

重力波で探る初期宇宙

黒柳 幸子

(東京理科大学)

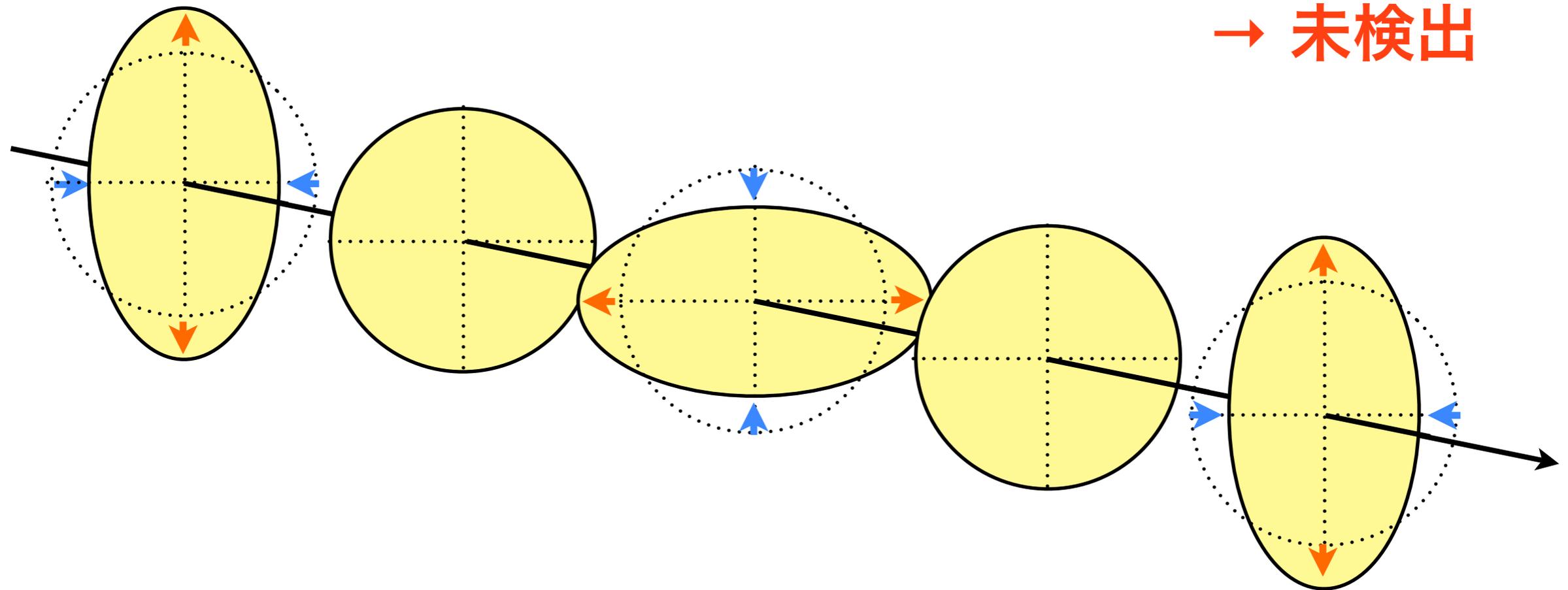
第43回天文・天体物理若手 夏の学校

@宮城蔵王ロイヤルホテル

2013/7/30

重力波とは

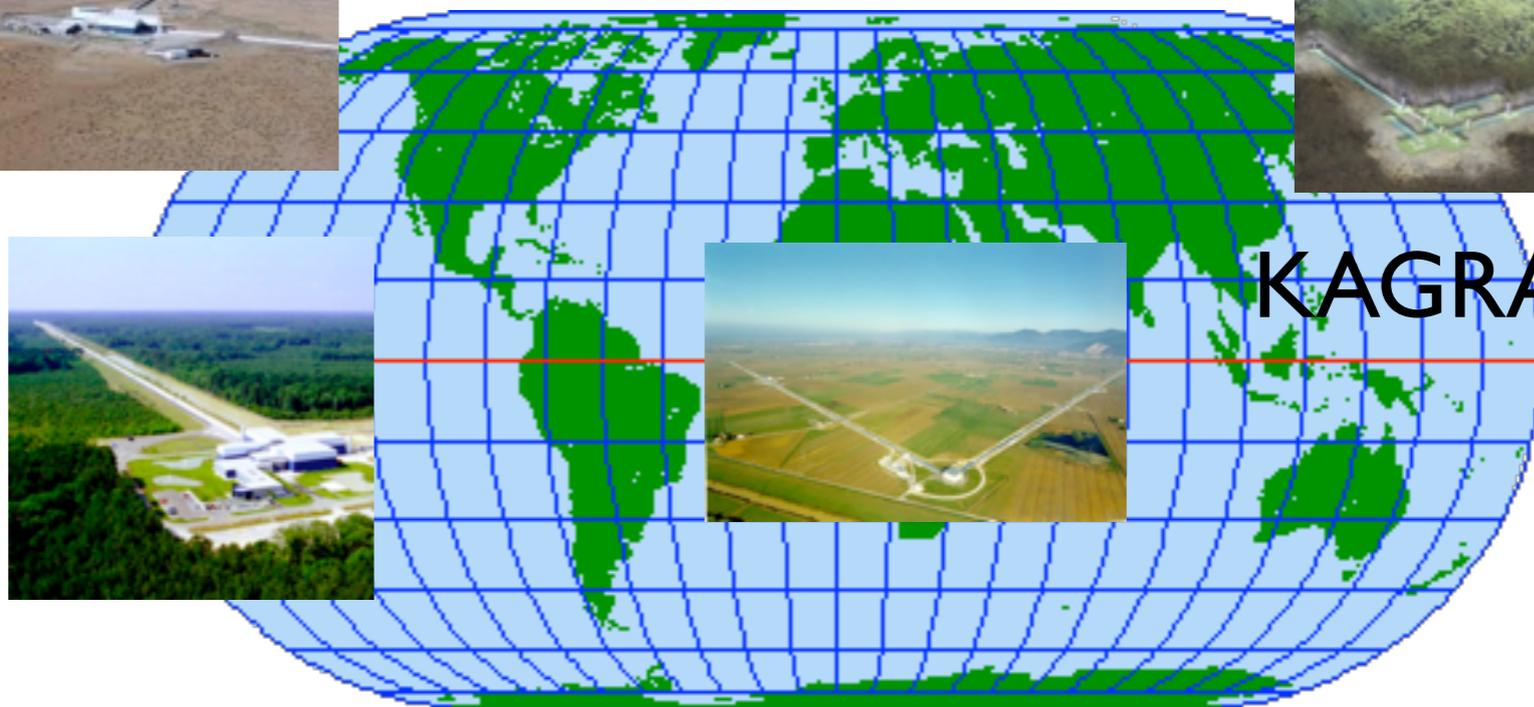
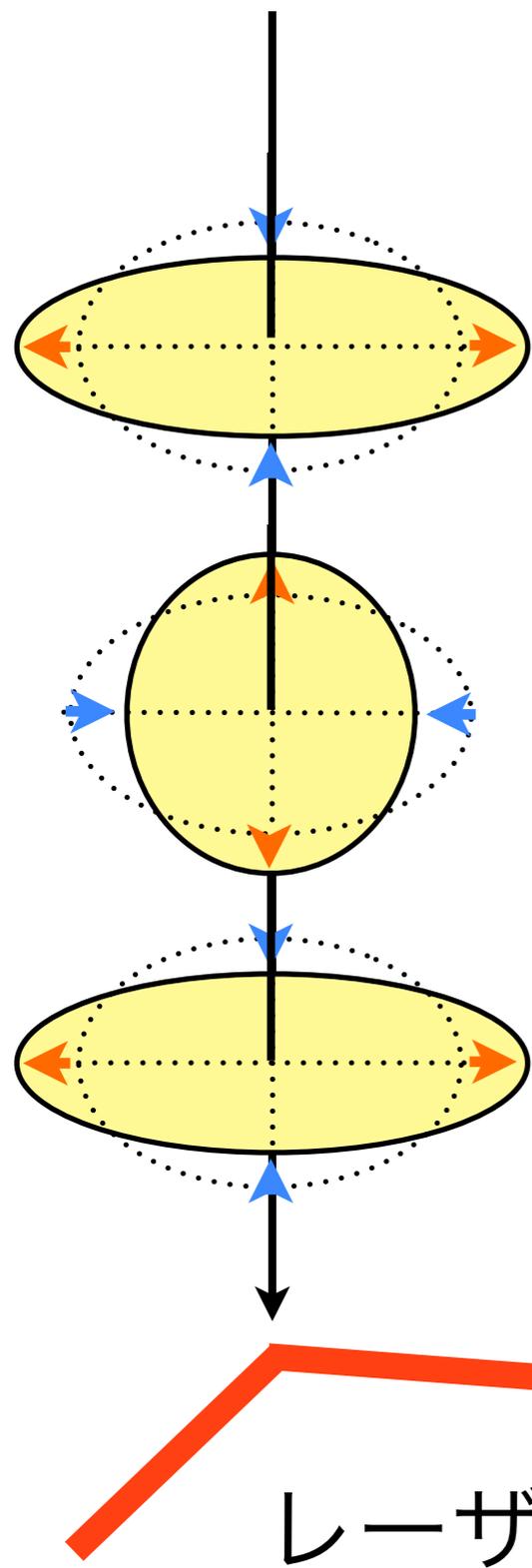
一般相対性理論から予言される時空の歪みの波



計量の摂動展開: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \underline{h_{\mu\nu}}$

→ 波動方程式 $\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$

重力波検出実験



KAGRA (日)

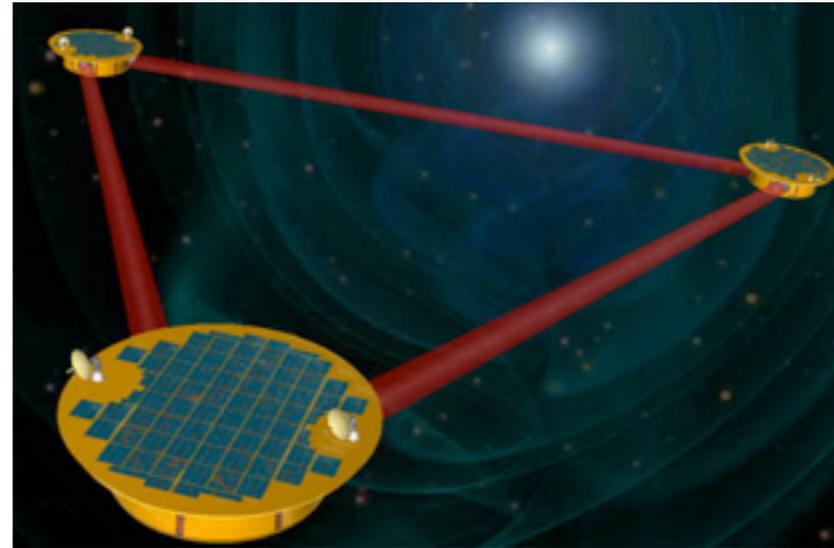
Advanced-LIGO (米)

Advanced-VIRGO (欧)

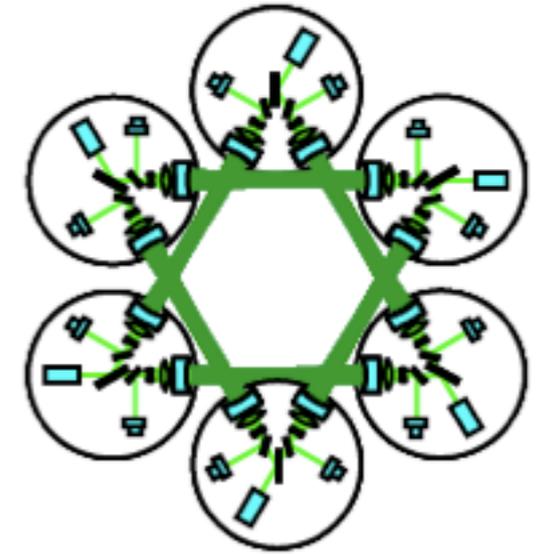
世界各地で次世代型の
地上重力波検出器が建設中 (2016-)

その他の重力波実験

- 衛星型レーザー干渉計
eLISA/NGO (2022?)
DECIGO (2027?)

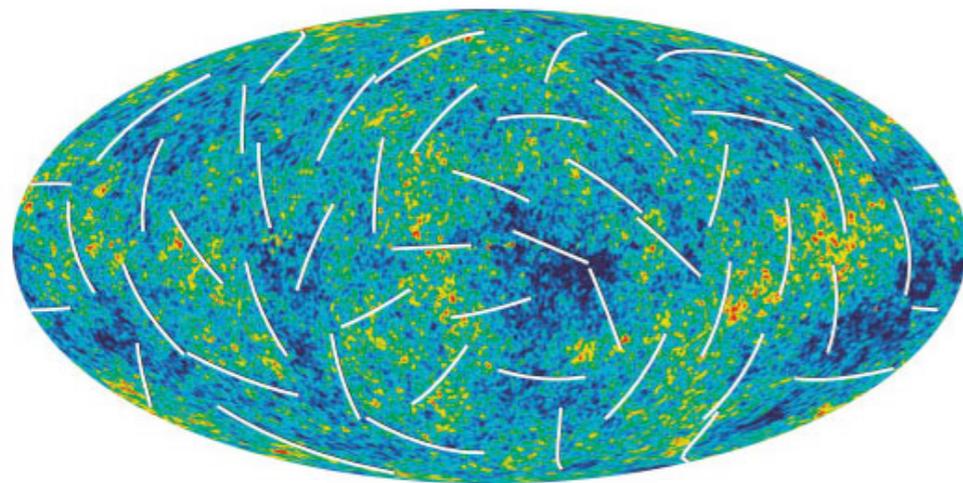


LISA image (<http://lisa.nasa.org/>)



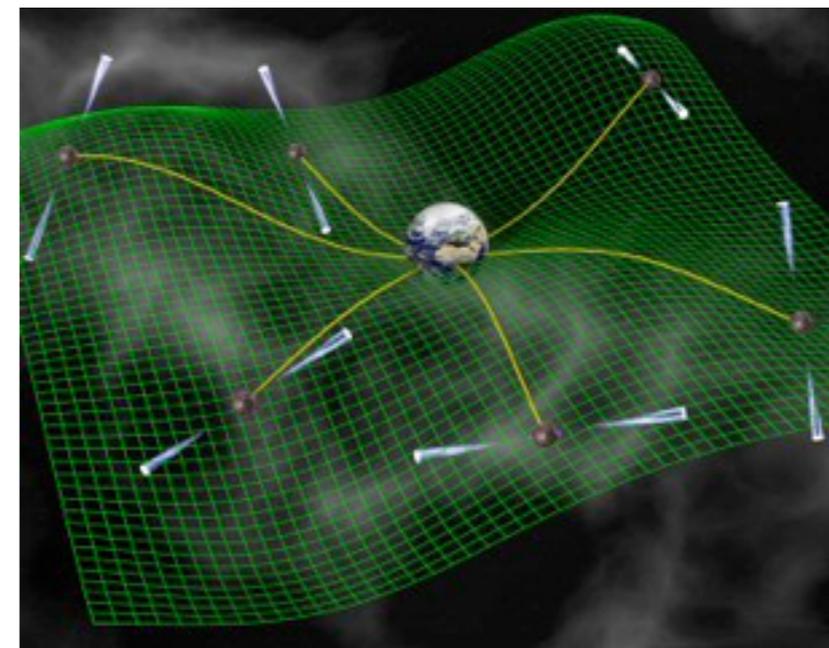
DECIGO image, S. Kawamura et al, J. Phys.: Conf. Ser. 122, 012006 (2006)

- CMB Bモード偏光



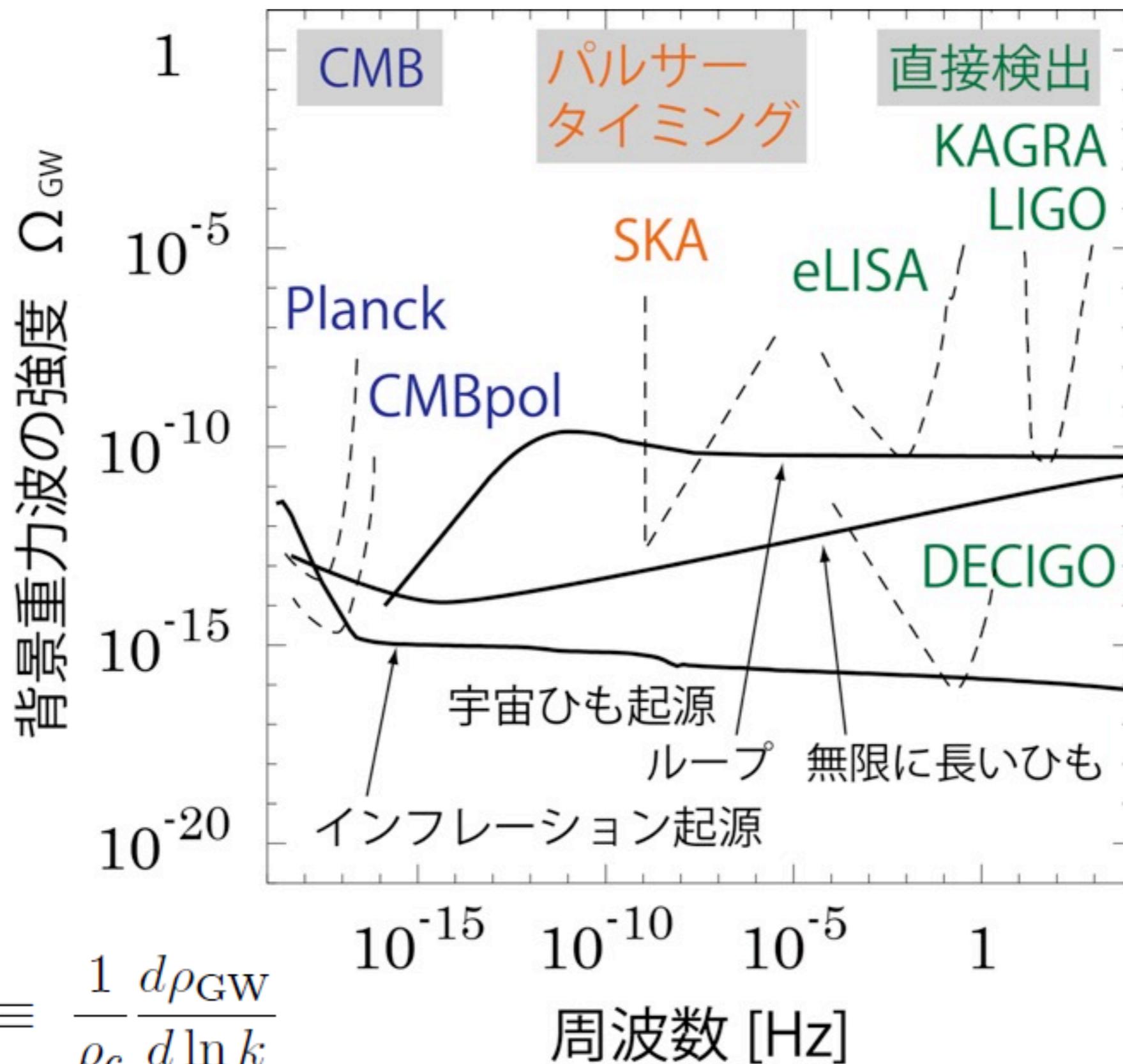
WMAP Three Year Polarized CMB Sky (<http://wmap.gsfc.nasa.gov/>)

- パルサータイミング



PTA image (NRAO)

将来実験の背景重力波に対する感度



$$\Omega_{GW} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{GW}}{d \ln k}$$

地上型重力波検出実験のターゲット

- 中性子連星
- 重力波パルサー
- 超新星爆発
- ブラックホールの準固有振動
- 宇宙ひも etc.

→ 主に天体起源

衛星型重力波検出実験（DECIGO）、CMB B-mode

→ 感度が良いので宇宙論的な起源を持つ重力波も検出が期待される

宇宙論的重力波の生成機構

BIG BANG

インフレーション

宇宙再加熱

宇宙の相転移

→ 背景重力波として
現在も残っている

Big Bang plus
 10^{-43} seconds

Big Bang plus
300,000 Years

CMBの時代

Light

現在

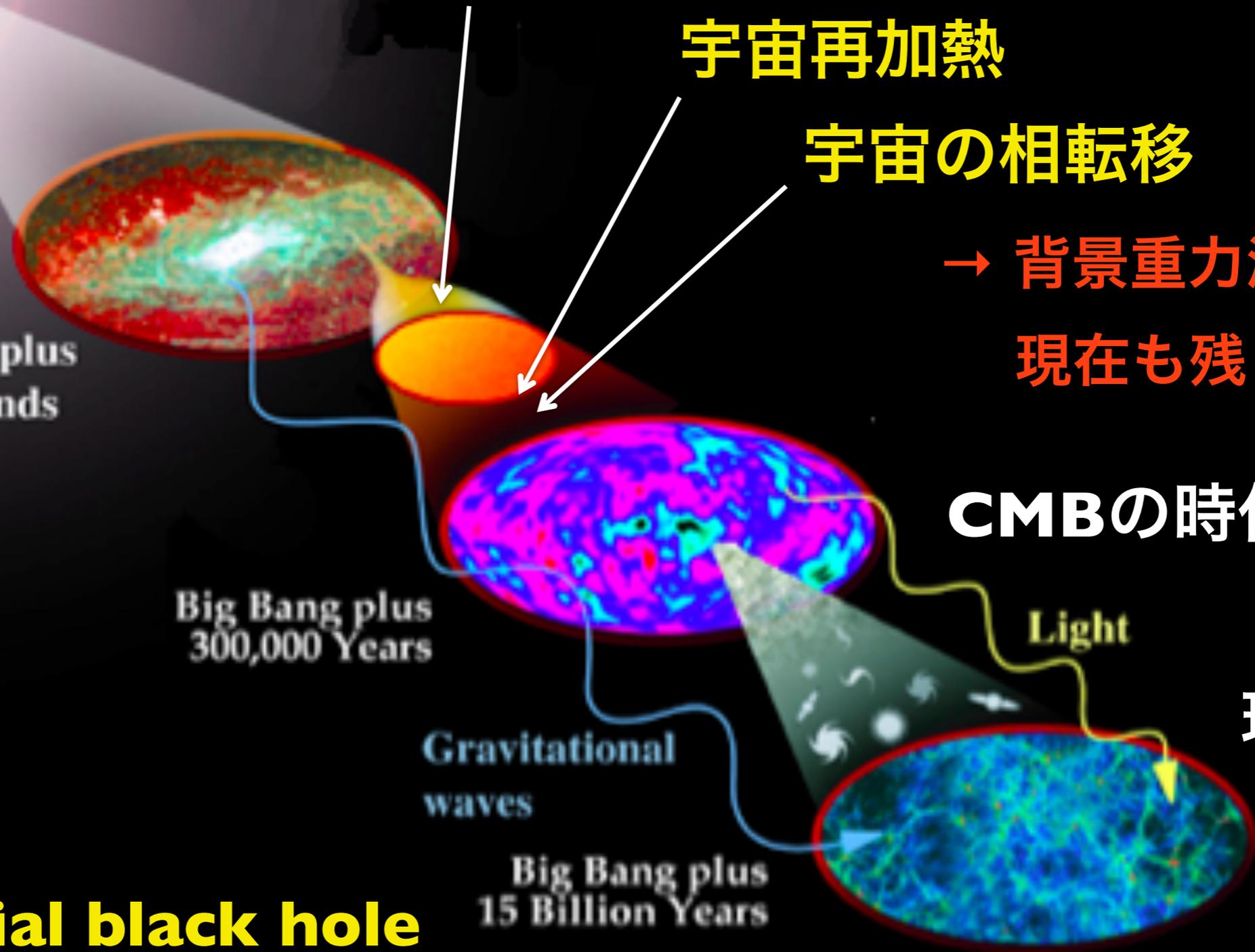
Gravitational
waves

Big Bang plus
15 Billion Years

宇宙磁場

primordial black hole

位相欠陥 (宇宙ひも, domain wall) etc...



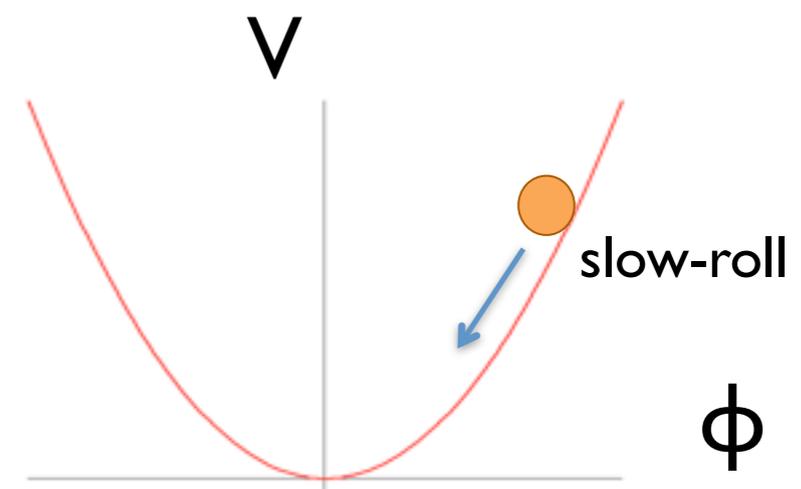
インフレーション起源の重力波

インフレーション：宇宙初期の宇宙空間の加速度的膨張

→ Big Bang宇宙論の問題点をうまく説明できる

一般的なインフレーションの描像

スカラー場 (ϕ) 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



スカラー場 ϕ の量子揺らぎを考慮することで
密度ゆらぎの起源も説明

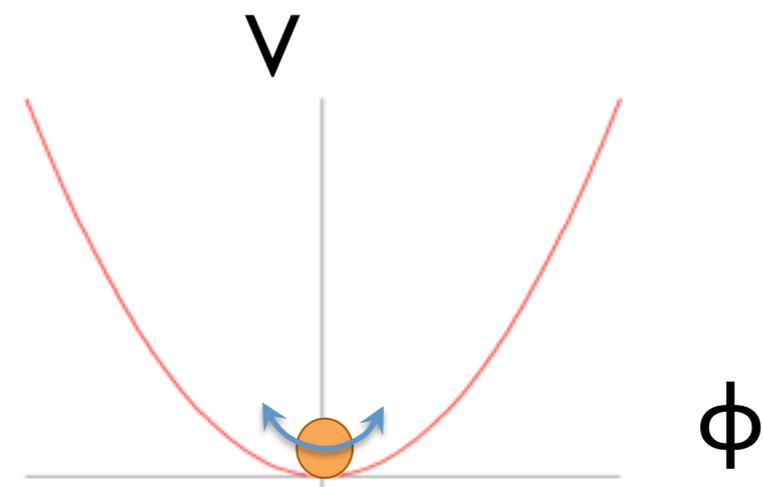
同様に時空の量子揺らぎから重力波が生成されることを予言

宇宙再加熱からの重力波

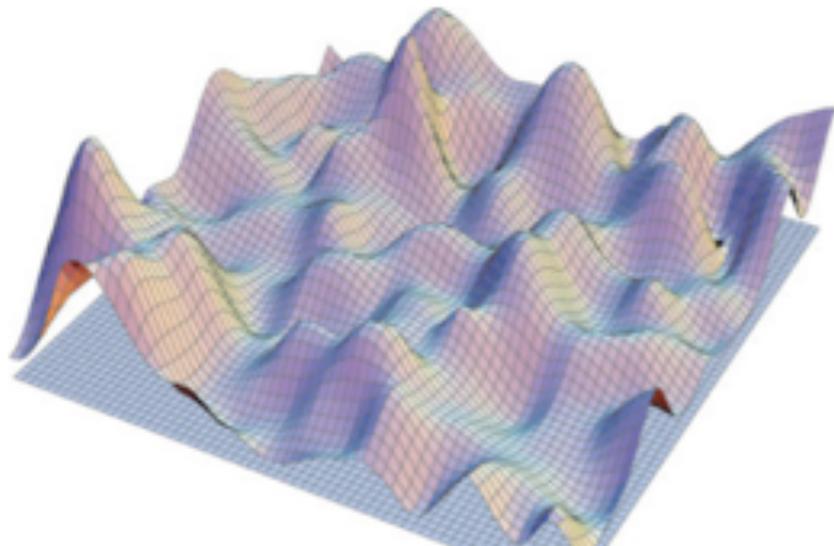
宇宙再加熱 (reheating) : インフレーションで冷えきった宇宙を温めて火の玉宇宙につなげる機構が必要。

一般的な再加熱の描像

スカラー場 (ϕ) がポテンシャルの底で振動しながら輻射へと崩壊



Preheating: スカラー場と崩壊先の場が共鳴振動を起こし粒子生成が爆発的に進む場合



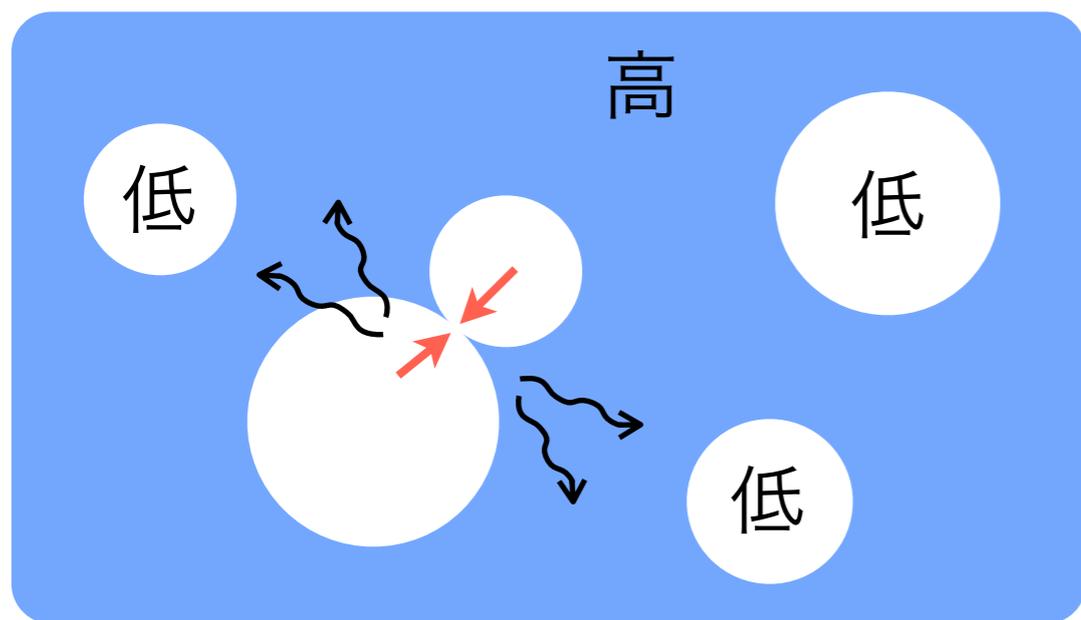
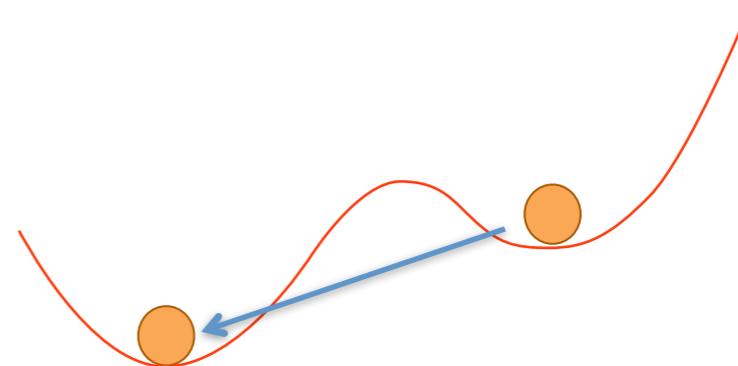
スカラー場の大きな揺らぎが重力波を生成

宇宙相転移からの重力波

宇宙の相転移：宇宙の温度が下がると共に真空が
高いエネルギー状態から低いエネルギー状態へ変化

一次相転移

エネルギーの高い真空から低い真空へ
不連続的に移る

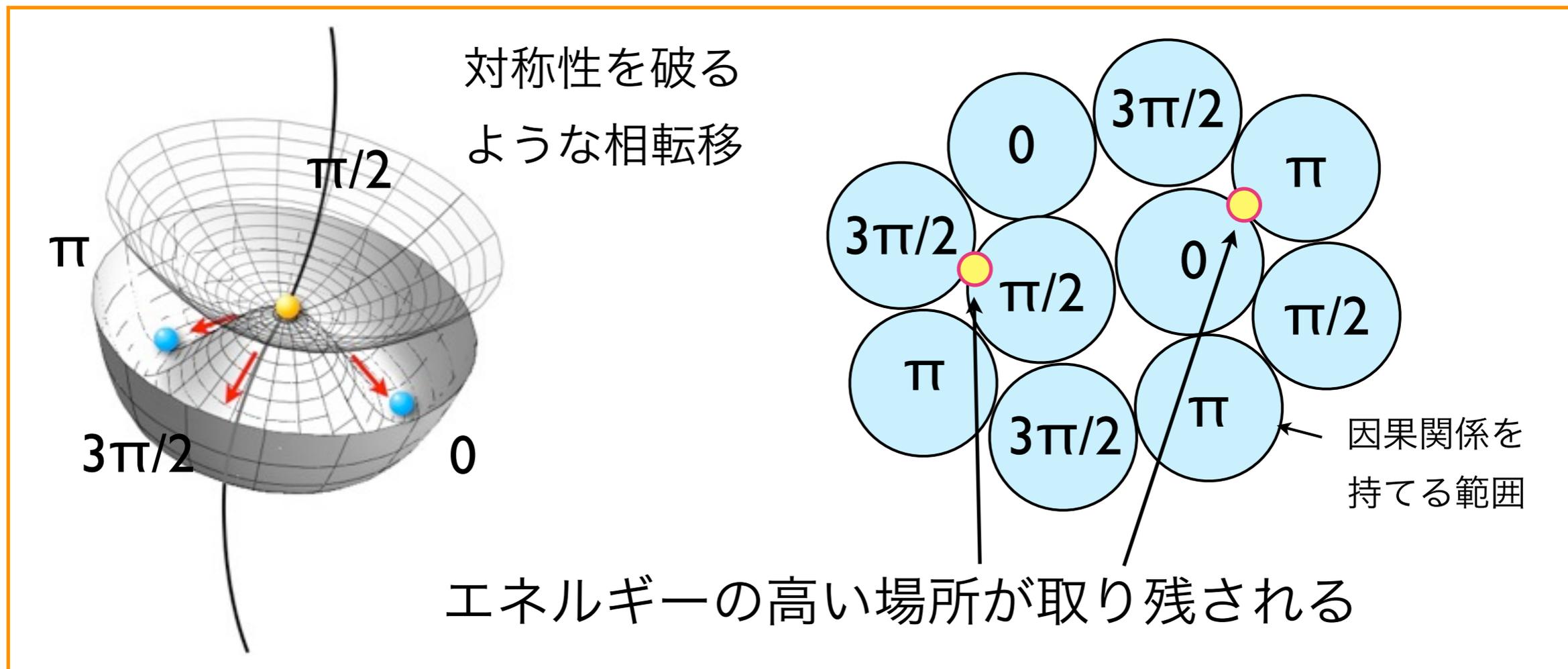


宇宙にエネルギーの低い場所がバブルとして点在。バブルは成長しながら隣同士で衝突して合体していく。

バブル同士の衝突が重力波を生成

宇宙ひもからの重力波

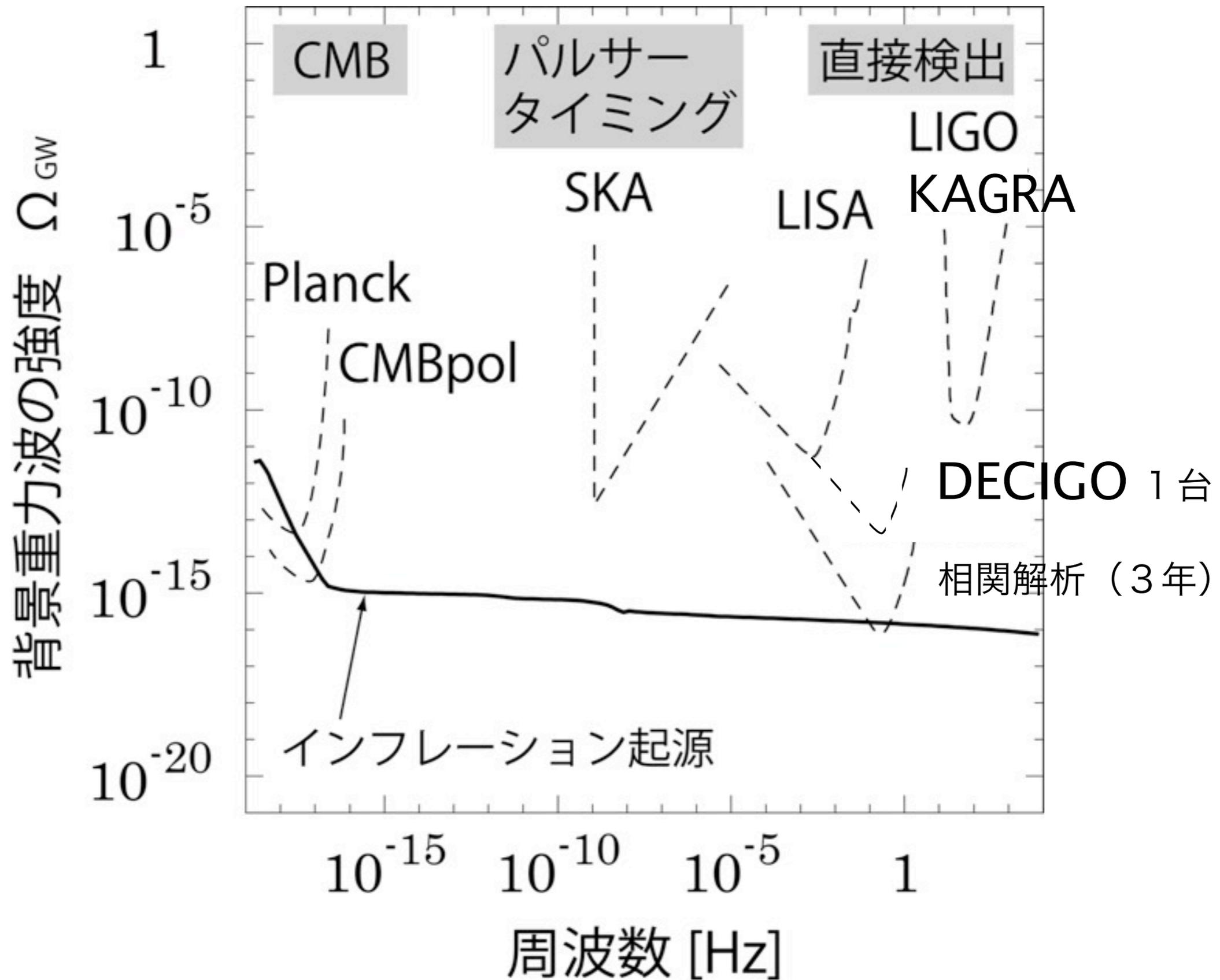
宇宙ひも：宇宙が相転移を起こす際に生じた一次元の位相欠陥



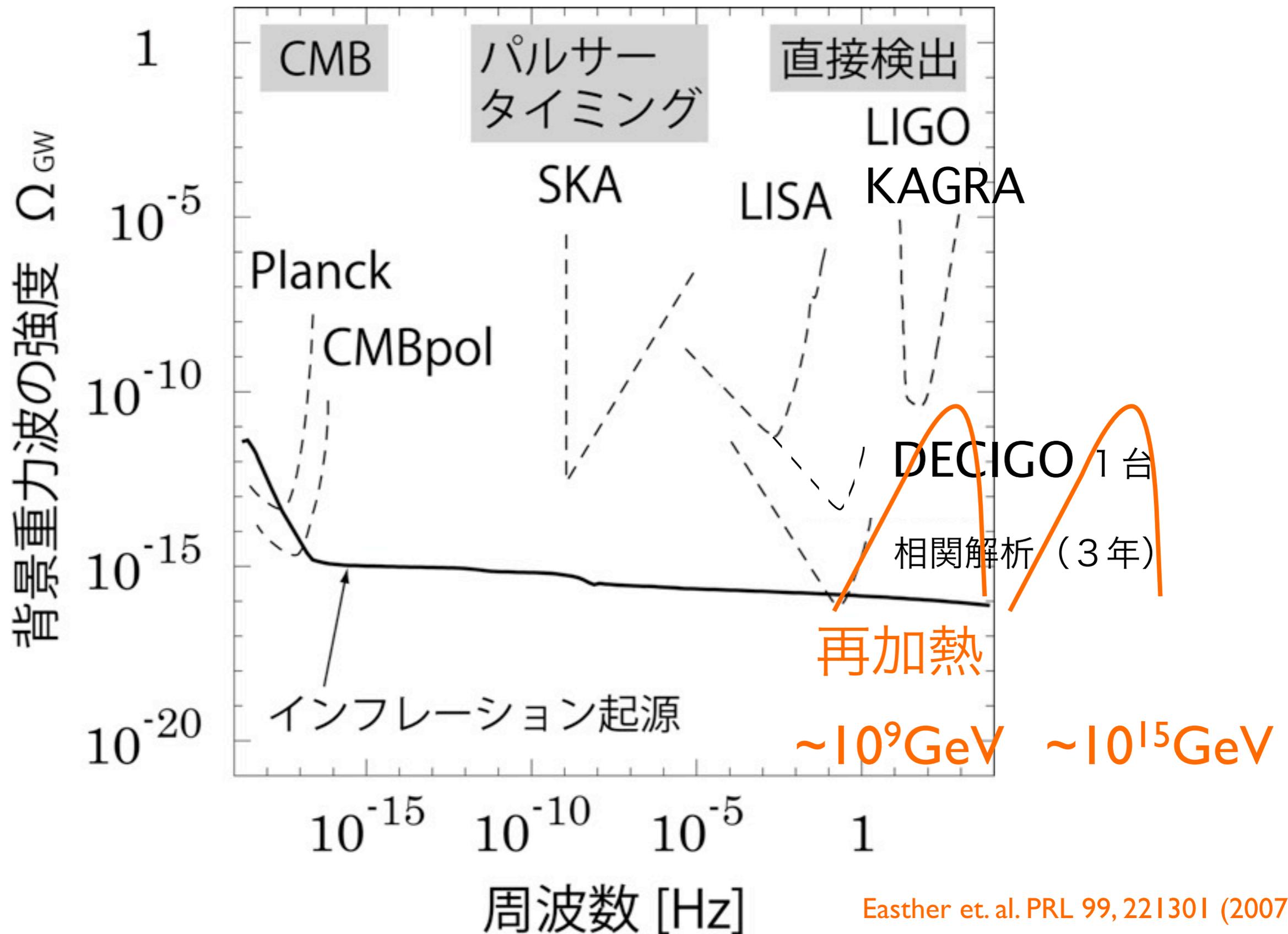
宇宙ひも：エネルギーが高く、重力的に重い

→ 宇宙ひもの運動が重力波を生成

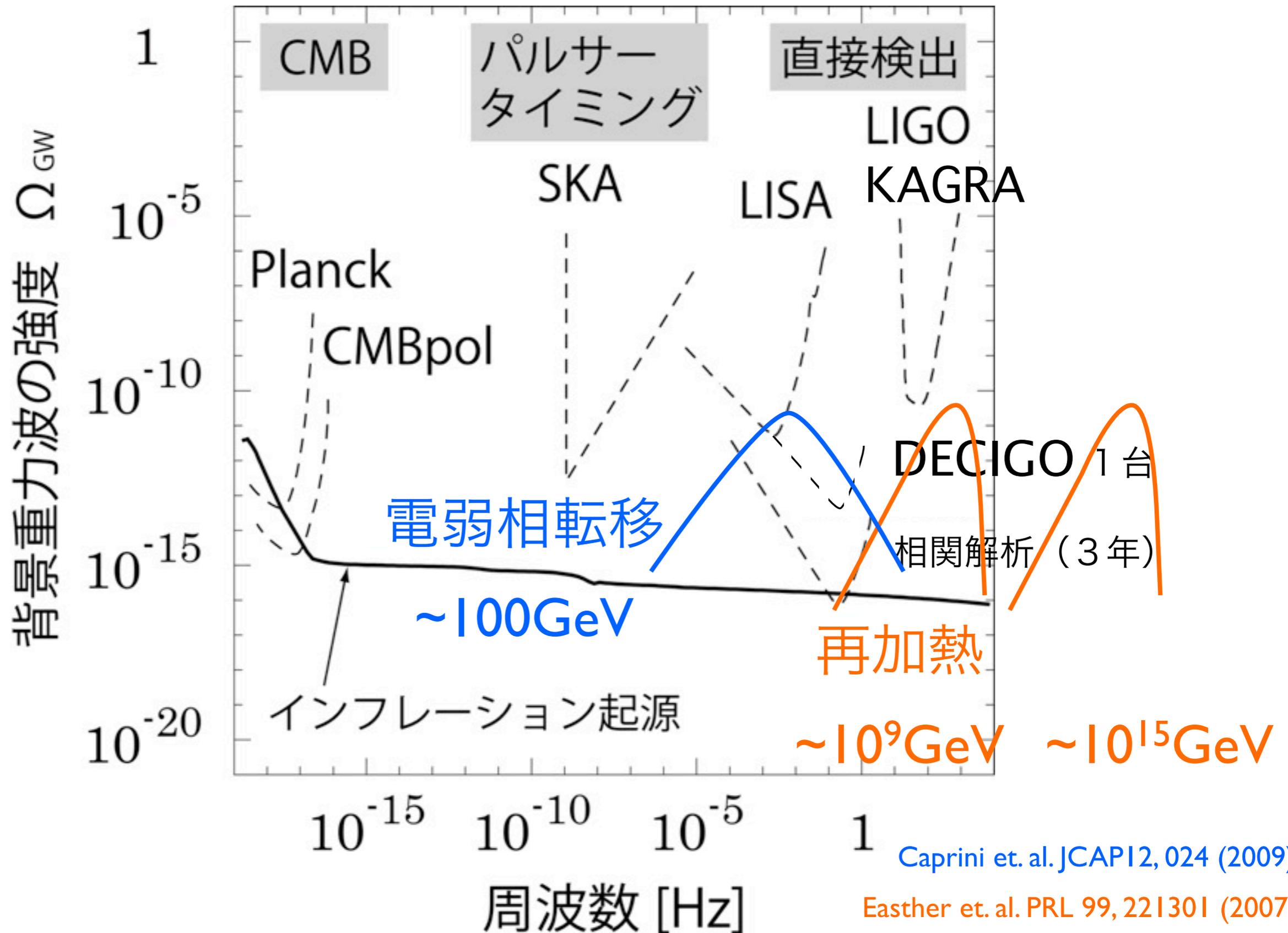
インフレーションはほぼスケール不変な重力波を生成



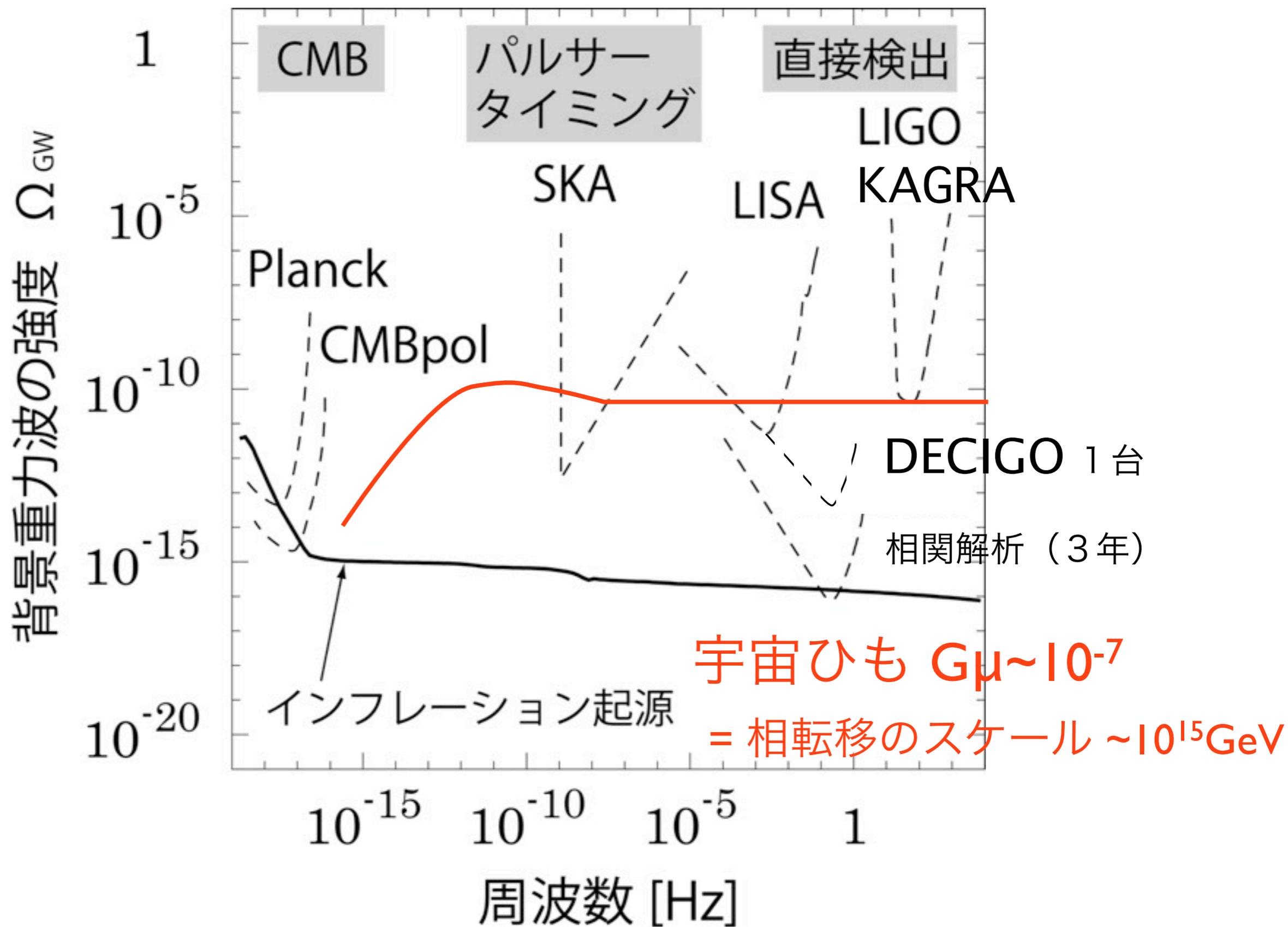
再加熱や相転移は当時の宇宙のサイズに相当する波長の重力波を生成
 昔のほうが宇宙のサイズが小さい→ 昔に生成された重力波ほど高周波



再加熱や相転移は当時の宇宙のサイズに相当する波長の重力波を生成
 昔のほうが宇宙のサイズが小さい→ 昔に生成された重力波ほど高周波



宇宙ひもは重力波を作り続ける → ほぼスケール不変な重力波



宇宙論的重力波を探る意義

BIG BANG

インフレーション

現段階でほとんど観測的情報がない

宇宙再加熱

宇宙の相転移

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

CMBの時代

Light

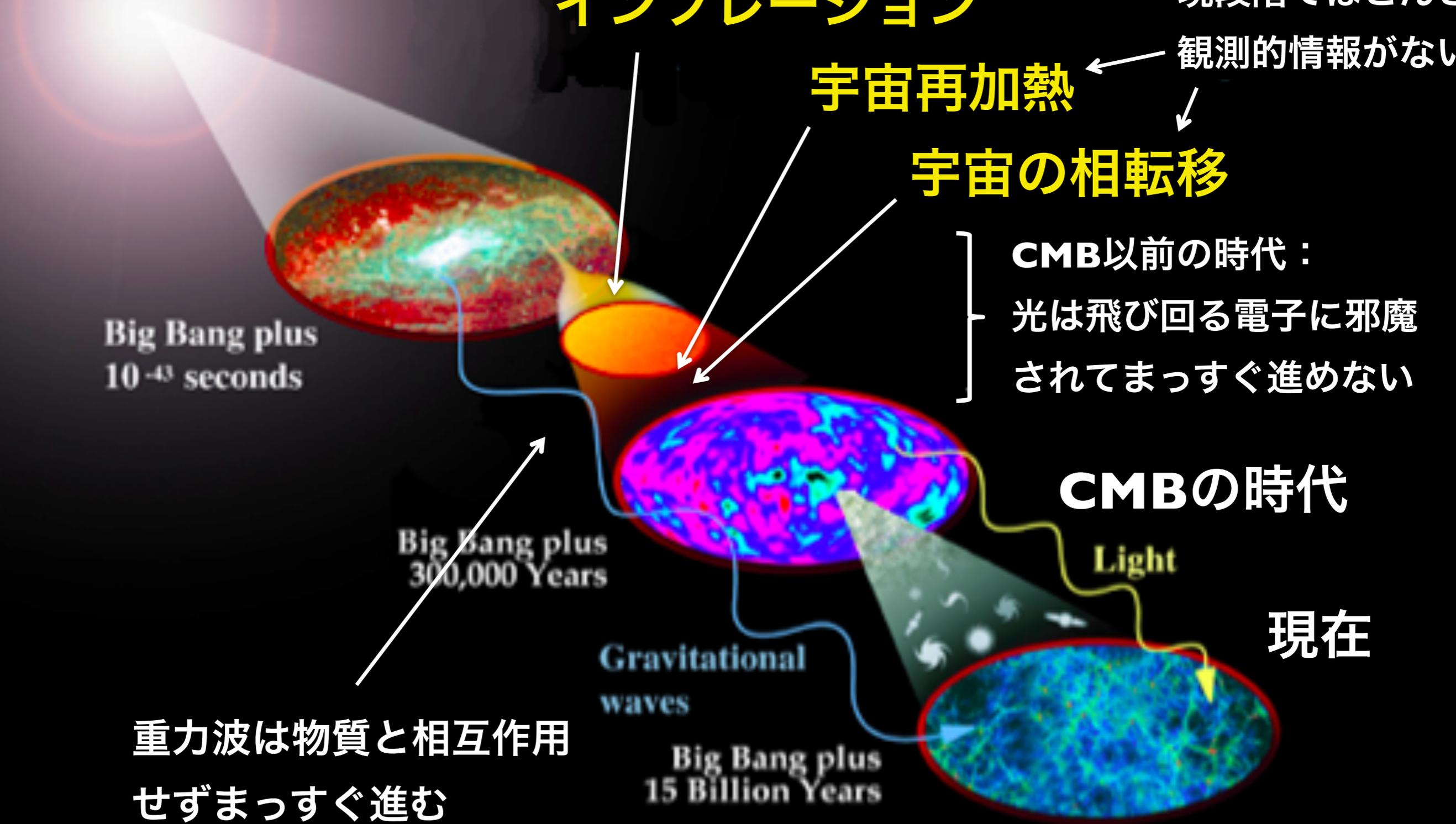
現在

Gravitational waves

Big Bang plus 15 Billion Years

重力波は物質と相互作用せずまっすぐ進む

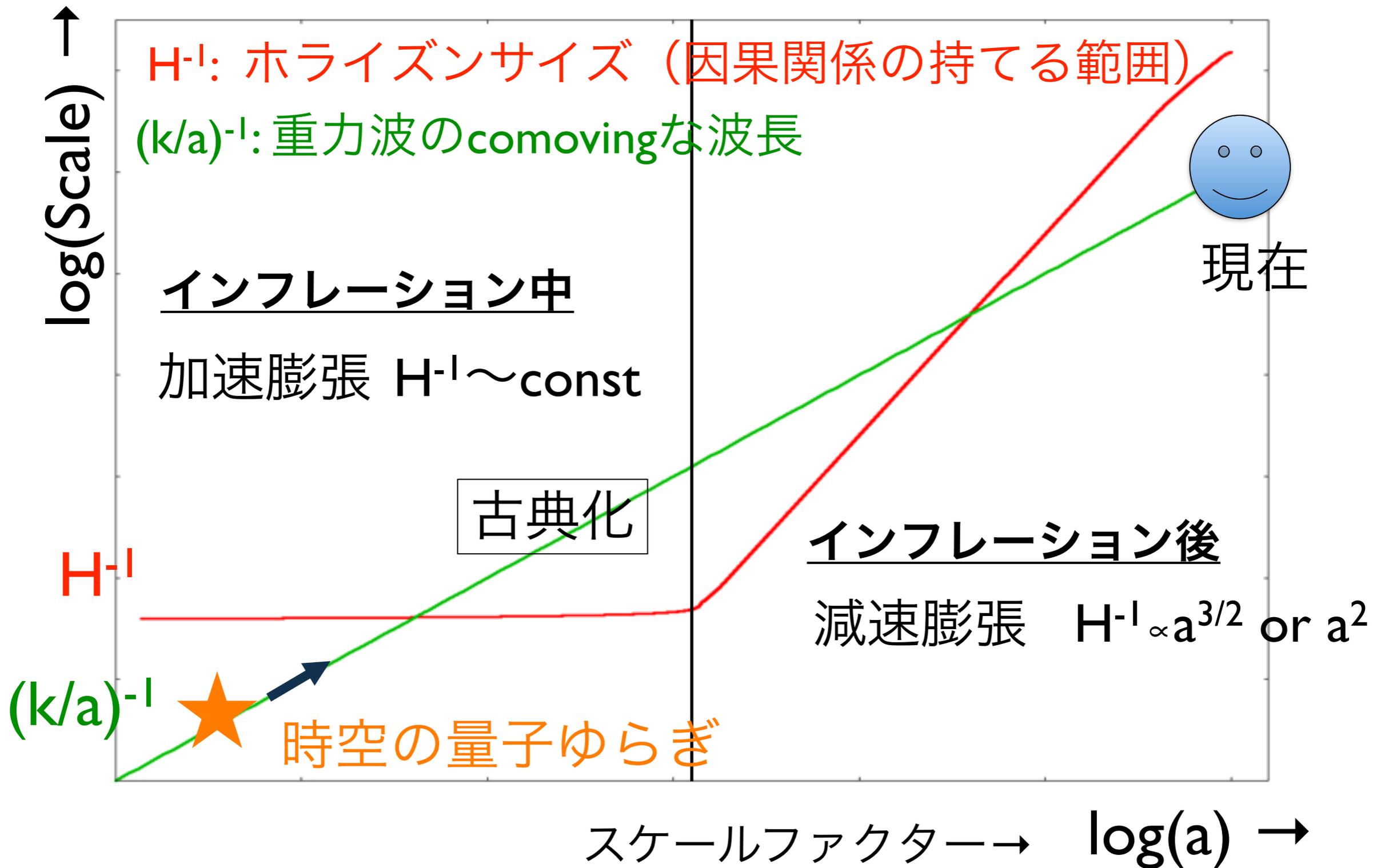
→ 重力波は初期宇宙を直接観測する唯一の手段！



インフレーション起源の重力波

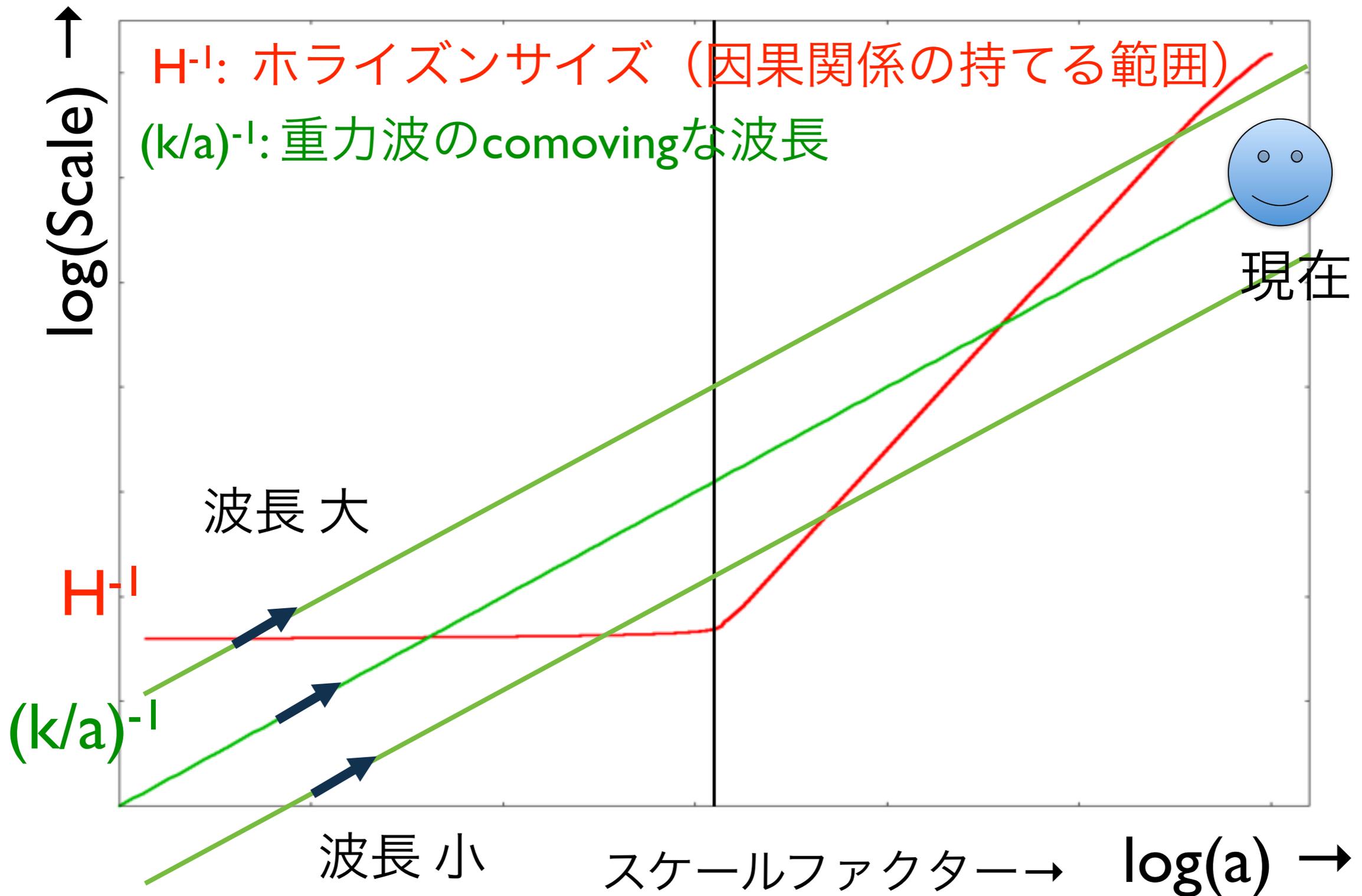
生成メカニズム

インフレーションにより引き伸ばされた時空の量子ゆらぎが古典化 → 重力波に

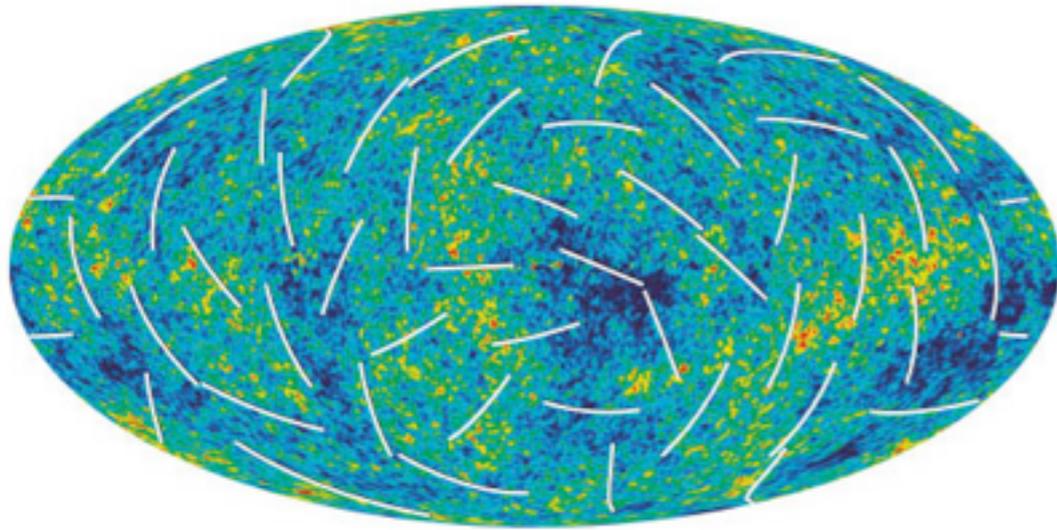


生成メカニズム

大小様々な波長の量子ゆらぎを引き伸ばす → スケール不変な重力波



インフレーション起源重力波の観測に向けた取り組み



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

CMB Bモード偏光

Planck (2009-)

LiteBIRD, CMBpol, COrE (2020?)

地上実験

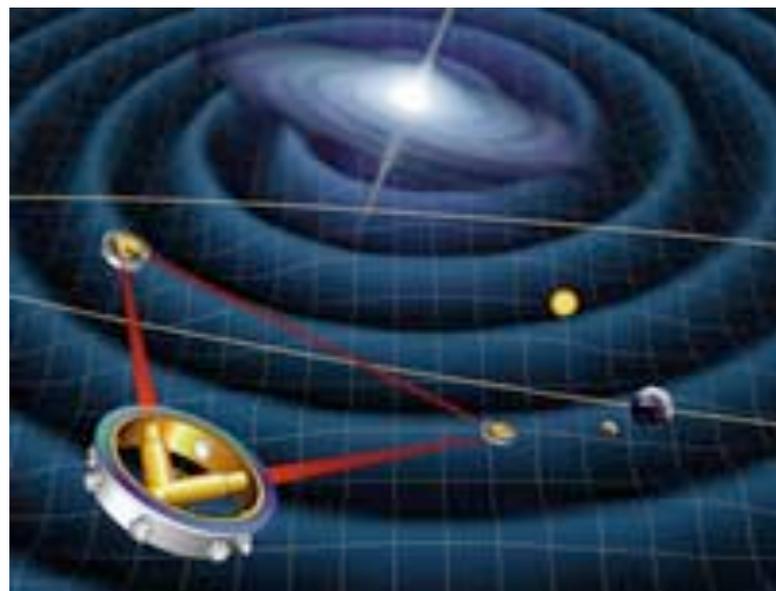
直接検出

地上実験 or eLISA/NGO

→感度が足りない

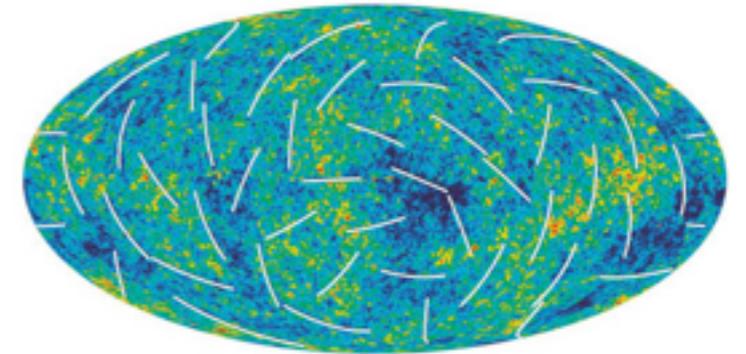
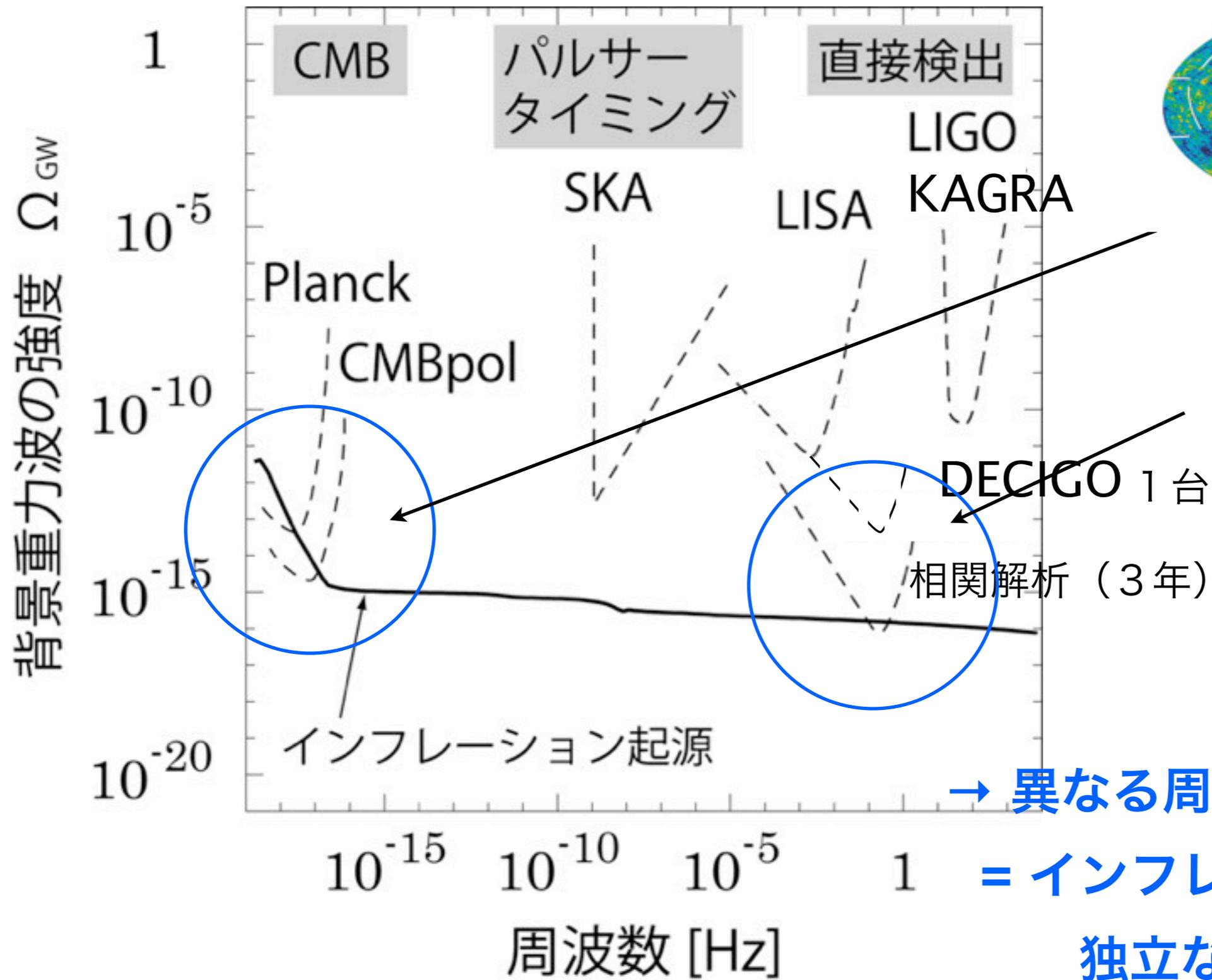
DECIGO (2027?)

→ **インフレーション起源重力波の直接観測!**

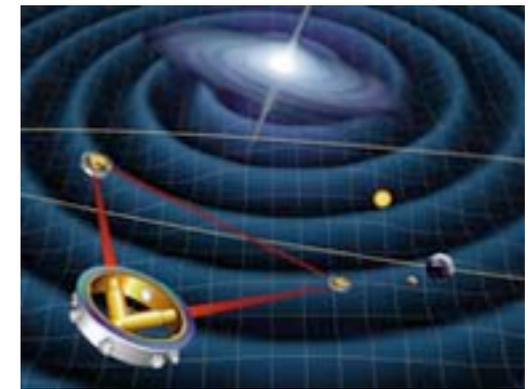


LISA image (<http://lisa.nasa.gov/>)

インフレーション起源重力波に対する感度



CMB B-mode偏光



直接検出

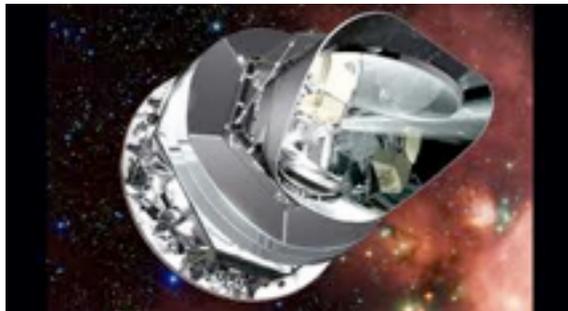
→ 異なる周波数の重力波を見る
= インフレーションに関して
独立な情報を提供！

インフレーションパラメータへの制限

CMBの場合

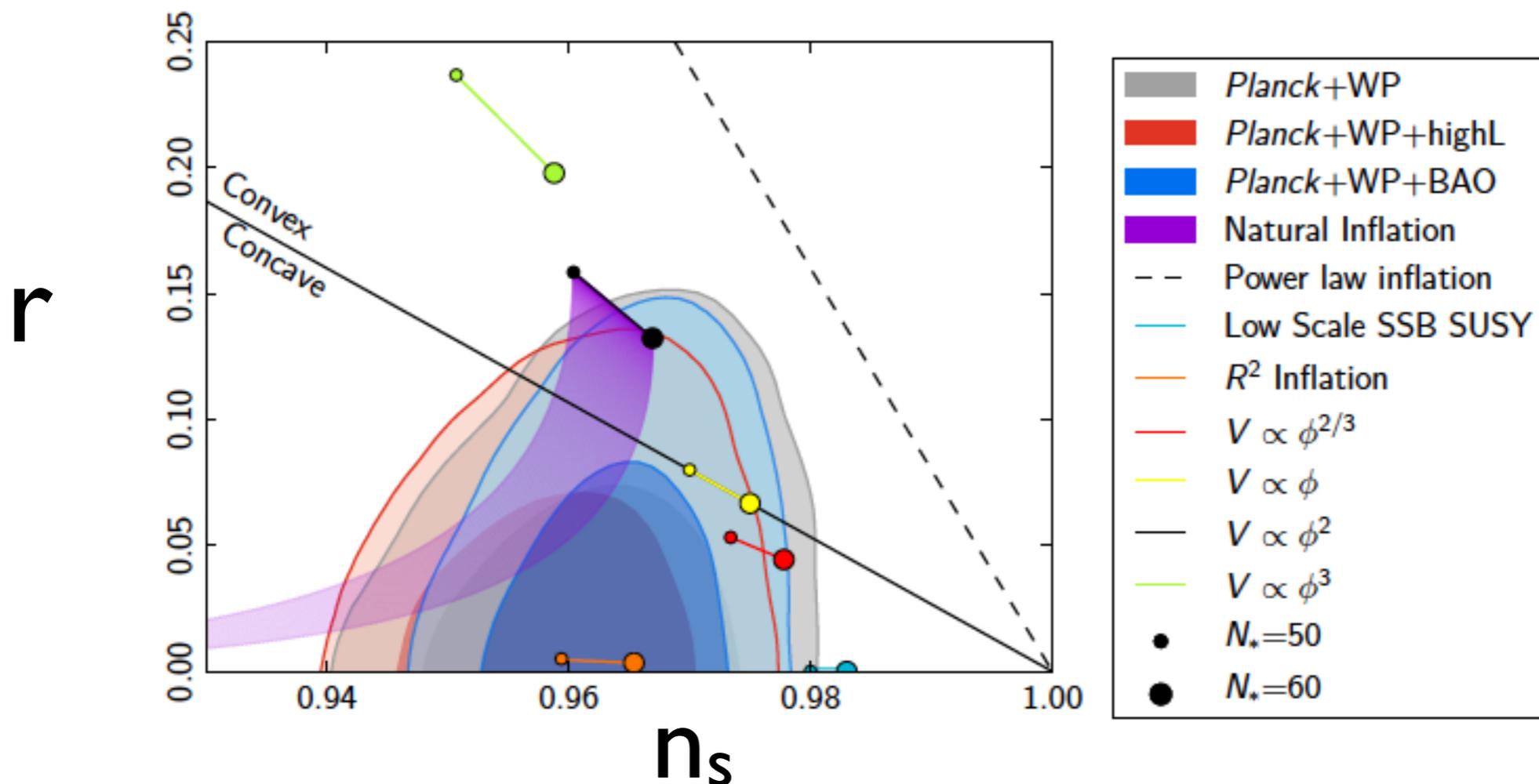
n_s : 密度揺らぎのスペクトルの傾き

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



Planck 温度揺らぎ観測からの制限

Planck collaboration, "Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation", arXiv:1303.5082



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)

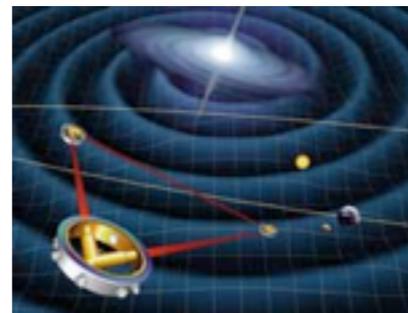
将来的には...

Planck B-mode



+

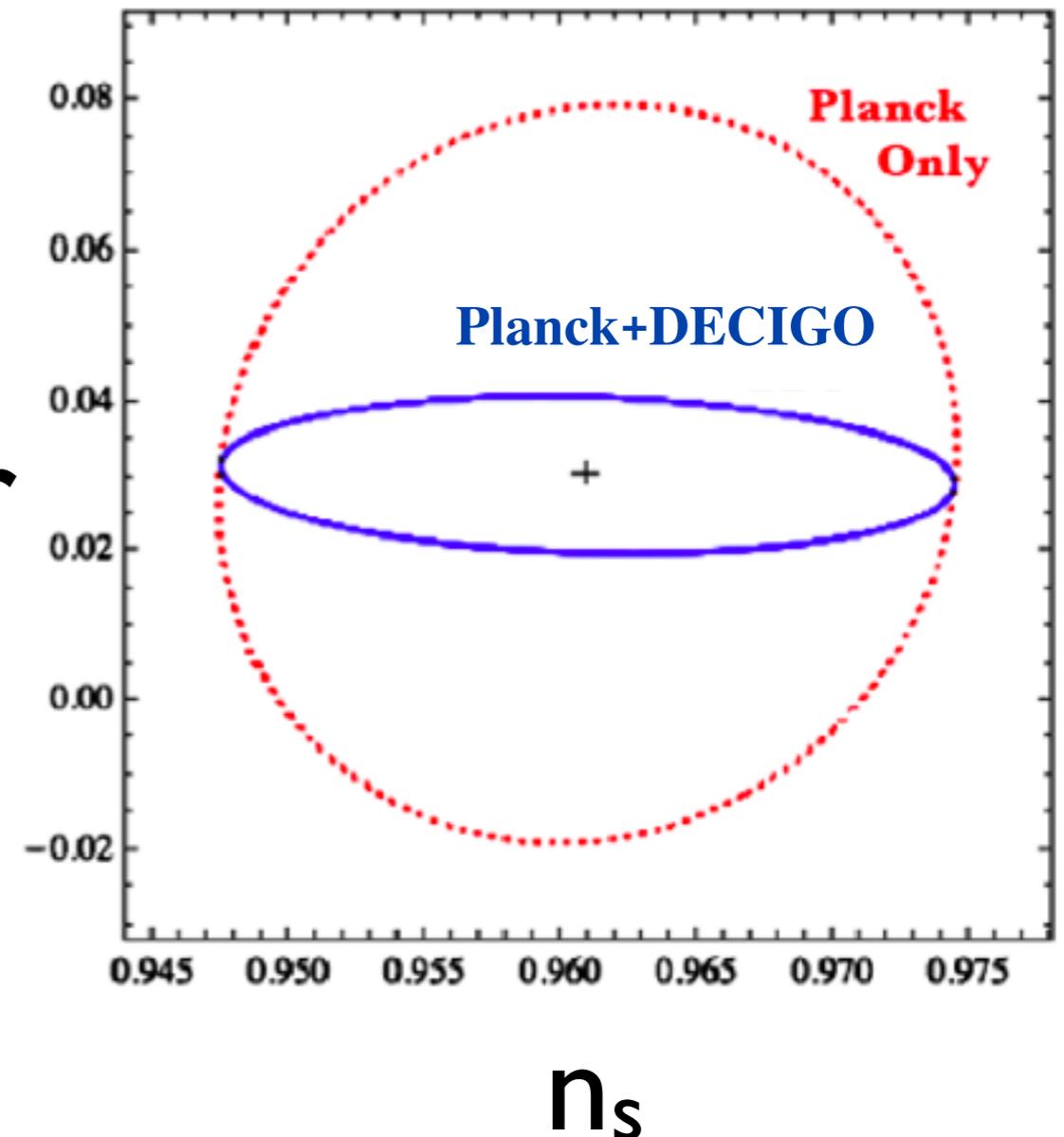
直接検出



r

$r=0.03$ を仮定

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



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

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

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

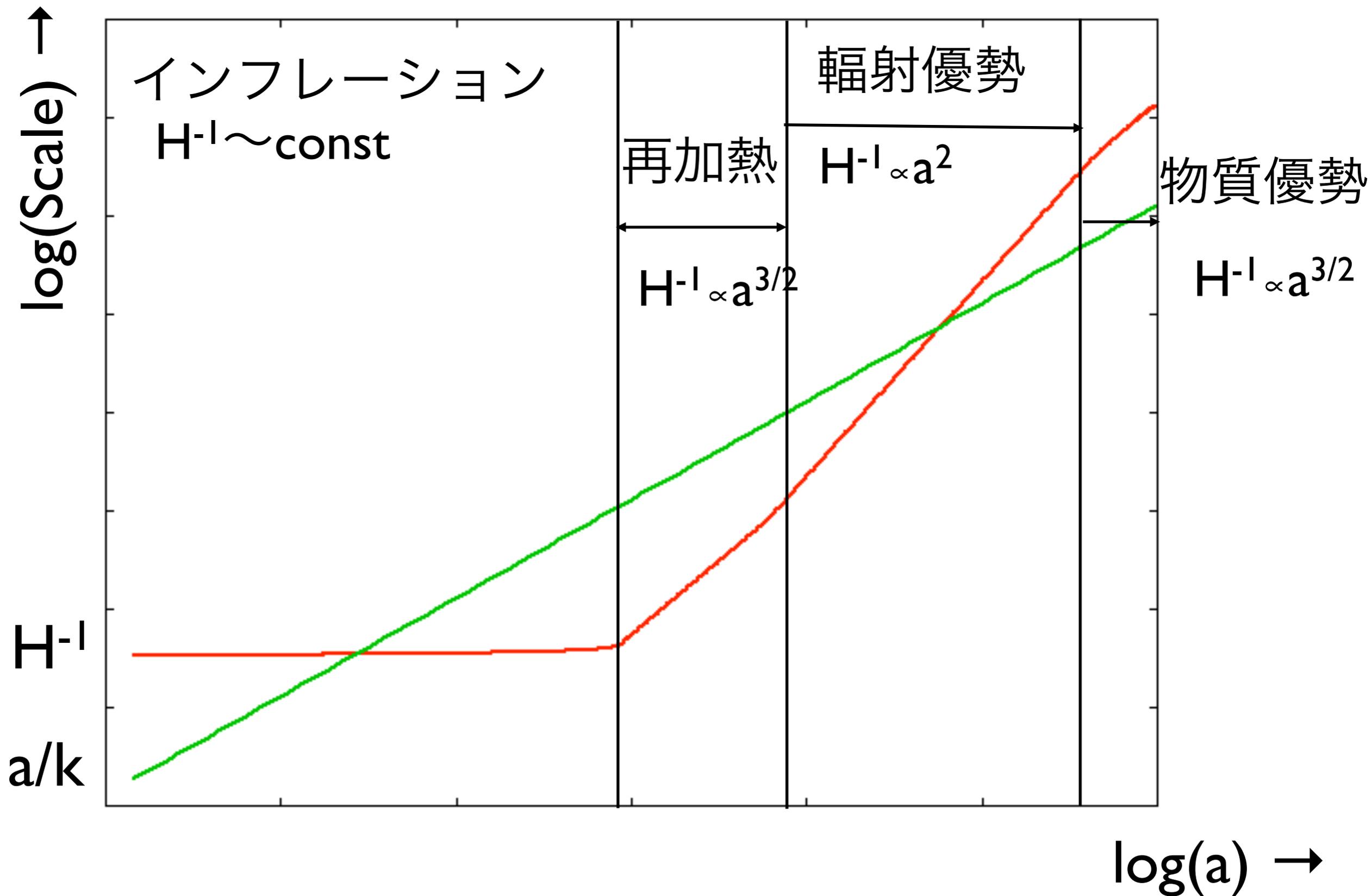
H: 宇宙の膨張率

k: 周波数 ($f=k/2\pi$)

→ 宇宙の膨張率 (H) と周波数の関係が重力波の運動を決める

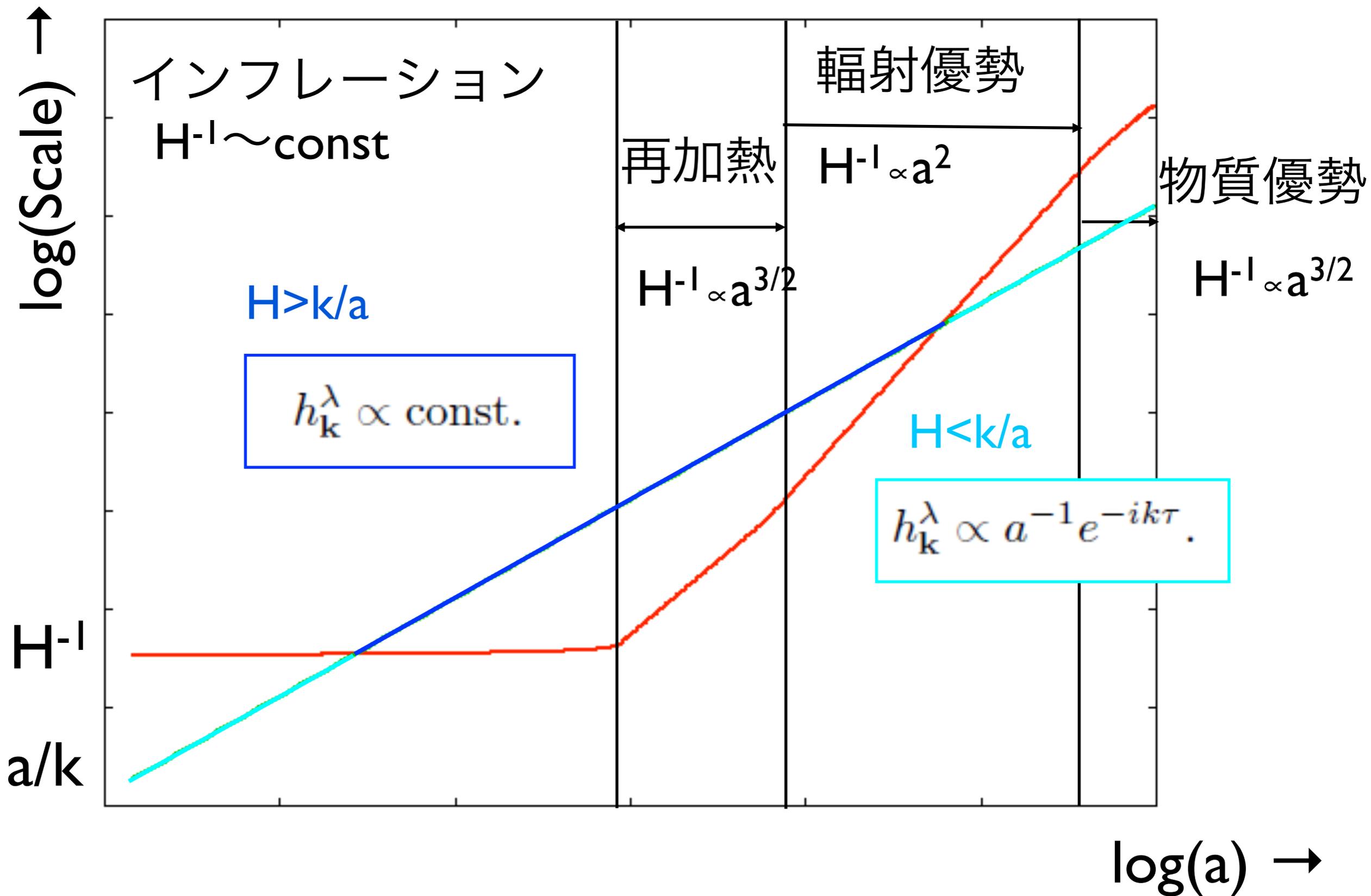
宇宙膨張の歴史

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



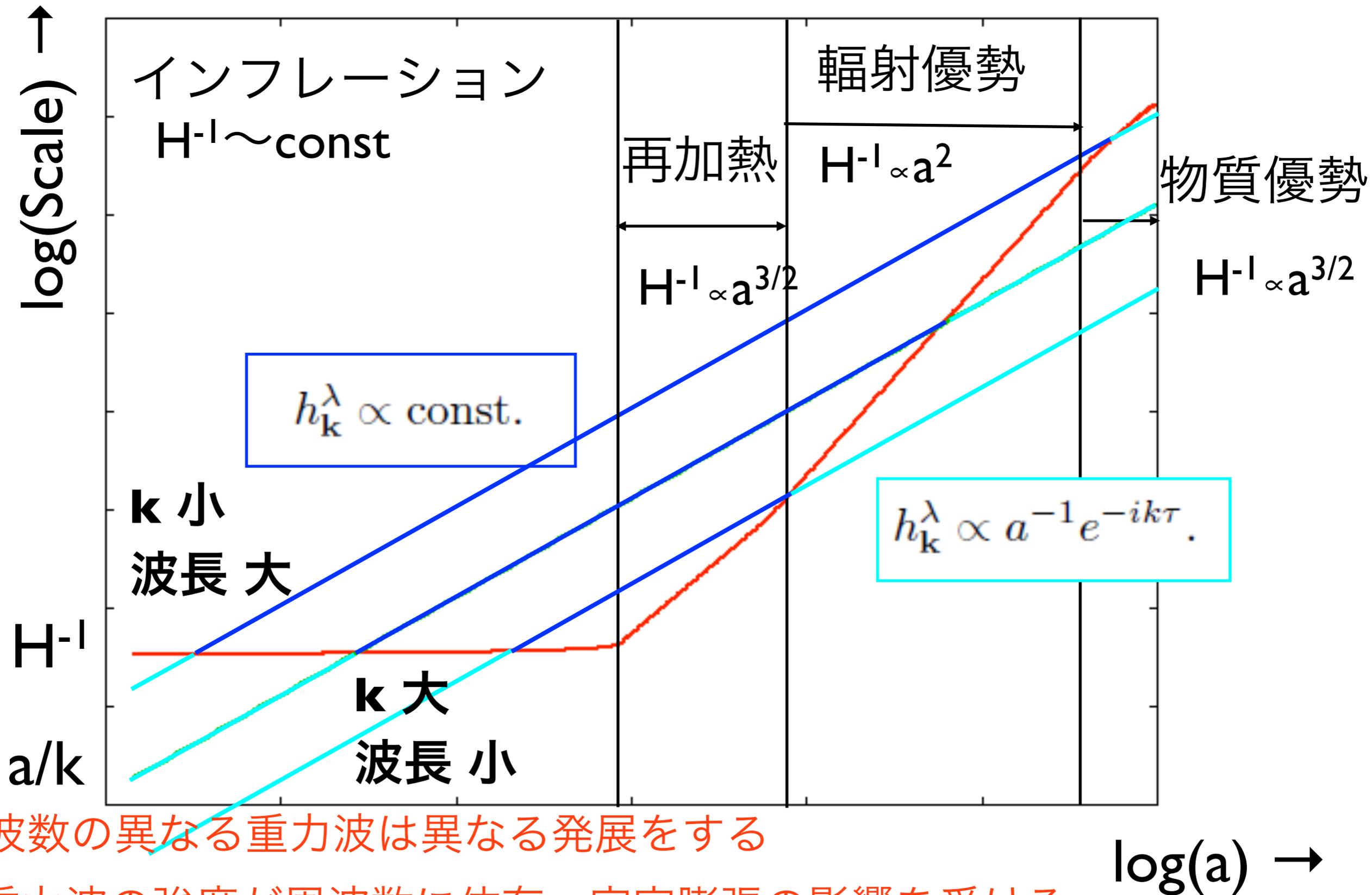
宇宙膨張の歴史

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



宇宙膨張の歴史

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

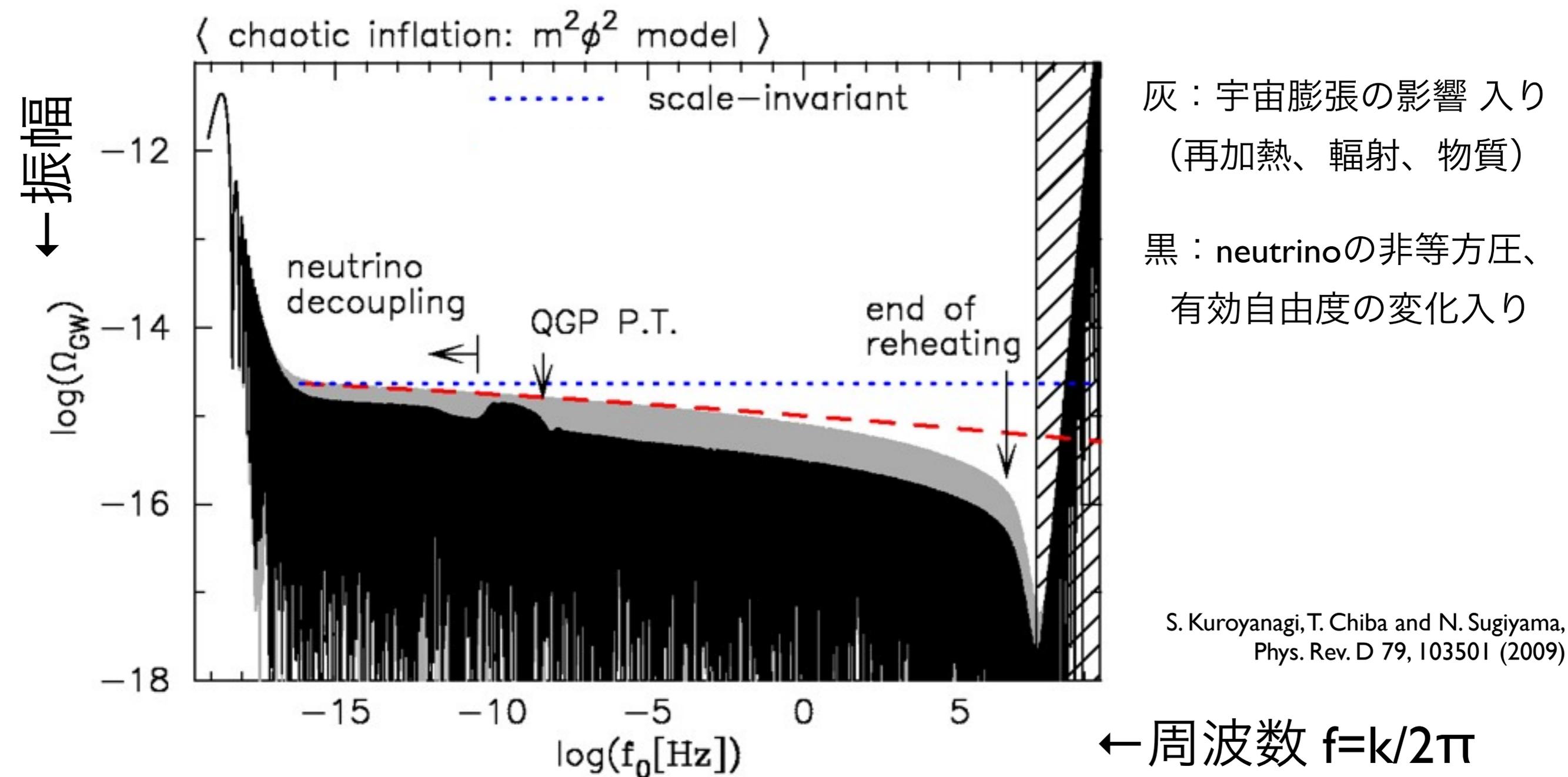


周波数の異なる重力波は異なる発展をする

= 重力波の強度が周波数に依存、宇宙膨張の影響を受ける

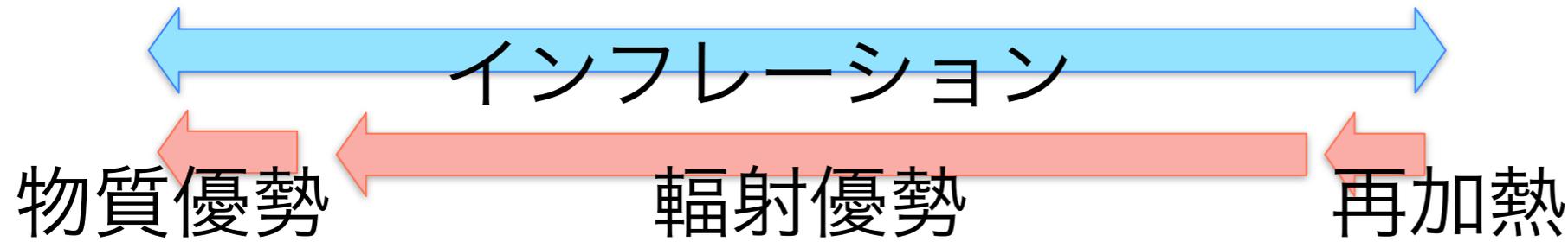
重力波のスペクトル

インフレーションはほぼスケール不変な重力波を作るが、
その後の宇宙膨張でスペクトルに特徴的な形が刻まれる

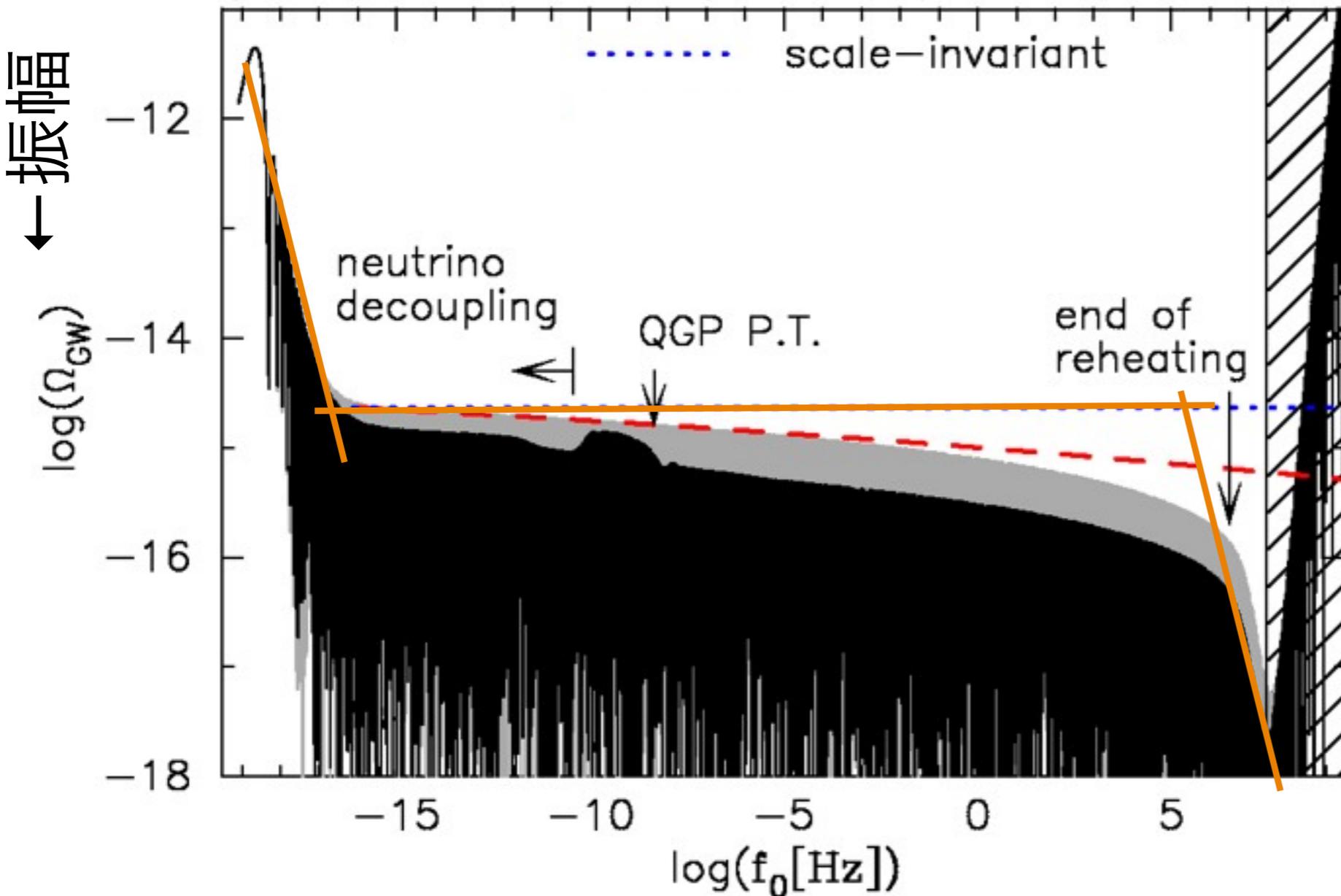


重力波のスペクトル

各モードがホライズンに入ったときの膨張則が影響



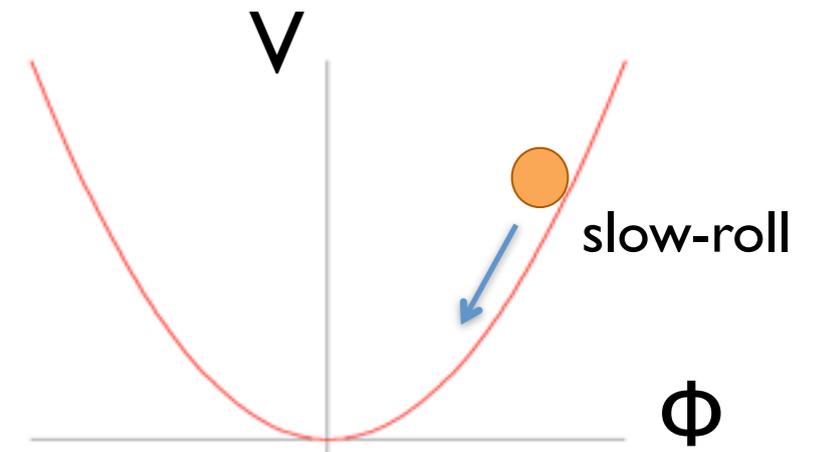
(chaotic inflation: $m^2\phi^2$ model)



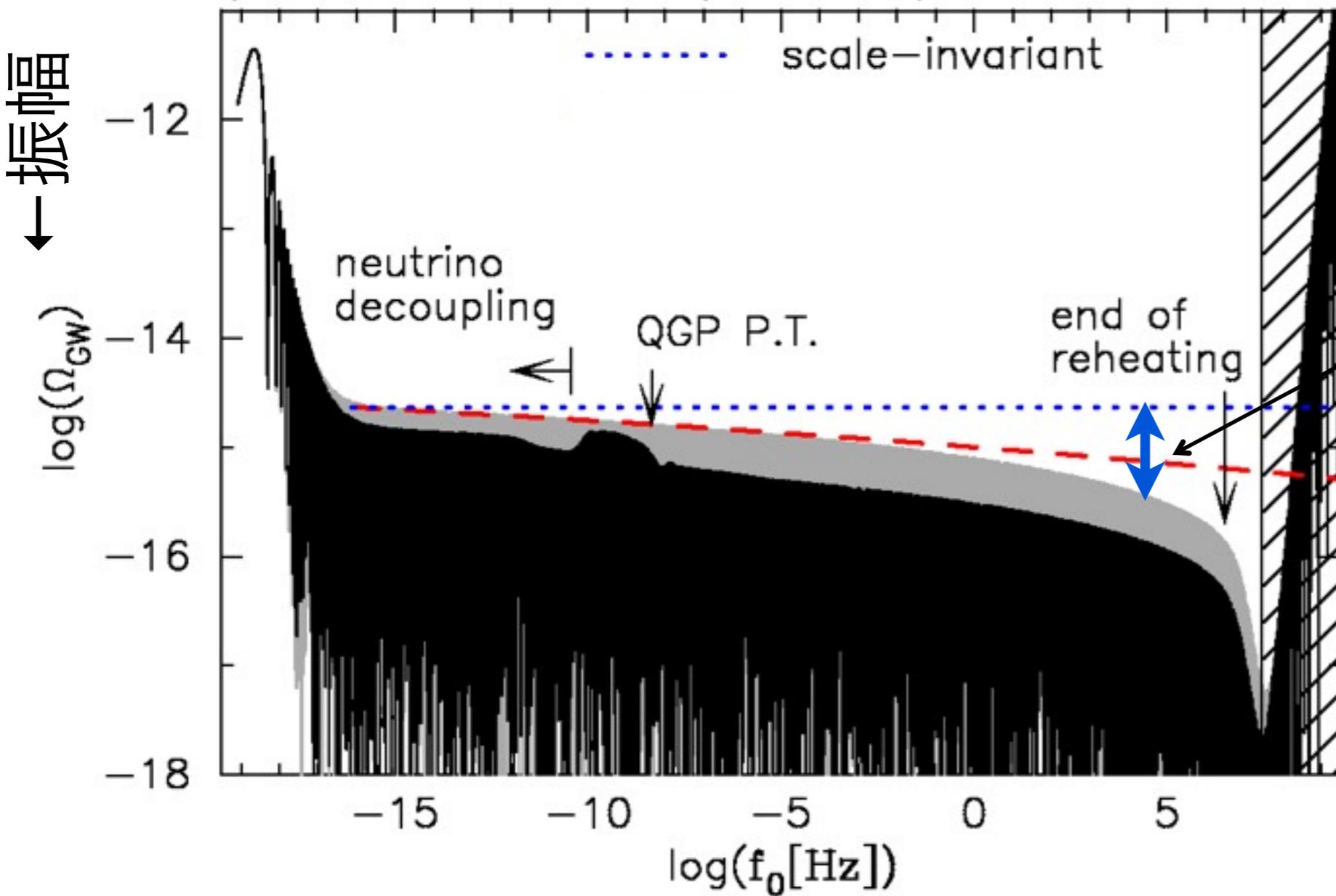
S. Kuroyanagi, T. Chiba and N. Sugiyama,
Phys. Rev. D 79, 103501 (2009)

重力波のスペクトル

スカラー場がポテンシャル中を転がるうちにポテンシャルの高さが変わる
 → 生成される重力波のスペクトルに傾き



< chaotic inflation: $m^2\phi^2$ model >



$$H_{\text{inf}}^2 \sim \frac{V}{3M_{\text{pl}}^2}$$

スペクトルの傾き

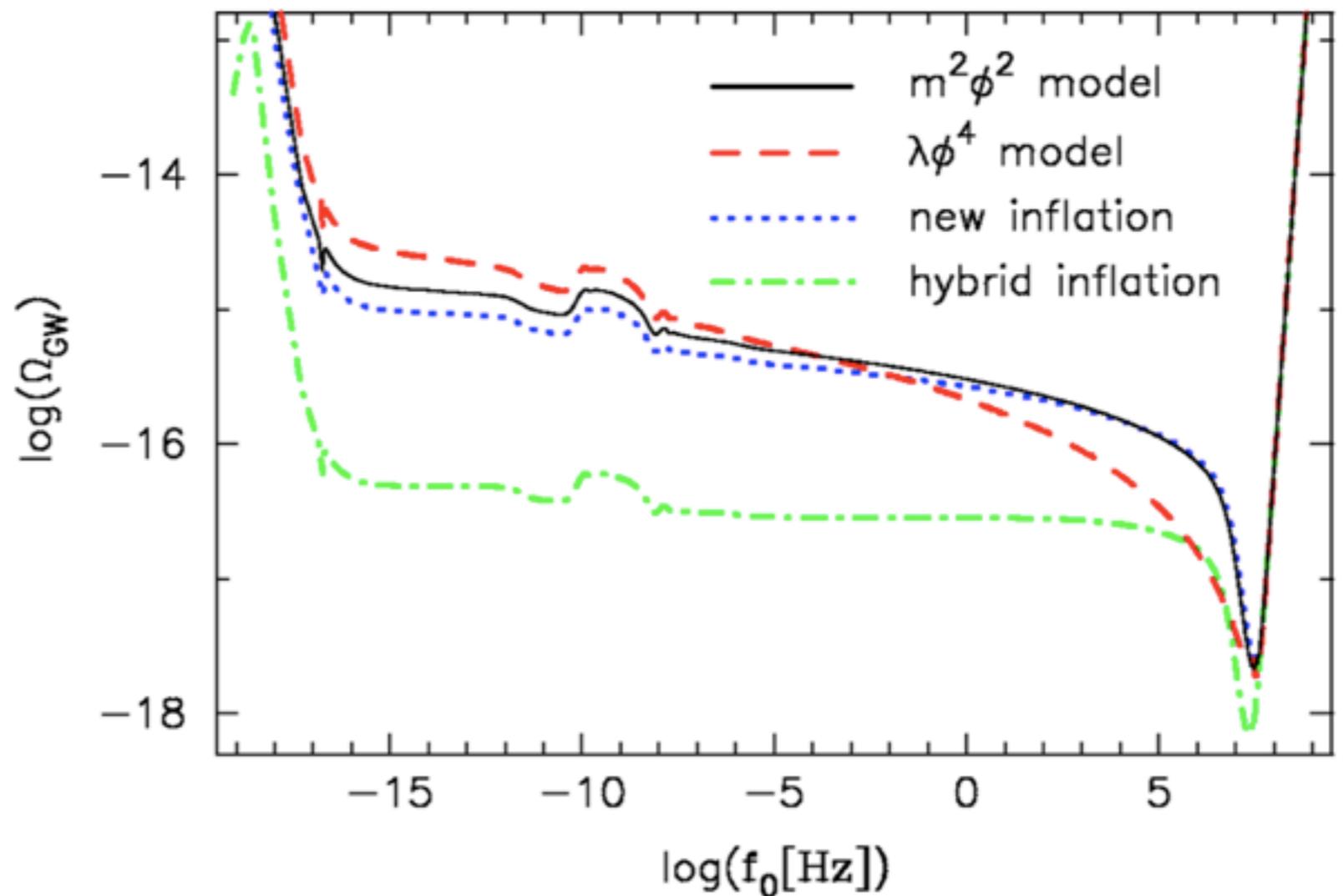
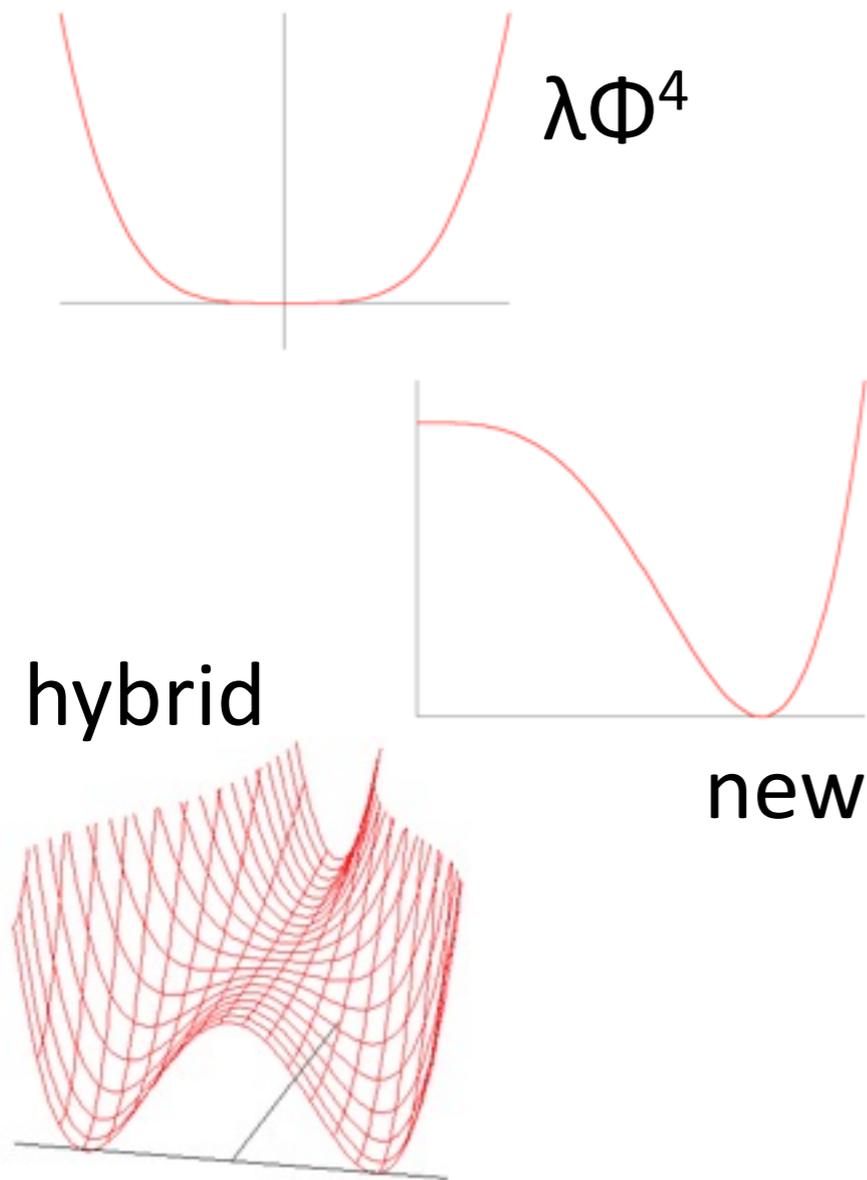
= インフレーション中の膨張則の影響

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

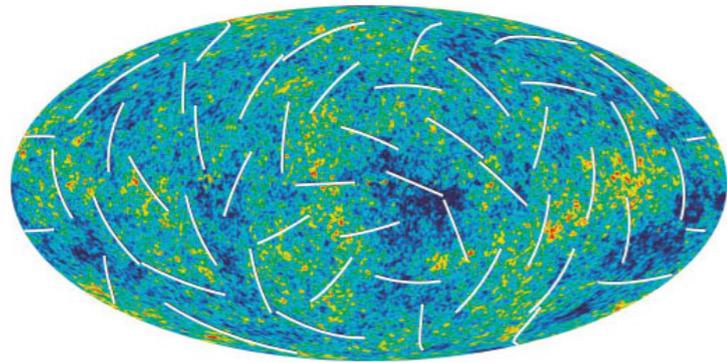
← 周波数 $f=k/2\pi$

インフレーションの情報はどう刻まれるか

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
= 膨張則の変化の仕方もある



インフレーションの情報はどう刻まれるか

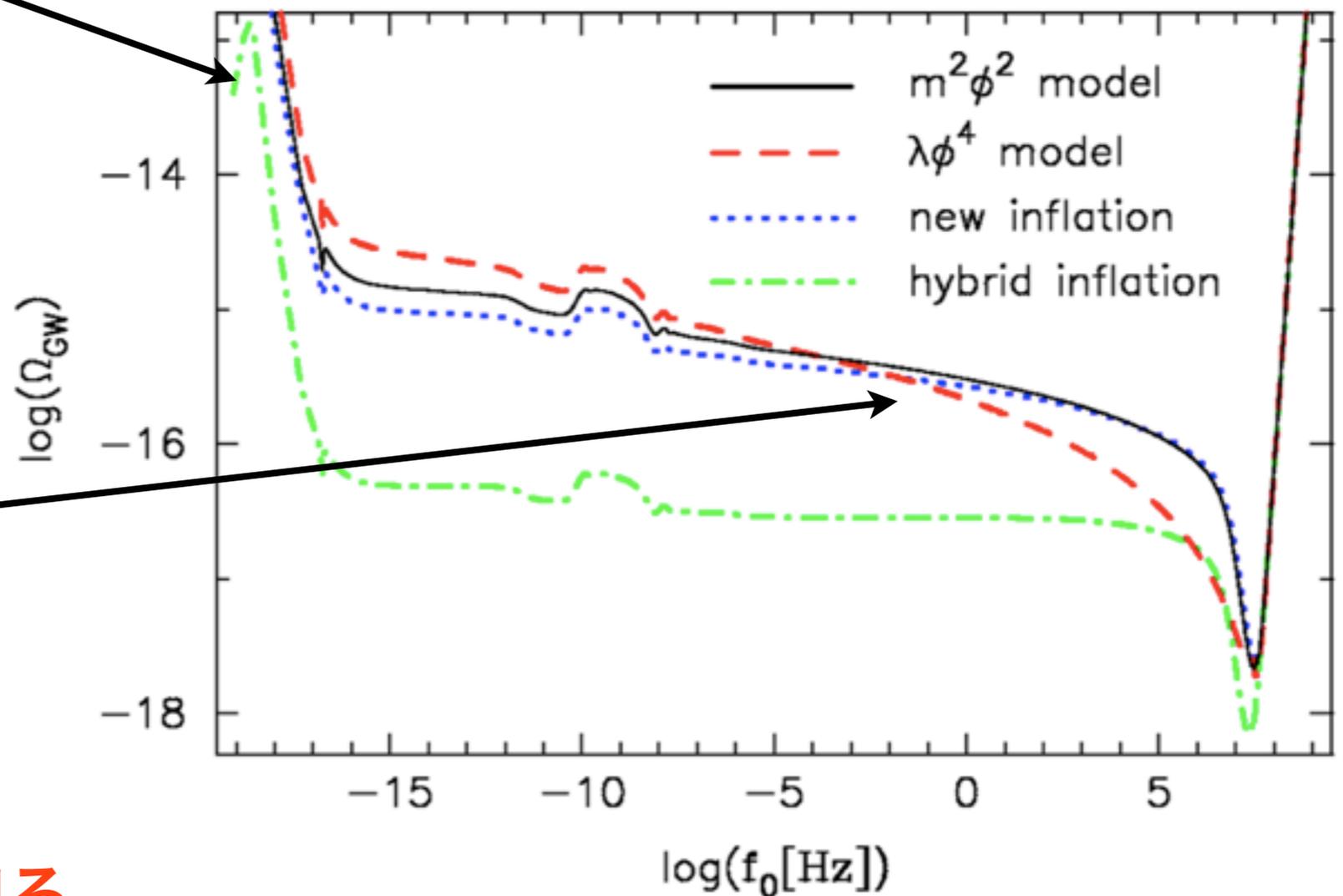


CMB Bモード



直接検出 $\sim 0.1\text{Hz}$

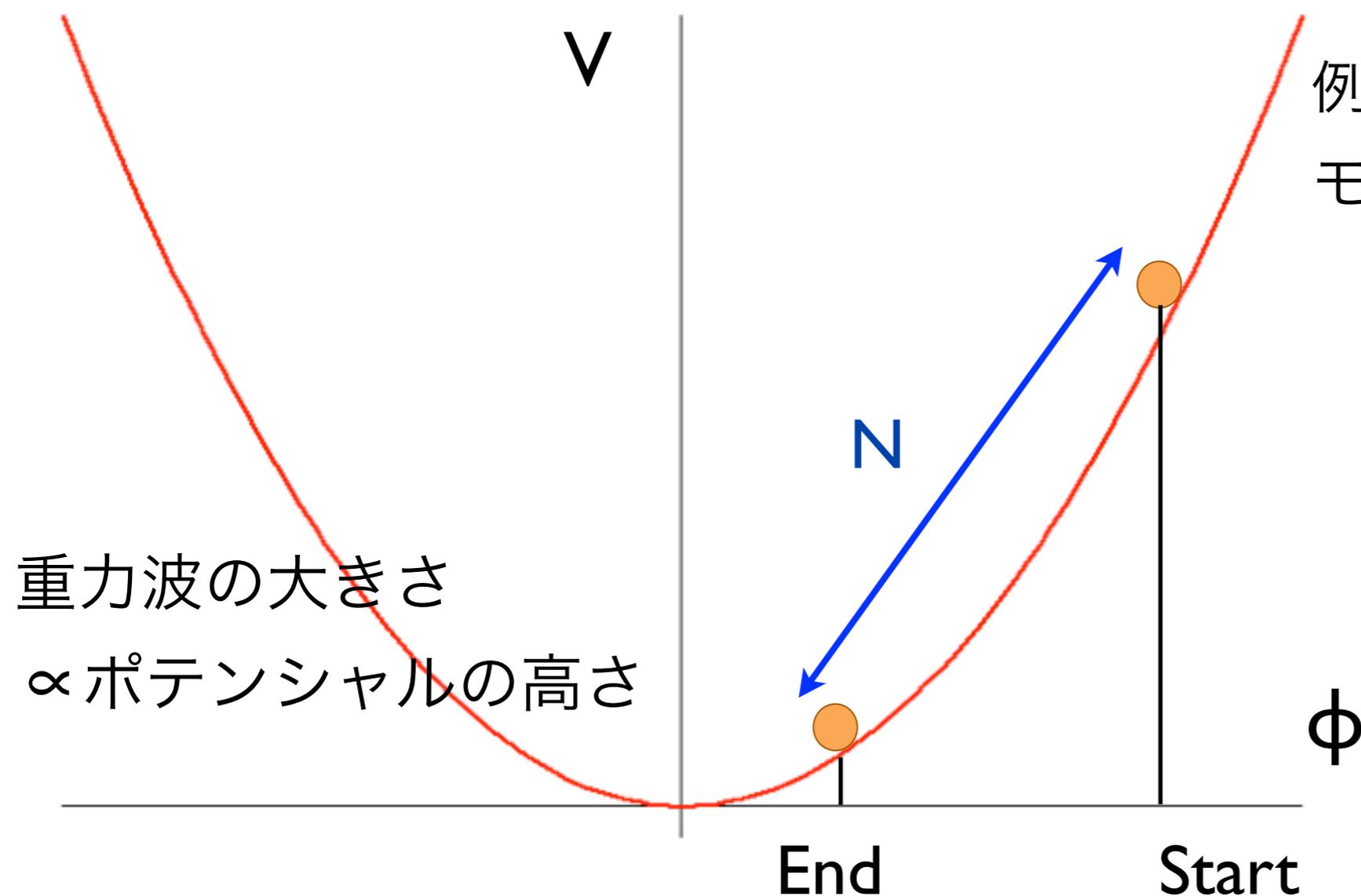
→ 傾きを測ることである程度
ポテンシャルの形がしぼれる



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

インフレーションポテンシャルが絞り込めたとすると...



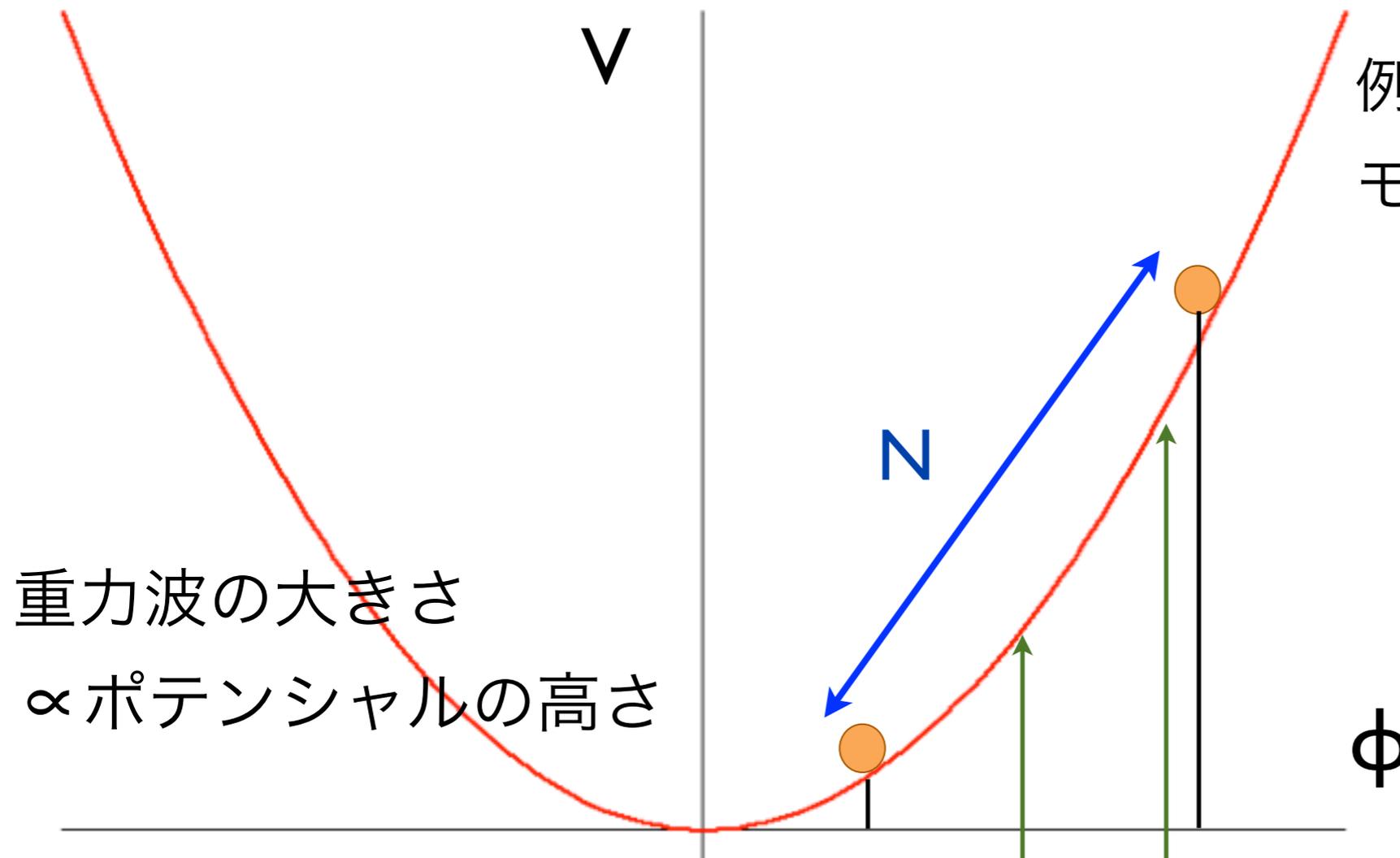
例えば観測がChaotic inflation
モデルを支持したとしたら...

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

重力波を観測することで
mと ϕ ($\rightarrow N$) の値に
制限がつけられる

Nの値は再加熱への示唆にもなる

インフレーションポテンシャルが絞り込めたとすると...



重力波の大きさ
 \propto ポテンシャルの高さ

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

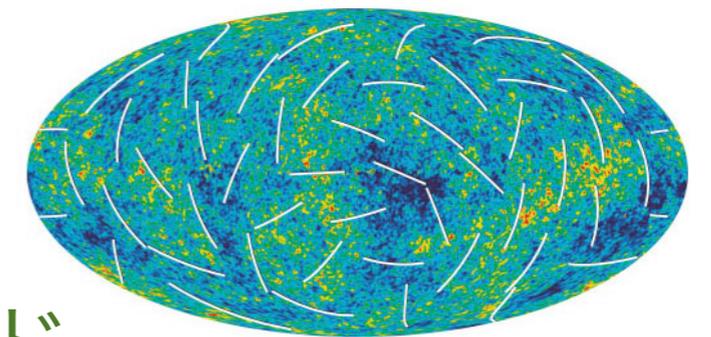
$$V(\phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2$$

重力波を観測することで
mと ϕ ($\rightarrow N$) の値に
制限がつけられる



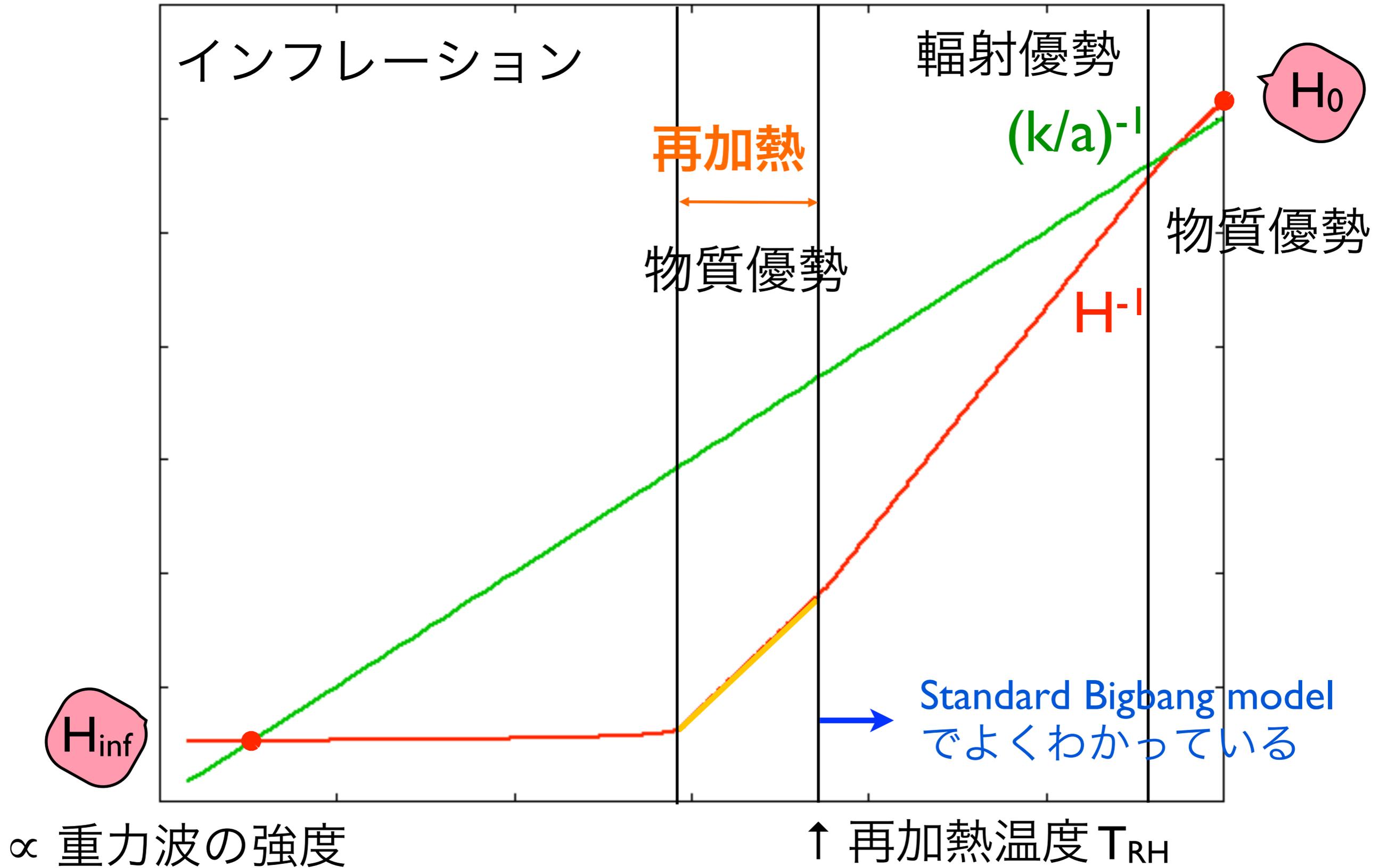
直接検出

CMB Bモード

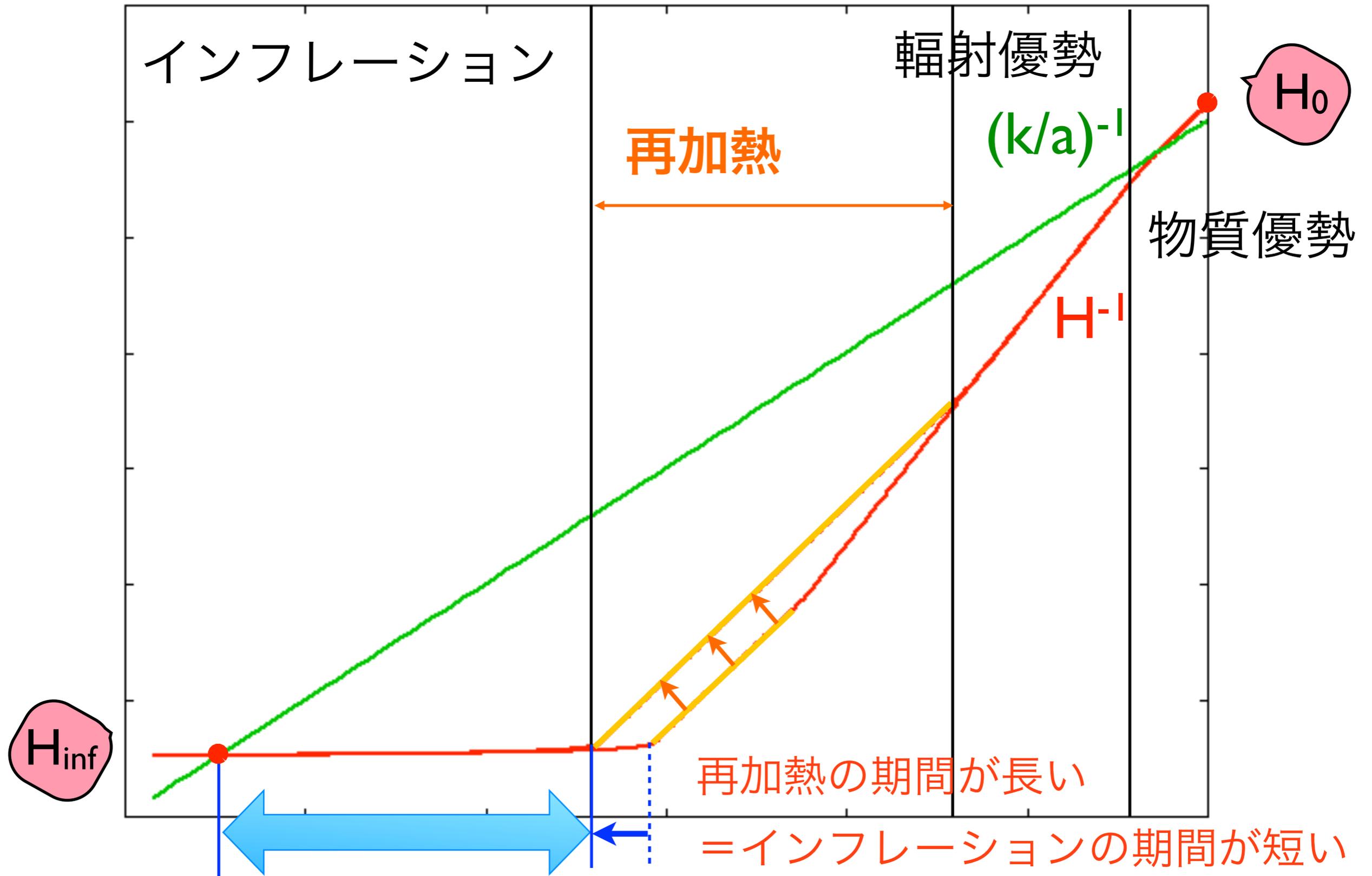


Nの値は再加熱への示唆にもなる

インフレーションの長さ と 再加熱の関係



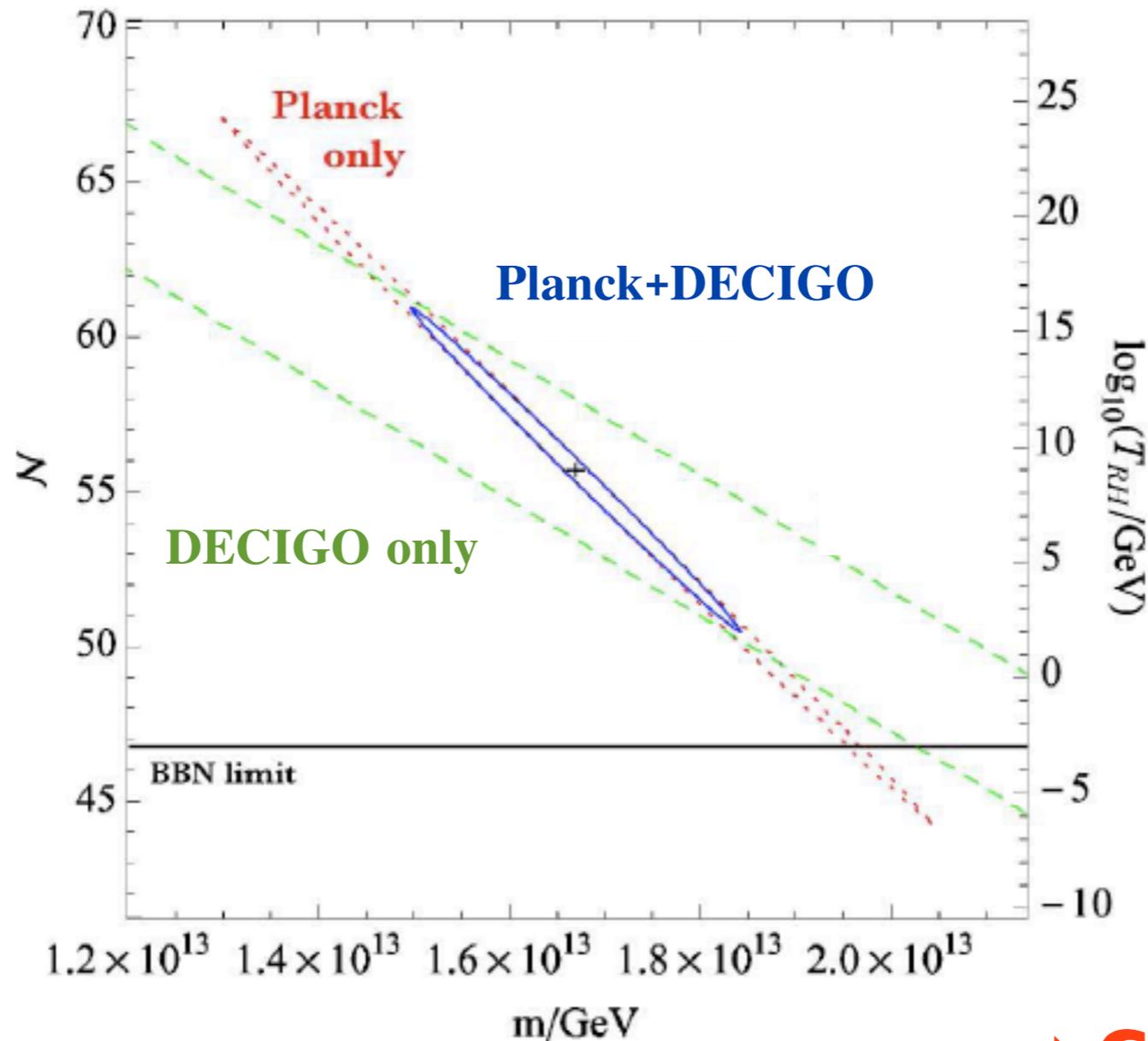
インフレーションの長さ と 再加熱の関係



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)

(CMBスケールを基準にしたときの)
インフレーションの長さ



再加熱温度

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

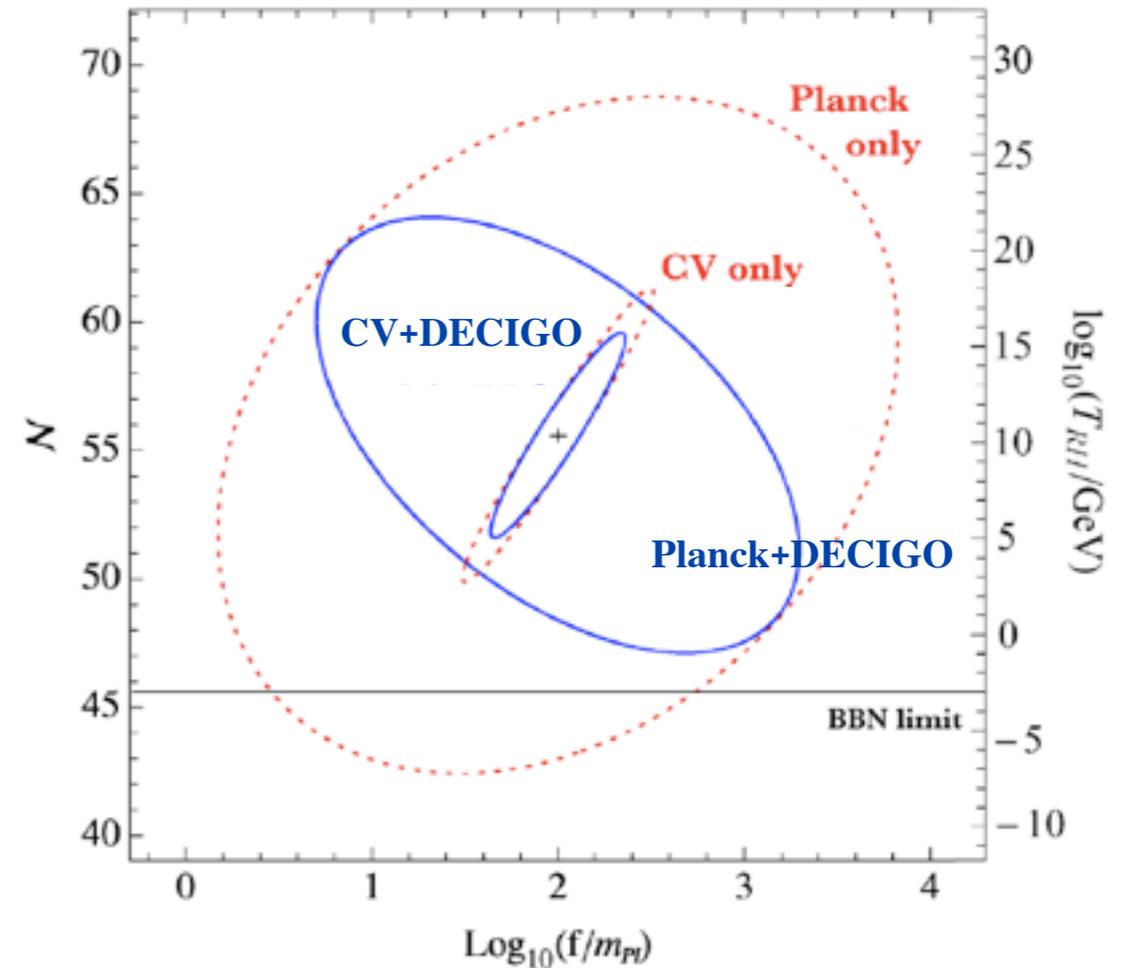
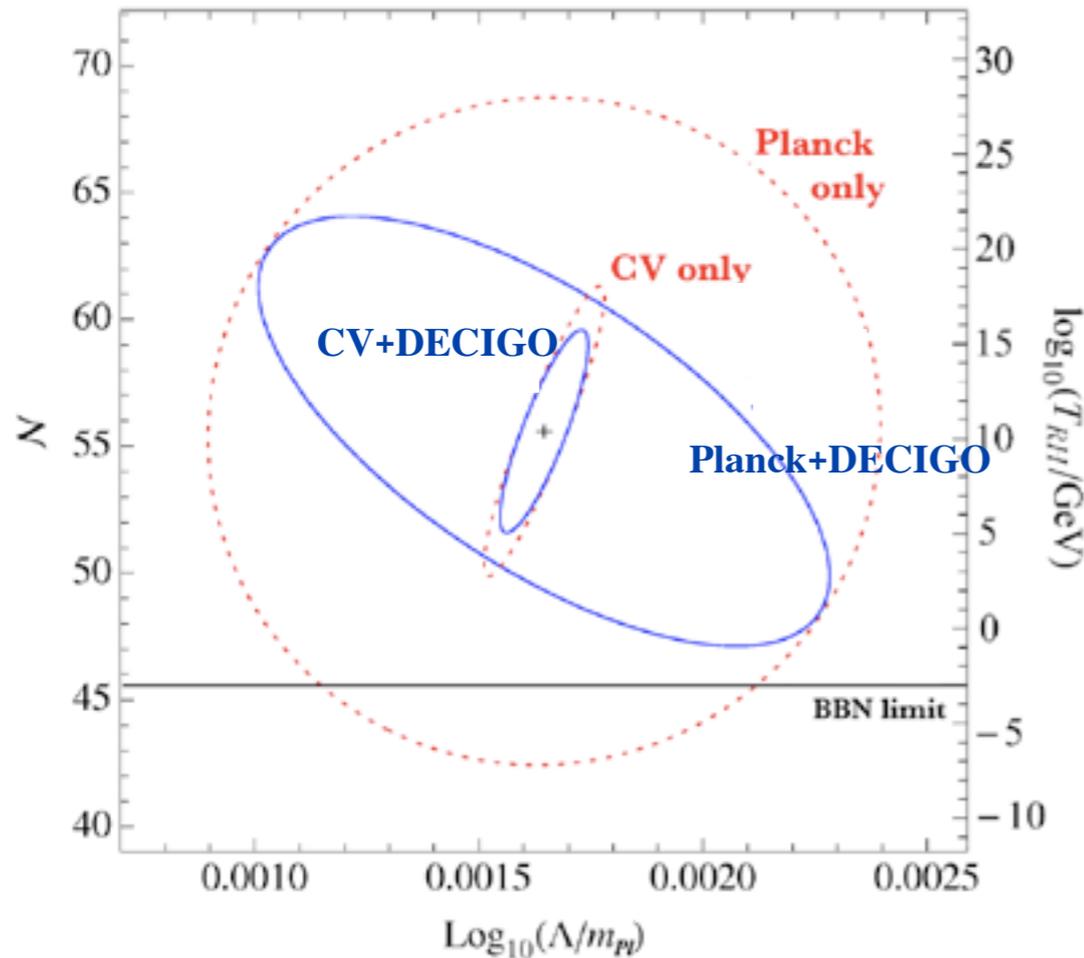
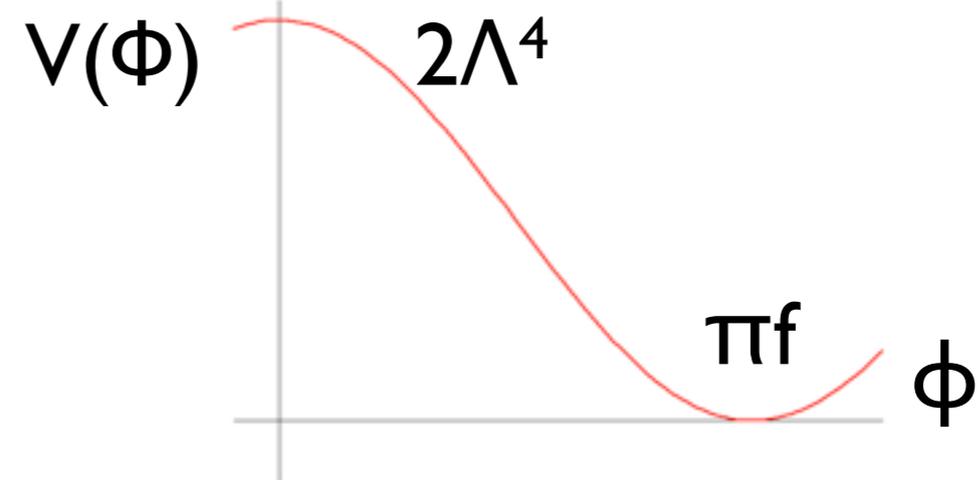
$$V(\phi) = \Lambda^4 [1 \pm \cos(N\phi/f)].$$

制限をつけるパラメータ

Λ : 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



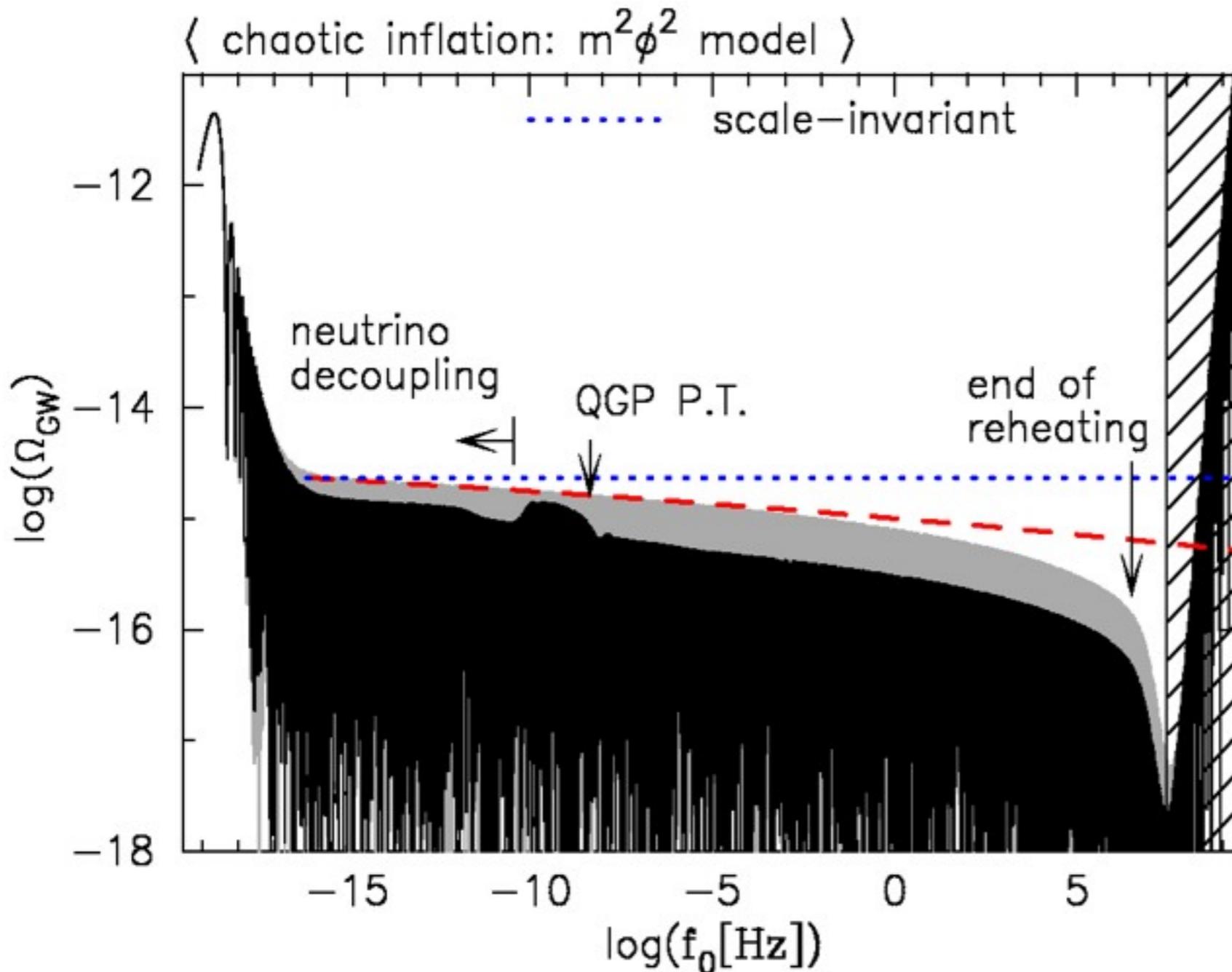
CV: CMB実験で究極の感度を想定

→ それでもなお直接検出は
制限を強めるのに役に立つ

宇宙再加熱への直接的な制限

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



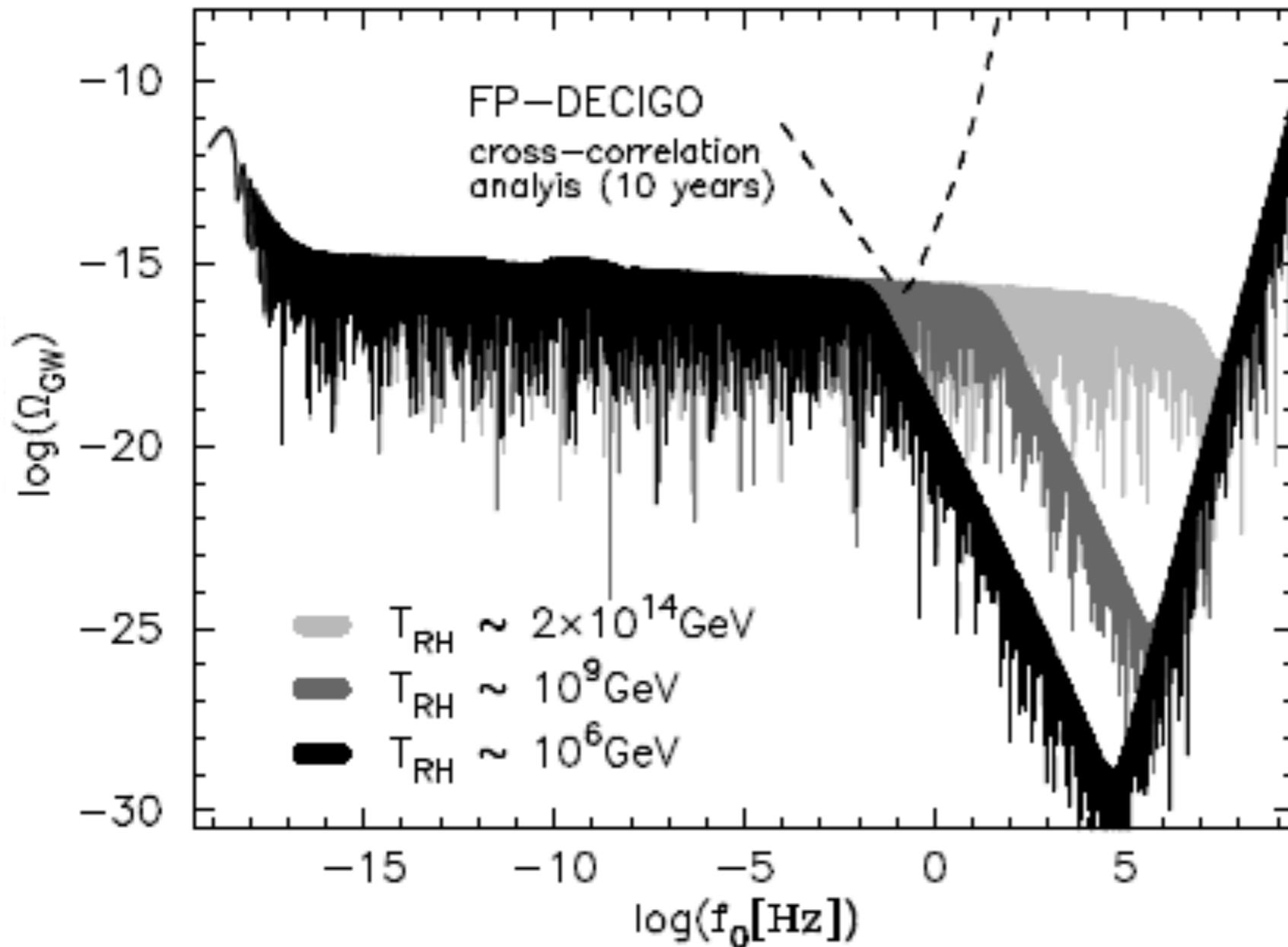
S. Kuroyanagi, T. Chiba and N. Sugiyama,
Phys. Rev. D 79, 103501 (2009)

宇宙再加熱への直接的な制限

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)

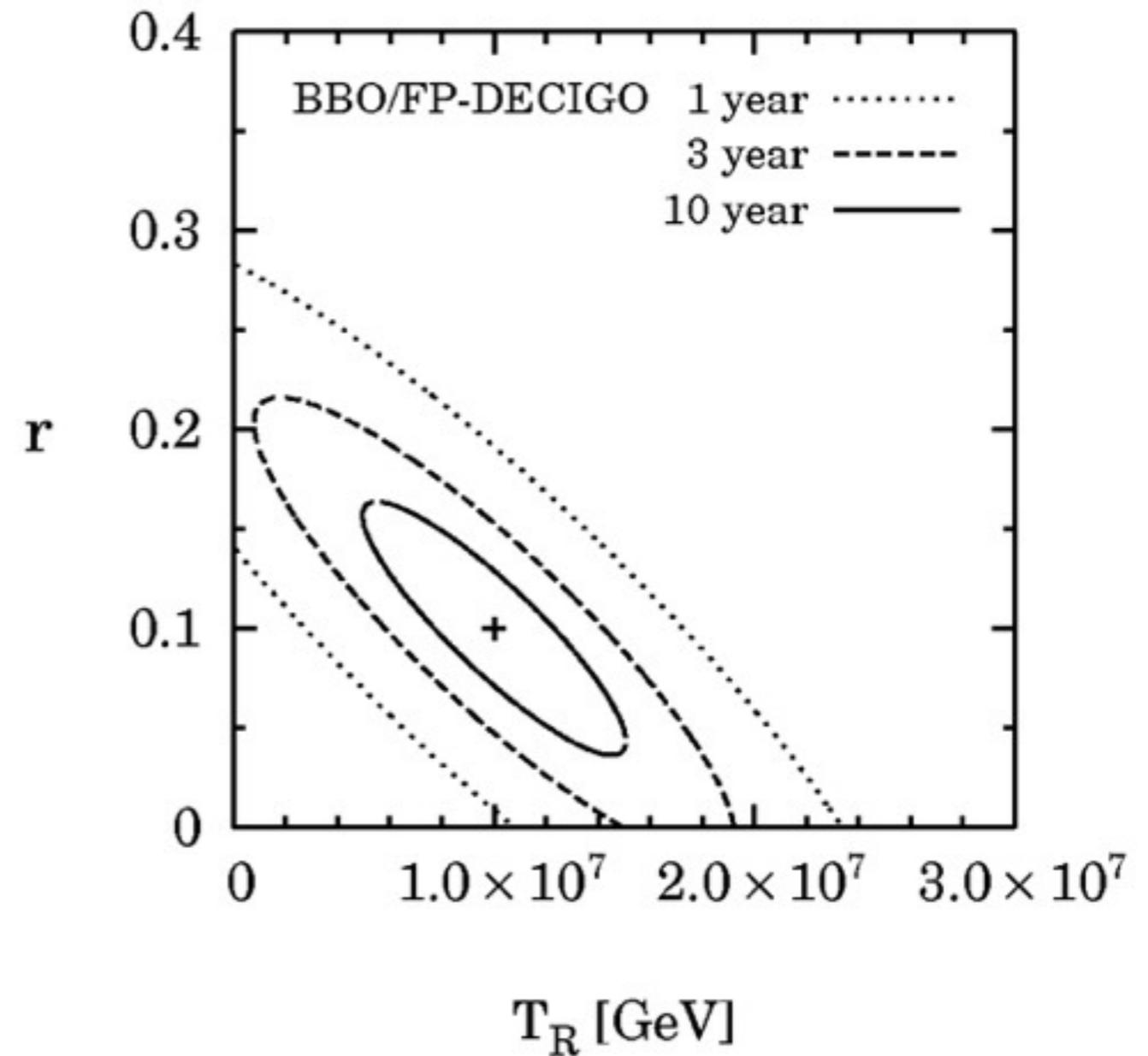
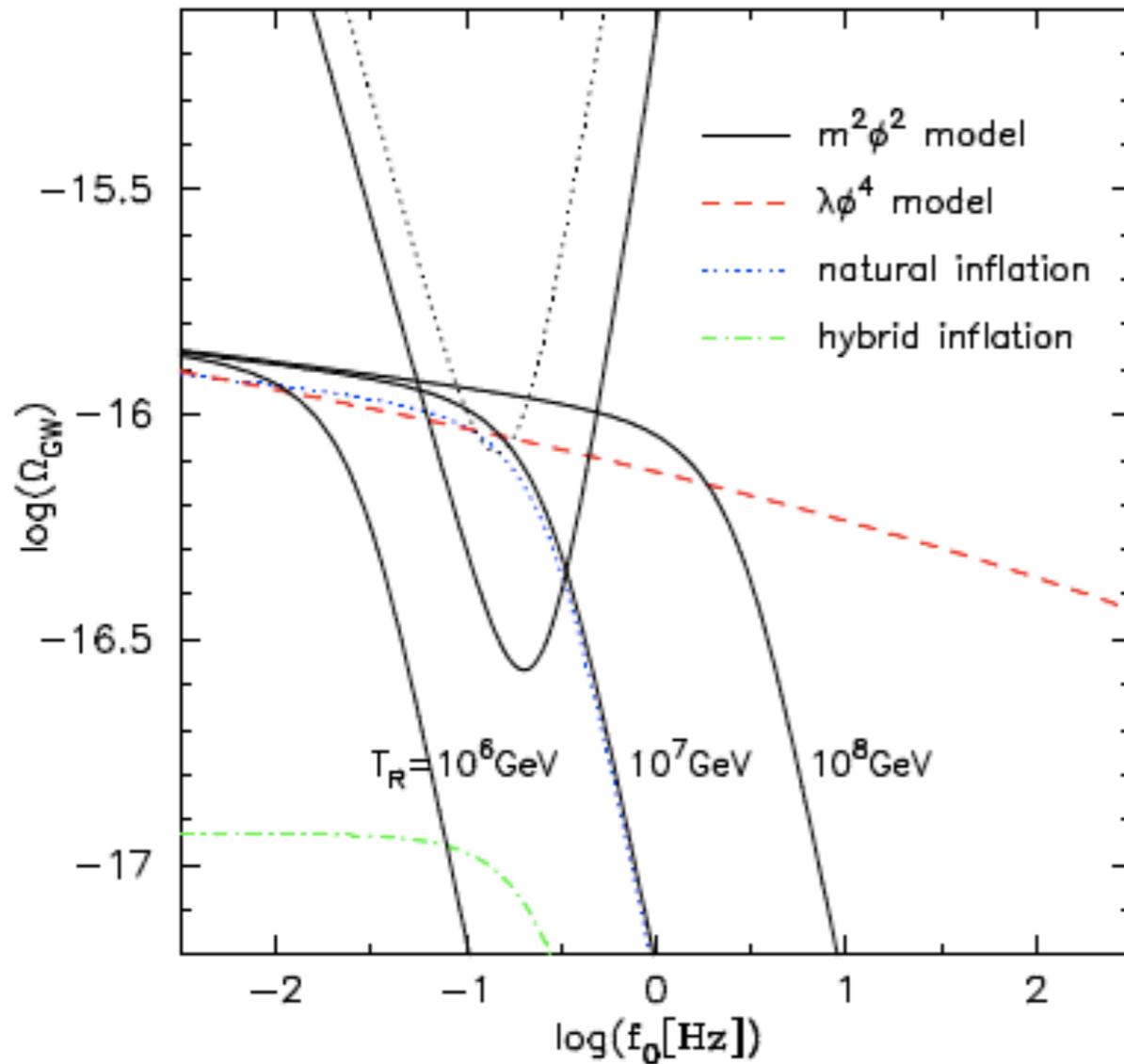


折れ曲がり直接検出
することで再加熱の証
拠を捉えられるかも？

宇宙再加熱への直接的な制限

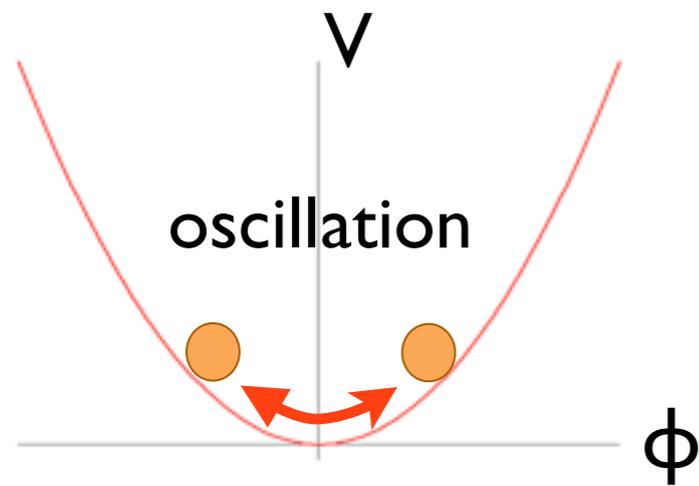
再加熱による折れ曲がりを直接検出可能なのは $T_R \sim 10^7 \text{ GeV}$ くらい

$r=0.1$ を仮定



インフレーションから現在まで

スカラー場が輻射に崩壊



インフレーション

スカラー場

再加熱

輻射

輻射優勢期

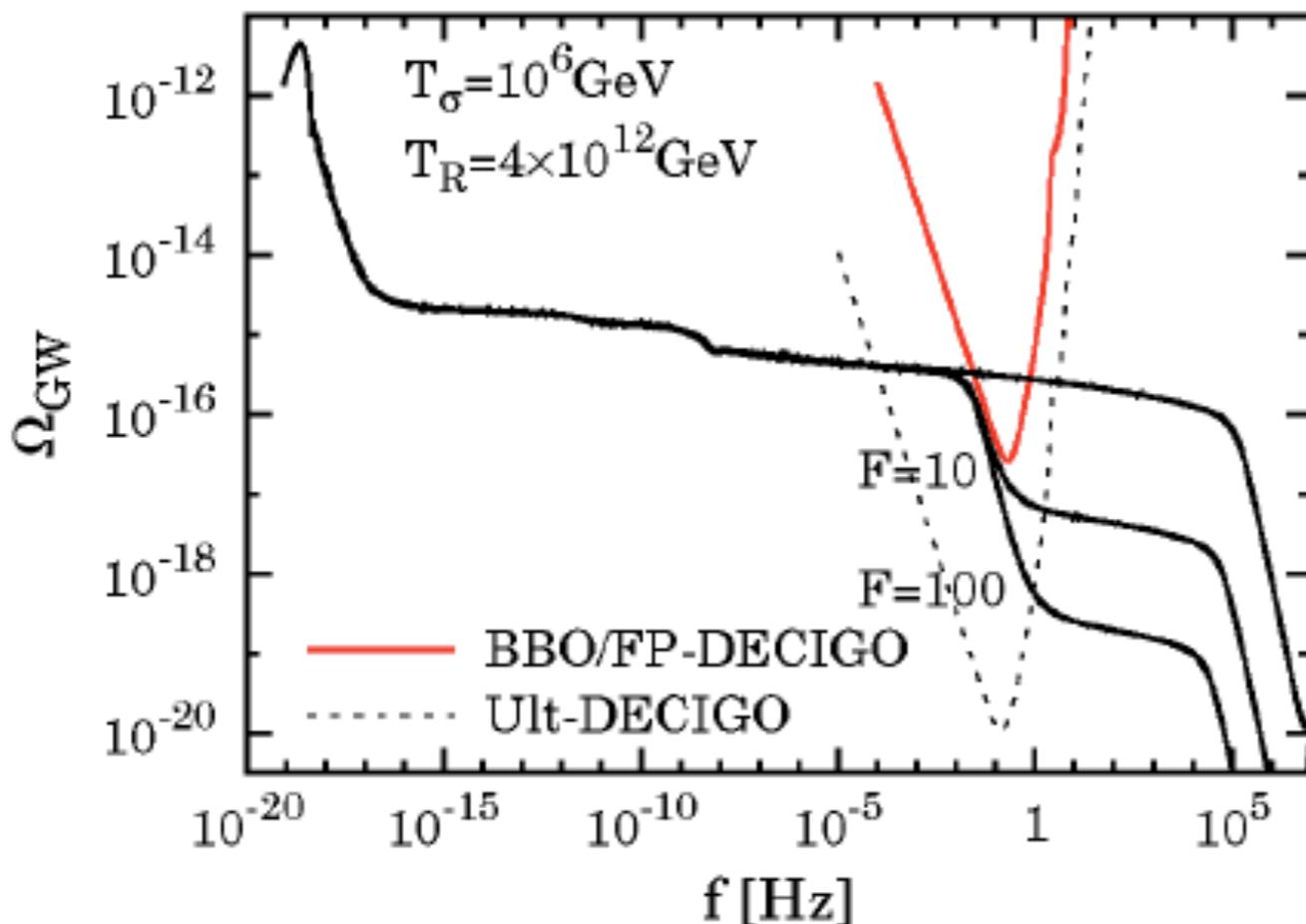
物質優勢期

インフレーションから現在まで

インフレーション

膨張則に影響を与える現象なら
全て重力波に影響が出る

例. late time entropy production



スカラー場

スカラー場の
運動項が優勢？

$$H \propto a^{-6}$$

輻射

異なる場？

late time entropy
production?

$$H \propto a^{-3/2}$$

輻射優勢期

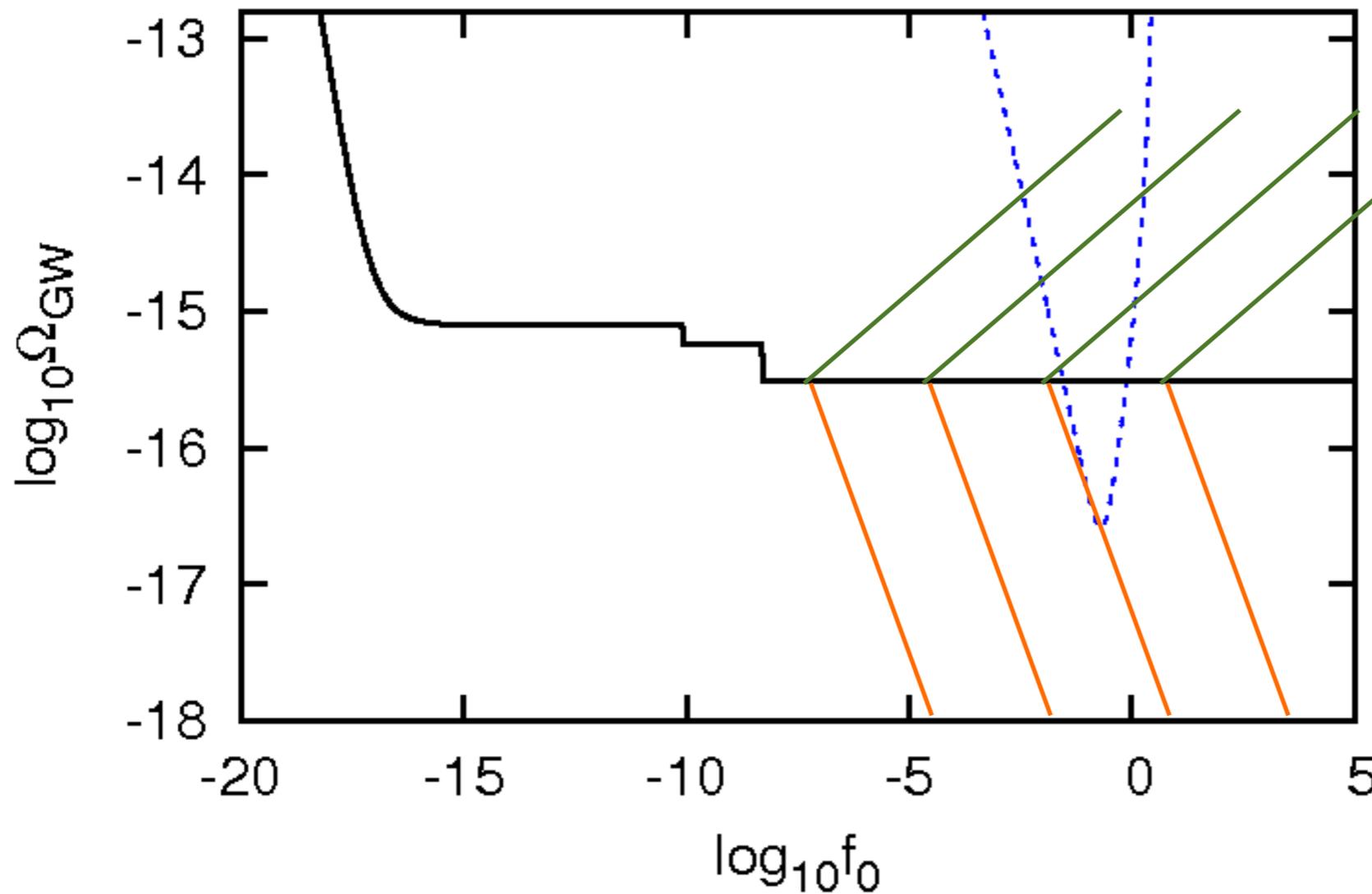
物質優勢期

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

スカラー場の

運動項が優勢: k^1



$w=1$

輻射優勢: k^0

$w=1/3$

物質優勢: k^{-2}

$w=0$

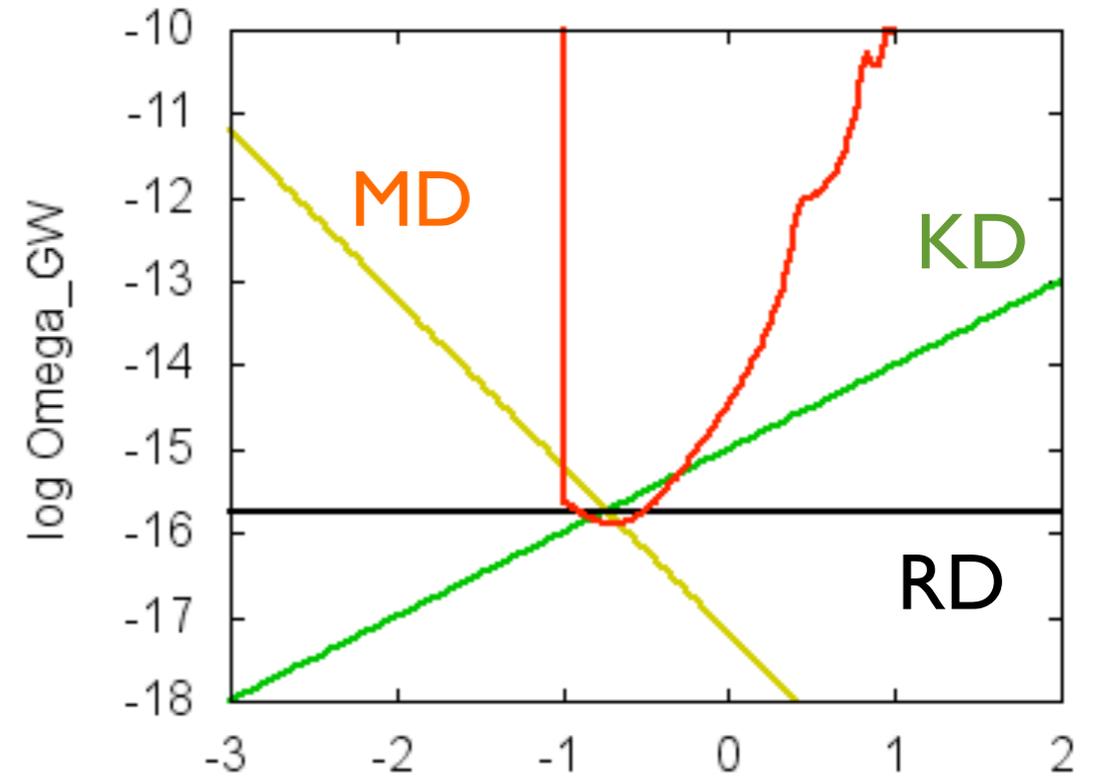
$$H \propto a^{-3(1+\omega)}$$

$$\Omega_{\text{GW}} \propto k^{\frac{2(3\omega-1)}{3\omega+1}}$$

宇宙の状態方程式: $p = w\rho$

状態方程式への制限

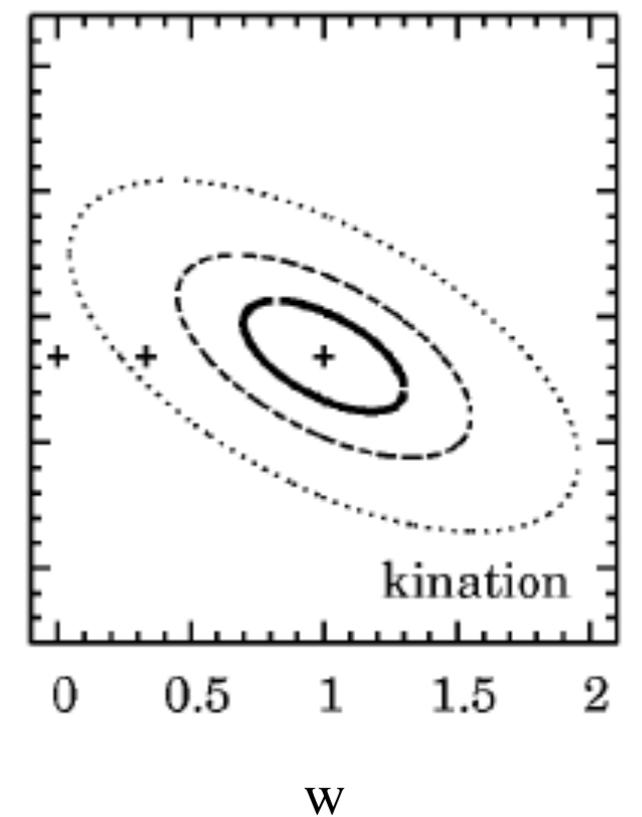
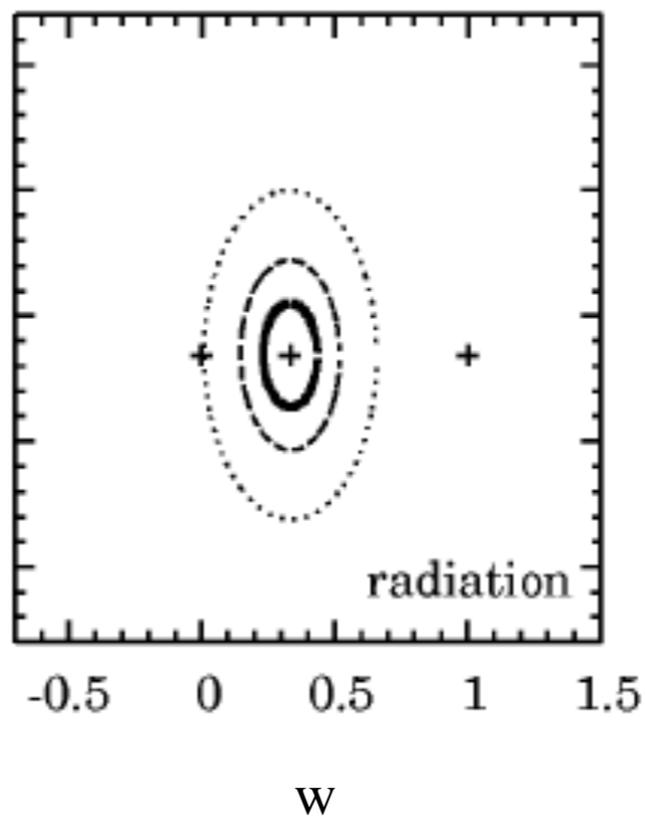
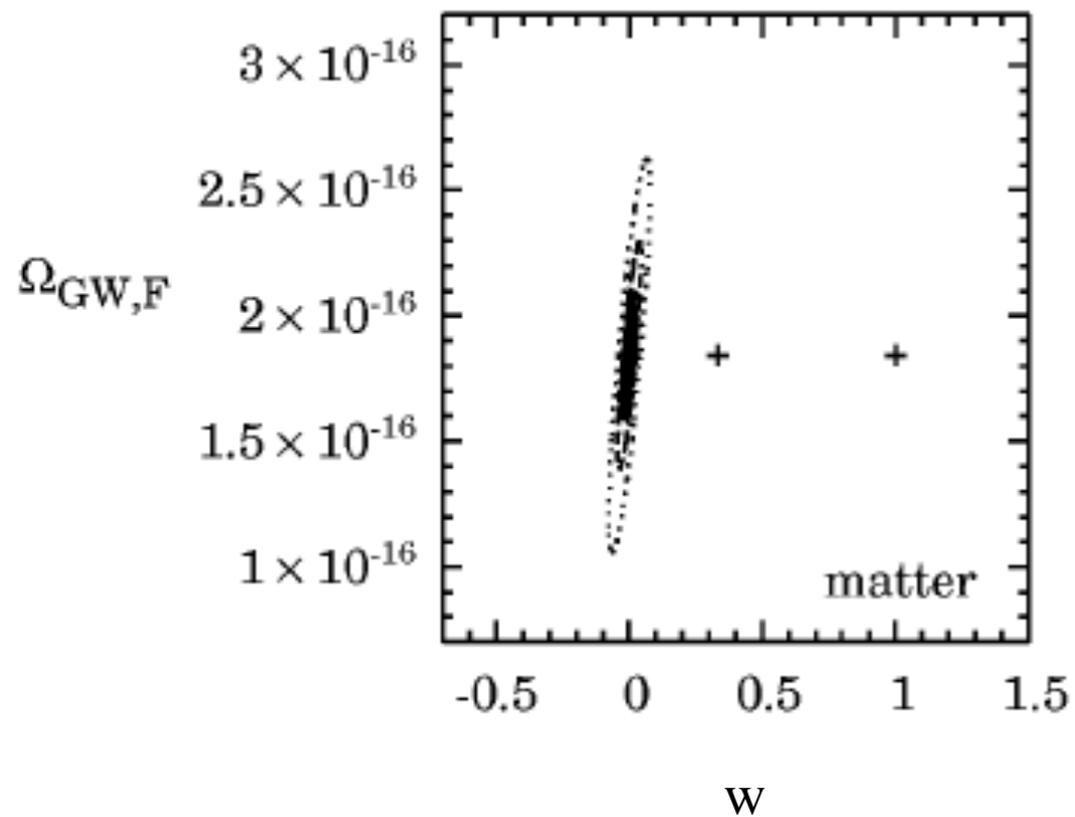
初期宇宙の状態方程式に制限



物質優勢: k^{-2}

輻射優勢: k^0

運動項優勢: k^1



まとめ

- 背景重力波の生成機構はたくさんある。捉えられれば初期宇宙物理への貢献は大きい。
- 中でもインフレーション起源重力波は最も存在が確実視されている。検出されればインフレーション理論が確実なものに。CMBと重力波はインフレーションに関して異なる情報を持っており、双方で捉えることでより強い制限を与えられる。
- インフレーション起源の重力波は、インフレーションに関する情報だけでなく、再加熱などの現在観測的情報が全くない時代の情報も持っている。特に直接検出の周波数帯には宇宙膨張がスペクトルの形に現れるので影響が見やすい。
- 将来の直接検出実験は初期宇宙物理に対する理解を飛躍的に進めてくれる可能性を秘めている。