

次世代電波望遠鏡  
による  
宇宙論の新展開

高橋慶太郎  
熊本大学

2014年7月29日

# 目次

- 1、標準宇宙モデル
- 2、Square Kilometre Array
- 3、暗黒エネルギー
- 4、宇宙再電離
- 5、原始ゆらぎの非ガウス性
- 6、まとめ

# 1、標準宇宙モデル

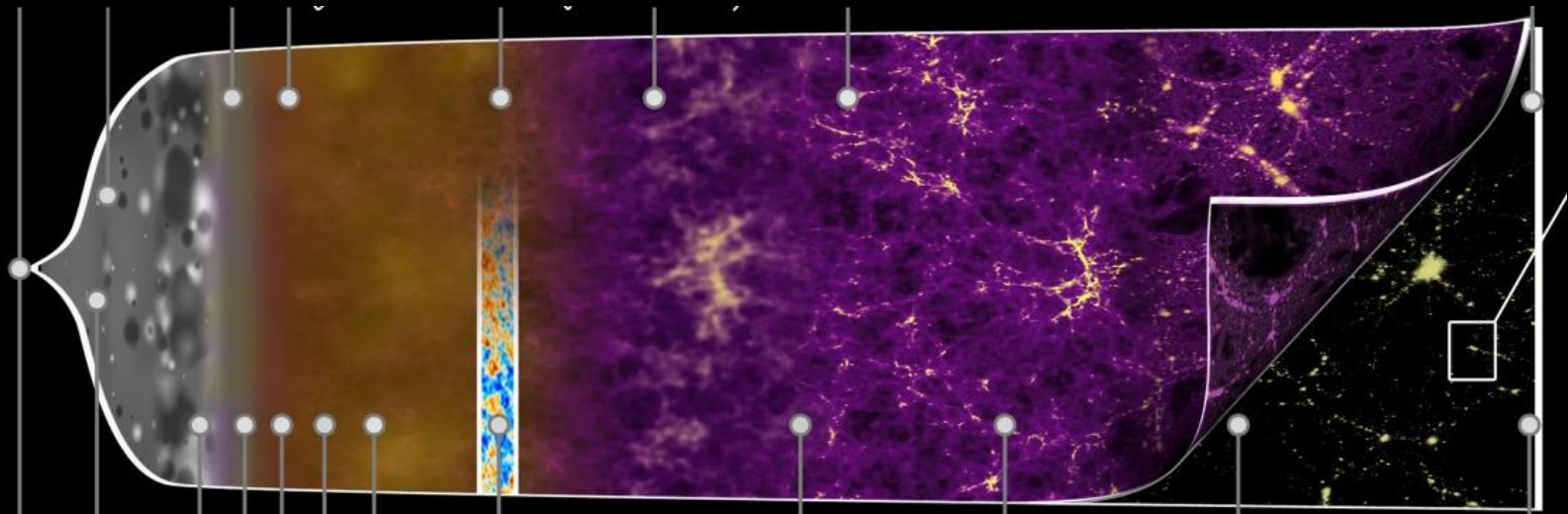
# 標準宇宙モデル

Planck HP

インフレーション

初代天体形成

晴れ上がり



暗黒時代

ビッグバン元素合成

暗黒エネルギー

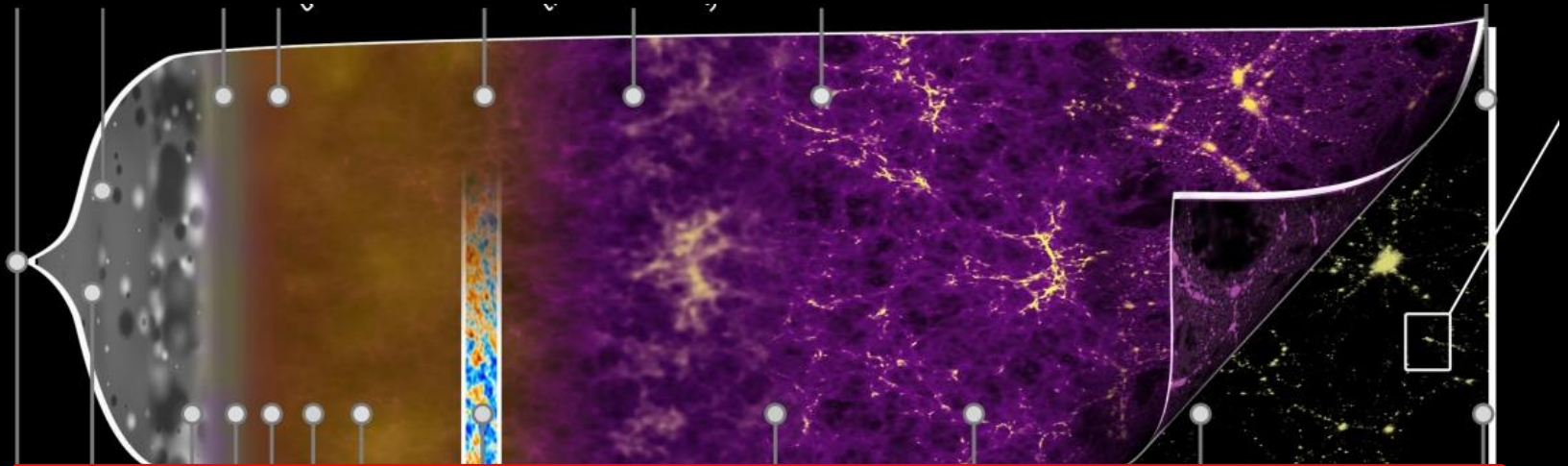
# 標準宇宙モデル

Planck HP

インフレーション

晴れ上がり

初代天体形成



- ・平坦な宇宙
- ・インフレーションによる原始ゆらぎの生成
- ・暗黒物質による構造形成
- ・宇宙定数による加速膨張

ヒ

ギー

# $\Lambda$ CDM model

## 宇宙論パラメータ

Parameter	Best fit	68% limits
$\Omega_b h^2$ . . . . .	0.022068	$0.02207 \pm 0.00033$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	0.12029	$0.1196 \pm 0.0031$
$100\theta_{MC}$ . . . . .	1.04122	$1.04132 \pm 0.00068$
$\tau$ . . . . .	0.0925	$0.097 \pm 0.038$
$n_s$ . . . . .	0.9624	$0.9616 \pm 0.0094$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	3.098	$3.103 \pm 0.072$

Planck only

これだけでほぼ全ての観測結果が説明できる

# 宇宙論パラメータ

## 密度ゆらぎの初期条件

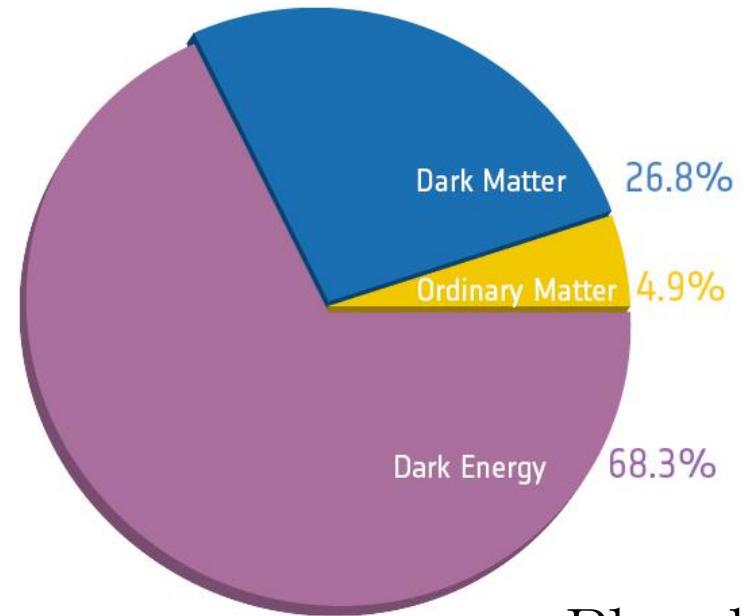
- $A \sim 10^{-9}$  : 大きさ
- $n_s \sim 0.96$  : スペクトル

## 宇宙の構成と膨張

- $\Omega_c \sim 0.27$  : 暗黒物質
- $\Omega_b \sim 0.05$  : バリオン
- $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_c - \Omega_b \sim 0.7$  : 宇宙定数
- $H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$  : 現在の宇宙膨張速度

## 再イオン化

- $z_{\text{re}} \sim 10$  : 再イオン化の時期



Planck



# 宇宙論の観測

宇宙背景放射

Ia型超新星

銀河分布

弱い重力レンズ





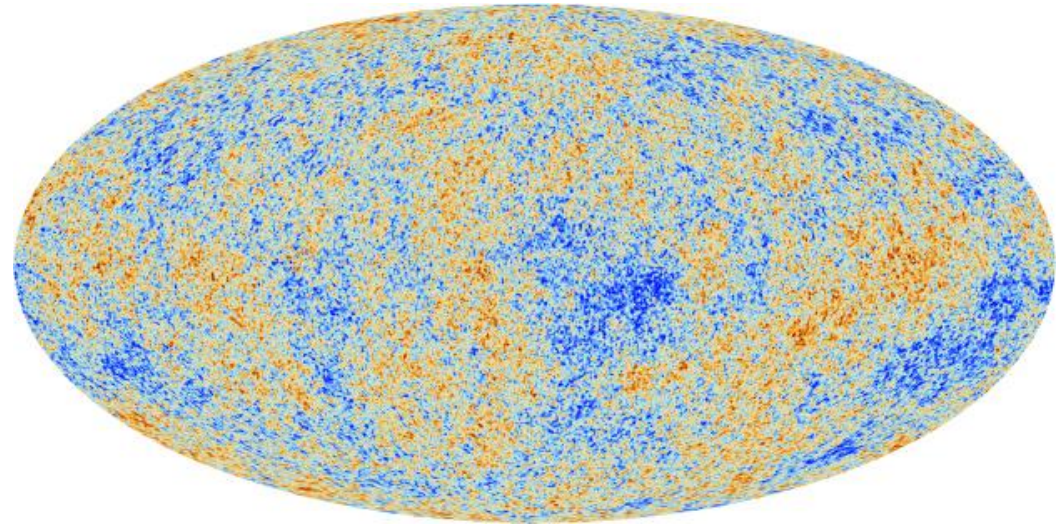
# 宇宙論の観測

## 宇宙背景放射

Ia型超新星

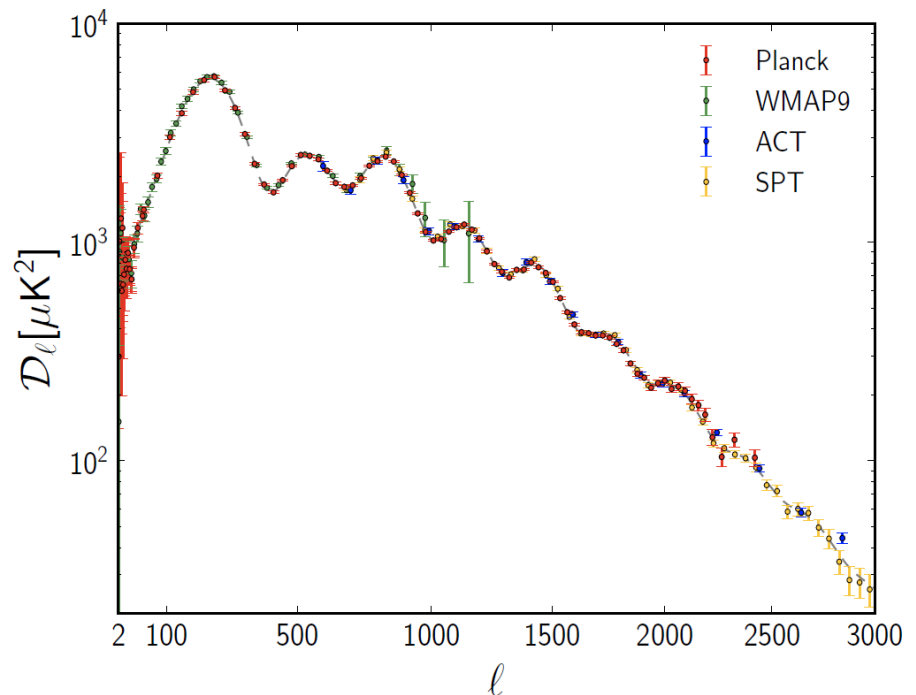
銀河分布

弱い重力レンズ



- 宇宙論の要
- 宇宙誕生後40万年のゆらぎの様子
- ゆらぎの初期条件 + 宇宙論的摂動論
- WMAP → Planck
- foregroundが問題

Planck



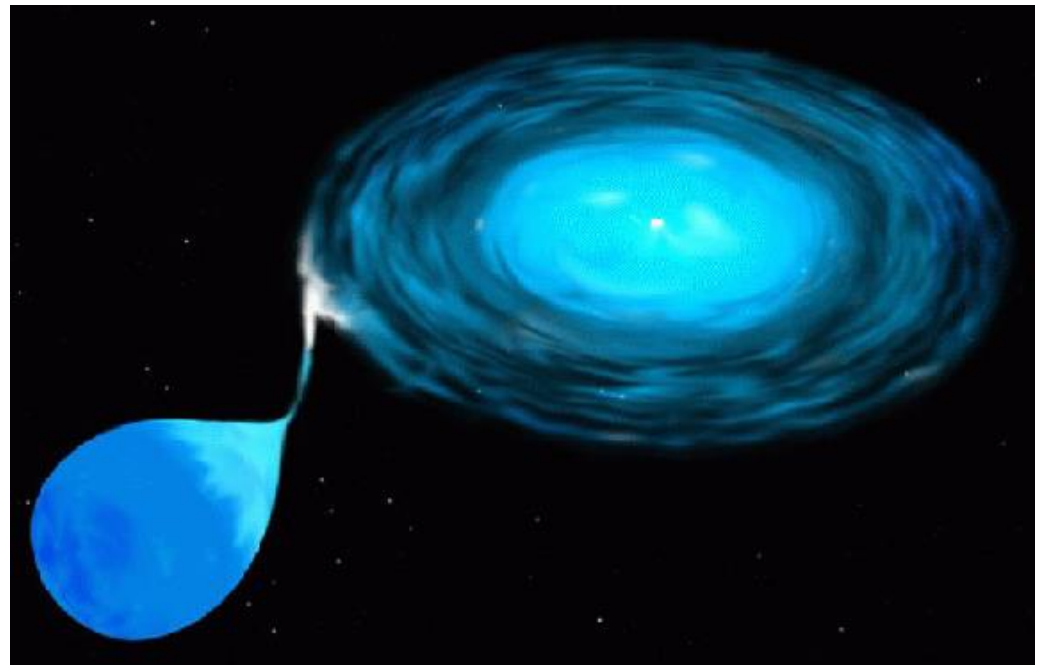
# 宇宙論の観測

宇宙背景放射

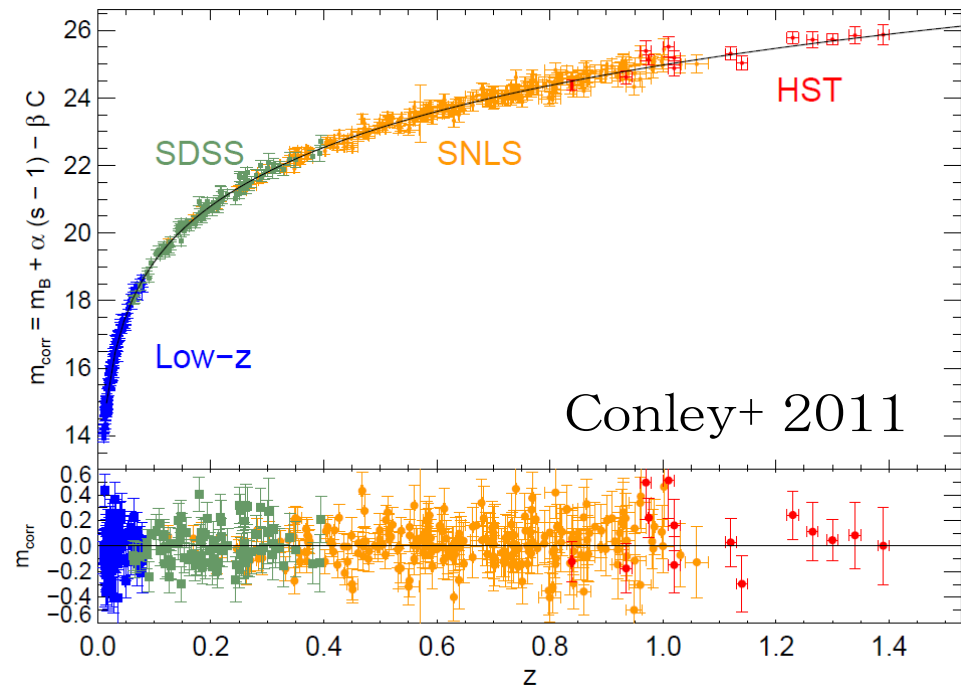
Ia型超新星

銀河分布

弱い重力レンズ



- $z = 0 \sim 1.5$ の宇宙膨張の進化
- 加速膨張を示唆  
→ 暗黒エネルギー
- systematicsが鍵



# 宇宙論の観測

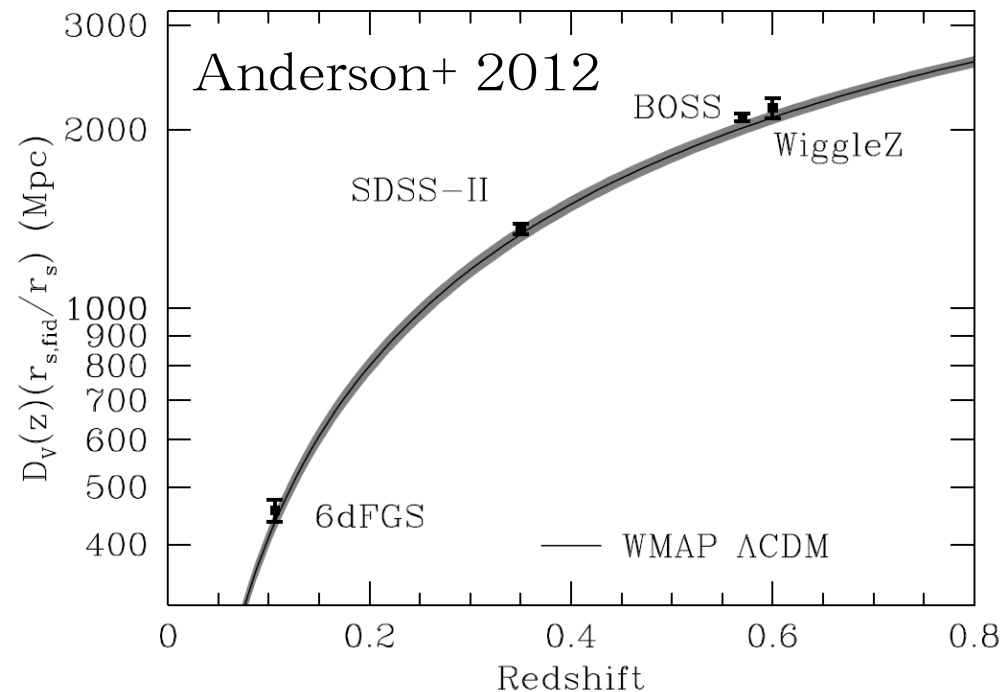
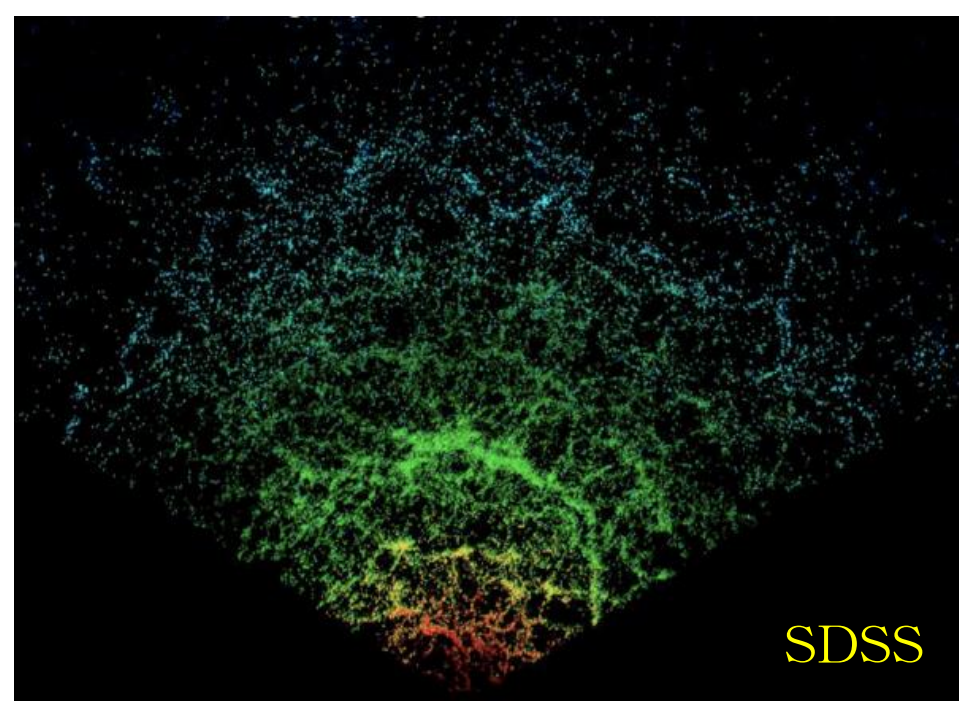
宇宙背景放射

Ia型超新星

銀河分布

弱い重力レンズ

- ・ 暗黒物質分布を測る
- ・ バリオン音響振動  
→ 角径距離
- ・ パワースペクトル  
→ ゆらぎの進化
- ・ 赤方偏移空間歪み  
→ 速度場
- ・ 今後大規模化



# 宇宙論の観測

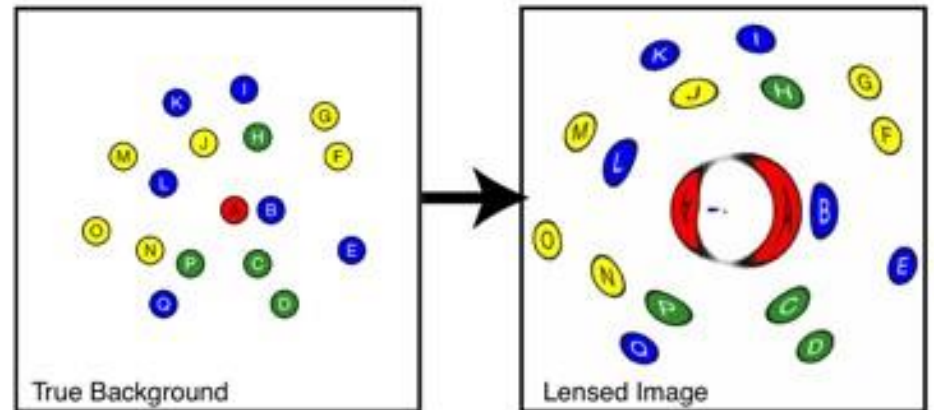
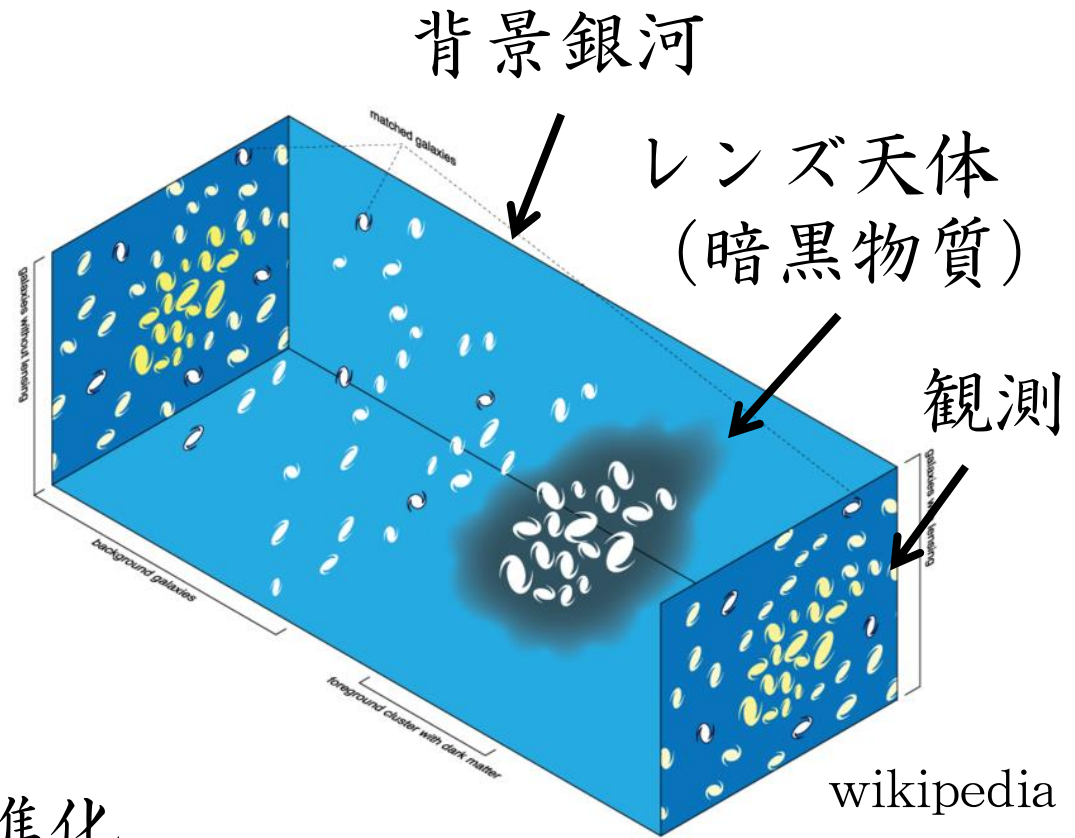
宇宙背景放射

Ia型超新星

銀河分布

弱い重力レンズ

- ・ 暗黒物質による銀河像の歪み
- ・ 宇宙膨張とゆらぎ進化
- ・ 観測が進みつつあり  
今後の大規模化で  
将来有望





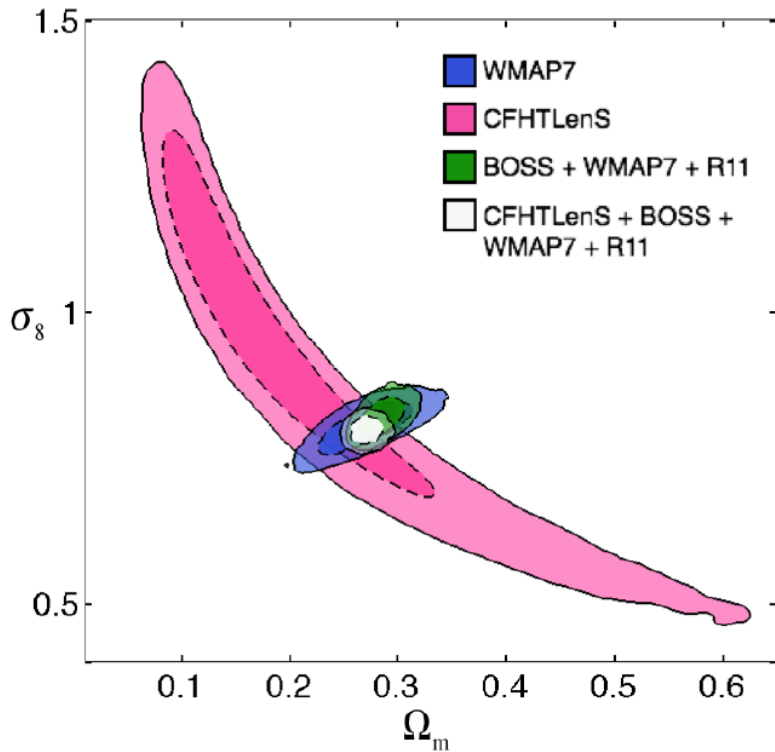
# 宇宙論の観測

宇宙背景放射

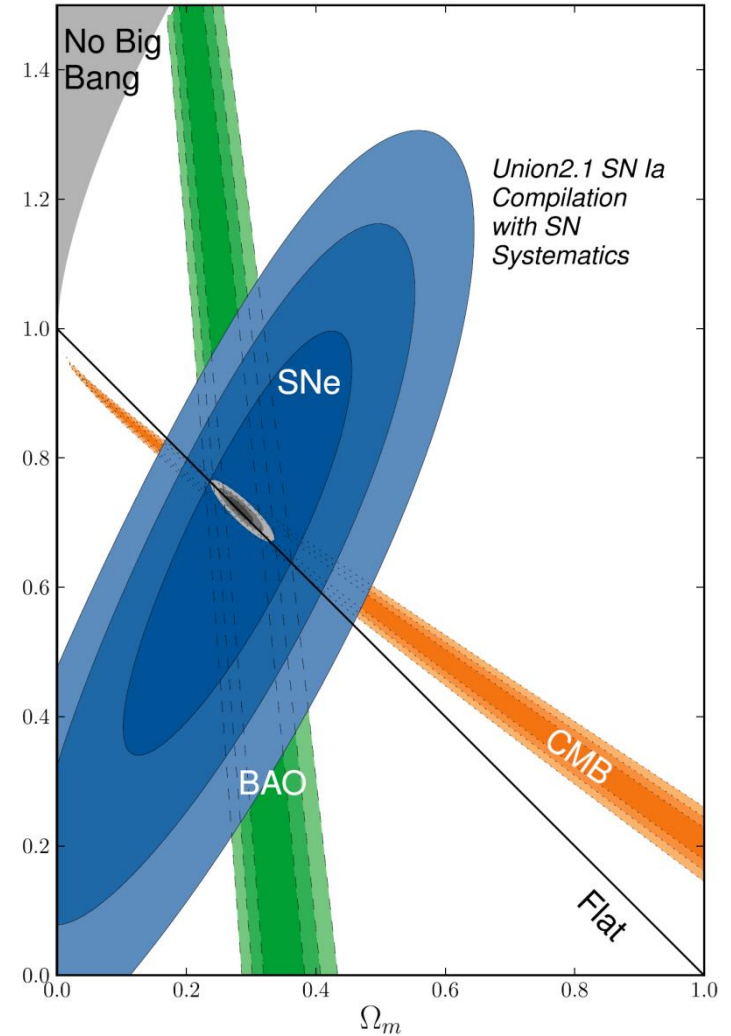
Ia型超新星

銀河分布

弱い重力レンズ

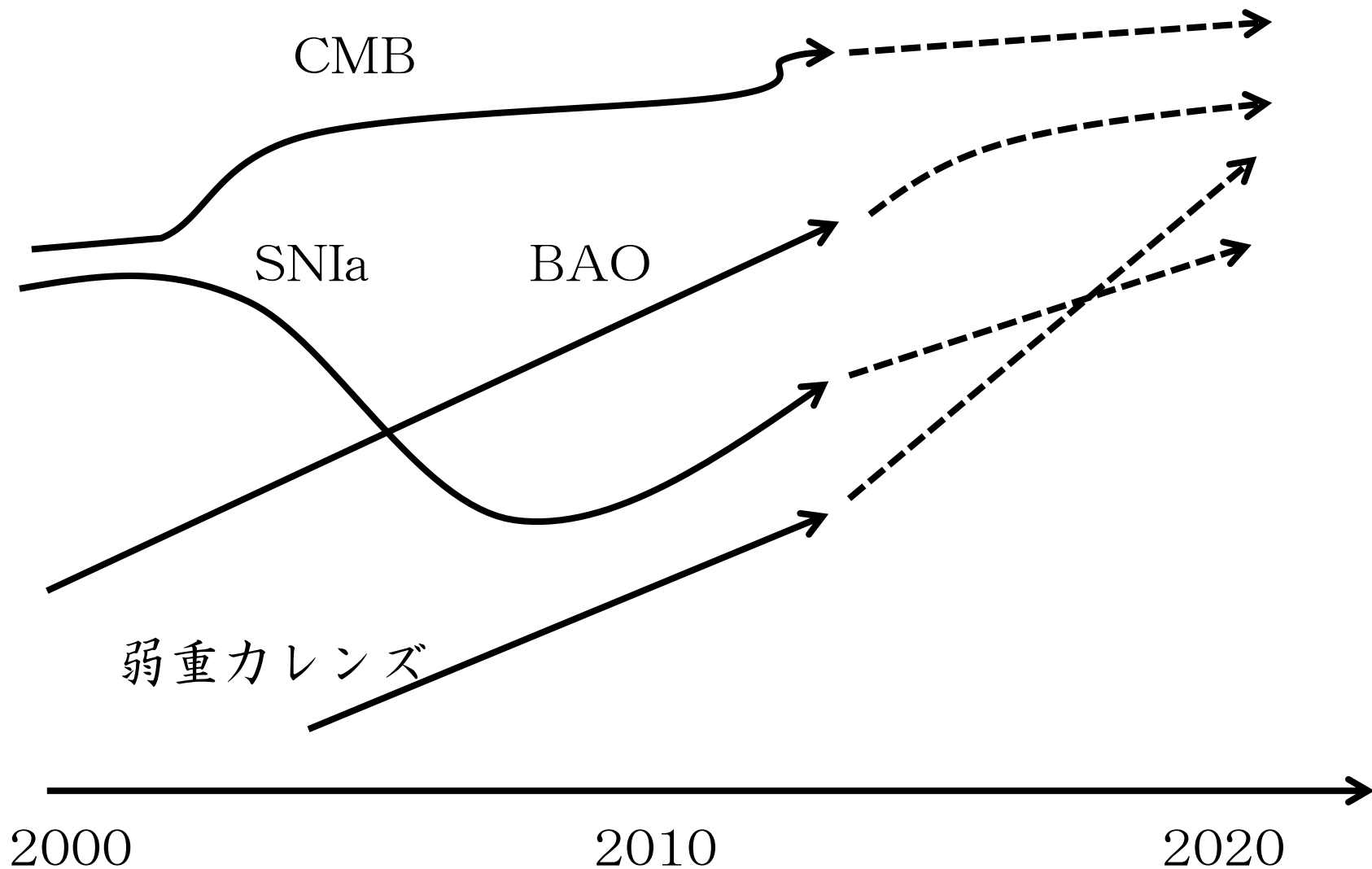


Heymans+ 2013

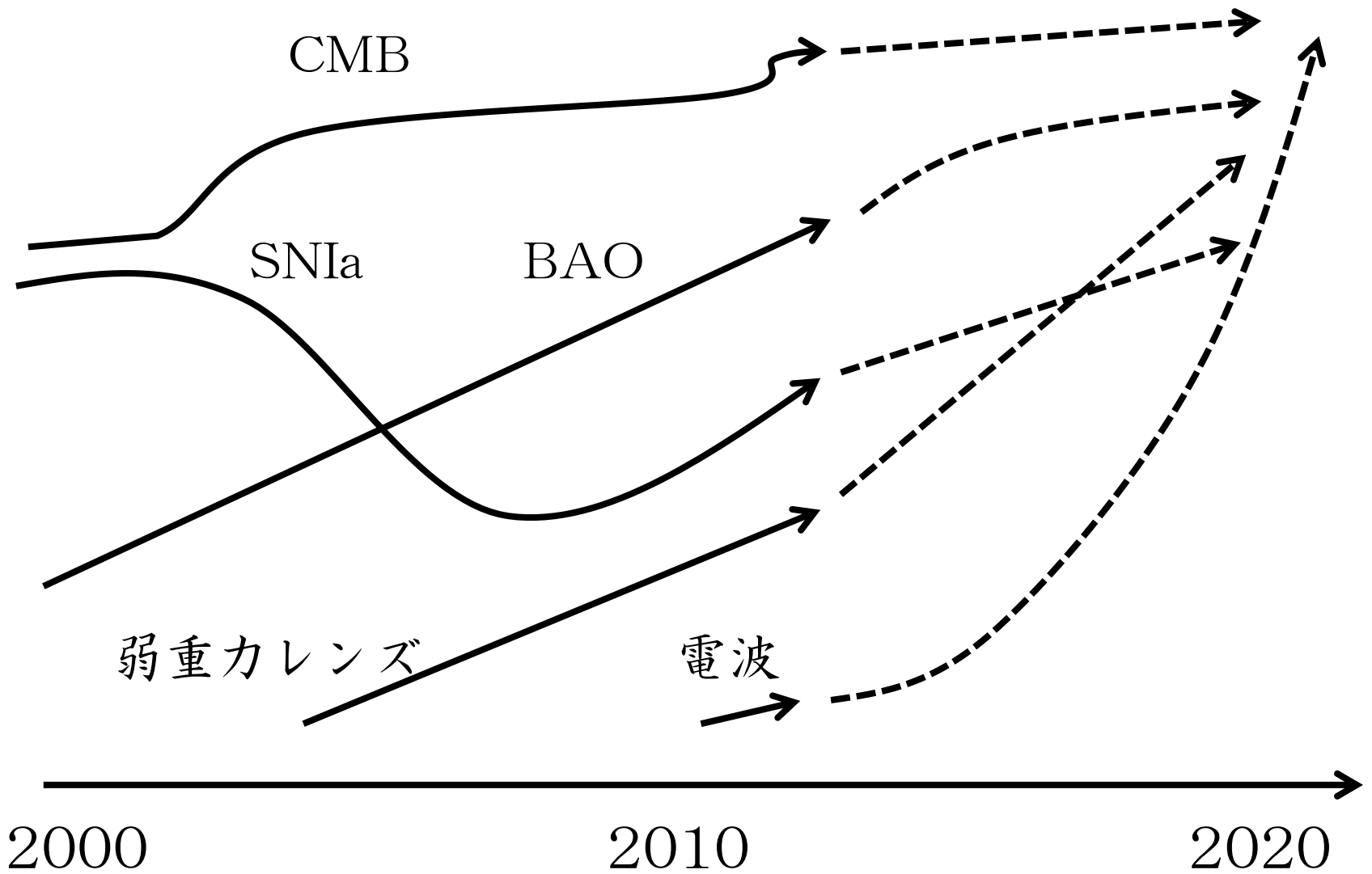


supernova cosmology project 2011

# 宇宙論の観測



# 宇宙論の観測





# 宇宙論：6つの重要問題

暗黒エネルギー（修正重力理論）

暗黒物質

ニュートリノ質量

原始密度ゆらぎの非ガウス性

背景重力波

宇宙再電離

# 宇宙論：6つの重要問題

暗黒エネルギー（修正重力理論）

暗黒物質

ニュートリノ質量

原始密度ゆらぎの非ガウス性

背景重力波

宇宙再電離

## 2、Square Kilometre Array

# Square Kilometer Array



次世代大型センチ波望遠鏡

規模：1平方キロ！

帯域：50MHz-10GHz

特徴：高感度・広帯域・広視野・高分解能

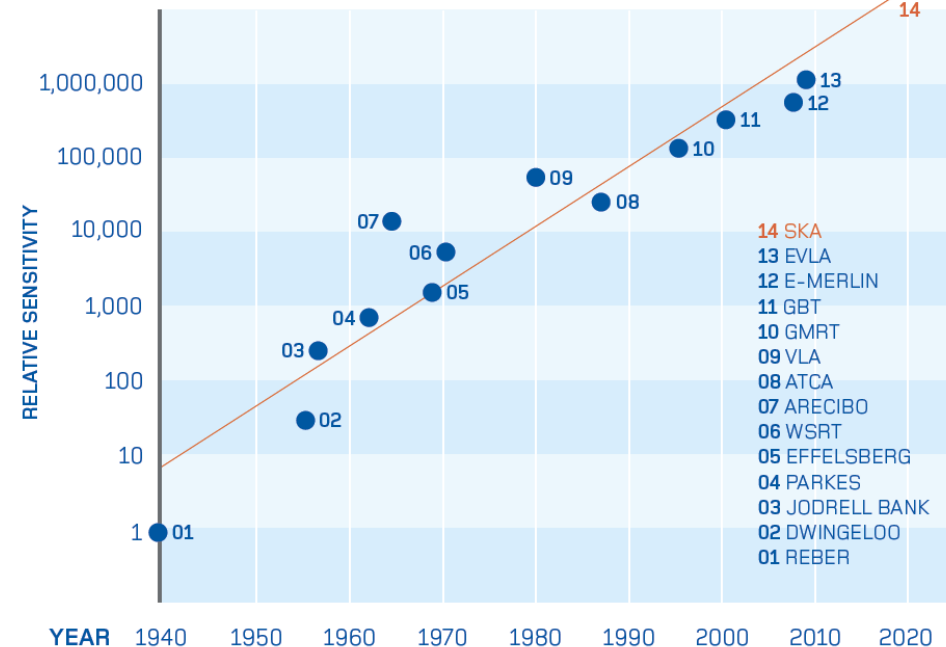
場所：オーストラリア・南アフリカ

→ 電波源の数：100倍

感度：JVLA×40

サーベイ速度：1万倍

RADIO TELESCOPE SENSITIVITY

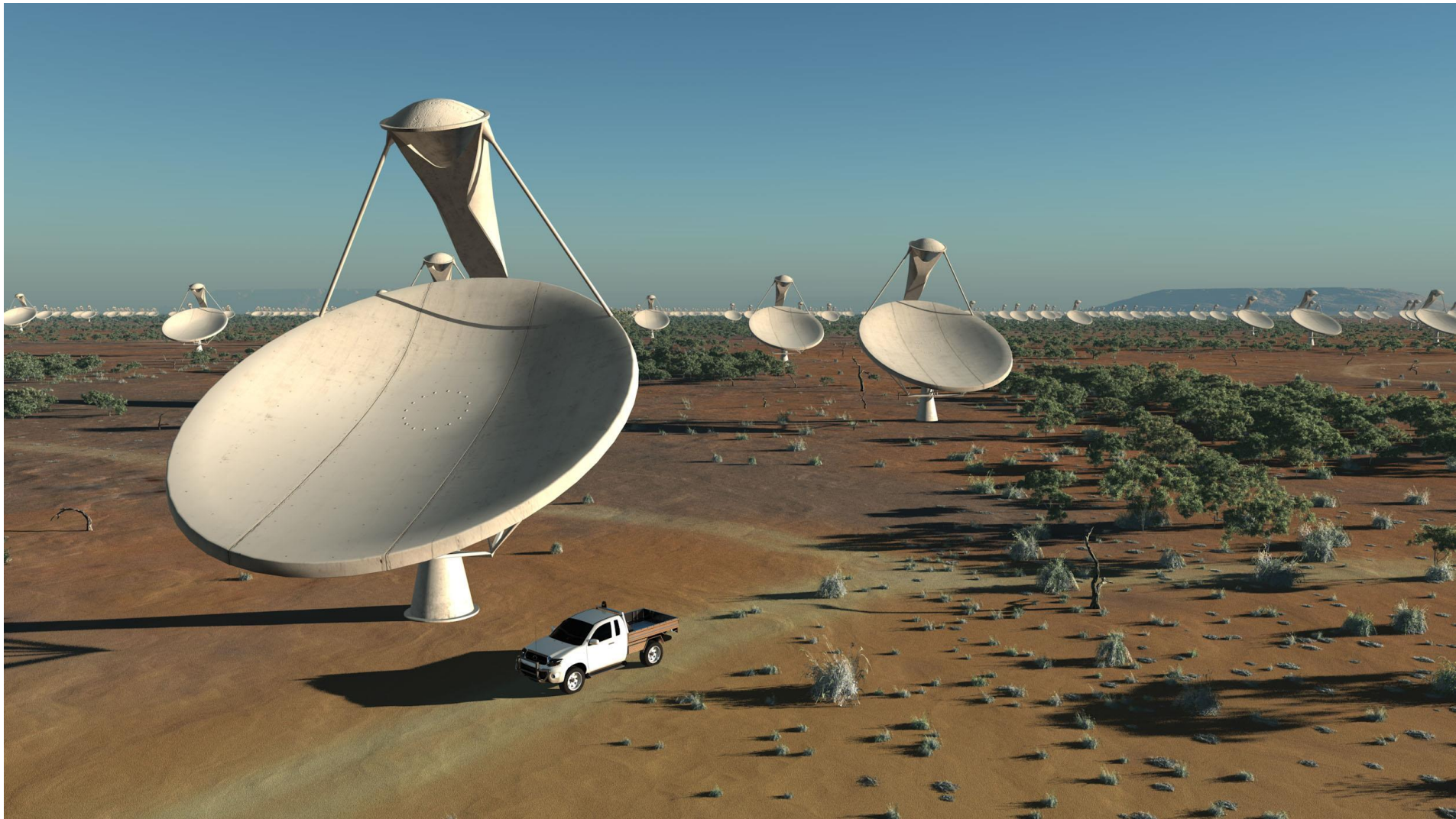


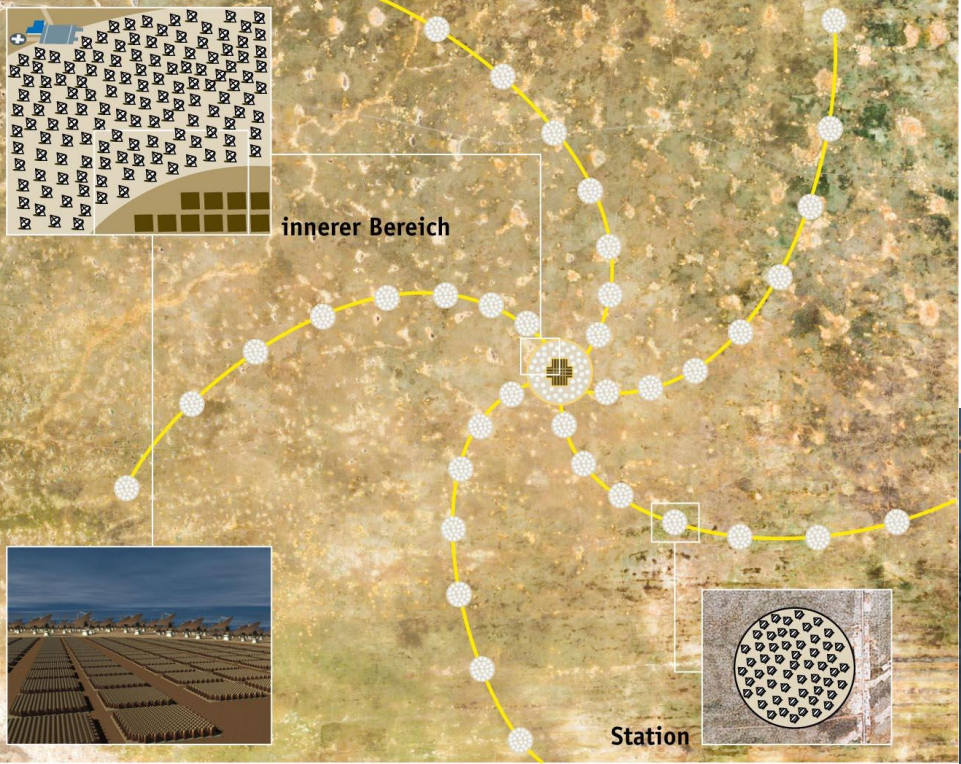


of an inner core and outer stations arranged in a log-  
extending to distances of up to 3 000 km on the right side.  
ceiving elements, dishes and phased array technology will  
e the SKA versatile, flexible and cost-effective.









# SKA CORE AND STATIONS ACROSS AFRICA

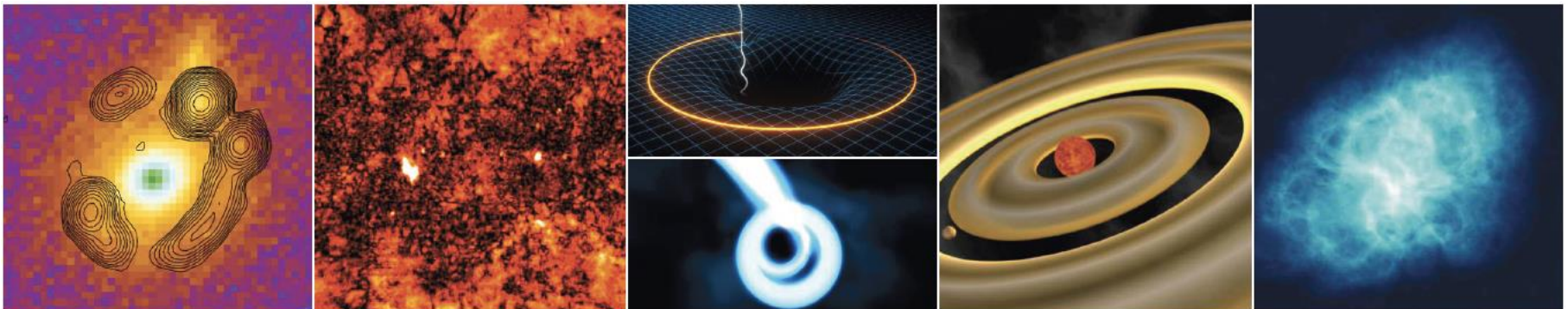
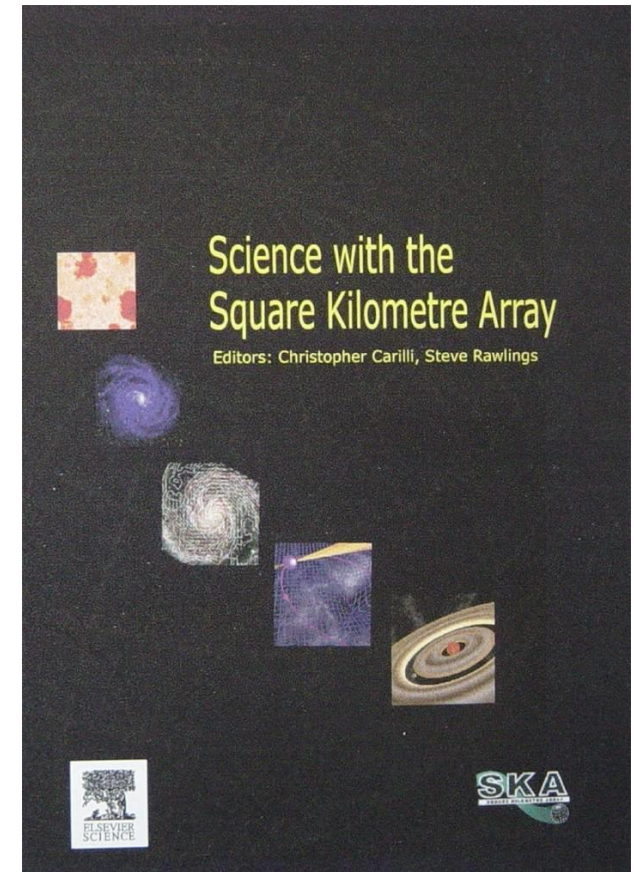




# SKA Key Science

## 5つのキーサイエンス

- ・ 暗黒時代と再イオン化
- ・ パルサーによる重力理論検証
- ・ 銀河進化と宇宙論
- ・ 宇宙磁場の起源と進化
- ・ 宇宙における生命



# timeline

path finder

- ・ LOFAR, ASKAP  
MeerKAT, MWA
- ・ 1% SKA
- ・ 電波宇宙論の幕開け



SKA phase 1

- ・ 2017年より建設
- ・ 2020年より観測
- ・ 10% SKA
- ・ 宇宙再電離
- ・ パルサー



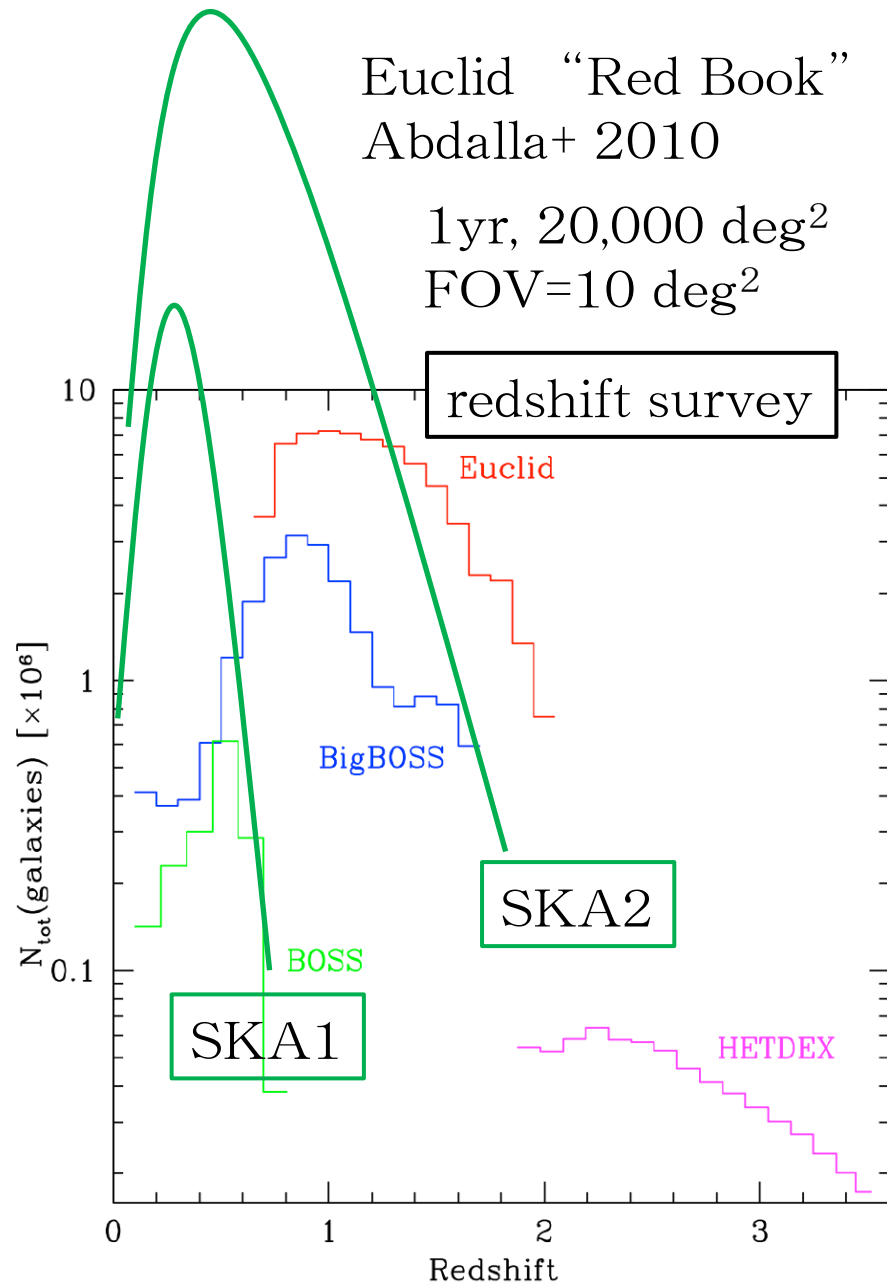
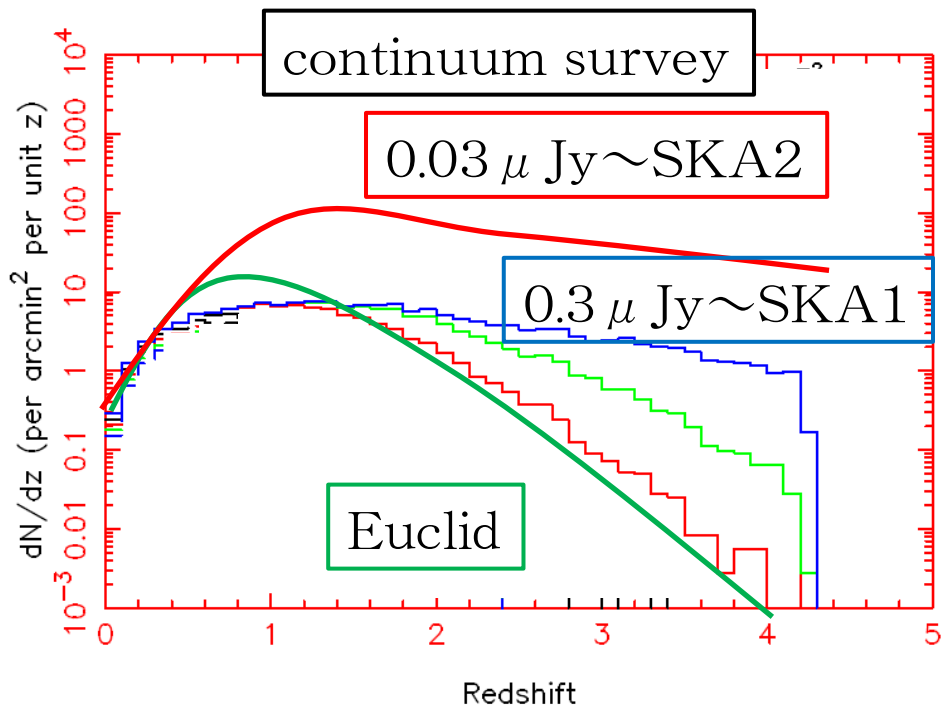
SKA phase 2

- ・ 2020年より建設
- ・ 2025年より観測
- ・ 全サイエンス

# 電波観測による宇宙論

- continuum survey
  - 銀河の宇宙線によるシンクロトロン放射
  - redshiftはわからないが像が鮮明で感度がよい
  - 弱重力レンズ、ISW
- HI line survey (1GHz帯)
  - 中性水素の21cm線
  - redshiftがわかる
  - 銀河分布
- 再電離期の中性水素 (100MHz帯)
  - 再電離以前の銀河間中性水素の分布
  - redshiftの情報 → 3次元分布

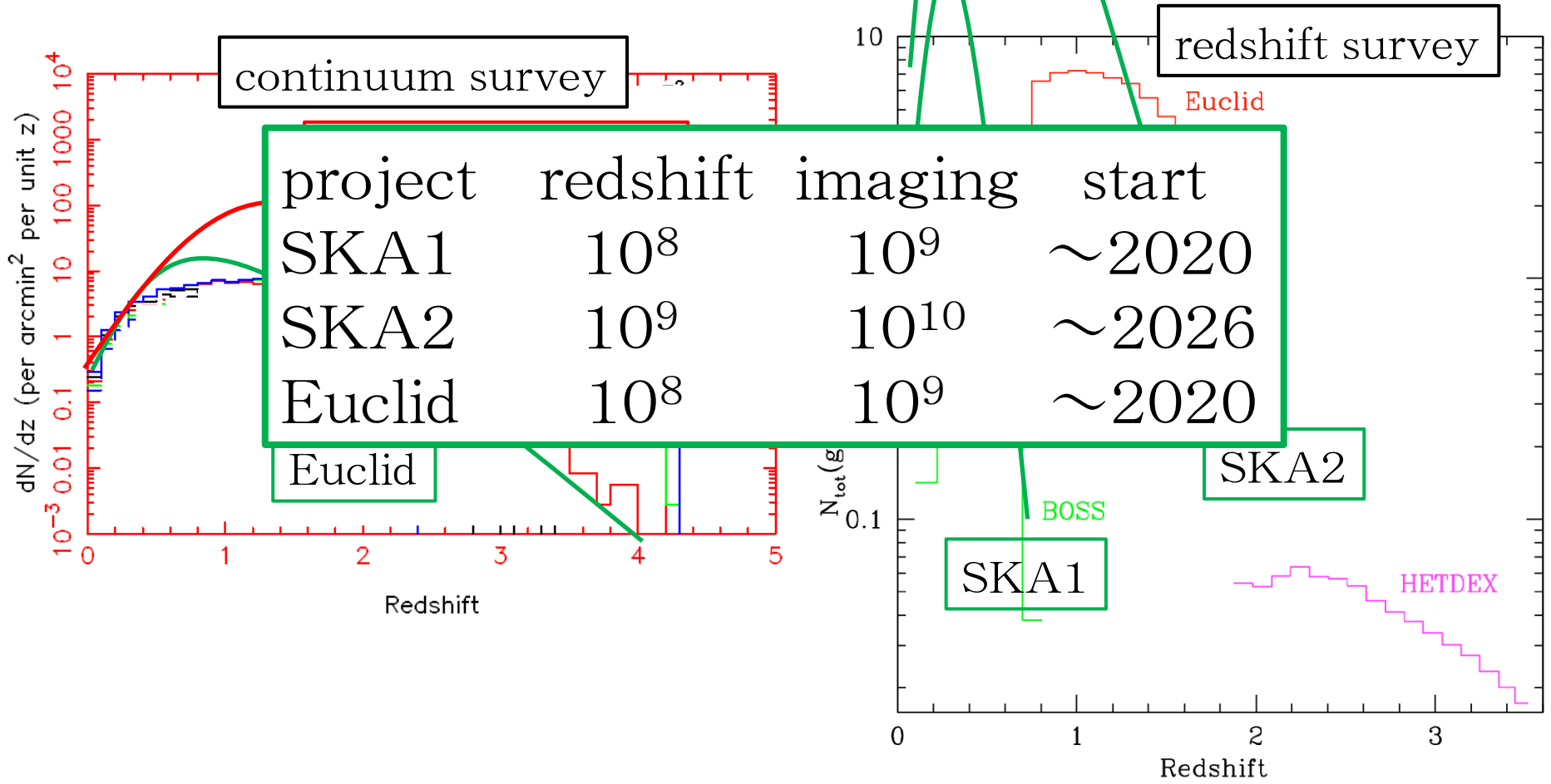
# SKA survey



# SKA survey

Euclid “Red Book”  
Abdalla+ 2010

1yr, 20,000 deg<sup>2</sup>  
FOV=10 deg<sup>2</sup>



continuum survey

redshift survey

project	redshift	imaging	start
SKA1	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	~2020
SKA2	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	~2026
Euclid	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	~2020

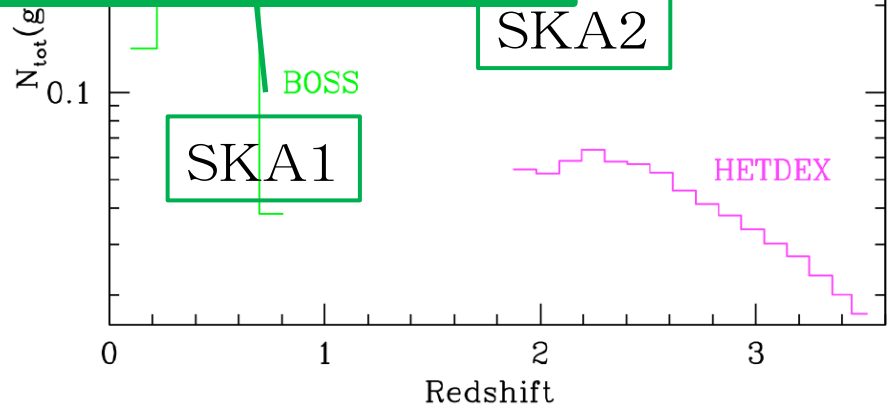
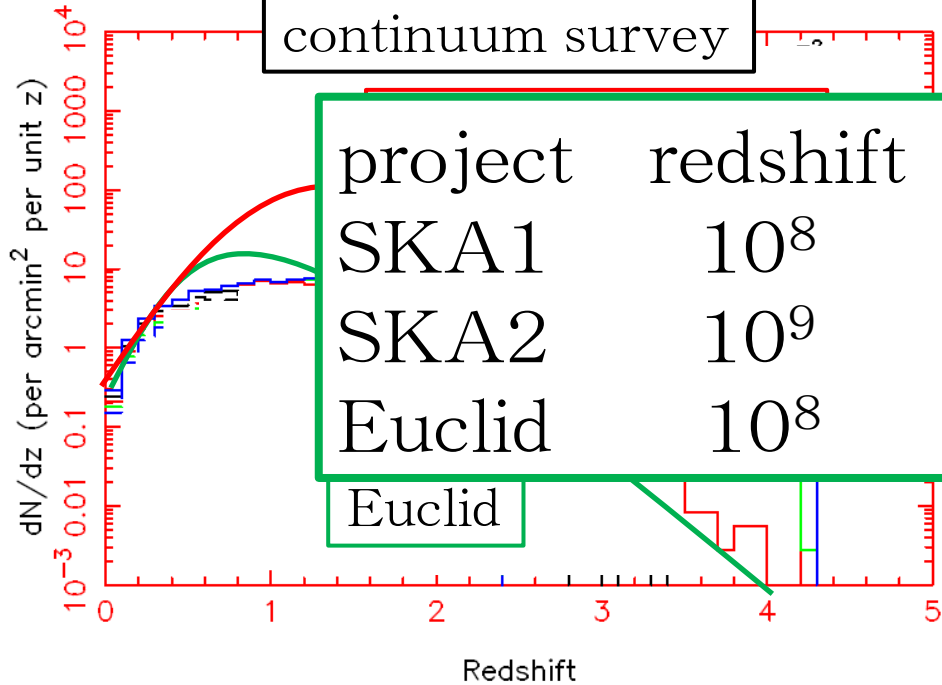
Euclid

SKA2

SKA1

BOSS

HETDEX



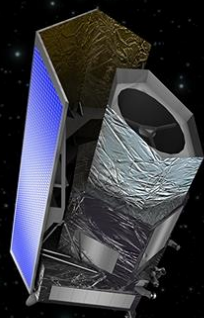
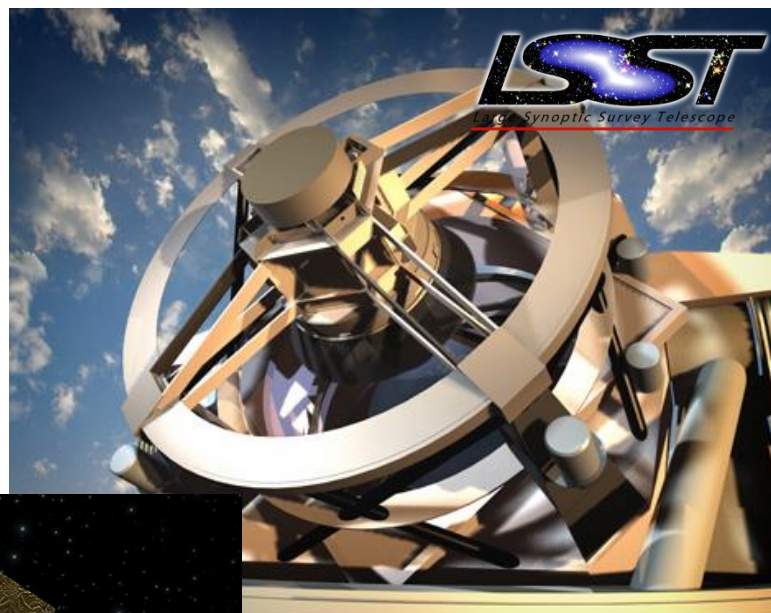
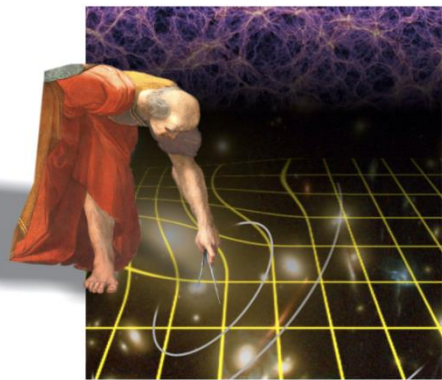


# 2020年代のサーベイ計画

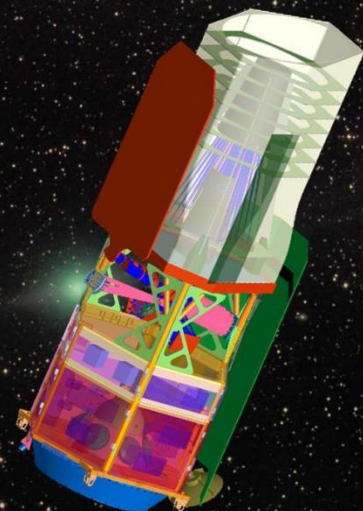
名称	機関	稼働	形態	目的
Euclid	ESA	2020-	人工衛星	暗黒エネルギー
LSST	USA	2022-	地上望遠鏡	汎用
WFIRST	NASA	2023-	人工衛星	汎用

## Euclid

Mapping the geometry  
of the dark Universe



WFIRST-AFTA  
Wide-Field Infrared Survey Telescope



# 3、暗黒エネルギー



# 暗黒エネルギー

宇宙を加速膨張させる  
エネルギー

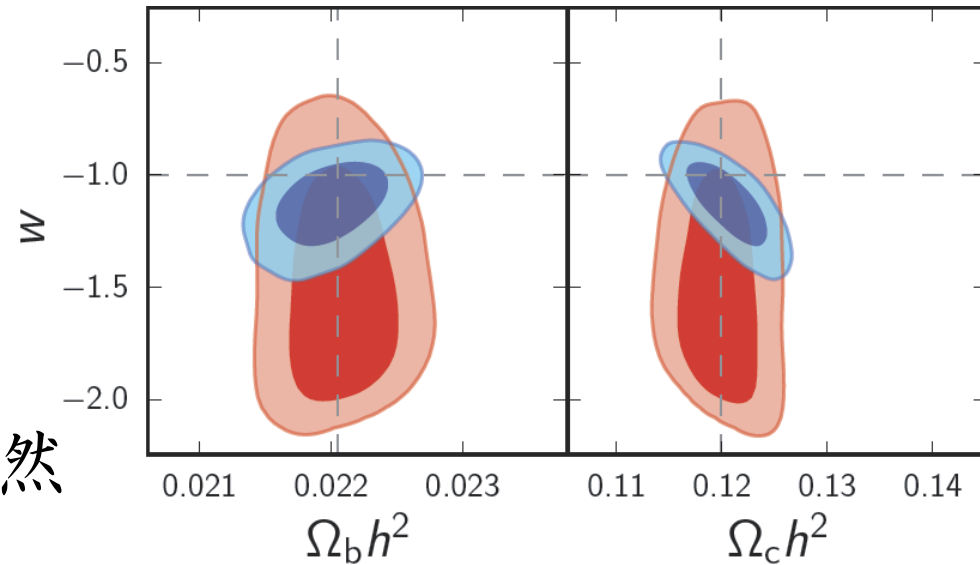
- ・実体はよくわからない
- ・宇宙定数？
- ・時間変化があるのが自然

状態方程式

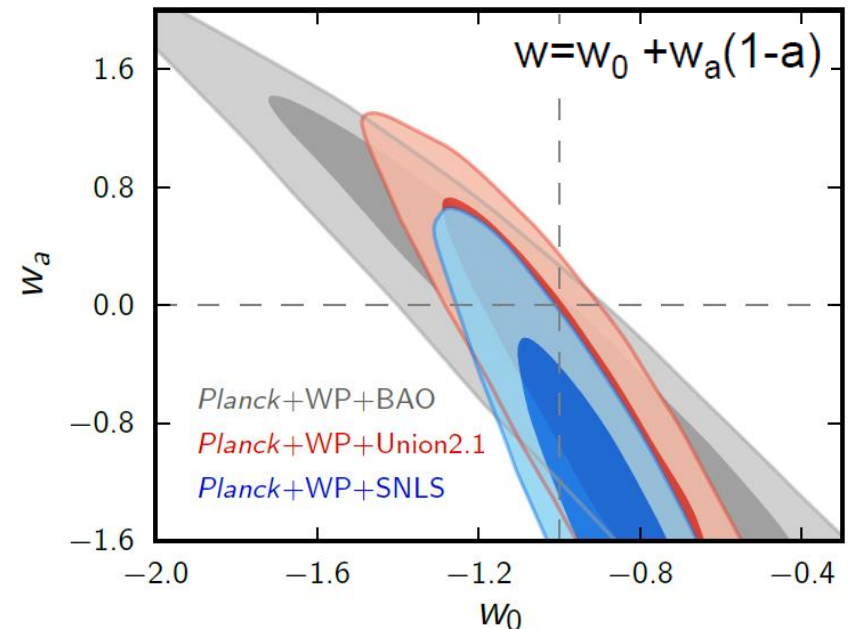
$$w(t) = \frac{p(t)}{\rho(t)}$$

宇宙定数：  $w = -1$

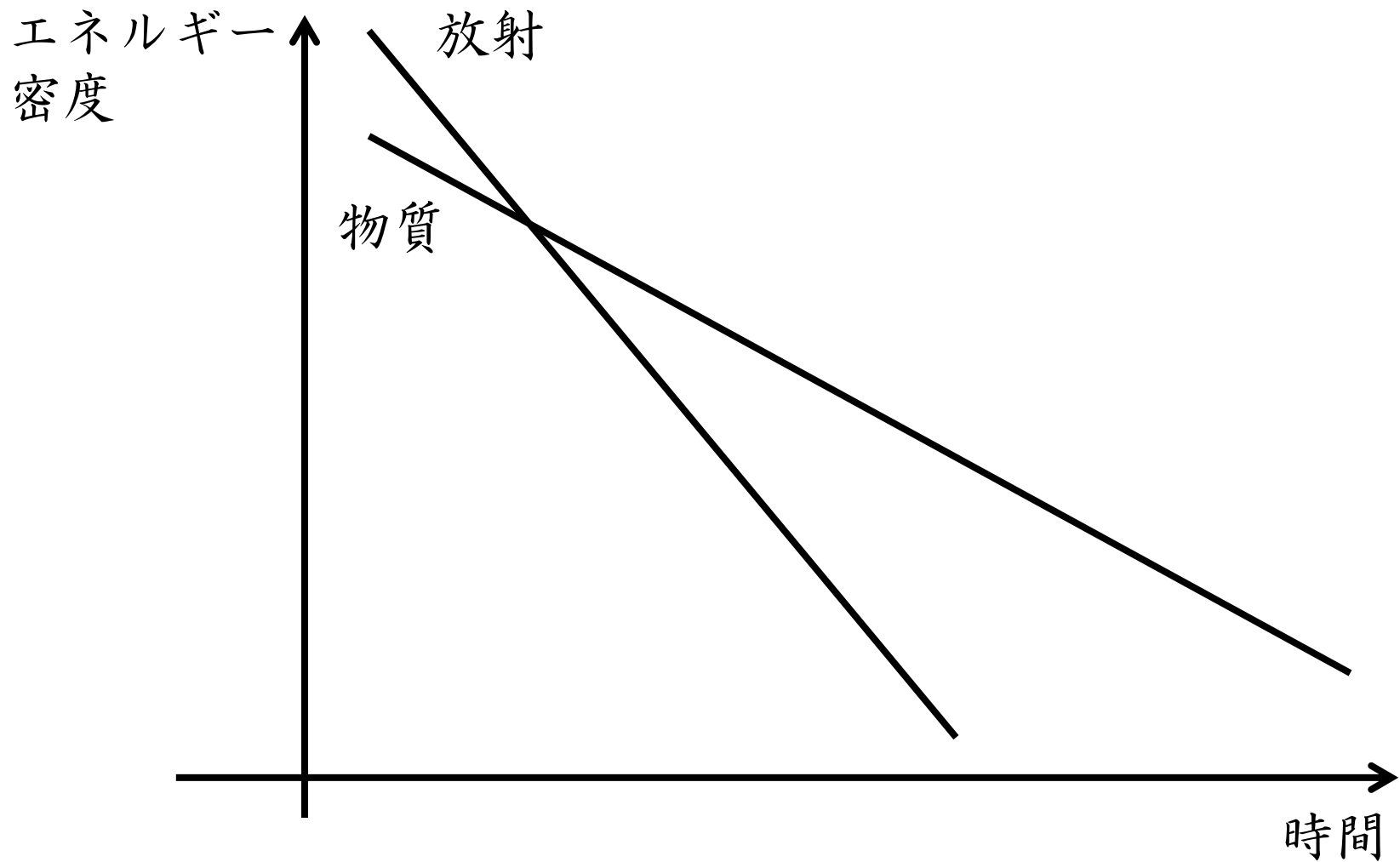
constant  $w$



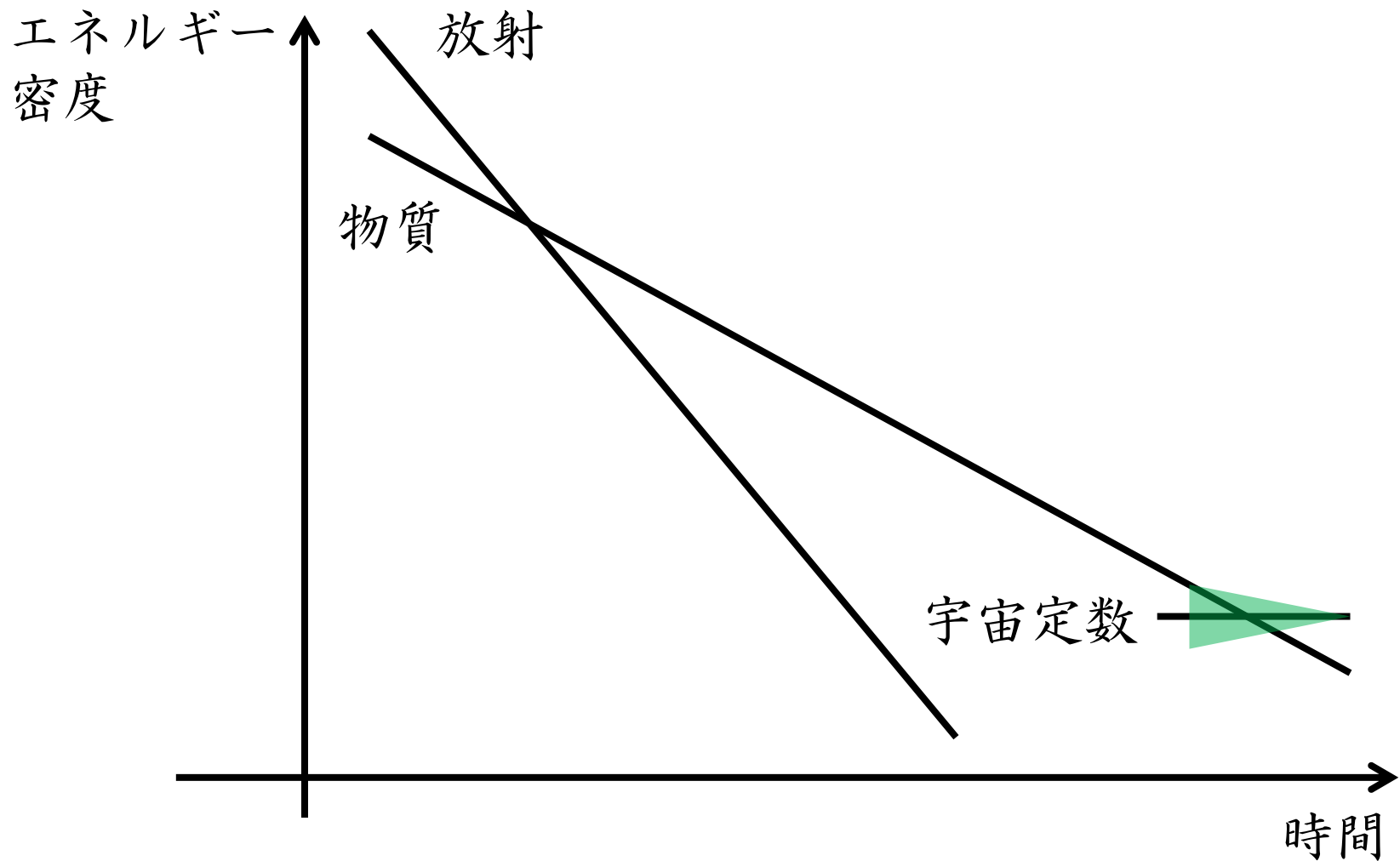
Planck



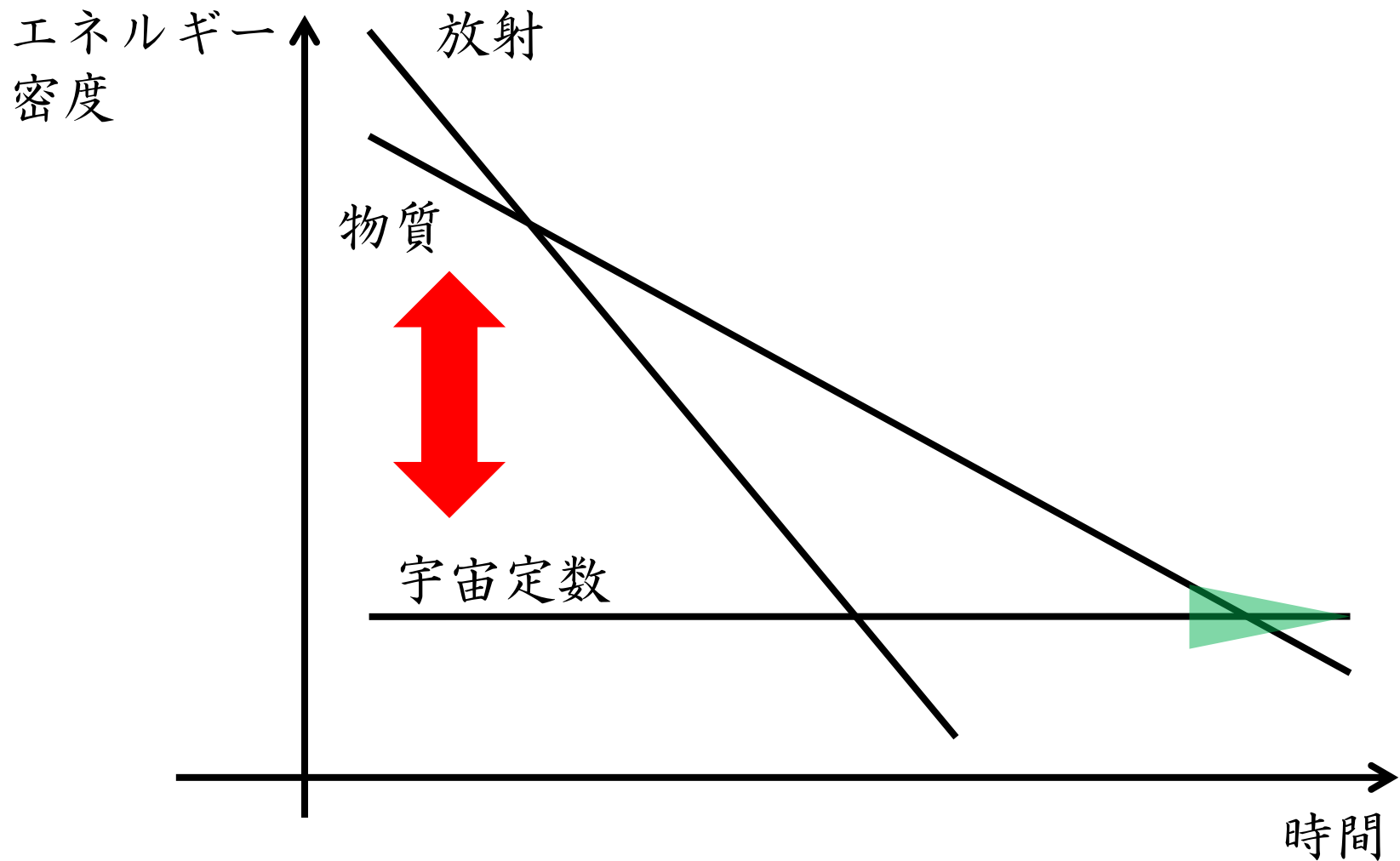
# エネルギーの進化



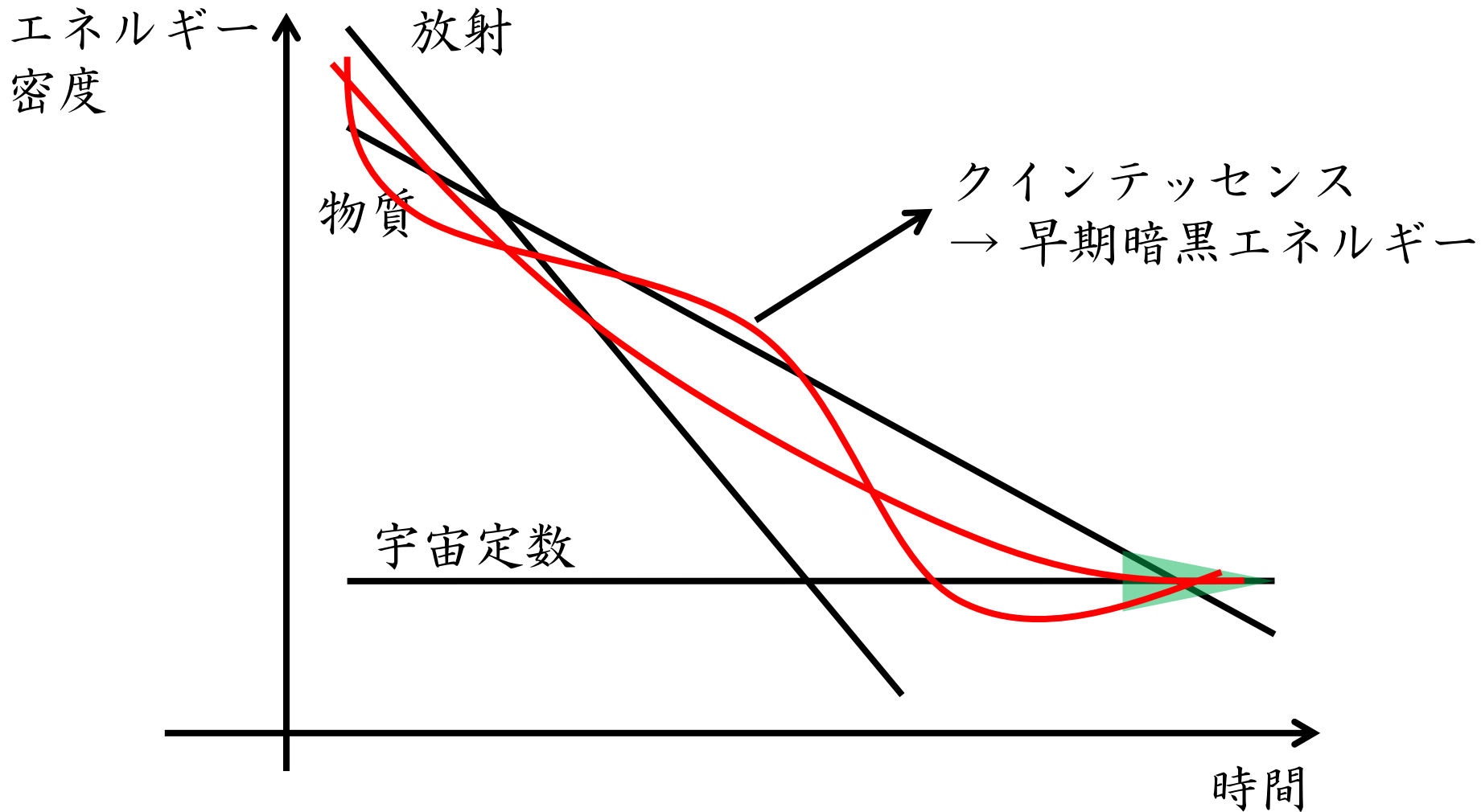
# エネルギーの進化



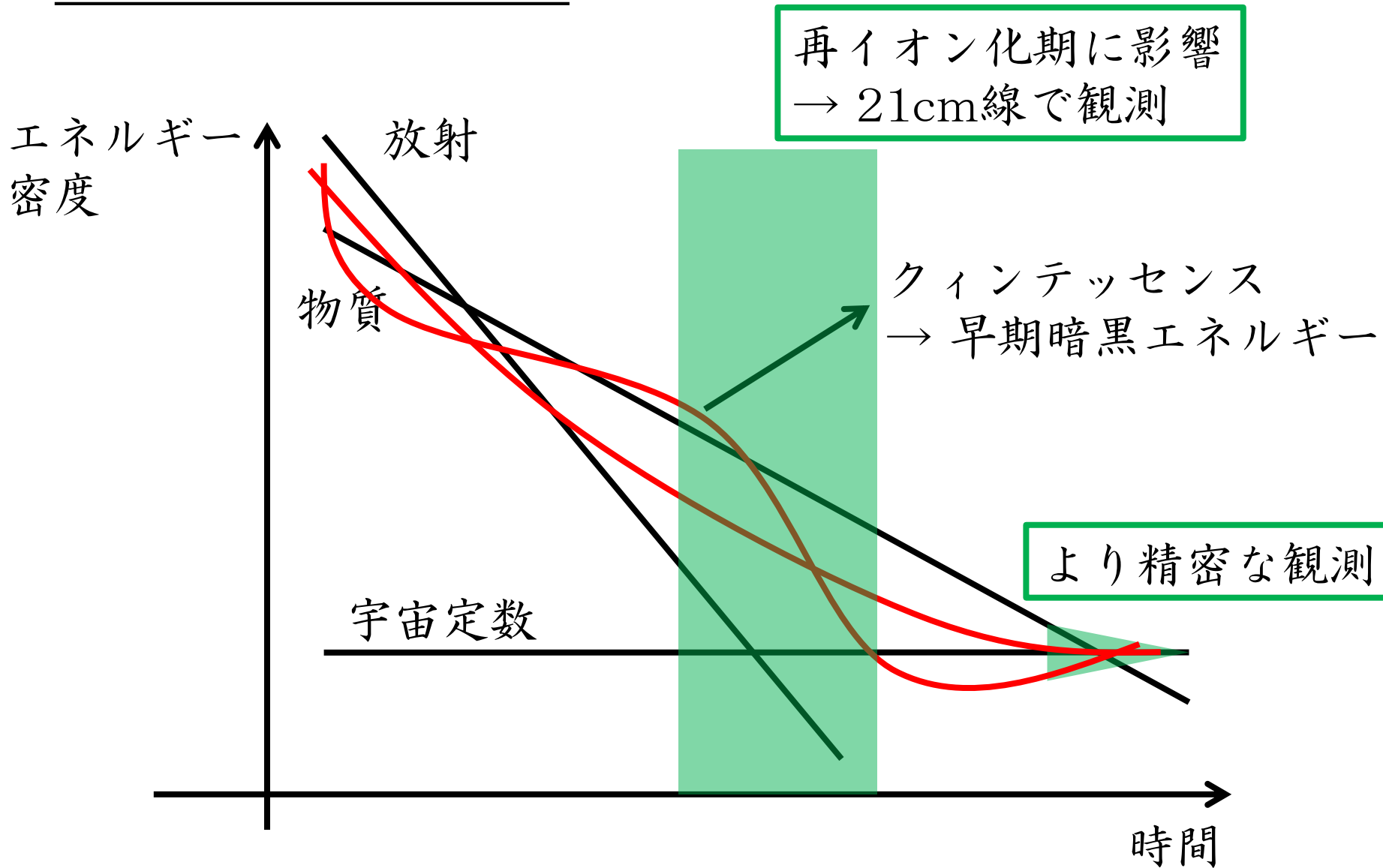
# エネルギーの進化



# エネルギーの進化



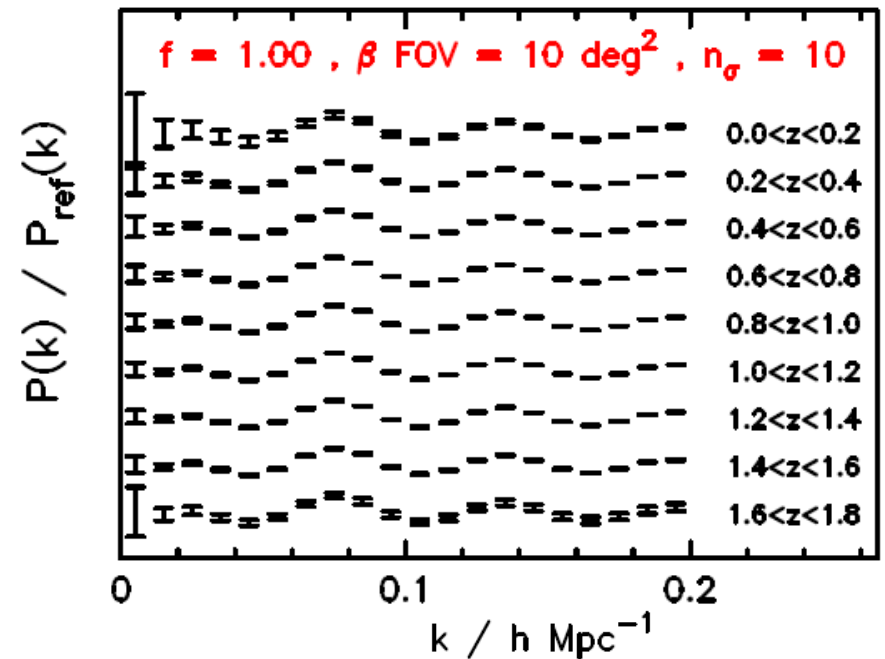
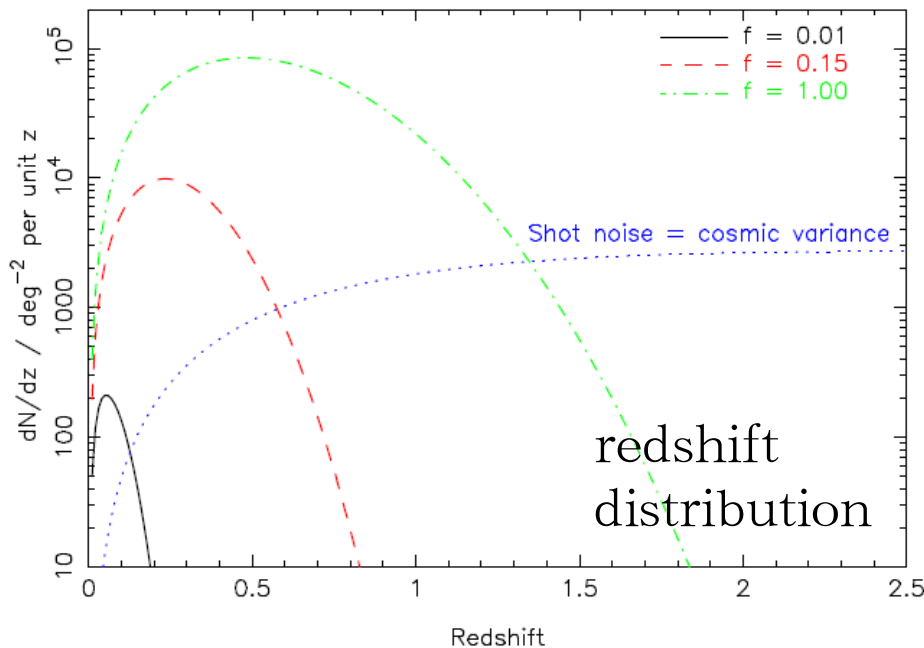
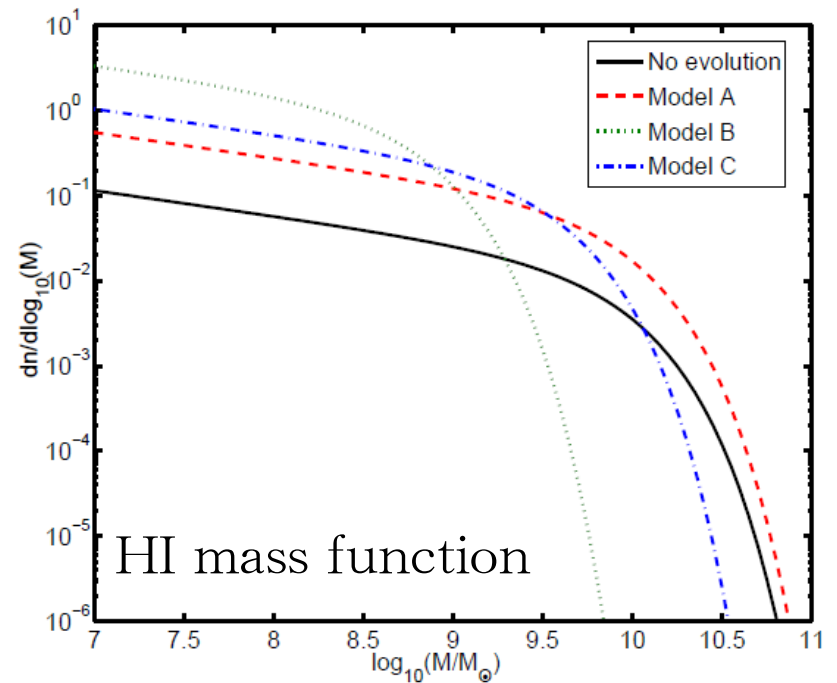
# エネルギーの進化



# 暗黒エネルギー探査

Abdalla+ 2010  
SKAによるBAO観測  
のシミュレーション

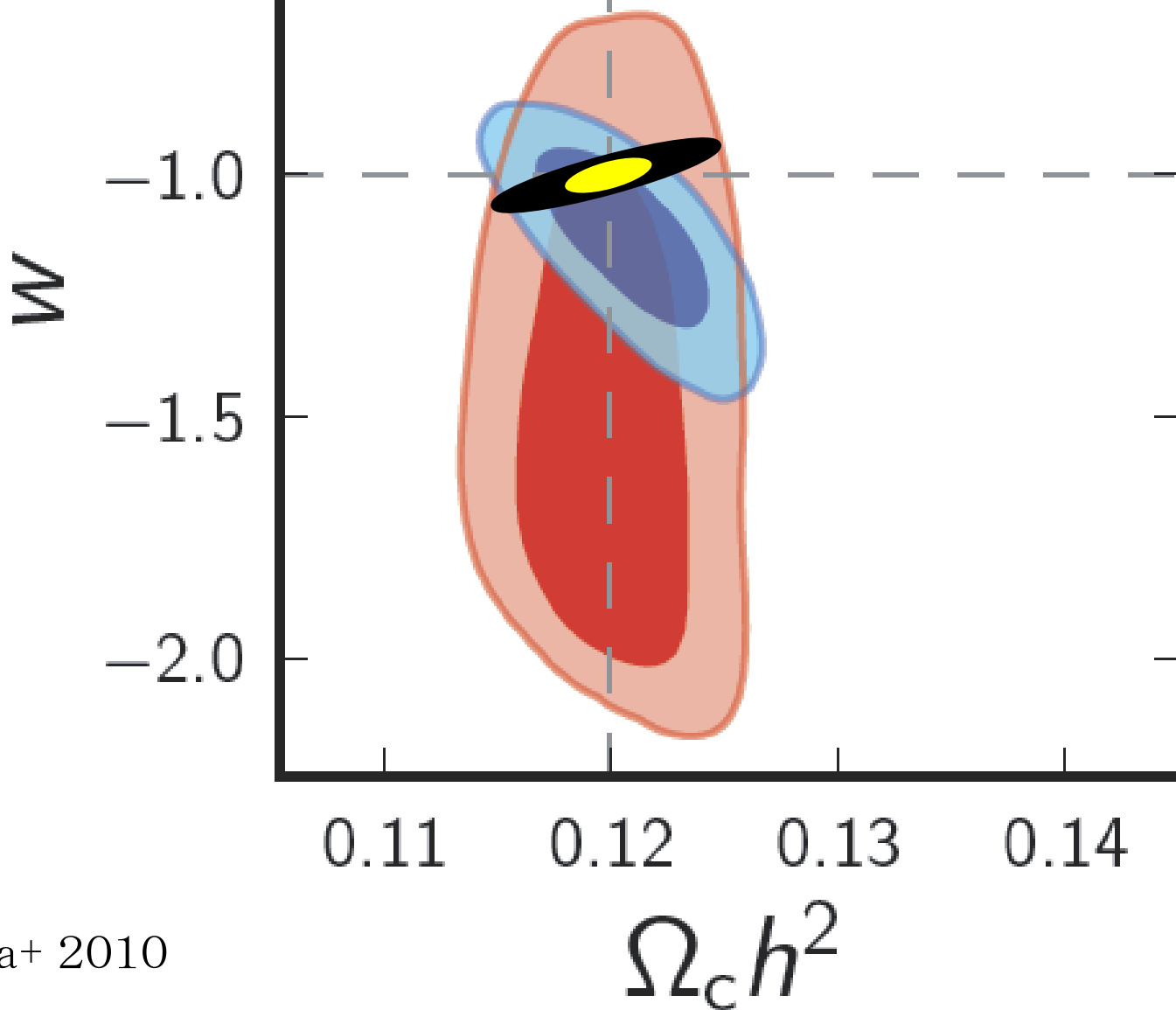
- 1 year
- 20,000 deg<sup>2</sup>





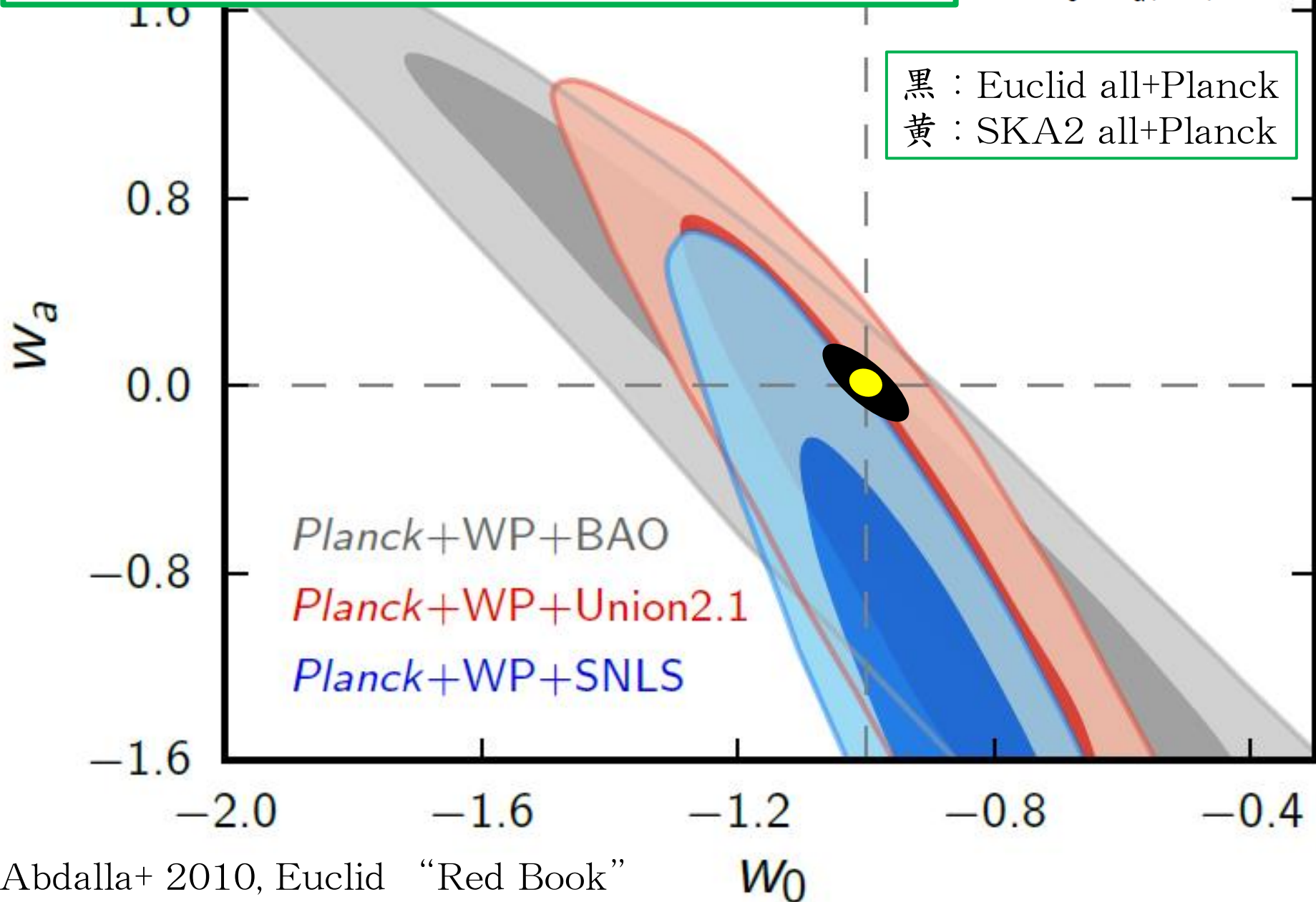
# 状態方程式への制限

黒 : SKA1 BAO+Planck  
黄 : SKA2 BAO+Planck



# 時間変化する状態方程式への制限

$$w = w_0 + w_a(1-a)$$

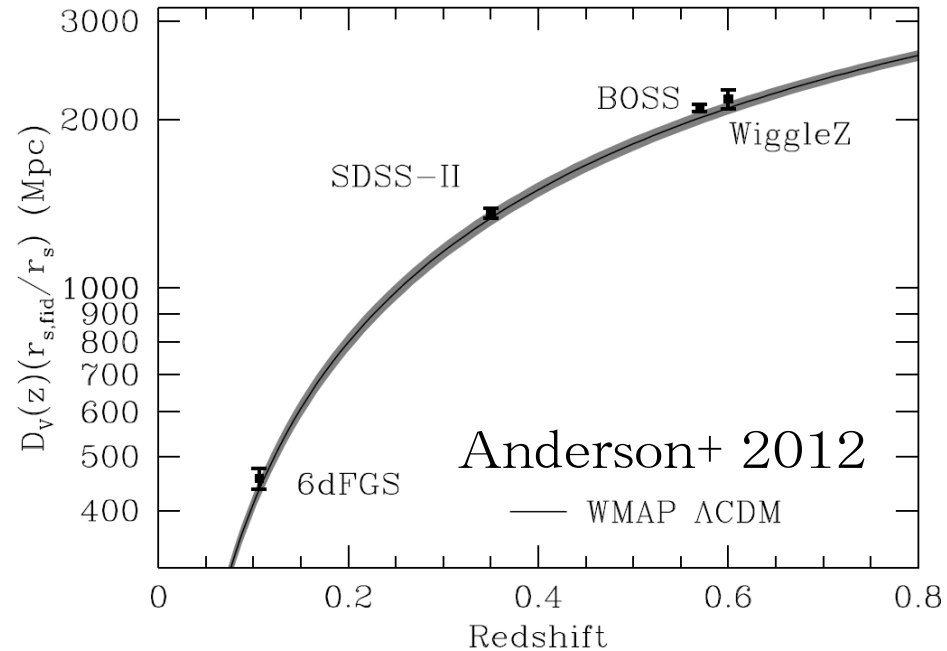
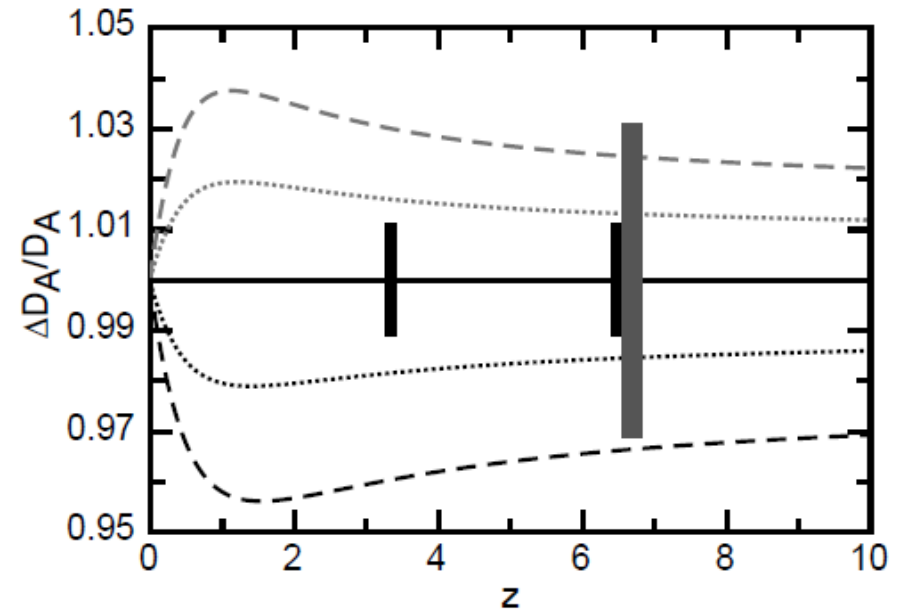
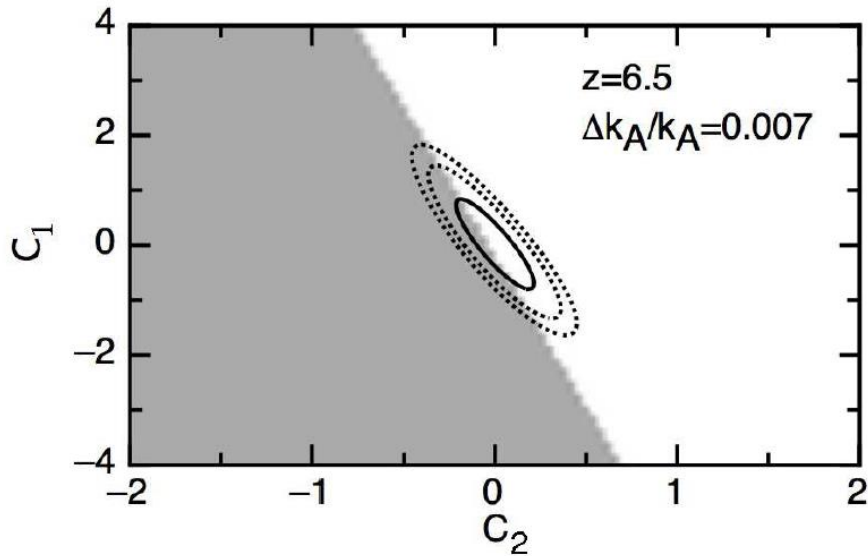


# 早期暗黒エネルギー探査

Wyithe+ 2007

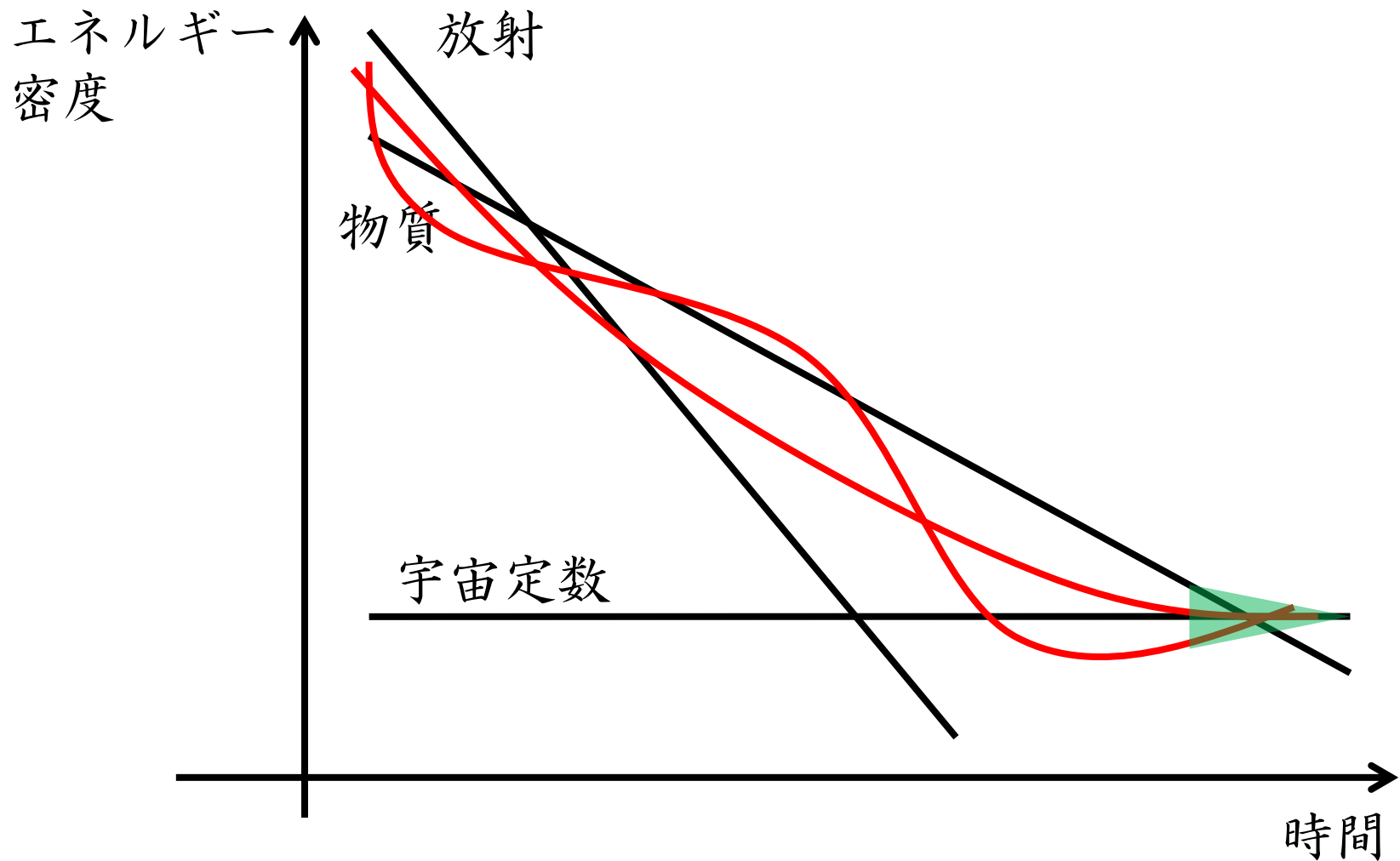
高赤方偏移でのバリオン  
音響振動観測

- MWA5000 ~ SKA1
- 3,000 hour

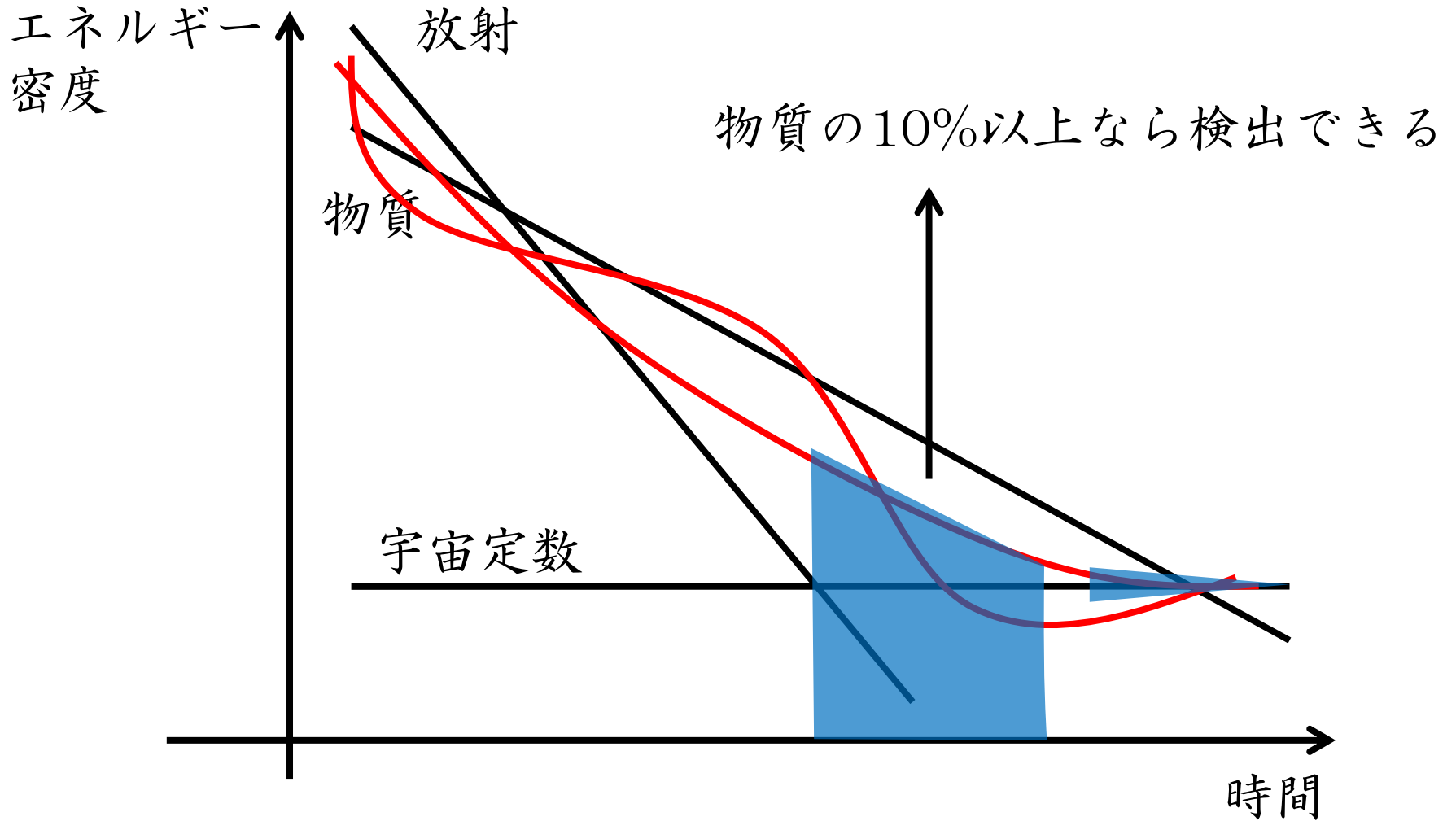


$$\rho_v = \rho_{v,0} [1 + C_1(z - z_{\min}) + C_2(z - z_{\min})^2 + \dots]$$

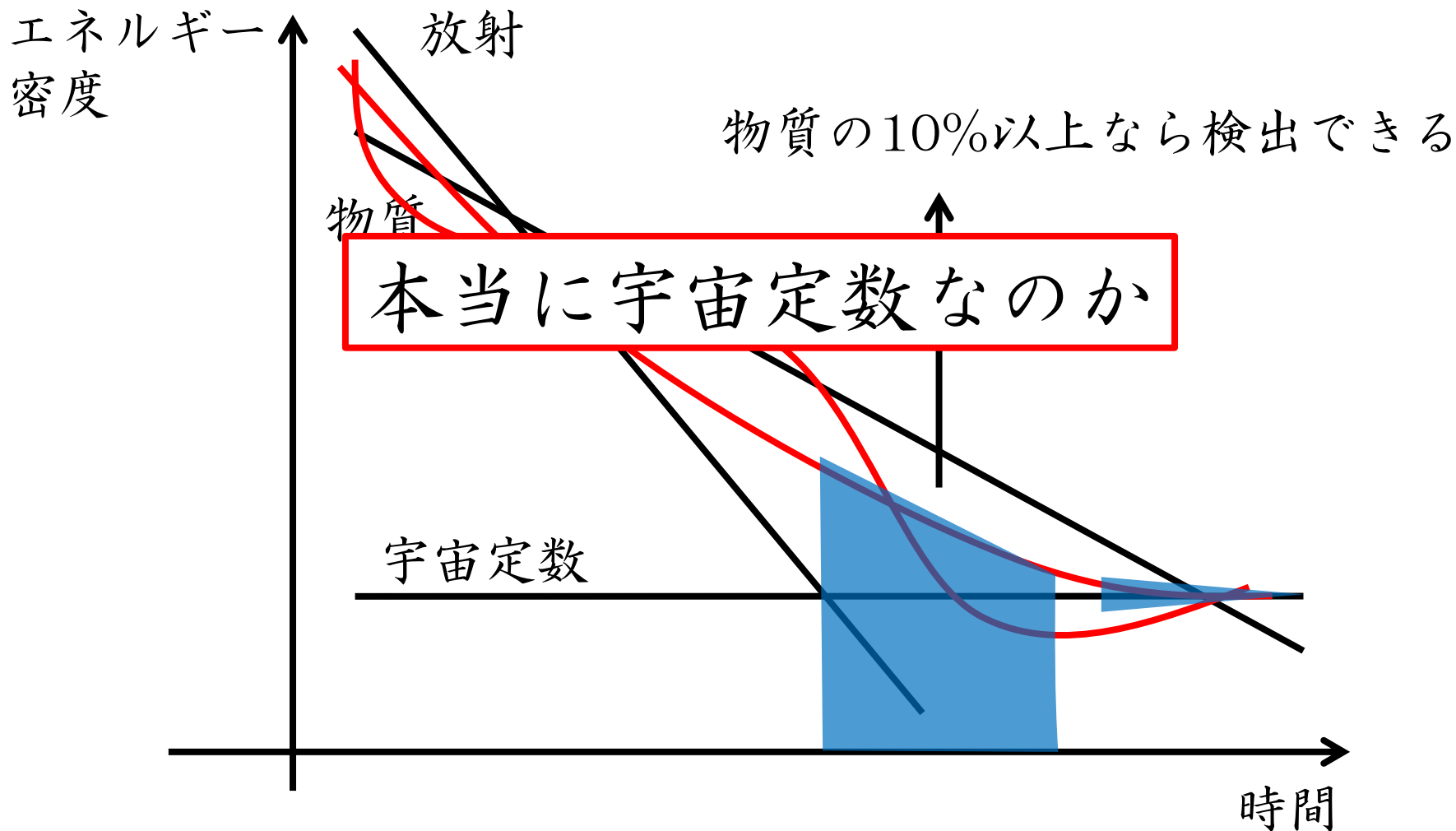
# エネルギーの進化



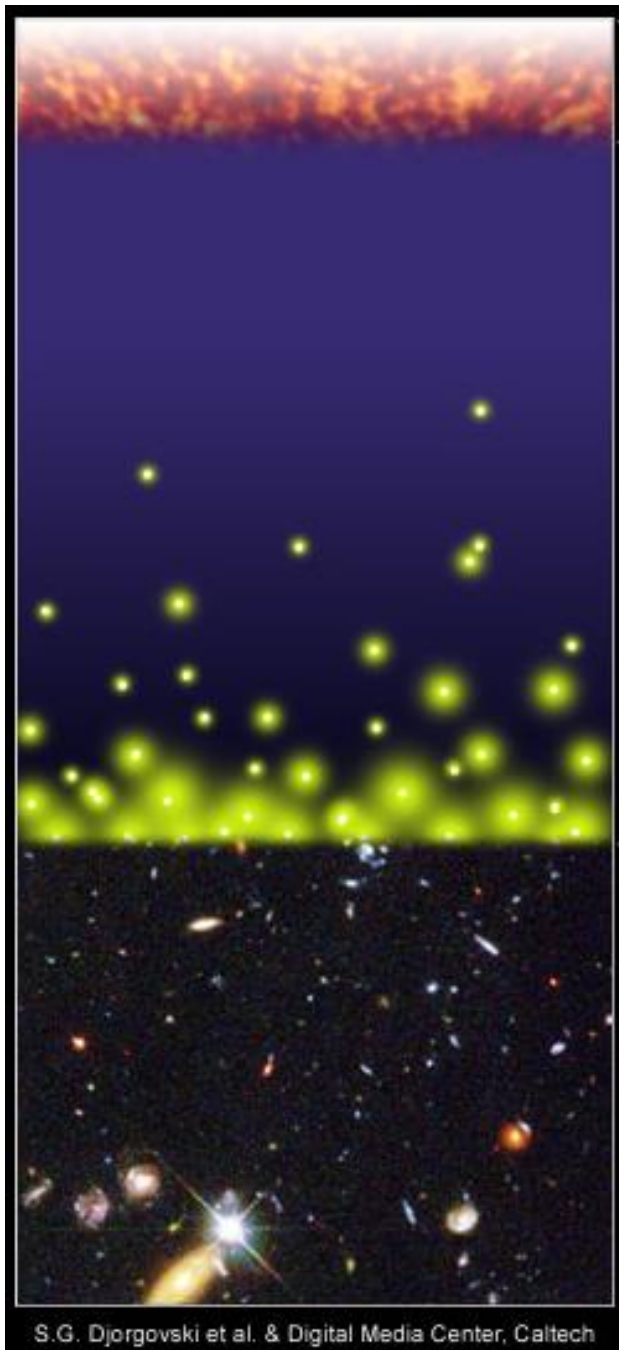
# 暗黒エネルギー



# 暗黒エネルギー



# 4、宇宙再電離



ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1000$  中性化

暗黒時代

$z\sim 30$  初代天体形成

$z\sim 10$  再イオン化開始

$z\sim 6$  再イオン化完了

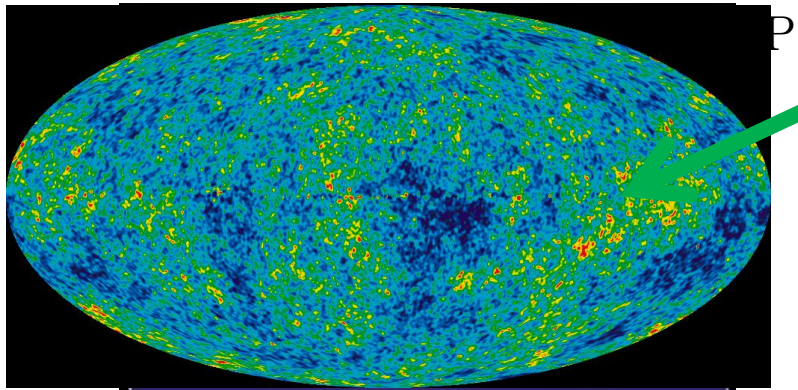
$z\sim 1$

銀河進化

大規模構造形成

暗黒エネルギー

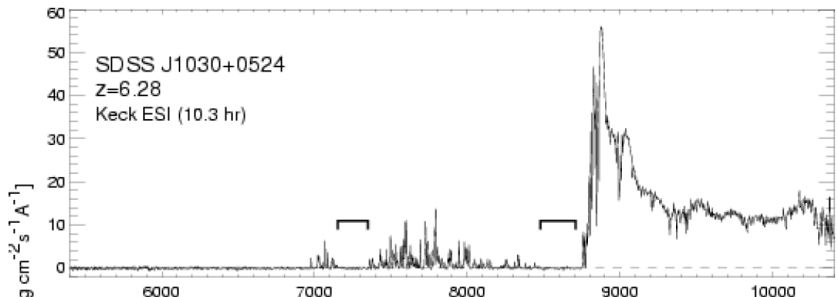




ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1000$  中性化

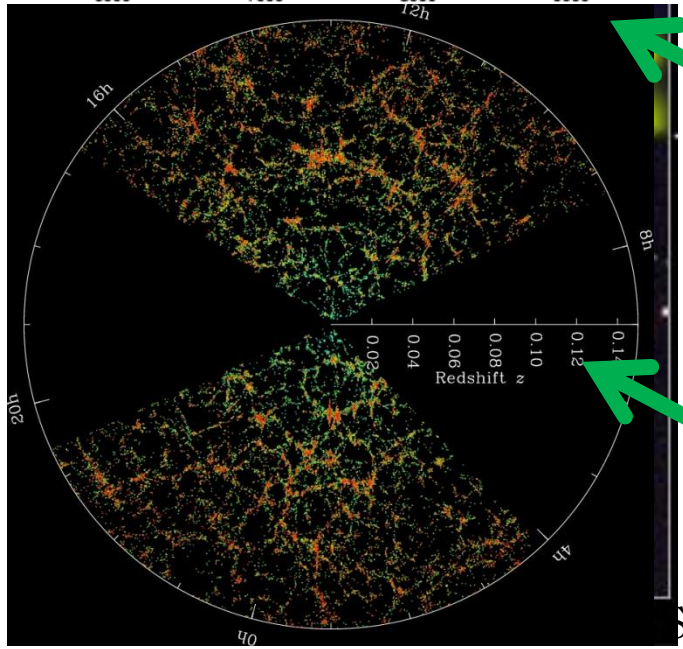
暗黒時代

$z \sim 30$  初代天体形成

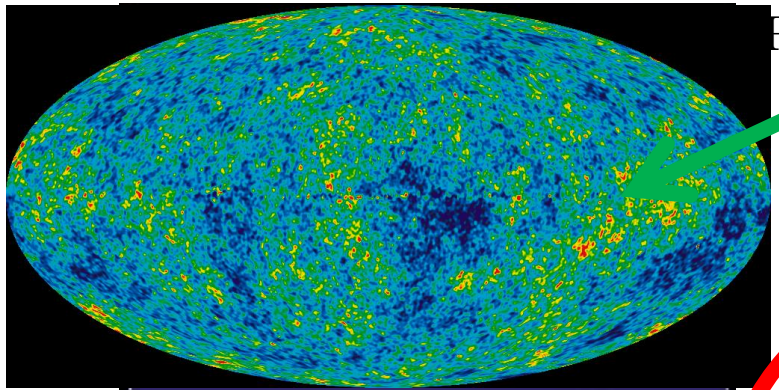


$z \sim 10$  再イオン化開始

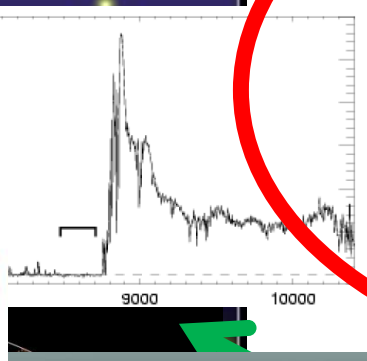
$z \sim 6$  再イオン化完了



$z \sim 1$   
 銀河進化  
 大規模構造形成  
 暗黒エネルギー



ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1000$  中性化



暗黒時代  
 $z \sim 30$  初代天体形成  
 $z \sim 10$  再イオン化開始

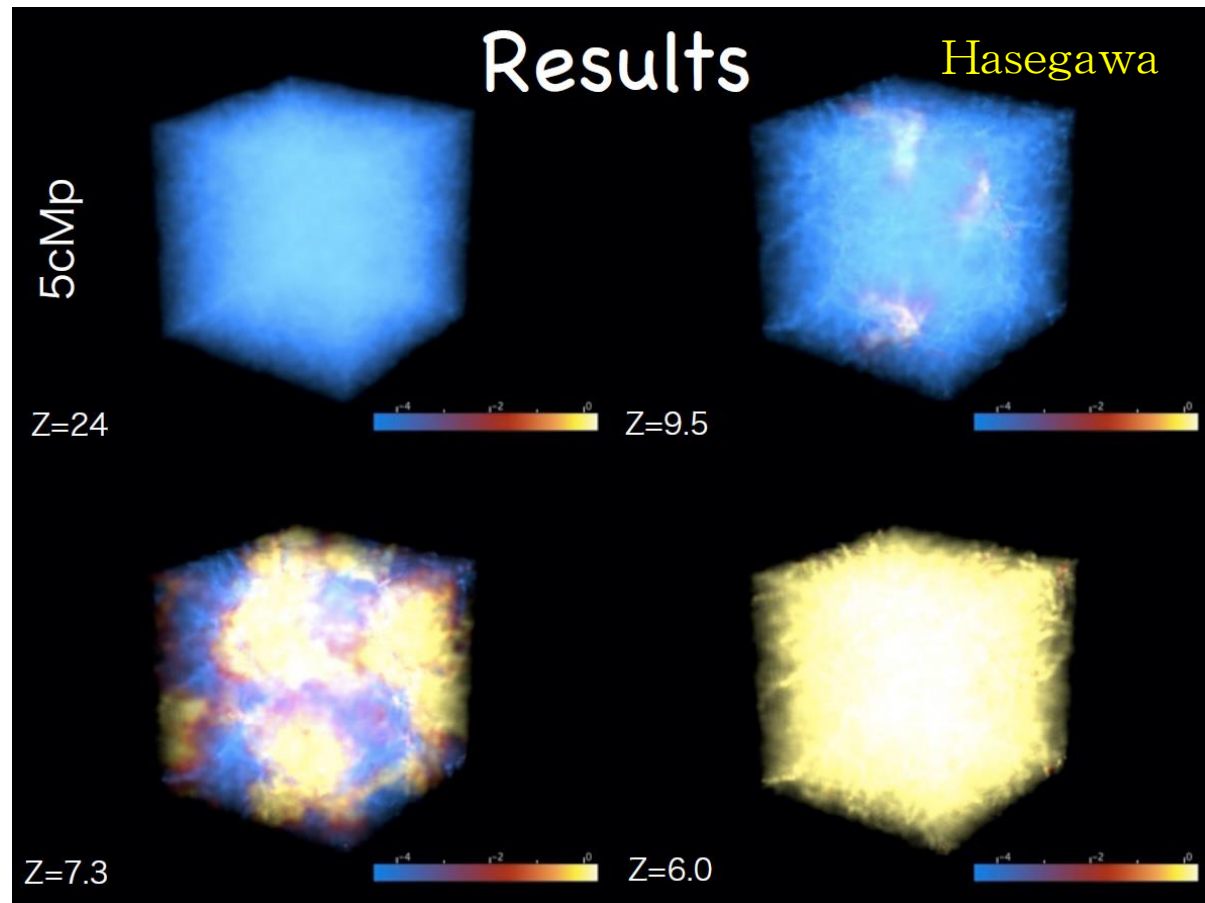


オン化完了

造形成  
ルギー

# 暗黒時代 - 初代天体形成 - 再電離

天体が形成されると紫外線やX線によってまわりをイオン化していく。

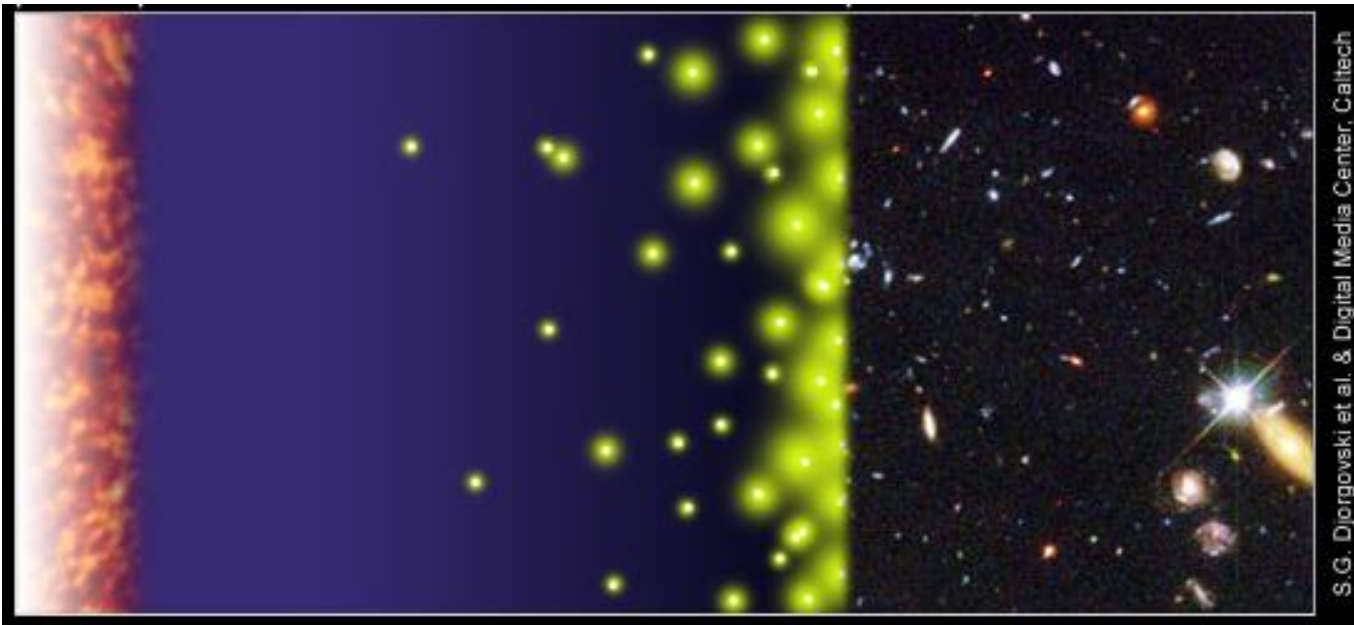


どう観測するか？

- ・宇宙背景放射
- ・Ly  $\alpha$  forest
- ・21cm線



# 現状



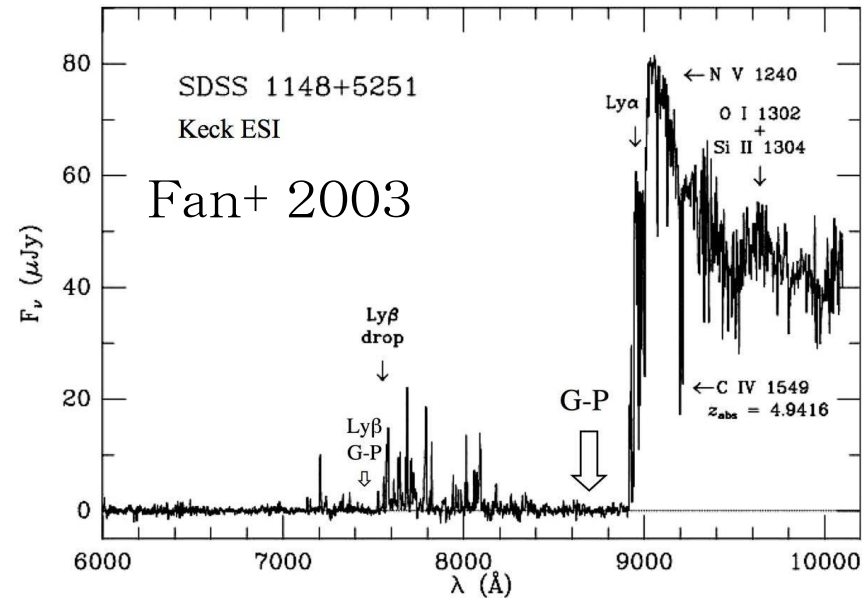
QSO ( $z=7$ )



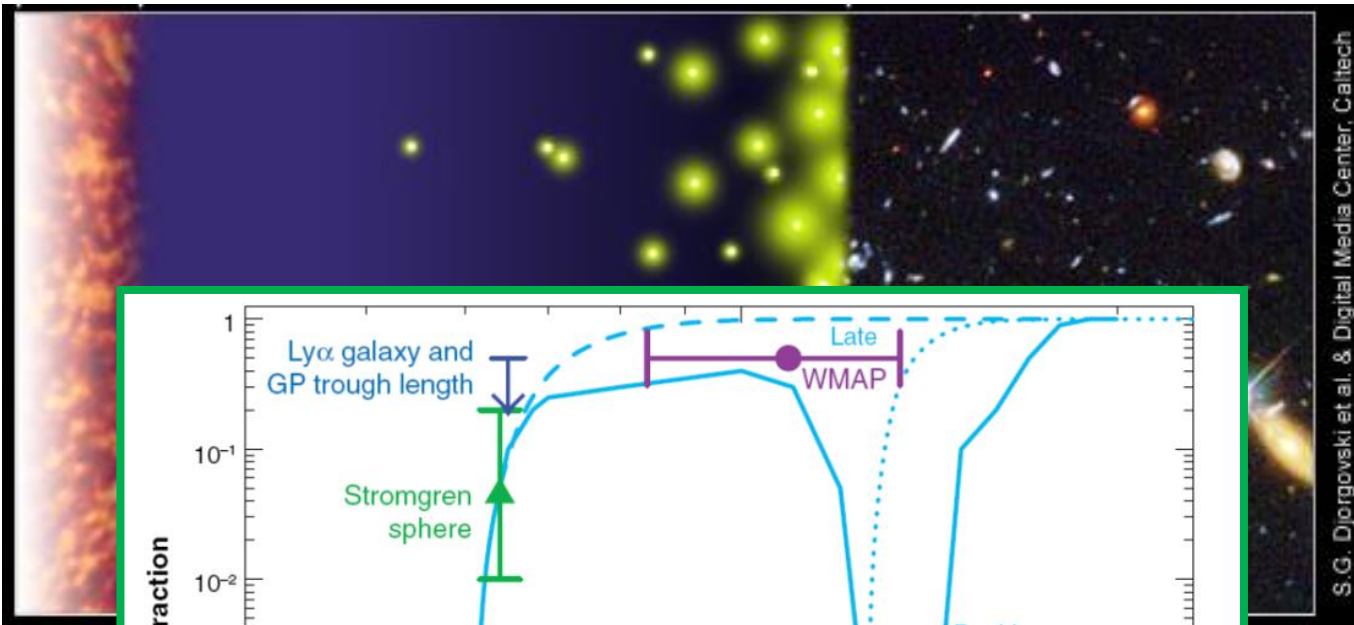
銀河( $z=10$ )



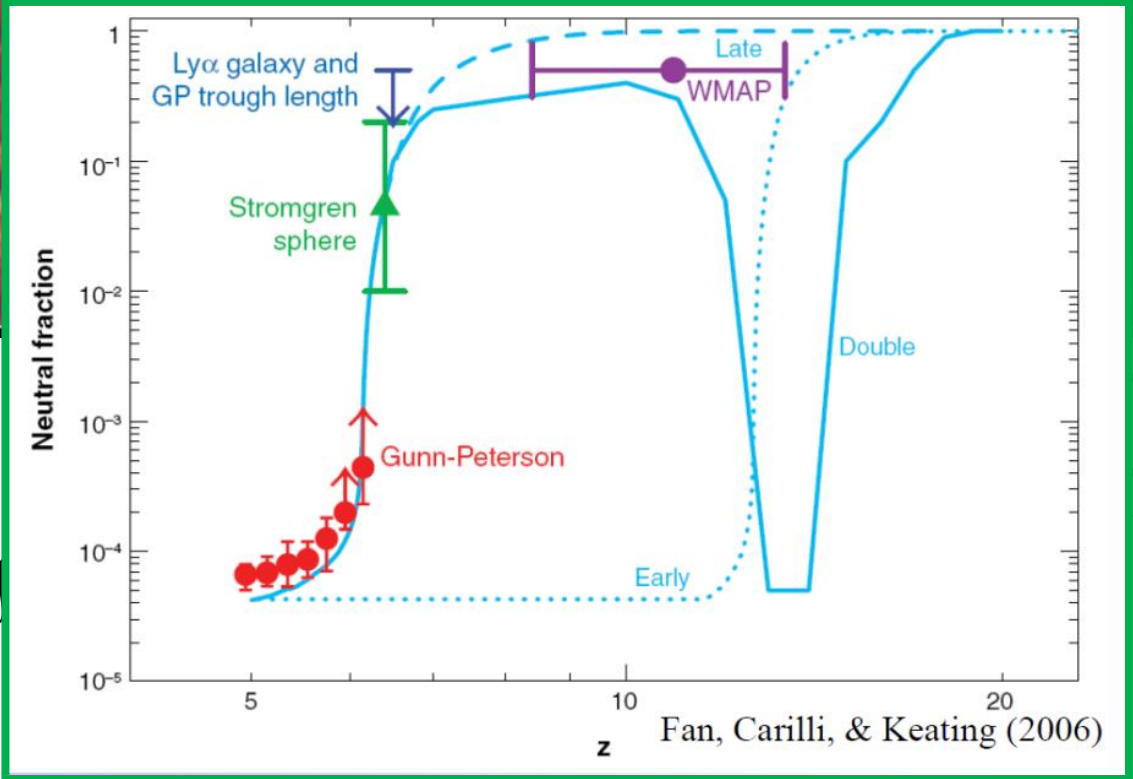
CMB  $\int \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot dz$



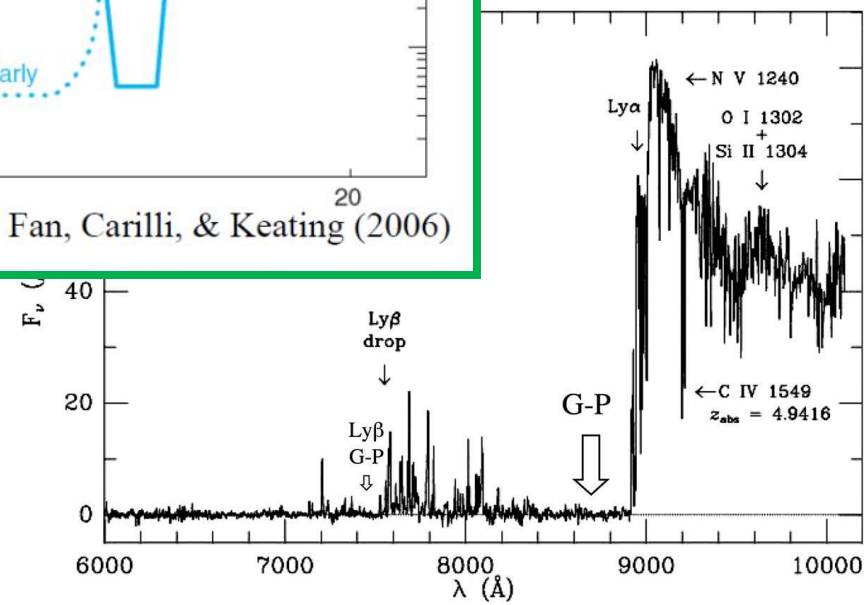
# 現状



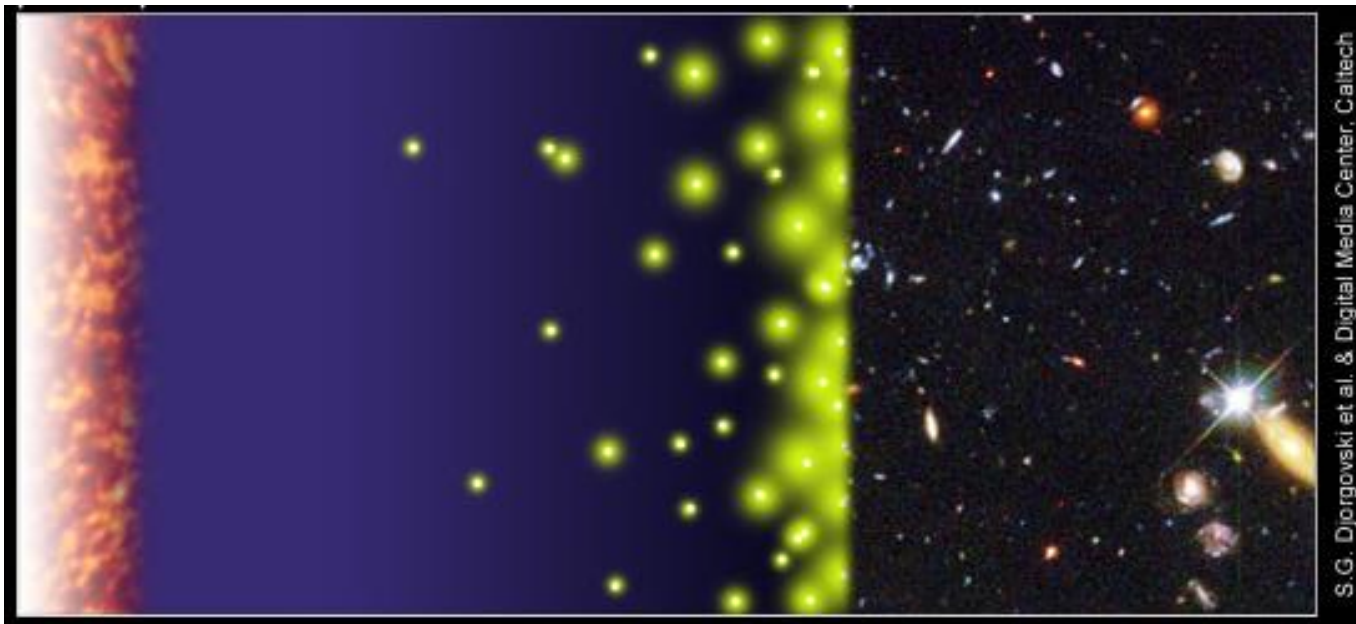
S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech



CMB



# 将来



QSO ( $z=8$ , Euclid)

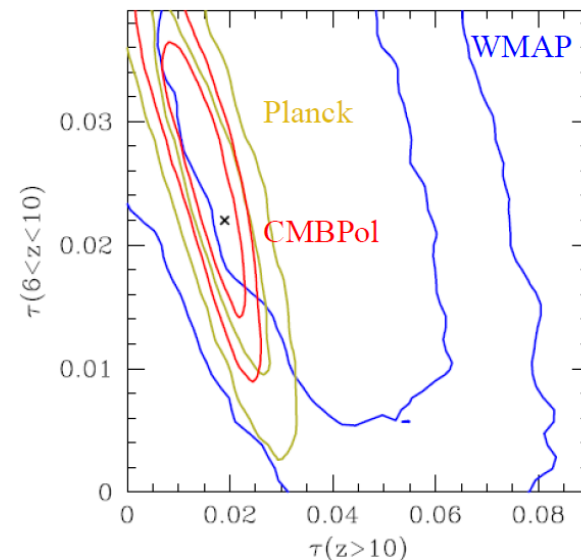


銀河( $z=12$ , JWST)

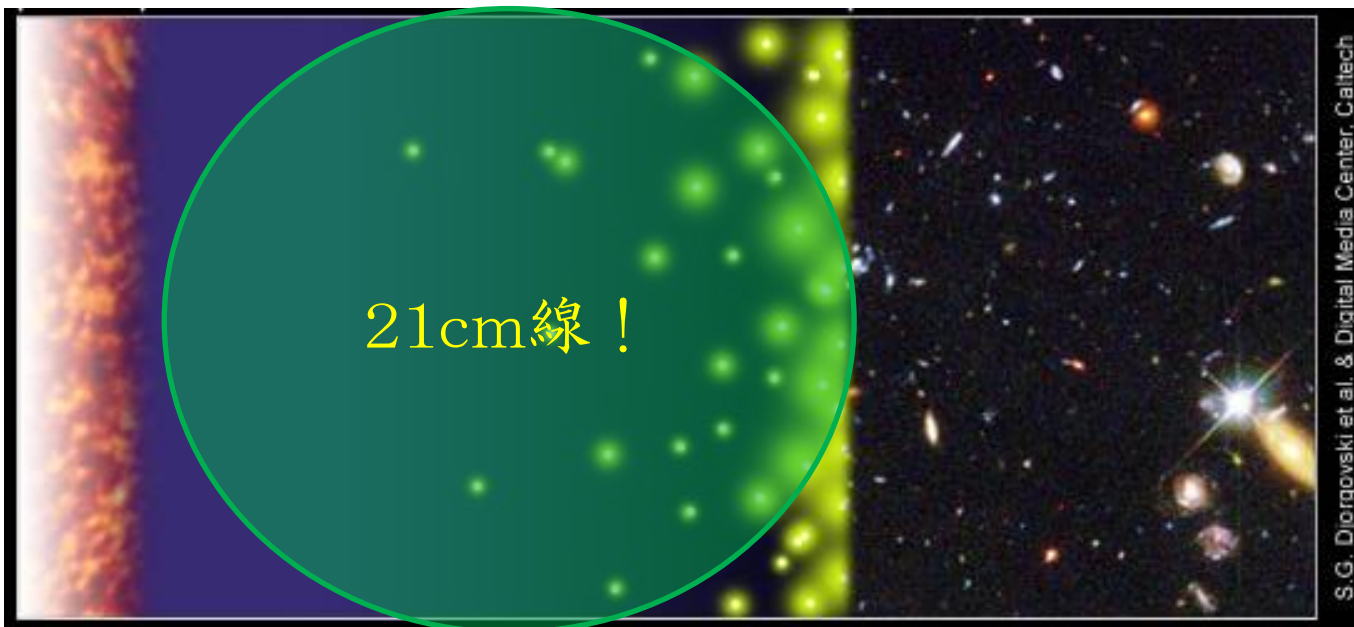


CMB (Planck, CMBpol)

$$\int \cdot \cdot \cdot dz \quad \int \cdot \cdot \cdot dz$$



# SKA



QSO ( $z=8$ , Euclid)



銀河( $z=12$ , JWST)



CMB (Planck, CMBpol)

$$\int \cdot \cdot \cdot dz \quad \int \cdot \cdot \cdot dz$$

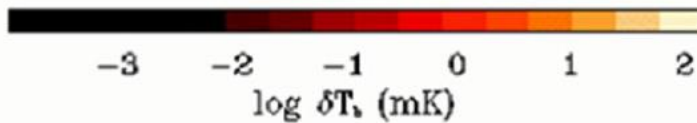
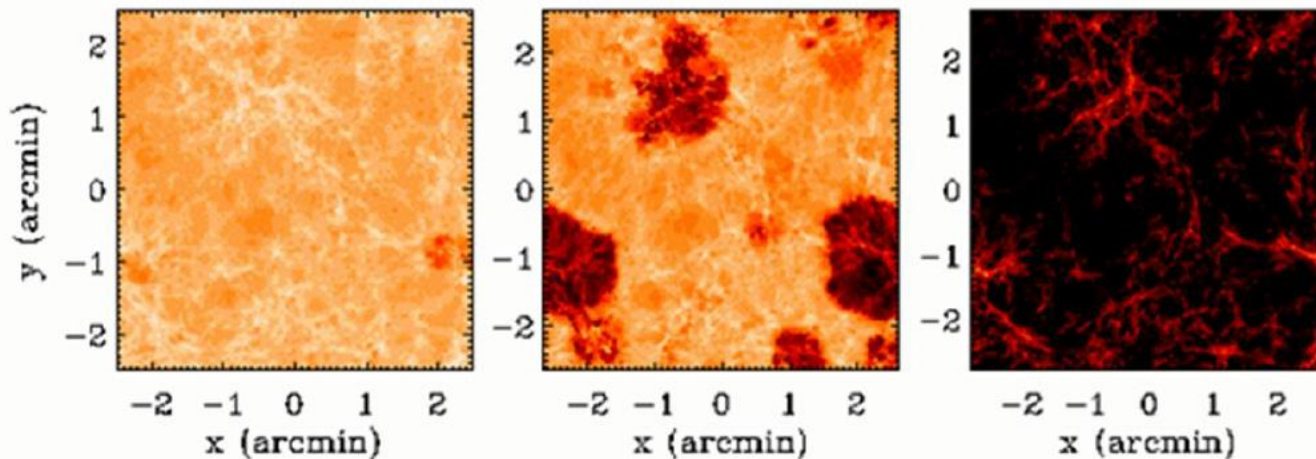
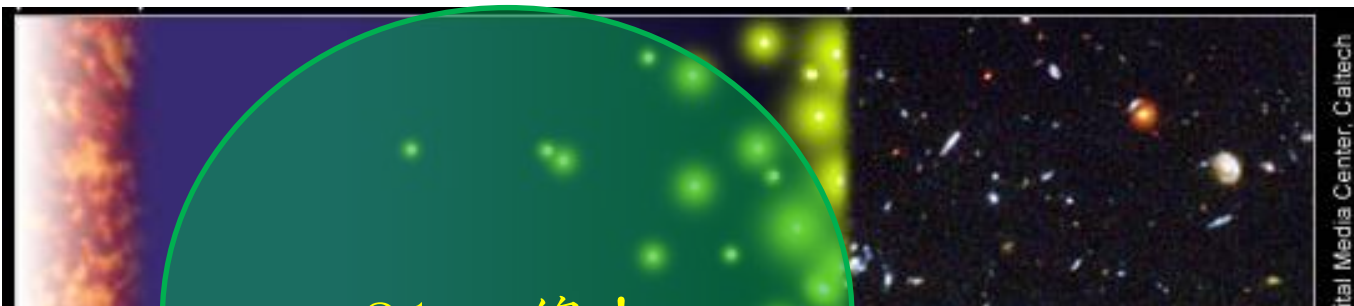


21cm線( $z=30$ , SKA)





# SKA

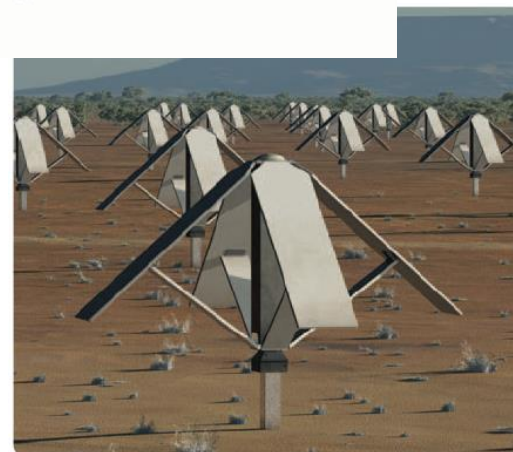


# CMB

$$\int \dots dz \quad \int \dots dz$$

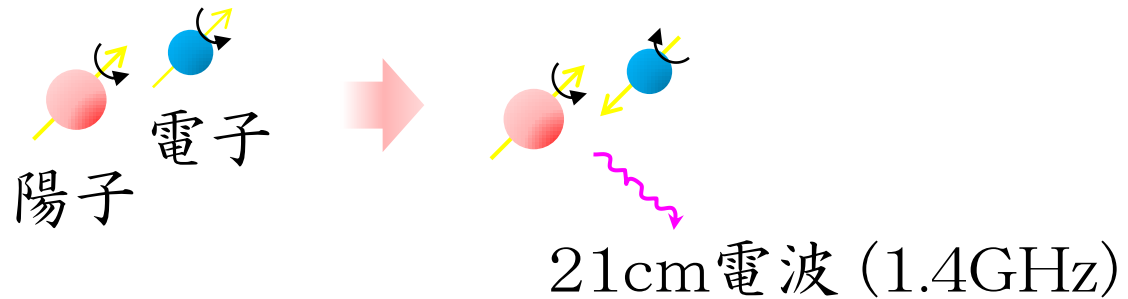


21cm線(z=30, SKA)



# 21cm線

## 水素原子の超微細構造

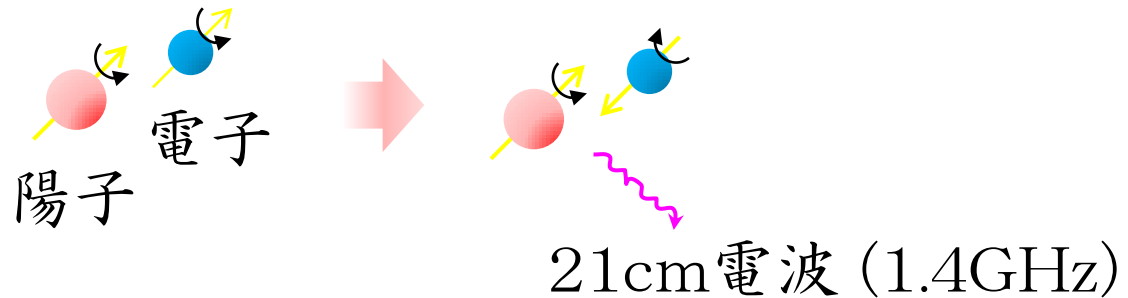


$$\delta T_b = 27 [\text{mK}] x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{T_S - T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \left[ \frac{\partial_r v_r}{(1+z)H(z)} \right]^{-1}$$

↑ HI存在比  
↑ バリオン密度ゆらぎ  
↑ スピン温度  
↑ 特異速度

# 21cm線

## 水素原子の超微細構造



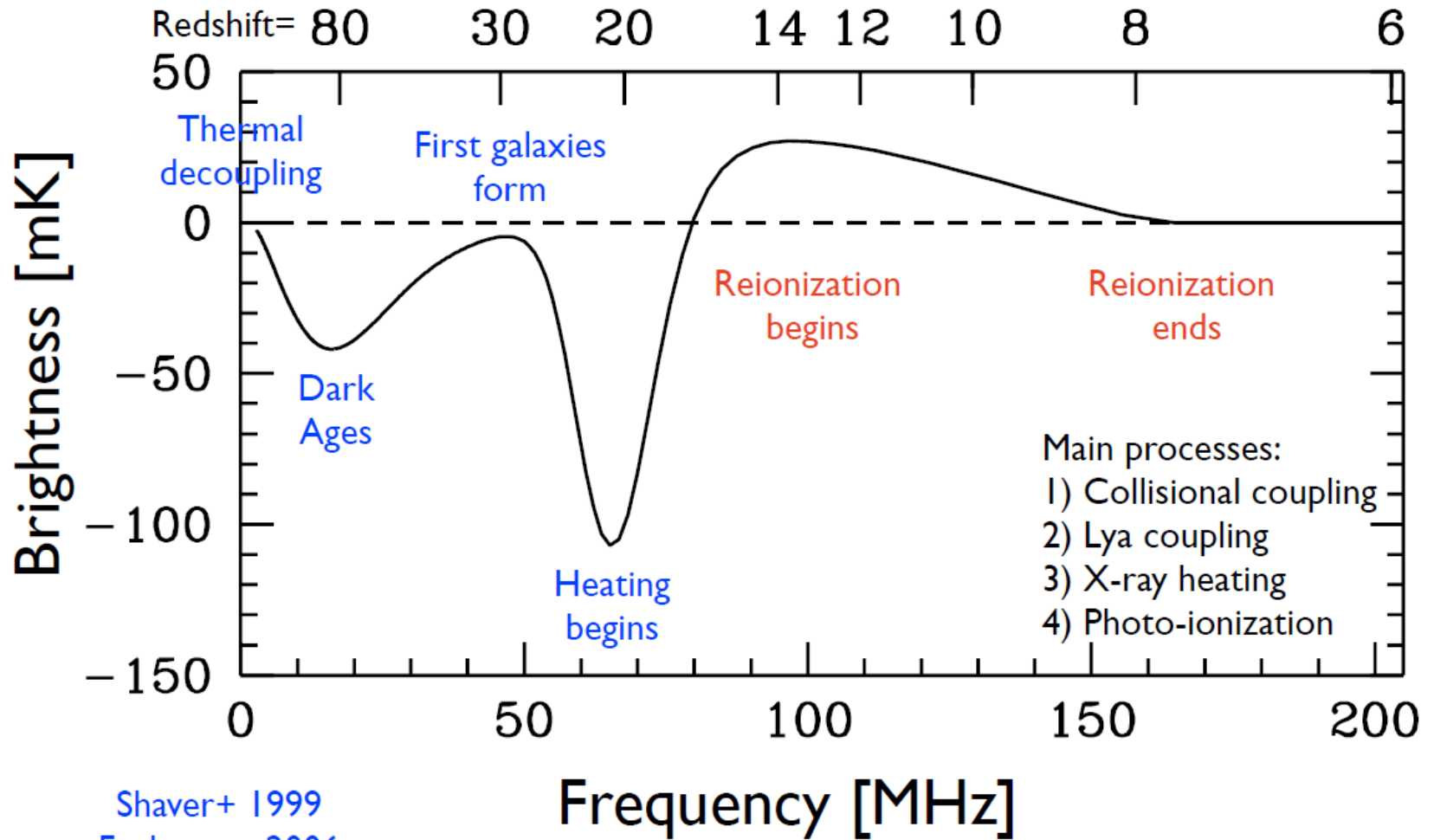
$$\delta T_b = 27 [\text{mK}] x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{T_S - T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \left[ \frac{\partial_r v_r}{(1+z)H(z)} \right]^{-1}$$

↑ ↑ ↑ ↑

21cm線には天体物理・宇宙論の重要な情報が詰まっている 速度

# 輝度温度

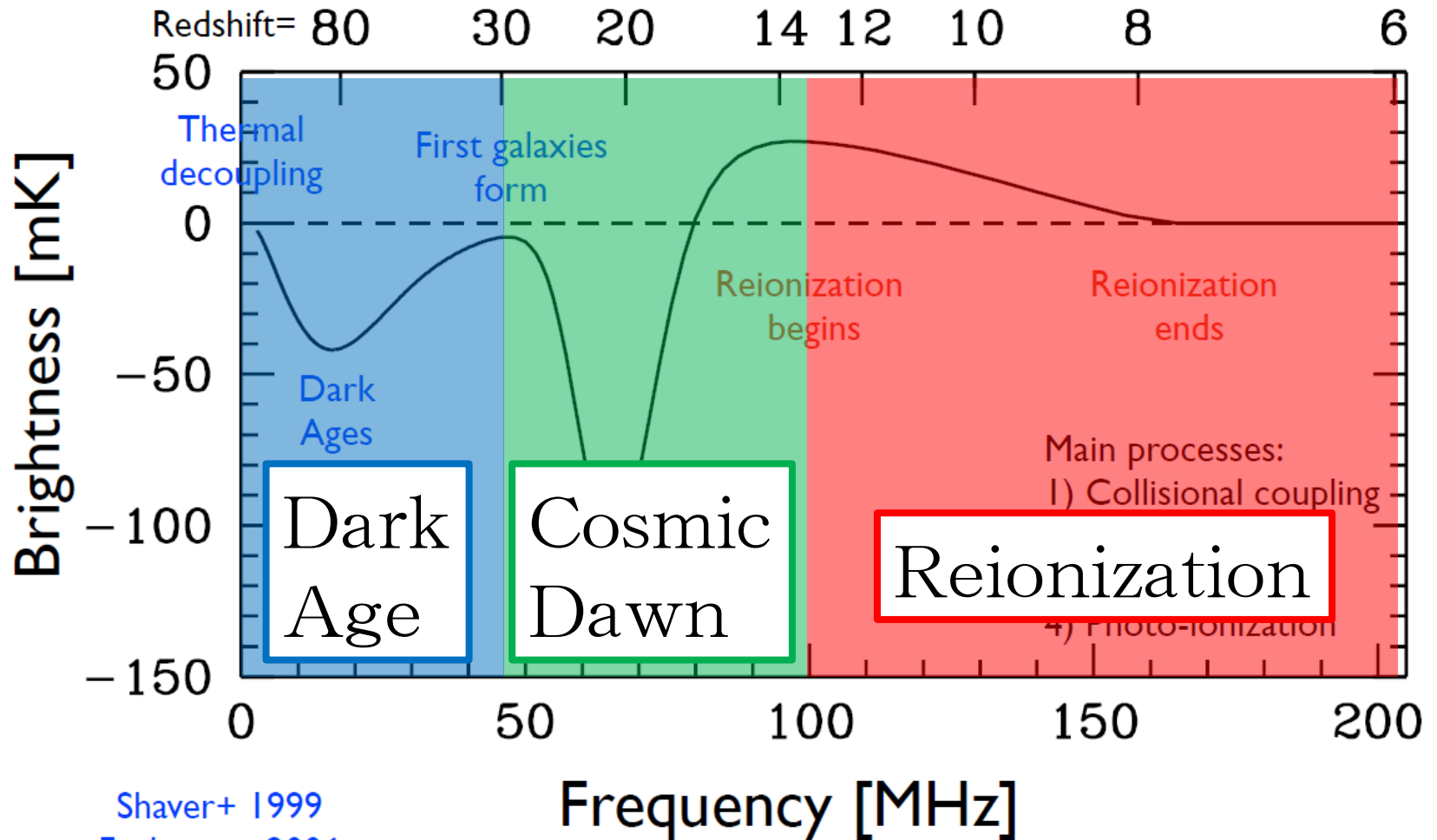
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 輝度温度

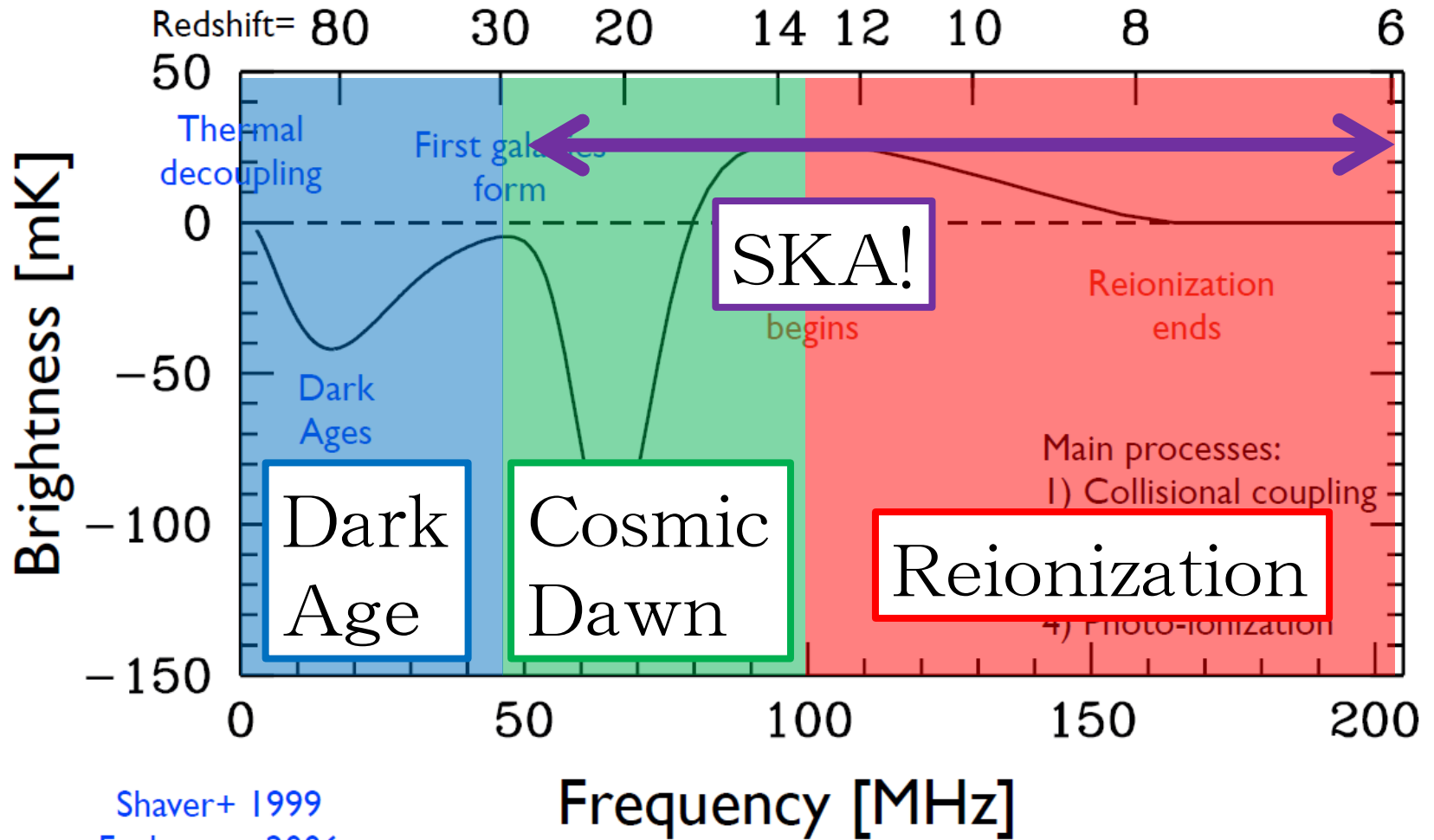
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 輝度温度

CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。

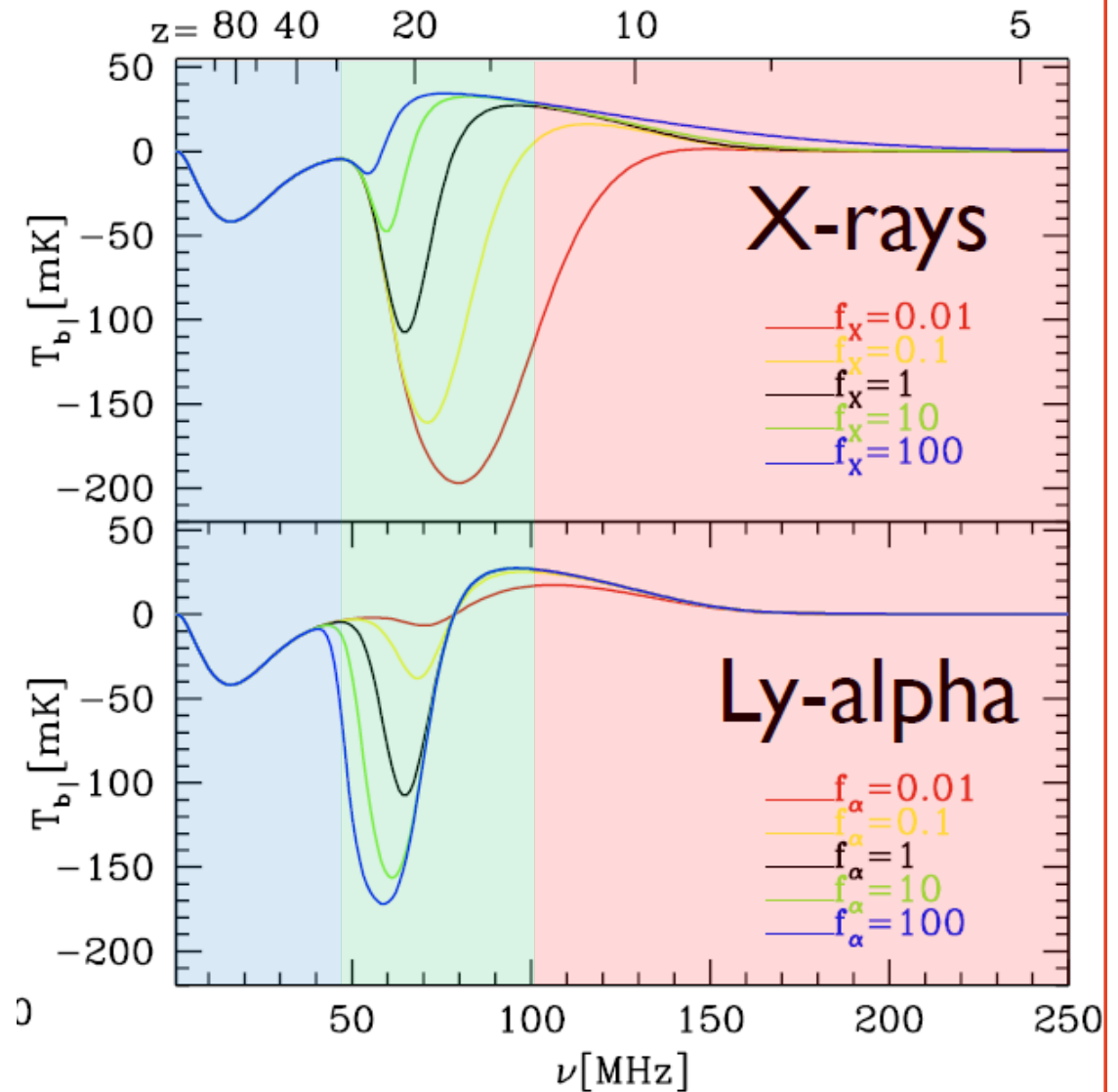


Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 例

影響する要因

- X線強度
- 紫外線強度
- 脱出確率
- 星形成史
- 初期質量関数
- ガス分布

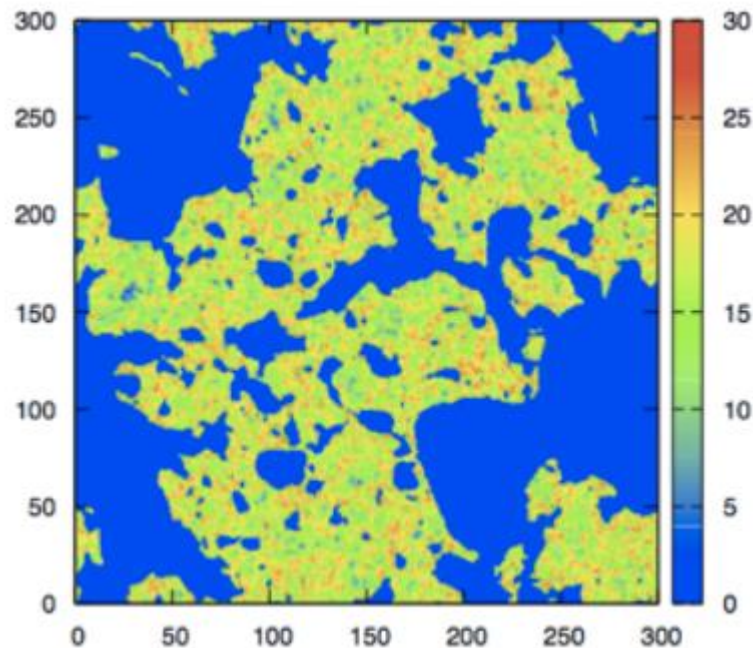
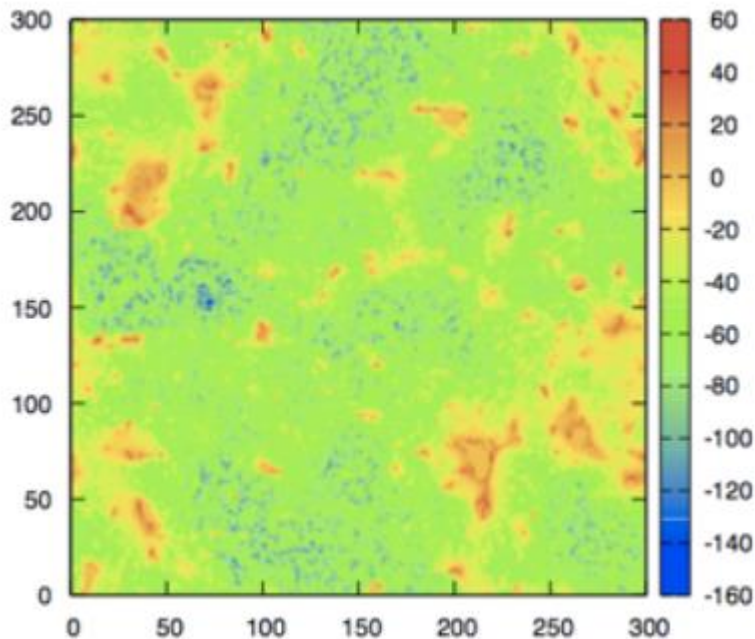
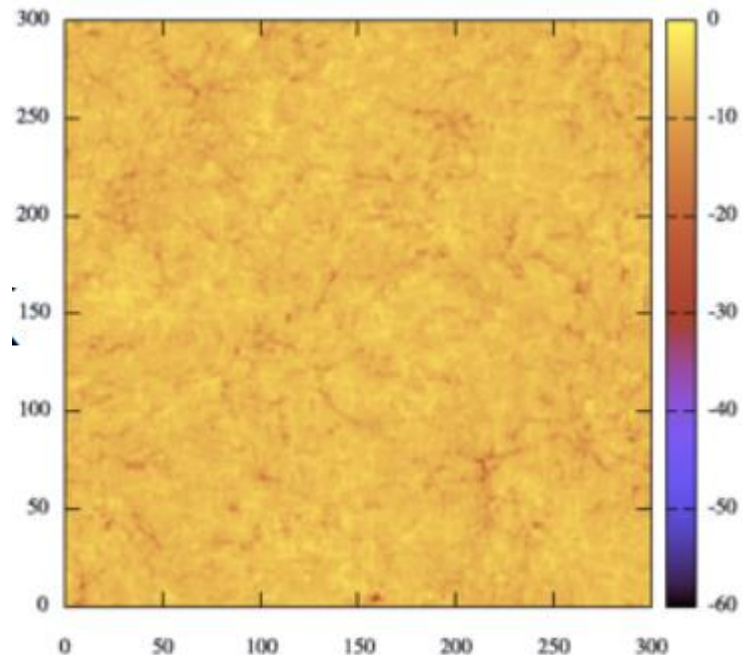




# 21cm線ゆらぎ

Shimabukuro, Yoshiura,  
KT, Yokoyama, Ichiki,  
in preparation

島袋君ポスター  
吉浦君トーク

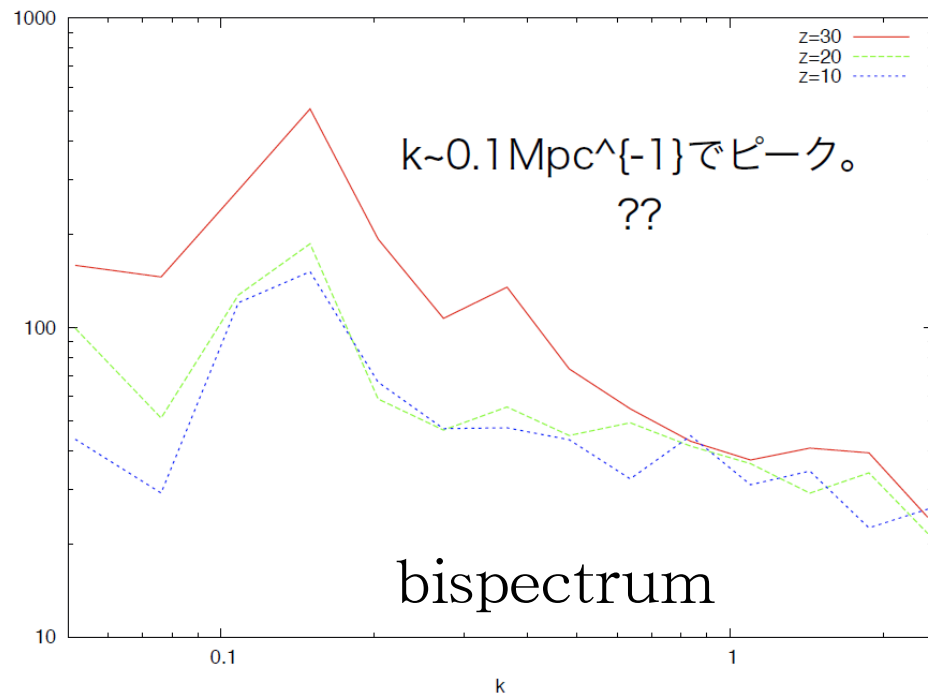
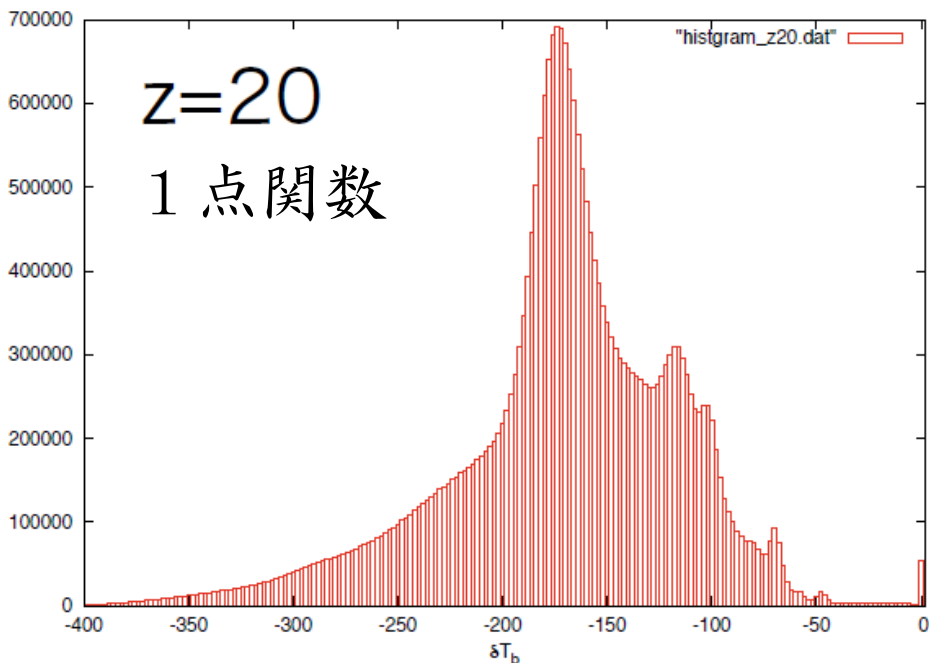
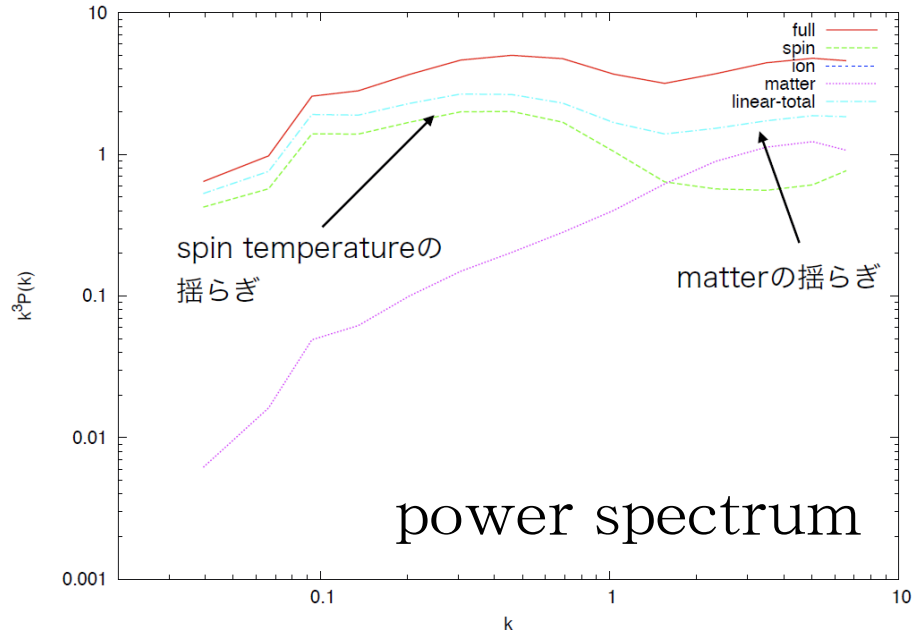


# 21cm線ゆらぎ

Shimabukuro, Yoshiura,  
KT, Yokoyama, Ichiki,  
in preparation

島袋君ポスター  
吉浦君トーク

$z=30$



# 再電離から何がわかるか？

天体物理

宇宙論

新しい物理

# 再電離から何がわかるか？

## 天体物理

- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

## 新しい物理

# 再電離から何がわかるか？

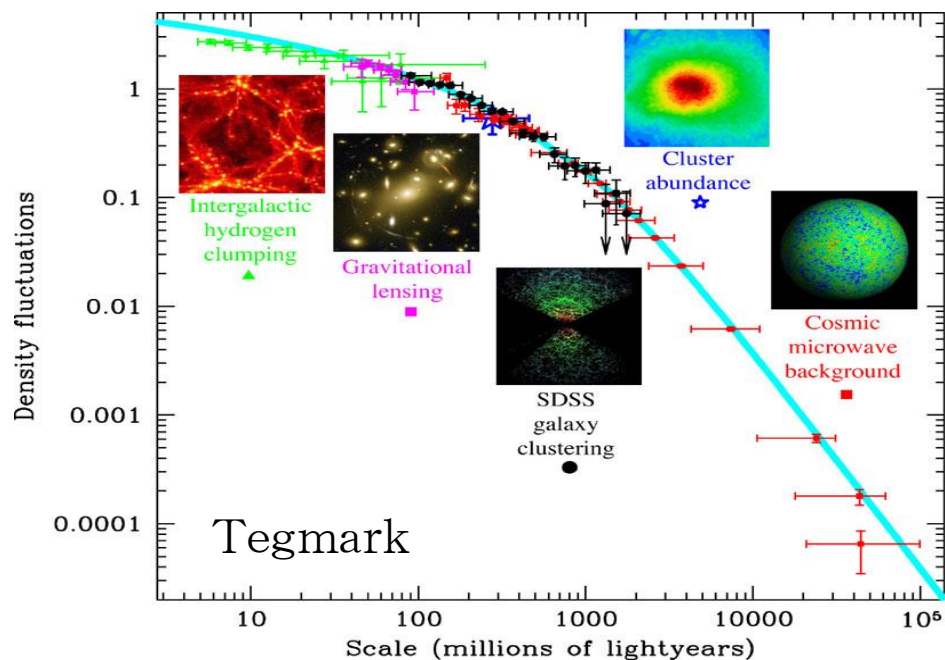
## 天体物理

- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

- ・ 小スケールゆらぎ、非ガウス性
- ・ 早期暗黒エネルギー
- ・ ニュートリノ質量
- ・ 原始磁場

## 新しい物理



# 再電離から何がわかるか？

## 天体物理

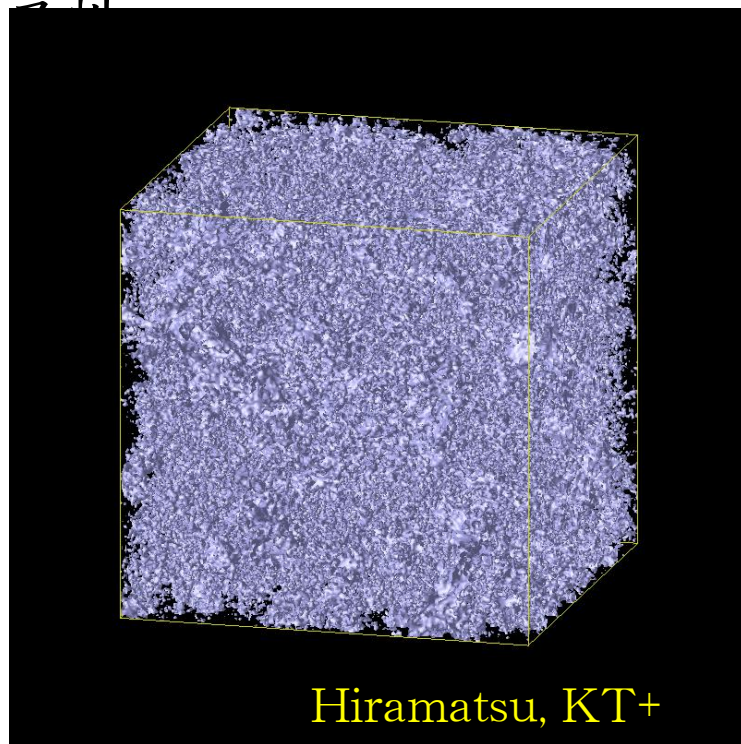
- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

- ・ 小スケールゆらぎ、非ガウ
- ・ 早期暗黒エネルギー
- ・ ニュートリノ質量
- ・ 原始磁場

## 新しい物理

- ・ 暗黒物質の崩壊
- ・ 原始ブラックホールの蒸発
- ・ 宇宙ひも
- ・ 物理定数の時間変化





# 再電離から何がわかるか？

## 天体物理

- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

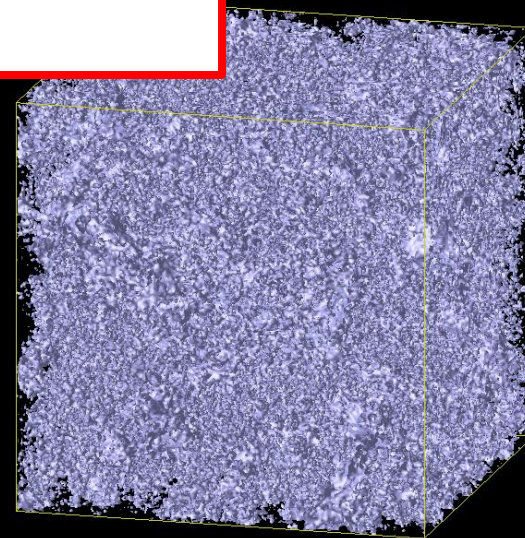
## 宇宙論

- ・ 小規模構造
- ・ 早期宇宙
- ・ ニュートンの重力
- ・ 原始磁場

## 新しい物理

- ・ 暗黒物質の崩壊
- ・ 原始ブラックホールの蒸発
- ・ 宇宙ひも
- ・ 物理定数の時間変化

暗黒時代・再電離期は  
宝の山！



# 5、原始ゆらぎの非ガウス性

# インフレーションと原始ゆらぎ

## インフレーション

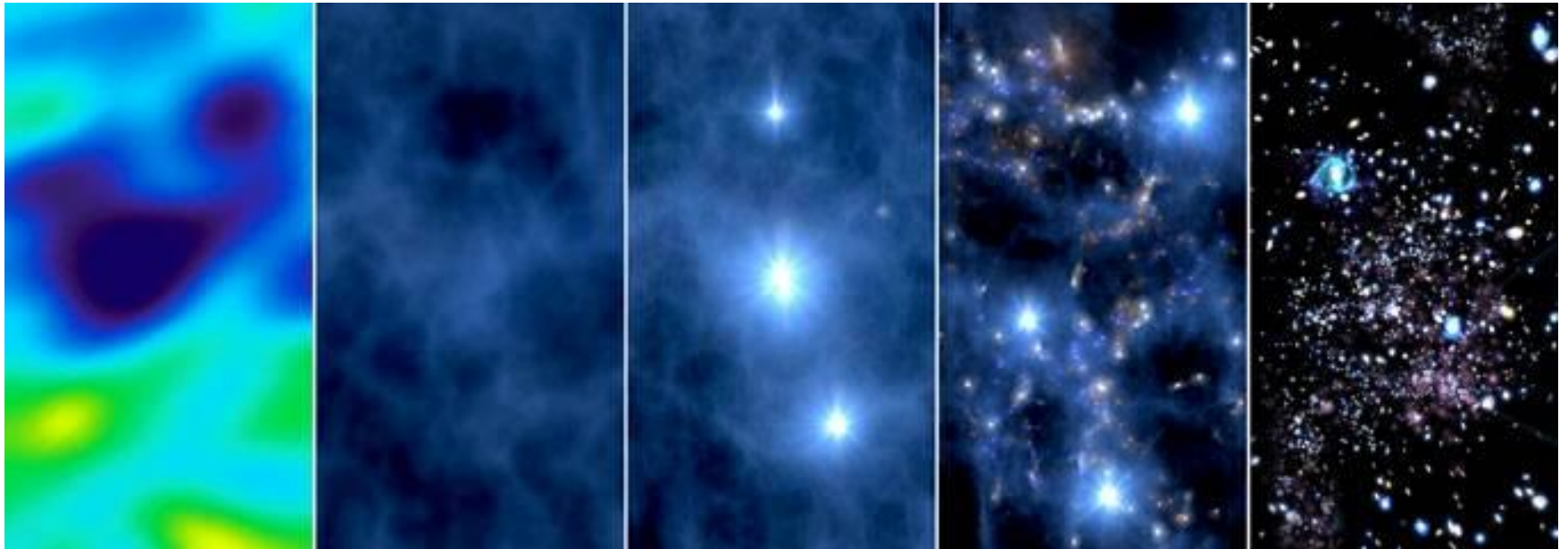
- ・密度ゆらぎ

→ CMBゆらぎ、大規模構造の種

- ・重力波

→ CMB B mode、背景重力波

これらの観測により、モデル確定、検証ができる

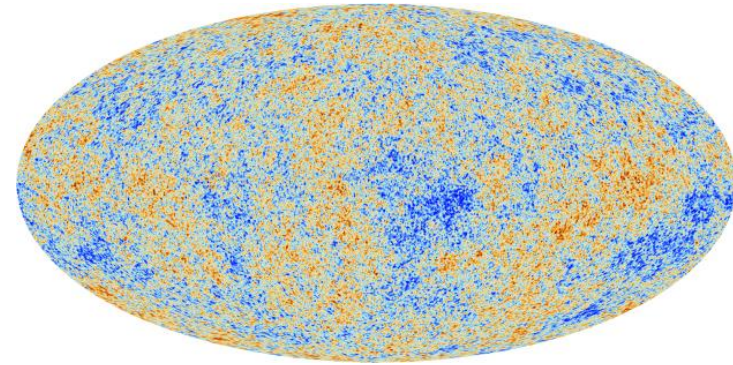


# 原始密度ゆらぎの性質

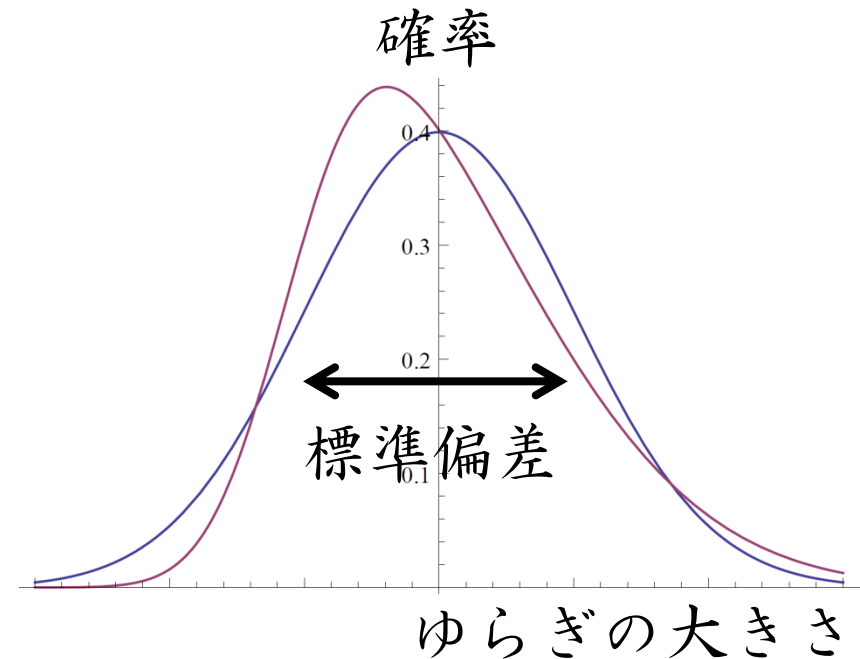
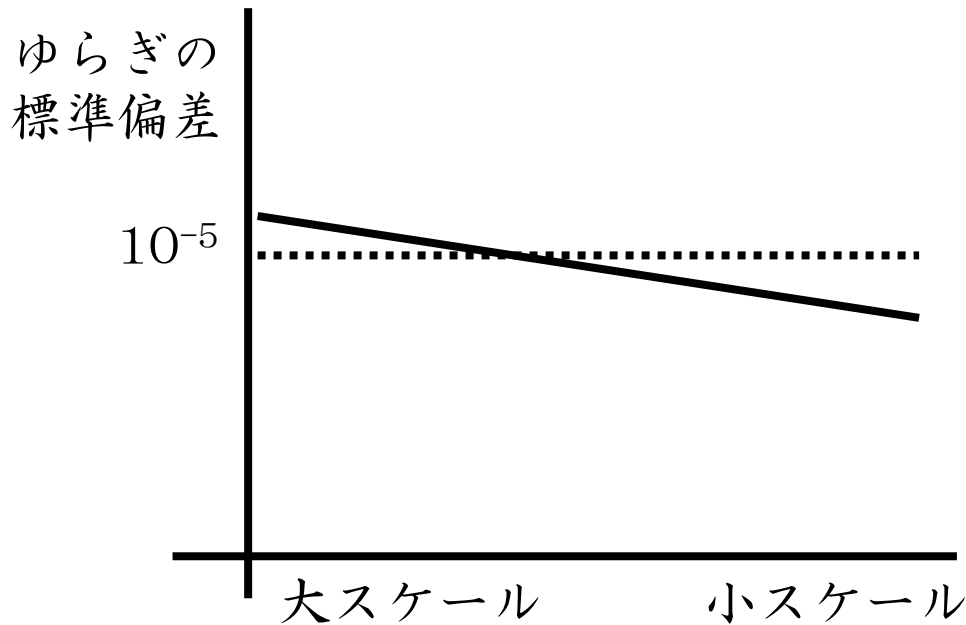
Planck

インフレーションの予言

- 大きさ → エネルギースケール
- ほぼスケール不変  
→ ずれが測られている
- ほぼガウス分布  
→ まだ非ガウス性は見えていない



赤が多い？  
青が多い？



# インフレーションの検証

- スケール不変な密度ゆらぎ
- スケール不変からのずれ
- 背景重力波 → BICEP2? PolarBEAR?
- 背景重力波のスペクトル → LiteBIRD?
- 密度ゆらぎの非ガウス性 → SKA+光赤外?

# 非ガウス性の予言と観測

非ガウス性

$f_{\text{NL}}$

10

1

0.1

0.01

ゆらぎの非線形効果

サイクリックモデル

シンプルインフレーション

非標準  
インフレーション

# 非ガウス性の予言と観測

非ガウス性

$f_{\text{NL}}$

10

1

0.1

0.01

Planckで否定

ゆらぎの非線形効果

サイクリックモデル

シンプルインフレーション

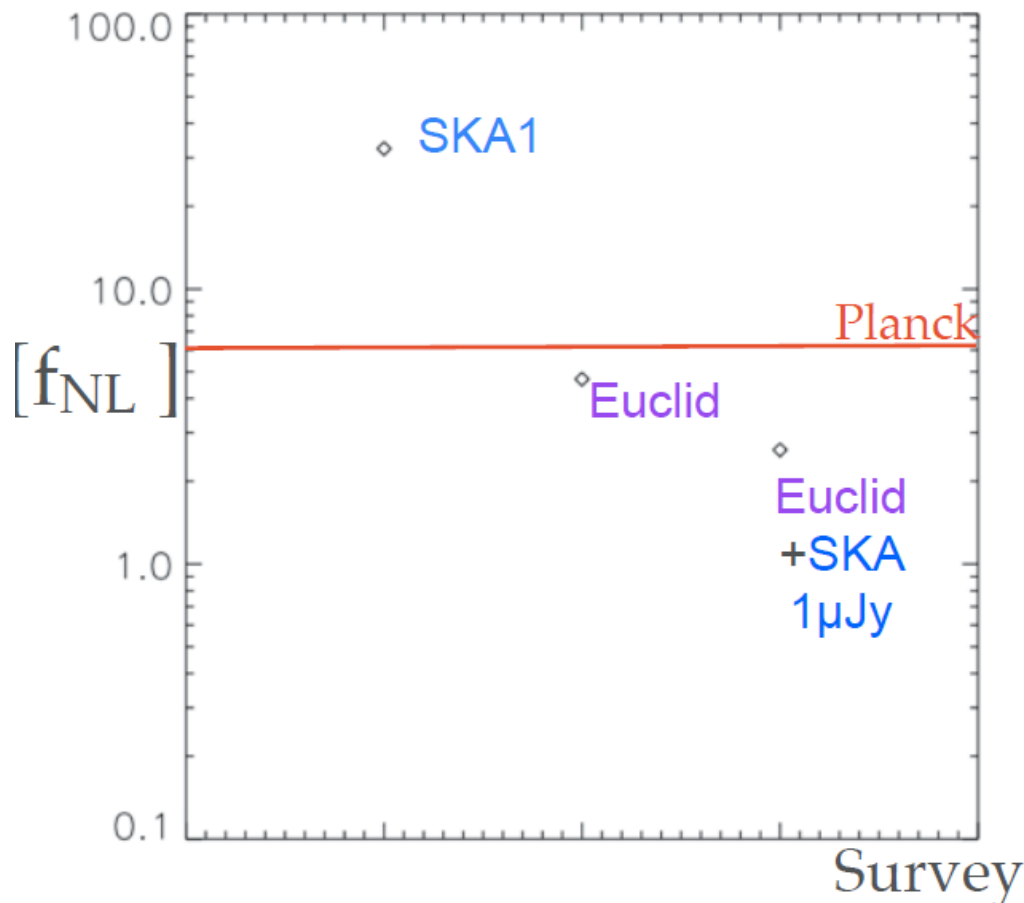
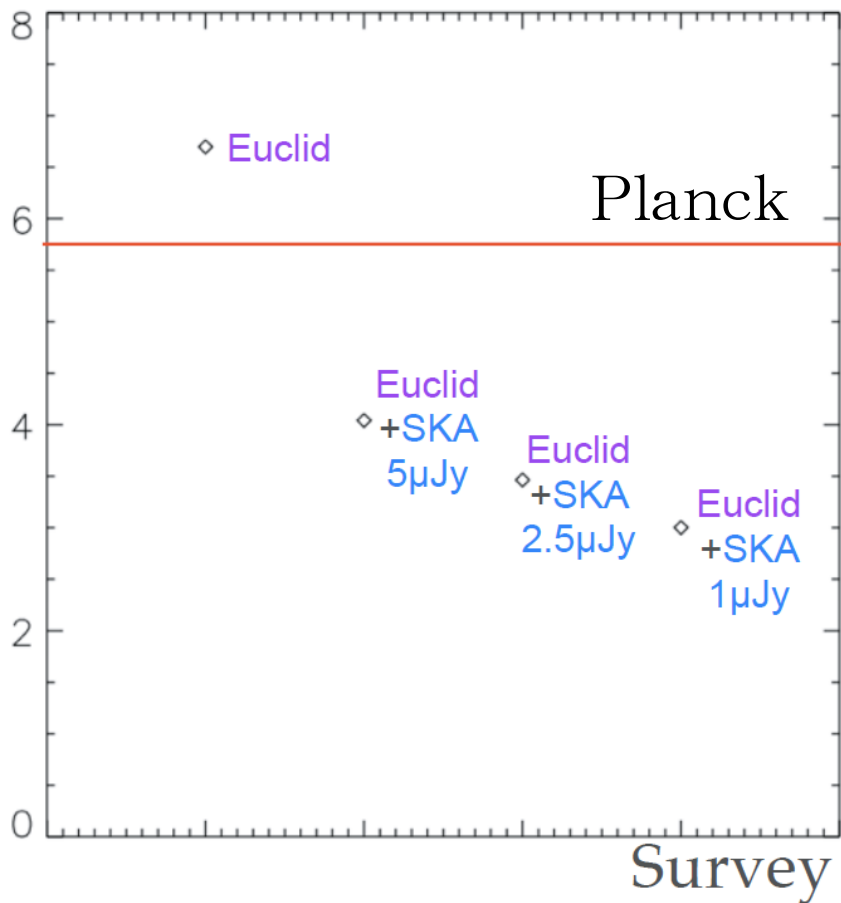
非標準  
インフレーション



# 非ガウス性への制限予測

ISW (CMBと銀河の相関)  
による  $f_{\text{NL}}$  への制限

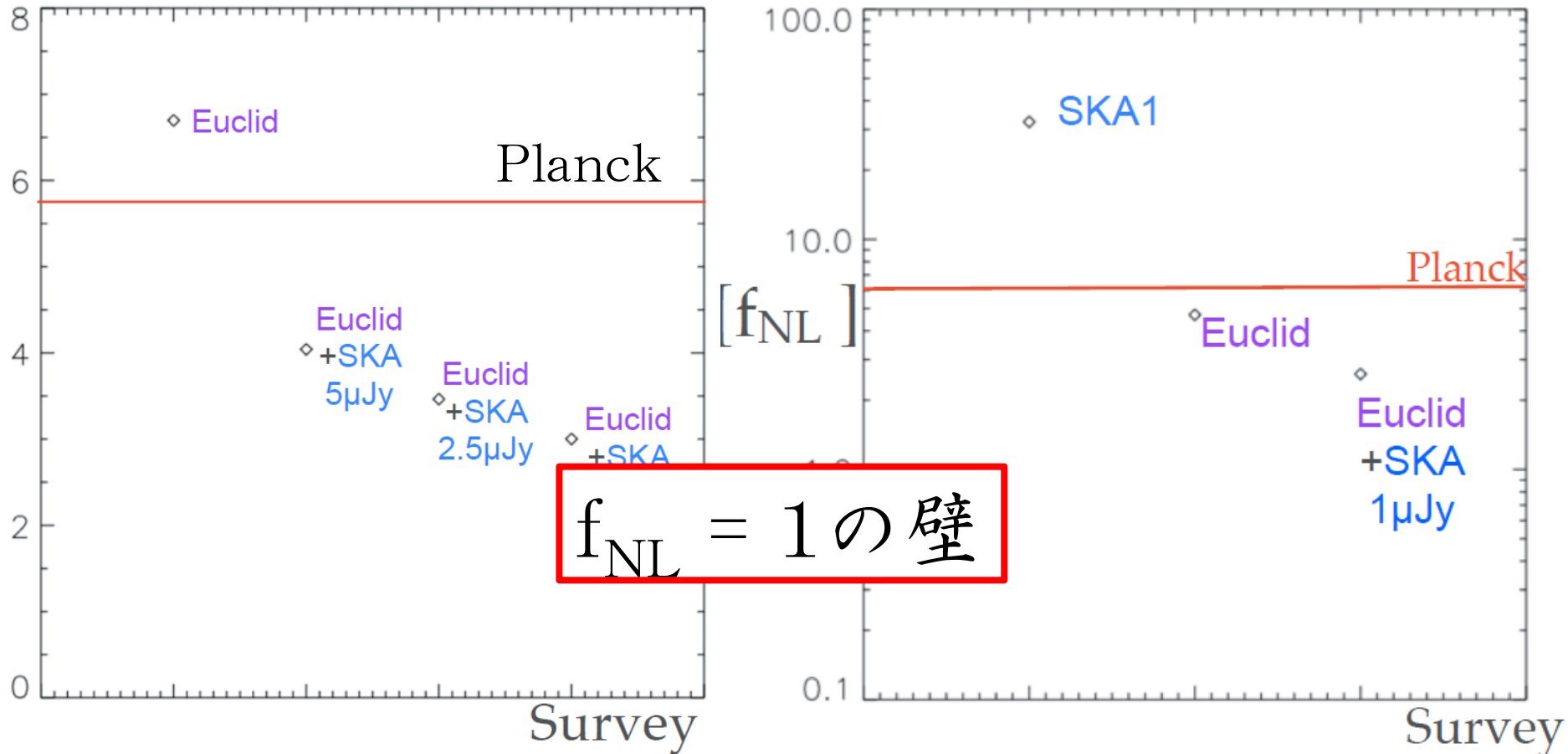
銀河のパワースペクトル  
による  $f_{\text{NL}}$  への制限



# 非ガウス性への制限予測

ISW (CMBと銀河の相関)  
による  $f_{\text{NL}}$  への制限

銀河のパワースペクトル  
による  $f_{\text{NL}}$  への制限



# 非ガウス性の予言と観測

非ガウス性

$f_{\text{NL}}$

10

1

0.1

0.01

Planckで否定

ゆらぎの非線形効果

サイクリックモデル

シンプルインフレーション

非標準  
インフレーション

$f_{\text{NL}} = 1$ では物足りない・・・。

# multi-tracer method

Seljak 2009

cosmic varianceをなくす

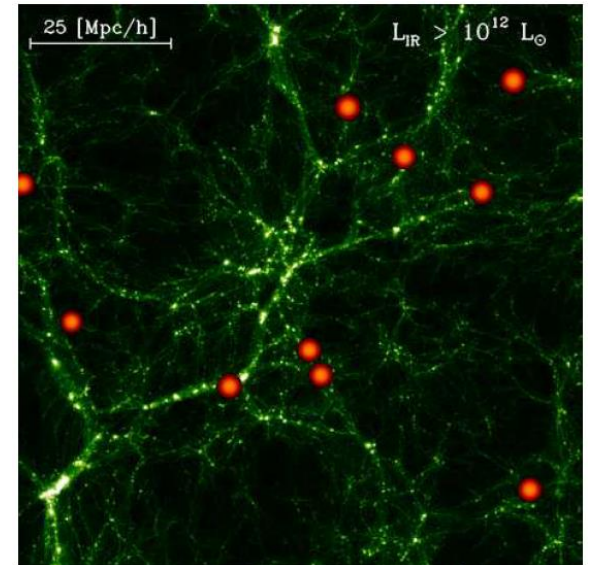
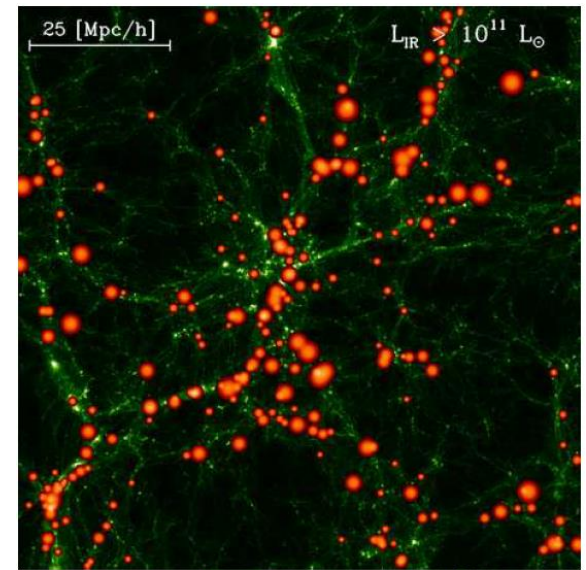
異なる bias を持つ 2 種の天体

$$\begin{aligned} \delta_1 &= b_1 \delta_{\text{DM}} \\ \delta_2 &= b_2 \delta_{\text{DM}} \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} \frac{b_2}{b_1} &= \frac{\delta_2}{\delta_1} \end{aligned}$$

ランダム性が消える！

bias は基本的に定数だが  
非ガウス性があると  
スケール依存性が出る。

$$b(k) = b_0 + f_{\text{NL}} \Delta b(k)$$

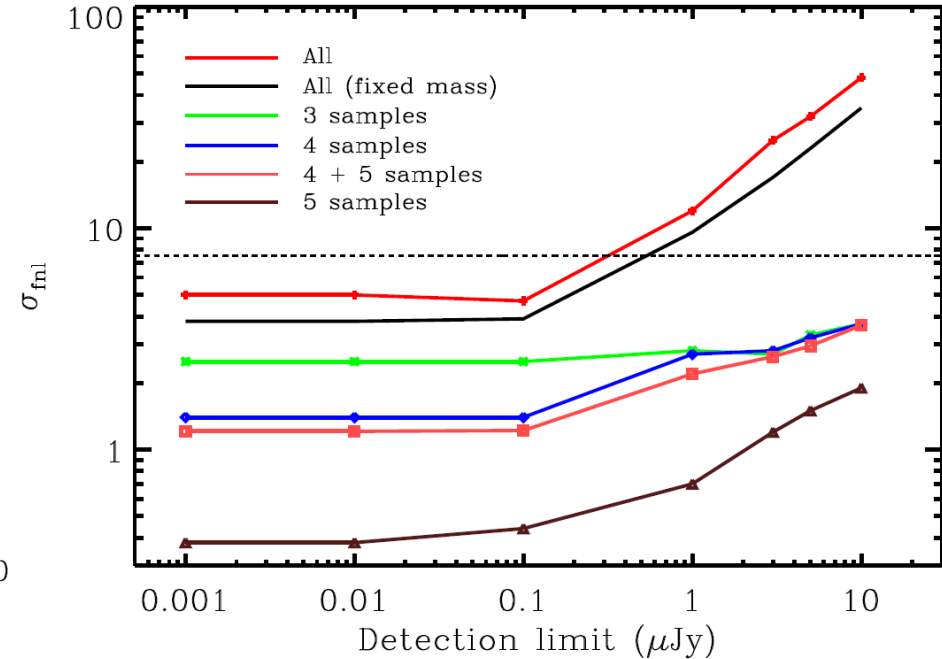
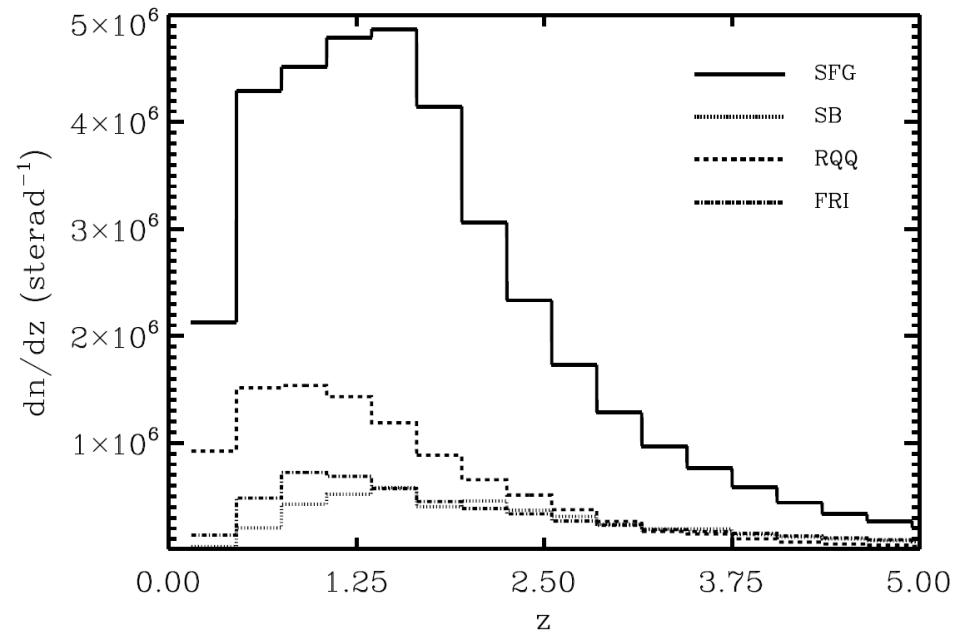


cosmic variance なしに  
非ガウス性を制限できる

# 非ガウス性：multi-tracer

Ferramacho+ 2014

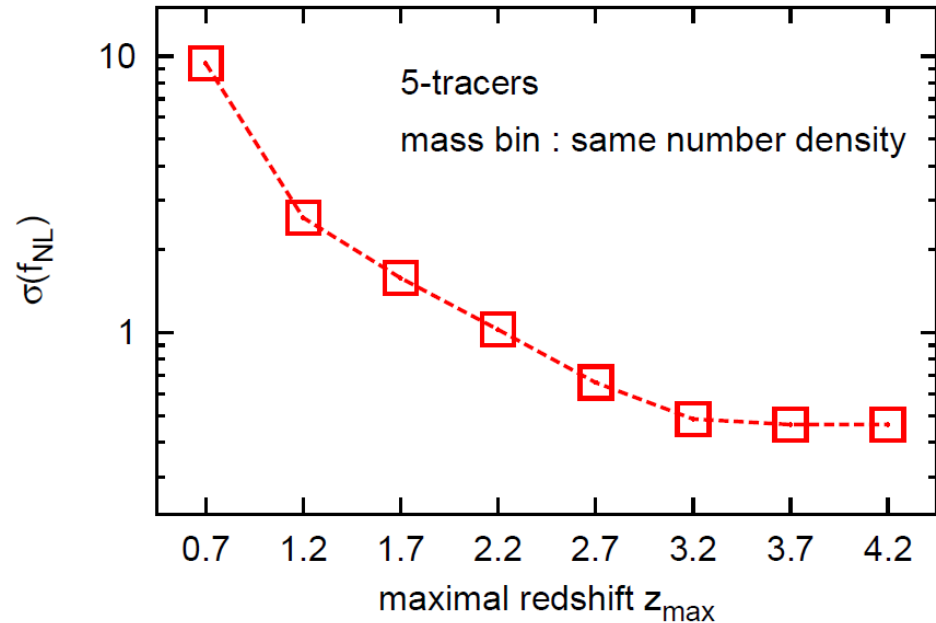
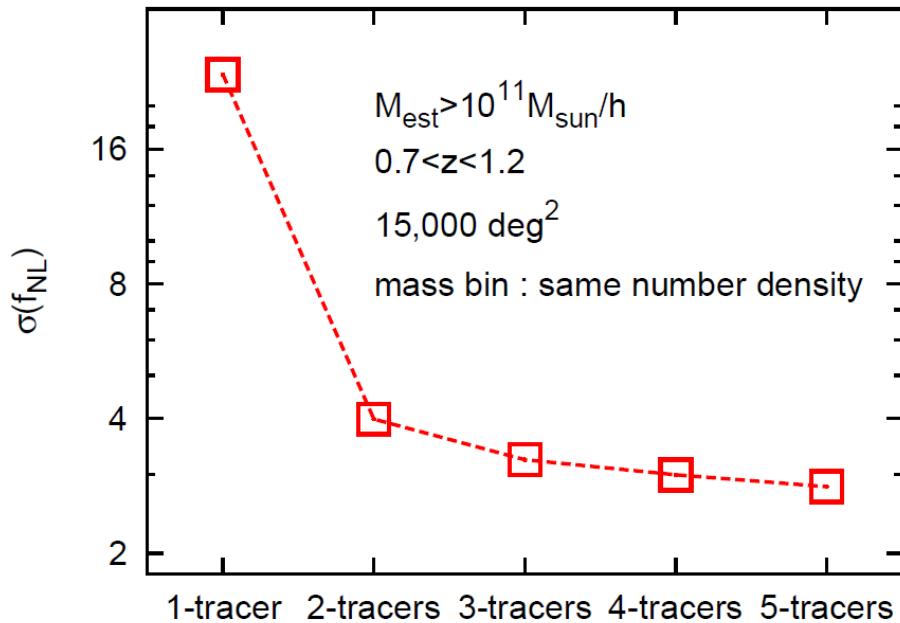
SKAで観測される様々な種類の銀河を tracerとして使い、 $f_{\text{NL}}$ を制限



$f_{\text{NL}} = 1$ の壁を崩す！

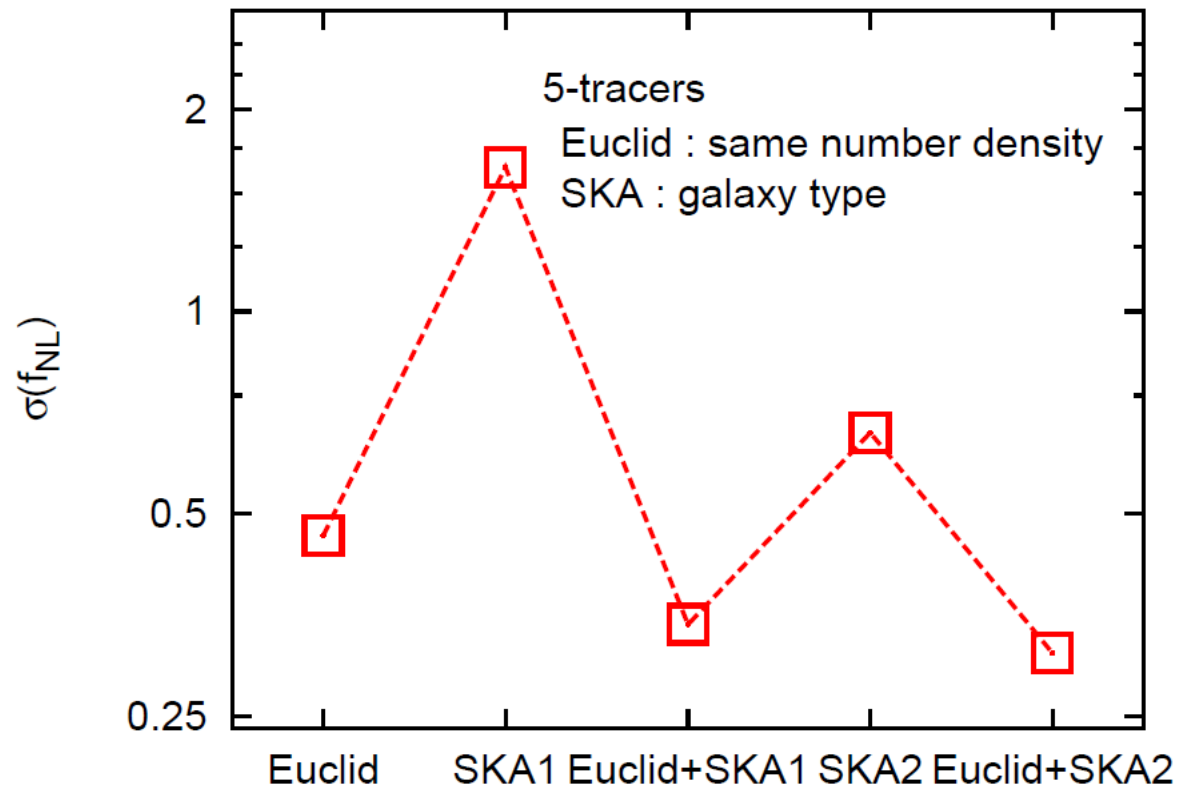
# 非ガウス性：multi-tracer

Yamauchi, KT, Oguri 2014  
Euclid + SKA



# 非ガウス性：multi-tracer

Yamauchi, KT, Oguri 2014



SKA, Euclid単独で $f_{NL} = 1$ の壁を崩し  
その協働で $f_{NL} = O(0.1)$ を狙う！



# 非ガウス性への制限

非ガウス性

$f_{NL}$

10

1

0.1

0.01

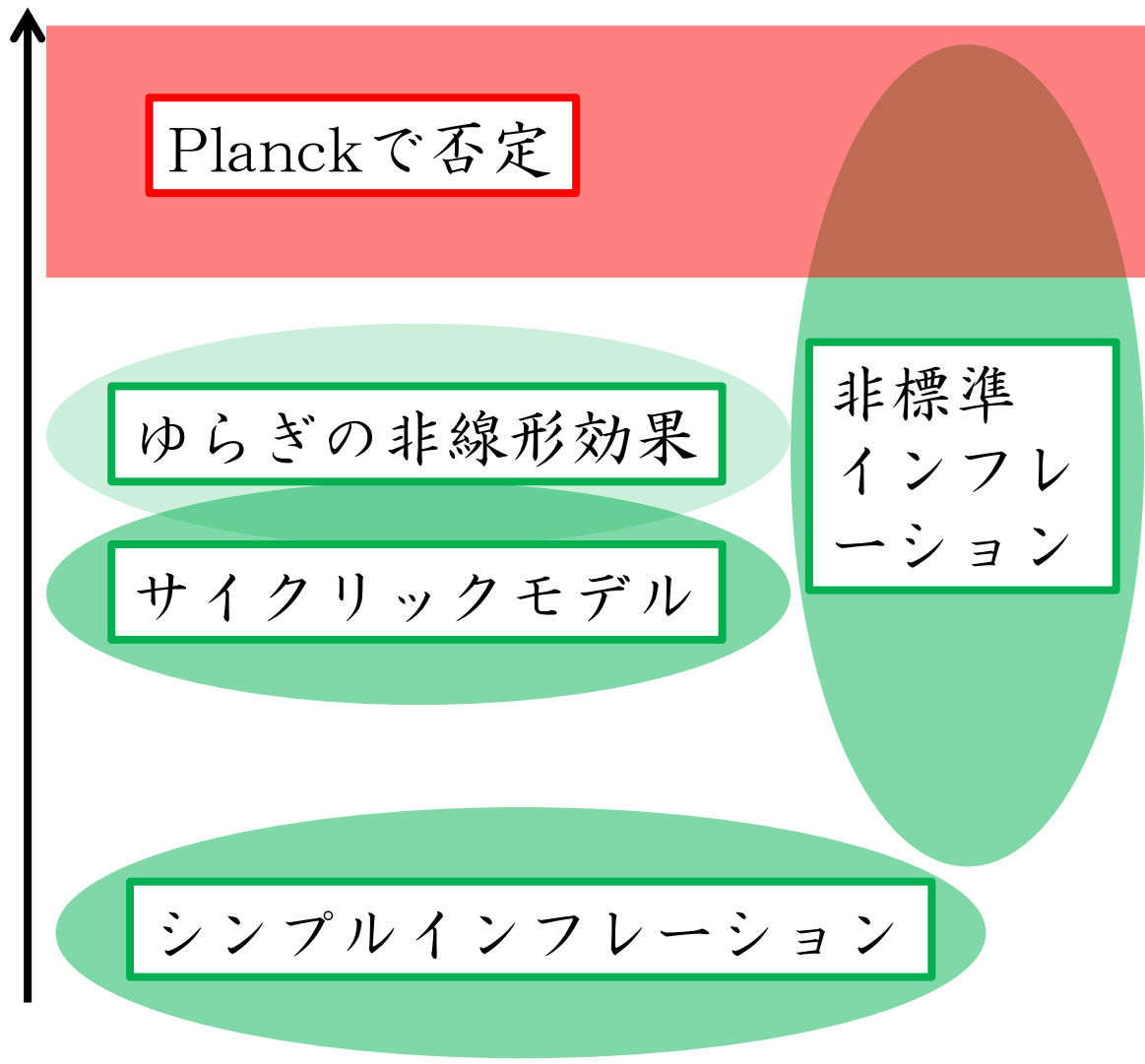
Planckで否定

ゆらぎの非線形効果

サイクリックモデル

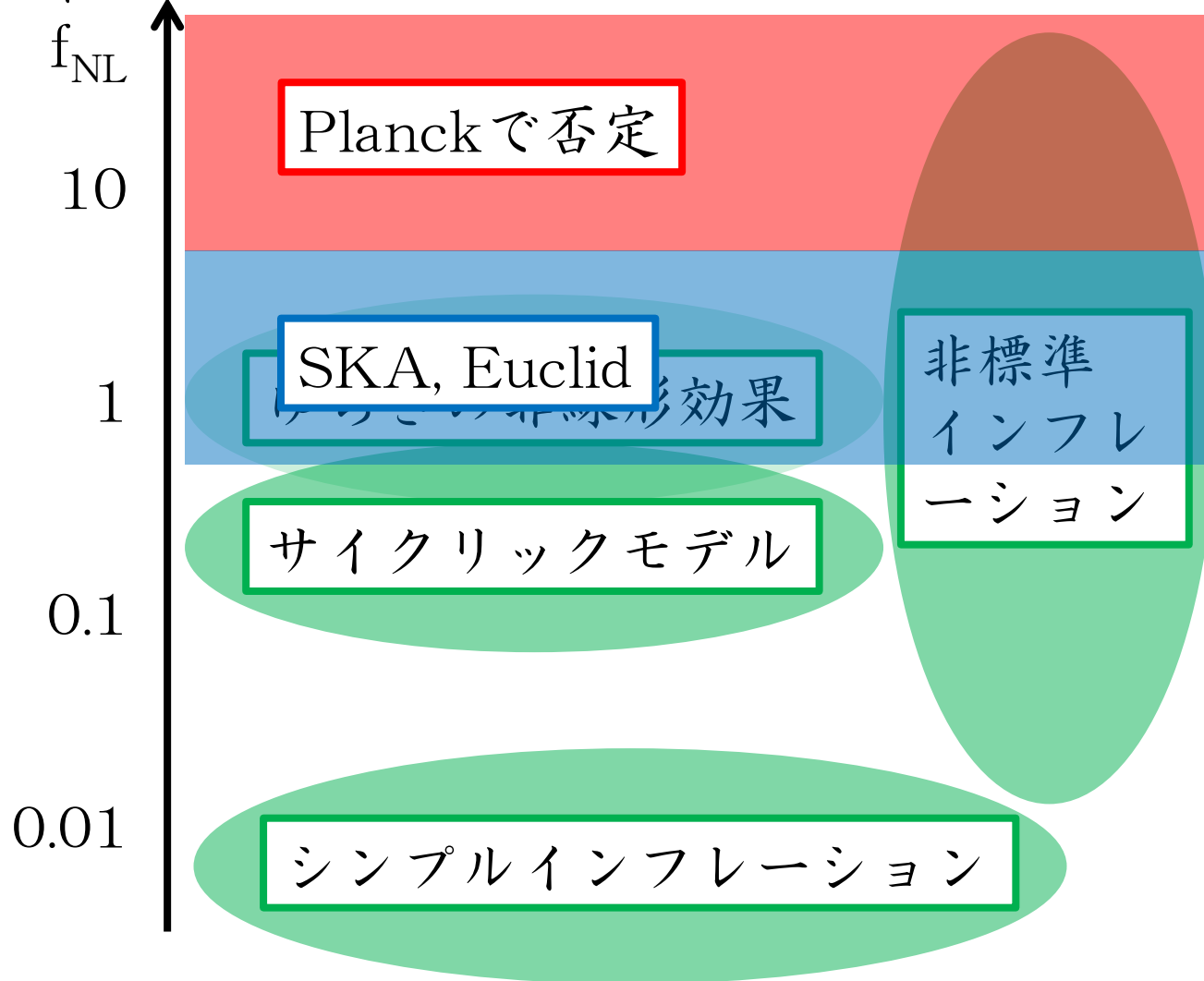
シンプルインフレーション

非標準  
インフレーション



# 非ガウス性への制限

非ガウス性



# 非ガウス性への制限

非ガウス性

$f_{NL}$

10

1

0.1

0.01

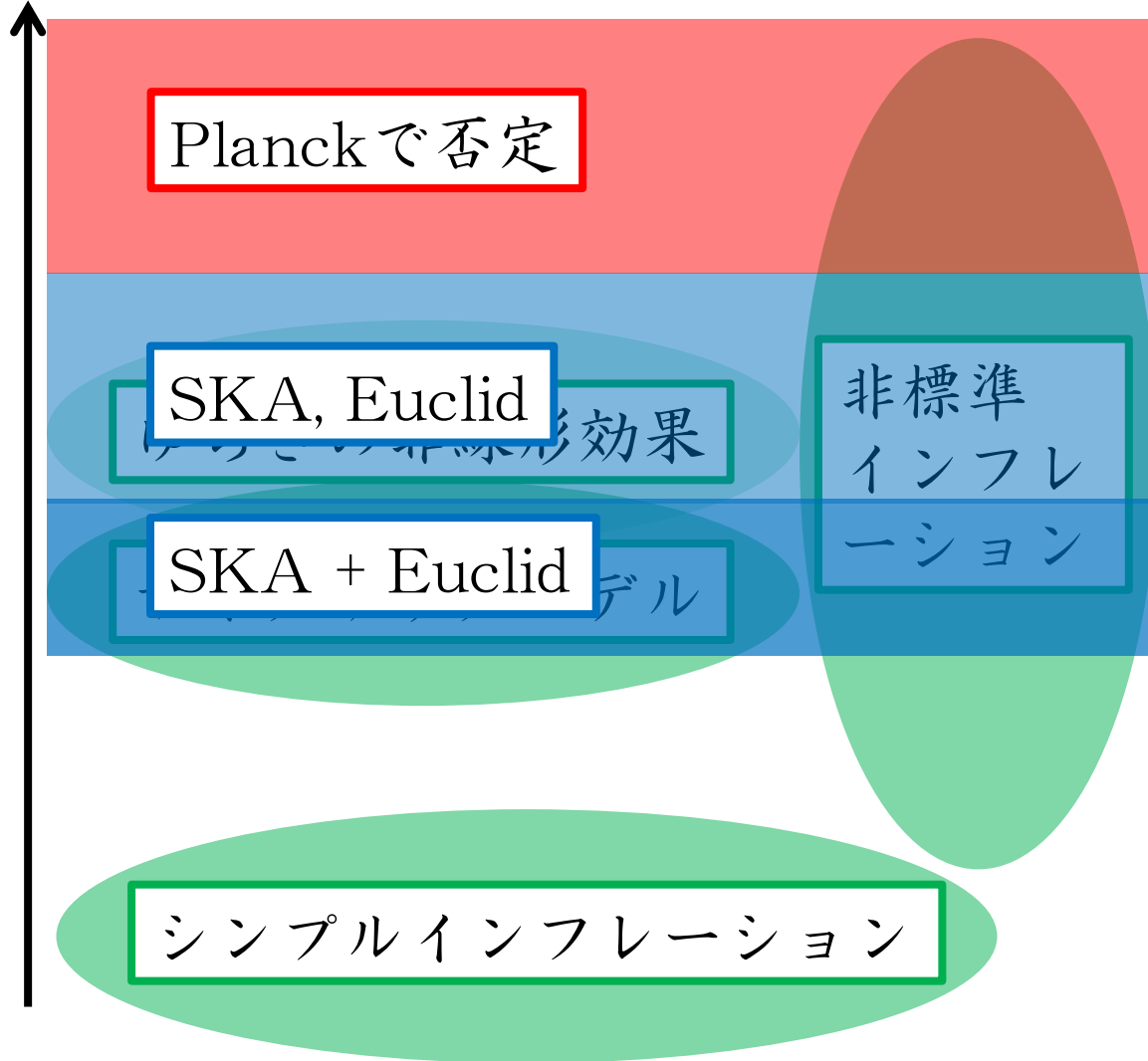
Planckで否定

SKA, Euclid

SKA + Euclid

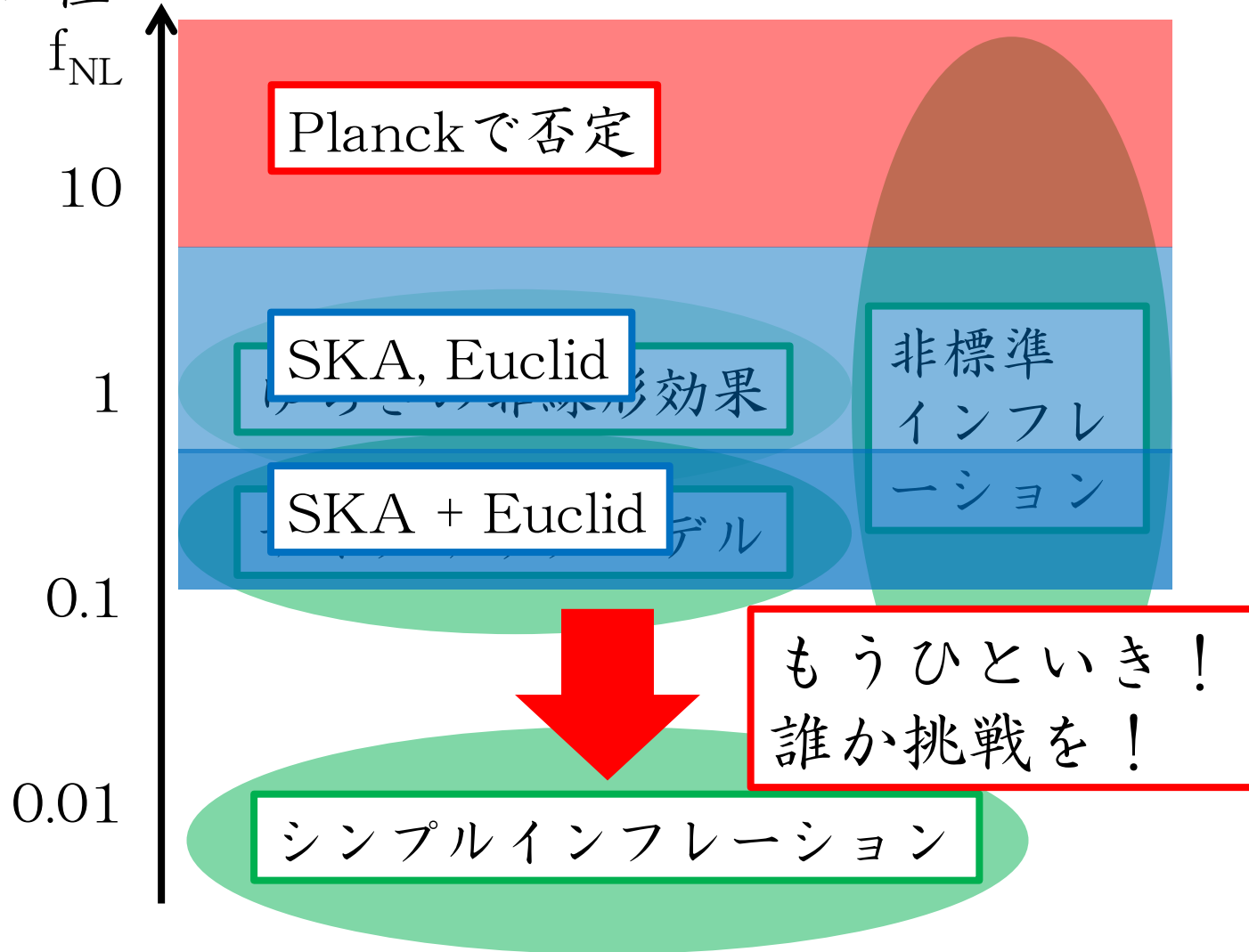
シンプルインフレーション

非標準  
インフレーション



# 非ガウス性への制限

非ガウス性



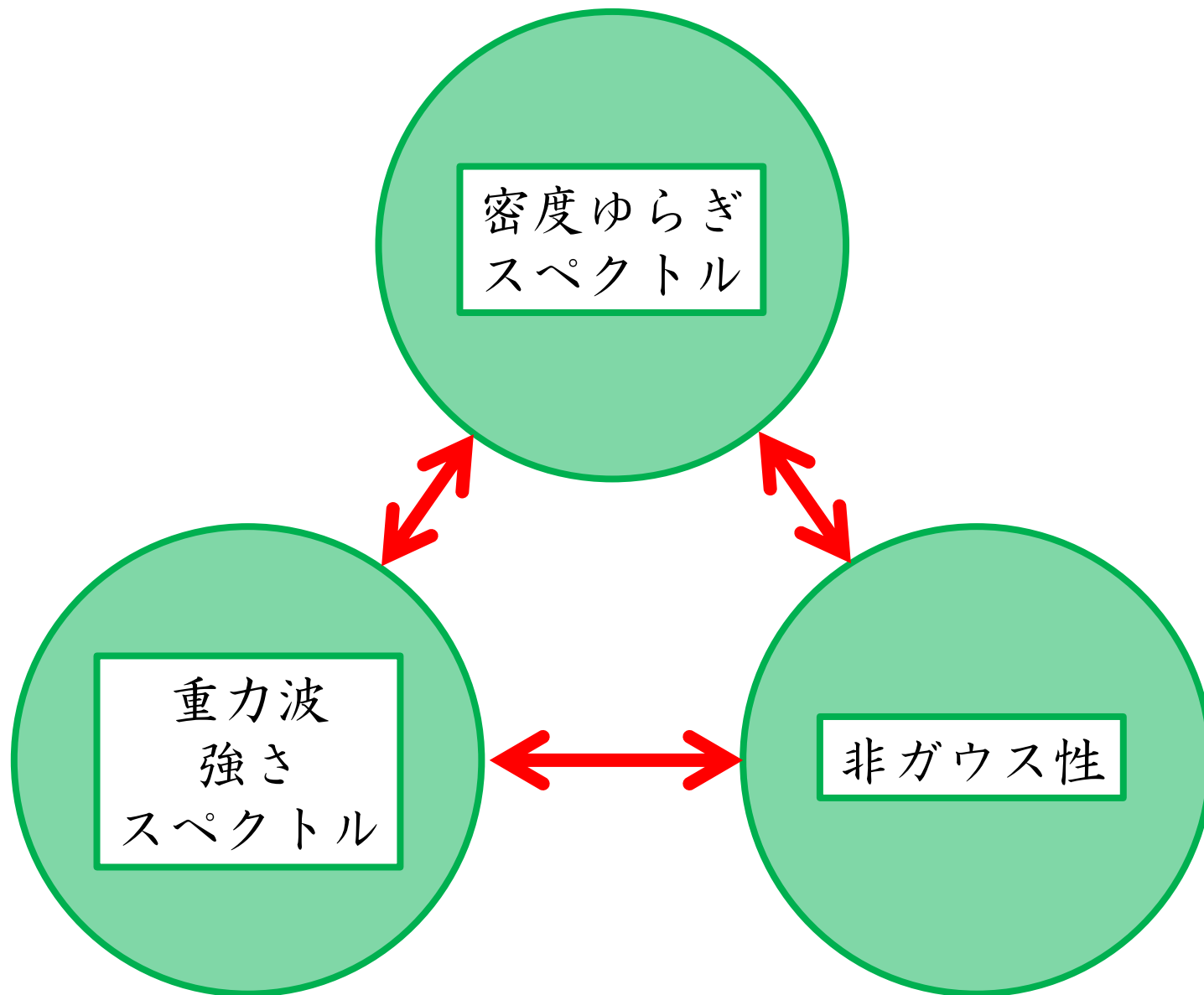
# インフレーションは本当にあったか？

密度ゆらぎ  
スペクトル

重力波  
強さ  
スペクトル

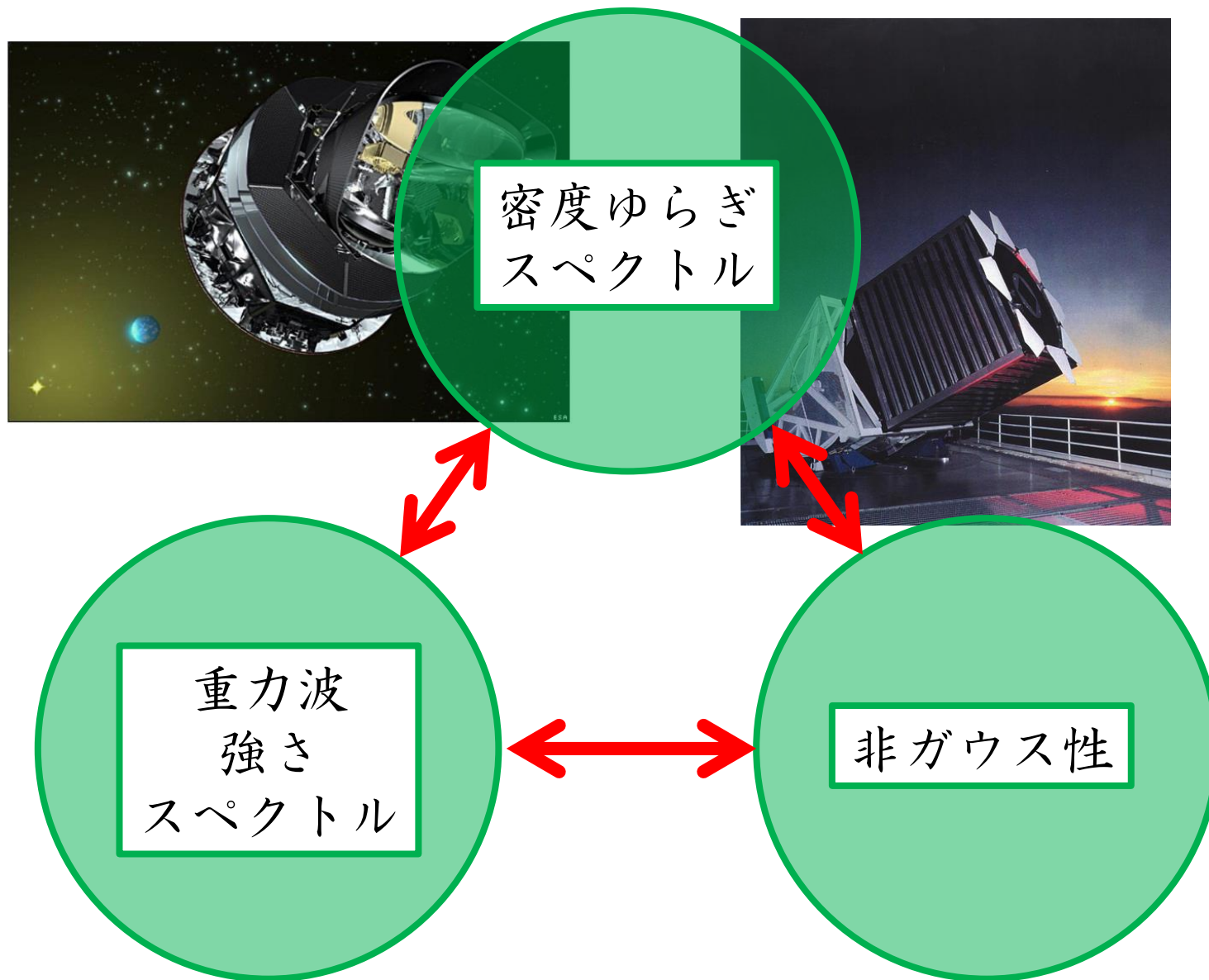
非ガウス性

# インフレーションは本当にあったか？

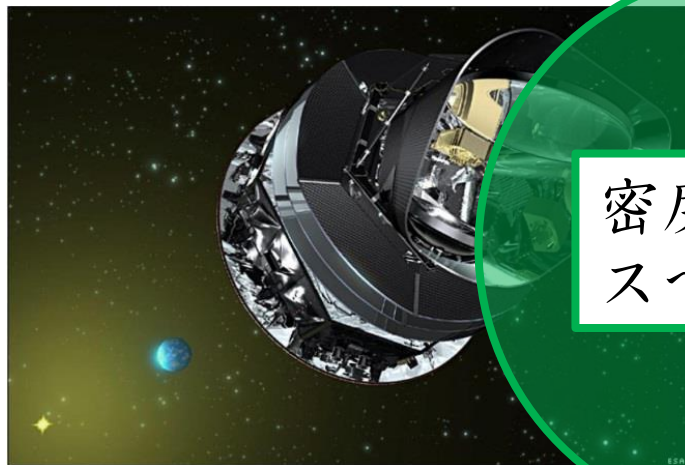




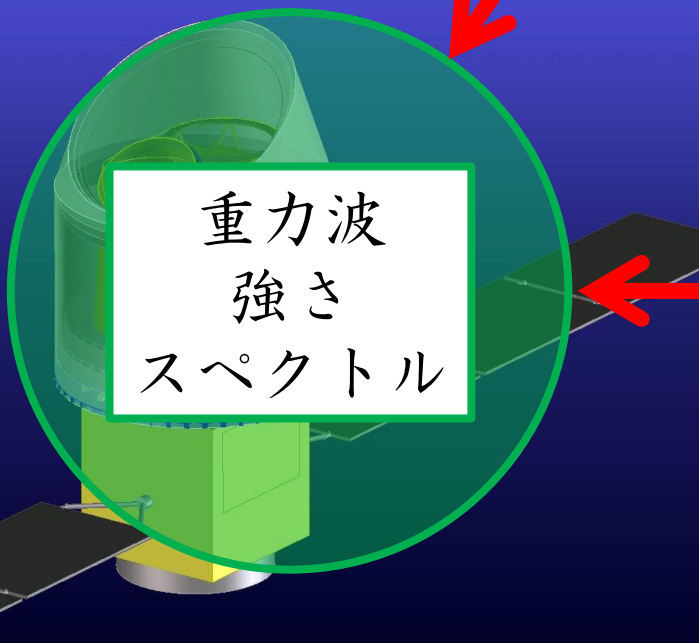
# インフレーションは本当にあったか？



# インフレーションは本当にあったか？



密度ゆらぎ  
スペクトル

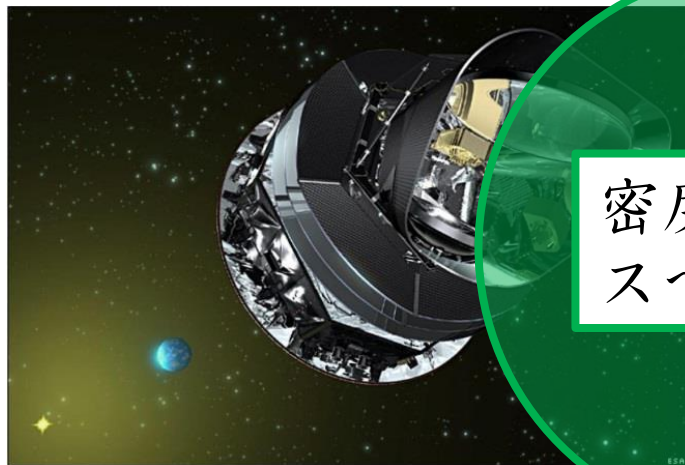


重力波  
強さ  
スペクトル

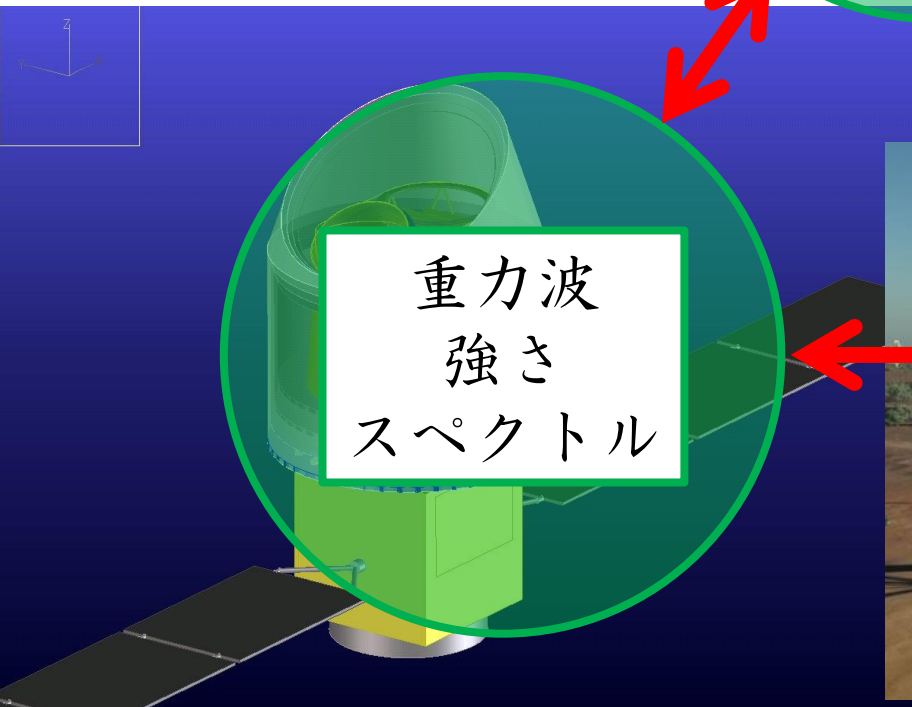


非ガウス性

# インフレーションは本当にあったか？



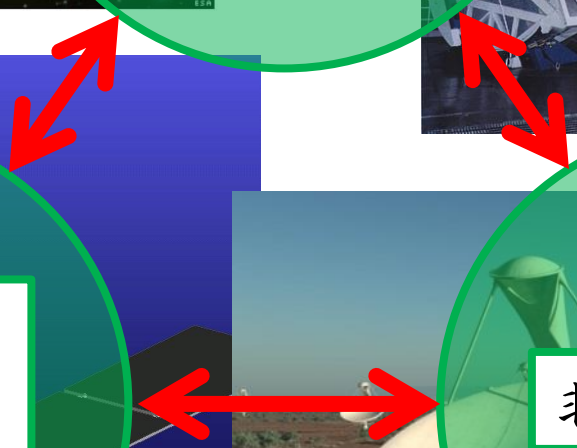
密度ゆらぎ  
スペクトル



重力波  
強さ  
スペクトル

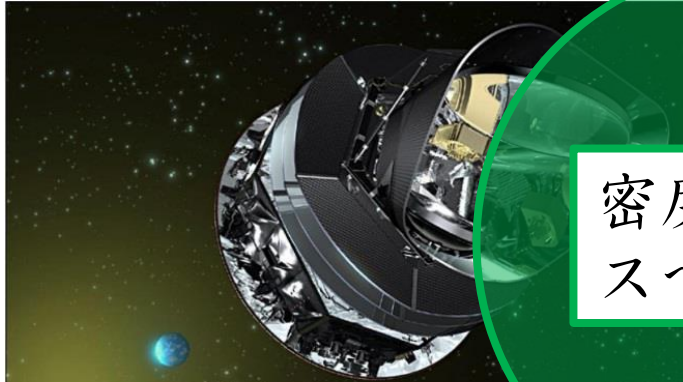


非ガウス性

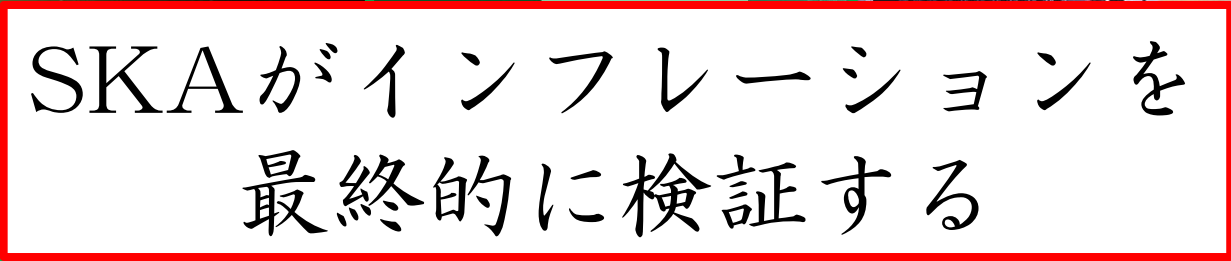




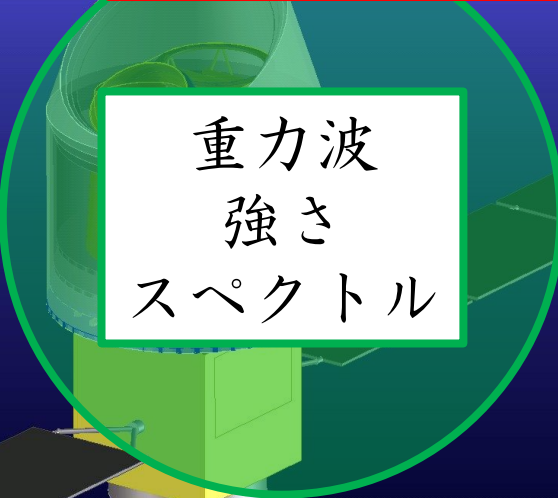
# インフレーションは本当にあったか？





密度ゆらぎ  
スペクトル



SKAがインフレーションを  
最終的に検証する



重力波  
強さ  
スペクトル



非ガウス性

## 6、まとめ

# SKAによる宇宙論

電波による宇宙論がもうすぐ始まる

SKAは宇宙論の大きな謎に答える

- ・ 暗黒エネルギー（修正重力理論）

「本当に宇宙定数か？」

- ・ 再電離

「初代天体はいつどのようにできたか？」

「再電離はどのように進んだか？」

- ・ 原始密度ゆらぎの非ガウス性

「本当にインフレーションは起こったか？」



# 7、自己紹介

# 自己紹介

大学院（東京）

修士：超新星ニュートリノのニュートリノ振動

博士：ブレーンワールド

海外学振（プリンストン）

原始磁場の生成

国内学振（京都）

ガンマ線による銀河間磁場の観測

ガンマ線バーストによる宇宙論

宇宙ひも

特任助教（名古屋）

ファラデー回転による銀河間磁場の観測

准教授（熊本）

宇宙再電離

パルサーによる重力理論検証、重力波観測

# 研究遍歴

再電離・パルサー



電波望遠鏡による磁場観測



宇宙ひも



GRB宇宙論



$\gamma$ 線による銀河間磁場観測



原始磁場の生成 with 同期



ブレーンワールド with PD



超新星ニュートリノ with 指導教官



修士

博士

PD

助教

准教授

# 研究遍歴

再電離・パルサー



電波望遠鏡による磁場観測



宇宙ひも



GRB宇宙論



$\gamma$ 線による銀河間磁場観測



原始磁場の生成 with 同期



ブレーンワールド with PD



超新星ニュートリノ with 指導教官



修士

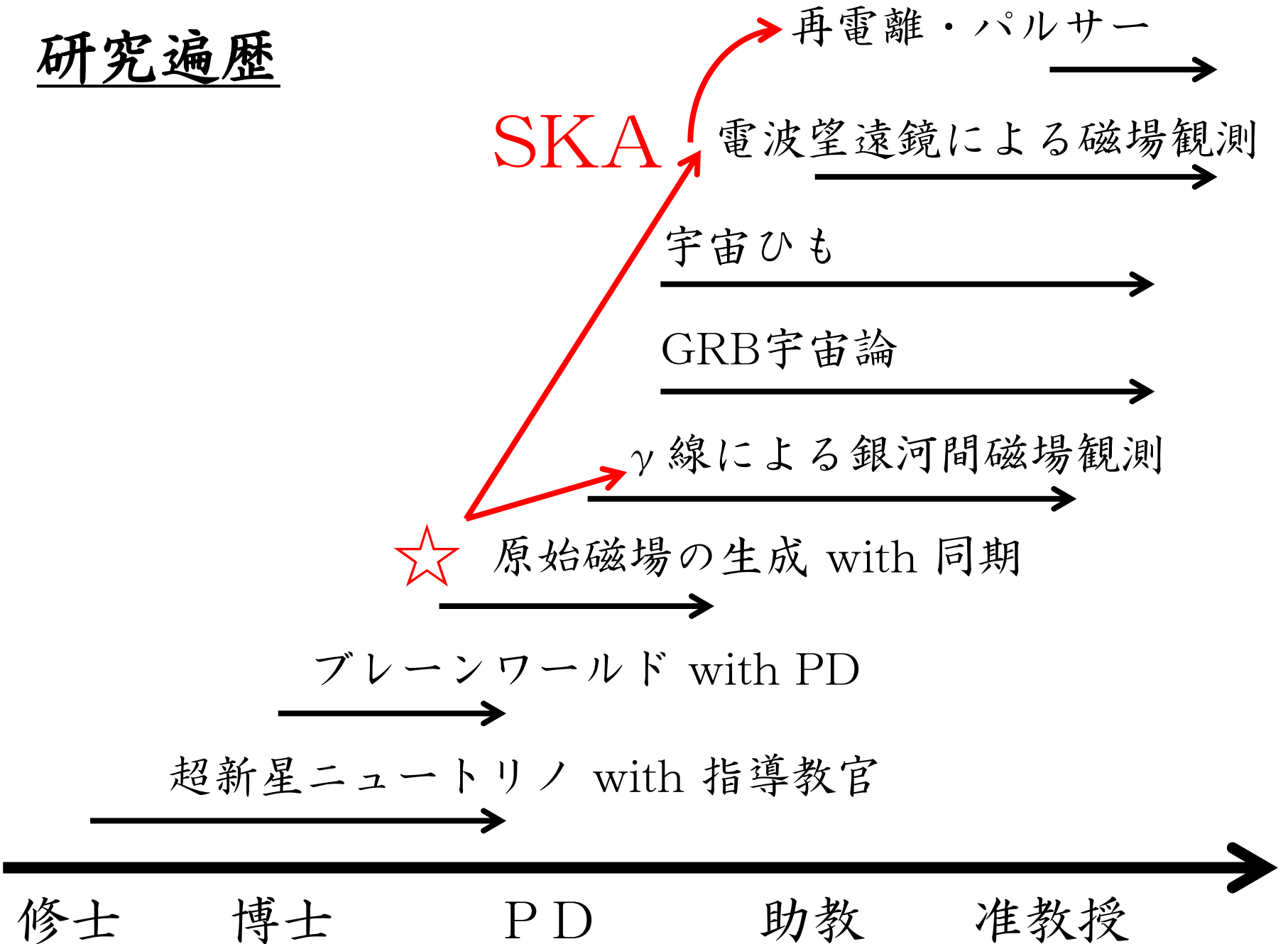
博士

PD

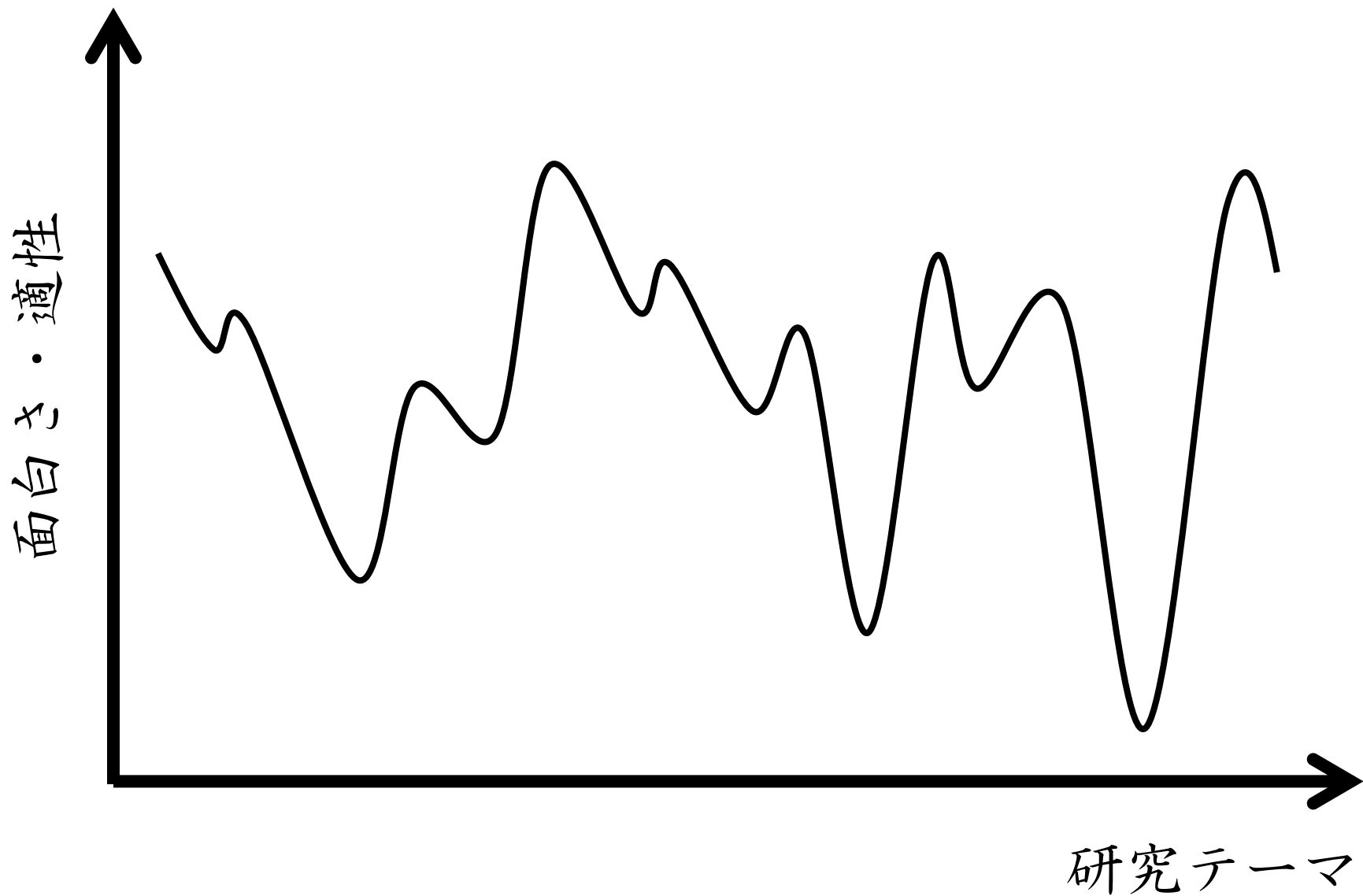
助教

准教授

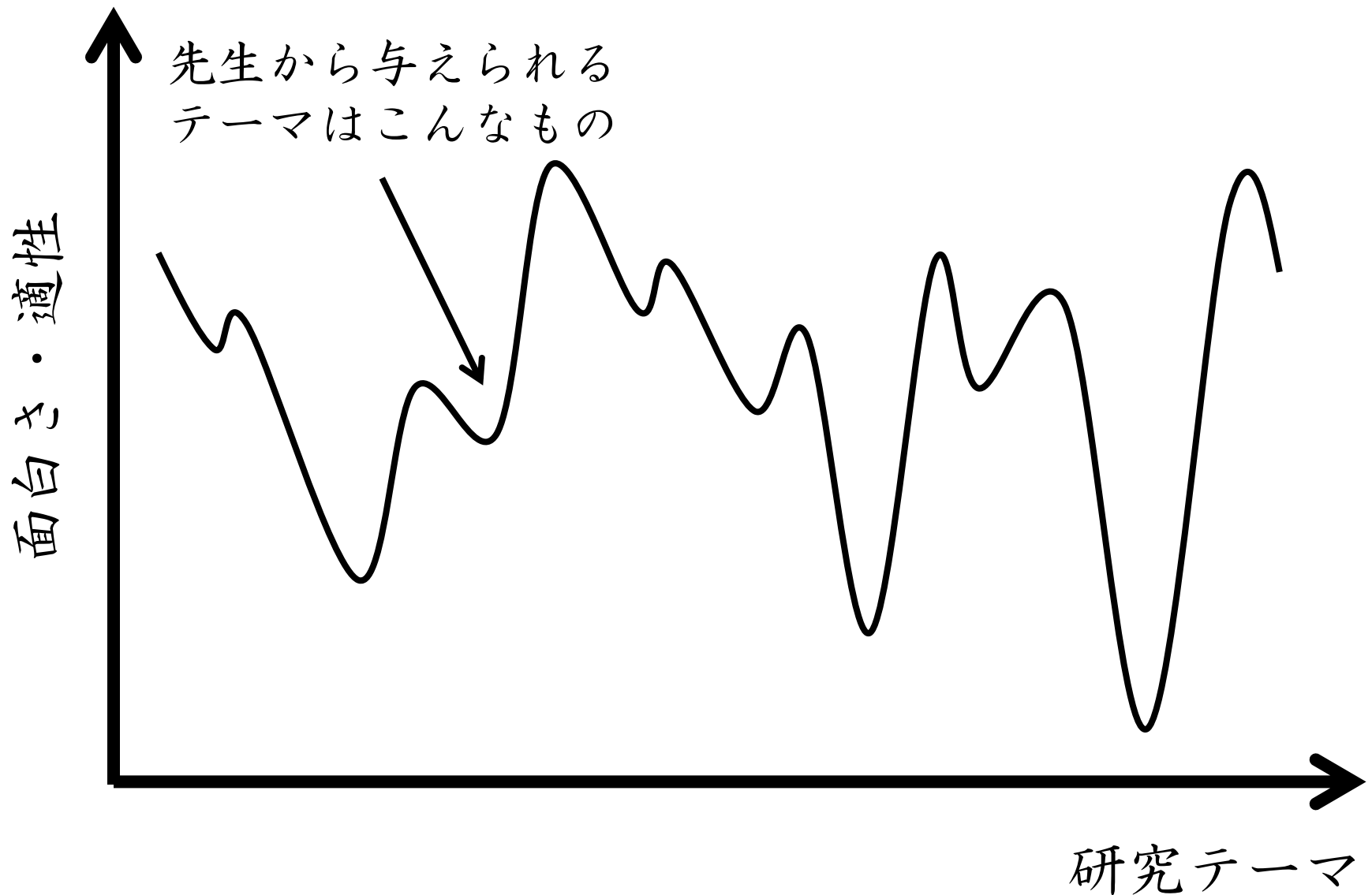
# 研究遍歴



# 研究テーマ空間ポテンシャル

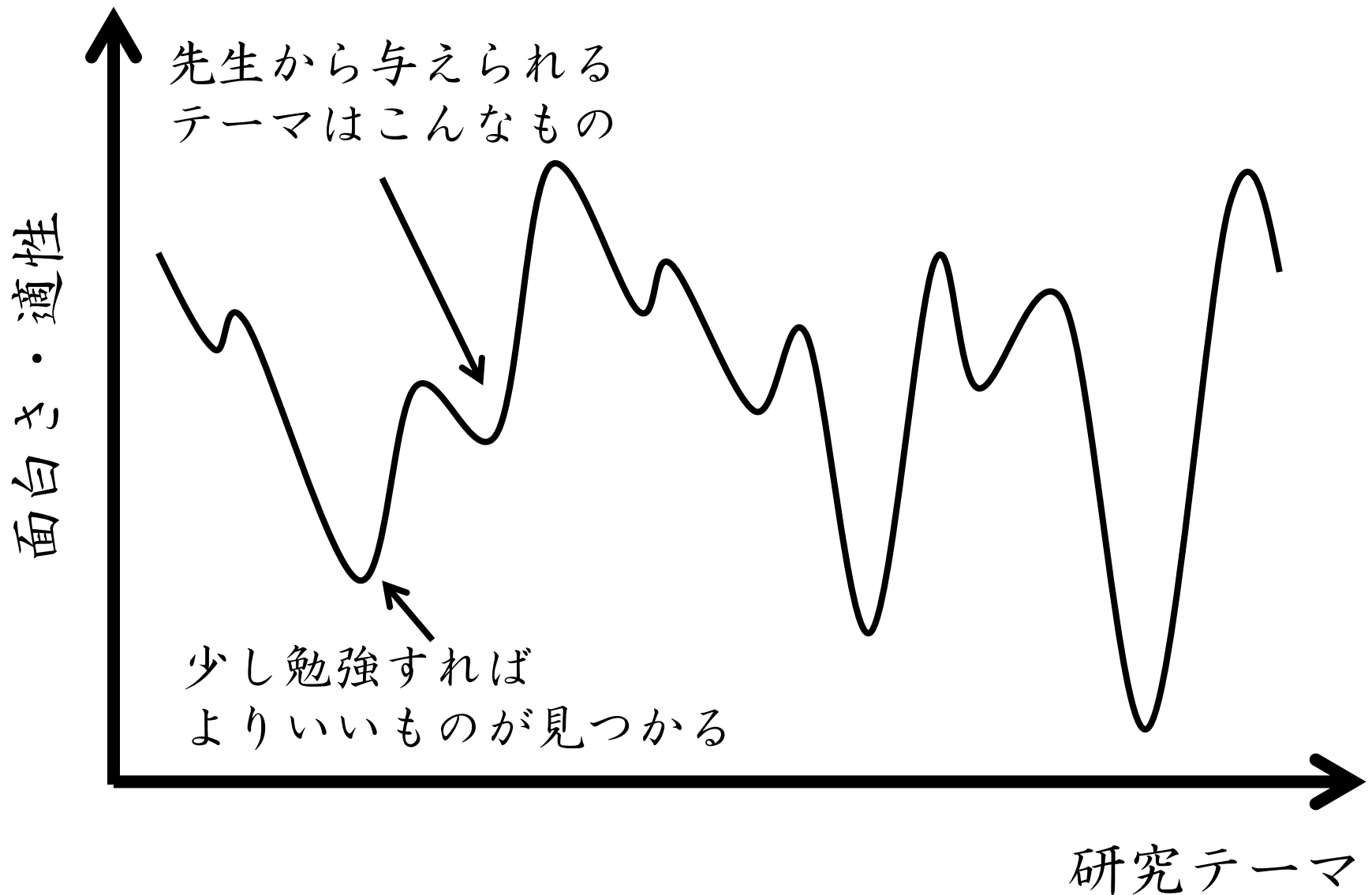


# 研究テーマ空間ポテンシャル

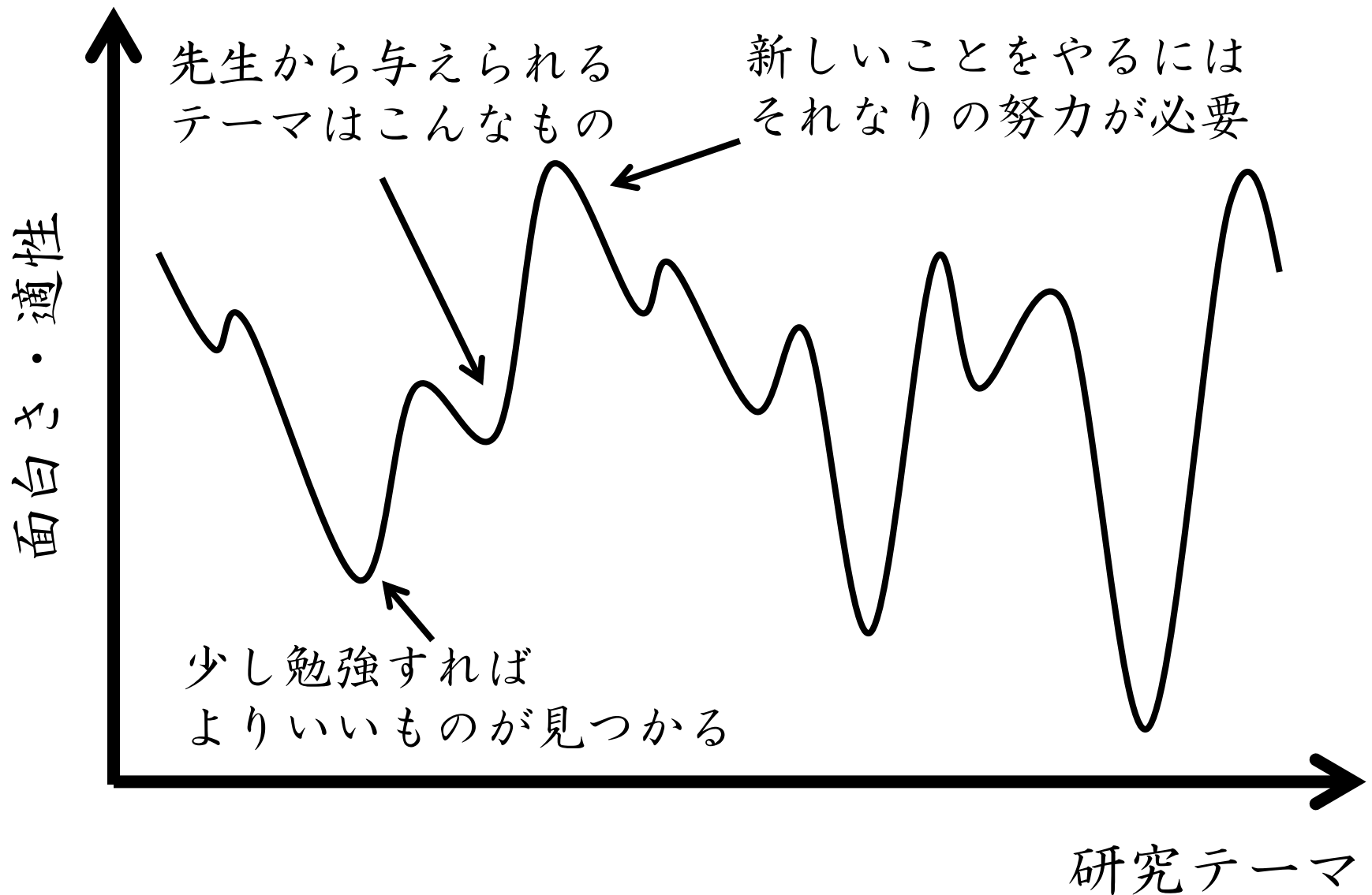




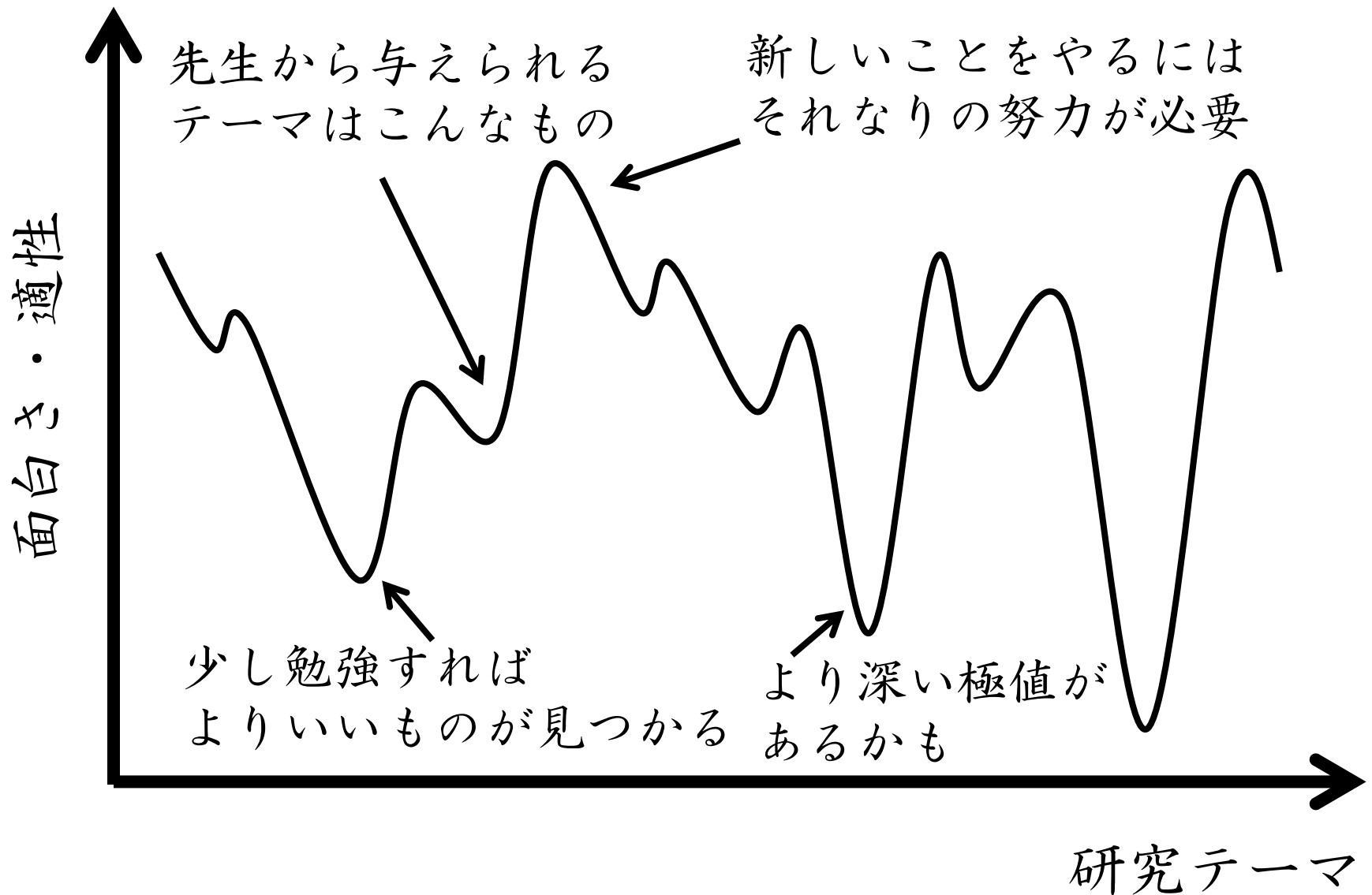
# 研究テーマ空間ポテンシャル



# 研究テーマ空間ポテンシャル



# 研究テーマ空間ポテンシャル



# 研究テーマ空間ポテンシャル

