙の物理に関しても示唆を与えられる。
- ▶ 宇宙論に飛躍をもたらすだけでなく、素粒子論をはじめとする高エネルギー物理にも大きく貢献する。