

TAO近赤外線観測装置ワークショップ



日時： 2009年9月11日(金) 10:00 - 17:30
場所： 東京大学 天文学教育研究センター三鷹 講義室

東京大学ではチリ・アタカマの標高 5,640m に口径 6.5m の大型光学赤外線望遠鏡を建設する TAO 計画を進めています¹。

今年度より、6.5m TAO 望遠鏡用の近赤外線装置(仮称 TAO-NIRCAM)の開発を本格的に開始する事になりました。本装置は、マウナケア山にも勝るサイトの特長を活かした近赤外線観測を行うもので、東京大学のみならず、日本のコミュニティに共同利用観測で開放される予定です。

TAO-NIRCAM が日本のユーザーに広く使用される観測装置となるように、今回、以下の日程でワークショップを開催し、ユーザーの皆様のご意見を伺う機会を設けました。本ワークショップにて、TAO-NIRCAM 装置仕様の多くの部分を決める予定です。

TAO 近赤外線観測装置開発班
本原・土居・小西

¹<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/>

プログラム

10:00 - 10:05 主催者挨拶 & 趣旨説明 本原

TAO/TAO-NIRCAM

10:05 - 10:15 TAO サイトについて 小西

10:15 - 10:30 TAO-NIRCAM 概要 本原

系内・近傍銀河

10:30 - 10:50 TAO 近赤外線観測装置による太陽系天体の観測 長谷川

10:50 - 11:10 星形成領域における YSO 食連星サーベイ 山下

11:10 - 11:30 ミラ型変光星を用いた楕円銀河の高精度距離測定 松永

11:30 - 12:30 諸連絡・昼食

12:30 - 12:50 銀河考古学 I 銀河系 有本

遠方銀河・銀河団

12:50 - 13:10 遠方銀河 ($z > 4$) の観測 嶋作

13:10 - 13:30 TAO 近赤外線による遠方銀河の探査 太田

13:30 - 13:50 TAO 近赤外線観測装置による遠方銀河団・銀河群の大規模探査 小山

13:50 - 14:10 TAO 近赤外線観測装置による原始銀河団の研究 児玉

14:10 - 14:20 休憩

AGN・超新星

14:20 - 14:40 東京大学アタカマ望遠鏡による活動銀河核研究 長尾

14:40 - 15:00 FeII/MgII から探る宇宙の化学進化 鮫島

15:00 - 15:20 Near-Infrared Frontiers of Supernova Study 前田

15:20 - 15:40 NIR Variability Surveys for AGN and SNe 諸隈

15:40 - 15:55 休憩

他波長連携

15:55 - 16:15 ALMA 時代における TAO 近赤外カメラでのサブミリ銀河観測 五十嵐

16:15 - 16:35 AKARI/SPICA との連携 和田

総合討論

16:35 - 17:30 総合討論 本原

参加者（敬称略）

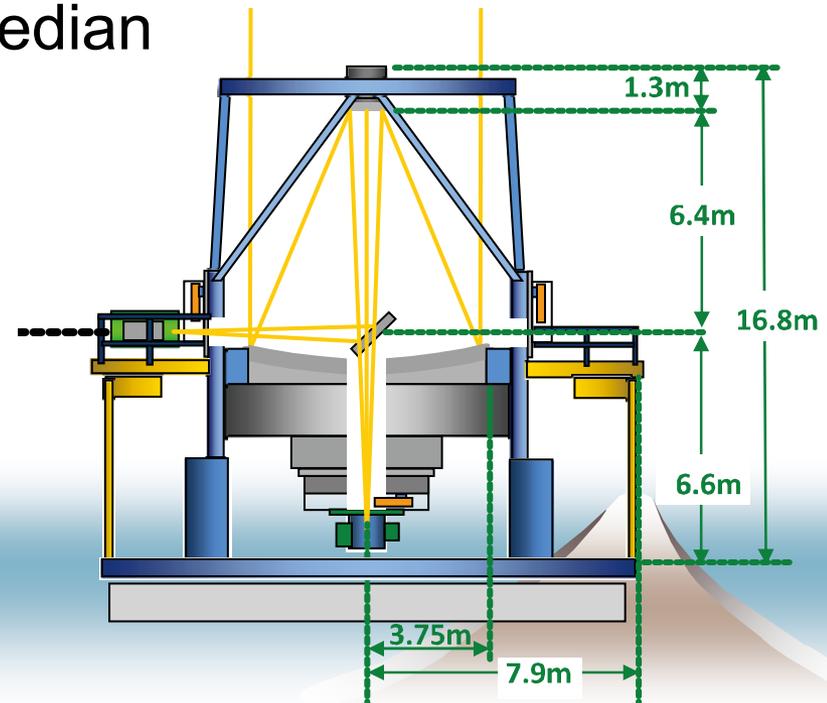
長尾透	愛媛大学
西浦慎悟	東京学芸大学
太田一陽	理化学研究所
小野寺仁人	CEA/Saclay
東谷千比呂	東北大学
長谷川直	JAXA
和田武彦	JAXA
諸隈智貴	国立天文台
児玉忠恭	国立天文台
有本信雄	国立天文台
山下卓也	国立天文台
佐々木敏由紀	国立天文台ハワイ
岡本桜子	東京大学/国立天文台
小山佑世	東京大学
林将央	東京大学
嶋作一大	東京大学
加藤大輔	東京大学
前田啓一	東京大学
田中培生	東京大学
川良公明	東京大学
五十嵐創	東京大学
鮫島寛明	東京大学
松永典之	東京大学
廿日出文洋	東京大学
越田進太郎	東京大学
浅見奈緒子	東京大学
酒向重行	東京大学
三谷夏子	東京大学
峰崎岳夫	東京大学
土居守	東京大学
本原顕太郎	東京大学
小西真広	東京大学

TAO-NIRCAM概要

本原顕太郎、小西真広、酒向重行、三谷夏子、
ほかTAOチーム(東京大学)

1. TAO 6.5m望遠鏡計画

- ◆ チリ・チャナントール山頂(5640m)に6.5m望遠鏡を設置: **世界最高地点の光赤外望遠鏡**
- ◆ マウナケアを超える赤外線性能
 - 低い水蒸気量(0.5mm) ⇒ 高い赤外線透過率
 - 良好なシーイング ⇒ 0.69" median



望遠鏡緒元

- ◆ 光学系 : Cassegrain with Ritchey-Chretien
- ◆ 最終F : 12.2 ←すばるカセグレン焦点と同じ
- ◆ 主鏡サイズ : 6,500 mmφ (有効径 6,154mm)
- ◆ 主鏡F : 1.25
- ◆ 副鏡サイズ : 897mmφ
- ◆ 焦点 : Cassegrain, Nasmyth 2
- ◆ 視野 : 25'φ

すばる望遠鏡とのシナジー

望遠鏡光学系をできるだけ合わせることで
観測装置を相互利用することが可能

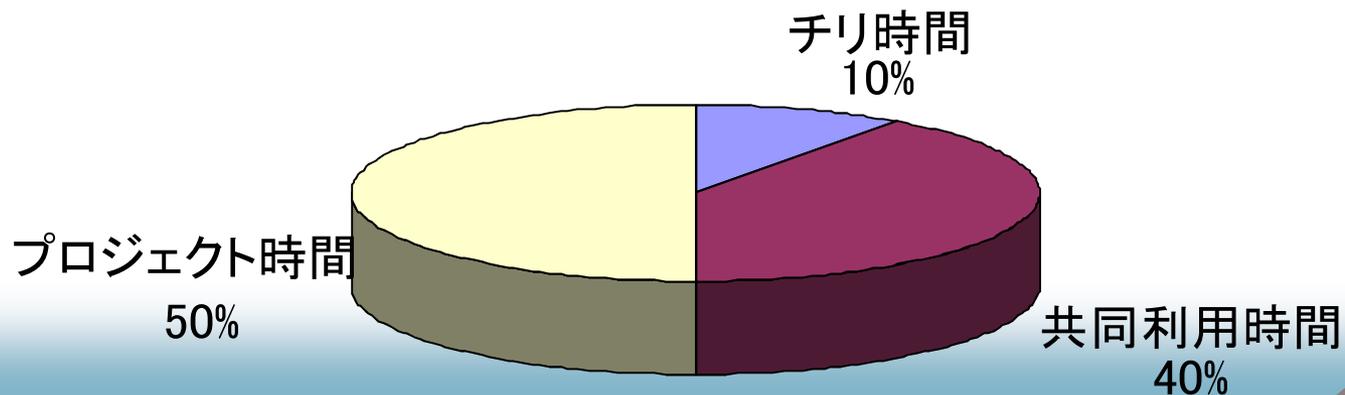
運用形態

◆ 他大学、機関と協力した運営、利用

- 観測装置の共同開発
- 共同利用観測

共同利用観測の公募

すばる望遠鏡と共同のTACも検討中



2.観測装置計画

◆ 2観測装置

- 近赤外線撮像分光カメラ
- 中間赤外線撮像分光カメラ

◆ 予算措置

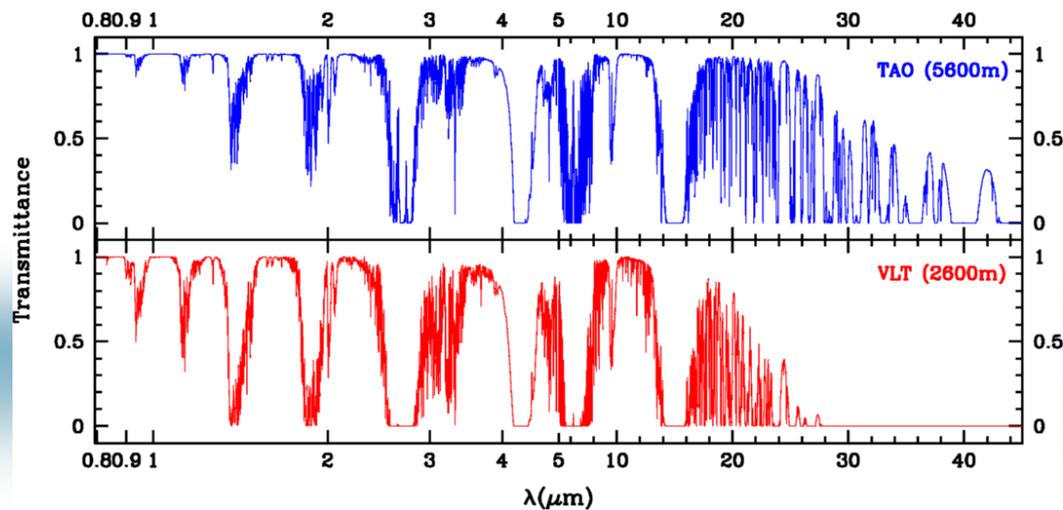
- 平成21年度補正予算
- 2年で製作？！

3. TAO-NIRCAM

◆ 装置のコンセプト

: 望遠鏡・サイトの特徴を生かす

- **広い視野**
 - 望遠鏡視野は $\phi 25'$
- **豊富な観測時間**
 - モニタ、大規模サーベイなどが可能に
- **広い大気の窓**
 - $0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$ まで、ほぼ連続した大気の窓
 - 分光に有利



3. TAO-NIRCAM

◆ 装置の特徴

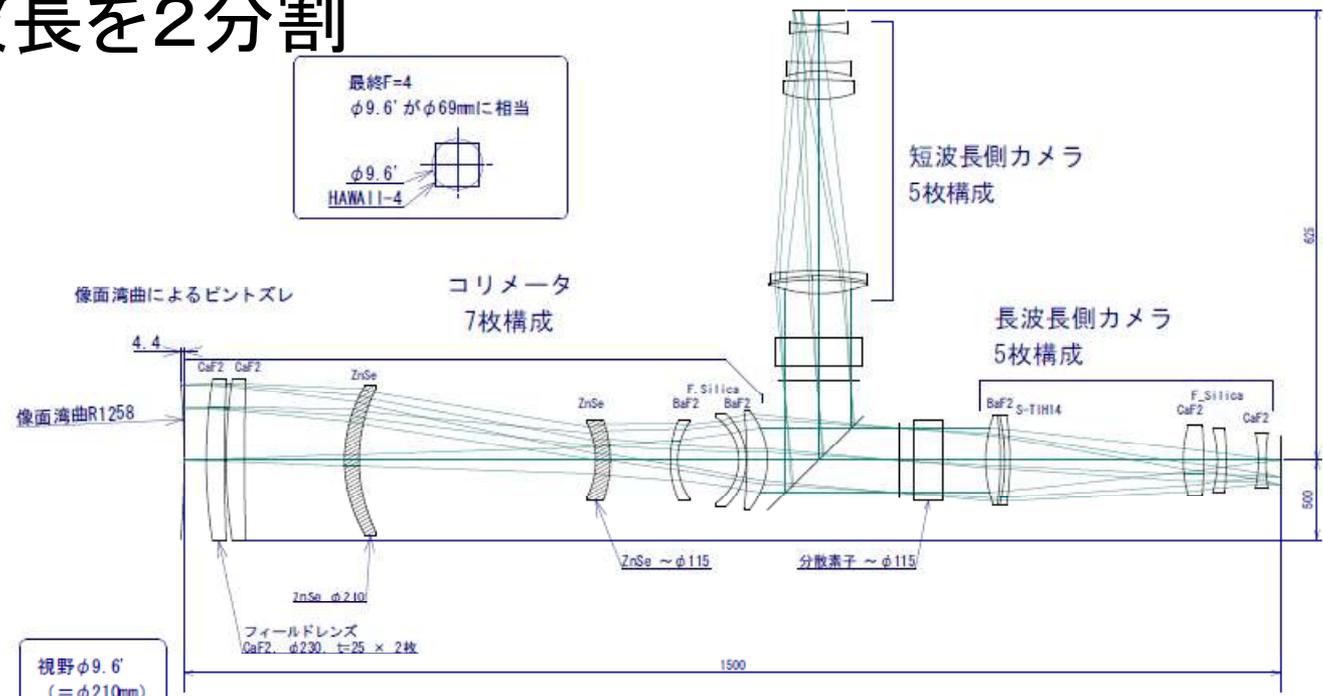
- 4k x 4k 検出器で9.6'φの視野をカバー
- 2波長帯同時撮像
- 0.9–2.5μmの中分散同時分光
- 多天体分光

◆ オプション

- AOSMによるGround Layer AO

光学系

- ◆ 2バンド同時
- ◆ 実効視野は8.5'角で4隅が蹴られる
- ◆ 1.4 μm で波長を2分割



- 視野？
- 分割波長？
- 3バンド同時はあるか？

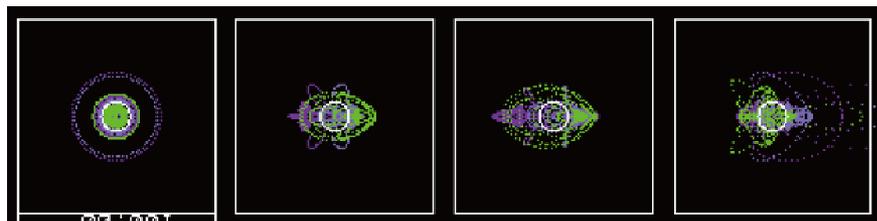
結像性能

◆ 問題なし

撮像時

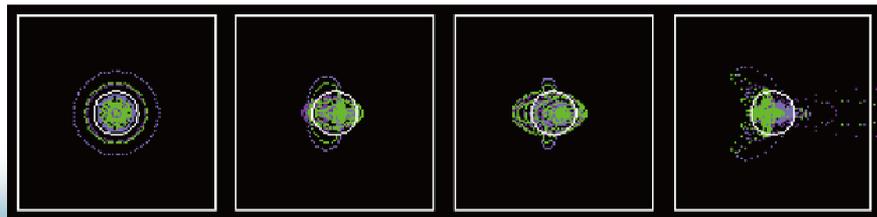
短波長側のスポットダイアグラム

0' 2.4' 3.3' 4.8'



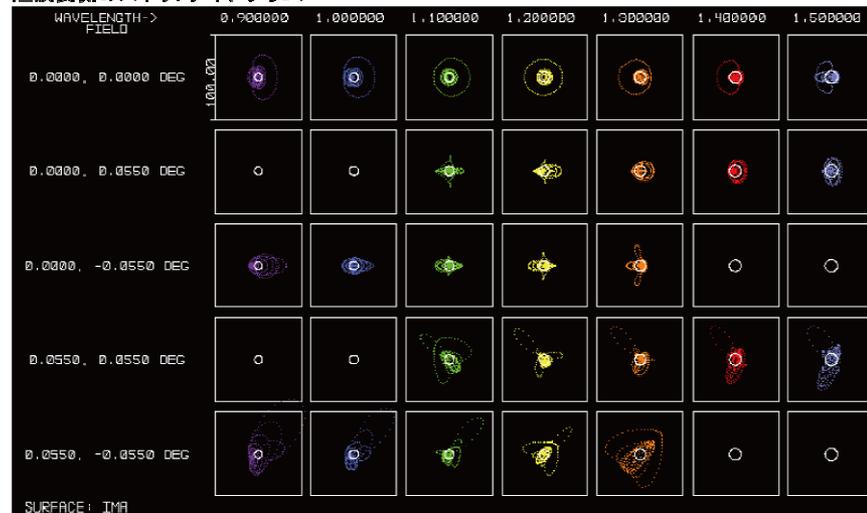
↑ 矩形は 100 μ m

長波長側のスポットダイアグラム

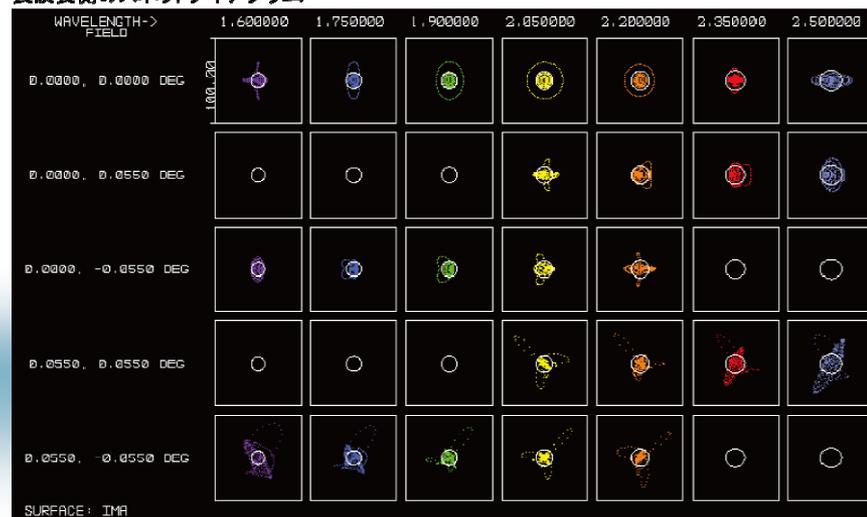


分光時

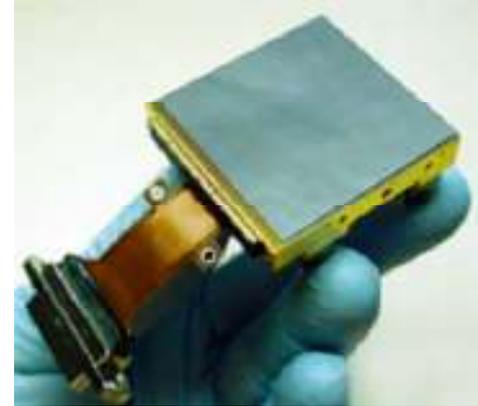
短波長側のスポットダイアグラム



長波長側のスポットダイアグラム



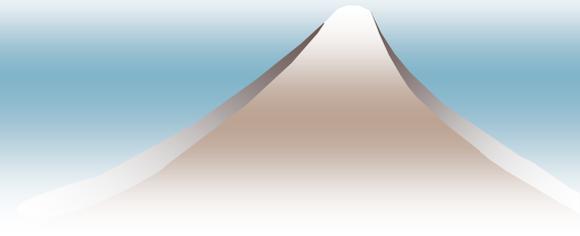
検出器



- ◆ HAWAII-2RG + SIDECAR ASICが有力
 - Teledyne 製
 - 2k x 2k ⇒ 8個必要...
 - HAWAII-4RG は間に合わない(2010/中に試験デバイスが出てくる)
- ◆ VIRGO 2kが対抗馬
 - Raytheon製
 - ASICがないので、読み出しボードシステムも8個いる
 - 分光用途での実績がない

フィルター

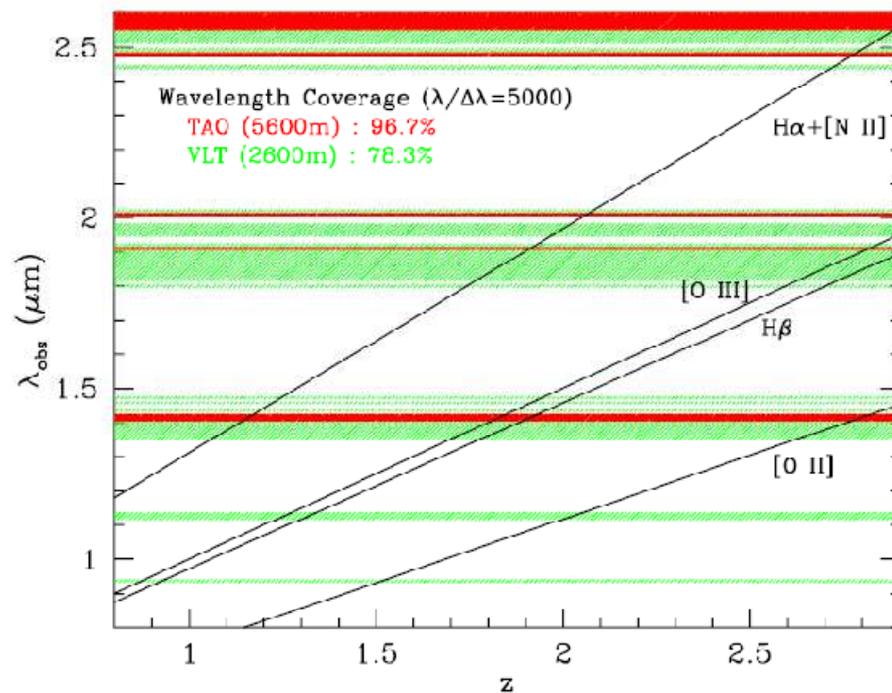
- ◆ Mauna Kea Standard Filter Set
 - Y, J, H, Ks, K
 - Narrow-band Filters?
 - Medium-band Filters?
 - Tunable Filterはいるか？



分光性能

- ◆ 0.9-2.5 μm を一気にカバーできる
- ◆ $R \sim 1500$ (0.5"幅スリット)
- ◆ 多天体分光: Max 35 (スリット長15")
- ◆ 広い波長coverageが得られる

- 必要な波長分解能は？
- multiplicityは？



スケジュール

- ◆ 2010/前 : 冷却系、機械系、光学系設計確定
- ◆ 2010/末 : 検出器納品
- ◆ 2011/初 : 冷却系、機械系、光学系製造完了
- ◆ 2012後 : 組み上げ調整

望遠鏡本体の完成スケジュールは、
最速でも2016年

スケジュール

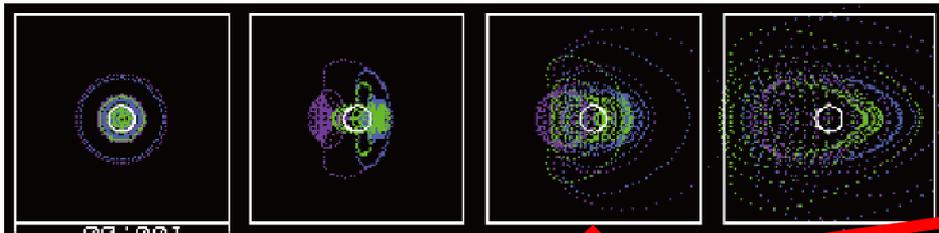
- ◆ 2010/前 : 冷却系、機械系、光学系設計確定
- ◆ 2010/末 : 検出器納品
- ◆ 2011/初 : 冷却系、機械系、光学系製造完了
- ◆ 2012後 : 組み上げ調整
- ◆ 2013初 : すばる望遠鏡への輸送
- ◆ 2013後 : すばる望遠鏡でのファーストライト

すばるでの性能

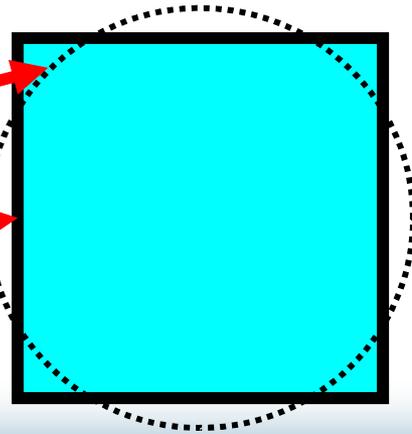
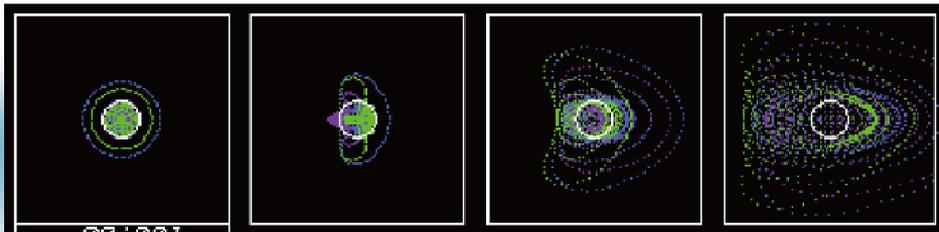
- ◆ 視野は6.5' 角(7.3'φ)
- ◆ 視野端での結像性能は低下する
- ◆ カセグレン焦点設置

短波長側のスポットダイアグラム

0' 2.4' 3.3' 3.7'



長波長側のスポットダイアグラム





TAOサイトについて

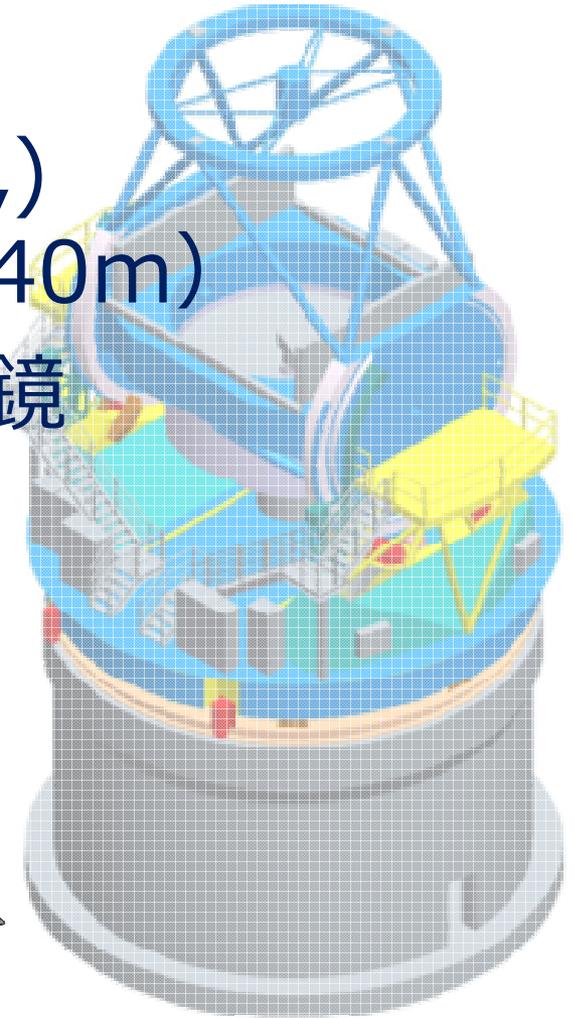
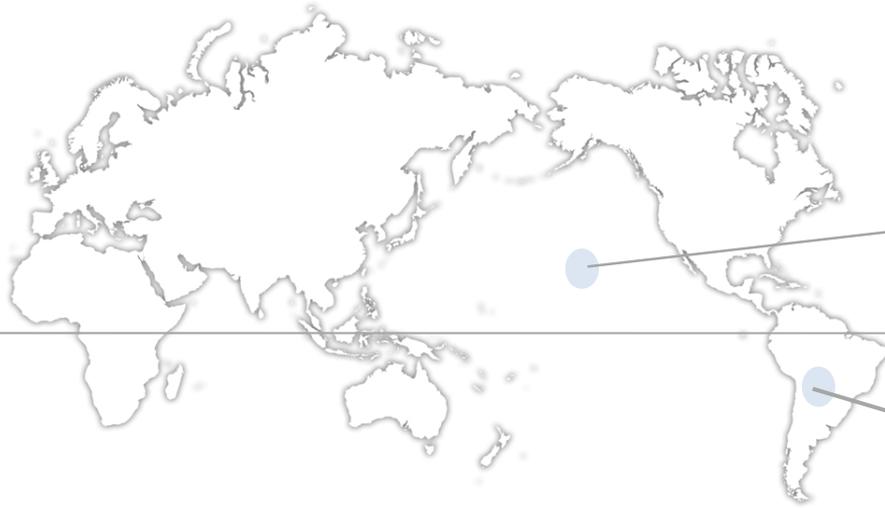
小西真広、ほかTAOチーム（東大）



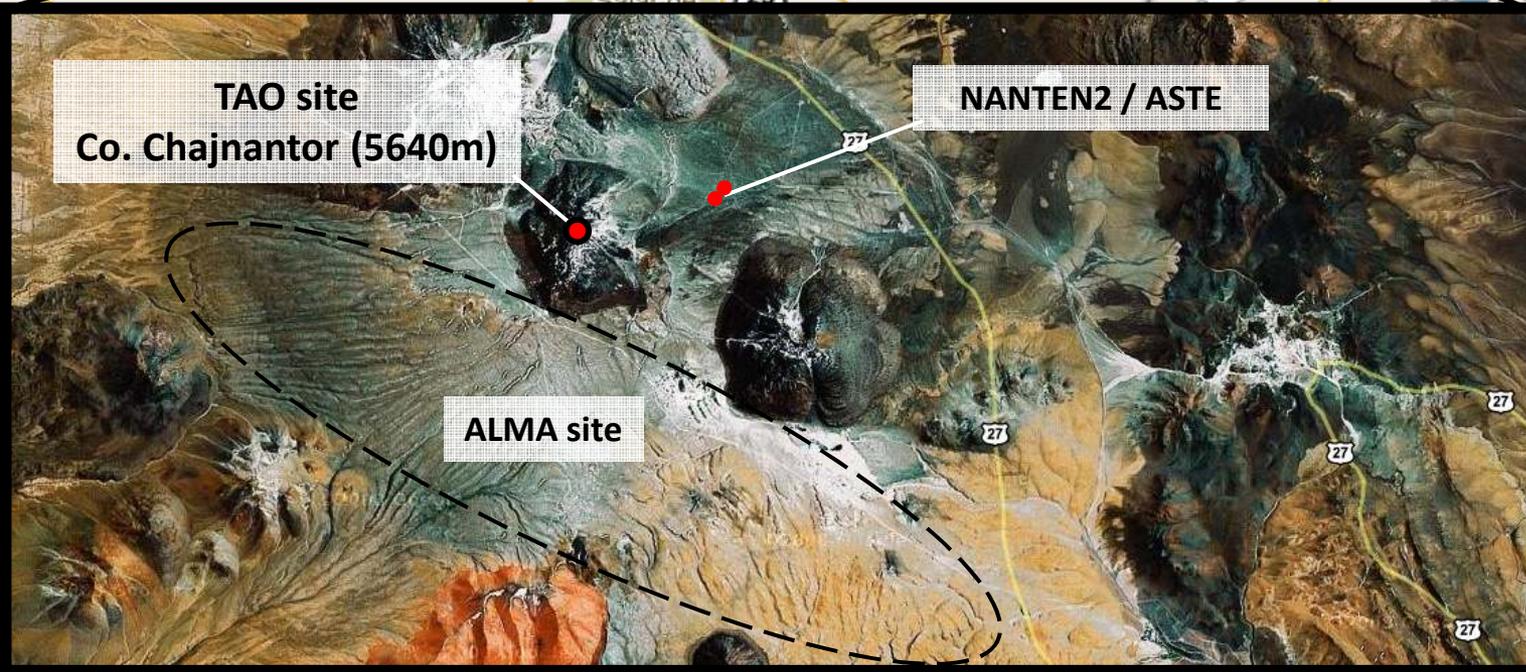
TAO計画

The University of Tokyo Atacama Observatory Project

- 南米チリ・アタカマ高地
(ALMA, ASTE, NANTEN2,,,)
チャナントール山 (標高5,640m)
- 口径6.5mの光学赤外線望遠鏡

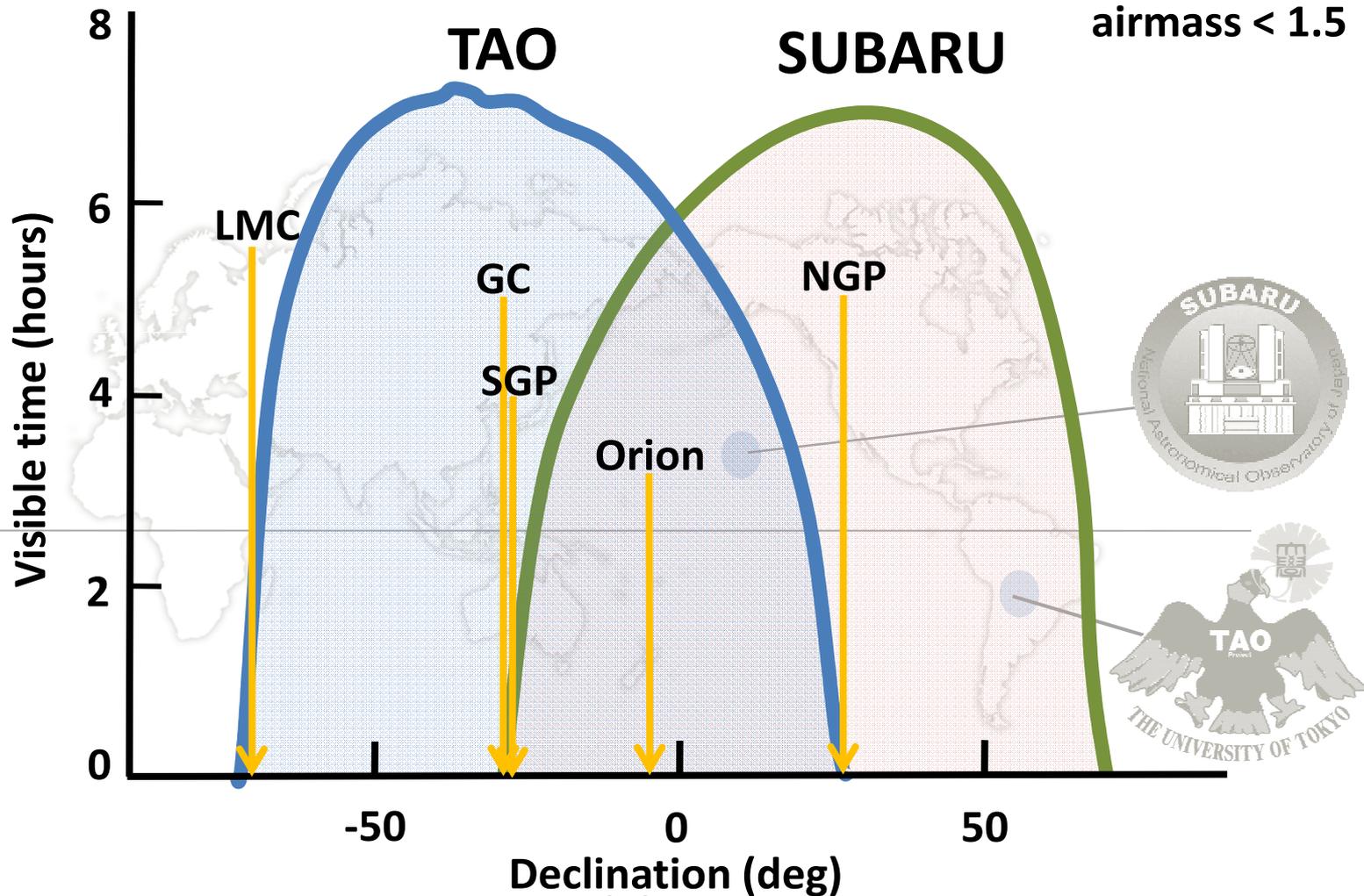


TAOサイト



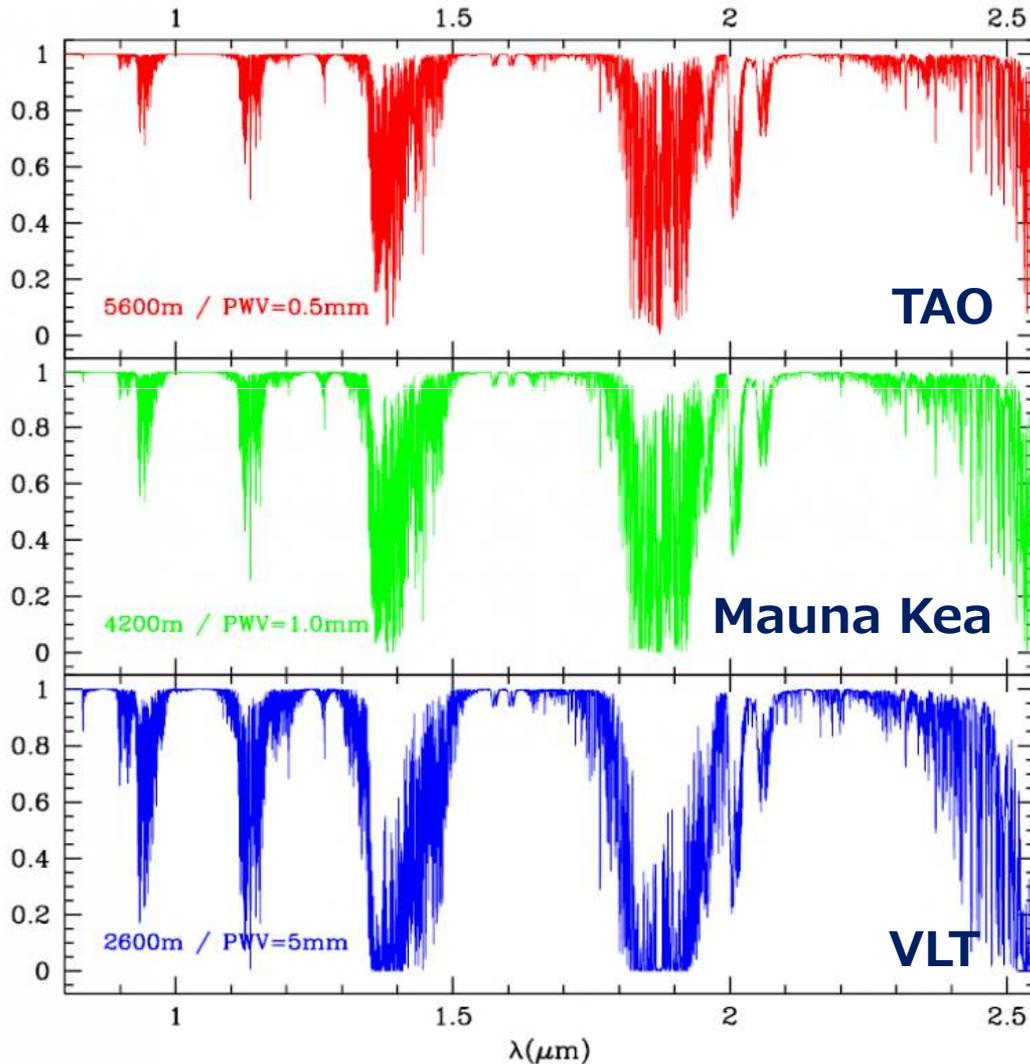


Visibility





高い大気透過率



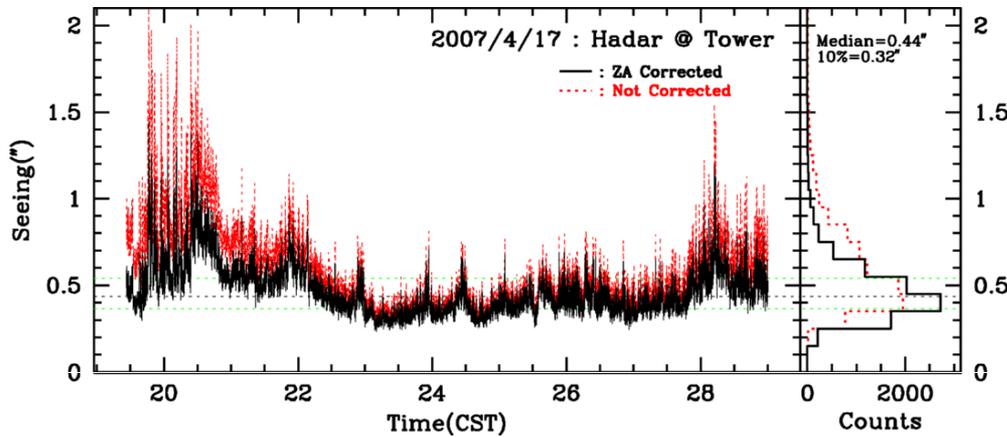
標高5,640m
水蒸気が少ない



赤外線吸収が小さく、
z~Kバンドにかけて連続的な大気の窓になる。



マウナケアに匹敵するシーイング



可視シーイング調査(8夜)の結果

median 0.69"
 best 0.38"

今年6月の観測でも、可視・近赤外とも星像(FWHM)~0.6"のシーイングを達成。

Site (Telescope)	Altitude (m)	Seeing (Median)	Seeing (25%)	Seeing (10%)
Peaks within Chajnantor Area				
Co. Chajnantor	5650	0."69	0."51	0."38
Co. Toco ²	5430	0."68	0."50	0."43
Co. Chico ³	5150	0."71	0."55	-
Existing Astronomical Observatories				
Las Campanas (Magellan) ⁴	2300	0."63	0."4	-
Co. Pachon (Gemini-S) ⁴	2710	0."75	-	-
Co. Paranal (VLT) ⁴	2640	0."82	0."63	-
La Silla (NTT) ⁴	2350	0."87	0."69	-
La Palma (WHT) ⁴	2330	0."69	-	-
Kea (Subaru, Keck)	4210	??	??	??
Candidate Site for TMT				
Co. Tolar	2290	0."63	-	0."42
Co. Armazones	3064	0."64	-	0."41
San Pedro Martir (Mexico)	2830	0."78	-	0."50
Mauna Kea (13 North)	4210	0."73	-	0."45

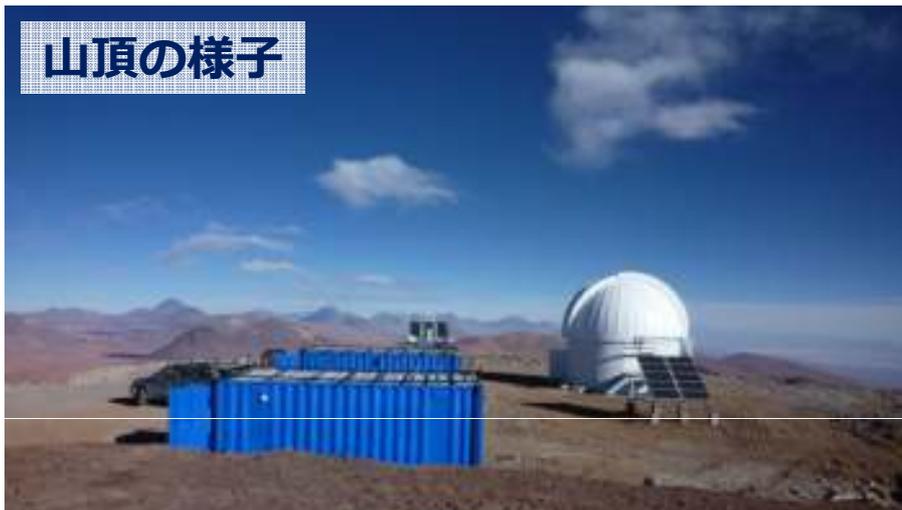
表 5: 他の観測所の DIMM によるシーイング測定結果との比較

Motohara et al. 08, SPIE



TAO6.5mに先立ち 1m望遠鏡 miniTAO

山頂の様子



観測室





1m望遠鏡 miniTAO / ANIR

- ANIR : Atacama Near-InfraRed camera
- 仕様

検出器	HAWAII2-Engineering
ピクセルフォーマット	1024 x 1024
ピクセルスケール	0.318"/pix
視野	5.41' x 5.41'
フィルター	Y, J, H, K, Pa α , Pa α -off, Pa β , etc
可視同時撮像	ダイクロイックミラーによる

- 2009.06.08 First Light



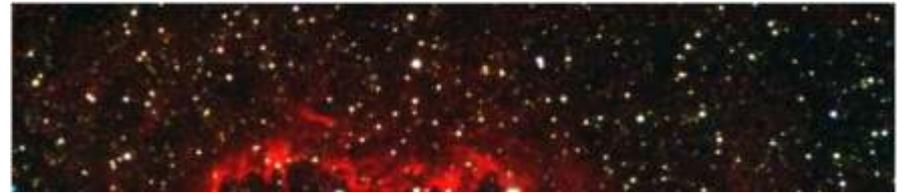


ANIR Pa α Imaging

- Pa α (1.8751 μm) Imaging of Galactic Objects



SgrA* (Pa α -off, Pa α , N207)



Quintuplet (H, Pa α -off, Pa α)



ANIR Pa α Imaging

- Nearby IR-luminous Galaxies.



Hidden Ionized Gas in Luminous Infrared Galaxy NGC 6926

ANIR / miniTAO 1.0m Telescope



Hidden Ionized Gas in Interacting Galaxies : IC 4686/4687/4689

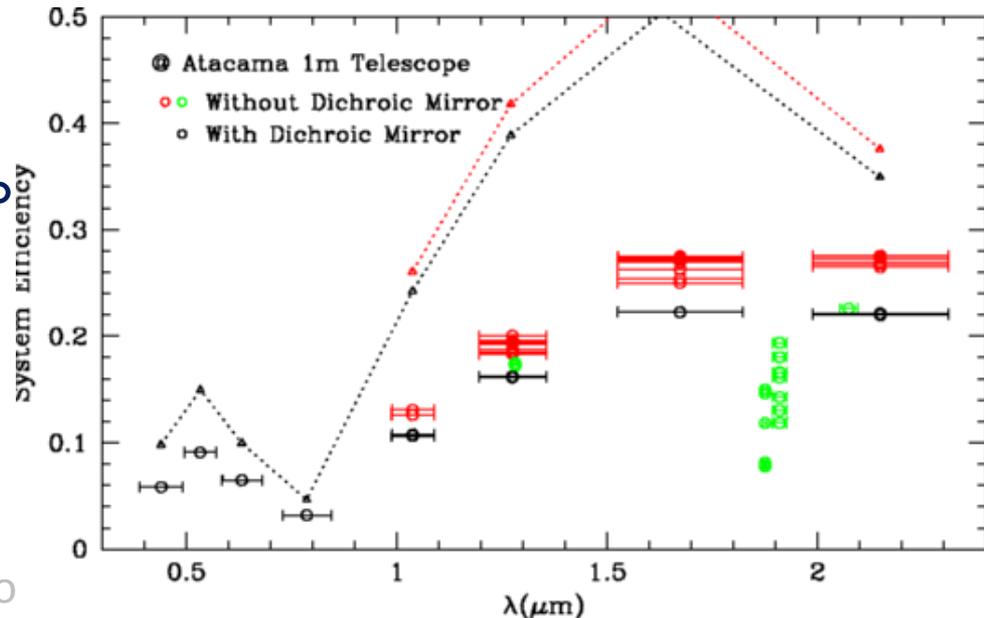
ANIR / miniTAO 1.0m Telescope



TAOサイトでの近赤外観測

- ANIR星像(FWHM) $\sim 0.56''$ を達成。
→良好なサイトであることを確認
- Pa α 観測
システム効率が2倍ほどふらつく。
水蒸気量の変動
(0.25-1.0mm)
で説明できるレベル。
c.f. 1.0mm @ MK

望遠鏡性能
 $\sim 0.4''$
回折限界
 $\sim 0.5''$





今後のminiTAO

- 2009 秋
ANIR第2期観測
中間赤外線カメラ First Light
観測の遠隔化
- 2010
本格観測
(銀河中心サーベイ、近傍LIRGサーベイ)

+

TAO-NIRCAM製作





山頂へのアクセス



- 最寄の町～山頂まで2時間半（80km）のドライブ

山頂へのアクセス



- 最寄の町へ (80km) のドライブ

山頂へのアクセス



- 最寄の町～山頂まで2時間半（80km）のドライブ



山頂へのアクセス

休憩中@標高4,200m



標高5,000mから見る
TAOサイト



- 最寄の町～山頂まで2時間半 (8

山頂へのアクセス



- 最寄の町～山頂まで2時間半（80km）のドライブ



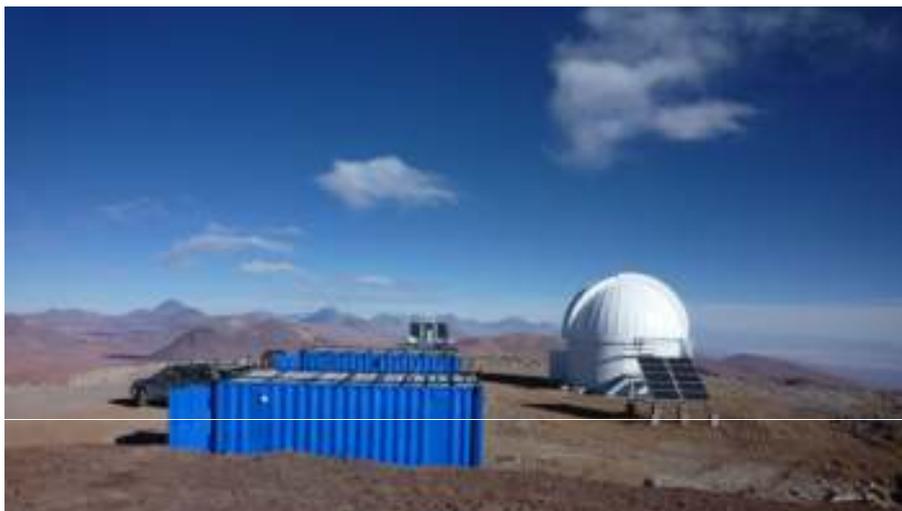
山頂へのアクセス



- 最寄の町～山頂まで2時間半（80km）のドライブ



山頂の様子



観測室



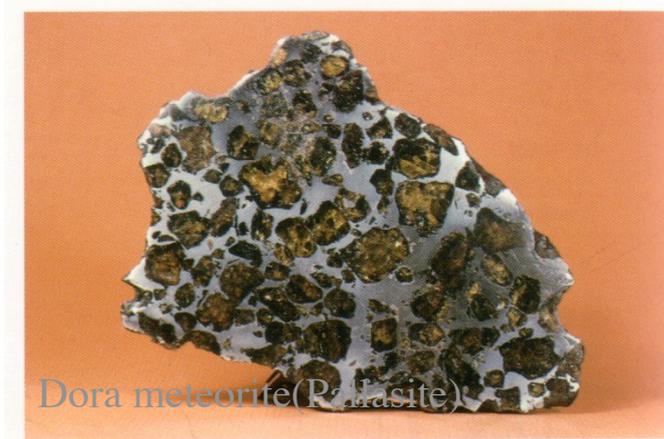
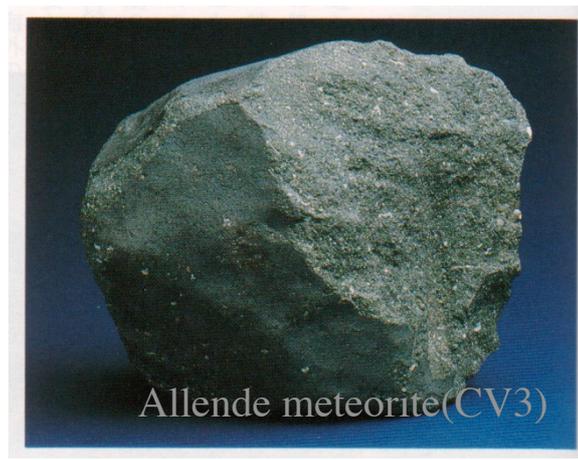
山頂から見下ろした風景

T A O近赤外観測装置による 太陽系天体の観測

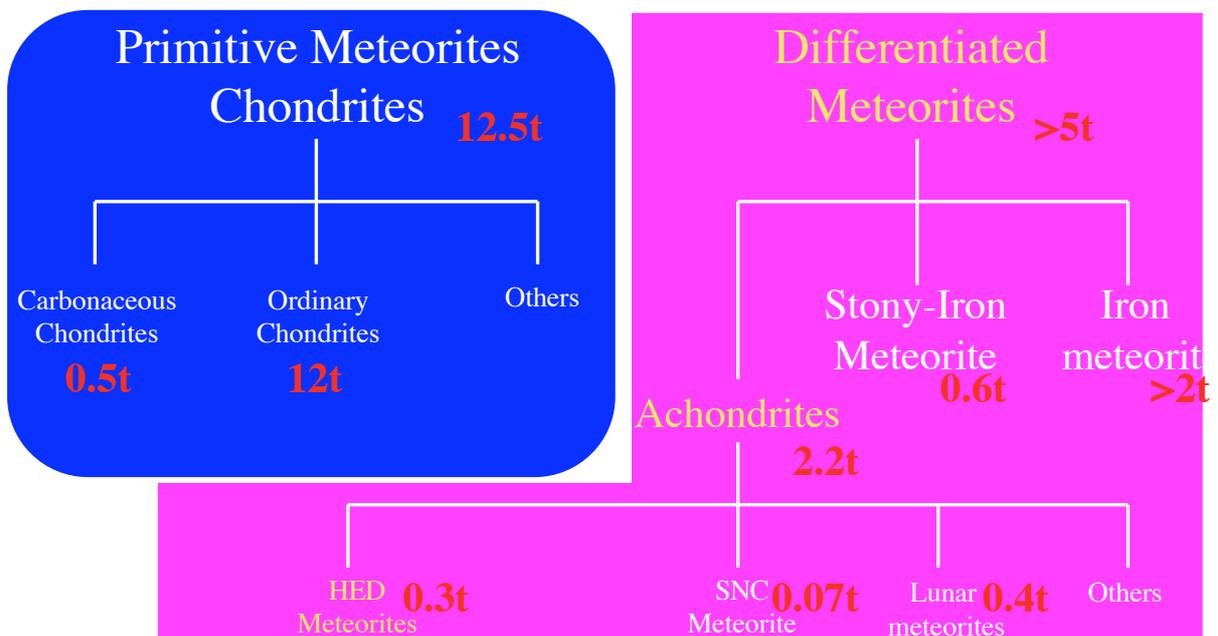
長谷川直、黒田大介、大坪貴文

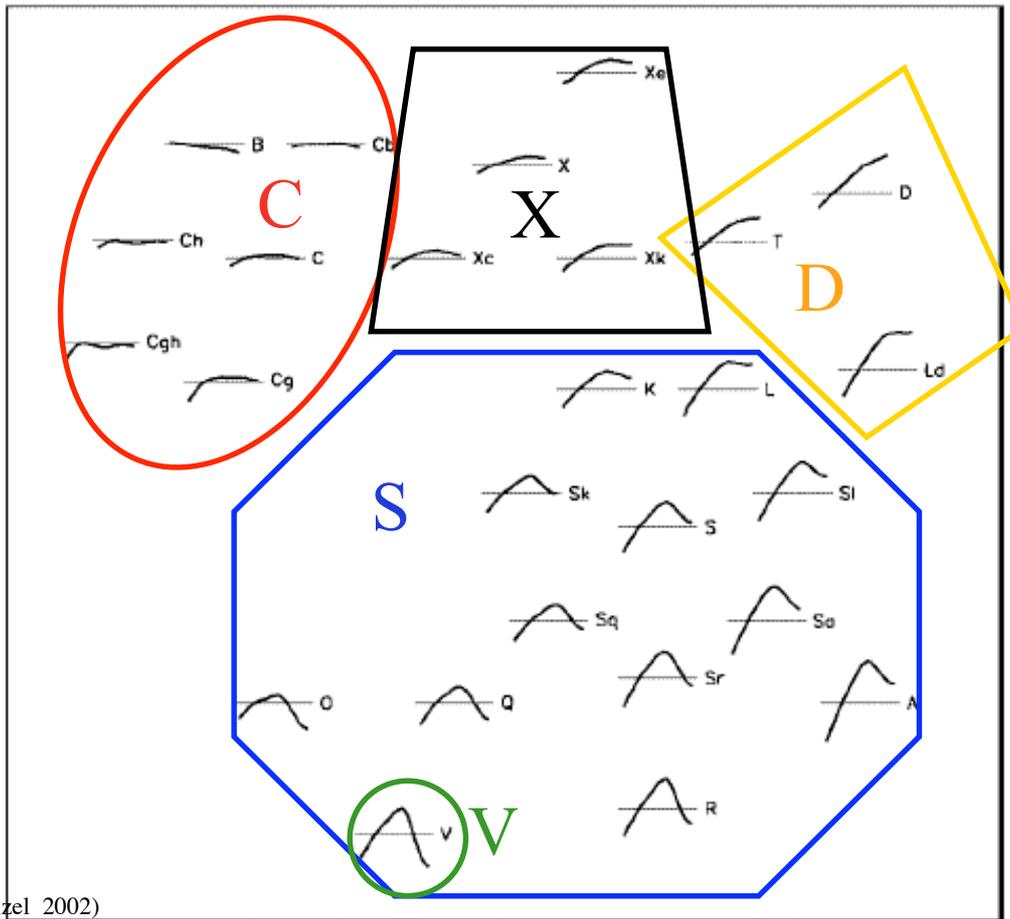
T A O 望遠鏡本体に関する 太陽系チームからのリクエスト

- 移動天体追尾を可能にして欲しい。
 - 移動天体追尾が出来ませんとこの後の話はすべてできなくなってしまう・・・
 - 移動量は最大で45arcsec/seconds。これを満足すれば、大概の太陽系天体が観測できます。

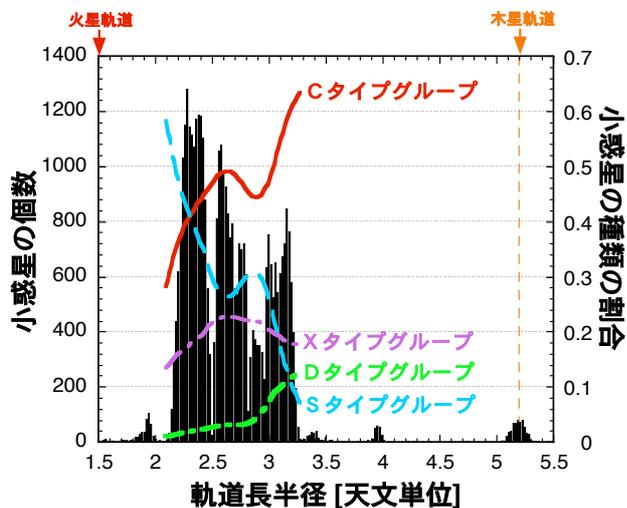


Meteorite Classification





小惑星の分光観測



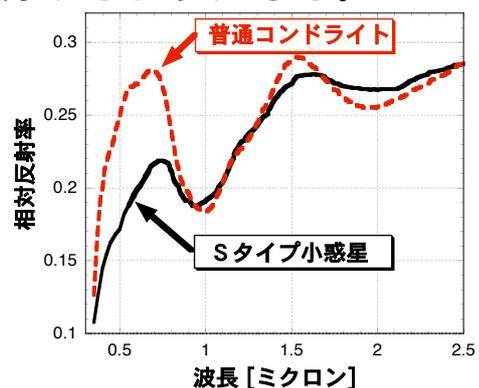
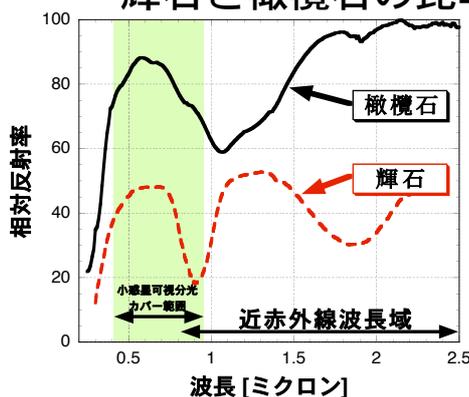
- C-type asteroids
 - Carbonaceous chondrites
- S-type asteroids
 - Ordinary chondrites
 - Stony-iron meteorites
- X-type asteroids
 - Iron meteorites
- D-type asteroids
 - Tagish lake meteorites

小惑星の分光観測

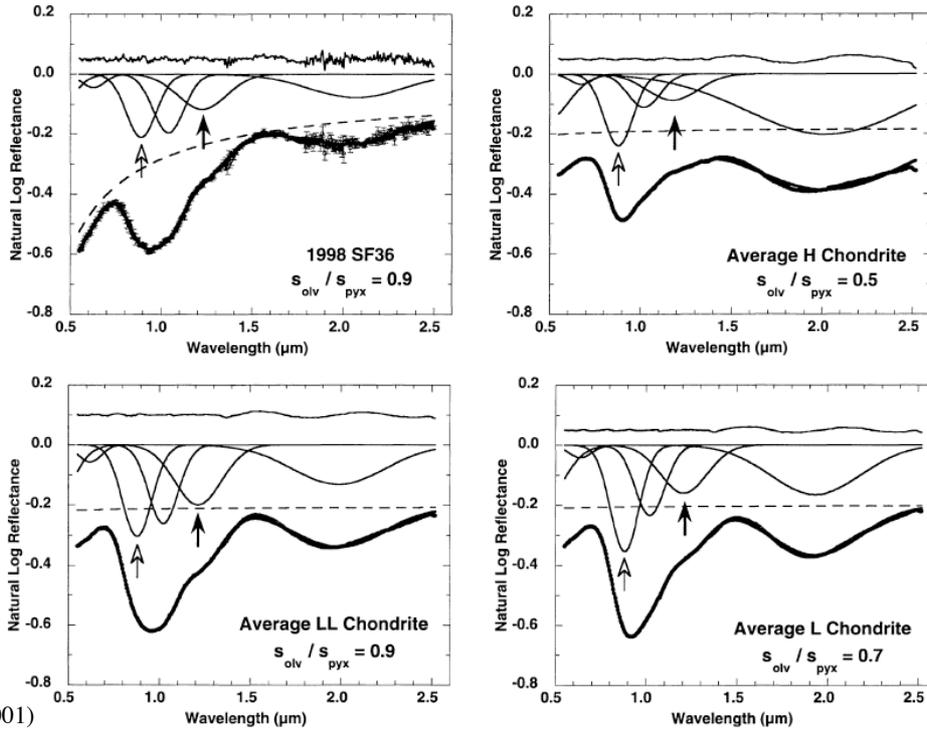
- 小惑星の分類は基本は可視のスペクトルから行われてきた。
- 但し、近赤外 ($0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$) のスペクトルがあるとより詳細な事がわかる。

小惑星の分光観測

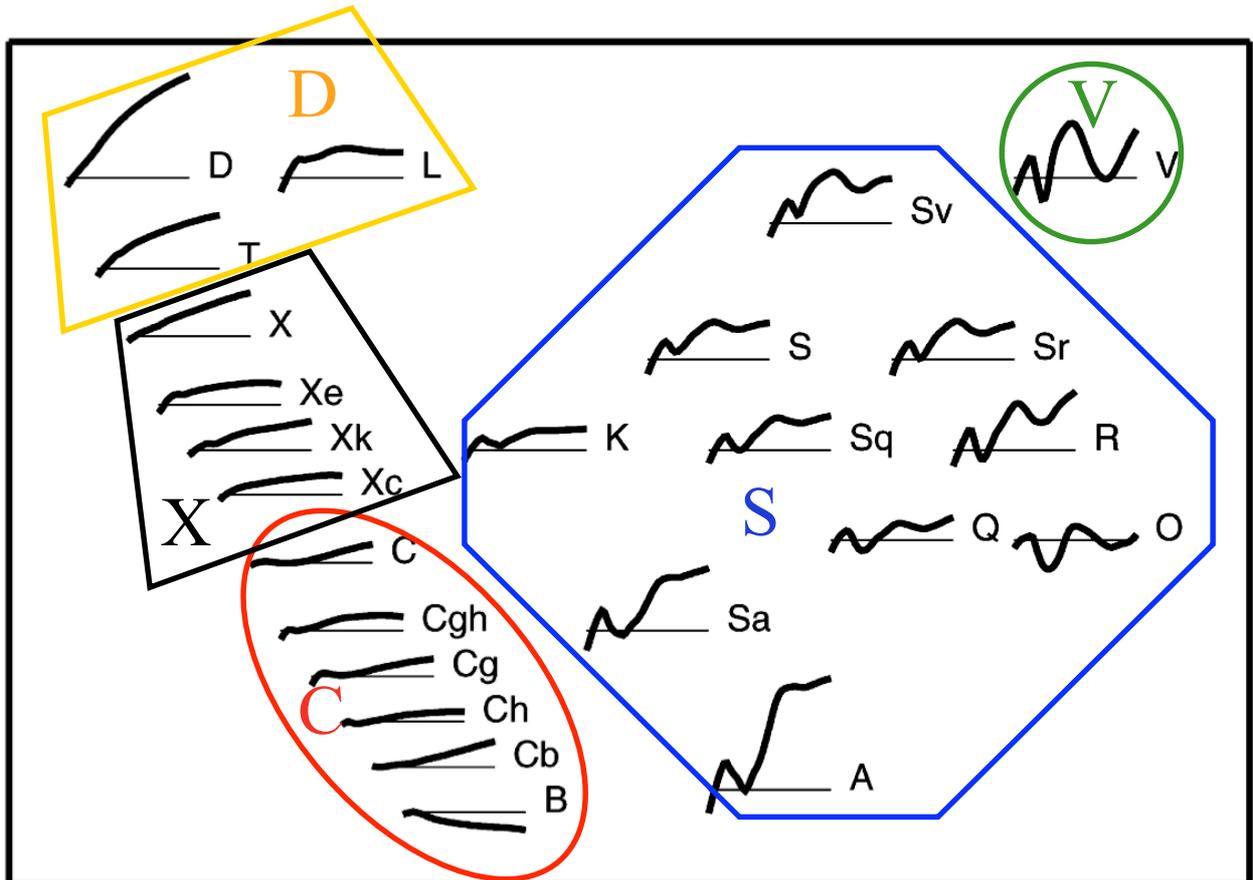
- 近赤外 ($0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$) のスペクトルがあるとより詳細な事がわかる。
 - $1\mu\text{m}$ & $2\mu\text{m}$ の吸収の深さと形状が分かる。
 - 輝石と橄欖石の比率が分かるようになる。



小惑星の分光観測



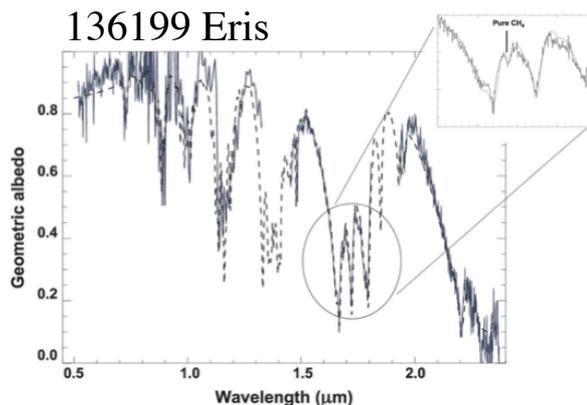
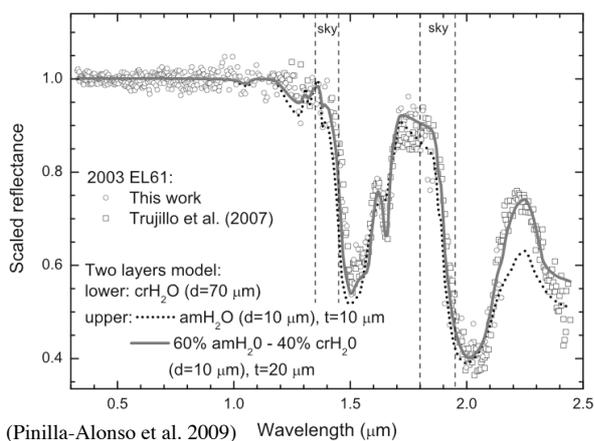
(Binzel et al. 2001)



(DeMeo et al. 2009)

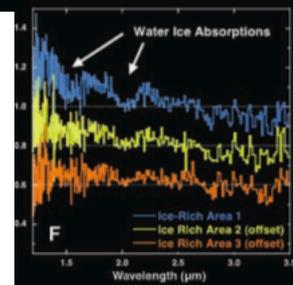
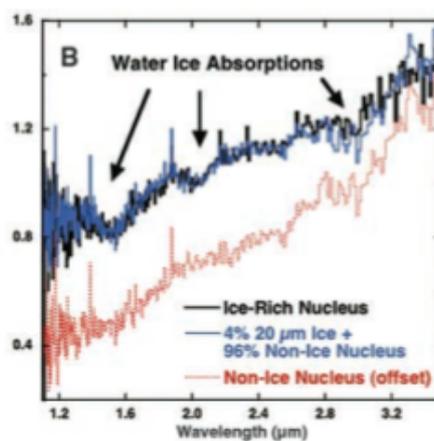
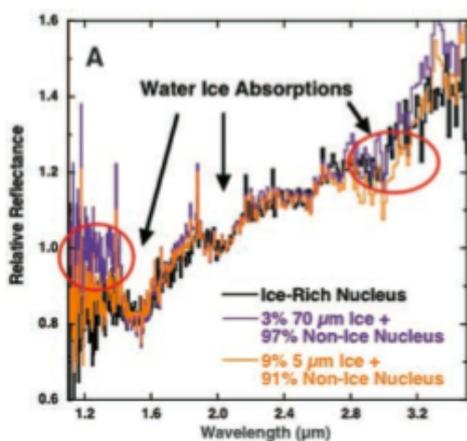
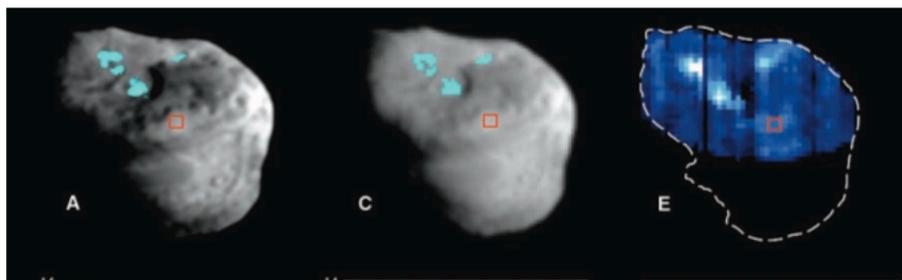
氷天体

- 水氷（アモルファス・結晶）・アンモニア・メタン等の判別が可能



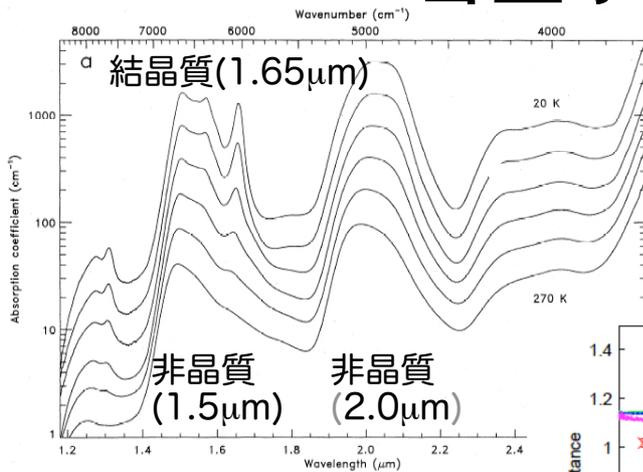
彗星核表面の氷の検出

Deep Impact
 探査の際の
 9P/Tempel
 の彗星核の
 観測

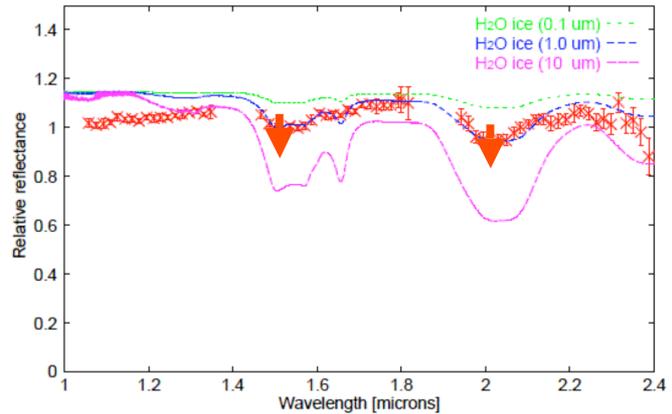


(Sunshine et al. 2006)

彗星氷の検出



リニア彗星 (C/2002 T7)
すばる+CISCO
1.05--2.45micron R=400,600



(Kawakita et al. 2004)

彗星氷粒の検出は
これまでわずかに2例

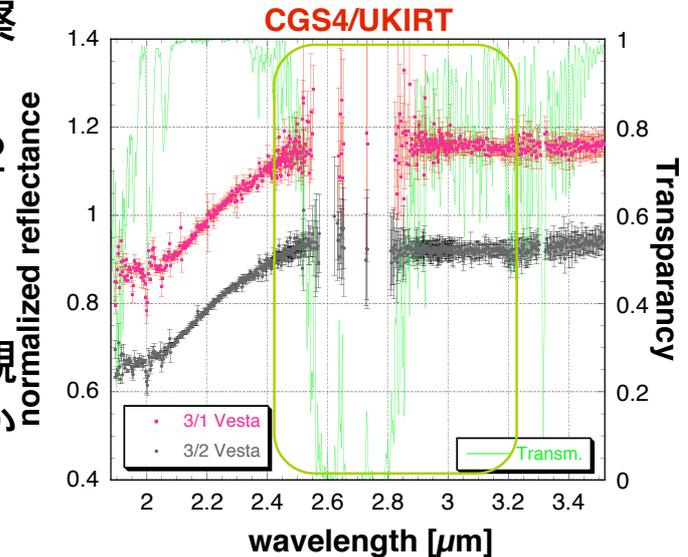
すばるクラスの望遠鏡
+観測時間の自由度が重要

T A O時代の面白そうな 小天体観測

- I R T Fで出来ないサイズレンジでの近地球小惑星観測
- 自転周期の速い (~ 2 時間) 小惑星の観測
- 氷天体の観測
- はやぶさ 2 の観測
 - オプションだが、衝突機が小惑星に衝突させる計画がある。

小惑星のLバンド分光

- 含水鉱物・氷が観察できるので重要。
- 特に2.4 ~ 3.2 μm の間が重要
- 但し、この波長の観測はハワイでもなかなか難しい・・・



T A O 近赤外装置に関する 太陽系チームからのリクエスト

- 分光のスリットに幅広のスリットを用意して欲しい（シーイングサイズの5, 6倍程度）。
 - 1オクターブの波長範囲を%の傾きの議論をする為に必要。イメージとしては測光分光。
- Lバンド分光も出来るようにして欲しい
 - 透過率を見ると、Lバンドについても大変素性が良い。T A Oのサイトを生かせる観測になるのではと考える。

2009/9/11

TAO 6.5m 近赤外線観測装置ワークショップ

星形成領域におけるYSO食連星サーベイ

国立天文台・ELTプロジェクト室
山下卓也

概要

- 広視野赤外線観測装置を用いた星形成観測
 - 良く行われる観測
 - 問題点
- 食連星観測による星の物理パラメータの決定
 - ライトカーブ+視線速度 → 主星・伴星の質量・半径(温度、光度)
- 食連星サーベイの現状
 - Monitor プロジェクト
- YSO食連星サーベイの提案
 - TAO 6.5m のメリット
 - 近赤外線・連続性
 - 円盤システム(同土)の食の発見?!

広視野赤外線装置を用いた星形成研究

- すばる MOIRCS で良く行われる星形成関連の観測
 - 超低質量YSOの統計的研究
 - 星形成領域の深いYSOサーベイ・多天体分光
 - より軽い星(褐色矮星・惑星質量)の存在・形成・進化
 - IMF の軽い側の関数形
- しかし、どうしても残る疑問点！
 - 進化モデルは正しいのか？
- この問題の解決の数少ない方法の一つ
 - → 食連星による星パラメーターの決定
 - YSO の食連星はまだあまり進んでいない

星の物理量の決定

- 天体質量の決定

- 軌道(運動)を決定 → ニュートン力学で質量決定
- (可視赤外線天文では主に)連星系を用いる
 - 電波では、星周ガスの運動を用いる

- 連星系

- 実視連星の質量

- 位置を精度良く測定して軌道を決定
 - 2天体の相対位置変化だけだと、質量の和しかわからない
- 連星系の軌道周期: P
- 連星系の軌道長半径: $a = a_1 + a_2$

$$- \frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}$$

- » 連星系の見かけの軌道長半径: α

- » 距離 (d) がわかっていると: $a = \alpha \times d$

星の物理量の決定

– 分光連星の質量

- DLEB: Double lined (SB2) eclipsing binary
 - $M_1 \sin^3 i, M_2 \sin^3 i$ が求まる
- SLEB: Single lined (SB1) eclipsing binary
 - 質量関数 ($(M_2 \sin^3 i)^3 / (M_1 + M_2)^2$)しか求まらない
- SB2 で(相対位置)実視連星でもあると、主星・伴星の質量が求まる
- 食が観測されると、 i が求まり、かつ…
 - Eclipsing Binary(食連星)

• Eclipsing Binary(食連星)

- 測光観測で“食”を起こす天体を見つけ、光度変化を観測
- 視線速度の観測を合わせて主星・伴星の質量決定
 - モデルを介するが、主星・伴星の半径も求まる
 - 表面温度、光度、表面重力も求まる(多色データ)

食連星(Eclipsing Binary)観測の現状

- 観測の現状
 - 1Mo 以上の主系列星は多く観測されている
 - $< 1\text{Mo}$, YSO の観測は非常に少ない
 - 実行中の食連星サーベイプロジェクト
 - Monitor
 - 散開星団トランジットサーベイの副産物
 - UStAPS
 - The University of St Andrews Planet Search
 - EXPLORE-OC
 - EXtrasolar PPlanet Occultation REsearch – Open Cluster
 - PISCES
 - Planets in Stellar Clusters Extensive Search
 - STEPSS
 - Survey for Transiting Extrasolar Planets in Stellar Systems

Monitor プロジェクト

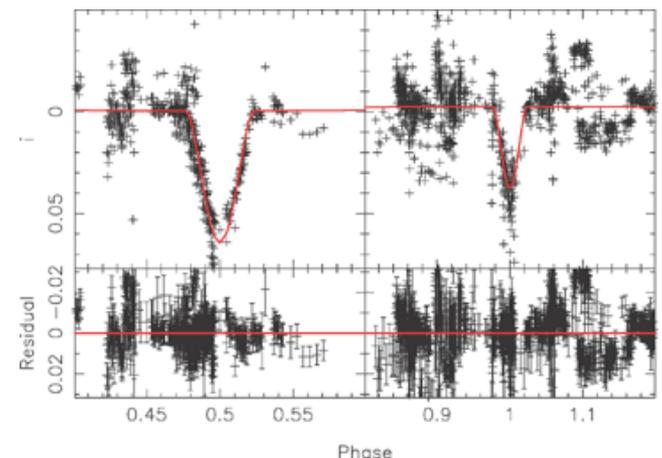
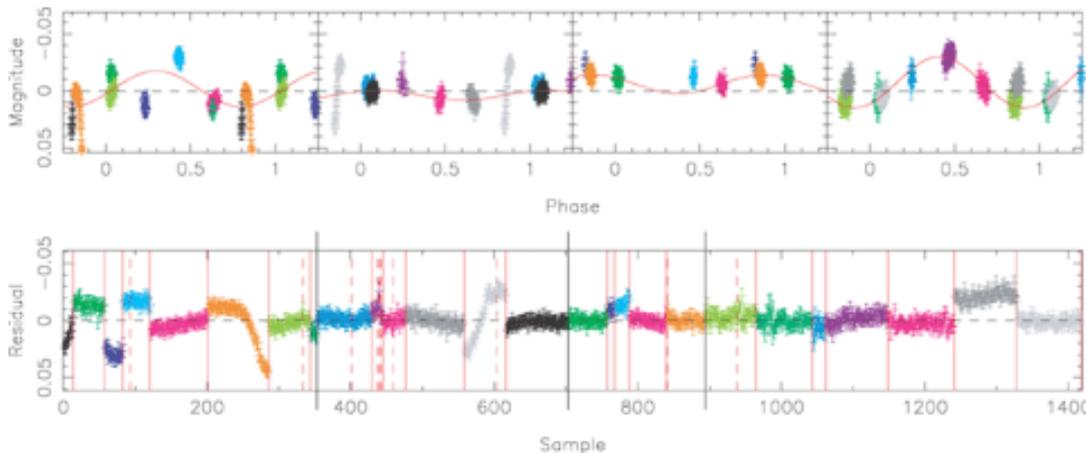
- 9つの若い散開星団の測光モニター
 - 超低質量星・BDの掩蔽, 惑星トランジットを見つける
 - 若い星の、年齢・質量・半径・光度の関連を較正
 - K型星から惑星まで
 - 副産物: 自転とフレア
 - 2004年開始、世界中の 2- 4 m 望遠鏡を利用
 - 100以上のEB + 約3のトランジット惑星を見つけると期待
- ターゲット
 - $t \ll 200$ Myr、1回の撮像で数百天体が撮れること
 - Primary: ONC, NGC2362, NGC2547, NGC2516
 - Secondary: h & χ Per, IC4665, Blanco 1, M50, M34

Monitor プロジェクト

- 望遠鏡＋装置
 - INT 2.5m: Wide Field Cam
 - ESO/MPI 2.2m: Wide Field Imager
 - CTIO 4m: Mosaic II
 - CFHT 3.6m: MegaCAM
 - KPNO 4m: Mosaic
- サーベイの深さ
 - 主系列の下限質量星に対して測光精度～1%
 - $I = 19 \text{ mag}$ が分光RVフォローアップを行う限界
- サンプリング間隔
 - $< 15 \text{ min} : 1\text{hr}$ (最短)の掩蔽を見逃さない
 - できれば 5 min に近く: ingress, egress を分解する

Monitor プロジェクト

- オリオンのサンプル (Irwin J. et al. MN 380, 541 2007)
 - WFC on 2.5m INT, 34' × 34' 写野、10夜の観測を2+2セット
 - 積分時間: 60s at V and 30s at i バンド → 3.5分頻度
 - 限界等級: 1% 精度で、18mag at V and 17mag at i バンド
 - 2500天体のライトカーブ取得
 - EB イベント ~ 0.05mag v.s. 食以外 ~ 0.03mag PV
 - 黒点の自転による変動
 - フィッティング → 4.9日の自転による modulation でOK
 - 黒点の生成・消滅 → ライトカーブが粗だとうまくフィットできない

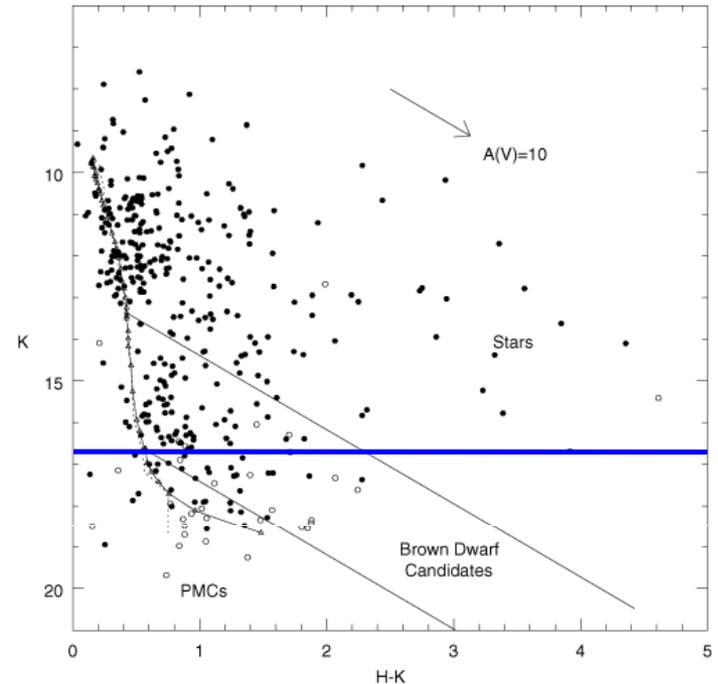


食連星サーベイの提案

- 可視光モニター観測ではできない(不得意な)天体を狙う
- TAO 6.5m の利点
 - 近赤外線観測
 - 若いEBを多数発見できる
 - 同年齢仮定が成り立っていない？
 - 多くのサンプルが必要
 - より若い天体をサーベイできる
 - 進化トラックのより若い時期の天体データを提供できる
 - 円盤システム(同土)の食が発見できるかも！
 - 連続的に観測できる
 - 黒点(など)による別原因の変光の補正が容易

食連星サーベイの提案

- 対象とする天体 (主星、伴星)
 - 若い星状天体 (YSO)
 - 低質量星 YSO
 - 若い褐色矮星
 - あわよくば、惑星質量天体
 - Orion: 1 Myr の進化モデル (右図)
 - $A_V=10$ mag: BDの主星が十分に検出できる
 - $A_V \sim 0$ mag: 主星が惑星質量天体
- 対象とする現象
 - 食による減光
 - Eclipsing Binary
 - 惑星トランジット
 - 周期: 10日程度までを狙う?
 - 使える時間に依存: 長いほどよい



Lucas+05 MN361, 211
Orion 周辺部: $26''$, 396天体

食連星サーベイの提案

- 観測計画
 - 期間
 - 観測頻度
 - 5分毎 (ingress, egress を分解)
 - 積分時間
 - 1分を仮定
 - 感度 (すばるMIRCSから換算)
 - 1分積分, 100σ
 - 17.8 mag at J
 - 16.7 mag at H
 - 16.8 mag at Ks
 - 面積
 - $8' \times 4' \times 4'$ 写野程度

食連星サーベイの提案

- 観測計画
 - 対象領域
 - 年齢 < 10Myr の星形成領域 (散開星団は含めない)
 - ONC(-5°) ~1Myr, 480pc
 - NGC2362(-25°) ~5Myr
 - その他南天の近傍星形成領域
 - » 未調査です
 - IC348 (+32°) ~3Myr
- 発見確率 (定量的計算はしていません)
 - 写野: 8' × 4' × 4写野
 - WFC on 2.5m INT, 34' × 34' の1/9
 - 中心部を狙うので星の数密度は高い
 - Monitor はOrion 周辺部
 - Monitor の期待値: >100 の食連星 (オリオンだけではない)

食連星サーベイの提案：フォローアップ観測

- フォローアップの高分散分光 (RV)
 - Monitor では $I < 19$ mag を設定 (8-10m 可視高分散分光)
 - 例えば、すばる IRCS を用いると
 - 1hr, 5σ
 - AO がフルに効いていると仮定
 - J,H,K ~ 18 mag
 - 発見される多くの食連星は赤外RV観測可能
 - TMT に拡張
 - + 2.8 mag \rightarrow 21 mag
- 原始星は吸収線の視線速度測定は難しい？
 - 非常に若い原始星は円盤表面からの吸収線がある？
 - 円盤からの輝線がみられる場合もある(分離が困難?)

食連星サーベイの提案

- しかし、**円盤システム(同土?)の食が見られるかも!**
 - 原始星・円盤の幾何構造の新しい情報が得られる
 - 但し、ある程度離れたシステムでないといけない??
 - 円盤のサイズ?
 - 軌道周期の長いシステム → 長時間モニター
- 散乱光しか見えていない天体の場合は、Pole-on から見るのに等しい?!
 - 角運動量が揃っていると食を起こす幾何学的配置はない?
 - ひょっとしたら妙なシステムがあるかも

観測装置へのリクエスト

- 高いダイナミックレンジ
 - ある程度明るい星も対象にできると良い
 - しかし、明るい星は数も少ないし・・・
- 短い読み出し時間
 - 高い観測効率
 - ダイナミックレンジ確保のためには短時間積分の足し算？
 - 10秒程度であれば・・・

ミラ型変光星を用いた 橈円銀河の高精度距離測定

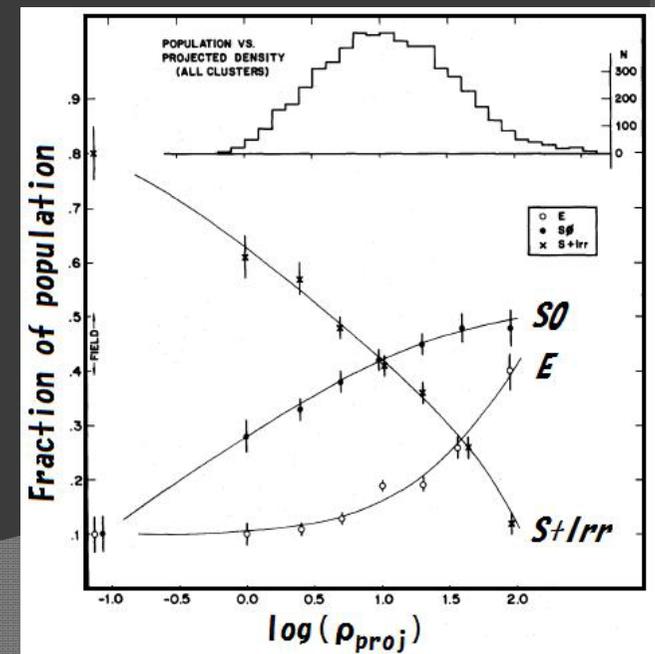
松永典之
(東大天文センター)

はじめに

- ◎ IRSF/SIRIUSの経験から：
 - 安定して常時使うことのできる赤外線装置は大変有効である。
 - 豊富な観測時間を活かして、世界でも稀少な近世外線での変光星観測を行いたい。

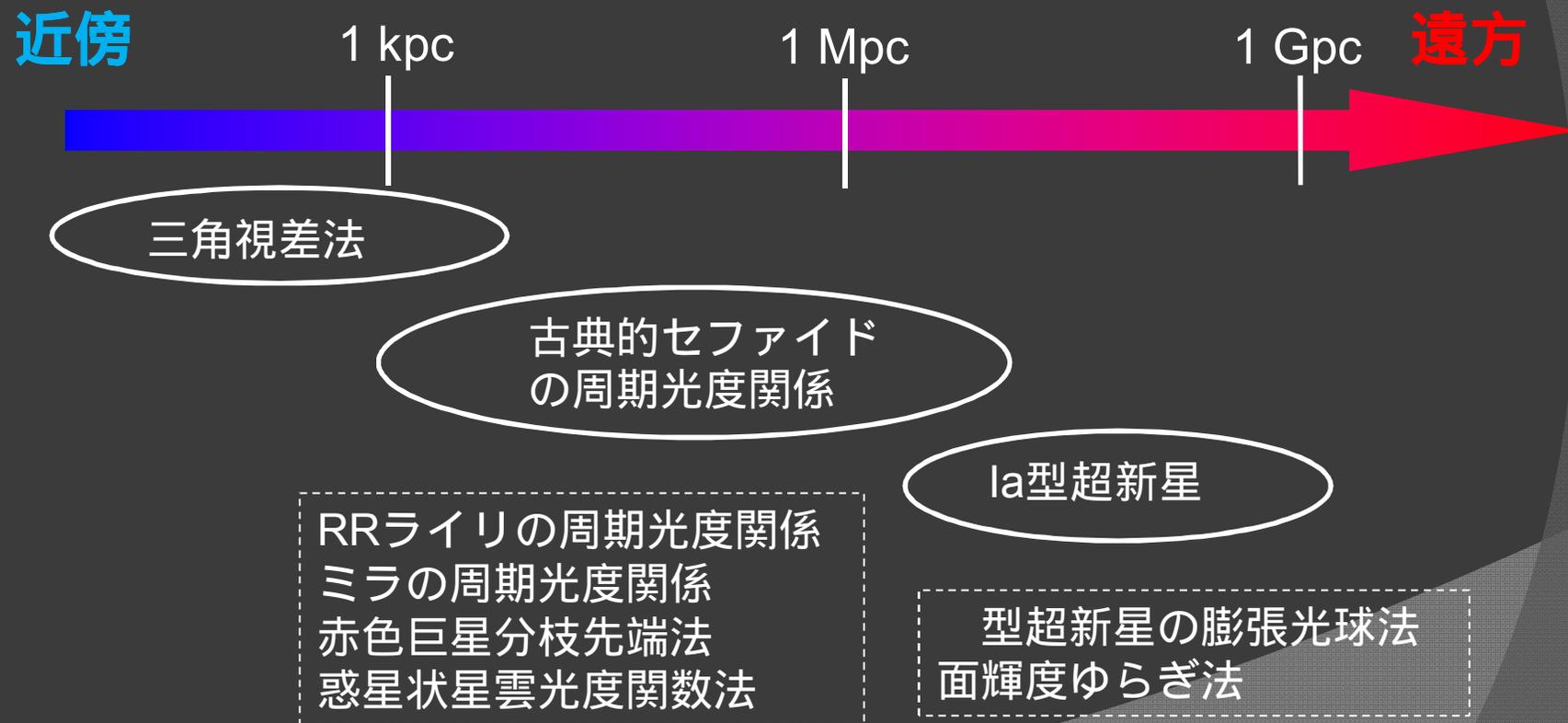
楕円銀河

- ◎ 宇宙初期の銀河形成・進化を物語る重要な化石
 - 古い星が支配的
 - 銀河団の中心部分に向かって多い。
- ◎ 楕円銀河の正確な距離決定によって・・・
 - 渦巻銀河とは異なる銀河団内での分布
(Cf. おとめ座銀河団)
 - 光度など基本的な物理量



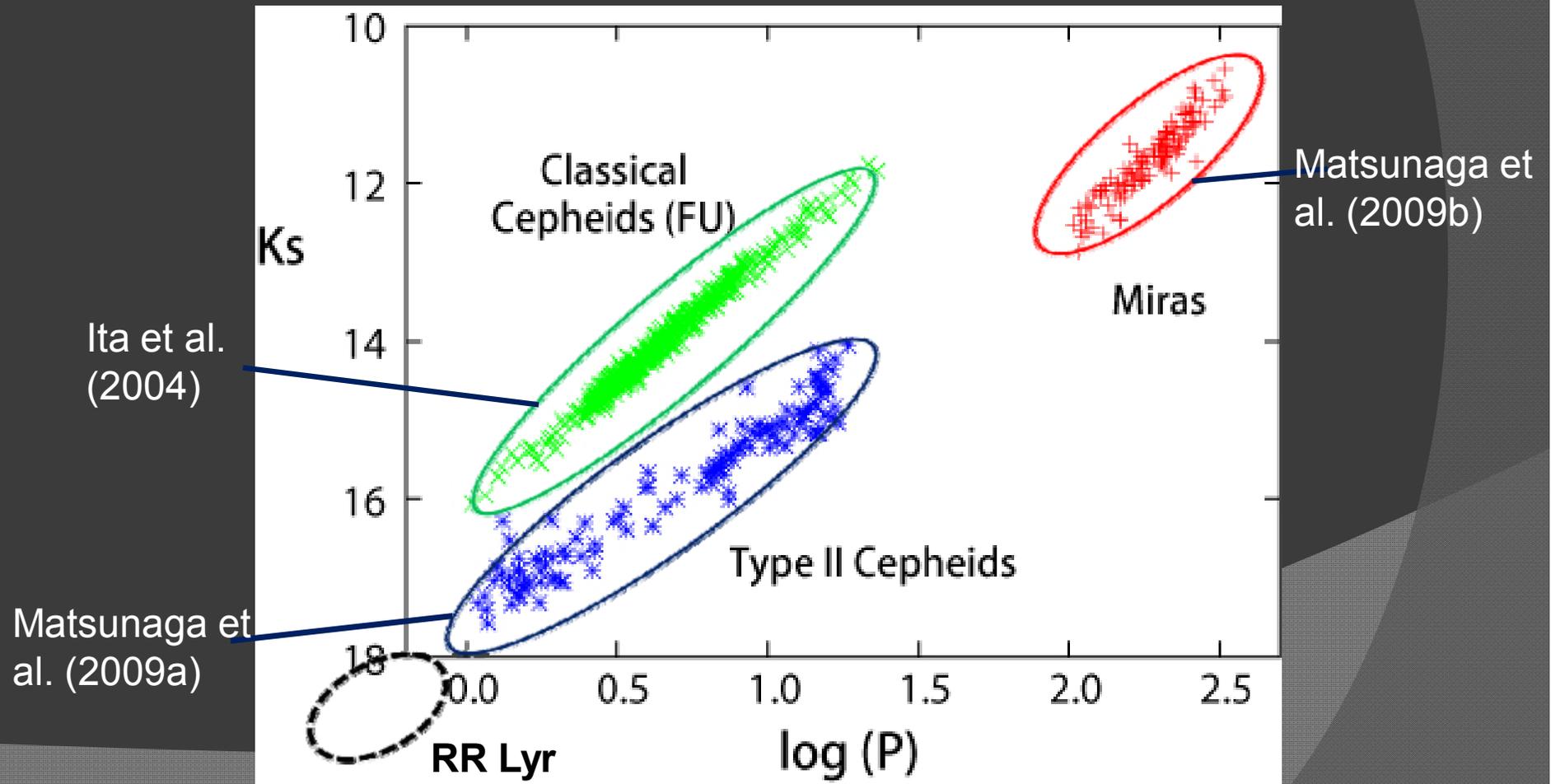
距離のはしご

- ◎ 三角視差法では届かないが、個々の星が見えるという範囲では、セファイドの周期光度関係が基本的な役割を果たす。



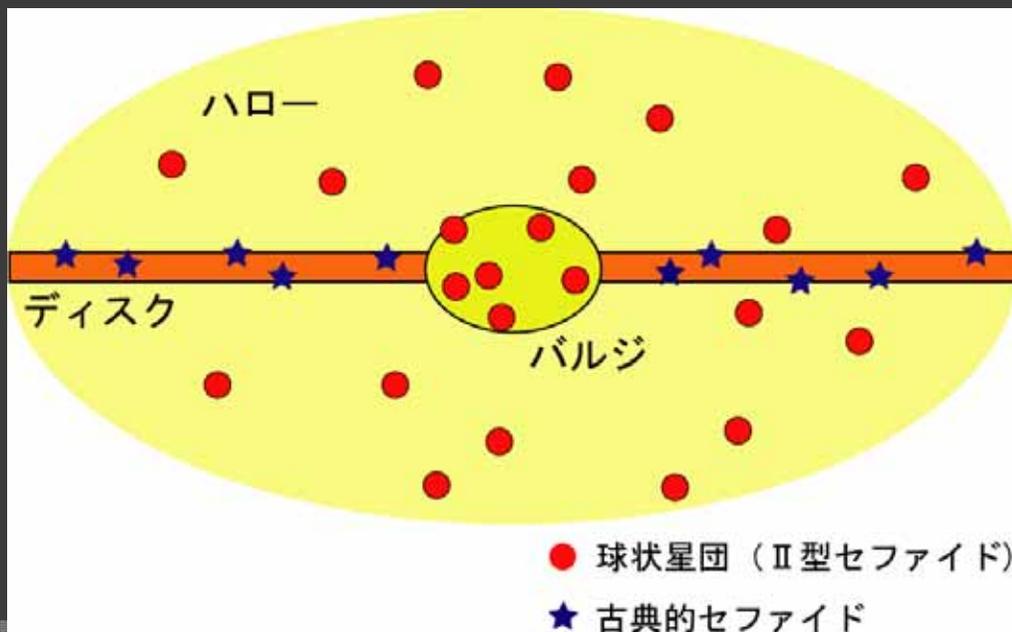
周期光度関係

- ◎ LMCにある数種類の変光星の周期光度関係
 - すべて、IRSF/SIRIUSの観測に基づく。



変光星の年齢

- ◎ 古典的セファイド
 - 若いグループ（ディスクなど）。3 ~ 10 太陽質量。
- ◎ 型セファイド・RRライリ
 - 年老いたグループ（球状星団など）。約 1 太陽質量。
- ◎ ミラ型変光星は 1 ~ 5 太陽質量程度



1 Gyr以上の年齢の星
しかない銀河：

× 古典的セファイド
型セファイド
RRライリ
ミラ型変光星

楕円銀河の距離決定法

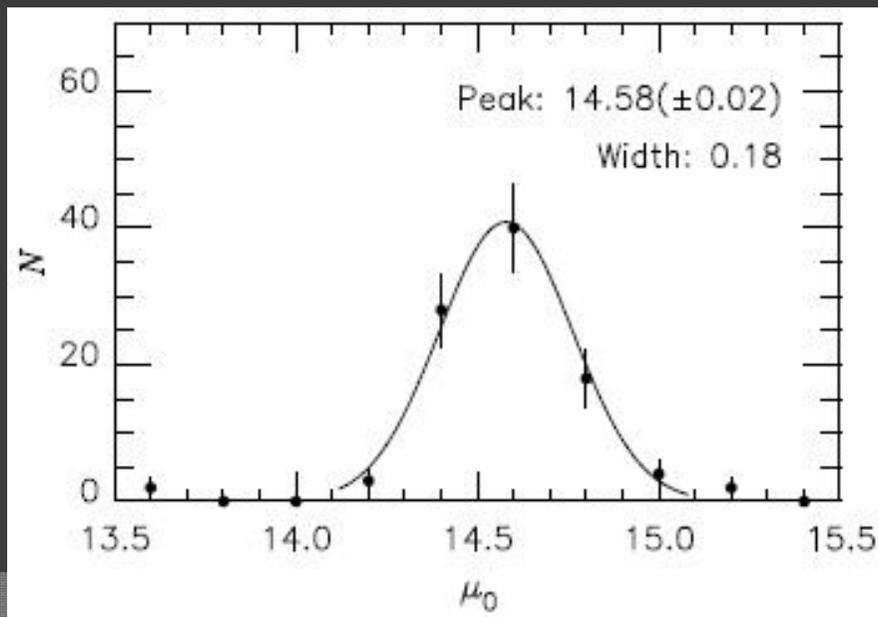
- ◎ 古典的セファイドがないので、高年齢の種族に使える距離指標が必要。

距離指標	精度	到達できる距離
RRライリのP-L関係		×
型セファイドのP-L関係		×
ミラ型変光星のP-L関係		
赤色巨星分枝先端法(TRGB法)		
惑星状星雲光度関数法		
面輝度ゆらぎ法		
フェイバー・ジャクソン関係	×	

ミラ型変光星による距離決定

◎ 周期光度関係の利用

- ひとつひとつのミラに対する距離決定精度は ± 0.2 mag ほど。何十個かまとめて使うことで統計誤差が小さくできる。
- 系統誤差
 - LMCの距離の不定性
 - 金属量への依存性がよくわかっていない。

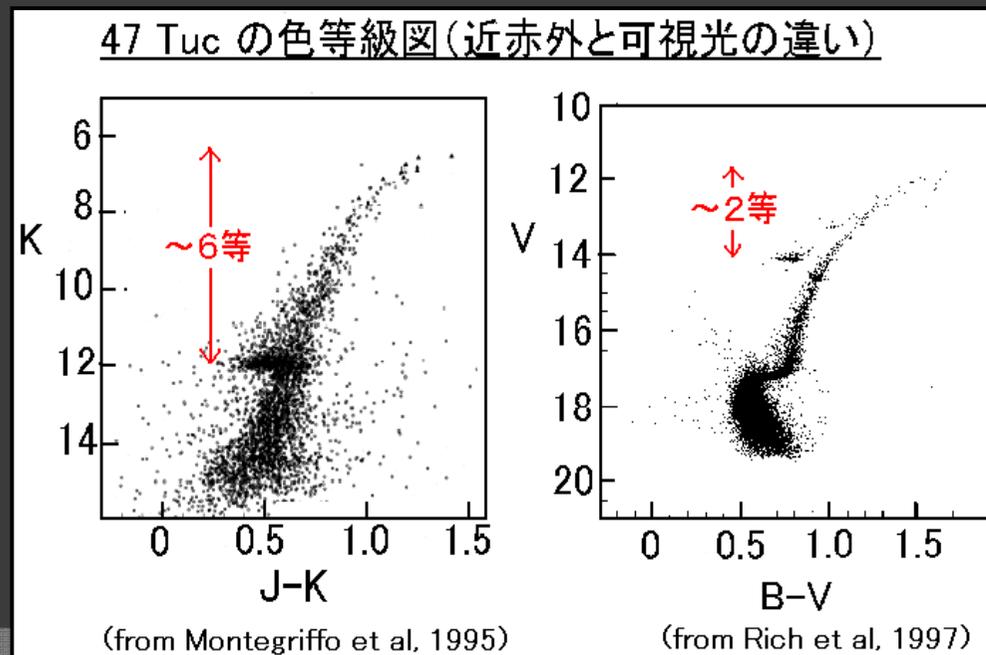


銀河中心の距離決定

$\mu_0 = 14.58 \pm 0.02^{\text{stat}} \pm 0.11^{\text{syst}}$
(Matsunaga et al. 2009)

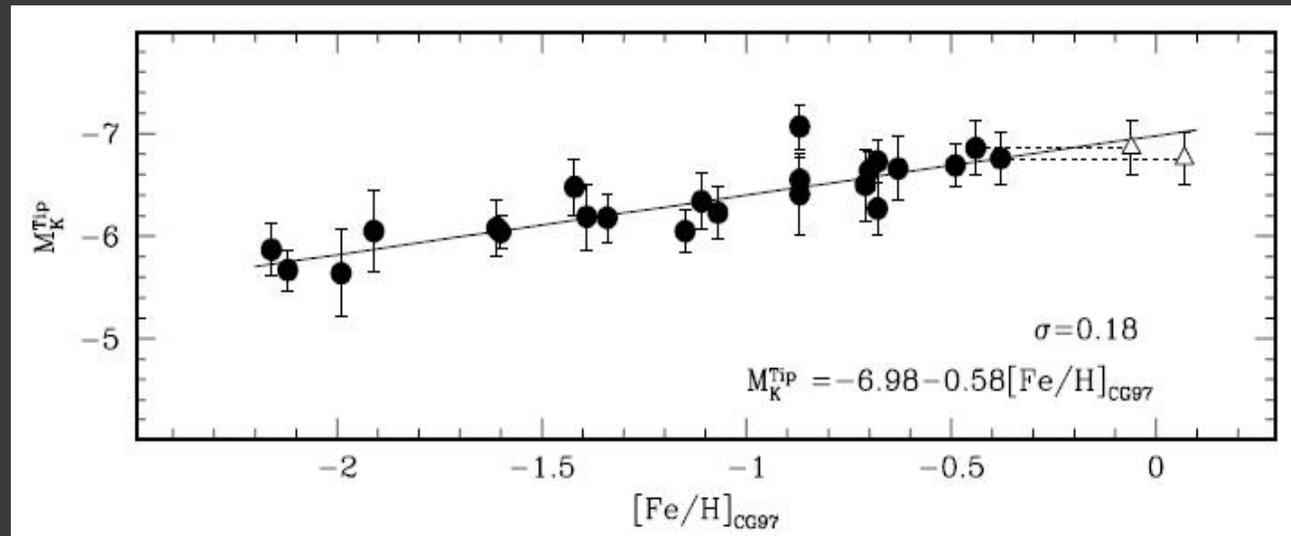
近赤外線観測の有利な点

- ◎ ミラの周期光度関係は近赤外でないとダメ。
- ◎ ミラが目立つので混んだ領域でも検出・測光しやすい。
 - 楕円銀河では重要な利点
 - それでもやはりAOは欲しい。



TRGB法 (赤色巨星分枝先端法)

- ヘリウムフラッシュの光度が、金属量にそれほどよらずほぼ一定であることを利用
 - 比較的精度が高いが、ほとんどの場合tipの等級を求めるのに ± 0.10 等ほどの誤差が出る。
 - S. Sakai氏(UCLA)らが精密な方法論を確立している。



どれくらいの精度が出るか

- ◎ 100個のミラが見つければ

→ ± 0.02 (stat.) ± 0.10 (syst.) mag

$\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3$ dex に対し、 $\Delta\mu_0 \sim 0.05$ mag

(ただし、まだあまり確立されていない。)

- ◎ TRGB法

→ ± 0.10 (stat.) ± 0.10 (syst.) mag

$\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3$ dex に対し、 $\Delta\mu_0 \sim 0.2$ mag (Kバンドの場合)

- ◎ 10Mpcにおけるの $\Delta\mu_0$ の影響

$\Delta\mu_0$ (mag)	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.50
ΔD (kpc)	90	230	460	690	920	1400	2300

* MWとM31の距離：700 kpc

Cen Aの場合

- ◎ Cen A (NGC 5128)
 - S0銀河
 - 電波銀河で最も近いAGNがある。
 - Rejkuba (ESO)らがミラ型変光星の観測を行った。



Centaurus A
(MPG/ESO 2.2-m + WFI)

ESO PR Photo 14a/03 (10 June 2003)

©European Southern Observatory

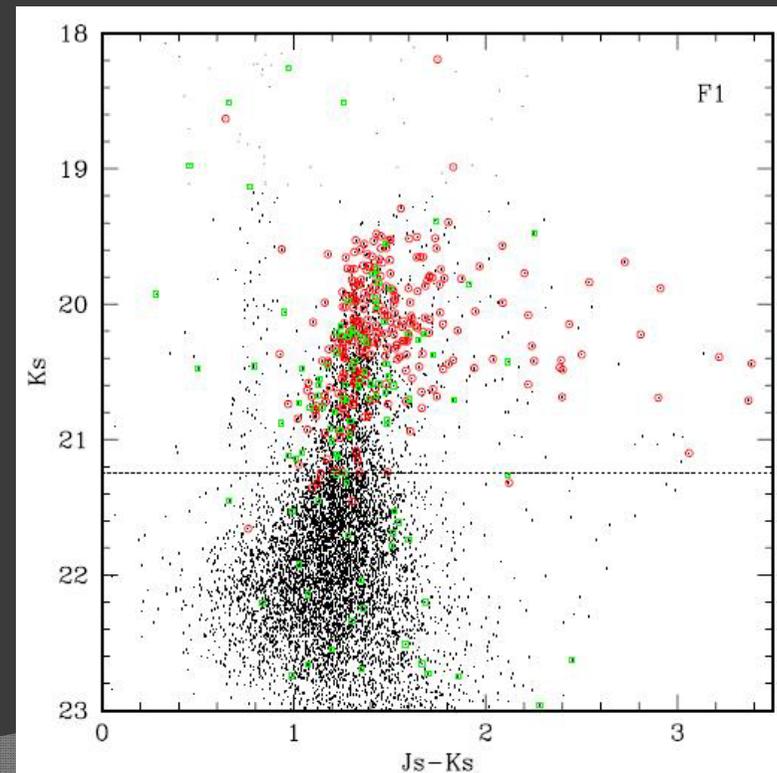
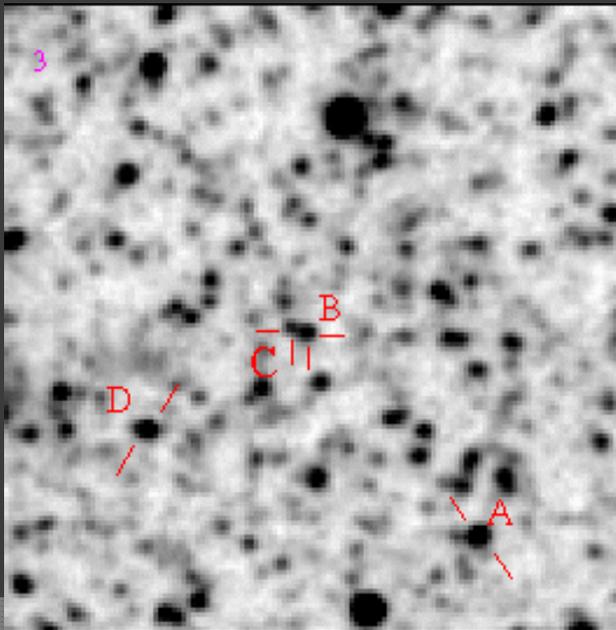


#	DM (mag)	Method	Reference
1	26.6	Stellar luminosity function (LF)	Sersic (1958)
2	29.6	Largest HII regions	Sandage & Tammann (1974)
3	27.73 ± 0.14	Planetary nebula LF	Hui et al. (1993)
4	27.97 ± 0.14	Planetary nebula LF	(3) revised by Harris et al. (1999)
5	27.53 ± 0.5	Globular cluster LF	Harris et al. (1988)
6	27.86 ± 0.16	<i>I</i> -band RGB tip (WF chips of WFPC2)	Soria et al. (1996)
7	27.76 ± 0.16	<i>I</i> -band RGB tip (PC chip of WFPC2)	Soria et al. (1996)
8	27.98 ± 0.15	<i>I</i> -band RGB tip (WFPC2)	Harris et al. (1999)
9	27.48 ± 0.06	<i>I</i> -band SBF	Tonry & Schechter (1990)
10	27.71 ± 0.10	<i>I</i> -band SBF	(9) revised by Israel (1998)
11	28.18 ± 0.07	<i>I</i> -band SBF	(9) revised by Marleau et al. (2000)
12	28.12 ± 0.15	<i>I</i> -band SBF	Tonry et al. (2001)

Rejkuba (2002-2004)の観測

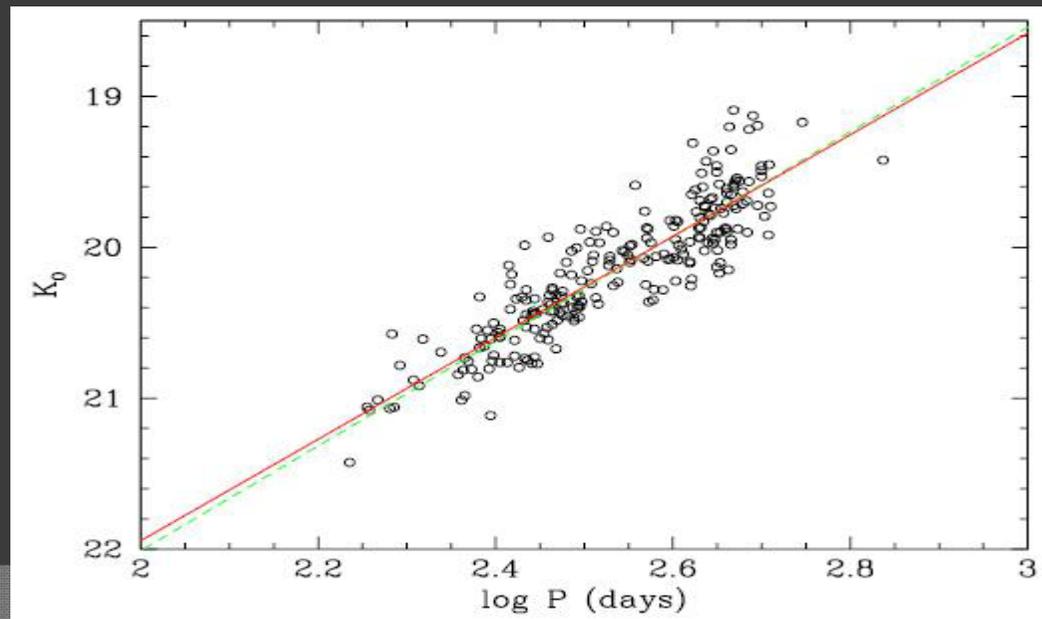
◎ VLT-8.2m / ISAAC

- 1999~2002にかけて約20回
- 0.148"/pix (1k1k Hawaii Rockwell array)
- FWHM ~ 0.4"
- Exposure ~ 60 min



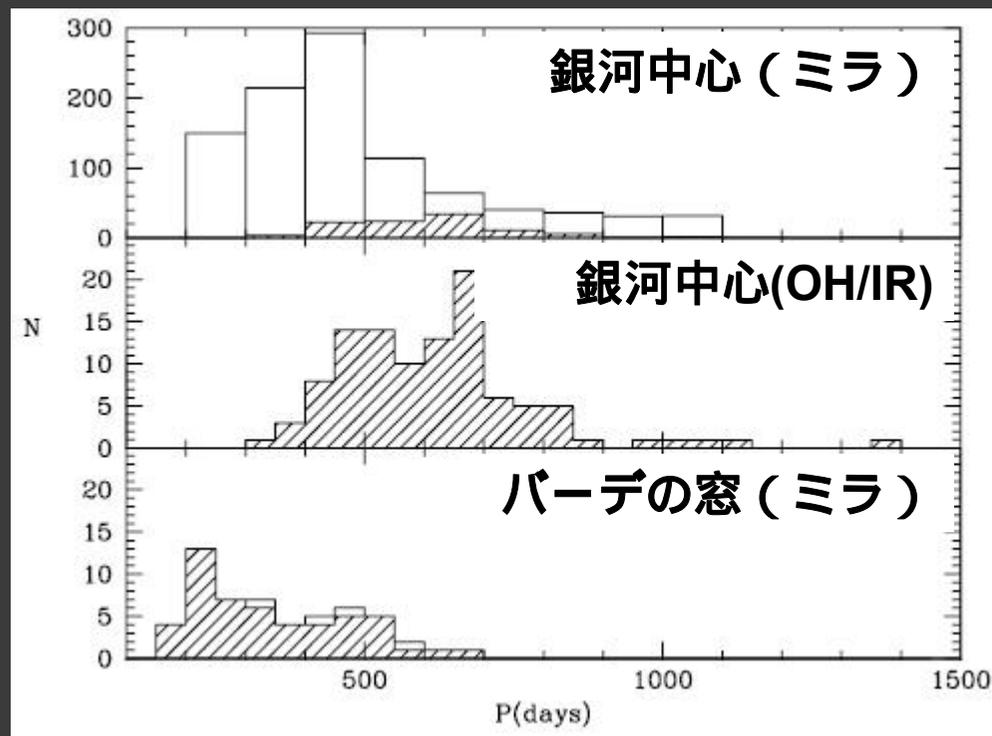
Rejkubaによるミラの発見

- ◎ 1000個以上の長周期変光星を発見
- ◎ 局部銀河群の外にある銀河で初めて（現在のところ唯一）
- ◎ 周期光度関係を利用して距離測定
 - $\mu_0(\text{Cen A}) = 27.96 \pm 0.11 \text{ mag}$ (系統誤差込み)
 - 同時に求めたTRGB法の結果では $27.87 \pm 0.16 \text{ mag}$



さらにミラ型変光星の応用

- ◎ 周期分布がどういう年齢の星がいるかという指標になる。
 - 周期が長いほど若い星(100Myr程度まで)の存在を示す。



楕円銀河変光星探査の観測目的

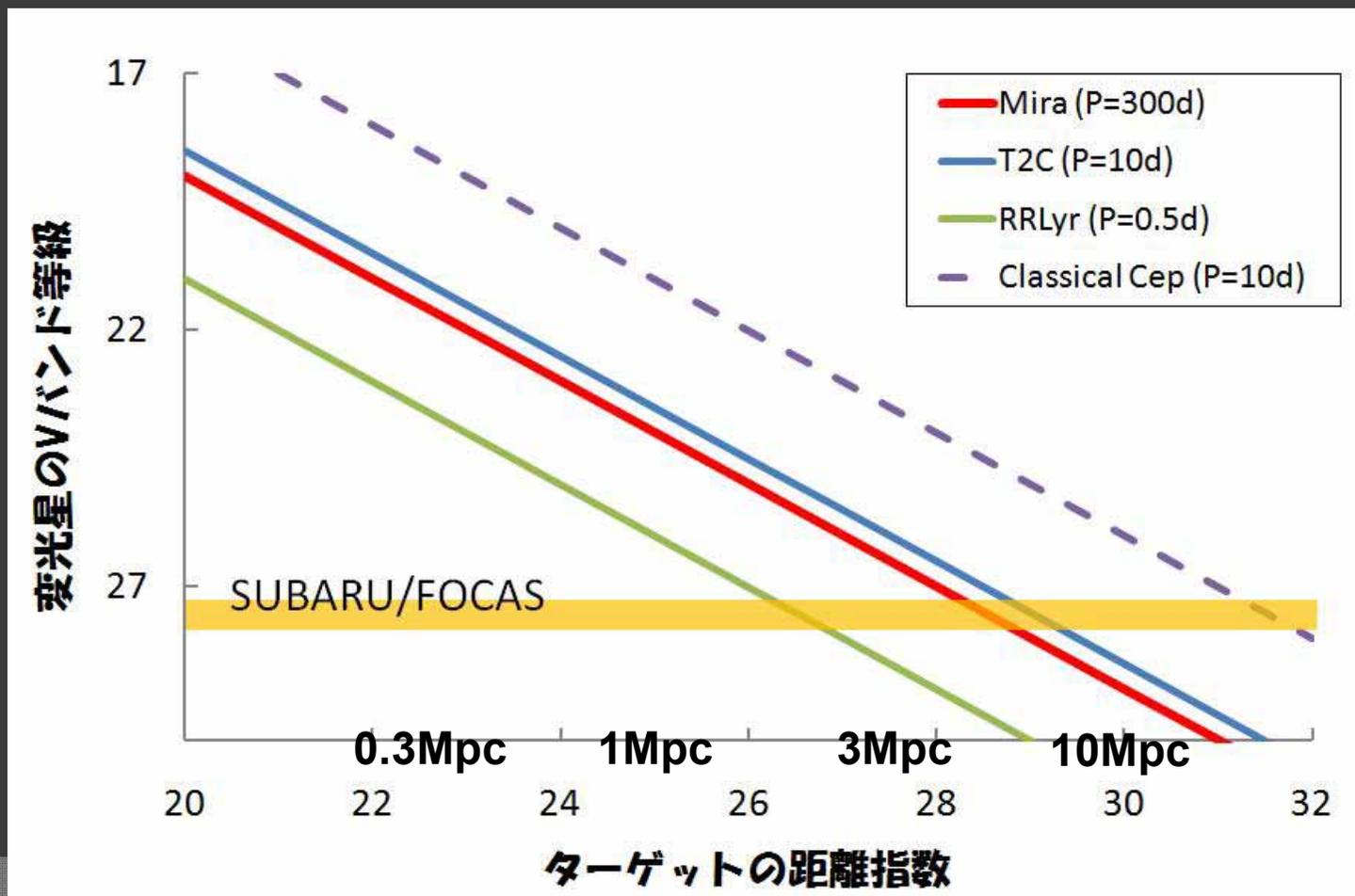
- ◎ 距離と銀河にある恒星の年齢構成の調査
 - ミラ型変光星のP-L関係を利用した距離決定
 - ミラ型変光星の周期分布は、主に100Myr~10Gyrの年齢構成を調べる指標となる。
 - 同時に
 - 赤色超巨星(< 100Myr の若い種族)の探査
 - TRGB法などによる距離決定
- ◎ 銀河群・銀河団内における分布
- ◎ 銀河の基本的な物理量(質量光度比など)の測定

TAO/NIRCAMによる観測

- ◎ 1時間のon-source積分→ $K=22$ mag (5σ)
- ◎ どんな距離にあるどんな変光星が観測できるか

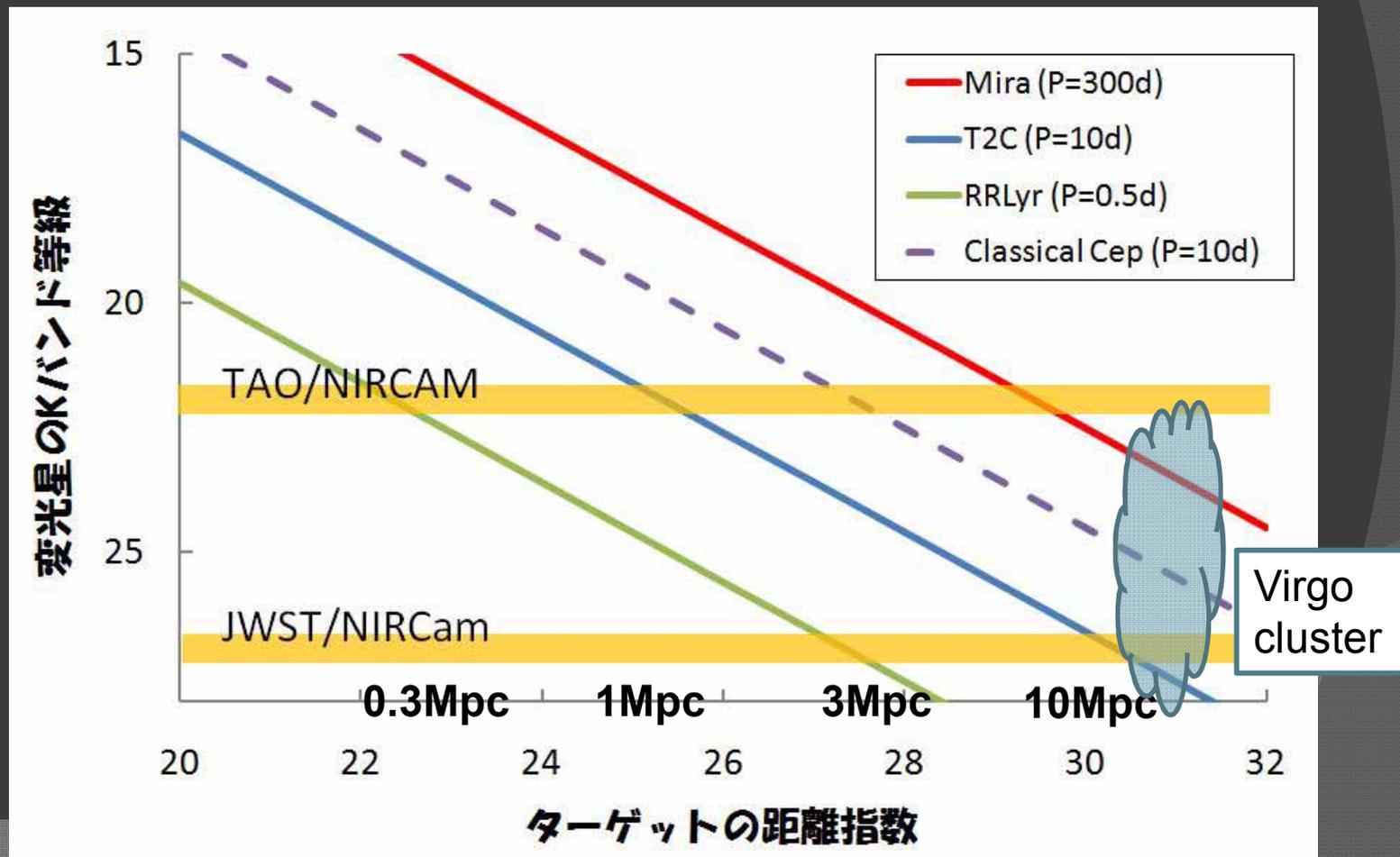
Vバンドでの変光星探査に必要な等級

- HSTでは27等くらいまでの撮像を行い、20Mpcくらいの銀河にあるセファイドを観測。
- ミラはVバンドでは暗く、さらにP-L関係を持たない。



Kバンドでの変光星探査に必要な等級

- ミラ型変光星が明るくなり、赤外の方が探査に有利。
- セファイドが探査可能な範囲は、HST→JWSTでそれほど伸びないが、ミラ型変光星では非常に遠くまで見える。

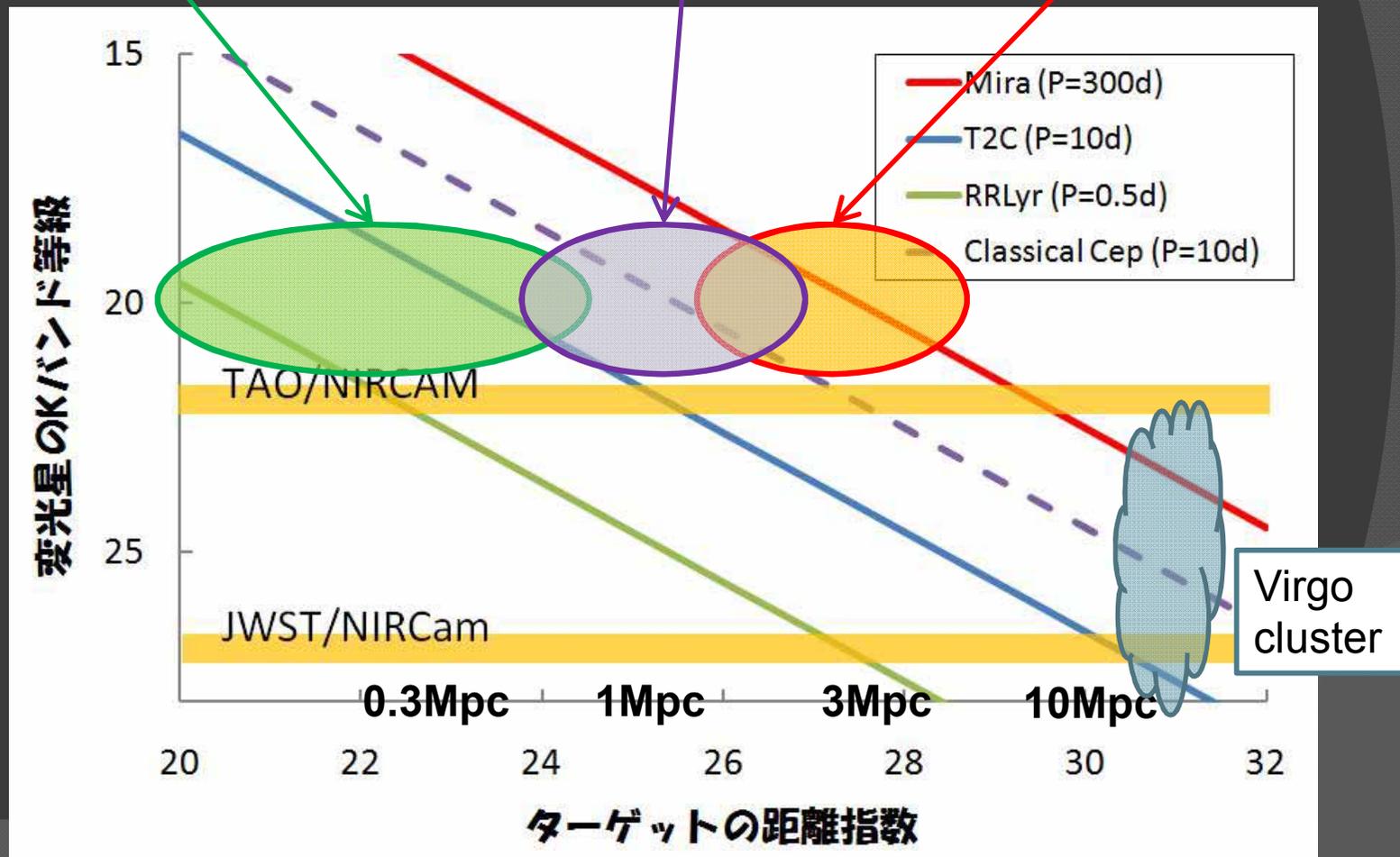


TAO/NIRCAMで観測できる変光星

1 Mpcより近いT2C
及び、300kpcより
近いIRRライリ

3Mpcより
近い古典的
セファイド

10Mpcより
近いミラ



観測ターゲット候補

- ◎ 10Mpc以内にある近傍楕円銀河およびレンズ状銀河
 - 不完全なサーベイだが・・・あまり多くない

名称	別名	形態	RA	DE	およその距離	補足
ESO 294-010		dG	00:27	-41:51	1.9 Mpc	Sci. Group
ESO 410-005		dG	00:16	-32:11	2 Mpc	Sci. Group
NGC 404		dE/S0	01:09	+35:43	3.2 Mpc	LINER-AGN
NGC 3379	M 105	E	10:48	+12:34	8.1 Mpc	LINER-AGN
NGC 5102		S0	13:22	-36:38	3.2 Mpc	Cen A Group
NGC 5182	Cen A	S0	13:25	-43:01	3.8 Mpc	Cen A Group
NGC 5206		S0	13:34	-48:09	4.6 Mpc	Cen A Group

必要な観測時間

- ◎ 1回あたり1時間の積分を繰り返す。
- ◎ 最初の数回でミラの検出が可能かどうか調べる。
 - 不可能な場合はSBF法等でおよその距離 (± 0.2 mag)を決める。
- ◎ ミラが検出できそうなら、3年間かけて25回くらい反復観測。
- ◎ Overhead (積分時間の2倍)を入れて、1天体あたり50時間 (~7夜分)

まとめ

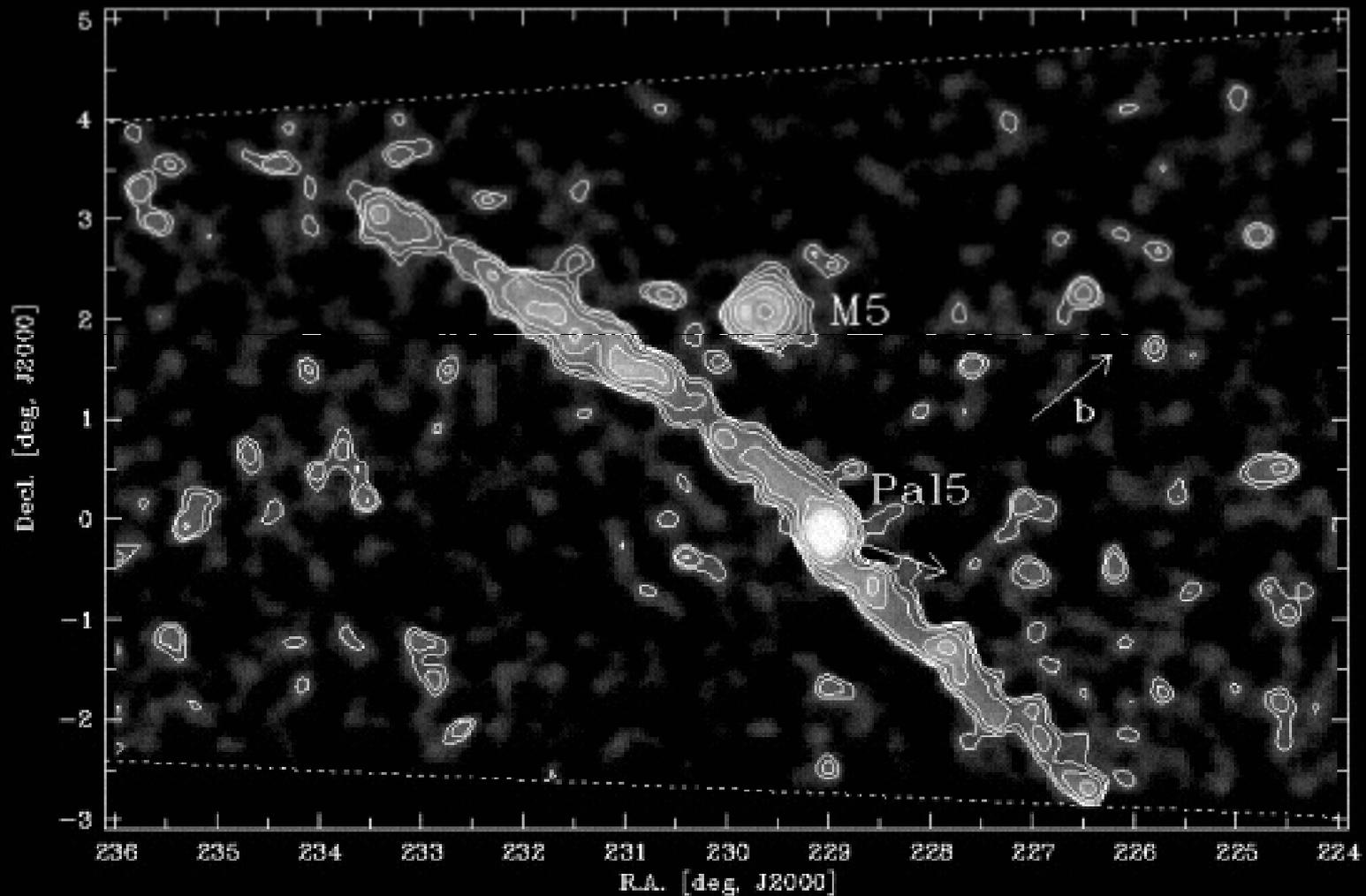
- ◎ 古典的セフィイドが存在しない楕円銀河等について、ミラ型変光星を利用した高精度(± 0.1 mag)の距離測定を行う。
- ◎ TAO/NIRCAMで、10Mpcくらいまでの銀河のミラを観測できる。
- ◎ 銀河群・銀河団の構造や、銀河の基本的な物理量（光度など）を精度よく求める。

銀河考古学 I 銀河系



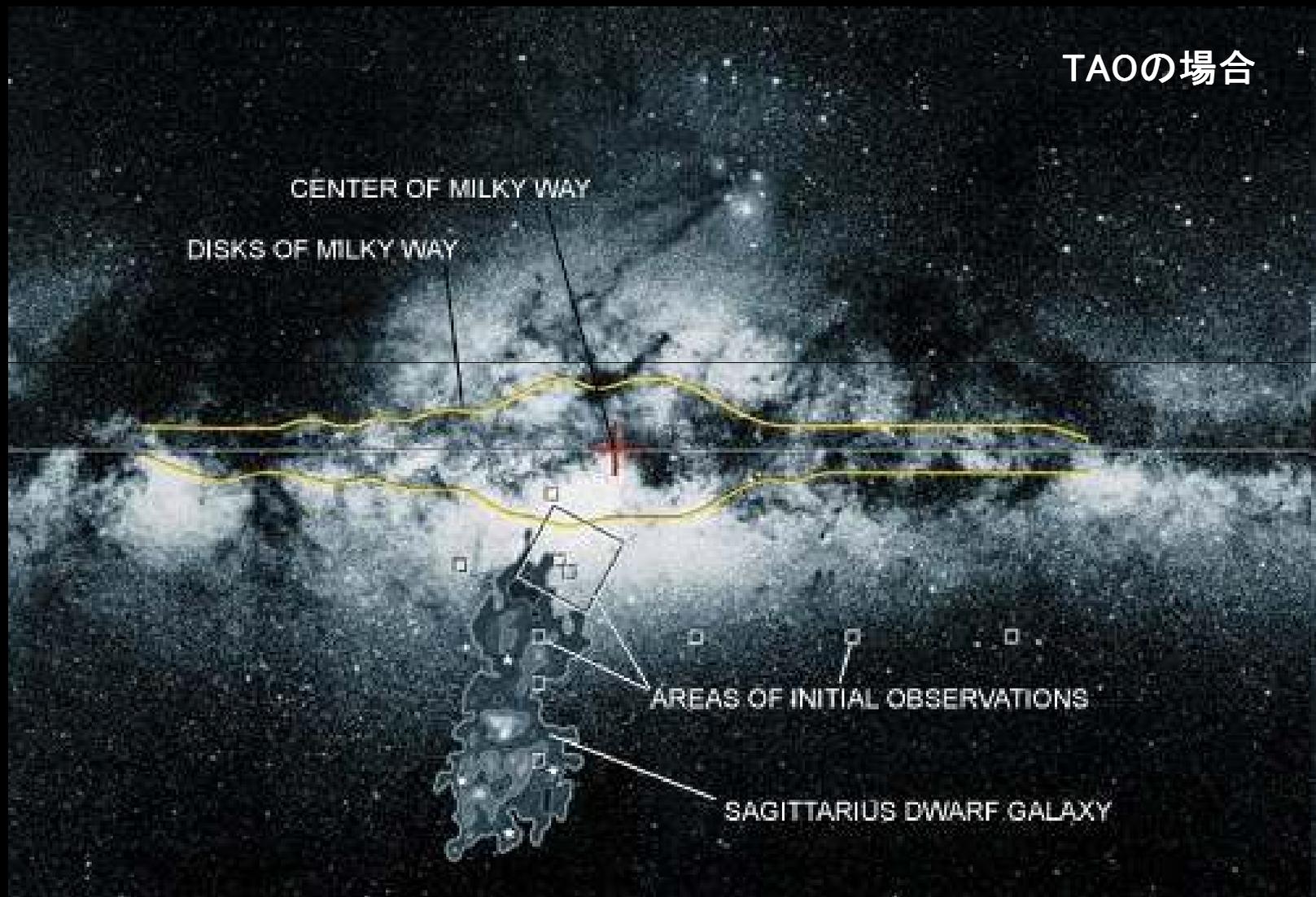
N.Arimoto
NAOJ (Japan)

近红外多体分光装置

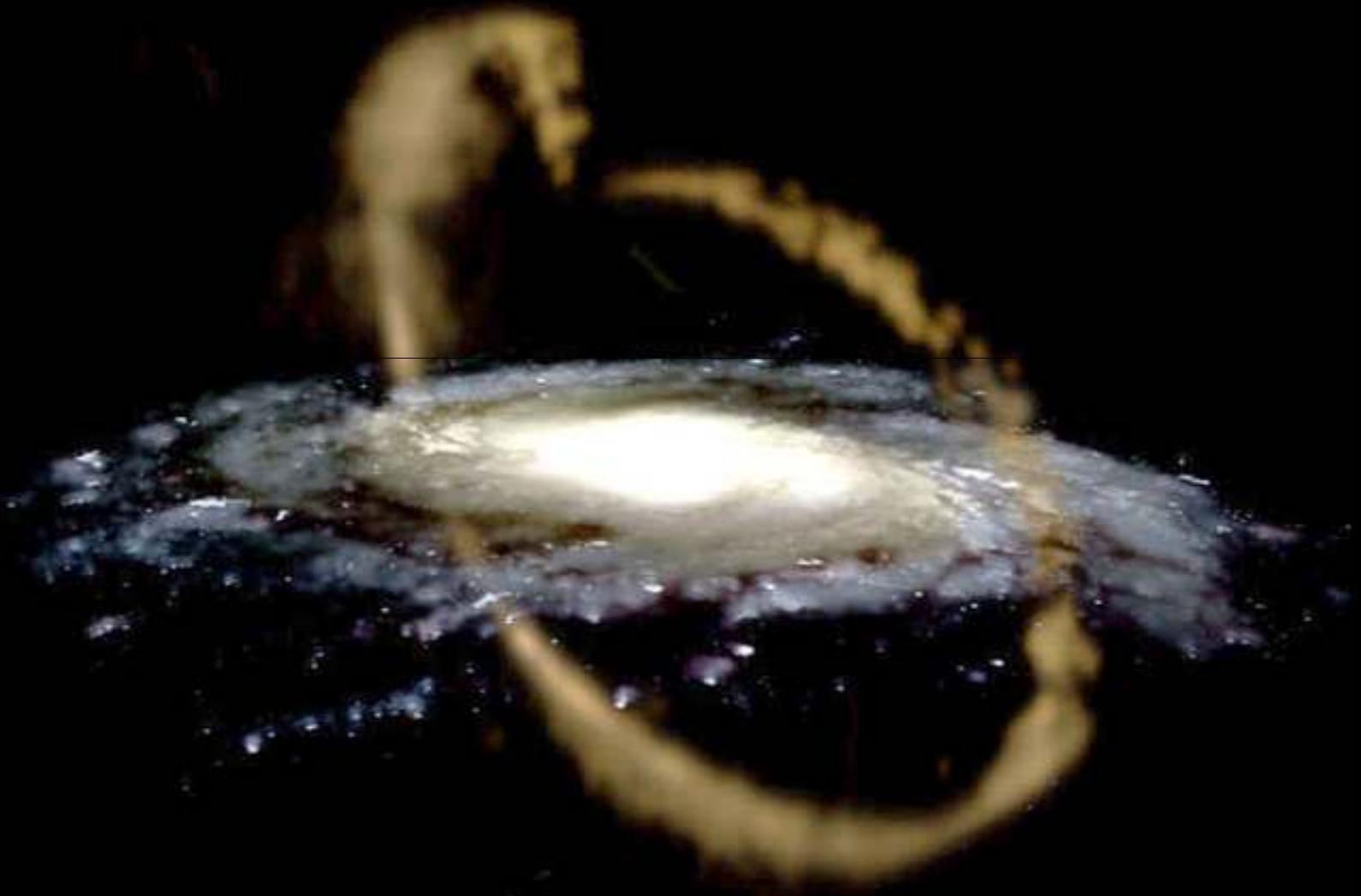


いて座矮小銀河

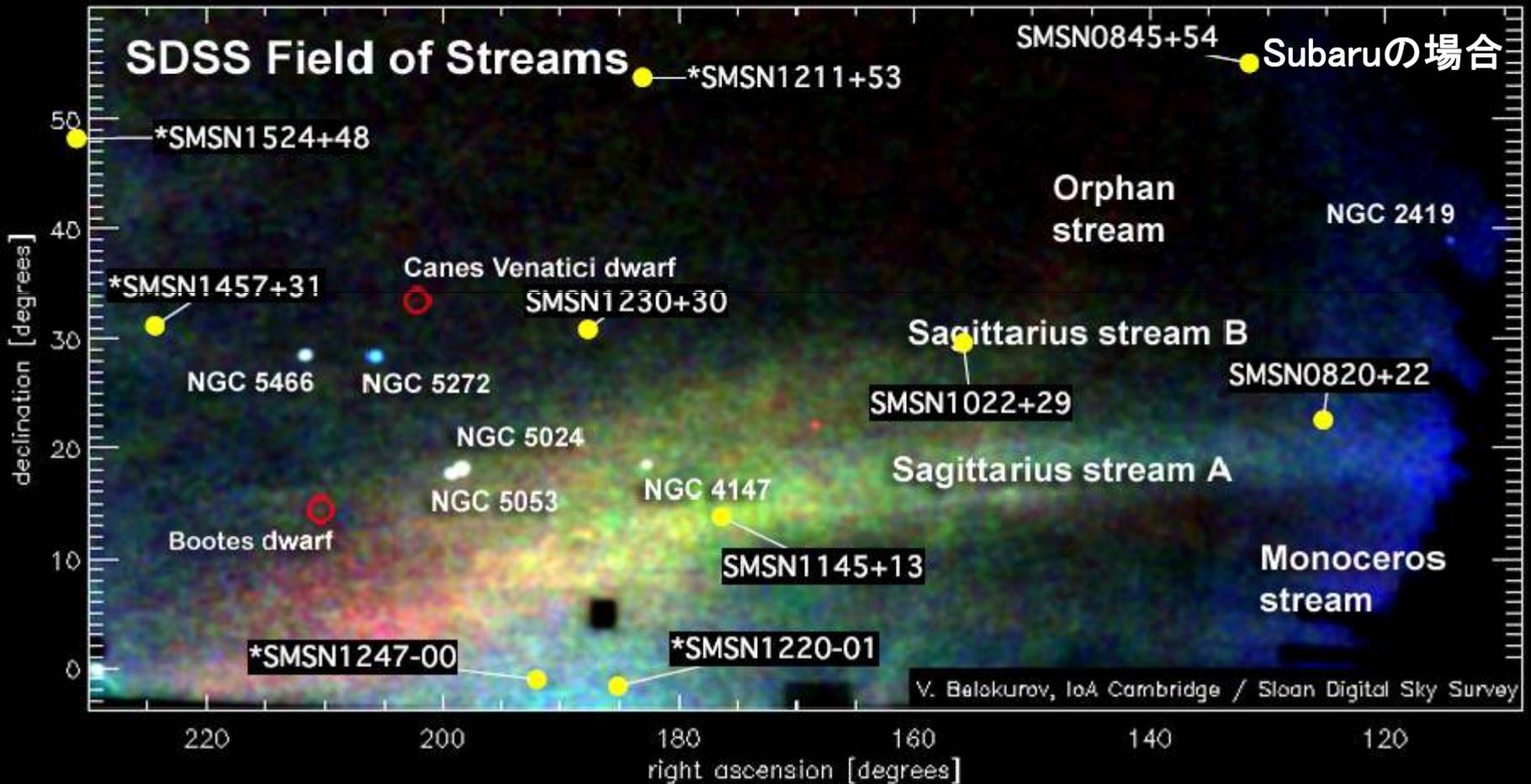
TAOの場合



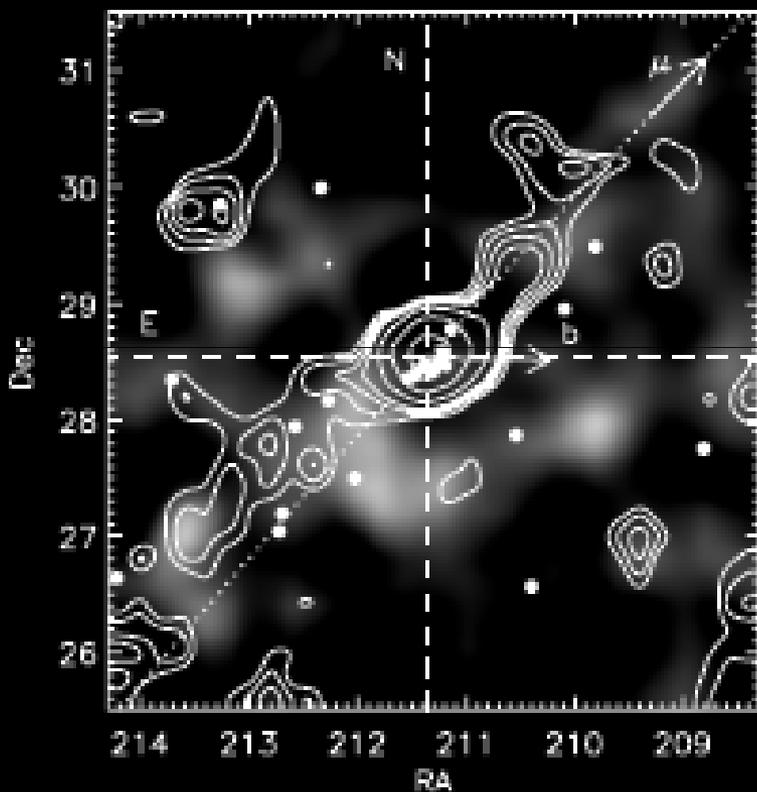
いて座矮小銀河



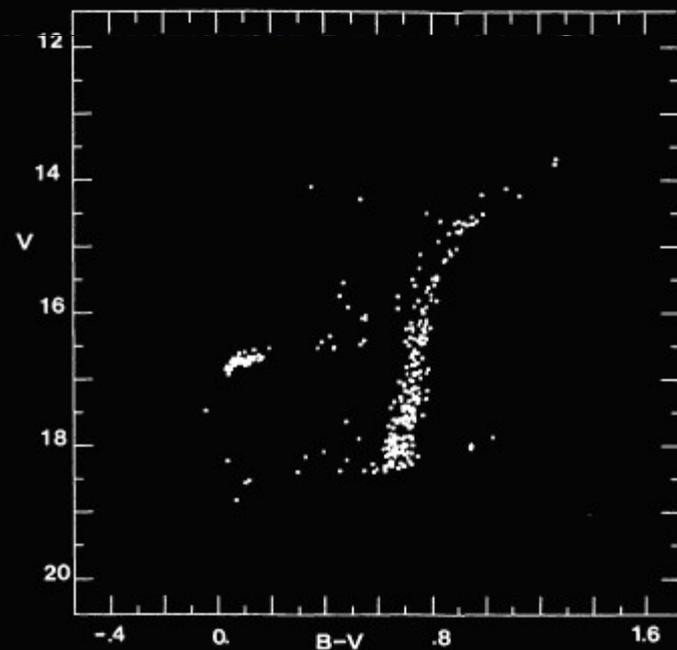
銀河系のストリーム構造



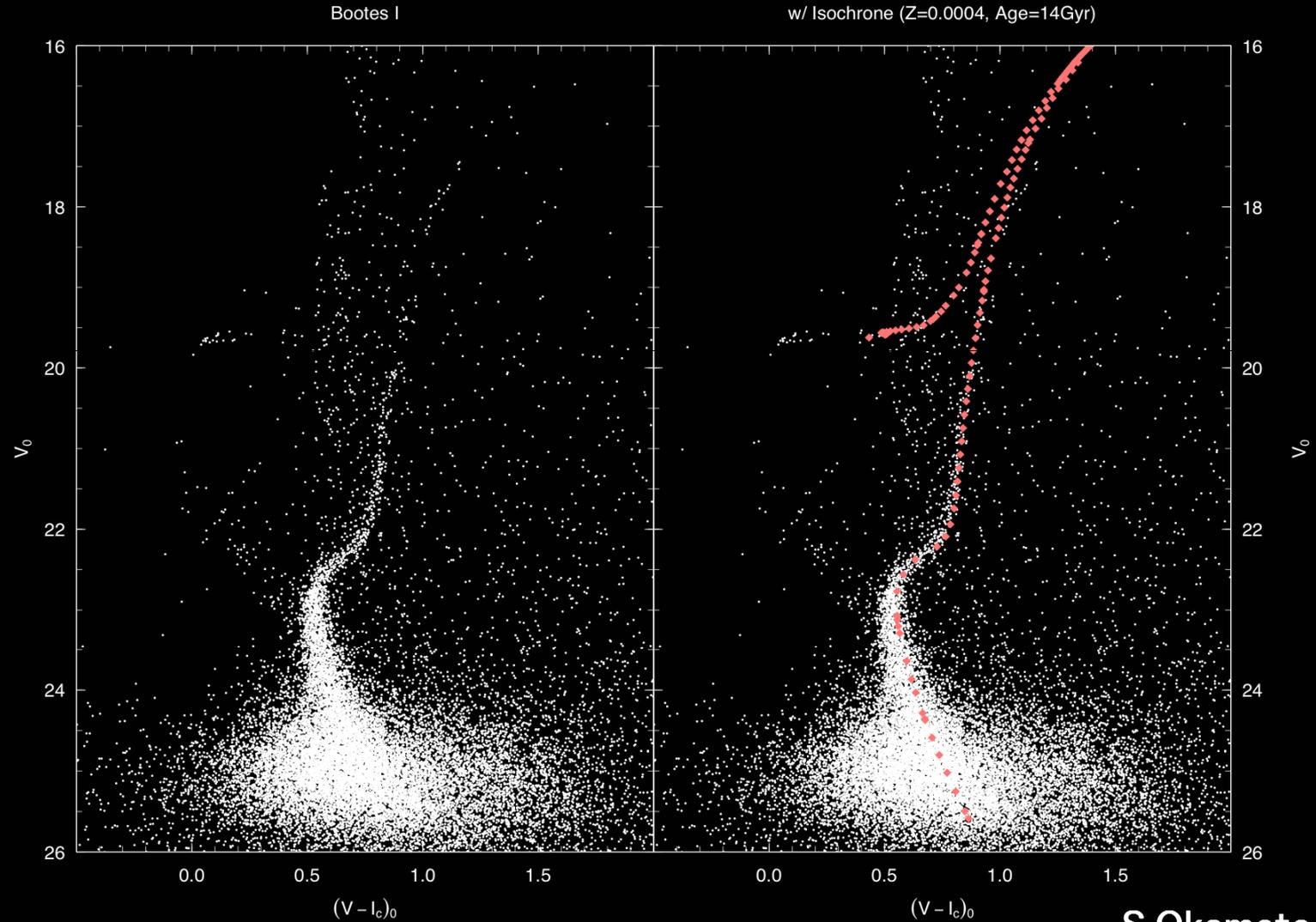
ストリーム近傍の球状星団



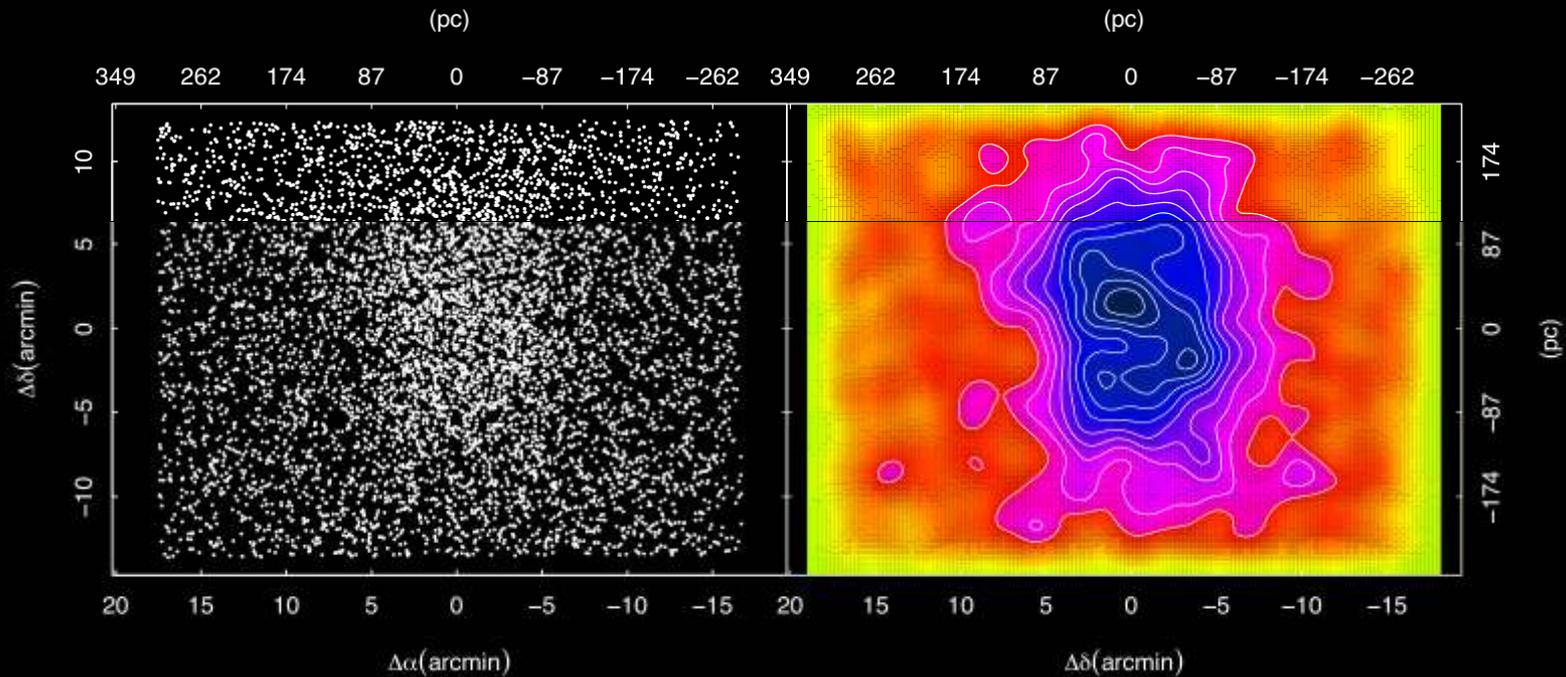
NGC5466 (Fellhauer et al. 2007)



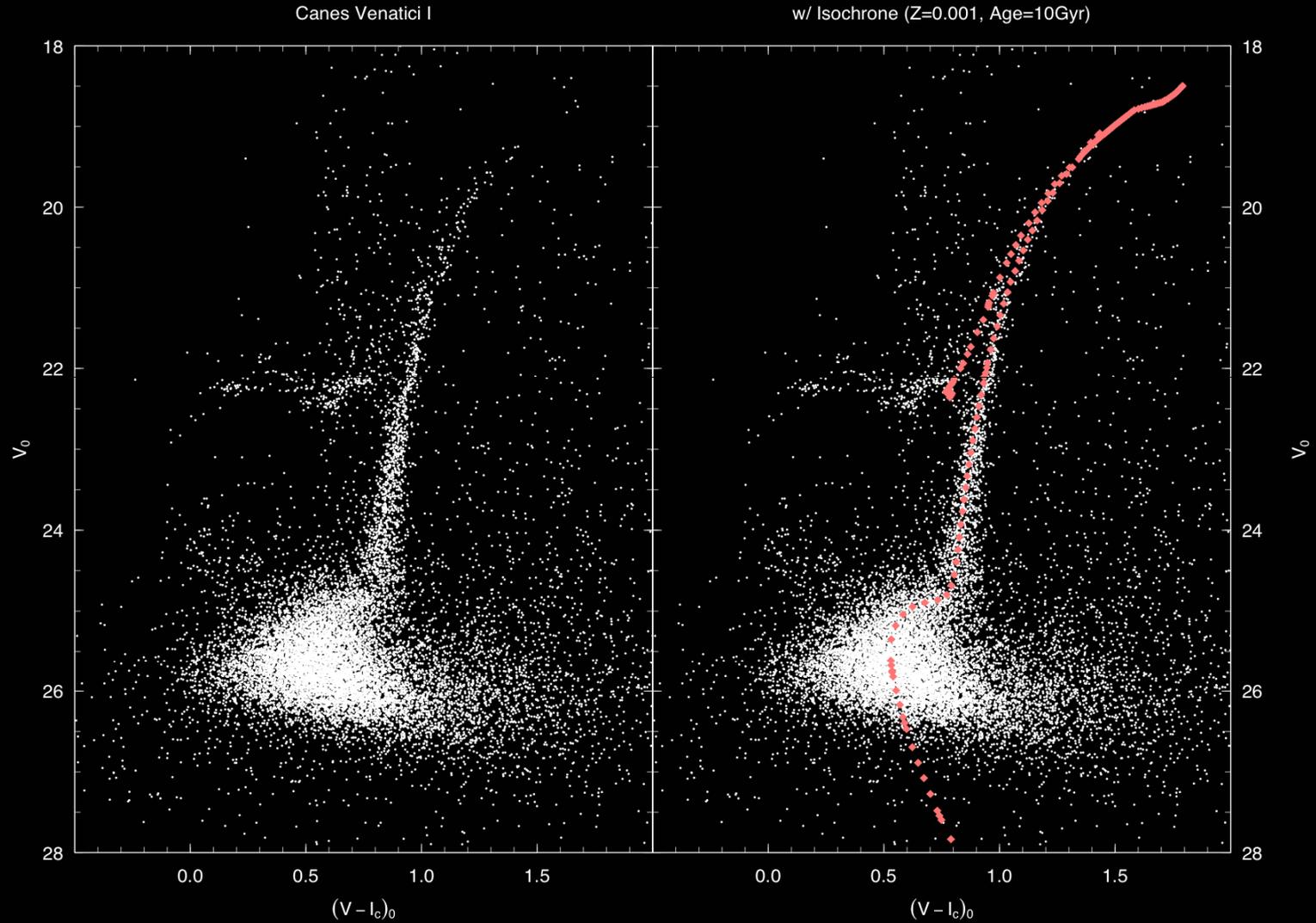
Bootes I (UFdG)



Bootes Iの空間構造

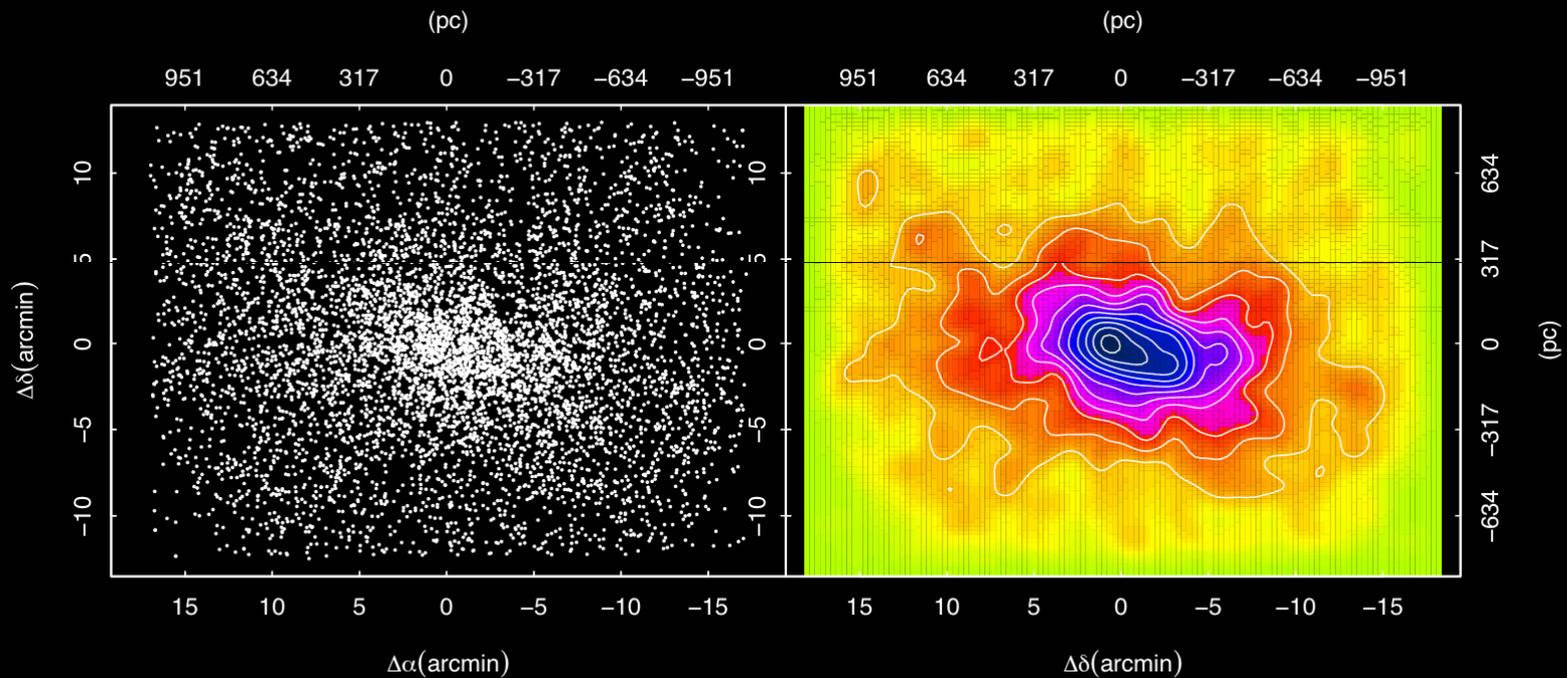


Canes Venatici I (UFdG)

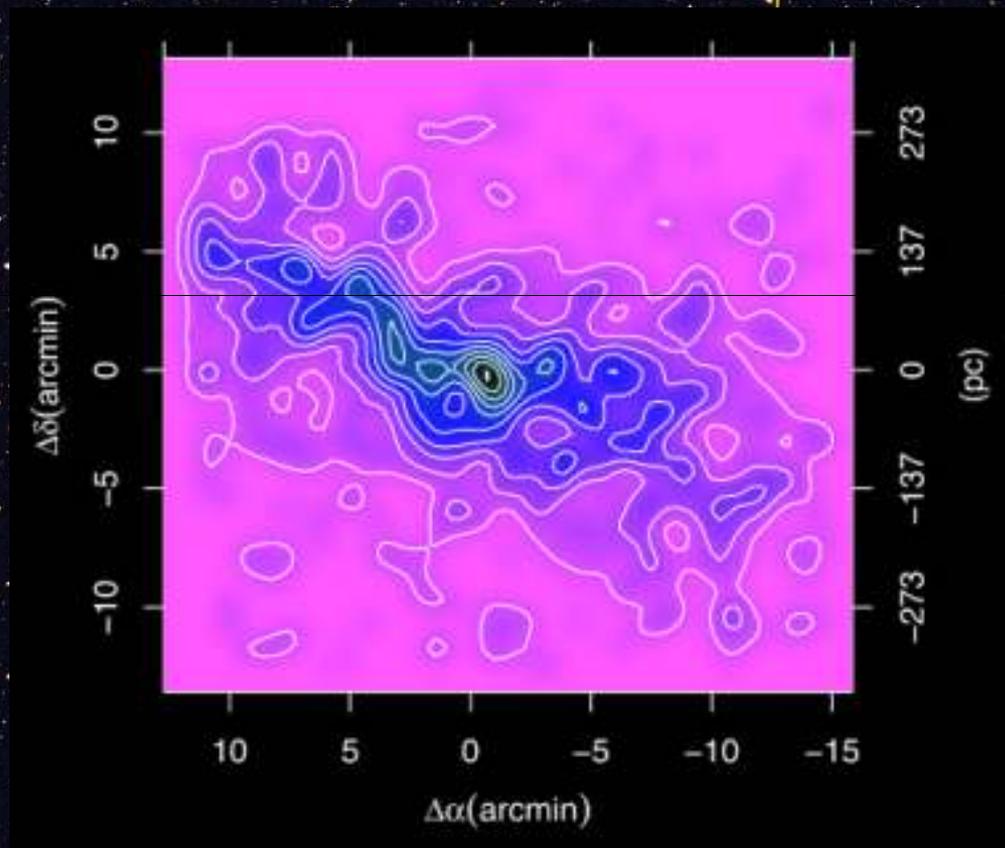
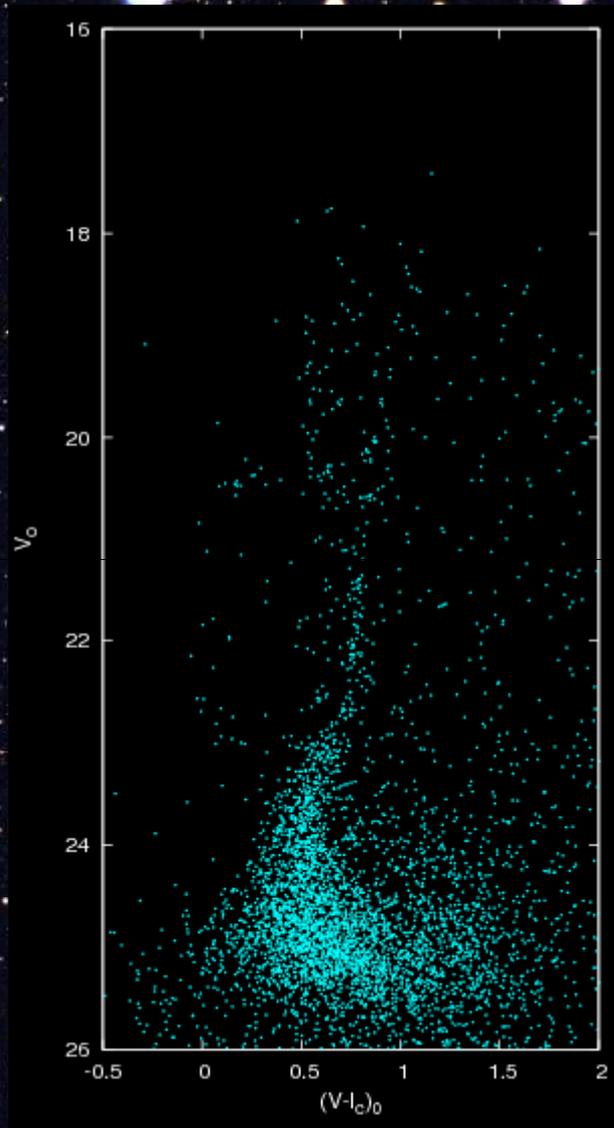


S.Okamoto (2009)

Canes Venatici Iの空間構造

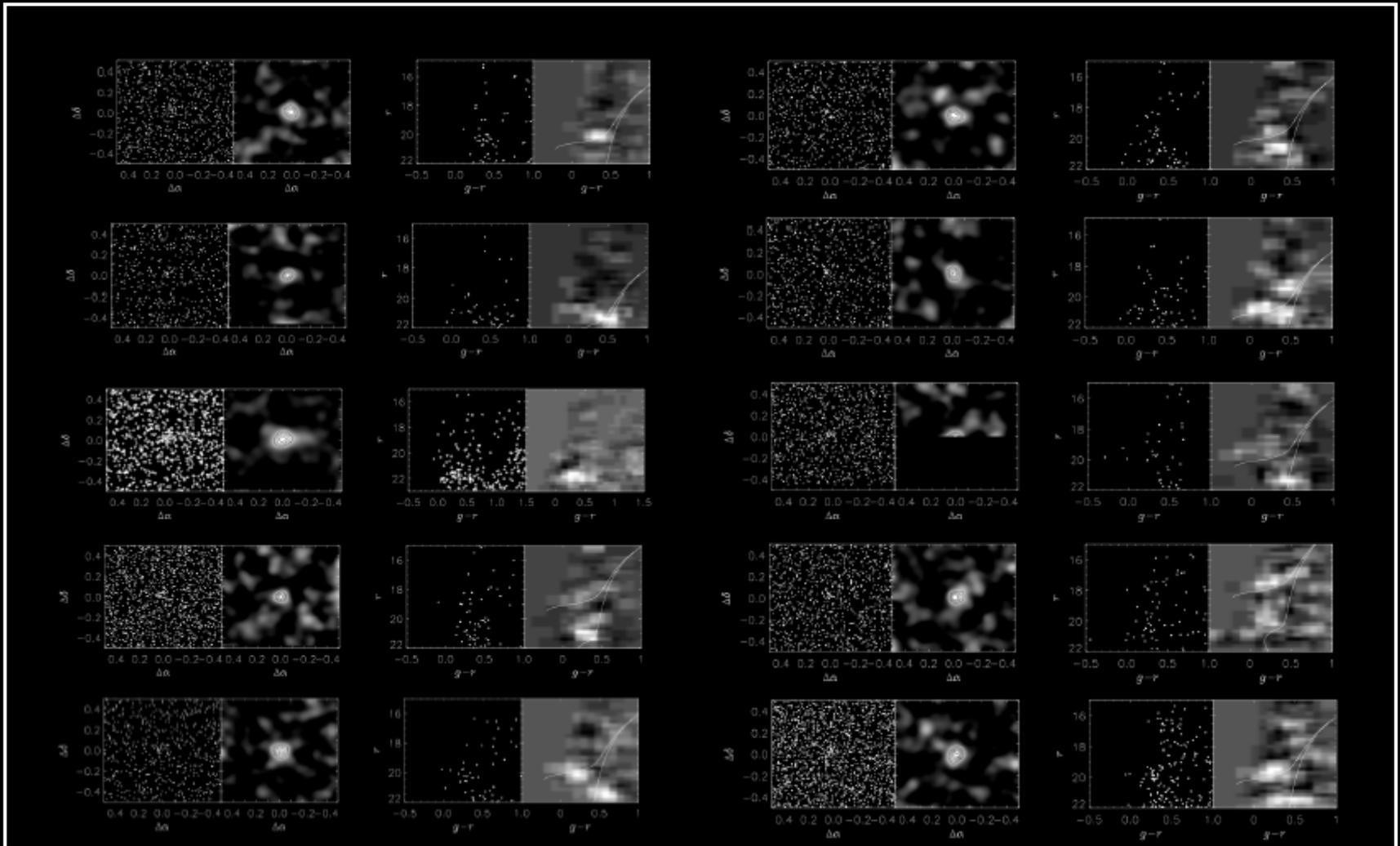


Okamoto et al. (2008)



Ursa Major (Suprime-Cam)

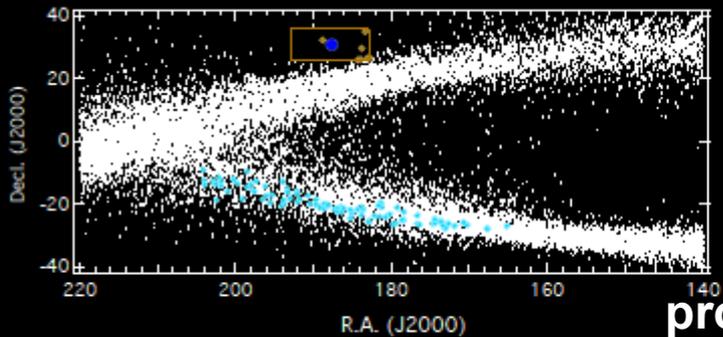
Search for New UFGs



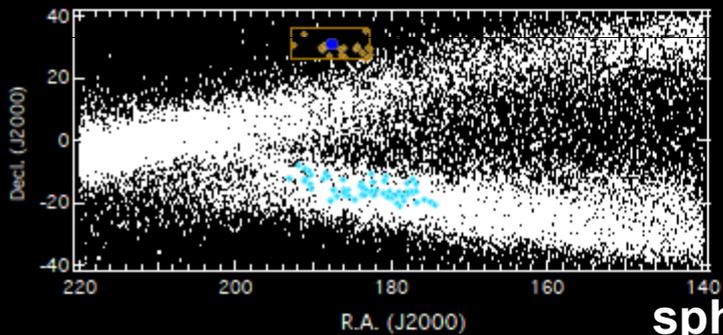
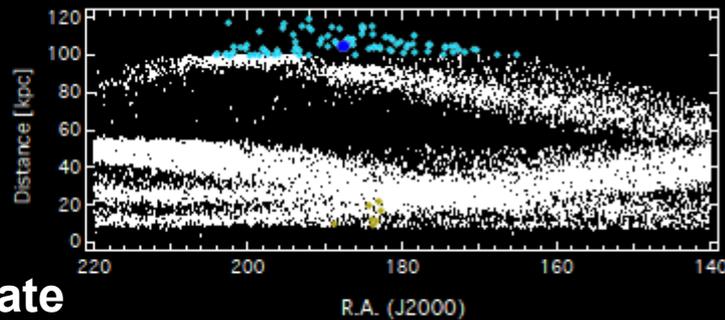
SDSS Candidates

ぎんがモデルとのひかく

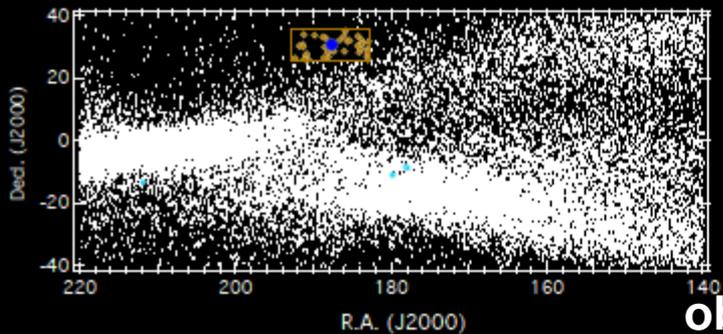
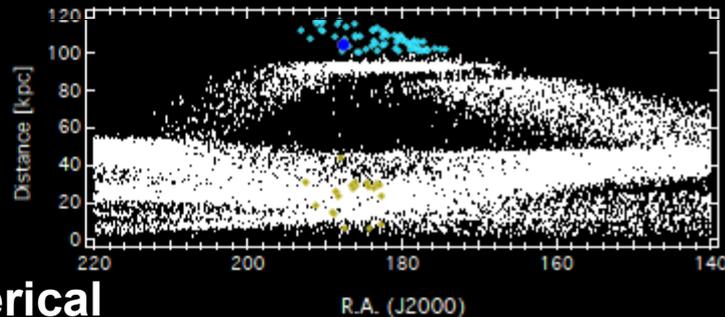
ストリームの視線速度・距離



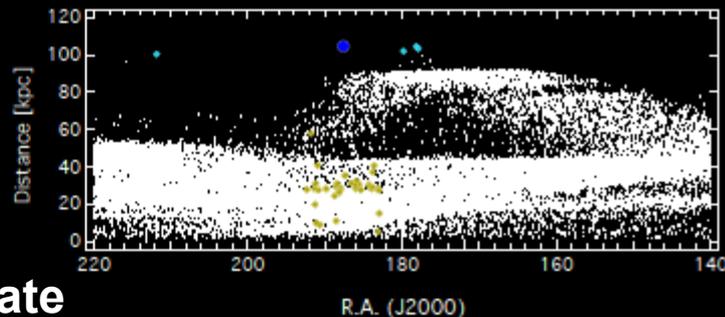
prolate



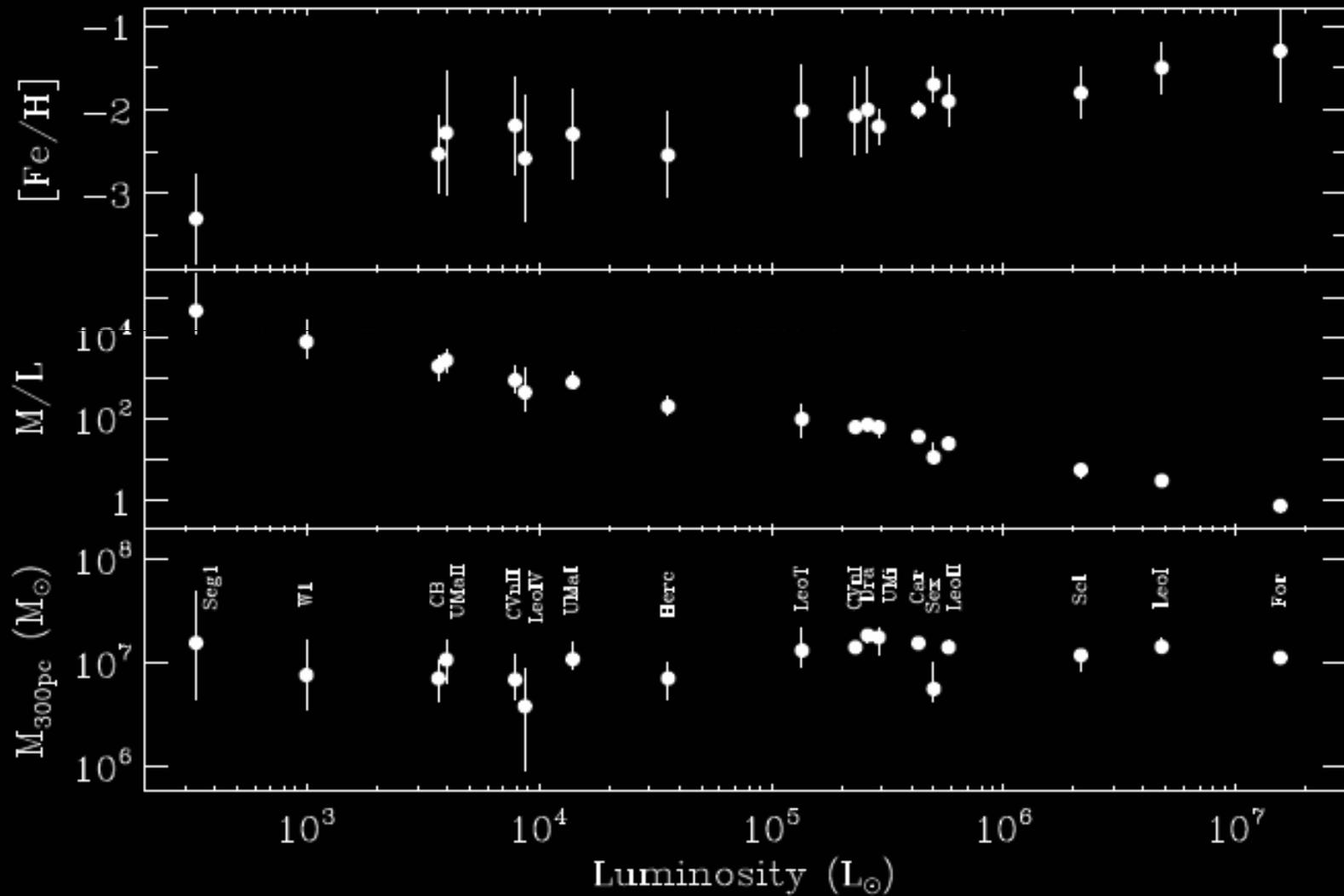
spherical



oblate

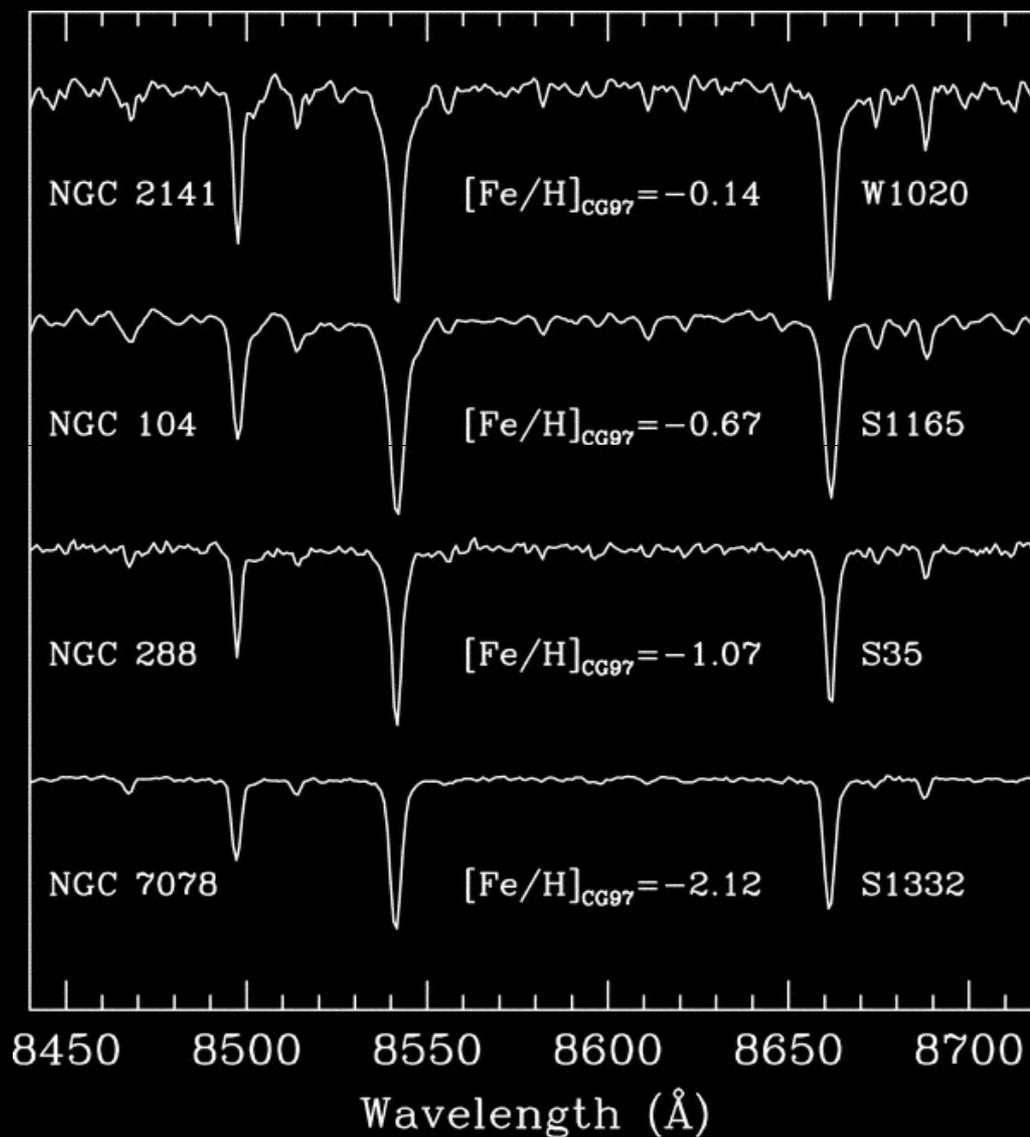


ストリーム星の金属量

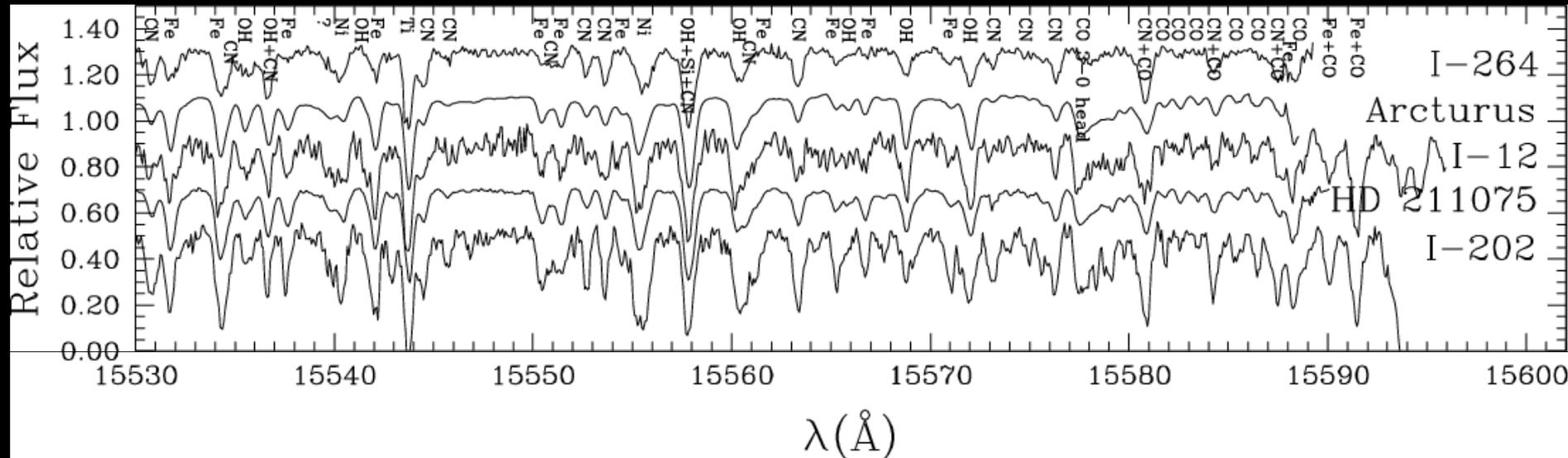


Call Triplet as Metallicity Indicator

近赤外での金属吸収線



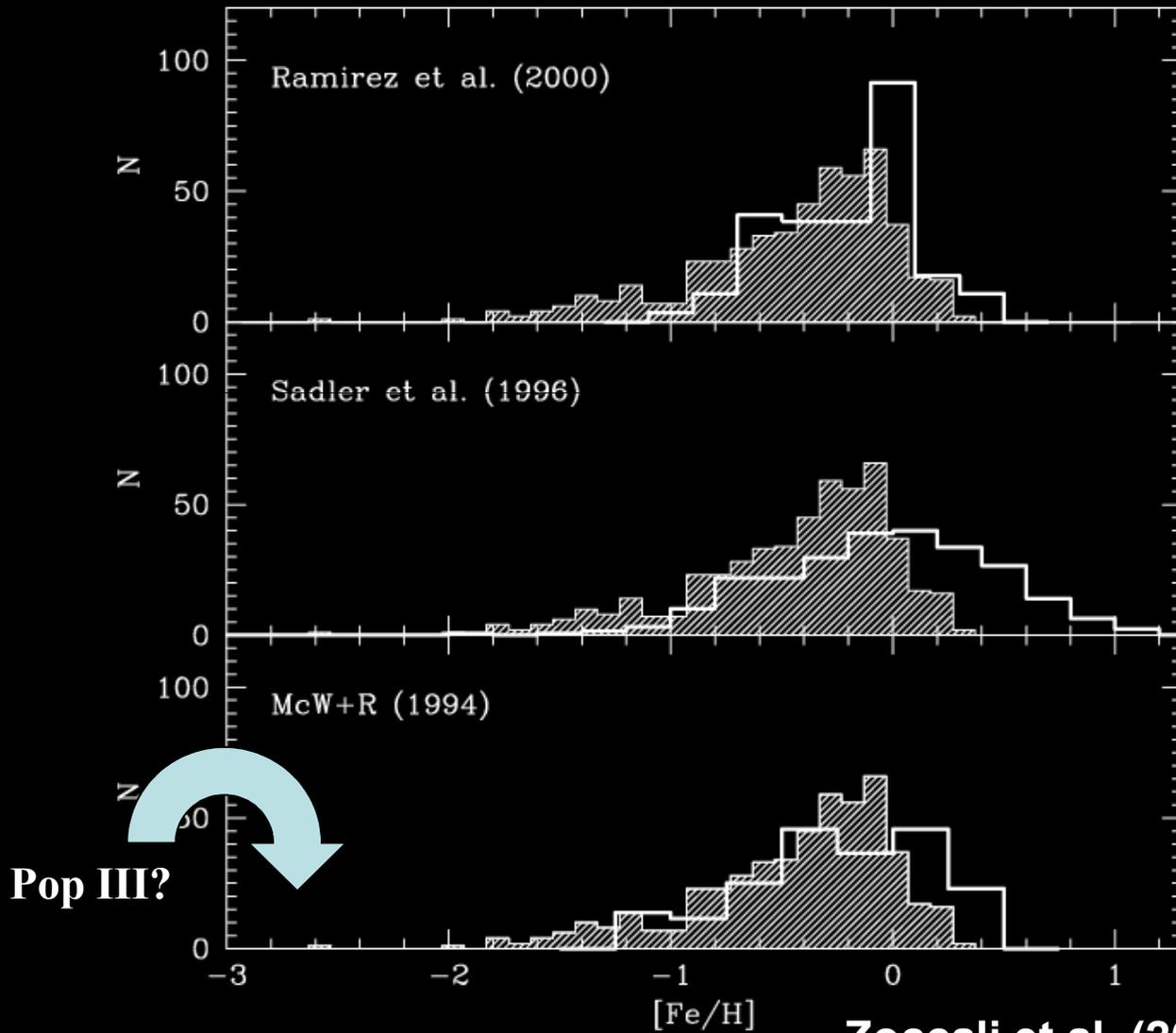
近赤外吸収線



Gemini-S/Phoenix (R=50000)

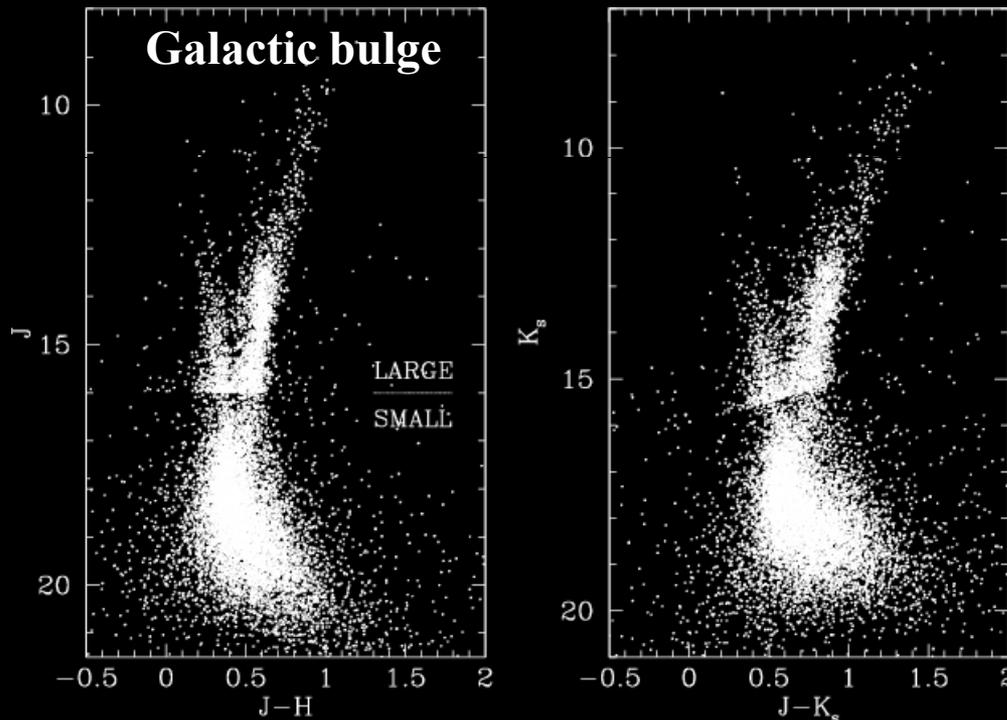
- 近赤外には原子やイオンの吸収線があまりない。
- あっても高電離の金属の吸収線で複雑で解釈も難しい。
- 多くの吸収線は正しく同定されておらず、吸収線の強度も不明である。
- その代わりに分子の吸収線があるが、TiOやZrOの吸収線はない。
- 分光器の性能は可視光域に比べて劣っている。
- 近赤外データだけから星のパラメータを決定するのは困難である。

Population III stars in Galactic Bulge



Specific Goals of HR Survey

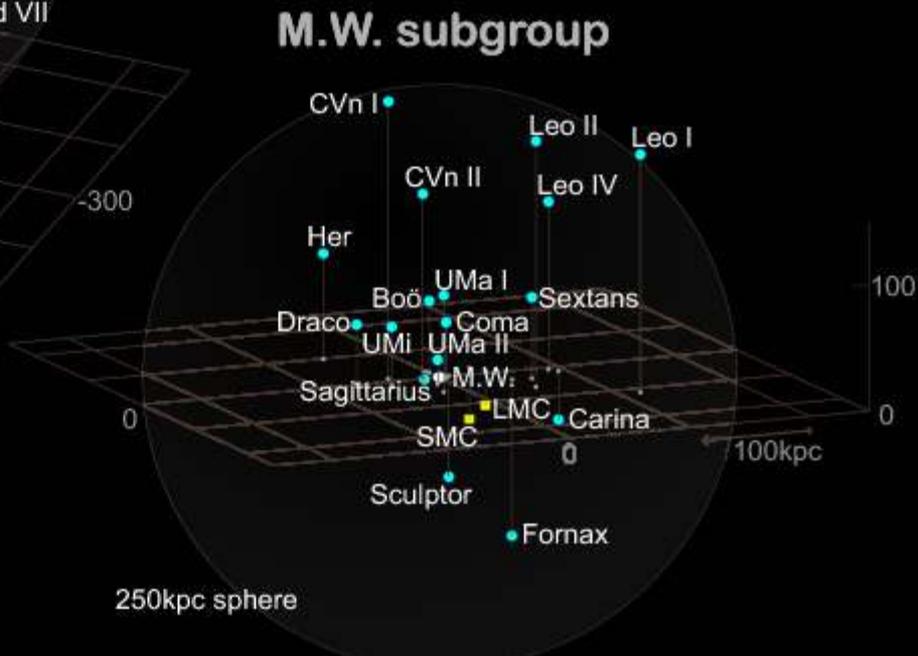
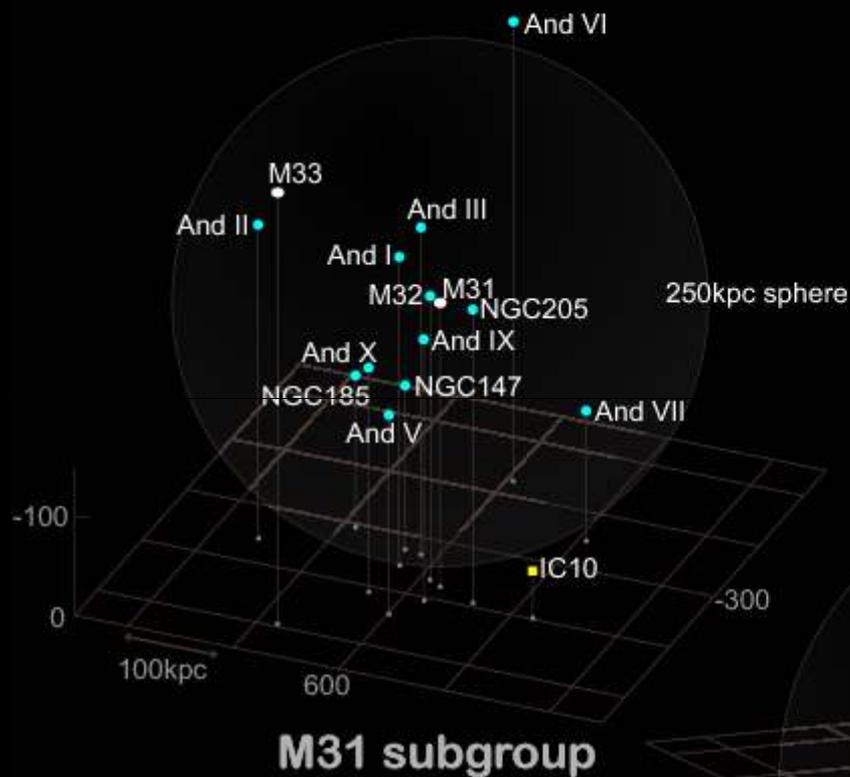
- **Formation histories of galaxies:** stellar population study in terms of colour-magnitude diagrams (CMDs) and abundance patterns can reveal how bulge, disc and dSph's formed and evolved.



Targeted Regions

**bulges, disc, outer disc,
halo, large area dSphs
disrupted globular clusters
M31/M33 large area
(substructure in haloes)
Galactic streams
dwarf irregulars**

銀河考古学 II 局所銀河群



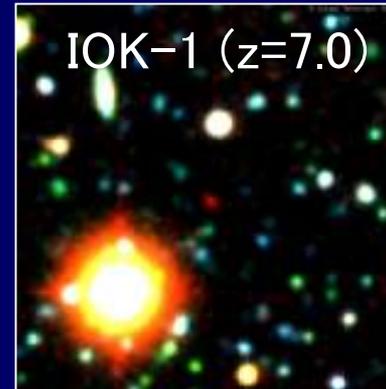
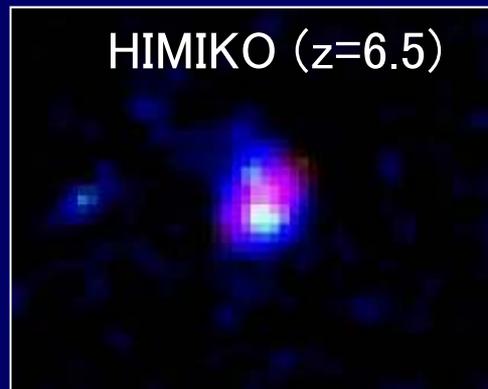
2009/9/11

TAO近赤外観測装置のサイエンス

遠方銀河 ($z > 4$) の観測

東大・天文教室 嶋作一大

1. 宇宙再電離時代の銀河探査
2. 原始銀河団の観測
3. 独自性を出すには？ HSC 深探査領域を観測しよう



1. 宇宙再電離時代の銀河探査

宇宙再電離の謎

宇宙再電離は $6 < z < 15$ の間に起きた
3-10億歳

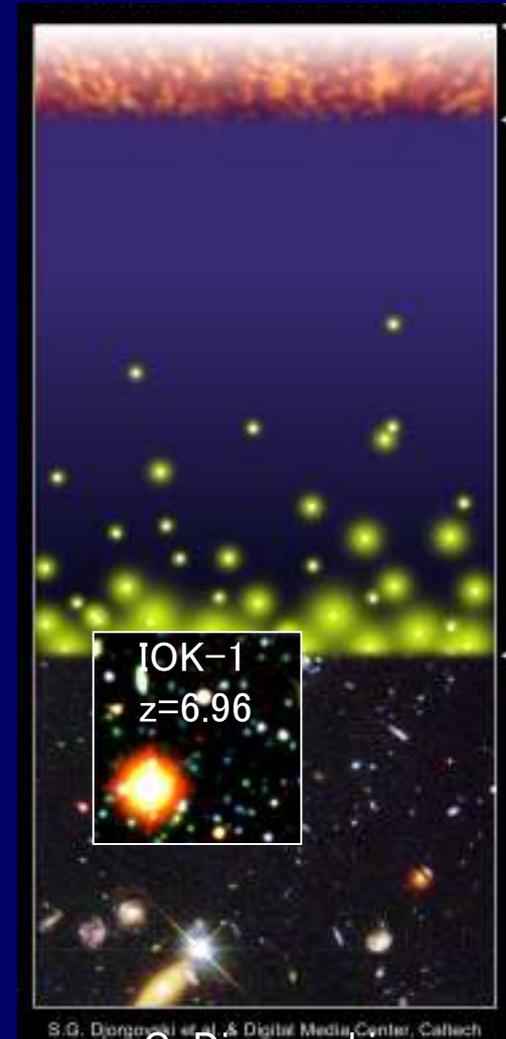
再電離の謎

- いつ?
- どのように? (ionizing bubbles)
- 電離源は?
- 銀河や AGN の性質
- first stars の性質

$z < 7.5$ は Hyper Suprime-Cam で研究

$z > 10$ は JWST や TMT に任せる

TAO は $7 < z < 10$ をやる



ビッグバン
(0歳)

初代の銀河
(1億歳?)

再電離
(数億歳?)

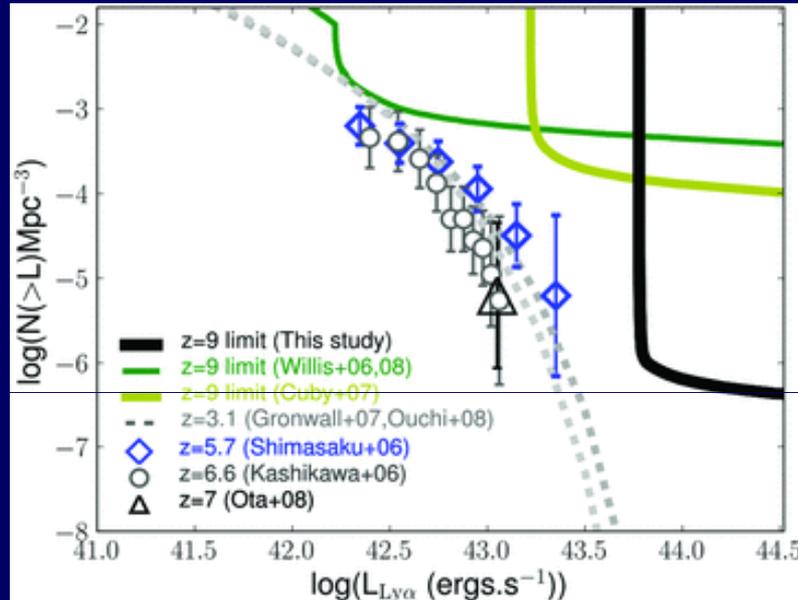
現在
(137億歳)

G. Djorgovski

2つの銀河種族

Lyman α 銀河

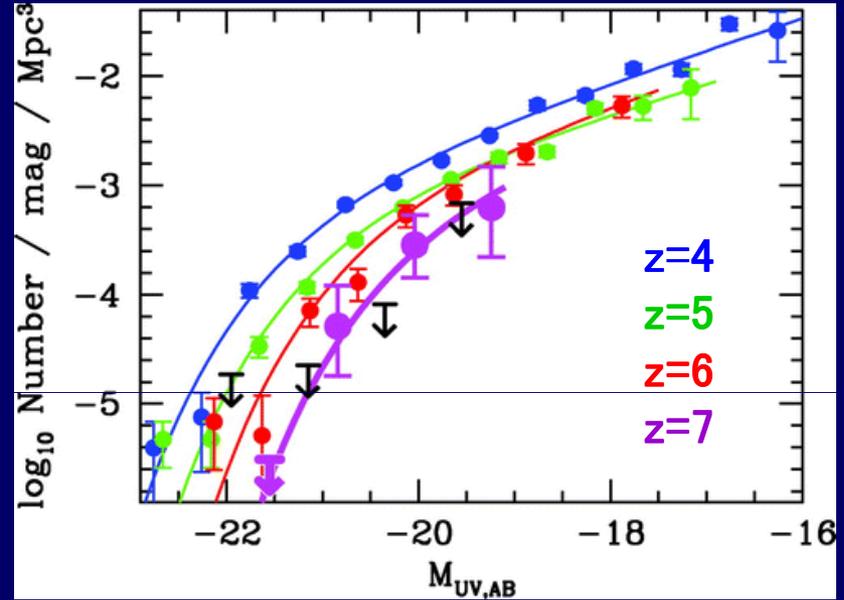
Lyman α 輝線の強い銀河



Sobral et al. 2009

Dropout 銀河

遠紫外連続光の強い銀河



Bouwens et al. 2008

- 遠方宇宙の主要な銀河種族

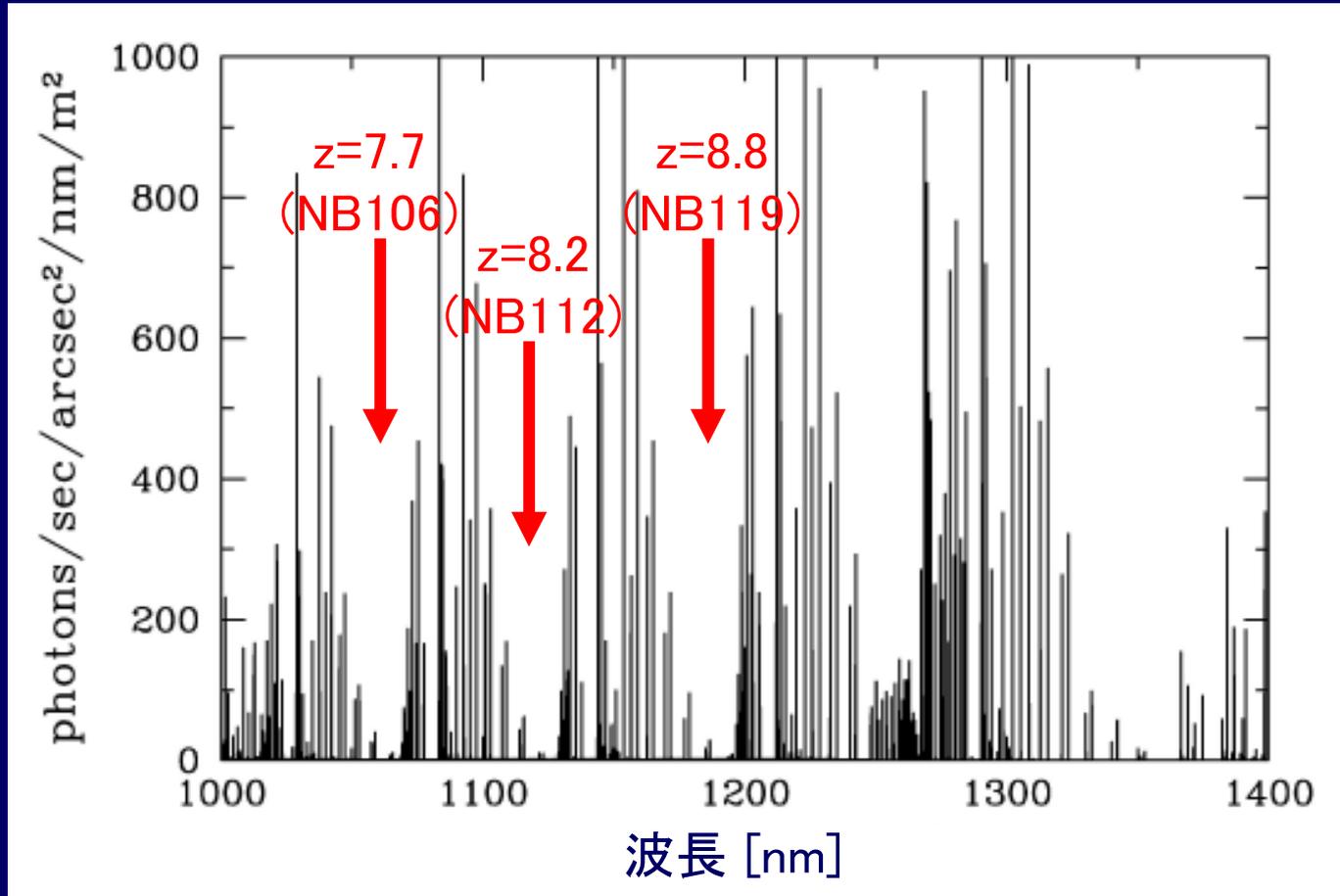
(どちらの種族も $z > 6$ で数が減る \Rightarrow 銀河の形成期?)

- 電離源の候補として、あるいは、再電離過程のプローブとしても重要

TAO で $z > 7$ の両種族を探查

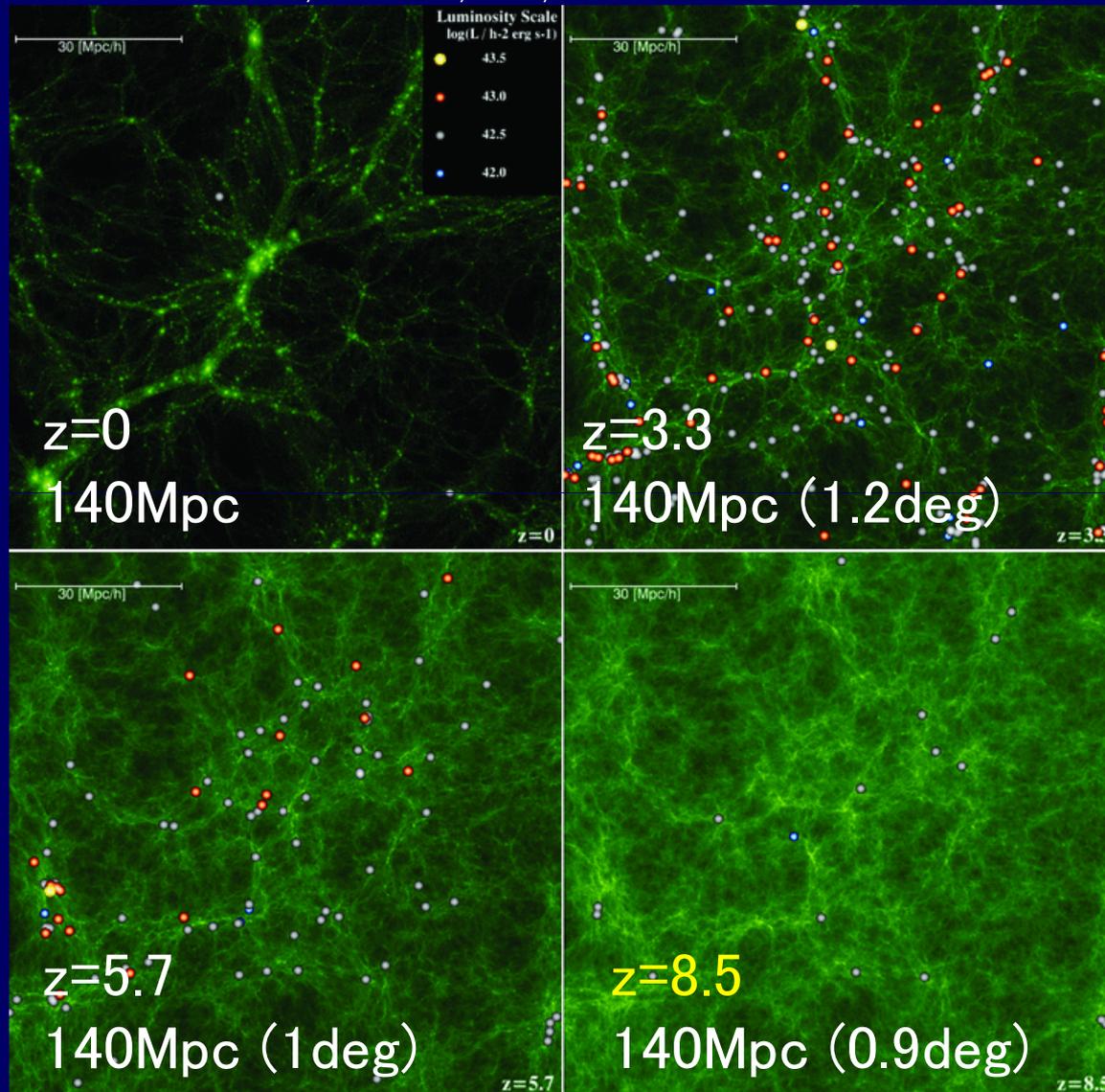
Lyman α 銀河の探査

夜光のスペクトル



モデルが予想するLyman α 銀河の天球分布

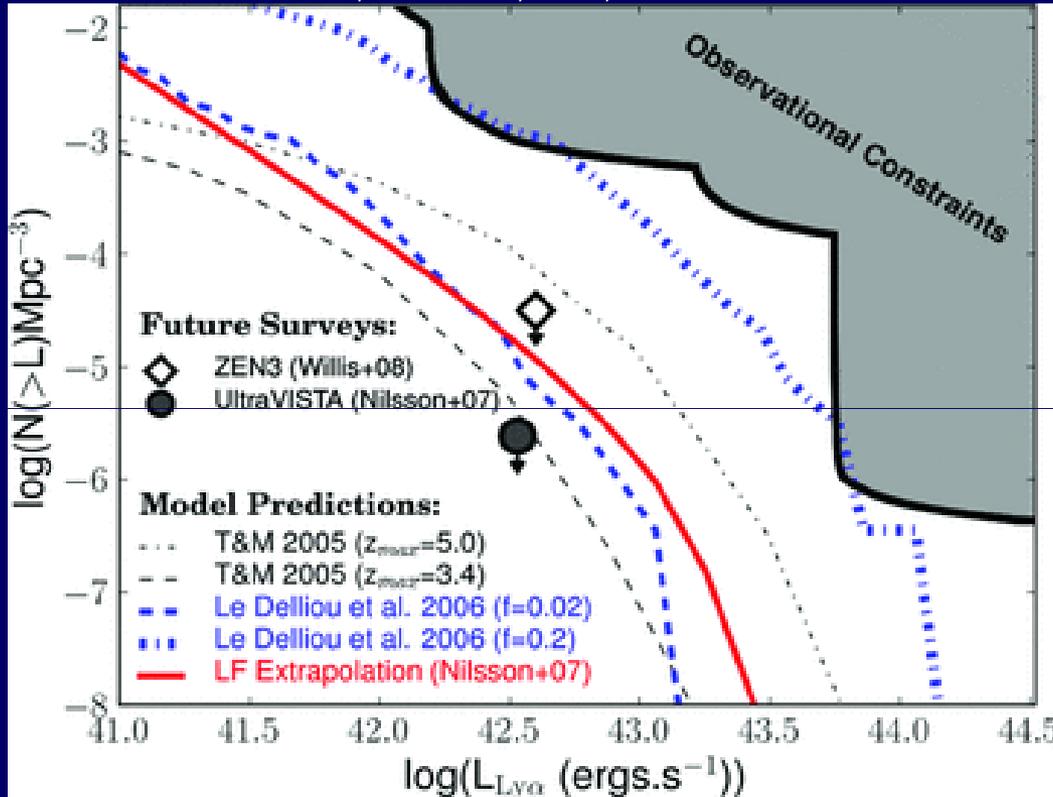
Orsi et al. 2008, MNRAS, 391, 1589



- 遠方に行くほど
- 明るいものが減る
($1E+42 \text{ erg/s}$ 程度)
 - clustering が強くなる
(100Mpcスケール)

$z \sim 9$ の Lyman α 銀河の数密度

Sobral et al. 2009, MNRAS, 398, L68



発見するには

$$L(\text{Ly } \alpha) < 3\text{E}+42 \text{ erg/s}$$

$$\Leftrightarrow 3\text{E}-17 \text{ erg/s/cm}^2$$

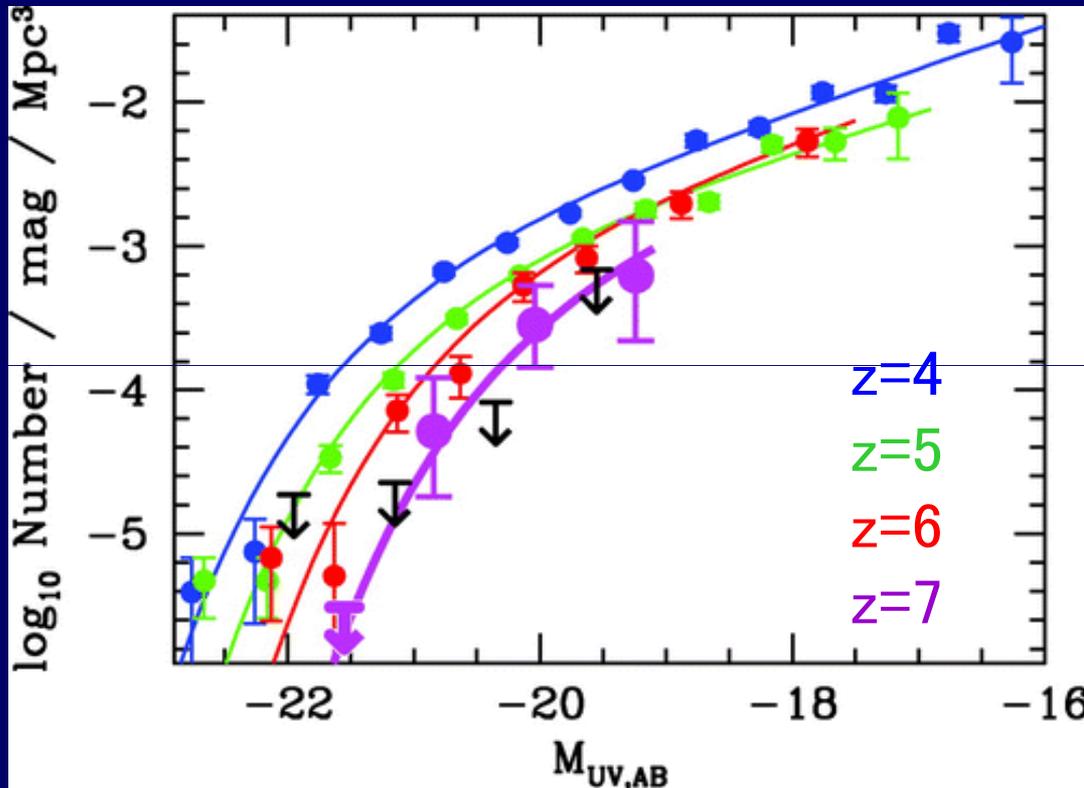
$$\text{volume} > 1\text{E}+5 \text{ Mpc}^3$$

$$\Leftrightarrow 0.2 \text{ 平方度}$$

が必要

Dropout 銀河の探査

Dropout 銀河の光度関数



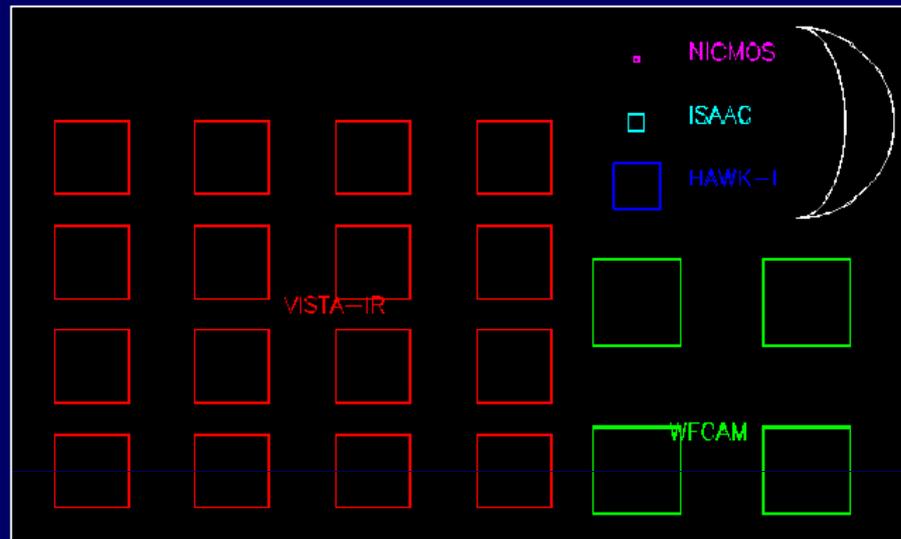
見かけ等級 **26mag** は
-20.9 at $z=7$ (z-drop)
-21.1 at $z=8$ (Y-drop)
-21.3 at $z=9$ (J-drop)

遠方で数密度が急減
⇒ $z > 7$ では、最低でも
 $1E+6 \text{ Mpc}^3$ が必要
 $\Delta z=0.5$ では **0.3平方度**

Bouwens et al. 2008

VISTA 望遠鏡 (ESO)

Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy



口径 4.1m

Paranal (2635m)

2010年から観測開始？

16 枚の検出器 = 0.6平方度

0.34arcsec/pix

PSF = 0.51arcsec (telescope+camera)

Z,Y,J,H,Ks,NB118

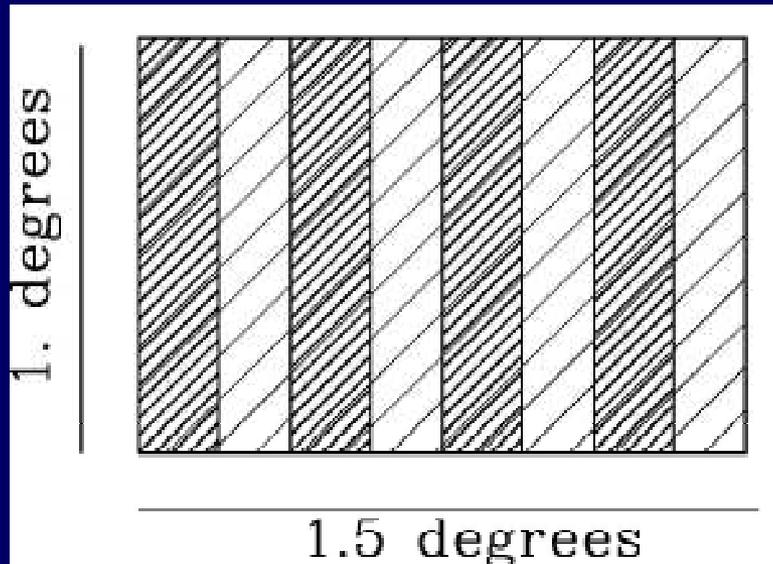
75%は大規模パブリックサーベイ (236夜/年)

- サーベイスピードは圧倒的
- TAO は、口径、標高、PSF、AO で上回るが...

Ultra-VISTA

Dunlop et al.

6つのパブリックサーベイの1つ



0.8平方度

COSMOS field

Y=26.7 (200hr) すべて5 σ , AB

J=26.6 (200hr)

H=26.1 (200hr)

K=25.6 (200hr)

NB118=26? (90hr)

2014年完了を予定

サイエンス

- dropout 銀河 (個数は LF($z=6$) が無進化の場合)
 - $z=6.3$ (i-drop, 560個), $z=7.5$ (z, 450), $z=8.5$ (Y, 180), $z=10$ (J, 6)
- Lyman α 銀河
 - $z=8.8$ (NB118= $3.7E-18$ erg/s/cm², 15-30個)
- mass-selected galaxies at $z=1.5-5$
- QSOs at $z>3$

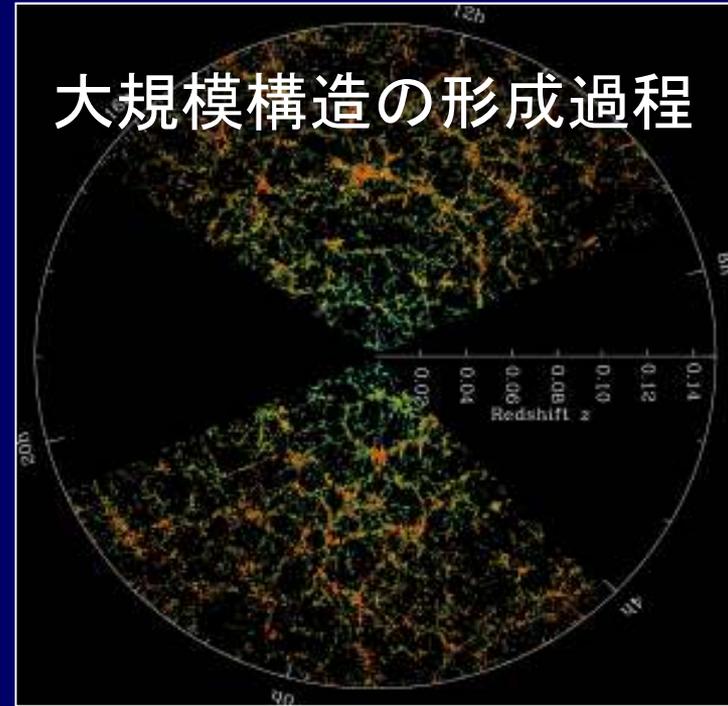
2. 原始銀河団の観測

原始銀河団の重要性

楕円銀河の形成過程、
形態-密度関係の起源



大規模構造の形成過程

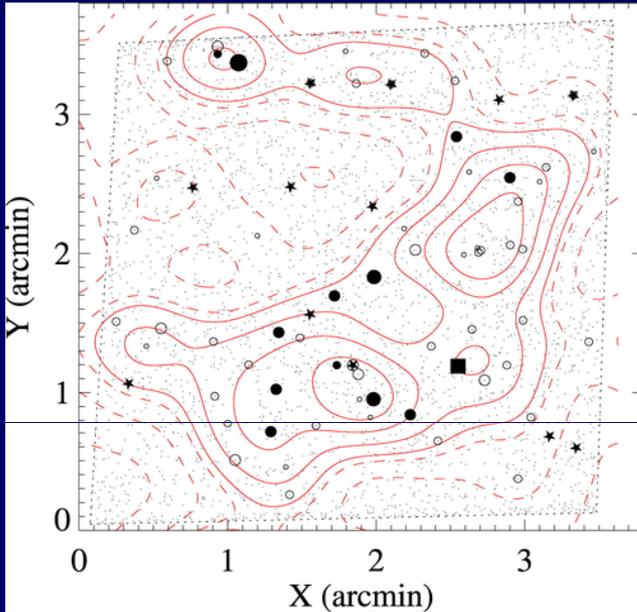


原始銀河団（や原始大規模構造）では、
どんな銀河がどう分布しているのか？
できるだけ過去で調べたい

見つかっている原始銀河団

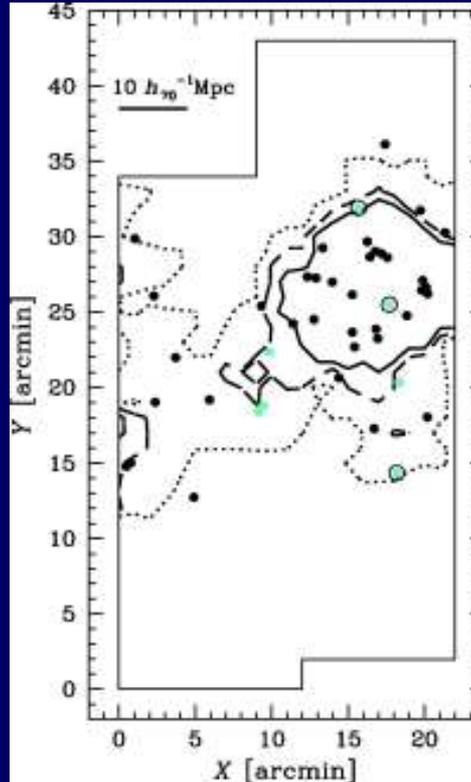
$z=4.1$

Overzier et al. 2008



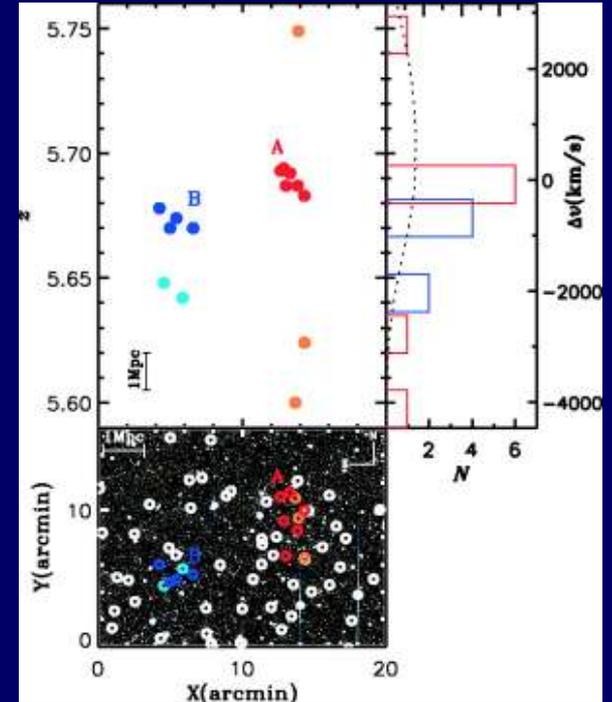
$z=4.9$

Shimasaku et al. 2003



$z=5.7$

Ouchi et al. 2005



- どれも数分から 10 分の大きさ \Rightarrow TAO NIR Camera にぴったり
- NIR の観測はきわめて乏しい (暗いから)

何をどうやって調べるか

(0) $z > 4$ の原始銀河団の探査

- Hyper Suprime-Cam “Deep Survey”
- 電波銀河、QSO、サブミリ銀河を目印にする
- 原始大規模構造

約10平方度 $\Rightarrow 1E+8 \text{ Mpc}^3 \Rightarrow 10^2$ 原始銀河団
分光同定は可視で行なう

(1) TAO で撮像観測

分光銀河の静止系可視の SED \Rightarrow 銀河の星種族
分光銀河の形態
old/dusty な銀河の探査

(2) TAO で分光観測

[OII] から星形成率を推定
4000Å break をトレース

可視で見つけて、TAO で物理を調べる

3. 独自性を出すには？

Hyper Suprime-Cam 深探査領域を観測しよう

TAO の強み

装置の強み

- 広い視野
- 2波長同時観測
- 大口径
- 広い大気の窓
- 視野全体の AO

運用の強み

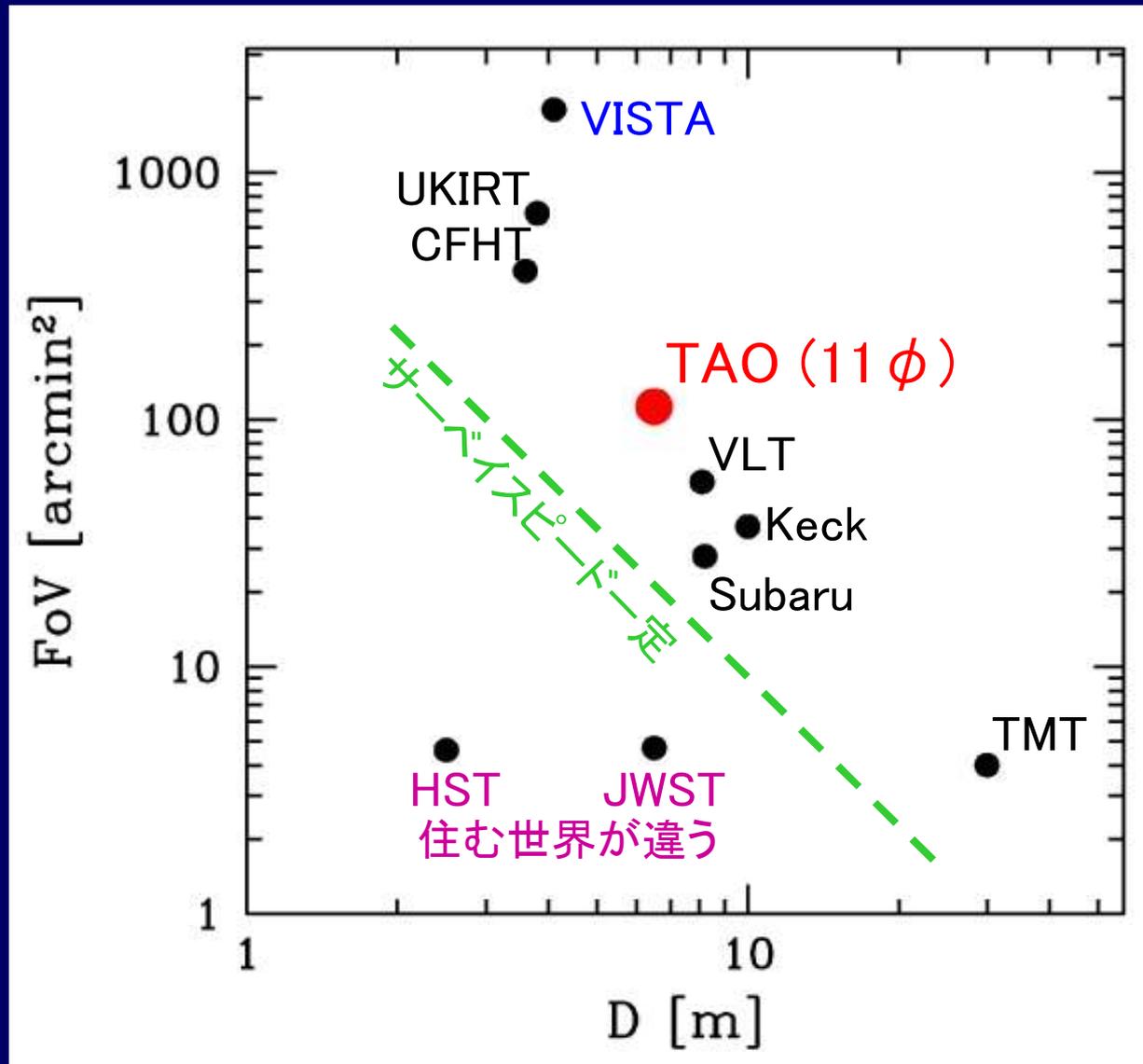
- 時間の集中投資
- 柔軟な運用

しかし 10 年後は心もとない

(VISTA, HST, JWST などが活躍)

観測モード、天域、運用に工夫が必要

大望遠鏡の赤外カメラ



UKIRT/WFCAM
CFHT/WIRCam
VLT/Hawk-I
Keck/MOSFIRE
Subaru/MOIRCS
HST/WFC3
JWST/IRMS
TMT/NIRCAM

運用によって
深さ(右方向)
広さ(上方向)
で勝負

独自のターゲットで勝負

分光器にもライバル
Keck/MOSFIRE
JWST/NIRSPEC

TAO で何をする？

広帯域バンドの深探査（～1平方度）

VISTA, HST, JWST などで行われてしまう

大規模分光探査

Keck/MOSFIRE (6' × 6') などで行われてしまう

狭帯域探査に特化する？

広帯域データのある天域を狙う（後発組の権利）

Hyper Suprime-Cam の深探査領域を観測する

可視の最強の撮像データ

共同提案者：大内（Carnegie）

HSC の 2 つの深探査 (案)

Ultra Deep Survey

3 平方度

30 hr/band/pointing

u,g,r,i,z,y (27–28mag), NB数枚 (26–27mag)

2天域 (UKIDSS/UDS, Ultra-VISTA?)

Deep Survey

40 平方度

3 hr/band/pointing

u,g,r,i,z (26–27mag), NB数枚 (25–26mag)

5天域

- きわめて深く広い可視の撮像 (BB, NB)
- $z < 7.5$ の銀河を多数検出

TAO による観測

- $z \sim 7$ 銀河の分光同定 ($z=7$ LAE 10^2 個、 z -drop 10^3 個)
- $z=6.5$ LAEs の Ly α 、HeII、CIV 輝線の分光
- 狭帯域バンドの $z > 7$ Lyman α 銀河の探査
- $z \sim 4$ 以上の原始銀河団の観測 (撮像、分光)
- $z < 4$ の銀河のさまざまな分光・撮像観測

- 独自のサンプル
- 時間を集中投資

あればうれしい

GLAO

波長分解能 $R \sim 2000$ 以上 (J band 付近)

tunable NB filters

3つの検出器のうち1つを可視 CCD にする

TAO近赤外線による 遠方銀河の探査

太田一陽
理化学研究所

Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

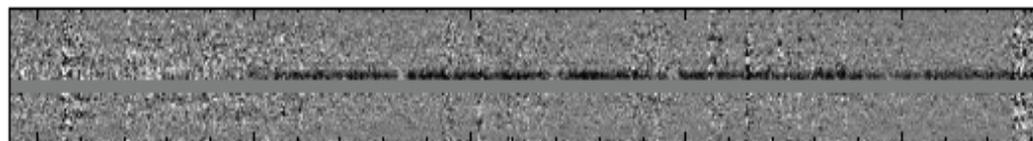
Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

遠方銀河は主に**2種類**、近赤外では **$z \sim 7-14$**

Lyman Break Galaxy
(LBG; UVで明るい)

Ly α emitter
(LAE; UVで暗い)



Observed Wavelength (\AA)

7500

8000

8500

9000

BD38 $z = 5.515$

f_{ν} (μJy)

0.5

0

-0.5

1200

1250

1300

1350

1400

Rest Wavelength (\AA)

Ly α $\lambda 1215.67$

SiII $\lambda 1260.42$

OI $\lambda 1302.17$

SiII $\lambda 1304.37$

CII $\lambda 1334.53$

SiIV $\lambda 1402.77$

SiIV $\lambda 1393.76$



Flux density ($10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)

2.5

2

1.5

1

0.5

0

-0.5

IOK-1

$z = 6.96$ LAE

Sky lines

9,600

9,650

9,700

9,750

9,800

Observed wavelength (\AA)

Ly α 1216Aにより検出

$z \sim 7-14$ 銀河探査の目的

1. First galaxyの発見

2. Ly α 輝線光度関数

宇宙の中性度(再電離度)、銀河進化

3. UV continuum 光度関数

銀河進化、銀河の再電離への貢献度

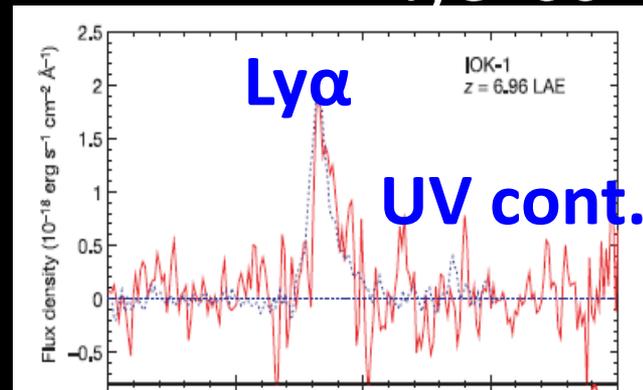
4. 恒星種族 (SED-fitting)

恒星質量、年齢、ダスト赤化、星形成率

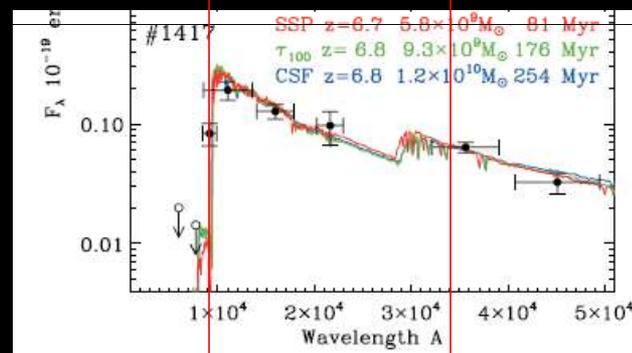
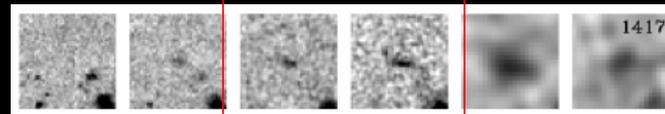
恒星質量密度 \rightarrow 質量集積史、CDMモデルへの制限

星形成率密度 \rightarrow 星形成史、銀河の再電離への貢献度

まずは、 $z \sim 7-14$ 銀河の検出から



可視 近赤外 中間赤



Labbe+06

近赤外・遠方銀河探査の現状

狭く深く vs. 広く程よく深く

近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

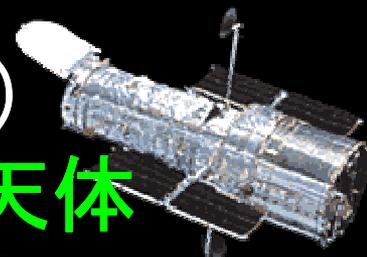
Hubble: ACS i,z NICMOS J, H $\sim 27-28$ (AB5 σ)

Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS)

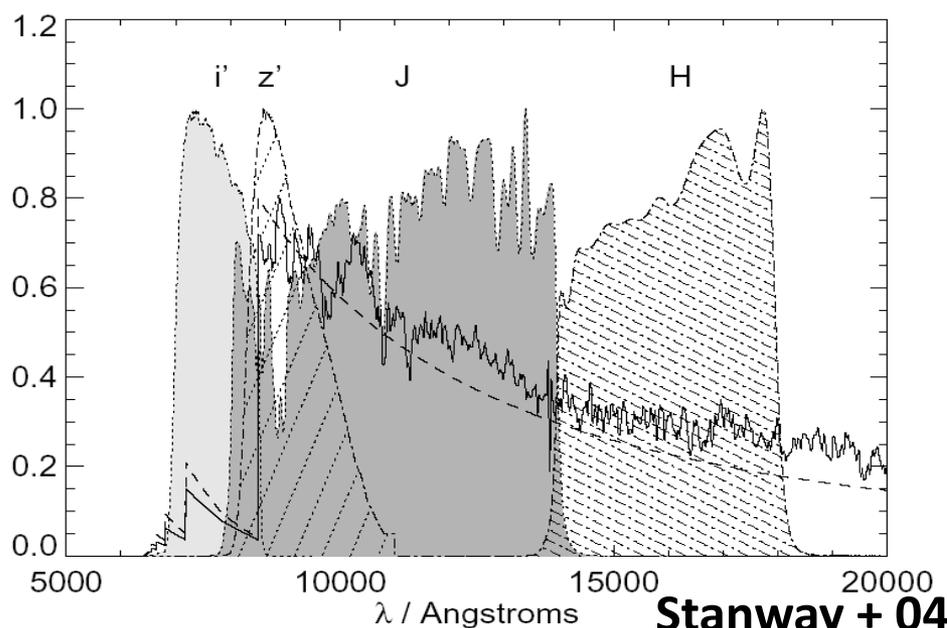
Hubble Ultra Deep Field (UDF)

$z \sim 6-10$ ライマンブレイク銀河 (LBGs)

- $z \sim 5.5-6.7$: i-dropout: $i'-z' > 1.3$ 数百天体
- $z \sim 7-8$: z-dropout: $z'-J > 1.3$ 8天体
- $z \sim 9-10$: J-dropout: $J-H > 1.8$ 0天体
- $z \sim 12-14$: H-dropout 先例なし



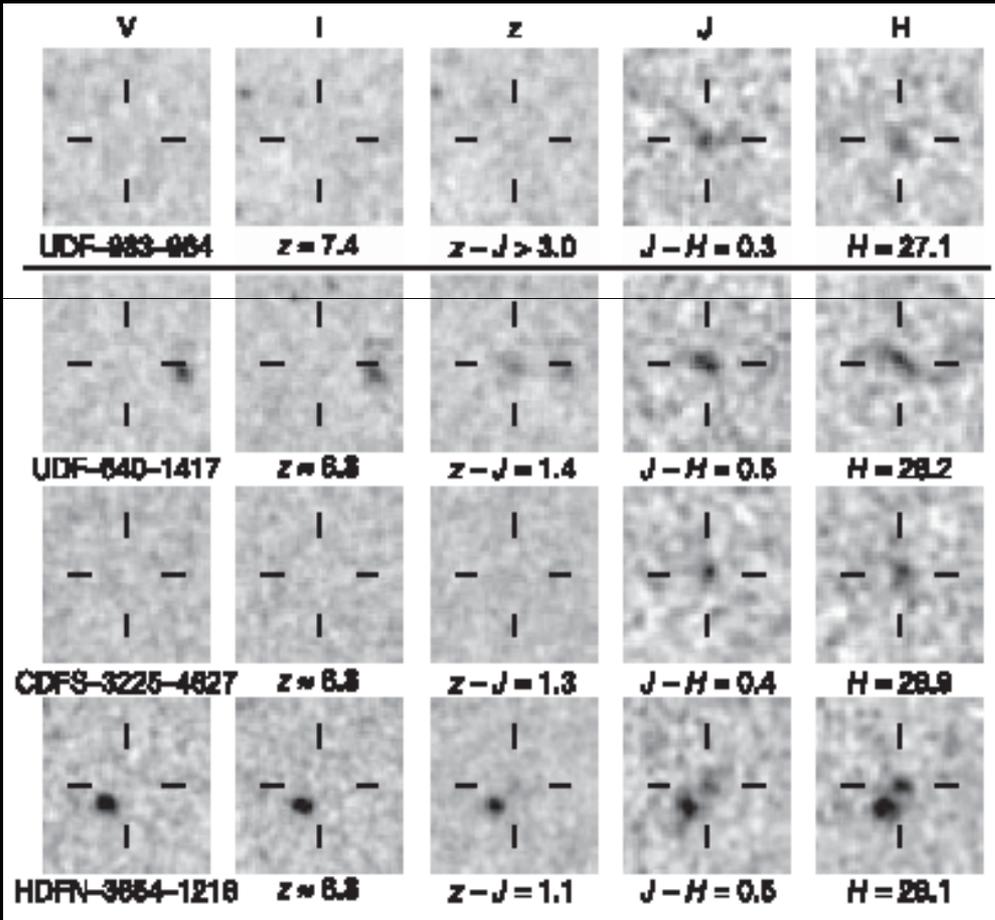
Bouwens + 06
Bouwens + 08



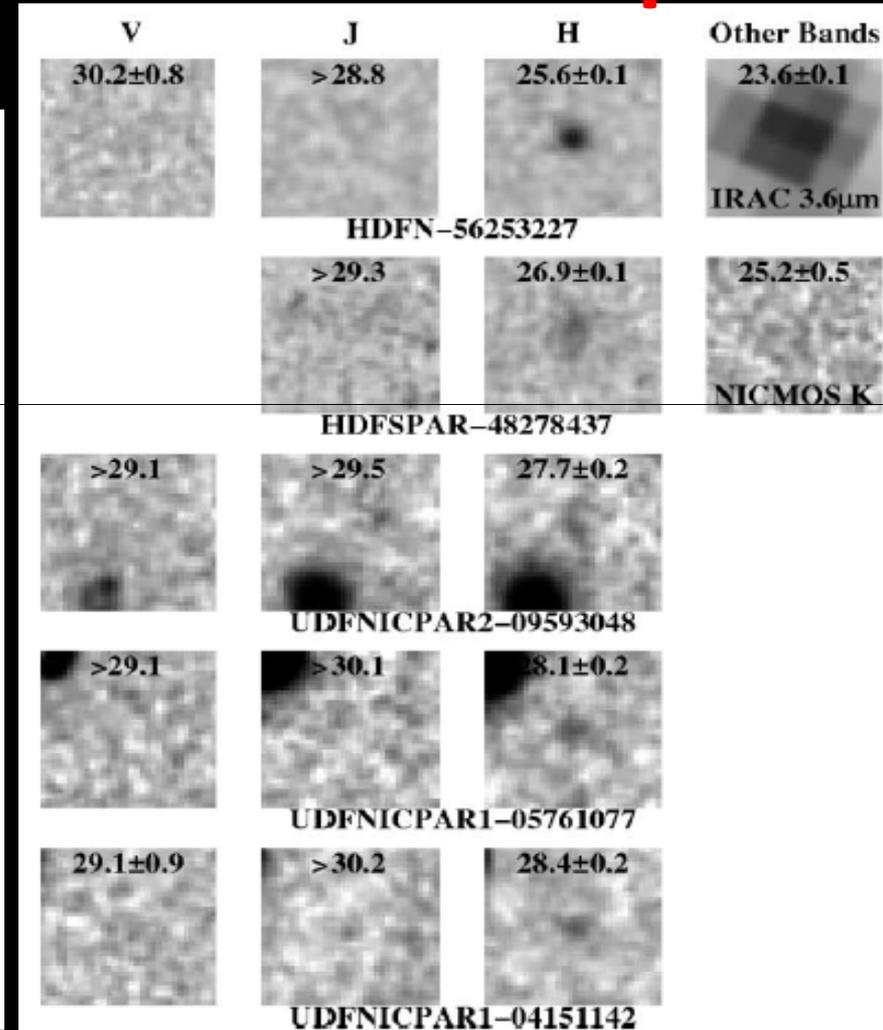
Hubble Ultra Deep Fieldで検出された $z=7-10$ 銀河候補

$z \sim 9-10$ J-dropout

$z \sim 7-8$ z-dropout



Bouwens & Illingworth (2006)



Bouwens et al. (2005)

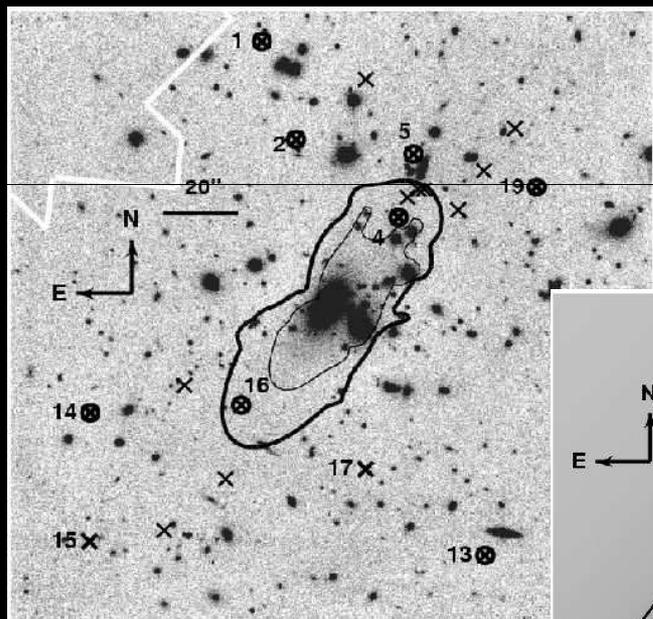
近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

Hubble: ACS z NICMOS J, H $\sim 26-27$ (AB5 σ)

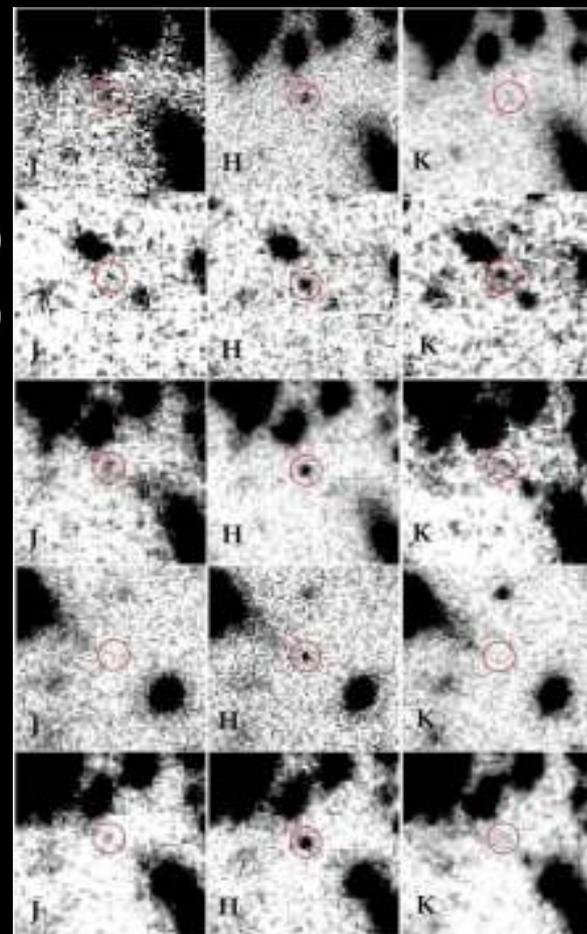
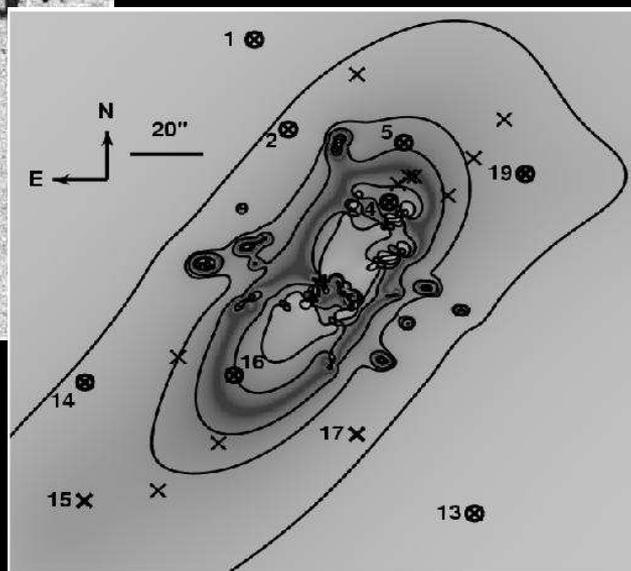
重力レンズ銀河団6個9arcmin² \rightarrow J, H $\sim 27-30$ (AB5 σ)

レンズされた $z \sim 7-8$ LBGs 10個 90%がlow-zなどの可能性あり

レンズされた $z \sim 9-10$ LBGs 2個



Richard et al. (2006)
Richard et al. (2008)

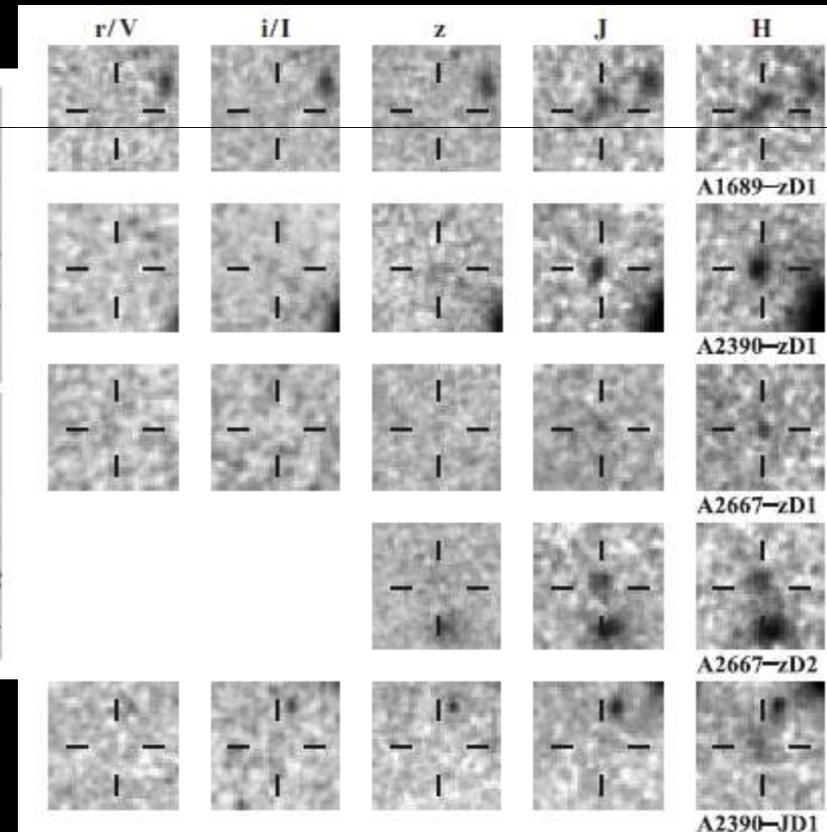
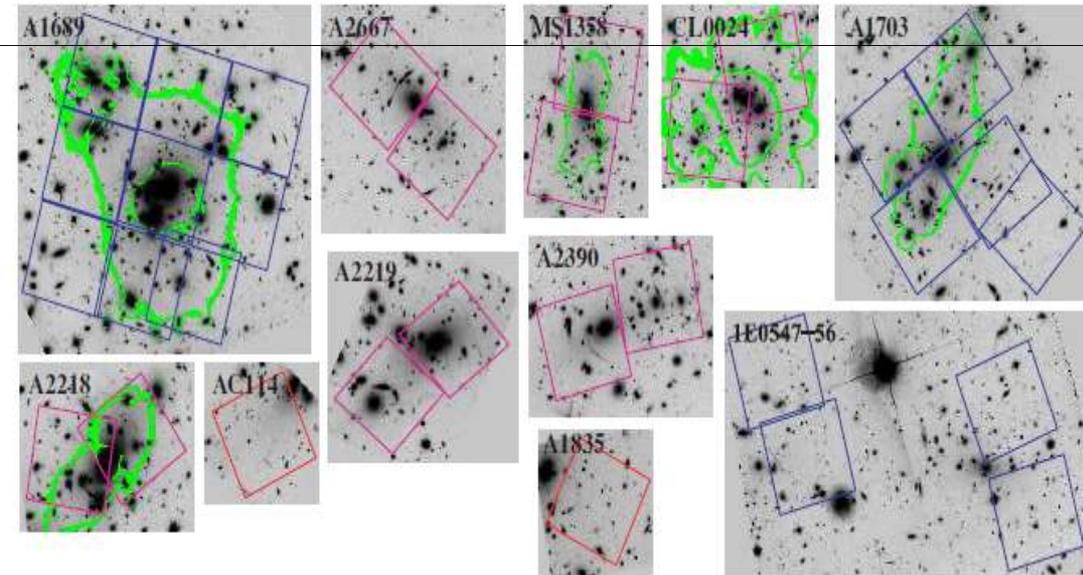


近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

Hubble: ACS z NICMOS J, H $\sim 26-27$ (AB5 σ)

重力レンズ銀河団11個20arcmin² \rightarrow J, H $\sim 27-30$ (AB5 σ)

レンズされた $z \sim 7-8$ LBGs 1個 (less robust 3個)
レンズされた $z \sim 9-10$ LBGs 0個 (less robust 1個)



Bouwens et al. (2009)

近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLAE編

VLT: ISSAC narrowband NB119 $\sim 1.19 \mu\text{m}$

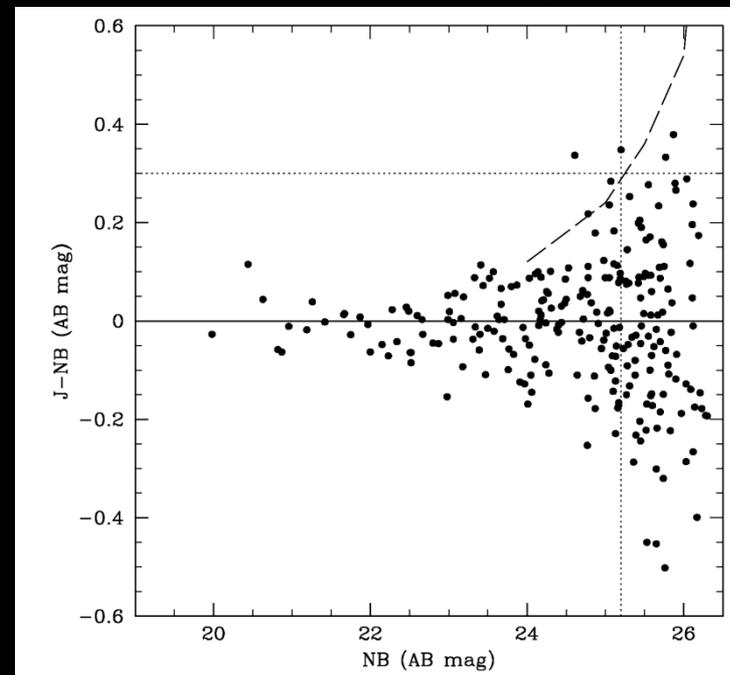
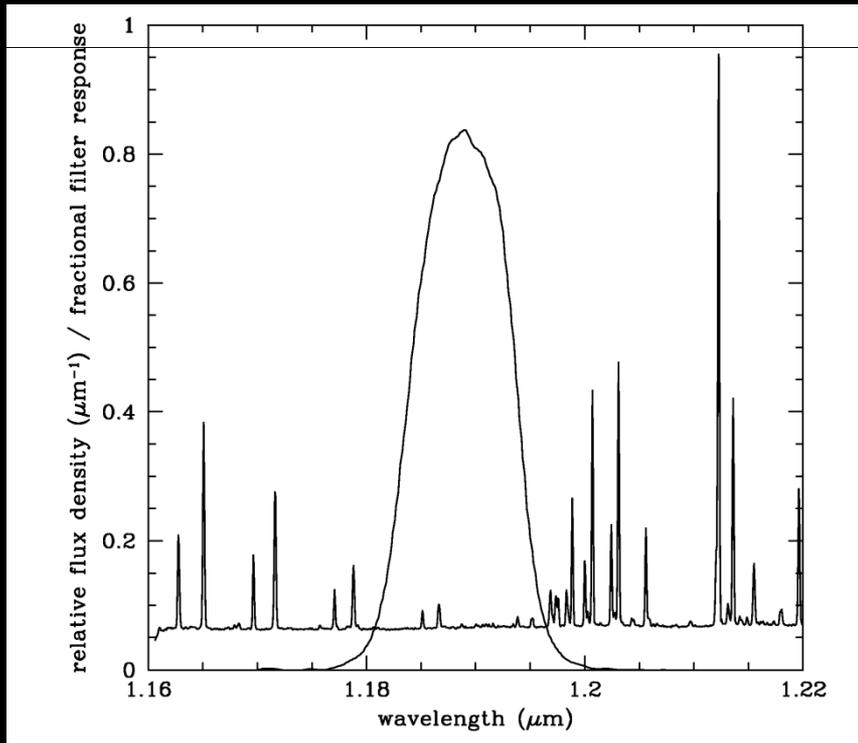
$z=8.8$ ライマン α 輝線銀河(LAE)

GOODS領域 30arcmin^2 0個 $>1.3 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

HDFS領域 $42\text{h } 4\text{arcmin}^2$ 0個 $>3.3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

重カレンズ銀河団3個 12arcmin^2 0個 $>3.7 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

Willis et al. (2005,2007) Cuby et al.(2007)



近赤外・遠方銀河探査の現状: 広く程よく深く編

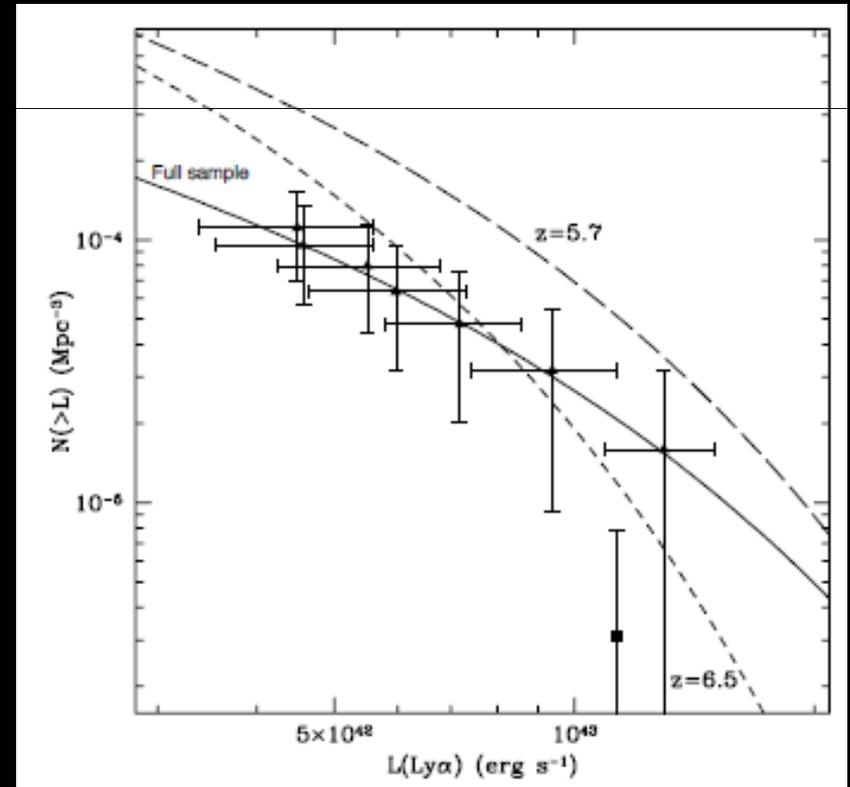
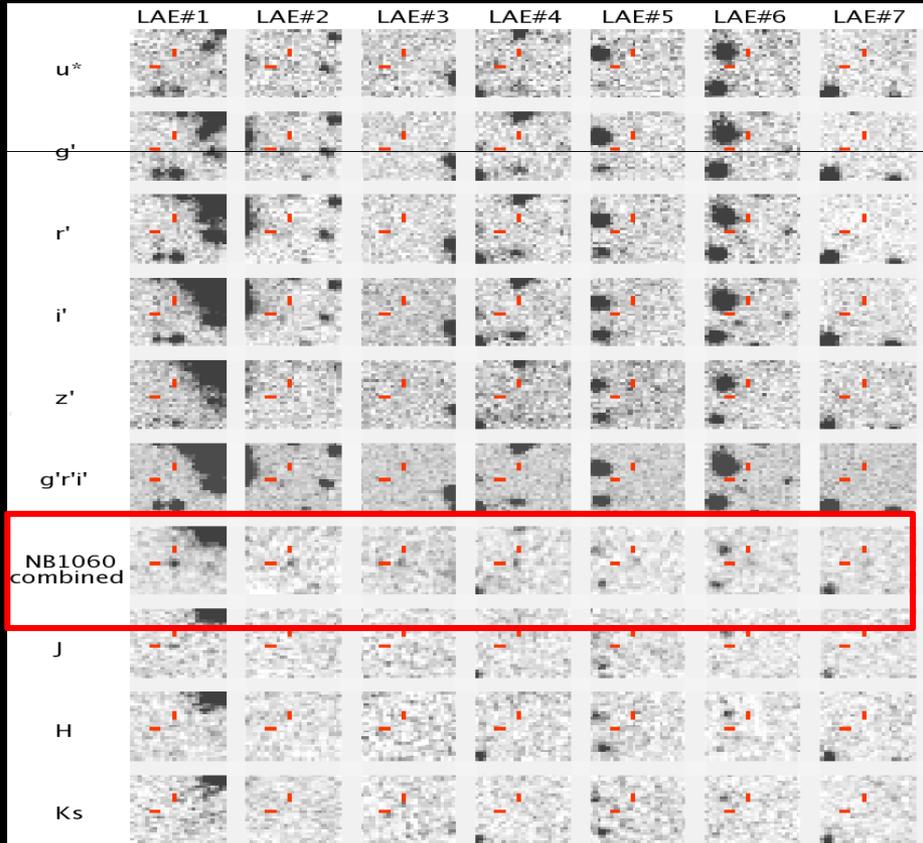
4m望遠鏡近赤外Narrowbandサーベイ NB $\sim 1.06 \mu\text{m}$

$z=7.7$ ライマン α 輝線銀河(LAE)

① CFHT WIRCam CFHT-LS領域 390 arcmin^2 7個 $> 8.3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

② KPNO NEWFIRM ?領域 $28' \times 28'$?個 $> 5.5 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

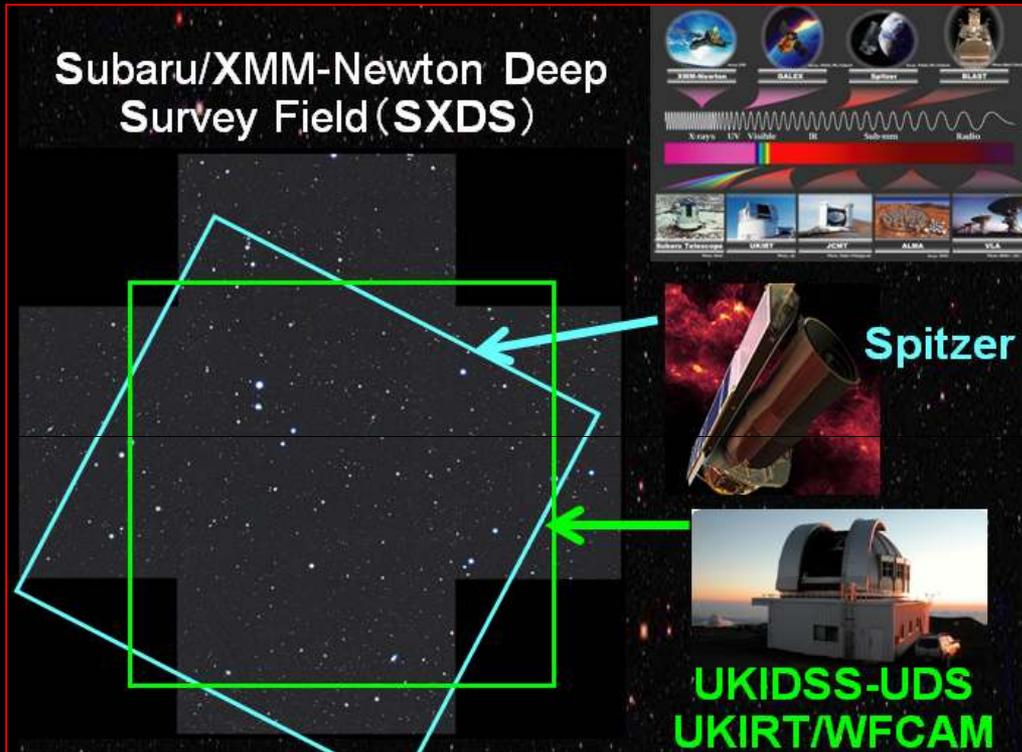
Hibon et al. (2009) Rhoads et al. (2009)



近赤外・遠方銀河探査の現状: 広く程よく深く

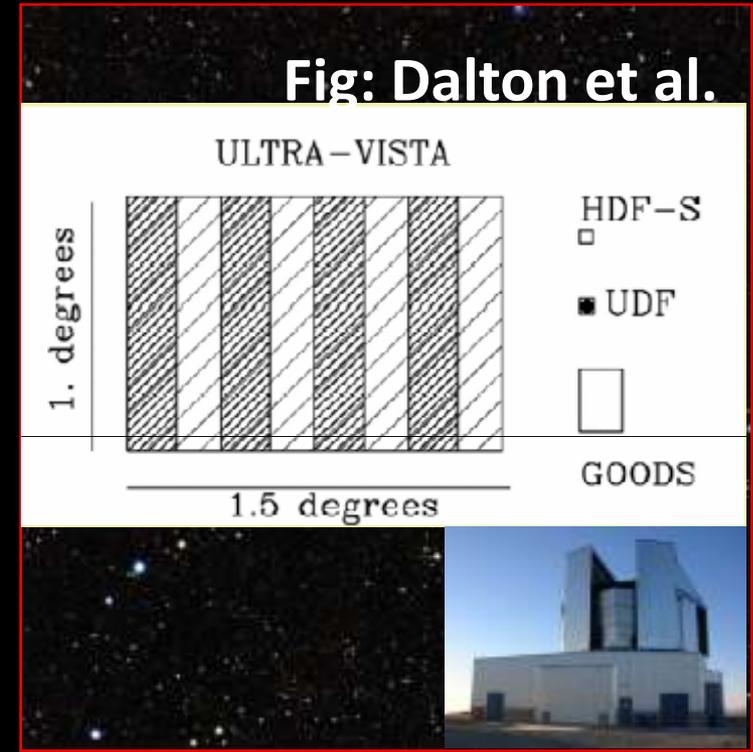
4m望遠鏡近赤外Publicサーベイ

UKIDSS/UDS



0.8 deg² 5 year data
DR5: 210 hrs up to 2007
depths (5σ AB; 2")
J = 24.0 H = 23.7 K = 23.9

COSMOS/Ultra-VISTA



0.75 deg² ultra-deep + 0.75 deg² deep.
5 year from 2009 冬 ~ 1000 hrs.
depth(5σ , AB)
Y=26.7, J=26.6, H=26.1, Ks=25.6,
NB1.18=24.1 (z=8.8 LAE)

Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

TAOで目指す遠方銀河探査

●これまで分かっている事

■ 狭く深く (Hubble宇宙望遠鏡)

- GOODS/UDF: $z \sim 7-8$ LBG候補が8個
- 重力レンズ銀河団11個: $z \sim 7-8$ LBG候補が1個

問題点①: 視野が狭く、候補数少ない ($z \sim 9-10$ LBG候補0個)

問題点②: 暗くて分光できない (30m望遠鏡などを待たないといけない)

■ 広く程よく深く (4m地上望遠鏡)

- ・ CFHT: $z=7.7$ LAE候補が7個 (NB ~ 25.2 AB 5σ)
- ・ KPNO、UKIDSS-UDS、UltraVISTA: 進行中、深さ YJHK $\sim 24-26.5$ AB 5σ
- ・ 予測: 明るい $z \sim 7-10$ LBG、LAE候補が数 \sim 十数個幾見つかる

利点: 明るいので、分光同定できる可能性が高い

問題点: 明るいものは稀なので検出個数が少ない可能性が高い。

限界まで深くできれば... 個数を増やせるかも

→ 4mよりも大きく、気象条件も良いTAO 6.5mなら更に深くできる!

広く深く = TAO 6.5m + 視野・感度最大設計 + 大量時間投入

TAO近赤外カメラへの要求・観測に必要なパラメータ

- 観測視野：少なくともUKIDSS、Ultra-VISTAと同じか広く $\geq 0.8 \text{deg}^2$
 - 8 arcmin² ϕ 視野： ≥ 57 pointing
 - 9.6 arcmin² ϕ 視野： ≥ 40 pointing
 - 12 arcmin² ϕ 視野： ≥ 25 pointing
- 観測深さ： UKIDSS、VISTAより深く
 - ZYJ ≥ 27.0 、H ≥ 26.5 、K ≥ 26.0
 - NB ≥ 25.5 –26.0
- 多バンド同時観測：3バンド同時が良い
- 観測投入時間： ZYJHK～数十時間/バンド
NB～数十時間/バンド

TAO Deep Field 構想

●観測① (同時撮像): 1 deg^2 ,

$z=7.0、7.7、8.8、\dots 18$ Ly α ナローバンド(NB) $\sim 26\text{mag AB } 5\sigma$
ブロードバンドZ, J, H, K $\sim 26\text{-}27\text{mag AB } 5\sigma$

●検出天体①: $z=7\text{-}18$ ライマン α 輝線銀河

- $z=7.0、7.7、8.8、\dots 18$ LAE、
低赤方偏移のH α 、OIII、H β 、OII輝線銀河も検出可能

●検出天体②: $z\sim 7\text{-}14$ ライマンブレイク銀河

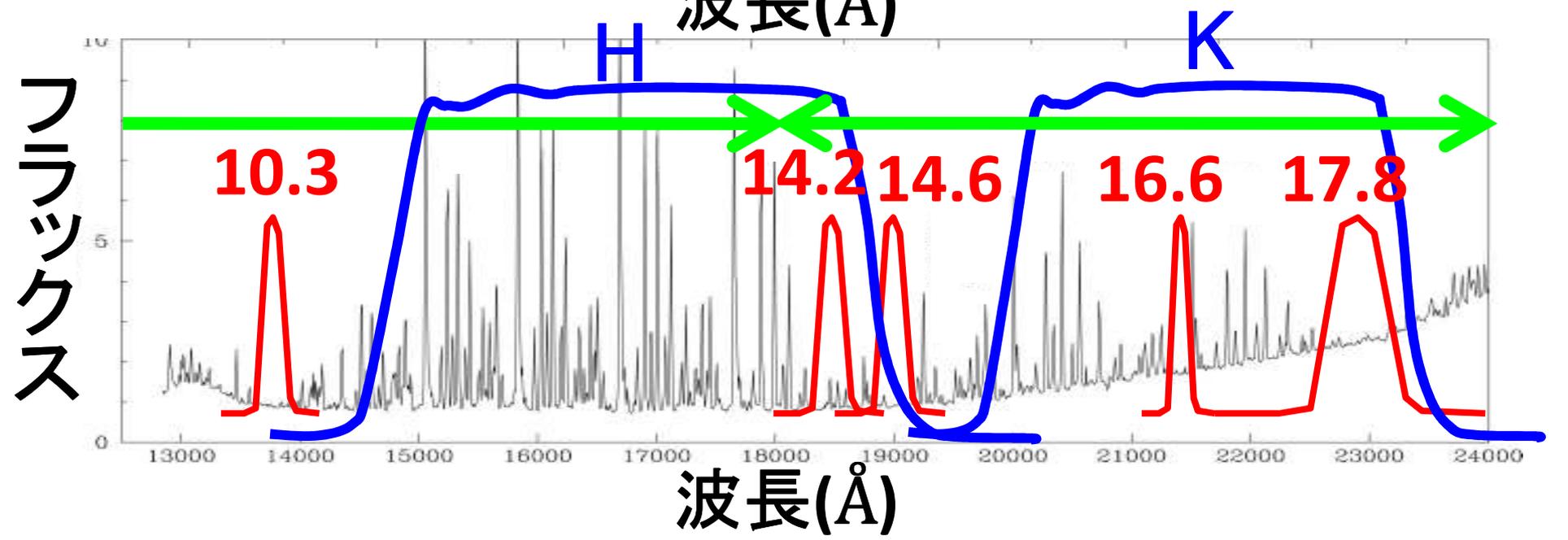
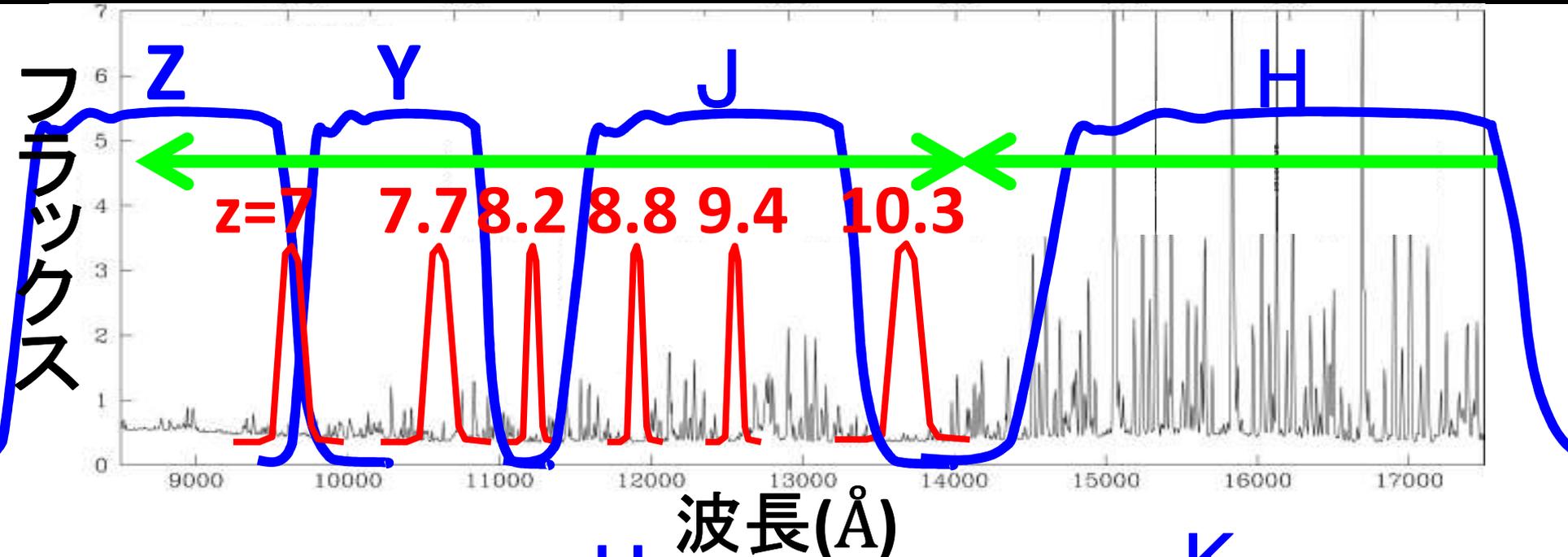
- $z\sim 7\text{-}8$ Z-drop (z-bandはSubaru Suprime-CamでもOK)
- $z\sim 8\text{-}9$ Y-drop LBG
- $z\sim 9\text{-}10$ J-drop LBG
- $z\sim 12\text{-}14$ H-drop LBG (SPICAなどの中間赤外線と連携もあり)

●観測②フォローアップ多天体分光 (将来30m望遠鏡で分光も可)

●目的: $z=7\text{-}14$ 宇宙で以下を探查

- ・銀河進化(光度関数、質量集積史、星形成史)
- ・宇宙再電離(中性水素の変化、ionizing photon budget)

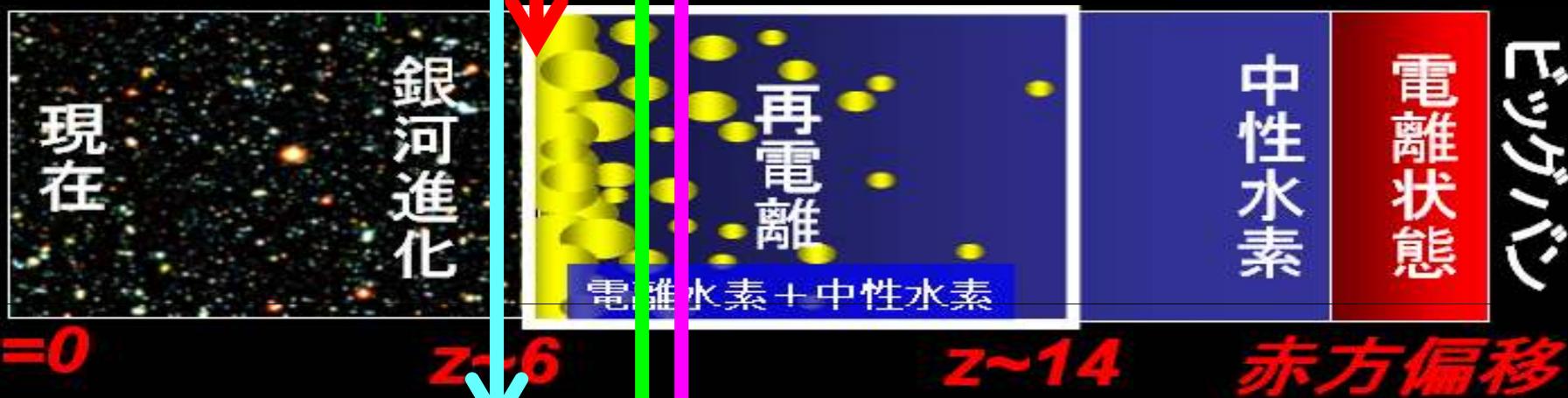
ZYJHKと $z > 7$ Ly α NBの3バンド同時撮像組み合わせ



Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

クエーサーのGPTラフ吸収
 $z \sim 6$ 宇宙の中性度 X_{HI} は1~4%



$z=0$

$z \sim 6$

$z \sim 14$

赤方偏移

$z=5.7$

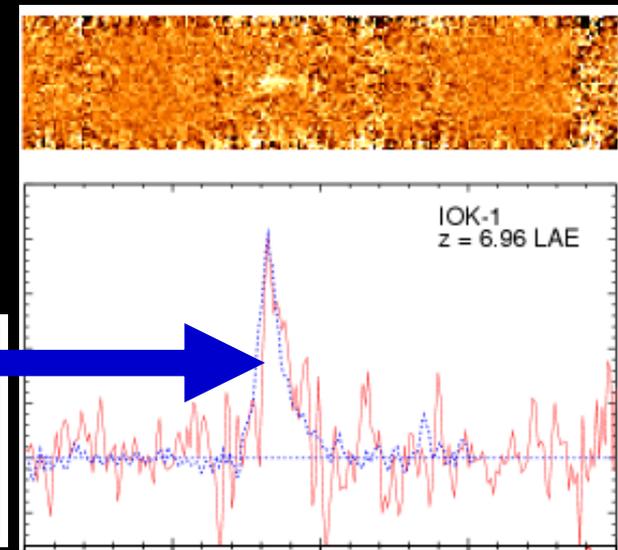
$z=6.6$ $X_{\text{HI}} \sim 24-36\%$

$z=7$ $X_{\text{HI}} \sim 32-64\%$

3つのサンプル

$\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAE)

もし $z > 6$ で中性水素が急増すれば、
 $\text{Ly}\alpha$ 光子が吸収・散乱される。
→ LAEの観測個数 ($\text{Ly}\alpha$ 光子) 密度が減少



宇宙年齡 (Gyr)

$z > 7$ 再電離探查

0.97

0.81

0.75

log(個數密度)

Mpc^{-3}

-4
-5
-6

Semi-analytic model
(kobayashi et al.2007)

銀河進化

再電離

?

log(星形成率密度)

$\text{M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

-3
-4
-5

銀河進化

再電離

?

log($\text{Ly}\alpha$ 光度密度)

$\text{erg s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

-4
-5
-6
39
38
37

5

5.7

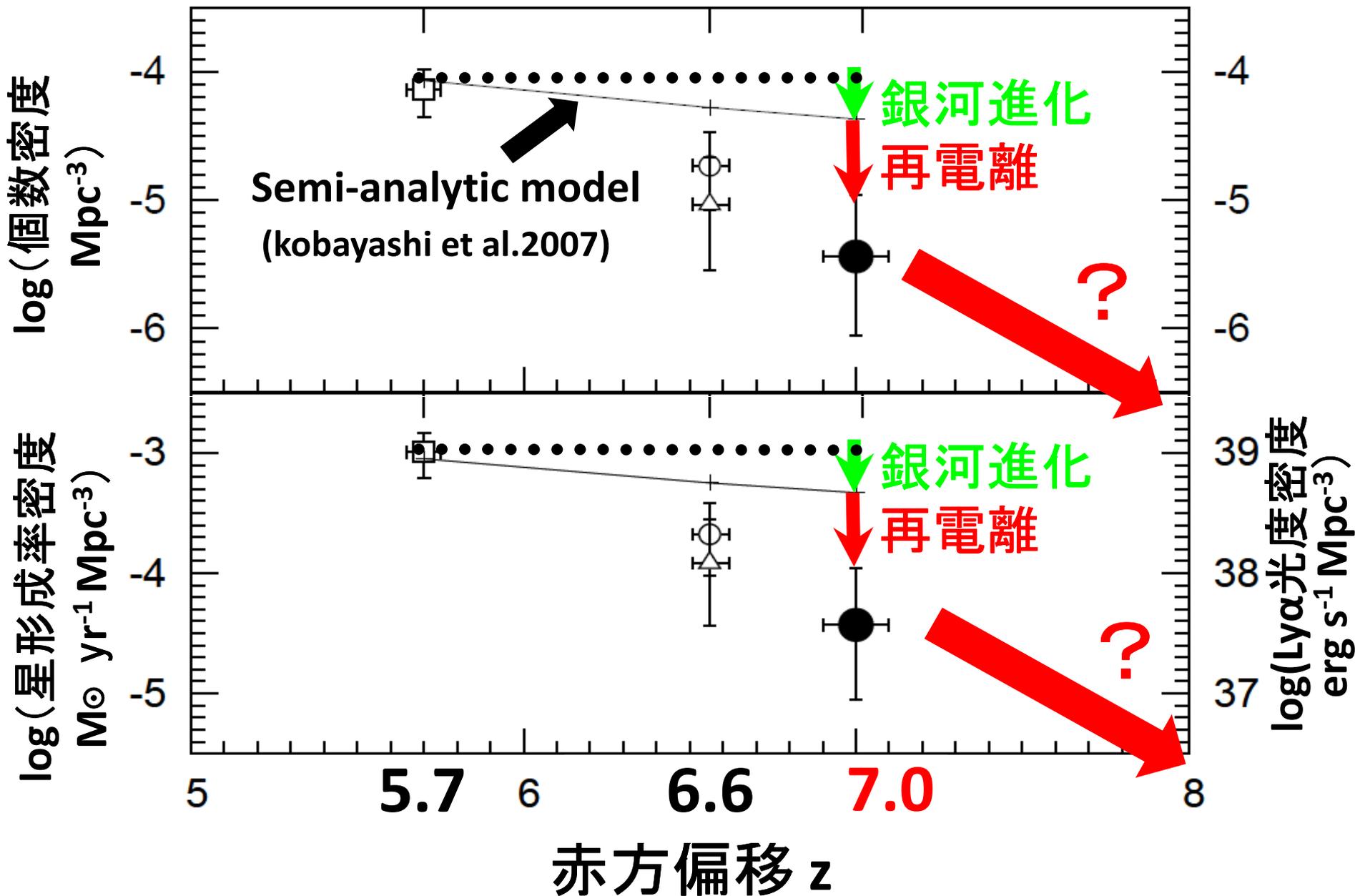
6

6.6

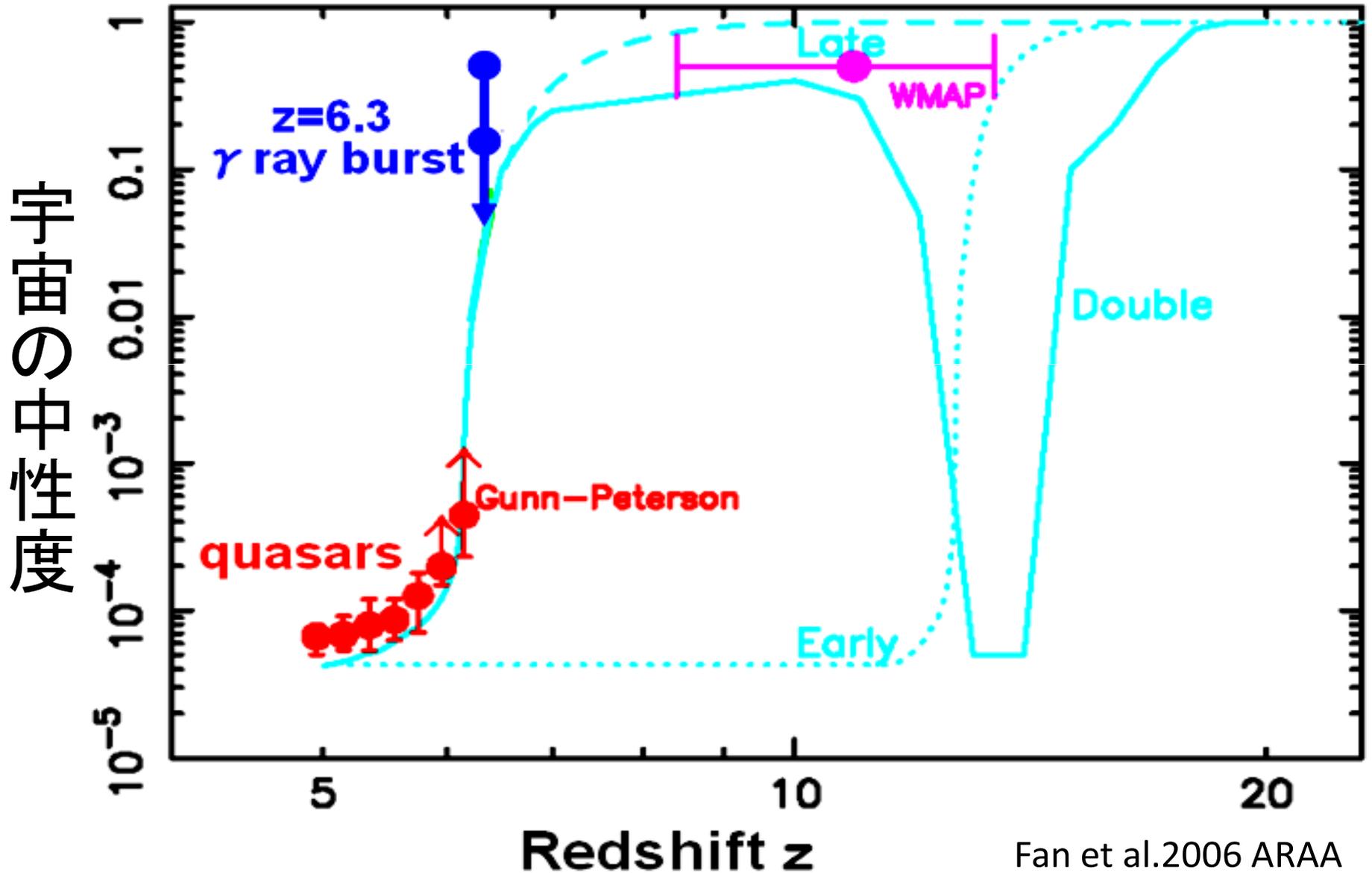
7.0

8

赤方偏移 z

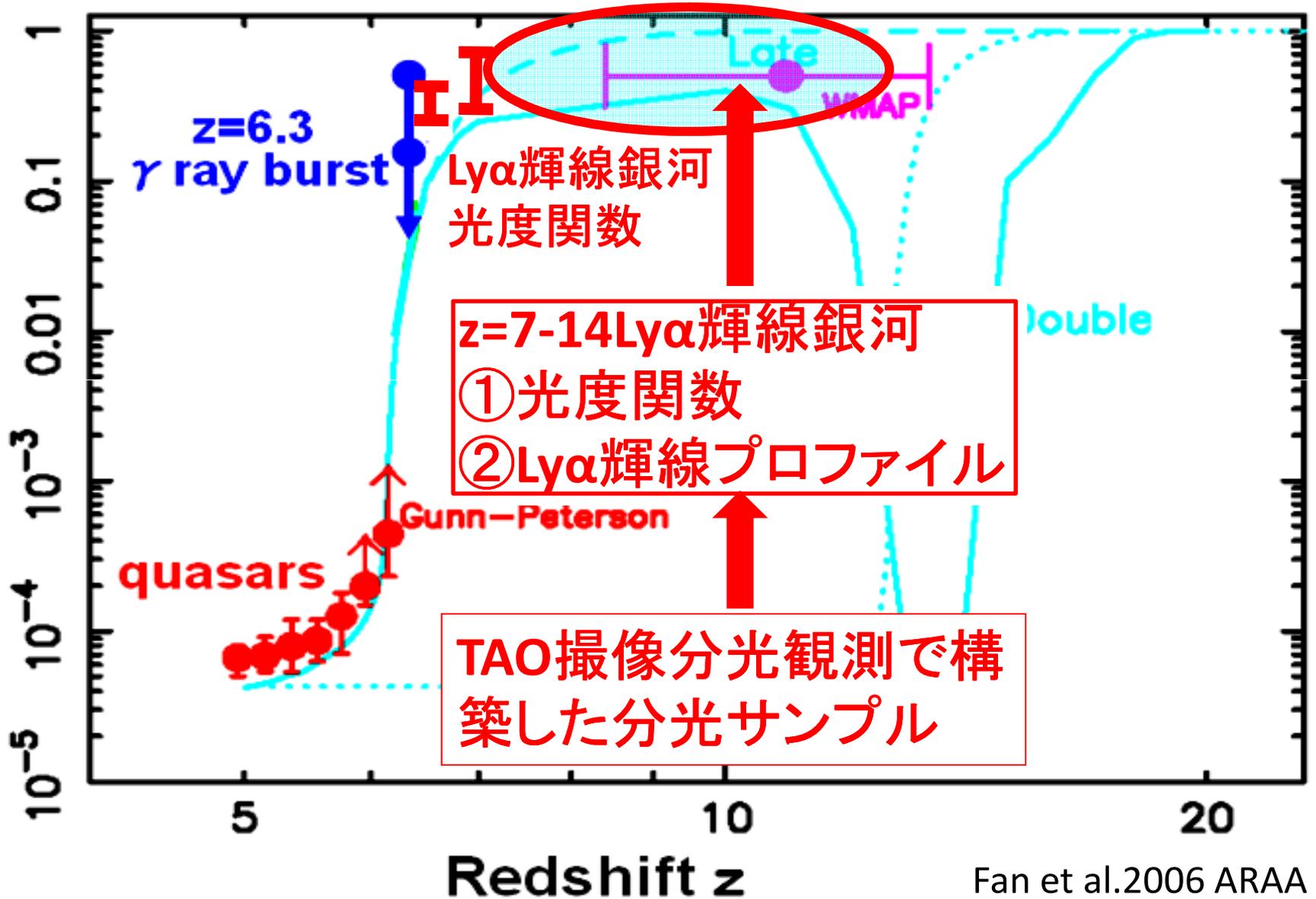


宇宙の再電離状況：観測vs.モデル



宇宙の再電離状況：観測vs.モデル

宇宙の中性度



ライマンブレイク銀河のUV光度関数 at $z > 6$

銀河は宇宙を完全に再電離できるか？

(でなければ、銀河以外に再電離に貢献した天体は何？)

？

銀河が供給する電離光子数 \geq 宇宙を完全電離するのに要する光子数

● 銀河のUV連続光が供給する再電離光子の生成率

$$\dot{N}_i = B \int_{-\infty}^{M_{\max}} 10^{-0.4(M+25+5 \log D_L)} \Phi(M) dM \quad (\text{s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})$$

● 宇宙を完全電離するのに必要な再電離光子の生成率

$$\dot{N}_{\text{cri}}(z) = 10^{51.2} \frac{C}{30} \left(\frac{1+z}{6} \right)^3 \left(\frac{\Omega_b h_{100}^2}{0.02} \right)^2 \text{ s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$$

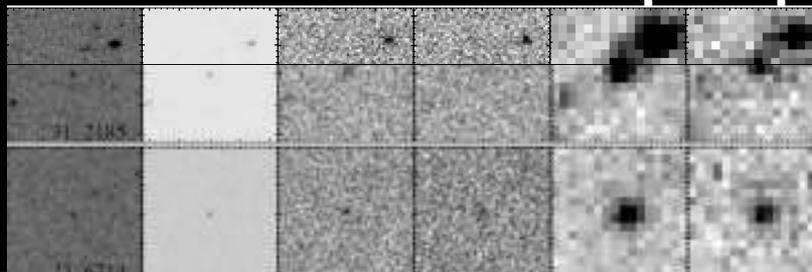
$$\dot{N}_i \geq \dot{N}_{\text{cri}}(z) \text{ なら宇宙を完全に再電離できる}$$

銀河の星/質量形成史

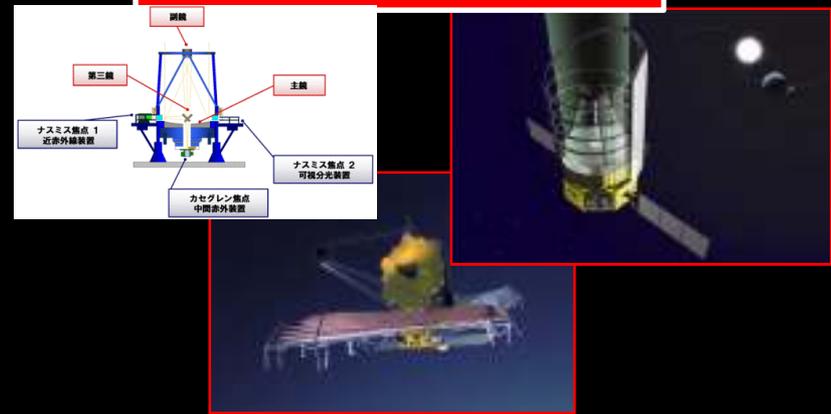
z=3-7 銀河



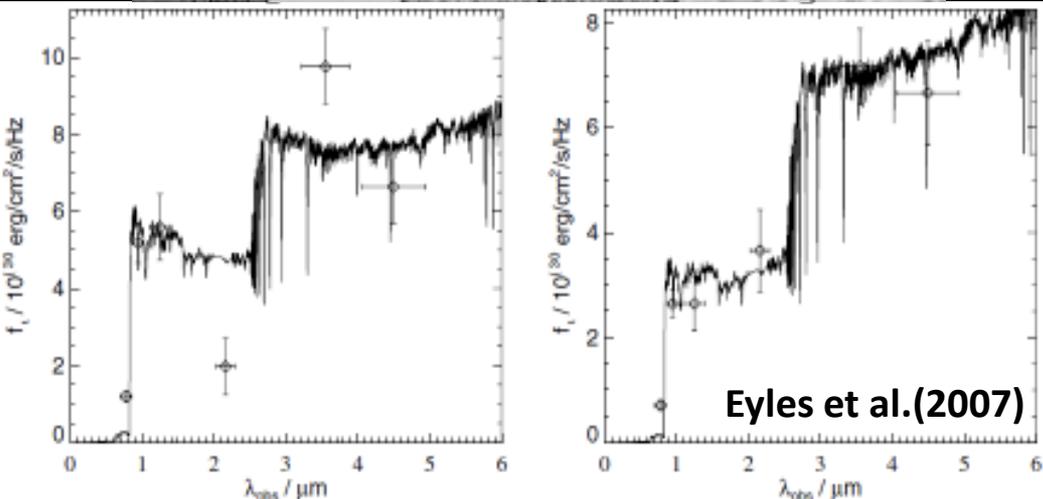
i' z' J K 3.6μ 4.5μ



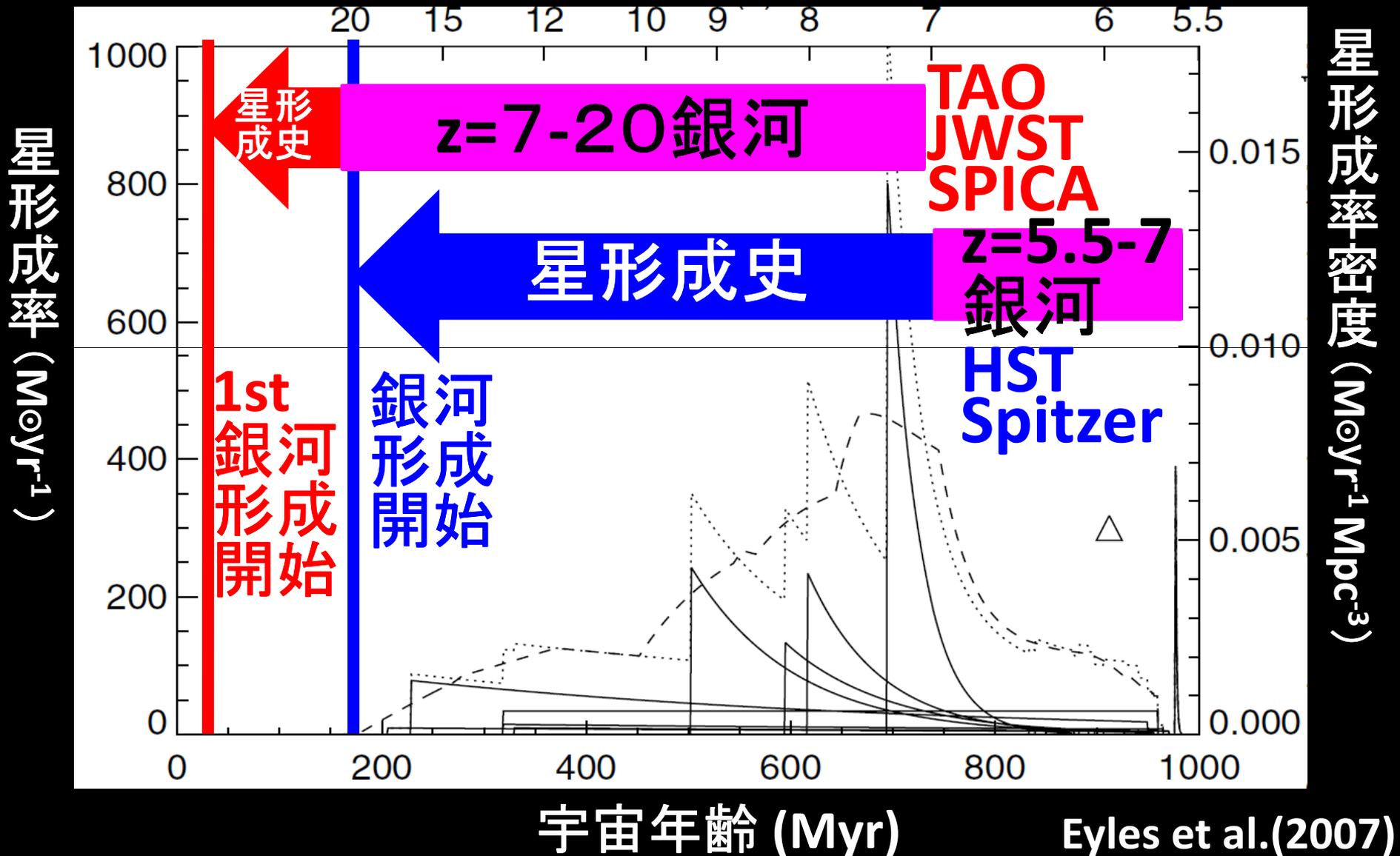
z=7-20 銀河



- ① **TAO** で **z=7-14 LAE**, **z=7-14 LBG** 候補を検出。
- ② **JWST**、**SPICA** で **中間赤外** フォローアップ撮像。
- ③ 静止系可視-近赤外を SED fit、**恒星質量**、**星形成史** を求める。

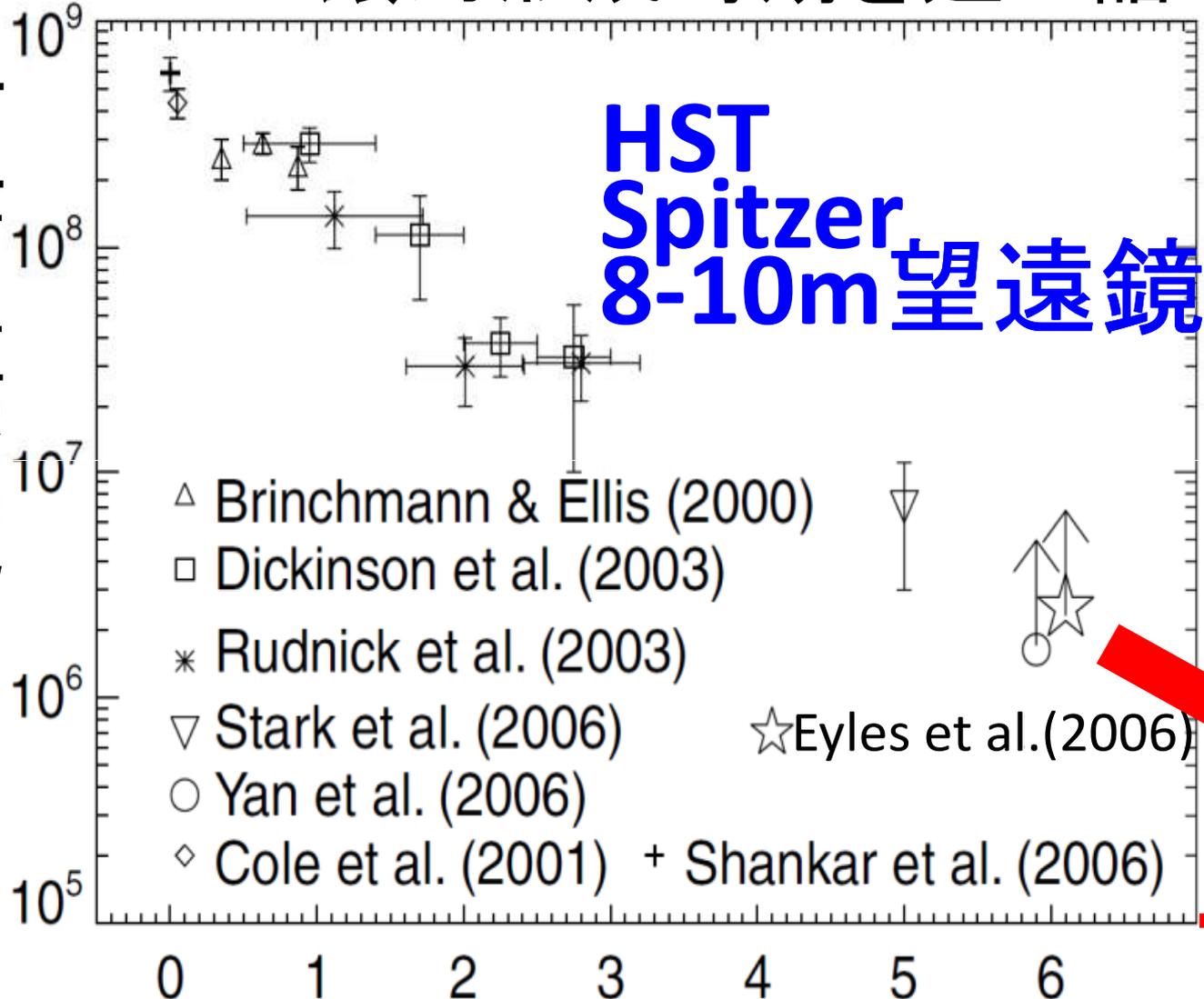


星形成史を遡り、
最初の銀河形成時期を突き止める
赤方偏移 z



質量形成史から 1st銀河形成時期を追い詰める

恒星質量密度 ($M_{\odot} \text{Mpc}^{-3}$)



**TAO
JWST
SPICA**

z=7-14

赤方偏移 z

結論

1. 視野は広い方が良い(12'φ)
2. 同時撮像バンド数が多いほどよい(3バンド)
3. 時間をたくさん投入して
UKIDSS/UDS、Ultra-VISTAと以上の深さと広さ
　　広くて深いサーベイを目指す

2009/9/11 TAO NIR-CAM ワークショップ @ 三鷹

TAO近赤外観測装置による 遠方銀河団・銀河群の大規模探査

小山佑世 (東京大学・天文学教室)

Outline

- * なぜ銀河団観測か？
- * 現状の理解と問題点・次のステップ
- * TAOへの期待

銀河団

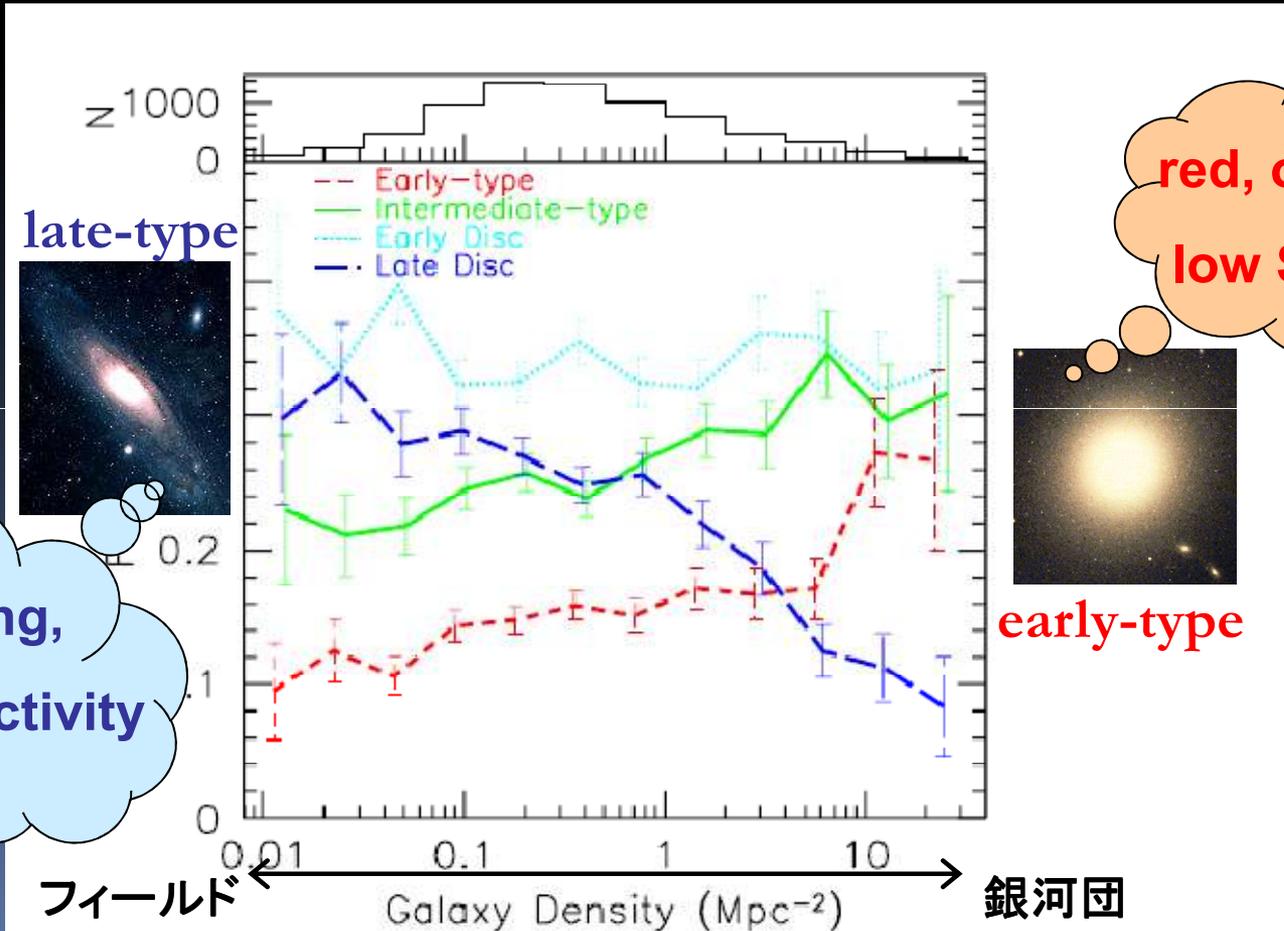
現在の宇宙の銀河団は、すでに星形成活動を終えた赤い楕円銀河やS0銀河（早期型銀河）に満ちている。



Coma cluster ($z=0.024$)

銀河の性質と環境の関係

形態－密度相関 ($z=0$) from SDSS galaxies (Goto et al. 2003)



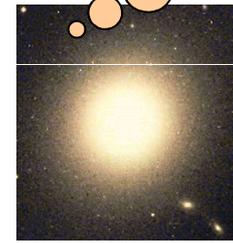
late-type



blue, young,
high SF activity

red, old,
low SF activity

early-type



フィールド

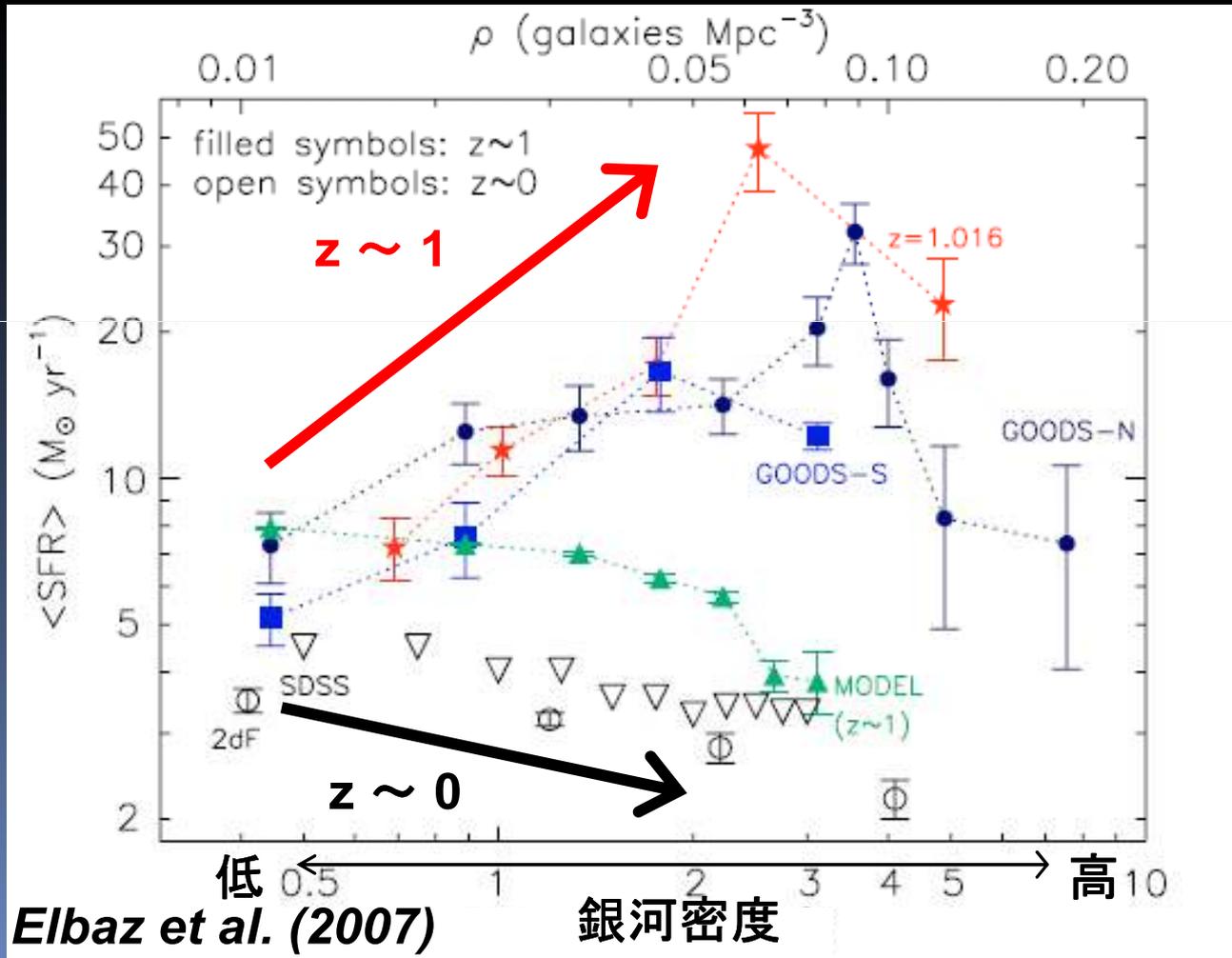
Galaxy Density (Mpc⁻²)

銀河団

高密度な領域ほど早期型銀河が多く、一般に星形成活動は弱い。

$z \sim 1$ 銀河の星形成活動と環境の関係

星形成活動と環境の関係は $z=0$ の傾向とは逆の傾向を示す。
 $z=1 \rightarrow 0$ で高密度環境の星形成活動は劇的に変化した？





Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru (PI : T.Kodama)

~10 X-ray detected clusters at $0.4 < z < 1.45$

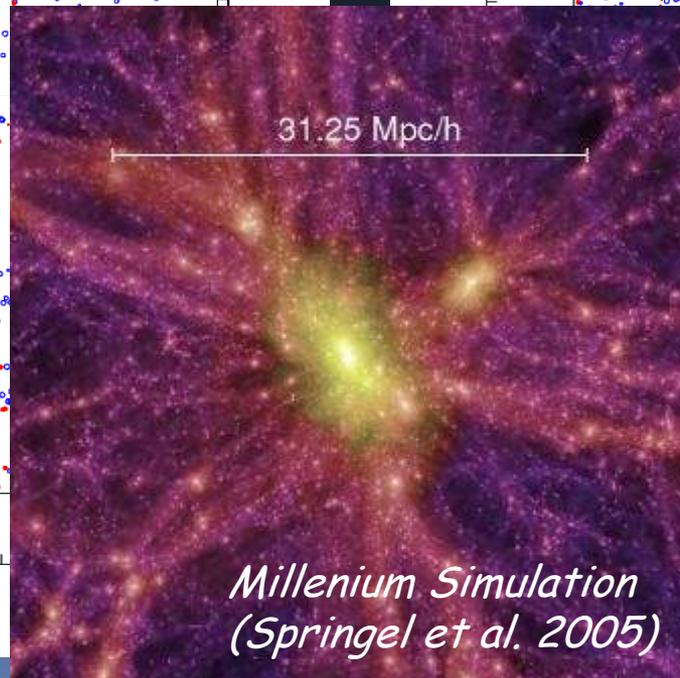
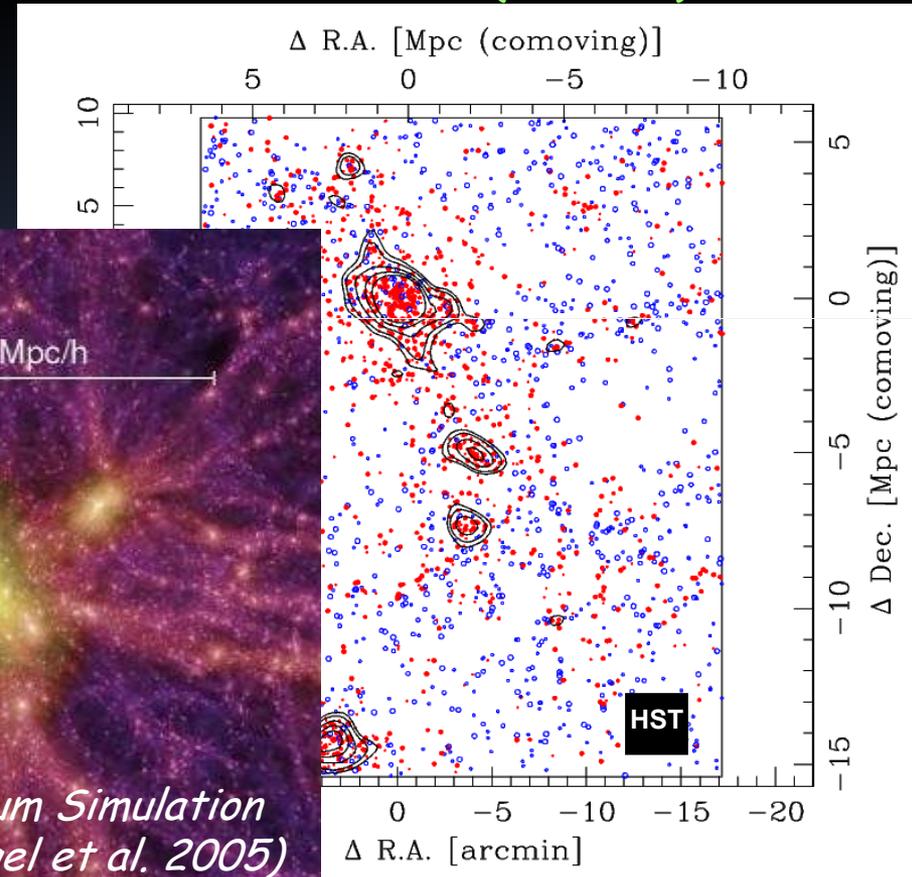
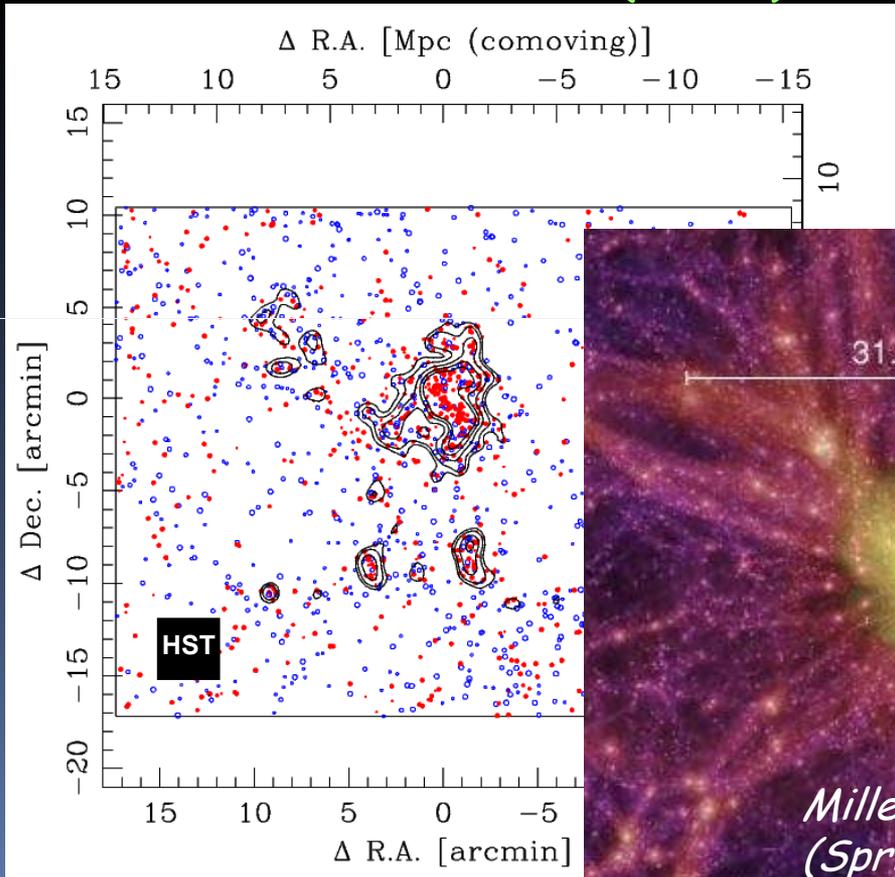
Class	Cluster	RA (J2000)	Dec (J2000)	z	L_X 10^{44}	Bands	Coordination
$z \sim 0.4$	CL 0024+1654	00 26 35.7	+17 09 43.1	0.39	3.2	BRz' ,NB	ACS, XMM, Chandra
	CL 0939+4713	09 42 56.2	+46 59 12	0.41	9.2	$BVRI$,NB	XMM
	(RX J2228+2037)	22 28 36	+20 37 12	0.42	16.5	$BVRi'$	Chandra, S-Z
$z \sim 0.55$	MS 0451.6-0305	04 54 10.9	-02 58 07	0.54	12.0	$BVRI$	ACS (3.5'), Chandra, S-Z
	CL 0016+1609	00 18 33.5	+16 26 13.4	0.546	26.0 [†]	$BVRi'z'$	ACS (3.5'), XMM, Chandra, S-Z
	(MS 2053.7-0449)	20 56 21.8	-04 37 51.4	0.583	5.0	$BVRi'z'$	ACS (3.5'), XMM, Chandra, S-Z
$z \sim 0.85$	RX J1716.4+6708	17 16 49.6	+67 08 30	0.813	2.7 [†]	$VRi'z'$,NB	Chandra, Astro-F target
	(MS 1054.4-0321)	10 56 59.5	-03 37 28.4	0.83	20.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra, S-Z
	RX J0152.7-1357	01 52 42.0	-13 57 52.9	0.831	16.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra, S-Z
	(RX J1226.9+3332)	12 26 58.2	+33 32 49	0.9	53.0	$VRi'z'$	XMM, Chandra, S-Z
	(CL 1604+43)	16 04 28.3	+43 16 24.0	0.9	2.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM
$z \sim 1.2$	RDCS J0910+5422	09 10 44.9	+54 22 08.9	1.11	2.1	$VRi'z'$	Chandra ACS(3.5')
	CL 1252-2927	12 52 54.4	-29 27 17.0	1.23	6.6	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra
	(RX J1053.7+5735)	10 53 43.4	+57 35 21	1.14	2.0 [†]	$VRi'z'$	ACS (6') XMM
	RX J0848.9+4452	08 48 46.9	+44 56 22	1.26	2.8	$BVRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra
$z \sim 1.4$	(XMMU2235.3-2557)	22 35 20.6	-25 57 42.0	1.393	3.0	$VRi'z'$	XMM
	XMMJ2215.9-1738	22 15 58.5	-17 38 02.5	1.45	4.4	$VRi'z'$,NB	XMM

遠方宇宙の大規模構造

Spatial distribution of phot-z members ($\Delta z = -0.05 \sim +0.03$)

RXJ 0152.7-1357 (VRi'z')

CL 0016+16 (BVRi'z')



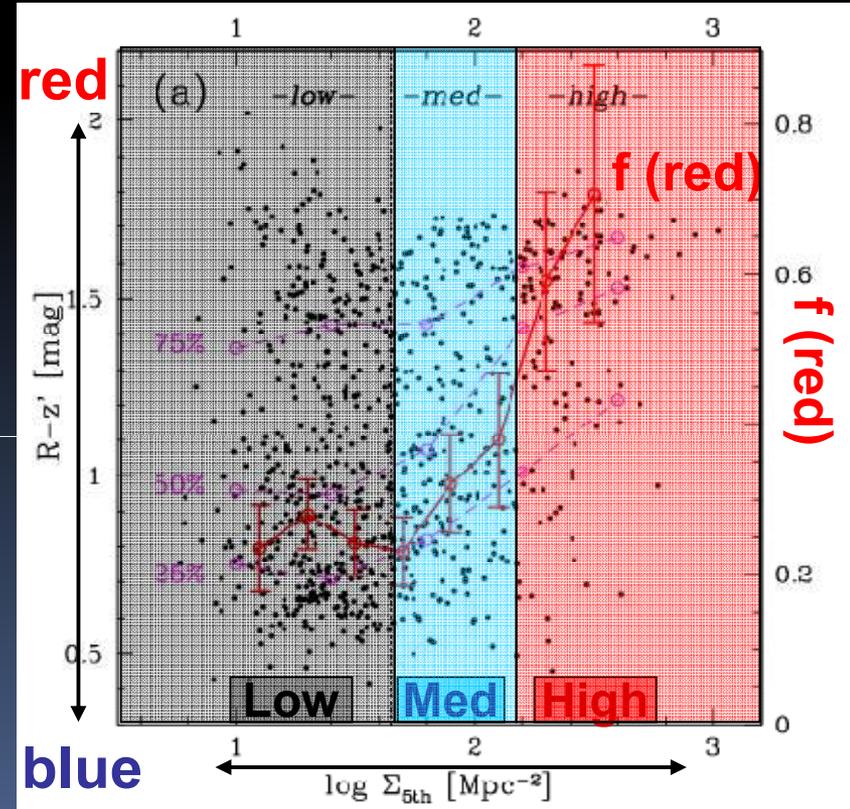
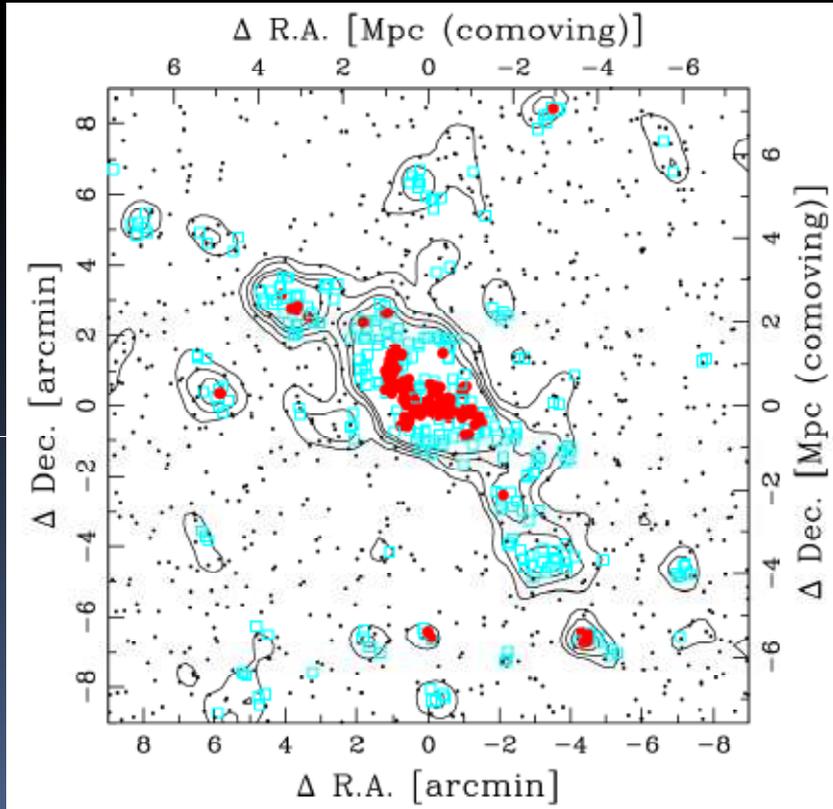
$z=0.83$ (7Gyr ago)

$z=0.55$ (5.4Gyr ago)

Kodama et al. (2005)

銀河団周辺部で銀河の性質が変化？

RXJ1716 銀河団 ($z=0.81$) の例。 (Koyama et al. 2008)



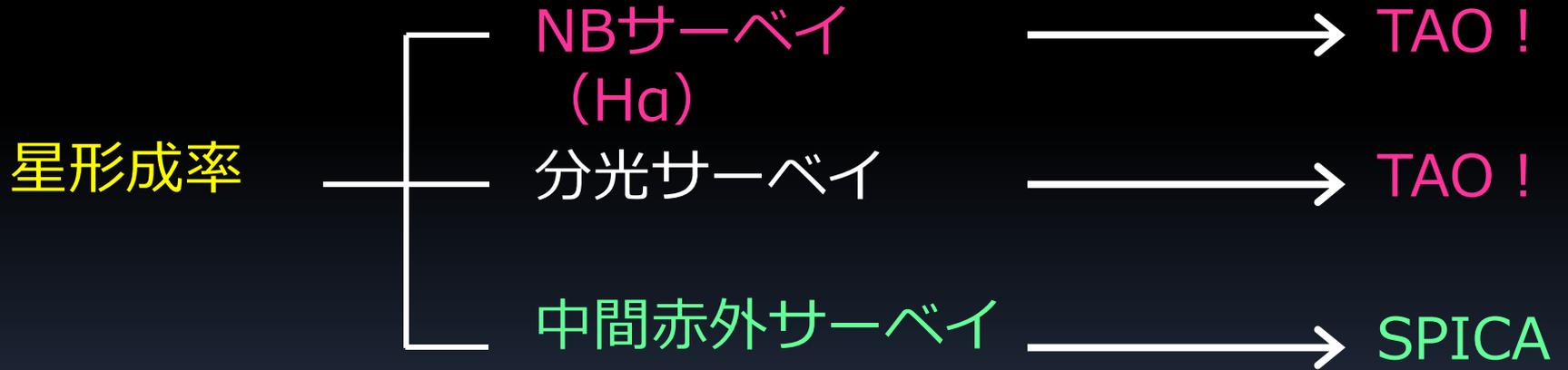
med = outskirts / group / filament

(銀河密度)

赤い銀河が銀河団周辺の中間的な密度環境で増え始めている。

銀河群・フィラメント環境で銀河の星形成が止まる!?

次のステップ：各銀河の物理量を正確に求める

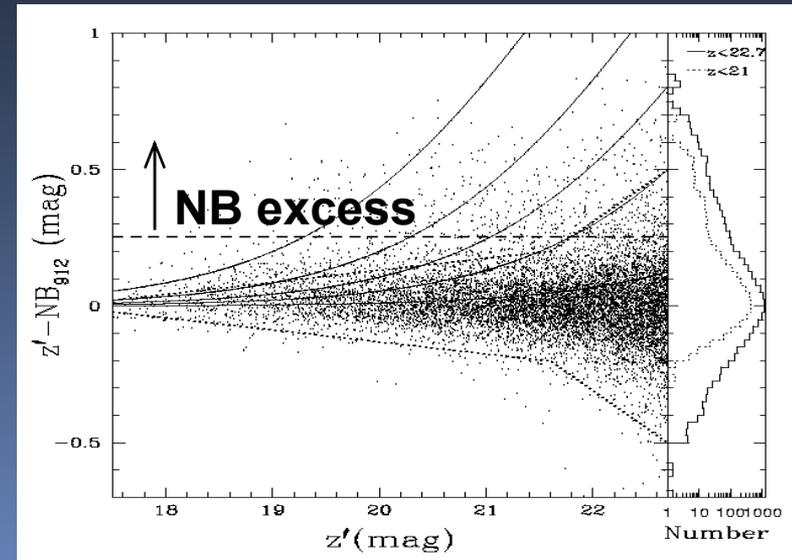
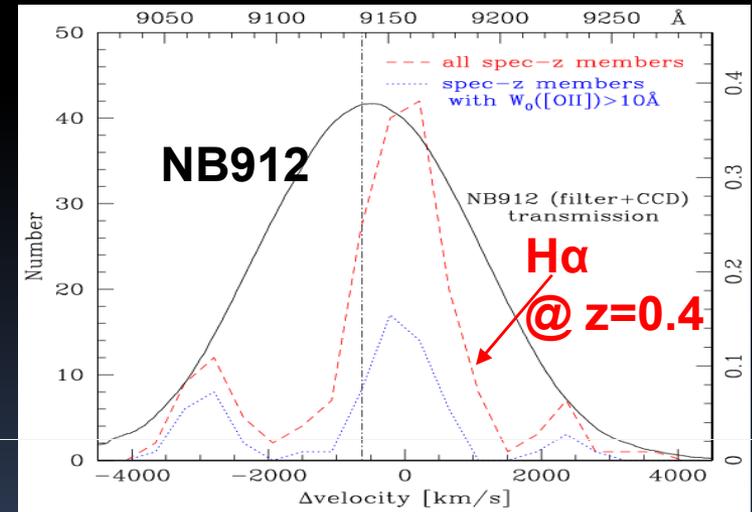
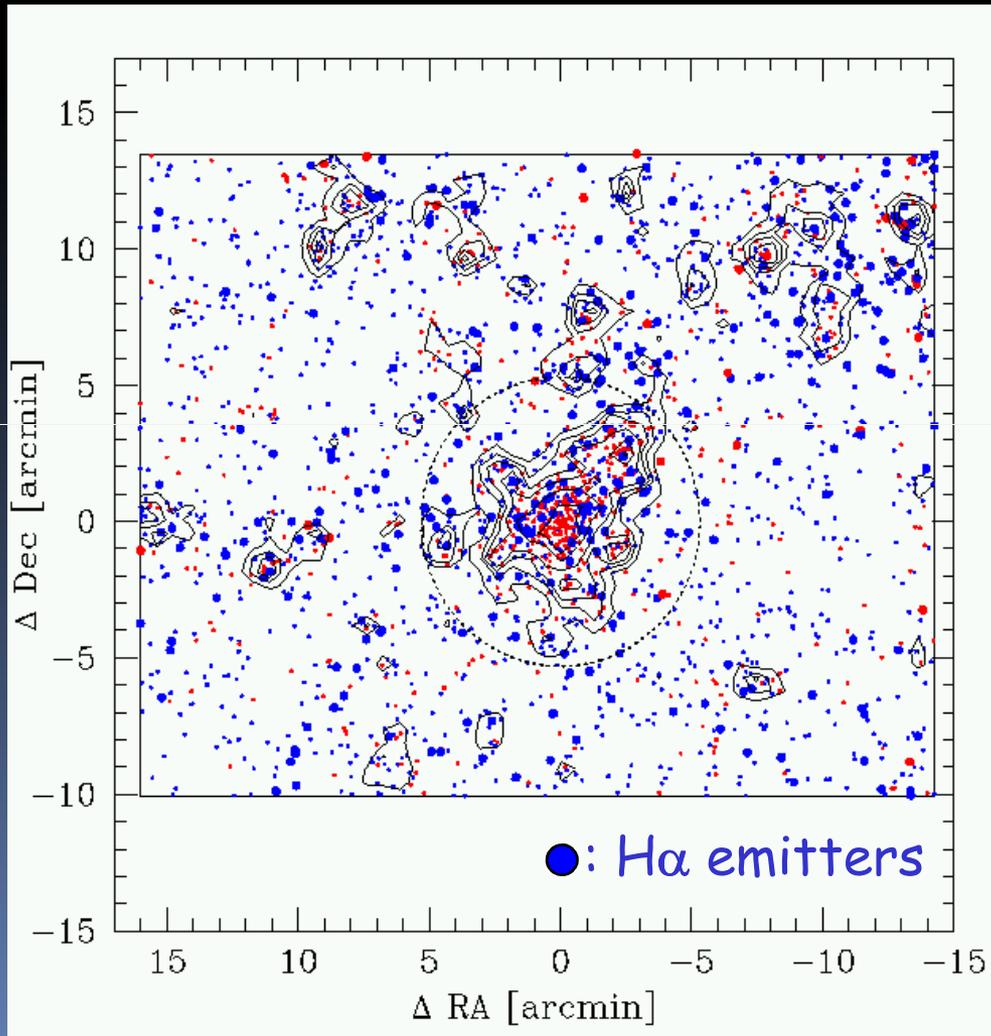


星質量 ———— 静止系近赤外撮像 → TAO!

形態 ———— 広視野AO → TAO!

H α mapping of CL0024 Cluster (z=0.4)

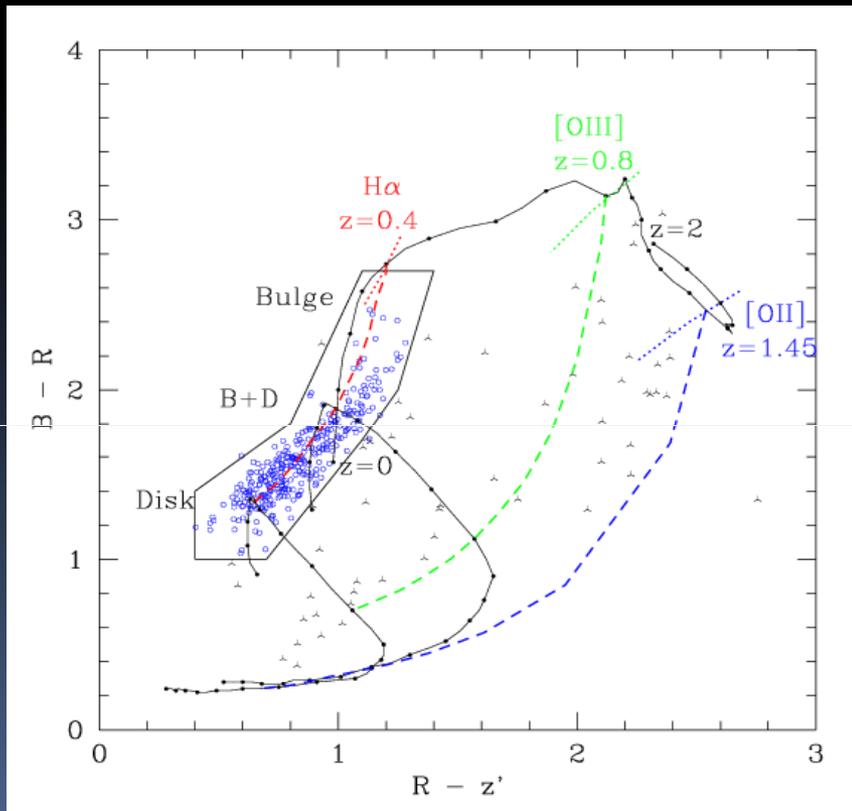
Suprime-Cam + BRz' and NB912 (FWHM=134Å=4000km/s)



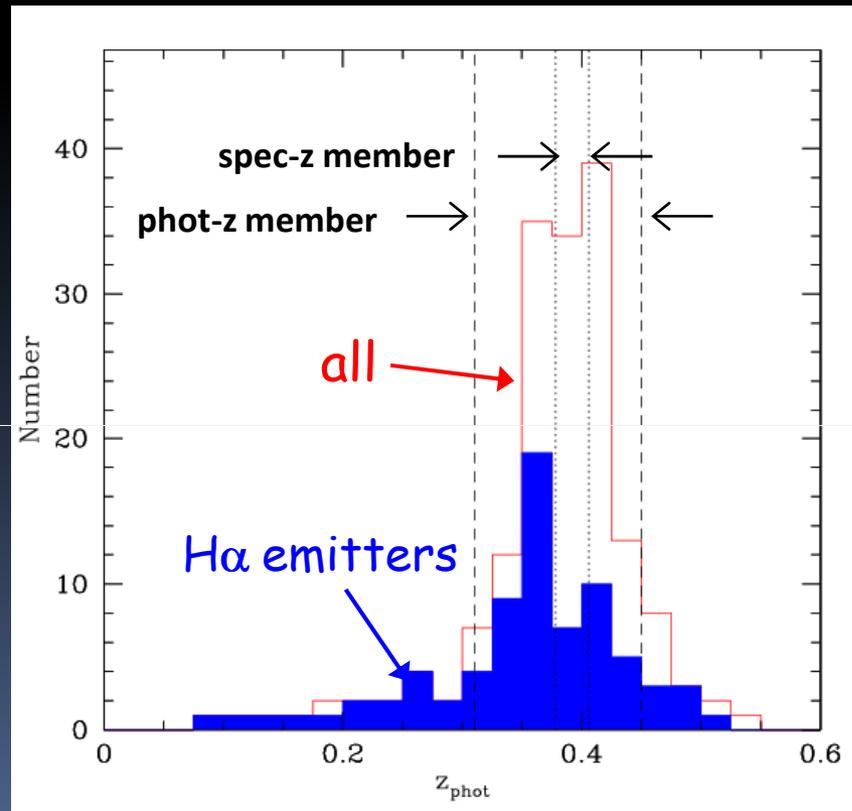
Kodama et al. (2004)

星形成銀河の選択 (広視野NBサーベイの利点)

Colour selection of H α emitters



Phot-z of the H α emitters



(Kodama et al. 2004)

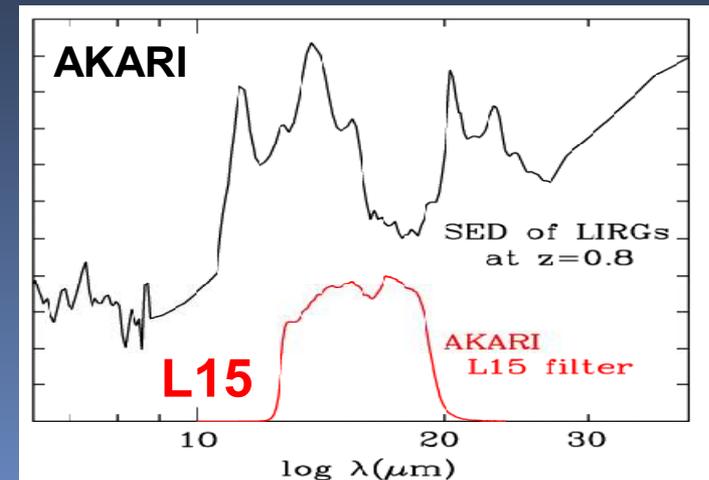
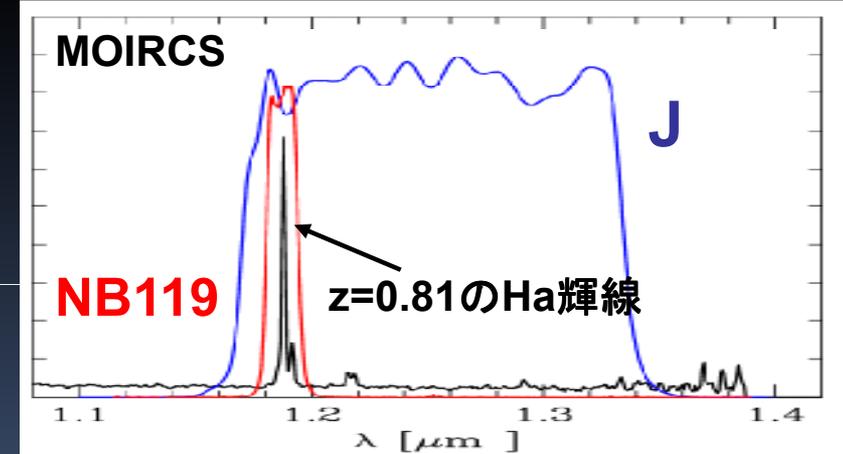
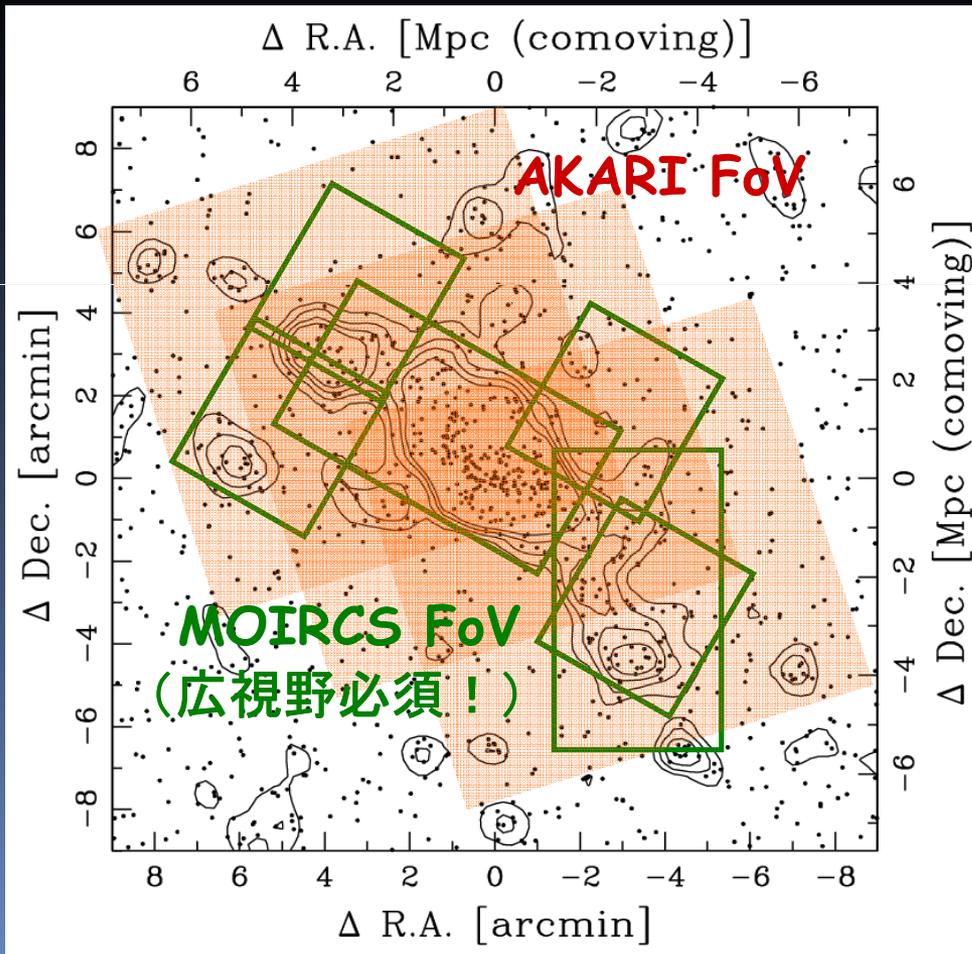
Phot-z の限界を超えて、星形成銀河をコンプリートに選び出せる。

TAO ならほぼ redshift の切れ目なく $z > 2$ まで H α 輝線サーベイを行える。

ダストに埋もれた活動性を見逃さない工夫

H α + MIR mapping of RXJ1716 cluster (z=0.8)

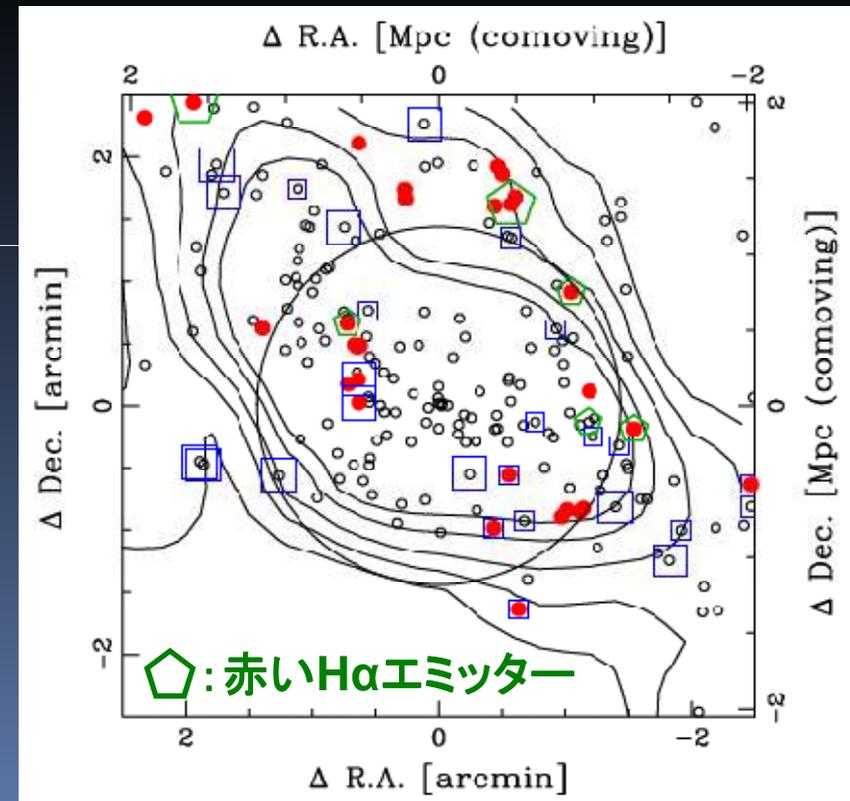
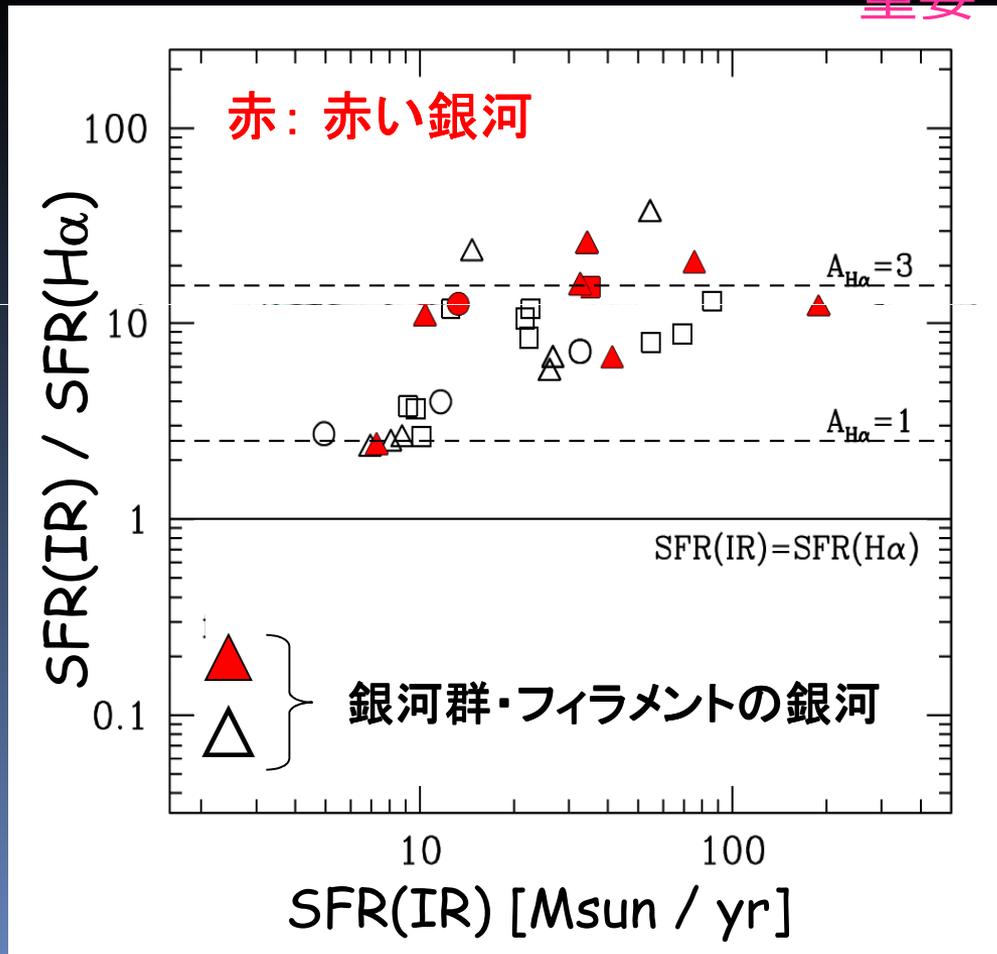
すばる S-Cam (V, R, i', z') MOIRCS (J, NB119) あかり IRC (3, 7, 15 μ m)



ダストに埋もれた活動性を見逃さない工夫

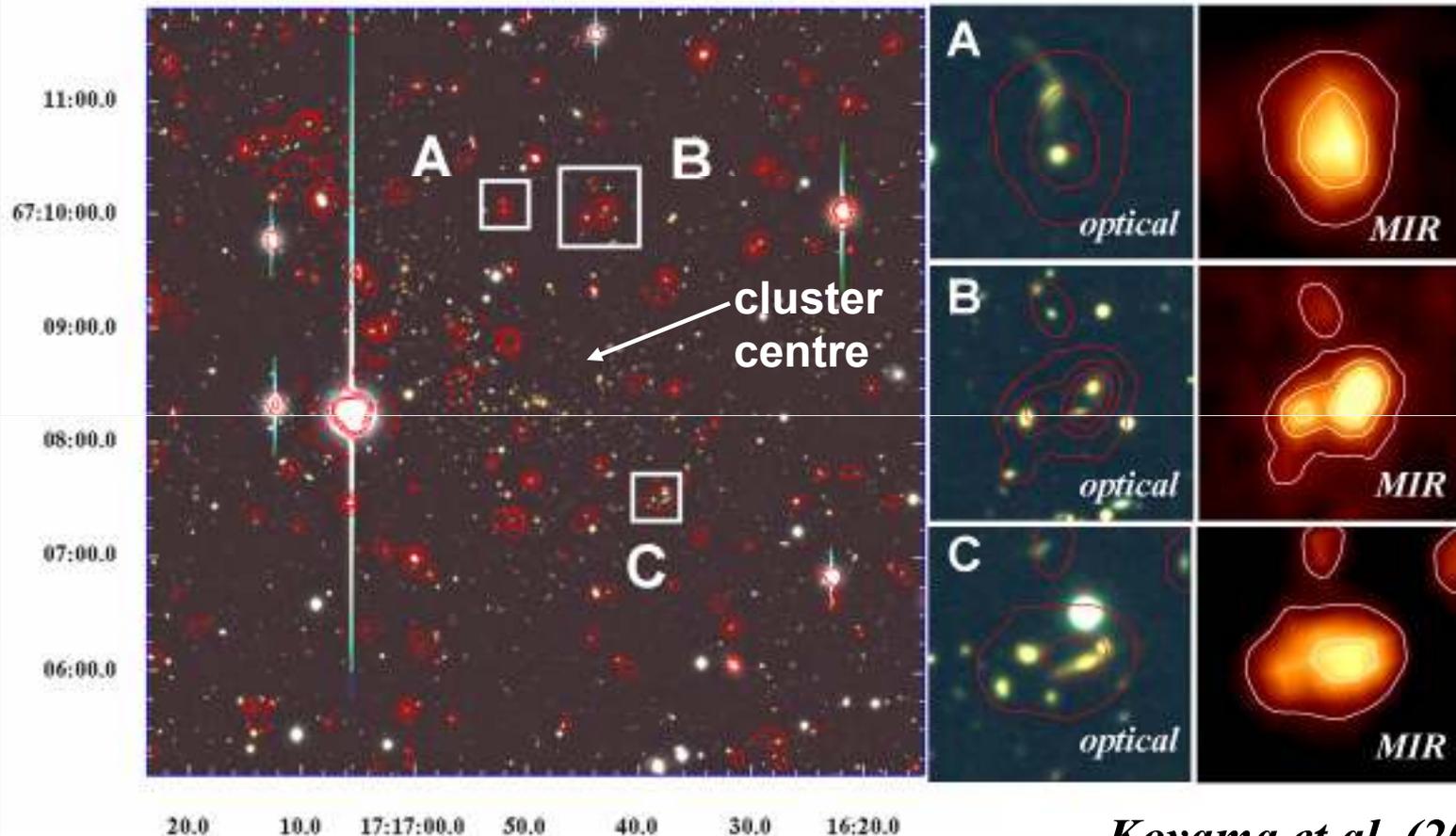
H α + MIR mapping of RXJ1716 cluster (z=0.8)

ダスティー銀河の存在も無視できない。SPICAとのコラボレーション重要！



広視野 AO の魅力

Image: Subaru optical / Contour: AKARI MIR



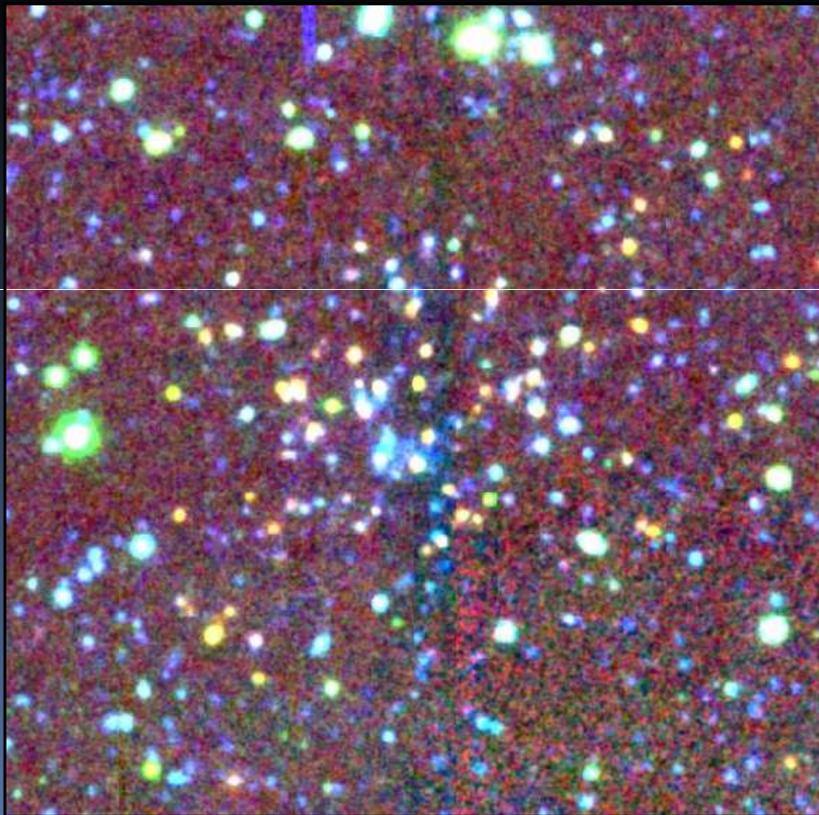
Koyama et al. (2008)

中間赤外で輝くような銀河はすべて合体/相互作用銀河なのか？
z~1 の銀河群レベルまで詳細に銀河の形態調査がしたい

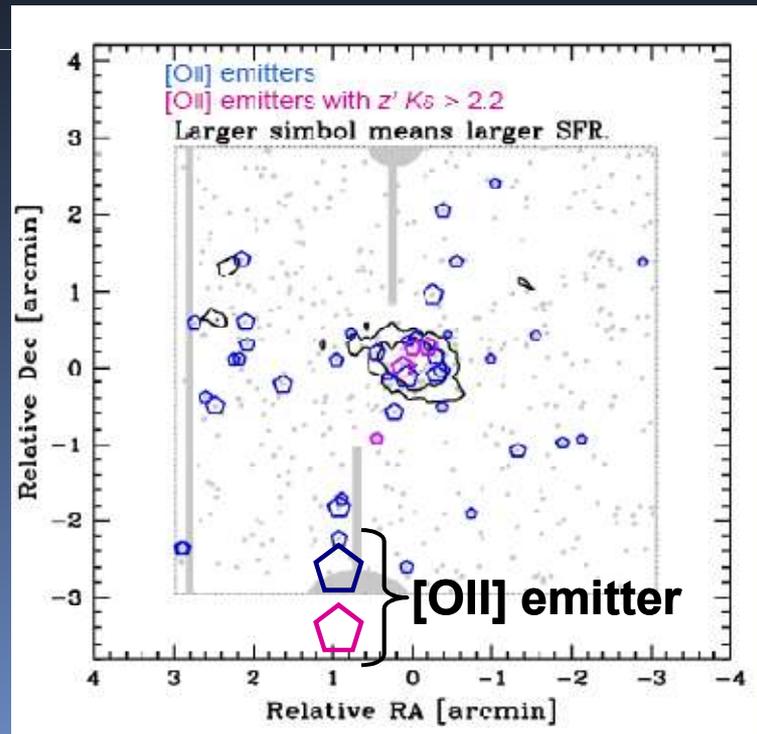
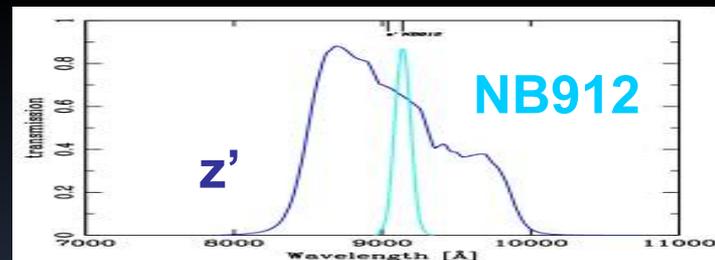
$z \sim 1.5$ 銀河団における星形成活動

XCS2215 (X線最遠方銀河団, $z=1.46$) の [OII] 輝線サーベイ。

[OII] 輝線銀河が銀河団の中心近くにも多く存在

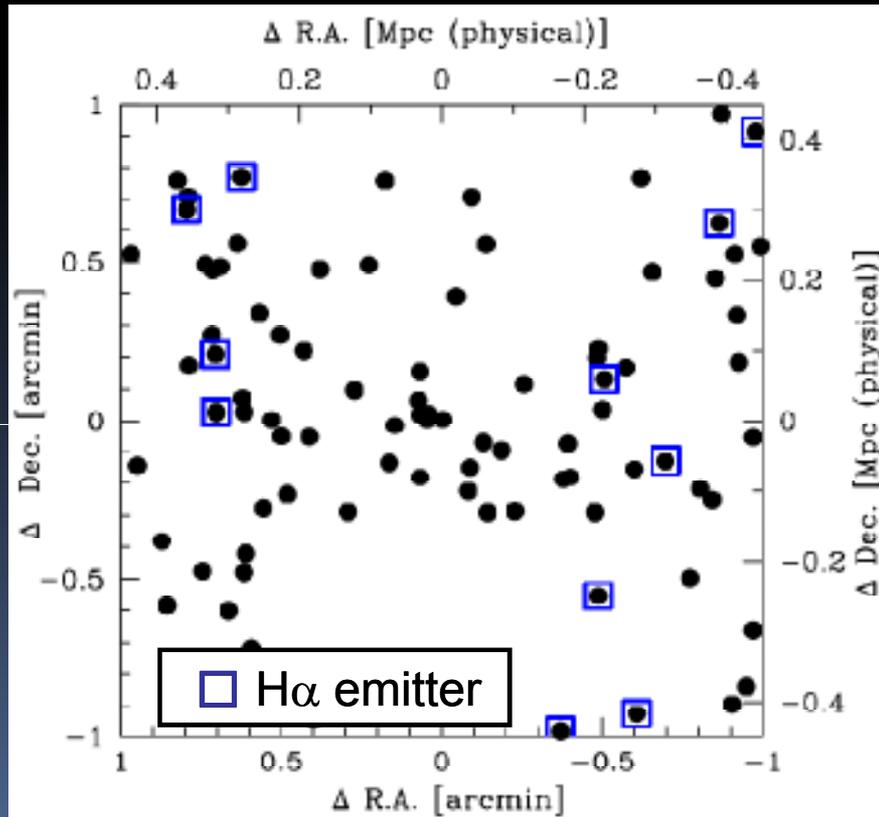


(Hayashi et al. 2009)



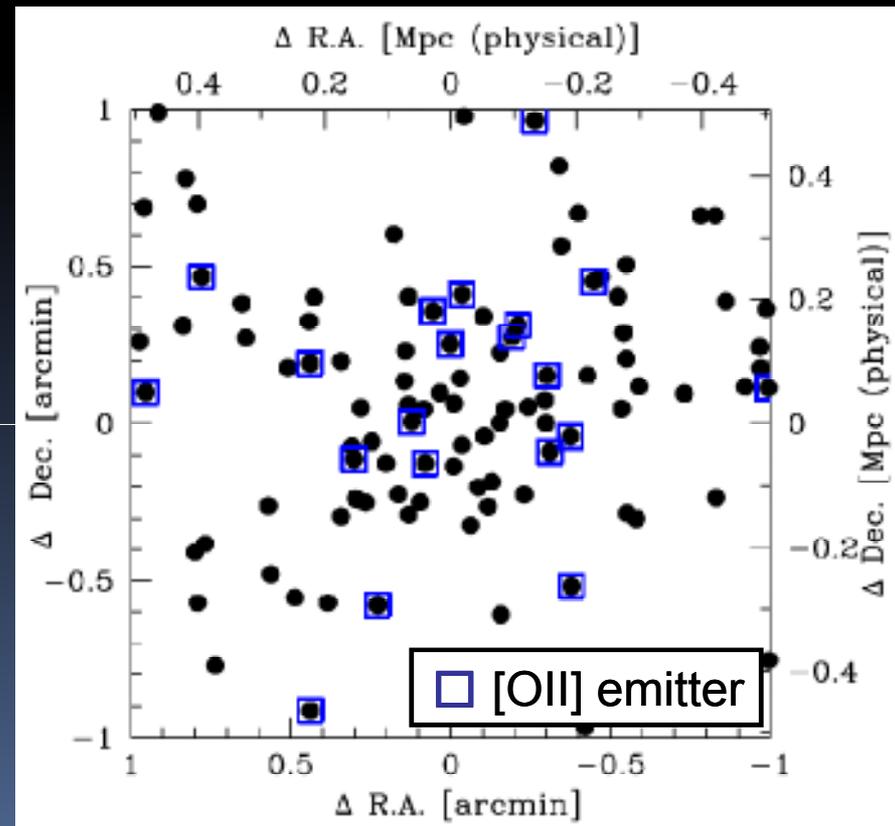
$z \sim 1 - 2$ は銀河団形成の重要な時期か？

$H\alpha$ emitters at $z=0.81$ (RXJ1716)



Koyama et al. (2009)

[OII] emitters at $z=1.46$ (XCS2215)



Hayashi et al. (2009)

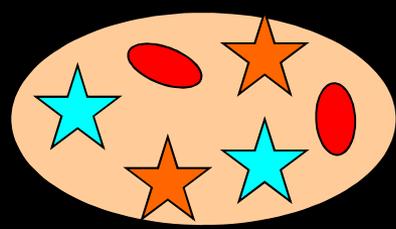
Propagation of SF site? (cluster core at $z=1.5 \rightarrow$ outskirts at $z=0.8$)
 $z > 1$ 銀河団も $H\alpha$ 輝線での調査が必須。

● : passive red galaxy

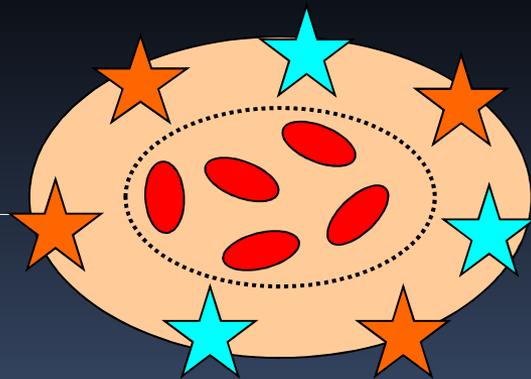
★ : normal SF galaxy

★ : dusty starburst

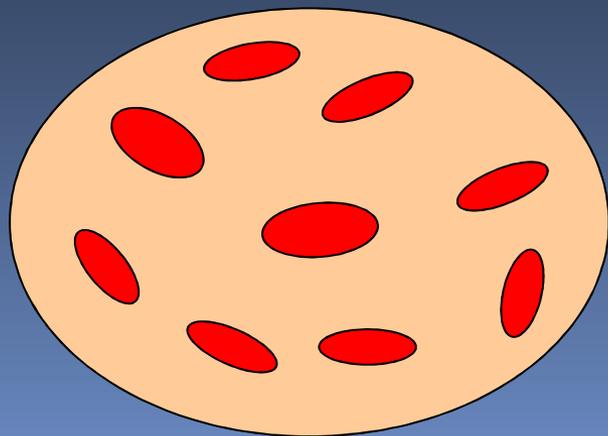
z=1.5



z=0.8



z=0



銀河団進化のイメージ (予想)

まとめ：TAOへの期待 ($z < 2$ の銀河団研究)

- ・ H α 輝線に基づく $0.5 < z < 2.0$ の大規模構造に沿った銀河団・銀河群の星形成活動探査をしたい。
- ・ NBで銀河団とその周辺のH α 輝線銀河を一網打尽にする。チューナブルフィルターがあれば断然パワフル。
- ・ 隠された星形成活動を見落とさない対策 → SPICA 連携
- ・ 広視野AOの威力を存分に使って形態の進化を見たい。

TAO近赤外線装置ワークショップ (IoA, Univ of Tokyo, 11/09/2009)

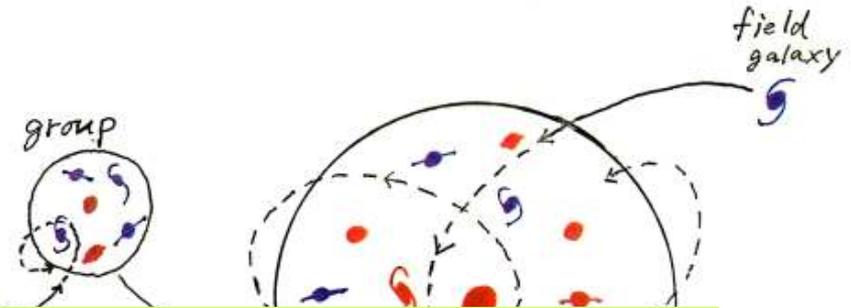
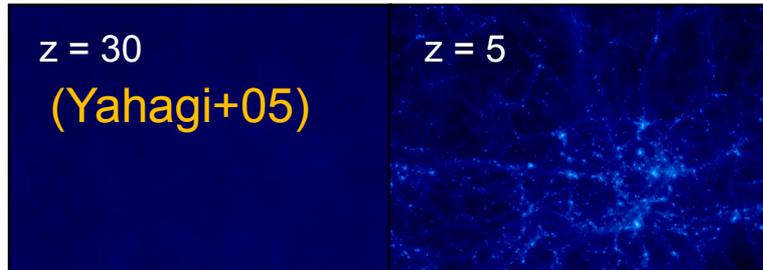
TAO近赤外装置による原始銀河団研究



Tadayuki Kodama (NAOJ),
Yusei Koyama (U.Tokyo), Masao Hayashi (U.Tokyo),
Kenichi Tadaki (U.Tokyo), Ichi Tanaka (Subaru), et al.

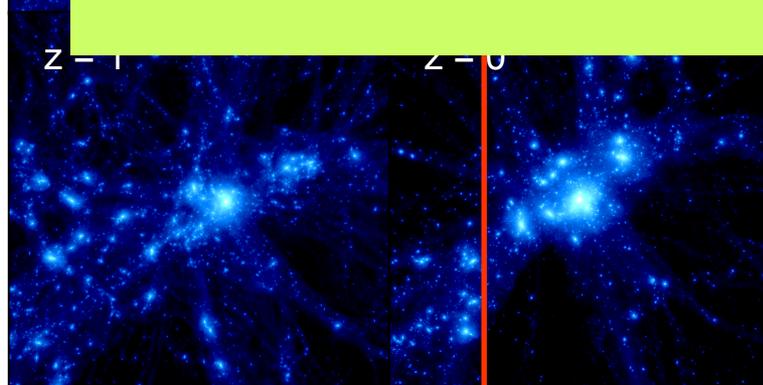
Origin of Environmental Dependence

N-body simulation of a massive cluster



★ **Optical Survey with S-Cam ($0.4 < z < 1.5$):**
Kodama+, Tanaka+, Koyama+ Hayashi+, PISCES team

★ **NIR survey with MOIRCS ($1.5 < z < 5.2$):**
Kodama+ Kajisawa+, HzRG team (Subaru+ESO)



$M = 6 \times 10^{14} M_{\odot}$ $20 \times 20 \text{ Mpc}^2$ (co-moving)

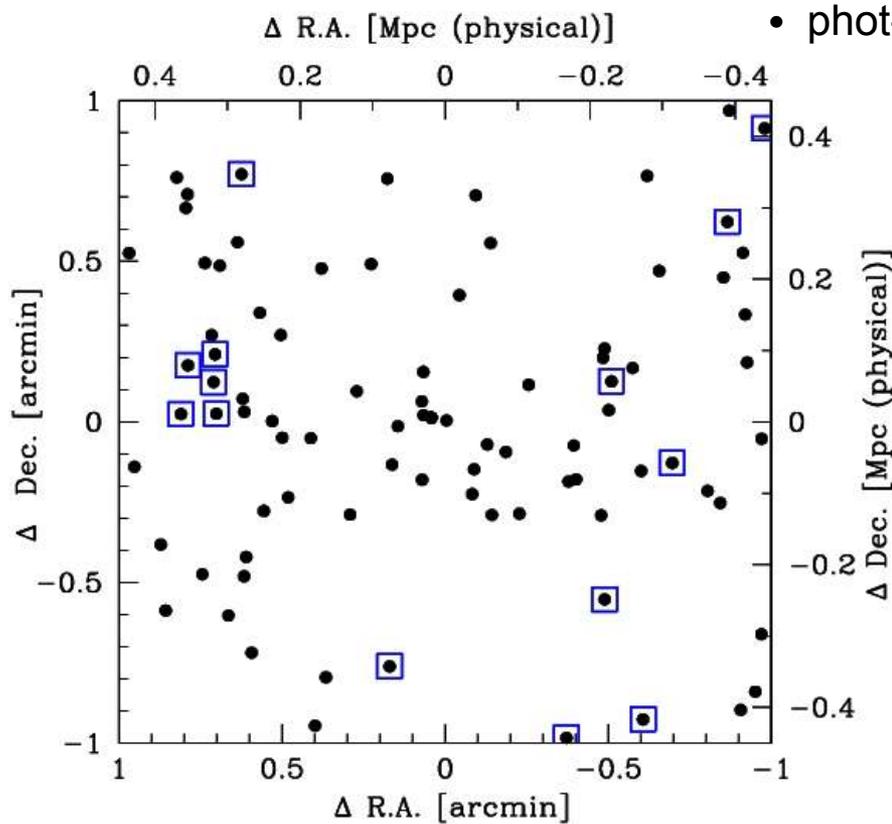
...s it becomes more important at high- z .

Nurture? (external)

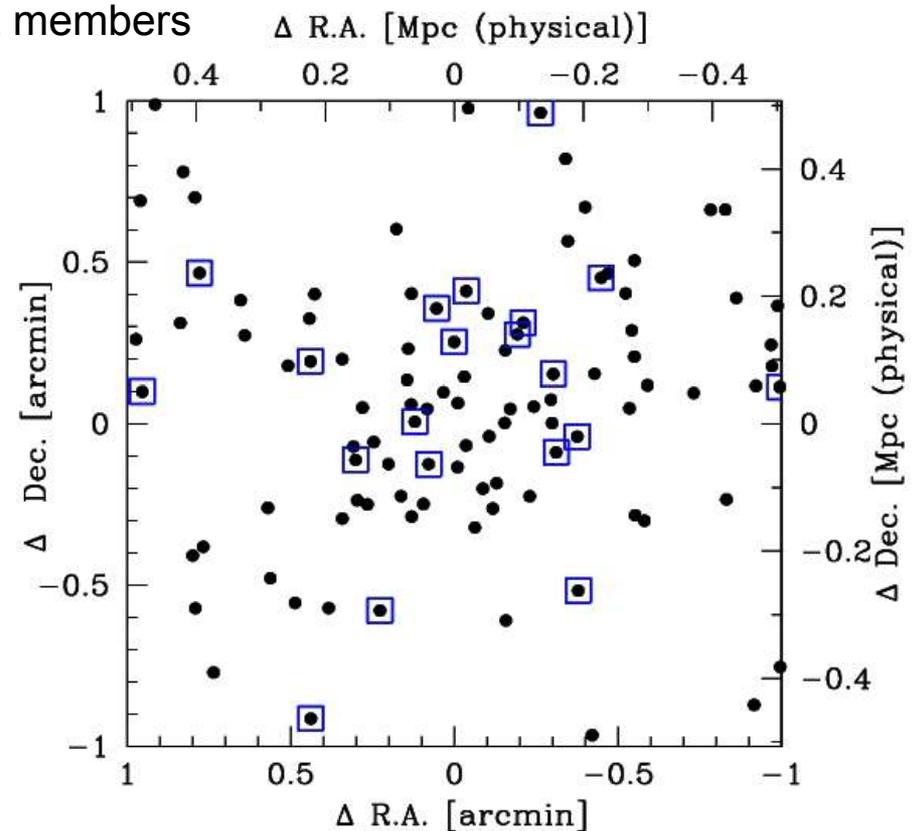
Need to go outer infall regions to see directly what's happening there.

Star forming activity in the cluster cores

□ $H\alpha$ emitters at $z=0.81$ (RXJ1716) □ $[OII]$ emitters at $z=1.46$ (XCS2215)



Koyama, TK, et al. (2009)



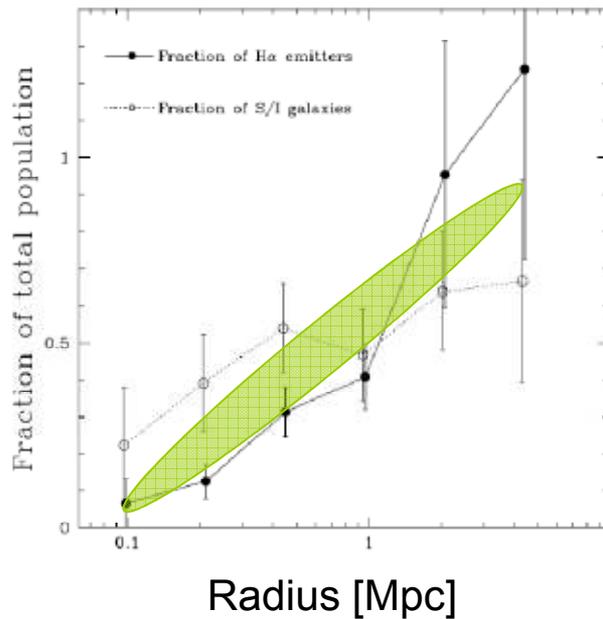
Hayashi, TK, et al. (2009)

Inside-out propagation of star forming activity in cluster cores !?

中心から外側へ星形成活動・減衰が移行する？

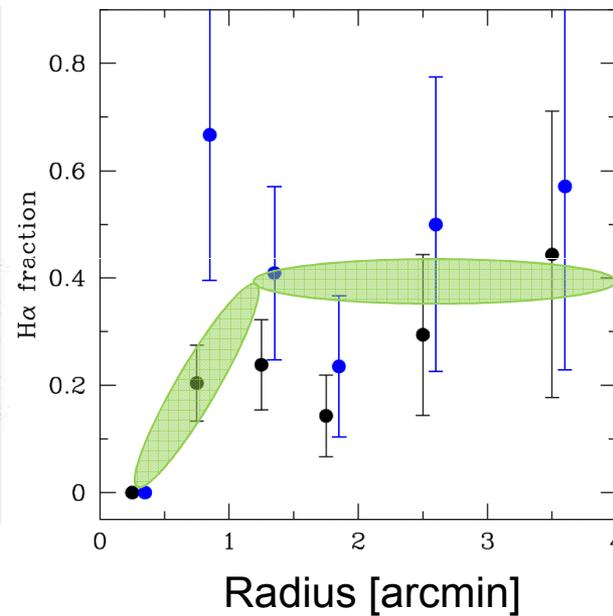
Galaxy formation bias & External environmental effects (mergers?)

H α @ z=0.4



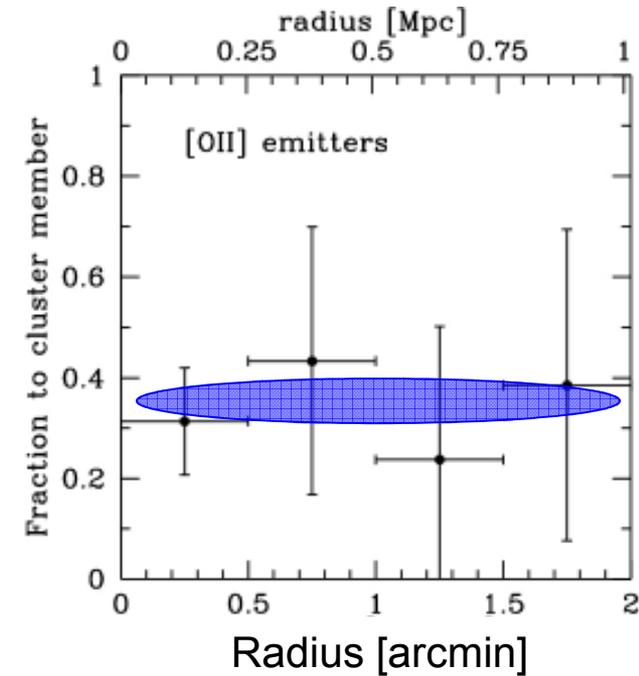
(Kodama+ 04)

H α @ z=0.8



(Koyama+ 09)

[OII] @ z=1.5



(Hayashi+ 09)

より遠方の原始銀河団で、**星形成中の活動的銀河**と**星形成を終えた受動的銀河**の両方をとらえて、それら空間分布の比較とその進化を調べることが重要！

High redshift(z) Radio Galaxies [HzRG] with Subaru, VLT, and Spitzer

7 confirmed proto-clusters at $2 < z < 5.2$ associated to radio galaxies

Overdense regions in Lyman- α emitters by a factor of 3—5.

Name	redshift	NIR	Spitzer	Lya	spectra	others
PKS 1138-262	2.16	JHKs	3.6--8.0	16	NIR/Opt	Ha, VLA, Chandra, SCUBA
4C 23.56	2.48	JHKs	3.6--8.0		NIR	Ha
USS 1558-003	2.53	JHKs	3.6--8.0			
USS 0943-242	2.92	JHKs	3.6--24.0	29	Opt	
MRC 0316-257	3.13	JHKs	3.6--8.0	32	NIR	
TNJ 1338-1942	4.11	JHKs	3.6--8.0	37		Suprime-Cam, VLA, MAMBO
TNJ 0924-2201	5.19	JHKs	3.6--24.0	6		Suprime-Cam/ACS (LBGs)

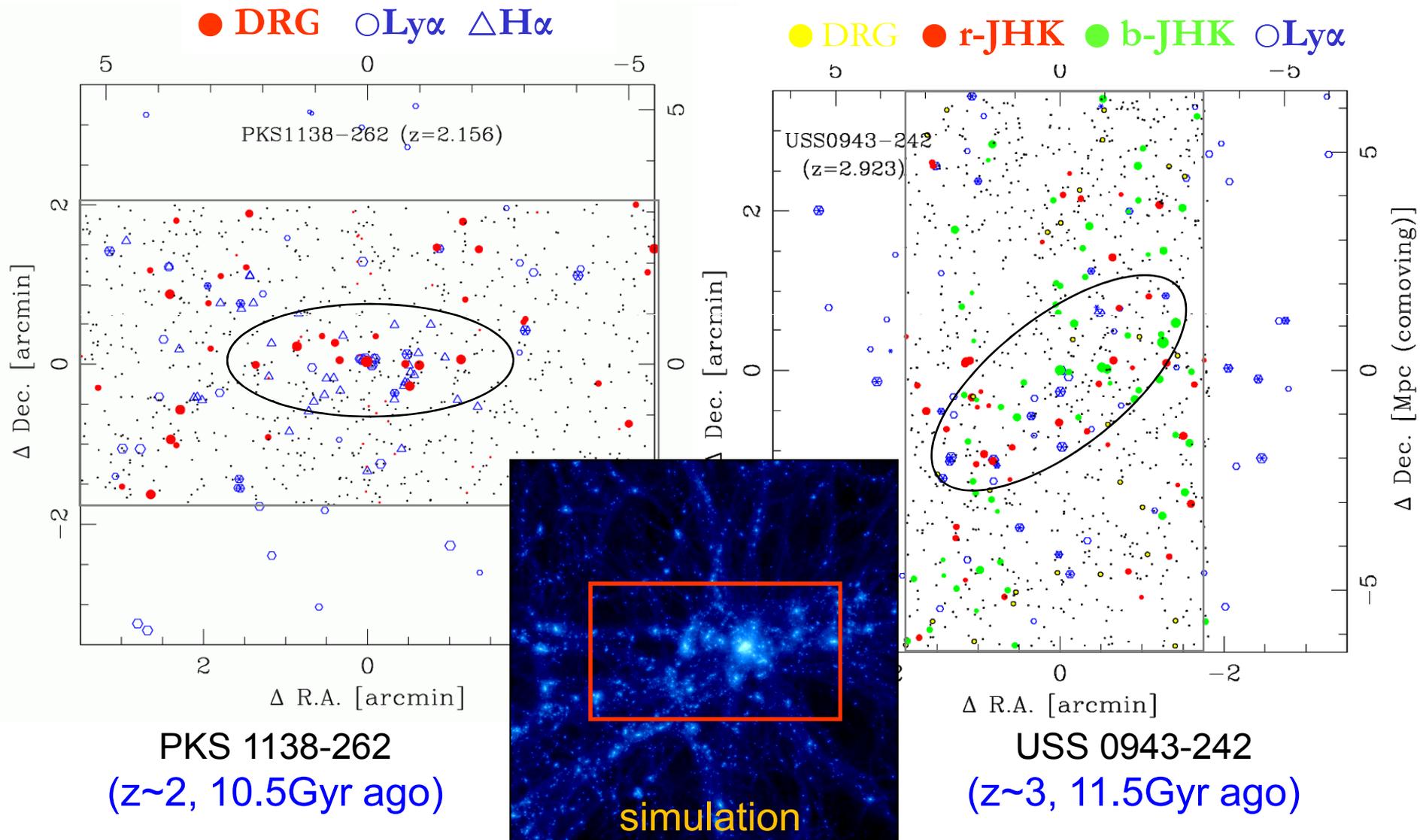
using MOIRCS/Subaru and Hawk-I/VLT

Kodama et al. (2007), De Breuck et al. (Spitzer HzRGs)

今後VISTAサーベイによって、大量の原始銀河団候補(100-1000)が見つかってくる。
すばるでもそう簡単でない深さ(J~24,H~23,K~22)で、系統的な観測はなかなか大変。

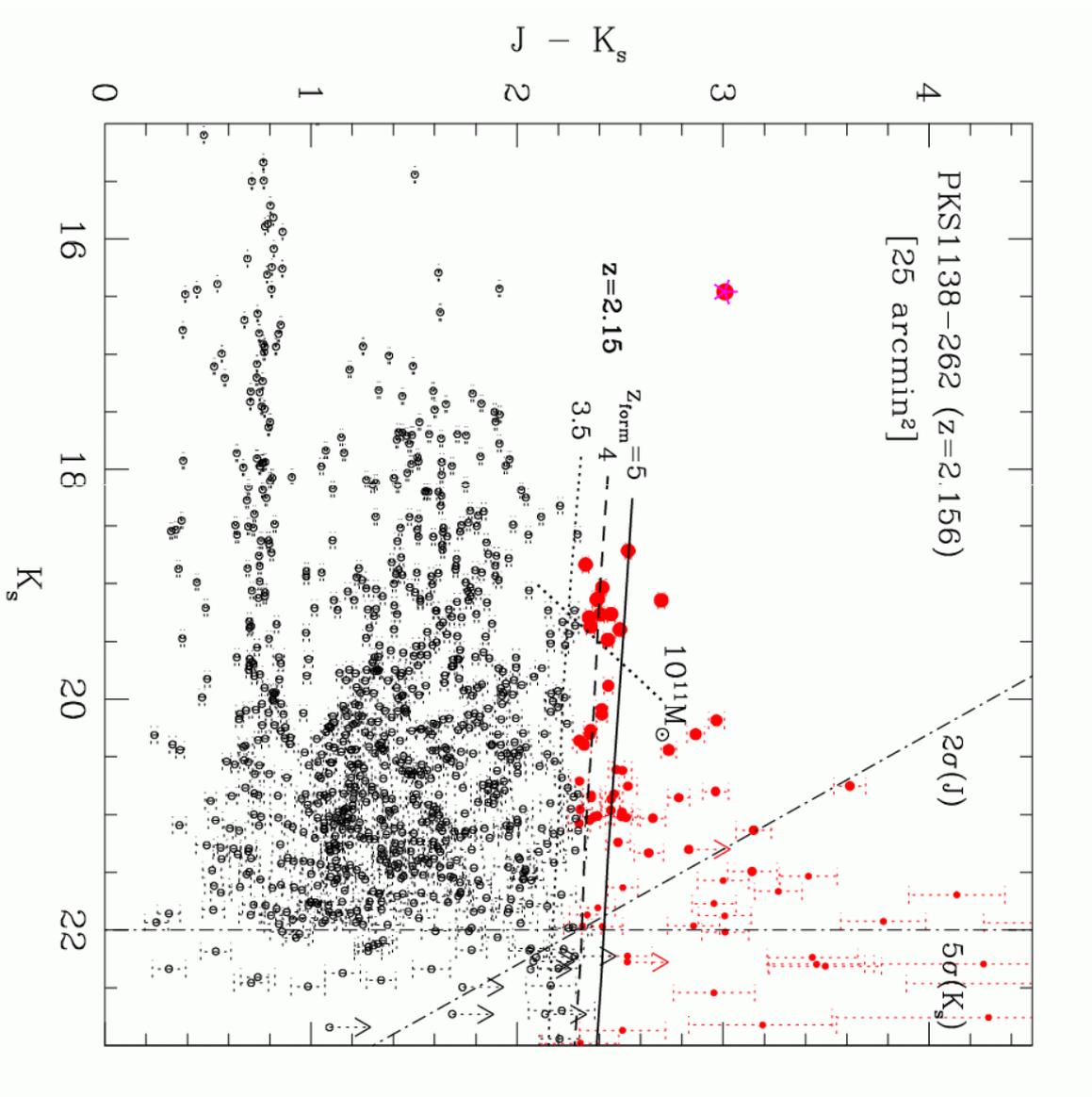
Structures in proto-clusters

Spatial distribution of NIR-selected member candidates and emitters
Kodama, et al. (2007)



赤い銀河

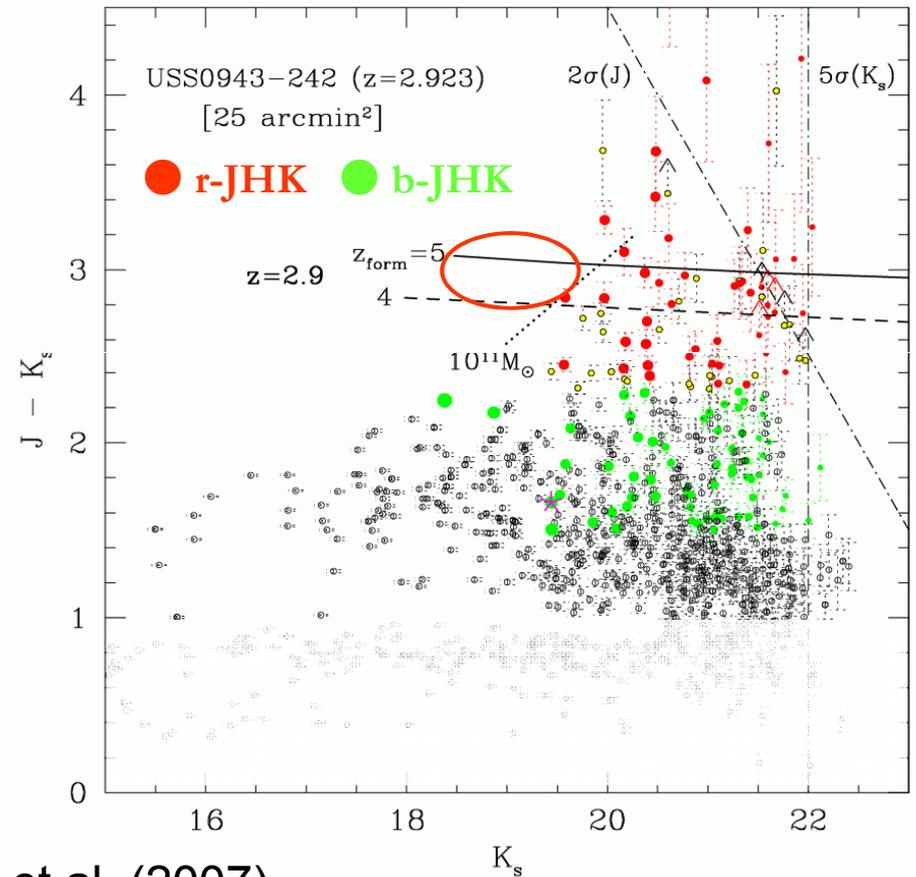
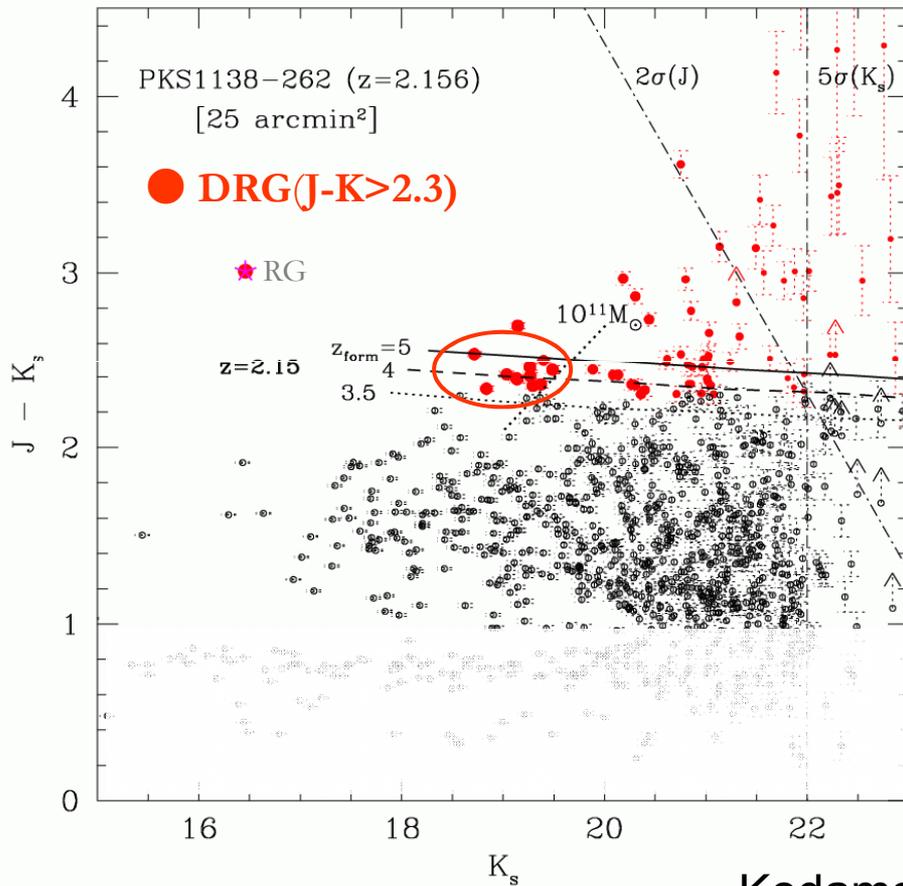
“Red Sequence” of galaxies



Emergence of the red-sequence at $z \sim 2$ in proto-clusters?

$z \sim 2$ (PKS1138)

$z \sim 3$ (USS0943)



Kodama et al. (2007)

The red sequence seems to be emerging between $z=3$ and 2 ($2 < T_{\text{univ}}[\text{Gyr}] < 3$).

Spectroscopic follow-up “*still*” in progress...

Incredibly unlucky with weather so far!
(10 out of 13 Subaru nights were clouded out !)
Nevertheless...

➤ Subaru/MOIRCS (NIR, ~30 slits over $7' \times 4'$, $R=1300$, 5 hrs)

3 H α emitters (members) are detected around 4C23.56 ($z=2.483$)

2 H α emitters (members) are detected around PKS1138 ($z=2.156$)

➤ Subaru/FOCAS (optical, ~30 slits over $6'_{\phi}$, $R=1000$, 5 hrs)

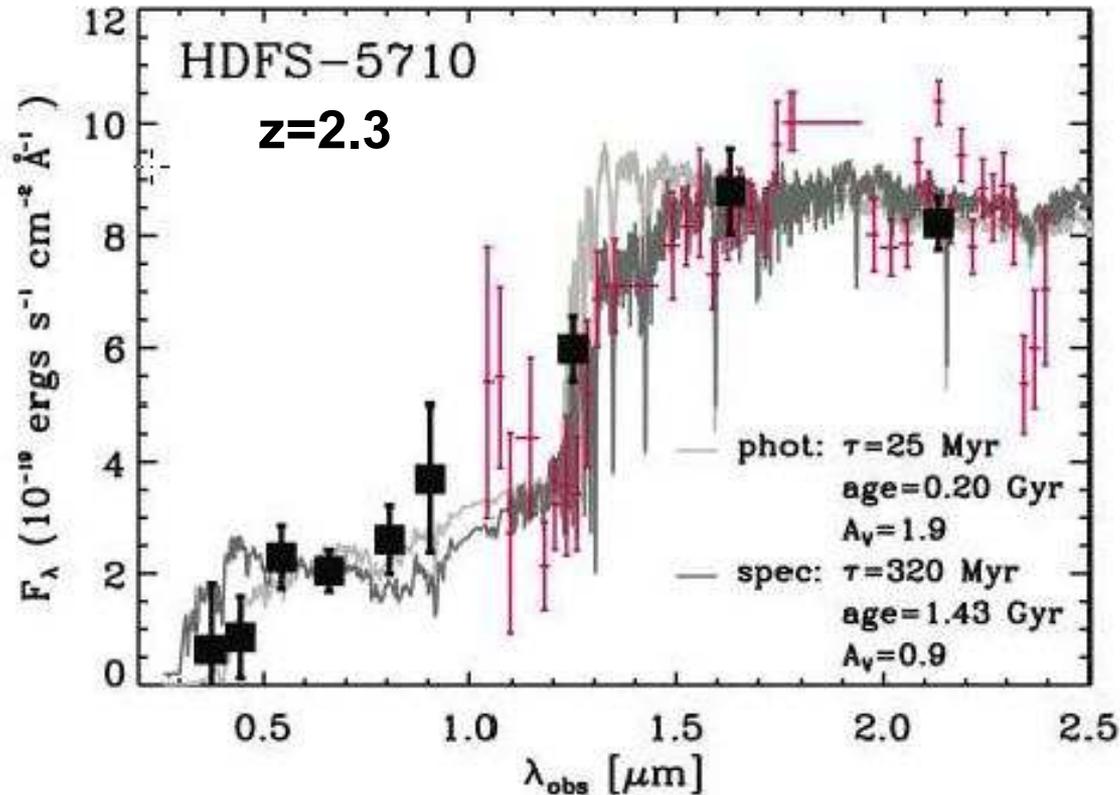
6 redshifts (Ly α +) are measured for USS0943 ($z=2.923$),
of which 2 are members (LAE, b-JHK), while the others are still
within $2.4 < z < 3.1$, consistent with our b-JHK selection.

➤ VLT/FORS2 (optical, ~30 slits over $7' \times 7'$, $R=1000$, 5 hrs)

11 redshifts (Ly α +) are measured for USS0943 ($z=2.923$),
of which 2 are members, while 4 out of 9 others are still
within $2.4 < z < 3.1$, consistent with our JHK selection.

We don't see many strong emissions... Need to search for continuum break and/or absorption lines.

Ultra-Deep Continuum Spectrum of a DRG



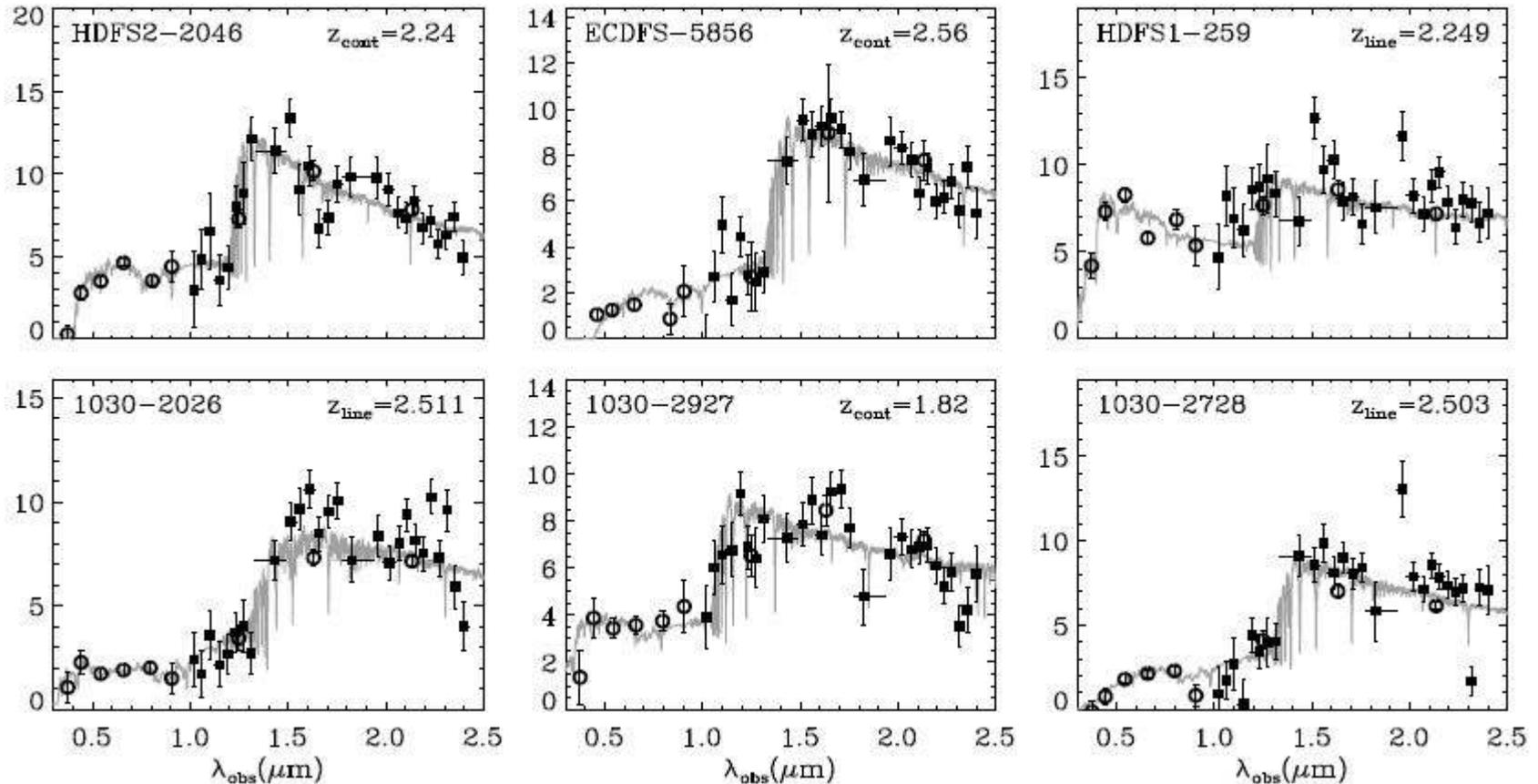
Kriek et al. (2008)

GNIRS on Gemini-S, R=1000, 20-30hrs?

これが限度！

Continuum (Balmer/4000Åbreak) redshifts for DRG

Kriek et al. (2008)



MUSYC survey, $K < 19.7$ GNIRS on Gemini-S, $R=1000$, 2-3hrs each

$R=1000$ のデータを $R=40-50$ になまらしてSEDを得、ブレイクの位置から z を決める。
遠方($z > 1.5$)の赤い銀河の z を決めるのに有効な方法。 $\Delta z / (1+z) < 0.019$ ($\sim 6000 \text{ km/s}$)

NEWFIRM Medium-Band Survey (Kitt Peak 4m, 27.6' × 27.6')

van Dokkum et al. (2009), arXiv:0901.0551

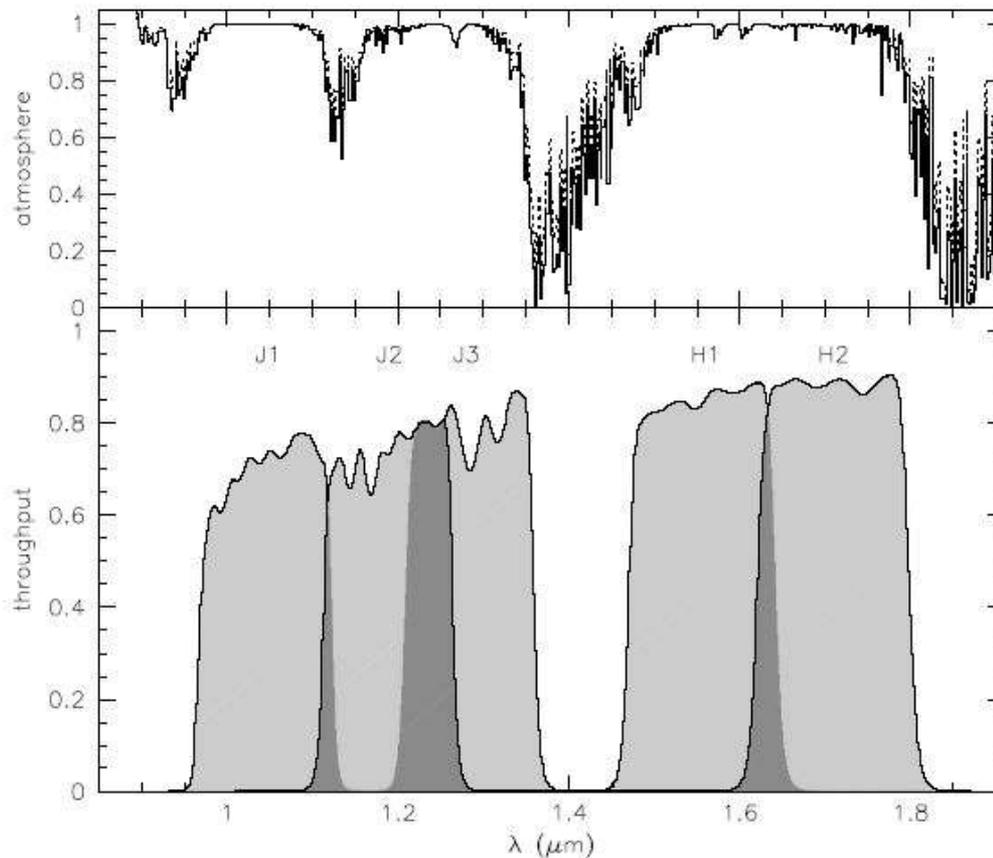


Fig. 1.— Medium-bandwidth filters designed for NEWFIRM and used in the NMBS. The throughput of the filters ranges from $\approx 70\%$ for J_1 to $\approx 90\%$ for H_2 (excluding effects of the atmosphere). The top panel shows the atmospheric transmission spectrum, for two different water columns: the broken line is for a column of 1.6 mm and the solid line is for 3.0 mm.

Medium-band redshifts

● NEWFIRM medium-band data

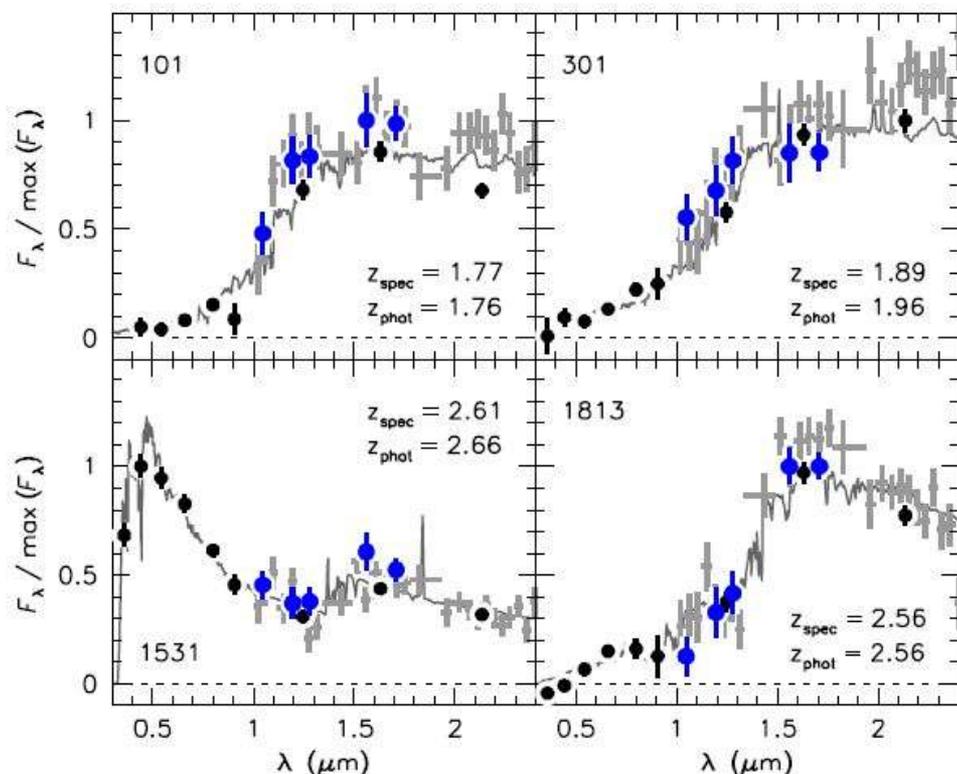


Fig. 2.— Spectral energy distributions from 0.3–2.4 μm of the four galaxies in the SDSS 1030 Kriek et al. (2008) set the highest S/N ratio. Black points are broad band photometric data, blue points are the new medium band data. The med data are able to pinpoint the location of rest-frame optical breaks in the spectra. Dark grey spectra are the best-fit EAZ SEDs. Light grey points are binned near-IR spectra obtained with GNIRS on Gemini, from Kriek et al. The best-fit model the (independent!) GNIRS spectra very well.

$\Delta z/(1+z) \sim 0.06$ を達成

van Dokkum et al. (2009), arXiv:0901.0551

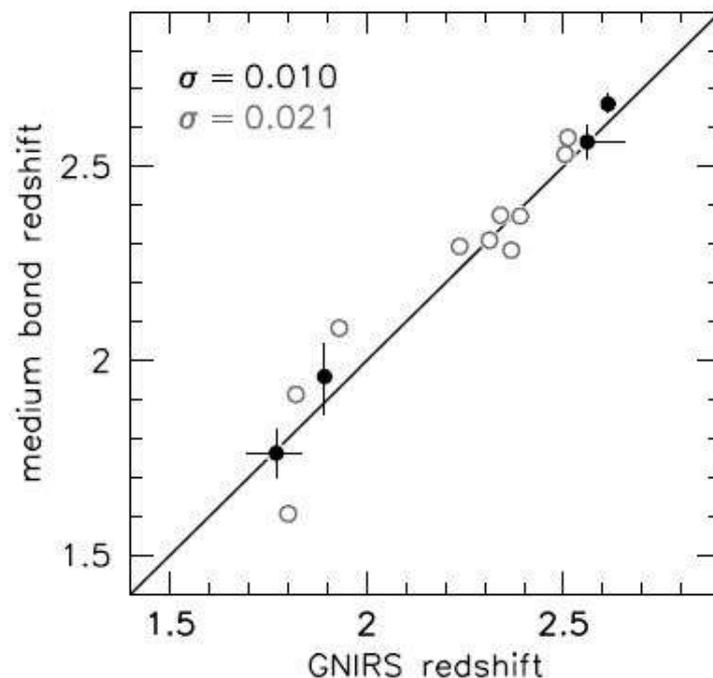
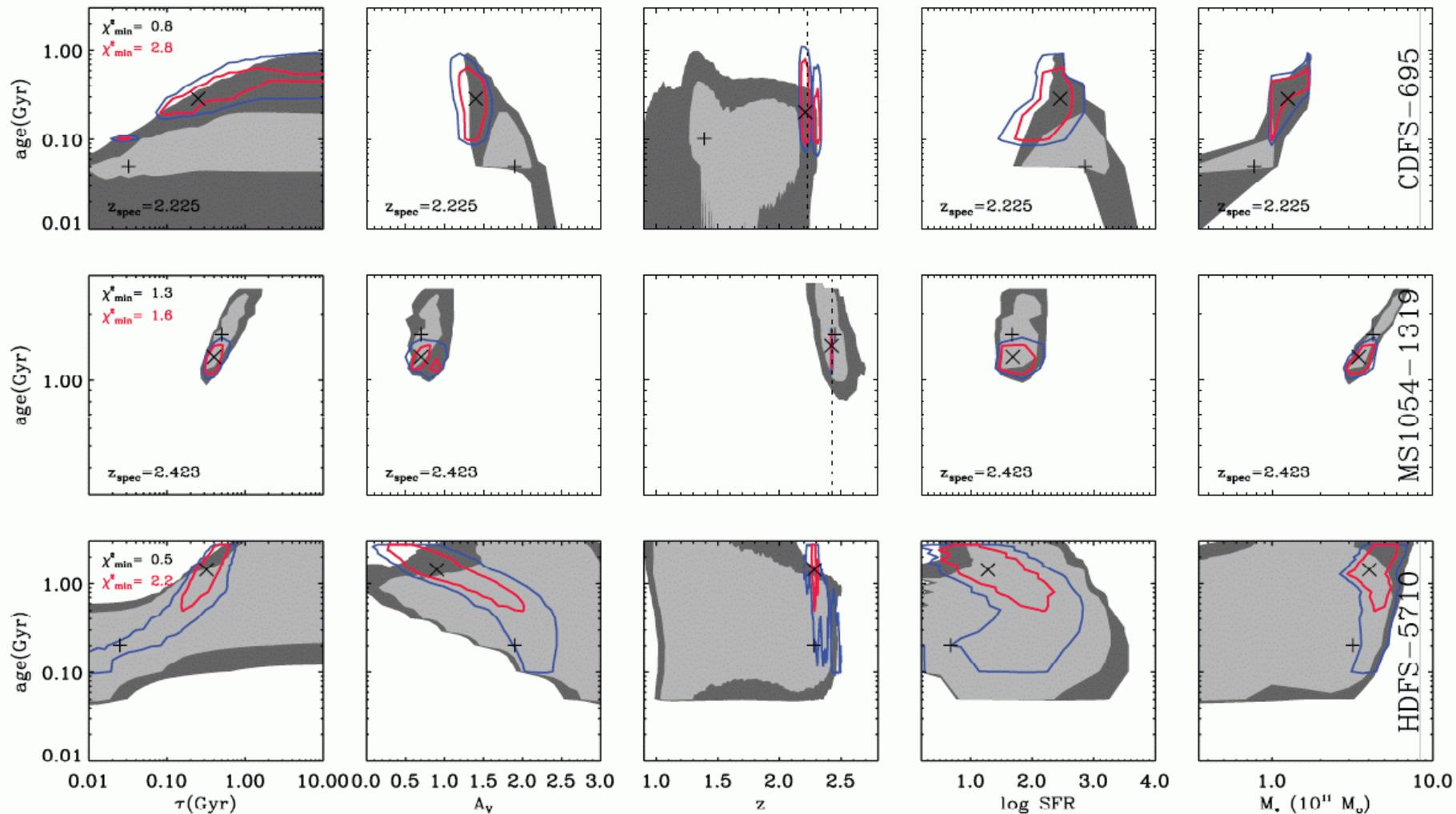


Fig. 3.— Comparison of photometric redshifts derived from medium band photometry to spectroscopic redshifts measured with the GNIRS near-IR spectrograph on Gemini for the four galaxies shown in Fig. 2 (solid symbols). There is very good agreement, with scatter 0.01–0.02 in $\Delta z/(1+z)$. Open symbols show the remaining 10 objects from the Kriek et al. (2008) sample. The scatter is small even for these galaxies, even though the S/N of their medium band photometry is lower than our survey criterion.

SED fitting



Balmer/4000 Å ブレイクやMg2フィーチャーの強さから星の平均年齢が推定できる。

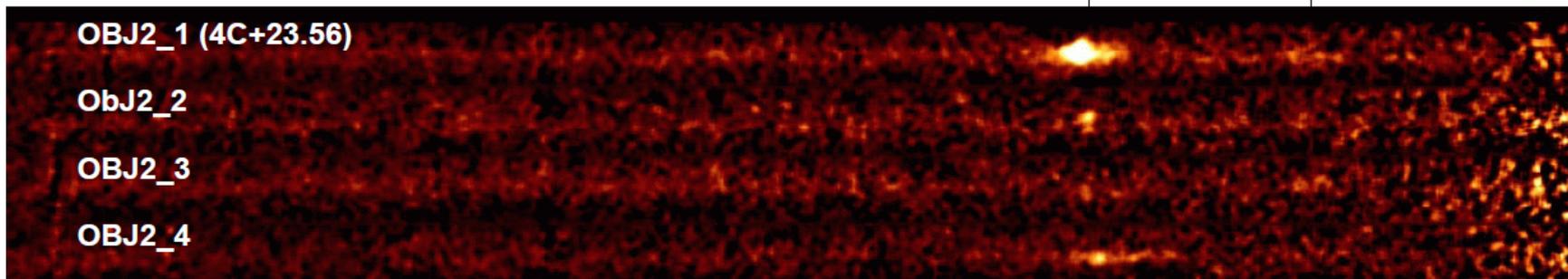
Kriek et al. (2006)

青い銀河

4C23.56 ($z=2.483$)

H α

[SII]



K-band spectra with Subaru/MOIRCS (4.7 hours, $R=1300$, $4' \times 7'$)

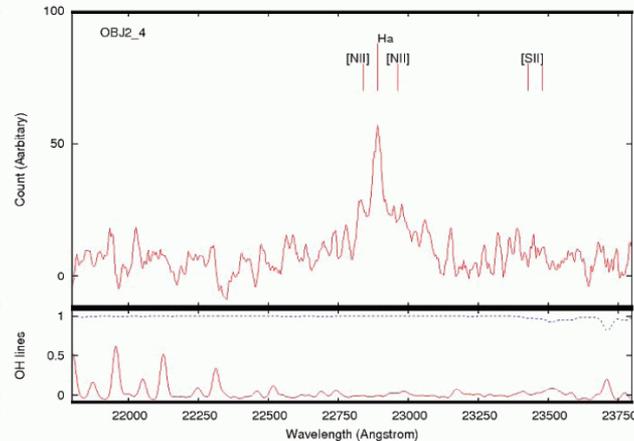
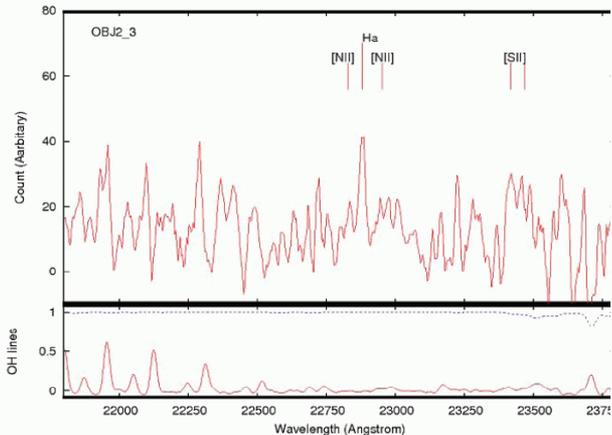
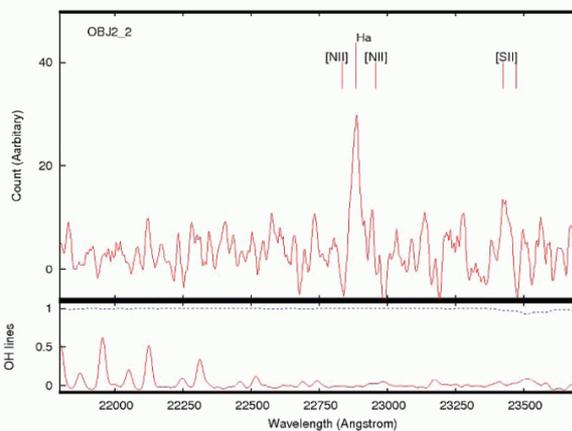
4 H α emitters including the RG.

I. Tanaka et al., in preparation

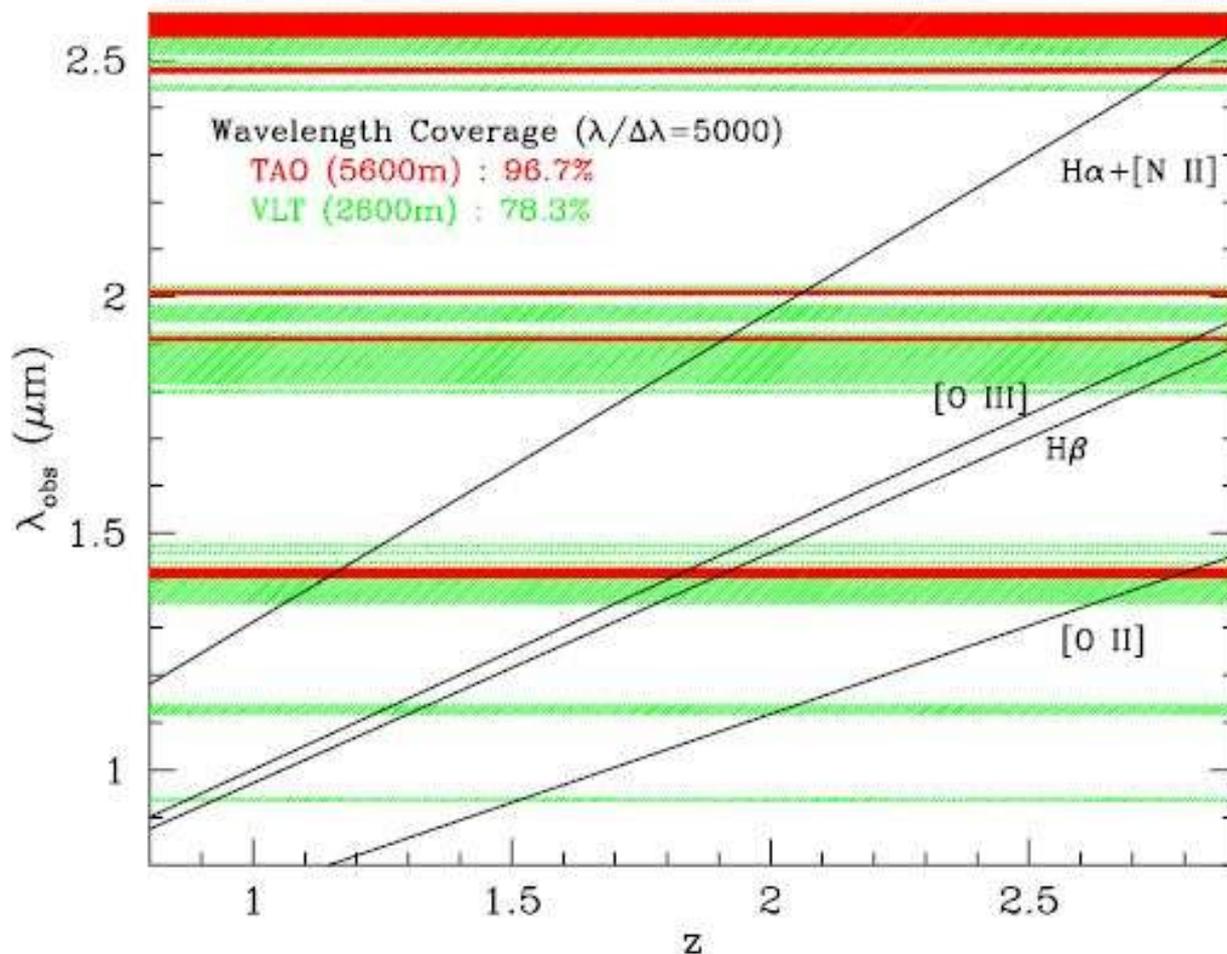
Obj2_2
 $z=2.4872$

Obj2_3
 $z=2.4865$

Obj2_4
 $z=2.4879$



TAO Window ($0.85 < \lambda [\mu\text{m}] < 2.4$)



$0.30 < z(\text{H}\alpha) < 2.65$

$0.75 < z(\text{H}\beta) < 3.94$

$1.28 < z(\text{OII}) < 5.44$

バンドギャップが小さい
ことも大きな魅力！

$0.4 < z < 4$ 銀河の星形成史/重元素量/力学質量とその環境依存性

$\delta' = 8\text{Mpc} (z=1), 10\text{Mpc} (z=1.5), 12\text{Mpc} (z=2), 14\text{Mpc} (z=2.5)$

Science with Line Emitters

* 3-D large scale structures with spec-z

* Environmental dependence of SFH

Star formation rate ($H\alpha$, [OII] emission lines)

Dust extinction ($H\alpha/H\beta$)

Gas metallicity (R23, O32, [NII]/ $H\alpha$)

AGN separation ([OIII]/ $H\beta$ vs. [NII]/ $H\alpha$)

Dynamical mass (line width)

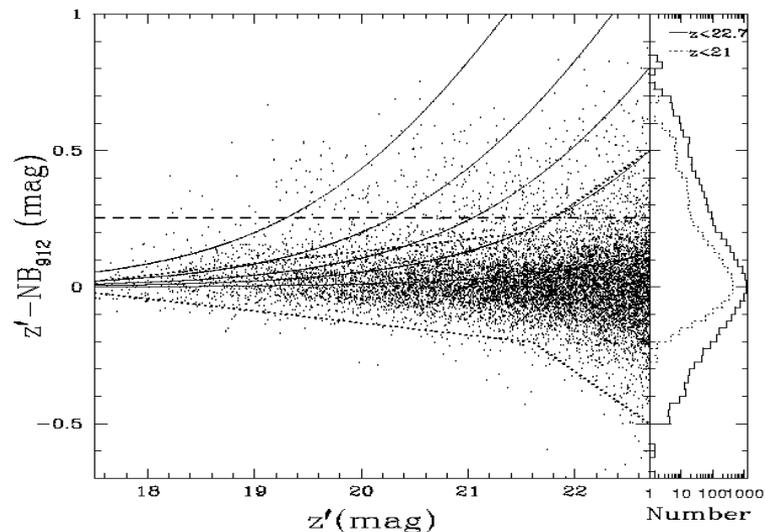
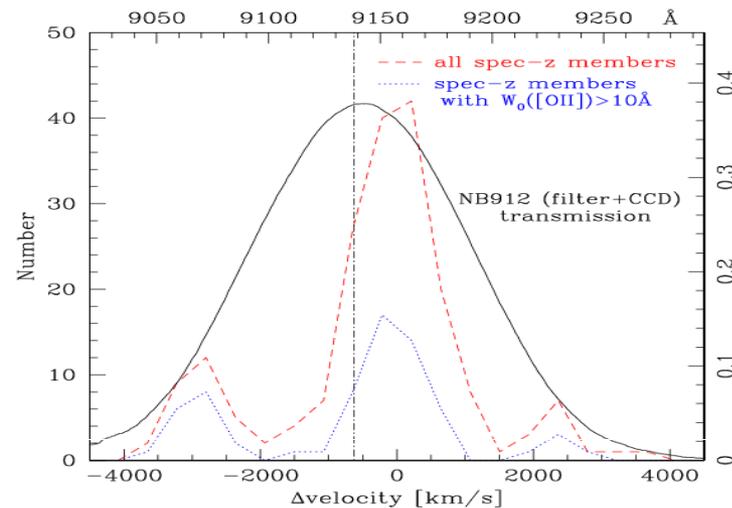
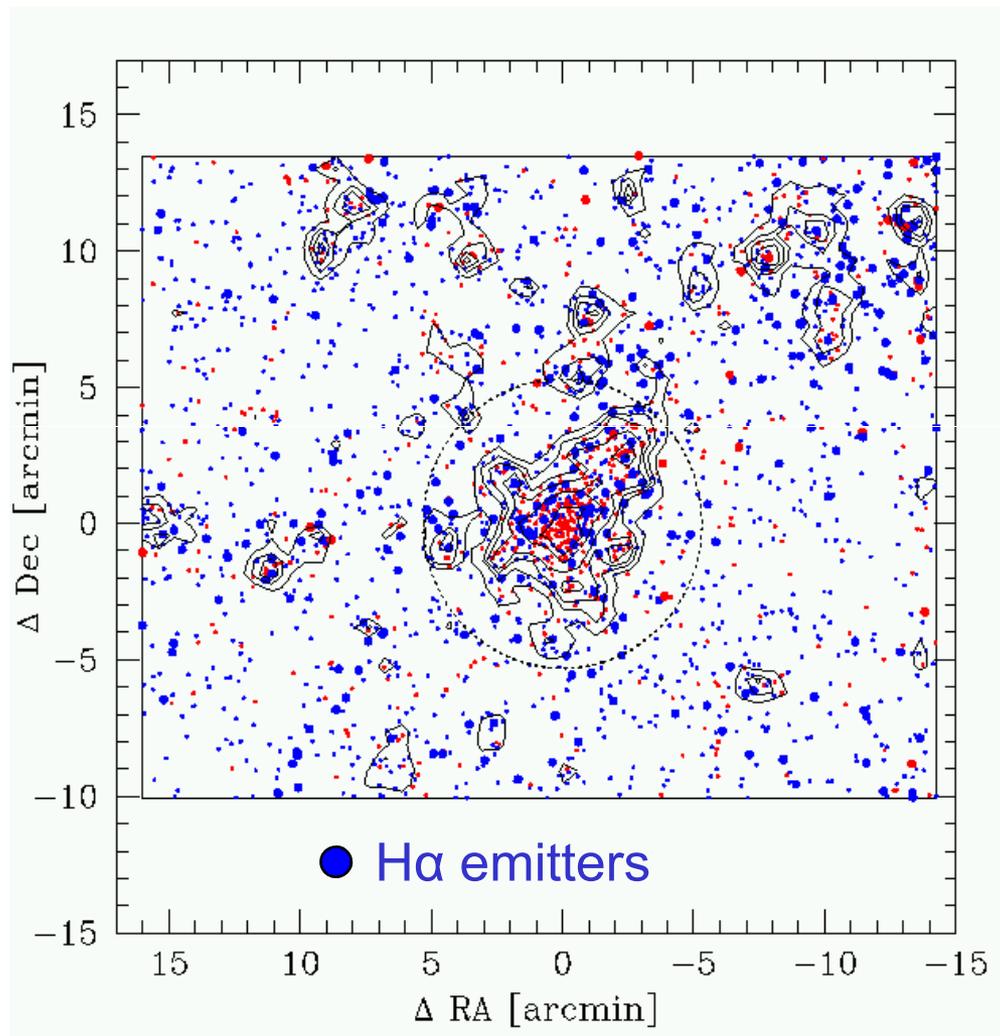
Post-starburst (composite Balmer absorption)

“When and Where do we see (post-)starbursts and truncation?”

“How much star formation is hidden in the optical (rest-UV) surveys?”

H α Mapping of CL0024 Cluster (z=0.4)

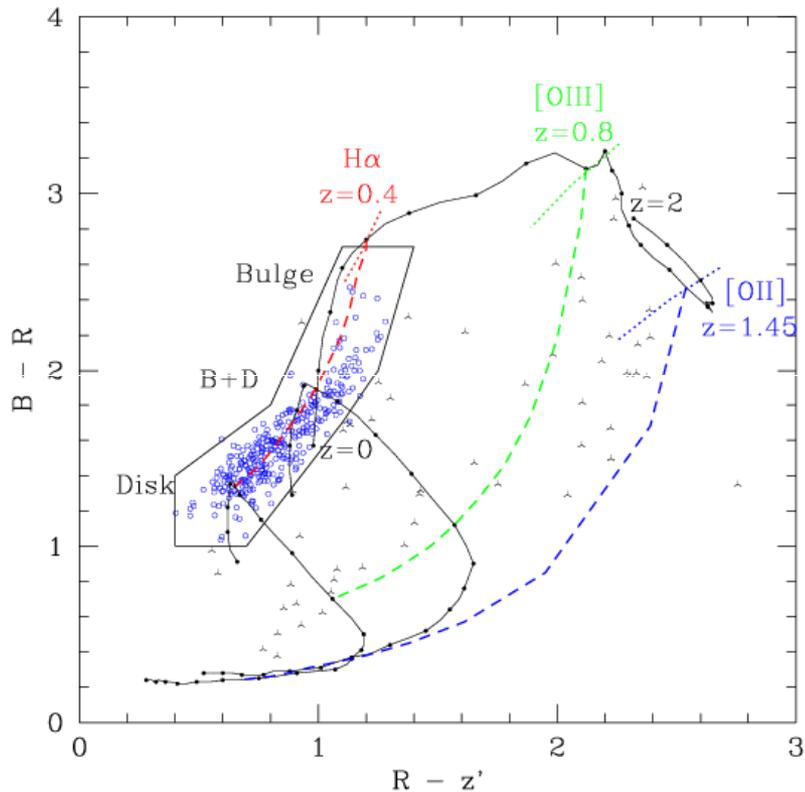
Suprime-Cam + BRz' and **NB912** (FWHM=134Å=4000km/s)



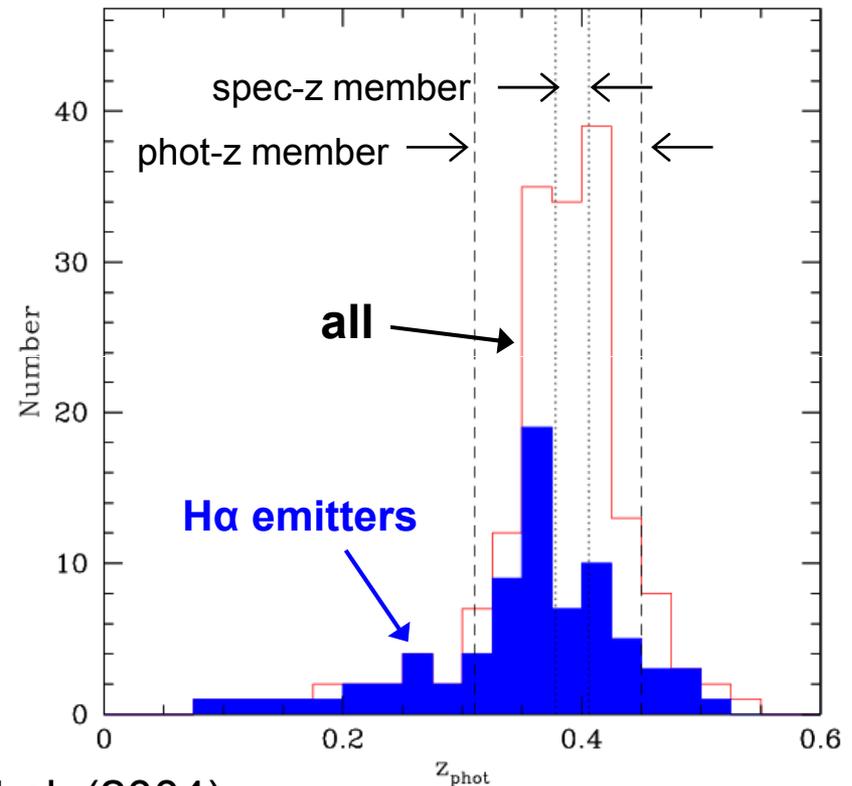
Kodama, et al. (2004)

NB輝線銀河探査の重要性

Colour selection of H α emitters



Phot-z of the H α emitters



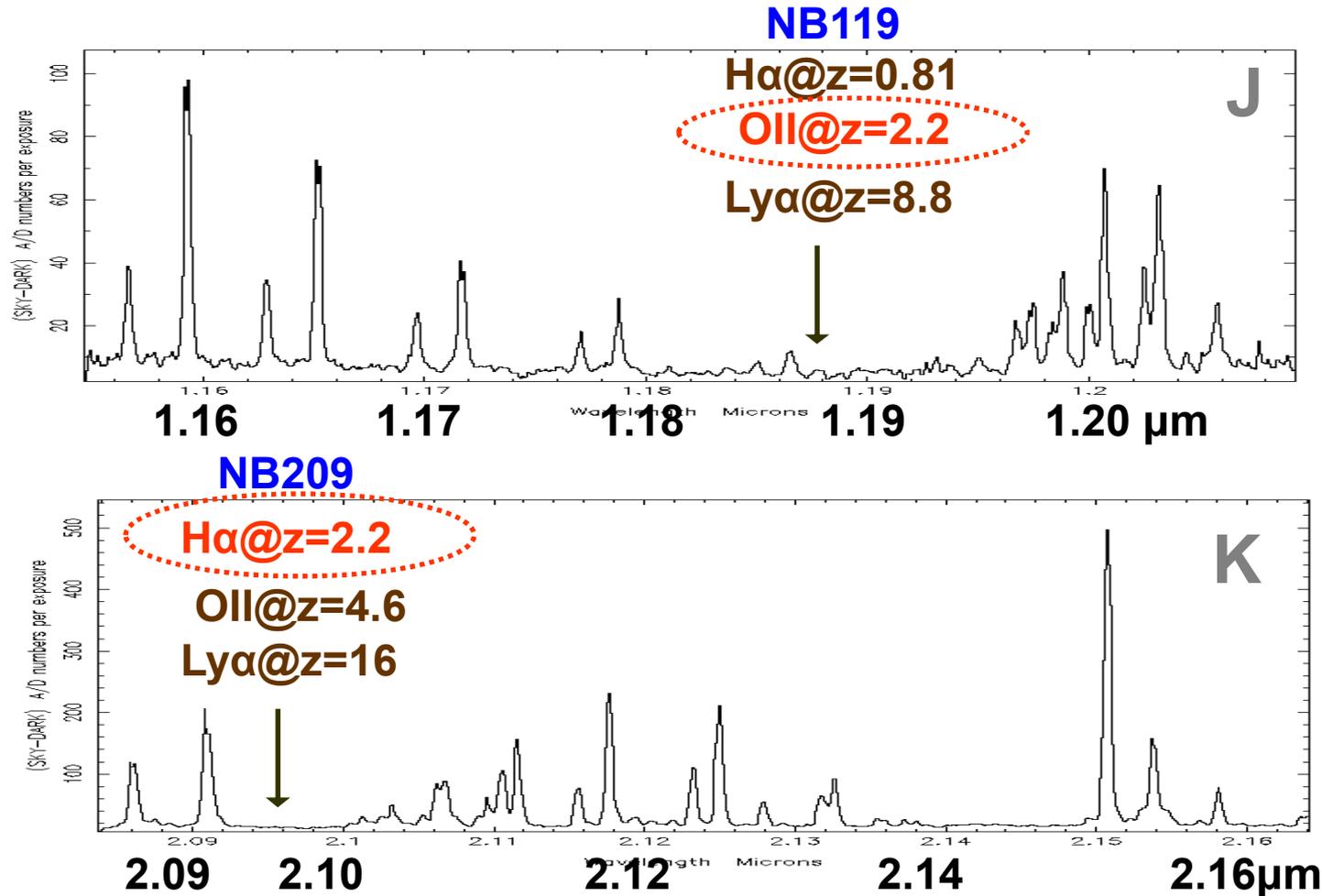
Kodama, et al. (2004)

広・中帯域撮像(passive galaxies)と狭帯域撮像(active galaxies)を組み合わせることによって、あるredshift(銀河団)にある赤く古い銀河と青い星形成銀河の両方をカバーした優れたサンプルを得ることができる！

Narrow-band emitter surveys ($H\alpha$, $H\beta$, $[OII]$) with **Suprime-Cam/MOIRCS** on Subaru

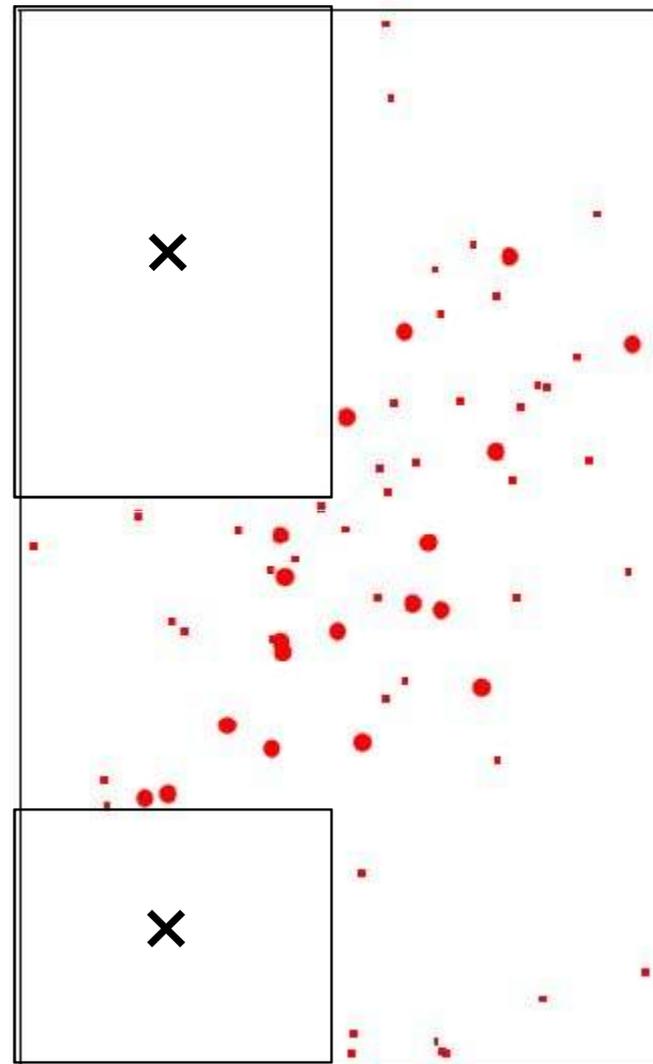
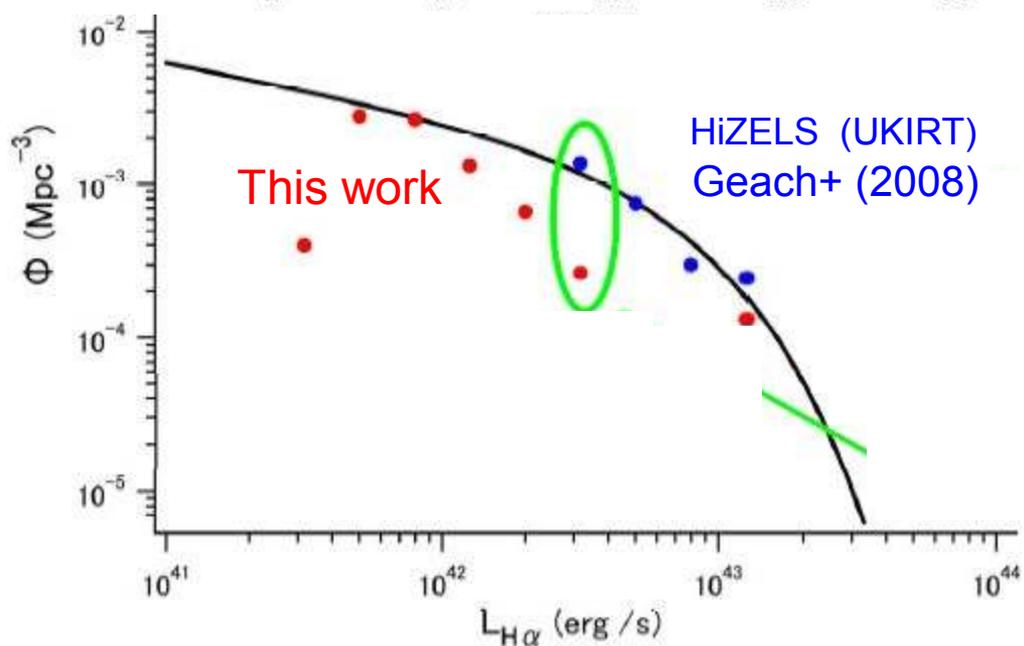
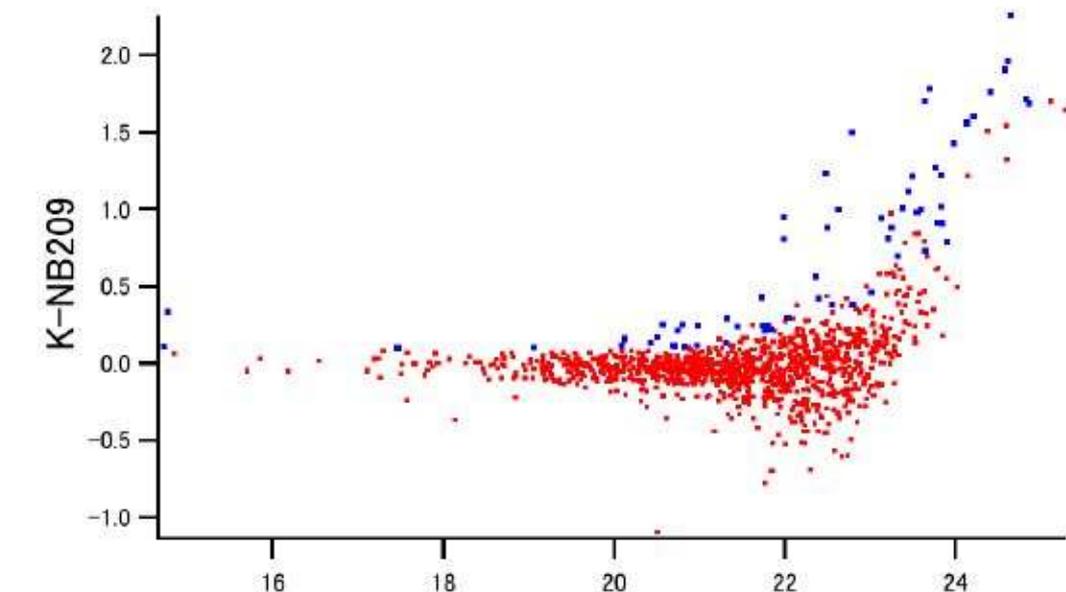
Targets	Redshift (z)	Filter	Instr.	CW (μm)	FWHM (μm)	Line ($M/\text{yr}, 5\sigma$)	SFR	Status
(Clusters: PISCES)								
CL0024+1652	0.395	NB912	S-Cam	0.9139	0.0134	$H\alpha$	0.1	Kodama+04
CL0939+4713	0.407	NB921	S-Cam	0.9196	0.0132	$H\alpha$	0.1	Nakata+
RXJ1716.4+6708	0.813	NB119	MCS	1.1885	0.0141	$H\alpha$	1.7	Koyama+09
		NA671	S-Cam	0.6714	0.0130	$[OII]$		Koyama+09
XCS2215.9-1738	1.457	NB912	S-Cam	0.9139	0.0134	$[OII]$	4.3	Hayashi+09
(Proto-clusters: HzRG)								
Q1126+101	1.517	NB1657	MCS	1.657	0.020	$H\alpha$		planned
Q0835+580	1.536	NB1657	MCS	1.657	0.020	$H\alpha$		planned
PKS 1138-262	2.156	NB2071	MCS	2.069	0.027	$H\alpha$	5.4	proposed
4C 23.56	2.483	CO	MCS	2.288	0.023	$H\alpha$		I.Tanaka+09
USS 1558-003	2.527	NB2315	MCS	2.313	0.027	$H\alpha$	12.4	proposed
(Blank fields)								
GOODS-N	2.19	NB209	MCS	2.091	0.027	$H\alpha$	10	Tadaki+09
		NB155	MCS	1.545	0.017	$H\beta$		Tadaki+09
		NB119	MCS	1.189	0.014	$[OII]$		Tadaki+09
SXDF/UDS	2.19	NB209/NB155/NB119		MCS				planned

MOIRCSのペアNB撮像による $z=2.2$ 輝線銀河の探査 (一般フィールド領域: GOODS-N, SXDF...)



[OII] と H α とを両方捉えることができる。したがってredshiftが決まる。

$z=2.2$ H α 輝線銀河 in GOODS-N



Tadaki et al. (2009)

ALMAとの連携観測(近赤外～電波)

TAO/Subaru (Near infrared)

- L(NIR)+SED → Stellar Mass (M_{star})
- H α /H β /[OII] survey → HII region (SFR)

ALMA (Submm--Radio)

- Submm conti. (850 μ m) → Dust (SFR)
- CO(3 \rightarrow 2) (\sim 100GHz@z \sim 2) → Mol. Gas (M_{gas})

$$a = \frac{M_{\text{star}}}{M_{\text{gas}}} : \text{ガス消費率}$$

$$b = \frac{SFR}{M_{\text{star}}} : \text{星形成タイムスケール}$$

TAO-NIRによる原始銀河団(およびフィールド)の研究

銀河形成・進化のピーク期($1.5 < z < 3$)の系環境を網羅した系統的探査

2~3バンド同時撮像&広視野&小バンドギャップ&長時間投入
などの特長を活かして、ユニークな深撮像サーベイを！
GLAOが効けば尚よい(銀河間相互作用を分離できる)！

- Medium-band break survey (J1, J2, J3, H1, H2, K1, K2)
赤い受動的銀河のメンバー同定とSED年齢
(D4000/Balmer break)
- Narrow-band emitter survey (10~100 filters or TFs)
青い活動的銀河の星形成率と重元素量、AGN
($H\alpha$ 、 $H\beta$ 、[OII]、[OIII]、[NII])

分光サーベイでは事前ターゲット選択によるバイアスがかかるのに対し、
撮像サーベイでは“コンプリートサンプル”を構築できる(但し分光確認も必要)。

2009.9.11 TAO/NIRCAM workshop

QSO Studies with TAO

Tohru Nagao (Ehime U.)



The AGN study in the TAO era

(1) The Evolution of Supermassive Black Holes (SMBHs)

1a) Search for QSOs at $z > 6.5$

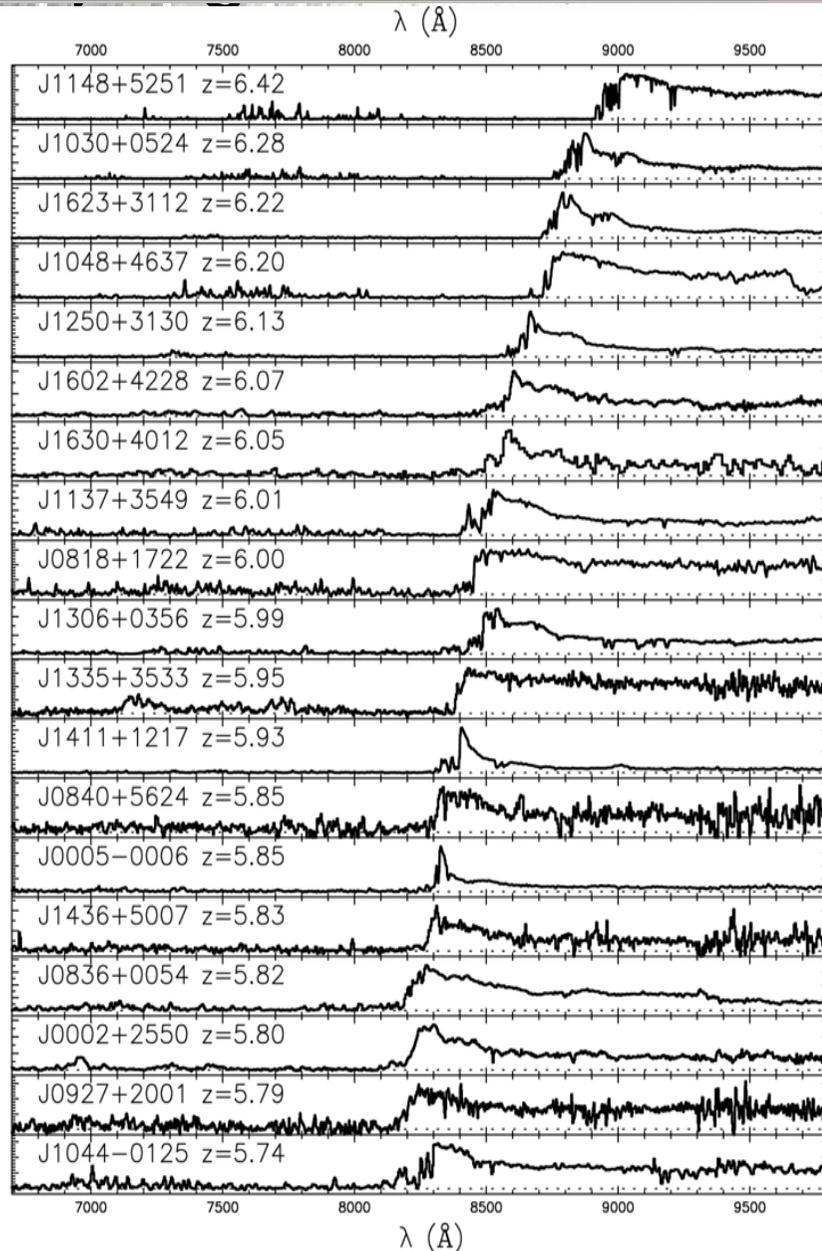
1b) QSO Luminosity Func. / SMBH Mass Func.

(2) The Co-Evolution of SMBHs and Galaxies

2a) QSO Host Galaxy Mass

2b) Chemical Properties (cf. next talk)

1a) Highest- z QSOs: **SDSS** View (1999-2006)



2 dozens of QSOs at $5.7 < z < 6.5$
~ cosmic reionization
~ rapid growth of SMBHs
~ early metal enrichment
~ $z > 6.5$ QSOs definitely needed

Maximum redshift: 6.5
~ limit of “i-drop” selection
~ “z-drop” QSOs ??
~ requires “wide” Y & NIR data

Fan et al. (2006)

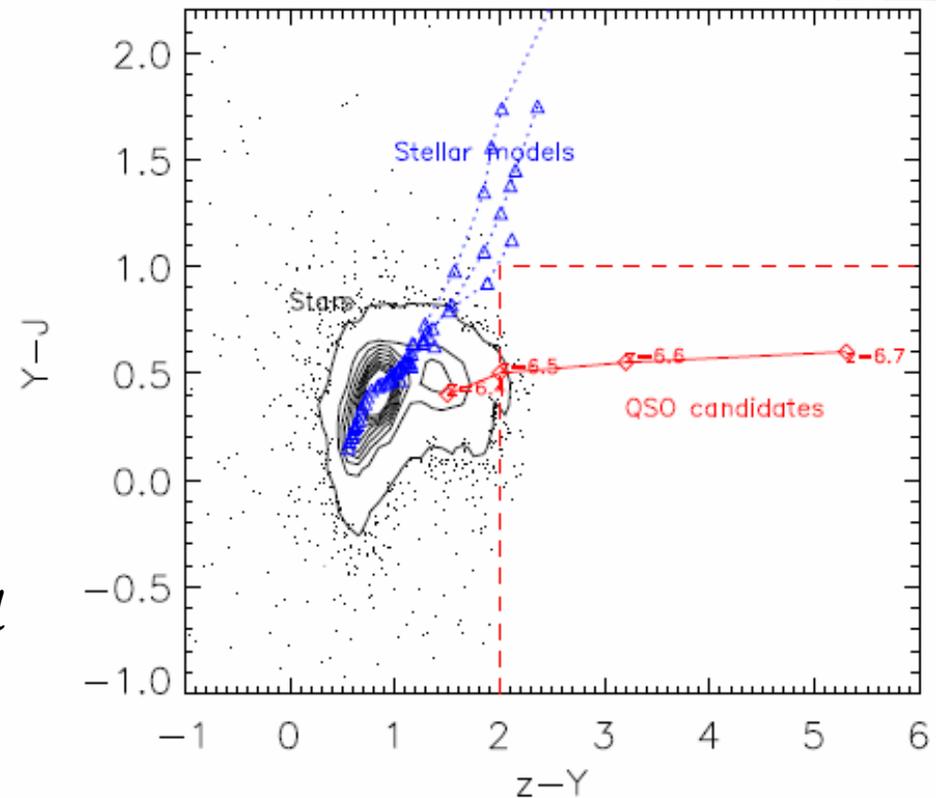
1a) Highest- z QSOs: **SWANS** View (2012-2016)

SWANS = Subaru Wide-Field AGN Survey

- ~ using Subaru/HSC (2011-)
- ~ 2000 sq.deg. ("HSC-wide")
- ~ 5 band (g, r, i, z, Y) imaging
- ~ JHK available data (UKIDSS)
- ~ observations: 2012-2016 (?)

Search for QSOs at $z > 6.5$

- ~ "z-drop" for QSOs at $z \sim 7$
- ~ 10-100 QSOs at $z \sim 7$ expected
- ~ "Y-drop" for QSOs at $z \sim 8$
- ~ a few QSOs at $z \sim 8$ expected
- ~ cool dwarfs are contaminated
- ~ **spectroscopic follow-up needed**



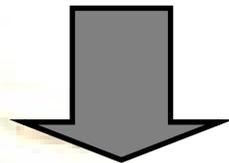
© T. Goto

1a) Highest- z QSOs: TAO View (201x-)

Follow-Up Spectroscopy for High- z QSO Candidates

- ~ success rate: ~3% (300 targets for 10 true QSOs)
- ~ optical (incl. WFMOS): useless for QSOs at $z > 7$ (Ly α at > 1 micron)
- ~ FMOS: useless for rare objects (< 1 targets for FMOS FoV)
- ~ 4m telescopes: useless for faint objects ($J=20$)
- ~ TAO: ~2 hours ok(?), 60/5 nights/yr for 300 targets (??)
- ~ requiring sensitivity down to 9000A for QSOs at $z \sim 6.5$

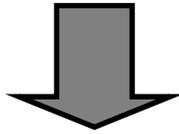
Moderately Large Aperture Size of TAO
Project-Oriented Operation of TAO
YJHK coverage of NIRCAM (especially Y)



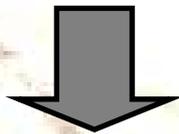
Identifications of QSOs at $z > 7$ with TAO !!

1b) QSO LF

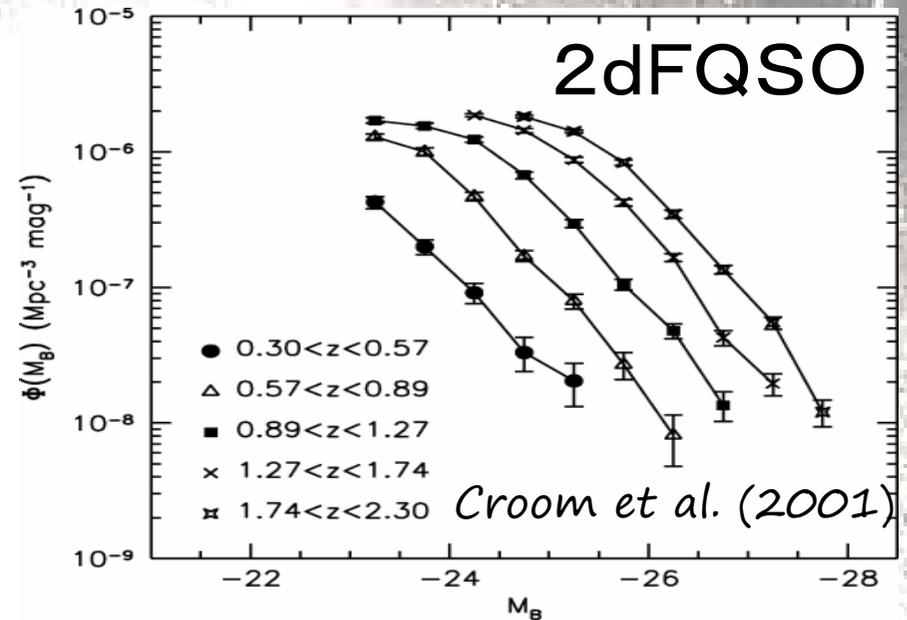
- ~ QSO LF: double power-law
- ~ $0 < z < 3$: well investigated
- ~ $4 < z < 6$: still unknown
- ~ low-luminosity QSOs needed



SWANS + Optical Spectroscopy



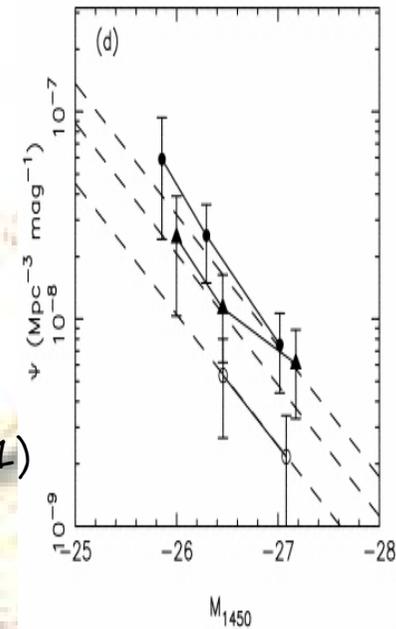
How about SMBH Mass Func.?



- : $3.6 < z < 3.9$
- ▲: $3.9 < z < 4.4$
- : $4.4 < z < 5.0$

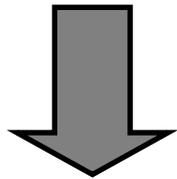
SDSS

Fan et al. (2001)



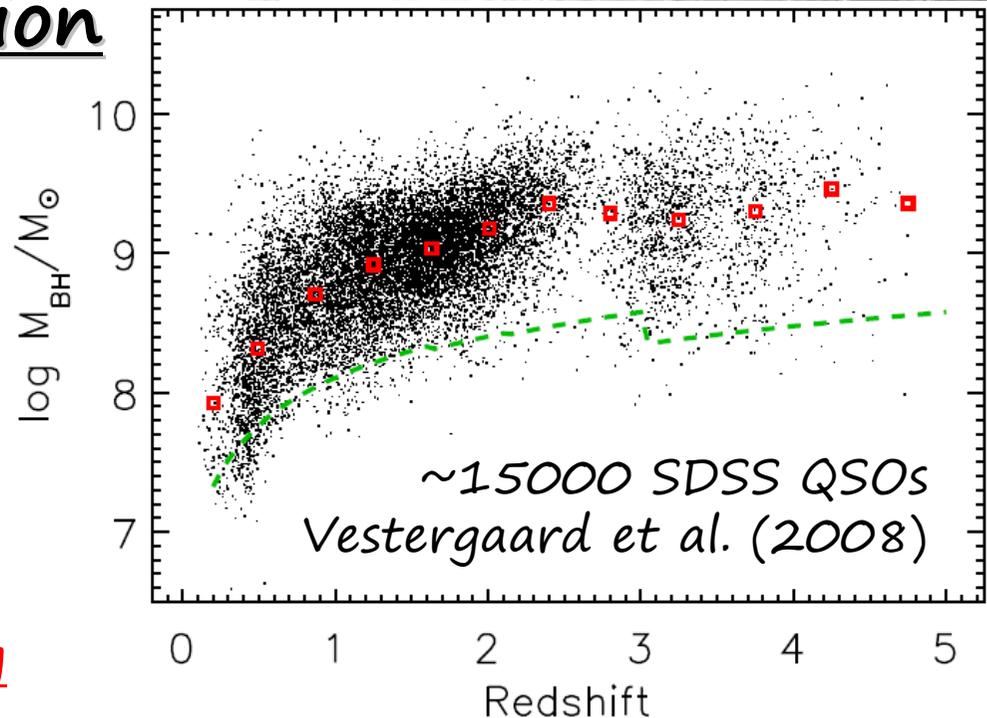
1b) SMBH Mass Function

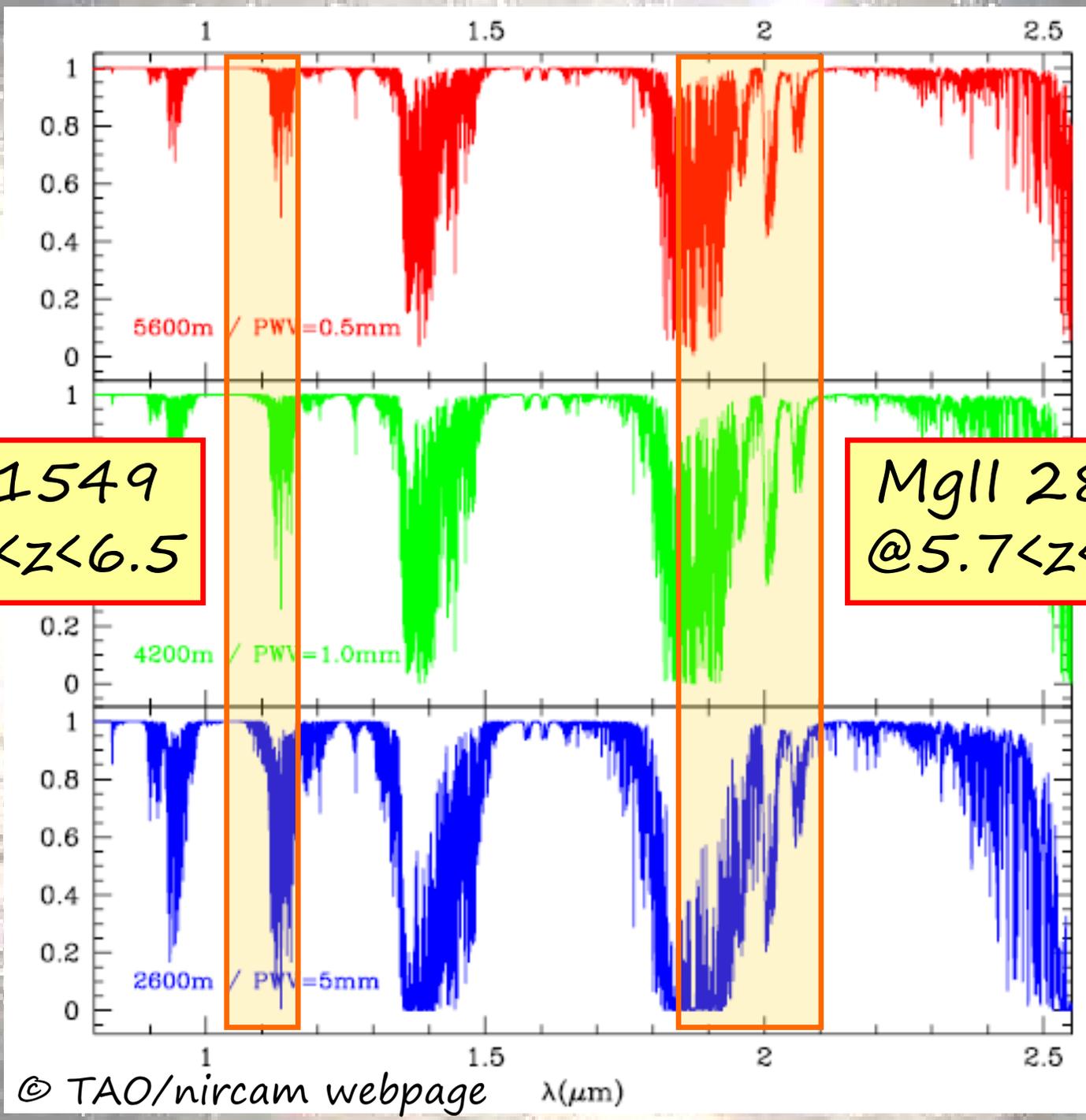
- ~ with C IV @1549Å (or Mg II)
- ~ SDSS MF: only at $z < 5$
- ~ NIR spectra needed for $z > 5$
- ~ Target QSO sample needed



SWANS + NIR Spectroscopy

- ~ 2000 sq.deg. → a few hundreds candidates @ $5.7 < z < 6.5$
- ~ SWANS Y-band → less contamination by cool dwarf stars
- ~ TAO/NIRCAM → *less affected by YJ-gap* (important @ $z \sim 6.2$)
- ~ *Simultaneous observation of C IV & Mg II (avoiding HK-gap)*
 - Very accurate M_{BH} measurements !!
- ~ $R \sim 500$ is enough?? Slit width should be variable...



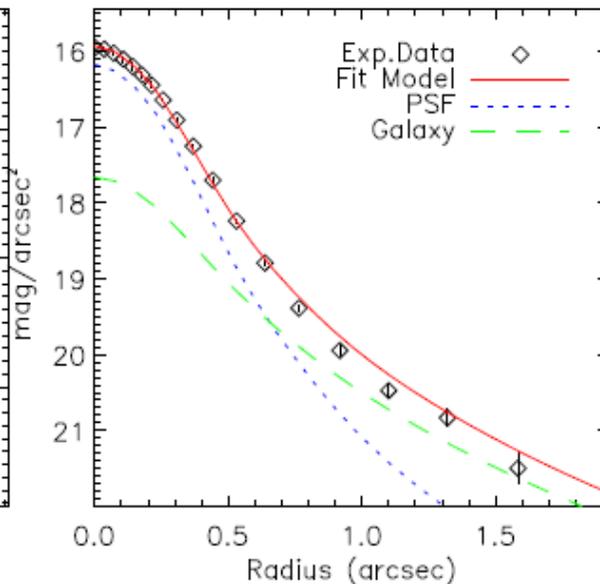
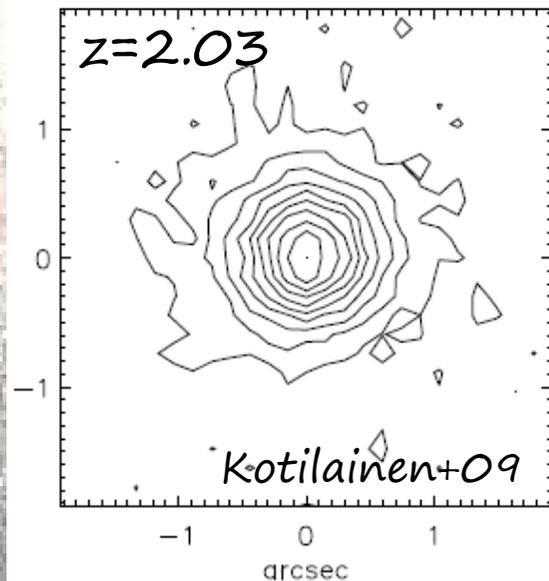


CIV 1549
@5.7 < z < 6.5

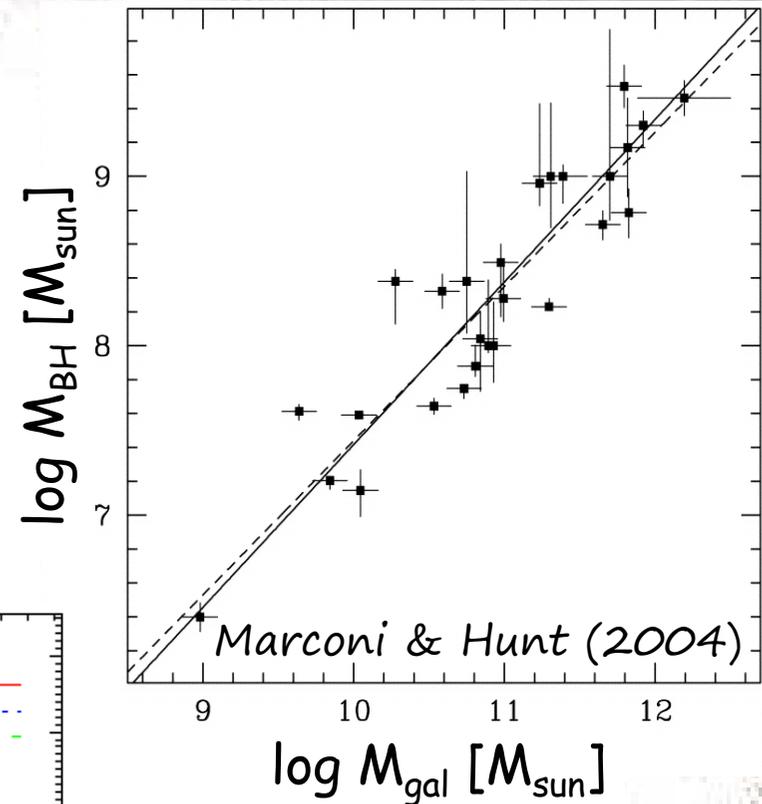
MgII 2800
@5.7 < z < 6.5

2a) Host Galaxy Mass

- ~ $M_{gal}/M_{BH} = 0.002$ at $z \sim 0$
- ~ most direct evidence for co-evolution
- ~ at high- z : crucial to constrain models
- ~ HST useless at $z > 2$ (small aperture size)
- ~ ground-based telescopes requires AO
- ~ hosts of low- L QSOs without AO??



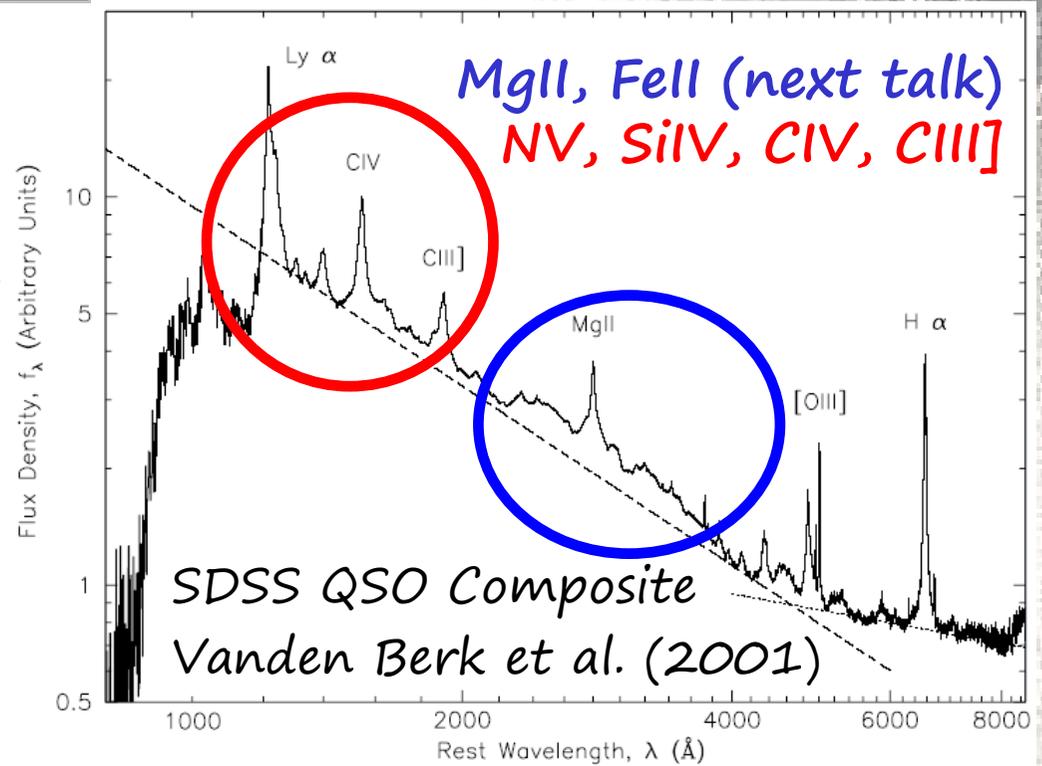
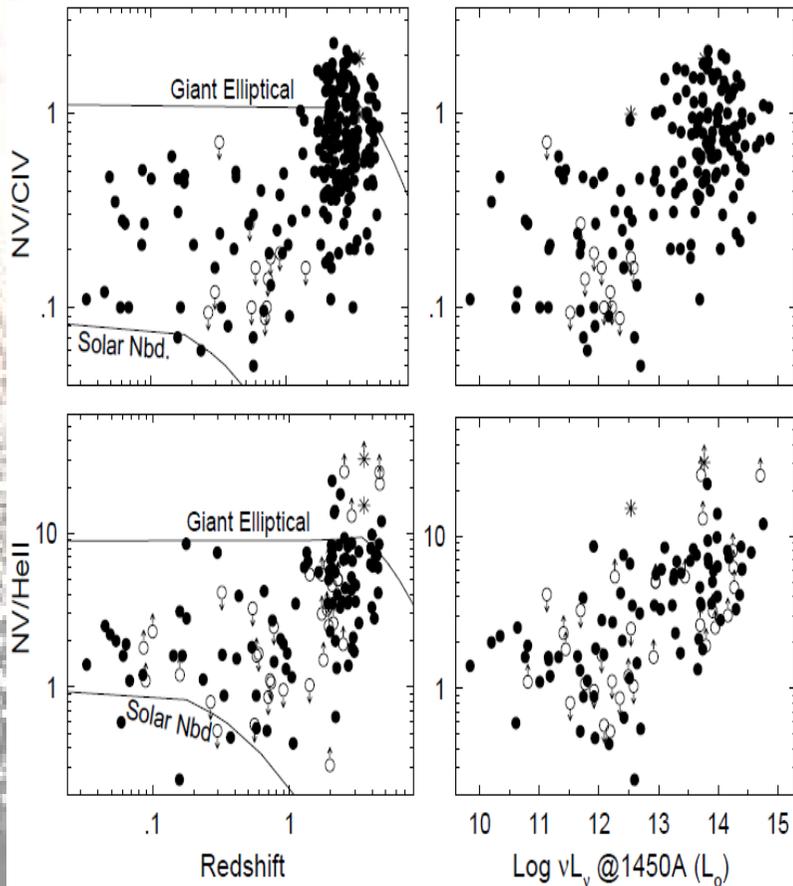
VLT/ISAAC without AO
seeing size: ~ 0.5 arcsec
typically 1-2 hours



**TAOでもやれるかも。
でもTAOじゃなくても
Subaru+A0188とかで
やればいーような...?**

2b) Chemical Properties

- ~ $Z_{QSO} \Leftrightarrow$ past SF in hosts
- ~ Z_{QSO} @ high- z
 → SH history, forming epoch

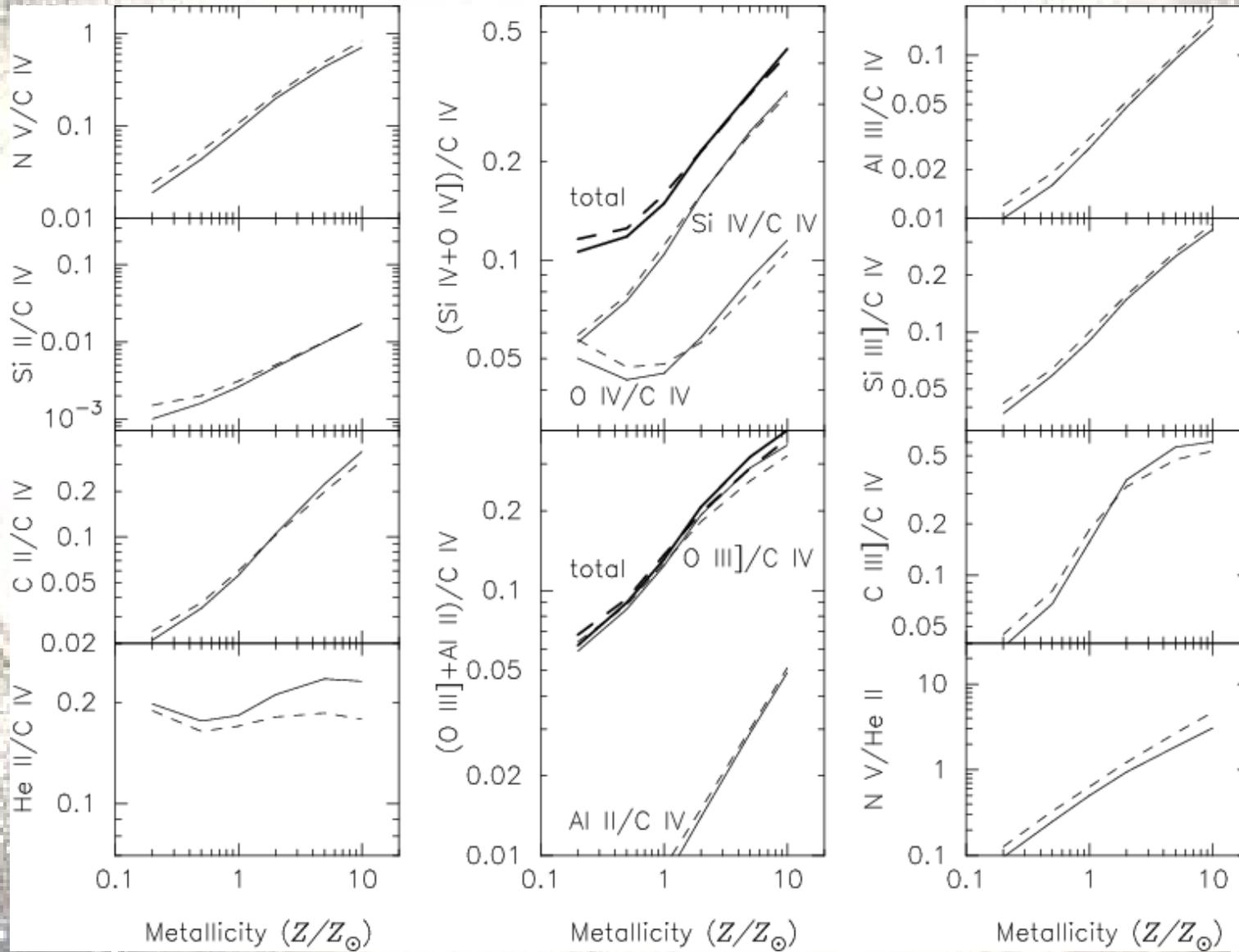


- ~ high metallicity \Leftrightarrow high redshift
- ~ high metallicity \Leftrightarrow high luminosity
- ~ which is important?
- ~ nitrogen effects ???

Hamann & Ferland (1999)

2b) Chemical Properties

TN, Marconi, & Maiolino (2006)

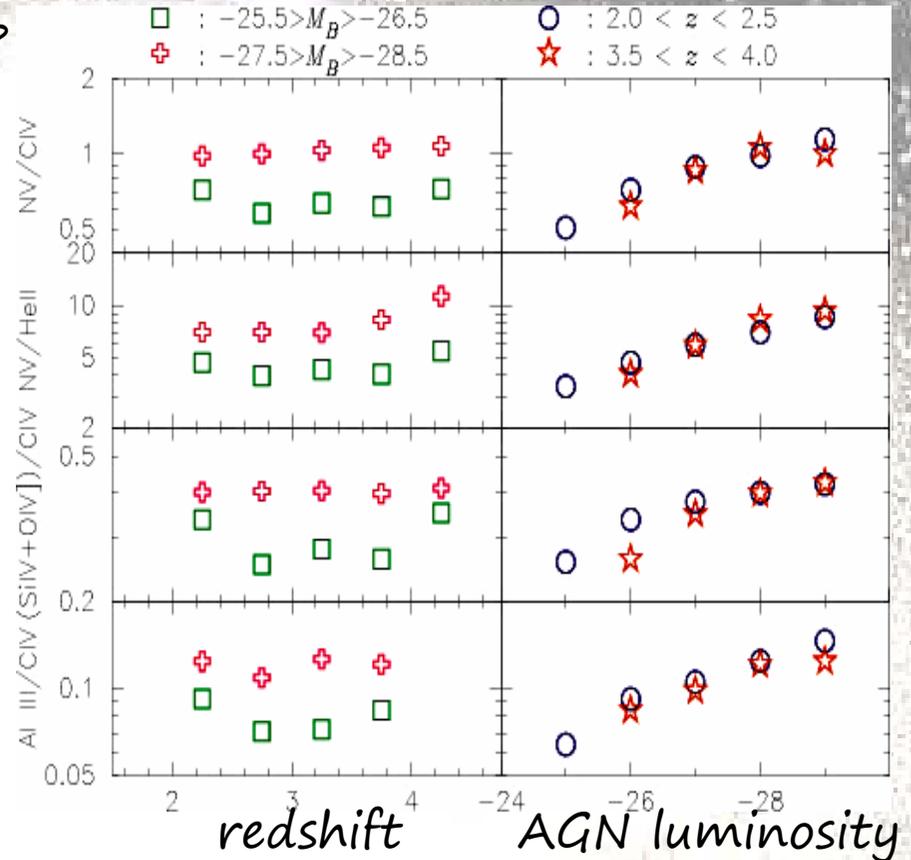
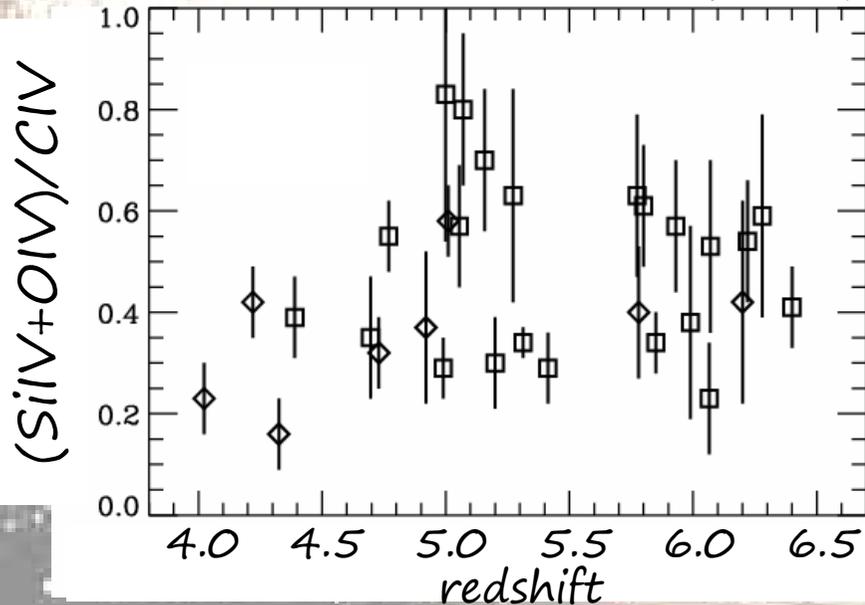


Nagao+06

2b) Chemical Properties

- ~ SDSS stacking analysis using 5000 SDSS spectra
- ~ tight luminosity-metallicity rel.
- ~ no evolution up to $z \sim 5$

Juarez, Maiolino, TN, et al. (2009)

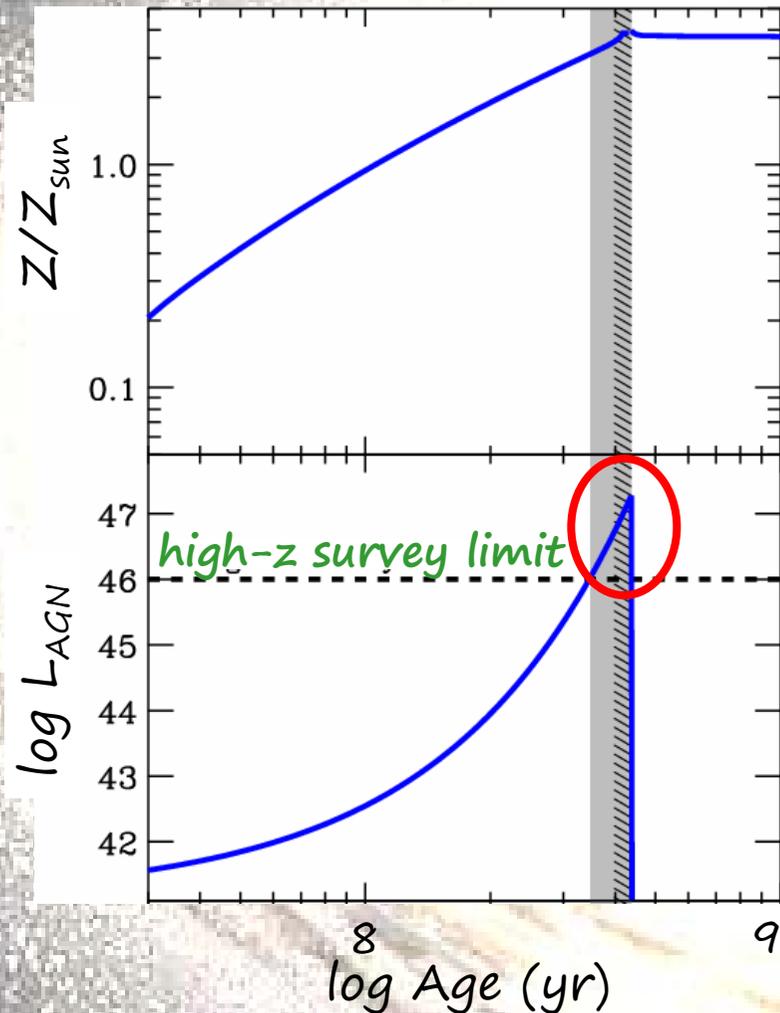


- ~ no evolution up to $z \sim 6.5$!?
- ~ Z_{QSO} for *lower-L* / *higher-z* needed

↓ ↓

TAO/NIRCAM + SWANS

2b) Chemical Properties

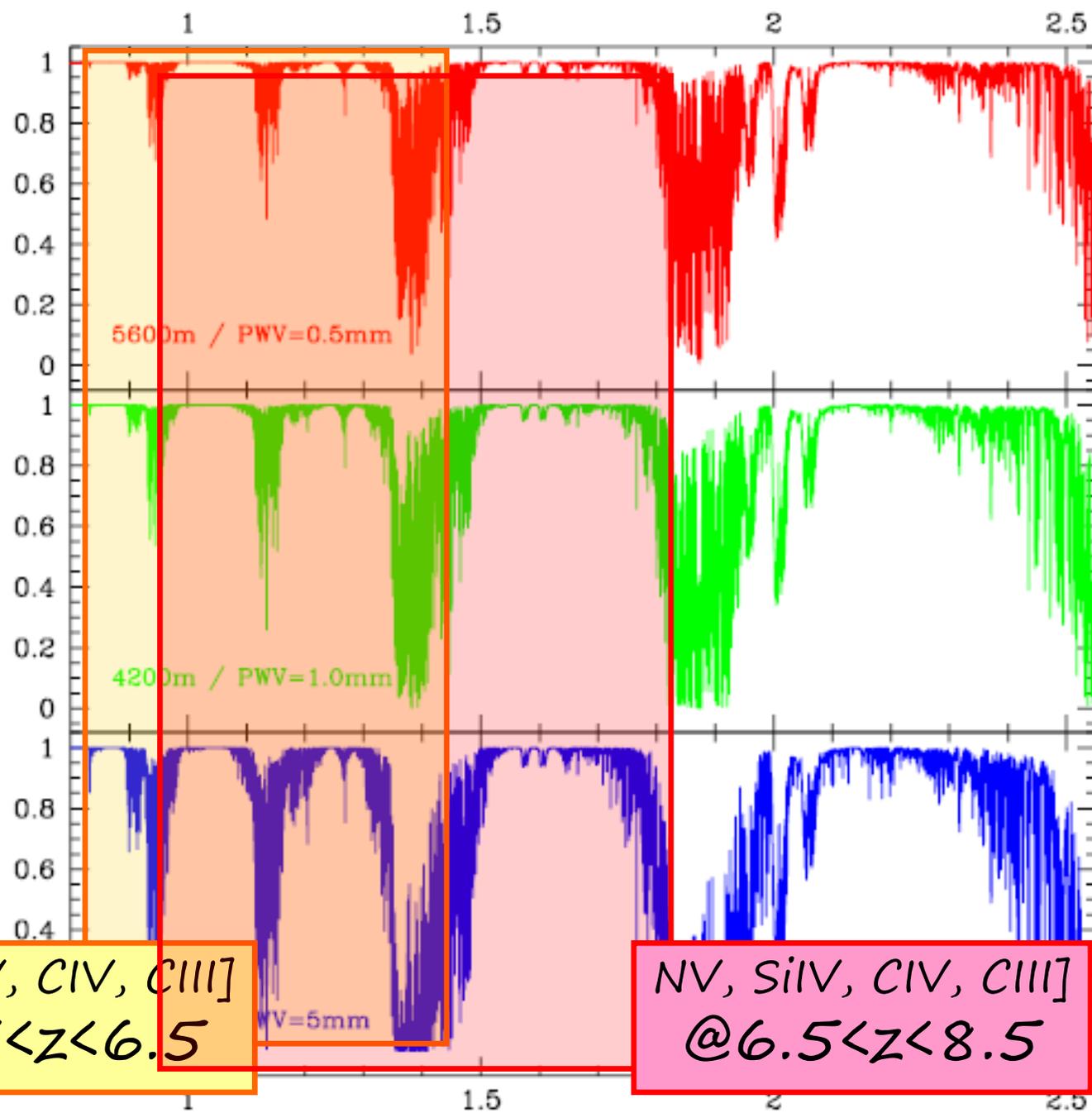


We see only brightest QSOs at high- z
Sampling only "well-evolved" guys
"No-evolution" due to selection effects

NEXT STEP: Higher- z & Lower- L

Kawakatu et al. (2003)
Granato et al. (2004)
Juarez, Maiolino, TN, et al. (2009)

↓ ↓
TAO/NIRCAM + SWANS



NV, SiIV, CIV, CIII]
 @5.7 < z < 6.5

NV, SiIV, CIV, CIII]
 @6.5 < z < 8.5

SUMMARY: The AGN study in the TAO era

(1) The Evolution of Supermassive Black Holes (SMBHs)

1a) Search for QSOs at $z > 6.5$

1b) QSO Luminosity Func. / SMBH Mass Func.

(2) The Co-Evolution of SMBHs and Galaxies

2a) QSO Host Galaxy Mass

2b) Chemical Properties (cf. next talk)

SWANS (2012-)

in the TAO era

(1) The Evolution of Supermassive Black Holes (SMBHs)

1a) Search for QSOs at $z > 6.5$

1b) QSO Luminosity Func. / SMBH Mass Func.

(2) The Co-Evolution of SMBHs and Galaxies

2a) QSO Host Galaxy Mass

2b) Chemical Properties (cf. next talk)

Requests to TAO/NIRCAM

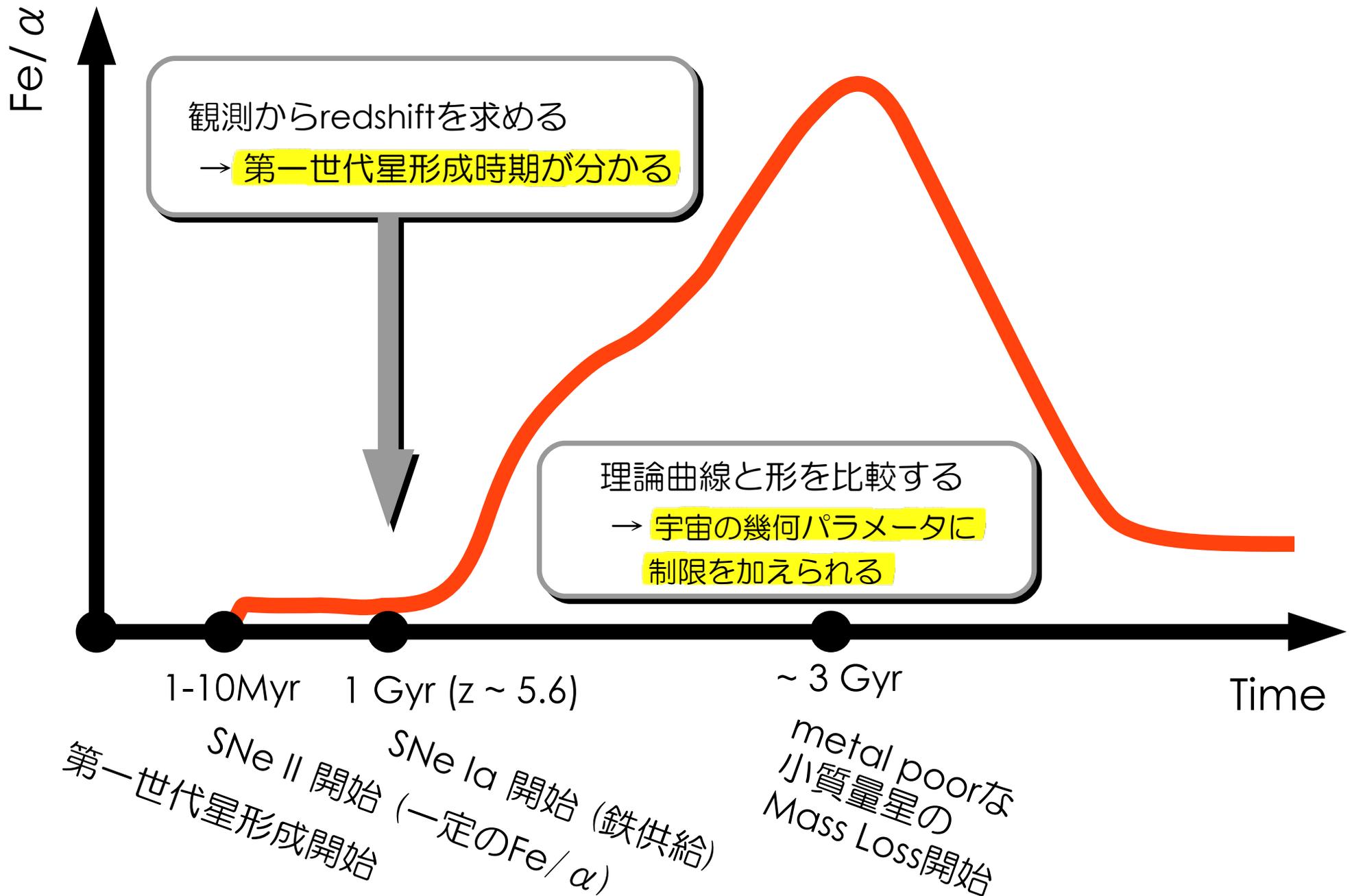
- ~ variable slit width
- ~ spectral coverage down to $\sim 8200\text{\AA}$
- ~ project-oriented operation

FeII/MgIIから探る宇宙化学進化

天文センターD1 鮫島 寛明

川良公明, 吉井譲, 大藪進喜, 松岡良樹
浅見奈緒子, 家中信幸, 清水孝則, 続唯美彦

Fe/ α 元素アバundance比の進化



これまでに行われた観測

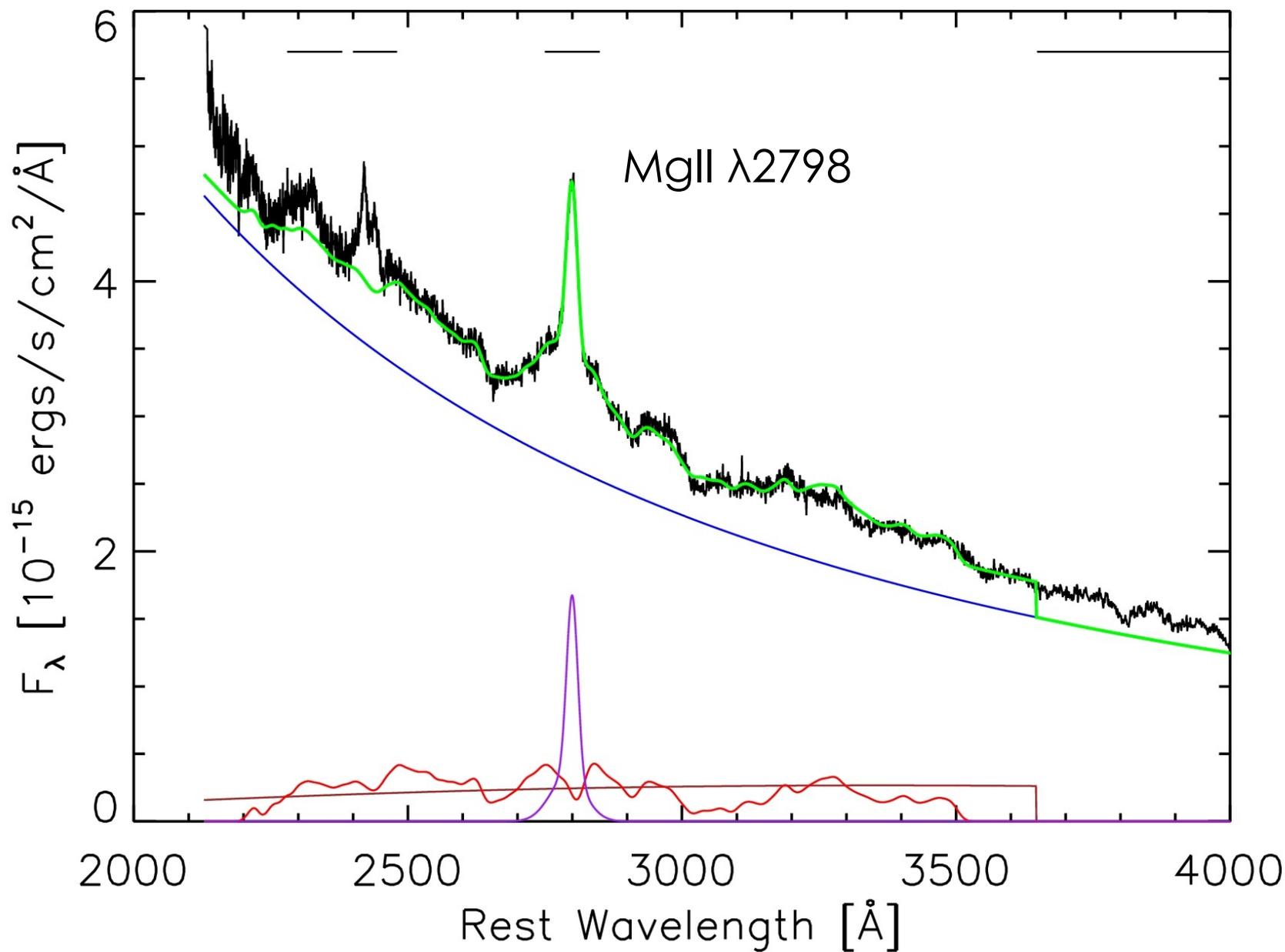
- 観測天体は明るく、輝線の豊富なクエーサー
- FeII/MgII輝線強度比がFe/Mgアバundance比を反映していると仮定

Redshift	Number	Paper
$0 < z < 1$	44	Tsuzuki+2006 Iwamuro+2002
$1 < z < 2$	~10,000 (SDSS)	M.thesis of Sameshima Iwamuro+2002
$2 < z < 3$	6	Sameshima+2009
$3 < z < 4$	19	Dietrich+2003 Thompson+1999
$4 < z < 5$	31	Iwamuro+2002 Maiolino+2003
$5 < z < 6$	13	Kurk+2007 Jiang+2007 Freudling+2003
$6 < z < 7$	10	Iwamuro+2004 Barth+2003

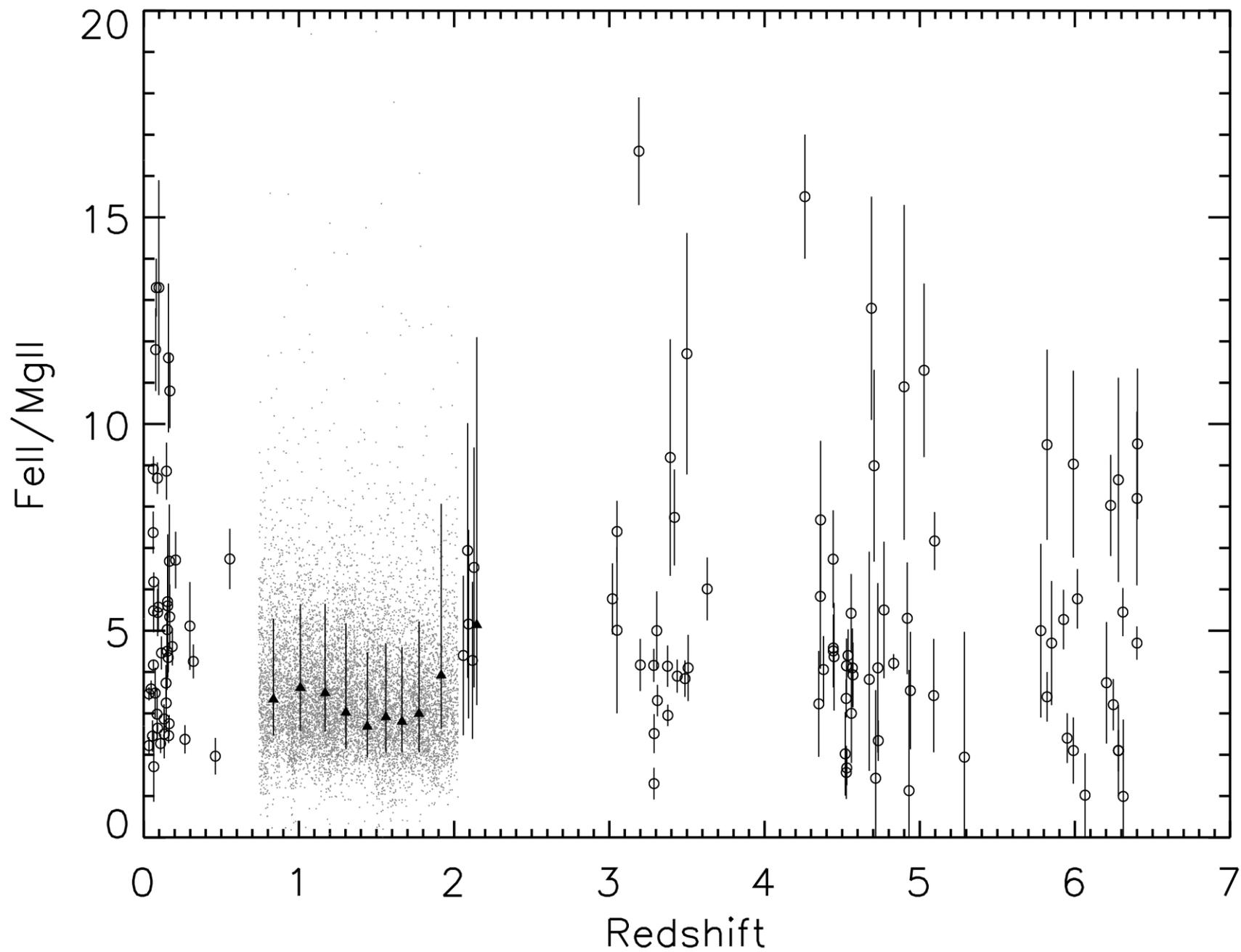


FeII/MgII測定の様子

SDSS J114343.06+674455.5



FeII/MgII輝線強度比の観測結果 (1)



FeII/MgII輝線強度比の観測結果 (2)

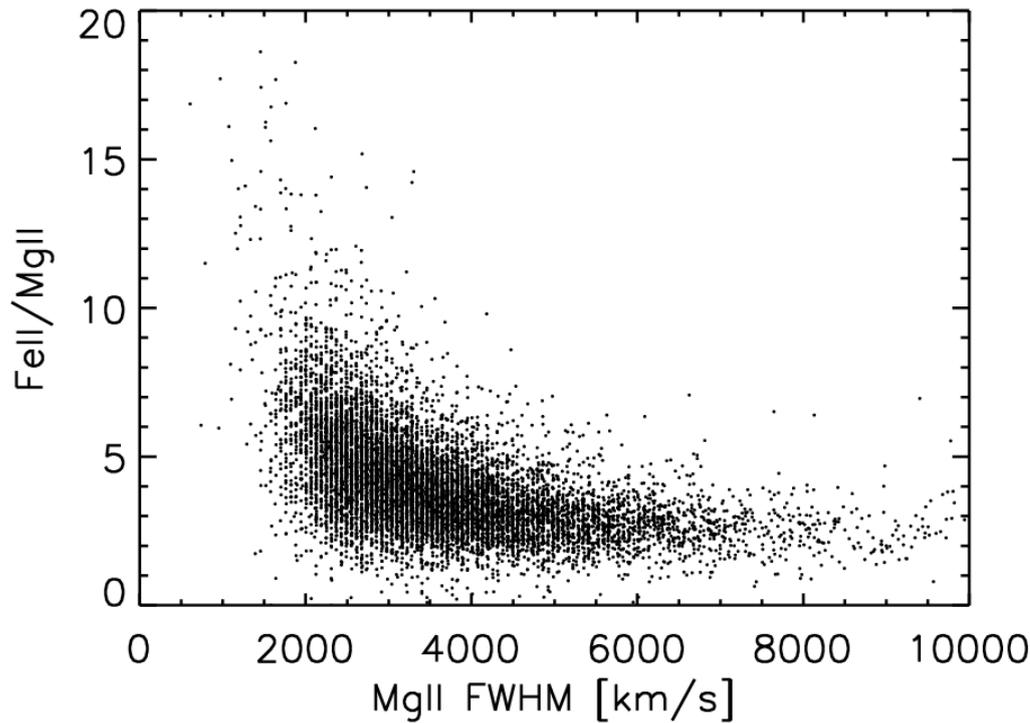
- 現在のところの解釈
 - $z < 6$ では明らかなブレイクは見られない
 - $z \sim 6$ でもFeは理論の予測より大量に存在 (Pop.IIIがFeを大量に作っている?)

でもその前にいろいろと問題が...

- FeII/MgIIはFe/Mgアバundance比を正しく反映しているのか？
 - micro-turbulence依存性 (Verner+2003)
 - エディントン比依存性 (Dong+2009)
 - FeII/MgII輝線強度比の非アバundance要素への依存性を調べる必要
- High- z 天体の値が散らばっている
 - 測定方法がバラバラ (FeIIテンプレートの違い etc.)
 - 単一の望遠鏡を用い、同じ方法で測定することが望ましい

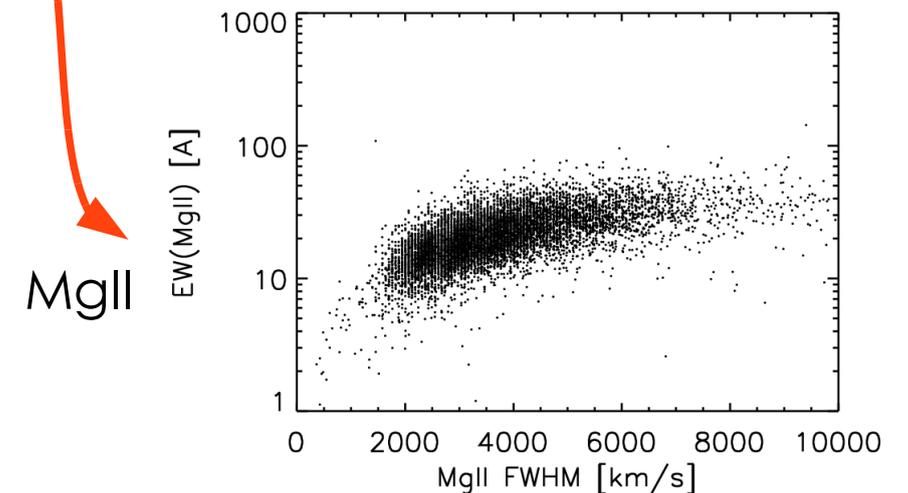
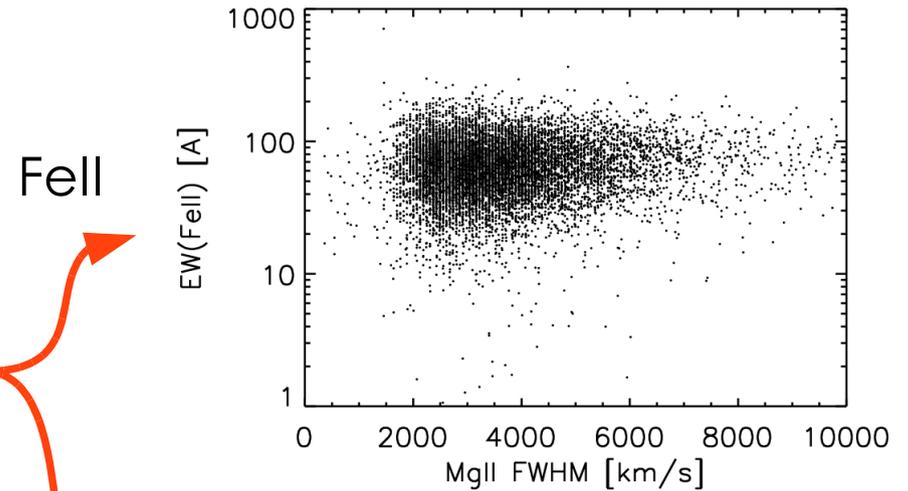
FeII/MgIIの非アバundance要素依存性

- SDSSクエーサーの解析
 - FeII/MgII – FWHM(MgII)



FeII/MgIIは半値幅の大きさに依存
→ 正確なアバundance測定を
行うには補正が必要

- Equivalent Widthの振る舞い



(Sameshima et al. 2009, in prep.)



アバundance測定を試み

- EW分布のモデル

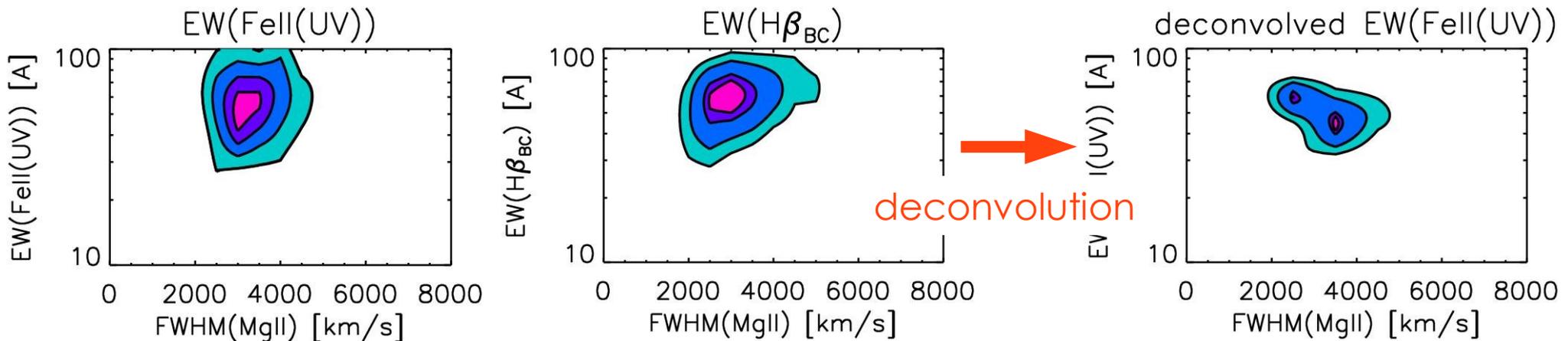
- 各輝線は半値幅の値によって系統的に変化

→ 金属量に依存しない水素の輝線(H β)の分布がこれを反映

- MgIIやFeIIの分布は「半値幅による系統的な変化」+「アバundance分布」を反映

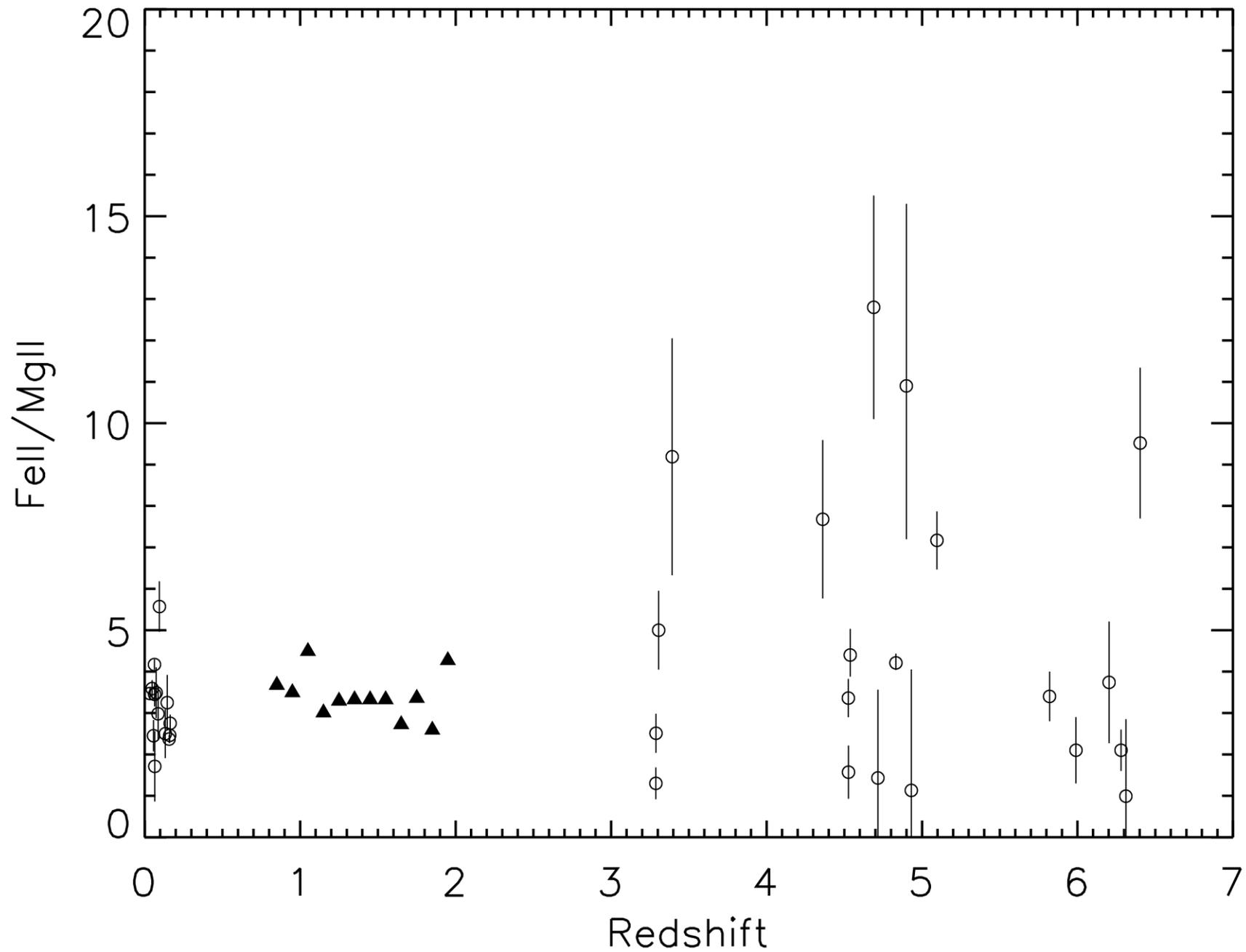
- $x = \log \text{EW}$, $v = \text{FWHM}$, $F(x; v)$: EW分布, $G(x; v)$: アバundance として、

$$F_{\text{FeII}}(x; v) = \int G_{\text{FeII}}(x - x'; v) F_{\text{H}\beta}(x'; v) dx'$$



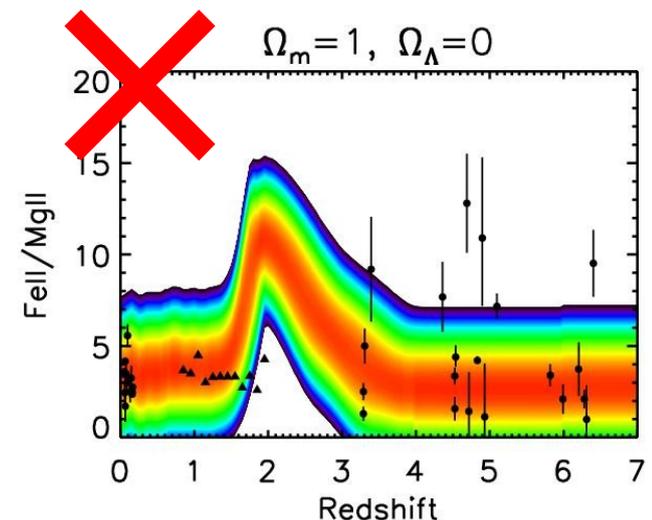
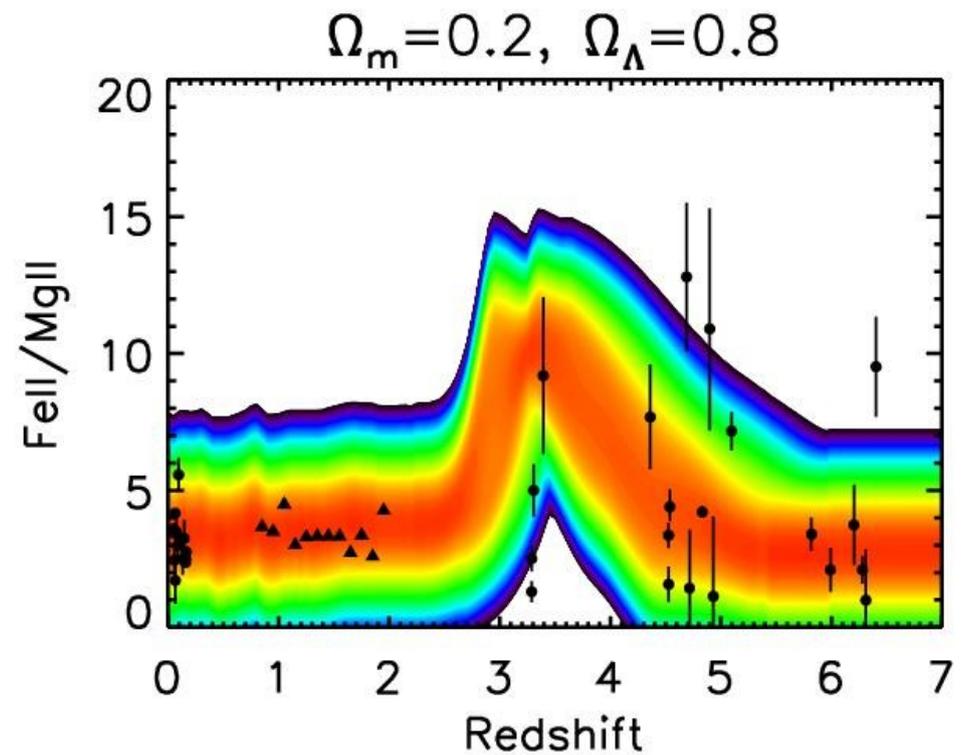
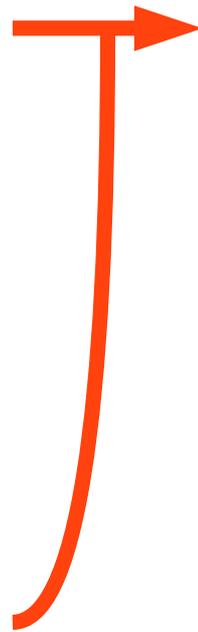
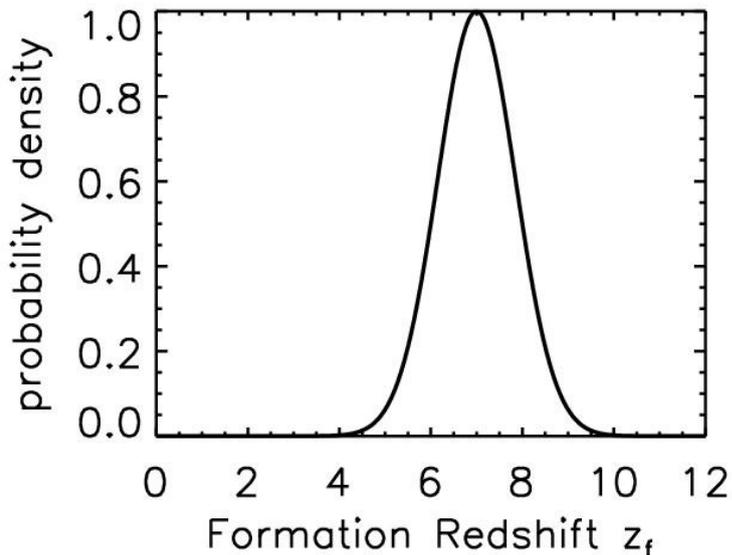
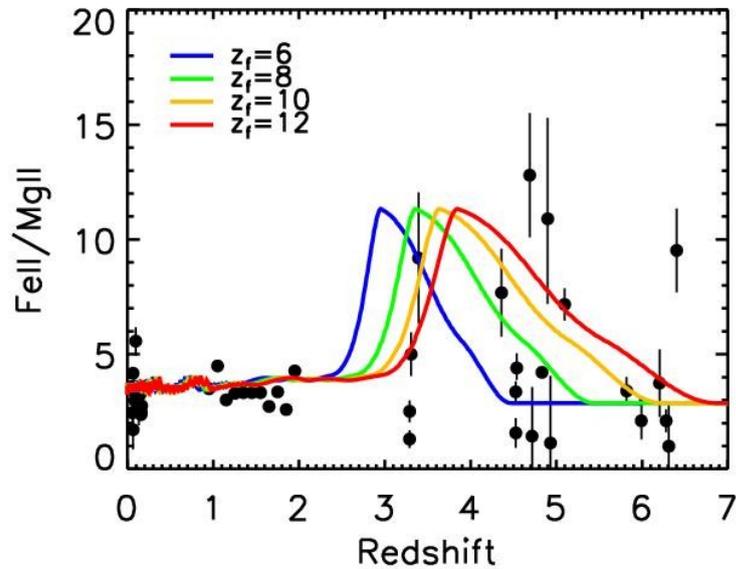
EW分布を書くために大量のサンプルが必要!!

FWHM > 3000km/s のサンプル



星形成時期の広がり を反映したモデル

- 星形成時期 z_f の分布を考慮



(Y.Yoshii 2009, private communication)



Fell/MgII研究で必要とされていること

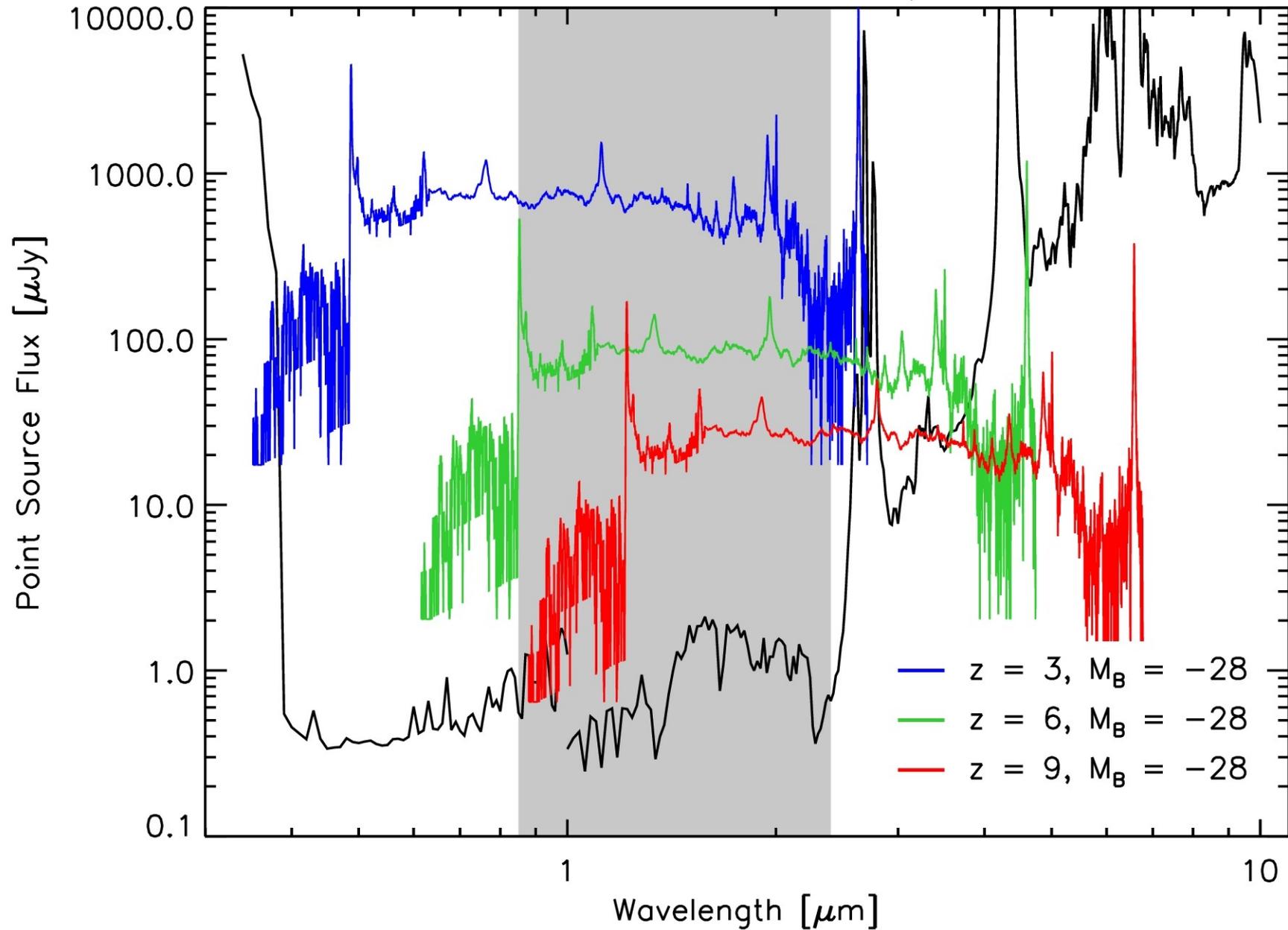
1. 赤外観測によるHigh-z天体のFell/MgII測定
2. サンプル数の増加
3. 測定装置、手法などによる測定結果の散らばりを抑える

- TAOの出番

- 専用望遠鏡ならではの豊富な観測時間
- 世界最高の赤外線感度
- 0.85-2.5 μm の広い観測波長域
- マイクロシャッターアレイによる多天体分光観測

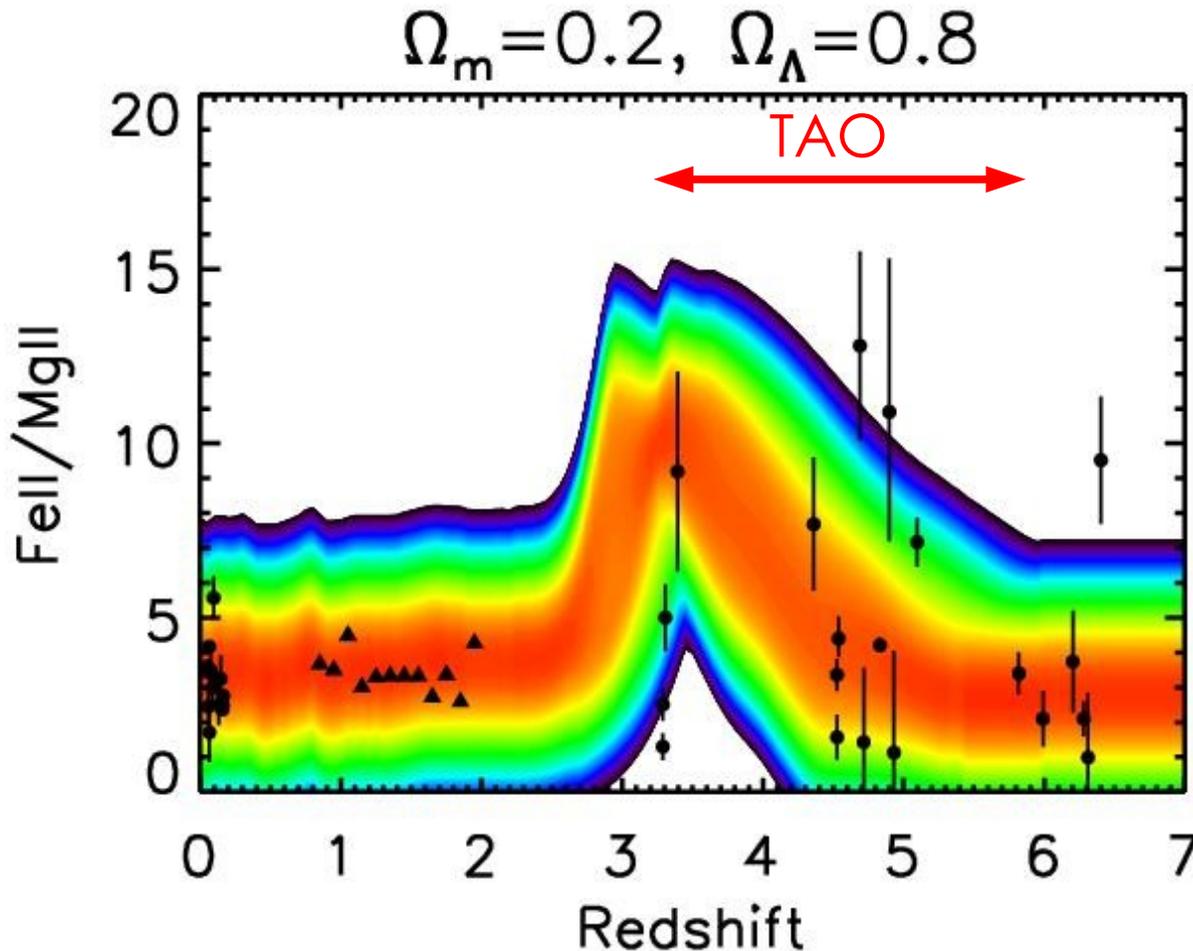
感度計算例

$R=5000$, 10000sec , $S/N=5$



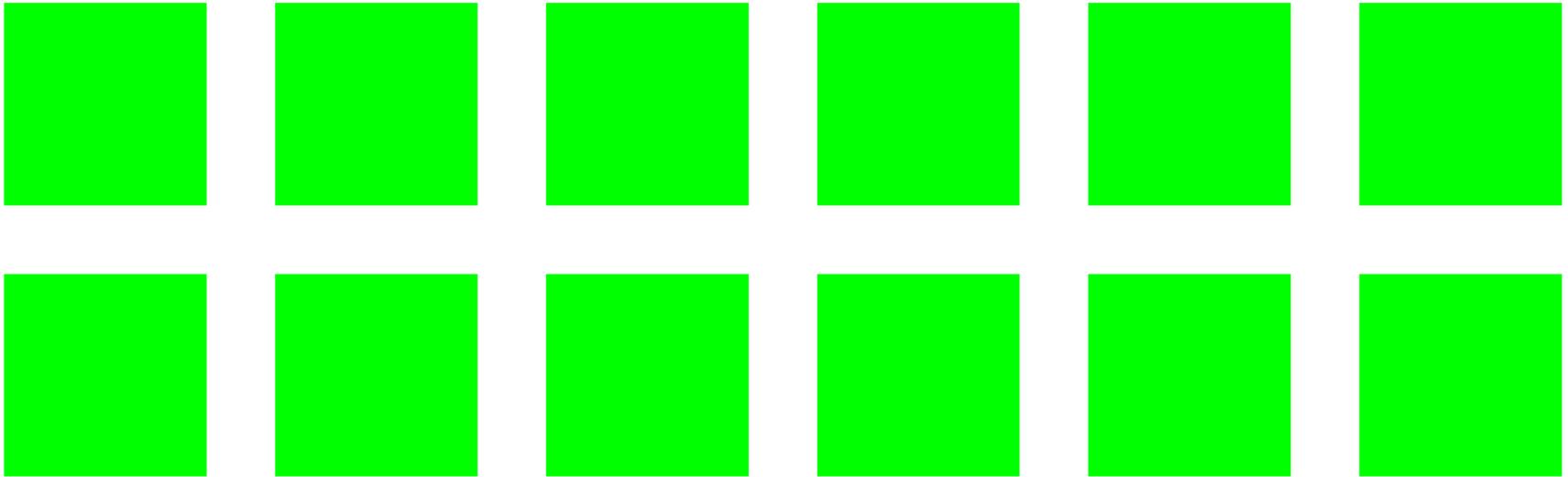
TAOでもたらされるデータ

- ねらうことのできる赤方偏移の範囲
 - TAOの観測波長域 … 0.85 – 2.4 μm
 - FeII/MgII測定に必要な静止波長域 … 2,000 – 3,500 Å
- $3.3 < z < 5.9$ にある天体のFeII/MgII分布が測定可能

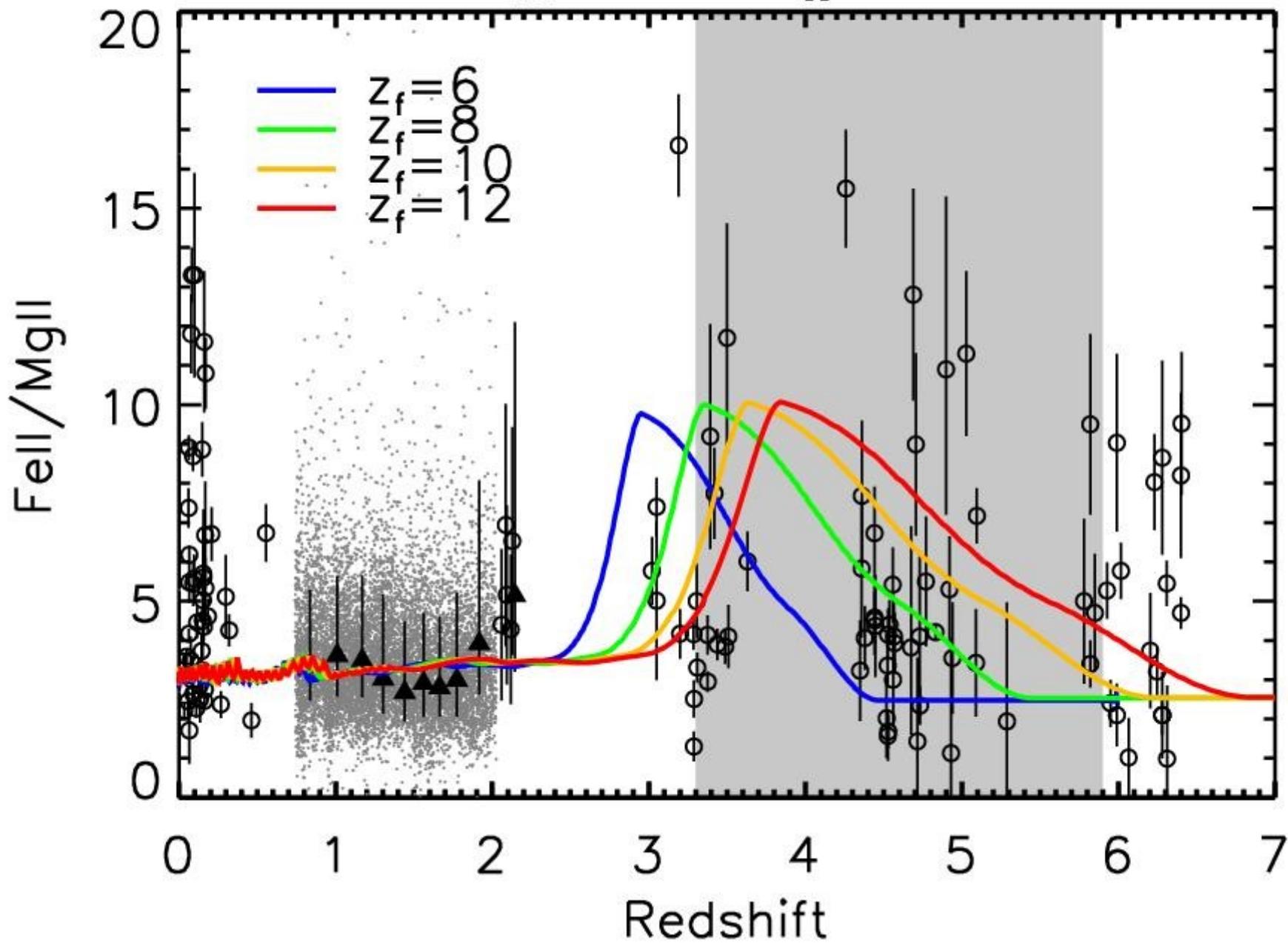


まとめ

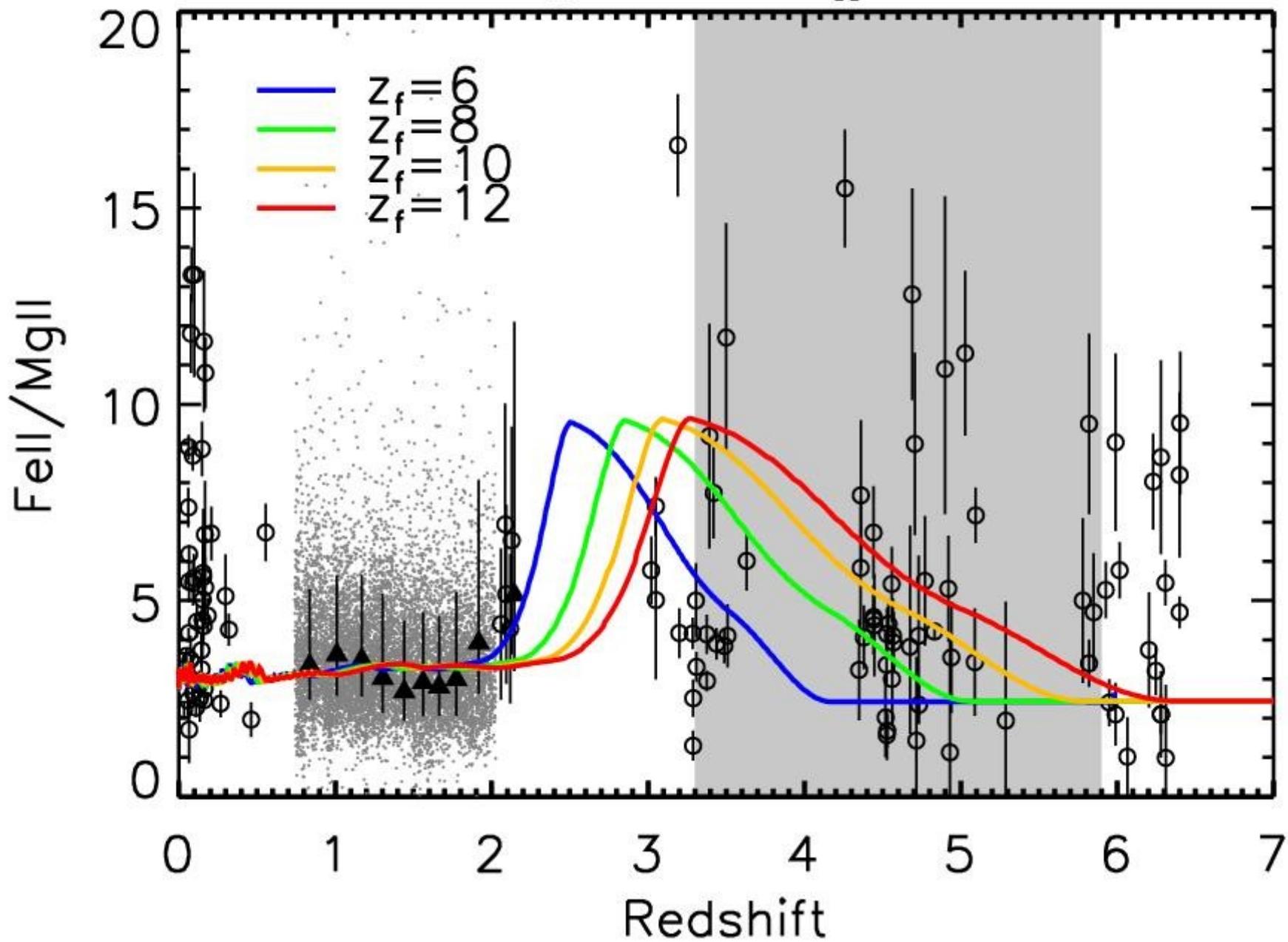
- Fe/Mgアバundance測定法の考案
 - FeII/MgIIの非アバundance要素(FWHM)依存性を補正することで、アバundanceの測定ができる
- 星形成時期の広がり を考慮したモデルの作成
 - high-zにおけるFe/Mgのdispersionはintrinsic
 - 理論的な分布と観測値の分布の比較を比較することで、宇宙論パラメータや第一世代星形成時期に制限をかけられる
- 必要とされる観測
 - とにかく多くのサンプルを取得
 - High-zデータ取得のための近赤外線観測
 - TAOはこれらの条件を全て満たしており、現代天文学が抱える大きな難問であるFe/Mg問題に解決をもたらしてくれるだろう



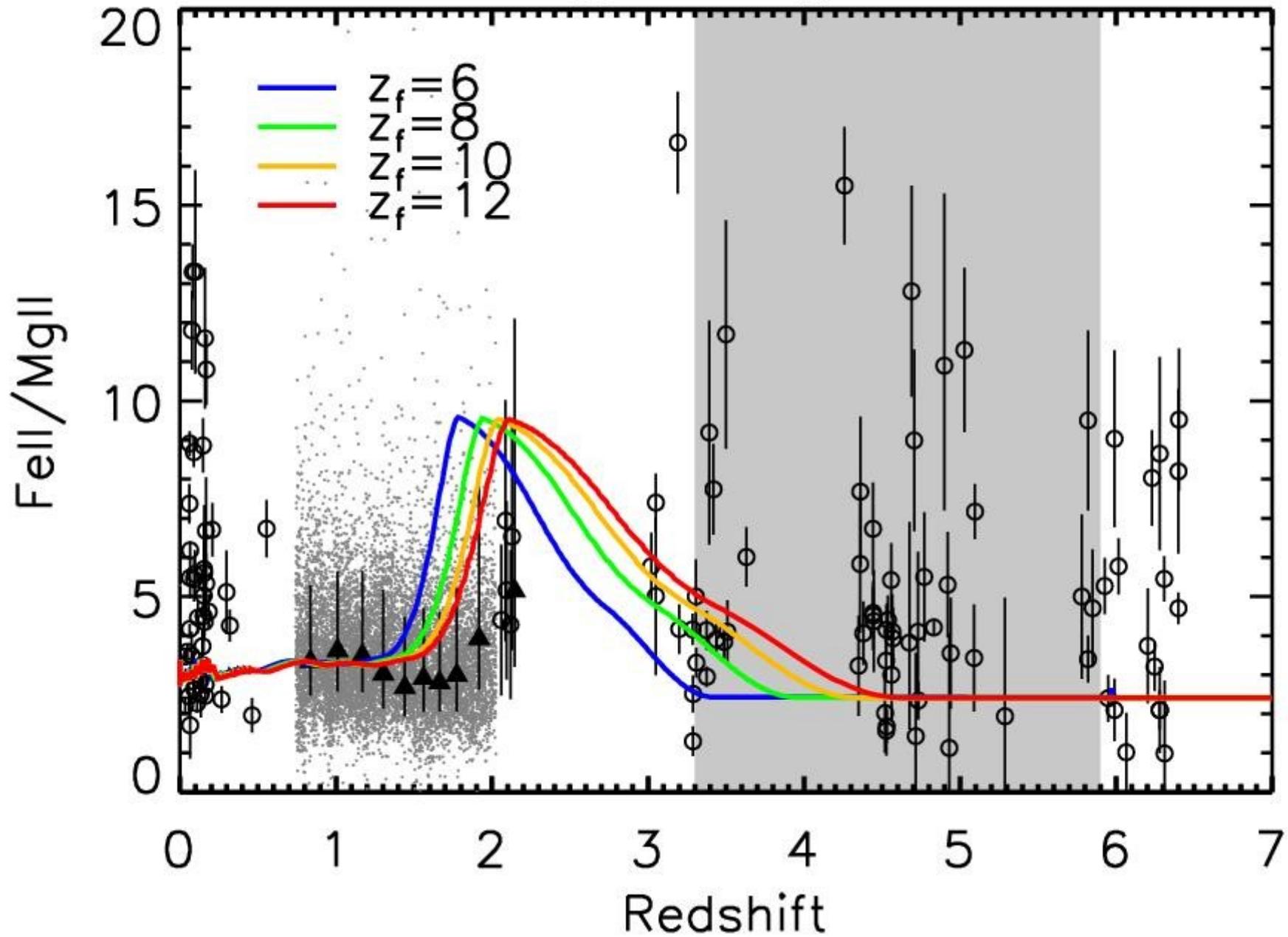
$$\Omega_m = 0.2, \quad \Omega_\Lambda = 0.8$$



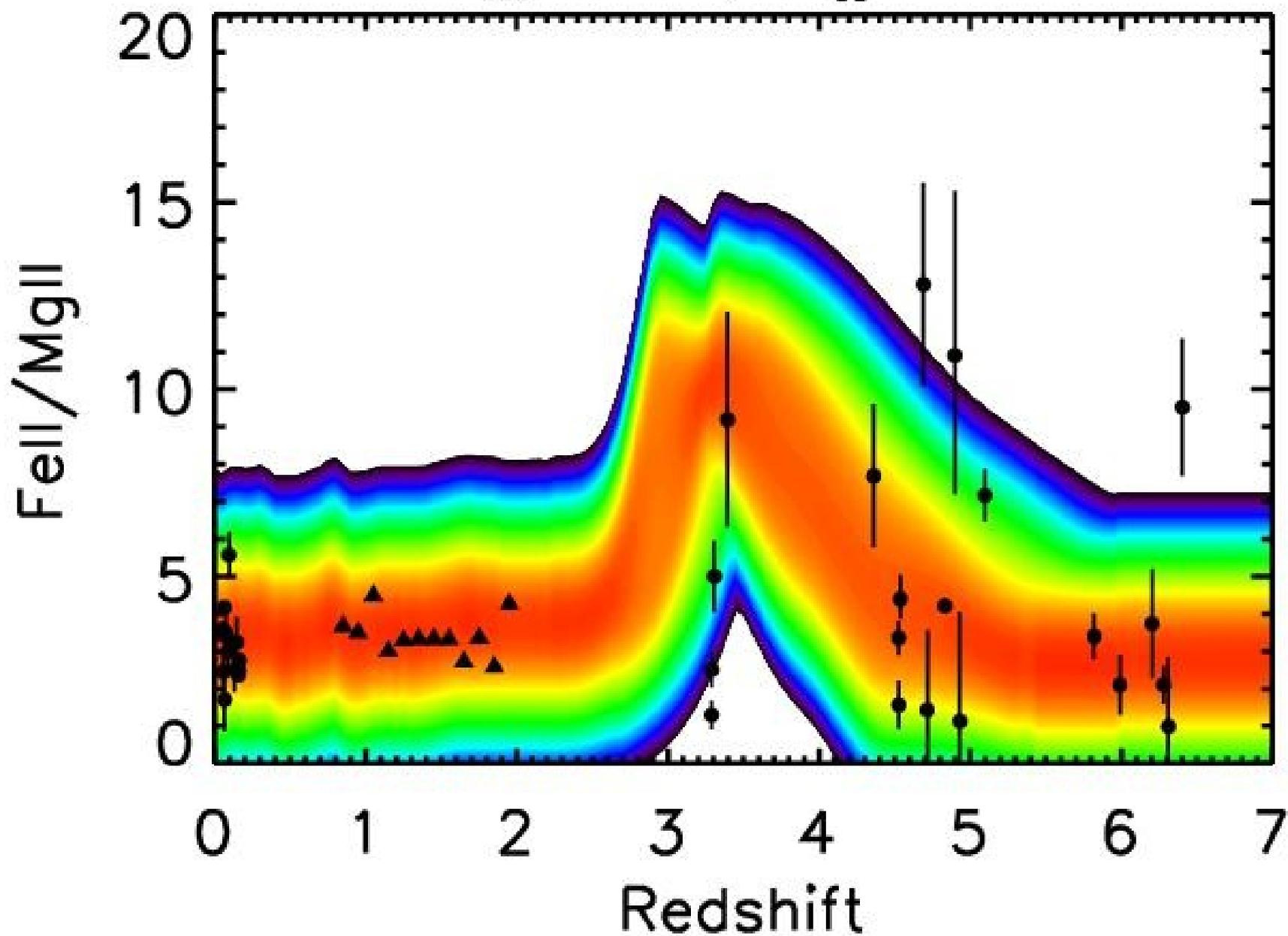
$$\Omega_m = 0.2, \Omega_\Lambda = 0$$



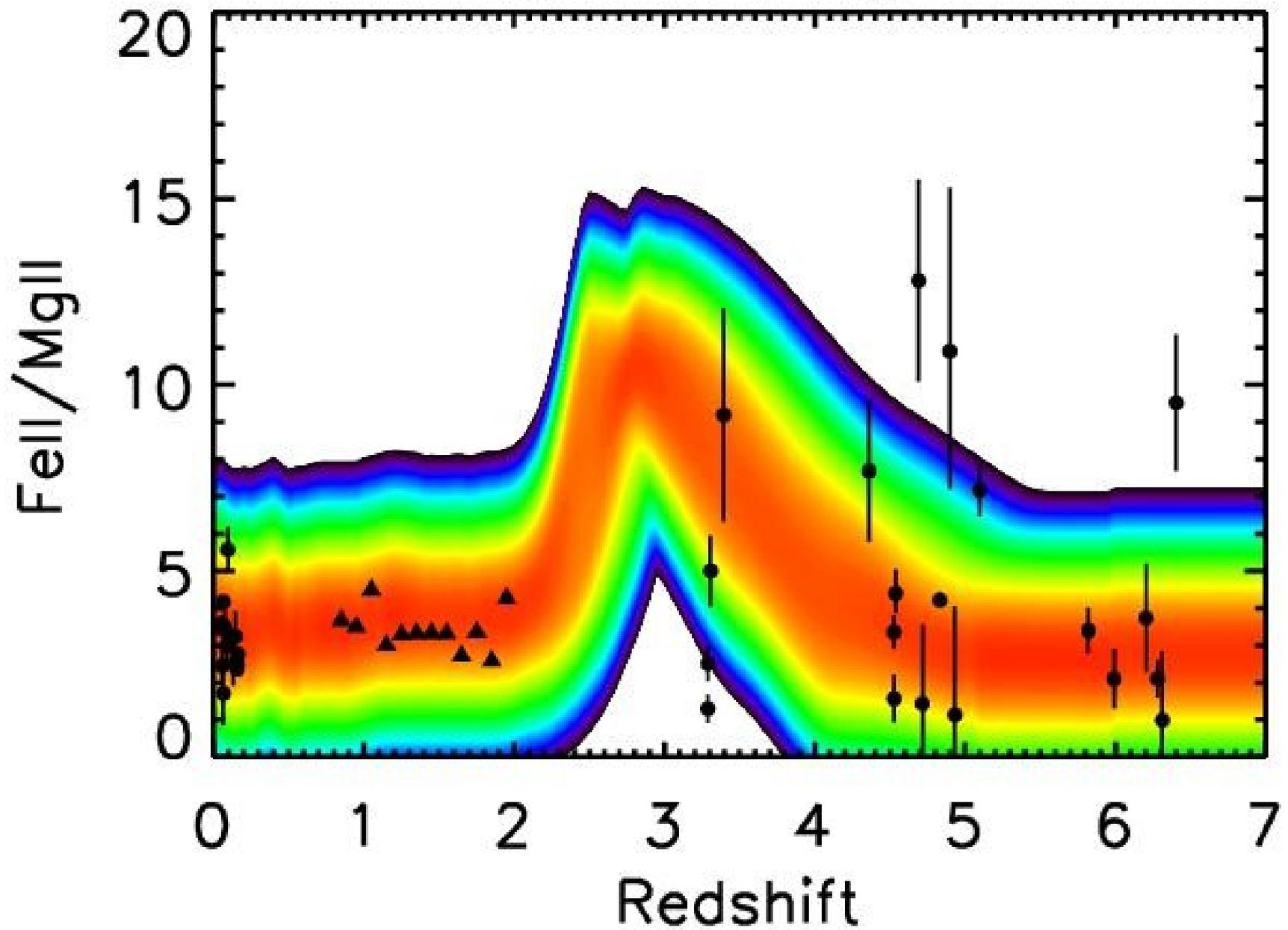
$$\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$$



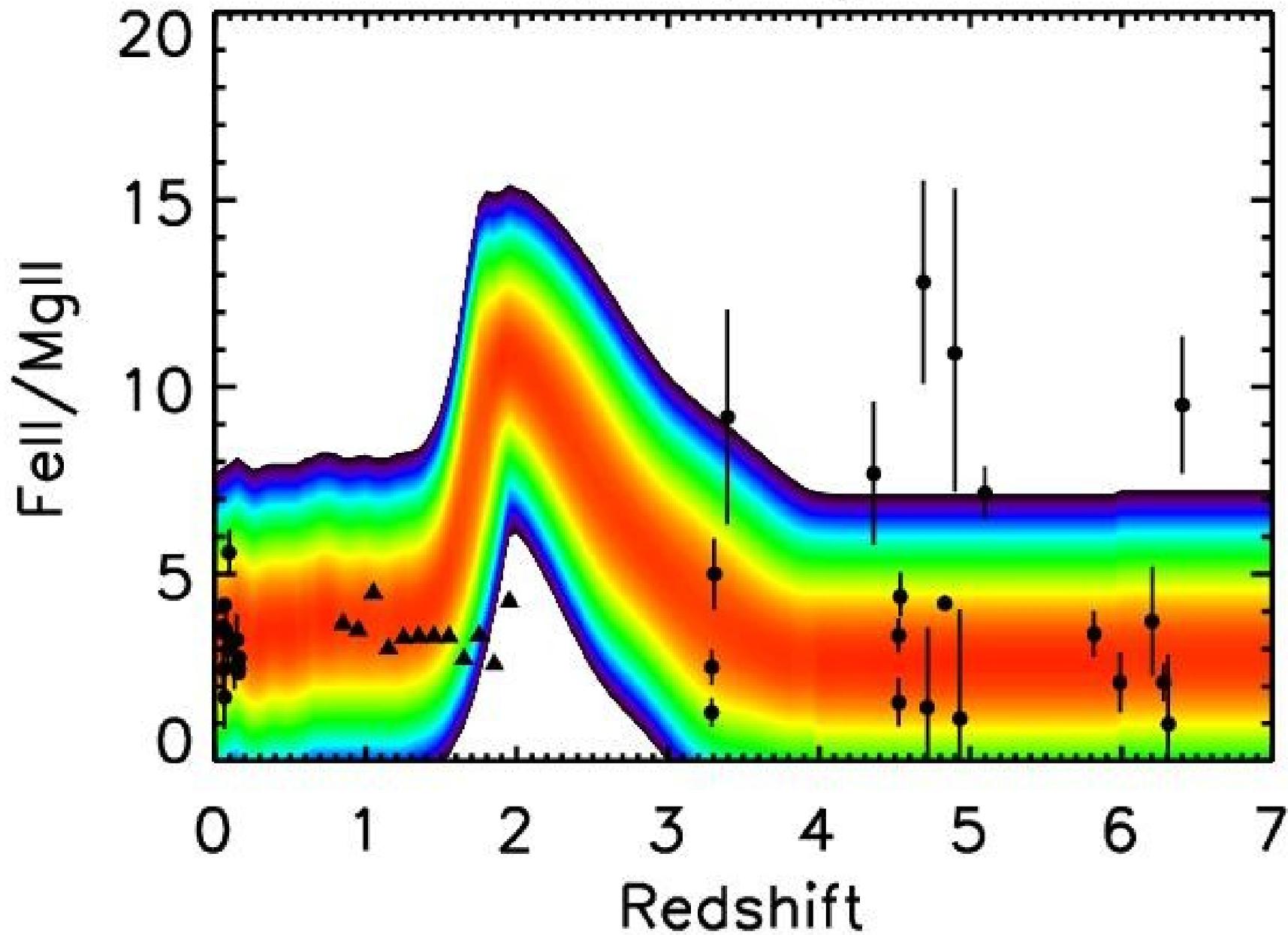
$$\Omega_m = 0.2, \quad \Omega_\Lambda = 0.8$$



$$\Omega_m = 0.2, \quad \Omega_\Lambda = 0$$



$$\Omega_m = 1, \quad \Omega_\Lambda = 0$$





Personal and Biased

NIR Frontiers of Supernova Study

前田 啓一

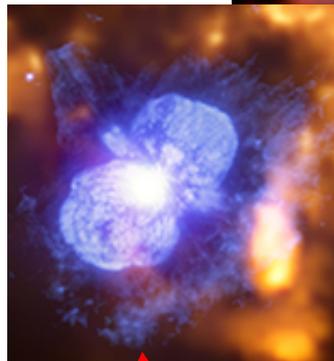
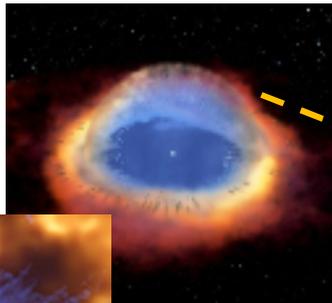
東京大学数物連携宇宙研究機構
(IPMU)



Supernovae

Chandrasekhar WD (binary)

→ SN Ia



Massive star (> 8Msun)

→ SN II/b/Ic

3. Progenitor Search
=> Stellar evolution, etc.

2. SN Search in dusty gals.
=> SN rate, SFR, etc.

4. Light Curve, Spectra
=> Explosion Physics

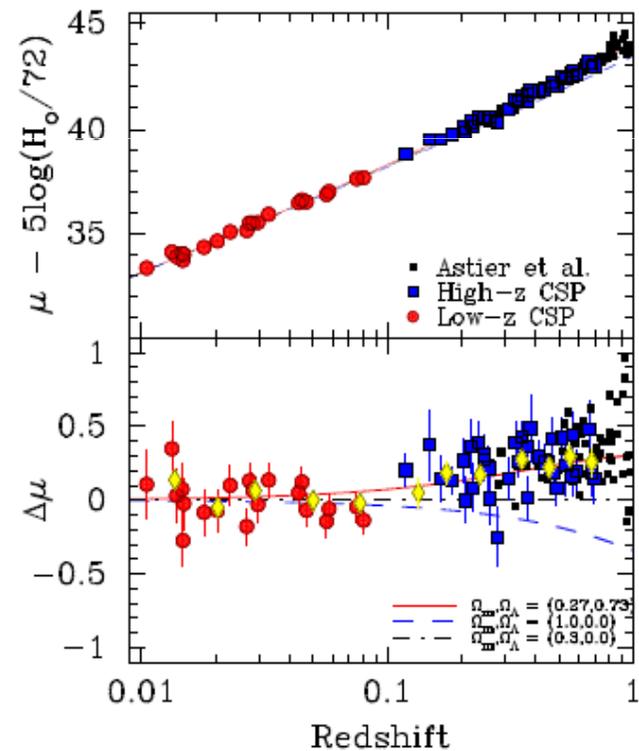
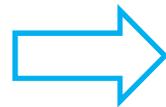
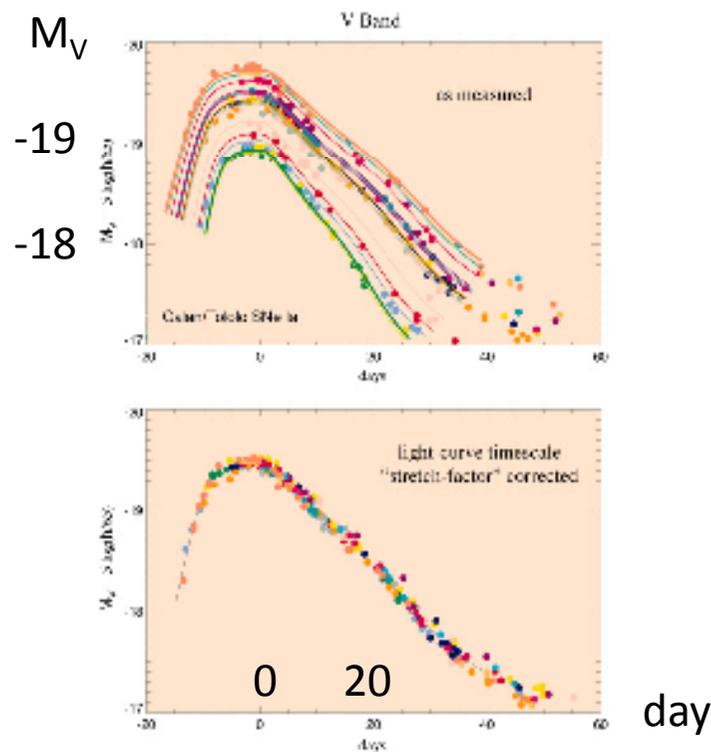
1. Luminous => Cosmology

Expanding ($\sim 10,000$ km/s) metal-rich material
Heating = Thermal energy + $^{56}\text{Ni}/\text{Co}/\text{Fe}$
Cooling = Optical \sim NIR
Time scale \sim days to yrs

SN Ia Cosmology @ NIR

1

- Optical.
 - phenomenological estimate of M_{abs} , then $\sigma \sim 0.2$ mag.

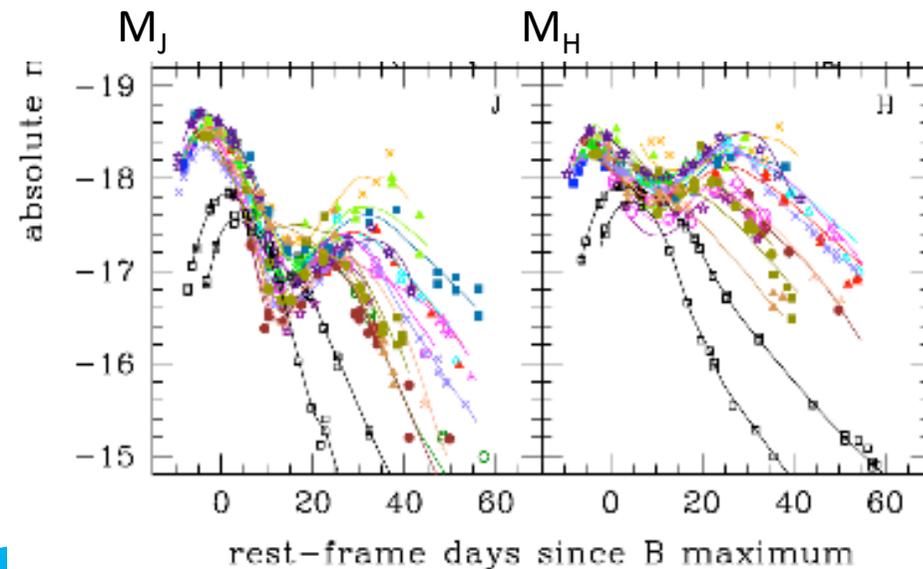
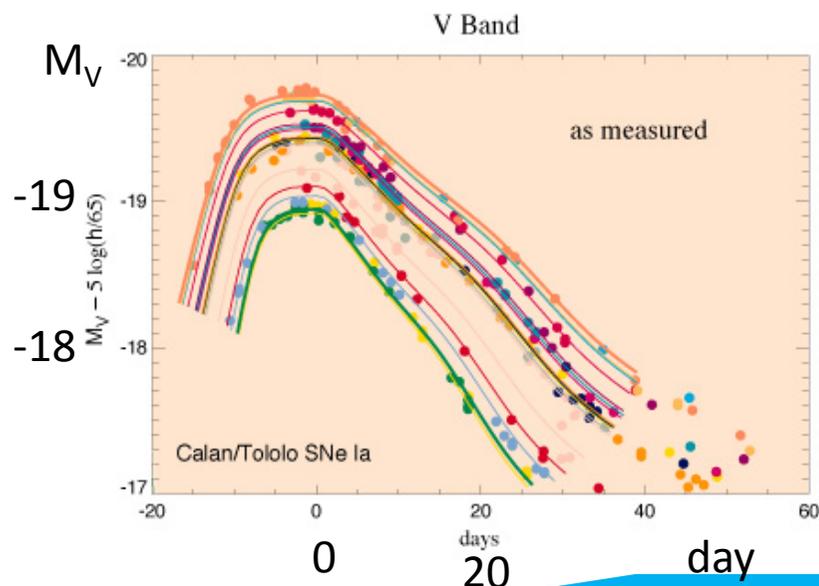


SCP (Supernova Cosmology Project)

SN Ia Cosmology @ NIR

1

- Optical.
 - phenomenological estimate of M_{abs} , then $\sigma \sim 0.2$ mag.
- NIR.
 - **Better standard candles**, $\sigma \sim 0.2$ mag w/o any correction.
 - Dust free.

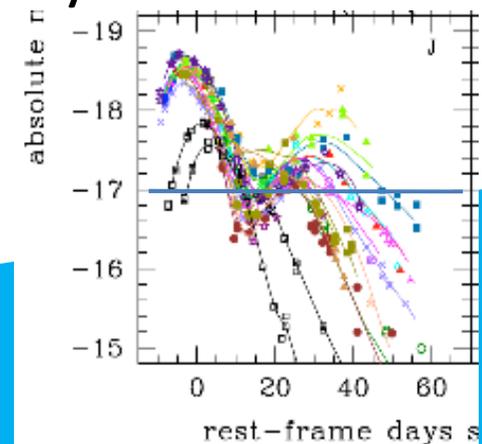


CSP (Carnegie Supernova Project)

SN Ia Cosmology @ NIR

1

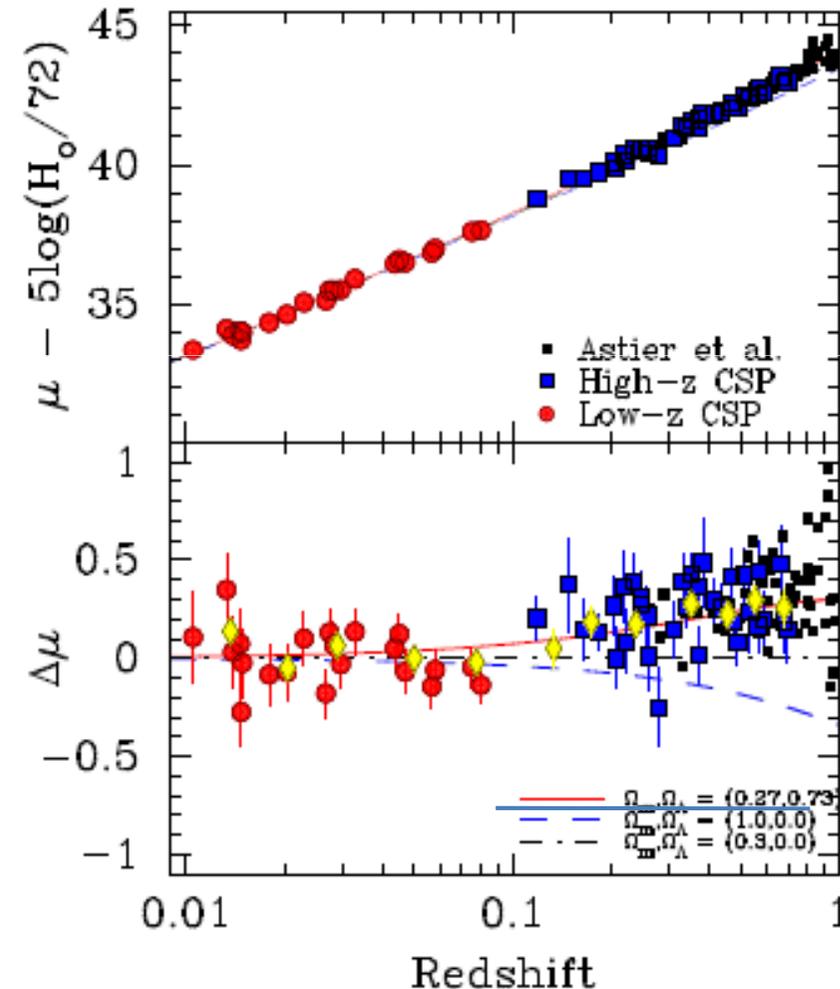
- $M_J < -17 \rightarrow$ up to $z = 0.15$ ($H_{\text{lim}} \sim 22$) – 0.2 ($J_{\text{lim}} \sim 23$).
- **Proposal:**
 - **Cluster Patrol in J and/or H** by TAO.
 - 8' FOV \Rightarrow 1.5Mpc @ $z = 0.2$, $\sim R_{\text{Abell}}$.
 - 100 galaxies /cluster \Rightarrow 1 SNe Ia /year/cluster (underestimate?).
 - **3 cluster x 1 hr x 2 time/week \Rightarrow \sim 10 SNe Ia/3 year survey.**
 - Better strategy will increase the discovery rate.
- **Why TAO?**
 - Need intensive coverage, $< \sim 5$ days.
 - J + H simultaneous imaging for K-cor.



SN Ia Cosmology @ NIR

1

- Does it make sense?
 - @z ~ 0.2, Ω_Λ is already visible.
 - “*a small sample, better precision*” is better than “a large sample, worse precision”?



SN Ia Cosmology @ NIR

1

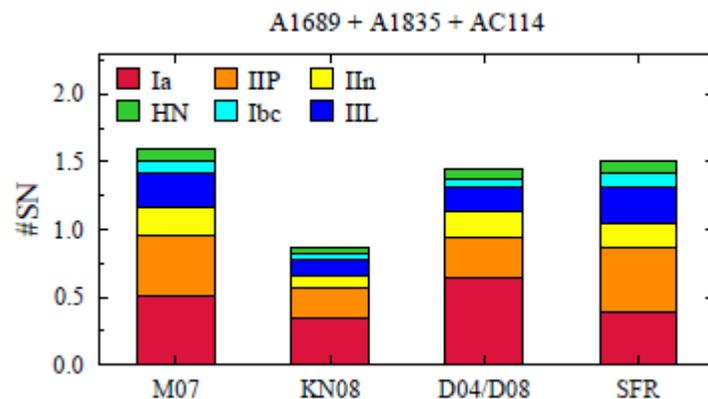
- ***Complementary Scenarios.***
 - ***Mini-TAO and/or MAGNUM.***
 - SN survey (replacing the “patrol” strategy).
 - NIR light curves of nearby SNe Ia (still need test).
 - ***Subaru/FOCAS (ToO).***
 - SN identification.
 - ***JWST.***
 - NIR Spectroscopy of nearby SNe Ia (K-cor.).

Byproduct: Higher-z SN?

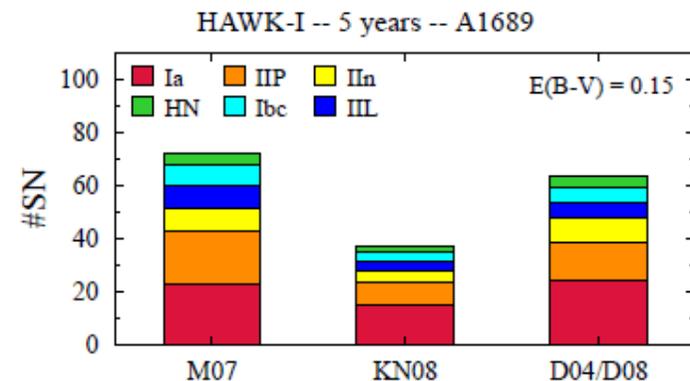
1

- **Monthly deep survey** MAY catch a few SNe @ $z \sim 1 - 2$, by **gravitational lensing**.
 - Complementary w/ the cluster patrol.
 - Useful for rate study?
 - Cosmology (SNe Ia + time delay) is not promising (?).

Stanishev+ 09; Goobar+ 09



VLT/ISAAC, J+Z (2 hrs each; $J_{\text{lim}} \sim 24$)
4 month x 3 clusters



VLT/HAWK-I, J (2 hrs each; $J_{\text{lim}} \sim 24.6$)
5 yrs x 1 clusters

Obscured SNe Search

2

- ***SN search has been conducted in optical.***
 - $\text{SNuB} = \text{SNe} / 100\text{yr} / 10^{10} (L_B/L_{\text{sun}})$.
- ***A large fraction of SF = dusty starburst galaxies.***
 - SNe in LIRGs (+ULIRGs) are HIDDEN.
 - L_B in these galaxies is NOT a good measure.
- ***Cosmic SN rate is then highly model dependent.***
- Importance of ***DIRECT SN detections*** in dusty galaxies.
 - Go to NIR. SNUJ, SNUH, SNUK.
 - Core-Collapse, SNe II (Ib/c is more difficult).

Obscured SNe Search

- ***A lesson from the past study*** (Grossan+ 99).
 - Even in NIR, a large fraction of SNe are likely missed.
 - Why? Host galaxy nucleus.



- **AO**... VLT just started. One detection. Continue?

Obscured SNe Search

2

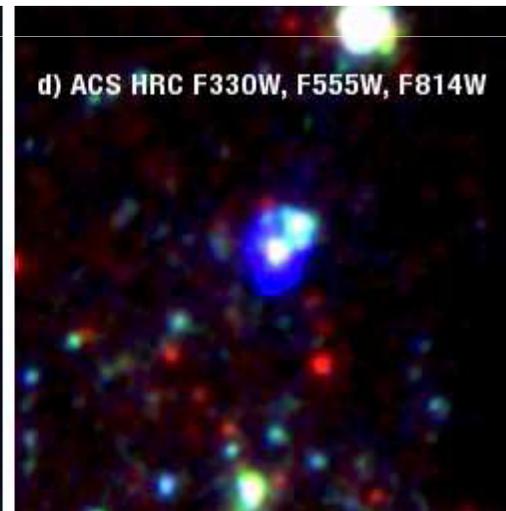
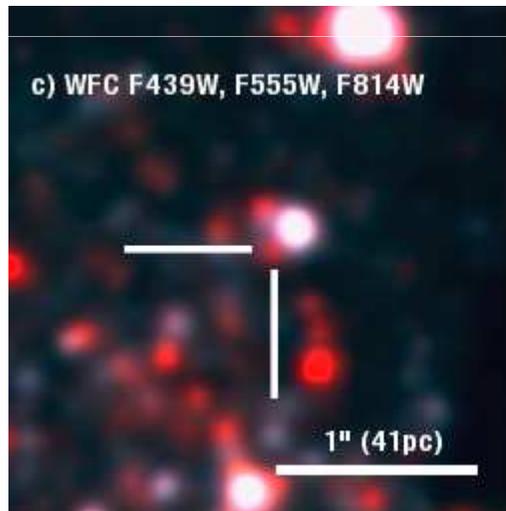
- $M_J \sim -18$, $A_J \sim 3 \rightarrow J = 20 - 21$ @ $z = 0.03$. $\rightarrow 10$ min?
- **Proposal.**
 - **LIRGs AO patrol** at $z < 0.03$.
 - $L_{\text{FIR}} \sim 10^{10-11} L_{\text{sun}}$, 10 (?) SNUFIR $\Rightarrow \sim 0.1 - 1$ SN /yr/gal.
 - **30 galaxies x 10 min/month** $\Rightarrow \sim 3 - 30$ SNe II/1 year survey.
 - Exposure time should be optimized.
- **Why TAO?**
 - NIR AO. Patrol observations (hard w/ 8m at least now).

Direct Progenitor Search in NIR

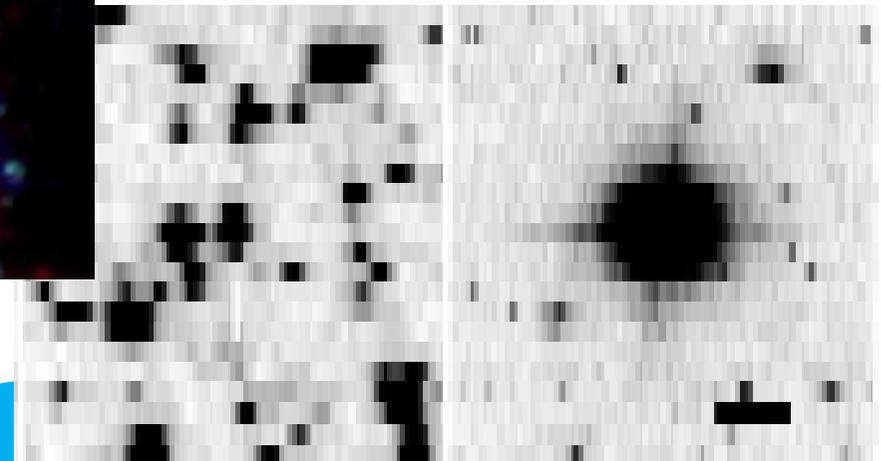
3

- ***Pre-SN image vs. post-SN image.***
- Intensively done by HST. VLT/NIR/AO started.

SN IIP 2005cs (Maund+ 05), HST



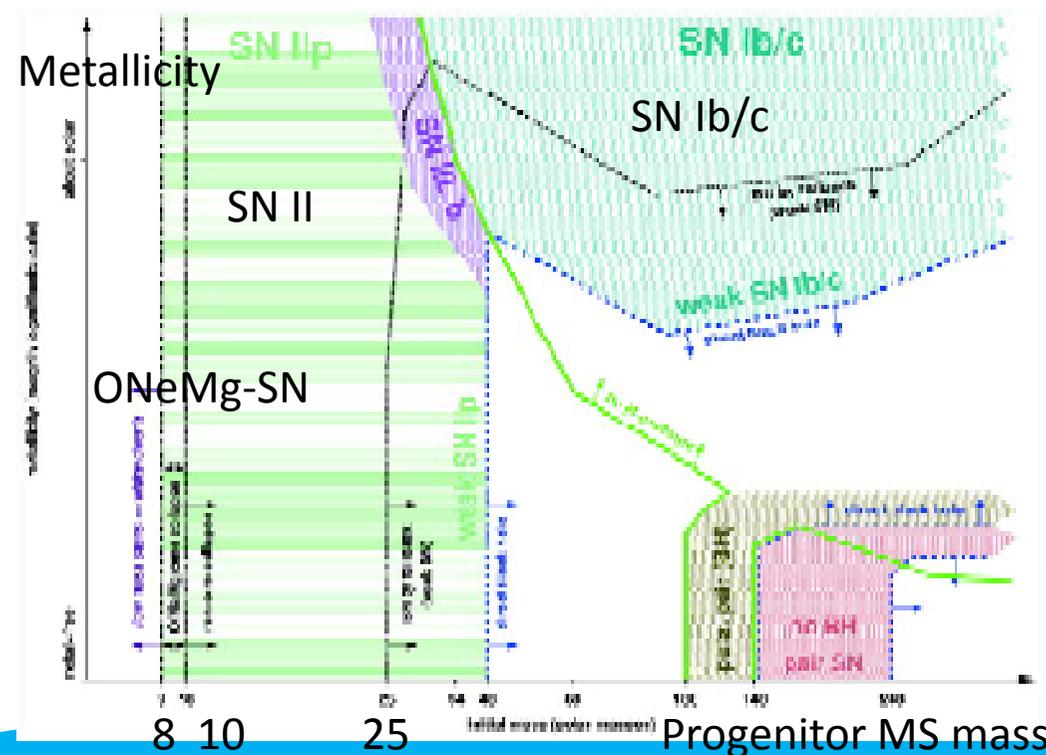
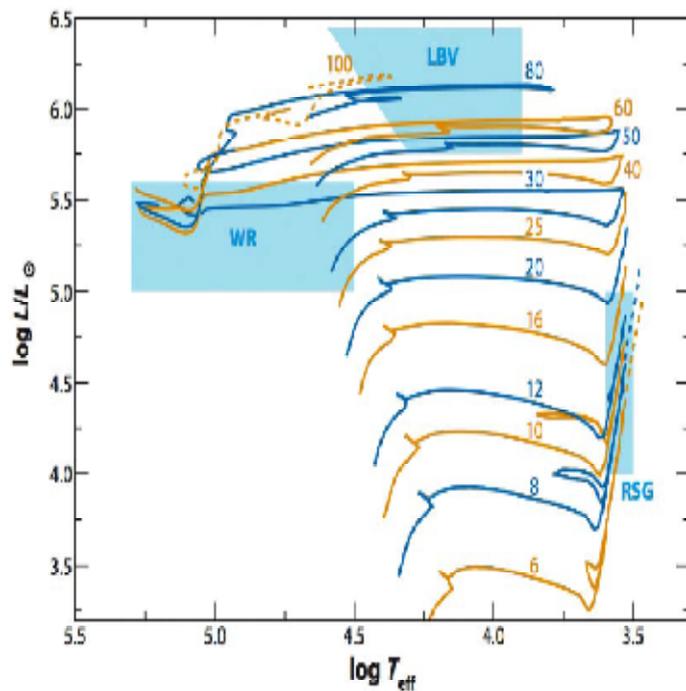
SN IIP 2008bk (Mattila+ 08)
VLT+NACO, K, AO



Direct Progenitor Search in NIR

3

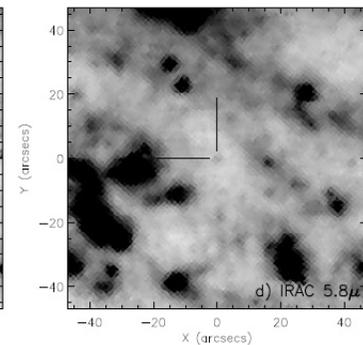
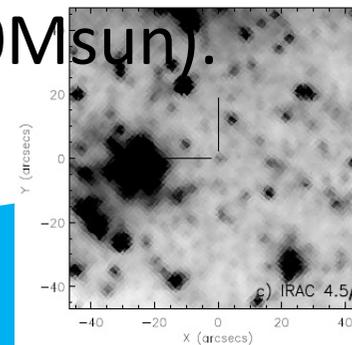
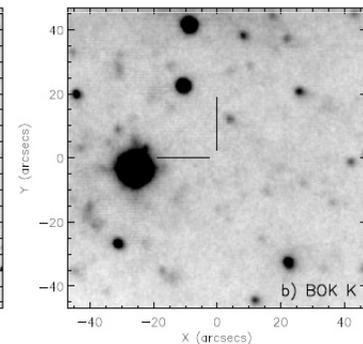
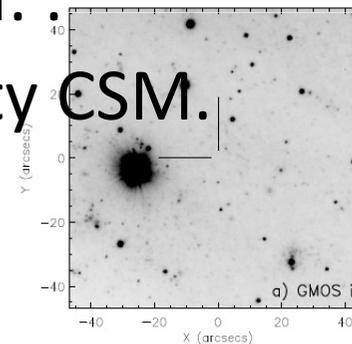
- Testing stellar evolution and explosion theories.
- Complementary w/ e.g., light curve modeling.



Direct Progenitor Search in NIR

3

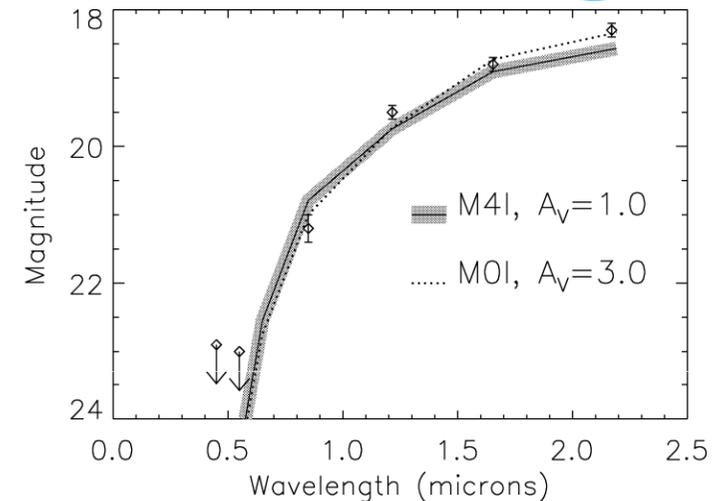
- ***NIR, a possible new window for a class of SNe.***
- SN 2008S.
 - Progenitor NOT detected in optical.
 - IR detection (3-4 μ m), Spitzer.
 - $\sim 6 - 8M_{\text{sun}}$, hidden by dusty CSM.
- **ONeMg core-collapse?**
 - Theoretically expected (8-10 M_{sun}).
 - Potentially abundant (faint).



Direct Progenitor Search in NIR

3

- 2008bk, J ~ 19 @ 4 Mpc
 - \rightarrow up to $\sim 20 - 30$ Mpc ($J_{\text{lim}} \sim 23$).
- **AO + Wide Field necessary.**
 - 0.2" seeing $\rightarrow 20$ pc
 - 8' FOV $\rightarrow 50$ kpc ($> \sim R_{\text{gal}}$)



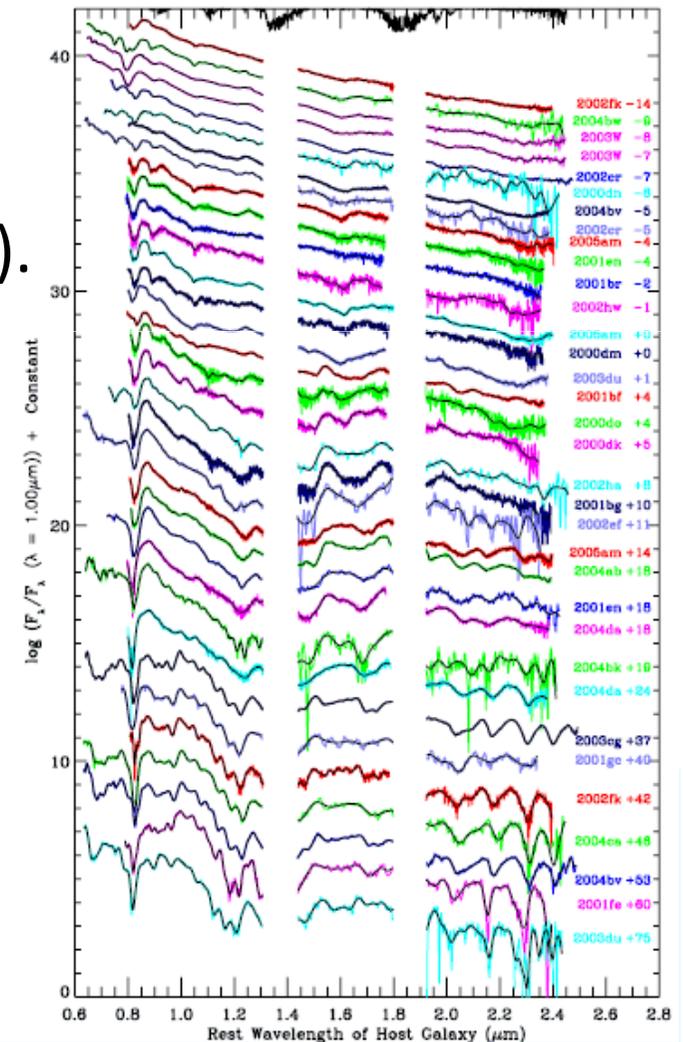
- **Proposal:**
 - AO imaging of nearby large galaxies (anyway should be done!).
 - **Two AO images @ a few weeks / a few yrs AFTER SN** (disappear?).
- **Why TAO?**
 - AO/NIR (but can be done by others....). Optical search maybe biased.
 - Potentially large sample coverage (vs. JWEB, 8-m).

NIR Nearby SN Followup

4

- *SNe Ia @ early phases (< 3 months).*
- *SN Search by MiniTaO/MAGNUM?*
- $M_J = -16, J = 19 - 20 @ z \sim 0.03.$
 - J, H Light Curves (“standard” candle).
 - ~15 SNe Ia
 - ~ 7 w/ good temporal coverage.
 - NIR Spectra.
 - ~ 35 SNe Ia, mostly single epoch.
- Outer layers
 - Compositions \rightarrow progenitors.
- Template for Cosmology.

Marion+ 09



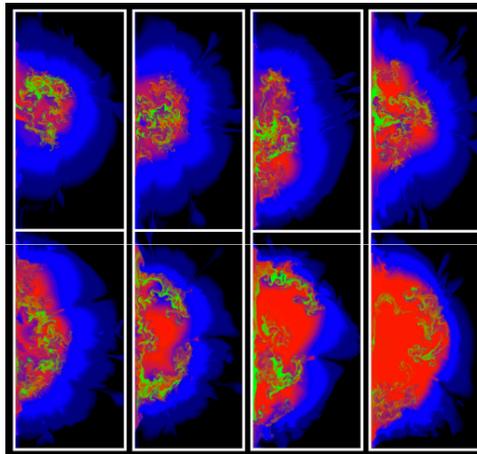
NIR Nearby SN Followup

4

- ***SNe Ia @ late phases (> 3 months).***
- SN 2003hv@20 Mpc... J ~ 18/19/20 @ 100/200/300 days.
 - J, H Light Curves.
 - ***Only a few published, no good temporal coverage (1 in 100 days).***
 - NIR Spectra... “semester” proposal is a problem (e.g., Subaru).
 - ***Motohara, Maeda+ 06: 3 SNe Ia @ 200 – 400days (single epoch).***
 - ***$J_{lim}@4hr, S/N = 10 \dots 19 \text{ mag w/o AO}, 20.5 \text{ mag w/AO}.$***
- A large fraction emitted in NIR (thermal structure in SNe).
- e⁺ contribution. Escape fraction => B-filed, e⁺ in the Galaxy.
- ⁵⁷Co.
- Dust (core-collapse SNe).
- Explosion Geometry.

NIR Nearby SN Followup

- *Explosion Geometry (example of science cases).*



Recent models...
 Asymmetric.
 Specific Axis?

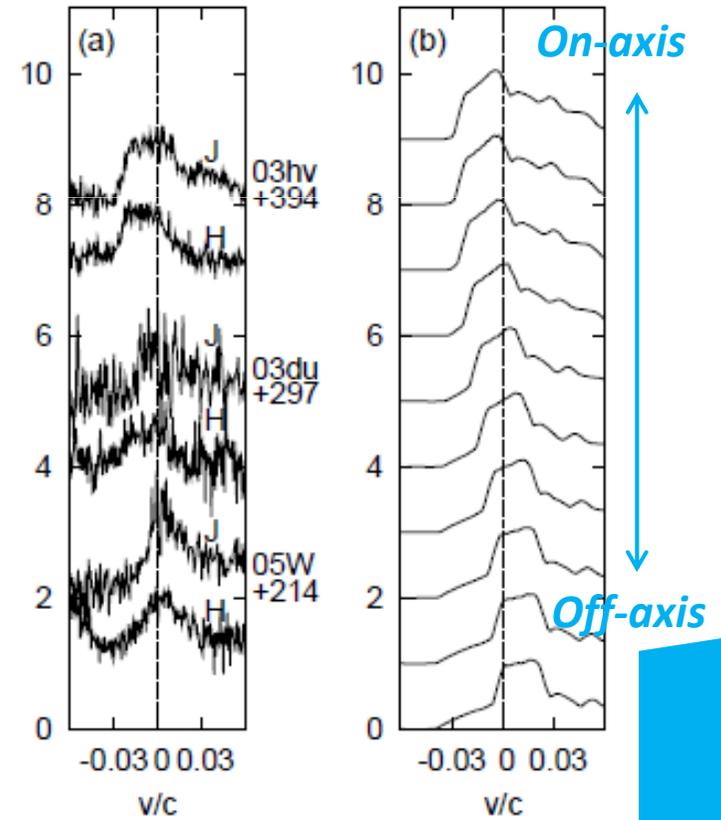
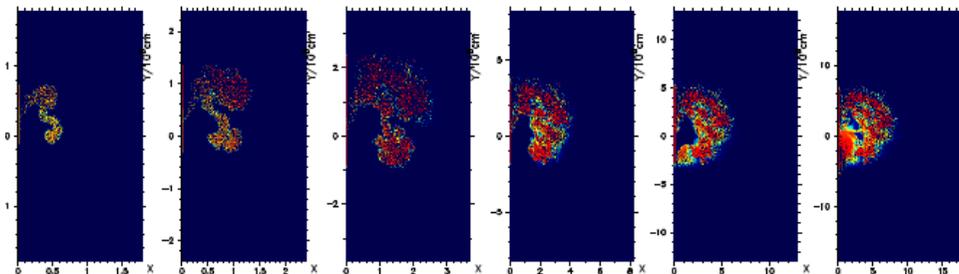


NIR can probe it!

Maeda, Taubenberger+ 09, ApJ, submitted

Kasen, Roepke, Woosley 09, Nature

Maeda, Roepke + 09, ApJ, submitted



Data from Motohara, Maeda+ 06

Summary

- **Proposed scenarios.**

- **SN Ia cosmology → Hubble diagram @ $z \sim 0.2$.**

- 6 hr / week x 3 yrs: 10 SNe Ia w/ good luminosity estimate.

- **SN II in dusty gals. → “True” SN rate.**

- 5 hr / month x 1 yr: 3 – 30 SNe II.

Best for TAO?

- **Progenitor Search → NIR likely a new window.**

- Post-SN images taken by, e.g., AO-NIR nearby gal. survey.
- Another two post-SN images. “Cheap”.

Best for TAO?

- **Nearby SNe followup → Good dataset. Cosmology.**

- Sampling nearby SNe. **MiniTAO, MAGNUM?**

NIR Variability Survey for AGN and SNe

諸隈 智貴
(国立天文台)

TAO/NIRCAM

Supernovae
AGN

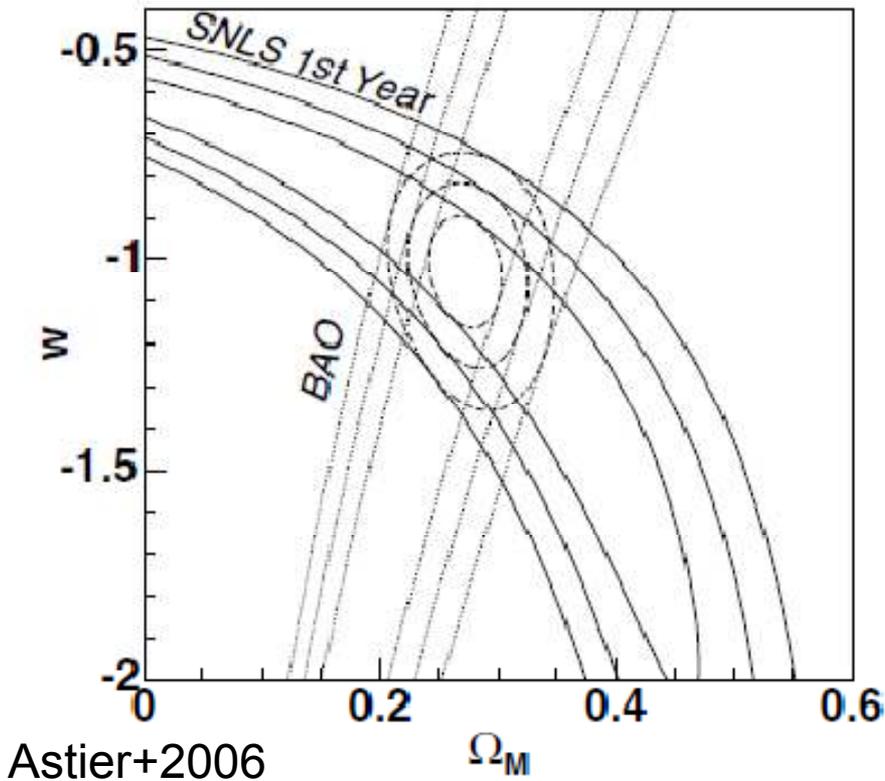
TAO/NIRCAMの特長

1. 広視野: 9.6'φ
2. 2バンド同時撮像
 - 効率up
 - 短時間変動天体のSED
3. 多天体スリット分光
4. 柔軟性の高い観測
 - モニタリング
 - 悪天候のcompensation
 - ToO

(high-z)超新星サーベイ

cosmology

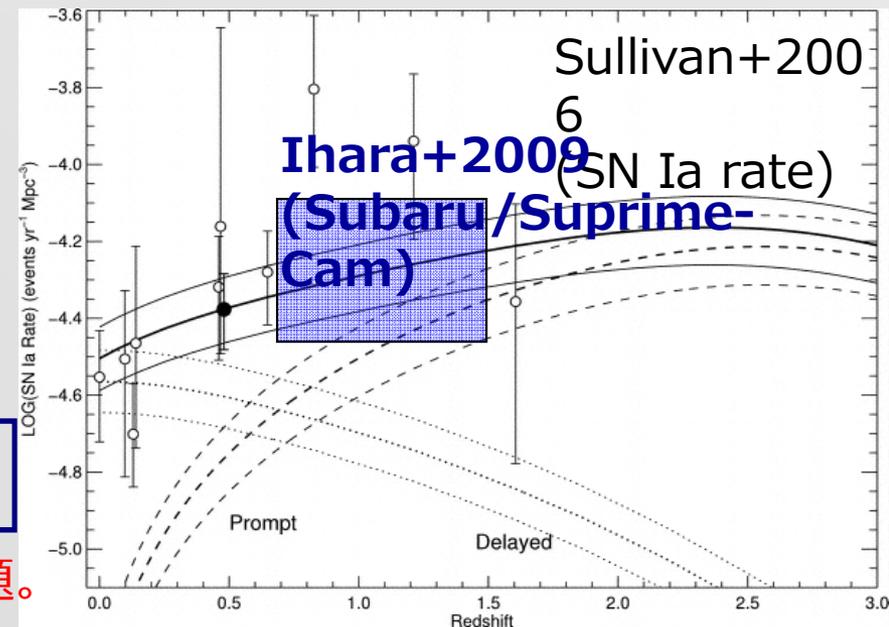
Systematicsが問題。



→ 重力崩壊型(CC)
→ 炭素爆燃型(Ia)

SN Ia/CC rate

Statistics/Systematics(/depth)が問題。



超新星サーベイのこれまでの常識(?)

- SN Iaは $z \sim 1.5$ くらいまでは観測可能。
- core-collapse (CC) SNは、一般的には、SN Iaより暗い。
- CC SN rateは $z \sim 1$ に到達するのがギリギリ。

超新星サーベイのこれまでの常識(?)

- SN Iaは $z \sim 1.5$ くらいまでは観測可能。
- core-collapse (CC) SNは、一般的には、SN Iaより暗い。
- CC SN rateは $z \sim 1$ に到達するのがギリギリ。

超新星サーベイの最近の常識(?)

- SN Iaは $z \sim 1.5$ くらいまでは観測可能。
- core-collapse (CC) SNは、一般的には、SN Iaより暗い。
- が、**SN IIn**は明るいのでhigh- z でも観測可能。
- **重力レンズ効果による増光**を有効利用。
- CC SNは $z > 2$ でも観測可能。CC SN rateから星形成史、IMFへ。
- hostless (or diffuse host) SNは変なのが多い?

High- z SN Ia cosmology/rate

Totani, TM+2008

Type Ia Supernova (較正可能な標準光源)

- 2つのpopulation???
 - tardy (delayed): 星形成後、しばらく時間がたった後(>1 Gyr)、爆発。
 - prompt: 星形成後、すぐに爆発(<1 Gyr)
- 2種類のprogenitor system???
 - single degenerate (SD)
 - double degenerate (DD)
- dust減光の不定性 + intrinsic color
← 縮退。補正が難しい。
(intrinsic scatterはrest-frame U-bandで顕著)

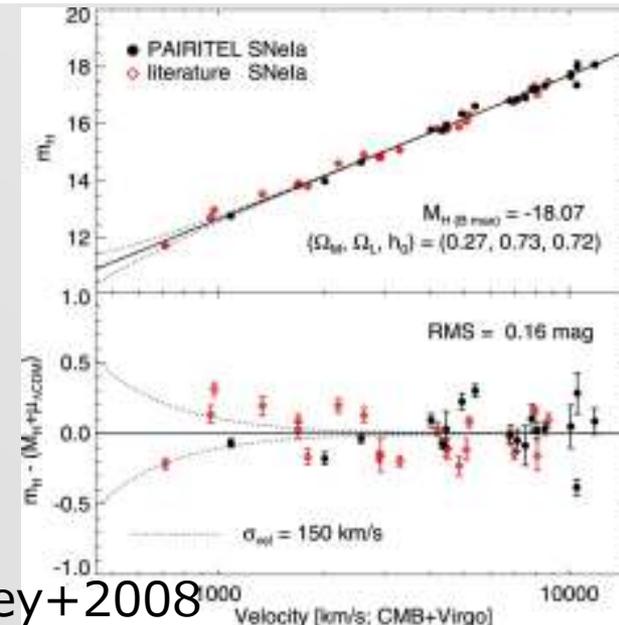
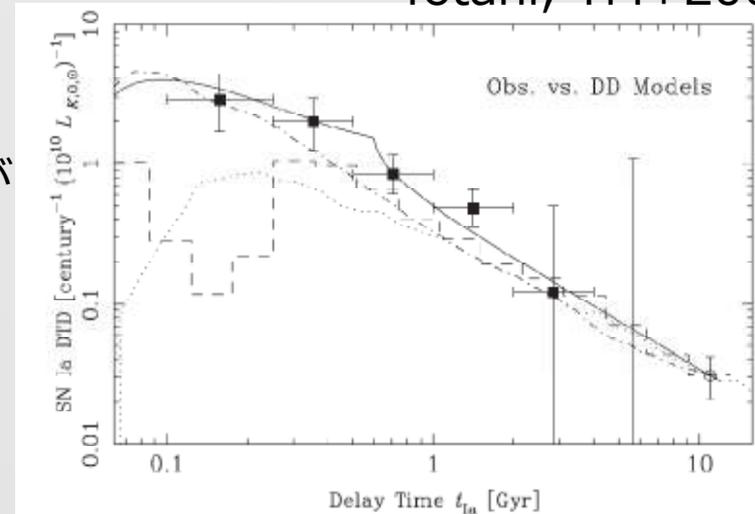
Statisticsは十分。Systematicsが問題。

Rest-frame red-optical/NIR \wedge : prompt populationも見つけやすい?

rest-frame I-band: Freedman+2009 ($z < 0.7$)

rest-frame H-band: Wood-Vasey+2009 (nearby)

Dust-free環境: 楕円銀河に特化してサーベイ

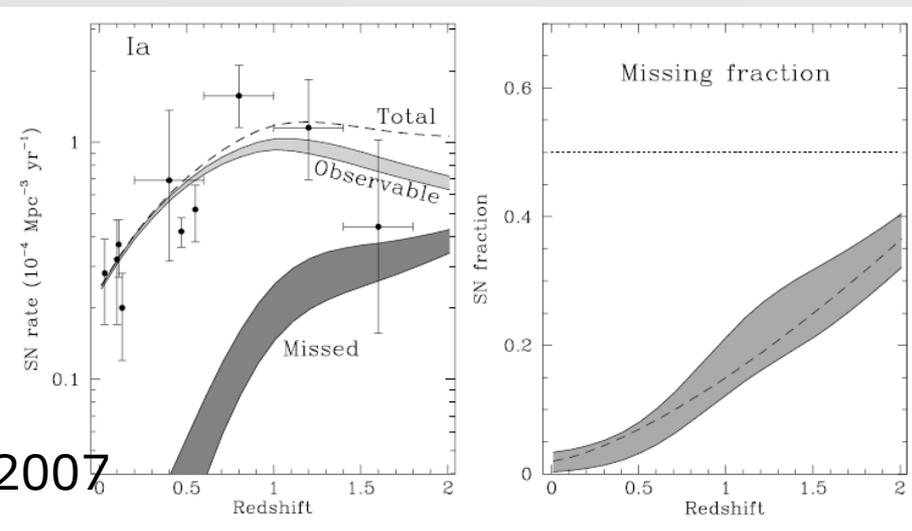


Wood-Vasey+2008

High- z SN Ia cosmology/rate

- dust-free cosmology
 - optical (Suprime-Cam/HSC)のNIR follow-up (J-band)
 - $z > 1$
 - $z \sim 0.5$: opticalでのextinction calibration rest-frame B,V
- dust-free SN rate
 - uncertain missing fractions in optical
 - Ia/CC SN survey in nearby/low- z galaxies?

Mannucci+2007



Ground-Based Spectroscopy for *SNe Ia* at $z > 1$

Subaru/FOCAS

22800sec

波長分解能 $R \sim 500$

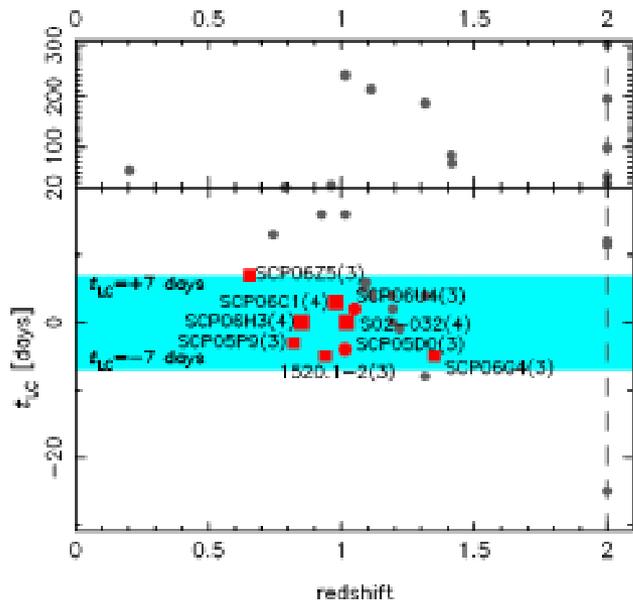
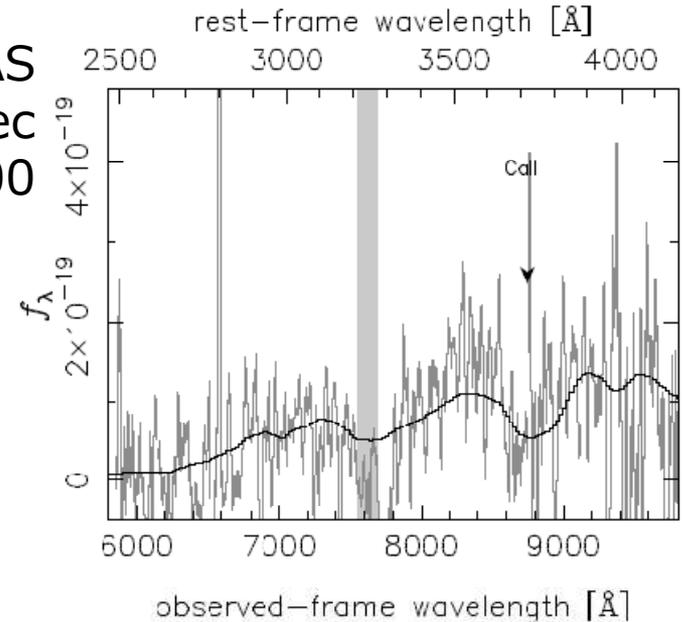
タイプ分類: Ia or CC

地上望遠鏡でのSN Ia分光同定

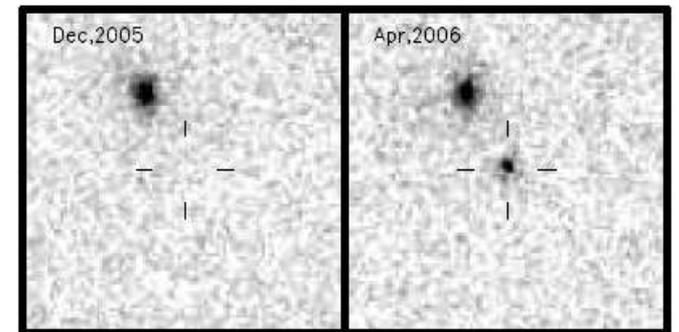
最遠記録。 $z=1.35$ 。(TM+2009, submitted)

cf. HST/ACS grismで $z=1.39$ (Riess+2007)

SN Iaに特有なfeature: $\sim 4000\text{\AA}$ (rest-frame)



最大光度付近での
分光の重要性



- 機動性の高いallocation (ToO?)
- $\sim 8000\text{\AA}$ までの分光能力
- NIR (J-band) w/ AO

(high-z) SN rate

銀河観測とは独立なSFHの研究

- 銀河の明るさに依存しない。
- Iaでも $z \sim 1.5$ 。CCはがんばっても $z \sim 1$ 。もどかしい。

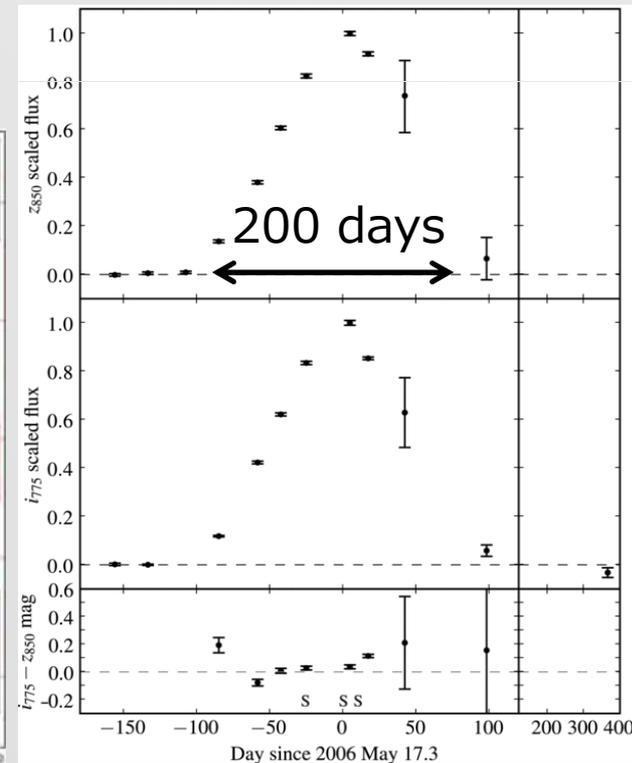
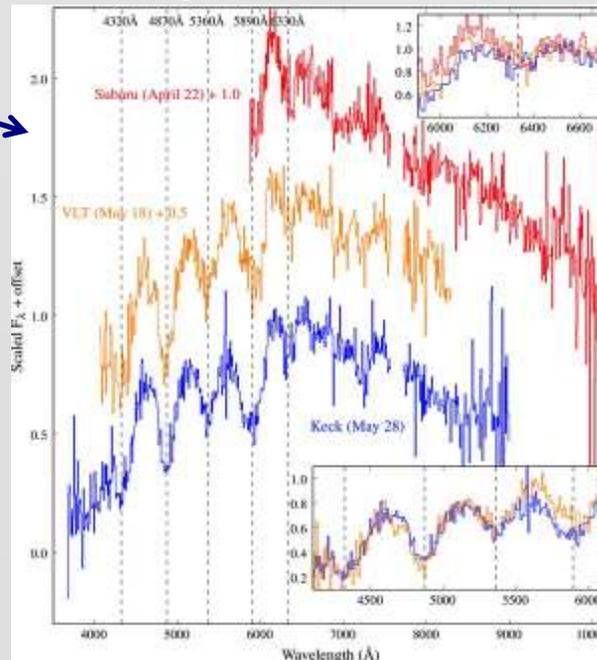
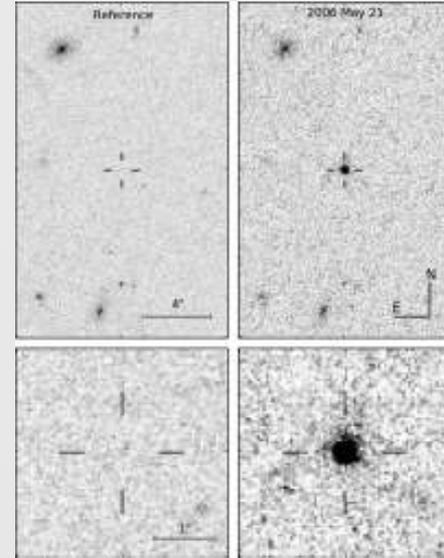
“変な”超新星が結構見つかってきている。

- SN 2006gy (NGC1260)

- **SCP06F6**

- SN 2001gl

母銀河がないor
暗いものが多い。
Intergalactic???



Gravitational Telescope

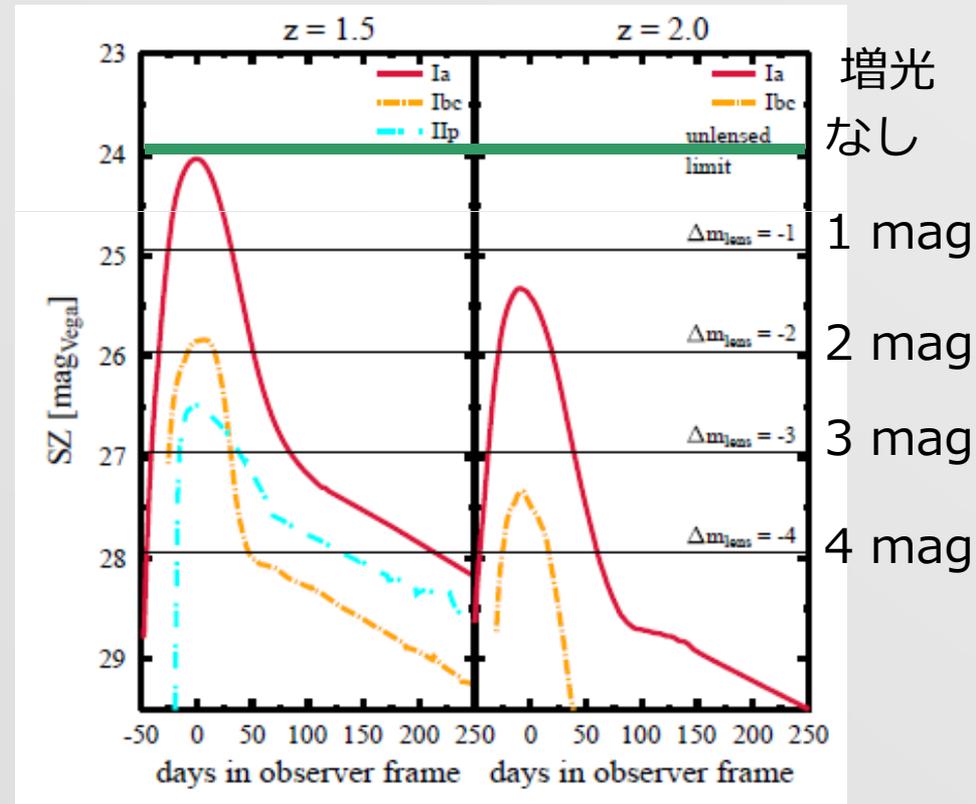
「銀河団により重力レンズされた超新星を探す!!!」

Stanishev et al. 2009, A&A, in press
(arXiv:0908.4176)

“Near-IR search for lensed
supernovae behind galaxy clusters: I.
Observations and transient detection
efficiency”

Goobar et al. 2008, A&A, in press
(arXiv:0810.4932)

“Near-IR Search for Lensed
Supernovae Behind Galaxy Clusters -
II. First Detection and Future
Prospects”

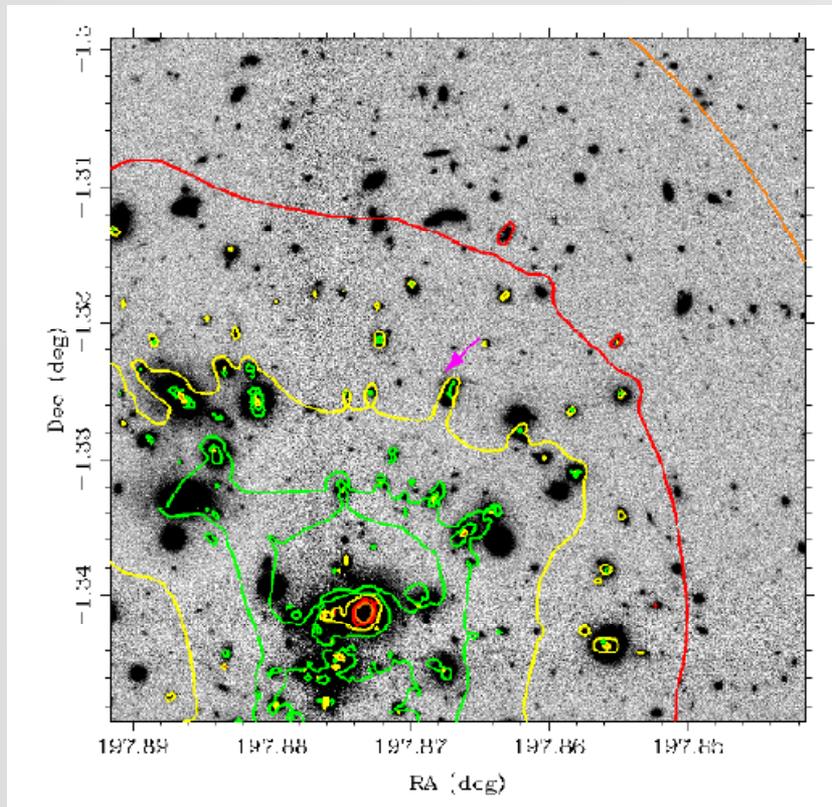


Gravitational Telescope

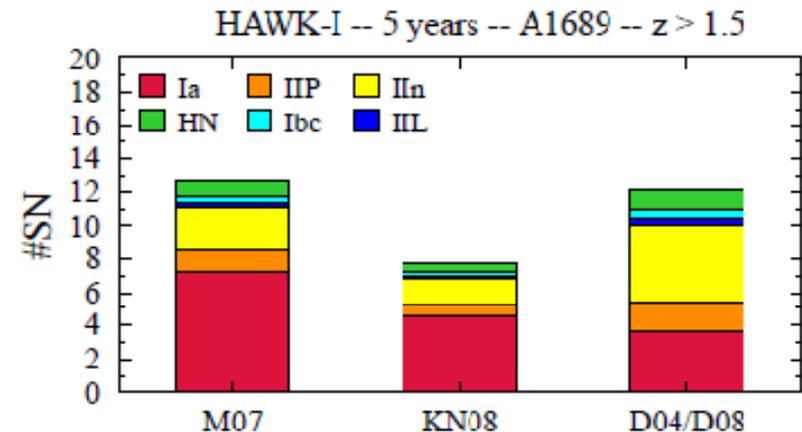
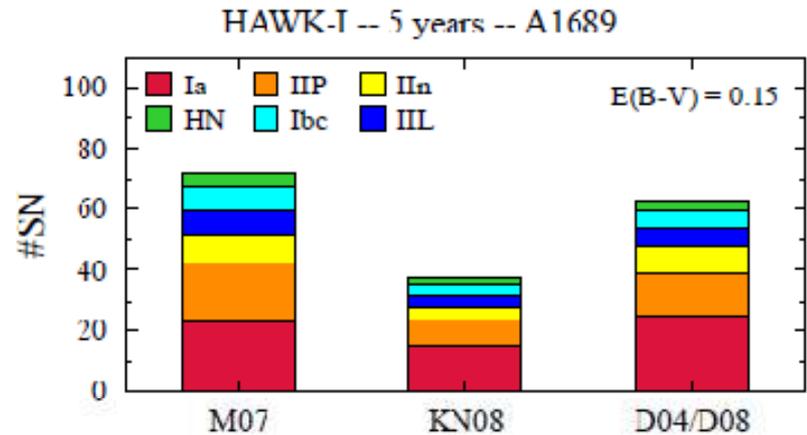
~ NIR survey for $z > 2$ SNe ~

SN IIP at $z=0.59$ を発見 (1つ)
w/ VLT/ISSAC (2.5'x2.5')

A1689 ($z=0.183$) magnification map



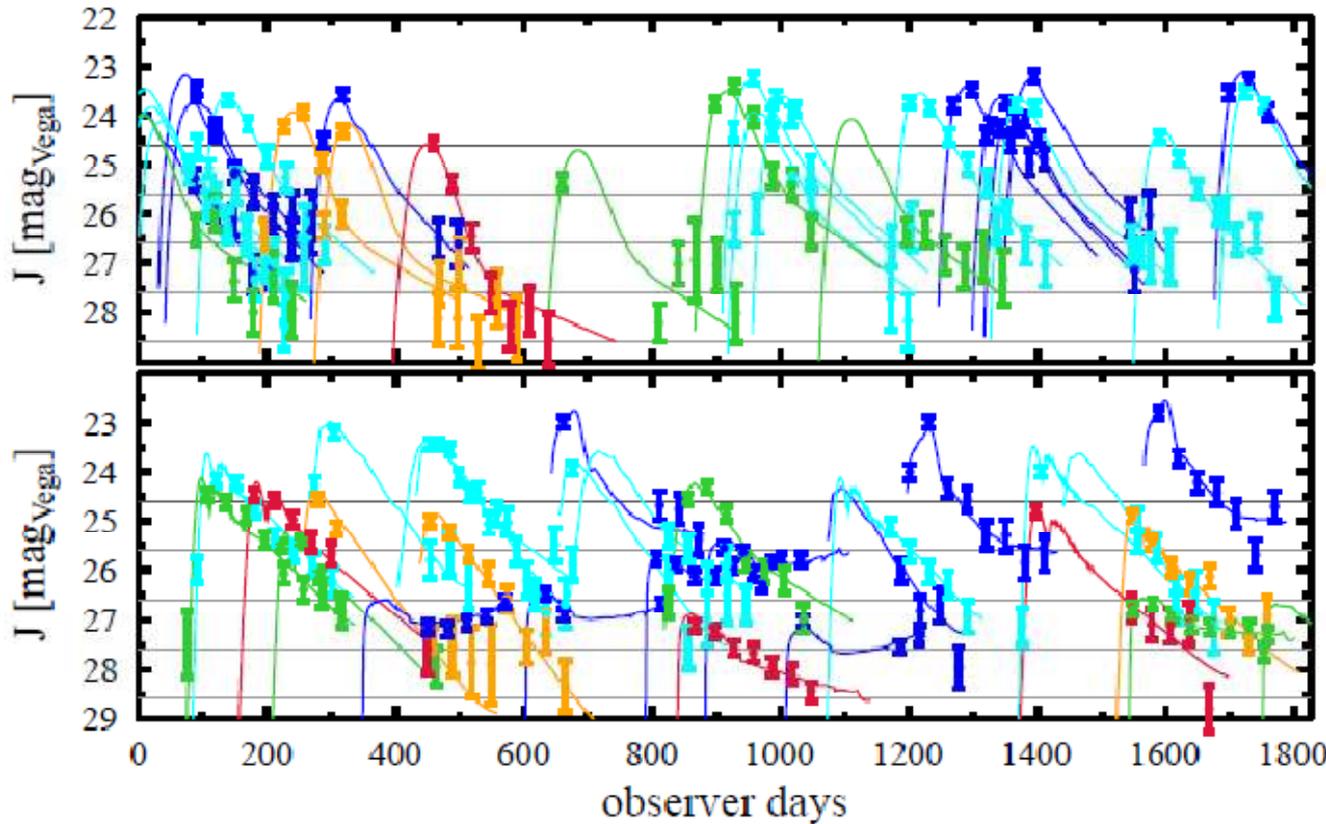
w/ VLT/HAWK-I (7.5'x7.5')



Gravitational Telescope

~ NIR survey for $z > 2$ SNe ~

Ia



5 years
VLT/HAWK-I

CC

SN IIn at $z > 2$

SN IInは

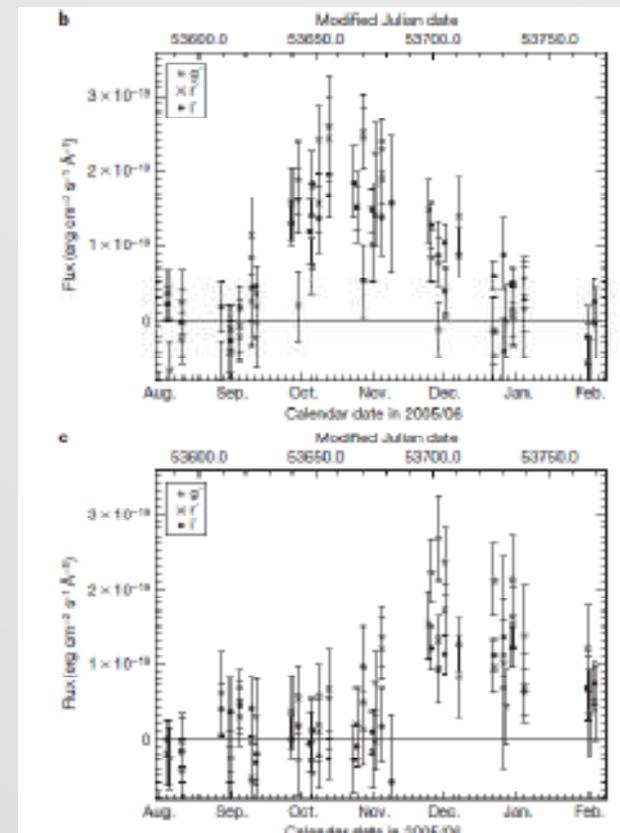
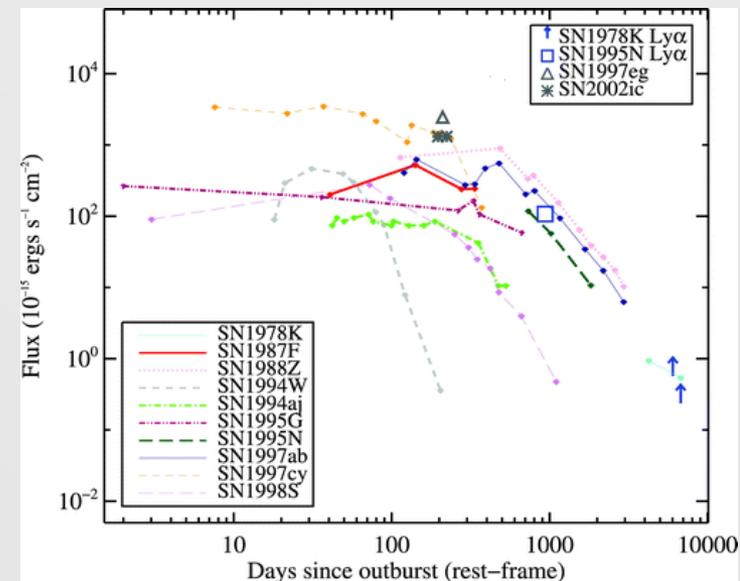
- 非常に明るい(MB \sim -19mag)

- blue spectrum

なので $z > 2$ でも受かる。(Cooke 2008)

Supernova Legacy Survey (SNLS)のデータ(CFHT/MegaCam)を使って $z > 2$ のSN IInを2つ見つけた。(Cooke+2009)

$z \sim 2$ だとJバンドはrest-frame U,B視野の観点からはopticalの方がベター?



High- z Supernovae Survey

地上からの観測の限界。
どうしても天候に左右される。

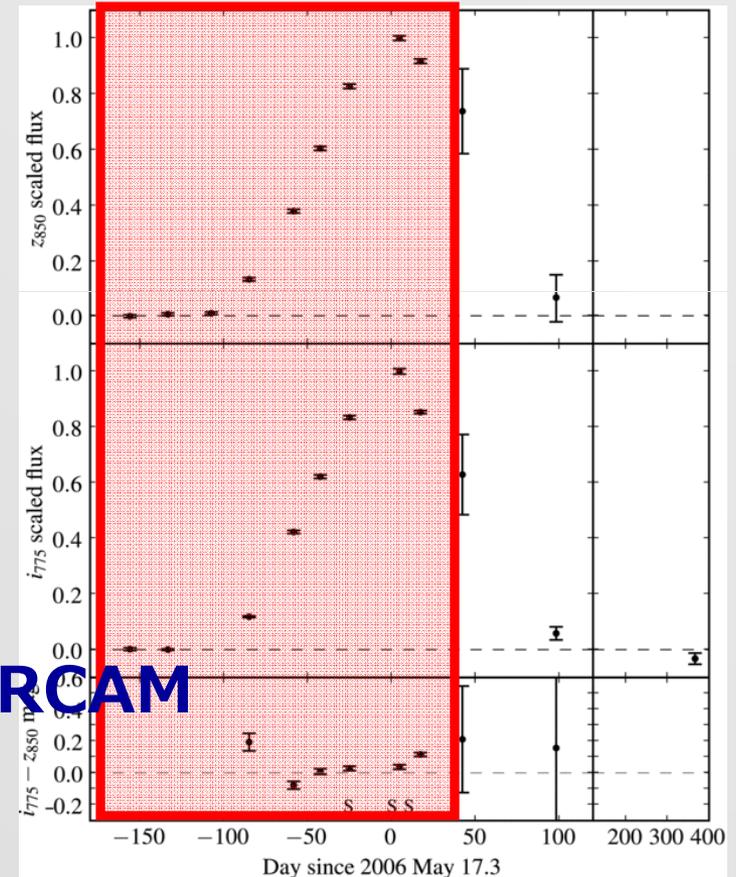
安定した天候

and/or

悪天候の場合のcompensation

が非常に重要。

Subaru/MOIRCS << TAO/NIRCAM



AGN monitoring

- NIR variability survey for AGN
- Supermassive black hole (SMBH) binary
- quasar 母銀河

NIR variability survey for AGN

低光度ほど変光大 in UV/optical (Vanden Berk+2004など)
→ 低光度ほど変光大 in NIR???

type-2 AGNのdustトーラスの変光。

タイムスケールはopticalと比べて長い: 数年、redshiftするともっと長い。
母銀河のコンタミのせいで、変光大のものしか受からない。

Subaru/Suprime-Camでの~3yrs optical survey:
~500 AGN/deg² (TM+2008)

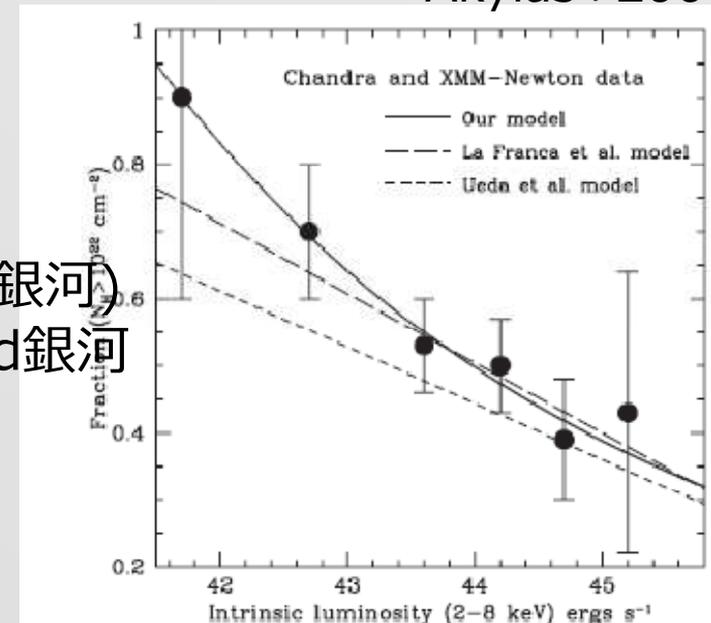
TAO/NIRCAMだと ~10 AGN/FoV

ただしopticalで受かるのは全部type-1

数10はX線検出×の低光度AGN($z \sim 0.5$ 楕円銀河)
← 色等級図でのred sequenceとblue cloud銀河との関係

低光度のものはtype-2の方が多い。
低光度AGNの進化?

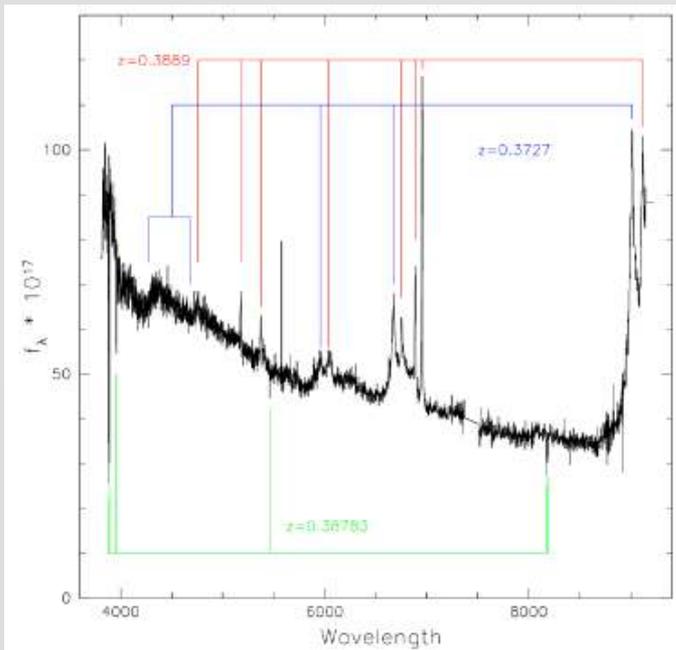
Akylas+2006



SMBH binary merging

銀河はmerging。ブラックホールもmerging。
タイムスケールは? 頻度は?

最近、SDSS J1536+0441 (あくまでまだ候補)など、
SMBH binaryは結構ホットなトピック?



electromagnetic counterparts of gravitational waves detected by *LISA* (2018-2020打ち上げ, angular resolution ~ 0.1 deg)

- mergerの2-3週間前からモニター
 - orbital motionのタイムスケールで変動
 - mergerの時期はdusty AGN? NIRがベター?
 - もっと広視野が必要? 他のBy-product?
 - 20 sources/35 weeks/deg²
- (Haiman+2009)

quasar母銀河 at $z \sim 3-4$

flux-flux diagram

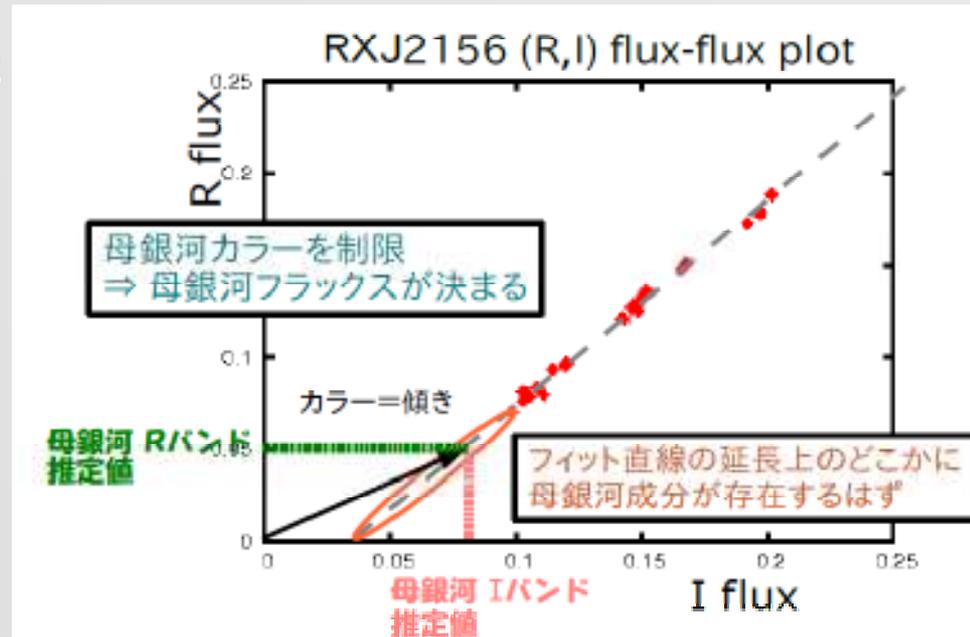
AGN成分は直線に乗る

→ AGNのカラーは変動により不変 (MAGNUMデータ、坂田修論)

Rest-frame UVの母銀河成分をゼロ
と思えば、rest-frame UV/U/B,Vの3
バンド測光モニターで母銀河成分の
推定が可能。

※可視(0.6um, 2-4mで十分)も必要。

→rest-frame B/Vなら $z=4/3$ まで
MBH-Mbulge関係から、SMBH進化
に制限をつけるにはやや精度が足り
ない? (systematicsさえなければ統
計を稼げばOK?)



まとめ

超新星

- SN Ia cosmology/rateはsystematic errorを抑える時代に。
- $\sim 8000\text{\AA}$ —Jバンド(w/ AO)での測光/分光
- dust-free SN cosmology/rate
- $z > 2$ でもCC SNから星形成史を探れる。
- 悪天候のcompensationを含めて、融通のきくallocation/ToOを

AGN

- Dustyな低光度AGN? AGNの初期phase?
- SMBH binary
- モニタリングによるAGN母銀河成分の推定→BH-bulge関係

ALMA時代における TAO近赤外カメラでの サブミリ波銀河観測

~Pre ALMA era and ALMA era~

五十嵐創(Soh Ikarashi)

IoA M1

Contents

■ Pre ALMA era

- AzTEC/ASTEの観測成果
- すばるなどでもできるNIRのサイエンス。

■ ALMA era

- ALMAを活かすTAOとの連携

Submm/mm-bright Galaxy (SMG)

SMGs: Dusty Massive Starbursts at the early Universe

■ Bright at (sub)millimeter

- $L_{\text{IR}} \gtrsim 10^{12-13} L_{\text{sun}}$
- Star Formation Rates (SFRs) $\sim 100\text{-}1000 M_{\text{sun}}/\text{yr}$

■ Dusty \rightarrow optically very faint

■ Massive

- $M_{\text{dyn}} \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$; $M_{\text{gas}} \sim 10^{10-11} M_{\text{sun}}$

■ High-redshift

- $z \sim 1\text{-}4$ ($z_{\text{median}} \sim 2.2$) (Chapman+05)
- Detectable at $z \sim 1\text{-}10$ because of the negative K-correction



*Hidden star formation in the early universe
Important role in galaxy formation and evolution*

Atacama Submillimeter Telescope Experiment: ASTE

- 10 m submm telescope
- alt. 4860m, Atacama desert, Chile
- 350 GHz (0.87 mm) spectroscopy: CATS345+MAC/WHSF
 - beam = 22", single pix
 - low T_{sys} & OTF
- 270 GHz (1.1 mm) continuum: AzTEC camera
 - 144 pix
 - FOV \sim 8 arcmin, beam = 28"



Deep and Wide SMGs surveys

- 2007/2008年にSXDF, ADF-S, SSA22を観測
 - SXDF (Ikarashi +, in prep)
 - 面積: 900 arcmin²
 - RMS: ~0.55 mJy
 - Source: 約165 ($>3.5\sigma$)
 - SSA22 (Tamura +, in prep)
 - 面積: 800 arcmin²
 - RMS: ~0.65 mJy
 - Source: 約130 ($>3.5\sigma$)
 - ADF-S (Hatsukade +, in prep)
 - 面積: 1000 arcmin²
 - RMA: ~0.60 mJy
 - Source: 約200 ($>3.5\sigma$)

- SMGsはOpticalでは非常に暗く分光が難しい。
 - B-bandで26等 (AB)より暗いのはざら。
- NIRではそれなりに明るい、22等(AB)ぐらいのことが多い。

**NIRCAMならば、30 時間程積分すれば分光できる！
10'x10'のMOSなら一度に前後10個？**

Target Science of Spectroscopy

Redshift

- Spectroscopy
 - 73 radio-identified SMGs
 - $z = 2.2$ (median)
 - $z = 1.7 - 2.8$ (interquartile)

(Chapman+05 ApJ 622, 772)

AGN診断

- NIR領域の複数の輝線(ex. $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $OIII$ 、 NII)を用いた診断

Veilleux + 1987

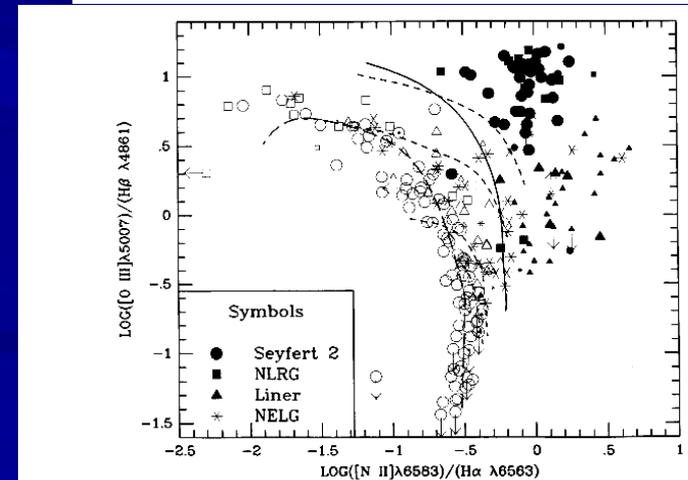
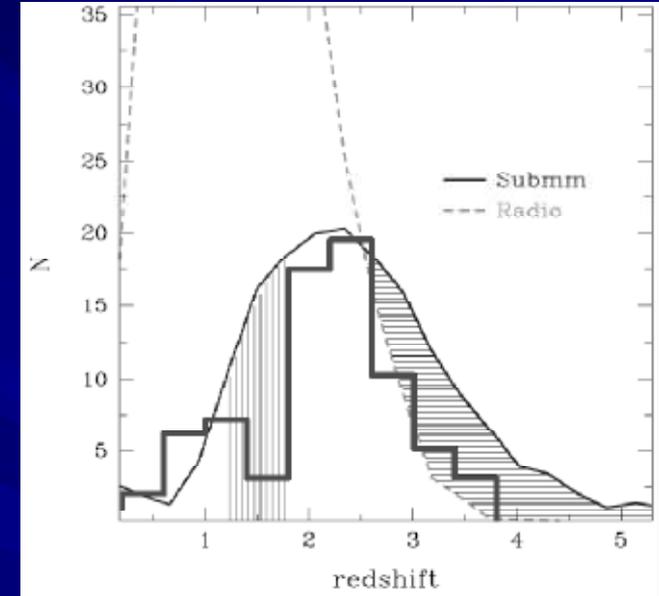


FIG. 1.—Reddening-corrected $[O III] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ intensity ratios. Symbols for types of objects are as shown in keys to this figure and Fig. 2. Four short-dashed lines are H II region models of Evans and Dopita (1985) for $T_e = 56,000, 45,000, 38,500,$ and $37,000$ K from the top to bottom respectively. Long-dashed curve represents H II region models of McCall, Rybski, and Shields (1985). Solid curve divides AGNs from H II region-like objects.

ALMA

いよいよ2010末に
部分運用のCfP!

- 日、台湾、米、欧の協力
- 南米チリ、アタカマ砂漠
- 標高5000m

- 観測波長: 30GHz (1cm) ~ 950GHz (315 μ m)
- 分解能: 0.1 ~ 0.01 arcsec @ 350GHz
- 2012年正式稼働予定

ALMAでもRedshift IDはできるが...

- ALMAでもCOラインを使ってSMGsのredshiftは決めることはできる。

64台Fullで使っても

1天体のredshiftを求めるのにおよそ
 3 [min] x 8 [tuning] = 24 [min] かかる
 24 [min] x 1000 個 = 400 [hours] !!

さらにAzTEC/ASTEに続くSMGサーベイに向けて
 450 μ m, 850 μ m, 1.1mmの3色カメラを作成中!!

例: $M_{\text{gas}} = 5 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$
 - CO-H₂ conversion factor = 0.8
 - velocity width = 500 km/s
 - velocity resolution = 50 km/s

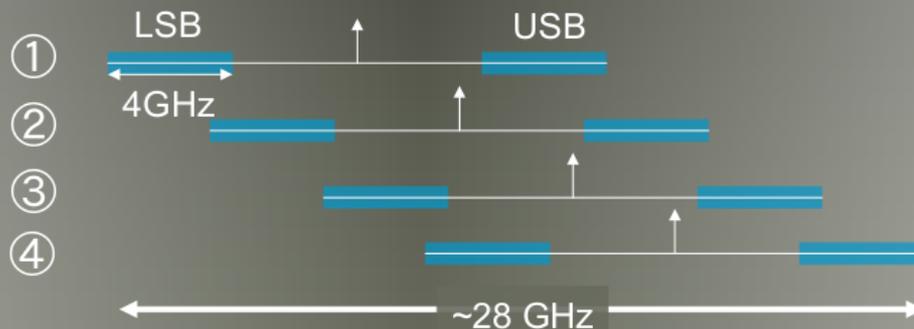
CO	z	ν_{obs} [GHz]	time for 5 σ detection [min]	
			64 antennas	16 antennas
CO(3-2)	2	115	2	30
CO(5-4)	4	115	3	40

• z 不定性 = ± 0.5

CO	ν_{rest} [GHz]	z	ν_{obs} 不定性 [GHz]
J=3-2	345	2	40
		3	22
		4	14
J=4-3	461	2	53
		3	29
		4	19

• ALMA バンド幅 = 4 GHz (IF=4-8)

- 周波数設定を変えて複数回観測する必要がある



ALMAでは高解像度を活かしたサイエンスをしたい

- 実はALMAの売りの高解像度も時間がかかる。

0.1"分解能 @ z=4 (~0.7 kpc)

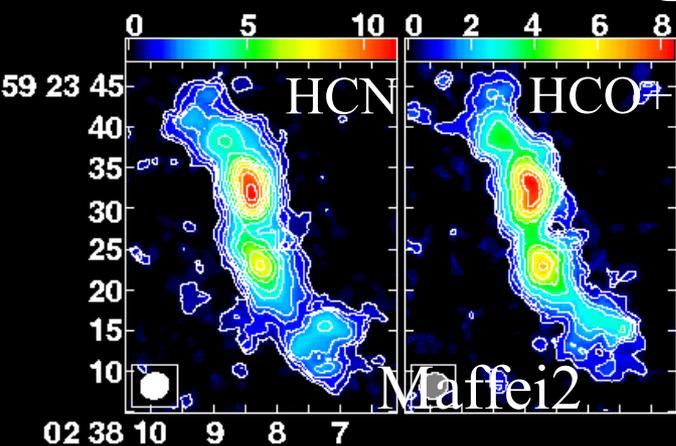
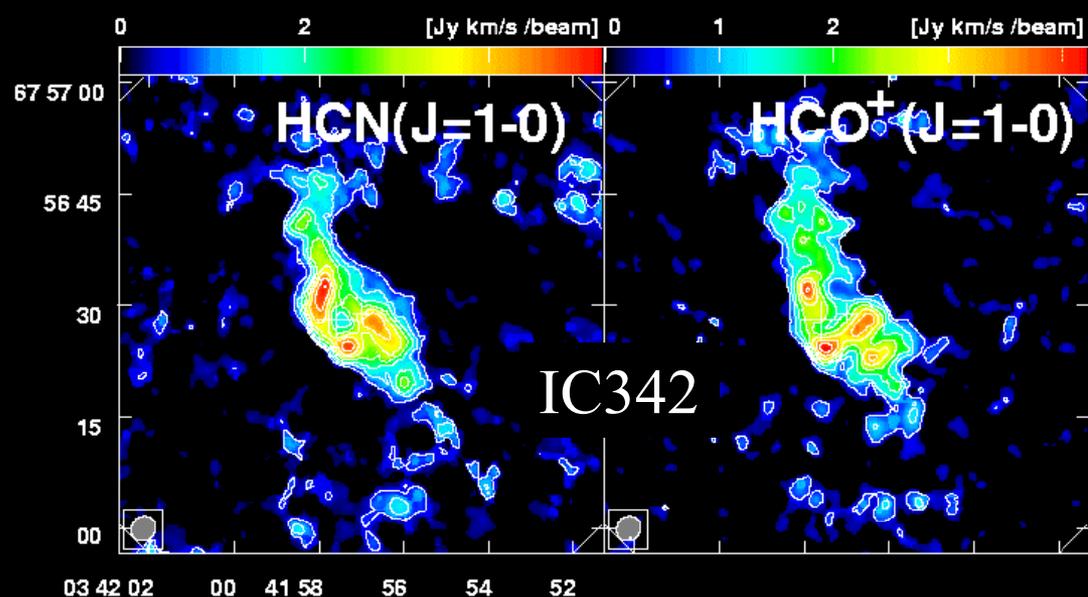
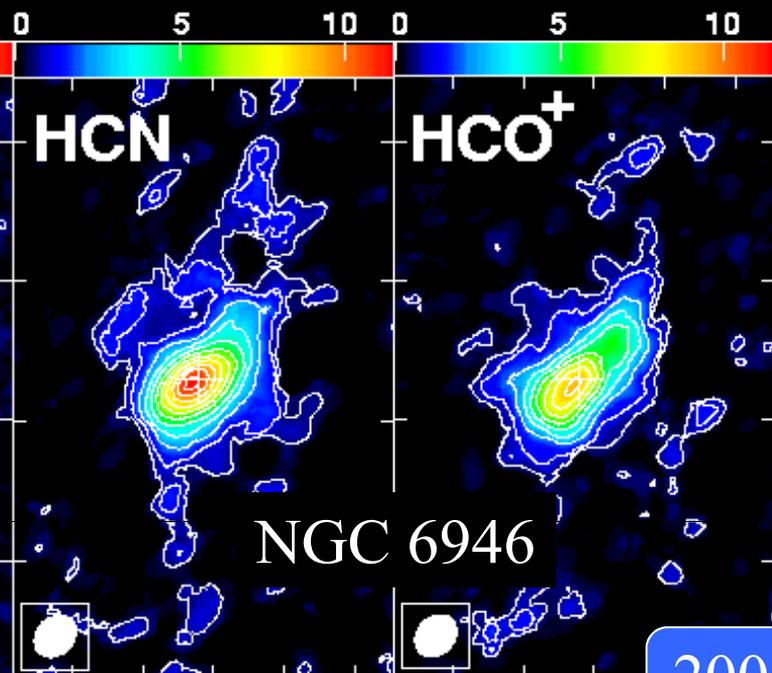
ν_{obs} [GHz]	band	expected Tb [mK]	time for 5 σ detection [hour]	
			64 antennas	16 antennas
230	band 6	46	11	180
350	band 7	50	7	120
650	band 9	43	20	350

0.01"の達成には
70時間！？

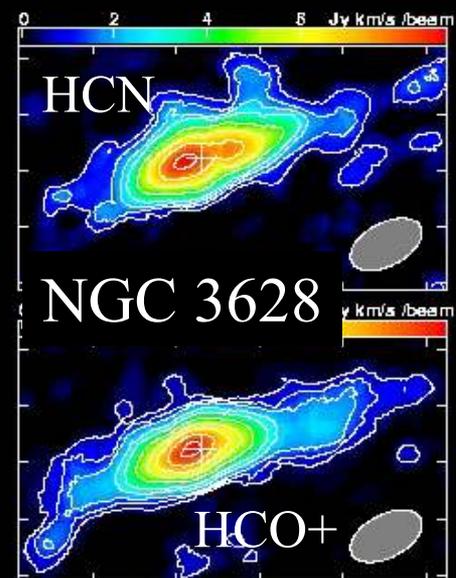
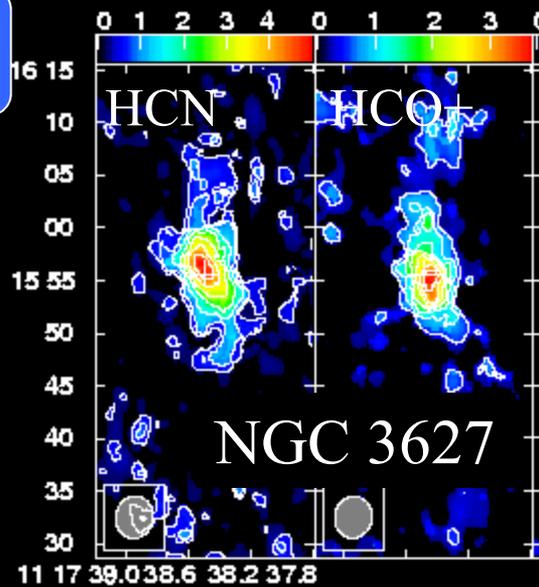
複数のラインによるサイエンスを
高分解能で！

- ・COラインによるtheremalize
- ・HCNとHCO+を用いたAGN判定
etc

HCN & HCO⁺ Images of Starburst Galaxies



200 pc

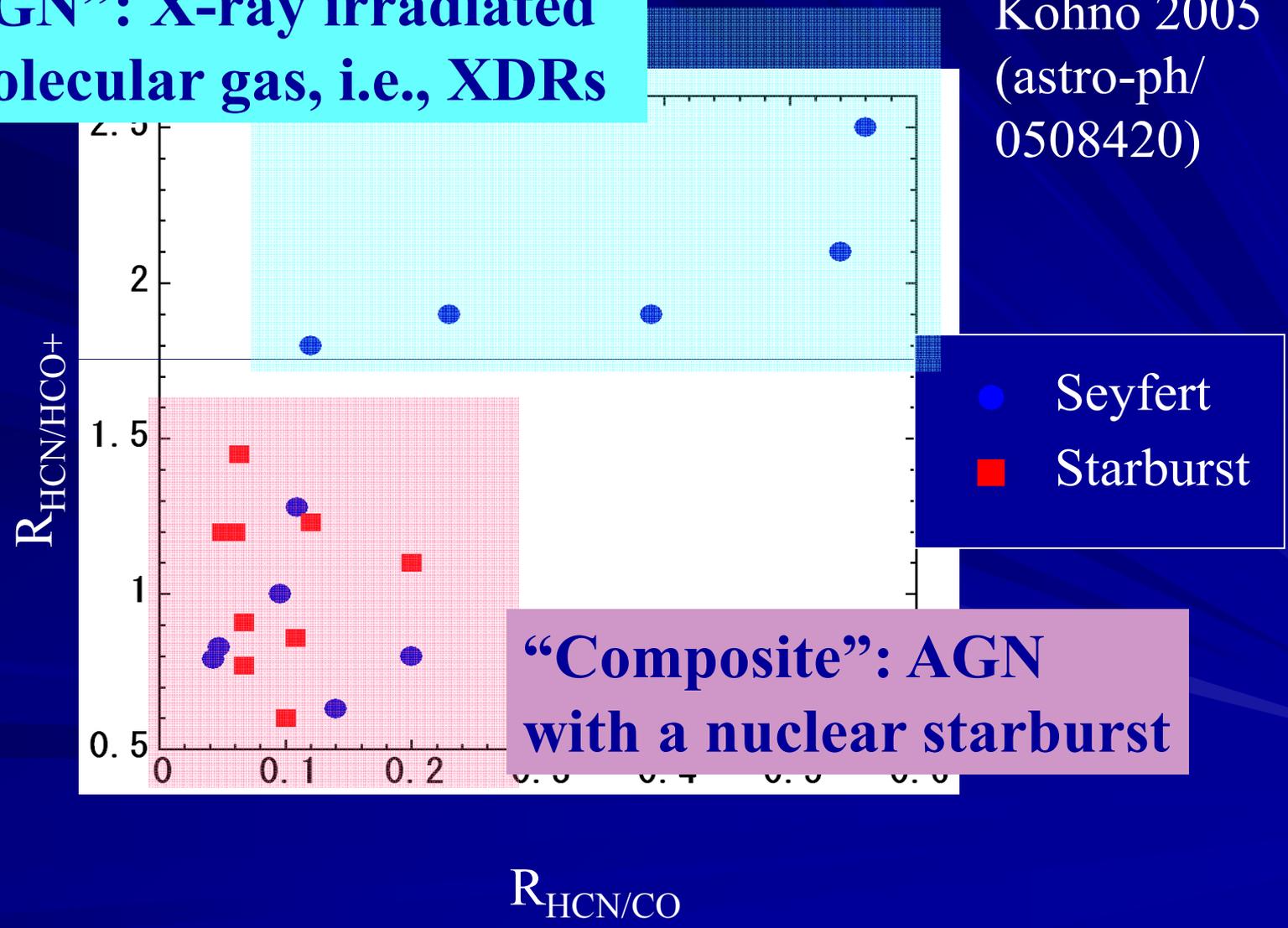


Dominant power source within observing beam

Kohno et al. 2001
(astro-ph/0206398)

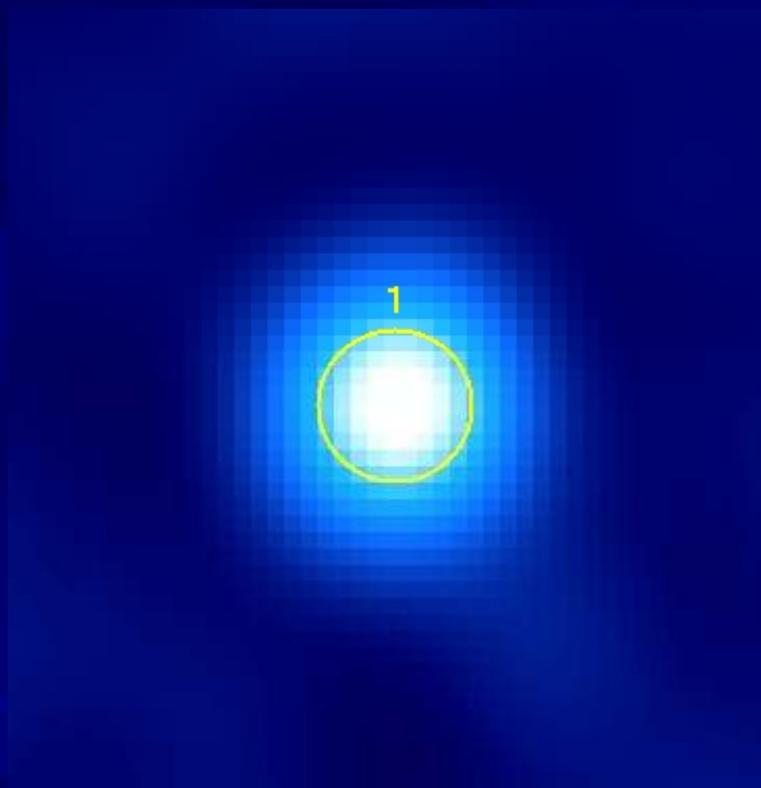
“Pure AGN”: X-ray irradiated dense molecular gas, i.e., XDRs

Kohno 2005
(astro-ph/0508420)



“Composite”: AGN with a nuclear starburst

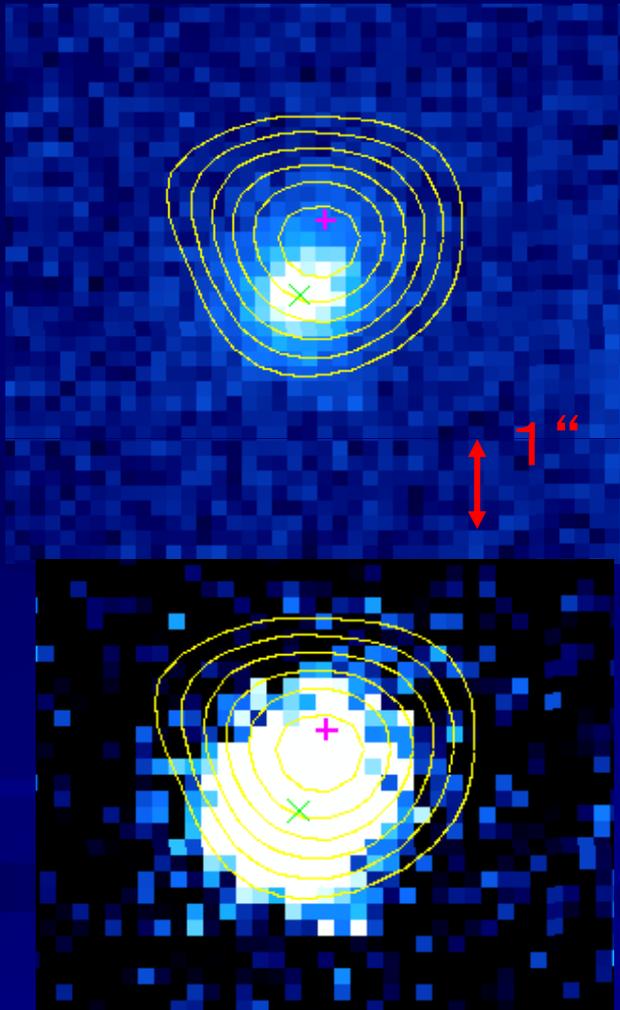
an ultra bright SMG, Orochi



- AzTEC/ASTEによる
1.1mm 連続波観測
で見つけた。
- Flux: 33.6 mJy
@1.1mm
- S/N~40
- カタログ名はAzTEC-
ASTE-SXDF1100.001



ALMAの高分解能との連携



- SMGsはdual component の徴候が見られることがある。

ALMAで低温ガス領域は $0.1'' \sim 0.01''$ の
分解能になる
Opt/NIRの高解像度も重要！！
NIRCAMのAOに期待！！

SXDF1100.001 (Ikarashi+ in prep)

ALMA Deep Field (ALDF)

- ALMAのレガシー観測で議論がすすんでいる。
- 候補サイト (ALMA-JT系外銀河subWG meeting)
 - SXDF (Subaru XMM/Newton Deep Field)
 - GOODS-S
 - etc..
- 日本のASTEのSMGsチームはSXDFを観測したいと考えている。

ALDFのサーベイplanにもよるが、深さを追及した場合
L \sim 10¹⁰ Lo程度のSMGs(?)が見つかるはず。
これらのfollow up にやはり集中的に時間を投入できる
ことは魅力的！！

まとめ

- SMGサイエンスにおいてALMA時代には高解像度のサイエンスをしたい！！
- ALMAの高解像度を活かすには赤外領域での事前のredshift測定、Opt／NIR領域での高解像度が重要！！

AKARI/SPICAとの連携

TAO望遠鏡と宇宙望遠鏡でさぐるdusty universe

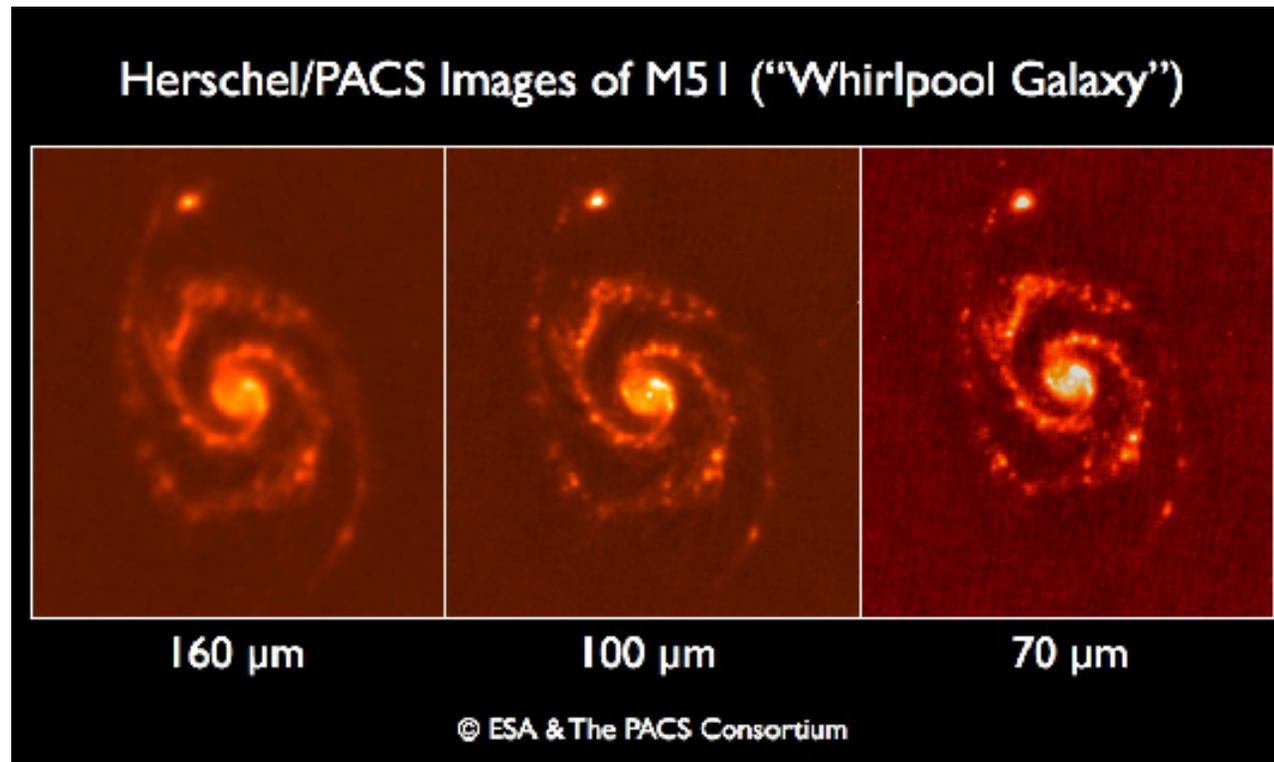
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
和田武彦

wada@ir.isas.jaxa.jp

TAO望遠鏡への期待

- **乾燥高地** hight=5600m PWV<0.5mm
 - MIR/FIRに微かな窓が開く
- **大口径(6.5m)**
 - Space NIR 6.5m (JWST)
 - Space MIR 3.5m (SPICA)
 - Space FIR 3.5m (Herschel)
- **良好なイメージ**
 - seeing 0.6"
 - diffraction 0.9" at 30um
 - diffraction 6.4" at 200um

大口径の威力



口径3.5mではこんなもん。

角度分解能1"に迫れると、可視光線との対応が可能になり
サイエンスが広がる

TAO望遠鏡(6.5m)で、MIR/FIR (25-200 μm)での観測を行えば、
角度分解能で世界を制せる

TAO-NIRCAMへの期待

- good median seeing (0.6")
- less atmospheric absorption at 1-2.5um

が、圧倒的と言えるだろうか...

- 特色ある装置
- 特色あるサイエンス
- 特色ある運用
 - Japanese space telescopeを使う事を出し抜けないだろうか？

AKARIとは

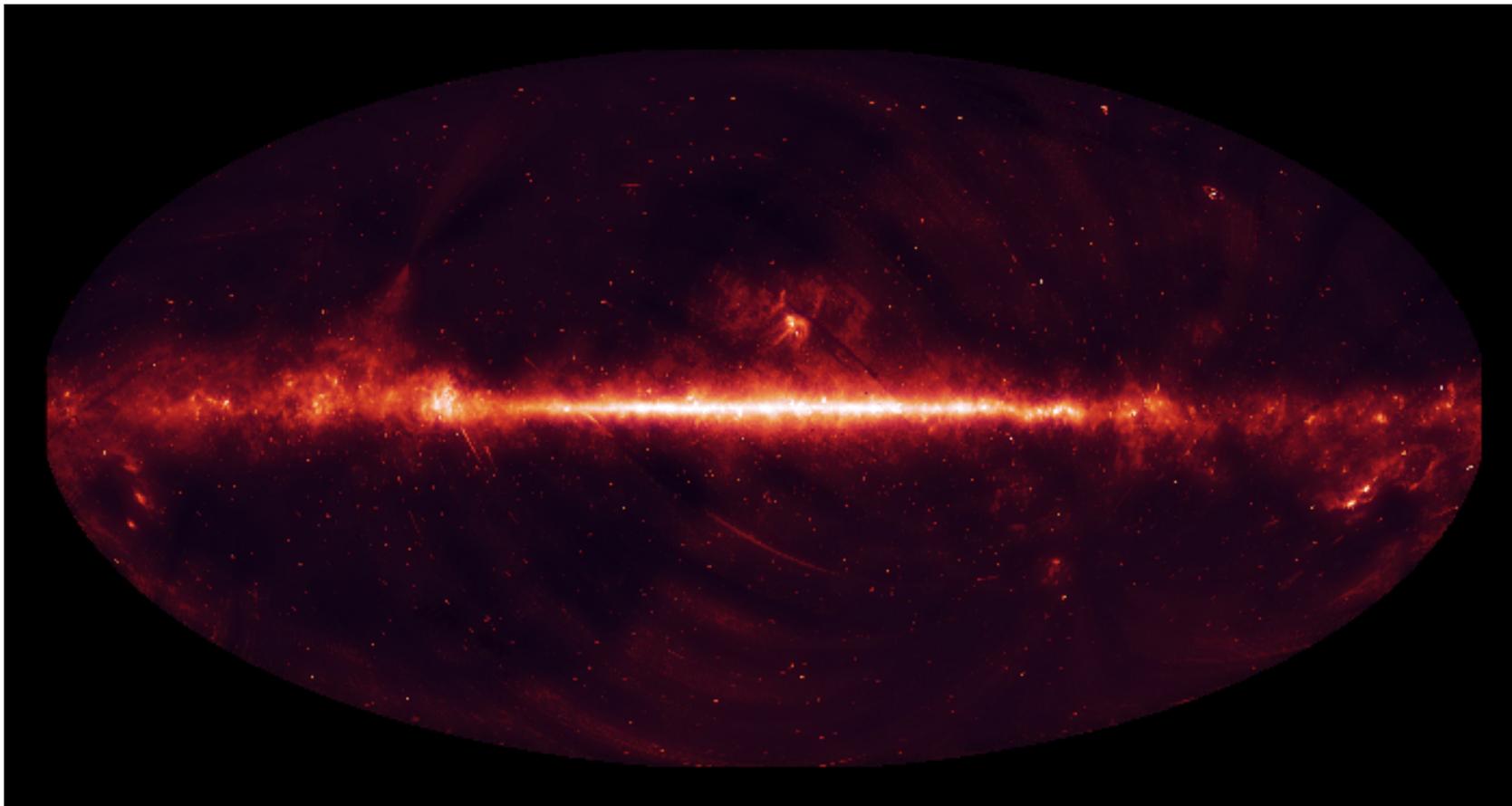
日本初の本格的赤外線天文衛星

- 口径68.5cmの冷却望遠鏡
- 遠赤外線サーベイ装置(FIS)と近中間赤外線カメラ(IRC)を搭載
- 波長 9-160um 6 bandでの全天サーベイ(Super-IRAS)
 - MIRで100mJy, FIRで 1Jy
- 波長 2-160um 13 bandでの広域deepサーベイ
 - NIRで10uJy, MIRで100uJy, FIRで1mJy
- launch 2006/02/22 by M-V rocket
- cold mission (Phase 1/2)
 - 2006/05/08-2007/08/26
- warm mission (Phase 3)
 - 2008/06/01-
 - 2, 3, 4umでの撮像と2.5-5umでのR=100分光

全天サーベイソースをTAOでフォローアップ

TAOソースをwarm mission NIR分光撮像でフォローアップ

AKARI all sky survey



9um all sky map (Ishihara et al. 2008)

AKARI all sky survey のソース個数

チャンネル	波長範囲	ソース総数	ソース総数 $\ b\ > 30$	ソース密度 $\ b\ > 30$
FIR	60, 90, 140, 160 μm	30 万個	2 万個	0.5 個/平方度
MIR	9, 18 μm	85 万個	8 万個	2 個/平方度

高銀緯では、多天体分光の旨味はない。
銀河面、LMCでは、多天体分光が有効。

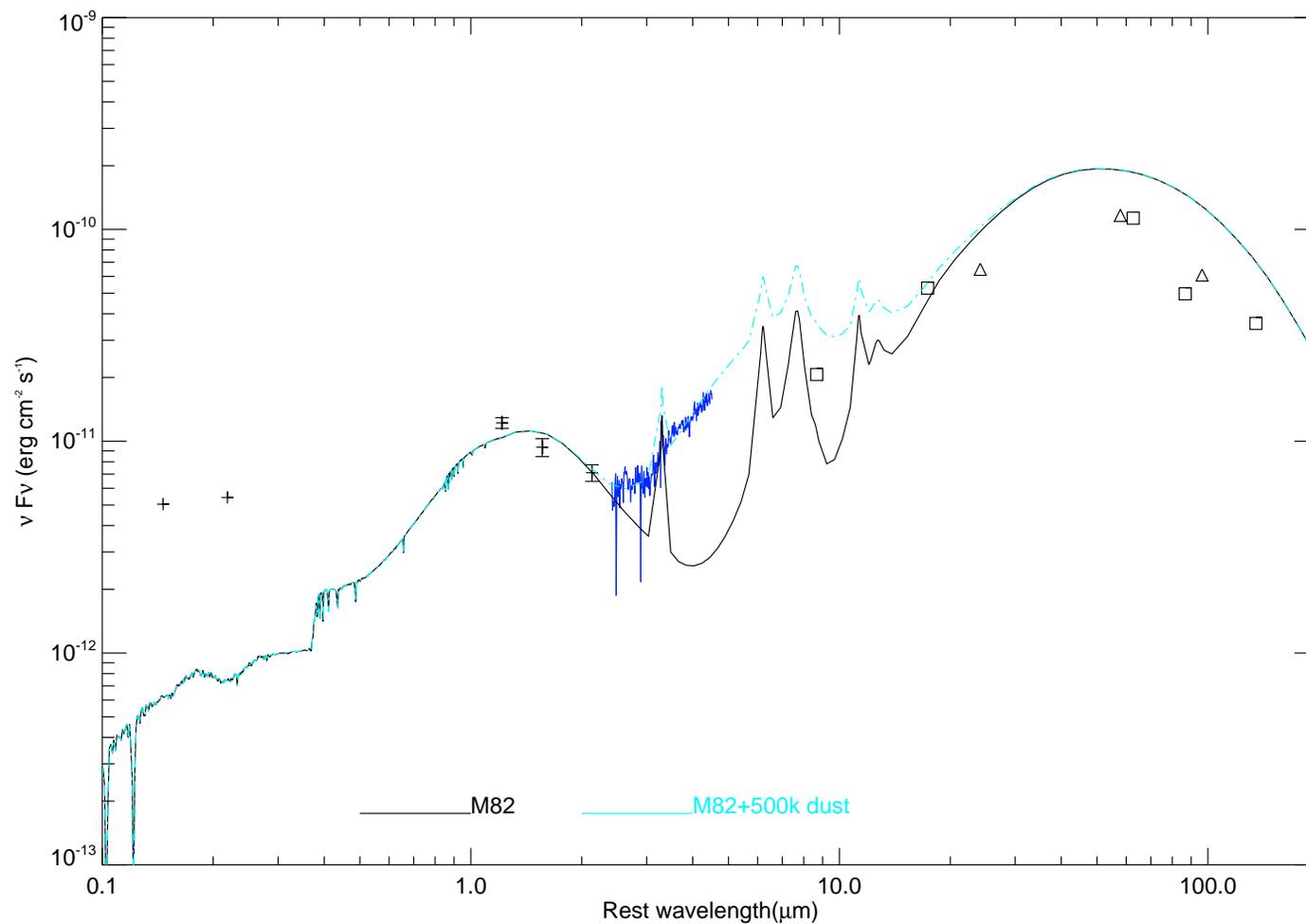
Example of AKARI all sky survey source follow-up

AKARI/IRC all sky survey ソース

R=14 等 K=12.7等 9micron 83mJy 18micron 330mJy

- K-9umでピックアップ
- AKARI(warm mission) NIR分光でフォローアップ
- 地上可視光線分光観測によるフォローアップ

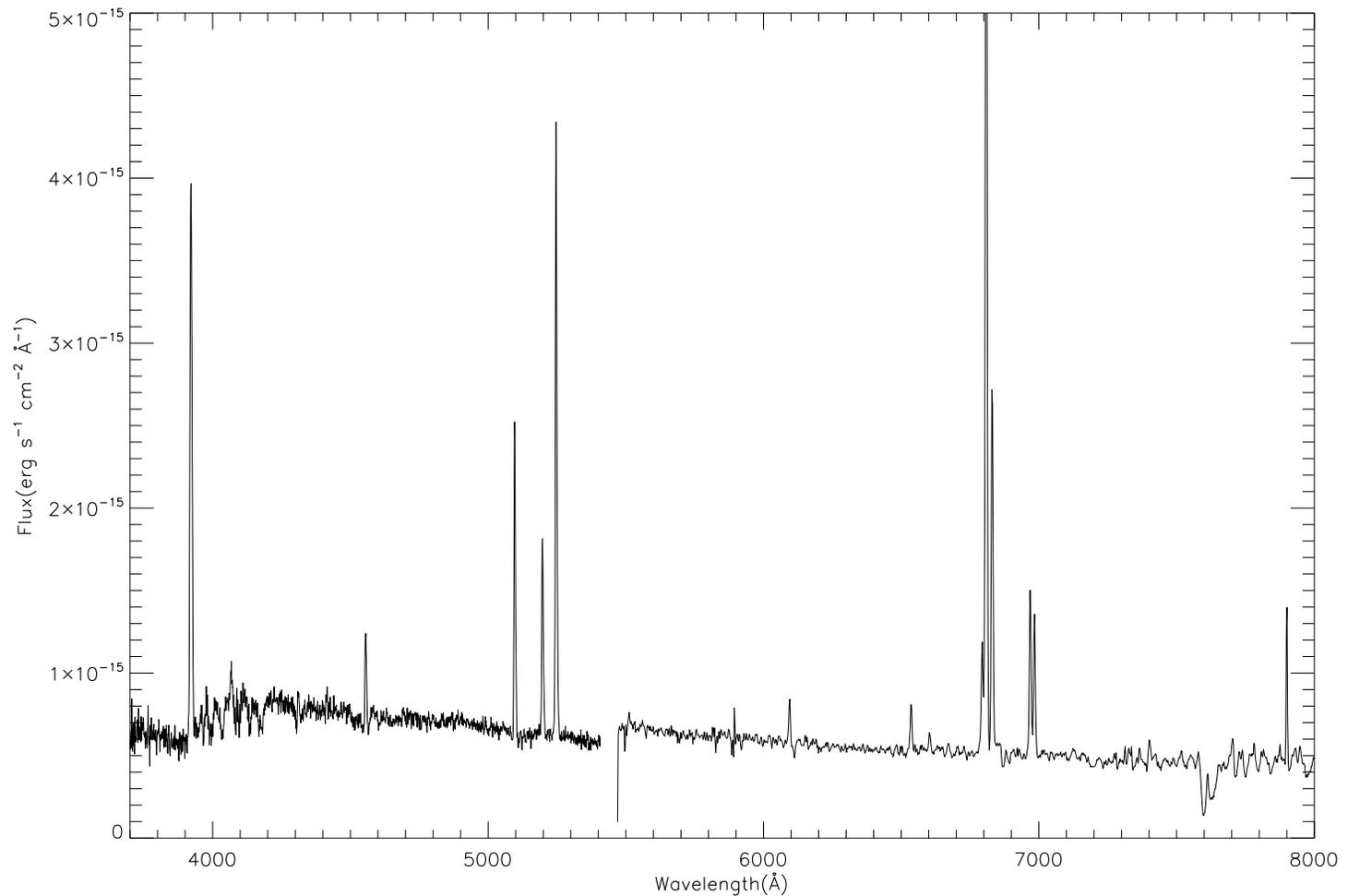
Example of AKARI all sky survey source follow-up



AKARI MIR surveyソースを
AKARI(warm mission) NIR分光でフォローアップ

(Oyabu et al. 2009)

Example of AKARI all sky survey source follow-up



AKARI MIR surveyソースを地上可視光線分光観測によるフォローアップ

(Oyabu et al. 2009)

TAO follow-up of AKARI deep and wide survey

NEP DEEP, NEP WIDE

- Wada+08, Lee+08

AKARI DEEP FIELD SOUTH (ADF-S)

- Shirahata+08

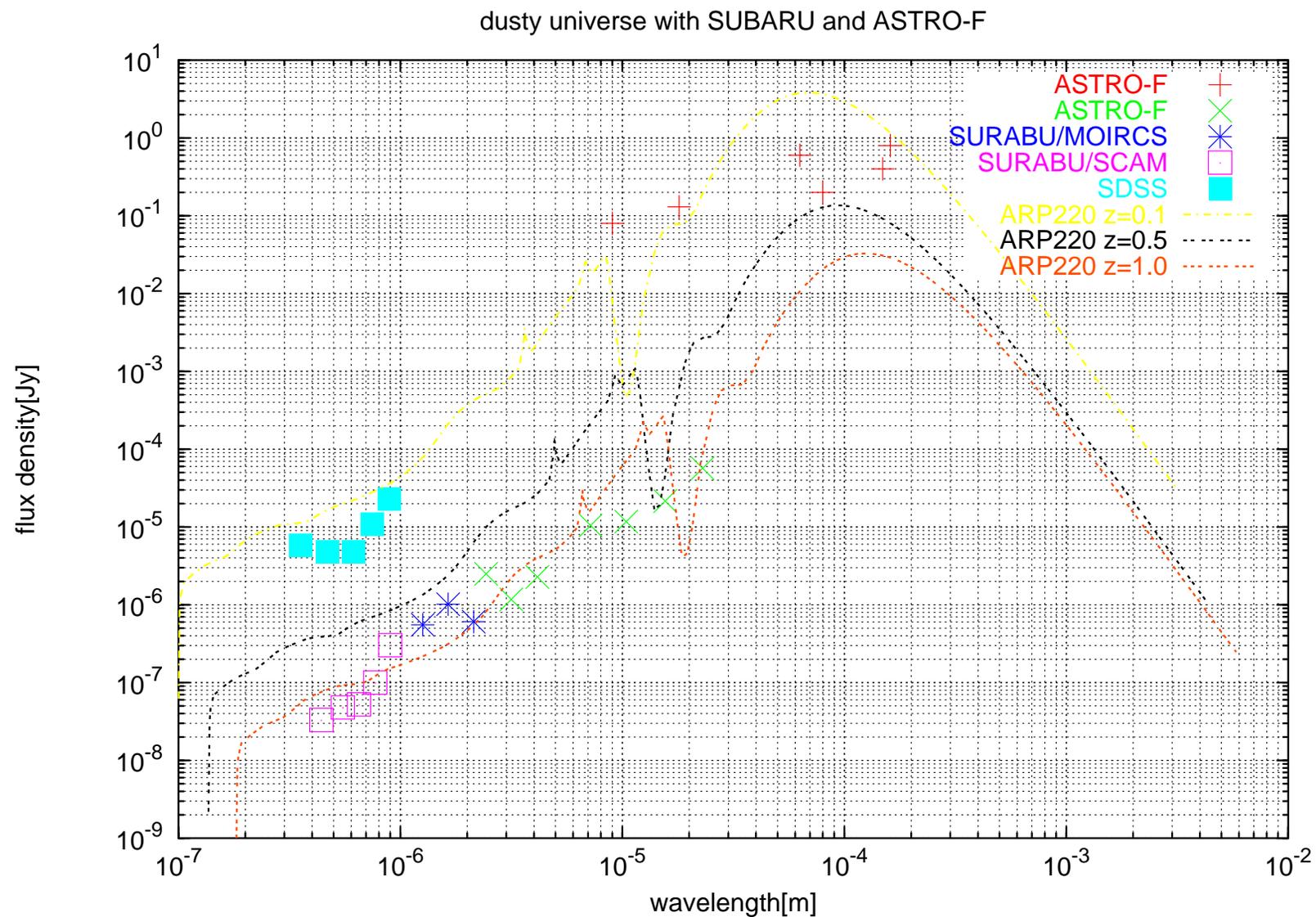
LMC

- Ita+08

TAOによる多天体分光フォローアップ

TAOによる高解像度イメージング

TAOとAKARIで探るdusty universe



Arp220のSEDはTakagi model(Takagi et.al. 2003)

Example of AKARI deep and wide survey; LMCサーベイ

Imaging (3, 7, 11, 15, 24), and spectroscopy (2-5 μ m, R=30)

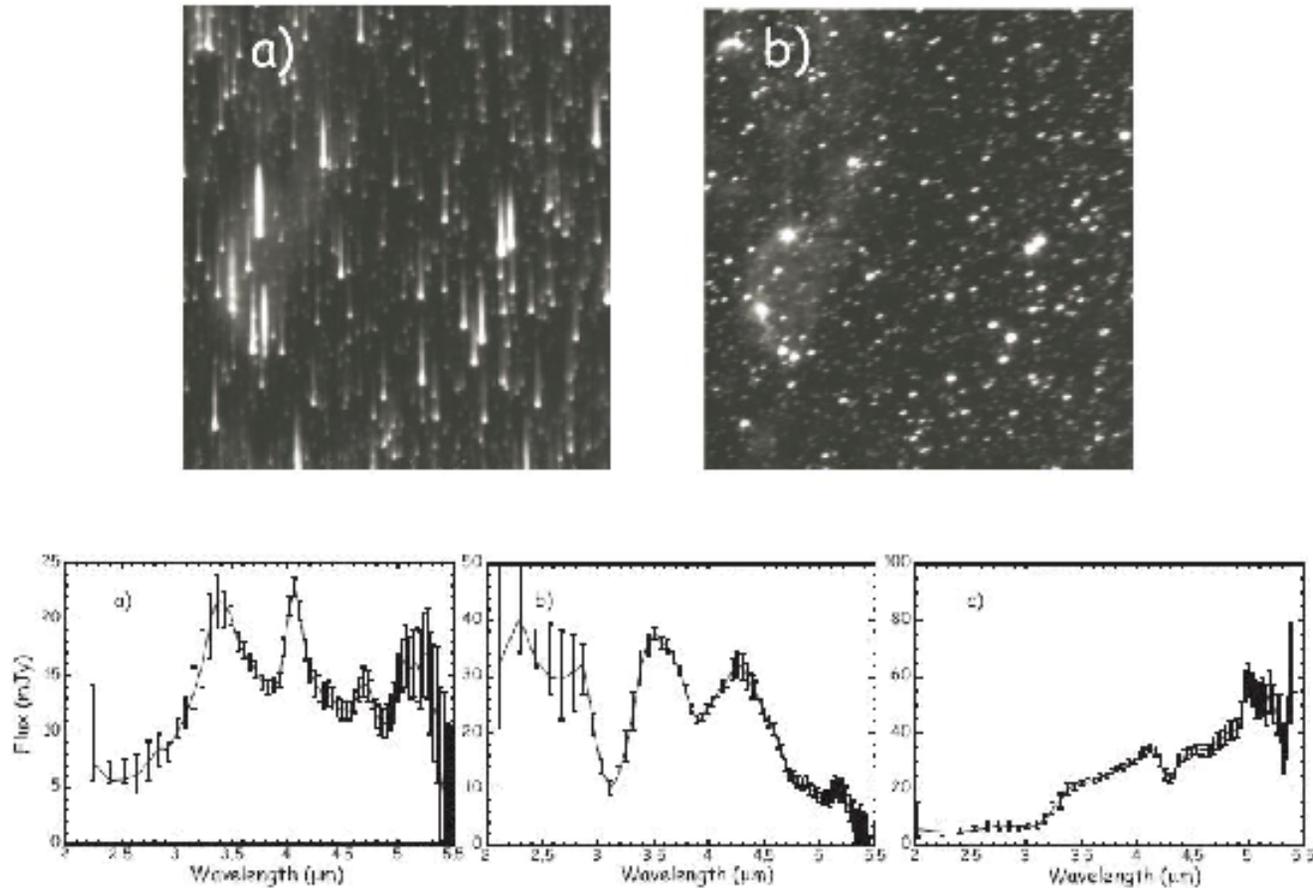


Fig. 4.— Example of the NIR spectra taken with the IRC slit-less spectroscopy mode. (a) HII region, (b) dusty carbon star, and (c) young stellar object.

(Onaka et al. 2007; Ita et al. 2008; Shimonishi et al. 2008)

SPICAとは

次期赤外線天文衛星

- 口径3m級の冷却望遠鏡
- 遠中間赤外線で驚異的な感度
 - 遠赤外線分光撮像装置(SAFARI; 35-200um, 2'x2', R=2000)
 - 中間赤外線カメラ (MIRACLE; 5-38um, 6'x6', R=10-100)
 - 中間赤外線分光器 (MIRHES; 10-36um, R=1000)
 - 高分散分光器 (MIRHES; 4-8, 12-18um, R=30000)
 - コロナグラフ (SCI; 3.5-26um, ダイナミックレンジ 10^6)
 - 遠赤外線分光装置 (BLISS; 40-400um, R=1000)
- launch 2010年代後半を目標
- 2008-2010 プリプロジェクトフェーズ
- 2011- プロジェクト化を目指して準備中

TAOソースを中間赤外線でフォローアップ

SPICAソースを高解像度撮像フォローアップ

SPICA TAOサーベイのフォローアップ

LAE at $z > 7$ の H α を測定

- SPICA中間赤外線カメラ(MIRACLE)
- 吸収の影響の少ない星生成率の測定
- 宇宙の電離度の測定
 - JWST/MIRIがベスト
 - VISTA+JWST/MIRIでやられてしまう?

LAE at $z > 7$ の PAHを測定

- SPICA遠赤外線分光撮像装置(SAFARI)
- 吸収の影響の少ない星生成率の測定

$z = 1-3$ でのPAH emissionの測定

- SPICA中間赤外線カメラ(MIRACLE)
- 吸収の影響の少ない星生成率の測定

2010年代の宇宙望遠鏡

James Webb Space Telescope(JWST) 2012-

- 0.6-26umの天文台
- 6m望遠鏡
- 近赤外線で究極の感度
 - NIRcam 2'x2'
 - nJyの世界...

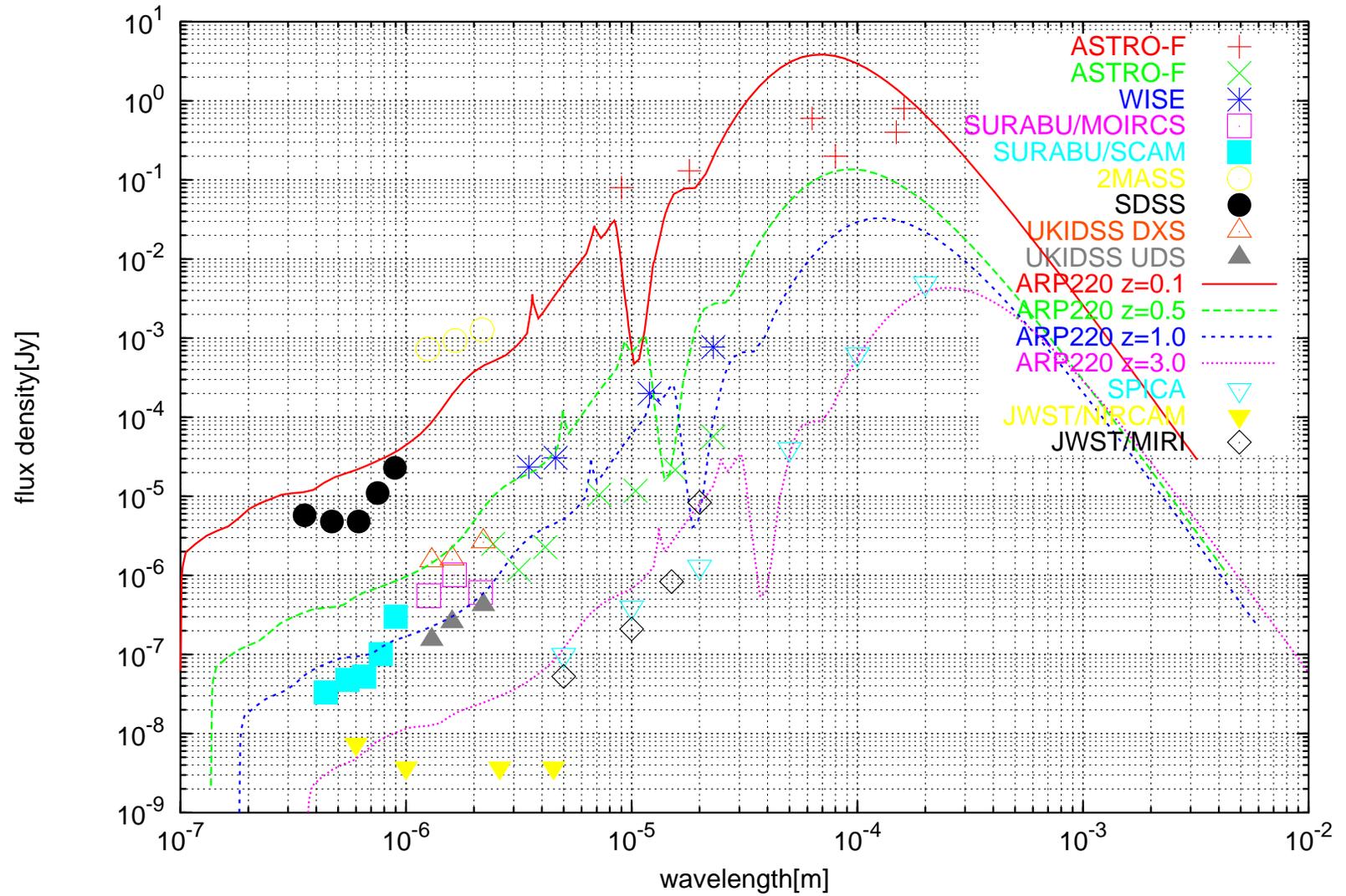
SPICA 2012-

- 5-200umの天文台
- 3.5m冷却望遠鏡
- 中間・遠赤外線で究極の感度
 - FIR 2'x2'
 - MIR 6'x6'

(2005年のプレゼンテーションの使いまわしです)

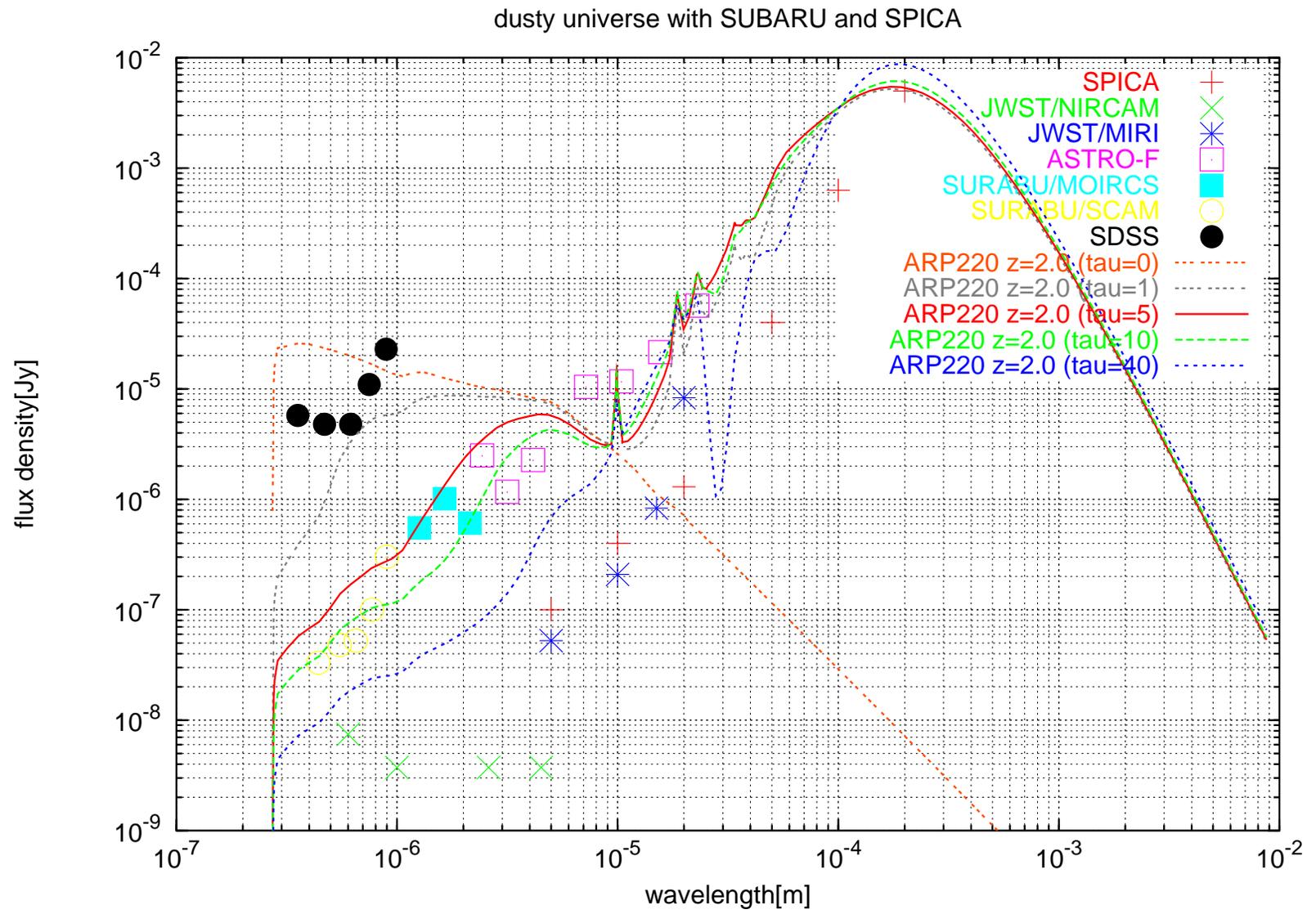
2010年代の光赤外線天文観測

Optical and Infrared Astronomy in 2010s



Arp220のSEDはTakagi model.(Takagi et.al. 2003)

TAOとSPICAで探るdusty universe



まとめ

- TAOは、MIRでは高空間分解能観測においてユニーク
- NIRでは、同業他社あり。なにか特徴が必要。
- 特色ある装置
 - TAO_NIRCAM
- 特色あるサイエンス
 - 本日いろいろ出ました
- 特色ある運用
 - 思い切った戦略的運用
 - 他装置との強調
 - Subaru/HSC
 - AKARI catalog
 - SPICA regacy observations



TAO-NIRCAM WS

総合討論



講演いただいたテーマ





各講演からの 装置スペック要求

- 波長coverage
短：0.8 μm ~ ?
長：~ 3 μm ?
- 波長分解能
低：~ 500 ?
中：~ 2000 ?
高：~ 50000 !?
- フィルター
NB, MB, Tunable
 - 既存装置との住み分け
 - TAOサイトだからこそ出来ること



各講演に見る

TAO-NIRCAMの独自性

Facility Keywords

すばる MOIRCS, Ultra-VISTA
多色同時（撮像・分光）

他サーベイからのインプット

TAO FLAMINGOS,
GLAO, 柔軟・豊富な観測時間、
大気透過率

この時までにはやられてしまうこと

MOS Multiplicity の要求度は？

J,H,Kの同時分光の魅力？

t



各講演に見る

TAO-NIRCAMの目指す所

- 豊富な観測時間を柔軟に。
- 新たな大気の窓での分光
- ある領域の定期（定常）観測
- Subaru/MOIRCSで出来ないこと
（観測時間、AO、天体選択(HSC, VISTA)）



討論内容 ～機能～

- 可視チャンネル
遠方銀河、超新星での有用性
- OHS
R~5000分散素子で代用？
但し、汎用的過ぎる⇔時間運用の柔軟性。
- 多バンド同時の利点：
タイミングが大事な観測（突発・変光天体）。
可視－NIRまで一度に取れると何かと便利。



討論内容 ～運用～

- 観測時間
使い方を工夫し、すばるとの差別化を。
- TAO/miniTAOの運用
miniTAOを併用したサイエンスの可能性。
同時運用は予算次第。