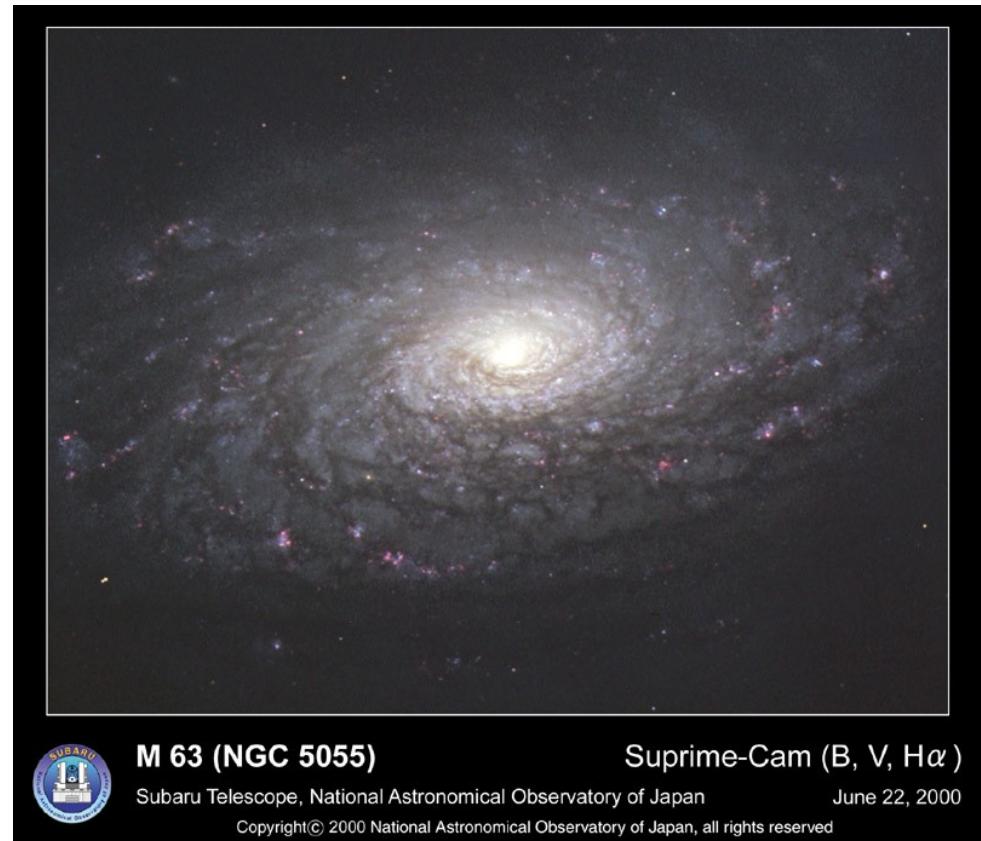


第5回最新の天文学の普及をめざすワークショップ

銀河進化の理論

長島雅裕(長崎大学教育学部)

1. 銀河とは何だろうか
 - その多様性と規則性
2. 我々の銀河系
3. 登場人物と役割
 - 星、ガス、ダークマター
4. 脚本(シナリオ)を探る
5. 銀河の内部
6. まとめ



M 63 (NGC 5055)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

June 22, 2000

Copyright© 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

天の川

夏の「天の川」
…星の集まり

天の川=「銀河系」(我々の銀河)

1年を通じて撮影した
天の川をつなげた「パノラマ写真」



銀河とはどのようなものか

M31, M32, M110 (アンドロメダ大銀河と伴銀河)



1997年 9月10日, 21時26分 (JST)

焦点距離300mm望遠レンズ（タムロン300mm F2.8 LD／絞り開放），冷却CCDカメラ（MUTOH CV-16）
露出時間：赤2分×4，緑4分×4，青2分×4，フィルタ：R-60, G-533, B-460, 3色分解撮像カラー合成画像
画像範囲：2.58×1.70°，観測場所：乗鞍コロナ観測所

H. Fukushima 国立天文台 広報普及室

←アンドロメダ銀河
(代表的な渦巻銀河)

天の川 と 夏の大三角

1997年 9月10日, 21時18分 (JST)



35mm判一眼レフ用魚眼レンズ（Nikon f=8mm, F2.8／絞り開放），冷却CCDカメラ（MUTOH CV-16）
露出時間：赤2分×3，緑4分×4，青2分×4，フィルタ：R-60, G-533, B-460, 3色分解撮像カラー合成画像
画像範囲：対角64°，観測場所：乗鞍コロナ観測所

H. Fukushima, M. Ishiguro and J. James 国立天文台 広報普及室

我々の銀河系(内側から見ている)

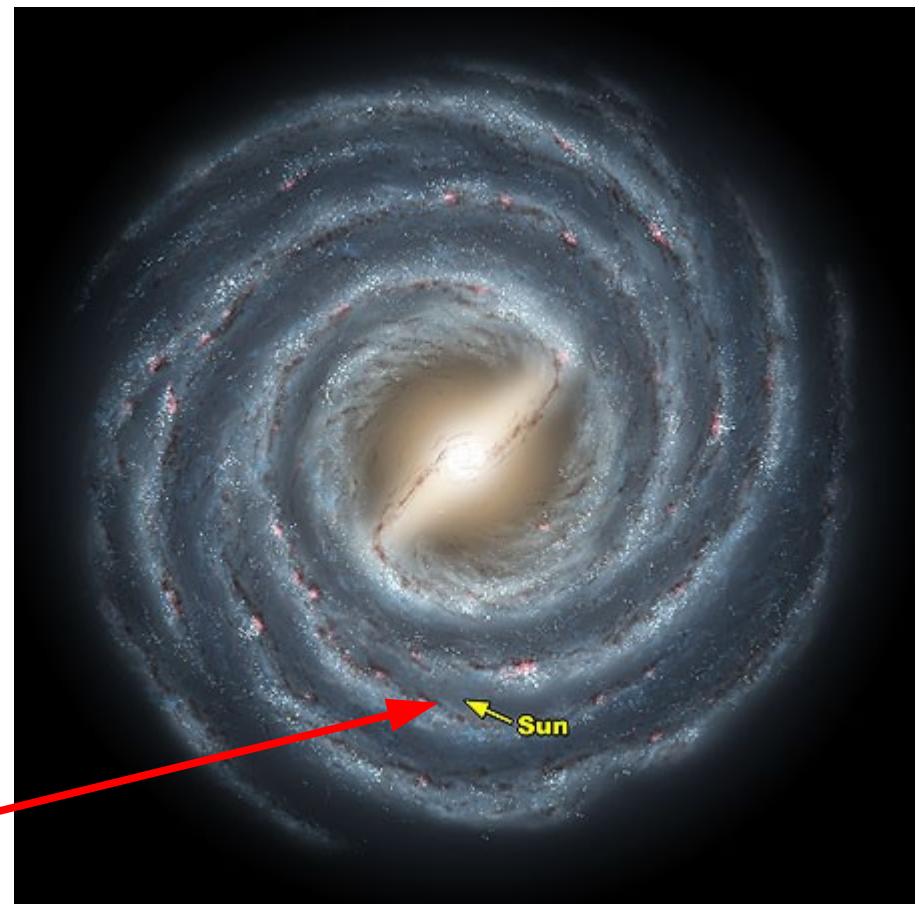


銀河系の想像図

- 銀河系: 約1千億個の星の集団
- 湾曲型(棒湾曲型?)の銀河
- 宇宙の中では大きめ
- 銀河系の外には出られない
 - 巨大なので
- 様々な観測から推測する

およそ10万光年

ここに太陽



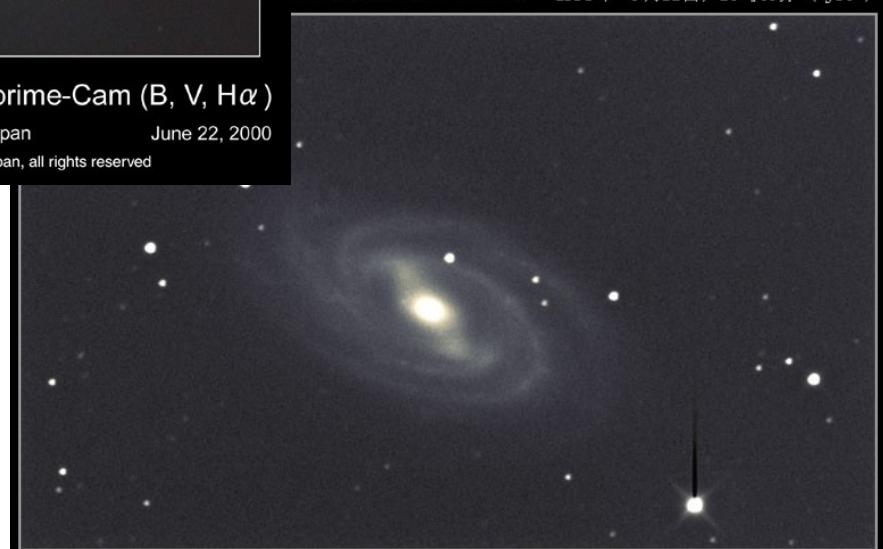
「銀河」とは

- 銀河(galaxies)
- 星の集団
 - およそ1千万～1兆個程度の星(連続的に分布)
 - 質量 $M \sim 10^{7-12} M_{\text{sun}}$
 - 矮小銀河～巨大銀河
- 色々なサイズ・質量
 - 0.1-10kpc (300-3万光年)
- 密度
 - およそ $10^{12} M_{\text{sun}} / (10\text{kpc})^3 \sim M_{\text{sun}} / \text{pc}^3$
 - 1pc(約3光年)立方に星一つ

渦巻銀河、棒渦巻銀河



にある棒渦巻銀河) 1996年 4月22日, 25時43分 (JST)



口径50cmカセグレン式反射望遠鏡(F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ(Astromed 3200シリース)
露出時間: 6分×4, フィルタ: Iバンド, 擬似カラー処理

H. Fukushima and N. Yamamoto 国立天文台 広報普及室



NGC 2403

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
Copyright © 2005 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

Suprime-Cam (B, R, IA651)
October 13, 2005

横から見た渦巻銀河

NGC4565 (かみのけ座にあるエッジオン銀河)



1998年 5月21日, 23時20分 (JST)

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200シリーズ)
露出時間: 6分×10, フィルタ: Iバンド, 疑似カラー処理, 画像範囲: 14.01×9.53'
観測場所: 国立天文台(三鷹)

H. Fukushima

国立天文台 天文情報公開センター 広報普及室

多様な形態(morphology)

- 漪巻き銀河(Spiral)
 - 漪を巻く腕がある
 - ガスを持ち、新たに星が作られ続いている
- レンズ状銀河(Lenticular)
 - SとEの中間(S0)
 - ディスクがあるが、ガスはほとんどない
- 橙円銀河(Elliptical)
 - 橙円～円
 - ガスがほとんどなく、古い星がほとんど
- 不規則銀河(Irregular)
 - 決まった形を持たない。矮小銀河に多い

橿円銀河

M87 (おとめ座銀河団の中にある巨大橿円銀河)



この銀河は、ブラックホールに伴う現象とされているが、中心部から噴き出している明瞭なジェットがあり、強い電波を放射している。

ジェットを表現するため、中心部だけを拡大し、異なる処理を施した画像を右下に示す。

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12)
液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200 シリーズ)
露出時間: 5分×8, フィルタ: Iバンド
擬似カラー処理

Mar. 4. 1996, 21h02m~21h51m (JST)

H. Fukushima
国立天文台 広報普及室

M49 (おとめ座にある橿円銀河)

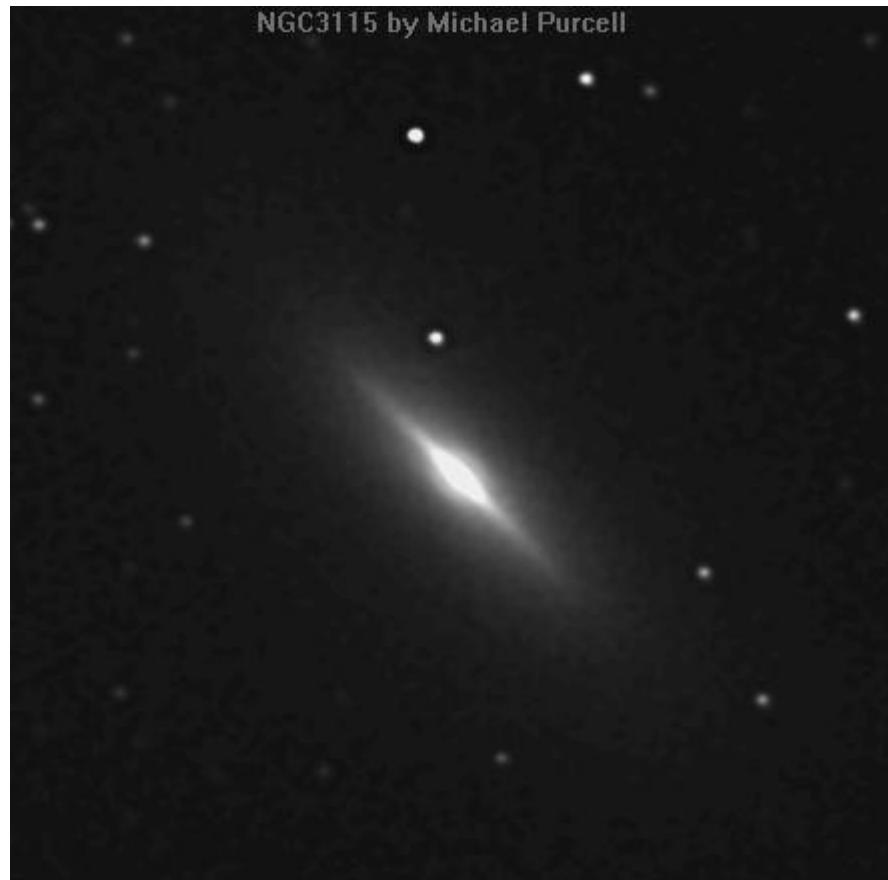
1998年 1月26日, 27時18分 (JST)



0cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12→F7.31, レデューサ使用)
CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露間: 10分×5, フィルタ: R-60, 擬似カラー処理, 画像範囲: 12.63×8.51'
場所: 国立天文台(三鷹)

H. Fukushima and Y. Ishibashi 国立天文台 広報普及室

S0銀河(レンズ状銀河)



不規則銀河



Sextans A (UA 205)



Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright ©2004, National Astronomical Observatory of Japan, All rights reserved.

Suprime-Cam (V, R, I)

February 23, 2004



Dwarf Irregular Galaxy Leo A

Suprime-Cam (B, R, z')

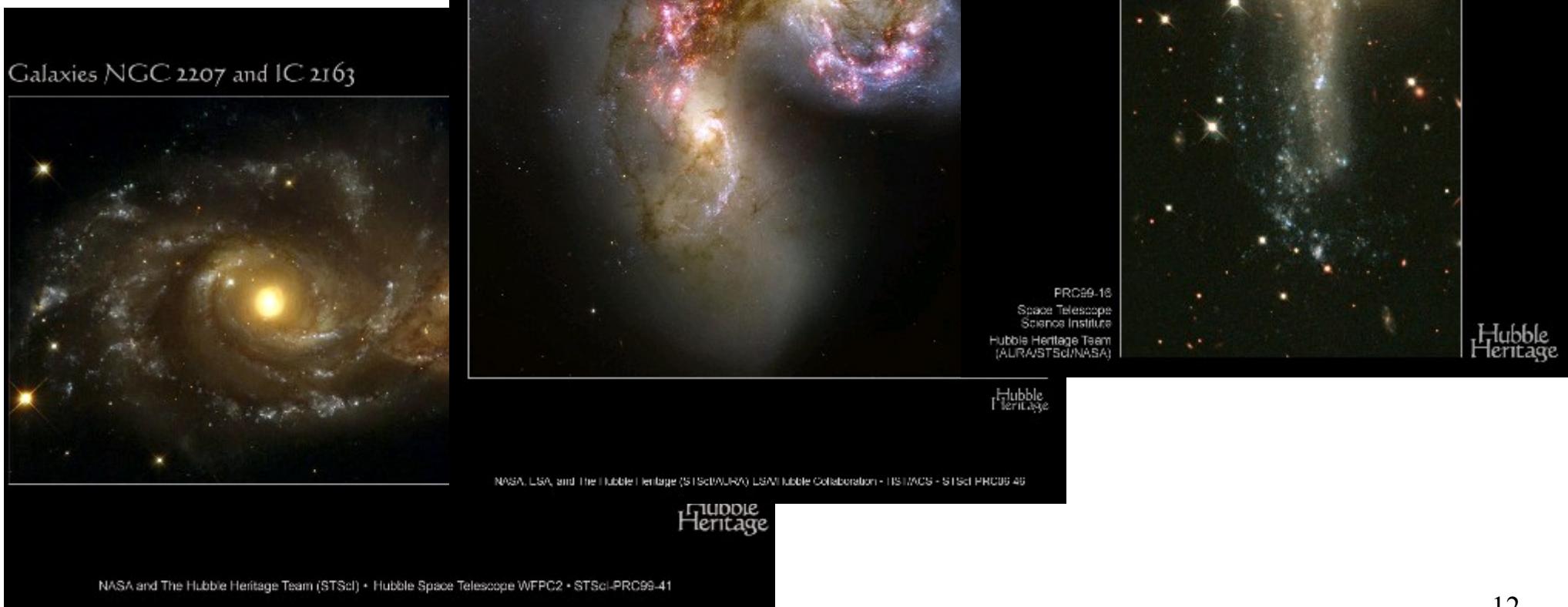
August 5, 2004

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright ©2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

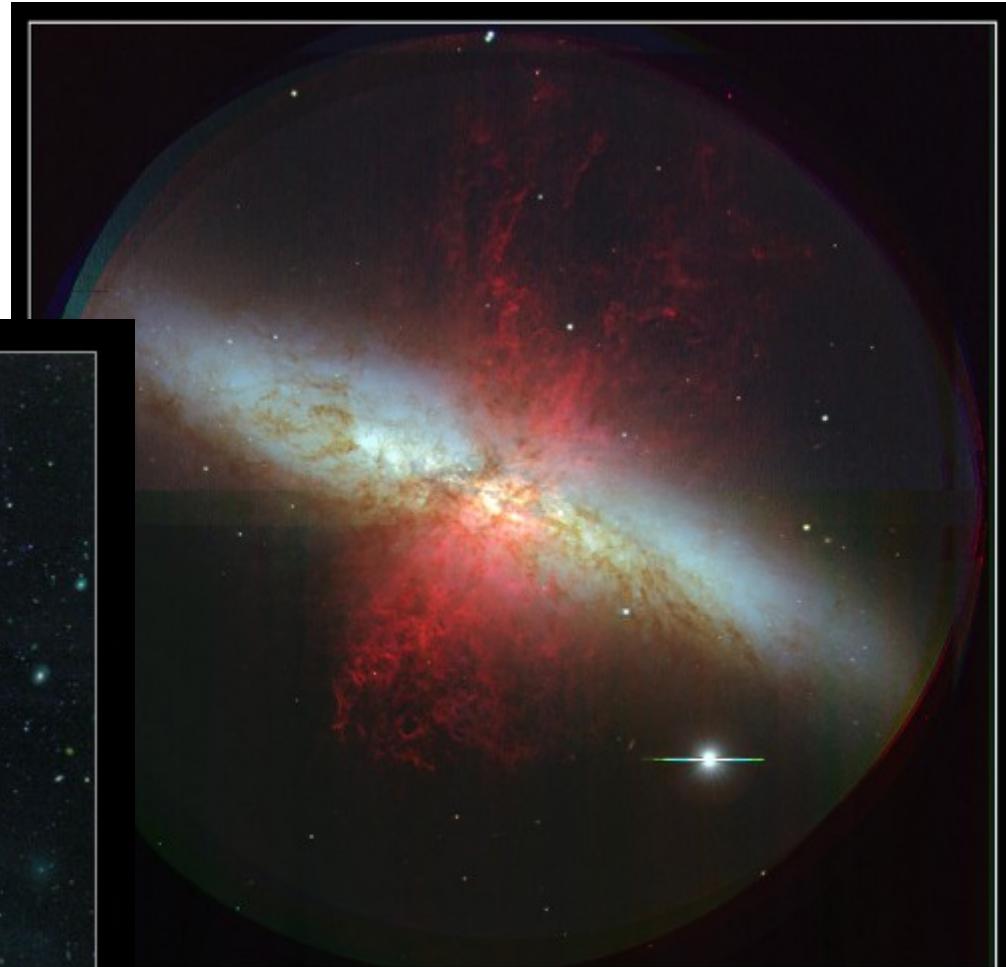
合体する銀河

- 新しい星が爆発的に生成



活動的な銀河

- ・銀河が合体した？
- ・水素のガスが放出
されている



M 82 (NGC 3034)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

FOCAS (B, V, H α)

March 24, 2000

Copyright © 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



Active Galaxy NGC 4388

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

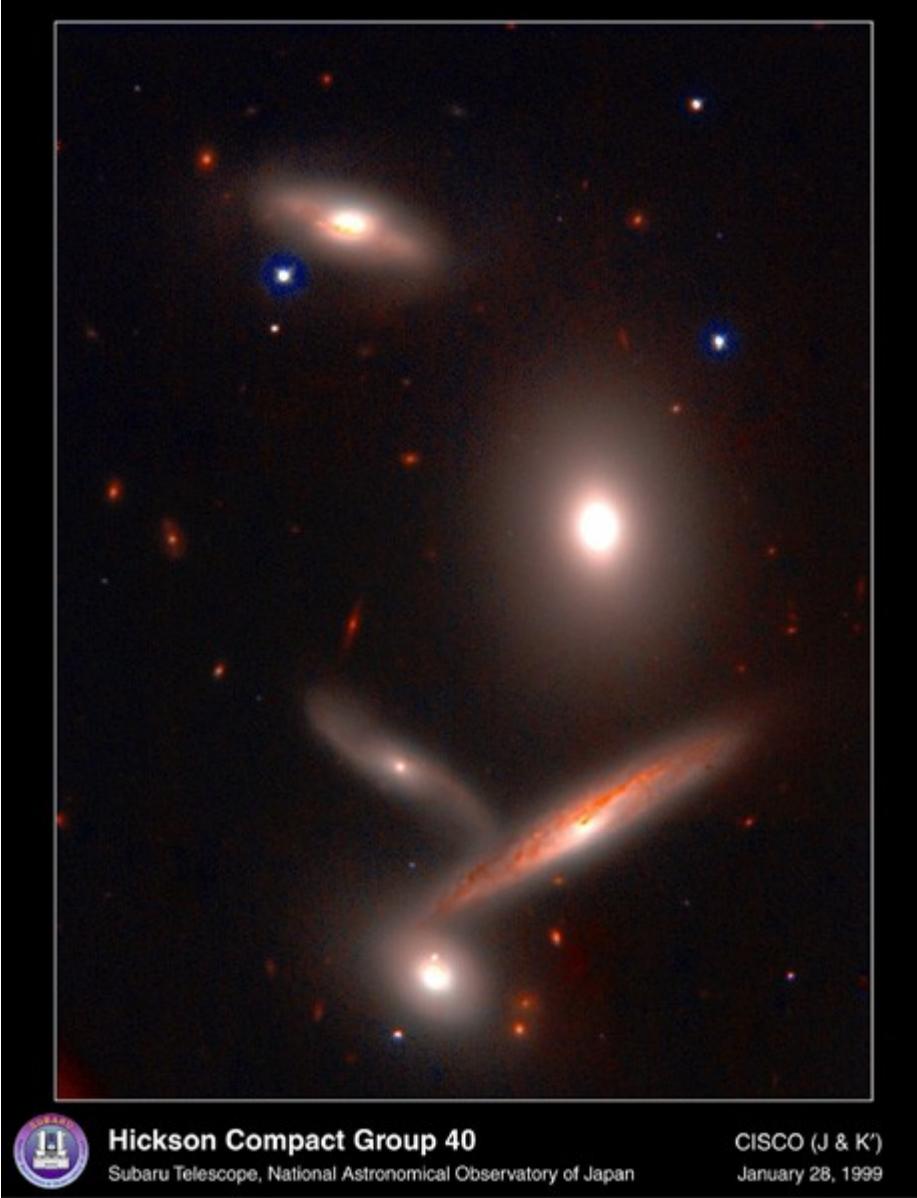
Suprime-Cam (OIII, V, H α)

April 15, 2002

Copyright © 2002 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



銀河群、銀河団

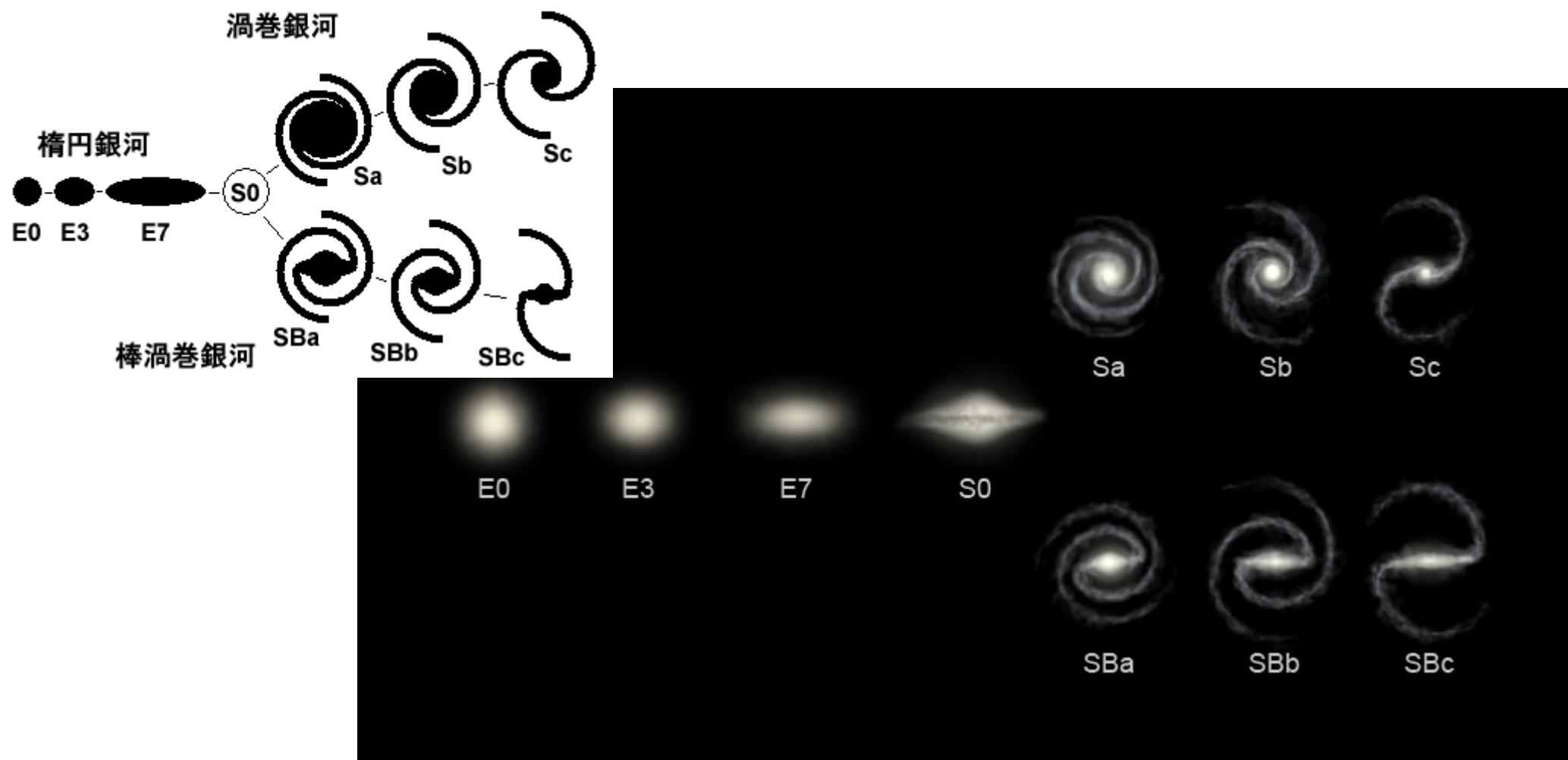


多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
- レンズ状銀河(Lenticular)
- 楕円銀河(Elliptical)
- これらは何を意味しているのか？
- とりあえず分類することから始まった

ハッブル系列(ハッブルの音叉図)

- ・「進化経路」ではない！
- ・ハッブルが形態を分類、当初は橢円→渦巻と進化するとも考えられていた



ここまでまとめ

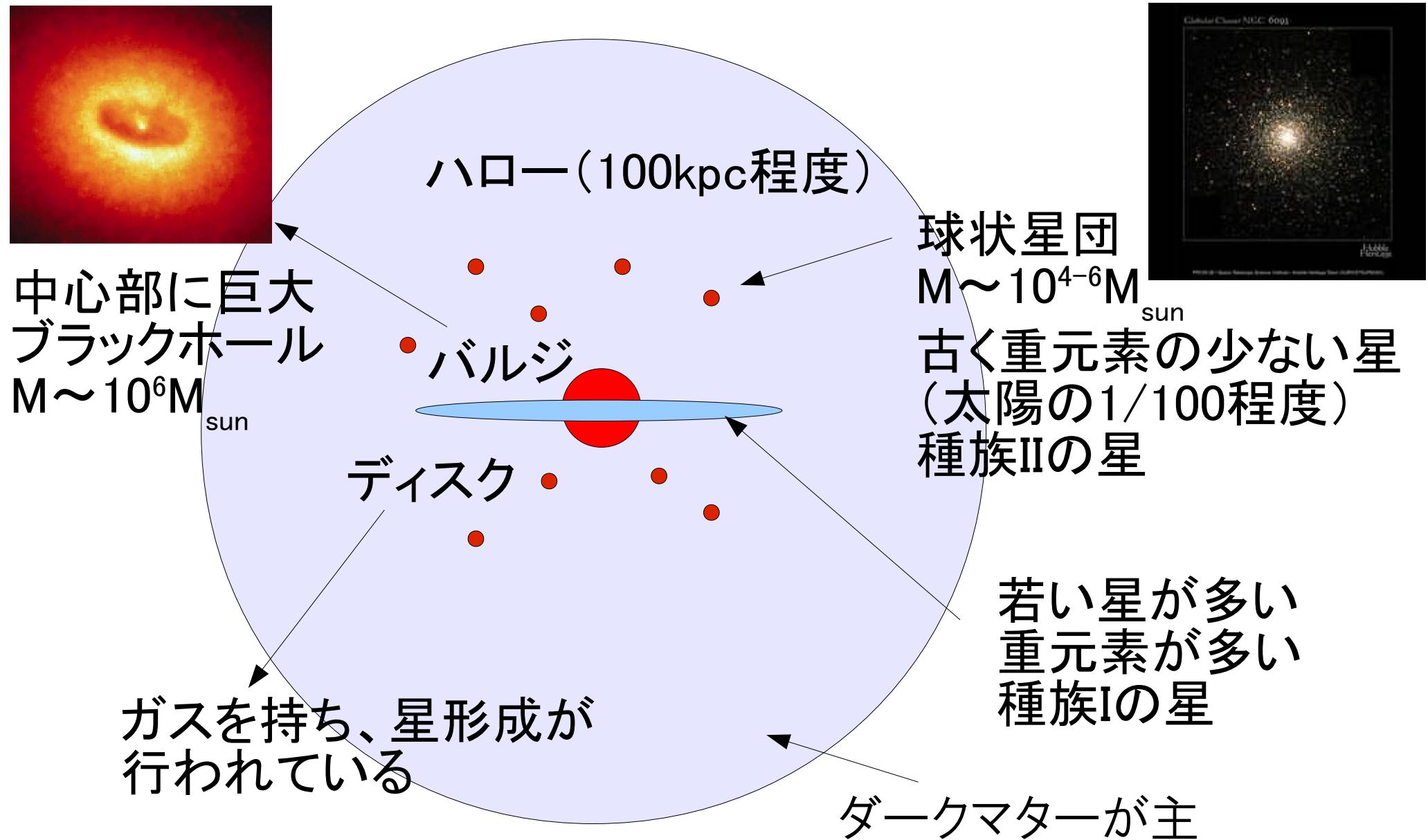
- 銀河は多様である
 - 姿、質量、大きさ、…
- しかし、規則性ももつ
 - 湾曲銀河は湾を卷いている
 - 楕円銀河は楕円型（あまりに平べったいのはない）
 - 銀河が密集しているところは楕円銀河が多い
 - などなど
- 多様性の起源はなにか？
 - 多様な物理過程を反映しているのか？
 - しかし、単純な法則が多様性を生むことが多い
- 銀河を支配する法則を見つけよう
- まずは、最も身近で詳細に調べられる「銀河系」を見よう

我々の銀河系

- 天の川銀河、The Galaxy, The Milky Way
- 質量 $M \sim 10^{12} M_{\odot}$ 程度の立派な銀河
- 漪巻銀河(棒渦巻かもしれない)
- $R \sim 10 \text{ kpc}$, 厚みは 1 kpc 程度
- 銀河中心から太陽までの距離約 8.5 kpc
 - 太陽は銀河系のはずれにいる
- バルジ(bulge)のサイズ～ 3 kpc



銀河系の模式図



長波長

短波長

<http://adngsf.gsfc.nasa.gov/mw/>

radio continuum (408 MHz)

atomic hydrogen

radio continuum (2.5 GHz)

molecular hydrogen

infrared

mid-infrared

near infrared

optical

x-ray

gamma ray



Multiwavelength Milky Way

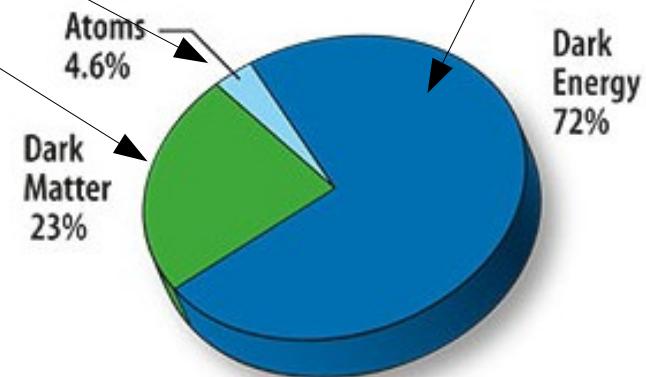
見る波長が違うと、違って見える

- 電波…主にガス
 - e.g. 21cm 線…中性水素原子(陽子と電子の спинの向き)
- 赤外線…ダスト(ちり)からの(熱)放射
- 可視光線…星からの光
- 紫外線…大質量星からの光(大質量の星は寿命が短いので、若い星団である)
- X線…超新星爆発などにより加熱されたガス(数十万～数千万度)
- ギ線…粒子加速や大質量星の超新星爆発?
 - まだ謎が多い

登場人(?)物

- 星…光り輝く主人公
- ガス…明日の星(?)
- ダークマター…闇の支配者

ダークエネルギー
構造形成に関与しない



<http://map.gsfc.nasa.gov/media/080998/index.html>

注：以下の説明は、通常とは若干異なる方法ですが、
より現代的な観点からの解釈と思ってください。

ダークマター存在の証拠(の一つ)

- 銀河の回転曲線(中心からの距離によって、回転速度がどう変化するか)

No. 2, 1985

DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198

309

観測値

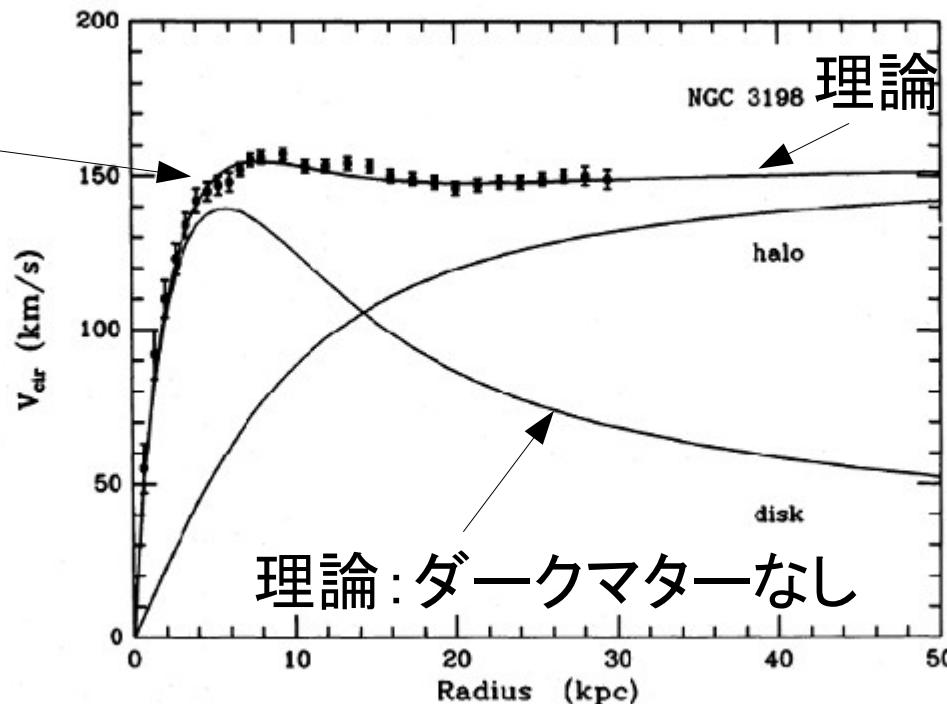


FIG. 4.—Fit of exponential disk with maximum mass and halo to observed rotation curve (dots with error bars). The scale length of the disk has been taken equal to that of the light distribution ($60''$, corresponding to 2.68 kpc). The halo curve is based on eq. (1), $a = 8.5 \text{ kpc}$, $\gamma = 2.1$, $\rho(R_0) = 0.0040 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$.

van Albada et al. (1985)

ダークマターと銀河系の回転

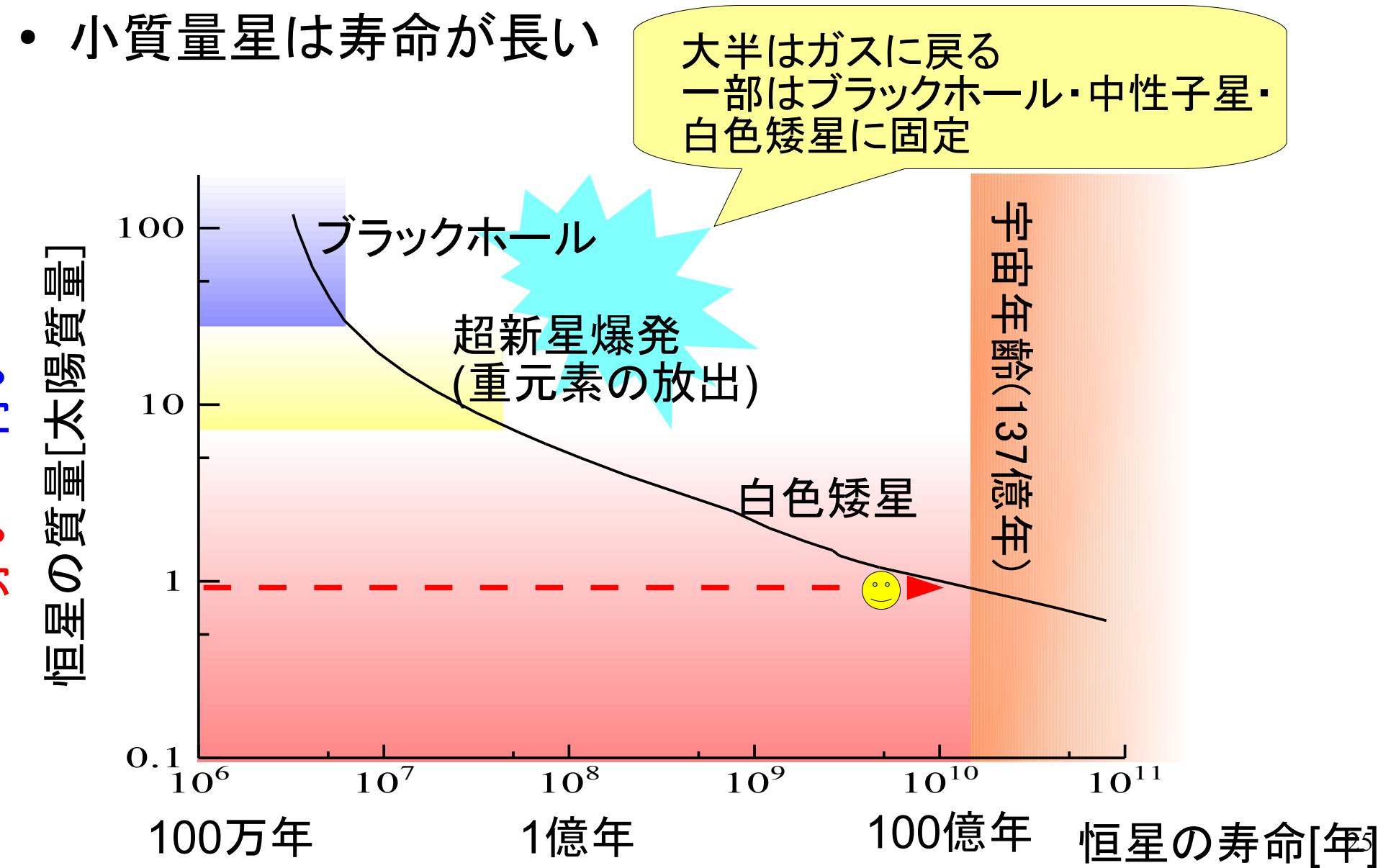
- 我々の銀河系は、約2億年で一周する
- 重力と遠心力の釣り合い
- 質量 = 密度 × 体積より、
- これより、
- 実際の観測では、回転速度 v は半径によらずほぼ一定（「平坦な回転曲線」）
- ところが、光っている星の分布は、半径が増えるにつれ、指数関数的に減少
- つまり、「見えない物質」 = ダークマターの存在を示唆
 - もしダークマターがなければ、回転速度は外に行くほど遅くなるはず

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$
$$M \simeq \rho r^3$$

$$\rho \simeq \frac{v^2}{Gr^2} \propto \frac{v^2}{r^2}$$

まずは星から：恒星の寿命

- ・大質量星は数千万年(ほぼ「一瞬」)で爆発→重元素汚染
- ・小質量星は寿命が長い



「色」

色の定義：

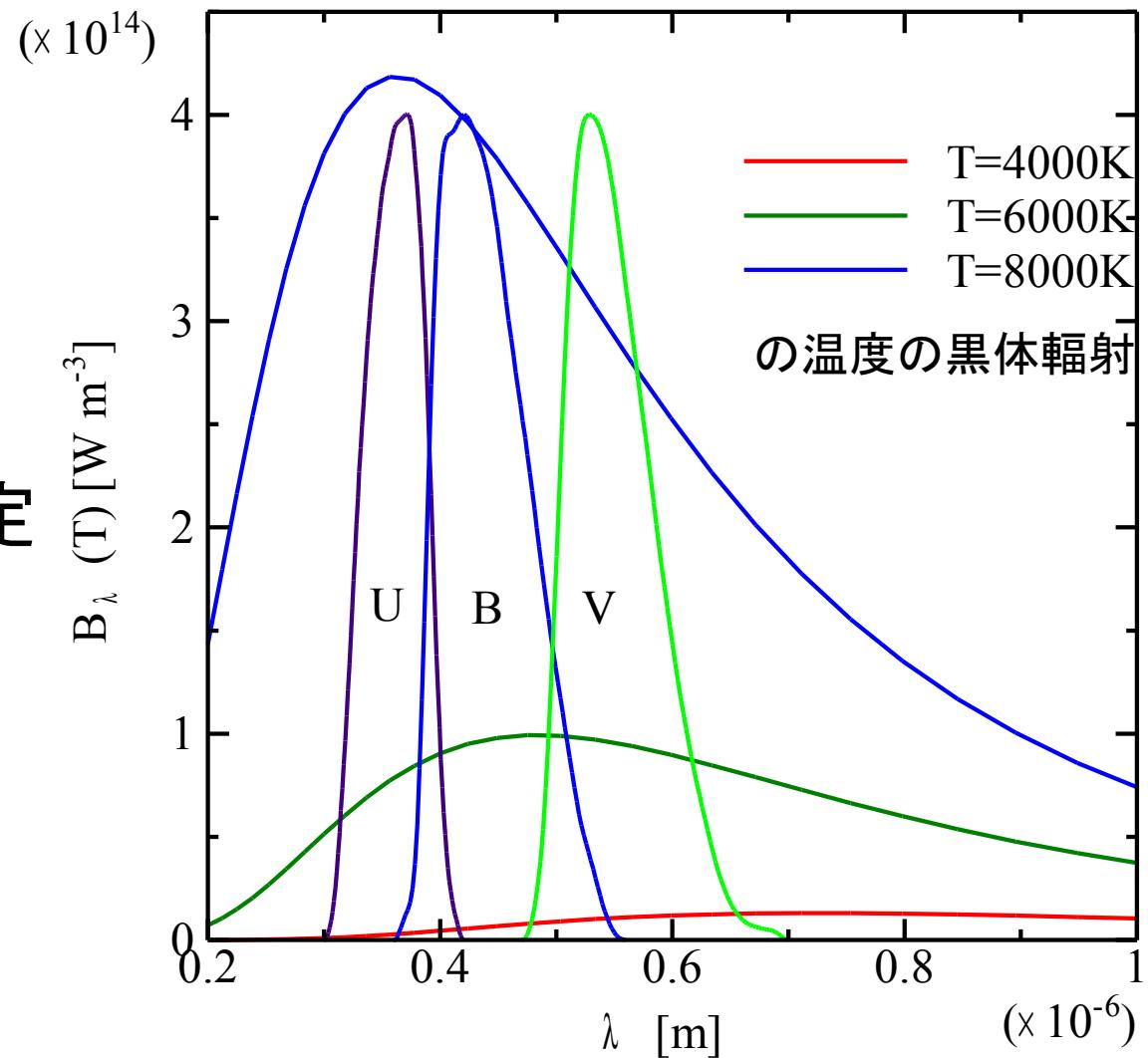
異なる波長での
光の**強度比**

通常の天文観測：

フィルターをかけて、特定
の波長の光だけを撮影

大質量星：高温→青い

小質量星：低温→赤い



同時に誕生した星の集団の進化

- 新たに星が作られなければ、星団は青→赤に変化していく
 - 球状星団はこれそのもの。橢円銀河も？

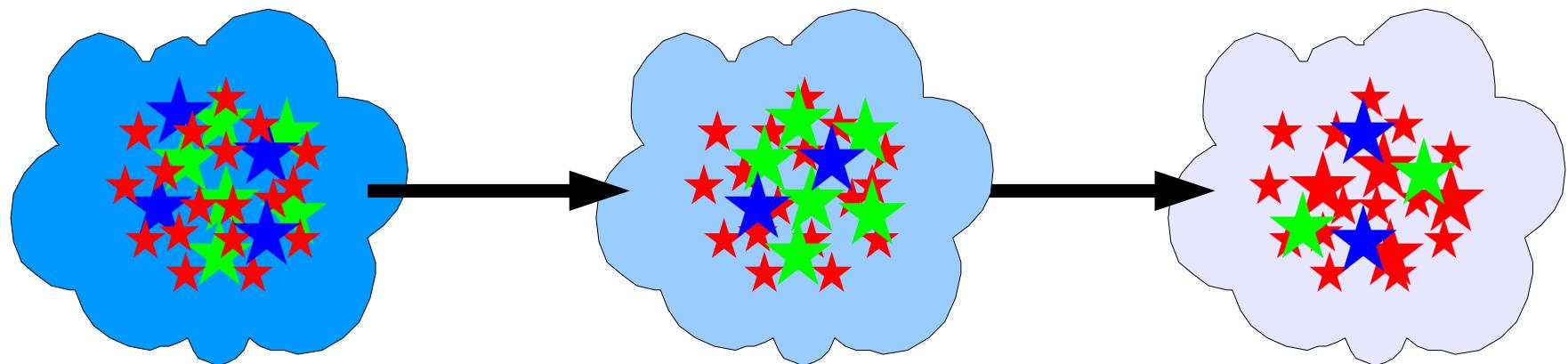


- 明るいが少ない、
青い大質量星
- 暗いが多い、
赤い小質量星
- 大質量星が死ぬ
 徐々に赤くなる
- 赤い小質量星ばかり
 一部は赤色巨星に

- 銀河進化を理解する上での大問題：
 - 大質量星と小質量星、どっちがどれくらい多いのか？
 - 「初期質量関数(IMF)」…質量と個数の関係
- 理論的にはほぼまったくわかっていない
- 仕方ないので、太陽近傍から推測する
- というわけで、この問題はとりあえず放置！

ガスがある場合

- ガスから絶えず星が作られる。
- 新たにできる星の集団には、明るく青い大質量の星が含まれるので、全体も青く見える。
 - 漩巻銀河がこれに相当する
- ガスは外部から供給されなければ、徐々に減っていく



- 銀河系のガス量は太陽質量の100億倍、星形成率は約6-10Msun/年→約1-2Gyr(10-20億年)で使い果たす→**供給が必要**

ここまでで言えること

- **観測事実**: 楕円銀河は赤く、渦巻銀河は青い
- **観測事実**: 楕円銀河はガスがなく、渦巻銀河は大量にある
- **楕円銀河**ではずっと以前に星形成が止まった
 - 古い星が多い
- **渦巻銀河**ではいまも星を作り続けている
 - (II型) 超新星爆発の有無などからも言える

⇒ 星がどのように生まれてきたか(**星形成史**)が重要

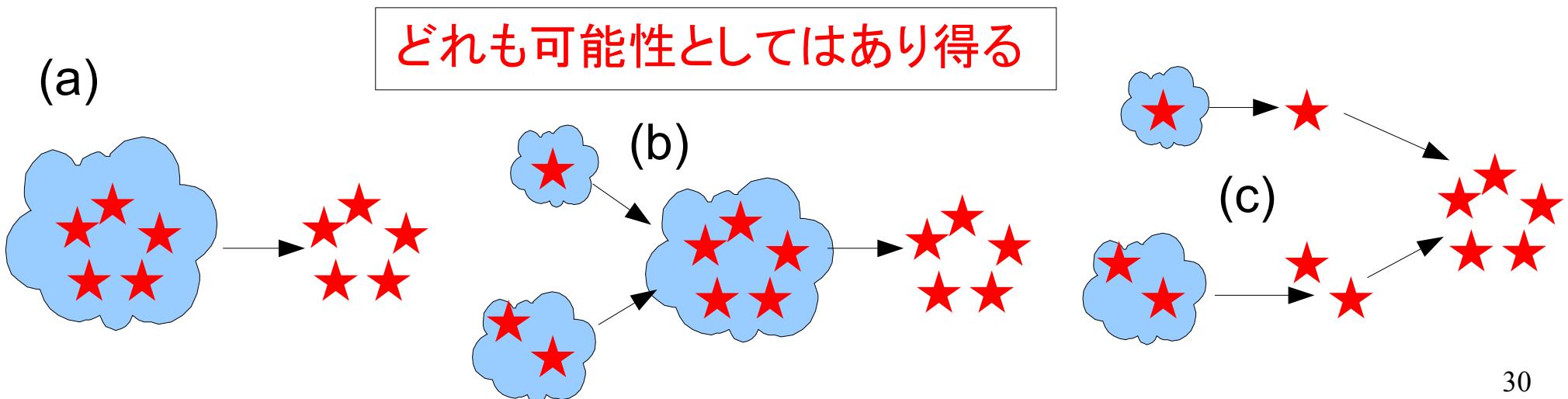
⇒ 渦巻銀河のガスはどのように供給されているのか？

⇒ 楕円銀河にはなぜガスがないのか？

⇒ ガスのある/なしと、「かたち」に関係があるのはなぜ？

橢円銀河

- 古い星が多い \Leftrightarrow 新しい星がない
- ガスがない
 \Rightarrow 早い段階で、ガスを使い果たし、新たなガスの供給がなかった、と考えられる
- 宇宙の初期に、爆発的に星を作ったフェイズがあった?
 - 爆発的星生成 / スターバースト
- はじめから一つの橢円だったのか？それとも、複数の銀河が合体して現在の姿になったのか？



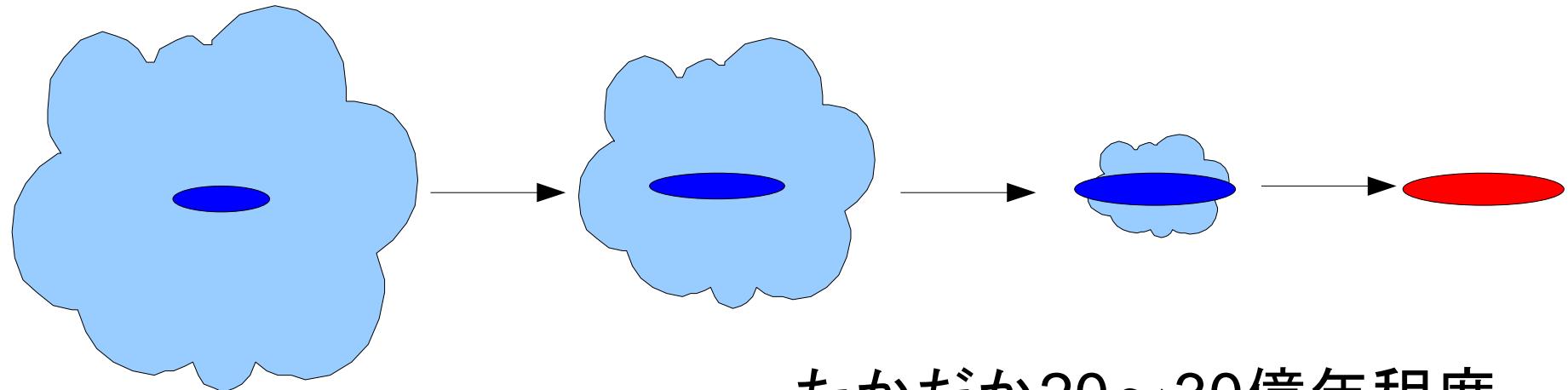
橢円銀河

- 始めから、いまと同じガス雲からできたとしたら：
 - なぜ「そのような」雲ができていたのか？
 - なぜ橢円になったのか？
- 合体で大きくなってきたとしたら？
 - 合体のときには簡単に橢円になれる（シミュレーションより）
 - 本当に、そんなに合体できるのか？
- 「冷たい暗黒物質」(CDM)宇宙では、合体が自然に起こることがわかっている[前頁(b),(c)]
- 合体しつつある銀河も大量に発見されている

橢円銀河は合体でできたようである

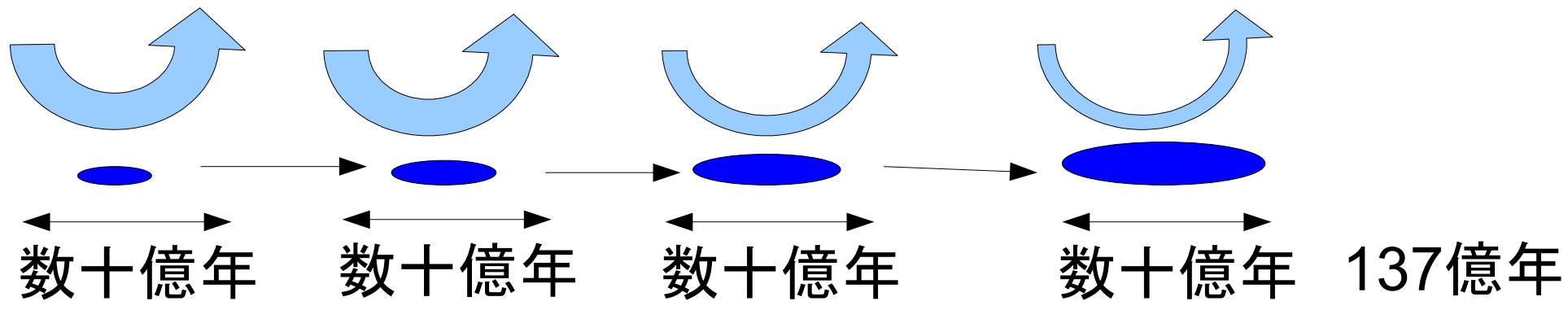
渦巻銀河

- 星を作り続けている
- ガスがあるので、星は作れる
- しかし、外部からの供給がないと、ガスがなくなる
- ハローから降ってくれれば良い？
- しかし、せいぜい10億年程度で落ちきってしまう
 - 星形成で使い果たすタイムスケールと同じ程度
- 137億年の間に渦巻き銀河はなくなってしまう？



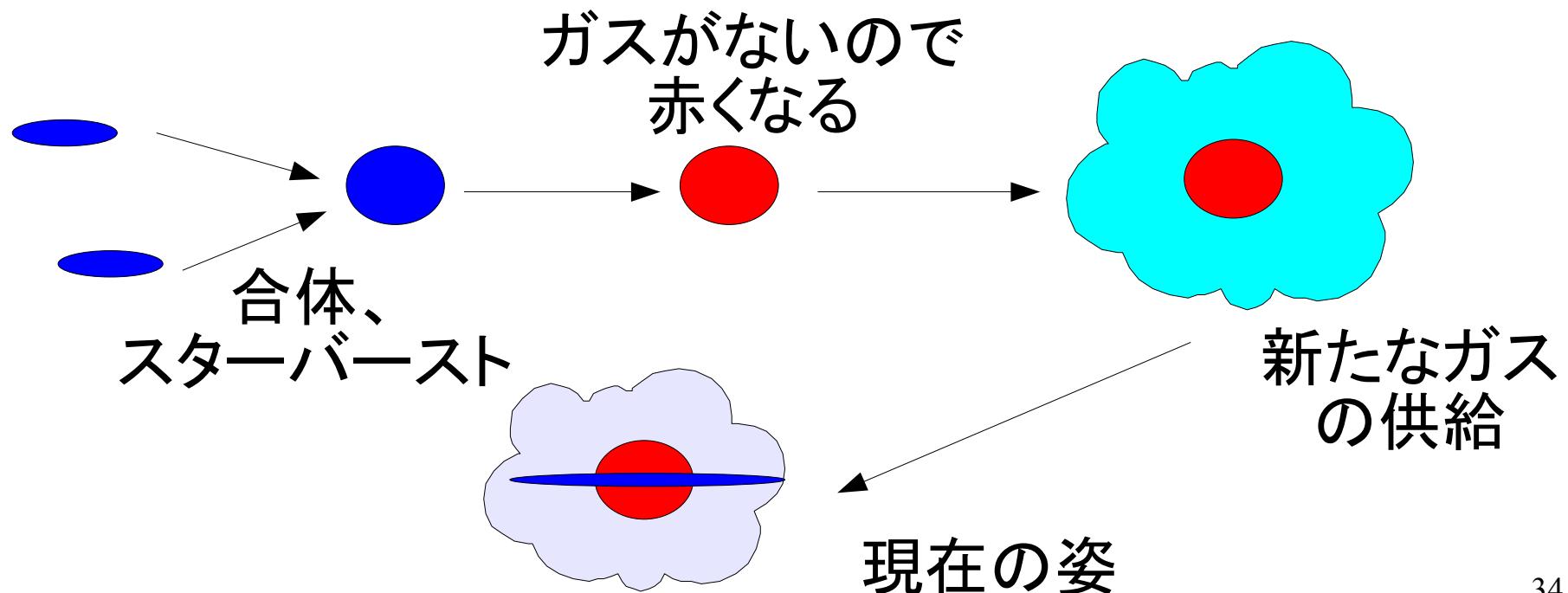
超新星爆発と超新星フィードバック

- 星は、ただ静かに死ぬのではない
- 太陽の8倍より質量の大きい星は、超新星爆発を起こす
 - 1 発当たり、約 $10^{51}[\text{erg}] = 10^{44}[\text{J}]$
 - 1 つの銀河で 100 年に 1 発程度
- 銀河に降ってきたガスを加熱し、外に追いやる
- 追い出され、加熱されたガスは、時間をかけて再び冷え、降ってくる → これを繰り返し、ゆっくりと成長する
- ただし、銀河が成長してくると、重力が強くなるため追い出されるガスの割合は減る



バルジの形成

- ・ バルジ(渦巻銀河中心の膨らみ)はどうやってできた?
 - 全然わかっていない
- ・ おそらく、宇宙初期に銀河同士が合体し、小さい橢円銀河を作り、その後、ガスが降ってディスクを作った?
 - ガスが降着する際に、遠心力のため円盤状になる

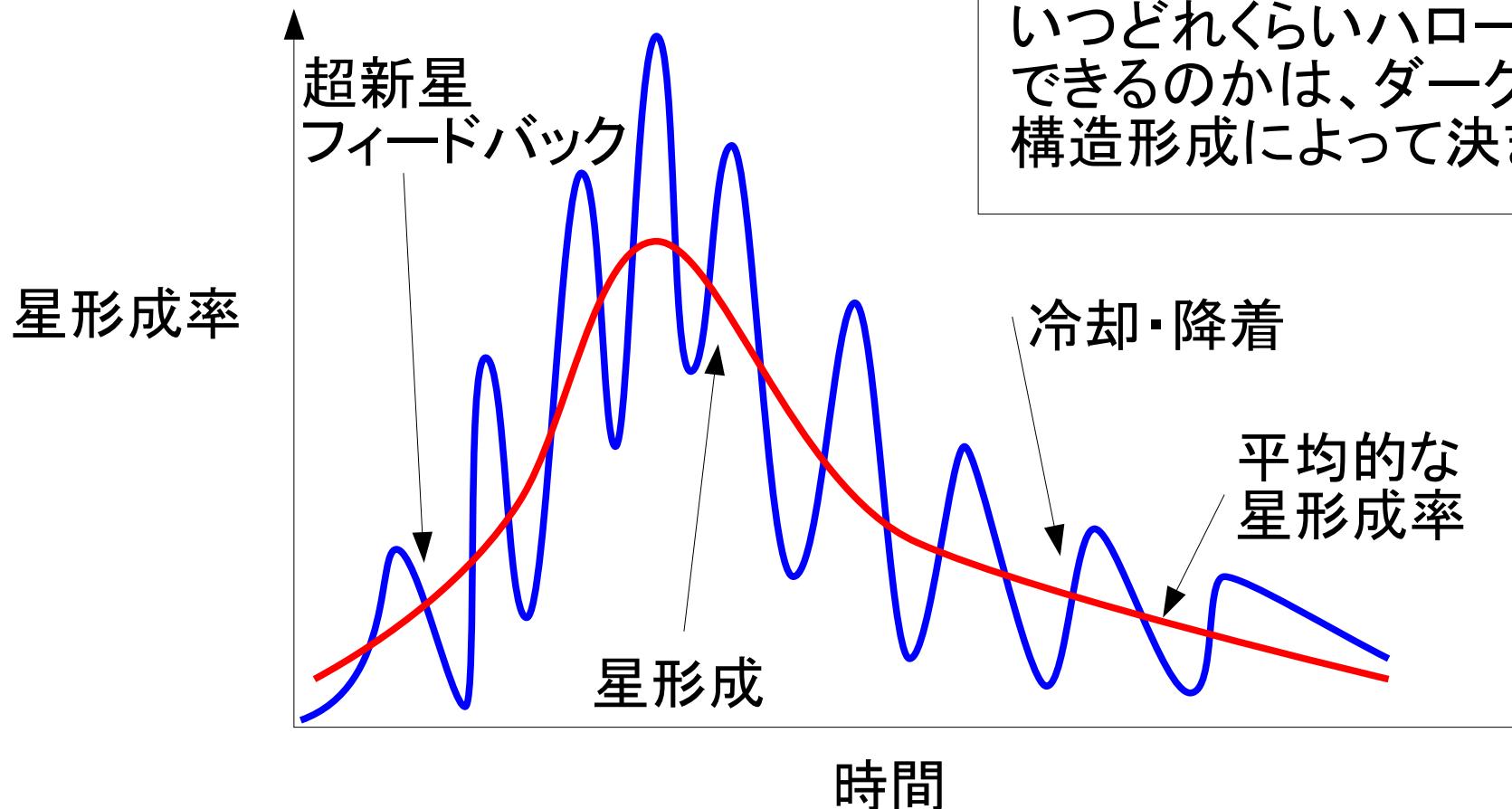


ガスの供給

- ハローが形成されるとき、その質量(と形成時期)に応じて、内部のガスの温度が決まる
 - 大質量ハロー内のガスほど高温になる
 - 銀河団サイズになると、1千万度を越える
- 熱いままだと、重力と圧力勾配の力(→気圧傾度力)が釣り合って、落ちてこない
- しかし、熱いと放射によってエネルギーを放出し、冷却し、圧力が小さくなることで、銀河に降ってくる
- 冷却のタイムスケールは、現在付近でせいぜい10億年程度(1Gyr)
 - 銀河団は熱すぎて宇宙年齢かかっても冷えられない
- ダークマター構造形成(昨日の須佐講演参照)と、銀河からの超新星フィードバックで、ガスがハローに供給される

渦巻銀河の歴史のイメージ図

どこかでバルジができるような合体？



フィードバックが弱いと、宇宙初期にほとんどのガスが星になってしまふ強すぎると、星がほとんどできない

※実際は、複数の銀河が途中で合体するし、また一つの銀河でも場所ごとに違うので、こんな単純には見えない

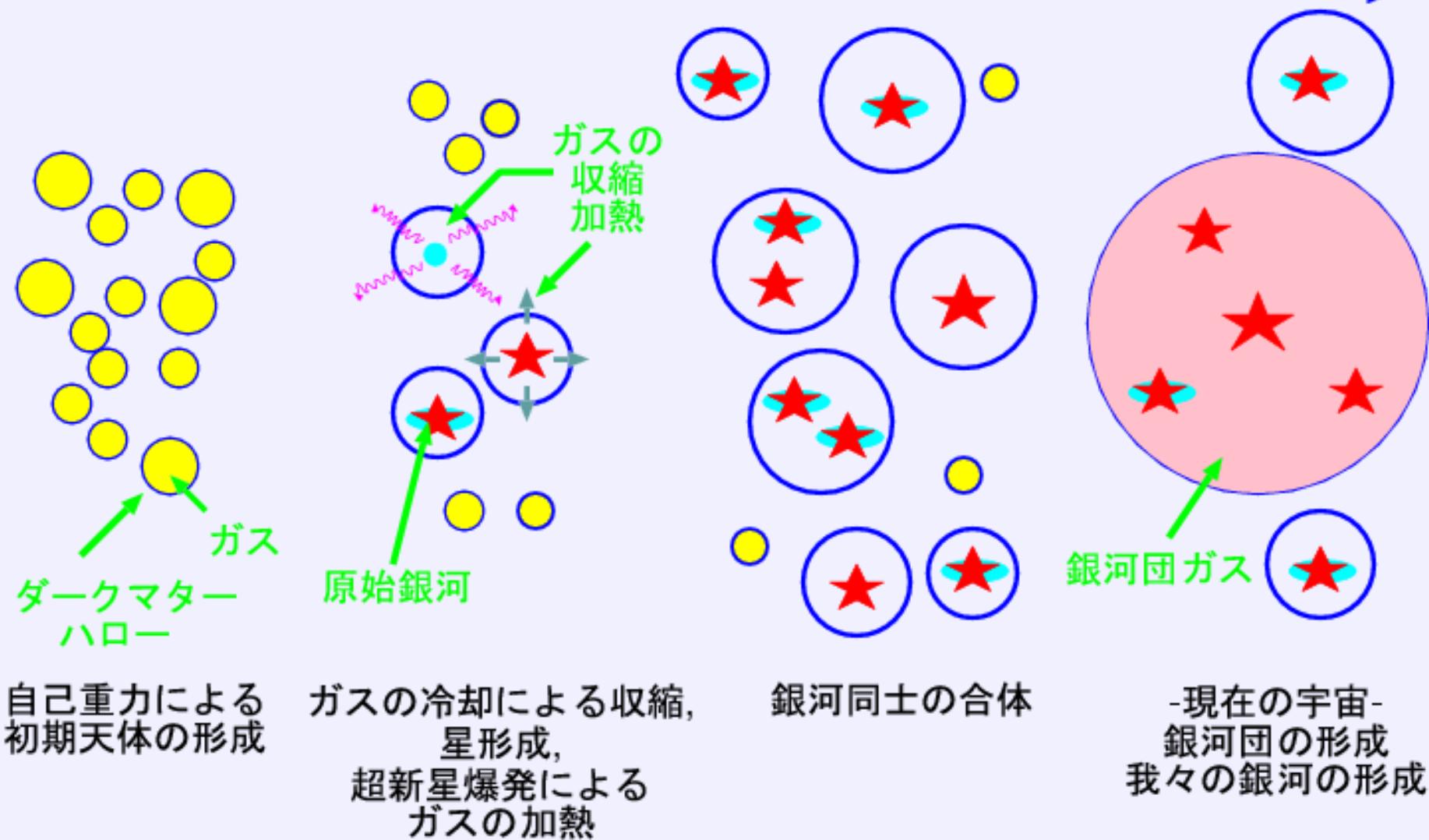
ここまでまとめ

- 考えなければならないプロセス
 - ハローの形成…ガス(バリオン)そのものをもたらす
 - 銀河へのガスの供給…ハローでのガスの冷却
 - 銀河での星形成
 - 超新星フィードバック…冷えたガスをハローに戻す
 - 銀河同士の合体…橢円銀河／バルジを作るきっかけ
 - 質量が違いすぎると大きい方には影響しない
- 以上をまとめると、次の図のように考えれば、統一的に多様な銀河の存在を理解できそう

階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ

宇宙初期

現在



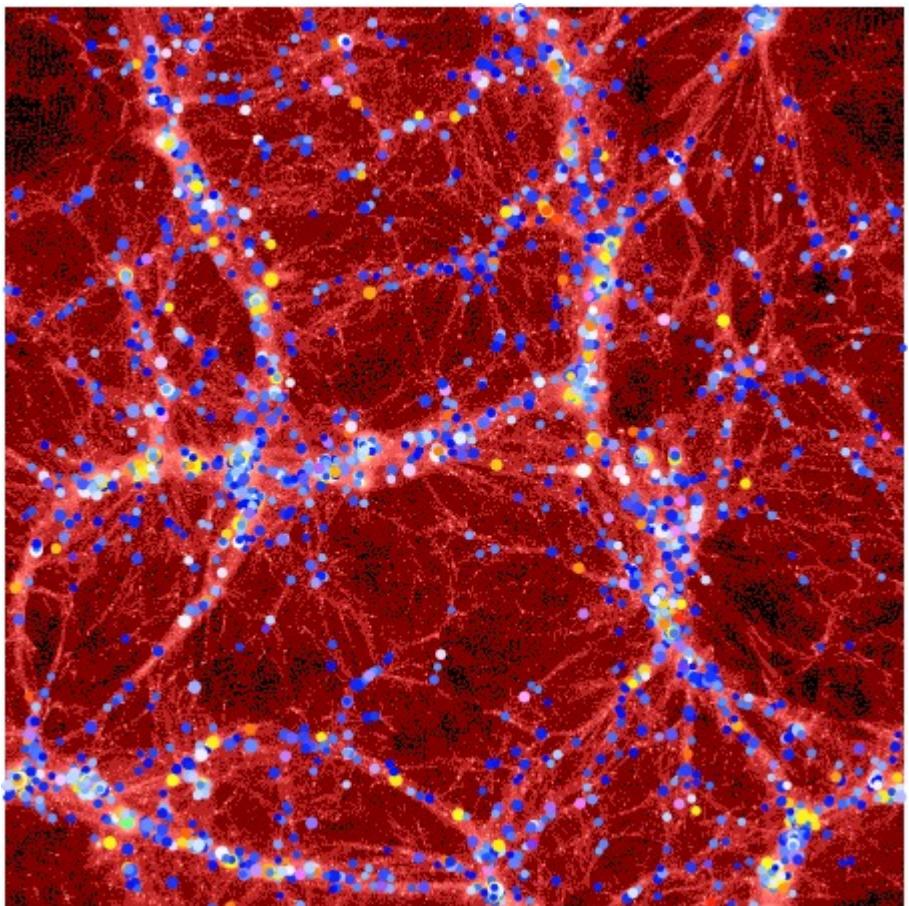
自己重力による
初期天体の形成

ガスの冷却による収縮、
星形成、
超新星爆発による
ガスの加熱

銀河同士の合体

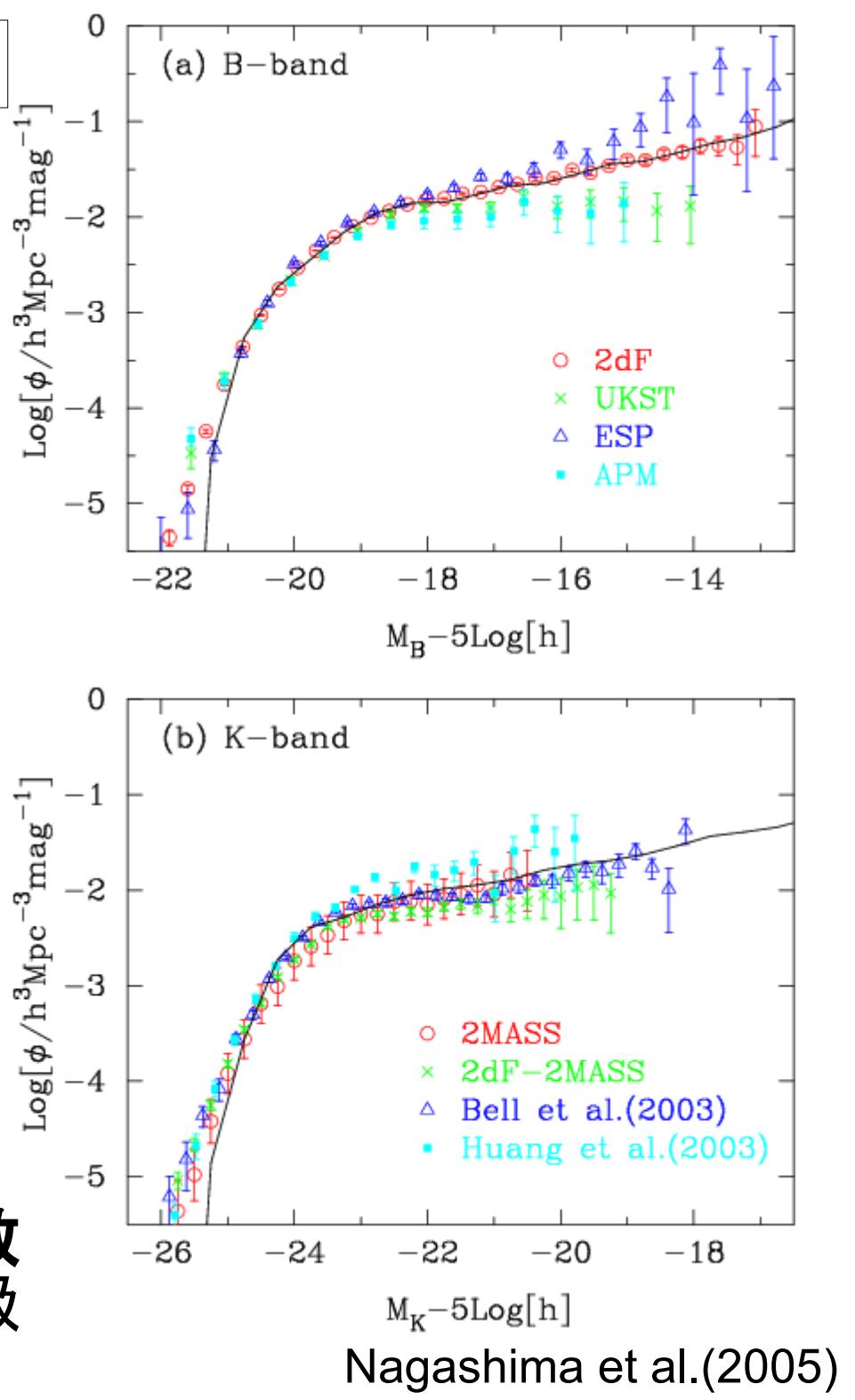
-現在の宇宙-
銀河団の形成
我々の銀河の形成

理論モデルを作り、観測結果と比較する



理論モデルにより得られた分布
赤の濃淡: ダークマター密度
色つき丸: 銀河

光度関数
横軸: 銀河の等級
縦軸: 個数密度



過去にさかのぼって
チェックする

すばるディープフィールド
での銀河の光度関数
(ヒストグラム)

この理論モデルは、
4D2Uの「宇宙の大規模構造」
で使われているものです。

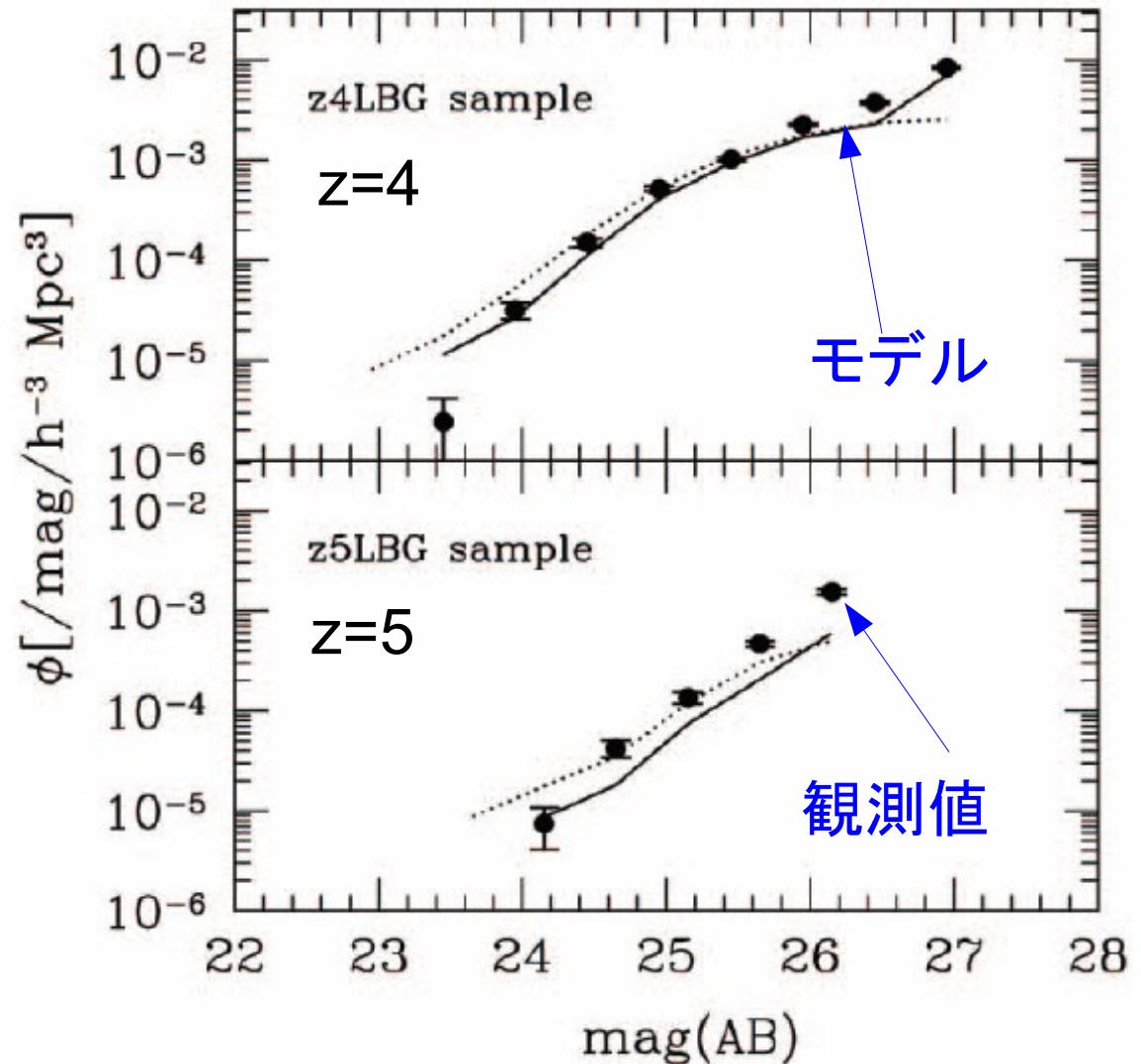
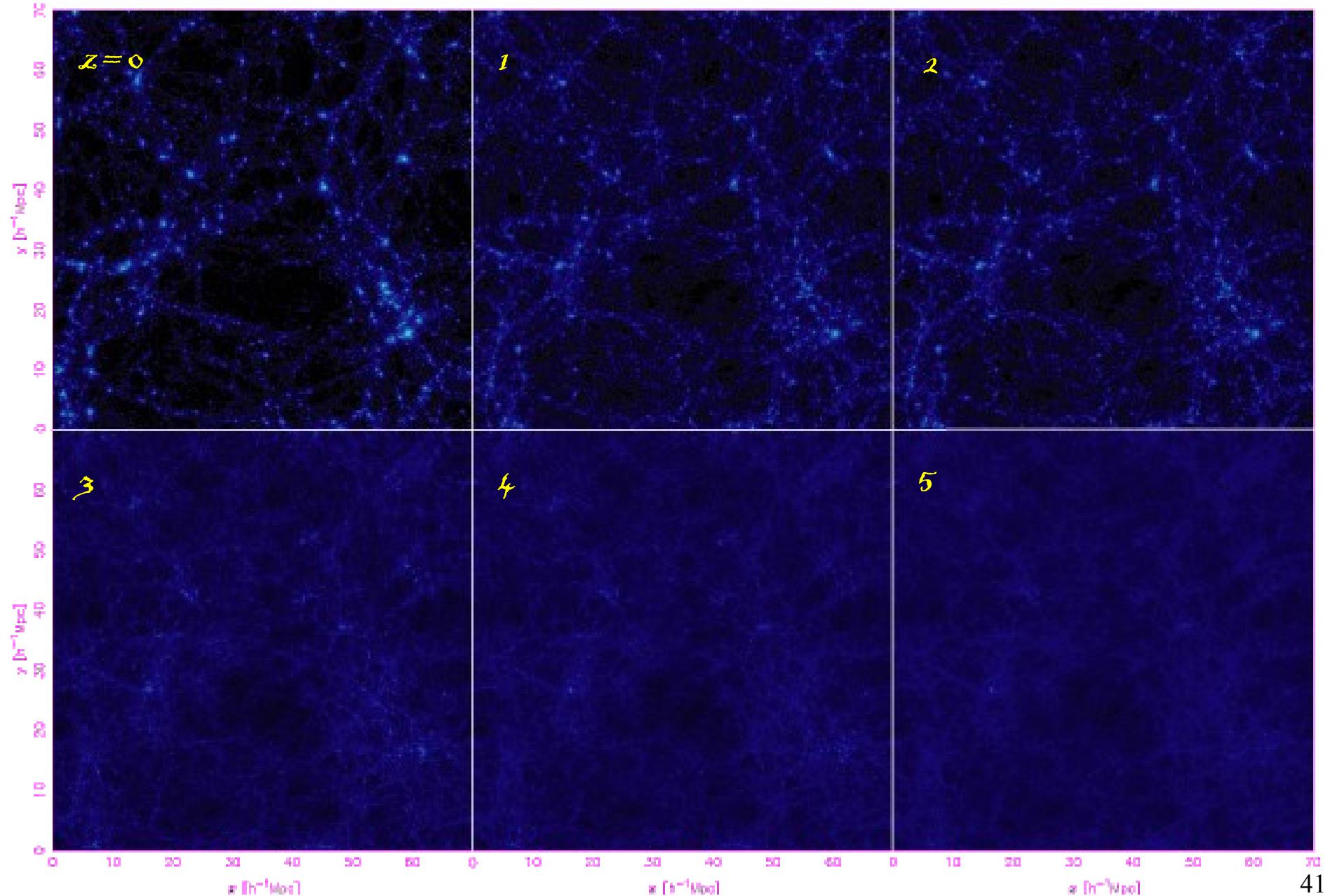


FIG. 3.—Comparison of the luminosity functions for LBGs at $z \sim 4$ (top) and $z \sim 5$ (bottom) between SDF observations by Yoshida et al. (2005; circles with error bars) and the predictions of the ν GC (lines). The solid lines denote the luminosity functions of COL-selected ν GC LBG samples, while the dotted lines are those of SF-selected ν GC LBG samples. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

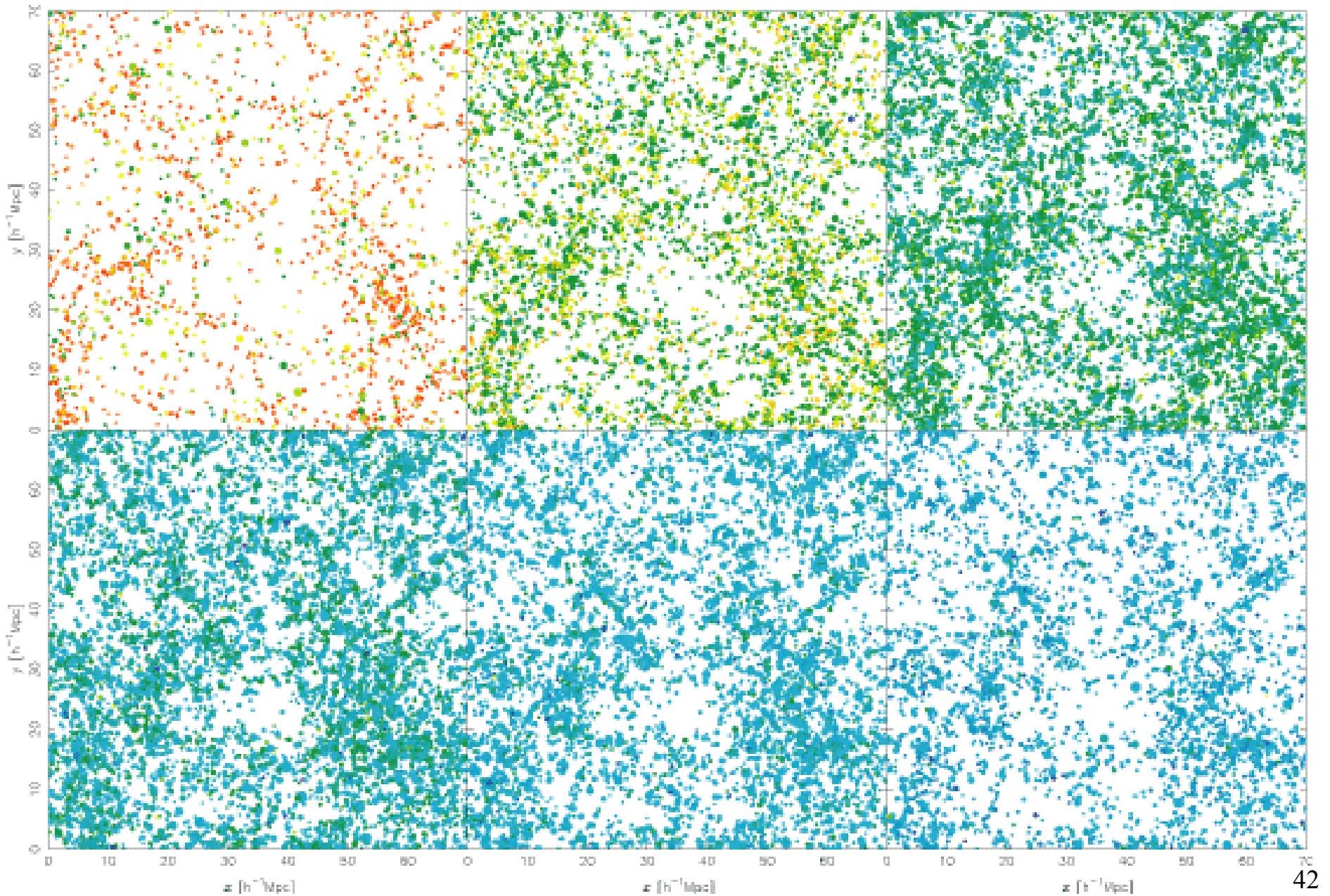
Kashikawa et al.(2006)

空間分布(dark matter) 宇宙の大きさ: $1/(1+z)$



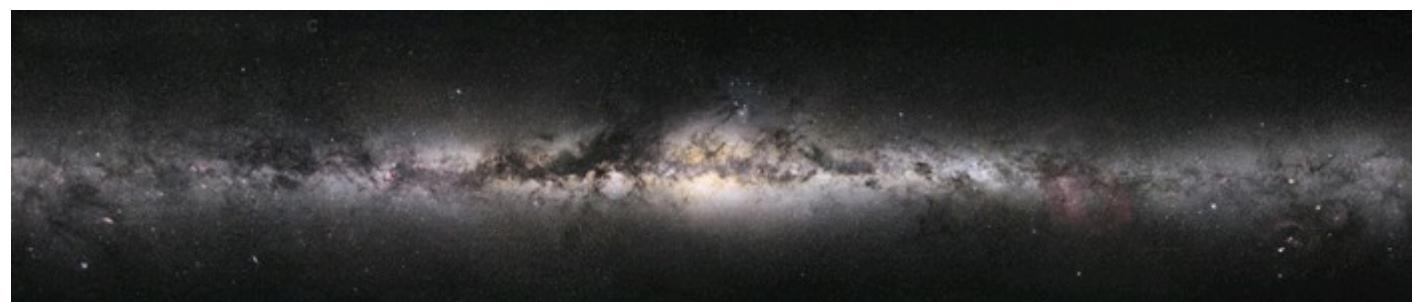
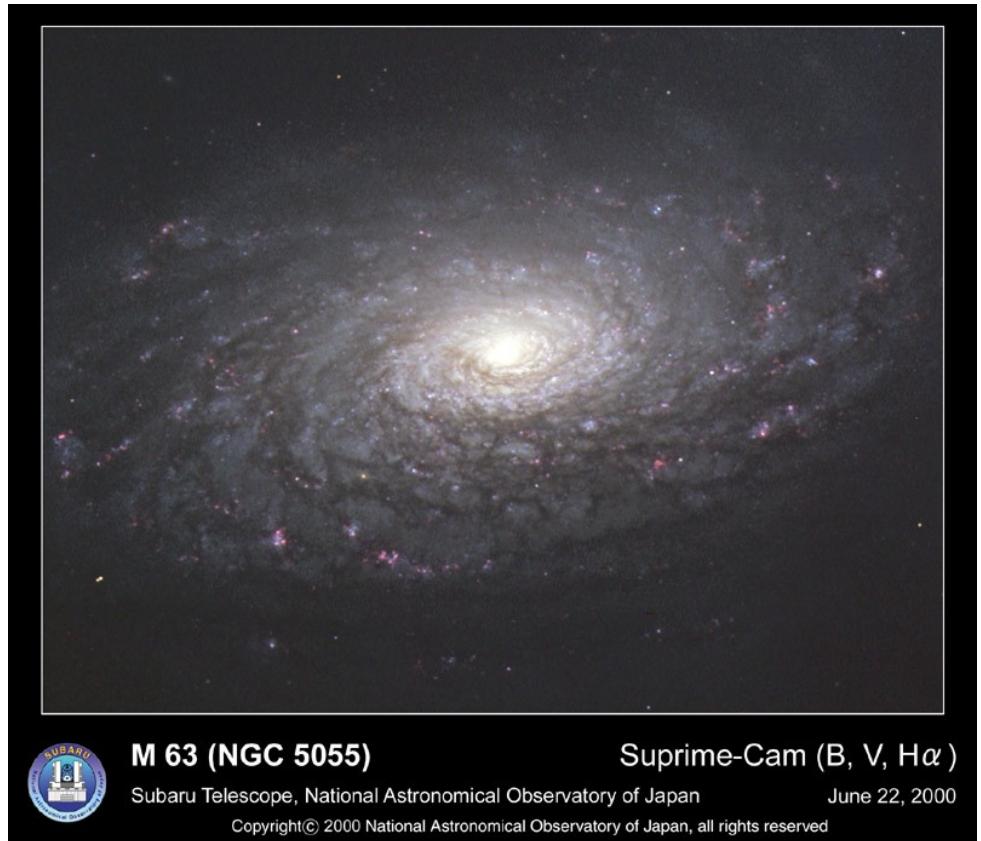
空間分布(galaxies)

宇宙の大きさ: $1/(1+z)$



銀河内部では何が起きているのか？

- よくわからないこと
 - 星形成（ガス→星）
 - 超新星フィードバック
- 星がどうやってできるか、がよくわかつていない
 - 小質量の単体の星が、「分子雲コア」からどうできるかが、ある程度わかつてきた、という段階
- 現実には星はできているので、少し考察してみよう



ガスの行く末

- 銀河内のガスは、一様に分布しているわけではない
 - 濃淡がある
- 濃いところ(ガス雲)では、自らの重力で収縮をはじめる(自己重力)→恒星は、自己重力と圧力勾配が釣り合った状態
- 濃いと原子同士が衝突しやすいので、分子ができる
 - 「分子雲」→暗黒星雲
- 分子雲内の特に濃いところ(分子雲コア)で星ができる
- しかし、この一連の流れはまだよくわかつていない

星間ガス雲

星ができた!

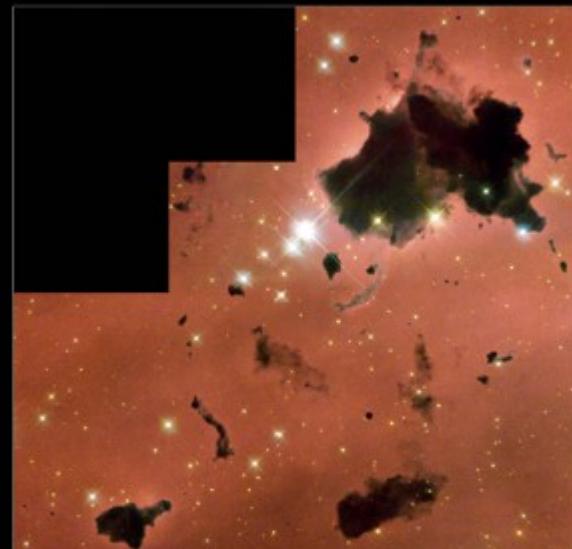
Horsehead Nebula



Hubble
Heritage

opt

Thackeray's Globules in IC 2944



Hubble
Heritage

Bok Globules in NGC 281



NASA, USA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC02-01
Hubble Space Telescope ACS • STScI-HSC06-03

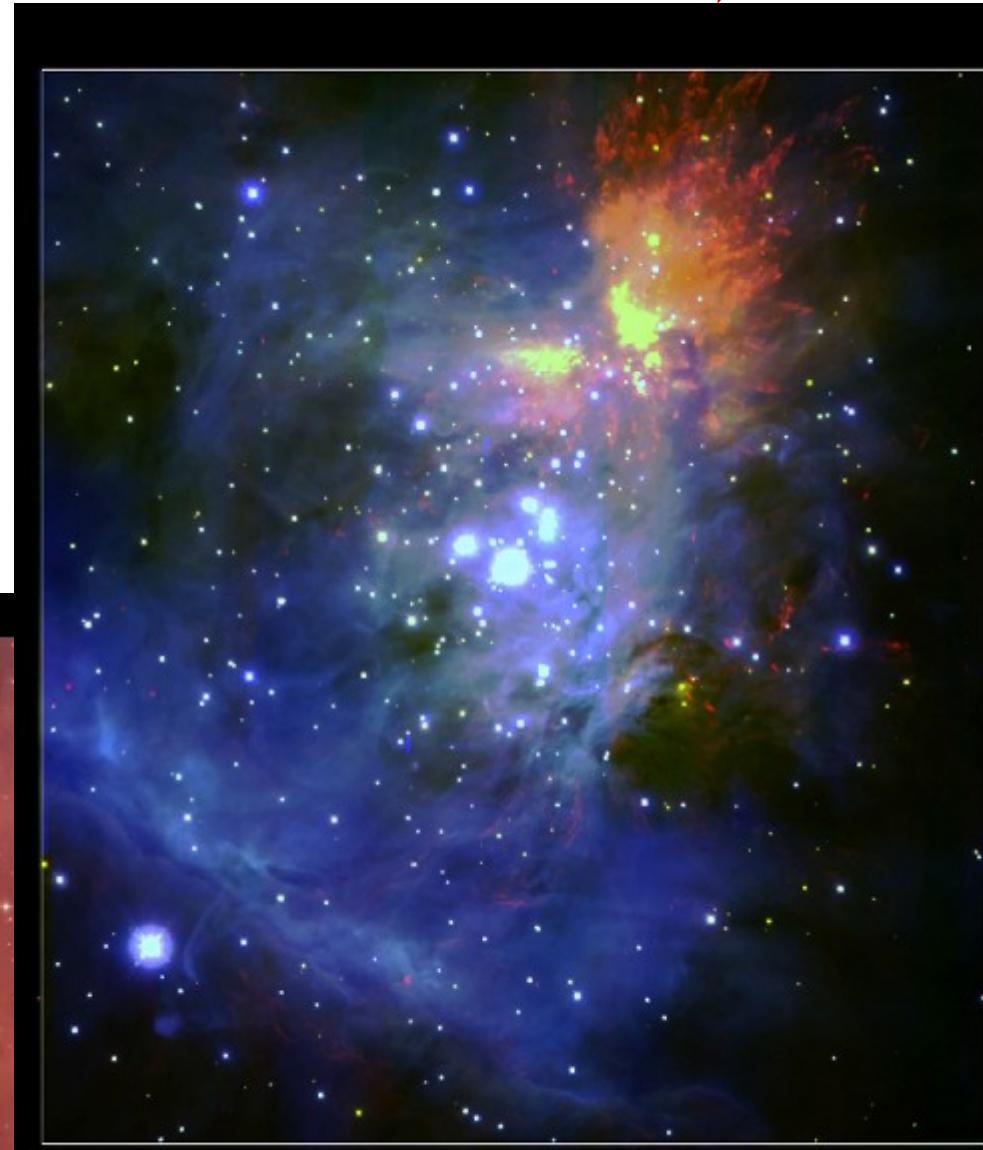


Orion Nebula

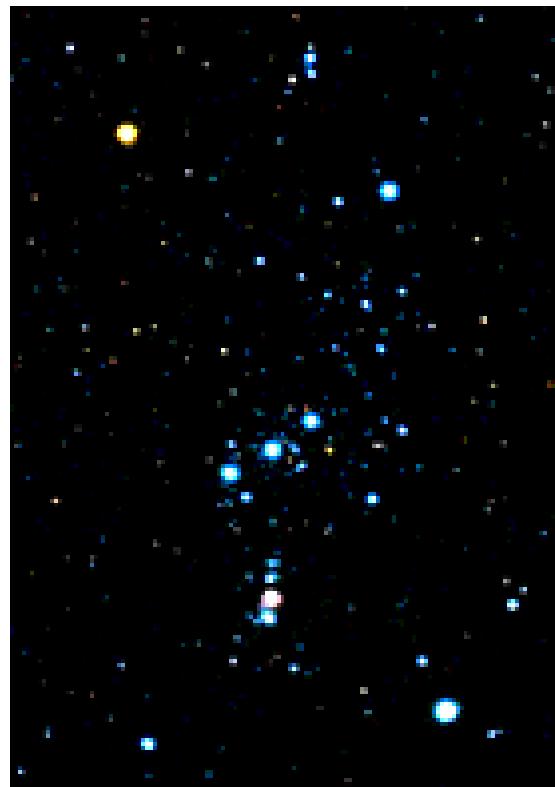
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K' & H₂ (v=1-0 S(1))

January 28, 1999

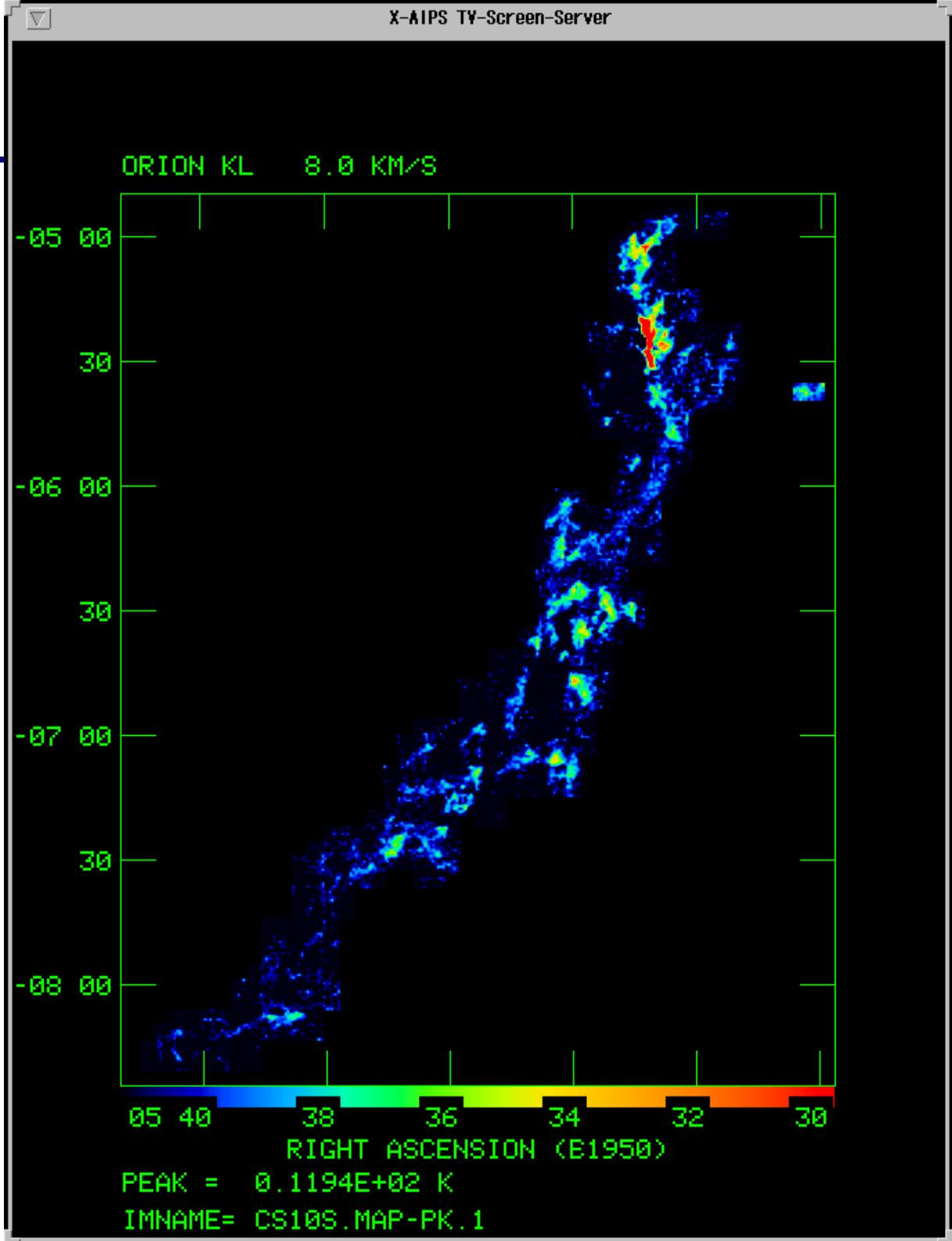


分子雲(電波)



(野辺山のwebより)

野辺山45m
(立松さんのwebより)



様々な星間ガス雲

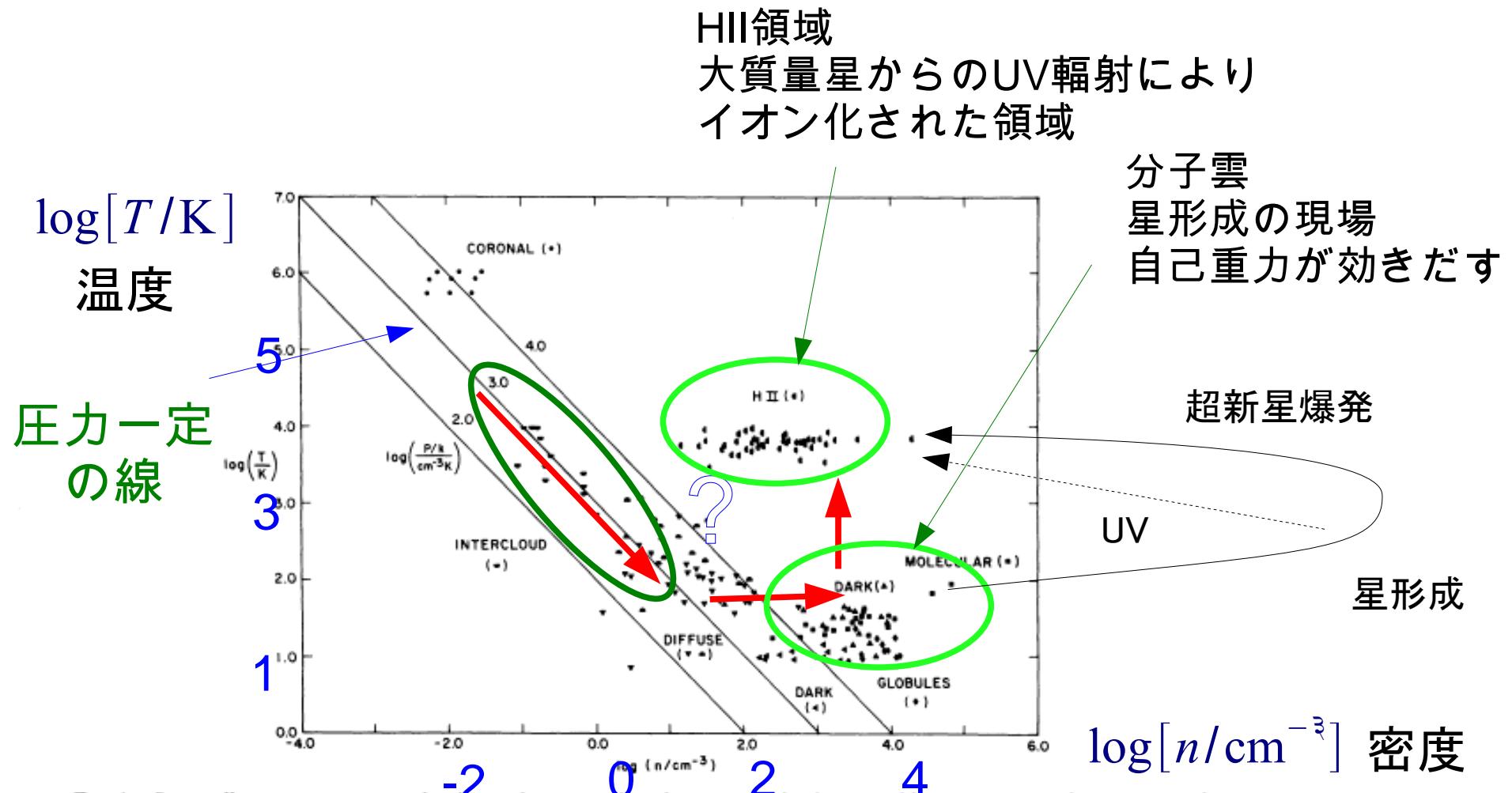


FIG. 1.—Interstellar gas temperature, density, and pressure, based on seven galactic spectral line surveys. Circles, representative points for coronal gas observed in 1032 Å O VI line, based on filling factor $f_c = 0.1, 0.2, \text{ and } 0.4$, and on $n(T)$ power-law exponent $\eta = 0.0, 0.5, \text{ and } 1.0$; semicircles pointing down, intercloud gas observed in 21 cm H I line; semicircles pointing up and triangles pointing down, diffuse clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing up, dark clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing left, dark clouds observed in 2.6 mm CO lines; diamonds, Bok globules observed in 2.6 mm CO lines; squares, molecular clouds associated with nebulosity, observed in 2.6 mm CO lines; semicircles pointing left, H II regions observed in 6 cm H109α line and 6 cm continuum.

Myers (1978)
47

分子雲の性質？

- 分子雲ができれば、星はなんとかできそう
- 分子雲は銀河のあちこちにある
- どうやってできる？圧縮してやればよい？
 - 水素ガスと分子ガスの濃いところは大体一致している
- どこで？→渦巻きの「腕」？超新星爆発でかき集める？
- 銀河系一周はだいたい2億年
- ところが、分子雲は「ほっておけば」100万年程度で重力でつぶれてしまう
 - ガスの1%程度だけが星になる？→分子雲を超新星爆発で壊さず、1億年維持？
 - 磁場などで1億年支える？
- 混沌としている。これからの課題。

$$\tau_{ff} \simeq 10^4 \left(\frac{n}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

まとめ

- タイムスケールの違いに注目しよう
 - 宇宙年齢 ~ 100 億年
 - ハローでの冷却・降着 ~ 10 億年 (サイズにもよるが)
 - 銀河の回転 ~ 1 億年
 - 超新星爆発(大質量星の寿命) ~ 100-4000 万年
 - ガス・分子雲 ……?
- 星の集団としての銀河
 - 大質量星は青く短寿命 → 超新星フィードバック
 - 小質量星は赤く長寿命 → 長く生き残る
⇒ 星の集団は、ガスが供給され星ができなければ、だんだん赤くなる
- 合体
 - ダークマターハローは合体をくりかえす
 - その内部の銀河も、合体をくりかえす
- 冷却・星形成・超新星爆発・加熱(フィードバック)というサイクルを繰り返し、合体成長していく