

膨張宇宙

ハッブルの法則、ビッグバン、加速膨張

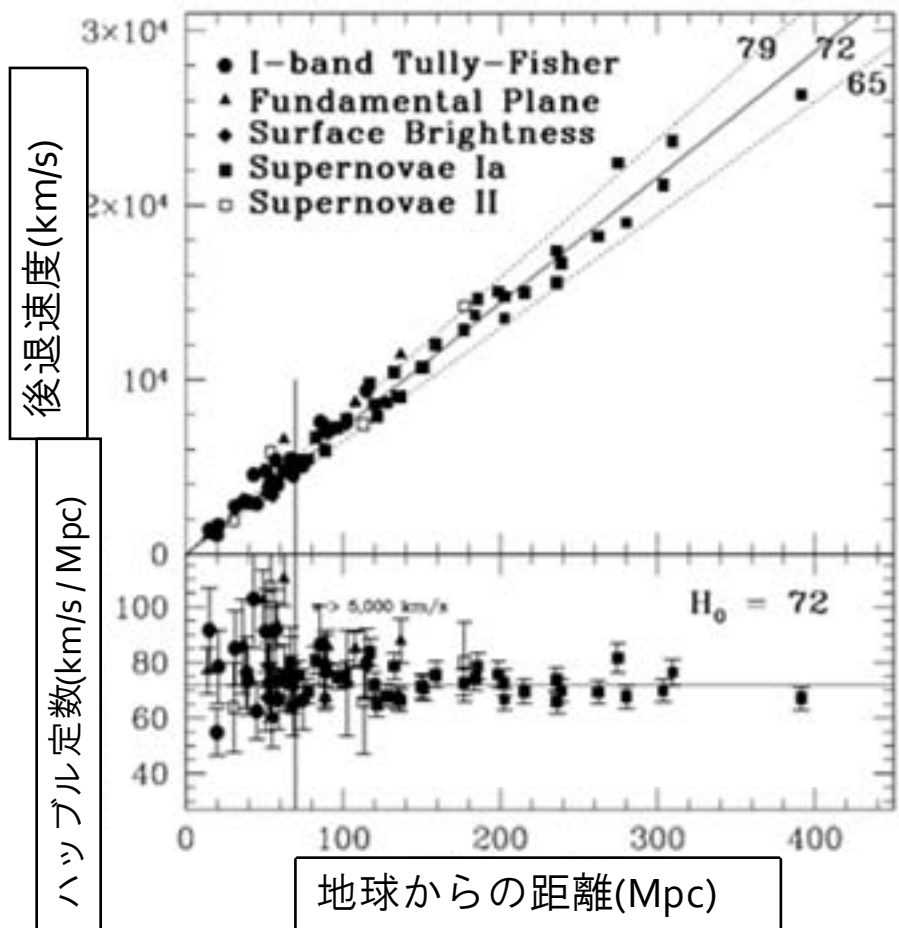
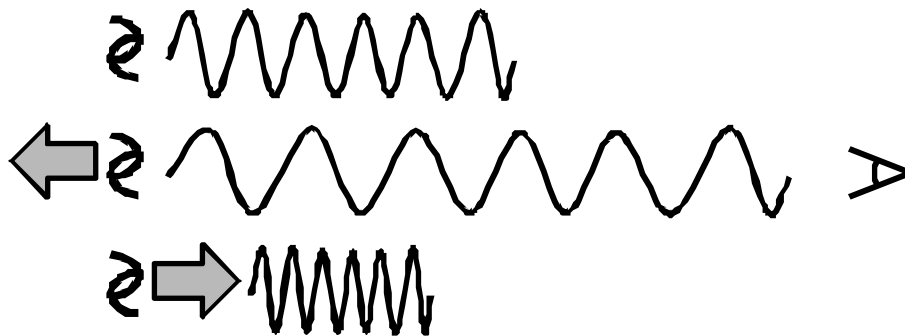
ハッブルの法則

- 遠い銀河ほど、速く遠ざかる

$$v = H_0 d$$



- ドップラー効果



Freedman et al. 2001, ApJ, 553, 47

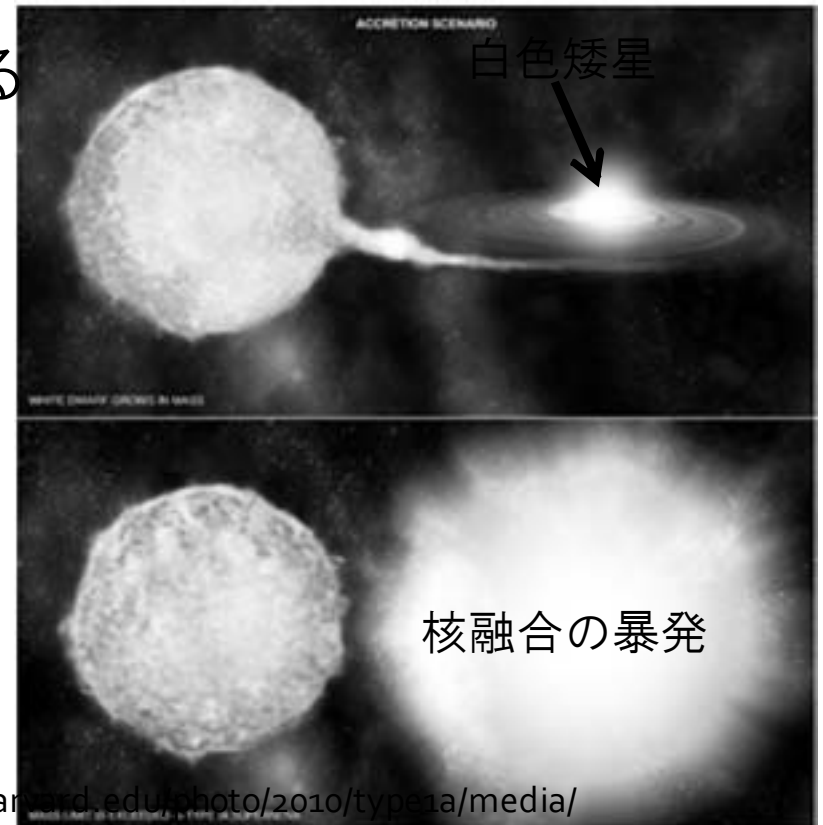
1a型超新星

- 白色矮星に伴星からのガスが降り積もる
- 白色矮星が重くなり、炭素の核融合が暴発
- 爆発が起こる質量は決まっている（太陽質量の1.4倍）
 - チャンドラセカールの限界質量
 - 爆発の明るさがほぼ同じ
- みかけの明るさから距離がわかる



SN1994D

http://en.wikipedia.org/wiki/SN_1994D

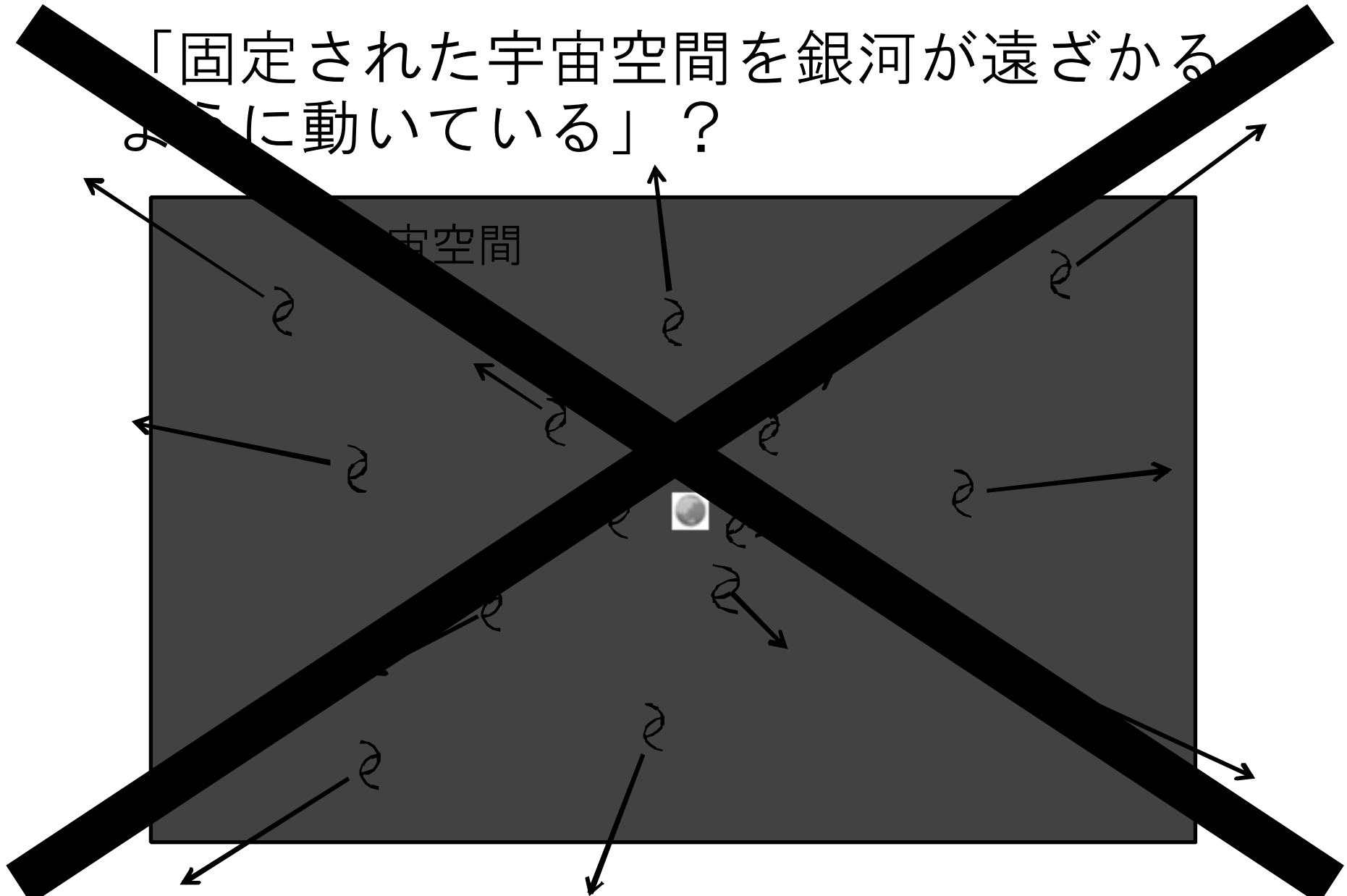


1a型超新星

<http://chandra.harvard.edu/photo/2010/type1a/media/>

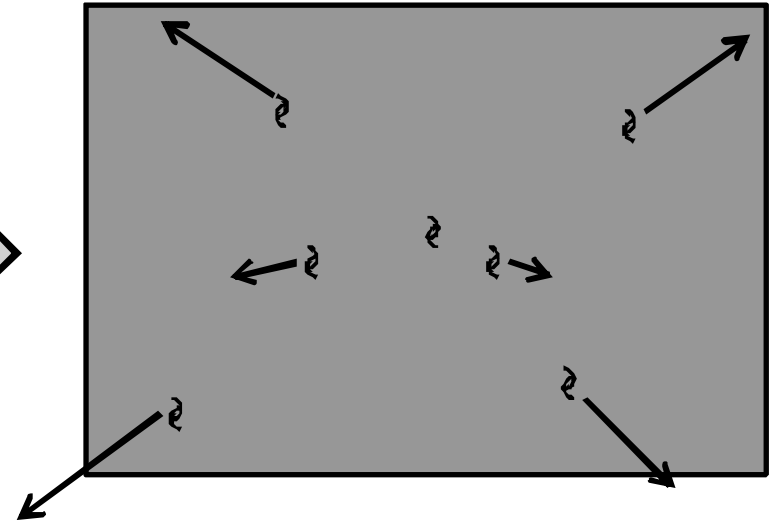
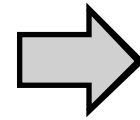
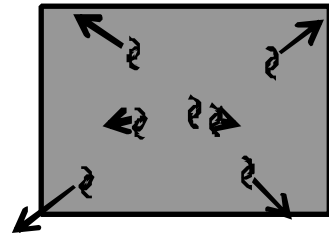
銀河が動いているとは思えない

「固定された宇宙空間を銀河が遠ざかるように動いている」？



宇宙の膨張

- 空間が広がる
 - その上に貼り付いている銀河が遠ざかる



Draw spots on a balloon to represent galaxies in the universe.

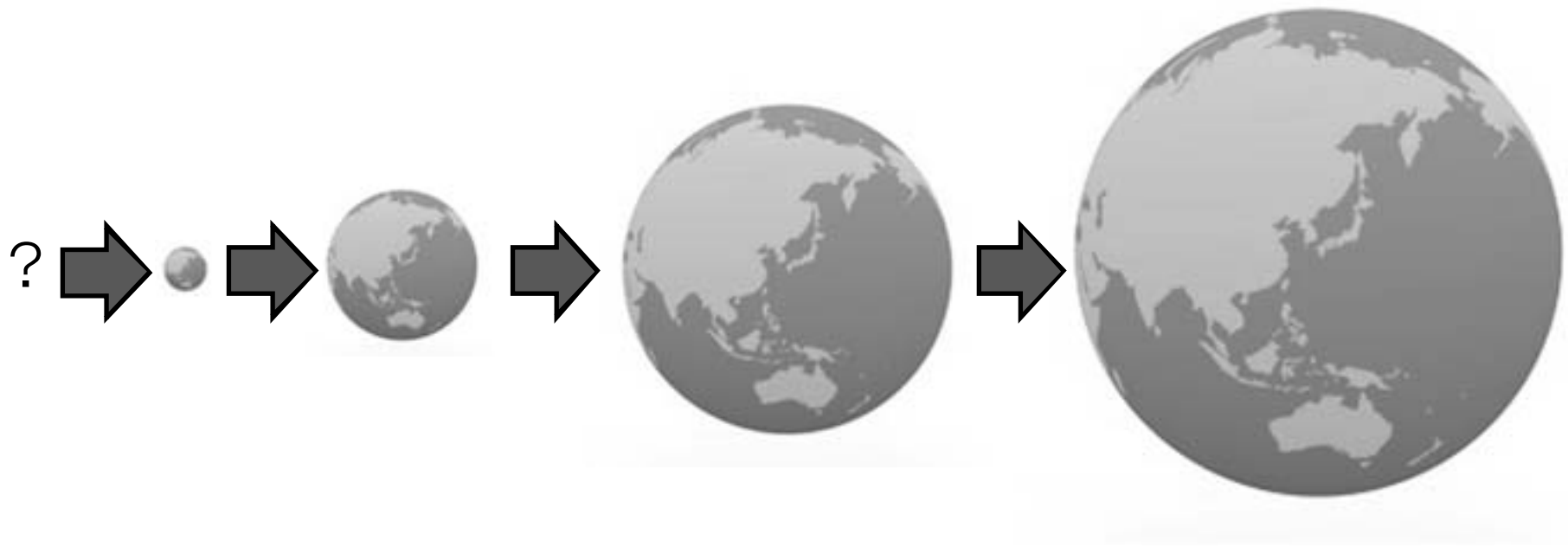


As you blow up the balloon, the "galaxies" move further apart.

<http://www.herebeanswers.com/2009/10/big-bang-and-center-of-universe.html>

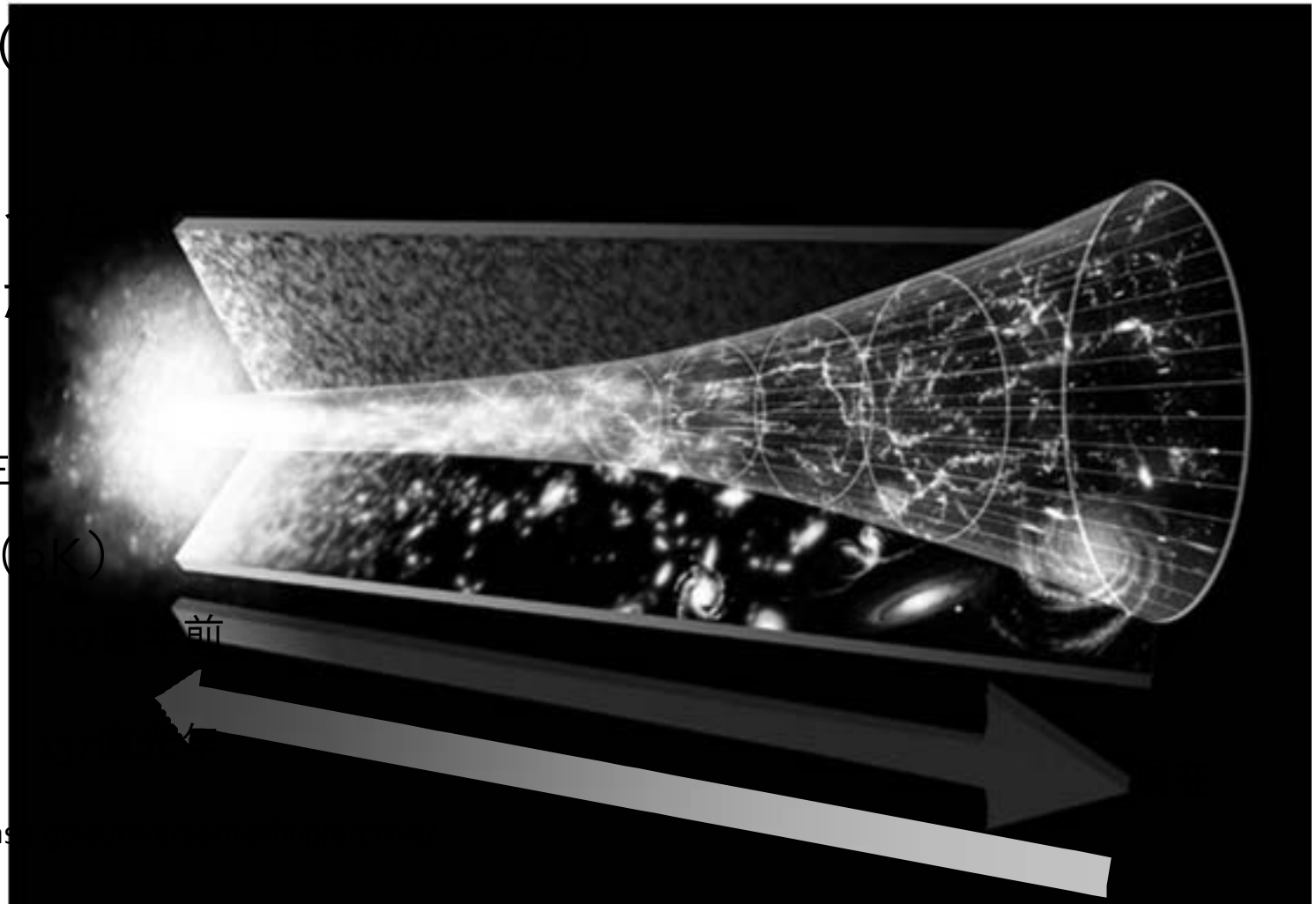
宇宙は、昔は小さかった

- 地球に例えて描くと、こんな感じ



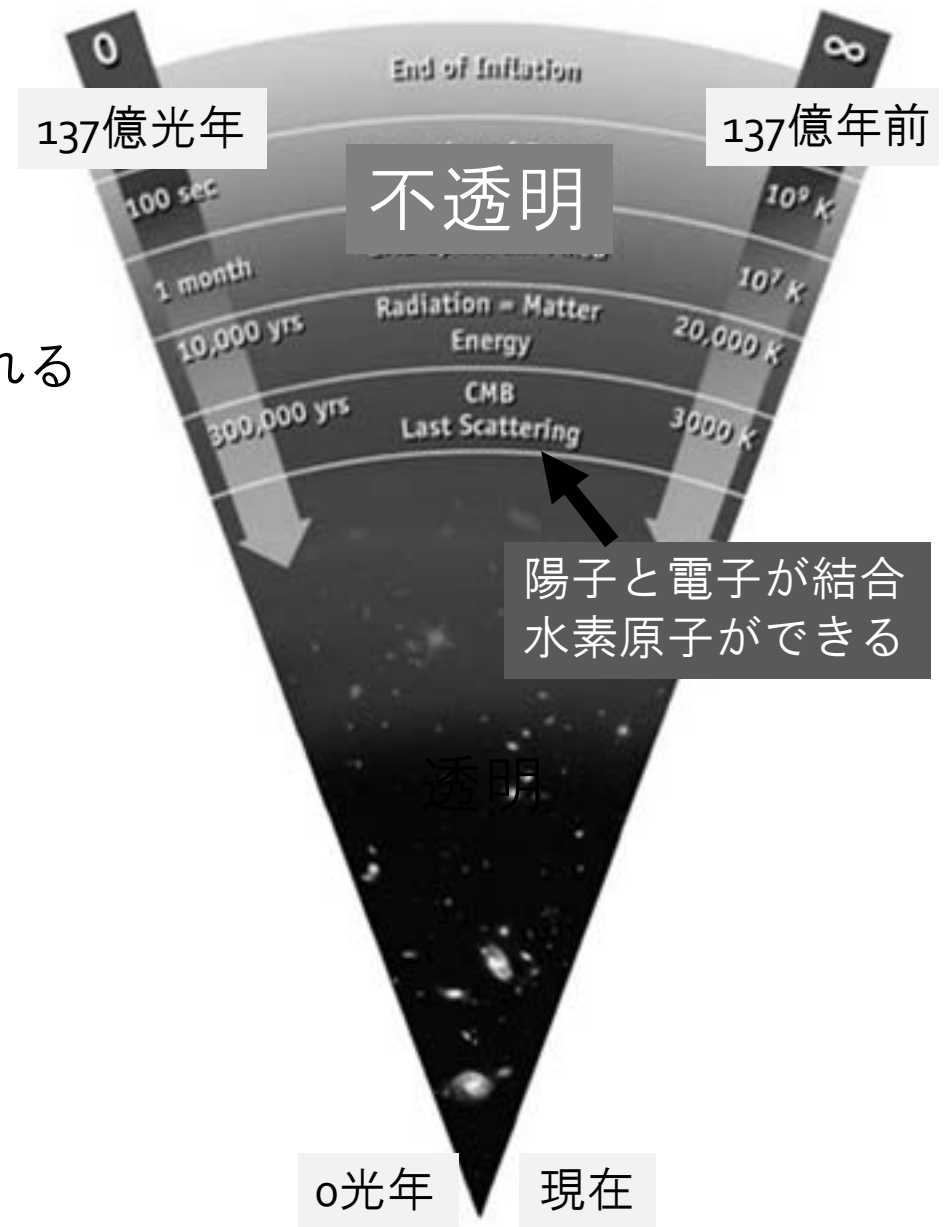
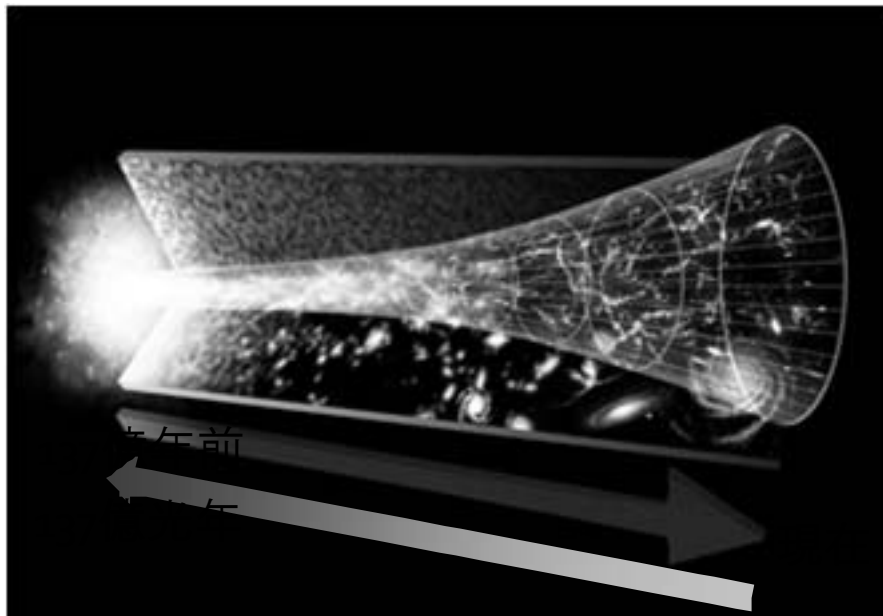
ビッグバン宇宙論

- 宇宙は、137億年前には、
 - ちいさかった（1mmよりも（はるかに）小さかった）
 - 熱かった
- 膨張して
 - 大きくなった
 - 冷えてきた
- 現在
 - 137億光年
 - 絶対3度（3K）



ビッグバン

- 高温・高密度から始まる
- 膨張しながら冷える
 - 冷えながら、現在の物質が形作られる
 - クォーク、光、電子、核子・・・
- 38万年で原子ができる
 - 宇宙が透明になる（原子ができる）

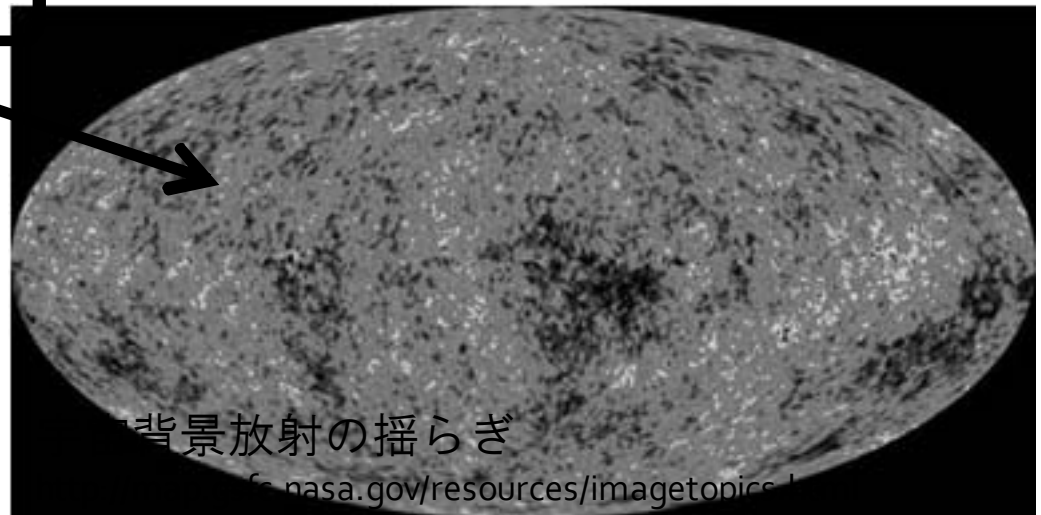


<http://www.astro.ucla.edu/~wright/BBhistory.html>

遠くを見るときは、過去を見ること

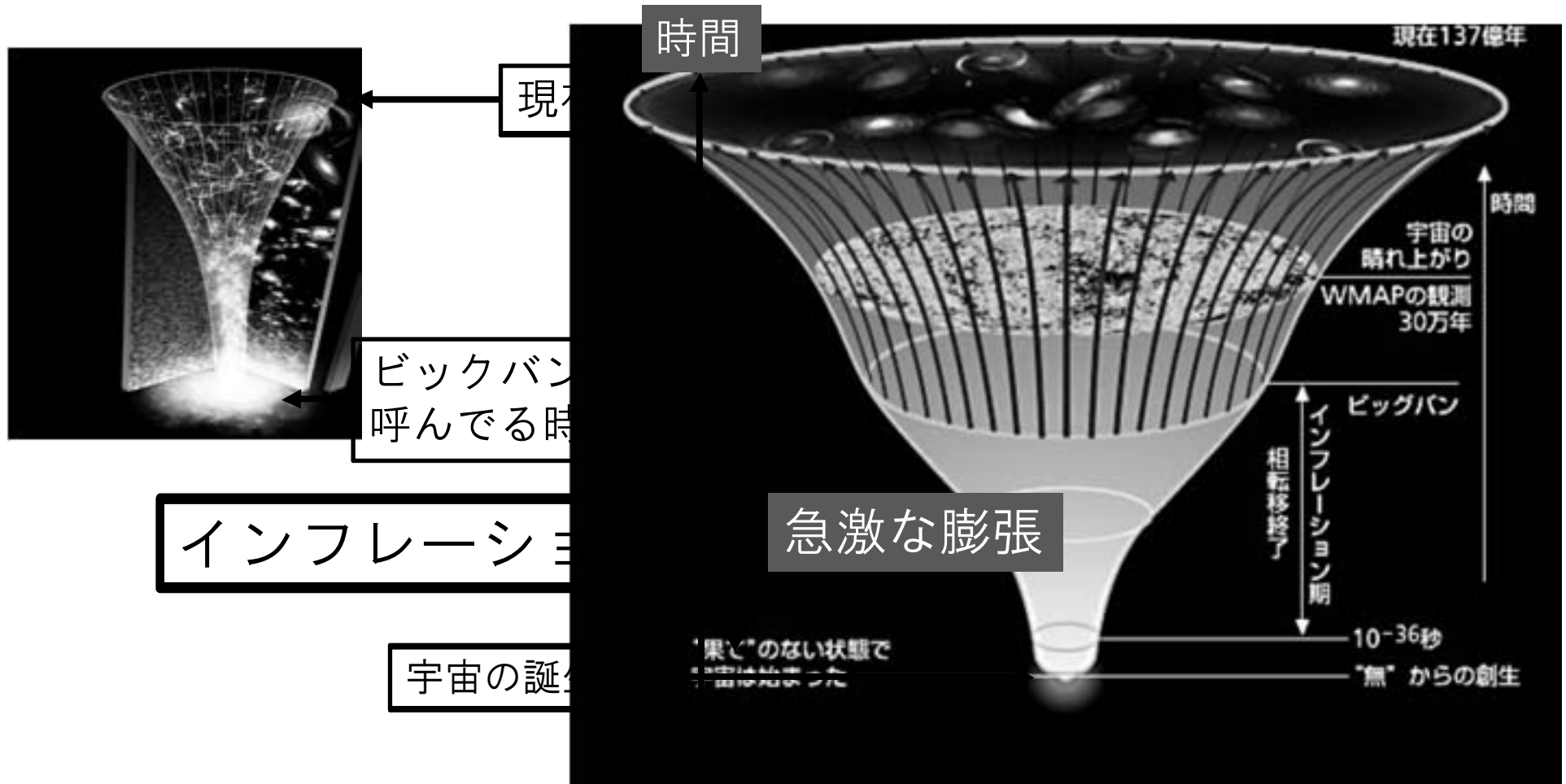
宇宙背景放射

- 宇宙の果ての光
 - 宇宙誕生後38万年の時の光
 - 3000K → 可視光・赤外線
 - 宇宙膨張によって、波長が長くなる
 - 3K → 電波（マイクロ波）
- 宇宙背景放射の揺らぎ
 - 温度、密度の揺らぎ（10万分の1）一様な宇宙背景放射
 - 星や銀河の種になる



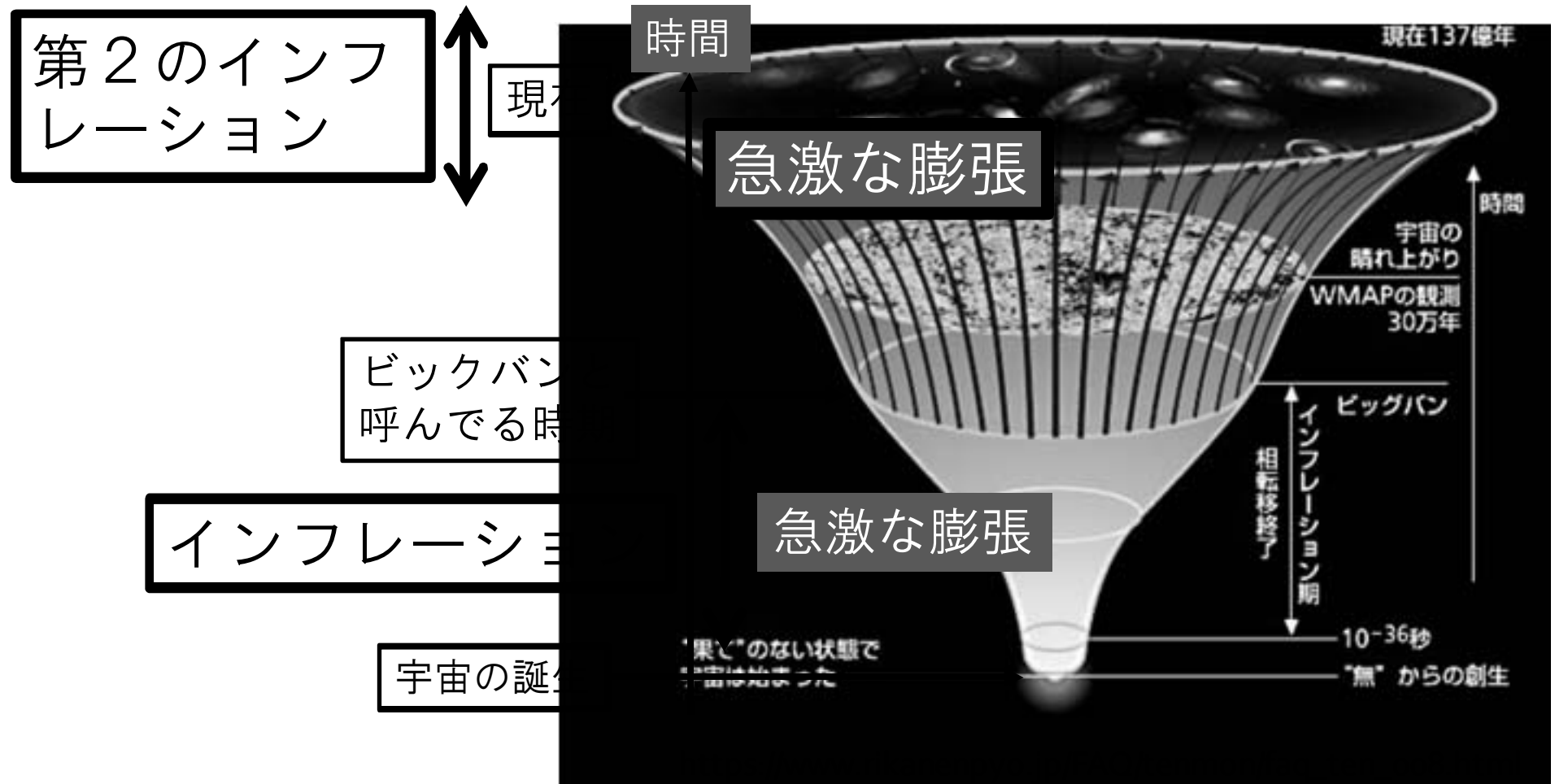
インフレーション

- 宇宙が生まれてすぐに、急激な膨張があった。
 - 現在のところ証拠はない
 - いずれ、背景放射の観測から得られると期待されている



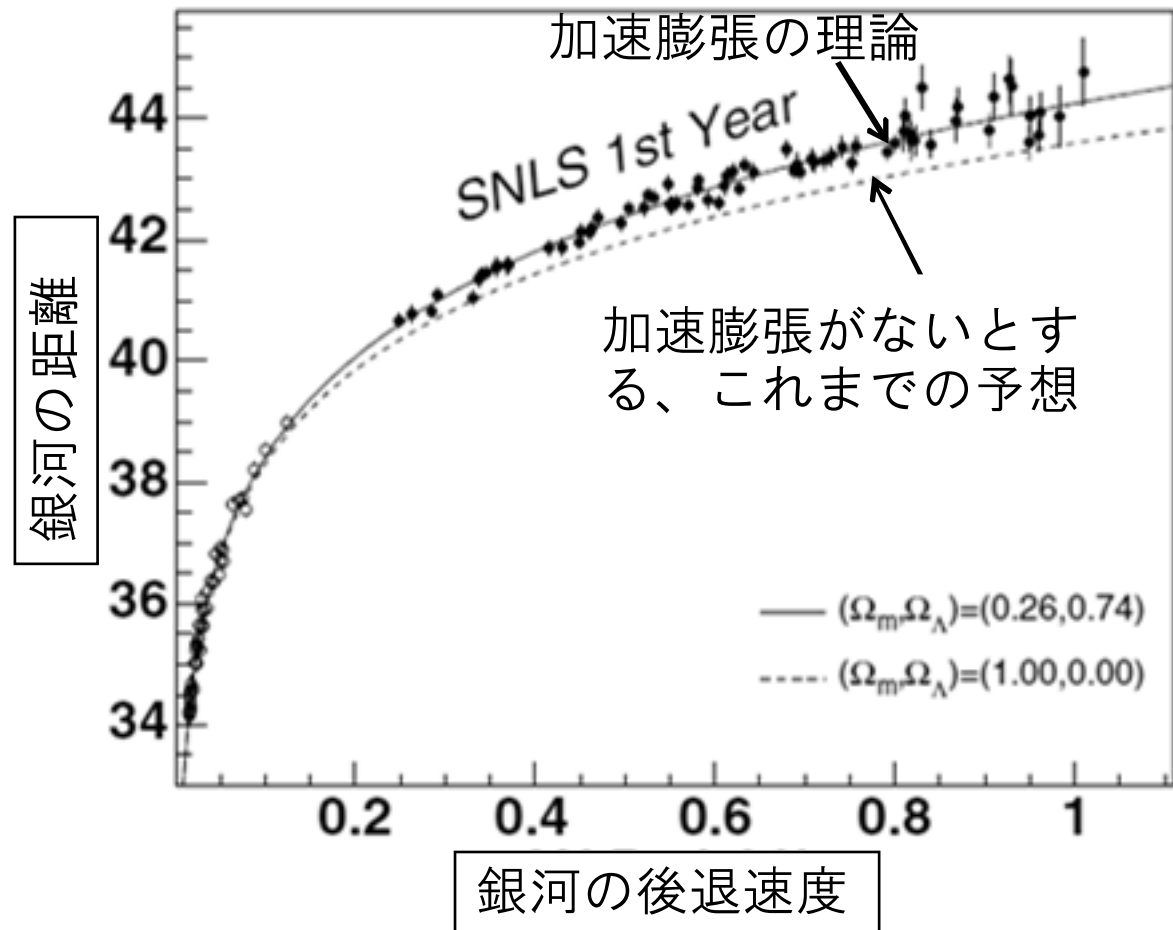
第2のインフレーション

- 現在も、宇宙は急激に膨張している！



宇宙の加速膨張

- 宇宙は思ったよりも広がっていた！
- 宇宙は加速度的に膨張している



銀河の後退速度と距離
の関係

Astier et al. 2006, A&A, 447, 31

なぜ、加速膨張するのか？

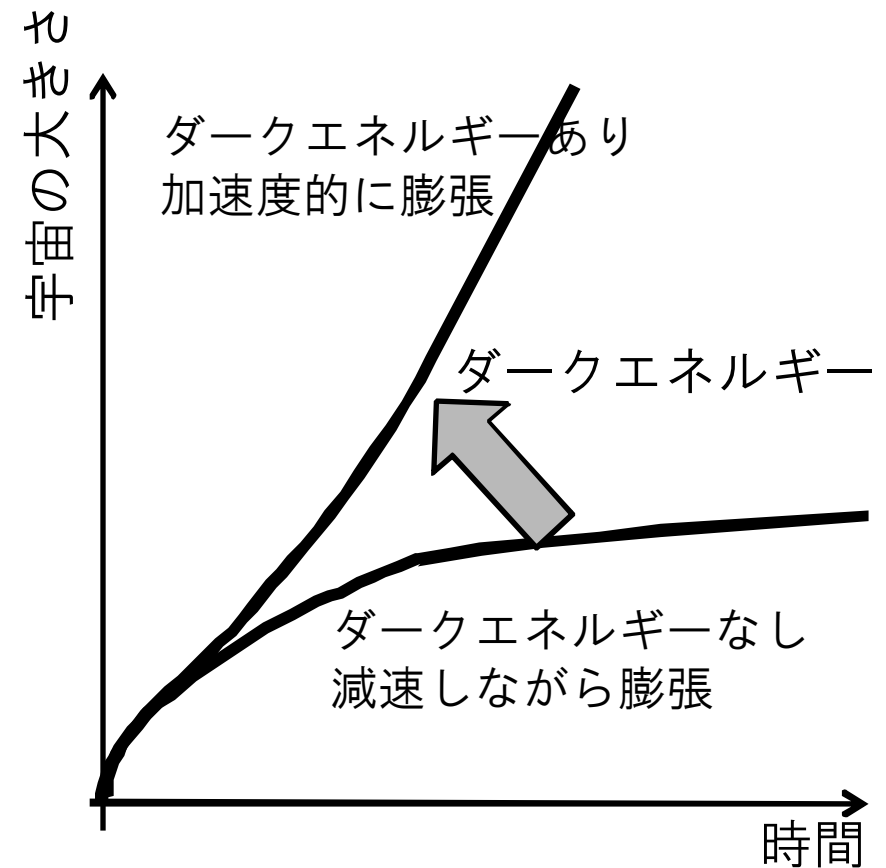
---素粒子・宇宙物理学最大の問題---

- 膨張を加速する「未知の原因」がある

- 正体は不明
- ダークエネルギーと呼ぶ
 - 質量はエネルギーと等価 ($E = mc^2$)
 - 普通は物（重力）があると、宇宙の膨張を引き留める
 - ダークエネルギーは宇宙を膨張させる！？

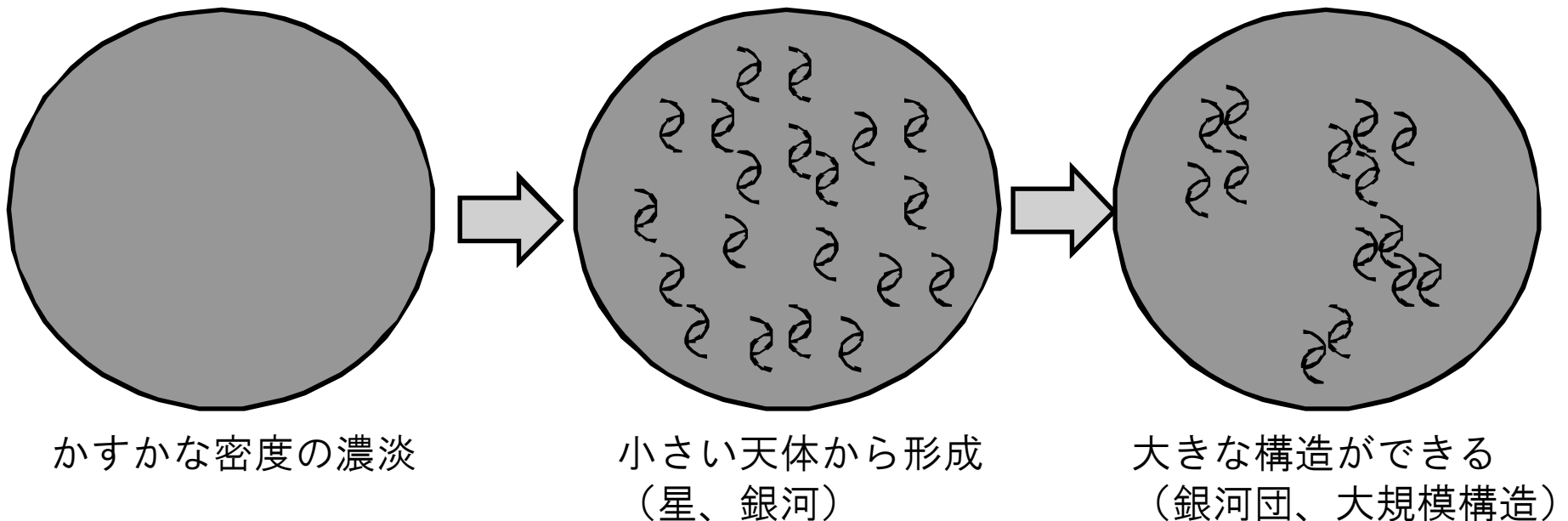
- 宇宙のエネルギーの構成

- 普通の物質（バリオン） 5%
- ダークマター 23%
- ダークエネルギー 72%



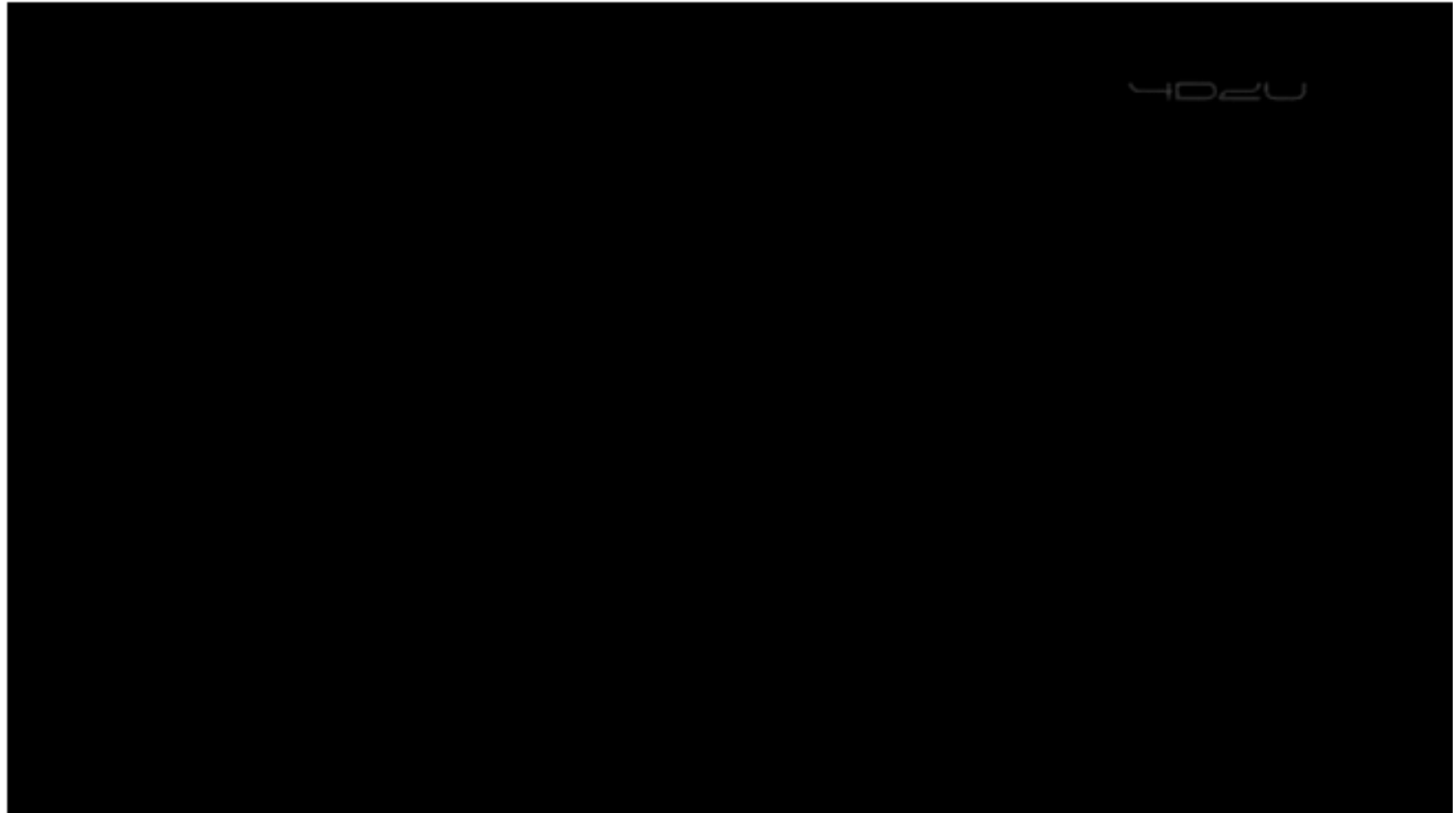
宇宙の構造形成

- 小さなものから先にできる
 - 星 → 銀河 → 銀河団 → 大規模構造
- ダークマターのかすかな濃淡が種
 - 自分の重力で縮まってできる



大規模構造形成のシミュレーション

138億年の進化、7億光年の領域

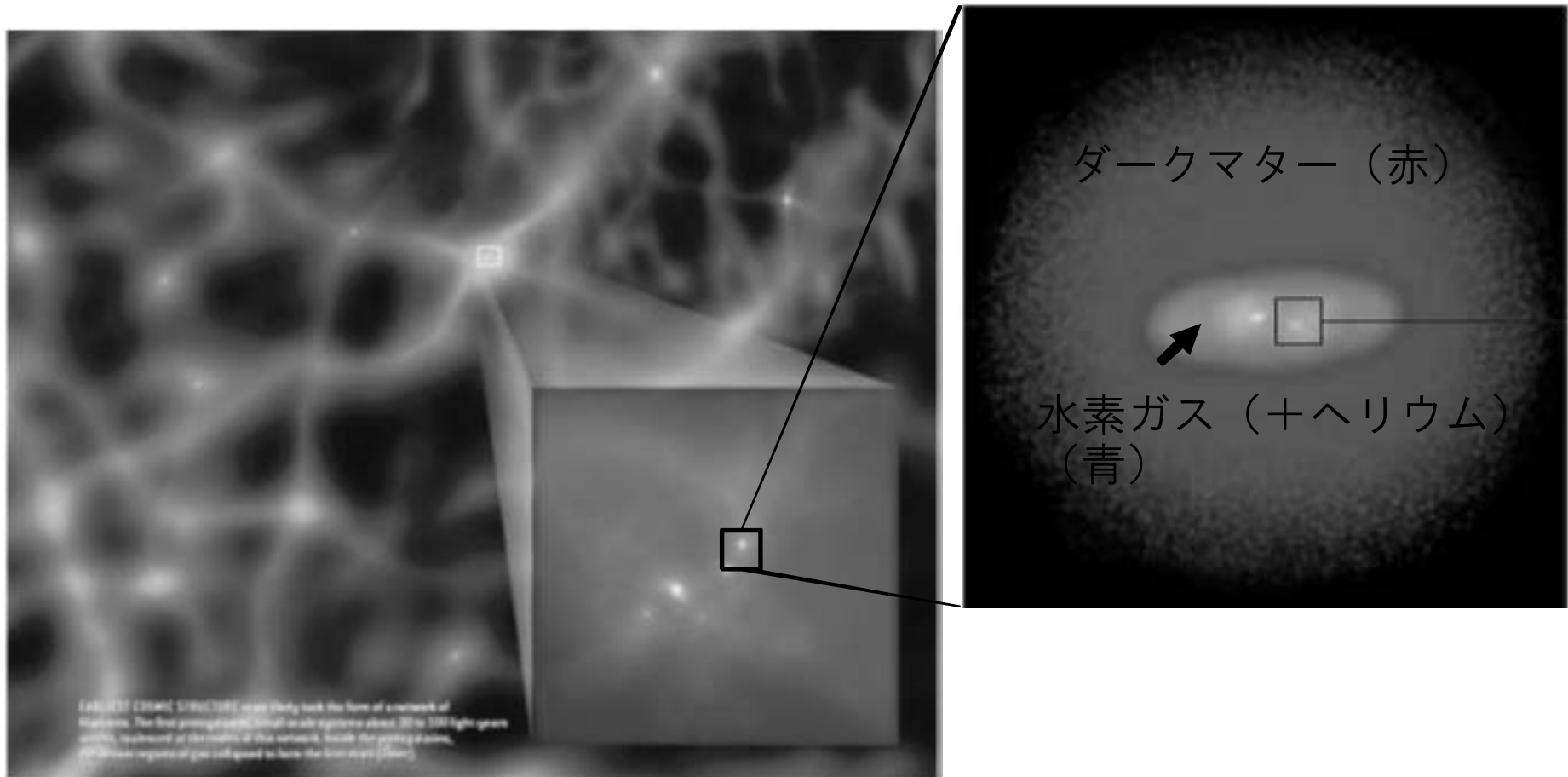


ダークマター：青 赤もたぶんダークマター（相対的に密度小？）

<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/movie.html>

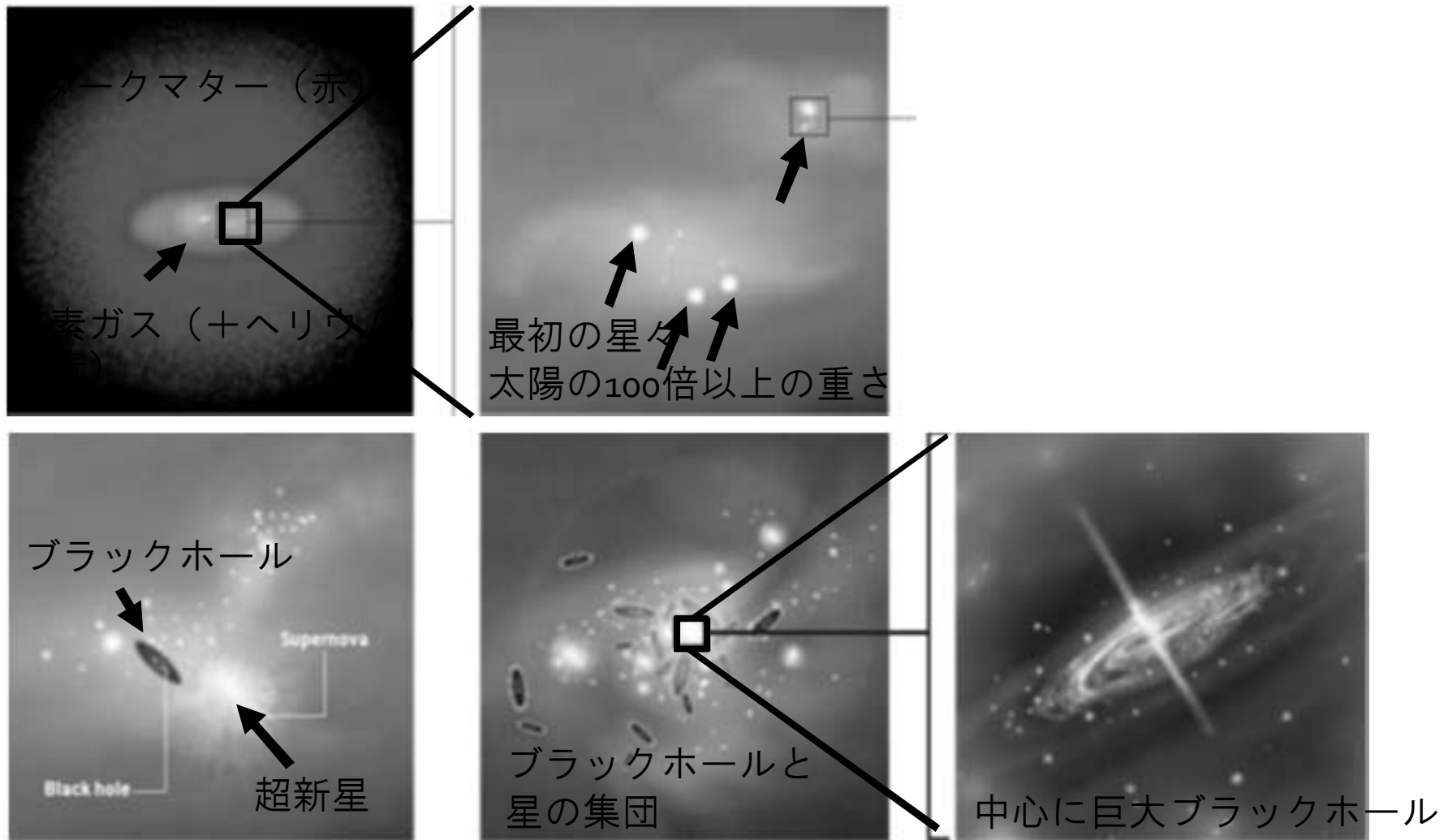
最初の星

- 宇宙誕生後、約1億年後に最初の星が生まれる



Larson and Bromm, Scientific American 2004

原始銀河の誕生

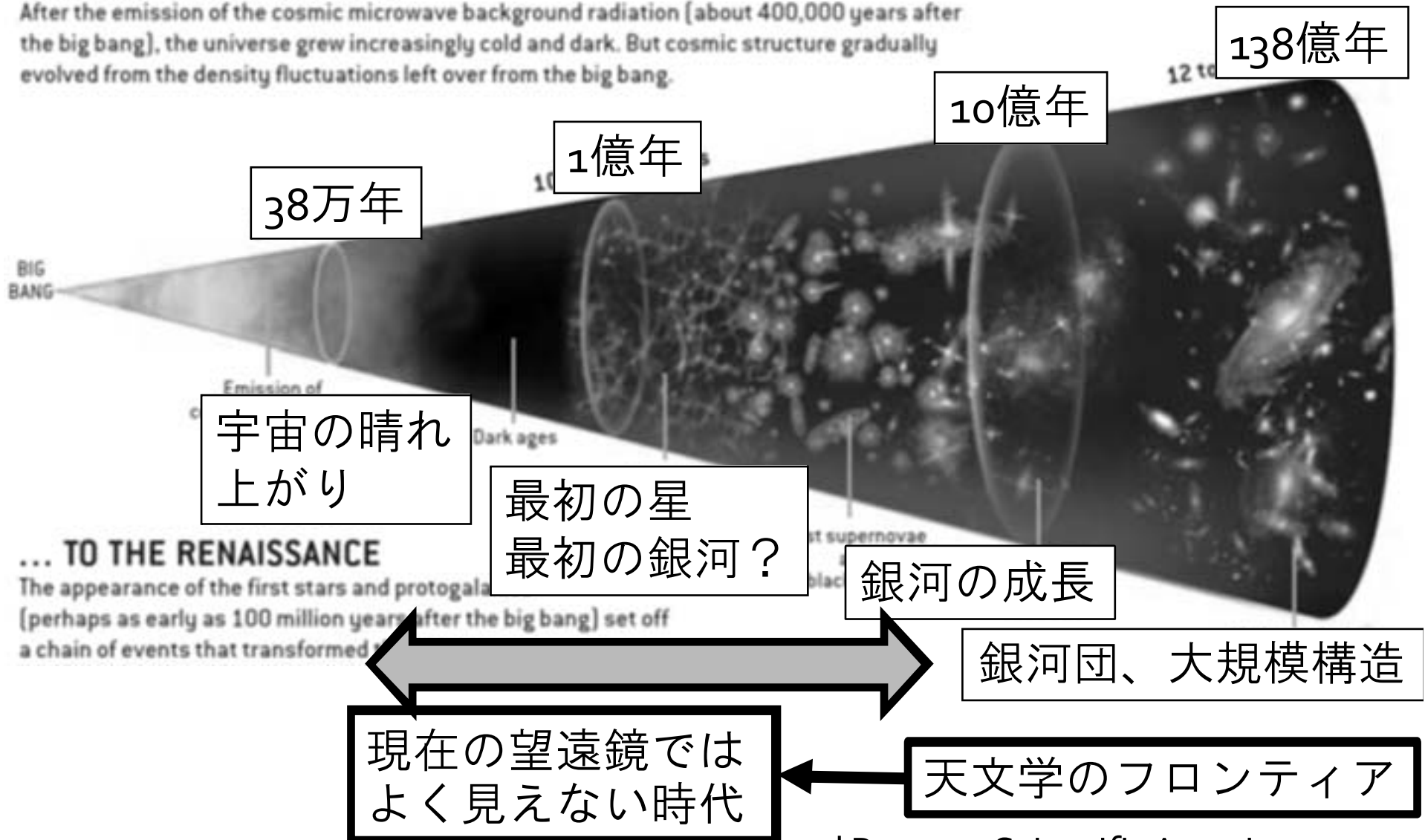


Larson and Bromm, Scientific American 2004

宇宙の歴史

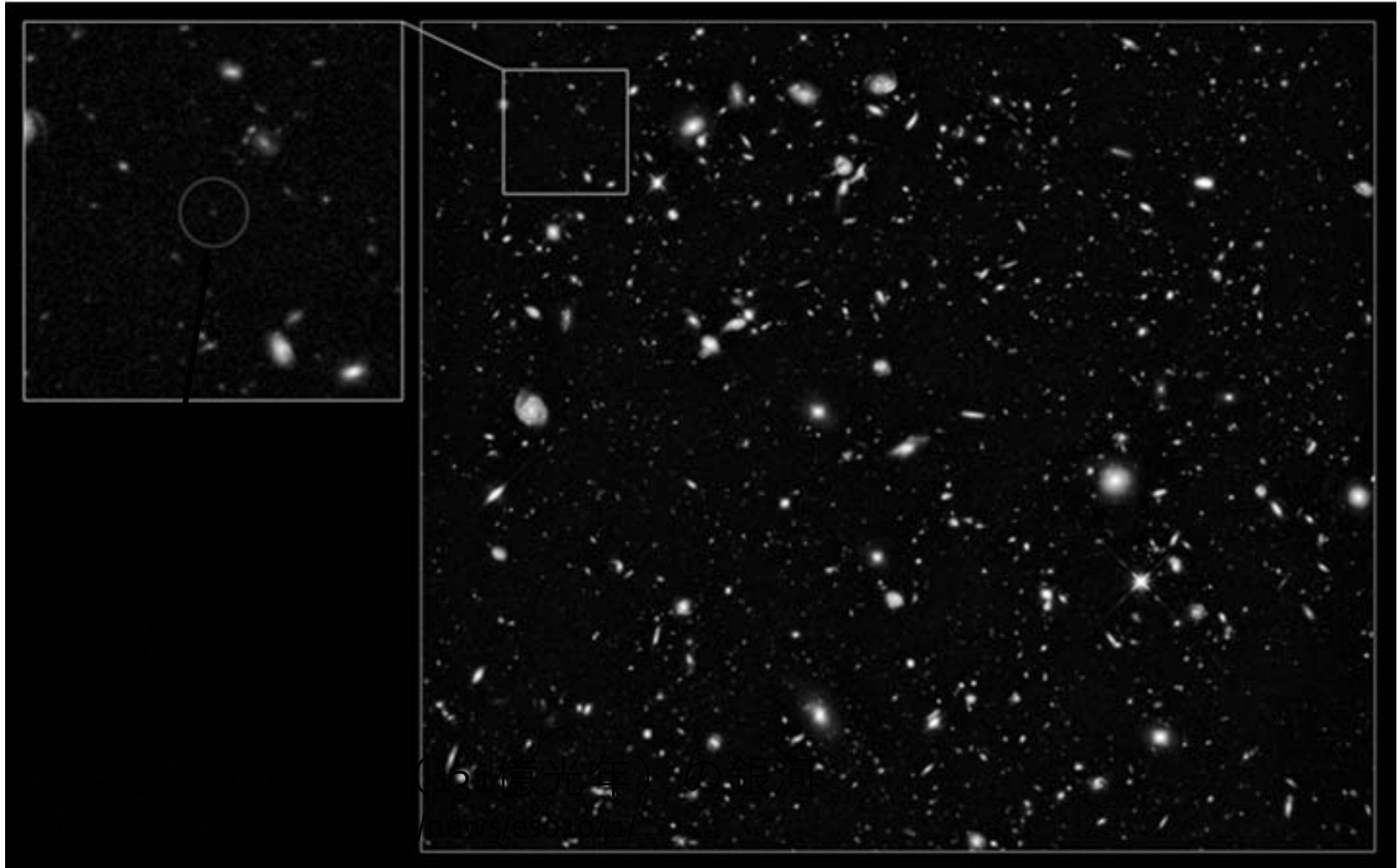
FROM THE DARK AGES ...

After the emission of the cosmic microwave background radiation (about 400,000 years after the big bang), the universe grew increasingly cold and dark. But cosmic structure gradually evolved from the density fluctuations left over from the big bang.



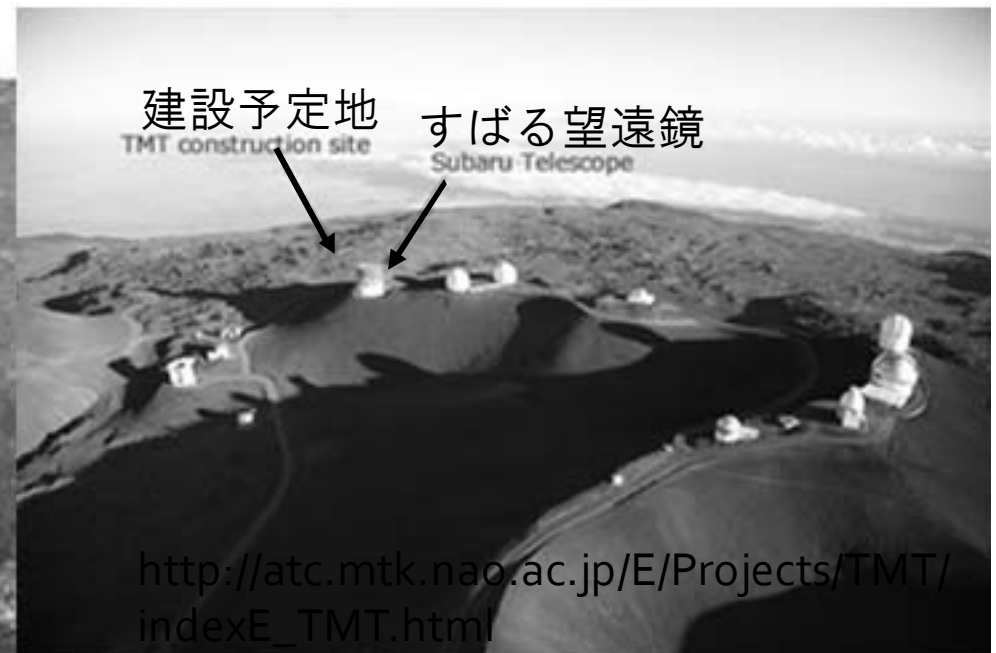
Larson and Bromm, Scientific American 2004

8m級望遠鏡での最遠の銀河



30m望遠鏡

- ハワイ・マウナケア山頂に建設中（2024年完成を目標）
 - アメリカ、カナダ、日本、中国、インドなどの国際協力
- マウナケア山は住人にとっての聖地
 - 現在、深刻な反対運動が起きている



<http://www.tmt.org/gallery/photo-illustrations>

http://atc.mtk.nao.ac.jp/E/Projects/TMT/indexE_TMT.html

参考文献

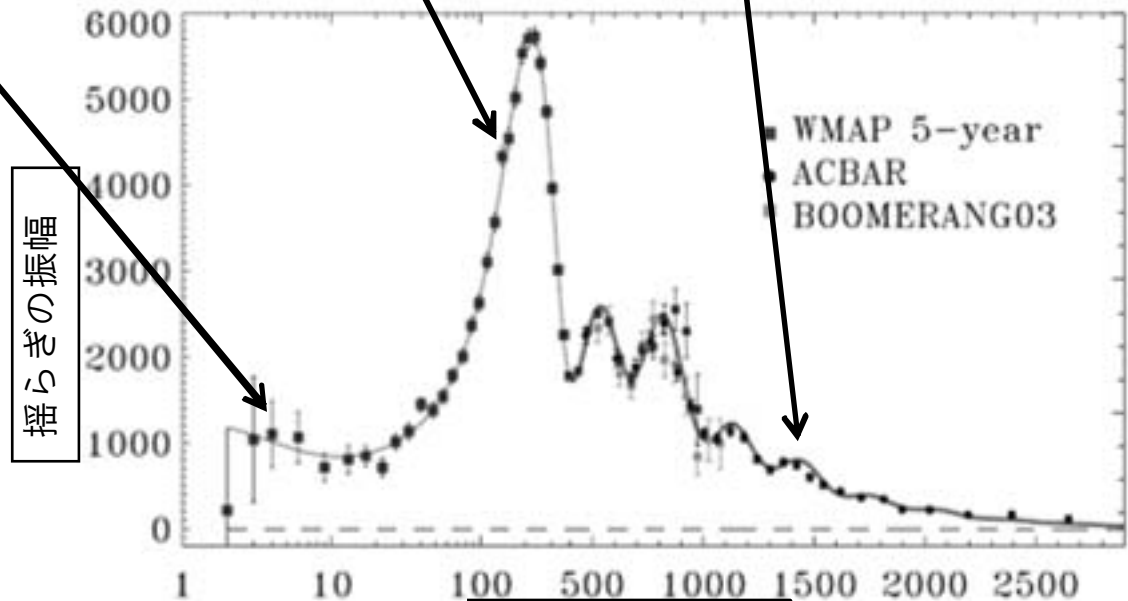
- 「現代の天文学₂ 宇宙論I—宇宙のはじまり」、佐藤勝彦ほか編、日本評論社
- 「現代の天文学₃ 宇宙論II—宇宙の進化」、二間瀬敏史ほか編、日本評論社
- 「現代宇宙論」、松原隆彦、東京大学出版会
- 「宇宙137億年解説」、吉田直紀、東京大学出版会（一般向け）
- 講義で説明していない宇宙の誕生などについては
 - 村山 斉や佐藤勝彦の一般向け解説書が読みやすい

宇宙背景放射の揺らぎ

- なめらかな揺らぎと細かい揺らぎに分解

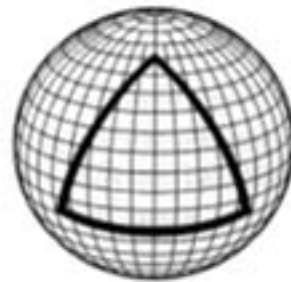


- 揺らぎの解析
 - 宇宙の物質の量
 - 宇宙膨張の様子
 - インフレーションについて

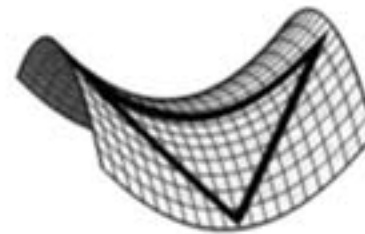


宇宙の幾何学

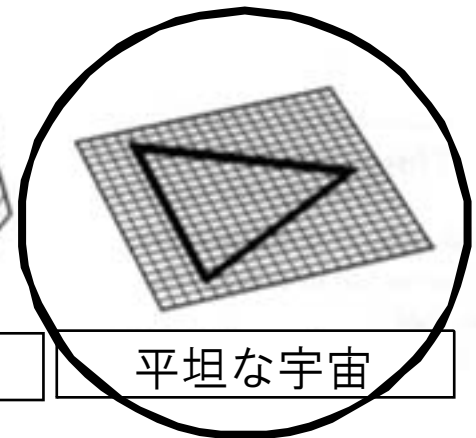
- 3種類の曲がった曲面
 - 閉じた曲面： 正の曲率
 - 開いた曲面： 曲率ゼロ
 - 開いた曲面： 負の曲率
- 閉じるかどうかは、物質（エネルギー）の量（密度）による
 - 物質が多い → 閉じる
 - 物質が少ない → 開く
- 宇宙の密度 → 曲面が平坦になる密度
 - 宇宙初期の急激な膨張：インフレーション



閉じた宇宙



開いた宇宙



平坦な宇宙

異なった幾何学を持つ2次元
の曲面

<http://abyss.uoregon.edu/~js/cosmo/lectures/lec15.html>