

次世代スーパーコンピューティング シンポジウム2007

ペタコンが拓く新たな天文学 —ペタコンは天文実験室と成り得るか？—

国立天文台
水本好彦

2007年10月3日

天文学は自然科学か

- **自然科学の研究方法:**
 - 観測と実験、予測と検証
 - 実験科学: 観測と実験、理論予測の検証
 - 理論科学: 一般法則の定式化、法則からの予測
- **天文学の基本は観測と分類・説明**
 - **再観測不可**(時間的に変化する)
 - **実験不可**(太陽は作れない)
 - 観測天文学: ひたすら観測
 - 理論天文学: 現象を物理、化学、数学的に説明
現象モデルからの予測
 - **観測データは極めて重要、貯めておく**

計算機が開いた数値天文学

- 理論天文学から

- 頭で考える微積分方程式系
- 単純な解析解からの摂動計算

- 数値天文学へ

- コンピュータに計算させる差分方程式系
- どんなに複雑でも計算できる

天文学はコンピュータという実験室を得た

計算機の中に宇宙を作る

- 観測手法の変化: 写真乾板からデジカメへ
 - 観測データは数値情報として計算機が取得保存
 - コンピュータがデータ倉庫: GoogleSKY

→ 観測された宇宙: 数値宇宙(静的、受動的)

- 計算性能の向上: 筆算からスパコンへ
 - 計算機による実効的な数値シミュレーション
 - コンピュータが宇宙を作る:

→ 計算された宇宙: 数値宇宙実験室(能動的)

テーマ1: 計算機内に銀河を作る

テーマ2: その観測的利用

現代天文学の大テーマ

□□はどのようにして出来たのか

- 宇宙
- 宇宙の大構造
- 銀河系、銀河
- 太陽
- 太陽系と惑星、月
- 生命

宇宙に何があるか

- 地球型惑星
- 地球外生命
- 地球外文明(SETI)

ビッグバンと宇宙の進化

ビッグバン後:

- 宇宙は膨張し、温度が下がっていく

3分後:

- 軽元素の合成 (H, He, ...)
- まだ高温で、原子核と電子がバラバラに存在

30万年後:

(COBE, WMAPが見た世界)

- 陽子と電子が結合し水素原子となる

その後:

(いつだかわからない)

- 星、銀河などの構造が形成される

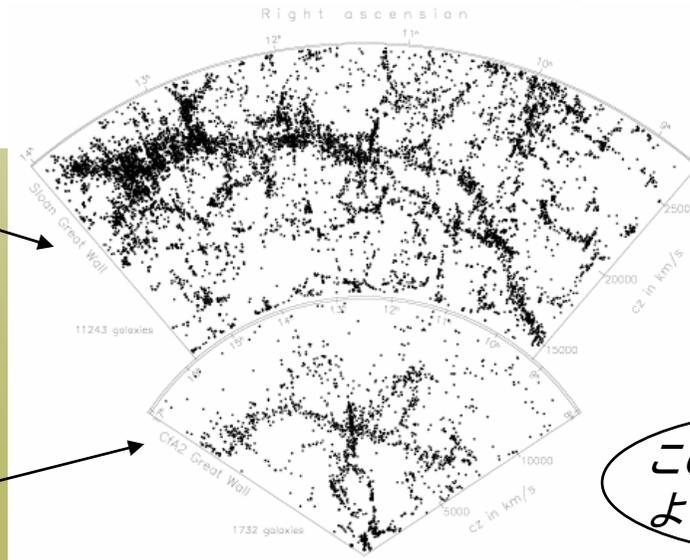
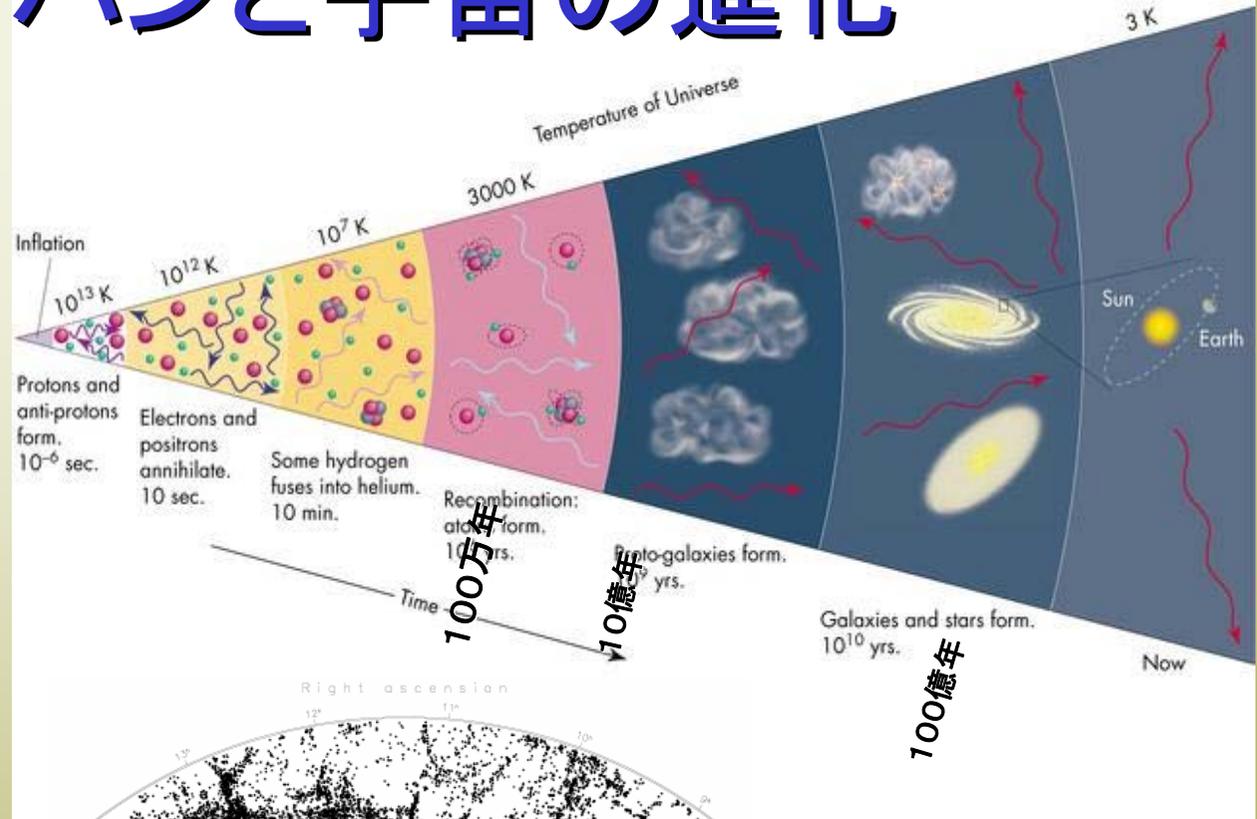
10億年後:

(すばる望遠鏡で見え始める)

- すでに銀河が存在

現在: 宇宙は137億年歳

- 銀河分布に大規模構造

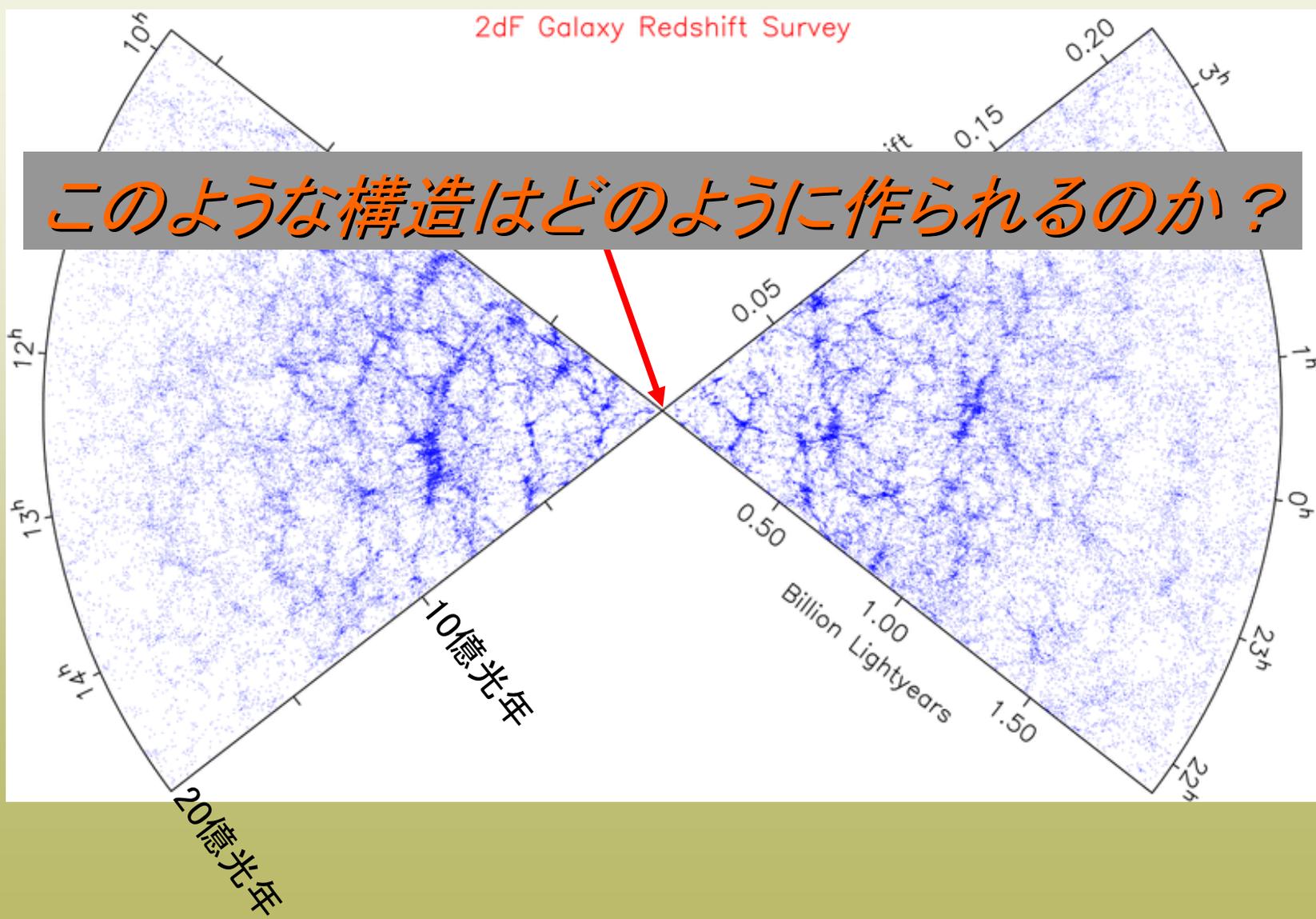


このような構造はどのように作られるのか?

今見える宇宙の姿

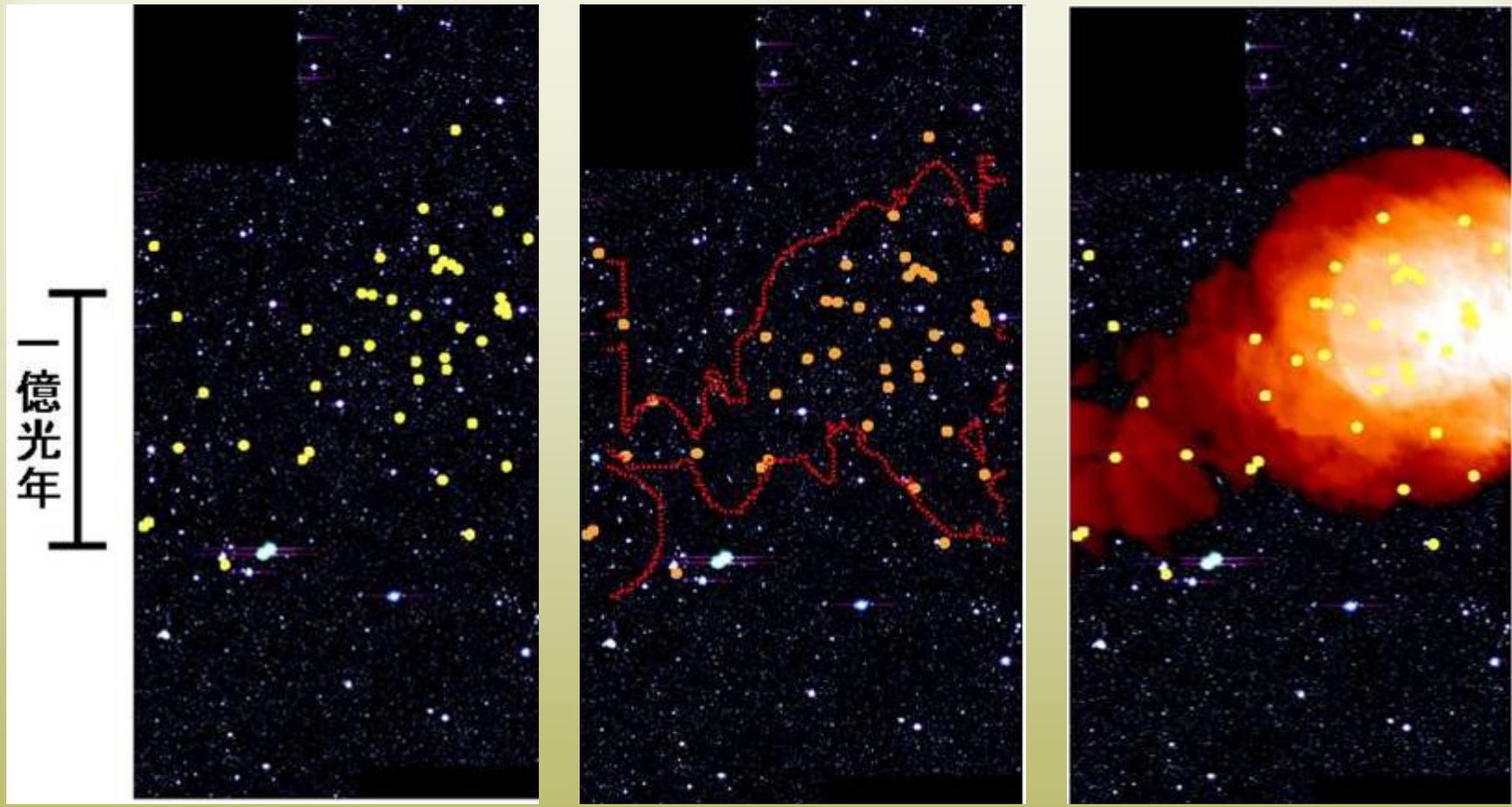
- 宇宙には銀河や銀河団、超銀河団などの構造がある
- 平均すれば似ているが、完全に一様ではない

銀河の空間分布 ～宇宙の大規模構造～



すばるの見た宇宙最古の構造

赤方偏移 = 4.9 (約 125 億光年) の43個の銀河



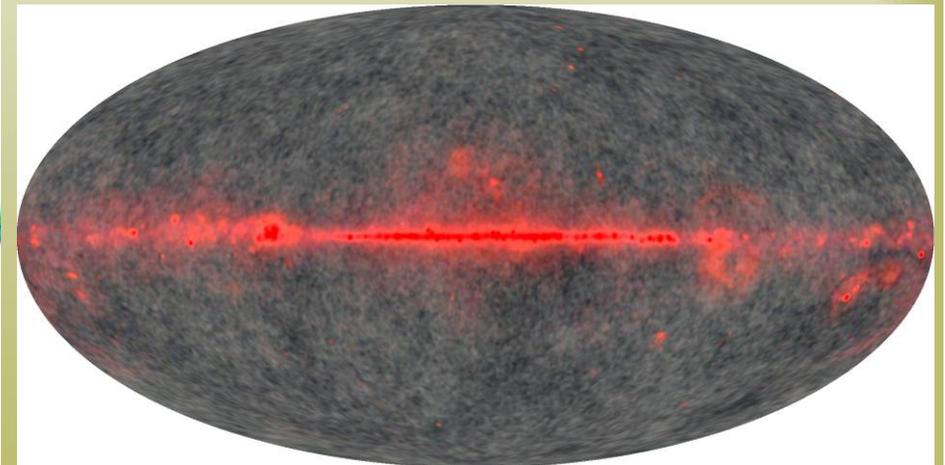
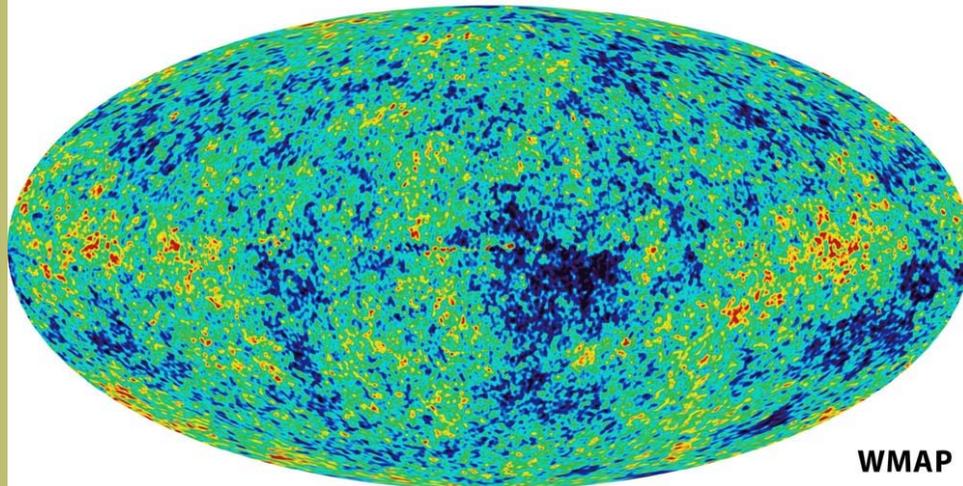
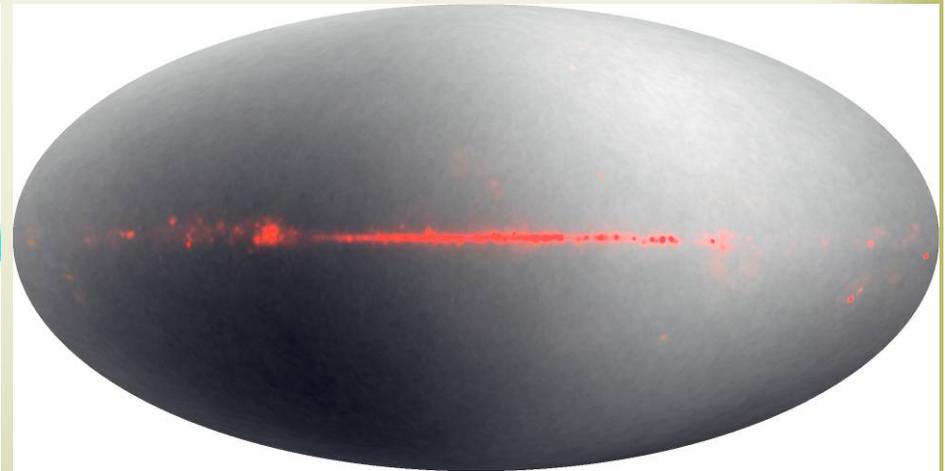
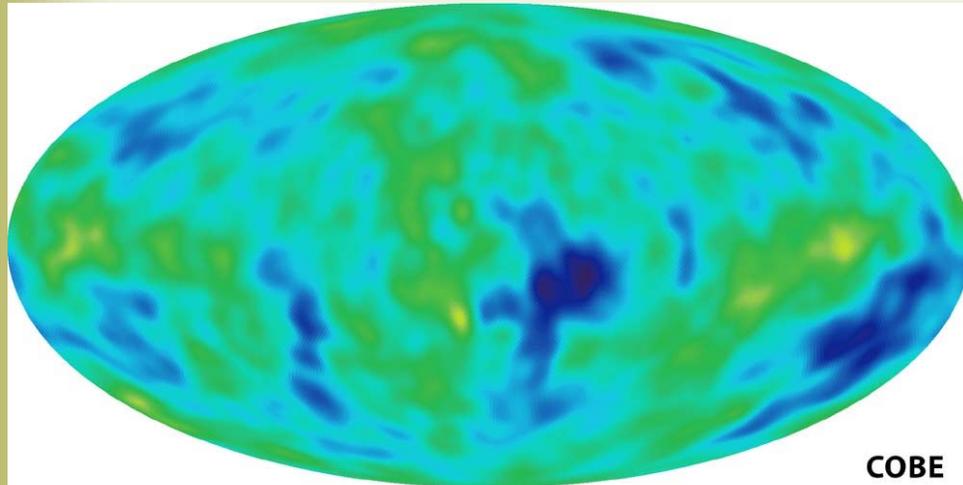
一億光年

黄点: 銀河位置

赤線: 銀河密度等高線

赤の濃淡: 銀河密度

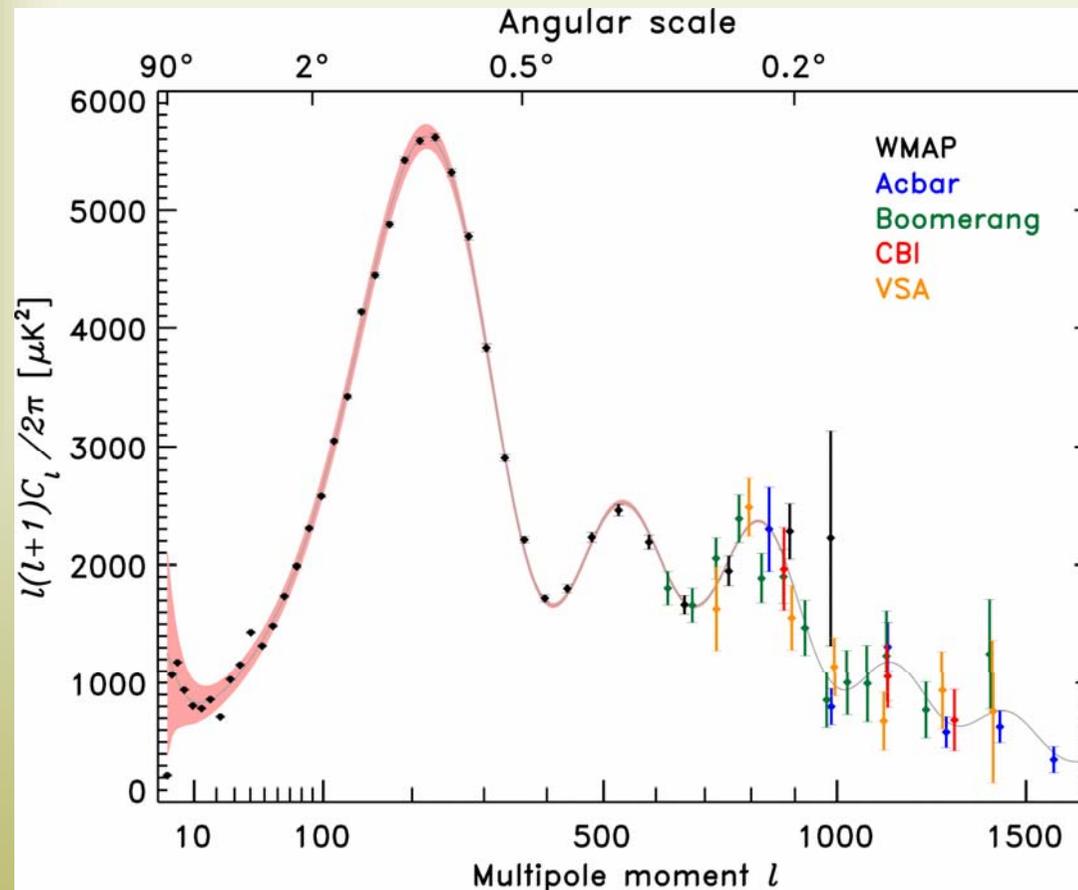
宇宙最古の光で見えた宇宙の姿



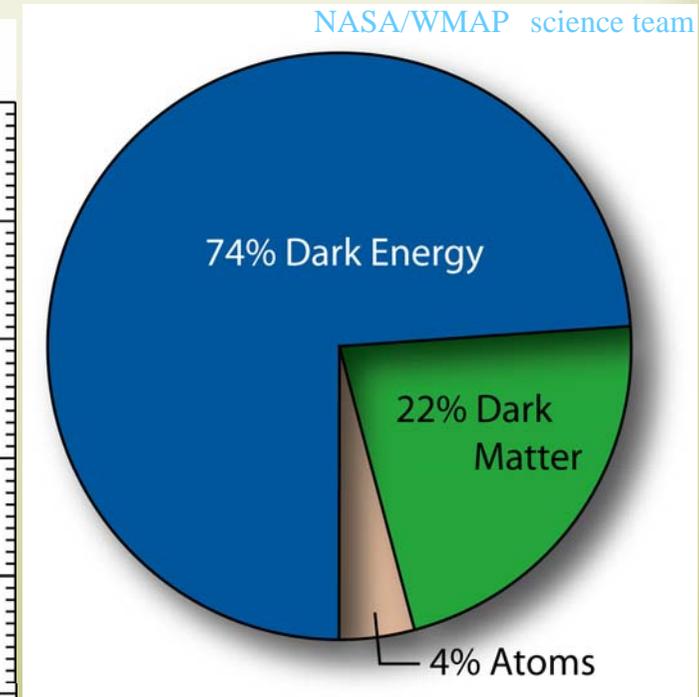
COBEとWMAPによる温度揺らぎの全天図(宇宙の2.7K背景放射)

http://map.gsfc.nasa.gov/m_ig/030628/

宇宙は見えない物質で満ちている



WMAPの温度揺らぎのパワースペクトル



バリオンと光子のエネルギー密度比

- 流体力学的効果
- バリオンの量が増えると音速が減少

物質と輻射のエネルギー密度比

- 重力による一般相対論的效果
- 輻射のエネルギーが大きいと物質揺らぎは成長できない

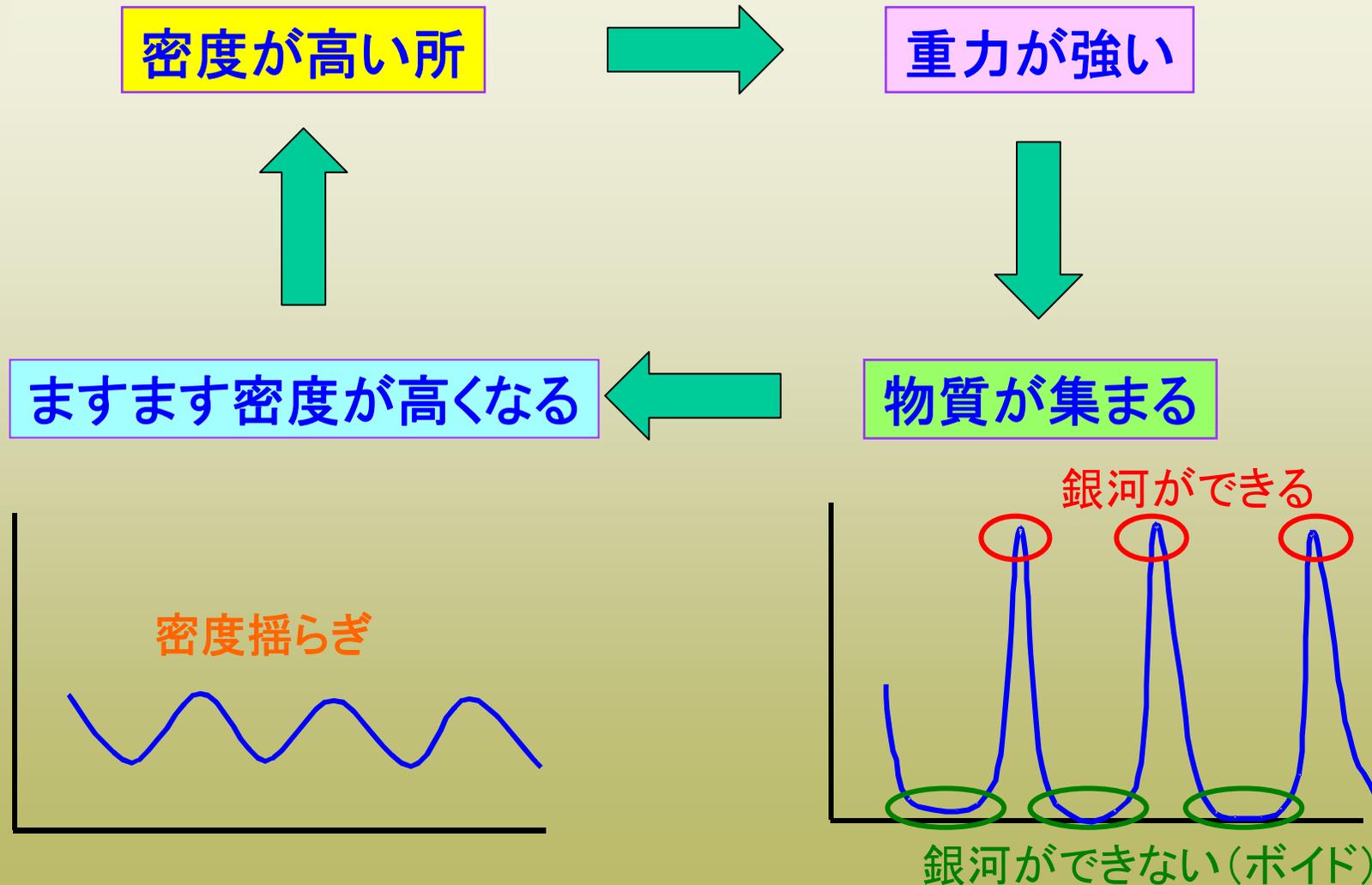
宇宙は見えない物質で満ちている

- 物質は(電磁相互作用で)光っている
 - ガンマ線、X線、紫外線、可視光、赤外線、電波…

宇宙は見えるものだけが全てではない！

- 光らない物質(暗黒物質)が存在する
 - 重力だけは感じる
 - その正体は不明

宇宙の大構造の形成シナリオ

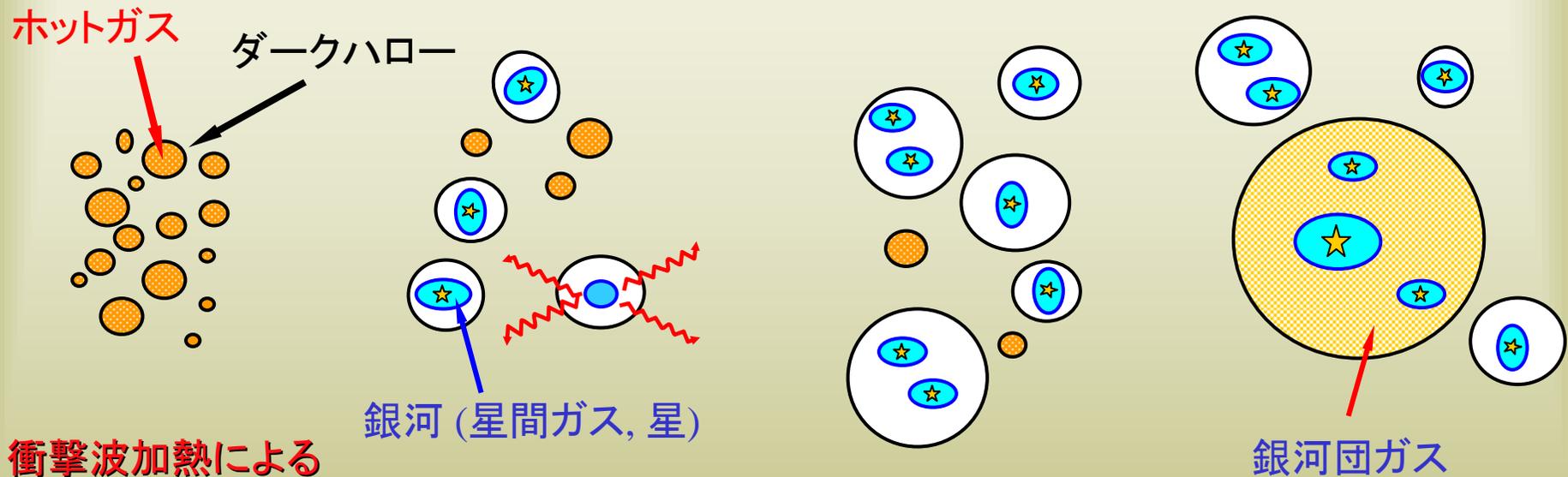


宇宙の進化の分岐点

- 宇宙開闢30万年の時代
 - 宇宙背景放射の温度揺らぎ 10^{-5}
- 現在(開闢137億年)
 - 銀河団分布など大きな密度揺らぎ
- 問題は
これらの大規模構造がいつできたのか
銀河と銀河団がどちらが先か

銀河形成のシナリオ

時間



衝撃波加熱による
ホットガスの形成

ホットガスの冷却・収縮
→ 星間ガスの形成
→ 星形成
→ 超新星爆発による
星間ガスの加熱

銀河同士の衝突合体
銀河の進化

銀河団の形成

銀河形成の観測と研究

- 階層的銀河形成シナリオの検証
 - より遠く, より広く, 宇宙を観測
 - 理論モデルと観測データの比較
 - 観測には限界あり(大きさ, 明るさ, 時間)
 - 理論研究では単純化(手抜き)が必要, 計算精度にも限界あり
 - 観測と比べうる理論モデルの構築
 - 銀河は多様な物理過程が複雑に絡み合う複雑系
 - ホットガスの冷却・収縮, 星間ガス形成, 超新星による星間ガスの加熱
 - 星形成, 星の種族合成, 銀河の衝突合体
 - 化学進化
 - 素過程がよく分かっていないものあり
 - 計算(実験)できなければ問題外
- ➔ 巨大な計算パワーと高速・高精度アルゴリズムが必須

テーマ1

計算機の中に銀河を作る 数値銀河カタログ

銀河を作る：数値銀河カタログ

● 宇宙のエネルギー(質量)

- 73%は暗黒エネルギー
- 23%は暗黒物質
- 通常物質(バリオン)は僅か4%

➤ 物質の分布を決めるもの

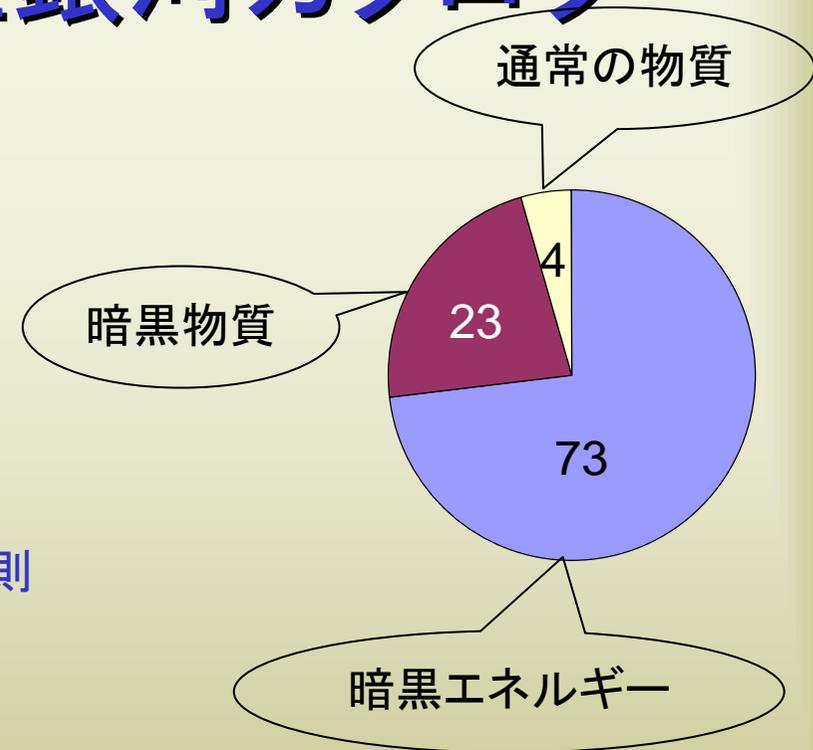
- 暗黒エネルギーで決まる宇宙の膨張則
- 暗黒物質が作り出す重力場

● 模擬銀河カタログ

➤ N体シミュレーション + 準解析的銀河形成(SA)モデル

- 暗黒物質の運動を自己重力多体計算で求める
- 暗黒物質の塊りがどのような合体を経て成長したかを求める
- 暗黒物質の塊りの中で通常物質でできた銀河がどのように成長するかをSAモデルから求める

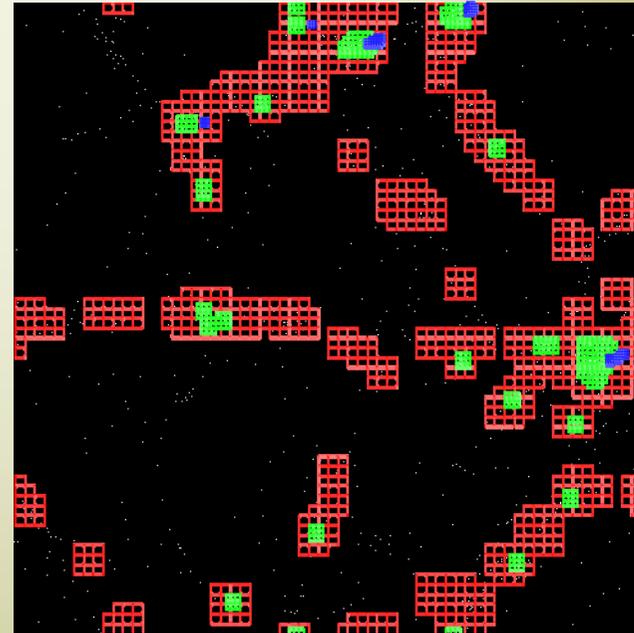
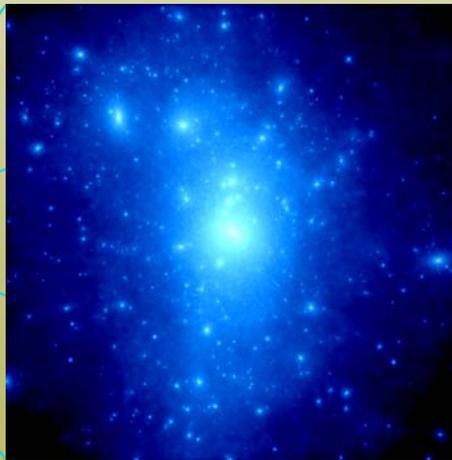
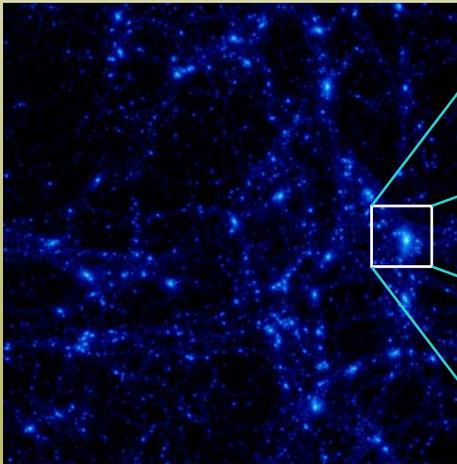
➤ 実際に観測して作られた銀河カタログと模擬銀河カタログは直接比較可能



大規模構造の形成シミュレーション

- 自己重力多体計算
 - 暗黒物質の宇宙における分布が、宇宙の膨張と共にどのように進化するかを調べる
- 計算手法：並列AMR 粒子-格子法
- 計算領域：100Mpc(約3億光年)立方
- 粒子数： 512^3 (約1.3億個)
- 計算時間：VPP5000/32PEで約18時間
 - 世界でも最大規模、最高精度の計算(2002)
- 数値銀河カタログ
 - 観測された銀河よりも遠方の若い銀河を含む

N体シミュレーション



AMR N体コード

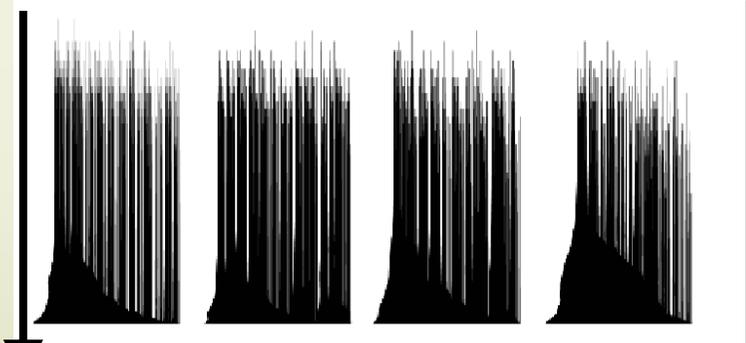


N体コード開発者
矢作 日出樹
国立天文台

準解析的銀河形成(SA)モデル

● 合体系譜

- 各時刻のN体データから粒子の塊り(ハロー)を抽出
- ハローを前の時刻のハローと同定する



時間

SAモデル開発者
長島 雅裕
長崎大学

● SAモデル

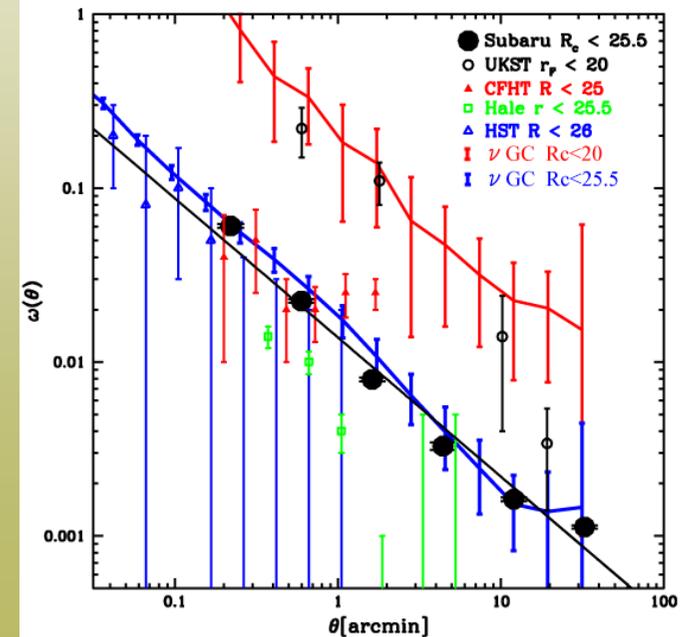
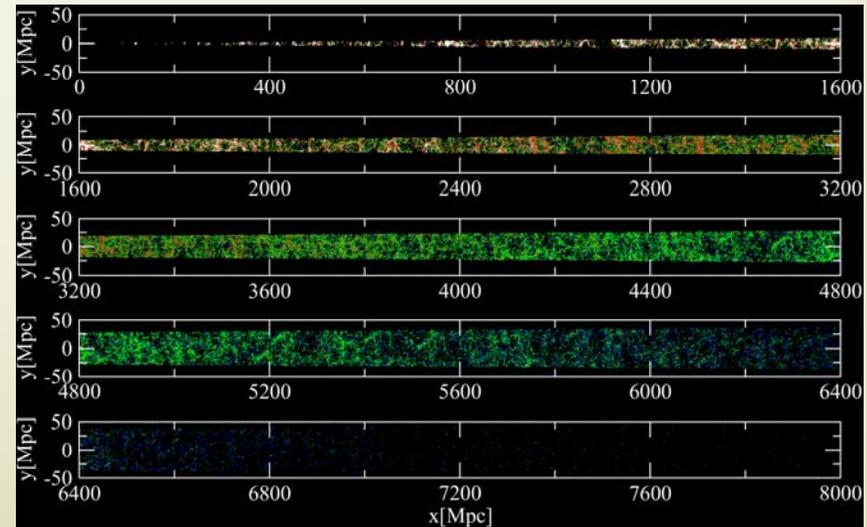
- 暗黒物質のハローの中の普通の物質の進化を計算
 - 星、冷たいガス、熱いガスに分ける
 - 放射冷却(熱いガス→冷たいガス)、星形成(冷たいガス→星)、超新星爆発による過熱(星、冷たいガス→熱いガス)
 - ハロー同士が合体した後、小さい方のハローの中の銀河は力学摩擦時間で合体
- 一回あたりの計算時間
 - Pentium D/3GHz で10時間程度

観測データとの比較

● 模擬深宇宙探査

- カタログデータを奥行き方向に並べる
- 銀河の角度二体相関関数を計算

- 銀河の天球上での集まり具合を定量化
- 青線(数値銀河カタログ)
- 黒丸(すばる望遠鏡による観測)
- 両者はよく一致する



現在の数値銀河カタログの限界

- 物質の分布は暗黒物質が決めるものとして、重力多体計算で求めている
- 矮小銀河およびそれより小さい天体では、超新星爆発による影響で、通常の物質の運動も重要になってくる



矮小銀河:六分儀座A



爆発的星形成銀河:M82

次世代数値銀河カタログ

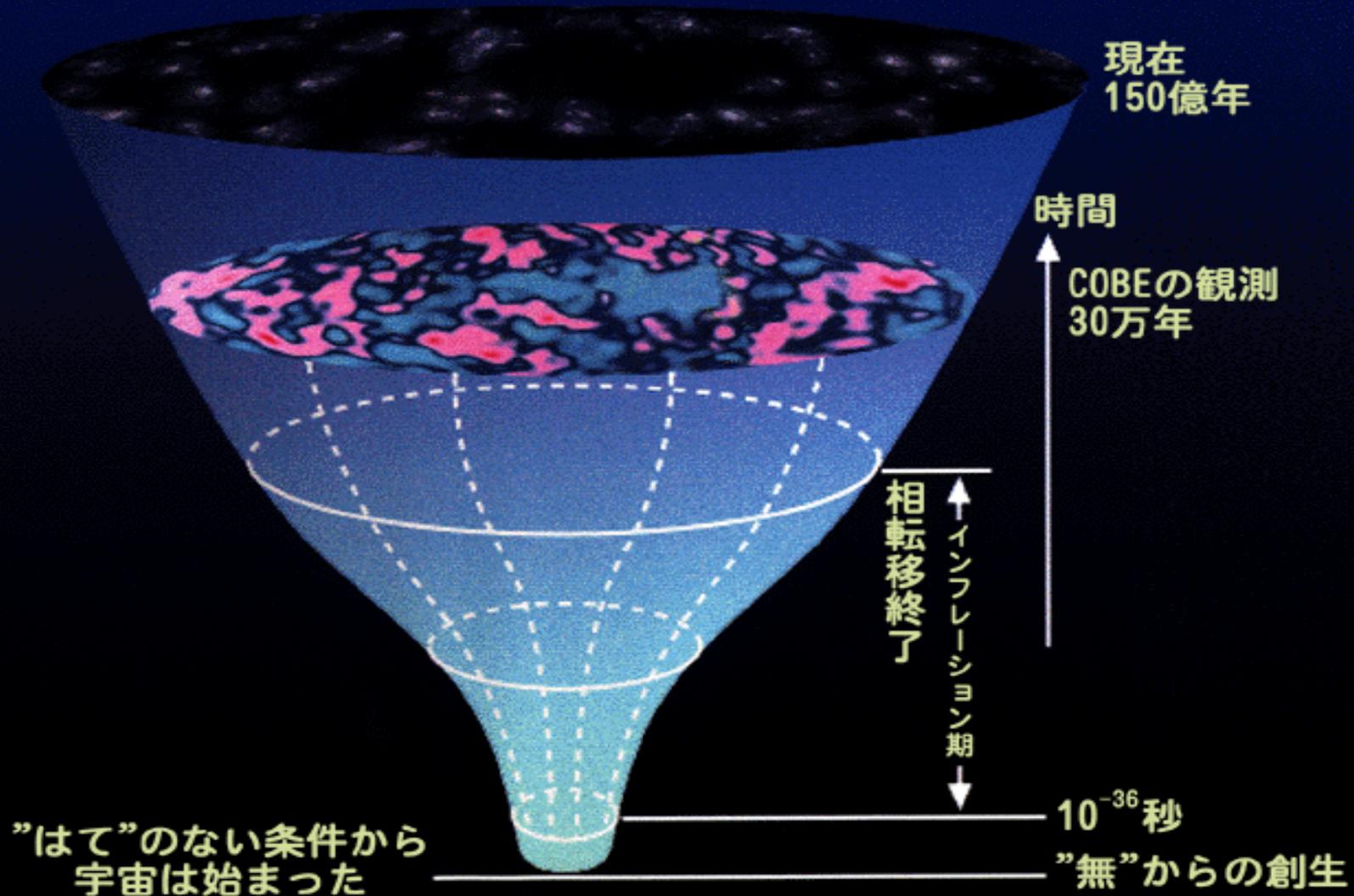
- 数値銀河カタログの分解能が矮小銀河に到達する
 - 約300万光年立方の領域に 4096^3 粒子
 - 小さい矮小銀河でも1000粒子程度
 - 粒子数 8^3 で、**計算規模で5百倍**
- 通常物質を理想流体として重力多体コードに取込む
 - SAモデルをサブグリッドモデルとして取り込むことにより、銀河の形成をシミュレーションで直接計算
- 銀河の形態やガスの分布まで含めたカタログになる

テーマ 2

観測された数値宇宙の中に
初期宇宙の痕跡を探す

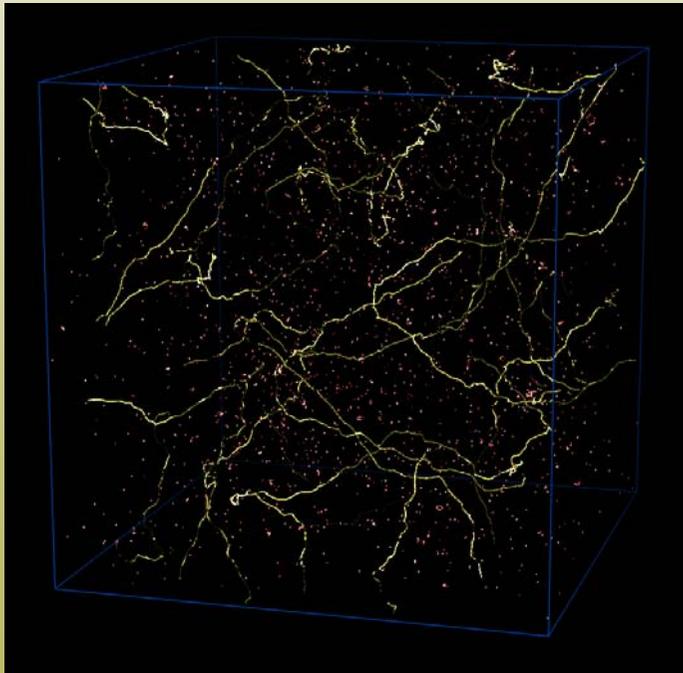
宇宙の進化の歴史

宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。



宇宙紐: コスミック・ストリングとは？

- 相転移の際に生じた相欠陥
- 超高密度天体として広く分布。10km→地球質量
- 分裂・崩壊により高エネルギー粒子を生成
- 10^{16} GeV→加速器では到達不可能



コスミック・ストリング の発達シミュレーション

http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cs_evol.html

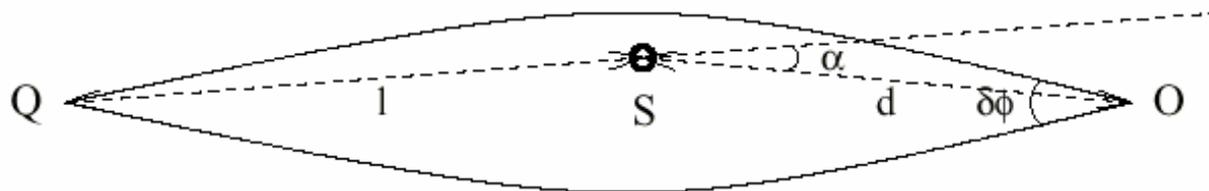
- 最高エネルギー宇宙線の起源
- 素粒子論の観測的検証
- 初期宇宙を探る

Cosmic Stringによる重力レンズ効果

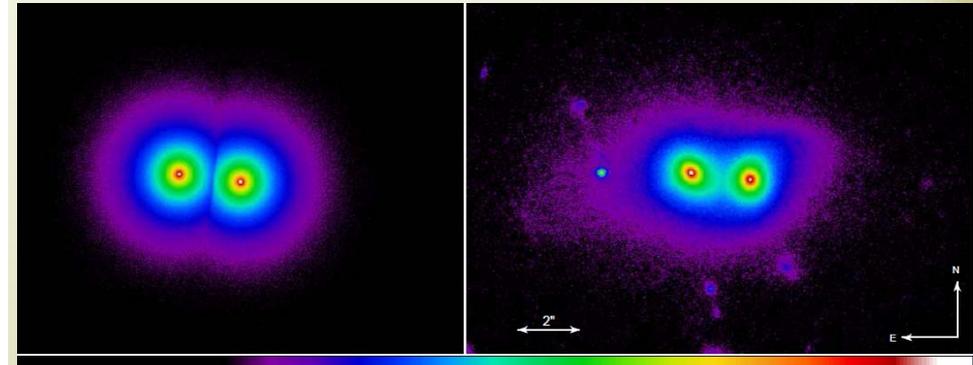
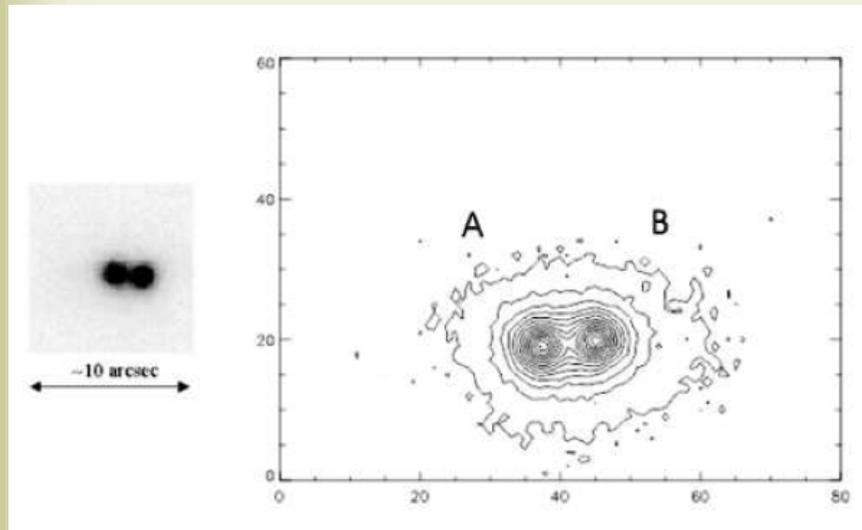
観測者が観測する2つの像の離角

$$\delta\phi = 2l(d+l)^{-1}\delta \sin\theta$$

$$\delta = 4\pi G\mu \approx 5 \left(\frac{G\mu}{1.5 \times 10^{-6}} \right) \text{arcsec}$$



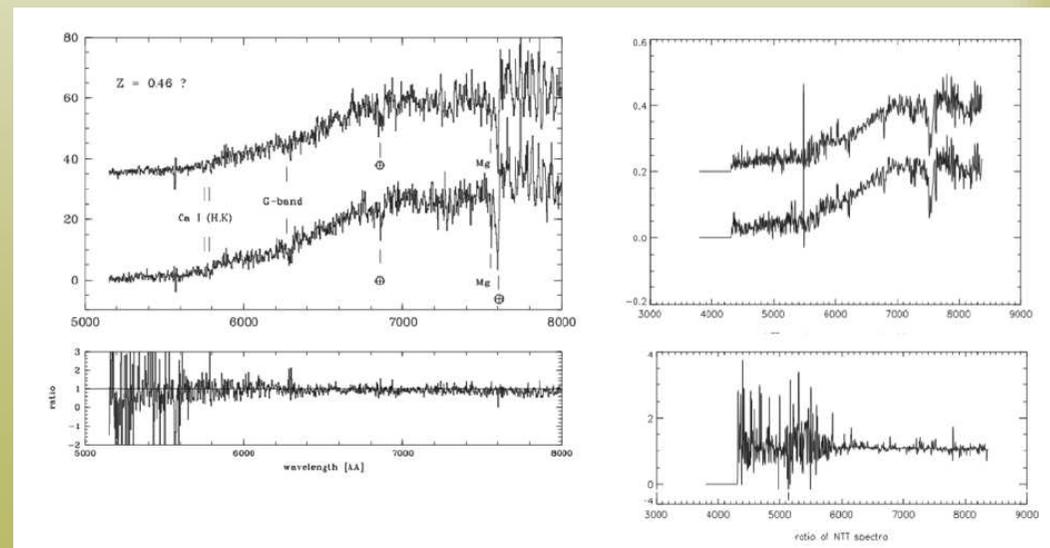
The Capodimonte-Sternberg-Lens candidate no. 1



シミュレーション

HST画像

- 2003 唯一の候補発表
Cosmic String による重力レンズ候補
サーベイ観測で偶然発見
- 2006.1 HSTによる観測で否定
相互作用している巨大楕円銀河



これまでの観測結果

- マイクロ波背景放射の異方性
 - COBE、BOOMERanG、MAXIMA、WMAP
- 重力レンズによる2重像探し
 - 二重像の離角は $5''$ (@GUT $\sim 10^{16}\text{GeV}$)
 - 増光、歪なし
- これまでに有力候補なし

深くて広域なサーベイにより

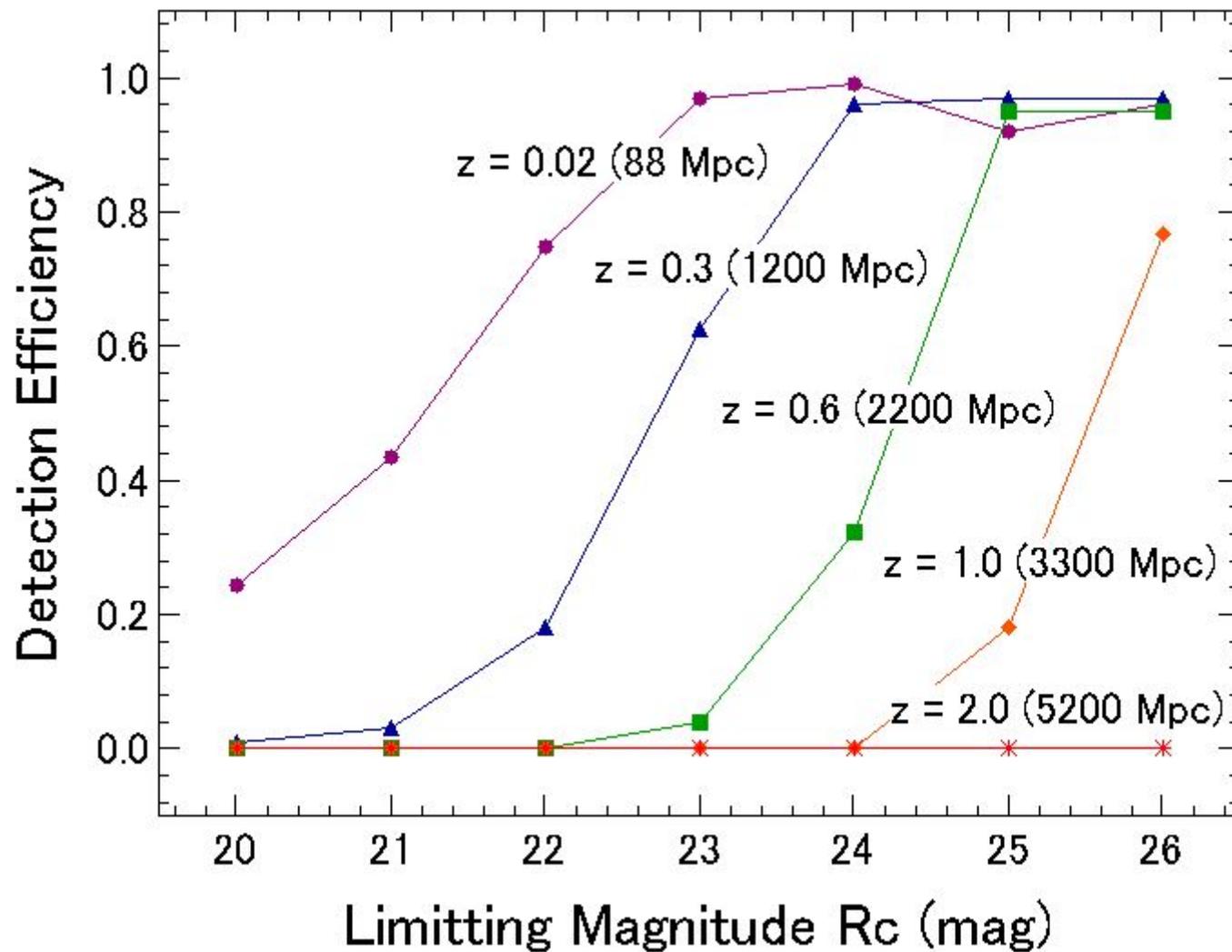
コスミックストリングが発見できるはず

すばる望遠鏡のアーカイブデータ

Simulation による検出確率の評価

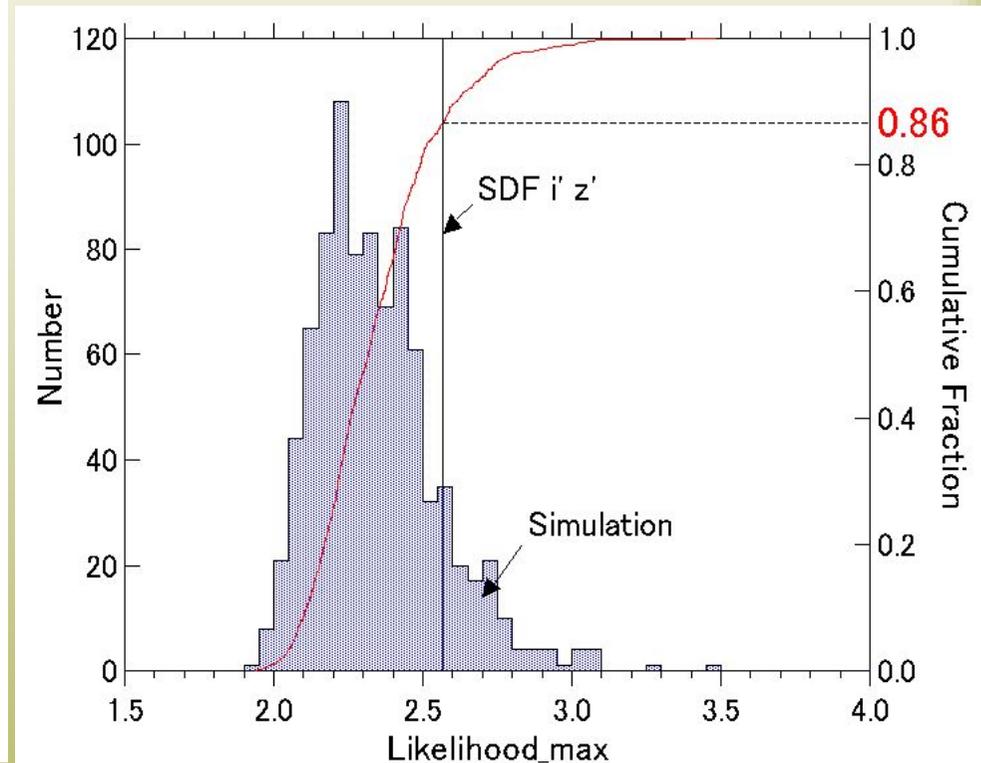
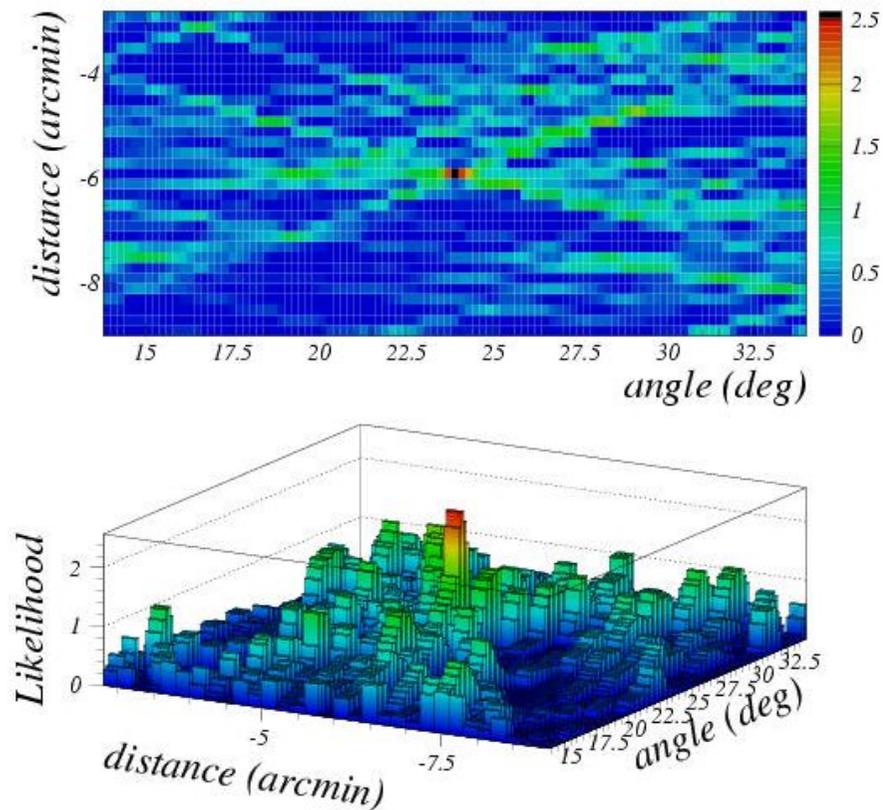
- 銀河分布
 - ✓ 数値銀河カタログ 40分角四方の視野x100セット
 - ✓ 銀河までの距離 (D_g)、見かけの等級 (M)
- 観測条件 (視野内にある場合)
 - ✓ コスミック・ストリングの位置 ($r_\theta \varphi_\theta$)
 - ✓ コスミック・ストリングまでの距離 (D_s)
 - ✓ 限界等級 M_l
- コスミックストリングの分布 (視野内にある確率を求める場合)
 - ✓ 一様・等方分布、全長 $30 \times$ 宇宙半径
- 2重像の計算
 - ✓ 分離角 = $8\pi\mu_s \sin(\theta) (D_g - D_s) / D_g$, $\mu_s \sin(\theta) = 10^{-6}$
 - ✓ Magnification Factor = 1
 - ✓ 2重像は同じ明るさ
 - ✓ 位置精度は $\sigma = 1$ pix

検出効率



SDF i' , z' band 解析

コスミック・ストリング的二重像候補は
1657組中10組



Likelihood_max = 2.57 \rightarrow **Chance Probability 14 %**

ペタコンが拓く宇宙

- **ペタコンを使って次世代数値銀河カタログを作ろう**
 - 銀河の形態やガスの分布まで含めたカタログになる
次世代30m光赤外望遠鏡での観測結果と詳細な比較可能
電波、サブミリ波、X線による観測結果との比較が期待
- **新たなシミュレーションコードの開発が必須**
 - 並列計算アルゴリズムの改良: AMR 粒子-格子法
 - モデルの改良: 物理過程のより正確な取扱い
- **望遠鏡による暗黒物質の観測手法の立案に必須**
 - 宇宙紐が見つかるか
 - ダークエネルギーが計れるか

数値宇宙実験室のペタコンと数値宇宙は共進化

すばる / XMM-ニュートン・ ディープサーベイ(SXDS)



SXDS

可視画像

すばる



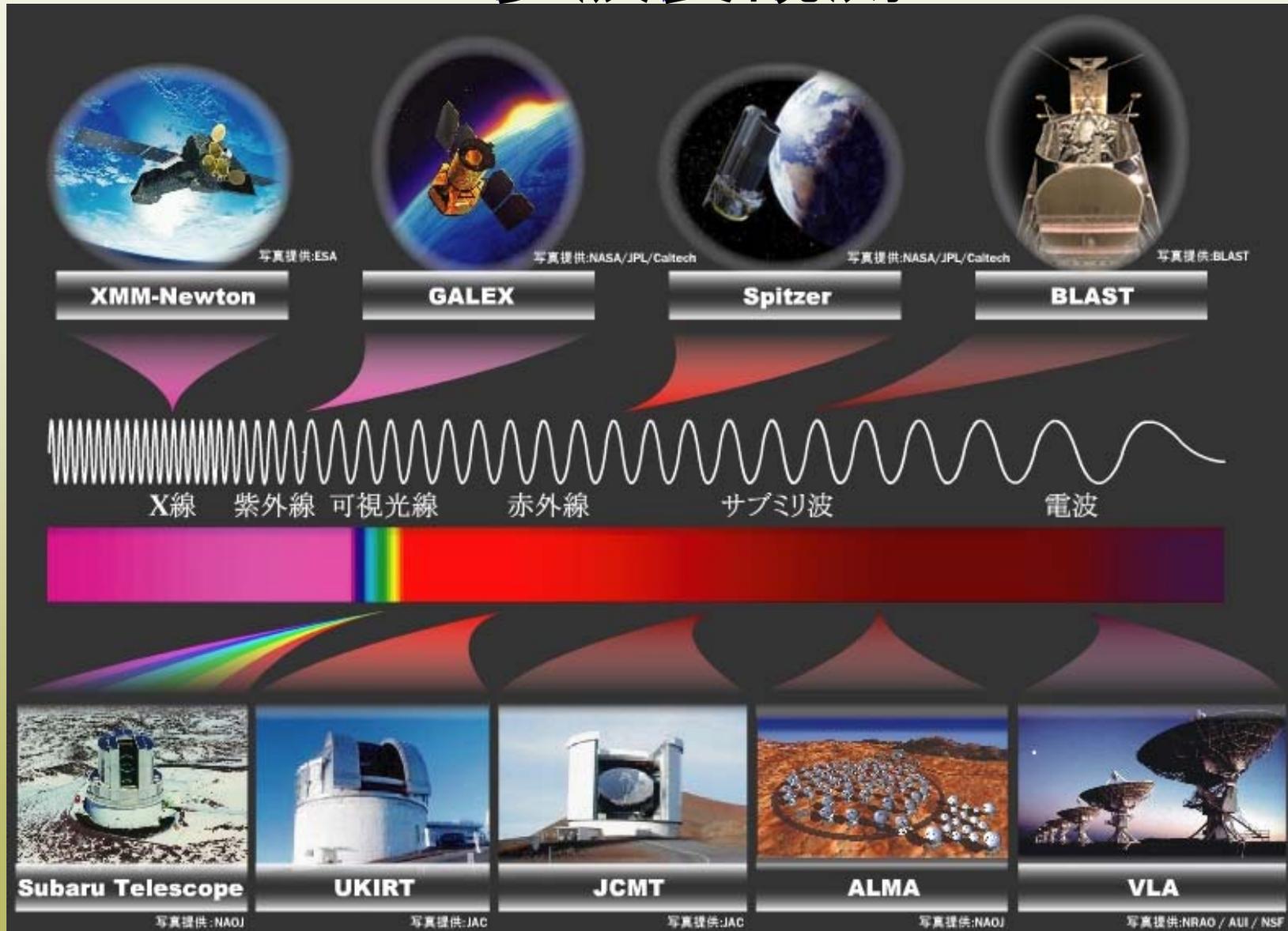








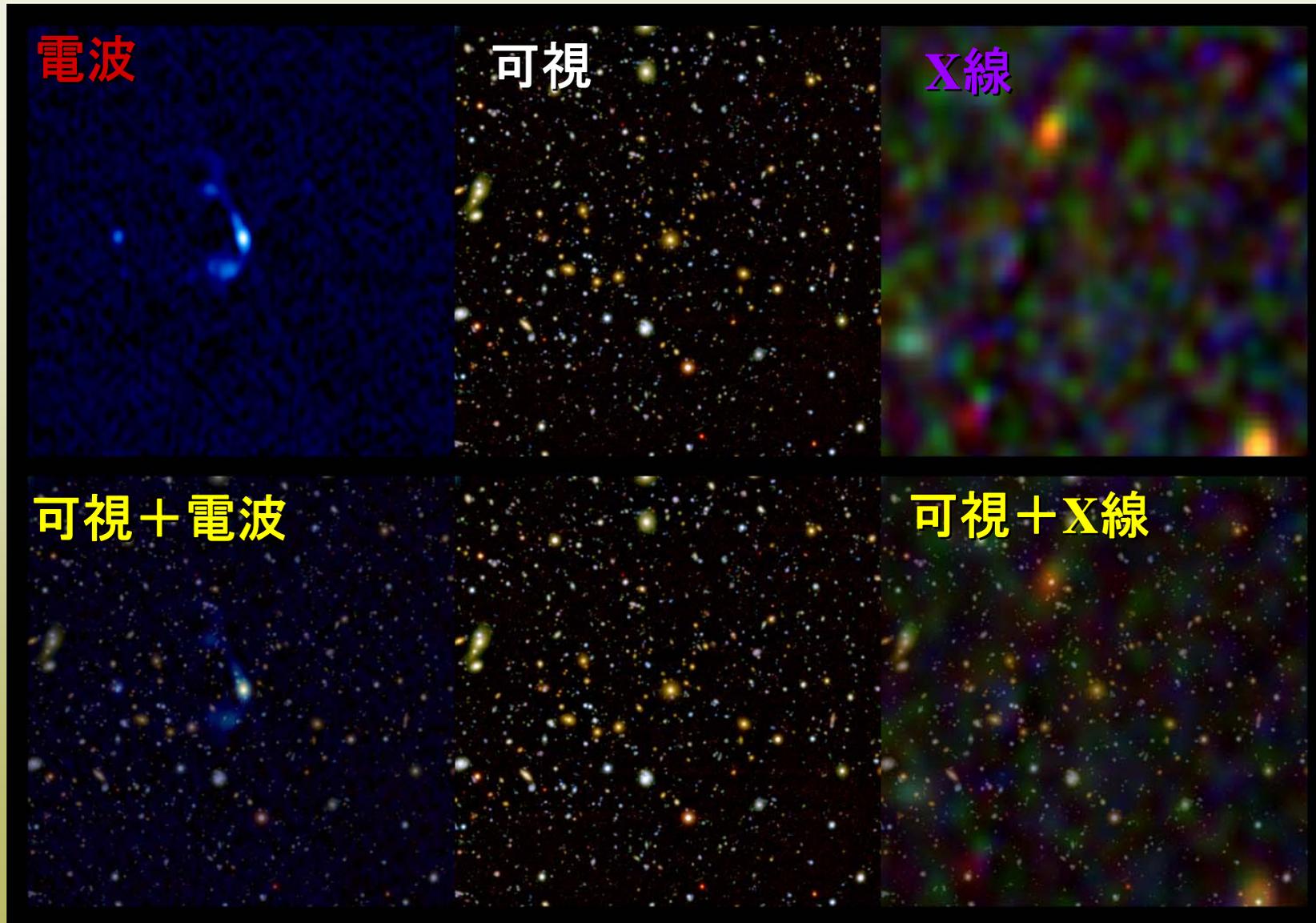
すばる/XMM-Newtonサーベイ領域 の多波長観測



なぜ多波長観測が必要か

- 波長ごとに異なった情報をもたらす
 - X線、ガンマ線
 - ・ ブラックホールや超新星残骸、高温ガス、中性子星などの高エネルギー現象
 - 紫外線
 - ・ 高温の星やクエーサーなど
 - 可視光
 - ・ 太陽のような星や惑星、星雲、銀河
 - 赤外線
 - ・ 冷たい星、星の誕生領域、星間のガスやチリ、遠方の銀河の星からの赤方偏移した可視光
 - 電波
 - ・ クエーサー、冷たい分子雲、星間ガス、背景輻射

電波・可視光・X線で見た銀河 (SXDF021823.6-052501)

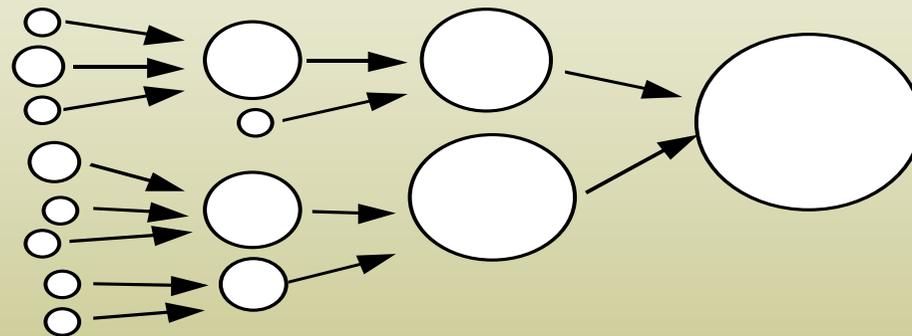


ボトムアップ と ダウンサイジング

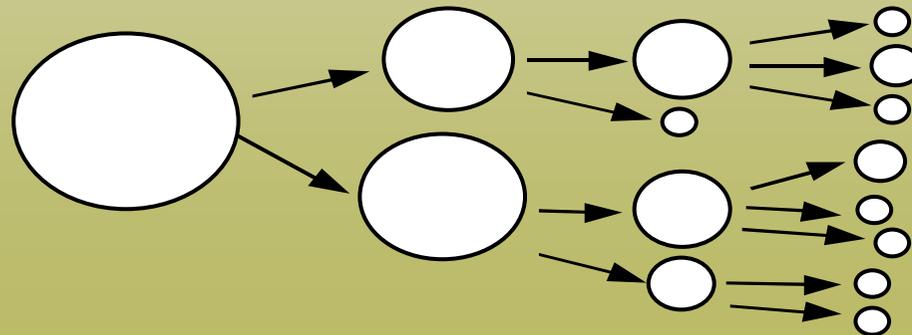
● 密度揺らぎの成長のパターン

➤ どのスケールの揺らぎが初めにできるか

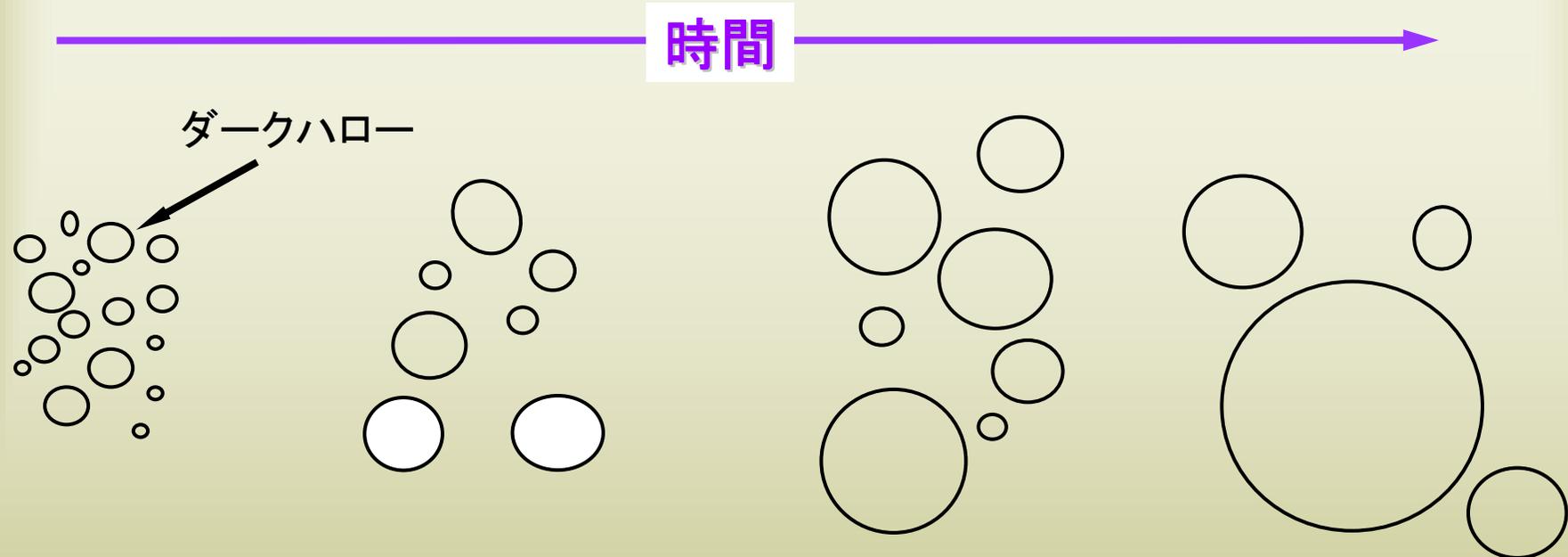
小さいスケール → 大きなスケールへ (ボトムアップ)



大きいスケール → 小さなスケールへ (ダウンサイジング)



暗黒物質の階層構造形成シナリオ

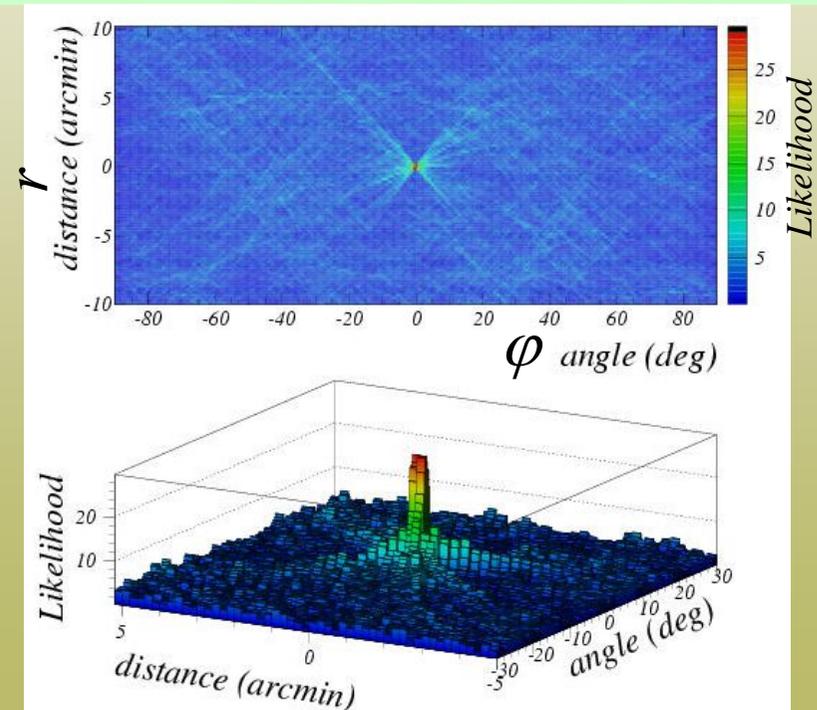
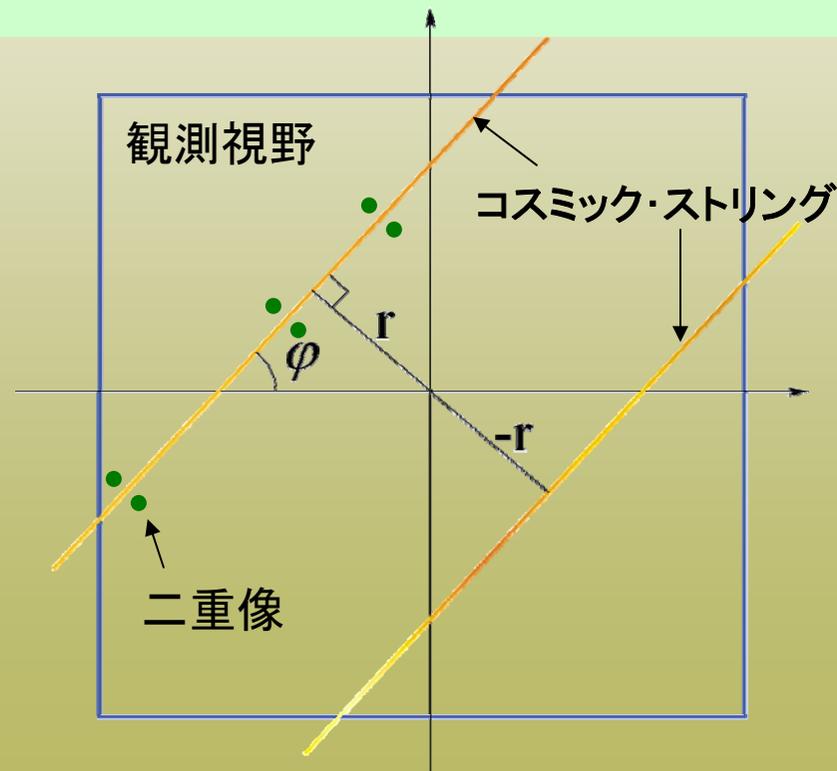


- 暗黒物質が重力で集まる → ダークハロー
- ダークハローが衝突合体を繰り返し成長
- 光る物質はダークハロー中に集まり銀河となる

コスミック・ストリングの探査方法

同じ方向に分離し、直線状に並んだ2重像を探す

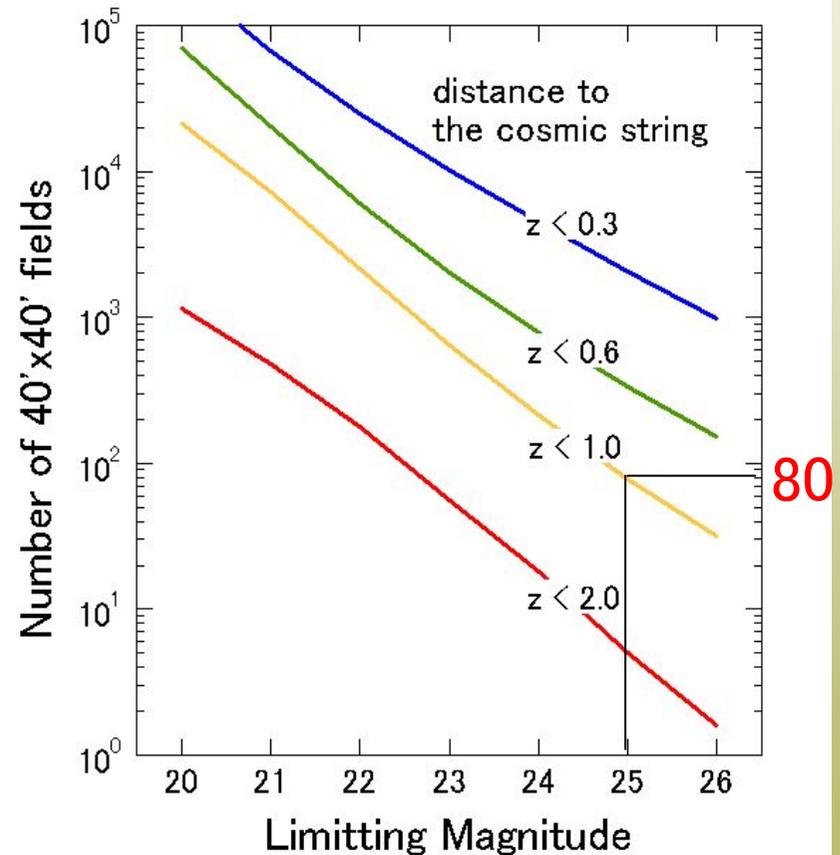
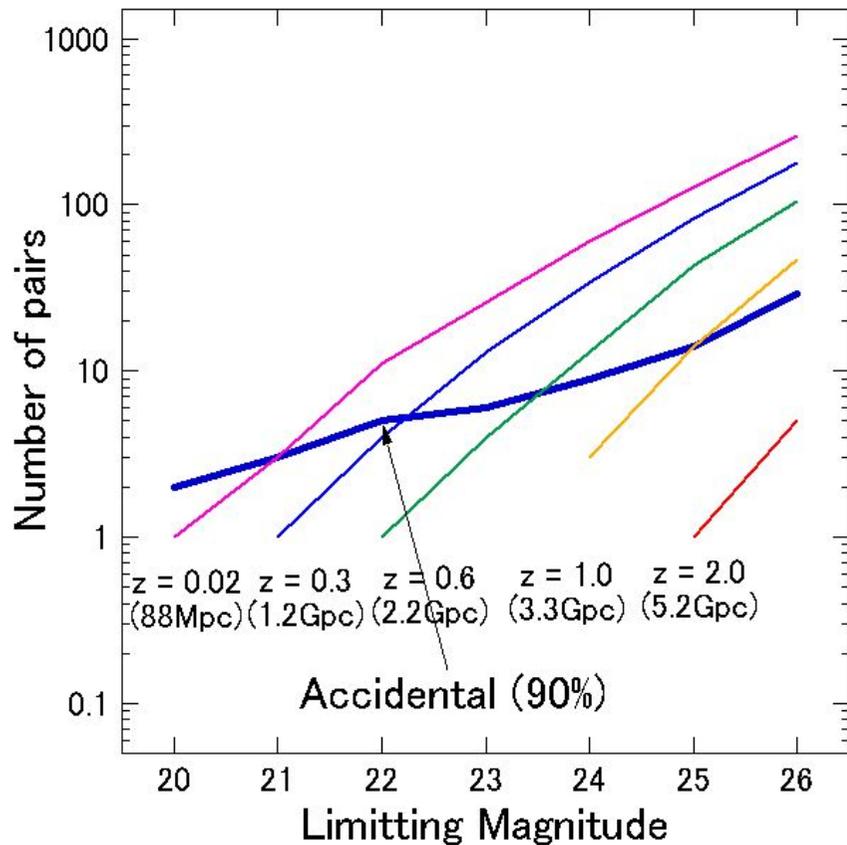
- | | |
|-------------------|--|
| 1. ペア天体抽出 | 離角 $< 6''$, 明るさの差 $< 0.1 \text{ mag}$ |
| 2. スtringの配置 | ペア毎に $(r, \varphi)_i$ を決定 |
| 3. 位置精度 | 誤差分布 $P_i(r, \varphi)$ を計算 |
| 4. Likelihood の計算 | $\sum P_i(r, \varphi)$ (全てのペアの和) |



検出に必要な感度・視野数

視野内で検出される
 コスミックストリングによる二重像

コスミックストリング検出に
 必要な平均視野数



検出されるペア天体の数

- 40分角視野内で検出されるCS的ペア天体
- 銀河分布は数値銀河カタログより
- コスミックストリングによる Optical Depth
 - Andrew A. de Laix、Phys Rev D56 (1997)

