

銀河形成研究の最前線：「自称」若手研究者のビジョン
2008/2/13-15

銀河形成と星形成をつなぐ ～森と木は同時に見えるか～



東大天文センター
小林 尚人



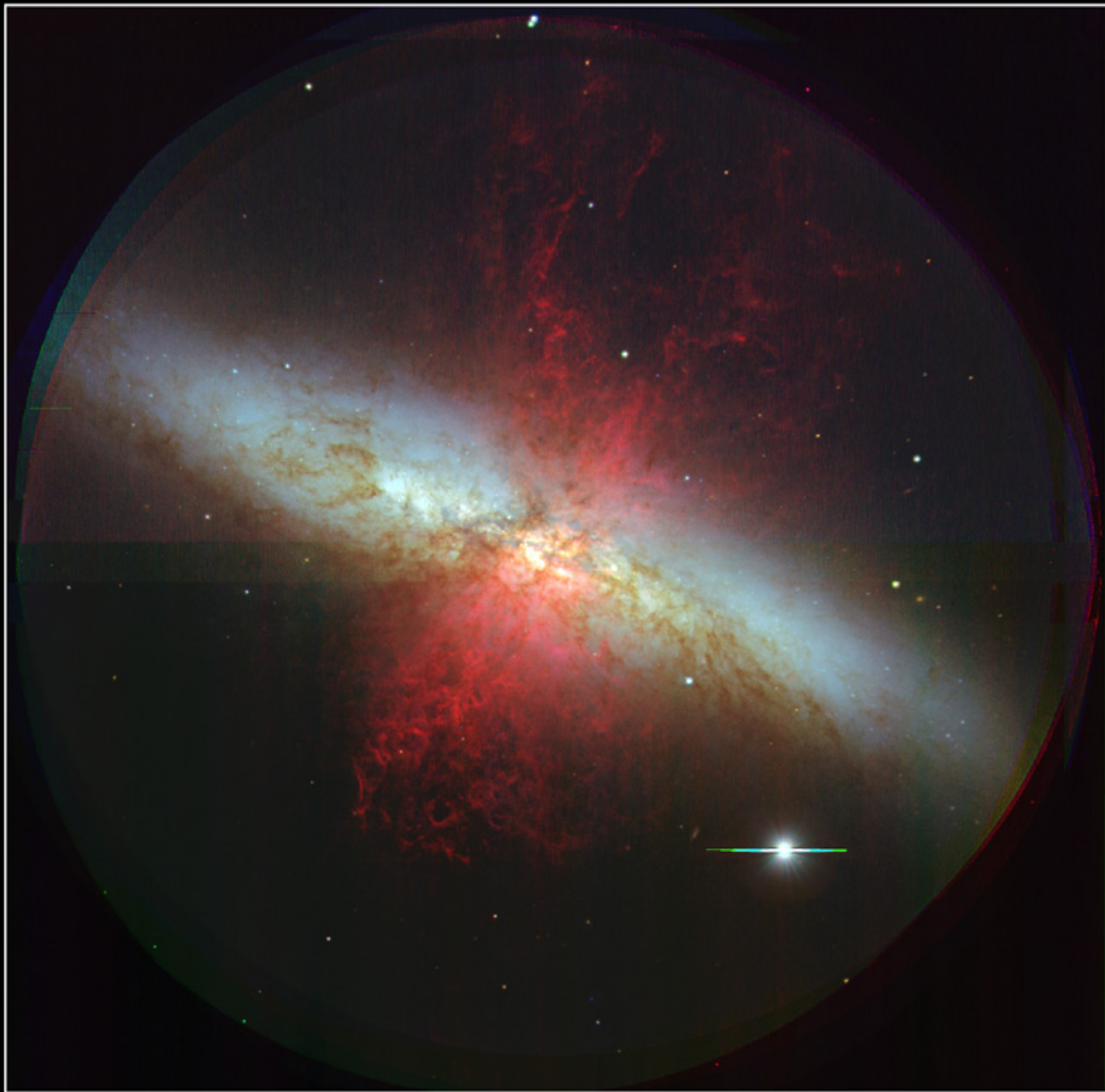
内容

0. 森と木の関係？ 象徴的な話

1. ストレートな話 高分解能観測

2. 近くに過去の名残を見る Outer Galaxy

3. 過去を拡大してみる 重カレンズ QSO 吸収線系



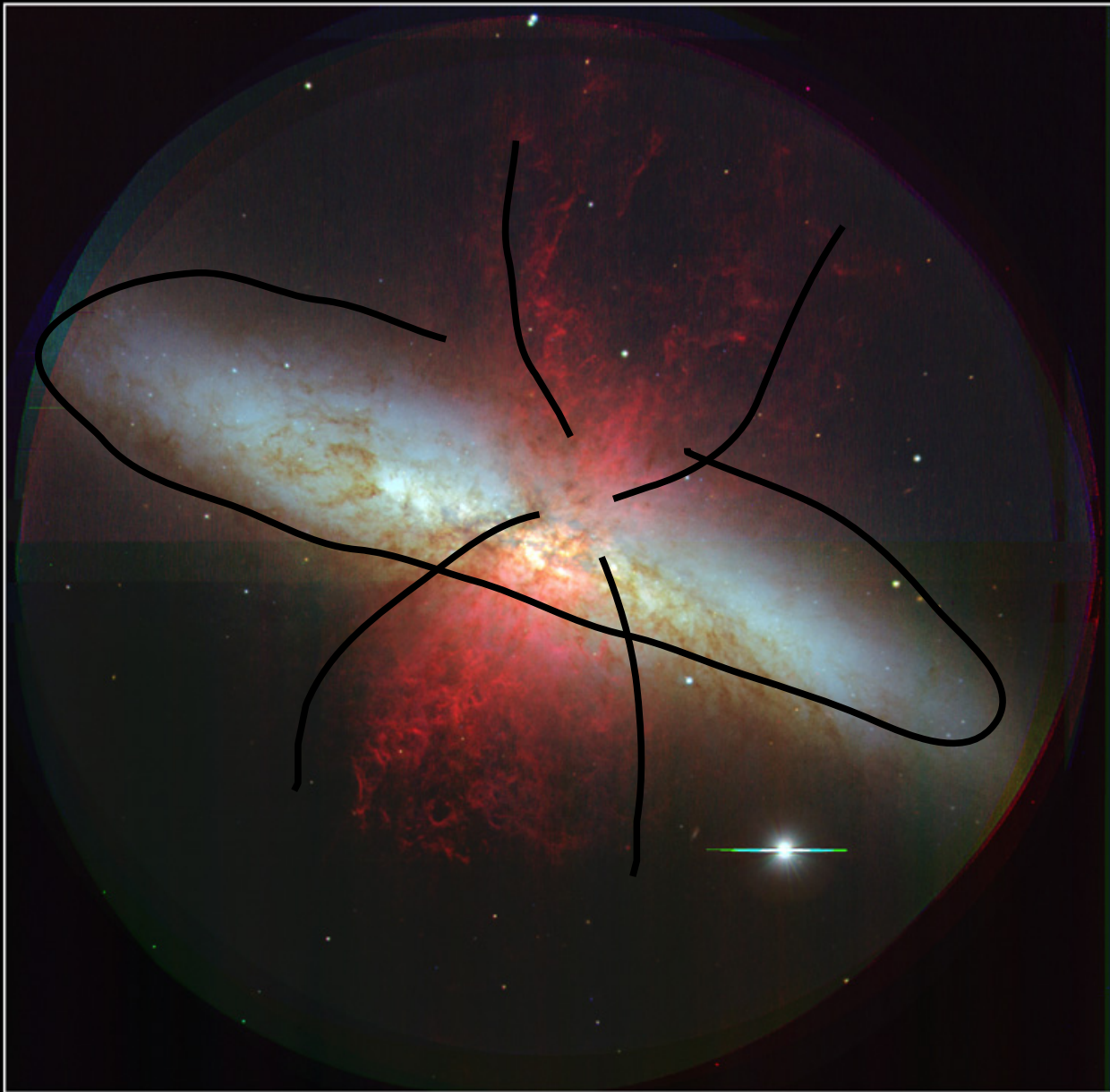
M 82 (NGC 3034)

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



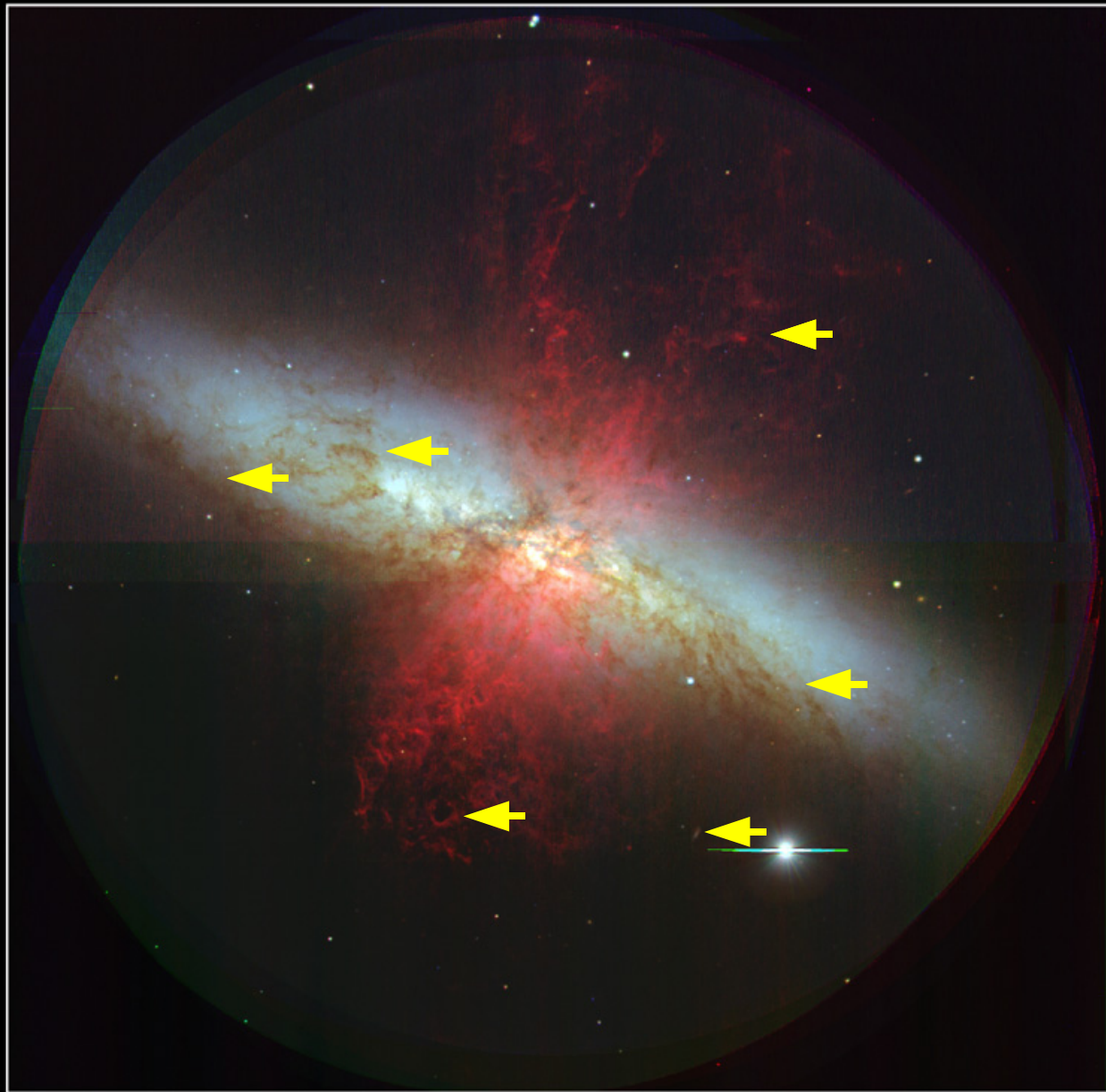
M 82 (NGC 3034)

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



M 82 (NGC 3034)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

FOCAS (B, V, H α)

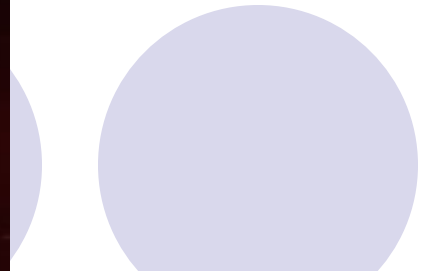
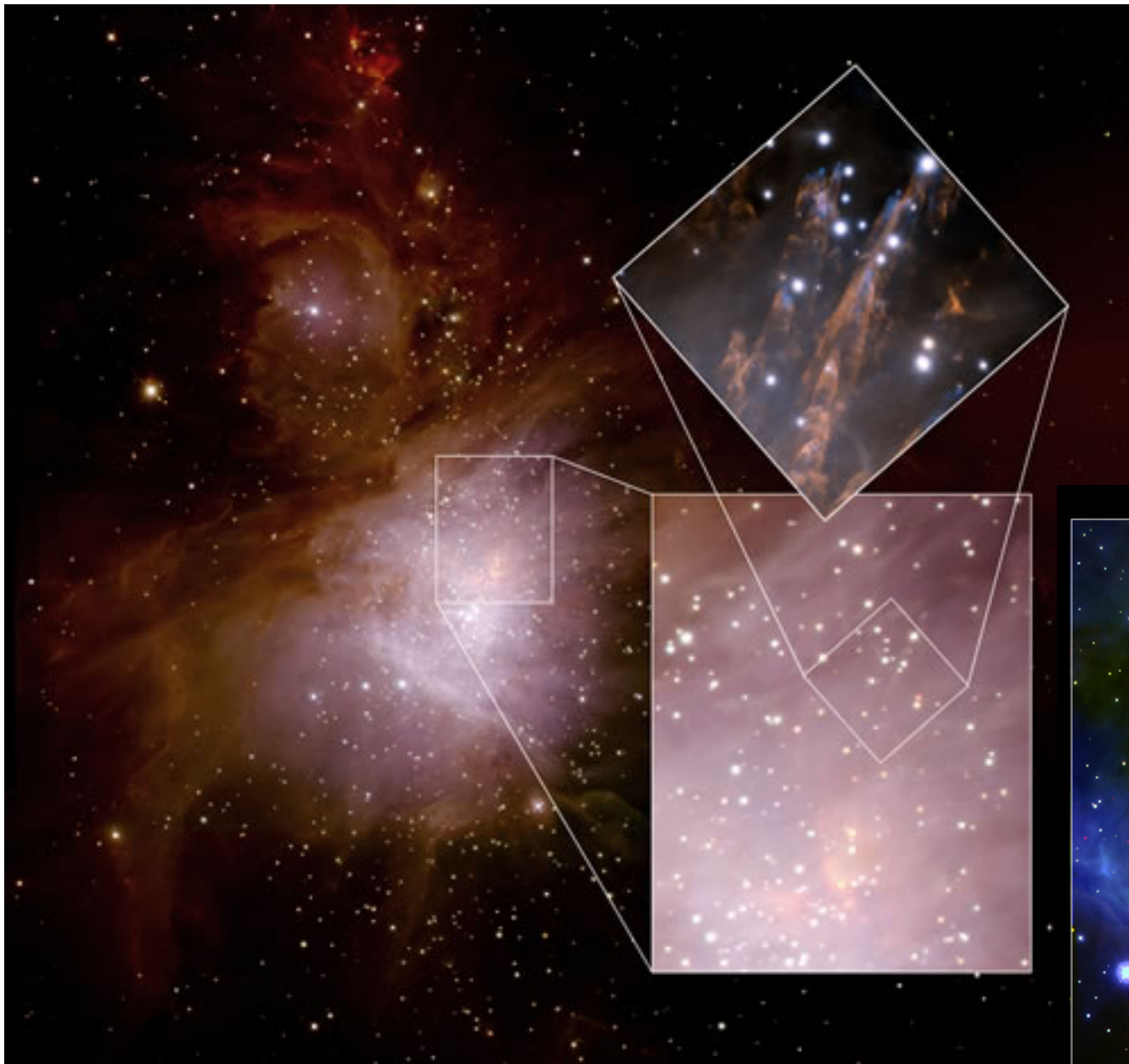
March 24, 2000

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



Orion

GEMINI
LGS-AO
First Light

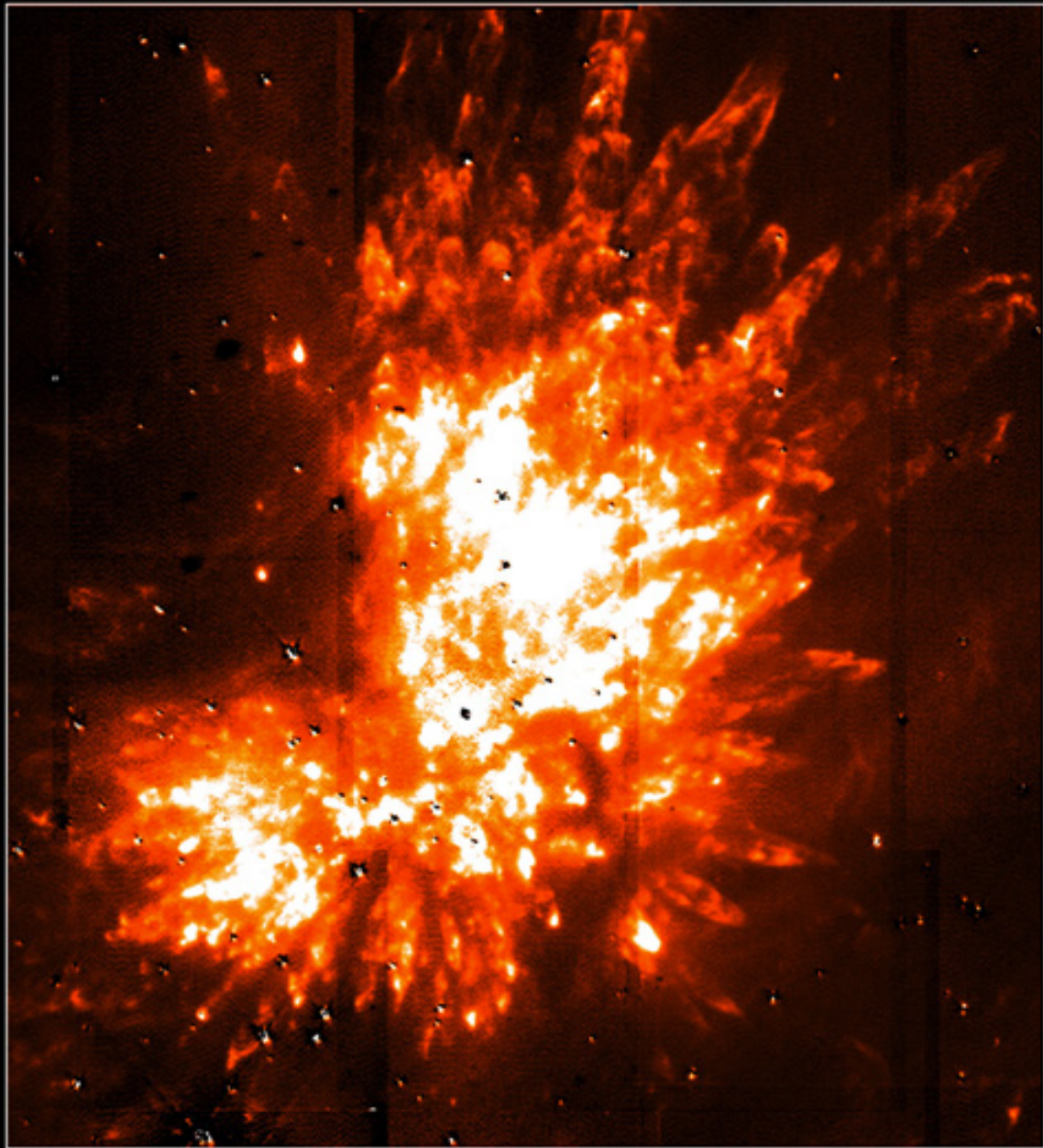


Orion Nebula

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K' & H₂ (v=1-0 S(1)))

January 28, 1999

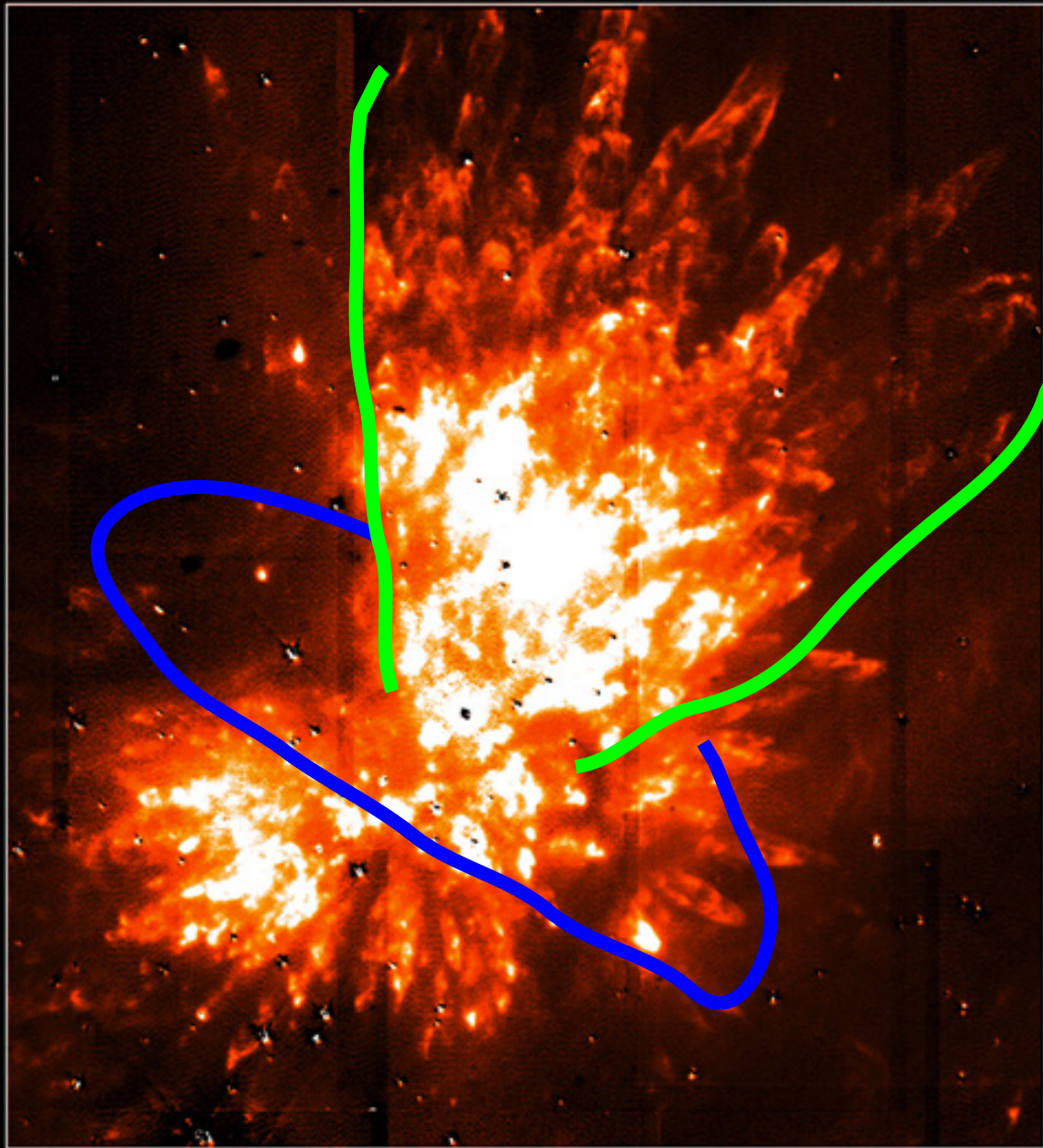


Orion KL

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (H₂ (v=1-0 S(1)) – Cont)

January 28, 1999



Orion KL

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (H₂ (v=1-0 S(1)) – Cont)

January 28, 1999

ある格言・・・

**「何事もできるだけ単純にしなければならない
が、単純化しすぎてもいけない」**

Einstein

銀河スケールから星のスケールへ（現在）

- Kennicutt–Schmidt Law

300–500pc スケールまで Kennicutt+ 2007, Calzetti+ 2007

- “Universal” IMF

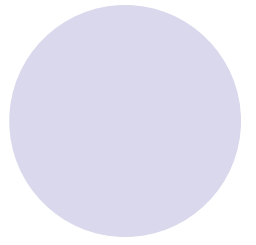
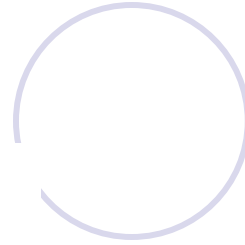
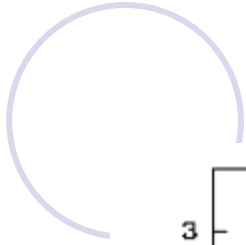
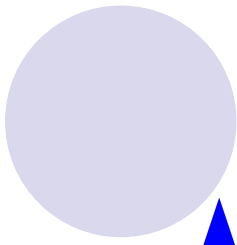
1次近似としては正しそう e.g., Kroupa 2002, Lada&Lada 2000

- Log-normal 密度個数分布 Wada, Norman 2001

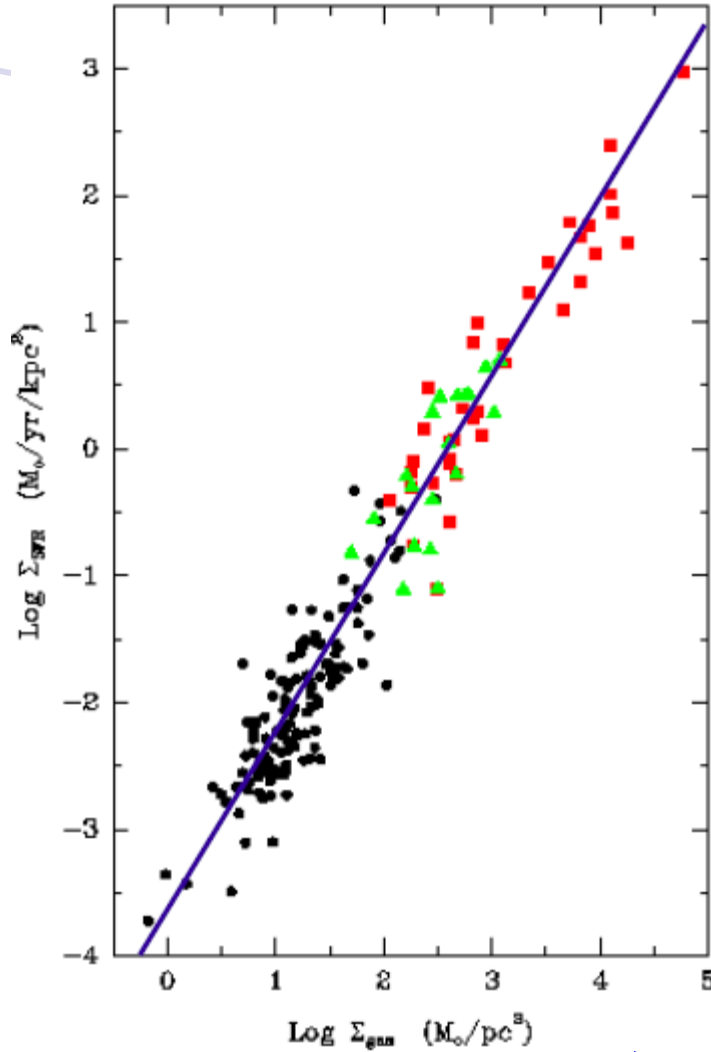
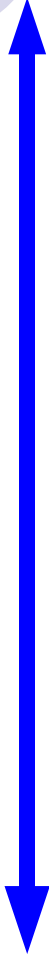
- 10pc scale 以下は？

散逸構造としての銀河とは無関係のただのディテール？

「ミクロとマクロをつなぐ”（非平衡）統計力学”は？」



7 桁



Kennicutt+ 2007

5 桁



銀河形成スケールから星形成スケールへ

過去をみる必要がある…

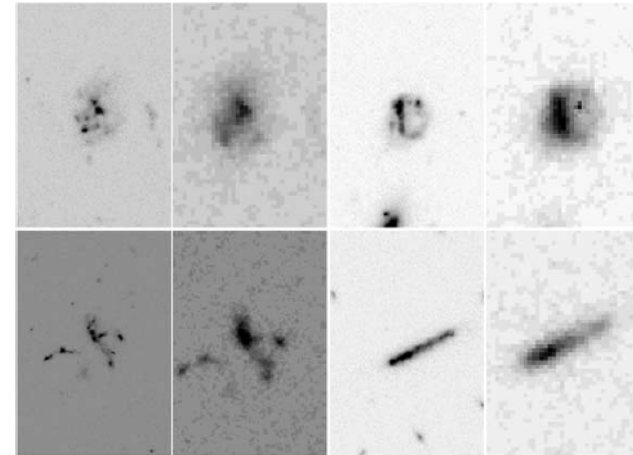
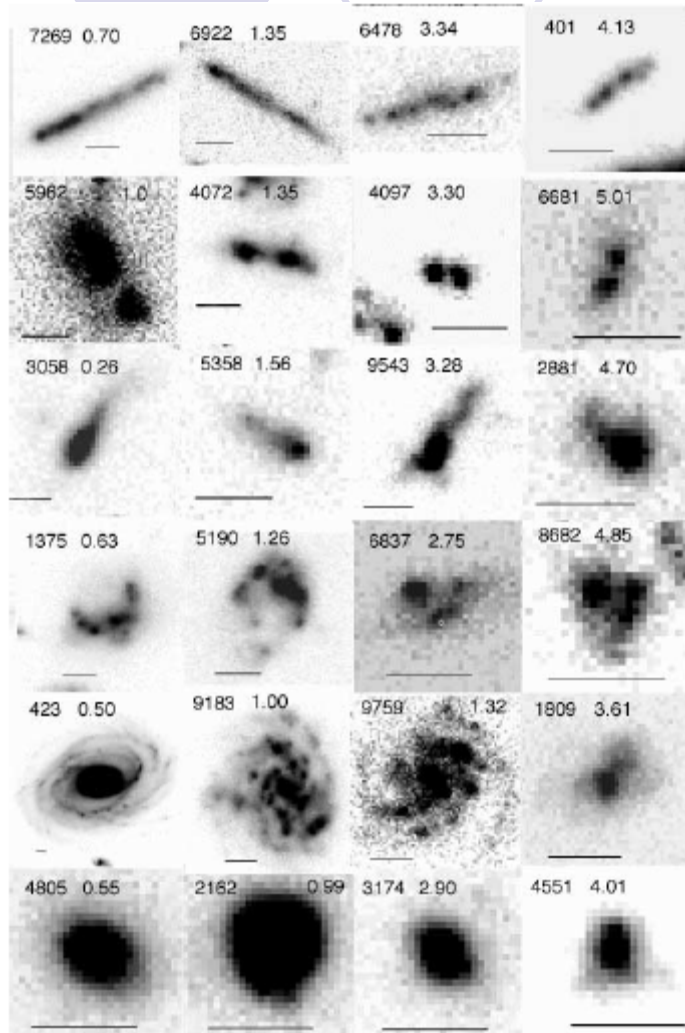
1. ストレートな方法

- 形成中の遠方銀河を高空間分解する
- 近赤外線（Rest-frame 可視） **星で”銀河の骨格”をみるため**

● **HST→Space 近赤外？** 最終的には JWST

● **地上 A0** **これからの流れの中心**

Superb images from Space

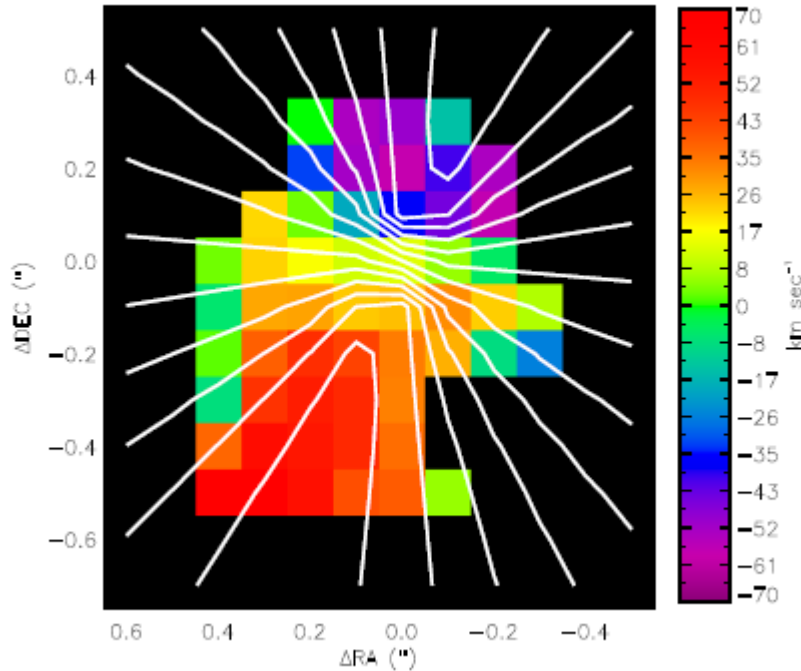


$Z < 5.5$ galaxies
by Hubble ACIS/NICMOS
(Elmegreen+ 2007 ApJ)

Clumpy disk dominance over $z=0-5.5$

most star formation occurs by self-gravitational collapse of disk gas

地上 AO : Beyond z=1



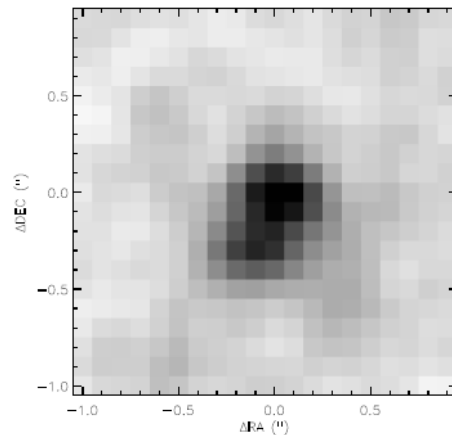
Q2334-BM133

Forming galaxy disk at $z=1.5$

by Keck OSIRIS

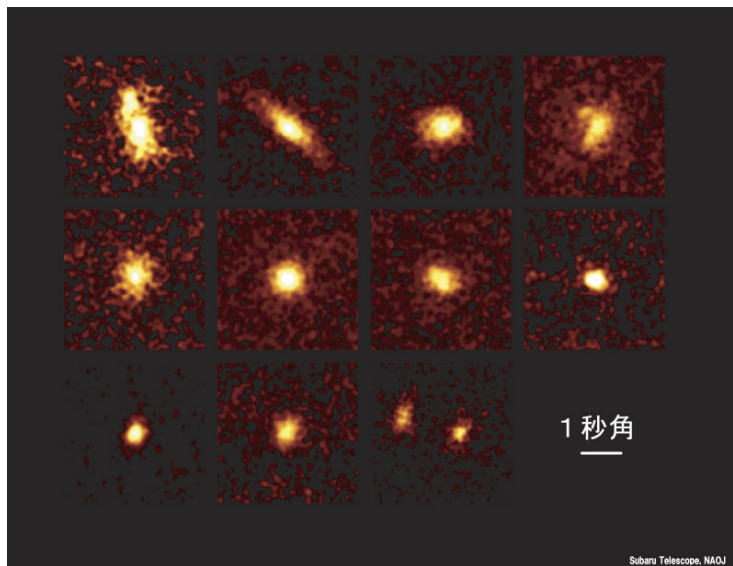
(Wright+ 2007 ApJ)

Resolution $0.1'' \sim 900\text{pc}$



Resolution $0.2'' \sim 1.8\text{ kpc}$

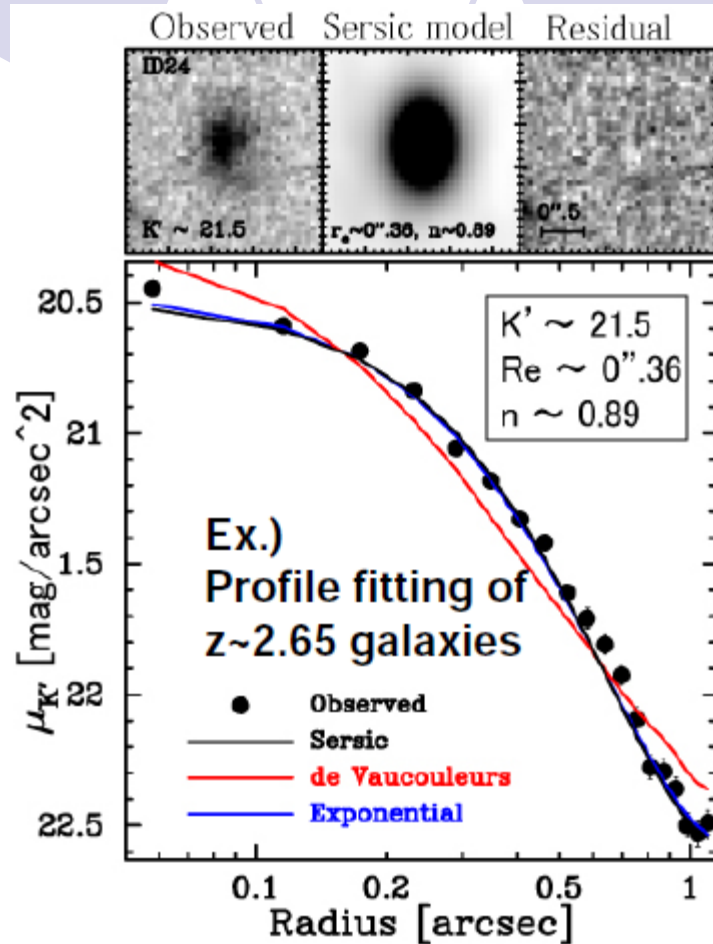
地上 AO : z=3 へ ファーストステップ



Z~3 LBGs
by Subaru AO+IRCS
(Akiyama+ 2008 ApJS)

disk galaxy dominance
high-stellar density disk

Resolution 0.1'' ~ 800 pc

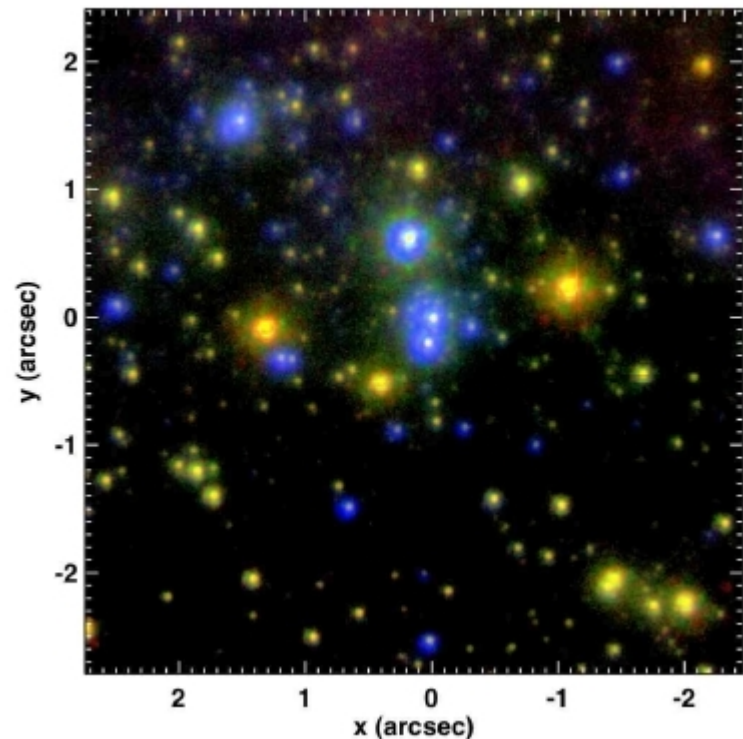


Z~3 galaxy in SSDF
by Subaru AO+IRCS
(Minowa+ 2008, in prep)

地上 A0 による系外銀河中の星生成 (現在)

星を分解(距離 1Mpc まで)

Resolution $\sim 0''.05$



IC10 with Keck LGSAO
(Vacca+ 2007 ApJ)

A0 でどこまで届くか？

典型的なクラスターの星平均距離 0.1pc

距離	500 pc	10 kpc	1 Mpc	5Mpc	
角度	40''	2''	0''.02	0''.004	
分解能	8''	0''.4	0''.004	0''.001	
			8m	30m	100m

銀河形成スケールから星形成スケールへ

過去をみる必要がある（大変・・・）

2. 「近くに過去の名残を見る」

- **Disk 銀河の outer galaxy 領域**
とくに **our Galaxy**
- **LSB 銀河**（今回は省略・・・）
gas-rich dwarfs

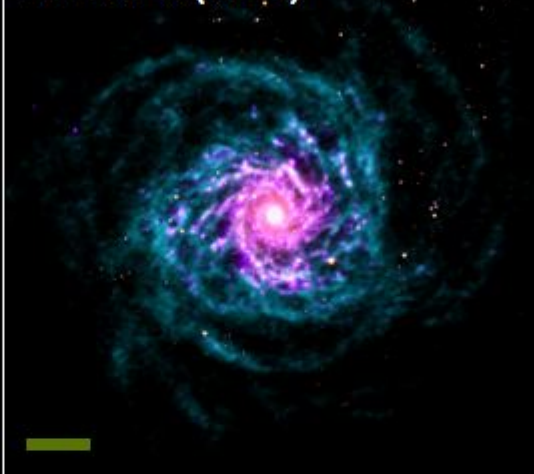
cf. Galactic Archeology とは違うが
Near-field Cosmology とは言えるもの？

Spiral Galaxies in THINGS — The HI Nearby Galaxy Survey

NGC 5055 (M 63)



NGC 628 (M 74)



NGC 3031 (M 81)



NGC 5194 (M 51)



THINGS

The HI Nearby
Galaxy Survey

color coding:

THINGS Atomic Hydrogen
(Very Large Array)

Old stars

(Spitzer Space Telescope)

Star Formation

(GALEX & Spitzer)

scale: 

15,000 light years



Image credits:

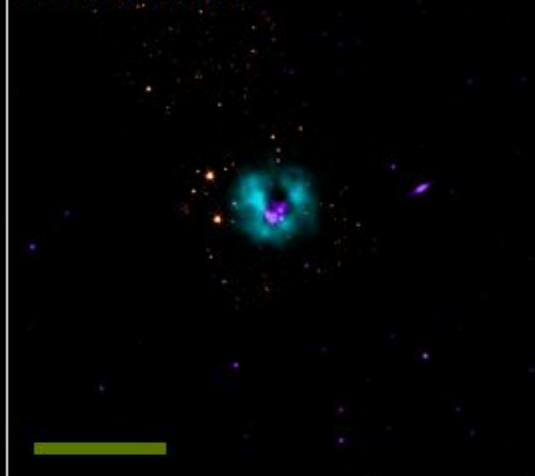
VLA THINGS: Walter et al. 08

Spitzer SINGS: Kennicutt et al. 03

GALEX NGS: Gil de Paz et al. 07

Dwarf Galaxies in THINGS — The HI Nearby Galaxy Survey

M 81 dwarf A



Holmberg I



Holmberg II



IC 2574



THINGS



color coding:

THINGS Atomic Hydrogen
(Very Large Array)

Old stars

(Spitzer Space Telescope)

Star Formation

(GALEX & Spitzer)

scale: 

15,000 light years



Image credits:

VLA THINGS: Walter et al. 08

Spitzer SINGS: Kennicutt et al. 03

GALEX NGS: Gil de Paz et al. 07

Galaxy Dynamics in THINGS — The HI Nearby Galaxy Survey

NGC 2403 — Gas and Stars



THINGS

The HI Nearby
Galaxy Survey

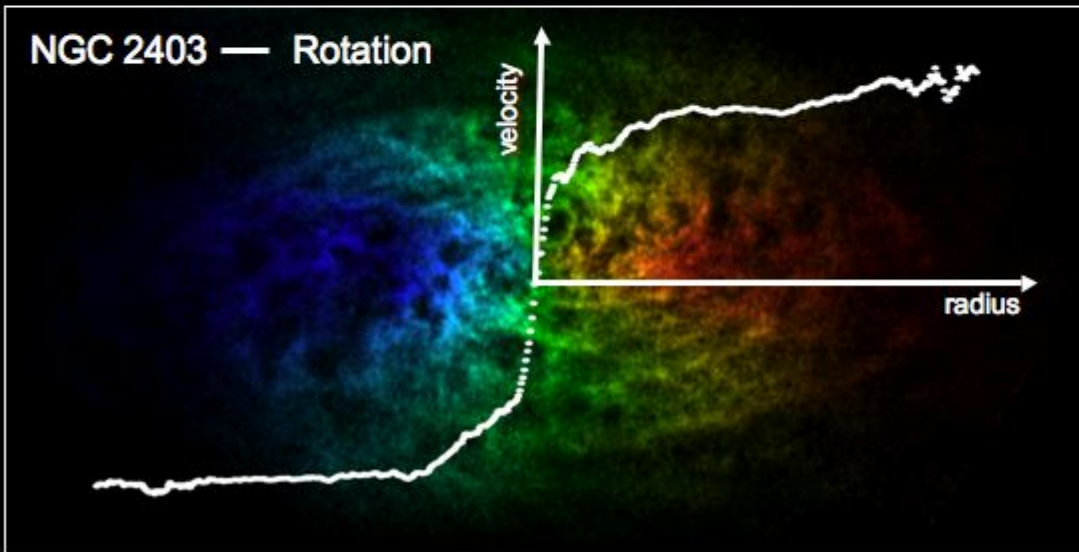
Color Coding:

THINGS Atomic Hydrogen
(Very Large Array)

Old stars
(Spitzer Space Telescope)

Star Formation
(GALEX & Spitzer)

NGC 2403 — Rotation



Color coding:

THINGS HI distribution:

Red-shifted (receding)

Blue-shifted (approaching)

— Rotation Curve



Image credits:

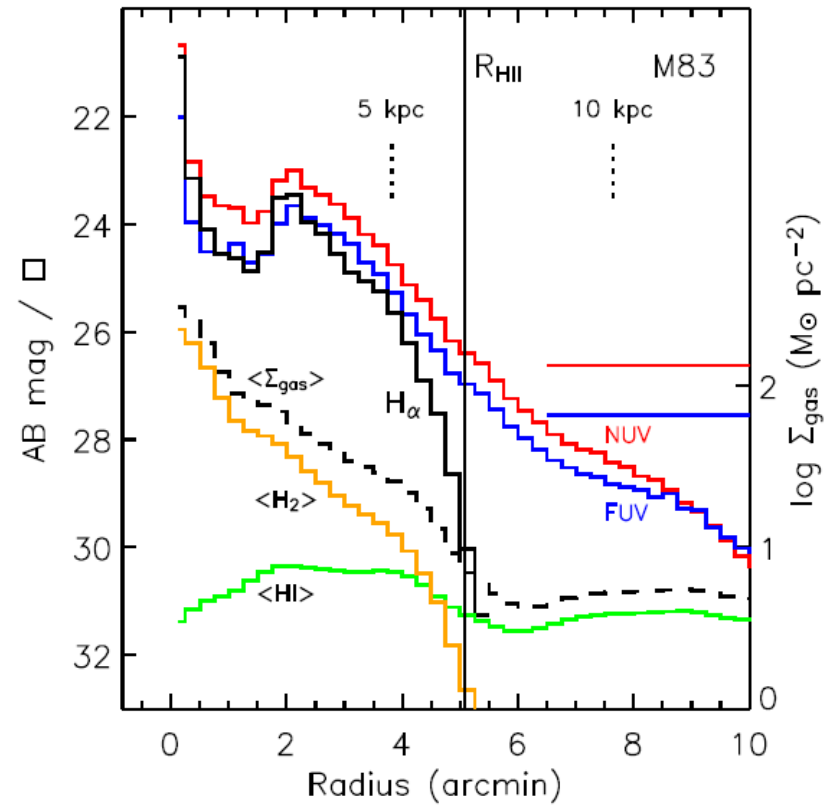
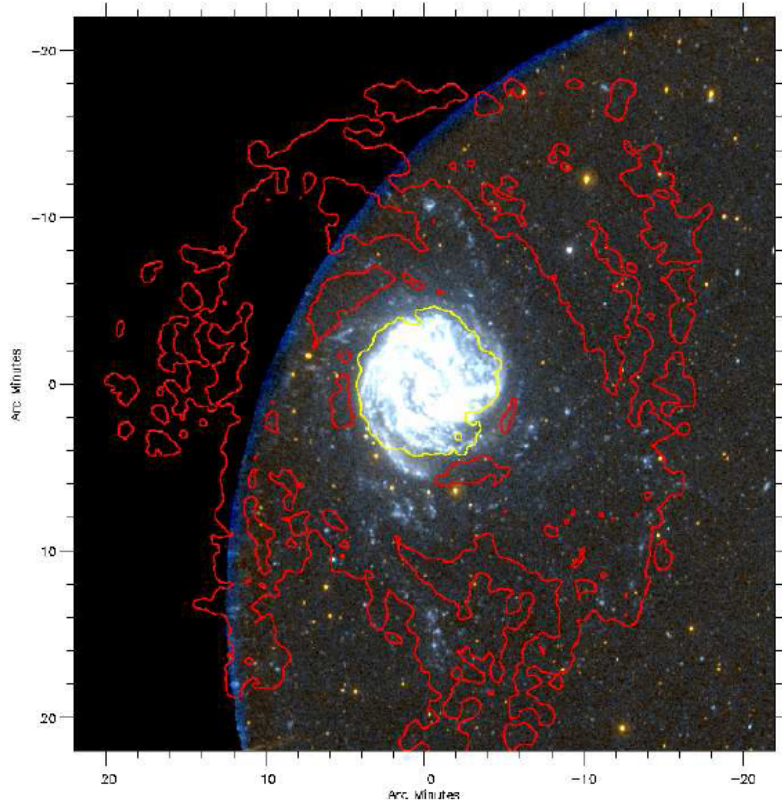
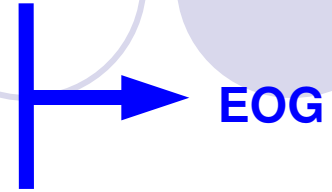
VLA THINGS: Walter et al. 08

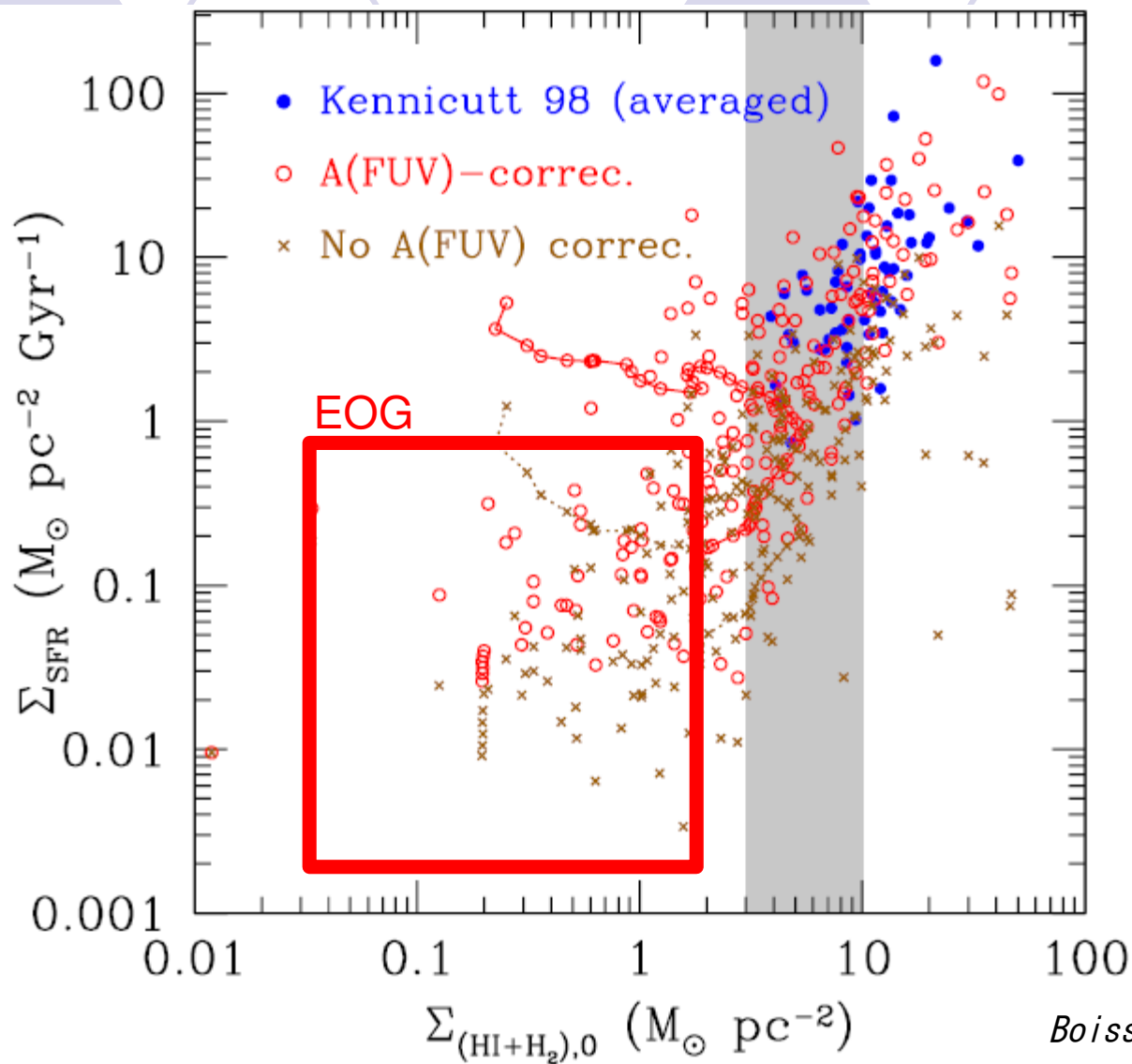
Spitzer SINGS: Kennicutt et al. 03

GALEX NGS: Gil de Paz et al. 07

Rotation Curve: de Blok et al. 08

GALEX XUV (EXTENDED UV emission) の発見

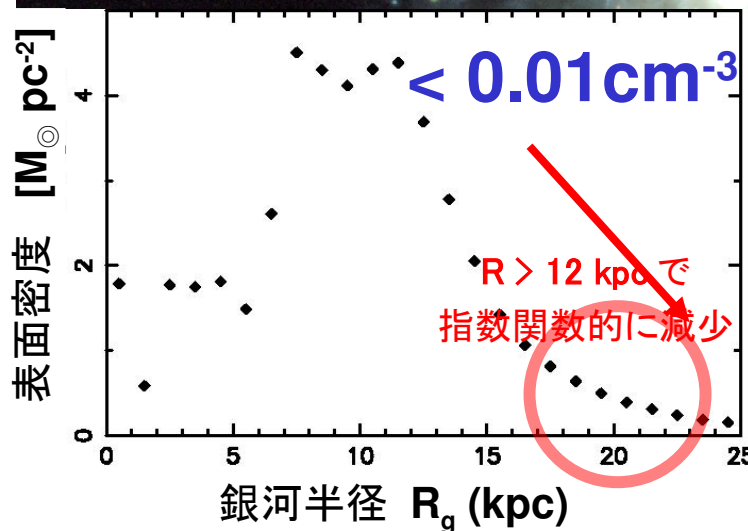




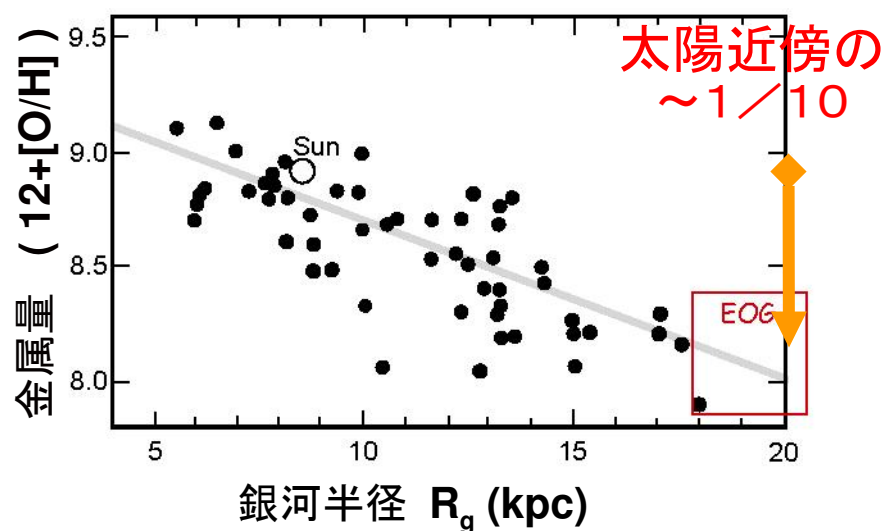
Sub-critical density での星生成はどのように起こる？

<研究意義>

銀河最外縁 (EOG: Extreme Outer Galaxy)



Nakanishi & Sofue 2003



Smartt & Rolleston 1997

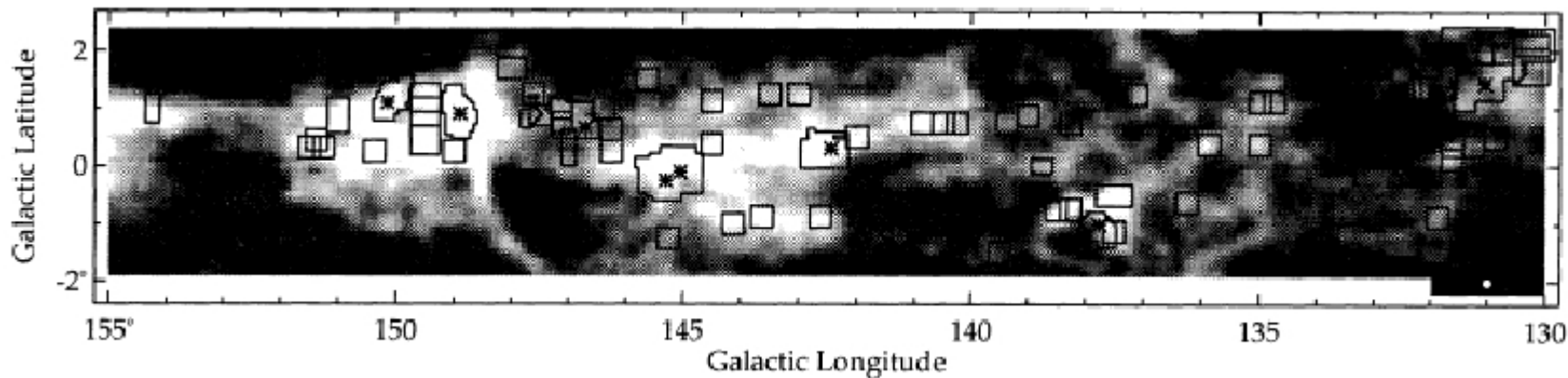
<銀河系最外縁の探査>

系統的な星生成領域探査 電波ベース(北天)

初の最外縁部分子雲探査

Digel, De Geus, Thaddeus 1994 ApJ

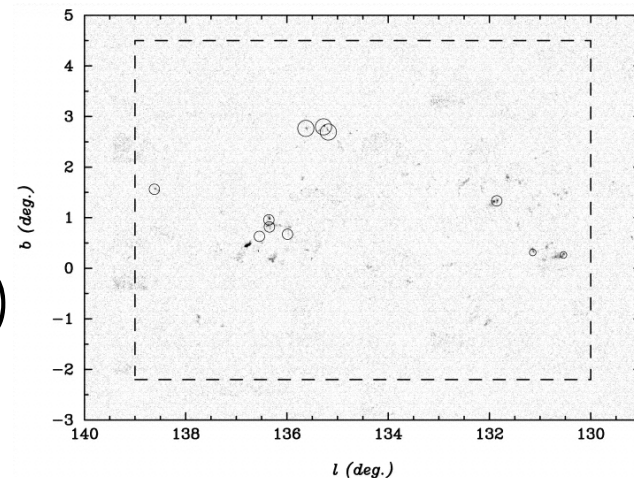
● $R_g > 20\text{kpc}$ 分子雲の発見



銀河系外縁部星生成領域探査

Snell+ 2002 ApJ

- FCRAO CO (1-0) とKバンド撮像
- Outer arm 付近 ($15 < R_g < 18\text{kpc}$) では分子雲からの星生成効率は通常 ($\sim 10\%$)
- 分子雲自体の生成効率が悪いだけか？



<研究の意義>

銀河系最外縁の研究意義

Kobayashi+ 2008, ApJ

✓それ自体への興味

- 銀河の果てはどうなっている？(ダークハロー 200–300kpc)

✓銀河形成期の星生成への示唆 銀河形成への側面

- 矮小銀河や高赤方偏移 DLA と同じ環境
- とくに thick disk 形成期(~90 億年前)をトレースか
- Sub-critical density での星生成
SNR-triggered, HVC-disk collision

✓星生成研究の理想的実験場 星形成への側面

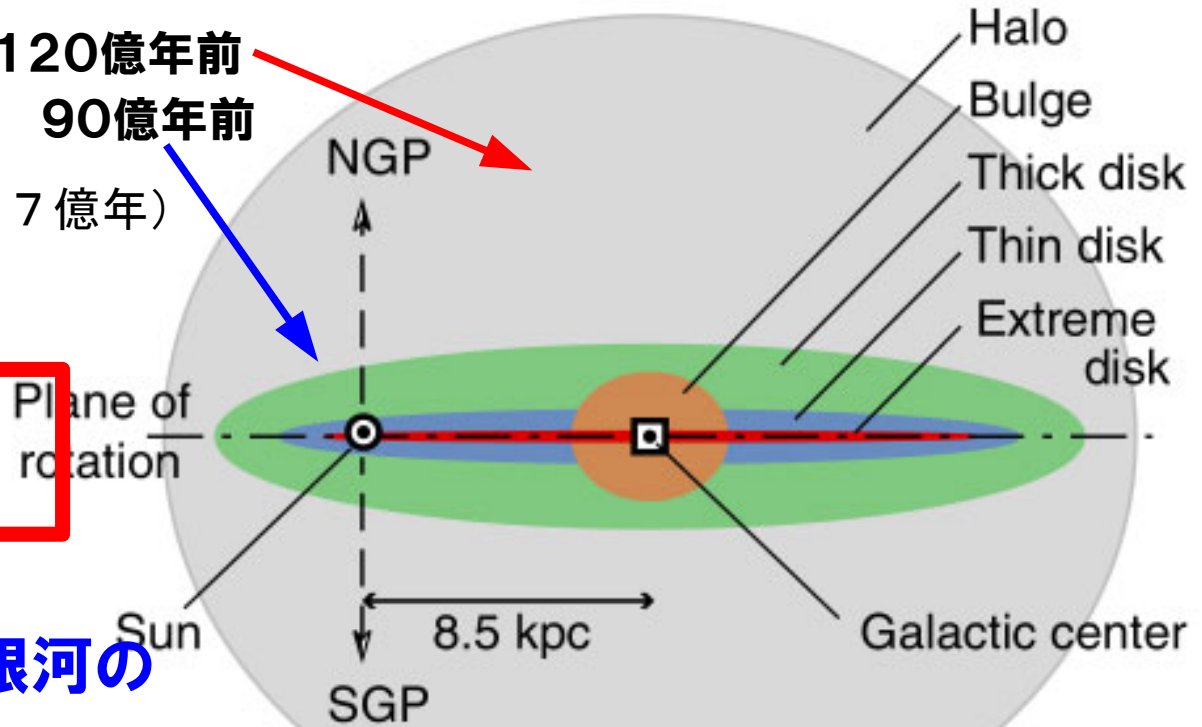
- 低金属量、低密度、密度波なしでの星生成
- 渦状腕周辺の複雑さが無い(空間、時間的に”単純”)

<銀河形成研究の実験場> 銀河系形成期を見る

ハローの形成 120億年前
ディスクの形成 90億年前

(宇宙の年齢 137億年)

EOG



1. 銀河系と系外銀河の
"ニッチ"エリア

2. SNRトリガーの星生成が支配的だろう

Audouze & Shilk 1995 ApJ

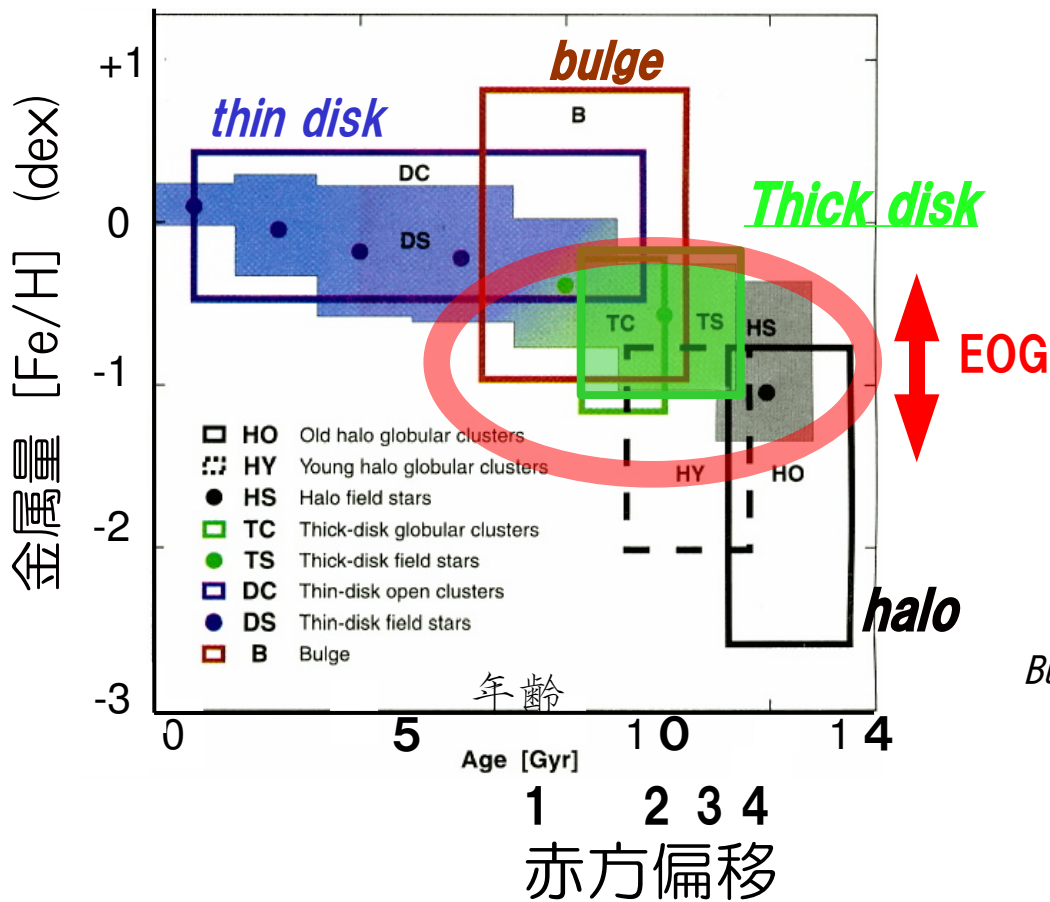
Shigeyama & Tsujimoto 1998 ApJ

Buser 2000
Science

<銀河形成研究の実験場>

“銀河形成期”の星生成を見る

銀河系の進化



Buser 2000, Science
を改編

<星生成研究の実験場>

近赤外による研究

—星形成研究の根幹—

■ すばる近赤外 deep survey (IRCS および MOIRCS)

MOIRCS 共同利用観測

S06B 近赤外深撮像

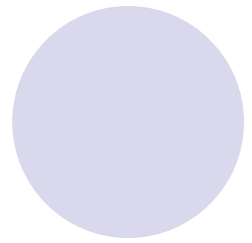
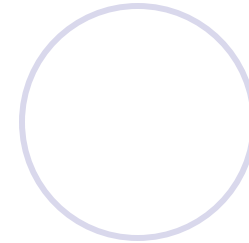
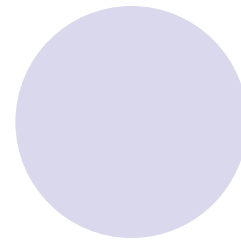
($K > 20$)

S07B 近赤外多天体分光

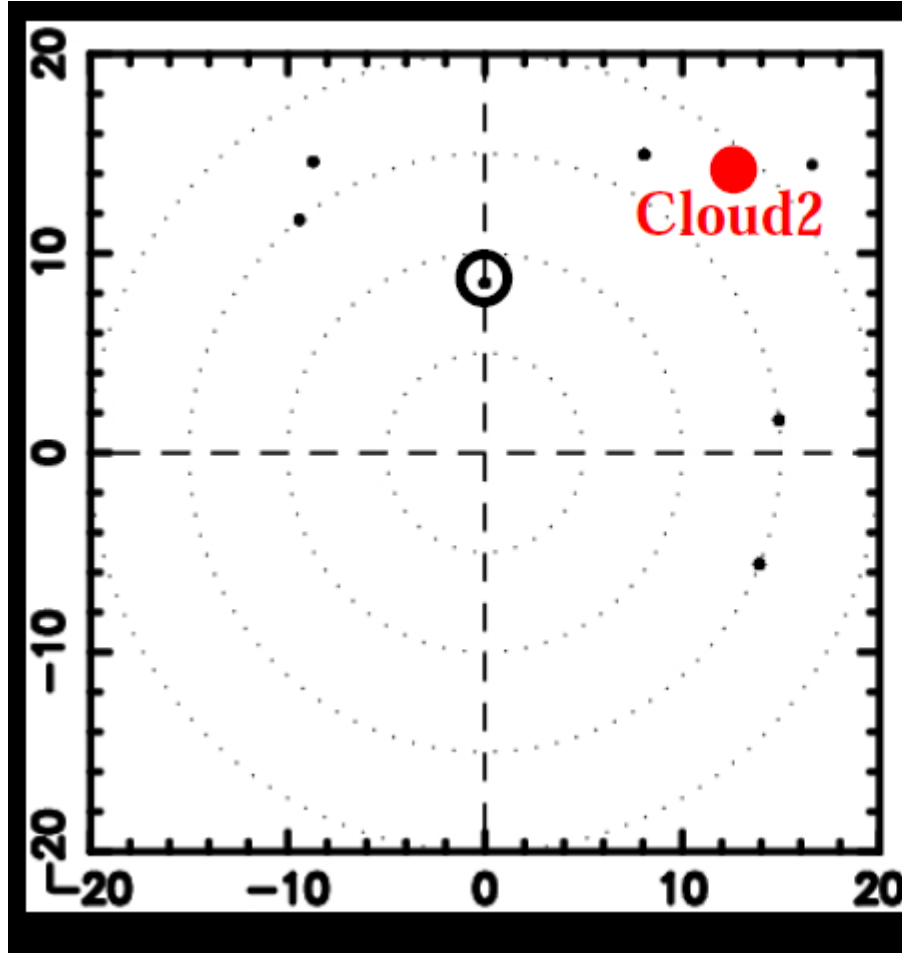
S07B サービス観測 近赤外深撮像 (supplemental)

低金属量下の
星生成の研究
(安井 D 論)

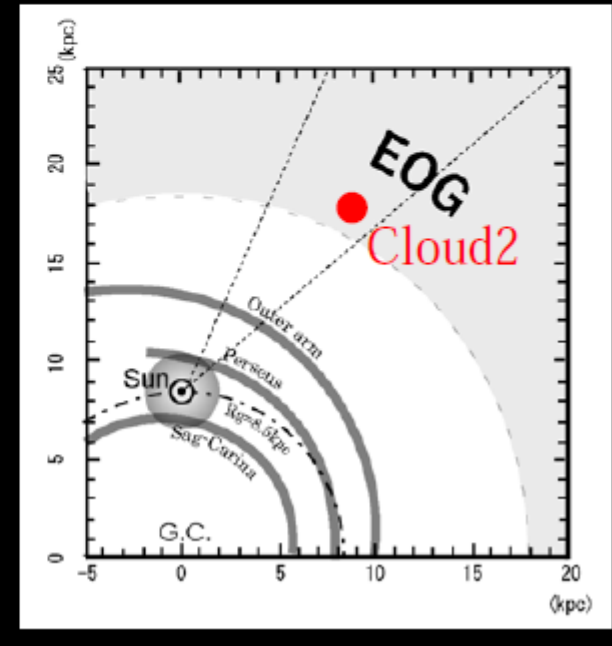
<星生成研究の実験場> (例) Digel Cloud 2



MOIRCS (JHKs)

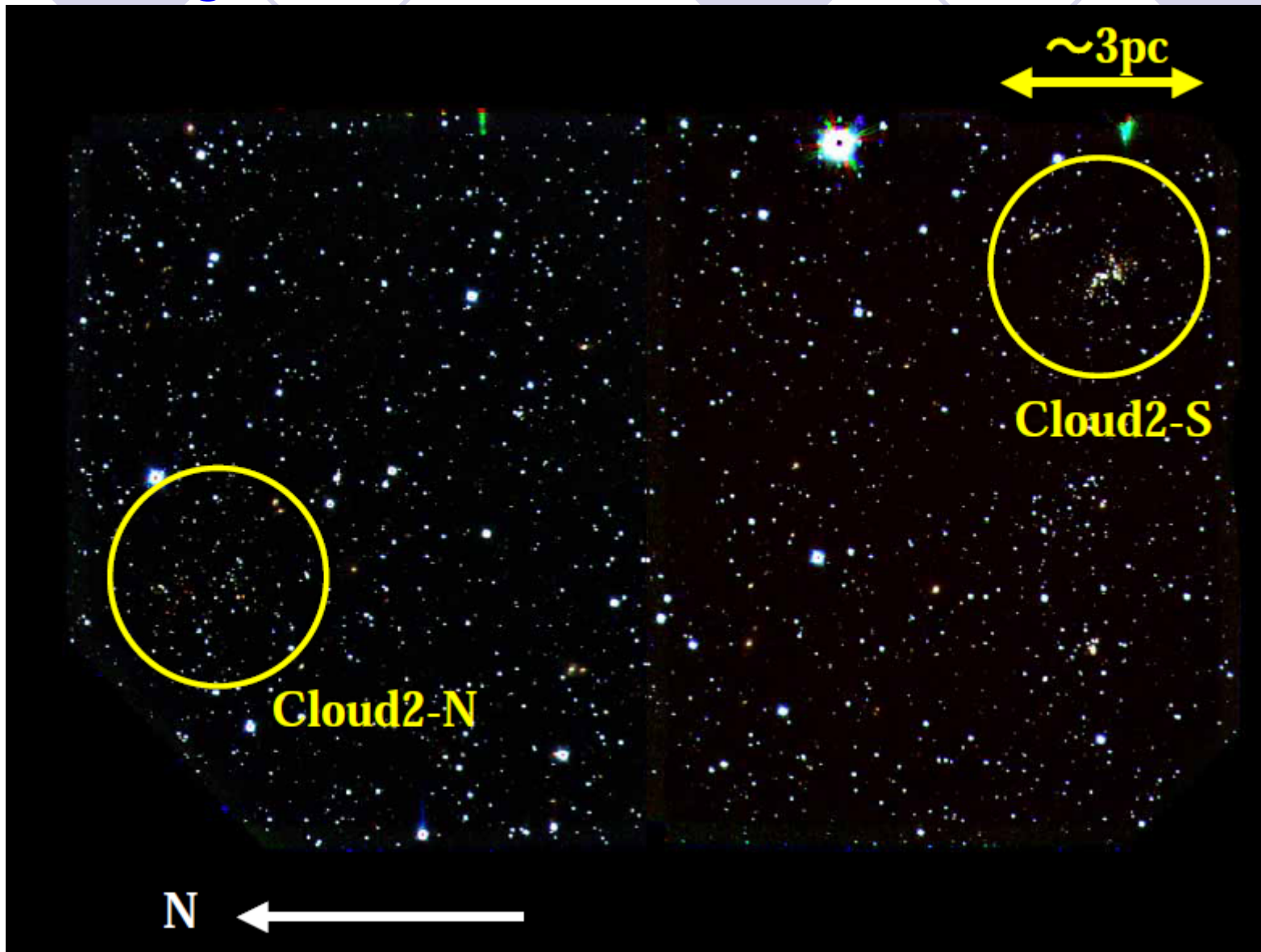


- ✓ $R_g = 19$ kpc
- ✓ $[M/H] = -0.6$ dex



<星生成研究の実験場>
(例) Digel Cloud 2

MOIRCS (JHKs)



SUBARUによる深撮像

Cloud2-N cluster



* Cloud2-S cluster

IRCS (JHK)



**EOG の embedded cluster で初めて
substellar 質量領域 (0.1 M_☉) まで観測**

(Yasui+ 2006 ApJ; Yasui+ 2008 ApJ)

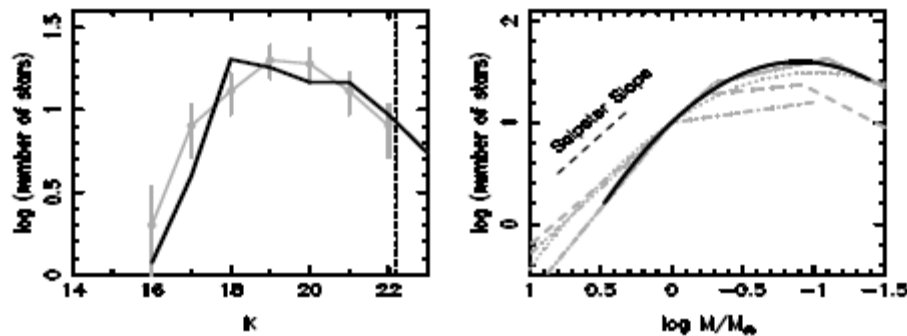


Figure 1. Results of KLF fitting assuming an age of 0.5 Myr for Cloud 2-N. The best fit KLF and resultant IMF are shown with black lines in the left and right panels, while the typical “universal” IMFs from literature (see Yasui et al. 2006 for the detail) are shown with gray lines.

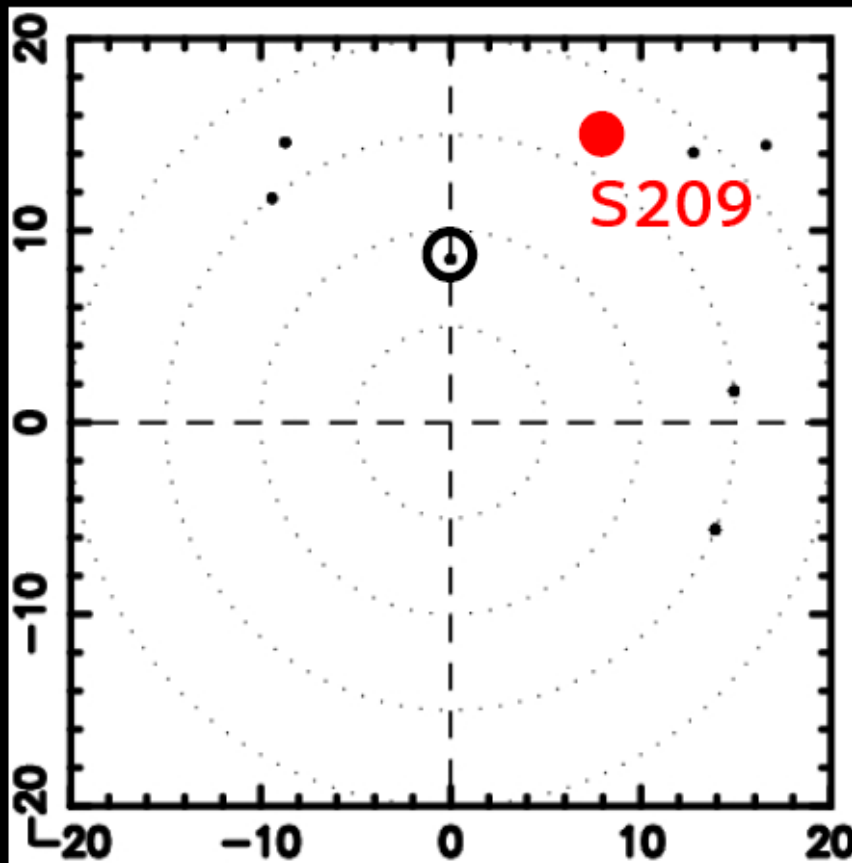
(Yasui+ 2008, astro-ph 0801.0204)

現時点での結論 Yasui+ 2006 ApJ, Yasui+2008 ApJ

- 低金属量下 (-0.7dex) の IMF は1次近似としては Universal
- 2次的な効果 (cut-off, substellar variation 等) は今後の研究

<星生成研究の実験場>
(例) S209

S209



- ✓ $R_g = 17$ kpc
- ✓ $[M/H] = -0.6$ dex

<星生成研究の実験場>
(例) S209

MOIRCS (JHKs)



- **近傍クラスター並の IMF の導出 //**
(flatness 、 low-mass end の環境効果)

Yasui+ 2008, in prep.

<銀河形成期の星生成>

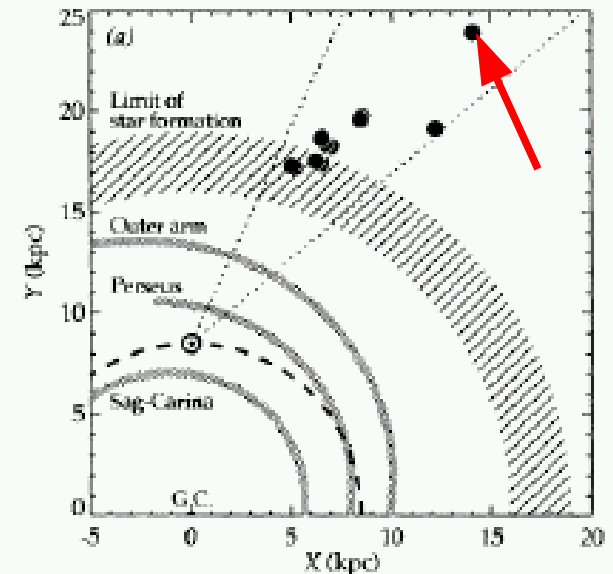
Cloud 2 best example として

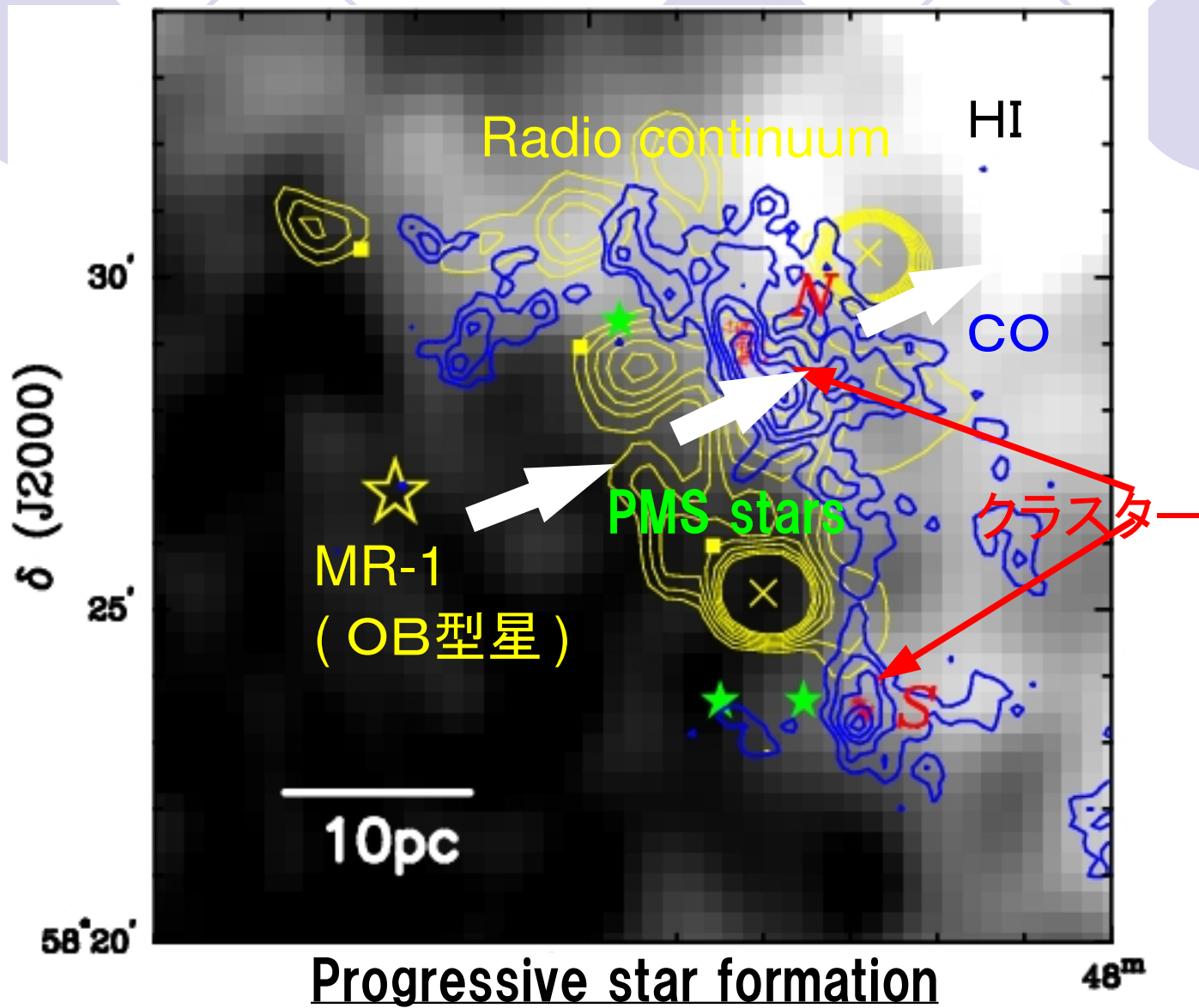
■ “最も遠い” 星生成領域

■ Digel による distant HI 雲候補の

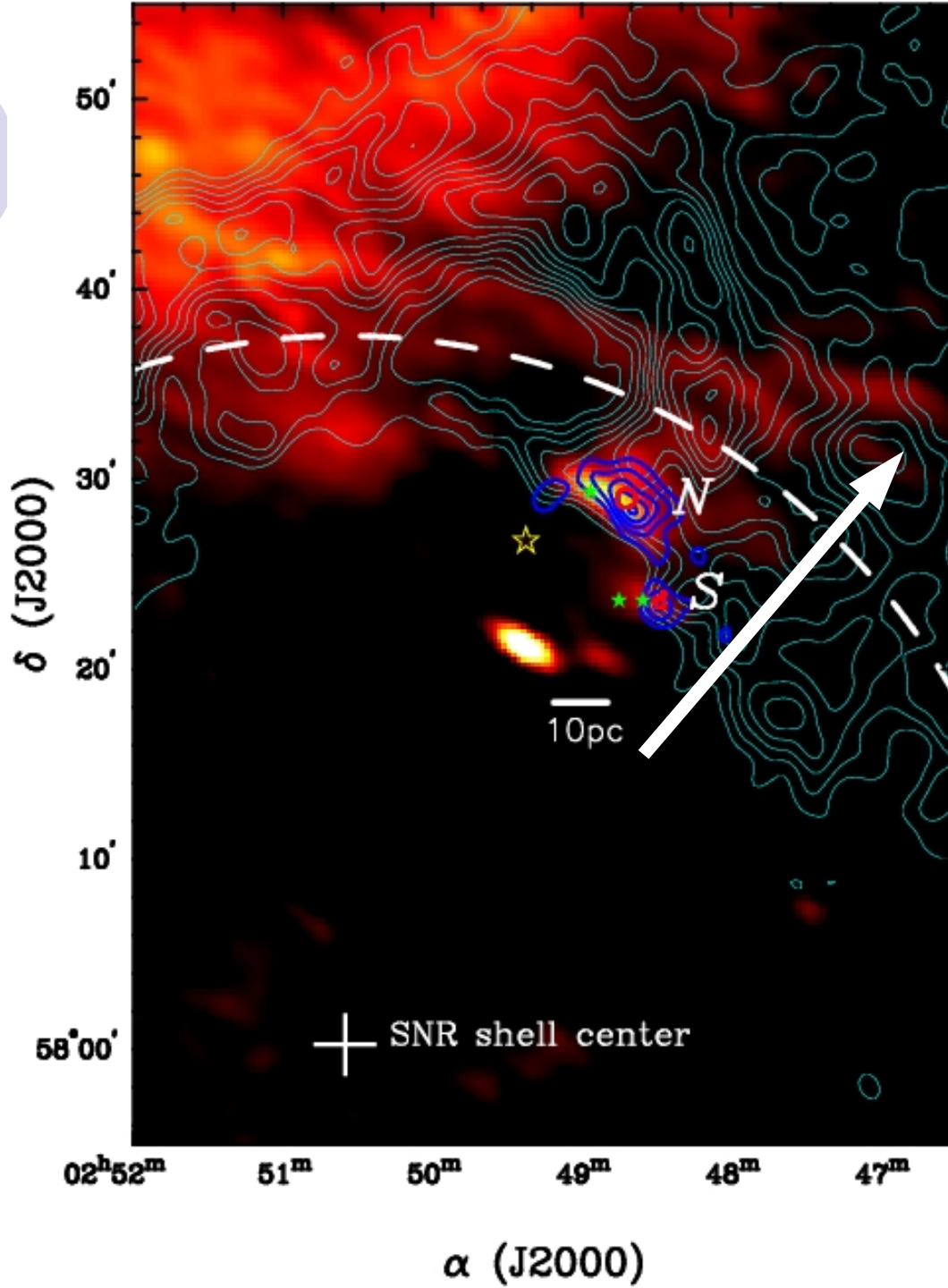
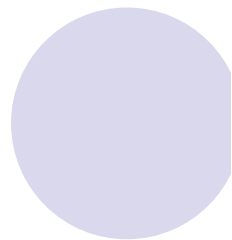
CO follow-up で発見 Digel+ 1994, ApJ

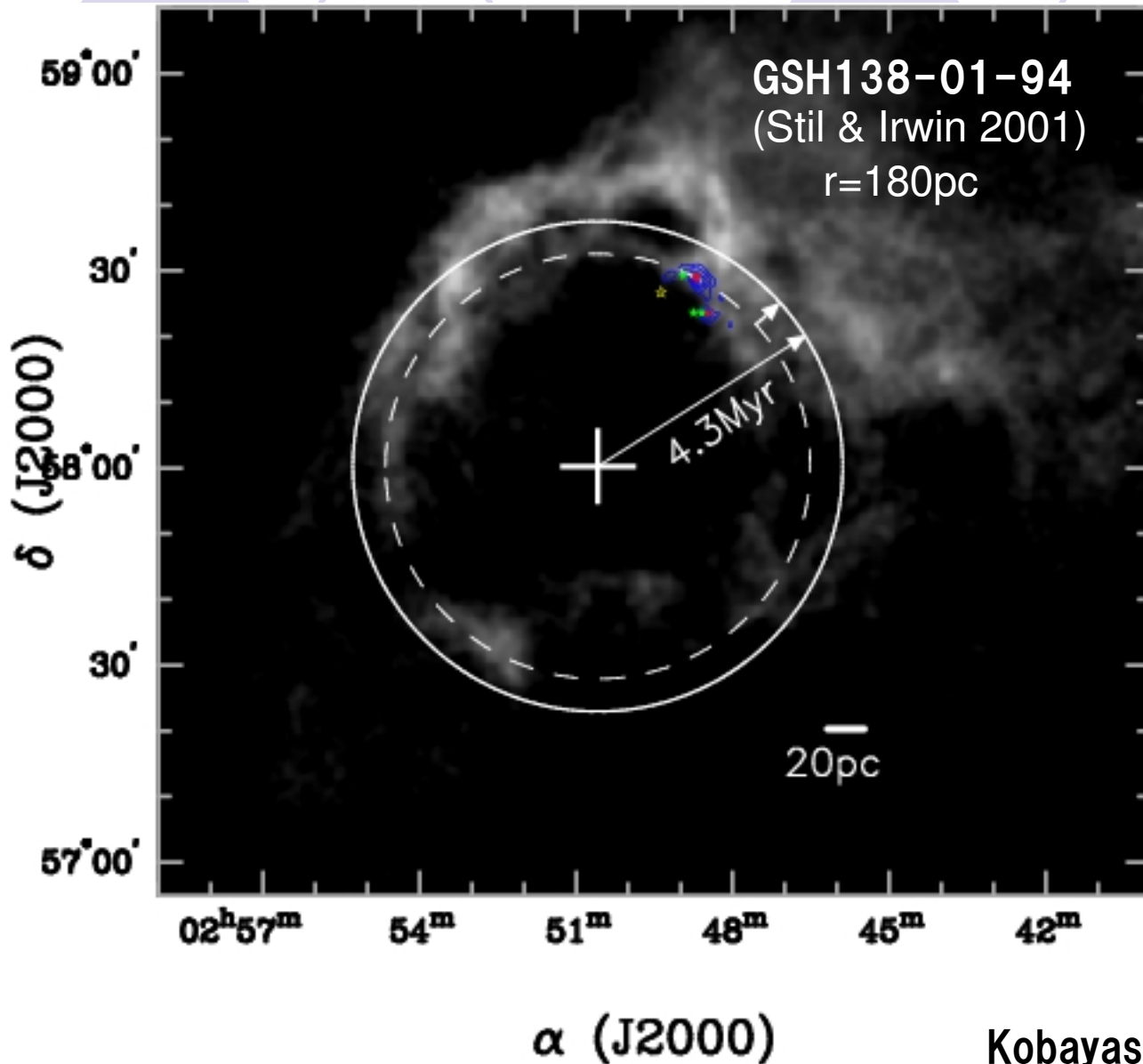
- 8つの Clouds のうちのひとつ GMC $M(\text{CO}) \sim 4 \times 10^4 \text{ Msolar}$
- $R_g \sim 20 \text{ kpc}$ Smartt et al. 1996 A&A; Kobayashi&Tokunaga 2000 ApJ
- 金属量 $\sim 1/5 \text{ solar}$ (SMC 相当)





■ 左から右へ





Kobayashi+ 2008 ApJ

超新星トリガーの星生成

■ Cloud2 はもっとも clear-cut な例

- SN-triggered star formation の最初の直接的な証拠？
- 星生成の根本的なテーマに答える実験場？

Kobayashi+ 2008 ApJ

- ✓ Sub-critical 環境下での星生成トリガー
- ✓ 星形成モード(Cluster/isolated)

<今後の流れ>

可視による探査

■ KOGS (Kiso Outer Galaxy Survey)

中西ほか 2005-

- ✓ 木曾シュミット望遠鏡によるサーベイ
- ✓ 銀経 161-213 度、銀緯 0度
- ✓ UBV 9.5-18.5mag、8万個
- ✓ $R_g > 15\text{kpc}$ 以遠のOB型星の動径分布
- ✓ 現在分光

■ SEGUE 2004-

Sloan Extension for Galactic Underpinnings and Evolution

- ✓ 撮像および分光
- ✓ 対象は old population だが、by-product として OB 型星、(若い)散開星団なども

$l=193.3-196$ (B-band)



< 今後の流れ >

星生成の直接探査

■ EOG 分子雲の星生成サーチ

- ✓ 中間赤外(AKARI、MSX)
- ✓ H α 木曾サーベイ

→ 2015ごろには
EOG の描像と、そこでの星生成の
アウトラインが得られていると考えられる
("実験場"としても活用されているだろう)

銀河形成スケールから星形成スケールへ

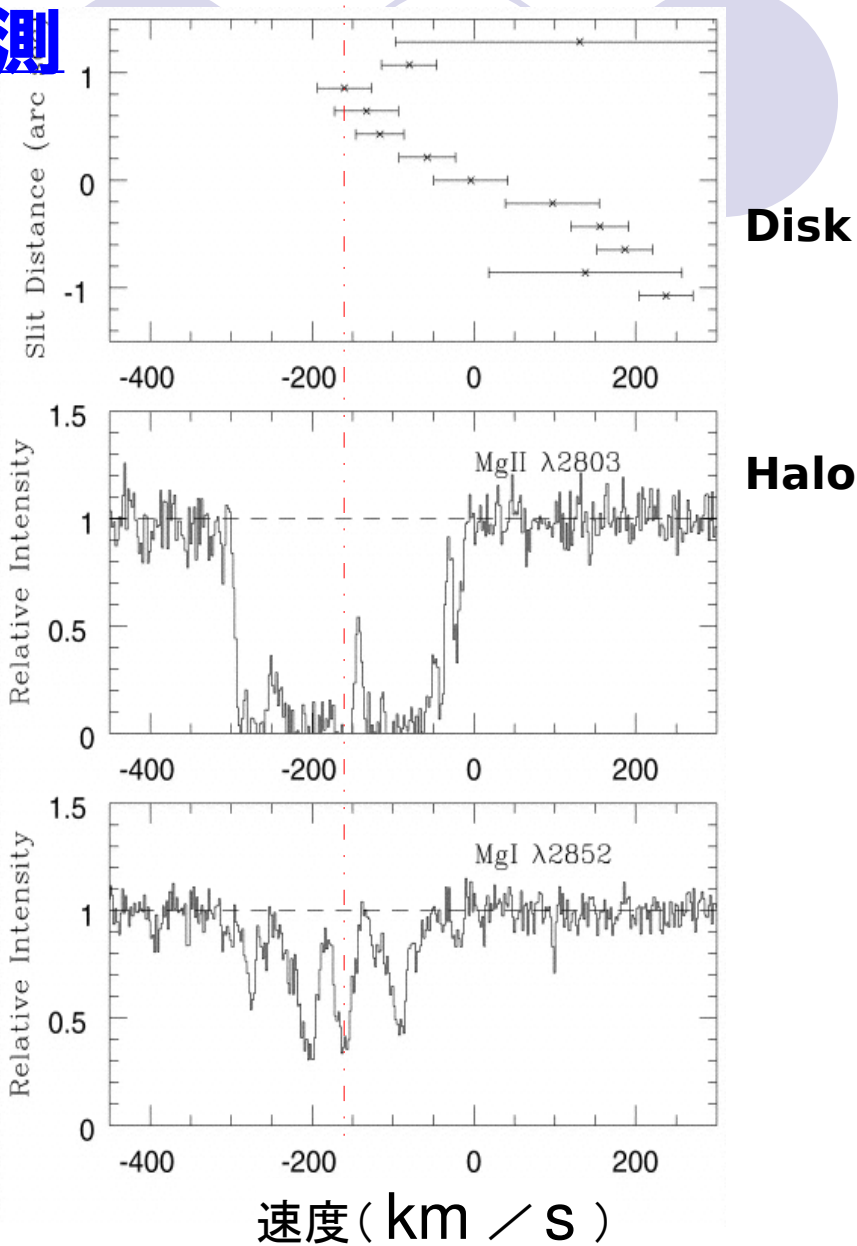
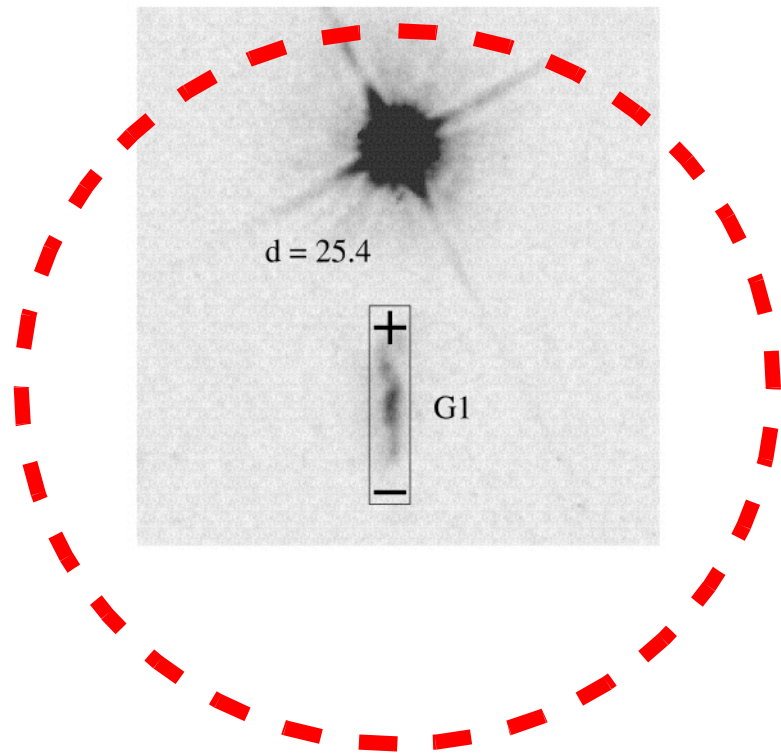
過去をみる必要がある（大変・・・）

3. 「過去を拡大してみる」

- **重力レンズクェーサー吸収線系の観測**

銀河ハローの形成を直接みる

金属吸収線によるハローの観測



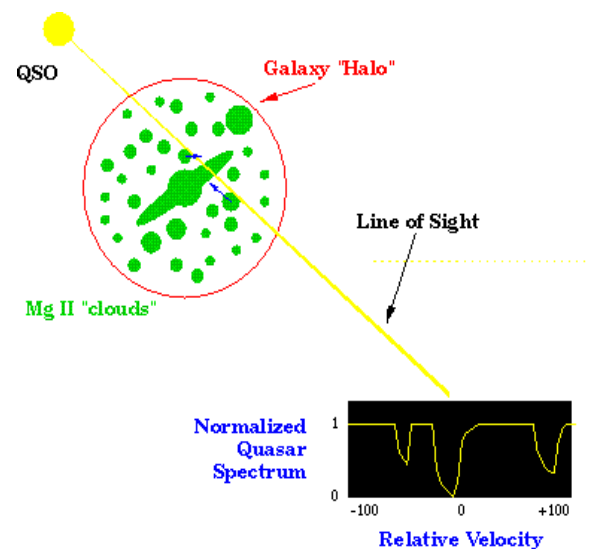
Halo の回転と Disk の回転の比較
→ $z < 1$ では同じ剛体回転？

<研究の意義>

銀河ハローの形成過程を見る

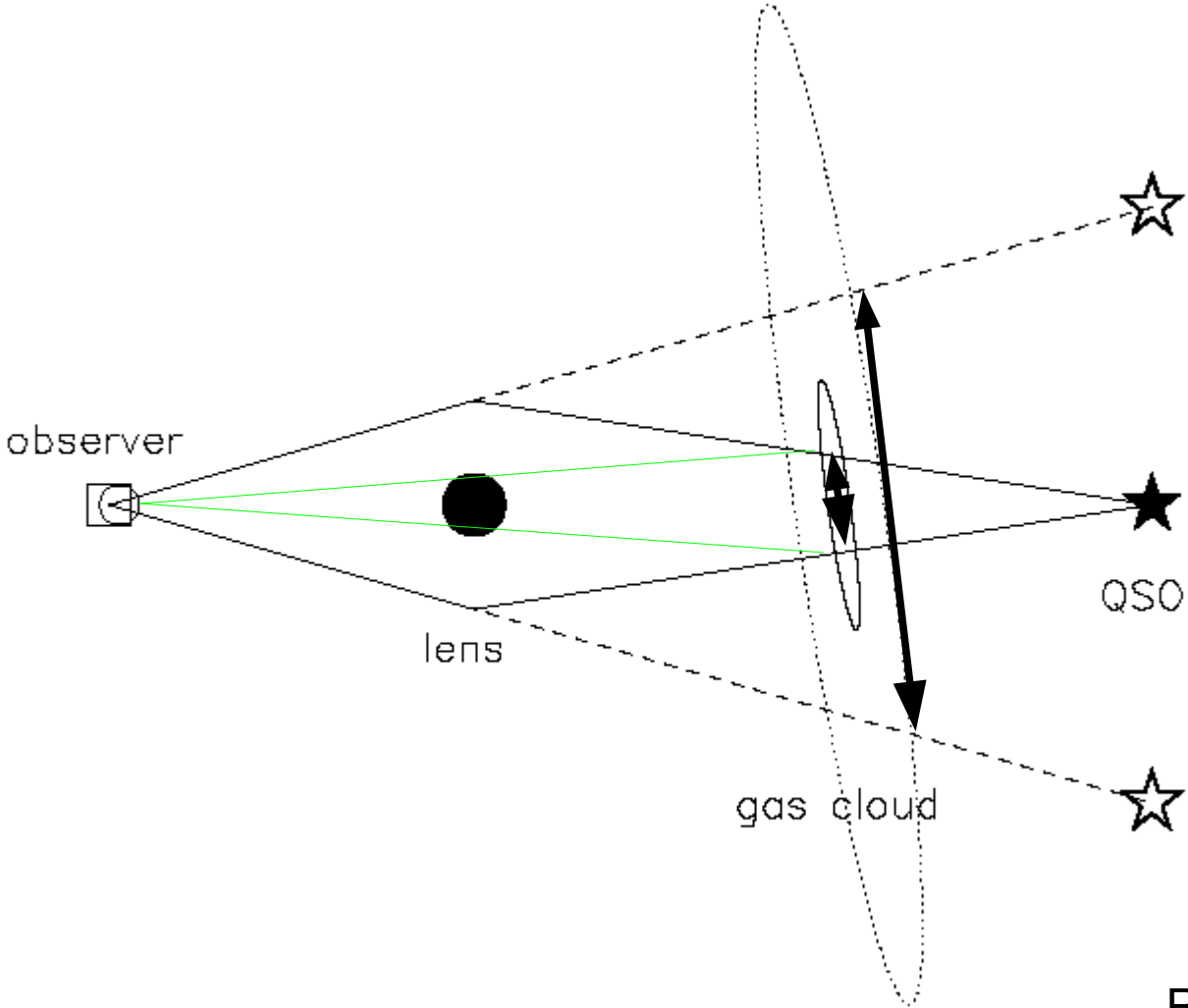
銀河間物質と銀河の境界

- ハローのサイズ
- ハローガス雲の運動（infallと回転）
- **ハローガス雲のサイズ**



- 高赤方偏移 ($2 < z < 6$) では銀河形成と密接に関連
- クエーサー吸収線系でないと観測不能

銀河、QSO 吸收線系



Rauch 2002

「ハローガス雲のサイズ」

ターゲット例: B1422+231

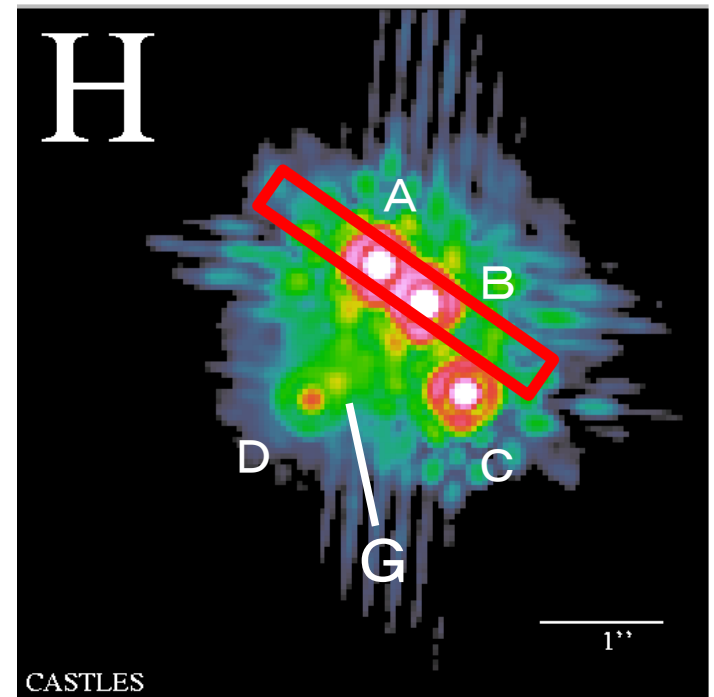
Kobayashi+ 2008, in prep
Kondo+ 2008, in prep

- $Z=3.62$
- 近赤外線で2番目に最も明るい high- z QSO
- 重力レンズQSO

$z_{\text{lense}} = 0.339$ (Tonry 1998)

A-B: $0''.5$

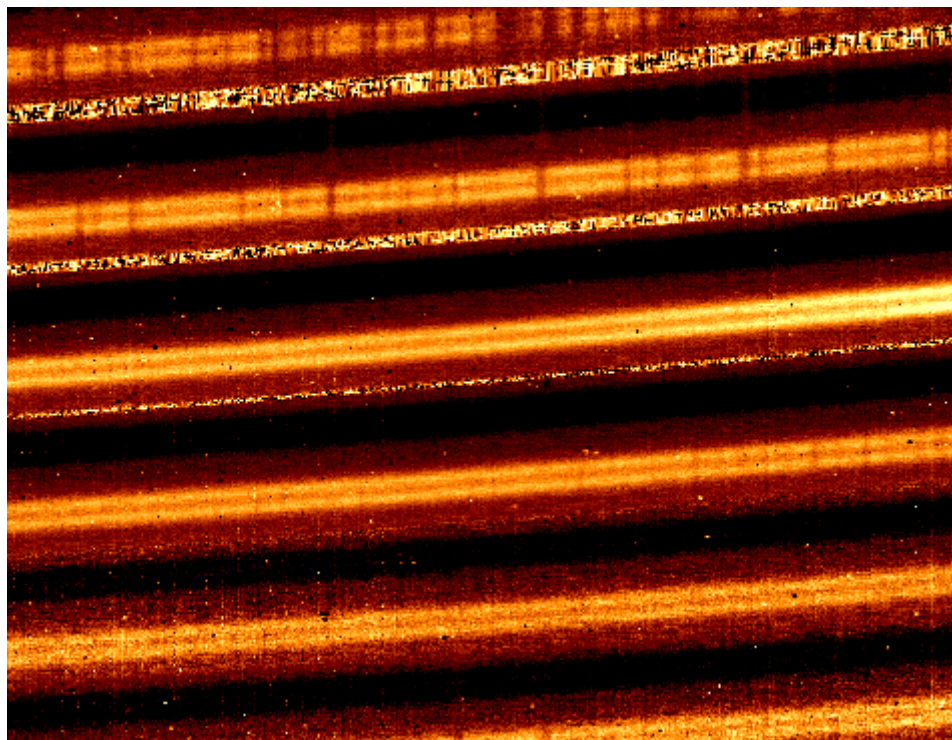
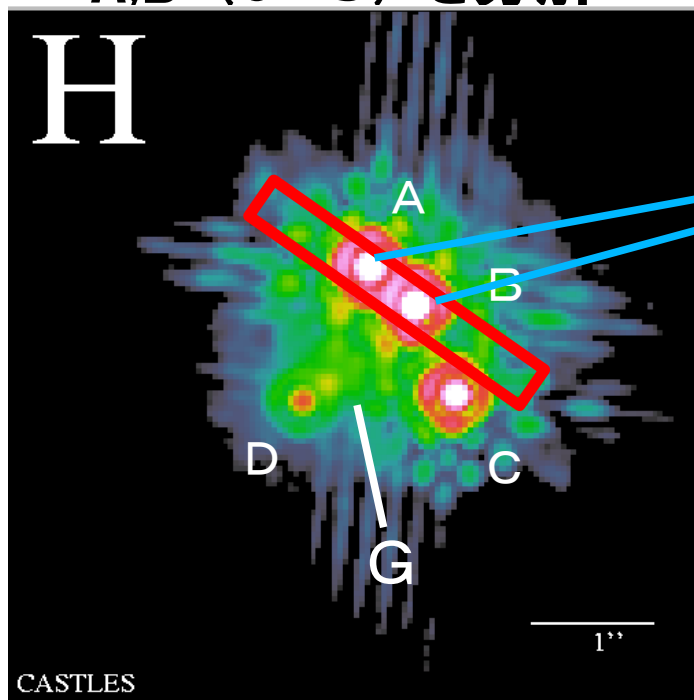
地上近赤外だと分解可能
それぞれ $J \sim 15$ mag



観測

- すばる共同利用 IRCS : $0''.3$ -slit $R=10,000$ (30 km/s)
- 好天候 photometric, seeing $\sim 0''.3$

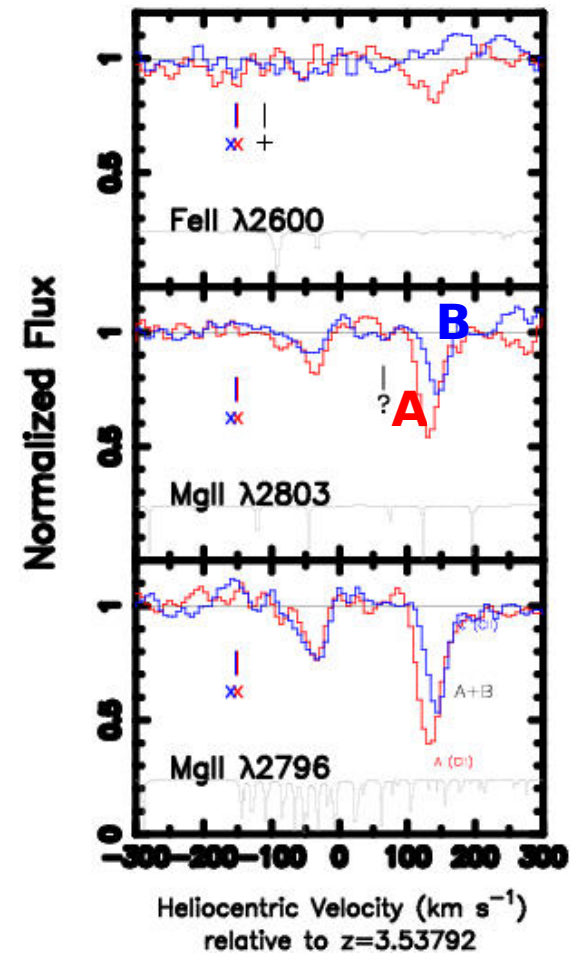
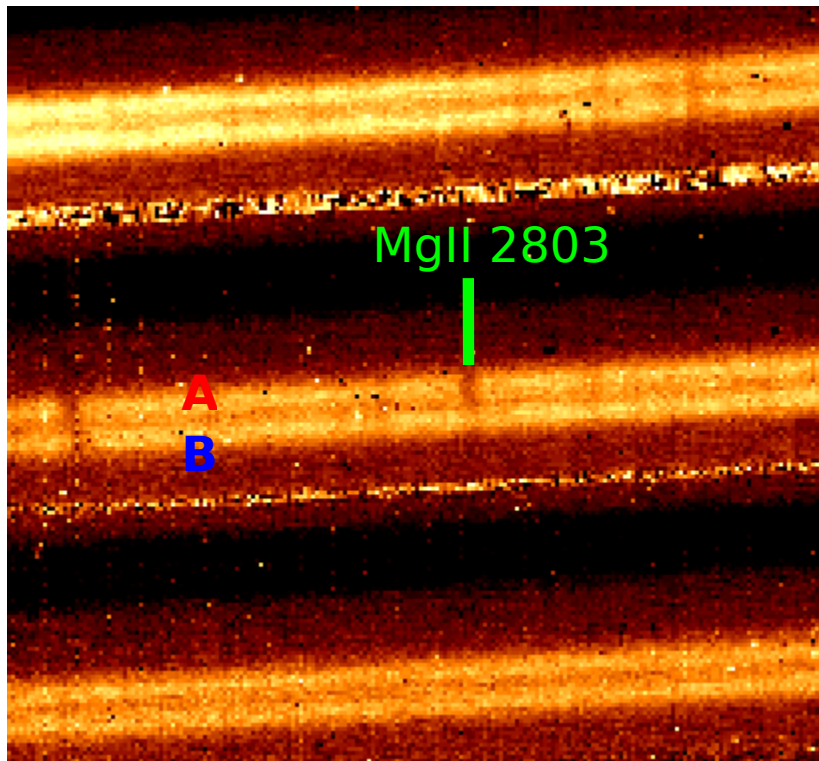
→ A,B ($0''.5$) を分解

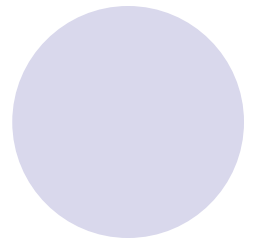
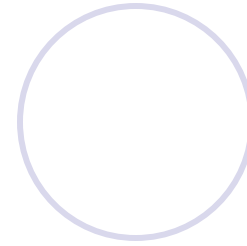
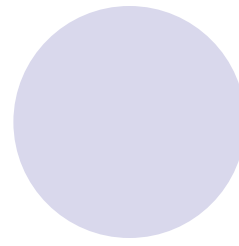
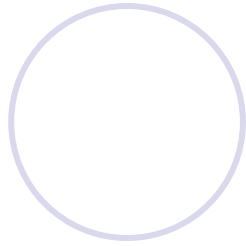
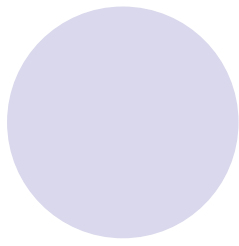


A-B 吸収線の違い

- 柱密度の差 (factor 2)
- ピーク速度のずれ ($\sim 15\text{km/s}$)

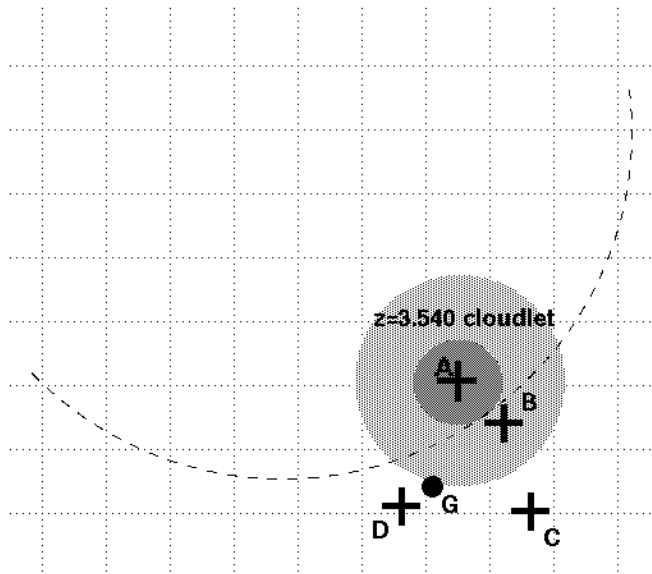
7 pc \updownarrow



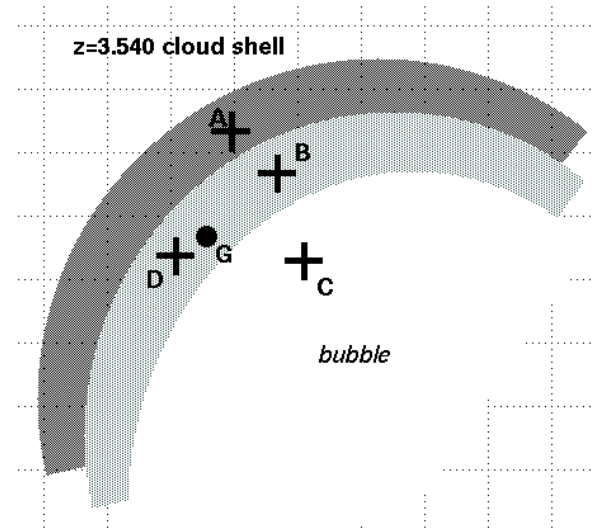


→ 7pc スケールの構造 $z=3.538$

- (巨大)分子雲 の空間スケールまで分解
- 高赤方偏移で見られるガス雲の最も小さな空間スケール

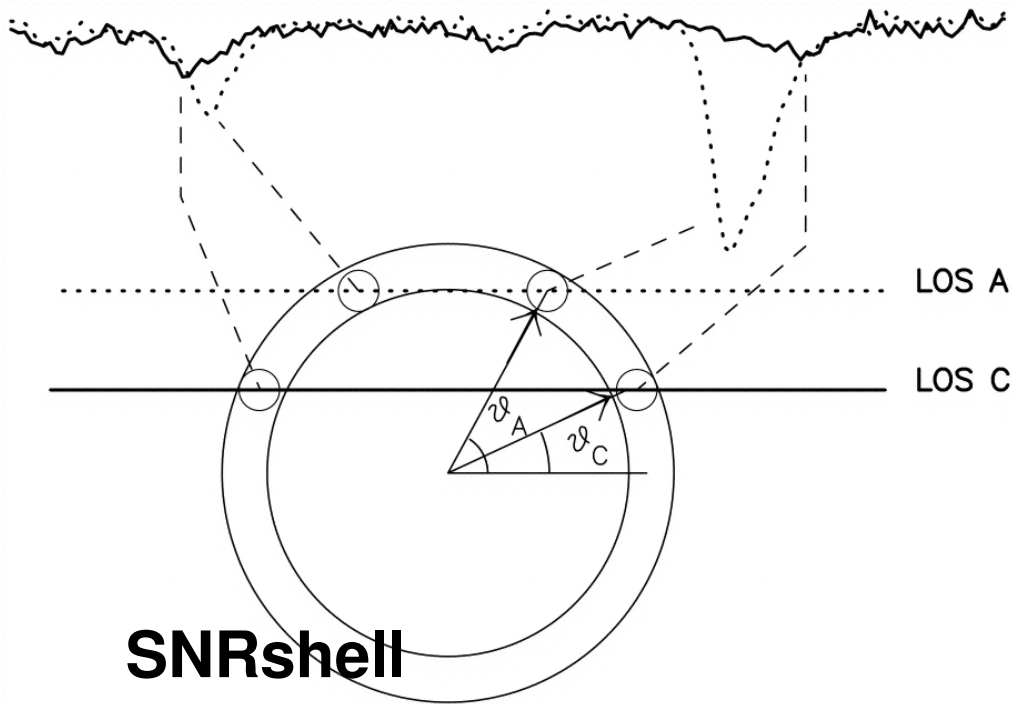


1. 「小吸収雲」の場合



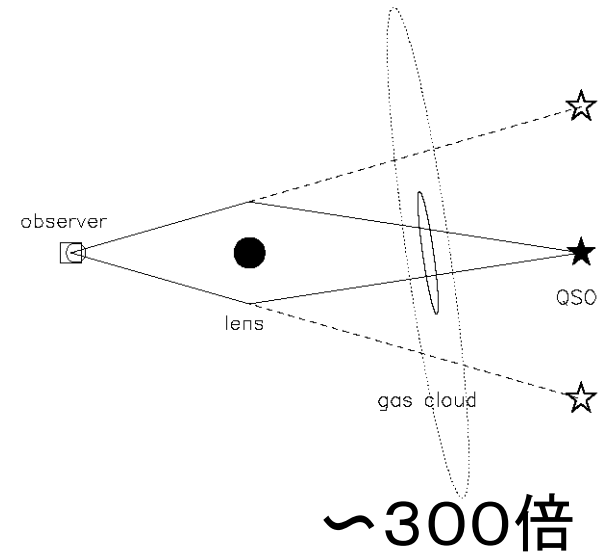
2. 「超新星シェル」の場合

吸収雲の視線方向による違い → $z=3.538$ の超新星残骸？



Rauch+ 1999 ApJ

重力レンズの効果



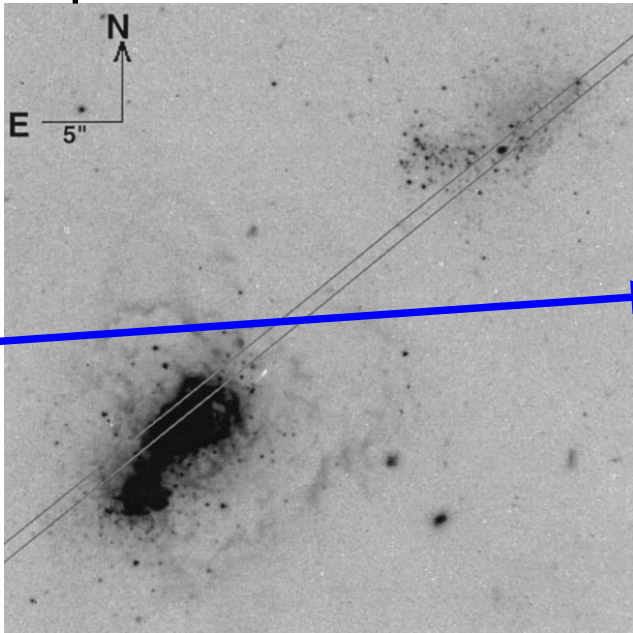
Rauch 2002

金属吸収線 . . .

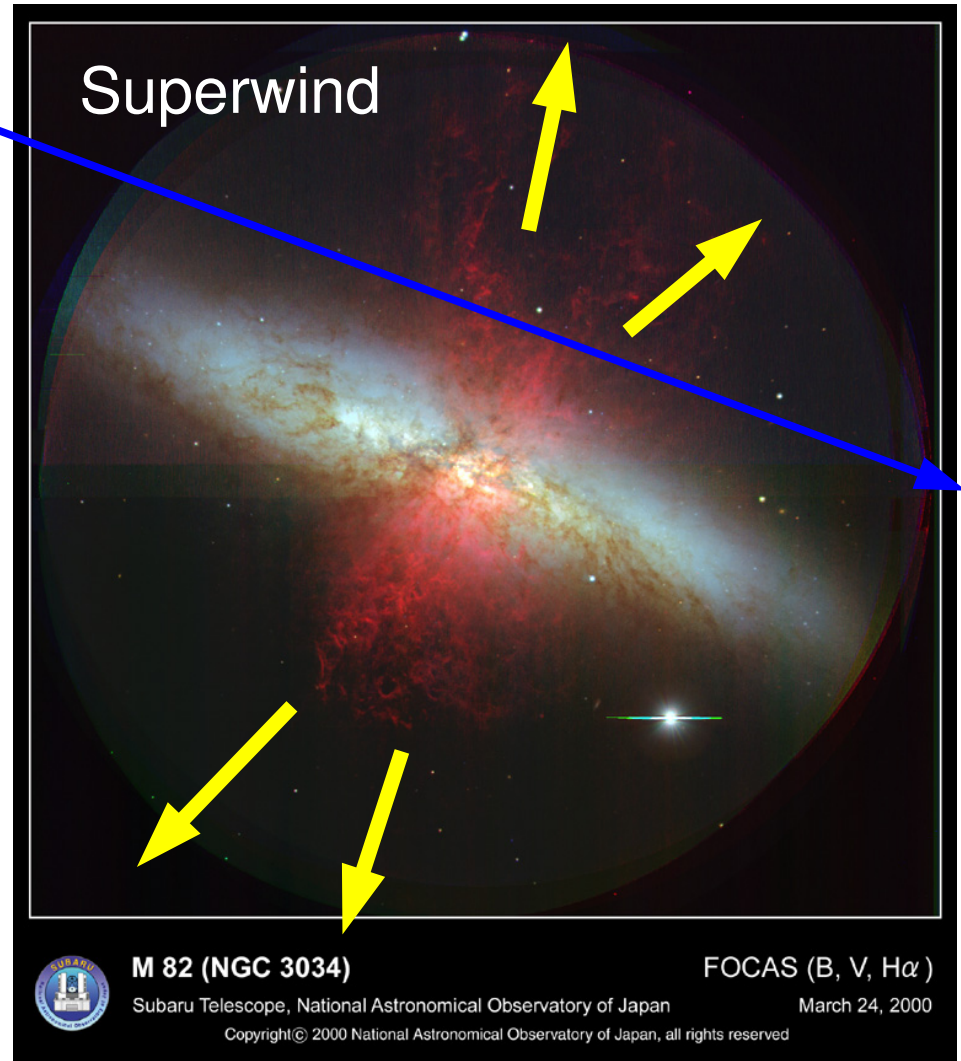
high-z での
アウトフローイベント
を見ている

Bouche+ 2006 MN, 2007 A&A
Bond+ 2001 ApJ

Superbubble



I Zw18 (HST, NASA)





まとめ

0. 森と木の関係？ 象徴的な話

1. ストレートな話 高分解能観測 素粒子物理的アプローチ
2. 近くに過去の名残を見る Outer Galaxy
3. 過去を拡大してみる 重力レンズ QSO 吸収線系
物性物理的アプローチ