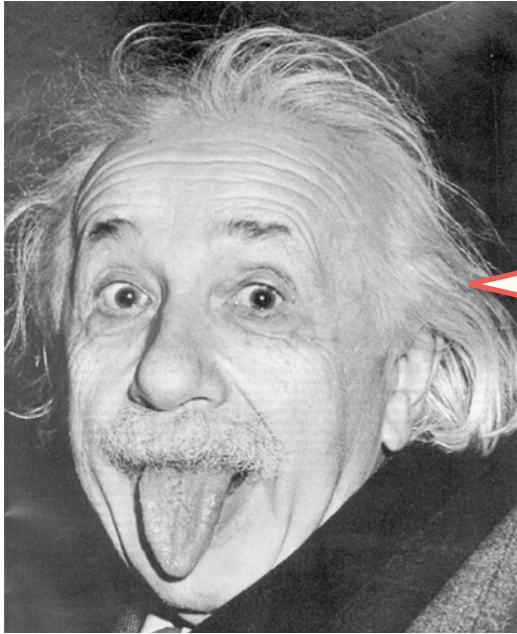


20世紀初頭の 2 つの大発見：

1. Einstein の一般相対性理論

2. 宇宙膨張の観測的発見

Einstein の一般相対性理論 (1915年頃)



Einstein

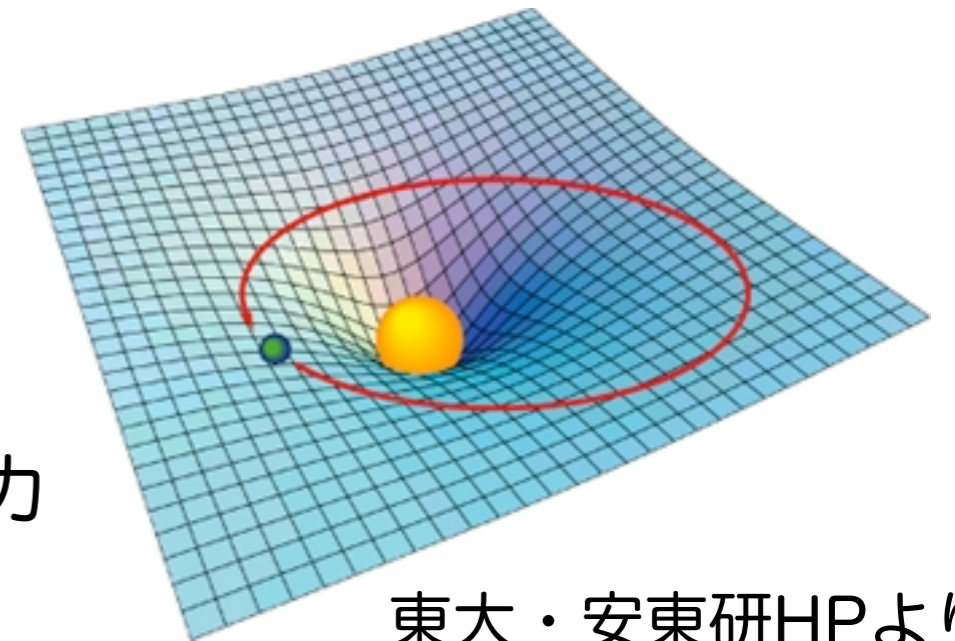
重力 = 時空のダイナミクス！

cf. 電磁気力は電磁場のダイナミクス

相対性理論における重力：

太陽が時空を歪める → 地球が力を感じる

cf. 電荷が電場を生成 → 他の電荷にクーロン力



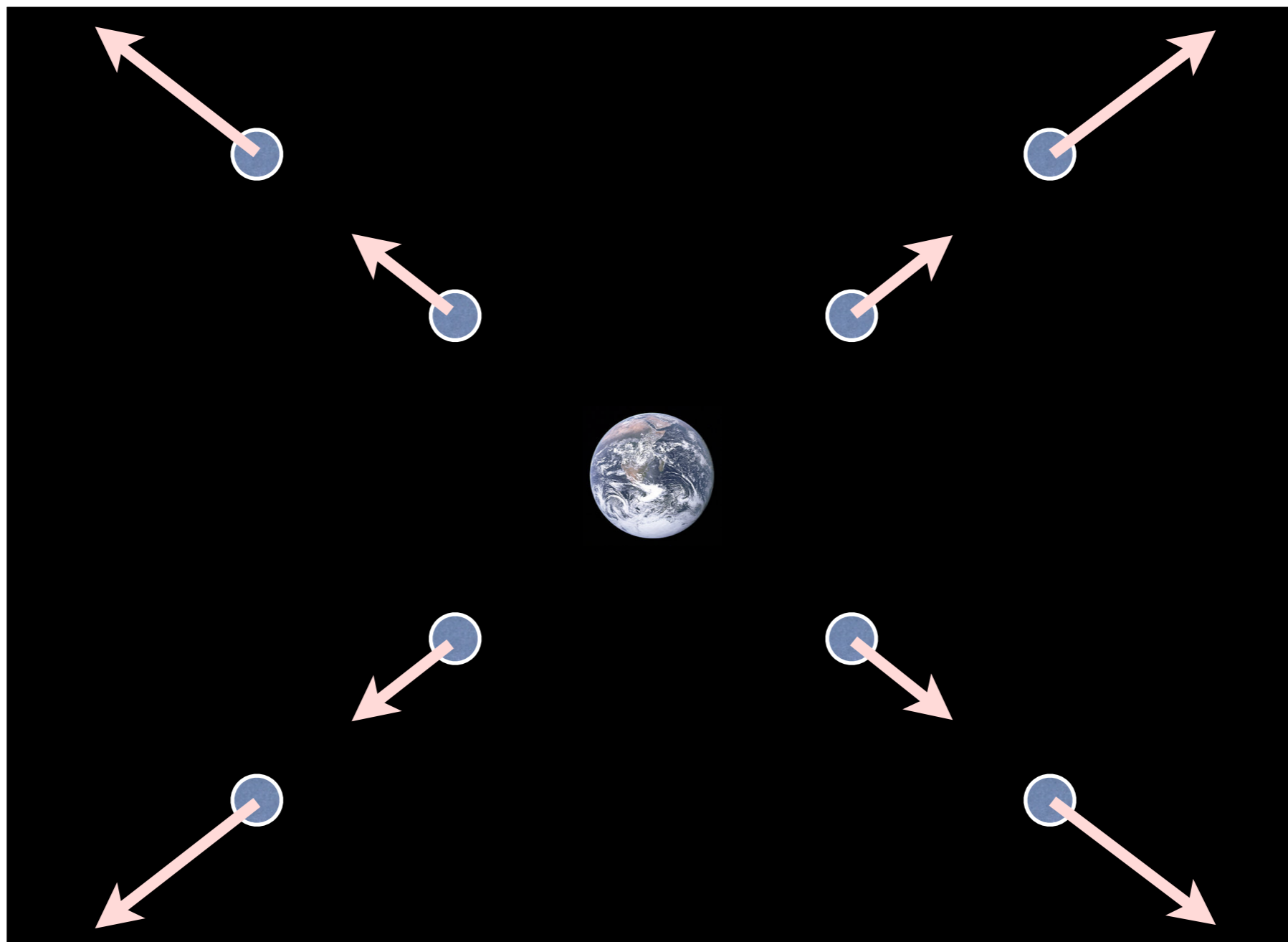
東大・安東研HPより

もはや時空は静的な“入れ物”ではない！

膨張する宇宙 (1920年代 Hubble)



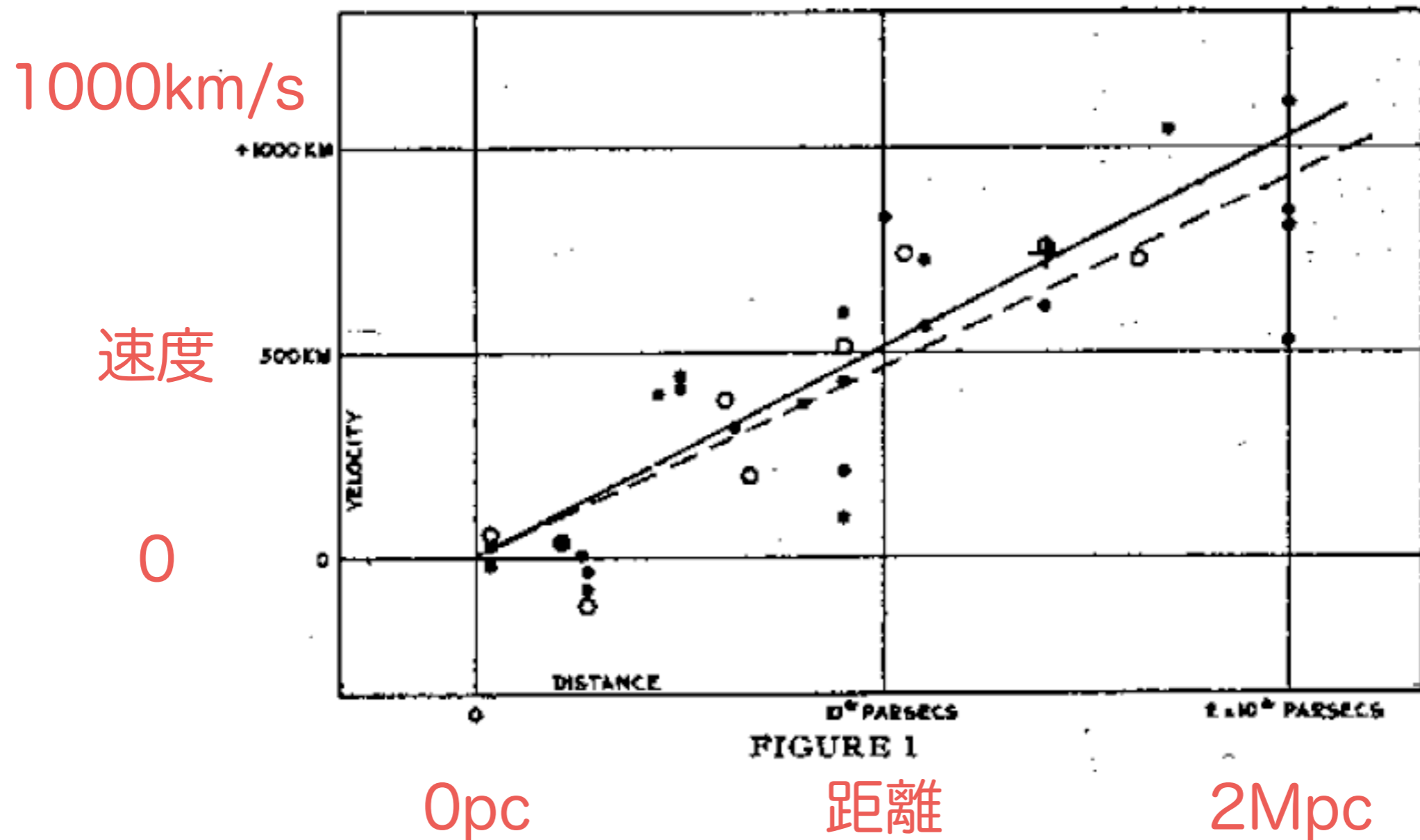
- ・ 銀河が地球から遠ざかっている
- ・ 遠くの銀河ほど速く離れている



宇宙が膨張している！

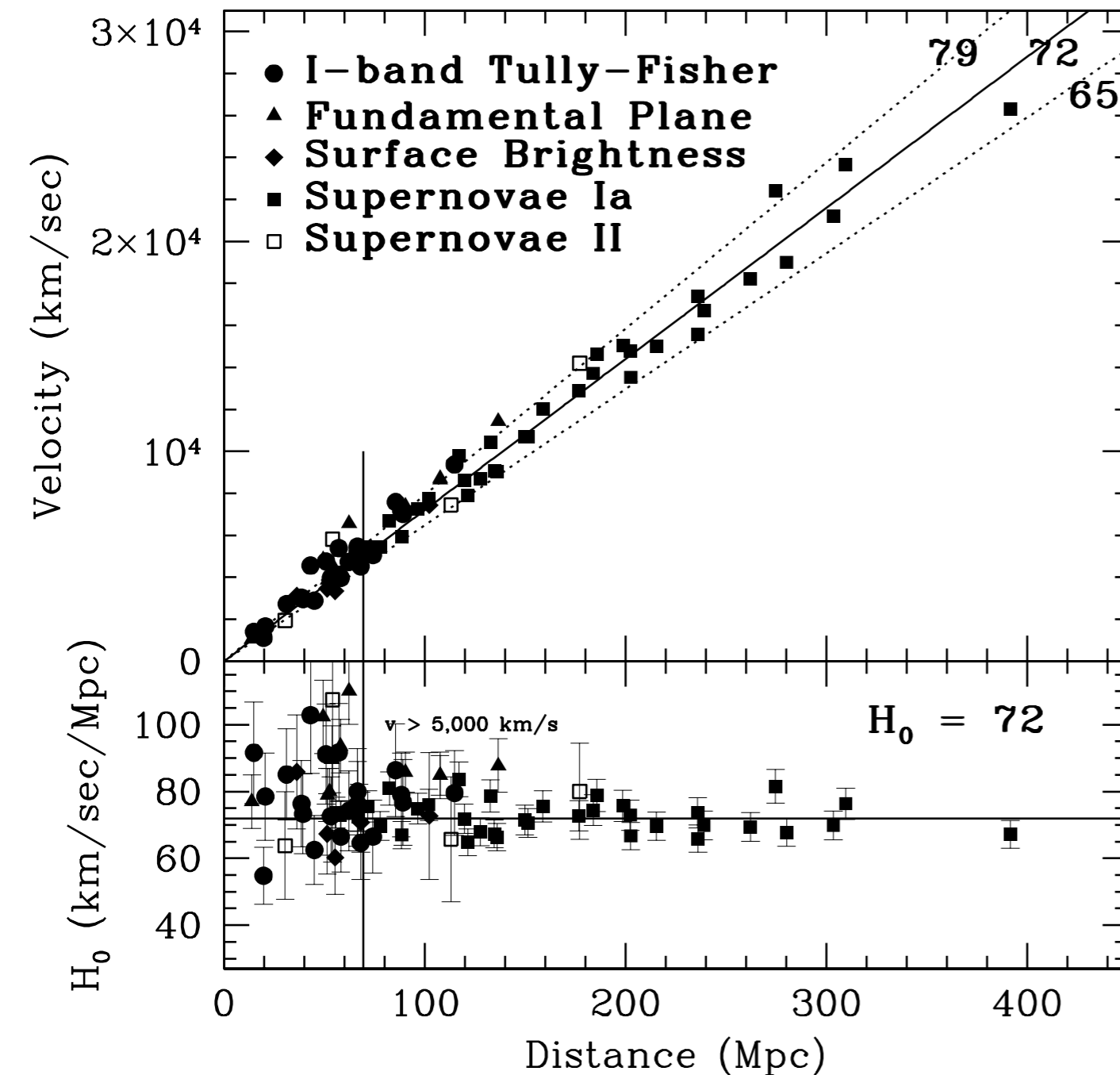
Hubble のオリジナルデータ (1929)

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.



$$v[\text{km/s}] \simeq 500[\text{km/s} \cdot \text{Mpc}] \times d[\text{Mpc}]$$

ハッブル望遠鏡 2001



Hubble の時代より

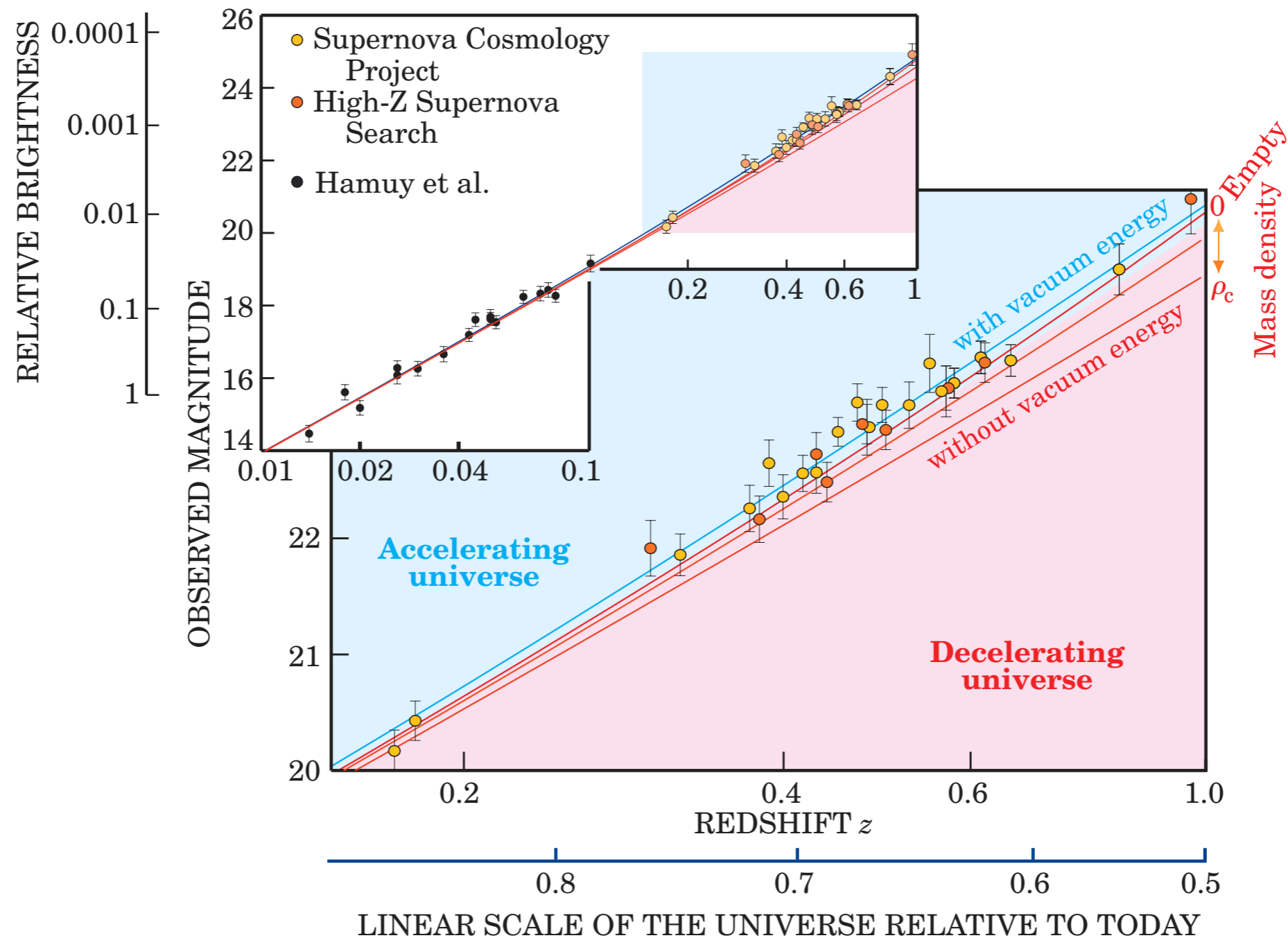
100 倍以上遠くまで！

$$v[\text{km/s}] \sim 70[\text{km/s} \cdot \text{Mpc}] \times d[\text{Mpc}]$$

他の観測結果も合わせると [Planck 2015]

$$v[\text{km/s}] = (67 \pm 5)[\text{km/s} \cdot \text{Mpc}] \times d[\text{Mpc}]$$

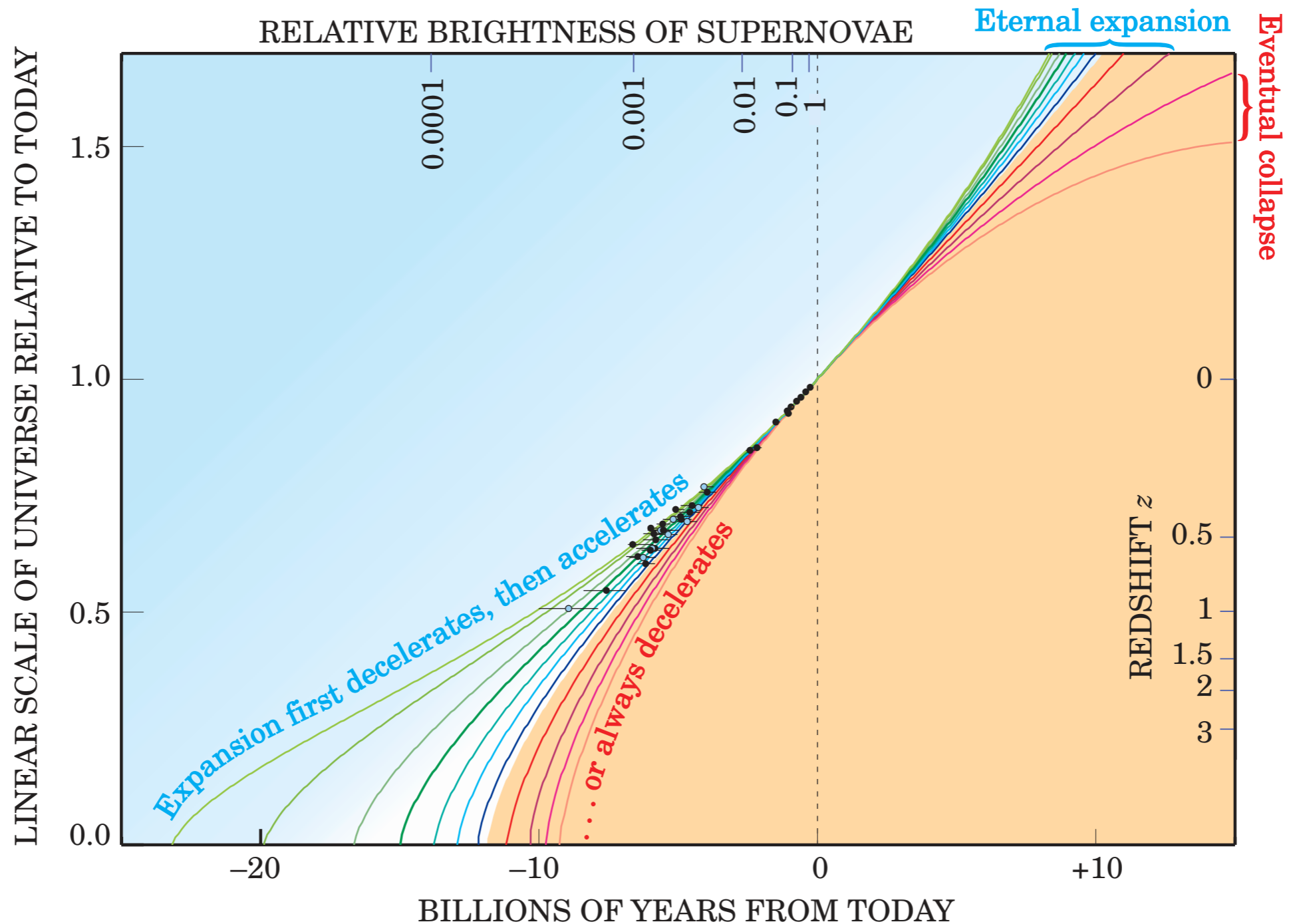
宇宙膨張・加速度膨張の発見



見かけの明るさ vs 赤方偏移

S. Perlmutter, April 2003, Physics Today, pp. 53-60.

宇宙膨張・加速度膨張の発見



見かけの明るさ vs 赤方偏移

S. Perlmutter, April 2003, Physics Today, pp. 53-60.

20世紀：定常宇宙 → 時間変化する宇宙

19世紀まで：

時間や空間は定常的で無限に広がっていると仮定し、
その中で運動する物質の法則を考えた（ex. ニュートン力学）

20世紀前半のパラダイムシフト：

1. 一般相対論 → 時空はダイナミカルで時間変化する！
2. 観測実験 → 宇宙は実際に膨張している！

Q. 宇宙膨張から何がわかるか？

A. 宇宙の温度や大きさ、密度

熱力学を思い出してみる



ヘアスプレー缶は？

1. 熱い
2. 室温程度
3. 冷たい

熱力学を思い出してみる



ヘアスプレー缶は？

1. 熱い

2. 室温程度

3. 冷たい

熱力学を思い出してみる



ヘアスプレー缶は？

1. 熱い
2. 室温程度
3. 冷たい

断熱膨張（熱のやり取りなし）：
気体が急激に膨張すると冷たくなる

熱力学を思い出してみる



ヘアスプレー缶は？

同様に、
宇宙も膨張するにつれて温度が下がる！

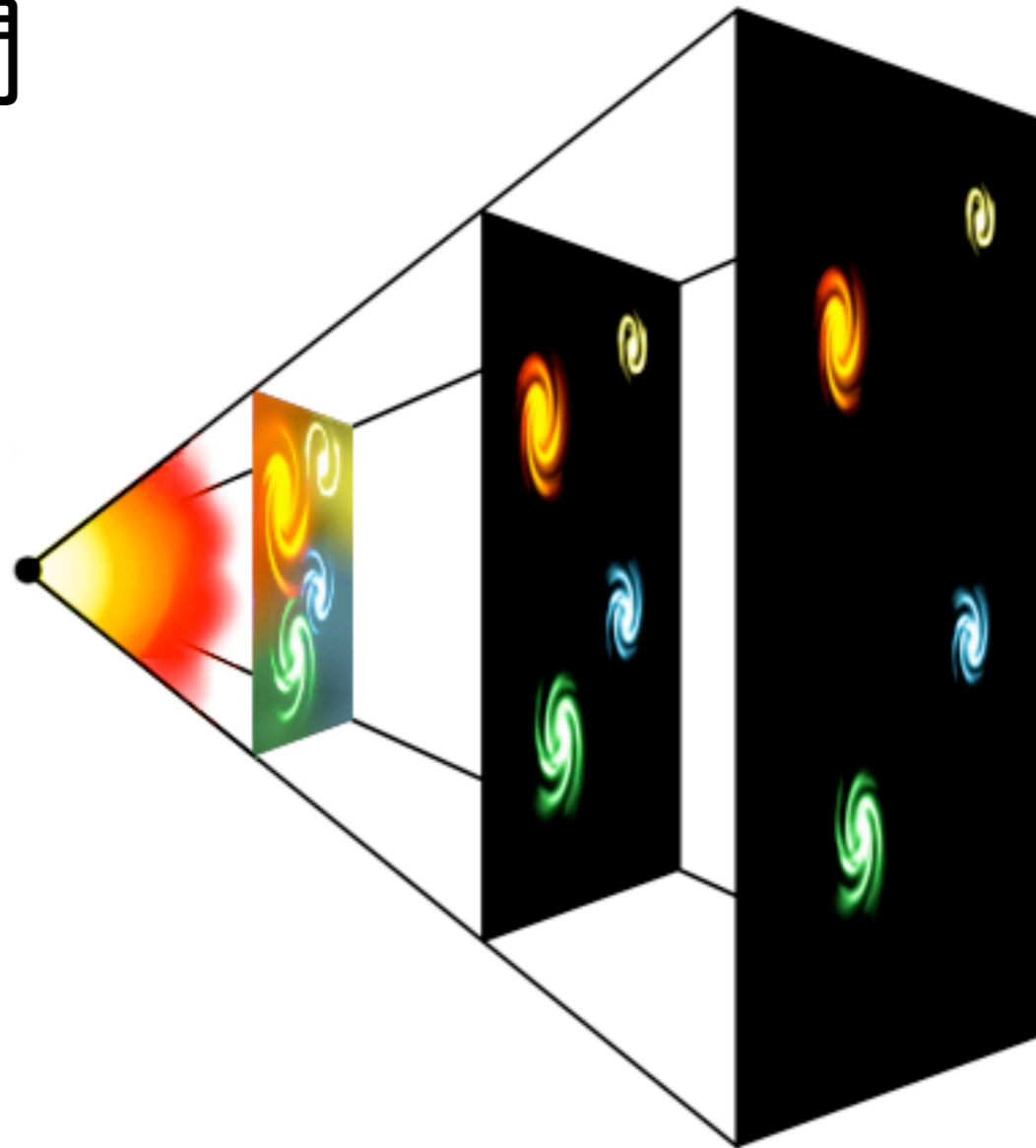
3. 冷たい

断熱膨張（熱のやり取りなし）：
気体が急激に膨張すると冷たくなる

時間を巻き戻してみると...



空間

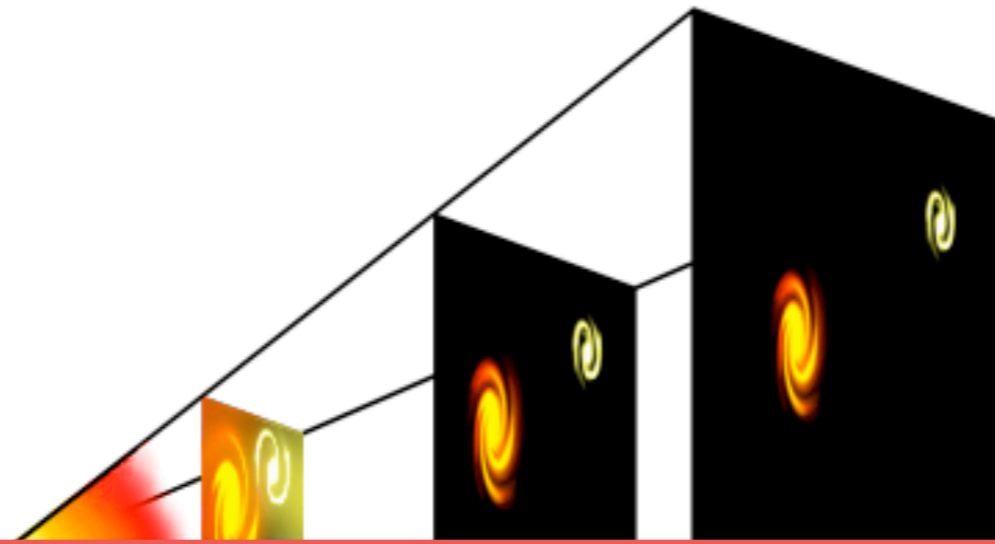


時間

宇宙の“始まり”は...

- とても小さくて高密度
- とても熱い (宇宙膨張で温度が下がる)

空間



- 宇宙膨張だけから色々と予想できる
- このような宇宙像をビッグバン宇宙という
- 以上は20世紀前半の成果！



時間

宇宙の“始まり”は...

- とても小さくて高密度
- とても熱い (宇宙膨張で温度が下がる)

1.2 最新の宇宙像

インフレーション

宇宙初期の加速度膨張

暗黒エネルギーによる
加速度膨張

銀河や惑星の誕生

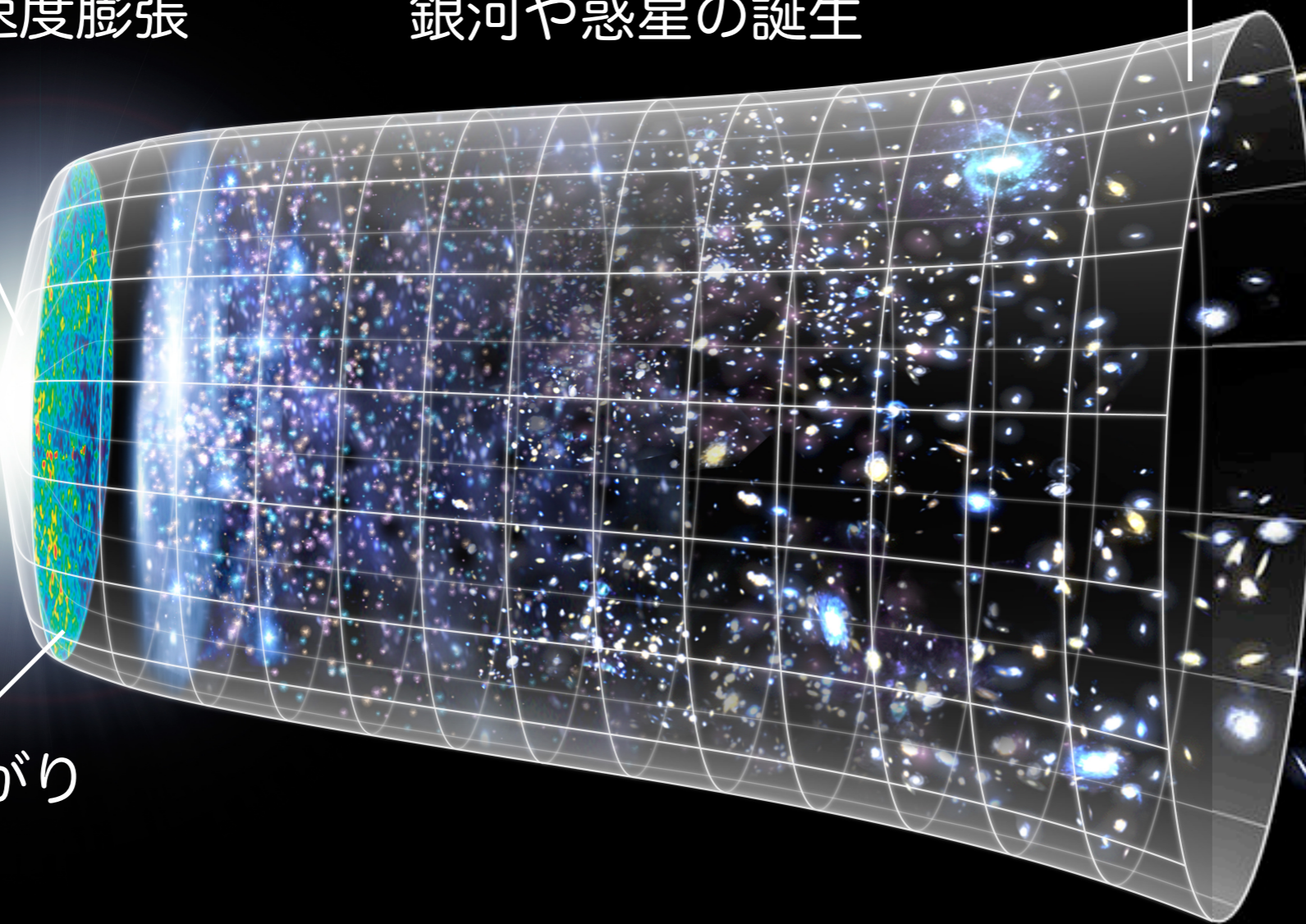
宇宙の晴れ上がり
38万年

ビッグバン膨張138億年

過去

現在

WMAP の絵をベースに編集



これまでの観測の要：宇宙背景放射

宇宙背景放射 = 現在見える宇宙最古の光

暗黒エネルギーによる
加速度膨張

宇宙の晴れ上がり
38万年

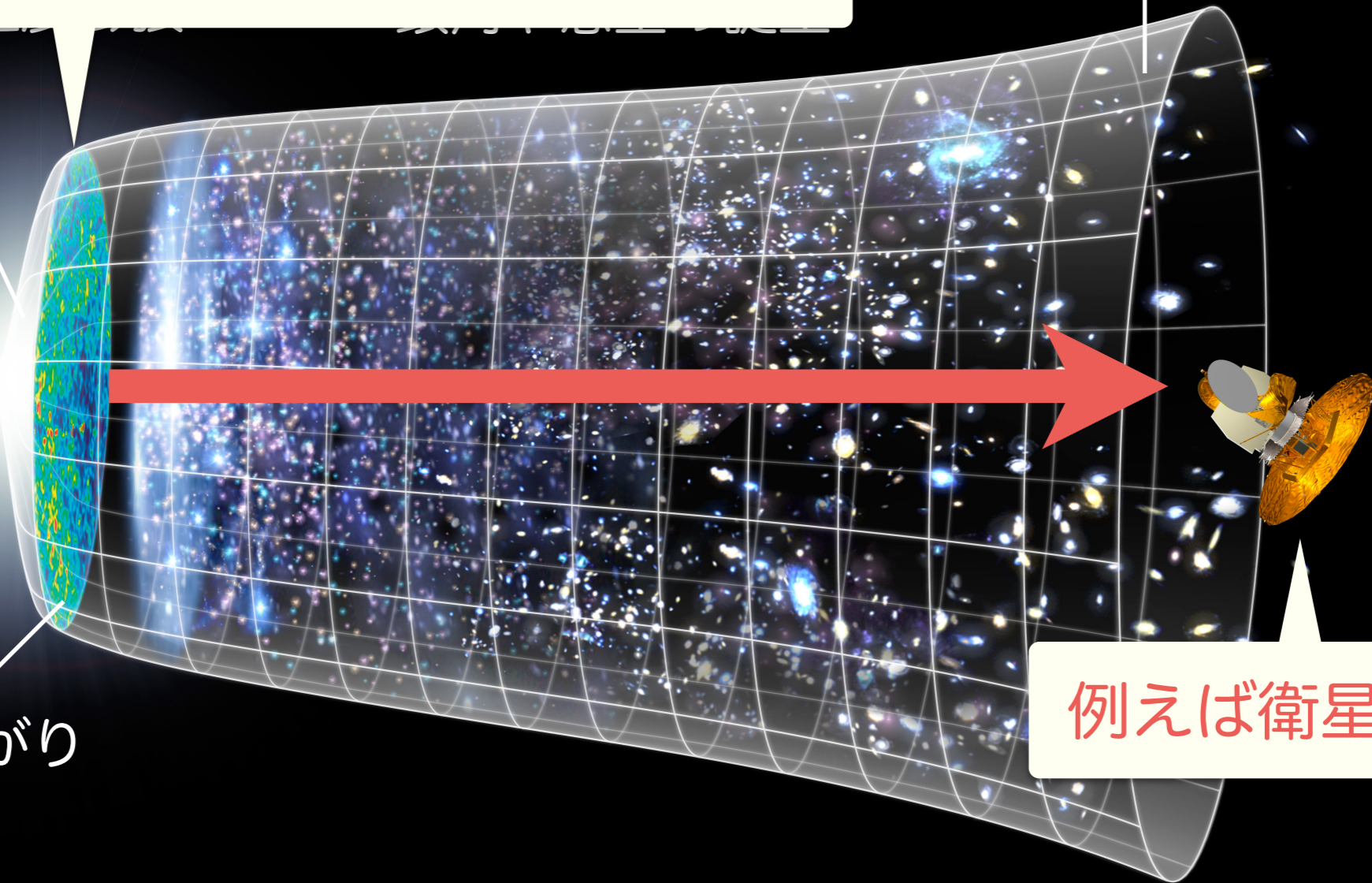
例えば衛星で観測

ビッグバン膨張138億年

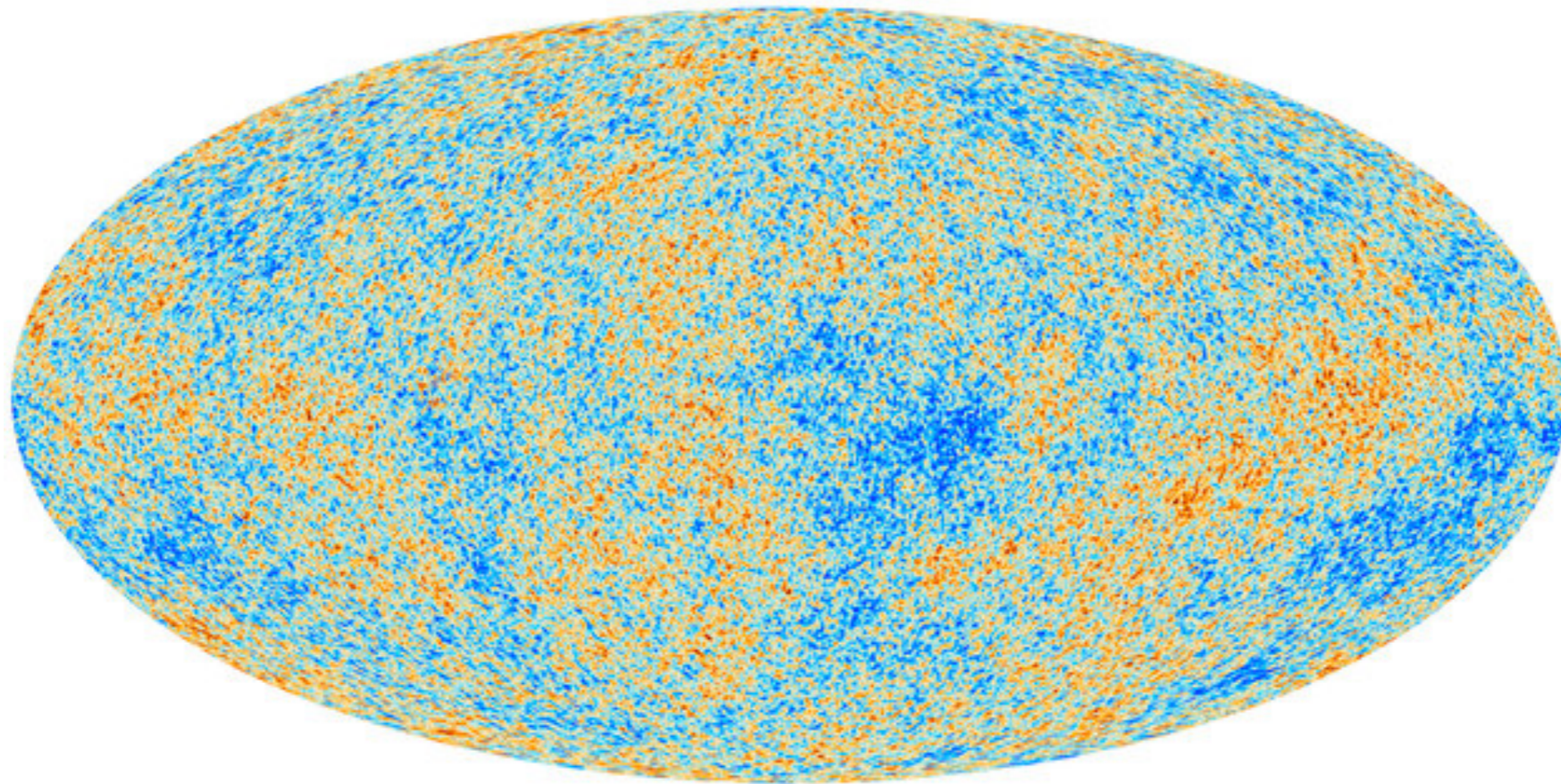
過去

現在

WMAP の絵をベースに編集



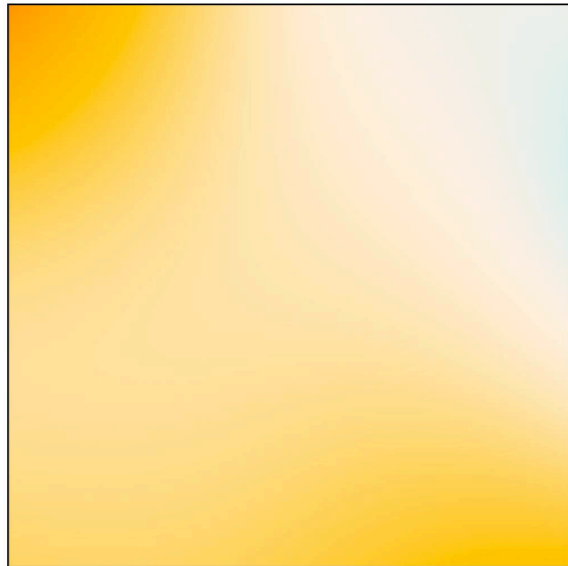
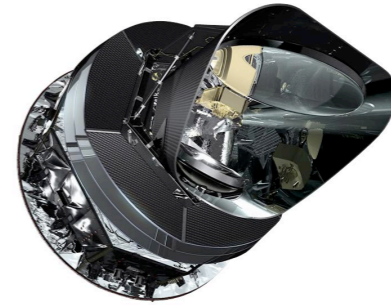
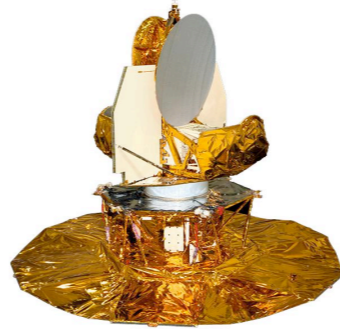
宇宙背景放射の温度分布



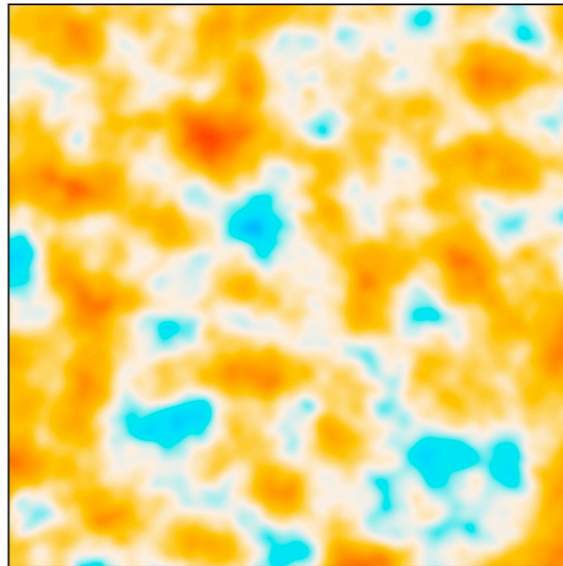
Planck 衛星で見る宇宙背景放射 (2015)

- 宇宙背景放射の温度は 2.7K でほぼ一様
- よく見ると 10^{-5} K 程度のわずかなムラ

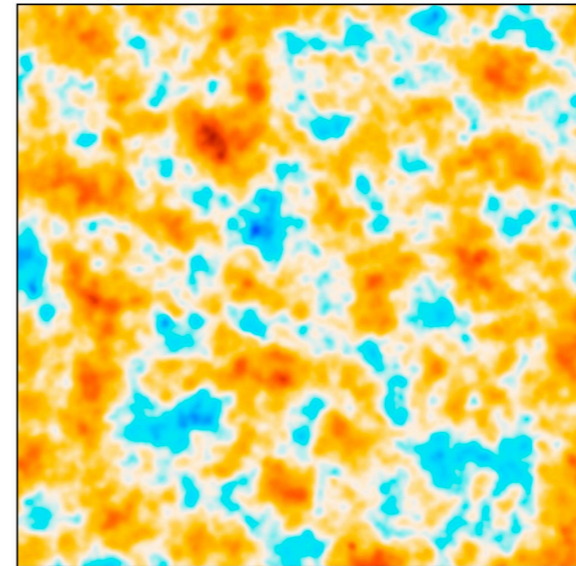
実験精度の向上



COBE 衛星
(1992)



WMAP 衛星
(2003)



Planck 衛星
(2013)

この20年で解像度などが大幅に進歩！

→ 宇宙論の理解も大きく進展！

明らかにになった新たなパラダイム

1. インフレーション

2. 暗黒物質・暗黒エネルギー

インフレーション
宇宙初期の加速度膨張

暗黒エネルギーによる
加速度膨張

銀河や惑星の誕生

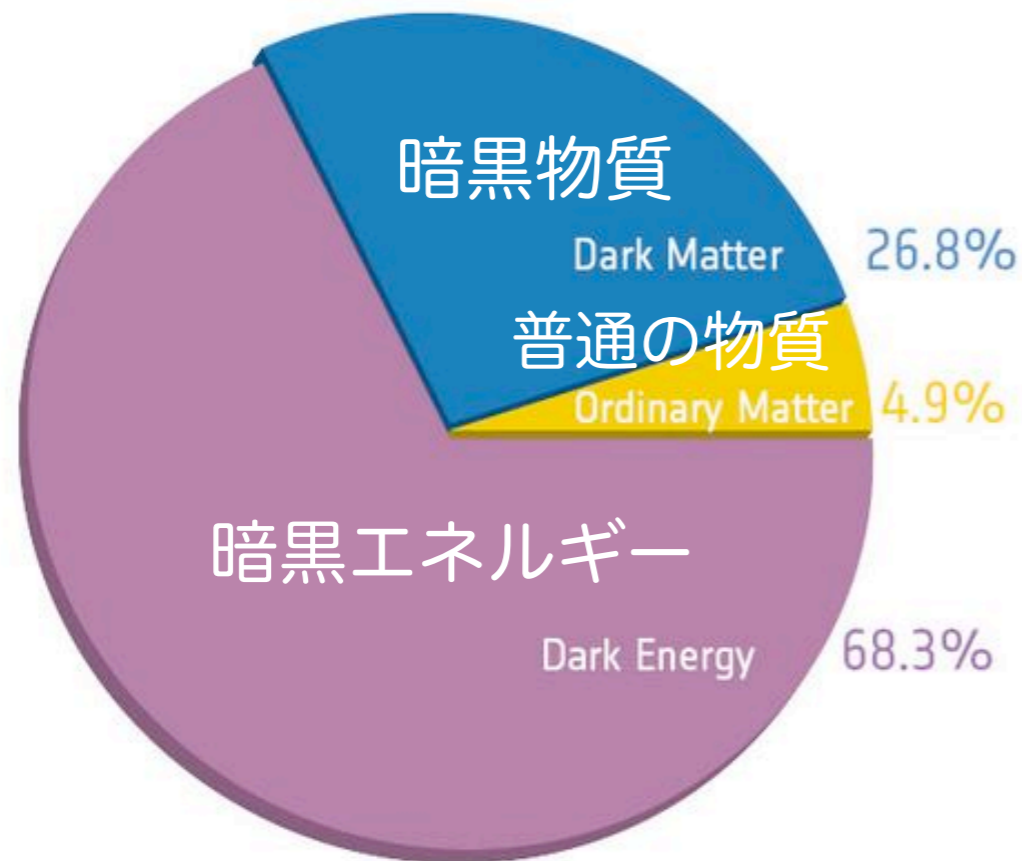
宇宙の晴れ上がり
38万年

インフレーション中に
宇宙背景放射のムラなど宇宙構造の種が形成される
※ インフレーションが起きる原理や機構は未だ謎

在

ベースに編集

暗黒物質・暗黒エネルギー



現在の宇宙の構成要素の
エネルギーの内訳がわかった！

宇宙の構成要素

約25%：見えない未知の物質**暗黒物質**

約70%：宇宙膨張を加速させる謎の**暗黒エネルギー**

※ その存在はわかっているが正体は未だ謎のまま