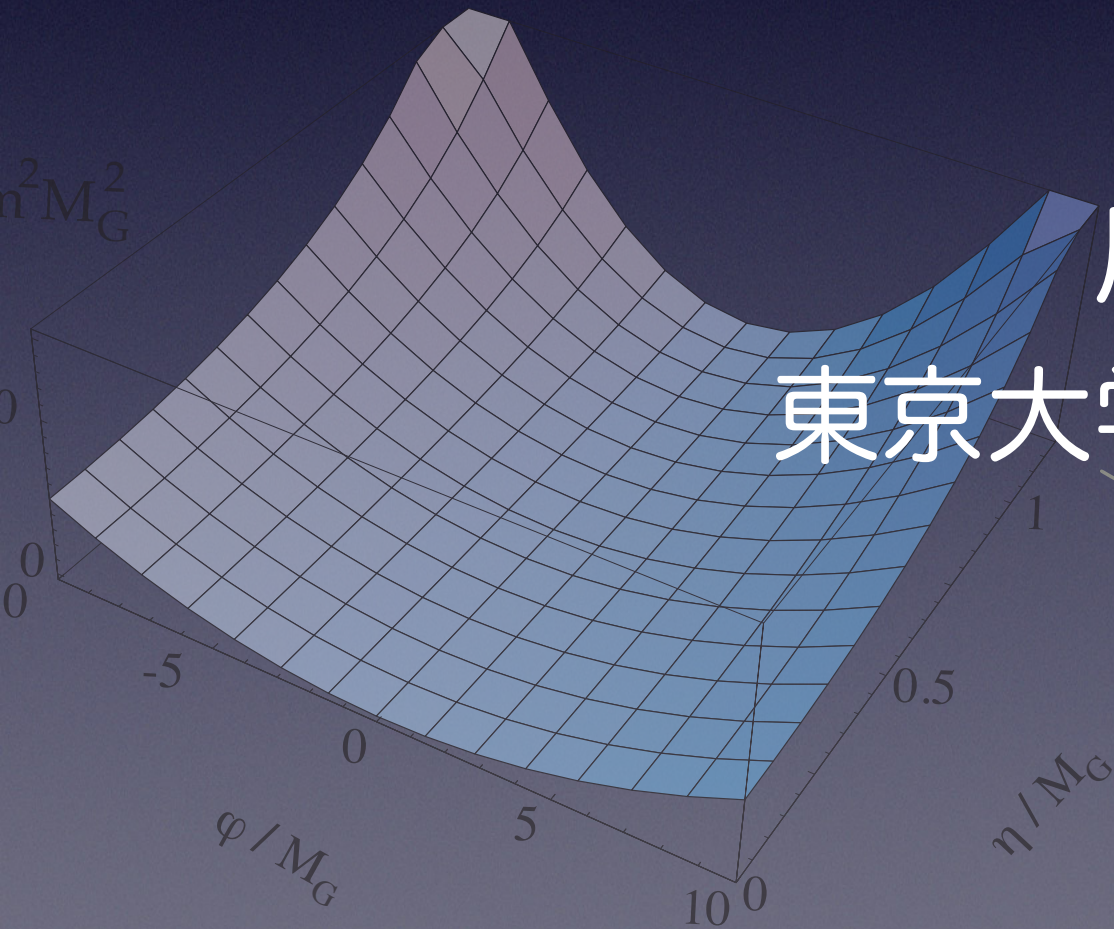


Spring School
2026年3月@ICRR

ビッグバン宇宙

川崎雅裕
東京大学宇宙線研究所



今日の話

1. ビッグバン宇宙論の進展
2. インフレーション宇宙モデル
3. 原始ブラックホール

1. ビッグバン宇宙論の進展

- ビッグバン宇宙モデルの確立 (1960年代)

ビッグバン宇宙モデル

宇宙膨張

マイクロ波宇宙背景放射

宇宙初期の元素合成

一般相対性理論

1.1 アインシュタイン(Einstein)の一般相対性理論

- 1915年 一般相対性理論発表

Die Grundlage der Allgemeine Relativitätstheorie

- 古典重力理論の完成



現代宇宙論の始まり

- Einstein 方程式

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

時空の歪み

エネルギー



1916.

№ 7.

ANNALEN DER PHYSIK.
VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. *Die Grundlage
der allgemeinen Relativitätstheorie;
von A. Einstein.*

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersteren „spezielle Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen

1.2 膨張宇宙

- フリードマン (Friedmann) : 膨張宇宙の解の発見 (1922)

▶ フリードマン方程式

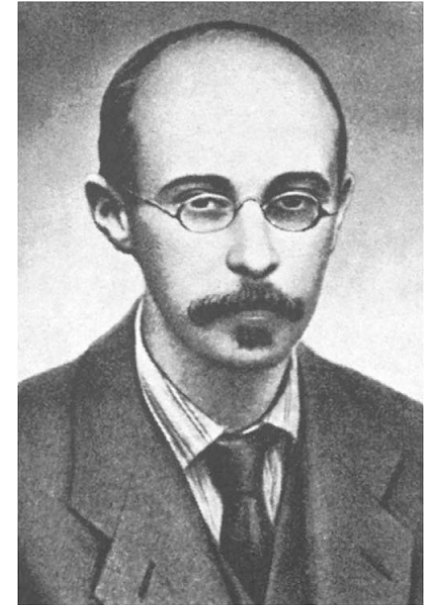
$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho a^2$$

▶ 膨張する解

a : 宇宙の大きさ
スケールファクター

ρ : 宇宙の密度

G : 重力定数



A. Friedmann

- ハッブル (Hubble) の発見 (1929)

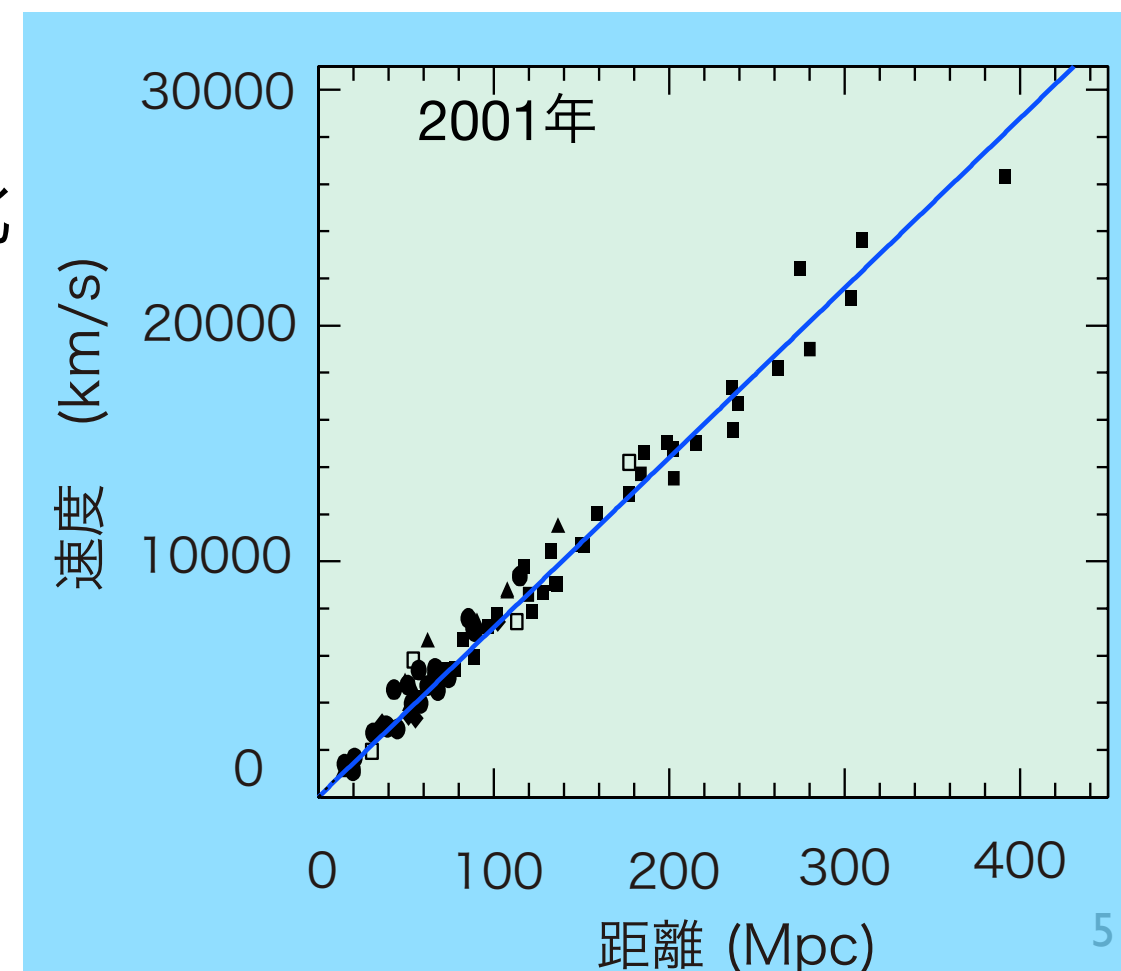
▶ 遠方の銀河は銀河までの距離に比例した速さで遠ざかっている

→ 宇宙膨張の証拠

▶ Hubble定数

pc=3.26光年

$$H_0 = (67.8 \pm 0.9) \text{ km/s/Mpc}$$



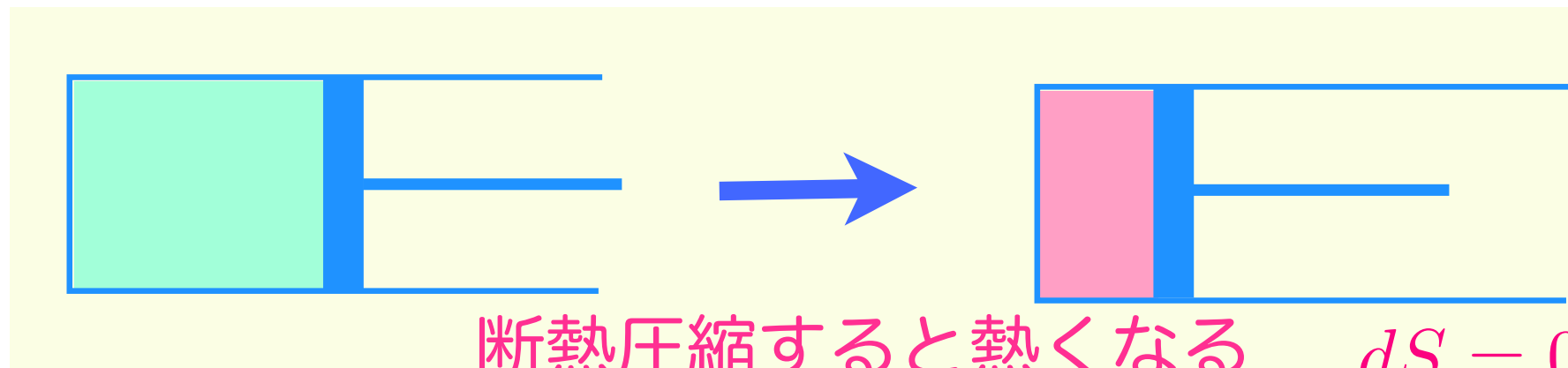
1.3 ビッグバン宇宙

- ルメーテル (Lemaître)

▶ 宇宙は原始的原子の爆発で始まった (1927)

- ガモフ (Gamov) : 熱い宇宙モデル (1946)

▶ 宇宙は高温・高密度状態で始まった



断熱圧縮すると熱くなる $dS = 0$ $dV < 0$

熱力学第1法則

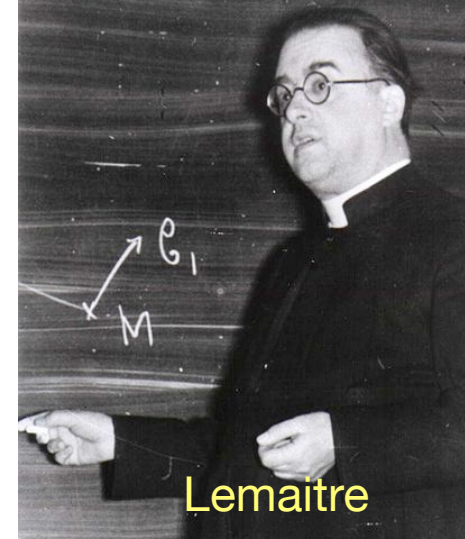
$$dE = -PdV + TdS \Rightarrow dE = -PdV > 0$$

$$dE > 0 \Rightarrow dT > 0$$

- ガモフの予言

☑ 宇宙初期にヘリウムが合成される

☑ 熱い宇宙の痕跡として宇宙背景放射が存在



Lemaître



Gamov

1.4 元素合成

- 宇宙が誕生して約1秒から数分の間に He4 (と He3 、 D 、 Li7) が合成される

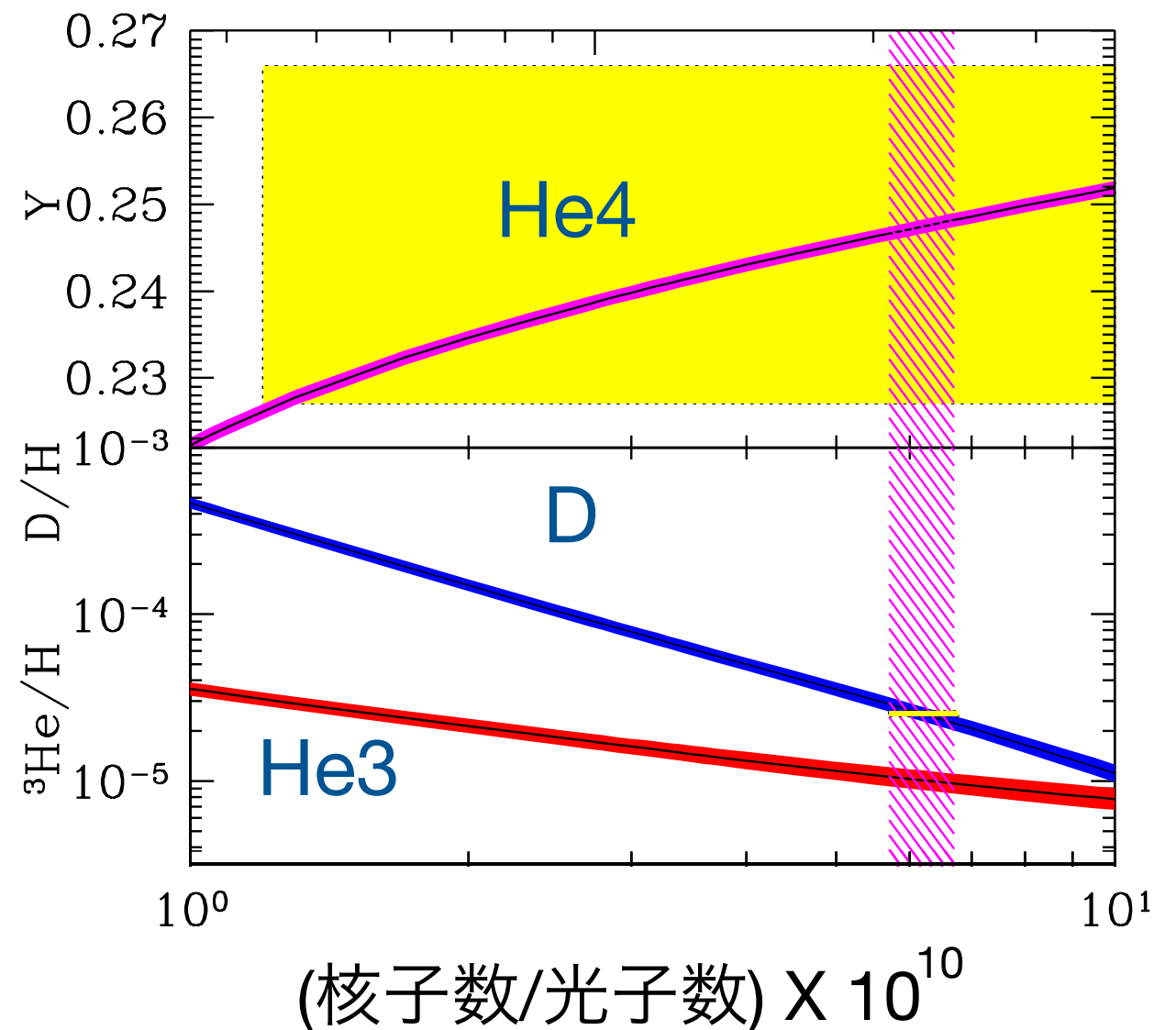


$$Y = \frac{\text{ヘリウム4の質量密度}}{\text{核子の質量密度}}$$

- 理論的予言値と観測が一致する

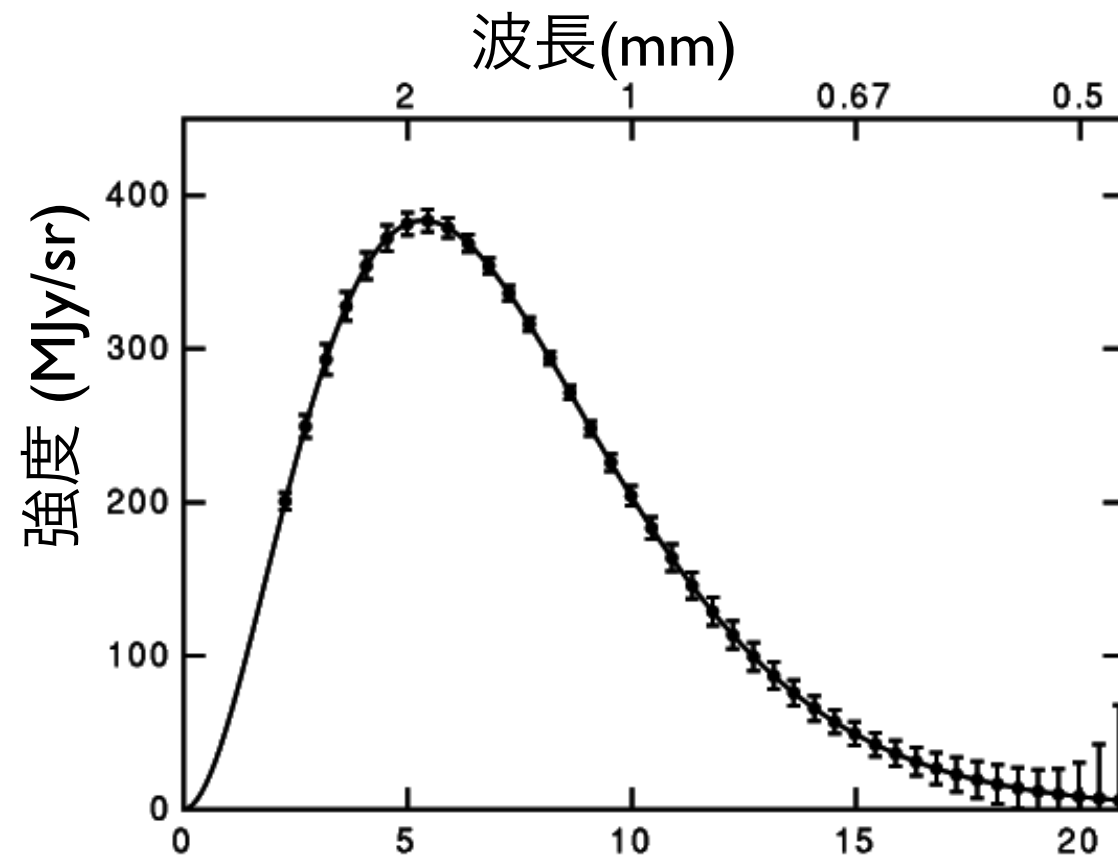


ビッグバン宇宙の
正しさを証明



1.5 マイクロ波宇宙背景放射 (CMB)

- ペンジャス (Penzias) ・ ウィルソン (Wilson) の発見 (1965)
- ▶ ビッグバン宇宙モデルの確立 [1978 ノーベル賞]
- 宇宙が誕生して38万年後 (再結合時 : 水素原子が形成) に放出
- COBE の観測 (1993)
- ▶ T=2.73K の完全なプランク分布



誤差は400倍して表示



1.6 再結合

- $T = 3000\text{K}$ (時刻38万年後)

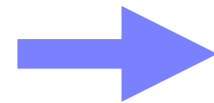
▶ それまで自由に運動していた電子が陽子と結合して水素原子を作る



- 再結合後は光子は散乱 (コンプトン散乱) されずに直進する



宇宙は光に対して透明



マイクロ波宇宙背景放射

Cosmic Microwave Background (CMB)

1.7 マイクロ波宇宙背景放射のゆらぎ

- 宇宙が誕生して38万年後（再結合時：水素原子が形成）に放出
- COBEの観測 [2006年ノーベル賞]

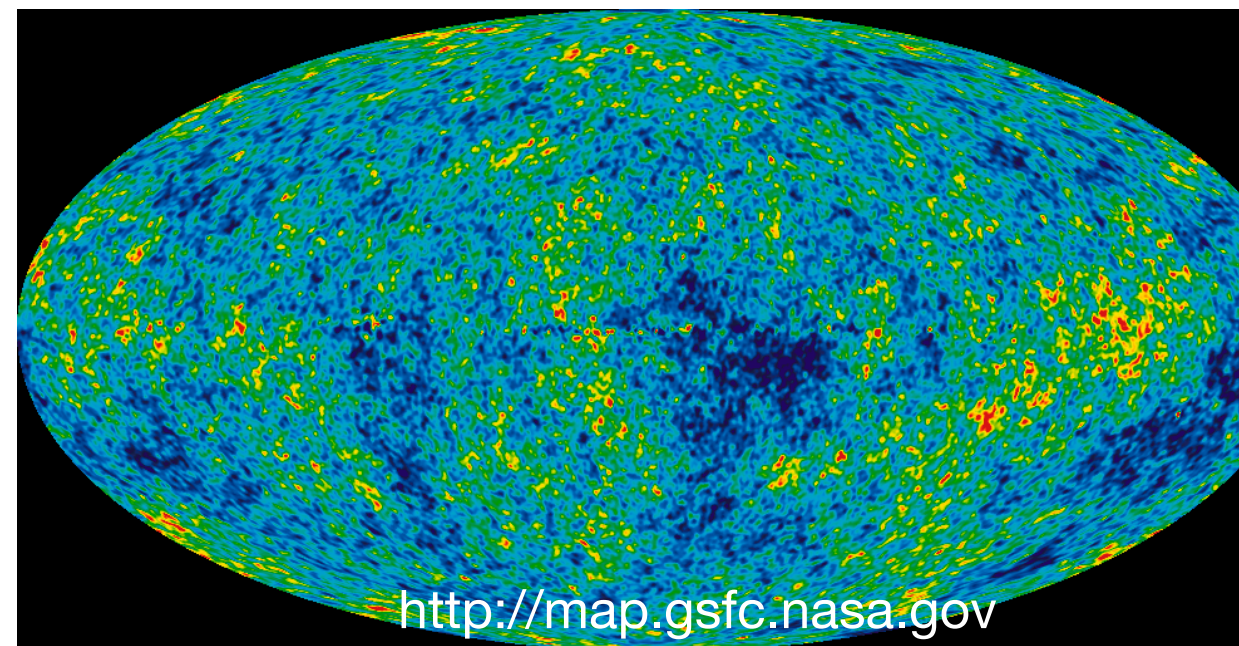
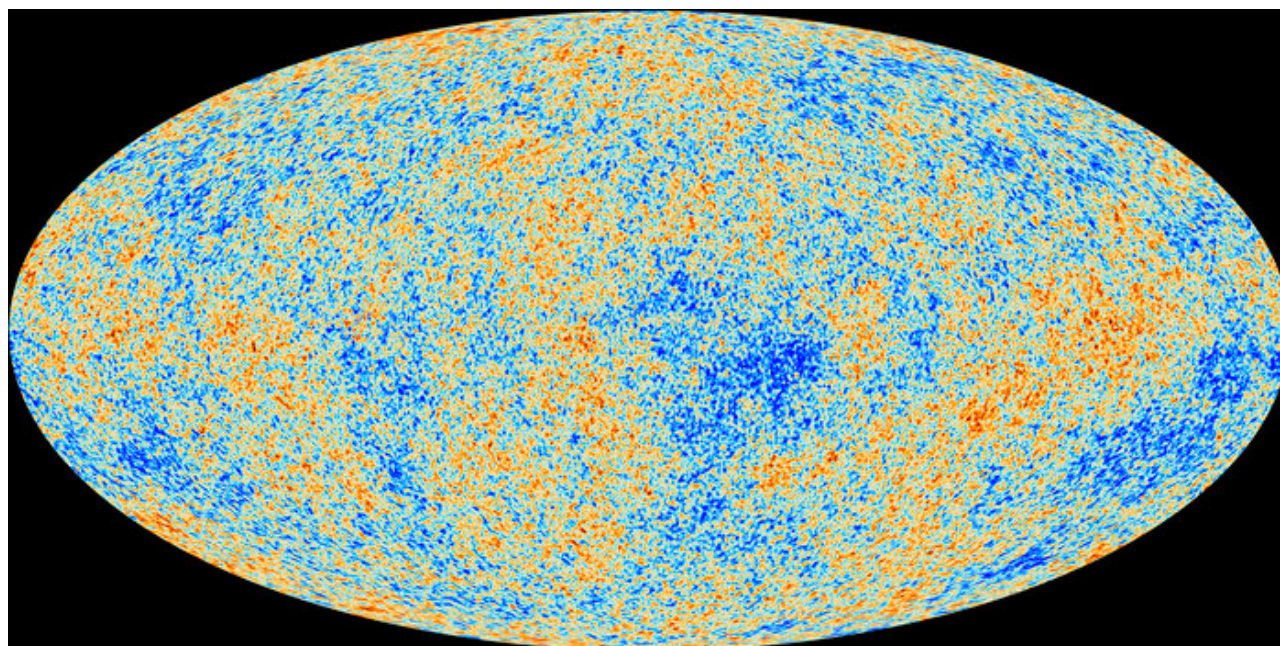
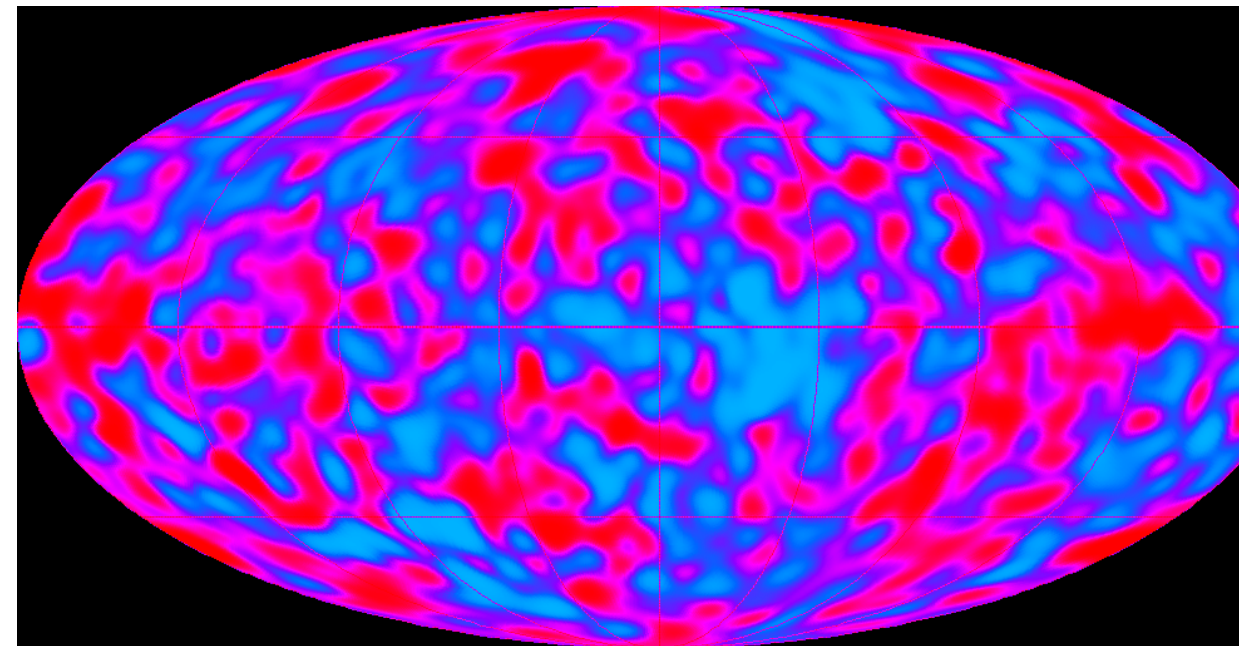
光と電子の散乱が切れる

▶ 完全なプランク分布

▶ 非等方性の発見 ← 密度揺らぎ

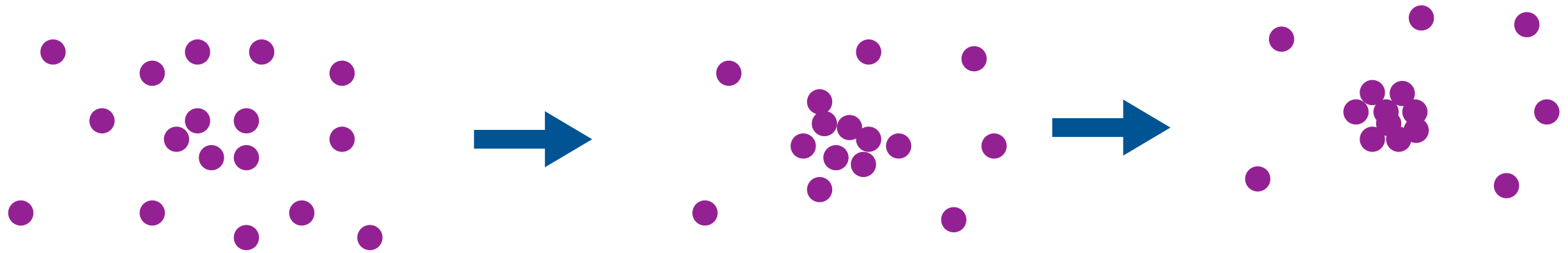
- WMAPの観測 (2003~)

- Planckの観測 (2013~)

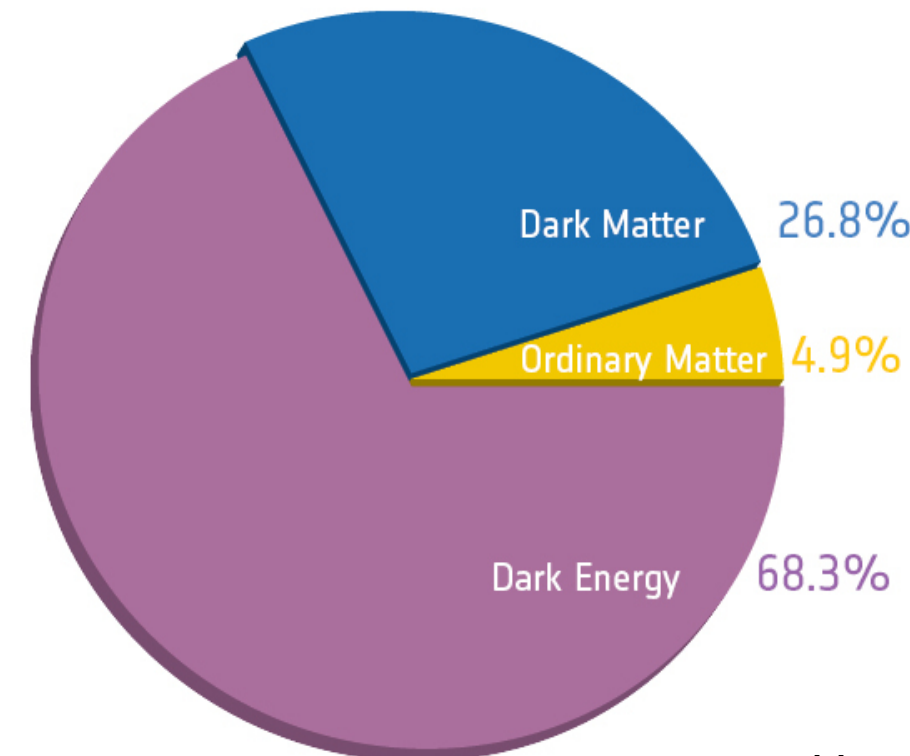


1.8 構造形成

- 宇宙初期の微小な密度ゆらぎ ($\sim 10^{-5}$) が重力不安定性によって成長し、銀河・銀河団を形成する



- 構造形成にはダークマターが必要
 - ▶ 銀河スケールのバリオンの揺らぎは光子との相互作用によって減衰してしまう (Silk damping)
 - ▶ ダークマターは減衰を受けない
- CMBの揺らぎは宇宙の構成要素に敏感
 - ▶ 観測から各構成要素の割合が決まる



1.9 ビッグバン宇宙モデルの問題

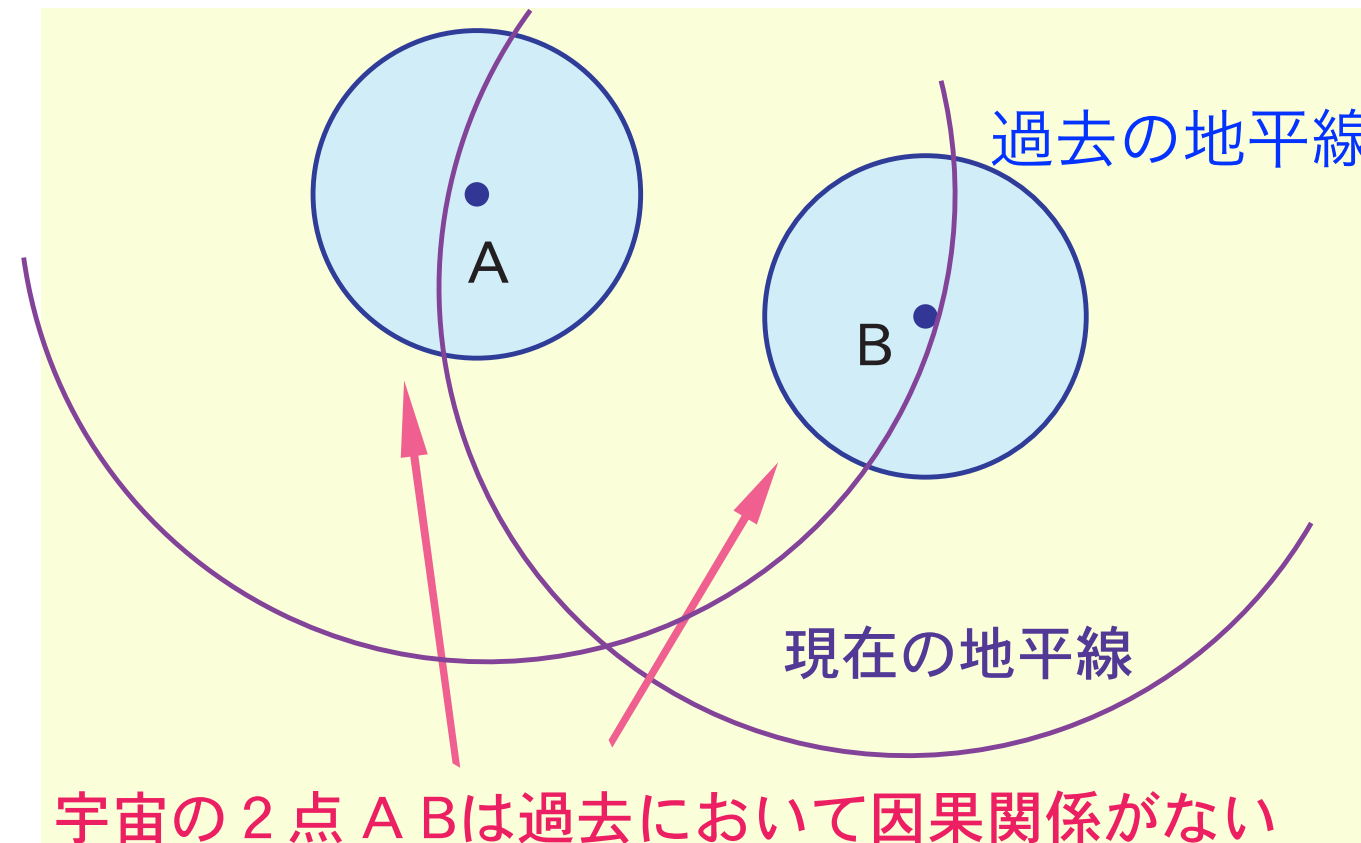
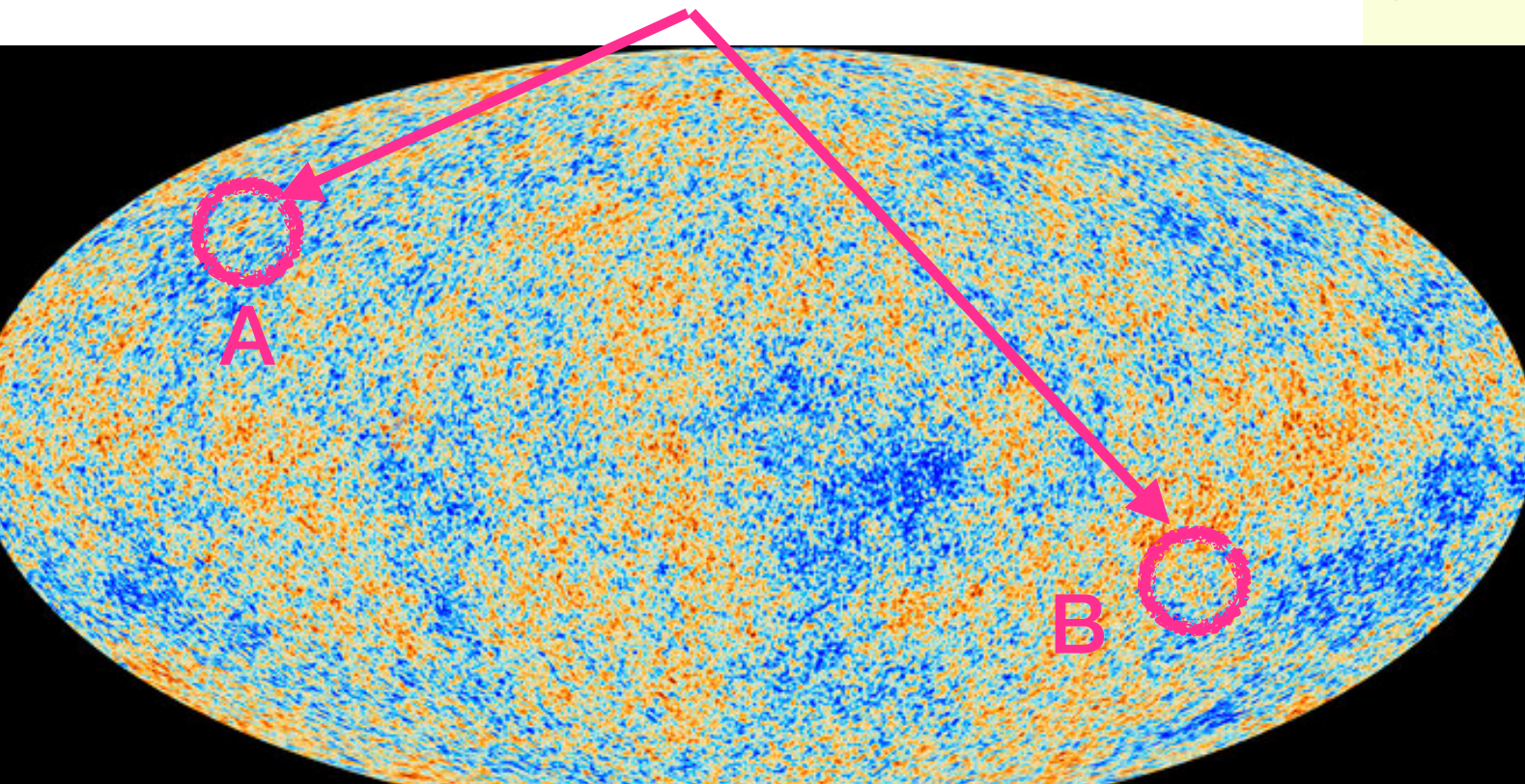
- ビッグバン宇宙モデルは宇宙が誕生して約1秒から現在までの宇宙の様子を正しく記述することに成功
- 宇宙のさらに初期に適用しようとする問題が生じる
 - ▶ 平坦性問題：138億年たった現在も宇宙は平坦に近い
 - ▶ 地平線問題：因果関係を超えた相関がある
 - ▶ 密度揺らぎの問題：密度揺らぎの起源が不明

1.10 地平線問題

- 宇宙の地平線：宇宙が誕生したときから光速で到達できる最大の長さ
- 宇宙背景放射は宇宙が誕生して約38万年後に放出された光
- 宇宙背景放射は非常に等方的

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

宇宙背景放射が出たときの地平線



- 因果関係の無い2点から出た光が同じ強さなのは不自然

2. インフレーション宇宙モデル

- 真空のエネルギー = スカラー場（インフラトン場）の
ポテンシャルエネルギー ρ_V が宇宙を支配する

$$\frac{da}{dt} = \sqrt{\frac{8\pi G \rho_V}{3}} a \quad \Rightarrow \quad a \propto \exp(H_{\text{inf}} t)$$

フリードマン方程式

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho a^2$$

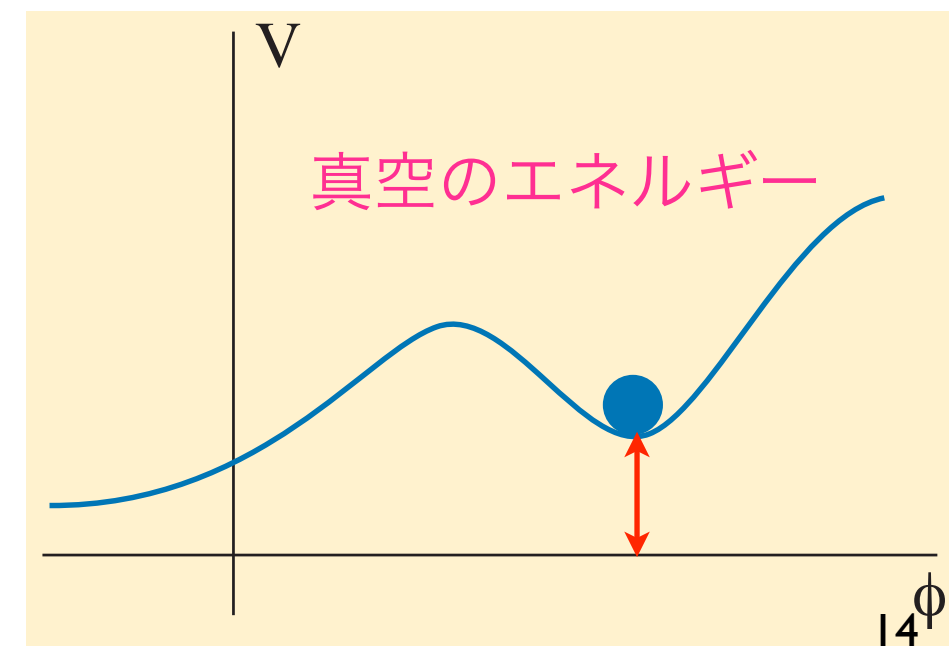
$$H_{\text{inf}} = \sqrt{8\pi G \rho_V / 3} \quad : \text{inflation 中のハッブルパラメーター}$$

➡ 急激な (指数関数的) 宇宙膨張

10^{-36} 秒の間に宇宙が 10^{26} 倍以上に大きくなる

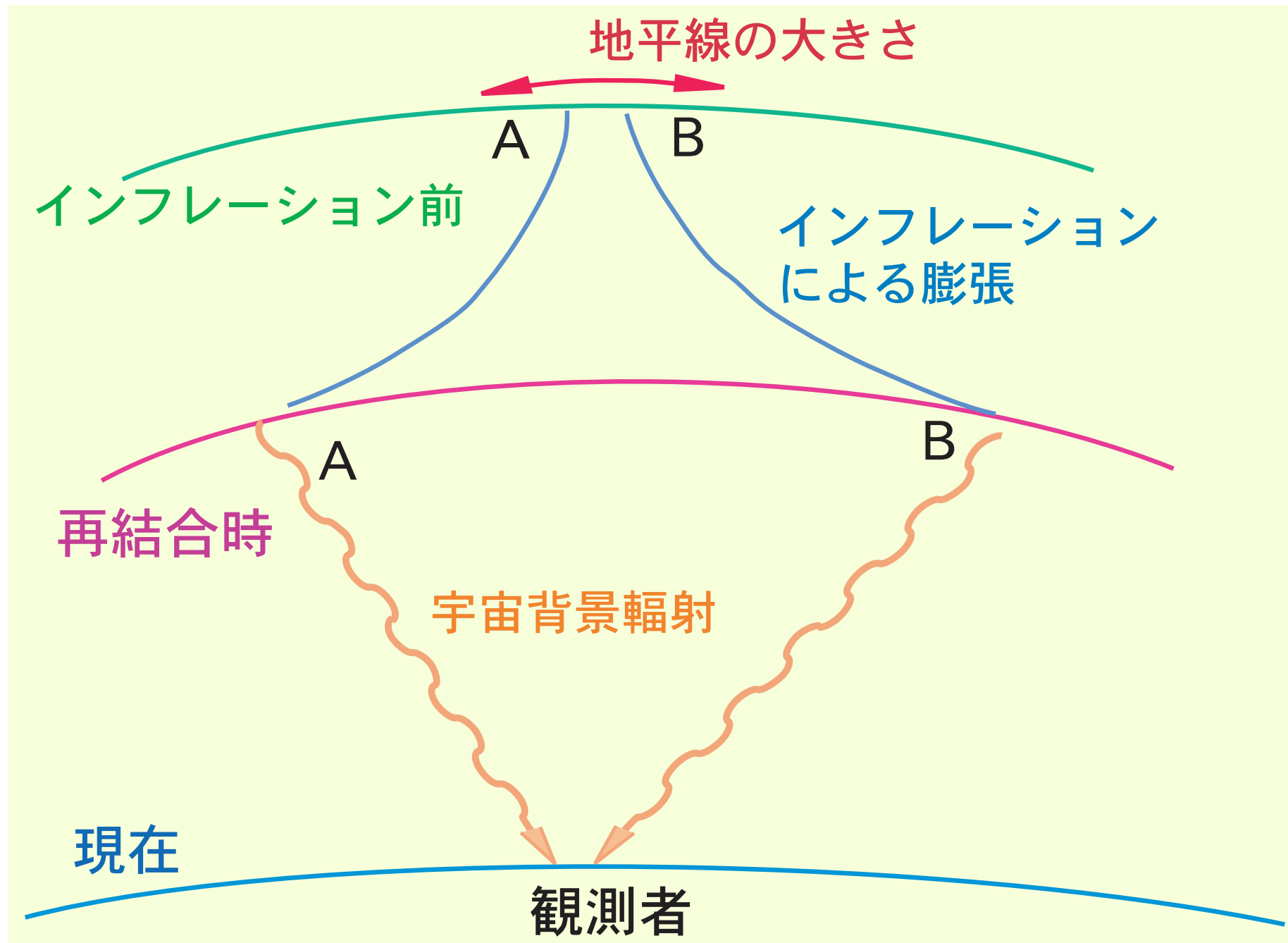
- 急激な膨張の後、真空のエネルギーが
解放されて熱い宇宙になる

➡ 再加熱 = ビッグバン



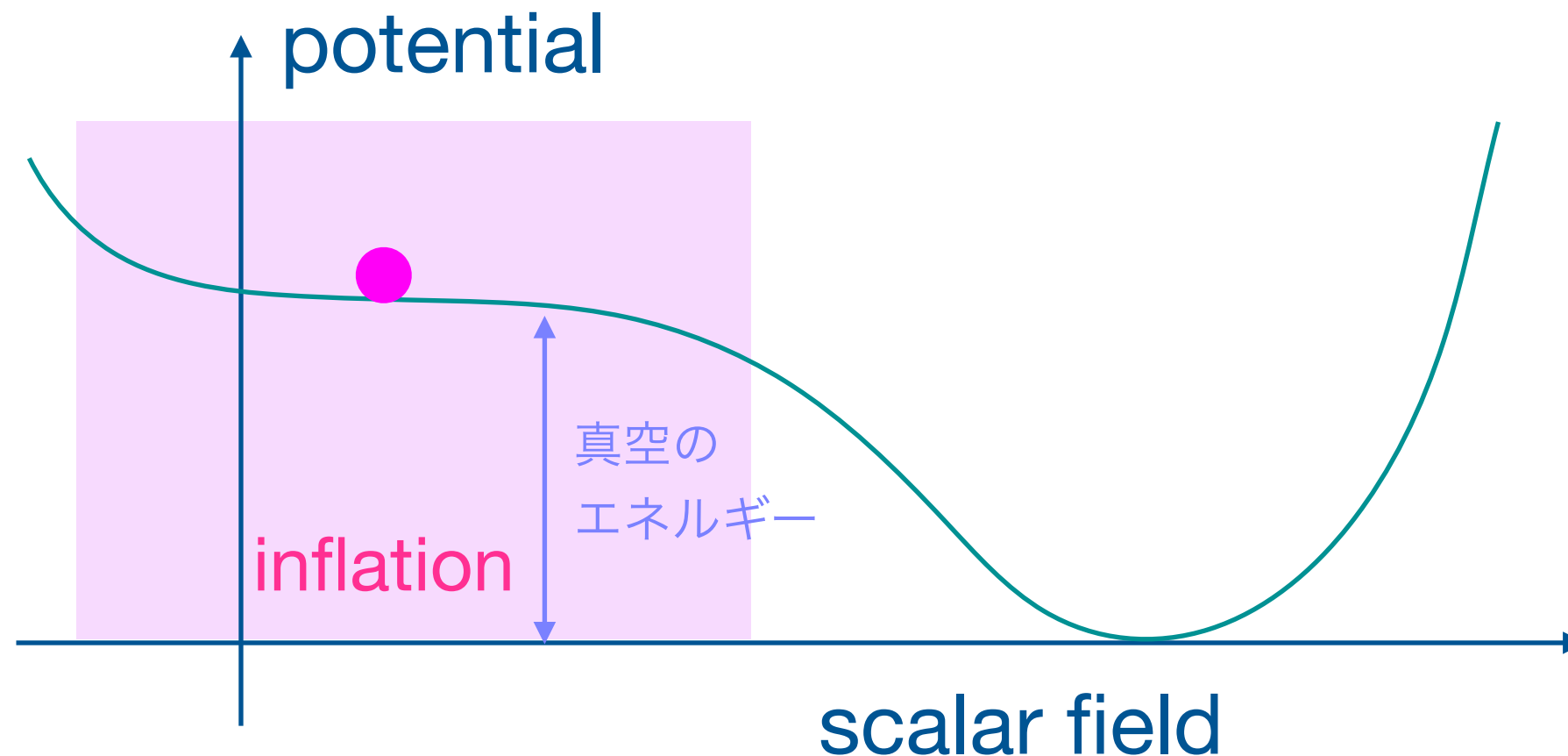
2.1 地平線問題の解決

- A、Bの2点はインフレーションによって急速に大きき引き離されたことを考慮すると、過去においては因果関係があった



2.2 スローロール・インフレーション

- 平坦なポテンシャルをゆっくり運動するインフラトン場によってインフレーションが実現される
= スローロール・インフレーション (Slow-Roll inflation)
- ポテンシャルの形によって様々なモデルが提唱



2.3 インフレーションによる密度揺らぎの生成

- インフラトン場の量子ゆらぎはインフレーション中に引き延ばされて長波長の古典的な揺らぎになる

$\delta\phi$ 量子ゆらぎ (振動) $\longrightarrow$ $\delta\phi$ 古典的揺らぎ (振動しない)
インフレーション

- 宇宙の場所ごとにインフラトン場がわずかに異なる値

$$\phi(t, \vec{x}) = \phi(t) + \delta\phi(t, \vec{x})$$

$$\delta\phi(t, \vec{x}) \simeq \frac{H_{\text{inf}}}{2\pi}$$

$$H_{\text{inf}} = \sqrt{8\pi G\rho_V/3}$$

inflation中のハッブルパラメター

- 密度揺らぎの生成 $\longrightarrow$ 宇宙の構造の形成

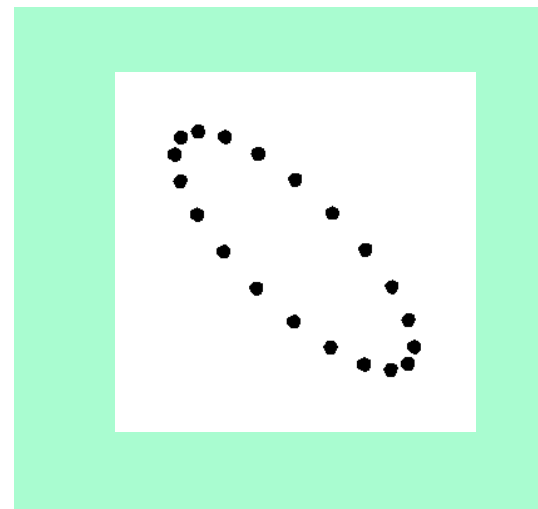
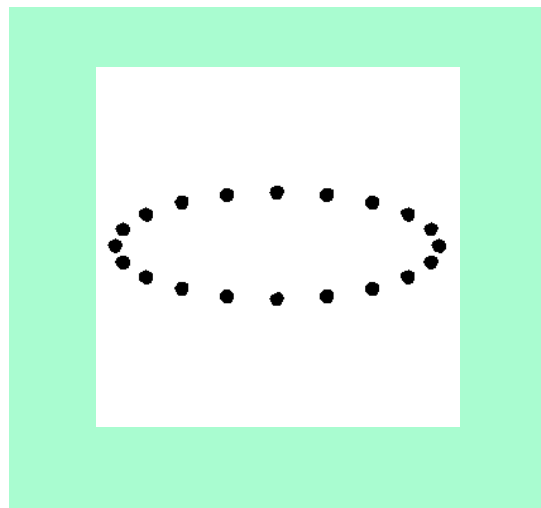
2.4 重力波の生成

- スカラー場と同様に重力子 (graviton) も揺らぎを獲得し、重力波 (空間が伸び縮みする波) が生成される

$$h_{ij}(t, z) = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{i\omega(t-z)}$$

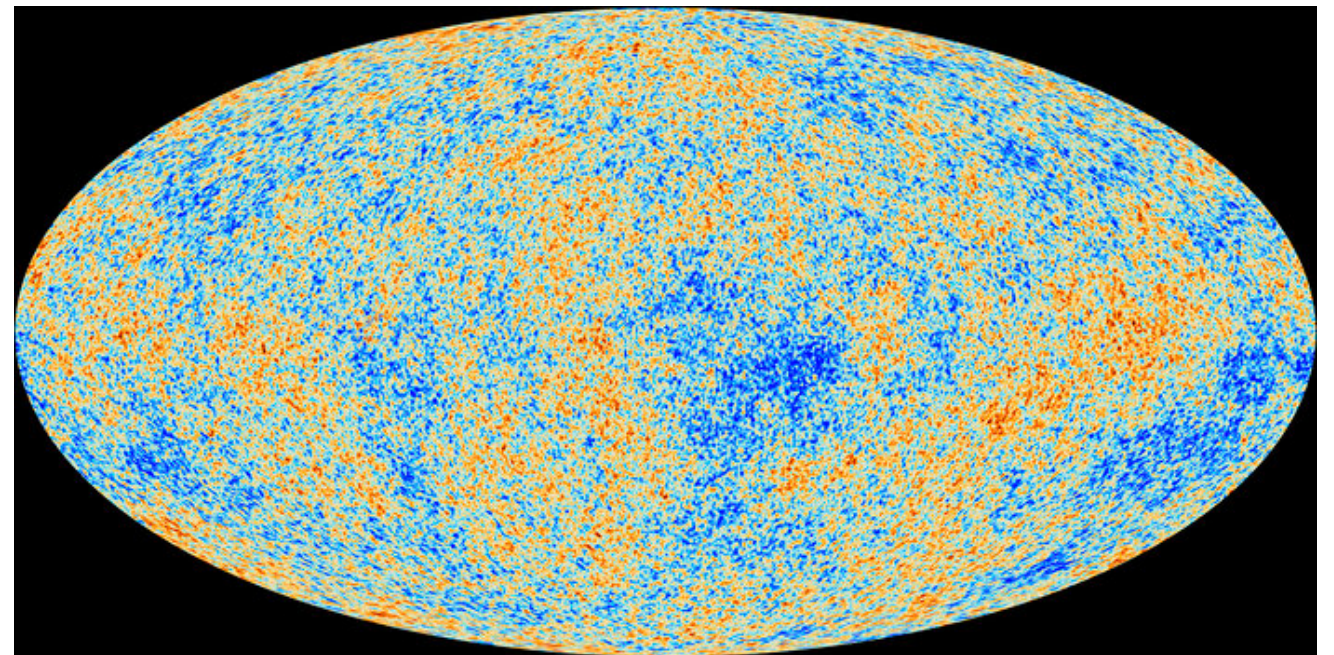
$$h_{+, \times} \sim \sqrt{G} H_{\text{inf}}$$

- 2つの独立なモード (+モードとXモード)



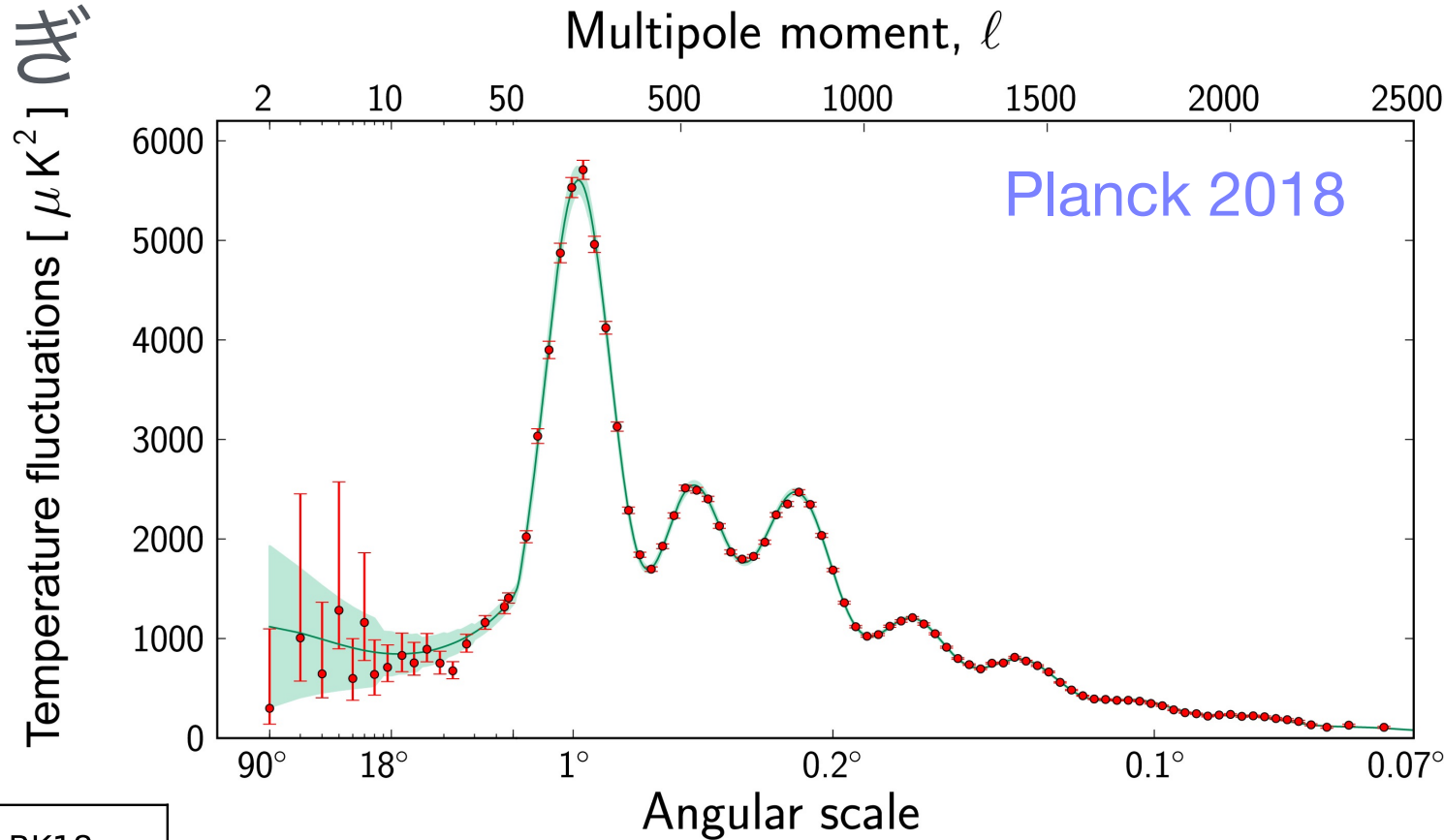
2.5 宇宙背景放射の温度揺らぎ

- 宇宙背景放射：再結合時 (約38万年) に放出された光
- プランク分布 → 温度で光の強度が決まる
- 密度揺らぎ (+ 重力ポテンシャル揺らぎ) → 温度の揺らぎ
- 観測
角度ごとの揺らぎの大きさ
(数学的にはフーリエ変換
球面上なので球面調和関数で
展開) を測定



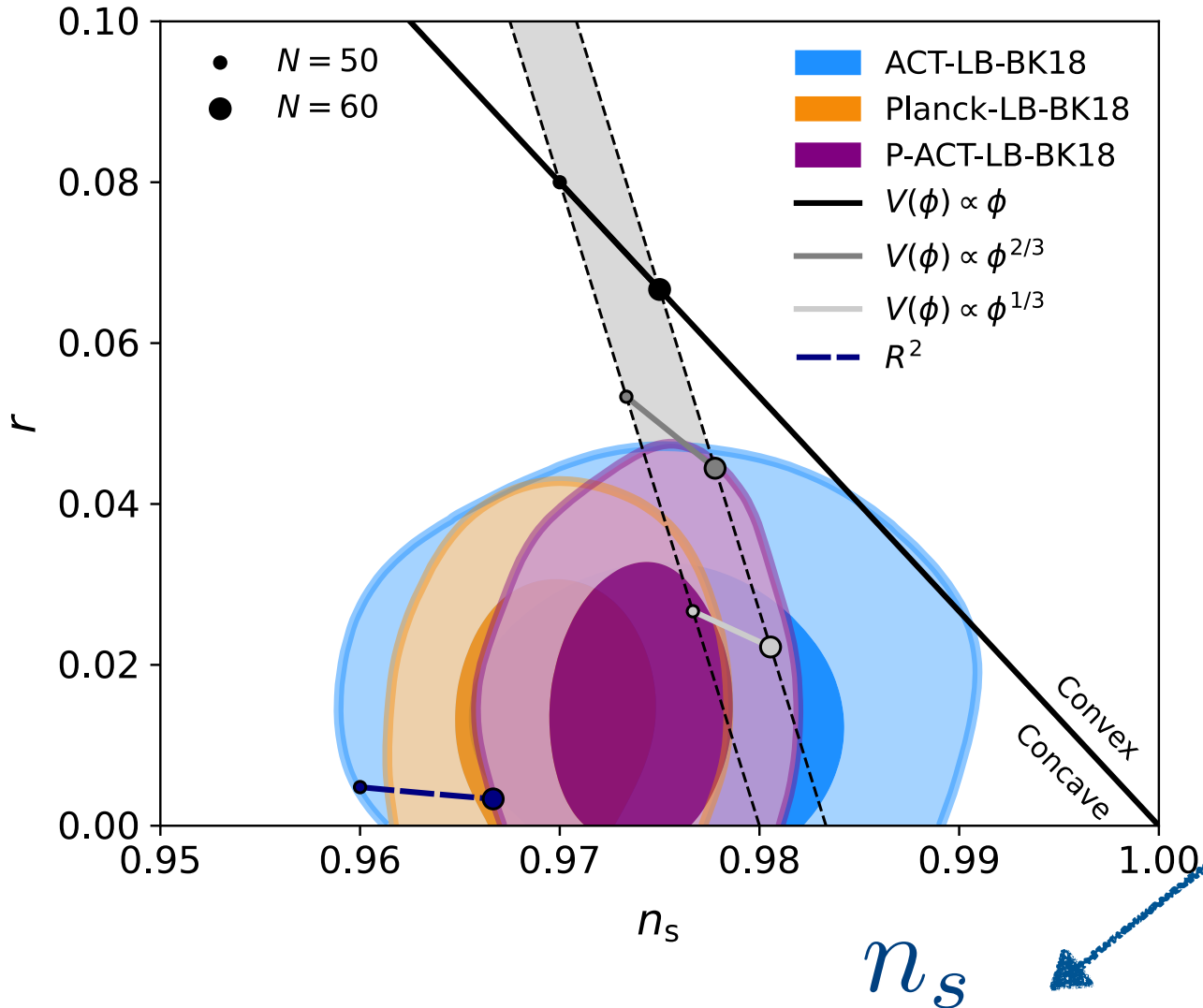
2.5 宇宙背景放射の温度揺らぎ

- WMAP Planckの結果
- Inflationの予言と一致



ACT (2025)

重力波の大きさ(r)



- 重力波モードに上限
- inflationモデルを制限

Spectral index

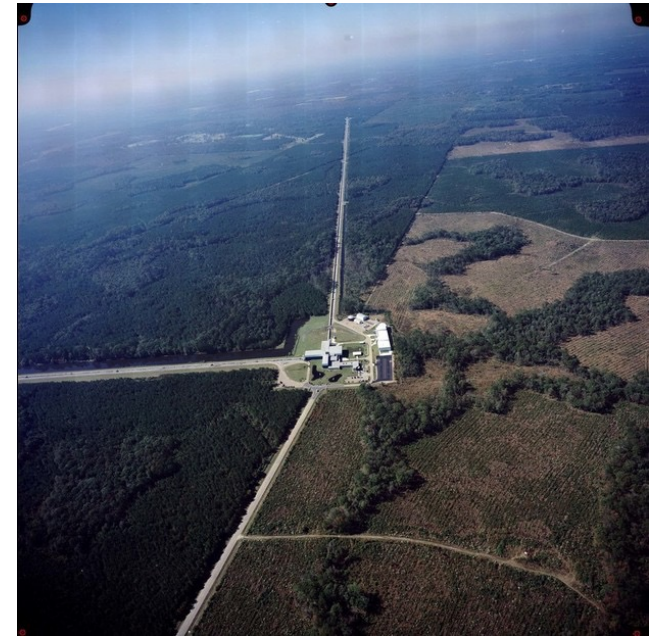
揺らぎのスケール依存性を表す
 $n_s = 1$ がスケール不変な揺らぎ

3. 原始ブラックホールと重力波の生成

- 2015年米国LIGOがBH-BH合体による重力波を史上初めて検出

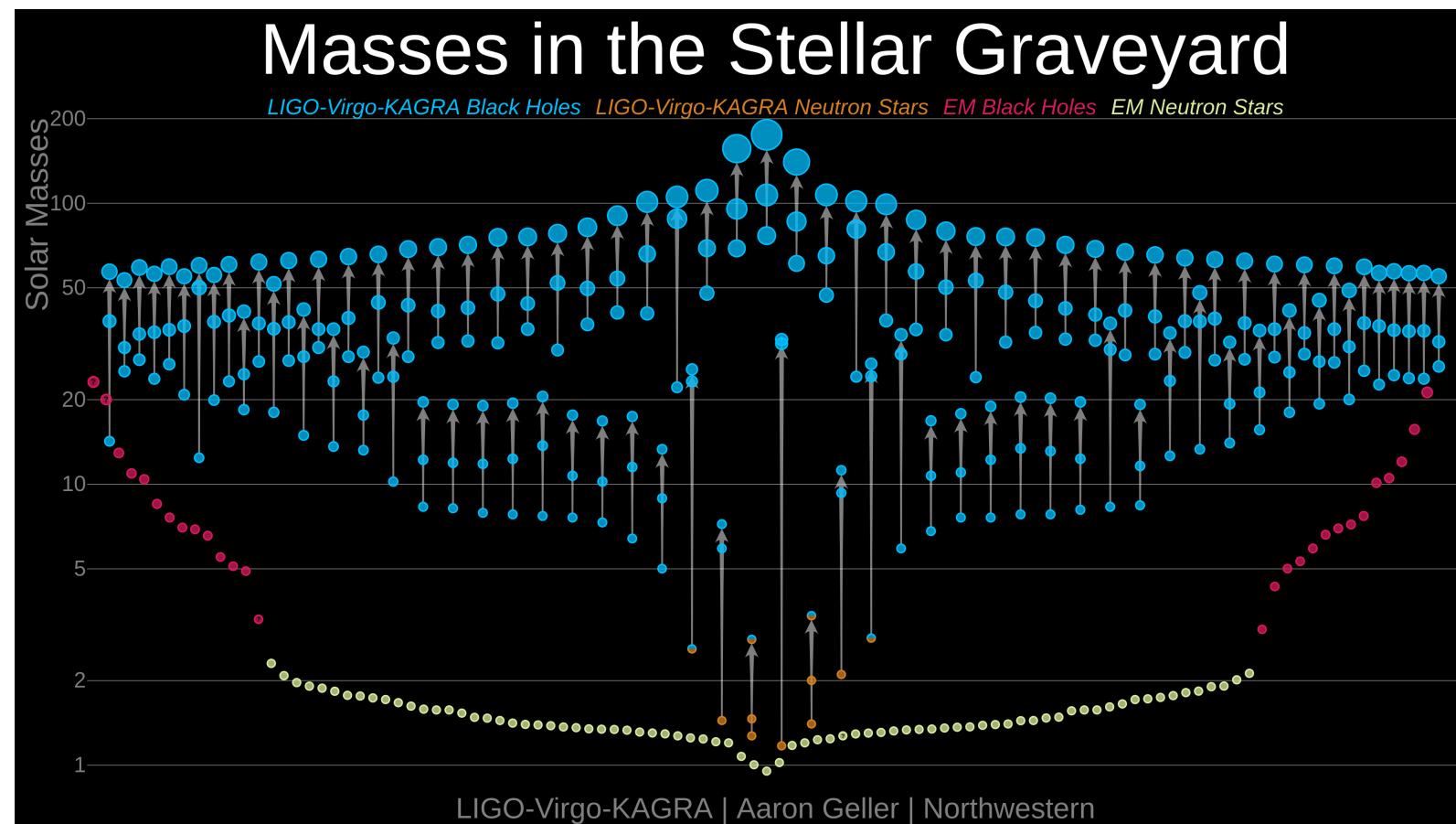
BH mass $\sim 30M_{\odot}$

- 大きな質量 ($\sim 30 - 50M_{\odot}$) でスピンの小さい
- 天体起源でないかもしれない



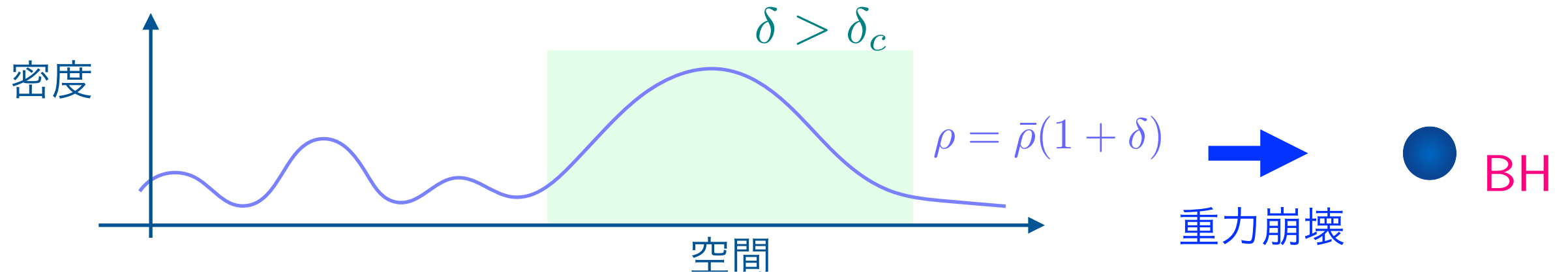
原始ブラックホール?

Hawking 1971



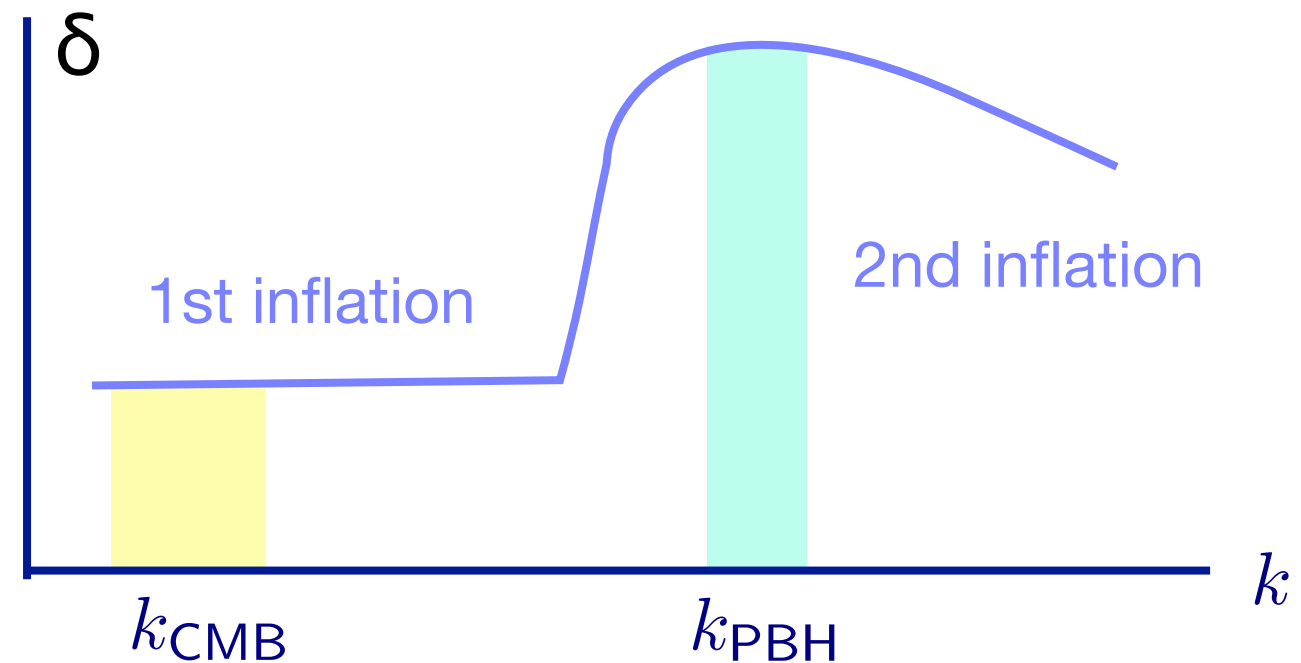
3.2 原始ブラックホール (Primordial BH)

- 大きな密度ゆらぎ δ (~ 0.4)の領域が重力崩壊してBHになる



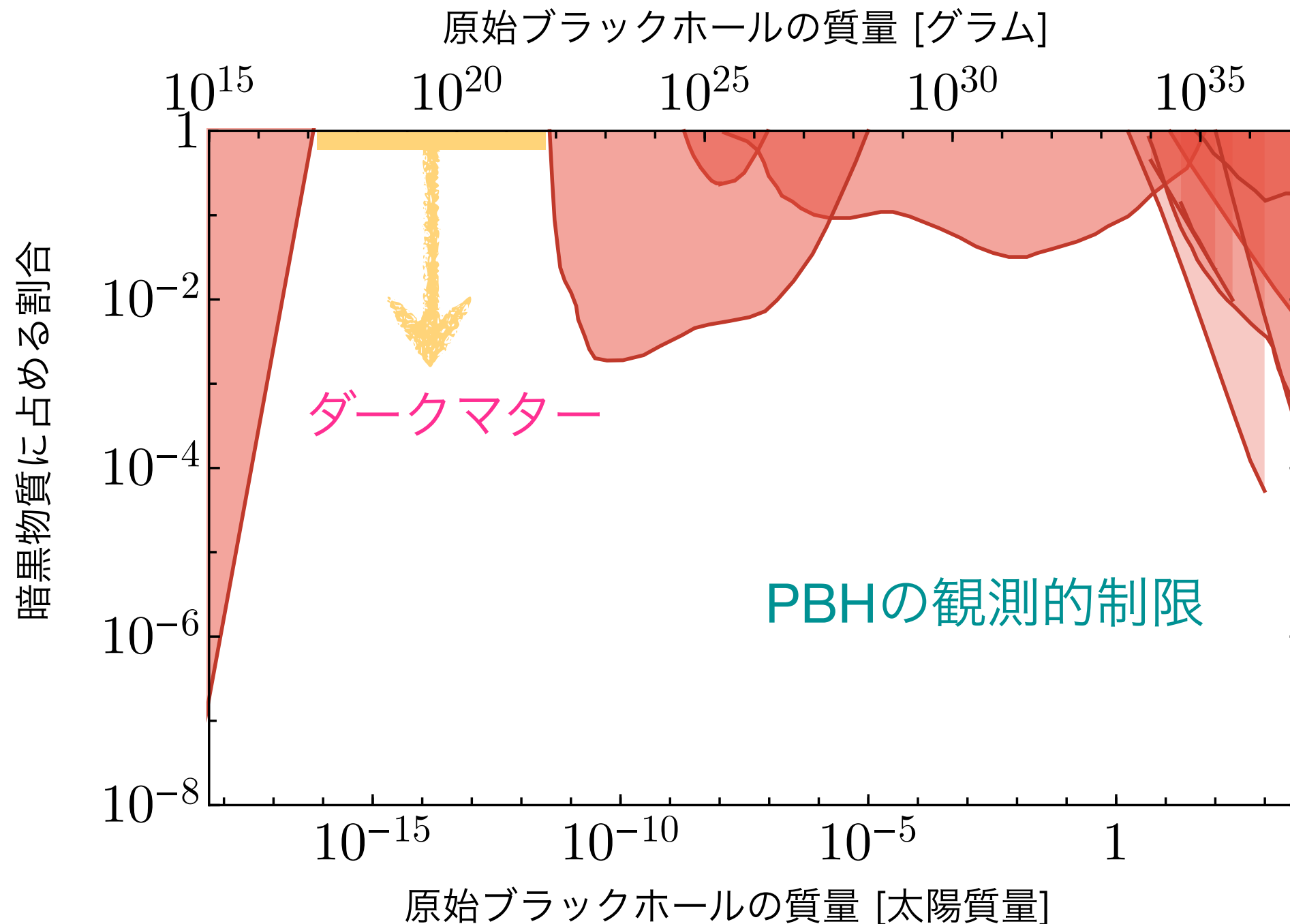
- インフレーションによって（小スケールで）大きなゆらぎが生成？
- インフレーションは一般にはスケール不変な揺らぎ
- スケール不変性を破るモデル
[理論的 challenge]

▶ マルチフィールド・
インフレーション模型



3.3 ダークマター候補としての原始ブラックホール

- 原始ブラックホールはダークマターかもしれない
- 質量が $10^{17}\text{g}-10^{22}\text{g}$ ($10^{-16}M_{\odot}-10^{-12}M_{\odot}$) のPBHがダークマターの可能性



3.4 原始ブラックホールの人体への影響

- ダークマターになっている原始ブラックホールが人体を貫いたら

- ブラックホールの半径=シュバルツシルト半径 $= 2GM/c^2$

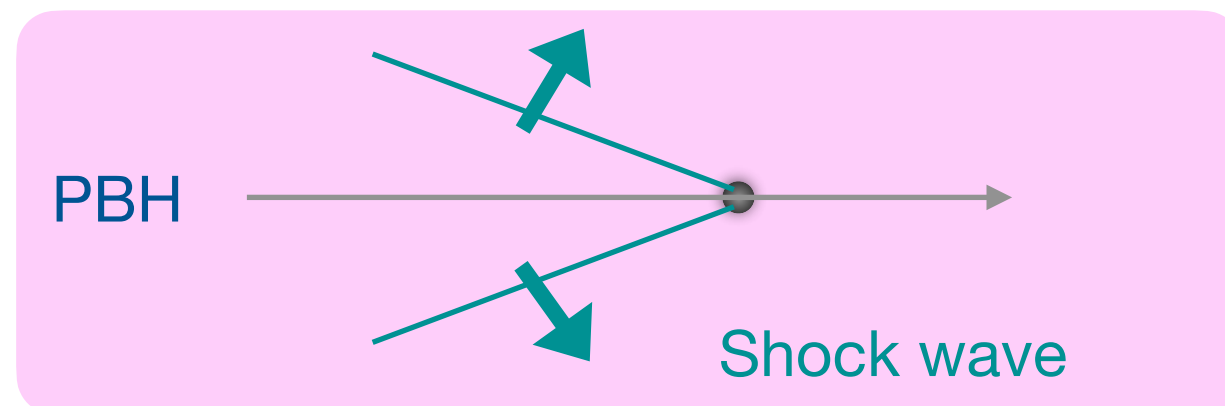
▶ $r_s = 1.5 \times 10^{-11} \text{ cm } (M/10^{17} \text{ g})$ 何の影響もなく通り抜けそう
原子のサイズ $\sim 10^{-18} \text{ cm}$

- ブラックホールに吸収される物質質量

▶ $\delta M = 7 \times 10^{-20} \text{ g } (M/10^{17} \text{ g})^2$ 無視できそう

- しかし、重力によって衝撃波が生じる R.J. Scherrer arXiv:2502.09734

▶ $M \gtrsim 10^{17} \text{ g}$ のPBHが衝突すると致命的な怪我を負う



3.4 原始ブラックホールの人体への影響

- 重力による潮汐力

- ▶ $M \gtrsim 10^{19-20} \text{g}$ のPBHによって脳細胞が破壊

- ▶ 潮汐力の効果はLarry NivenのSF小説 The hole man (1974)で指摘

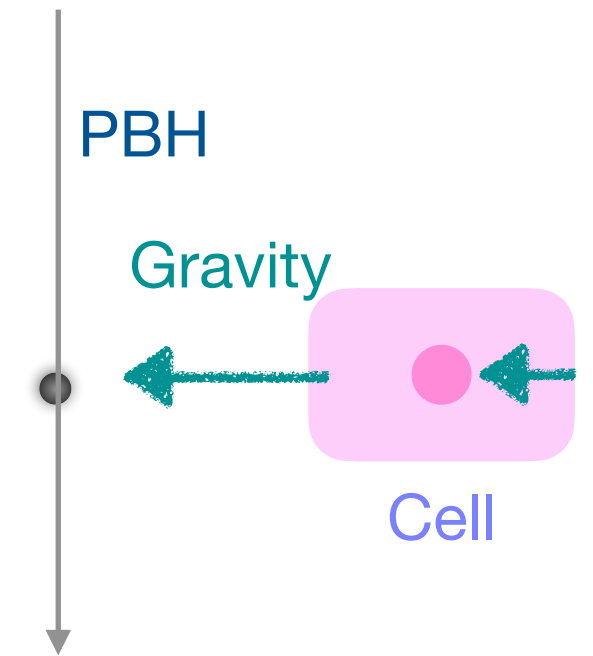
「... ブラックホールが形成され得た... 宇宙が始まるビッグバンのとき...
質量 10^{17} 乗グラム, 直径 10^{-11} センチ...

「... 原子よりずっと小さい。吸収は大したことない。
チルドレイを殺したのは, その質量が通り抜けたときの
潮汐作用なんだ。...

(「ホール・マン」小隅黎訳ハヤカワ文庫)

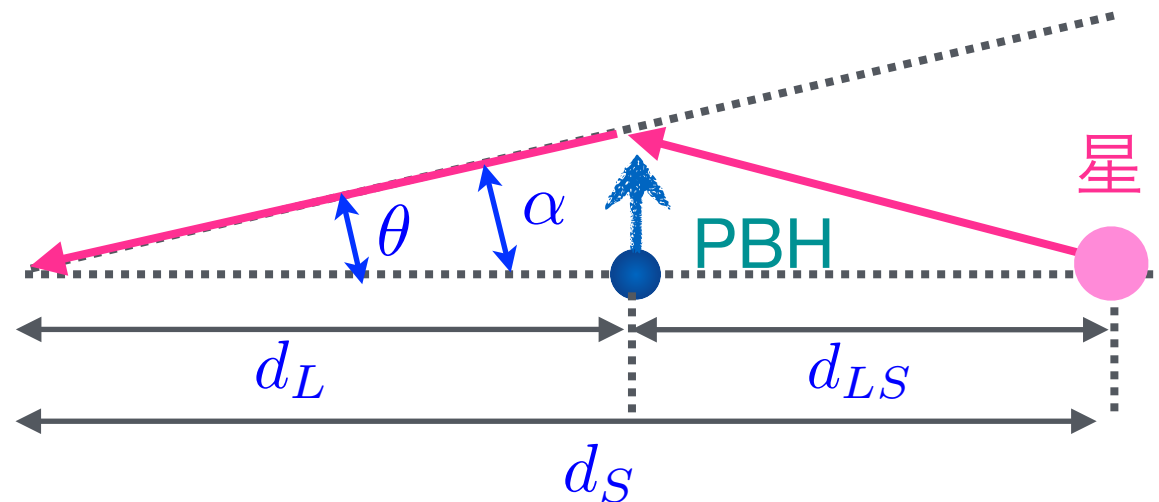
- 1年間で地球上の人間誰かにPBHが衝突する確率

$$P \sim 4 \times 10^{-15} (M/10^{17} \text{g})^{-1}$$



3.5 重力マイクロレンズ効果

- 星の光は重力で曲げられる（重力レンズ効果）



- PBHが視線方向を横切るとき背後の星の光が増光（マイクロレンズ）
- 増光が起こる典型的な時間スケール

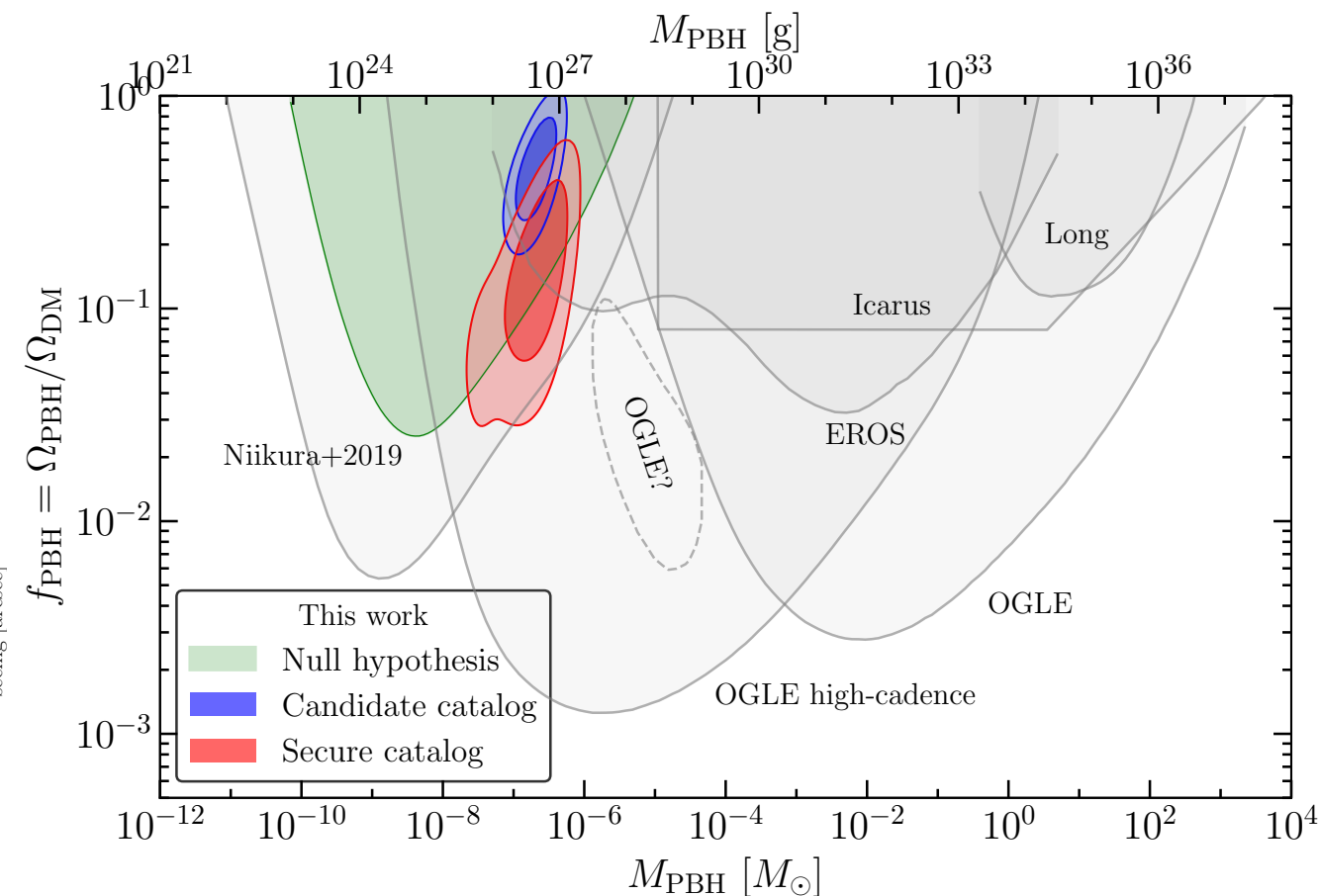
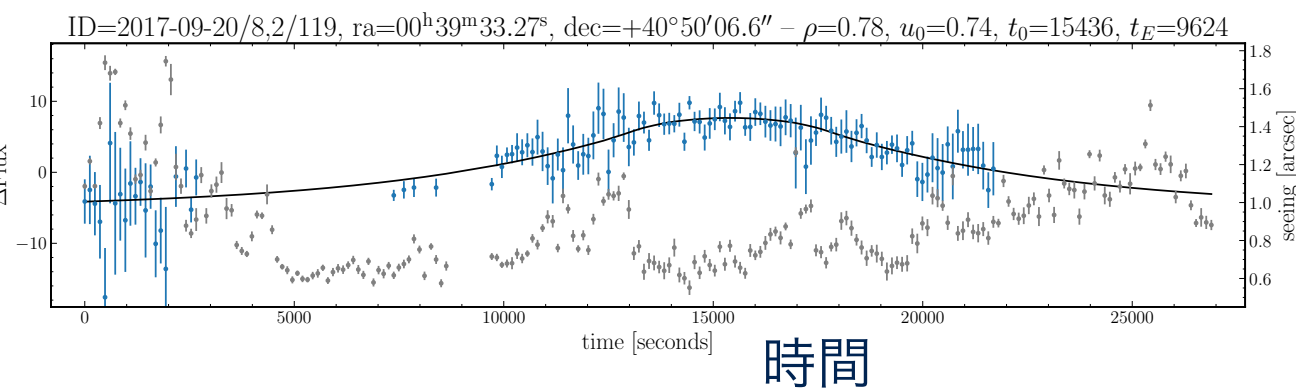
$$t_E \simeq 34 \text{ min} \left(\frac{M}{10^{-8} M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{d_L}{100 \text{ kpc}} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{200 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

- マイクロレンズ効果を使ってPBHを探すことができる

3.5 重力マイクロレンズ効果

- MACHO, EROS, OGLEグループによってPBHの存在量に制限
- Subaru望遠鏡を用いてアンドロメダ銀河の星を観測
 - ▶ 2026年2月に12個のマイクロレンズ候補を報告
 - ▶ 質量は $10^{-7}M_{\odot}$ – $10^{-6}M_{\odot}$ のPBHの可能性？
 - ▶ ダークマターの10%程度

フラックス



Sugiyama et al arXiv:2602.05840

まとめ

- ビッグバン宇宙モデルは宇宙が誕生して約1秒から現在までの宇宙の様子を正しく記述することに成功
- インフレーション宇宙モデルでは、誕生直後 (約 10^{-36} 秒)に急激な宇宙膨張が起こり、その後熱い宇宙（ビッグバン）が実現される。
- インフレーション宇宙は地平性問題などを解決し、宇宙の密度揺らぎの起源を説明する。
- インフレーション宇宙で予言される揺らぎは、宇宙背景放射の観測によって、検証されつつある。
- 大きな密度揺らぎからは原子ブラックホールが制せられる可能性があり、ダークマターになっている可能性もある。