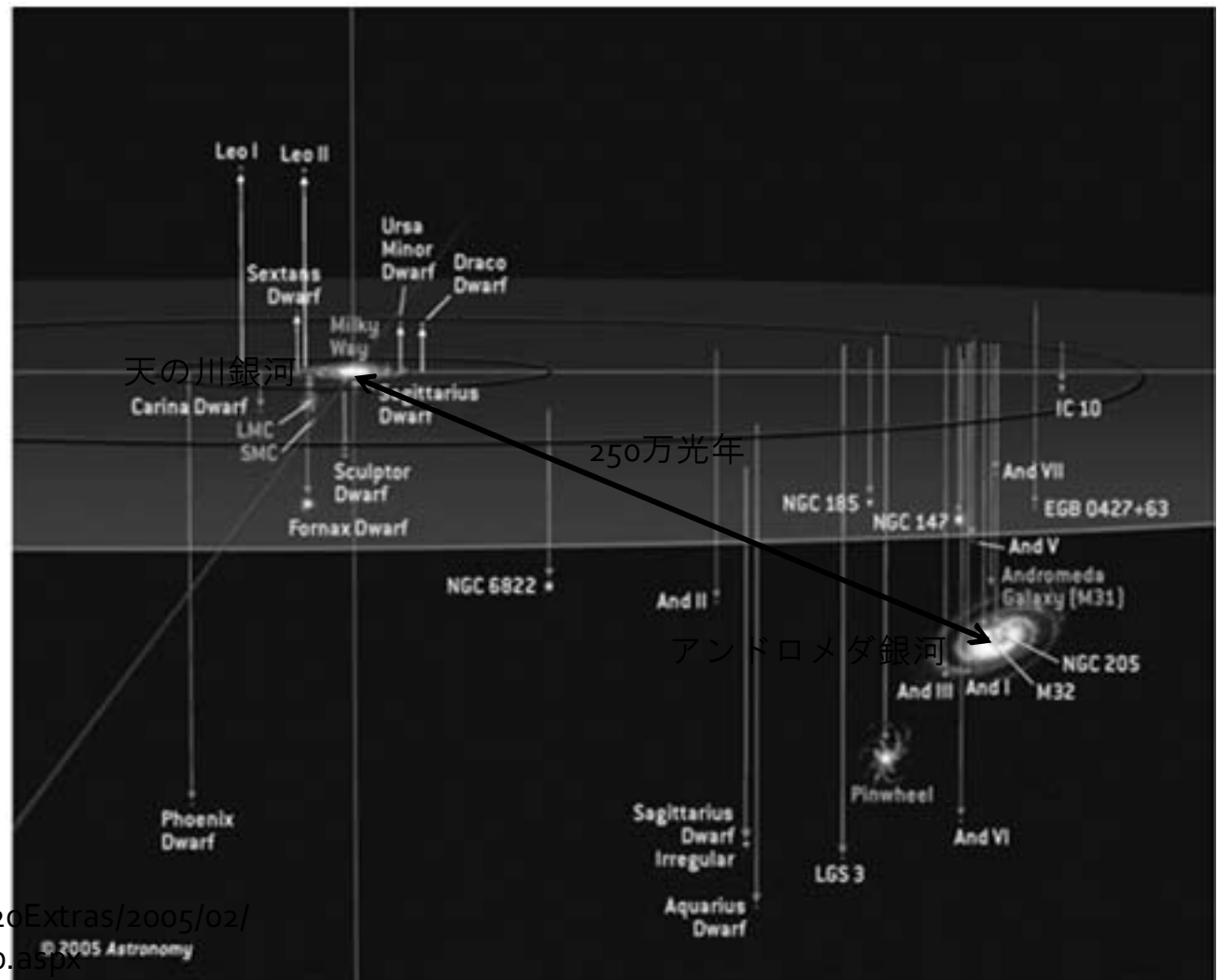


大宇宙

銀河団、大規模構造、膨張宇宙

銀河群

- 数個～数十個の銀河の群れ



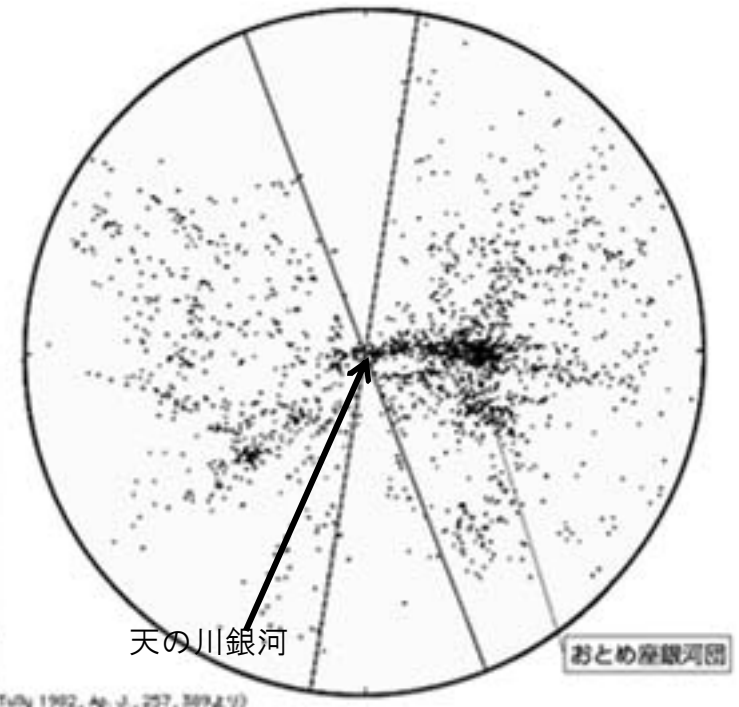
局所銀河群

<http://www.astronomy.com/en/Web%20Extras/2005/02/Dominating%20the%20Local%20Group.aspx>

銀河団

- 100個程度以上の集まり

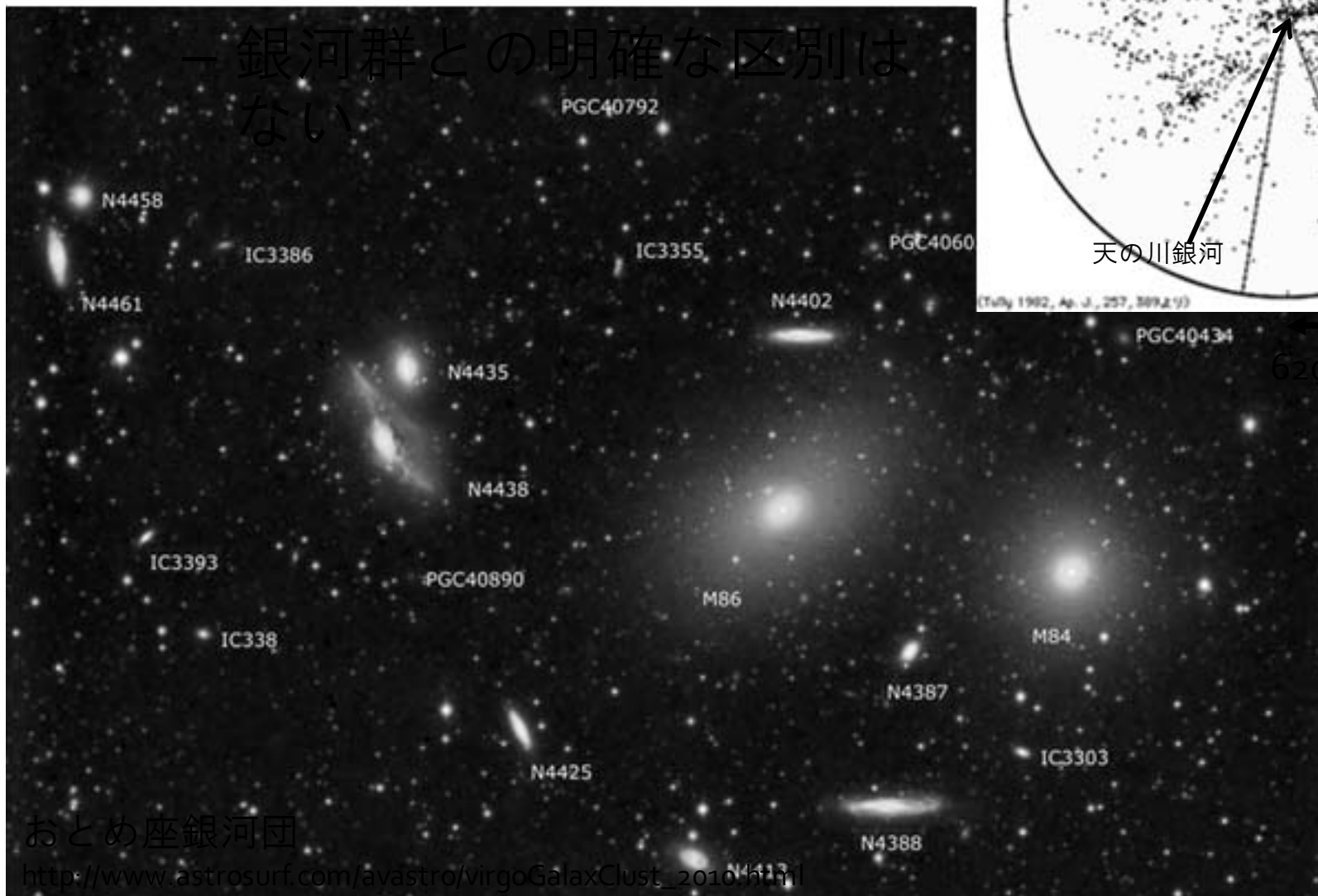
ー 銀河群との明確な区別はない



天の川銀河

おとめ座銀河団

6200万光年

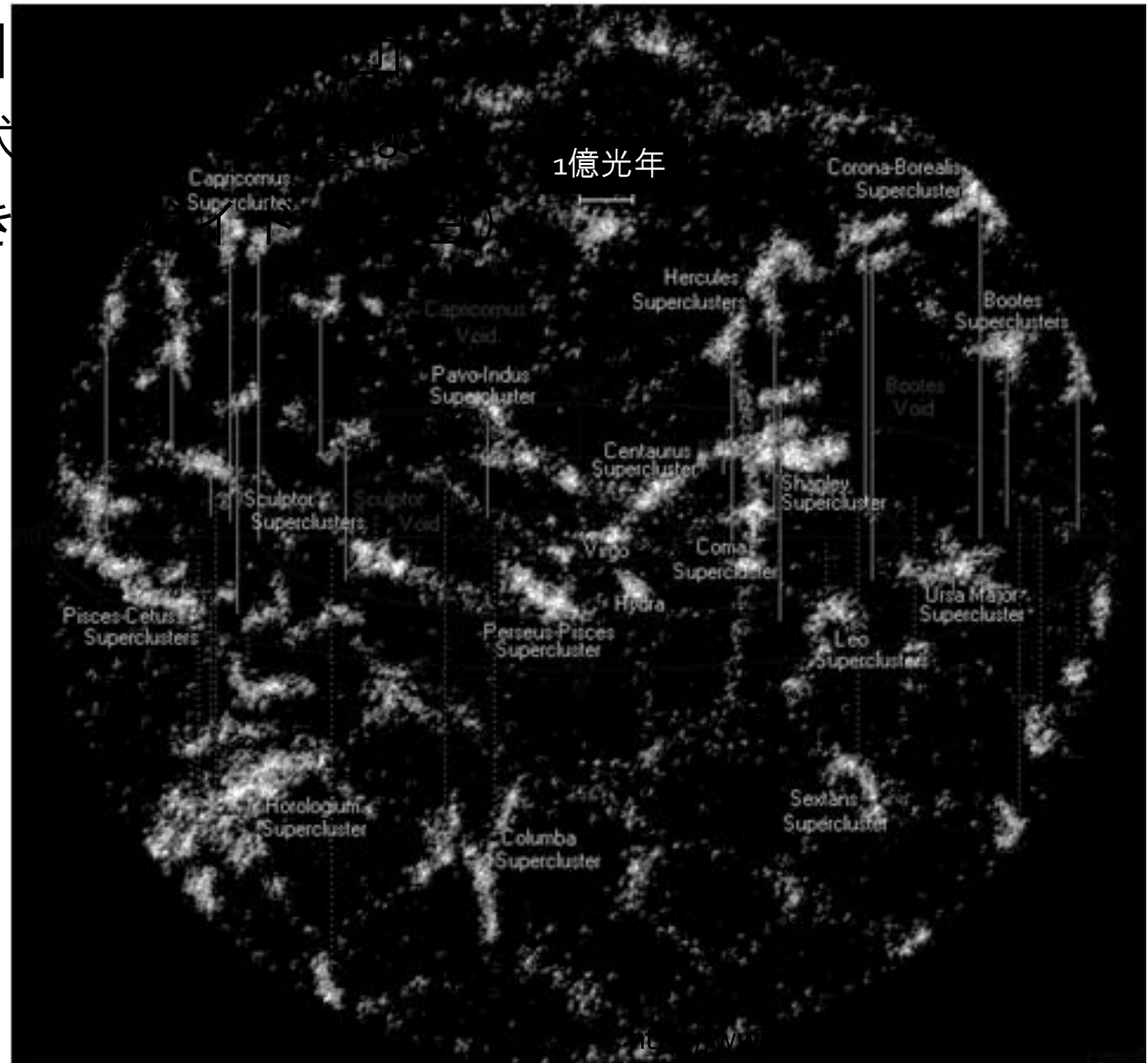


おとめ座銀河団

http://www.astrosurf.com/avastro/virgoGalaxClust_2010.html

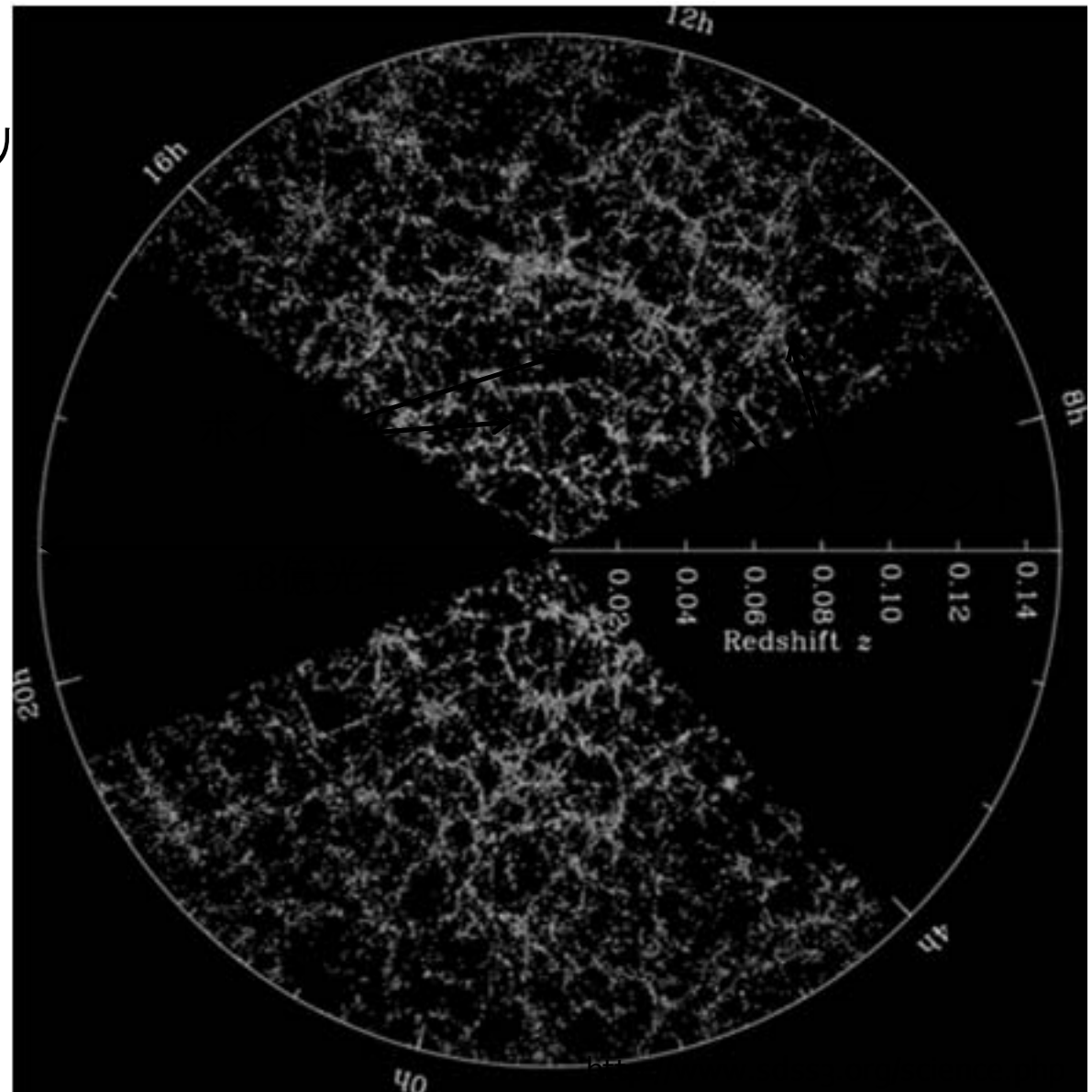
超銀河団

- 銀河団を複数個
 - フィラメント状
 - 同じ程度の大きさもある



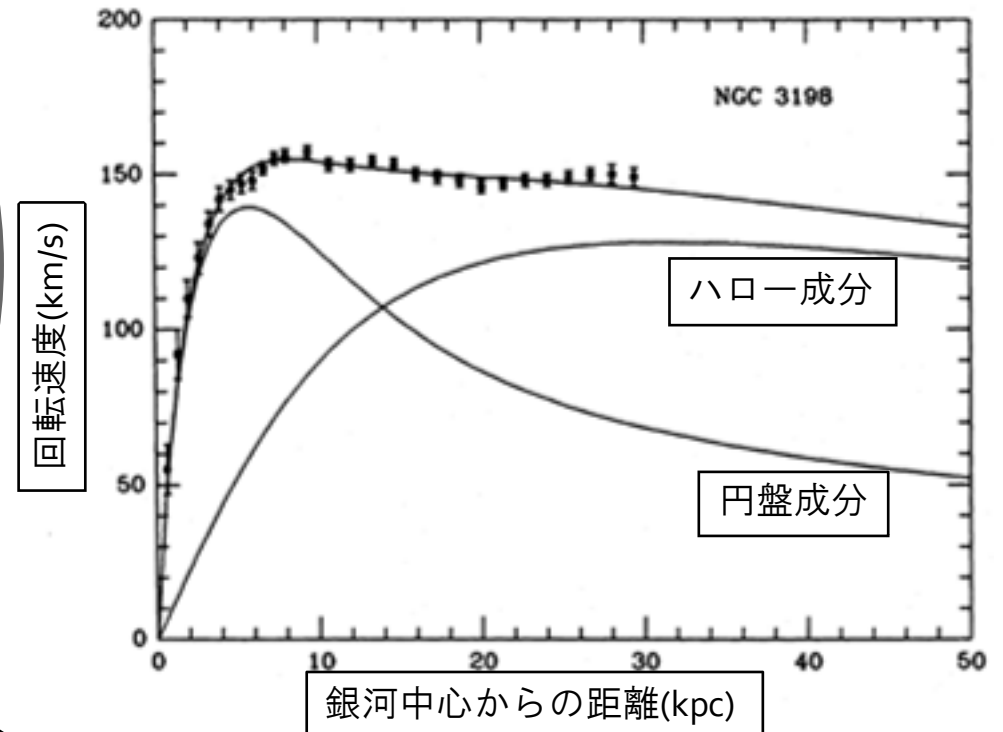
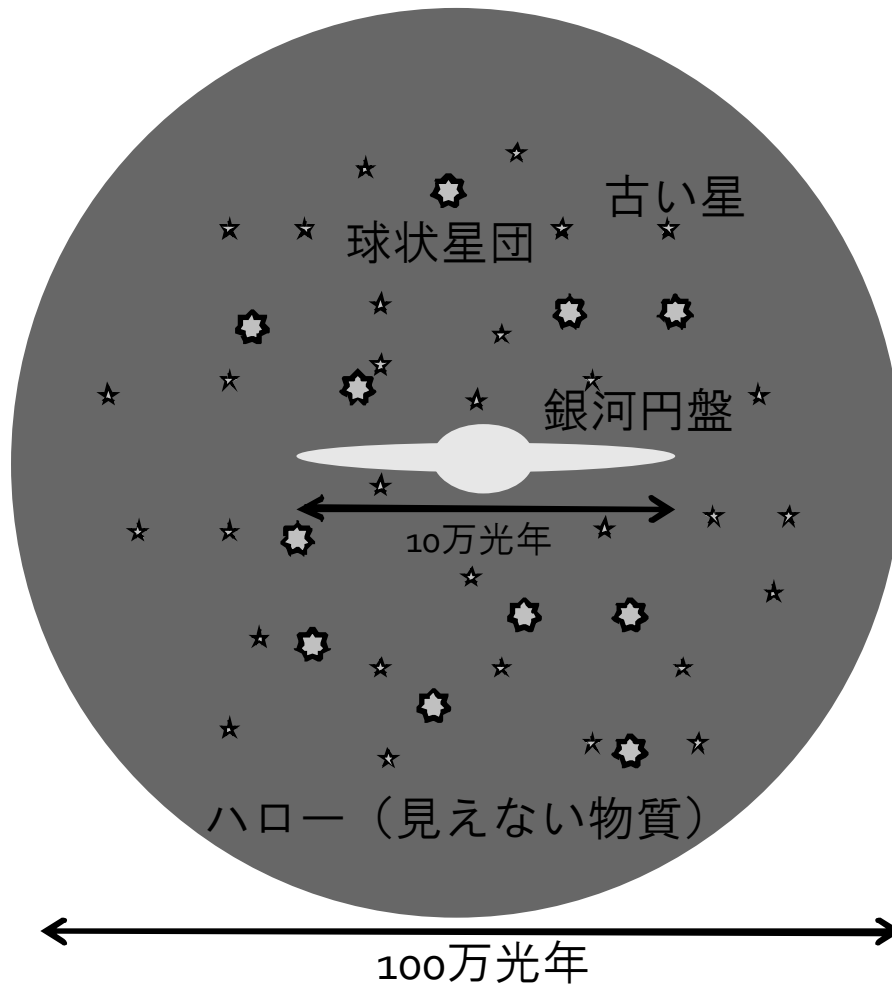
大規模構造

- 泡構造
 - 数億光年スケール



ダークマター（暗黒物質）

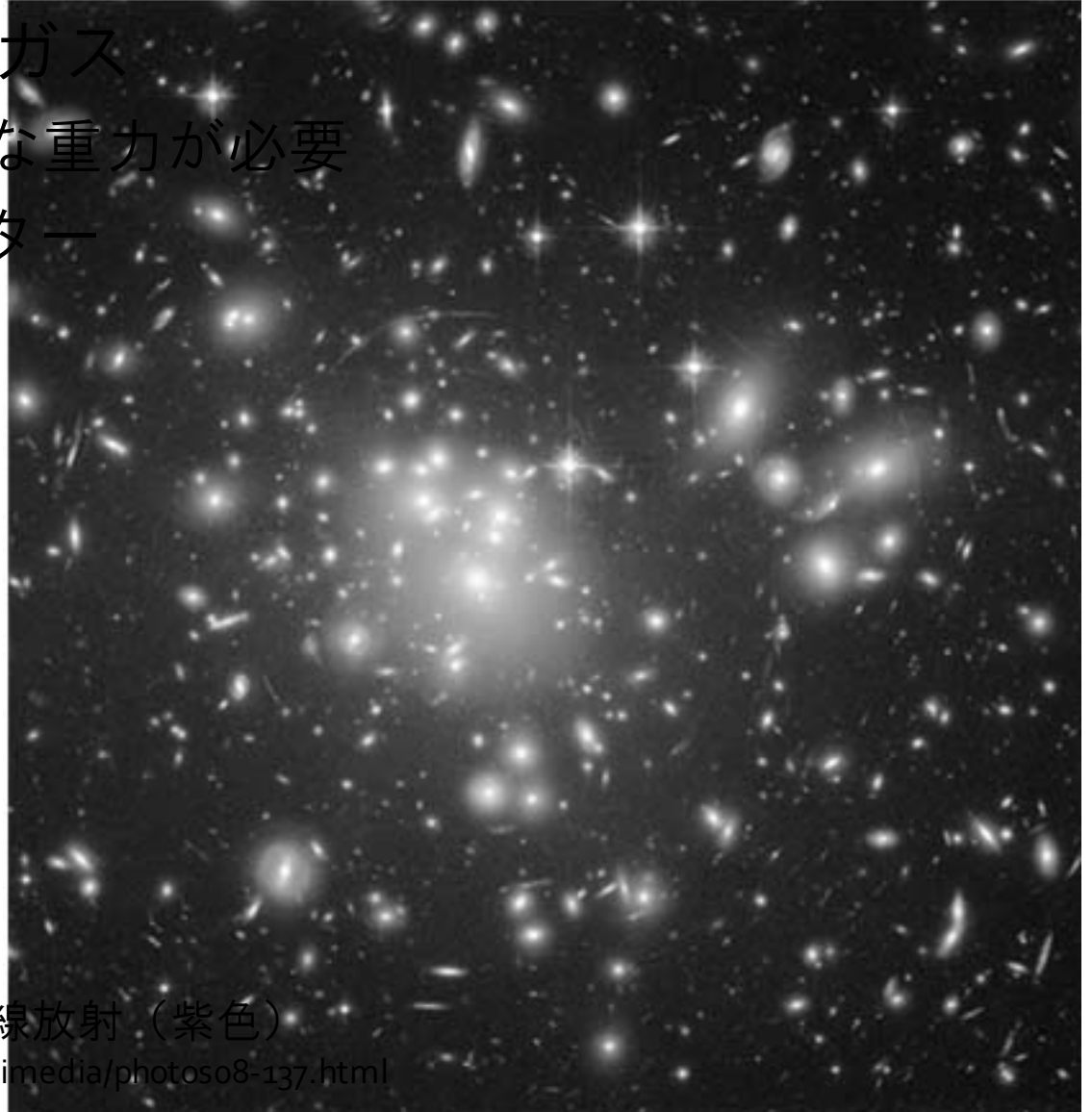
- 銀河のダークマター
 - 光る物質（星やガス）の10倍くらいのダークマター



銀河の回転速度(van Albada et al. 1985, ApJ, 295,305)

銀河団のダークマター

- 高温（数千万度）のガス
 - 閉じ込めるには巨大な重力が必要
 - 10倍程度のダークマター

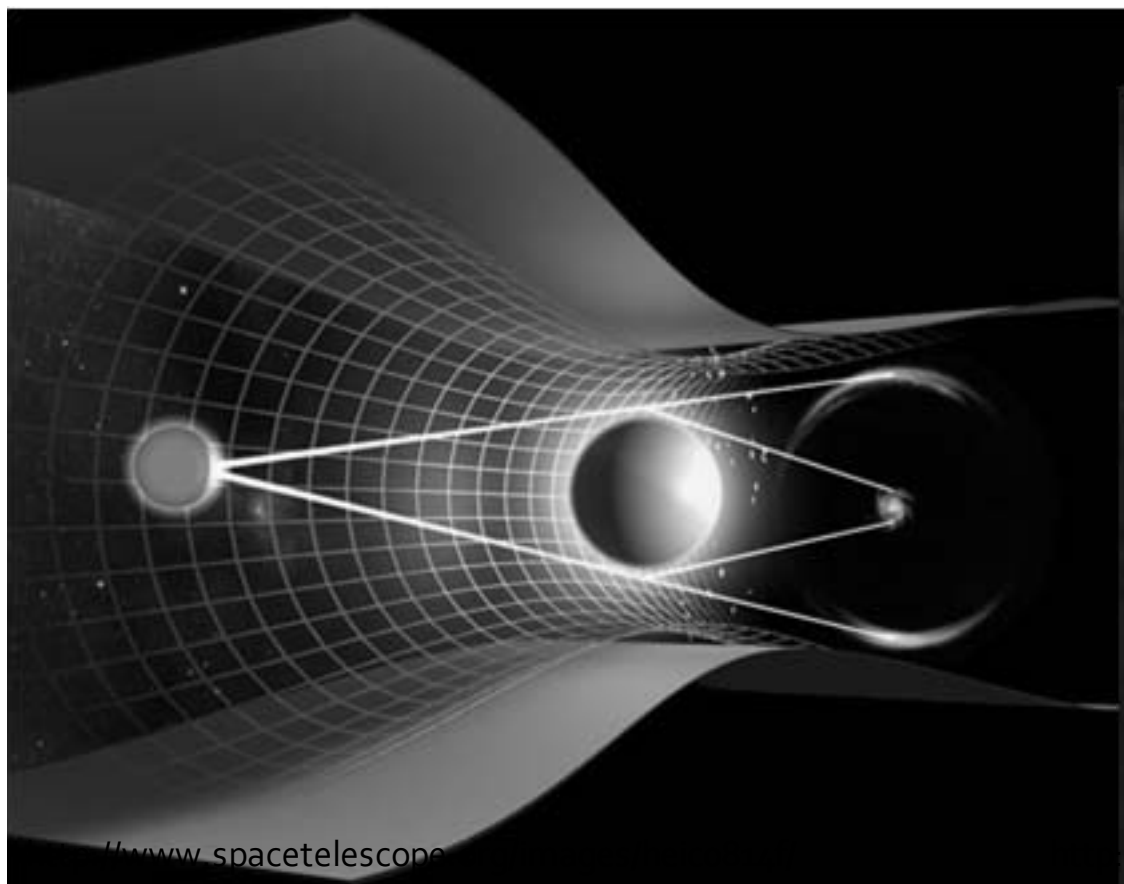


銀河団Abell 1689の高温ガスからのX線放射（紫色）

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/photos08-137.html

重力レンズ

- 銀河などの巨大な重力
– 光線が曲がる → レンズ



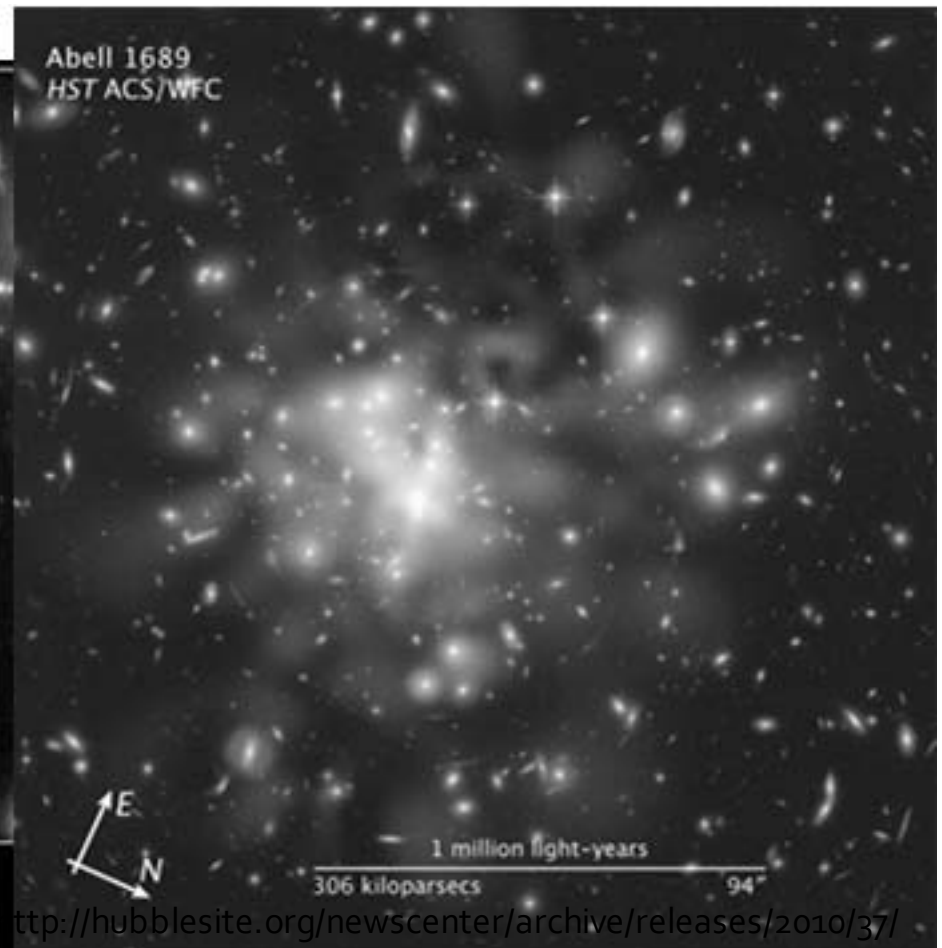
重力レンズを起こすダークマター

- 銀河団のダークマターは大きな重力レンズ



Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08



Abell 1689
HST ACS/WFC

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2010/37/>

見えない物質

- 見える物質（星、ガス）の10倍くらい
- 見えない普通の物質（ダークバリオン）
 - 暗すぎて見えない星、ガスなど --- 見えている物質と同じくらい
 - 褐色矮星、白色矮星、中性子星、ブラックホール
 - 銀河間に薄く広がるガス
- 光と相互作用しない物質（ダークマター）
 - 普通の物質（見えないのも含めて）の5倍くらい
 - ニュートリノ --- 質量をもつが、総量は少ない
 - 未知の素粒子？

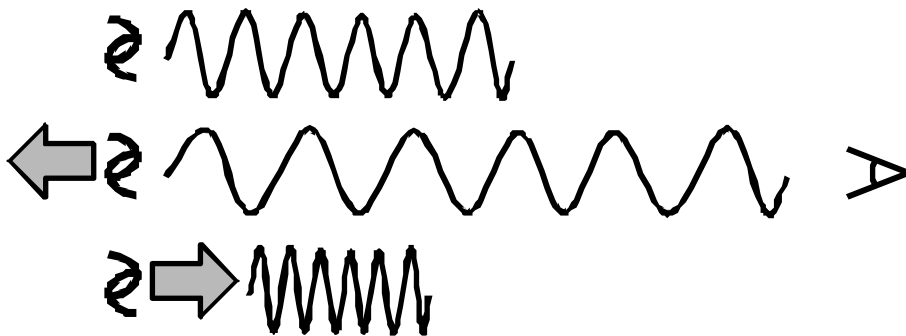
ハッブルの法則

- 遠い銀河ほど、速く遠ざかる

$$v = H_0 d$$

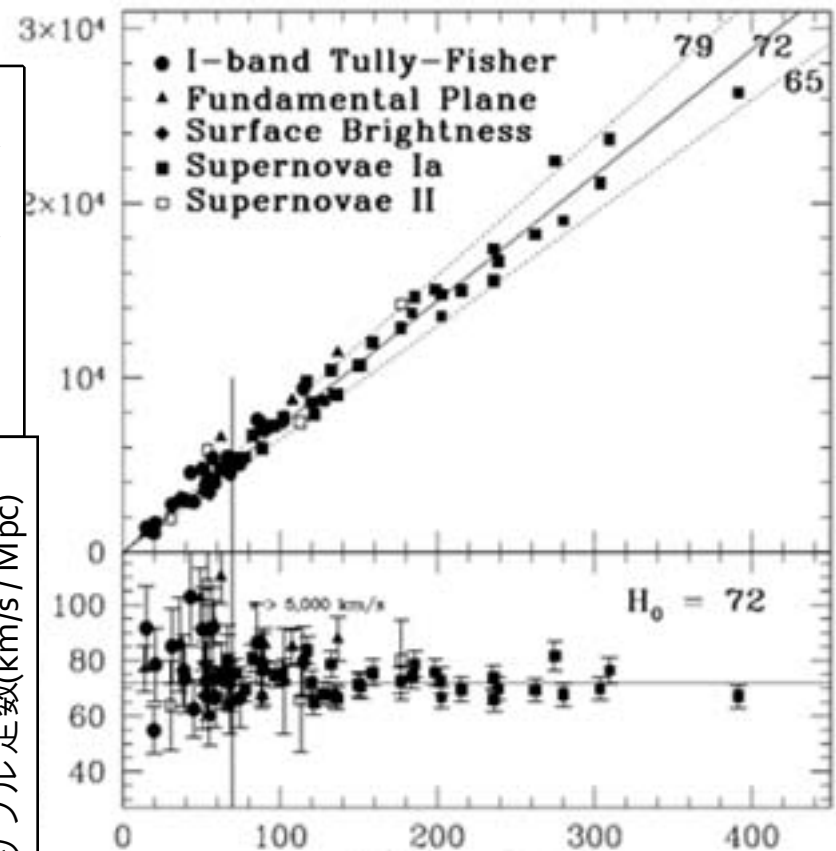


- ドップラー効果



後退速度(km/s)

ハッブル定数(km/s / Mpc)



地球からの距離(Mpc)

Freedman et al. 2001, ApJ, 553, 47

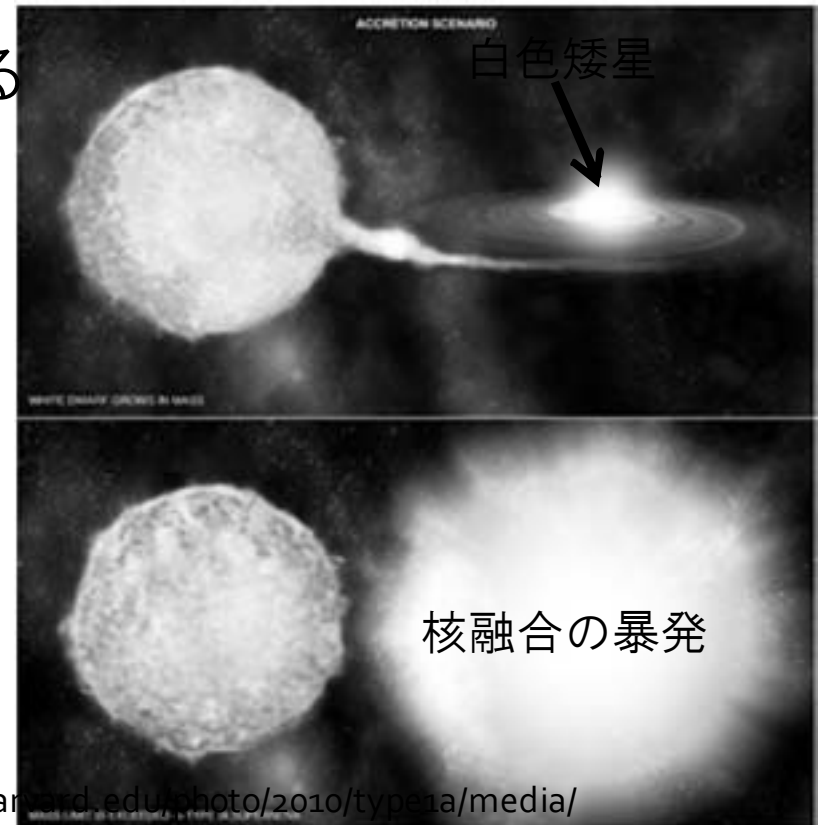
1a型超新星

- 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

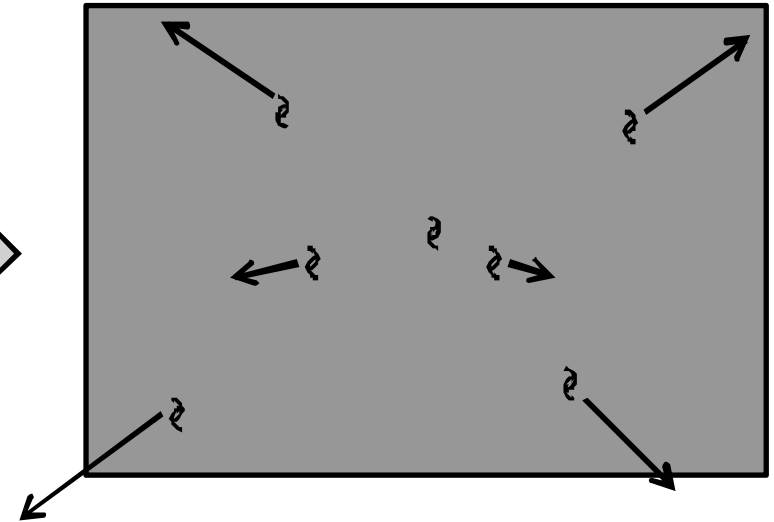
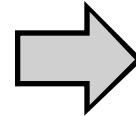
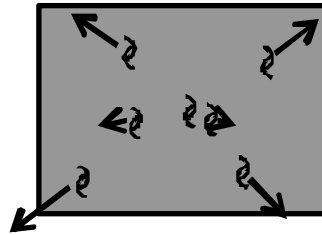


1a型超新星

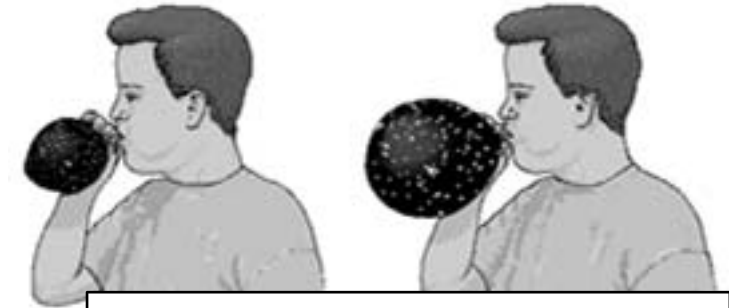
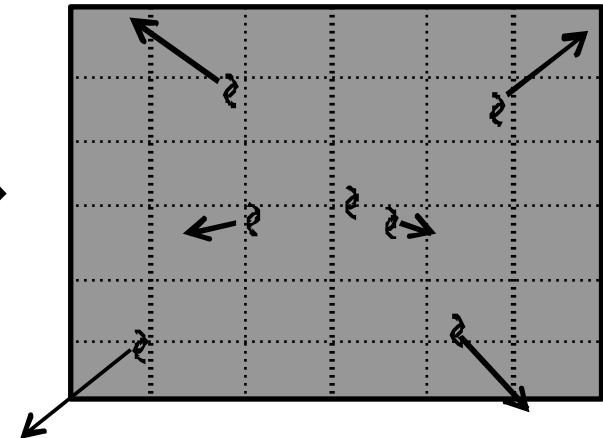
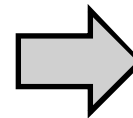
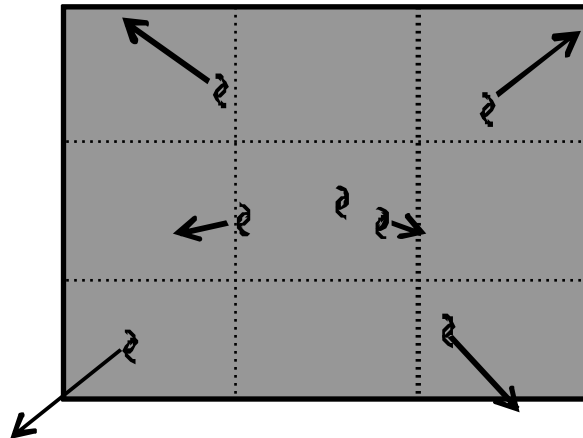
<http://chandra.harvard.edu/photo/2010/type1a/media/>

宇宙の膨張

- 空間が広がる



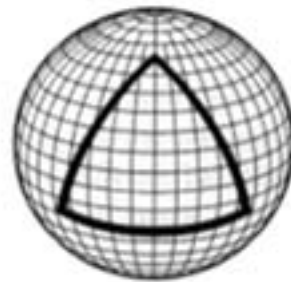
- 物差しが縮まる



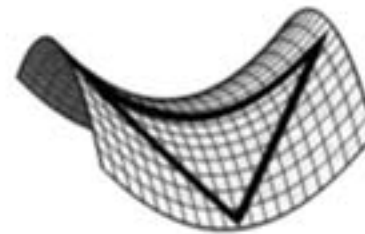
<http://www.herebeanswers.com/2009/10/big-bang-and-center-of-universe.html>

宇宙の幾何学

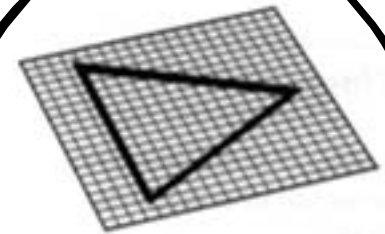
- 3種類の曲がった曲面
 - 閉じた曲面： 正の曲率
 - 開いた曲面： 曲率ゼロ
 - 開いた曲面： 負の曲率
- 閉じるかどうかは、物質（エネルギー）の量（密度）による
 - 物質が多い → 閉じる
 - 物質が少ない → 開く
- 宇宙の密度 → 曲面が平坦になる密度
 - 宇宙初期の急激な膨張：インフレーション



閉じた宇宙



開いた宇宙



平坦な宇宙

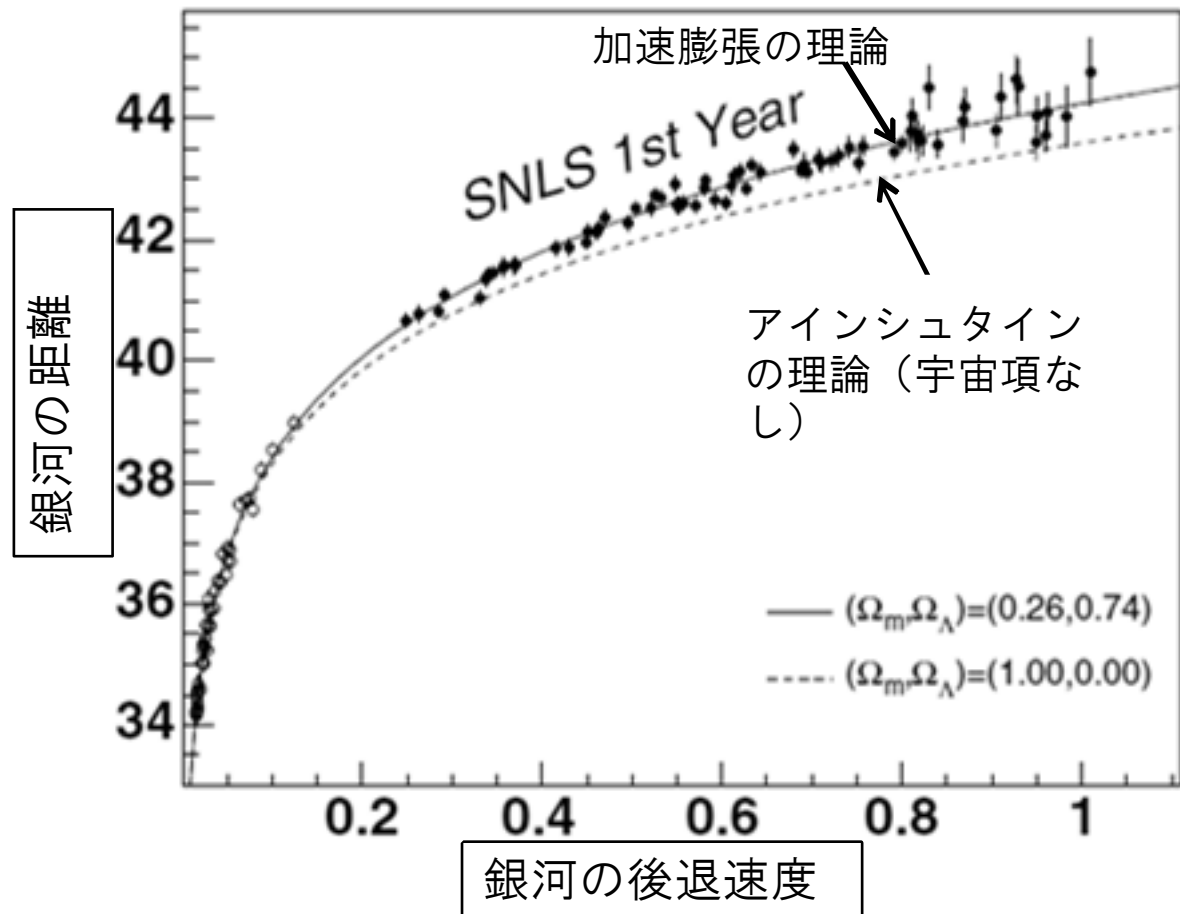
異なった幾何学を持つ2次元の曲面

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

宇宙の加速膨張

- 宇宙は思ったよりも広がっている?!
 - 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



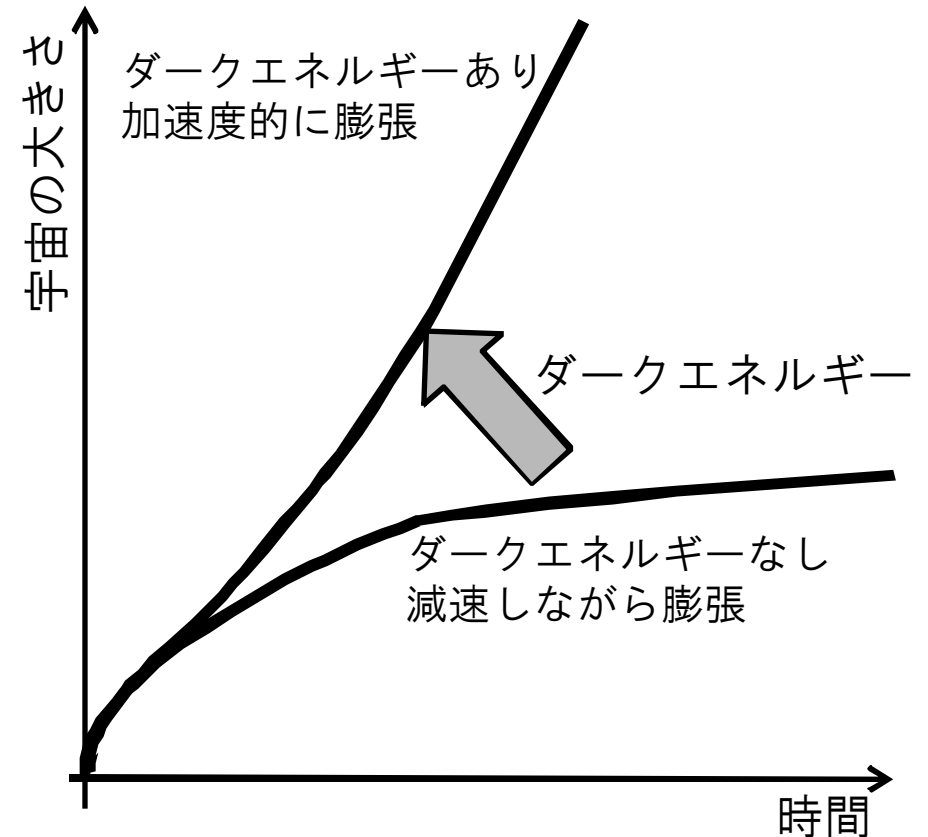
2011年ノーベル物理学賞
「宇宙の加速膨張の発見」

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt
Adam G. Riess の3氏

未知の加速源

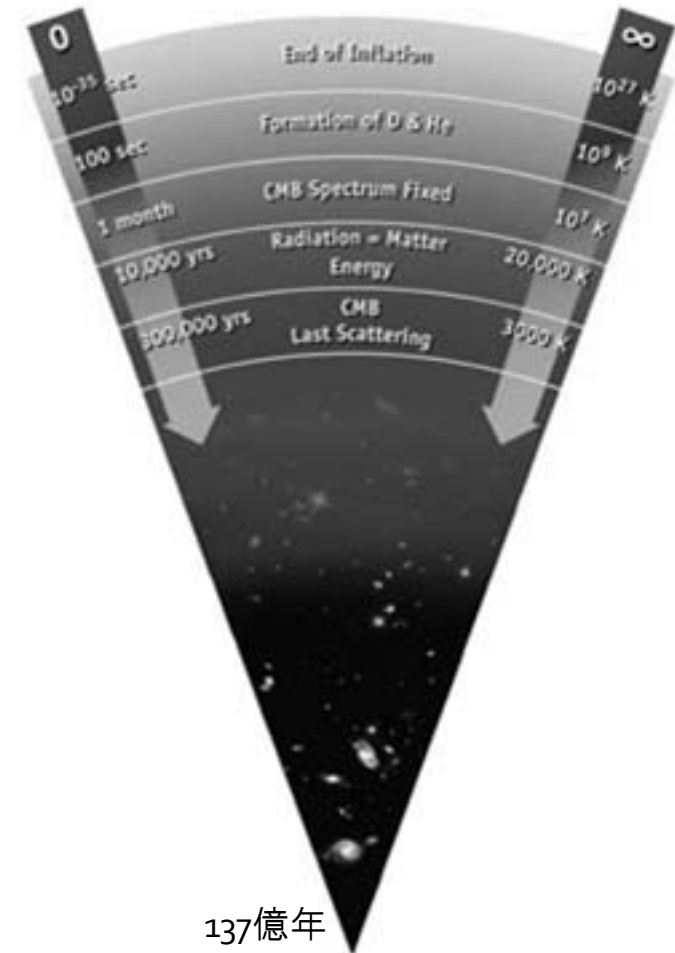
- 膨張を加速するものがある
 - 正体は不明
 - ダークエネルギーと呼ぶ

- 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%



ビッグバン

- 高温・高密度から始まる
- 膨張しながら冷える
 - さまざまな物質が生成・消滅
 - 冷えながら、現在の物質が形作られる
- 38万年で原子ができる
 - 宇宙が透明になる



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

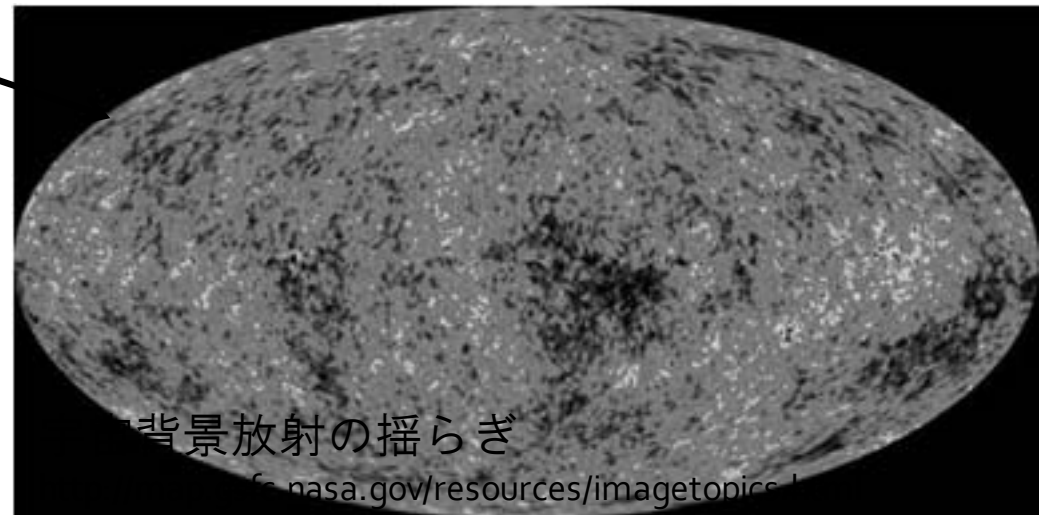
時間	温度	宇宙の構成要素
10^{-4} 秒	10^{12} K	陽子、中性子、電子、ニュートリノ、光
100秒	10^9 K	原子核（水素・ヘリウム）、電子、ニュートリノ、光
38万年	3000K	原子（水素・ヘリウム）、光、ニュートリノ
137億年	3K	原子（重い元素を含む）、電離ガス、光、ニュートリノ

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
 - 密度の揺らぎ → 星や銀河の種
 - 温度の揺らぎ

一様な宇宙背景放射

宇宙空間のゆがみ

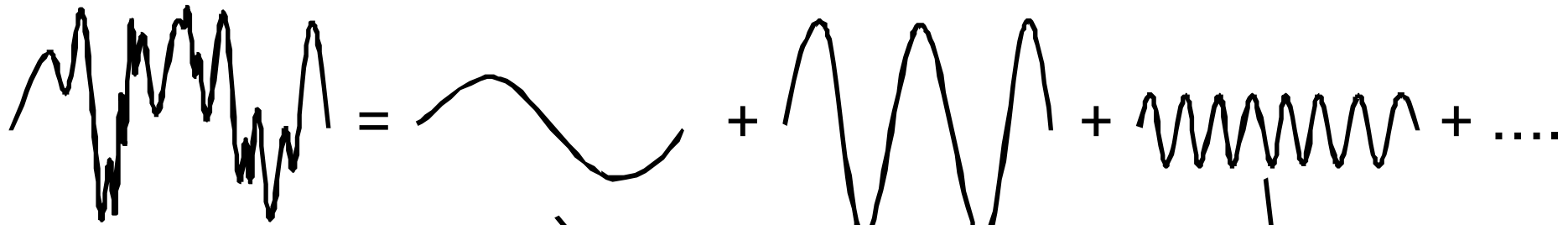


宇宙背景放射の揺らぎ

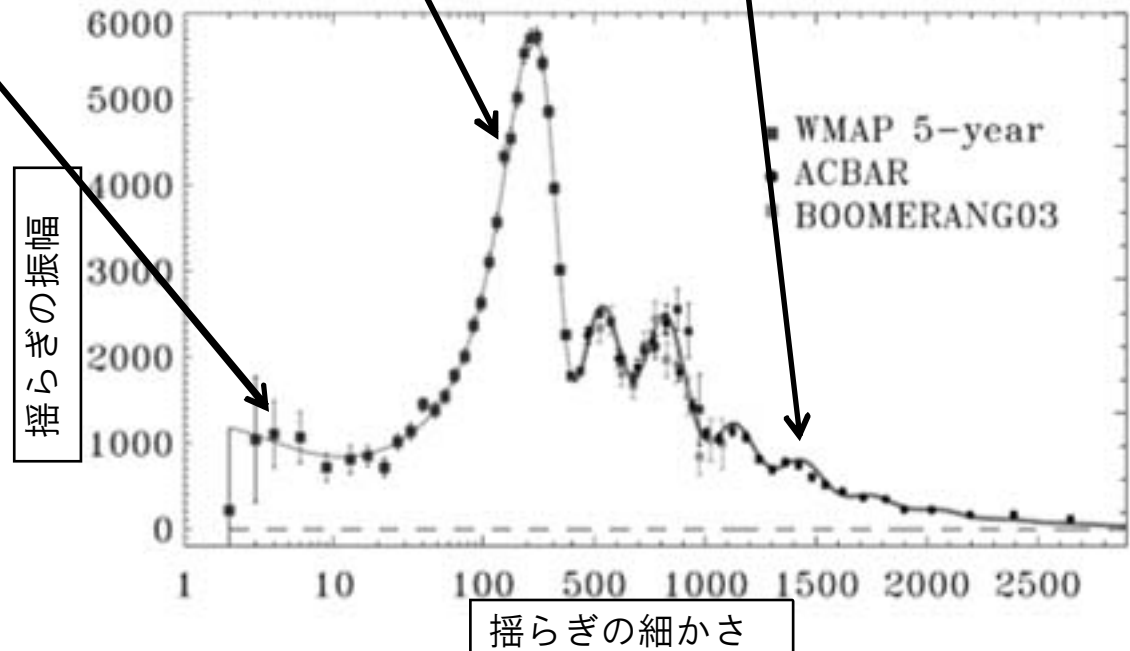
<https://nasa.gov/resources/imagetopics/>

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

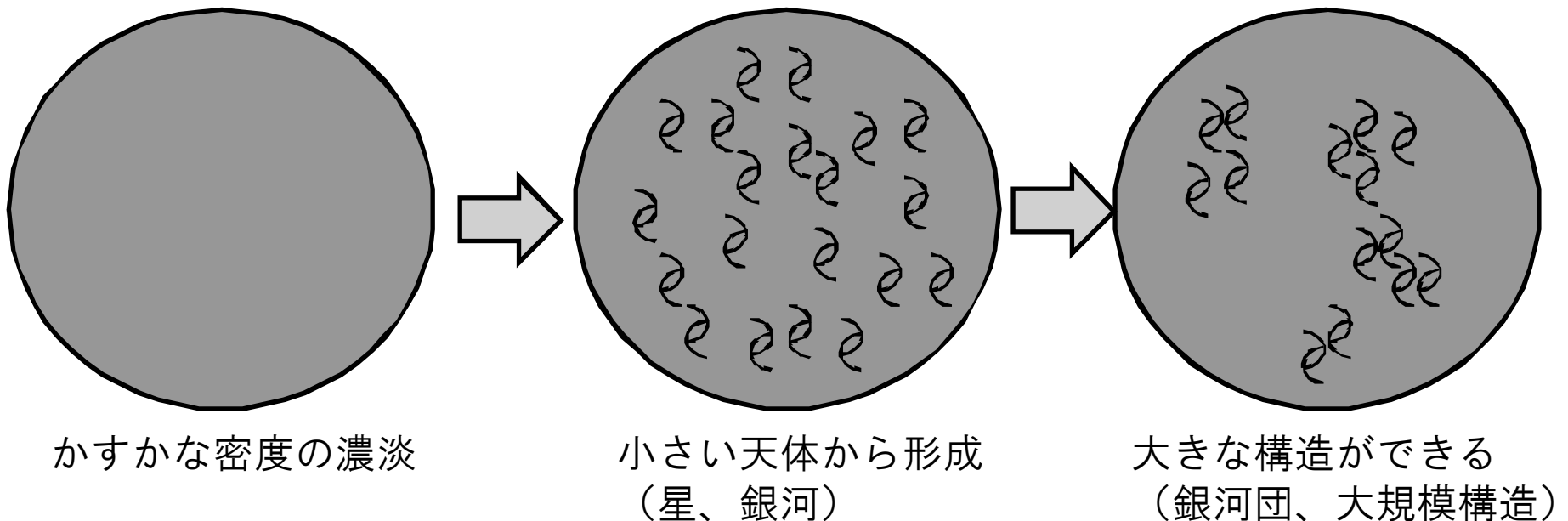


- 揺らぎの解析
 - 宇宙の物質の量
 - 宇宙膨張の様子

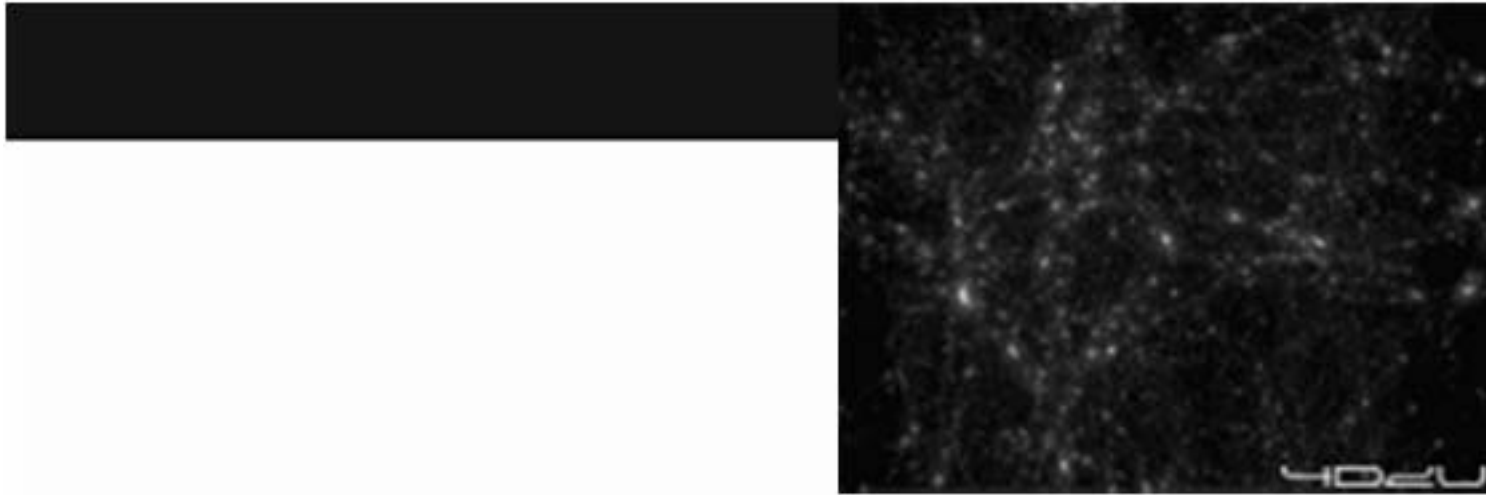


構造形成

- 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

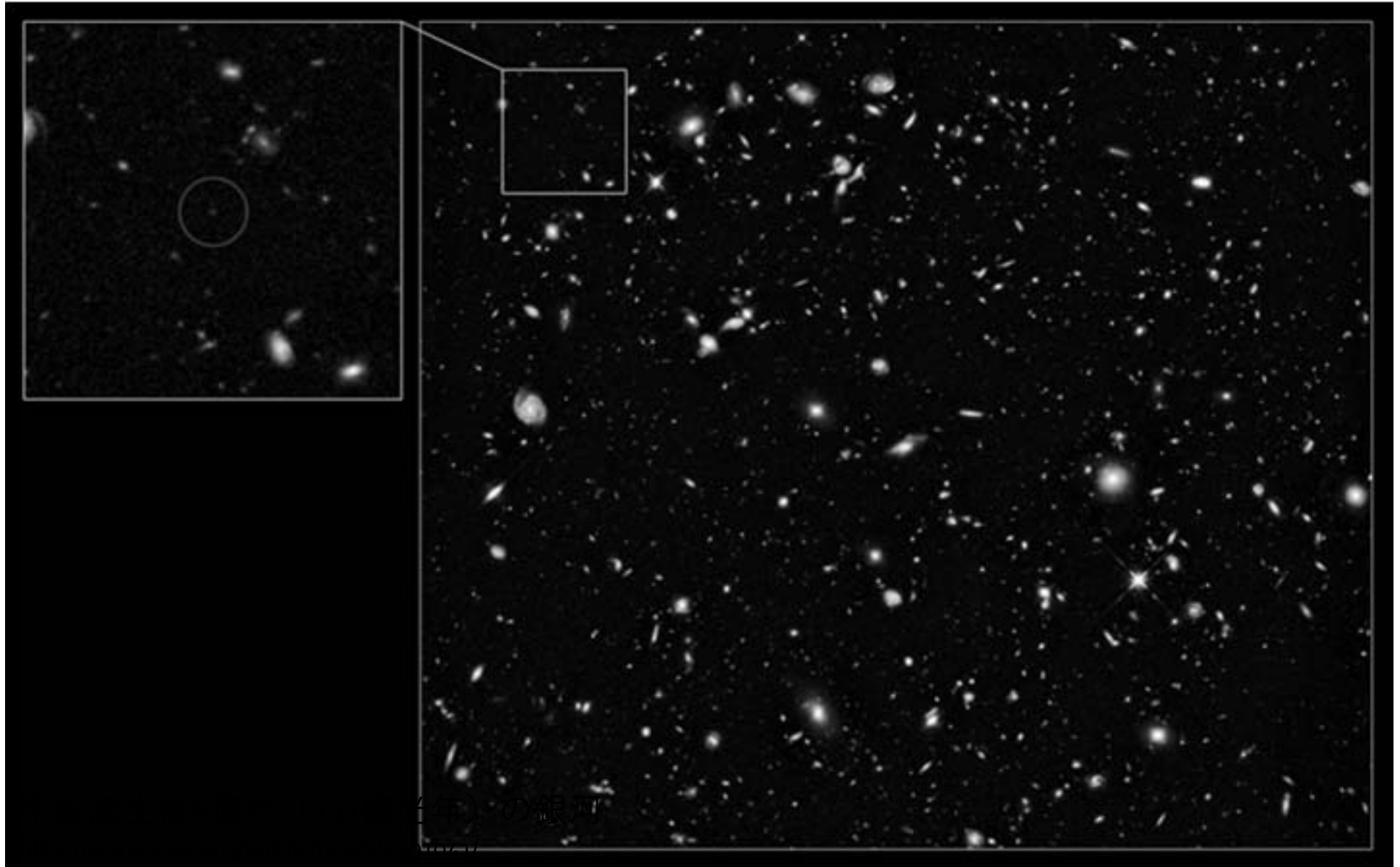


ダークマター：青 銀河：白
130億年の進化、1辺は3億光年

宇宙の歴史



最遠の銀河



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
- 「現代の天文学₄ 銀河I—銀河と宇宙の階層構造」、谷口義明ほか編、日本評論社
- 「現代宇宙論」、松原隆彦、東京大学出版会
- 「銀河系と銀河宇宙」、岡村定矩、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