

宇宙電波懇談会シンポジウム2013「SKA計画」
2013年12月18日-19日、於・国立天文台

SKAとALMAの連携

河野孝太郎

(東京大学・IoA/RESCEU)



次の10年は宇宙再電離期が面白い SKAとALMAの連携が鍵

中性水素原子ガスは21cm線で
→ SKA-Low + 熊崎さん、高橋さん他
(但し個々の銀河は見えない)

分子ガスはCOで！

→ Low-J CO輝線銀河をSKA-Highで広域探査
→ ALMAでfollow up

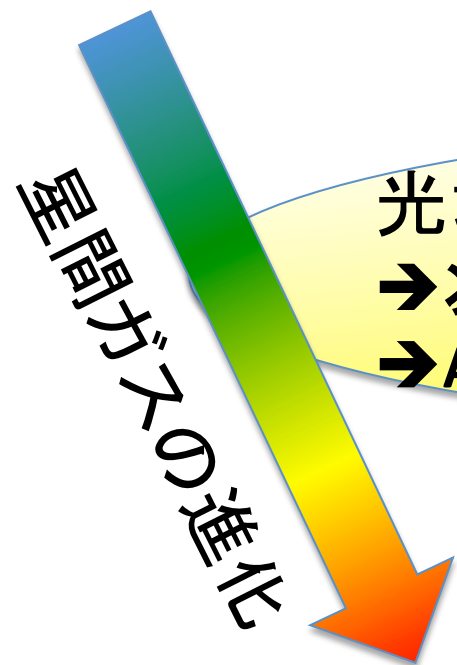
光乖離領域(PDR)は[CII]158 μ mで

→ 次世代35-50m大型ミリ波サブミリ波単一鏡で広域探査
→ ALMAで徹底観測(田村陽一さん?)

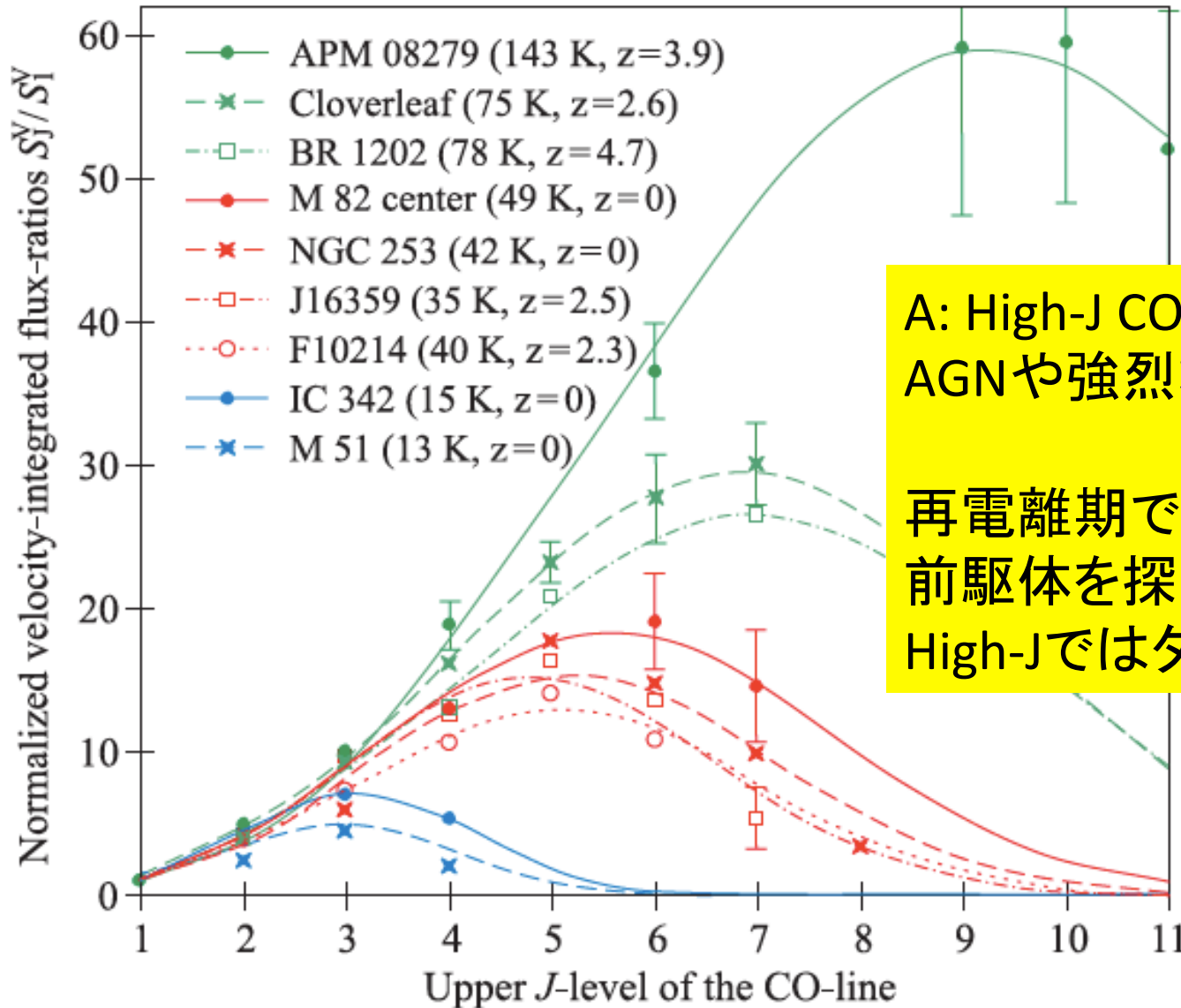
電離領域(HII)は[OIII]88 μ mで

→ すばる + TMT、JWSTで候補天体を広視野で探査
→ ALMAで徹底観測(松尾さん、井上昭雄さん?)

Ly α
?



Q: なぜ low-J CO ?

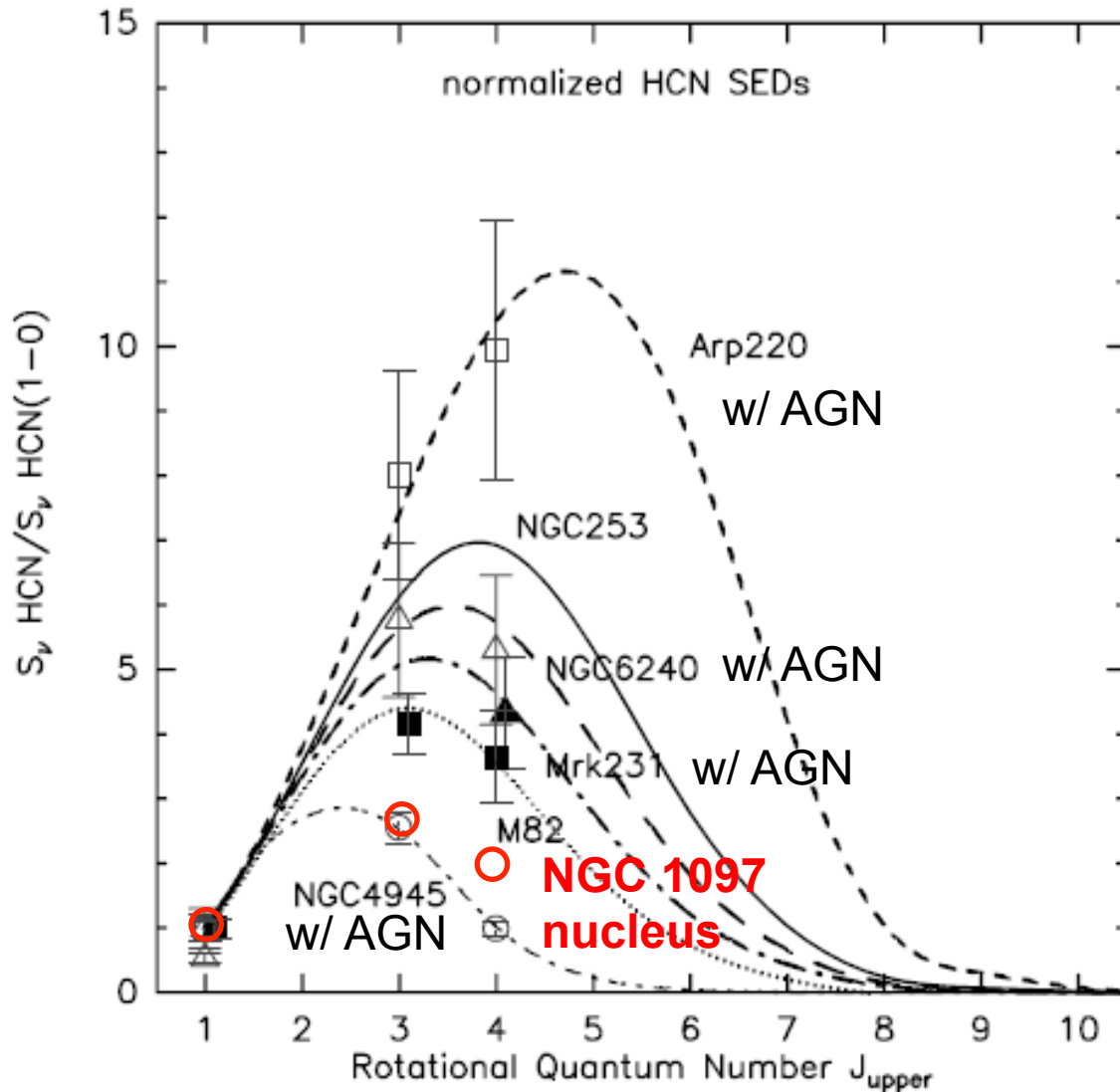


A: High-J COが強いのは
AGNや強烈なスターバースト。

再電離期で、そういう天体の
前駆体を探したいのだから、
High-Jではダメ。

Obreschkow et al.
2009, ApJ, 702,
1321

HCN line SED in galaxies



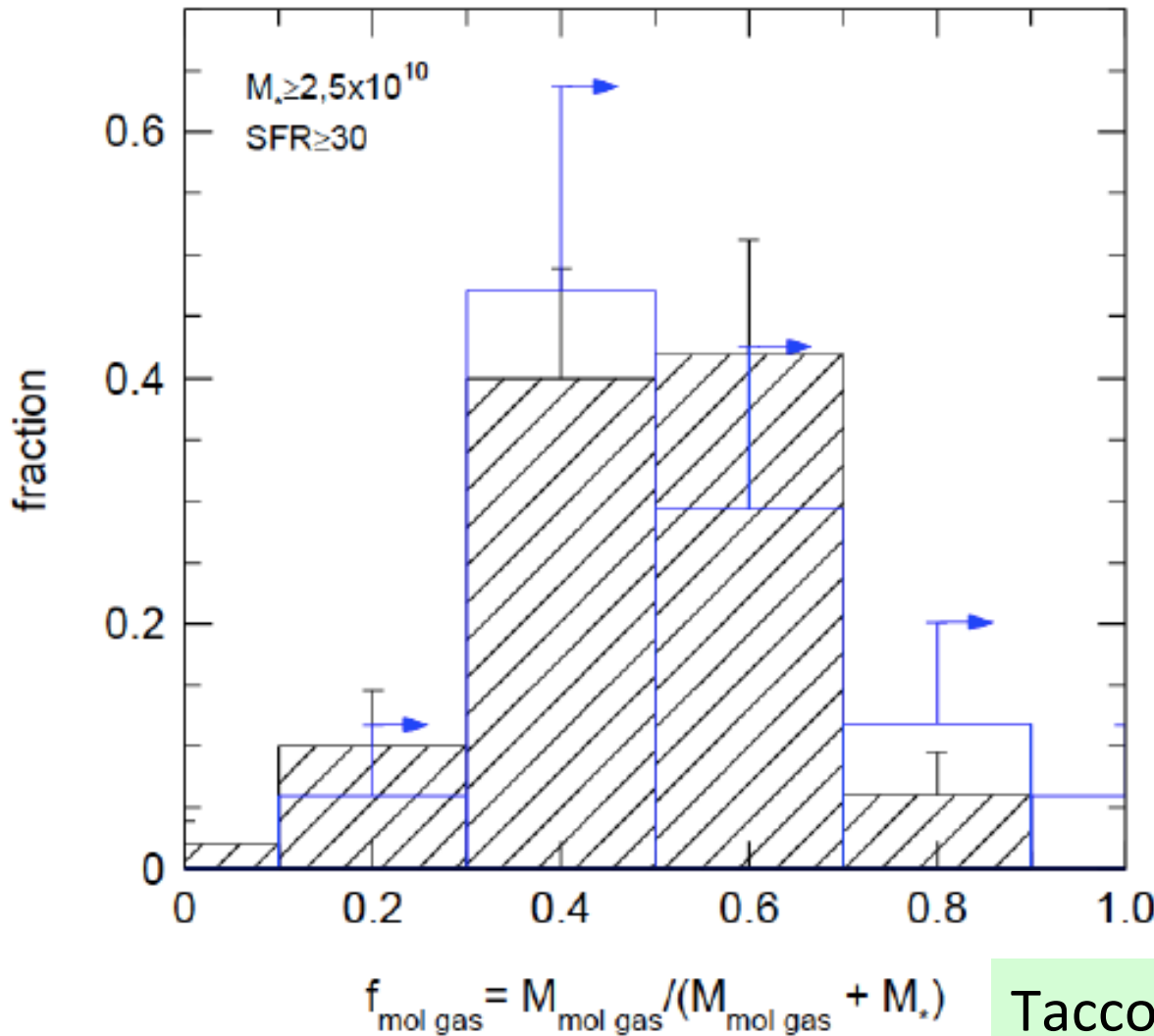
- Excitationは銀河により非常に多様性がある(その原因はまだ分かっていない)
- → たとえば $J=4-3$ が1本あるだけでは、励起状態について何か推定することは極めて困難。

Knudsen et al. 2007,
ApJ, 666, 156
Izumi et al. 2013,
PASJ, 65, 100

Q: COはあるの？

A: 恐ろしくgas richな人が
 $z=1\sim 3$ にかけて増えているようです。

$$f_{mol_gas} = \frac{M_{mol_gas}}{M_{mol_gas} + M_*}$$

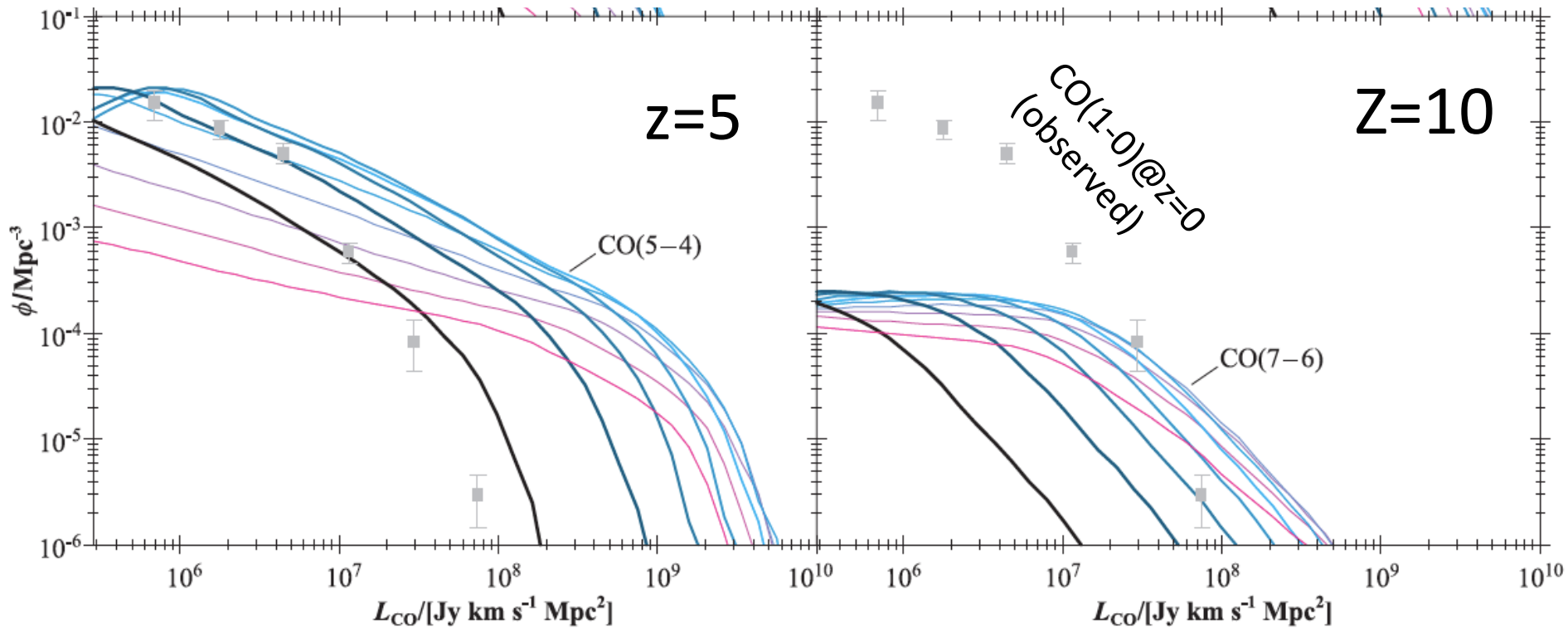


- $z=1-1.5$ (N=50):
 $\langle f_{gas} \rangle = 0.49 \pm 0.02$
- $z=2-3$ (N=17):
 $\langle f_{gas} \rangle = 0.47 \pm 0.05$

※ 5個の $z=2-2.5$ SFGsは
金属量がsubsolar
→ CO-H₂ conversion factor
は、おそらくMWの値より大
(Genzel et al. 2012)

Q: CMBの影響でlow-J COは見えない?
A: 確かに苦しくなるセンス。でもSKA2なら
可能性はある。(熱源次第?)

CO Luminosity Functions (LFs)

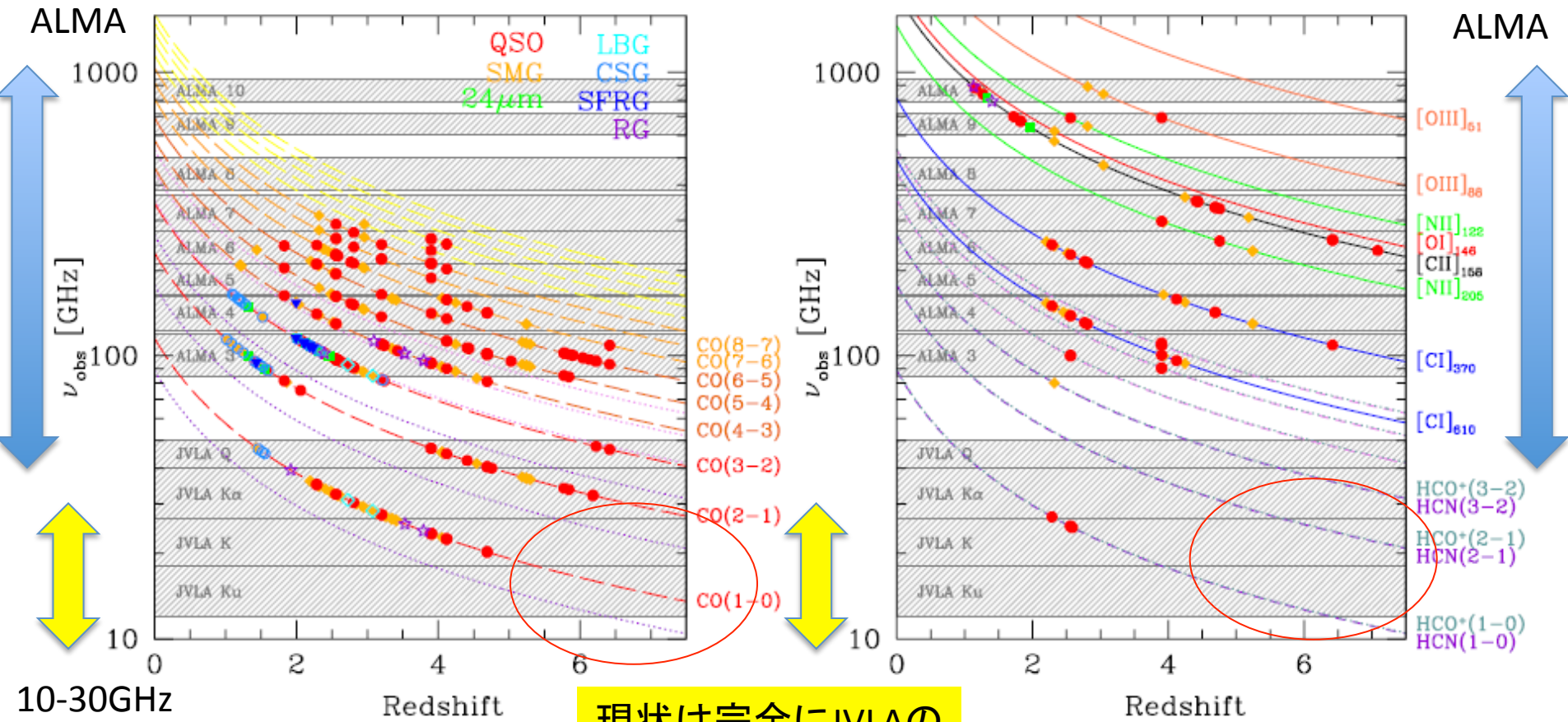


Millennium Simulation(もとづく
準解析的モデルからの予測

Obreschkow et al. 2009, ApJ, 702, 1321

CO, HCO⁺, HCN等、基本的かつ重要な分子のlow-J遷移@3mm帯

→ 宇宙再電離期は10-30GHz帯

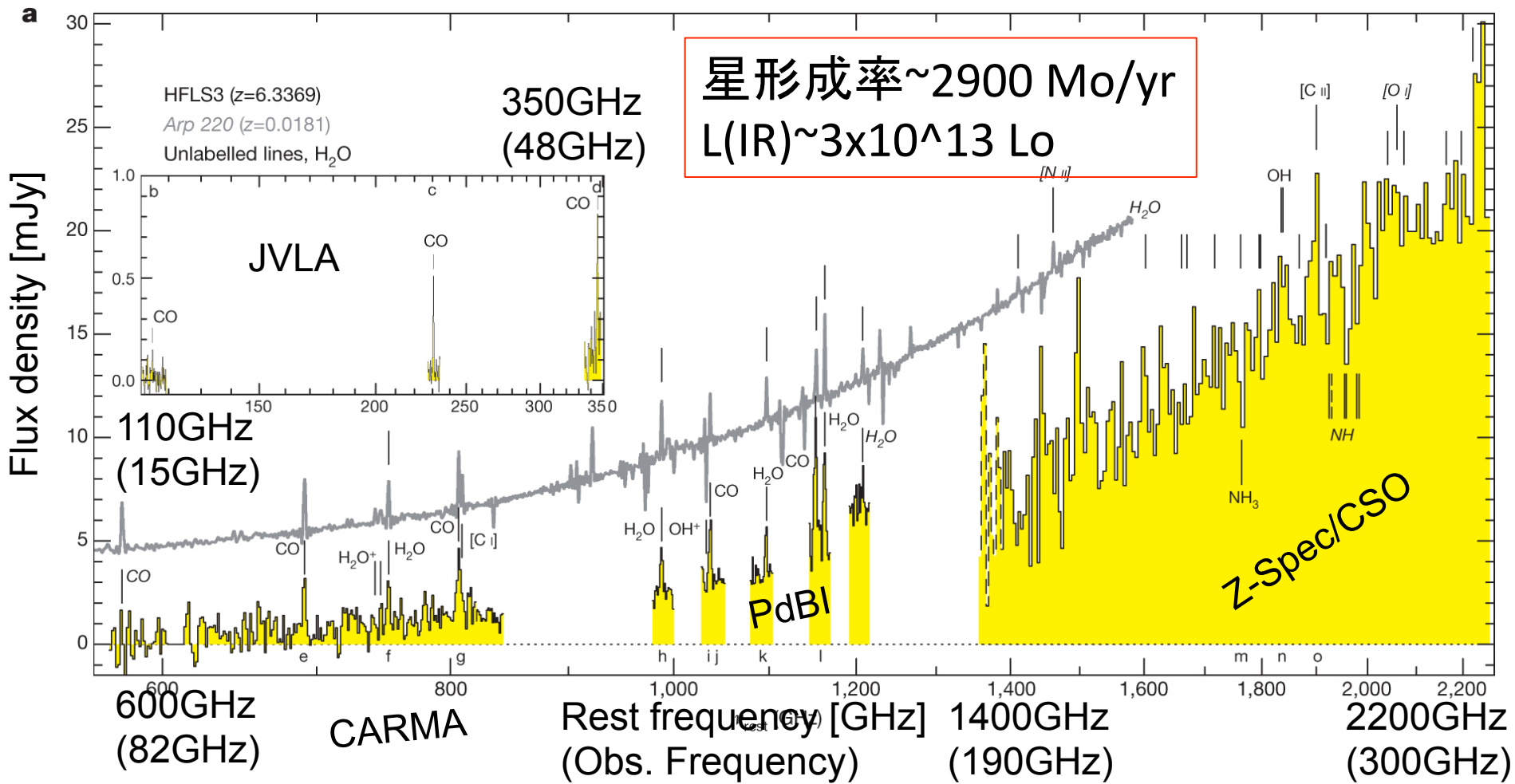


現状は完全にJVLAの感度リミット

→ $z=2.8-10.5$ @CO(1-0)
 $z=6.7-22$ @CO(2-1)

Carilli & Walter 2013, ARAA, 51, 105

現在知られている最遠方のサブミリ波銀河 HFLS3 at $z=6.34$ (& Arp220 at $z=0.018$ との比較)

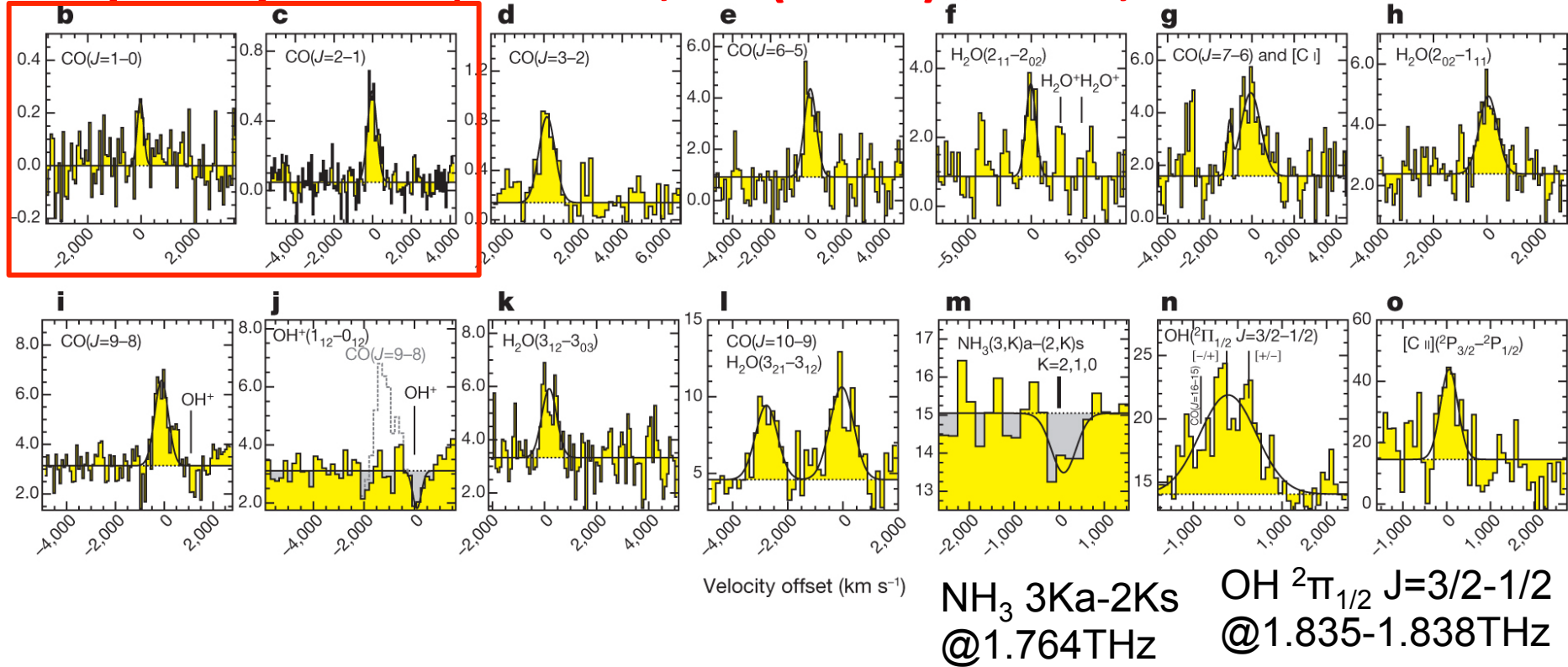


45m/ALMA-band3での知見をhigh- z (特に宇宙再電離期)で活かすには10-30 GHz帯が生命線。

Riechers et al. 2013, Nature, 496, 329

Submm to FIR spectrum of HFLS3 at $z=6.34$ ($L(\text{IR})=3 \times 10^{13}$, $\text{SFR}=2900 \text{ Mo/yr}$)

CO(J=1-0)@JVLA, 1.5 hrs; CO(J=2-1)@JVLA, 2.5 hrs



「最も明るい人」で数時間@JVLA
 ULIRGs ($L(\text{IR}) \sim 10^{12} L_{\odot}$) では100時間!?
 LIRGsでは・・・

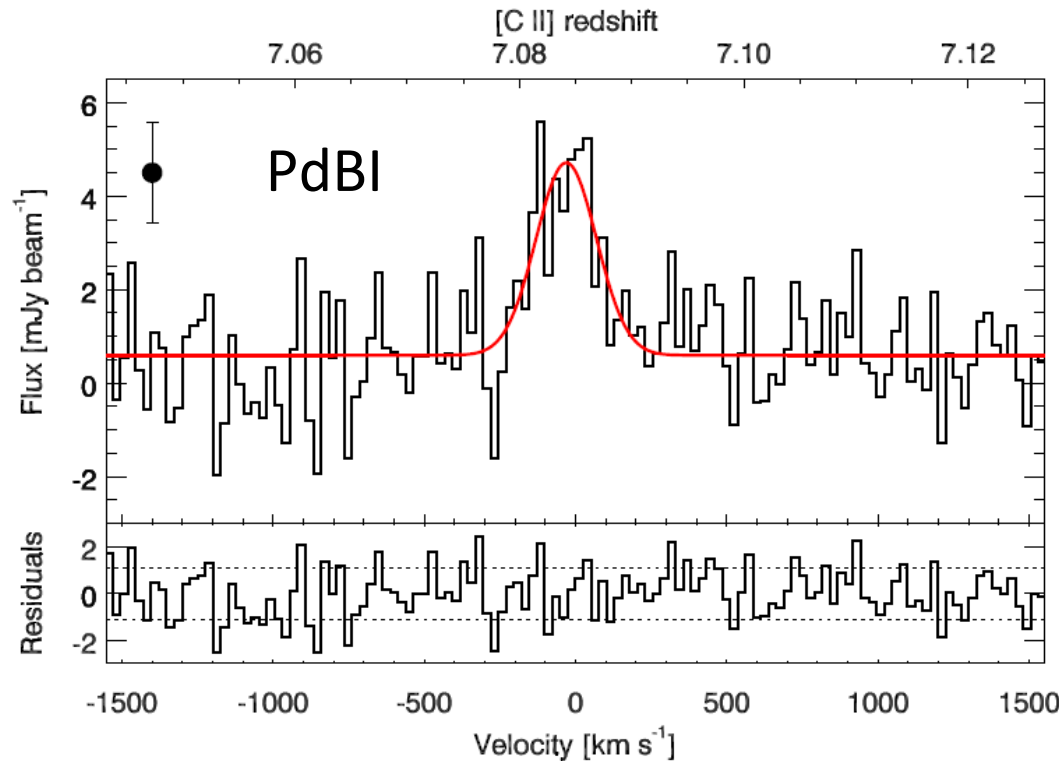
Riechers et al. 2013, Nature, 496, 329

Dusty starburst + 超巨大ブラックホール

@z=7.084 quasar J1120+0641

Venemans et al. 2012,
ApJ, 751, L25

Source is unresolved by
2".0 x 1".7 beam
(10 kpc x 9 kpc)

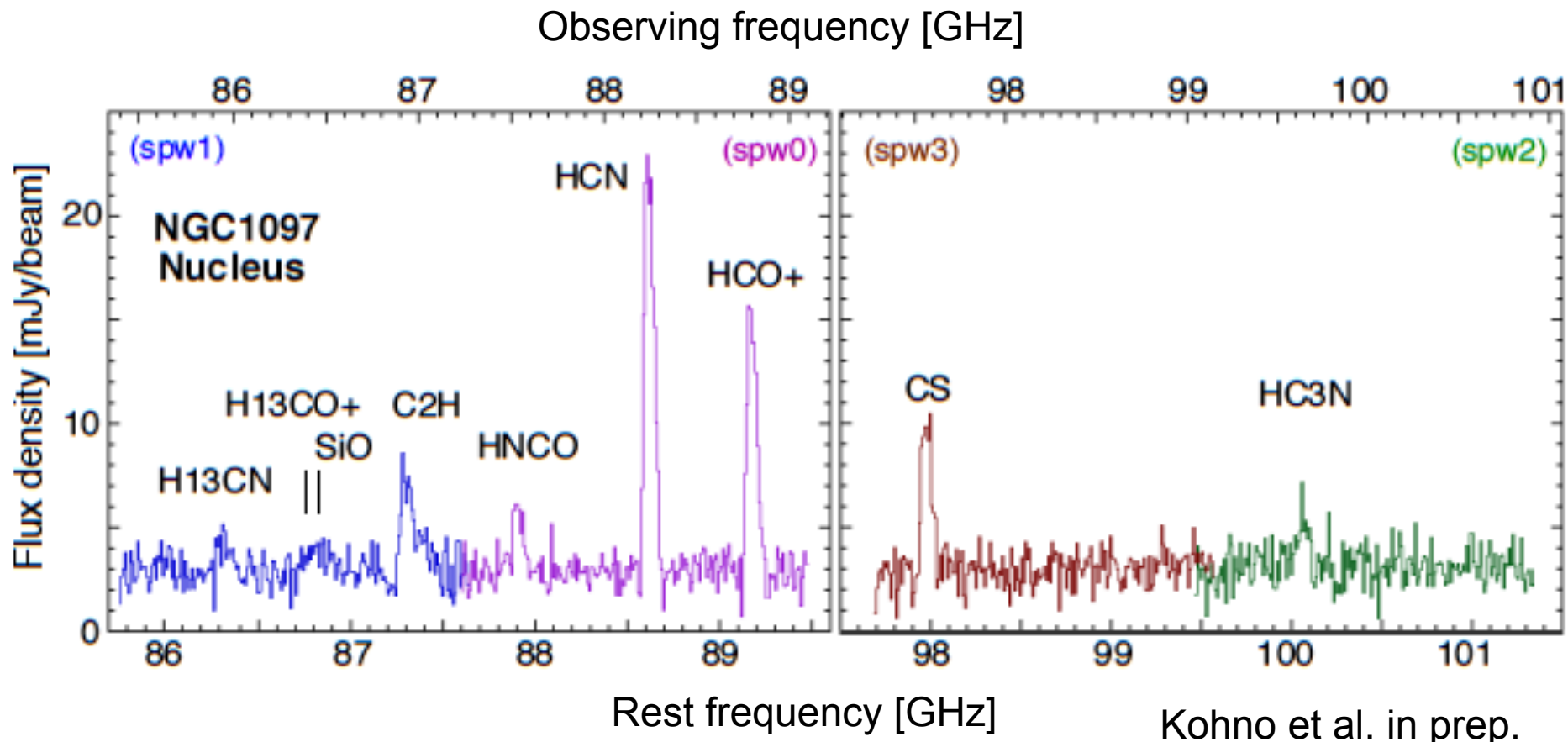


235 GHz continuum

→ $L(\text{FIR}) = 6 \times 10^{11} - 2 \times 10^{12} L_{\odot}$,
 $M(\text{dust}) = 7 \times 10^7 - 6 \times 10^8 M_{\odot}$

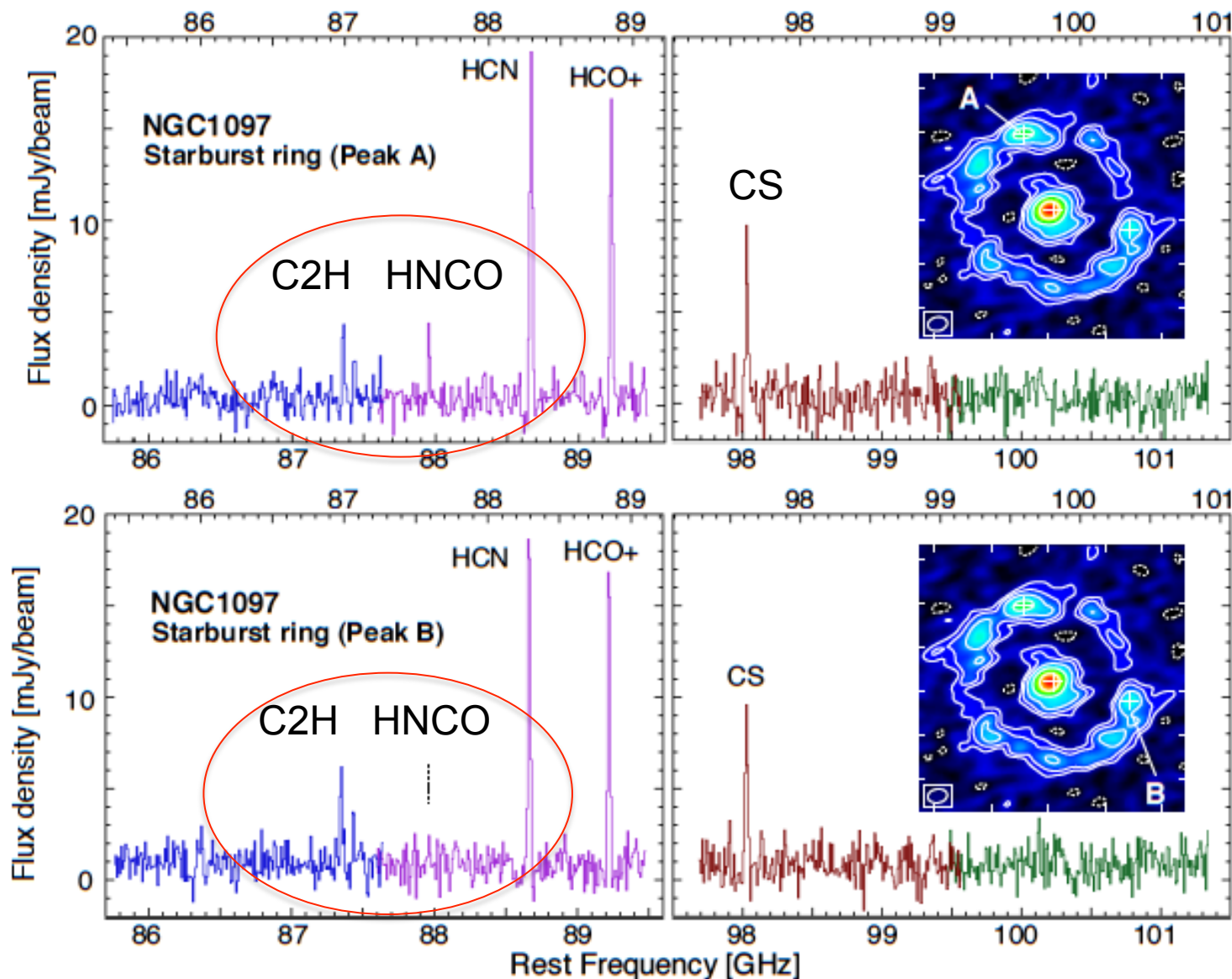
- ALMAによるdeep survey
 - HSCによる広域クエーサー探査
- 膨大なz>6の天体候補

ALMA Band 3 (80-100 GHz帯) spectrum of NGC 1097



before continuum subtraction; convolved to 2".3 circular beam
smoothed to $\Delta f \sim 9.8$ MHz (or $\Delta v \sim 33$ km/s @ HCN)

Chemical diversity among the starburst ring: tracing different phase of starburst?



Spectra at two brightest HCN(1-0) peaks (also bright in 3.2mm cont. → starburst)

Significant difference in HNCO strengths between 2 peaks

despite of similar intensities of HCN, HCO+, CS and C2H

Kohno et al.
in prep.

分子存在量の導出 → Rotation diagram

- レベル分布がBoltzmann分布(平衡温度T)に従うスペクトル線の柱密度は

$$N_u = N_{\text{tot}} \frac{g_u}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right)$$

ここで $Q(T) = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$: 全ての準位における状態数
 E_i が一つの状態のエネルギー

- 両辺を g_u で割って自然対数を取ると

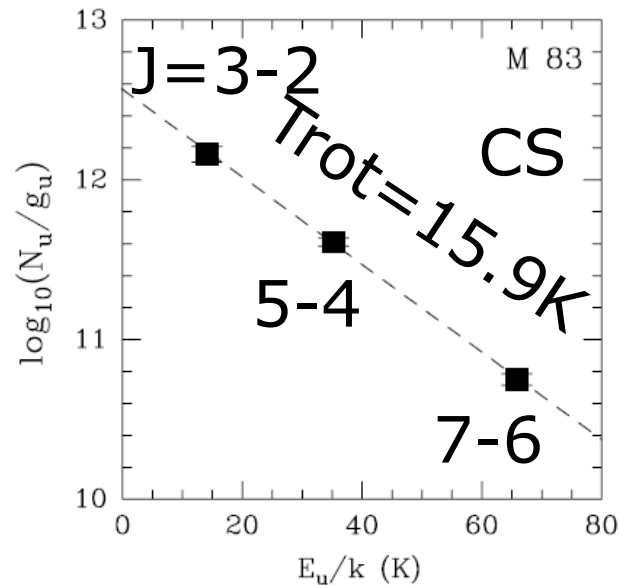
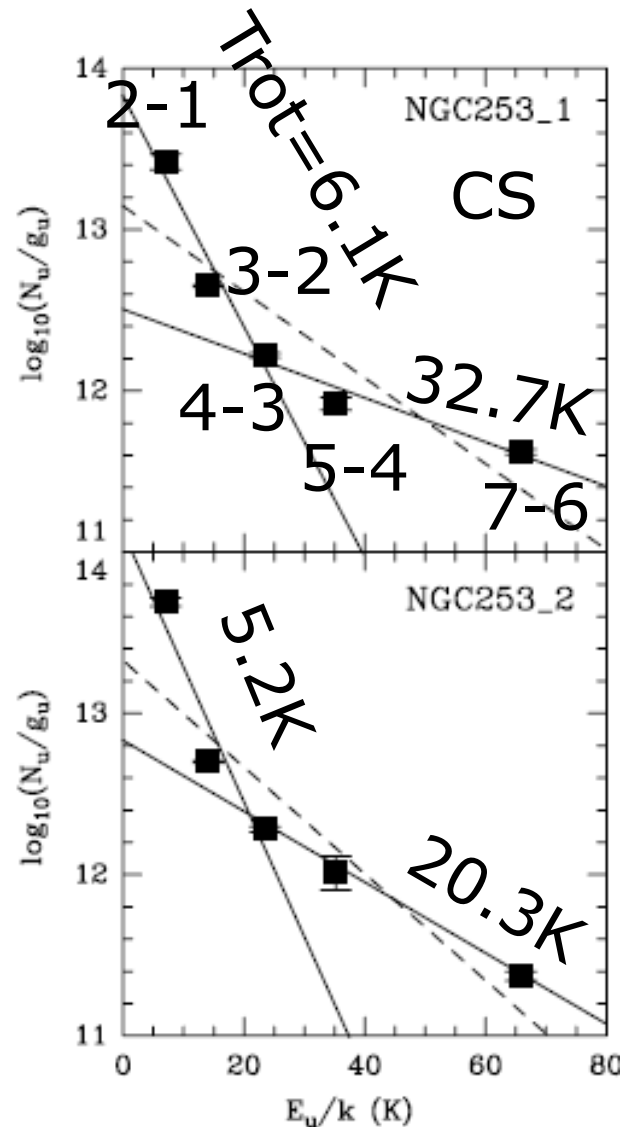
$$\ln\left(\frac{N_u}{g_u}\right) = \ln\left(\frac{N_{\text{tot}}}{Q(T)}\right) - \frac{E_u}{k_B T}$$

→いろいろな遷移で、その遷移での柱密度を測定し、 E_u の関数としてプロット→ グラフの傾きからTが、切片から全粒子数(N_{tot})がわかる

Q: 遷移は2本もあれば充分では？

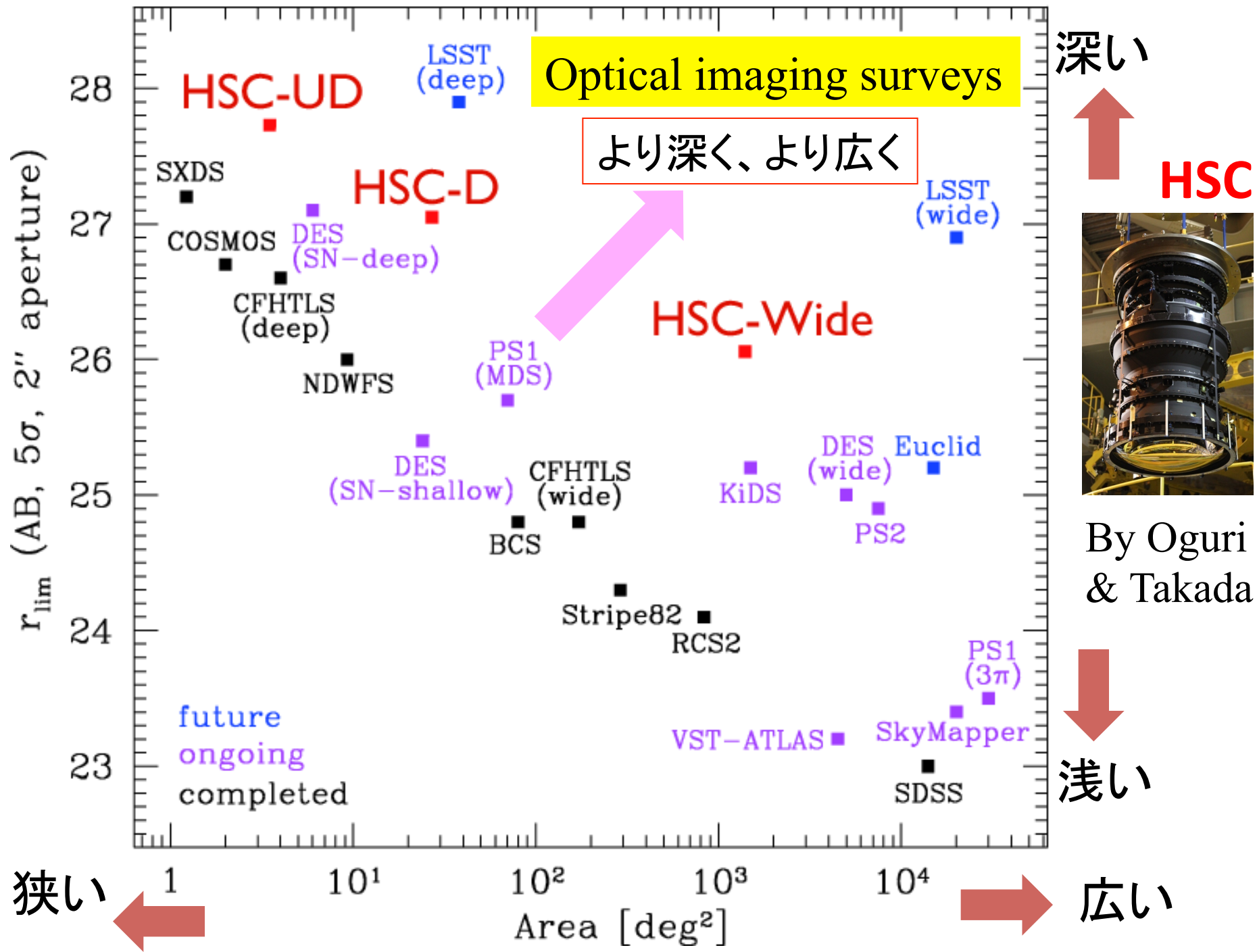
A: いいえ、幅広い量子数まで取らないと大間違いをする可能性があります。

→ SKAによる low-J と ALMA による high-J の両方の測定が必要です。



Bayet et al. 2009,
ApJ, 707, 126

宇宙再電離期の銀河研究： 連続波でのSKA-low & ALMA連携



広い



Area (deg²)



狭い

Radio Sky Survey

Limit of Conventional Radio-telescopes

Norris et al. 2013
PASA, 30, e020

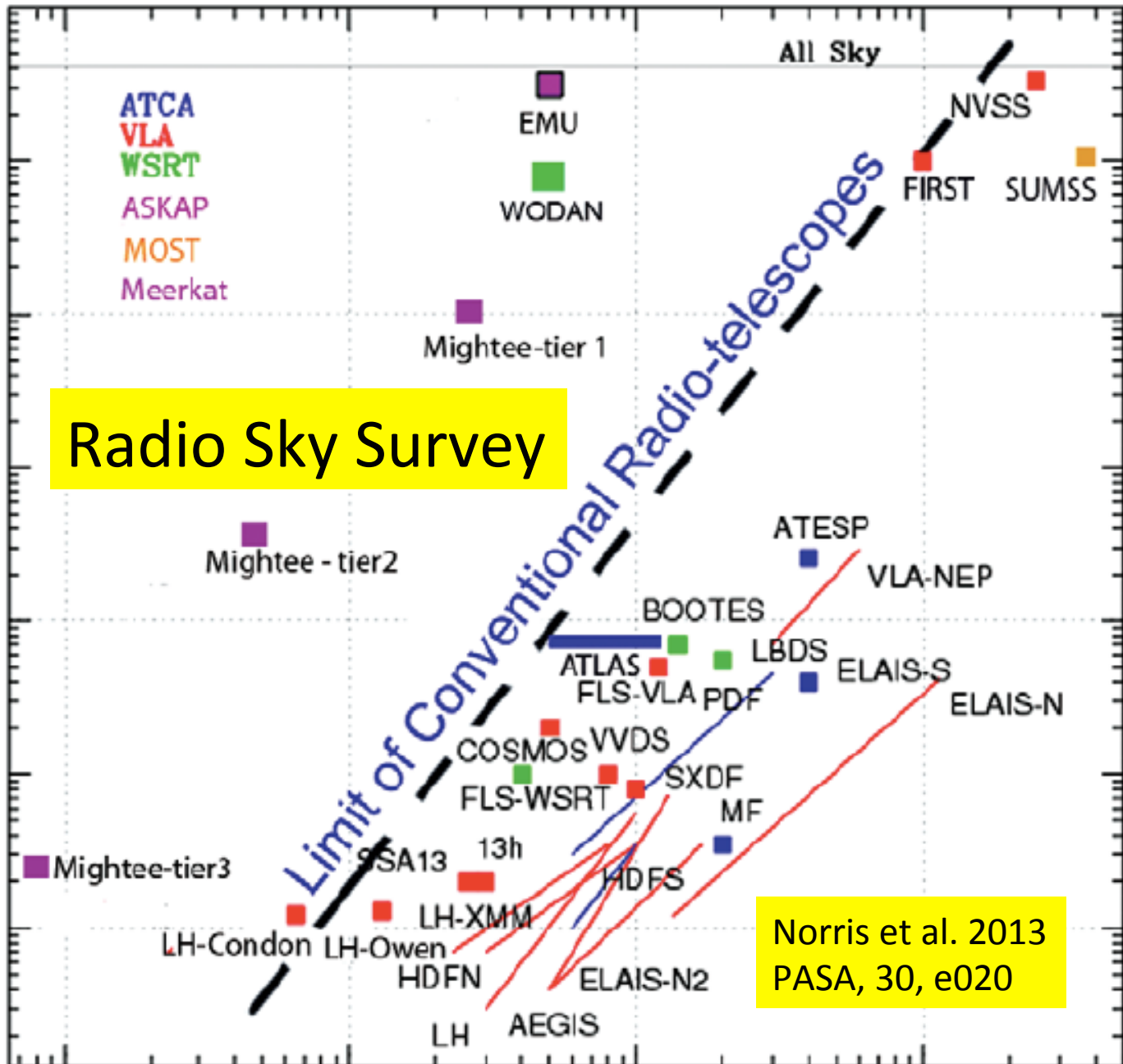
深い



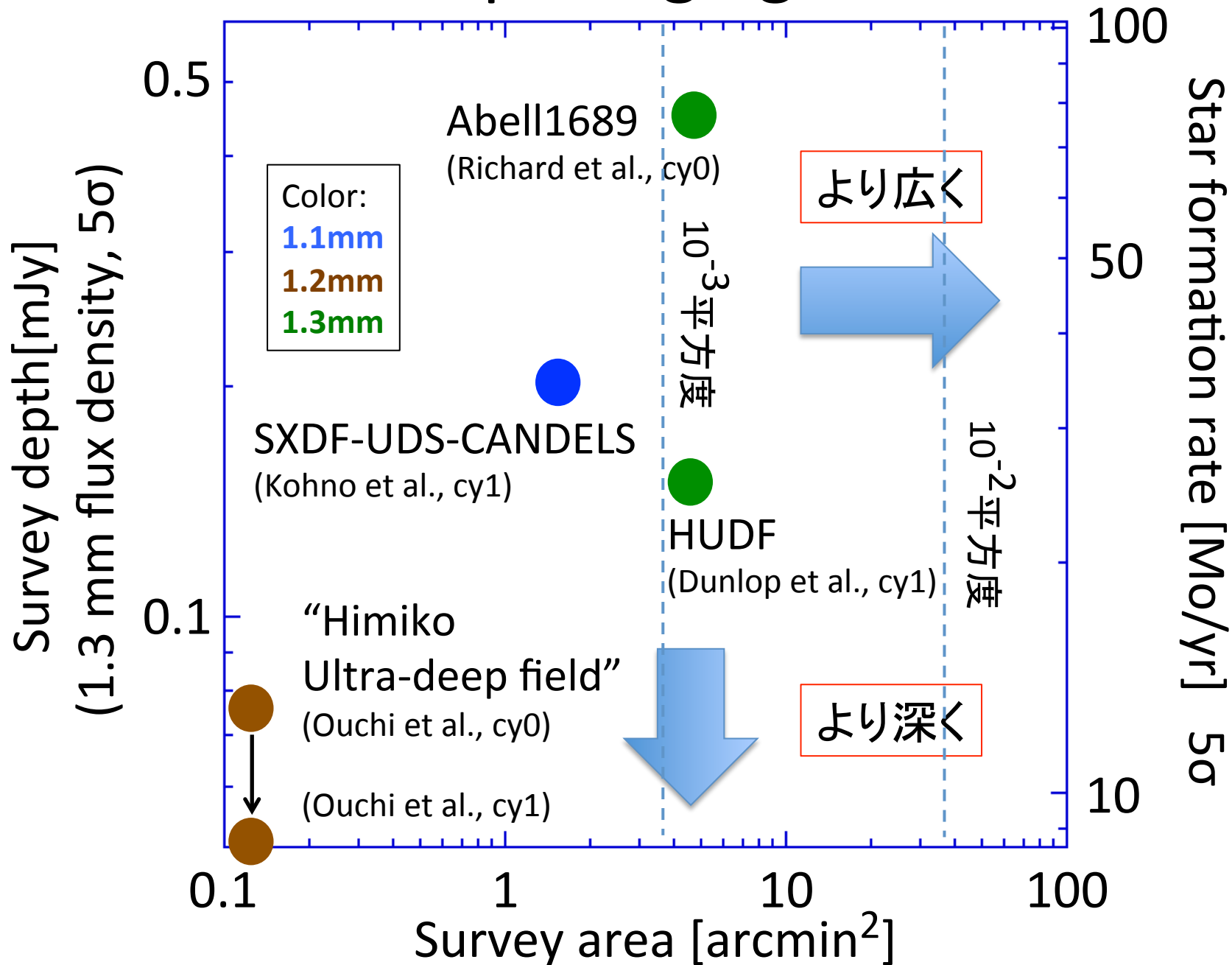
1.4 GHz flux (5 σ) S_{lim} (mJy)



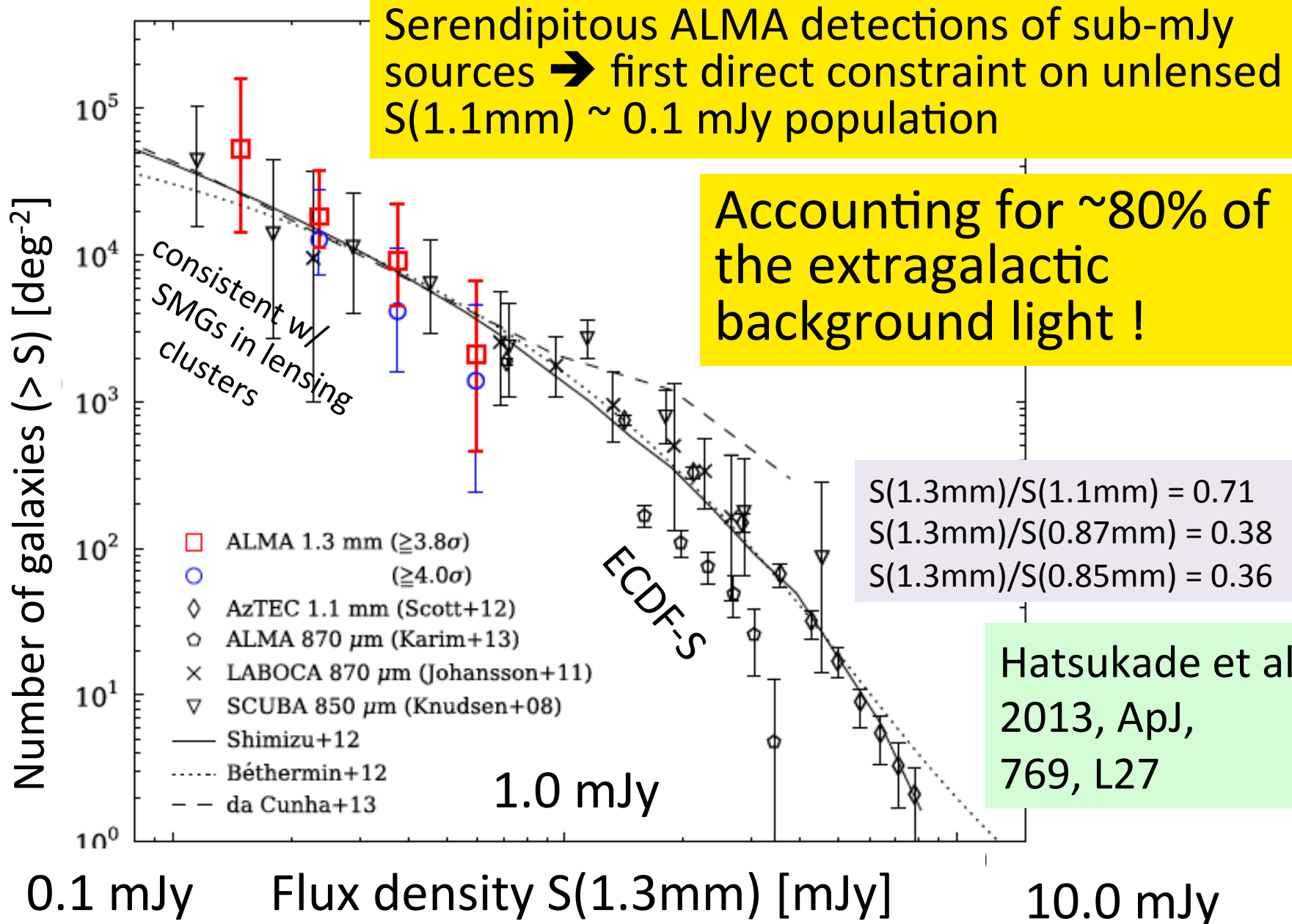
浅い



ALMA Deep Imaging at $\sim 1\text{mm}$



Importance of “sub-mJy” population



SXDS-UDS ancillary data (opt-IR)

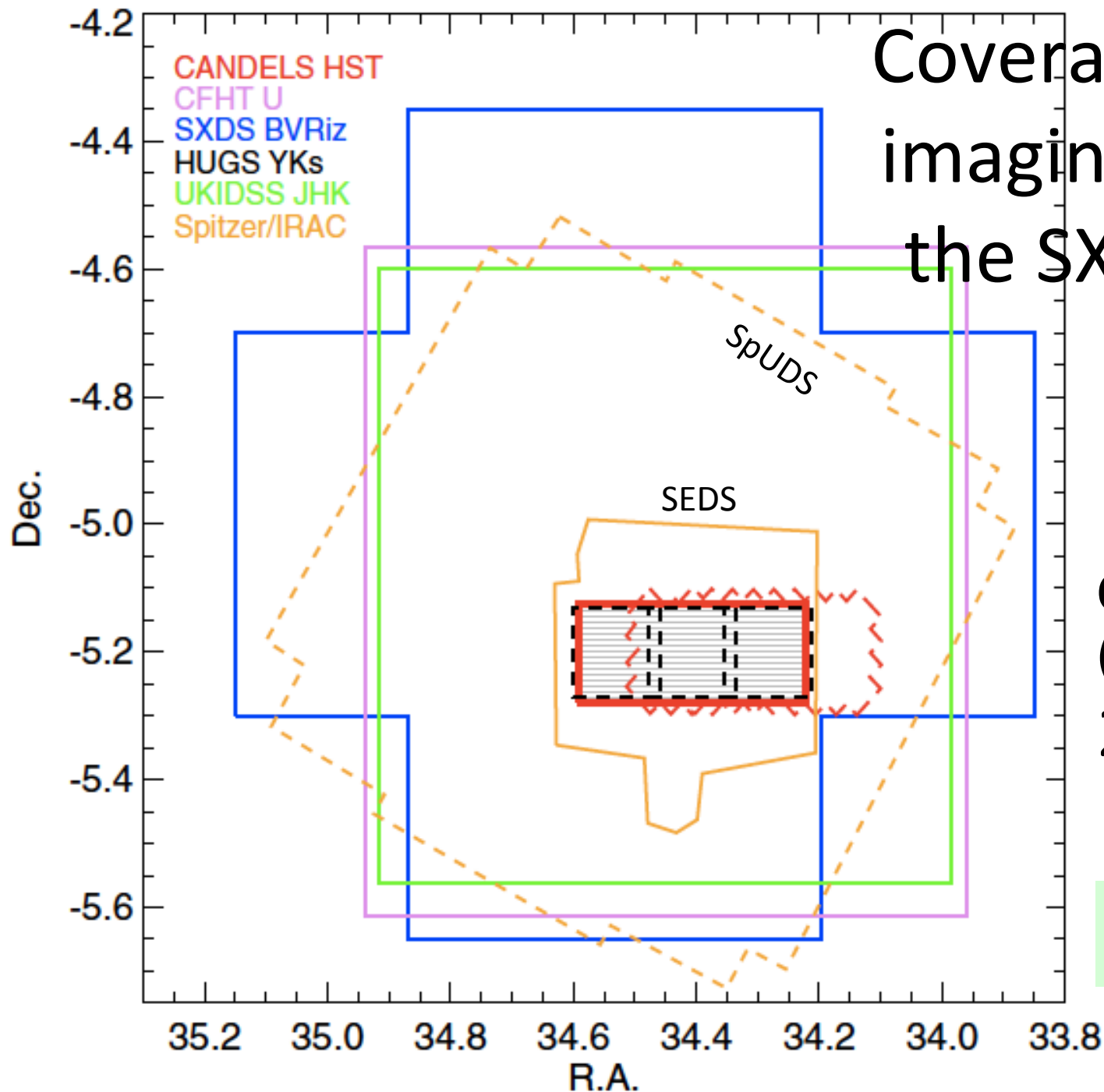
Galametz et al.
2013, ApJS, 206, 10

Instrument	Filter	Central Wavelength (nm)	FWHM (arcsec)	Limiting Magnitude (5σ , 1 FWHM radius, AB)	Survey ^a
CFHT/MegaCam	<i>u</i>	386	0.86	27.68	(1)
Subaru/Suprime-Cam	<i>B</i>	450	0.82	28.38	(2)
+ Subaru HSC ultra-deep g, r, i, z, y, ~27-28 mag & NB816,921,101	<i>V</i>	548	0.82	28.01	(2)
	<i>R_c</i>	650	0.80	27.78	(2)
	<i>i'</i>	768	0.82	27.69	(2)
	<i>z'</i>	889	0.81	26.67	(2)
	<i>HST/ACS</i>	<i>F606W</i>	598	0.10	28.49
	<i>F814W</i>	791	0.10	28.53	(3)
<i>HST/WFC3</i>	<i>F125W</i>	1250	0.20	27.35	(3)
	<i>F160W</i>	1539	0.20	27.45	(3)
VLT/HAWK-I ^b	<i>Y</i>	1019	0.42/0.52/0.49	27.05/26.73/26.69	(4)
	<i>K_s</i>	2147	0.36/0.42/0.37	26.16/25.92/25.98	(4)
UKIRT/WFCAM	<i>J</i>	1251	0.76	25.63	(1)
	<i>H</i>	1636	0.80	24.76	(1)
	<i>K</i>	2206	0.70	25.39	(1)
<i>Spitzer/IRAC</i>	3.6 μm	3562	~1.9	24.72	→ 25.0 (5)
	4.5 μm	4512	~1.9	24.61	Spitzer cy10 (5)
	5.8 μm	5686	2.08	22.30	(6)
	8.0 μm	7936	2.20	22.26	(SPLASH2) (6)

Notes.

^a (1) UKIDSS: O. Almaini et al., in preparation; (2) SXDS: Furusawa et al. 2008; (3) CANDELS: Koekemoer et al. 2011; (4) HUGS: A. Fontana et al., in preparation (5) SEDS: Ashby et al. 2013. (6) SpUDS.

^b FWHM and limiting magnitudes are provided for the three HAWK-I pointings following the scheme Pointing1/Pointing2/Pointing3 (i.e., Central/West/East; see A. Fontana et al., in preparation).



Coverage of the imaging data in the SXDS-UDS

CANDELS-UDS
(+ VLT/HAWK-I)
22'.3 x 9'

Galametz et al.
2013, ApJS, 206, 10

Angular resolution of JVLA

Configuration	A	B	C	D
B_{\max} (km ¹)	36.4	11.1	3.4	1.03
B_{\min} (km ¹)	0.68	0.21	0.035 ⁵	0.035
Band	Synthesized Beamwidth θ_{HPBW}(arcsec)			
74 MHz (4 band)	24	80	260	850
350 MHz (P)	5.6	18.5	60	200
1.5 GHz (L)	1.3	4.3	14	46
3.0 GHz (S)	0.65	2.1	7.0	23
6.0 GHz (C)	0.33	1.0	3.5	12
10 GHz (X)	0.20	0.60	2.1	7.2
15 GHz (Ku)	0.13	0.42	1.4	4.6
22 GHz (K)	0.089	0.28	0.95	3.1
33 GHz (Ka)	0.059	0.19	0.63	2.1
45 GHz (Q)	0.043	0.14	0.47	1.5

JVLA → SKA1-midへの期待(1): (少なくとも)HSTと同等の角分解能

		JVLA	MeerKAT	SKA1-mid	ASKAP	SKA1-survey	LOFAR-NL	SKA1-low
Aeff/Tsys	m ² /K	265	321	1630	65	391	61	1000
Survey FoV	deg ²	0.14	0.48	0.39	30	18	6	6
Survey Speed FoM	deg ² m ⁴ K ⁻²	0.98×10 ⁴	5.0×10 ⁴	1.0×10 ⁶	1.3×10 ⁵	2.8×10 ⁶	2.2×10 ⁴	6.0×10 ⁶
Resolution	arcsec	1.4	11	0.22	7	0.9	5	11

ようやく20cmでHST/WFC3と同等の解像度に

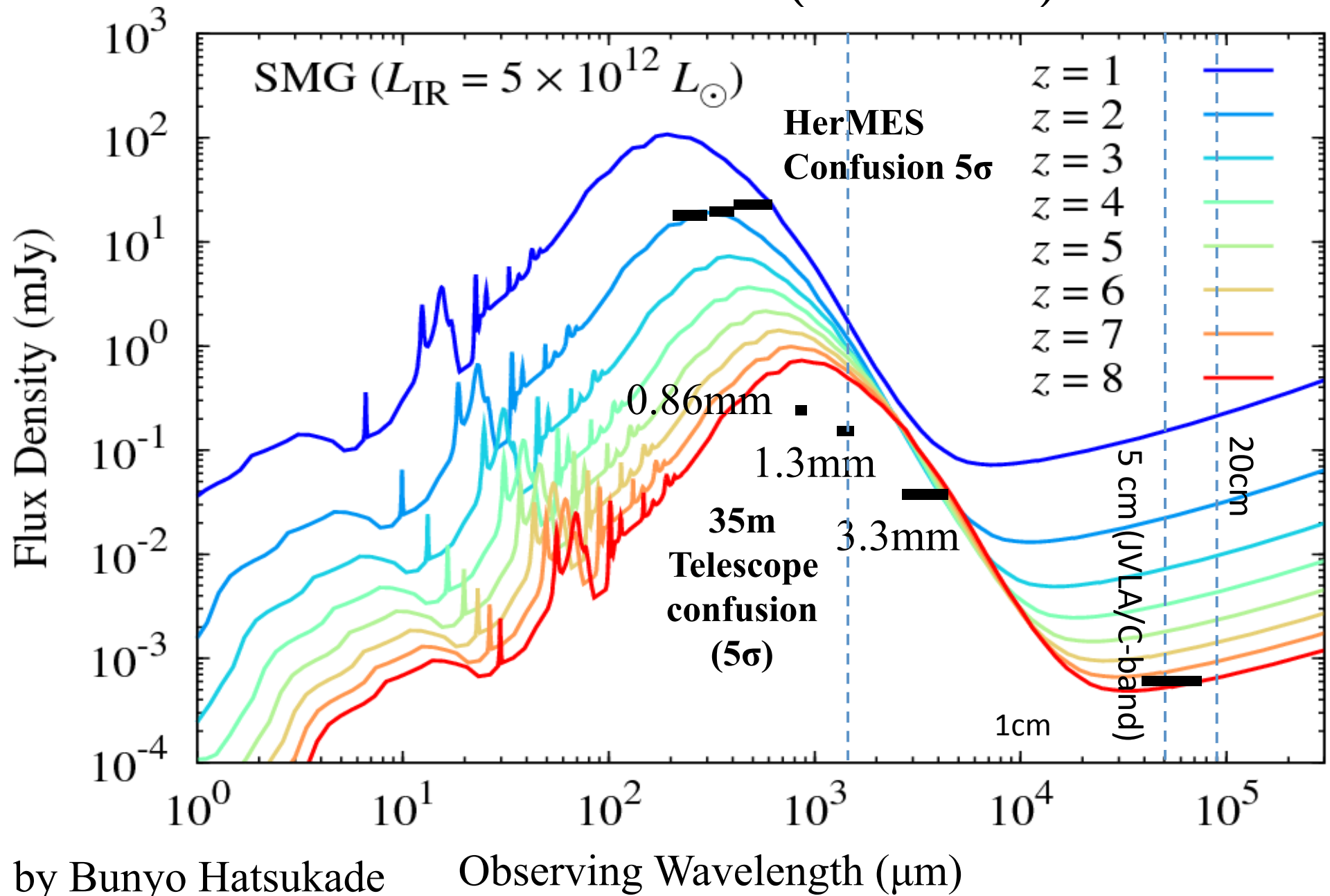
2013 SKA Engineering Meeting (07-11 Oct. 2013),

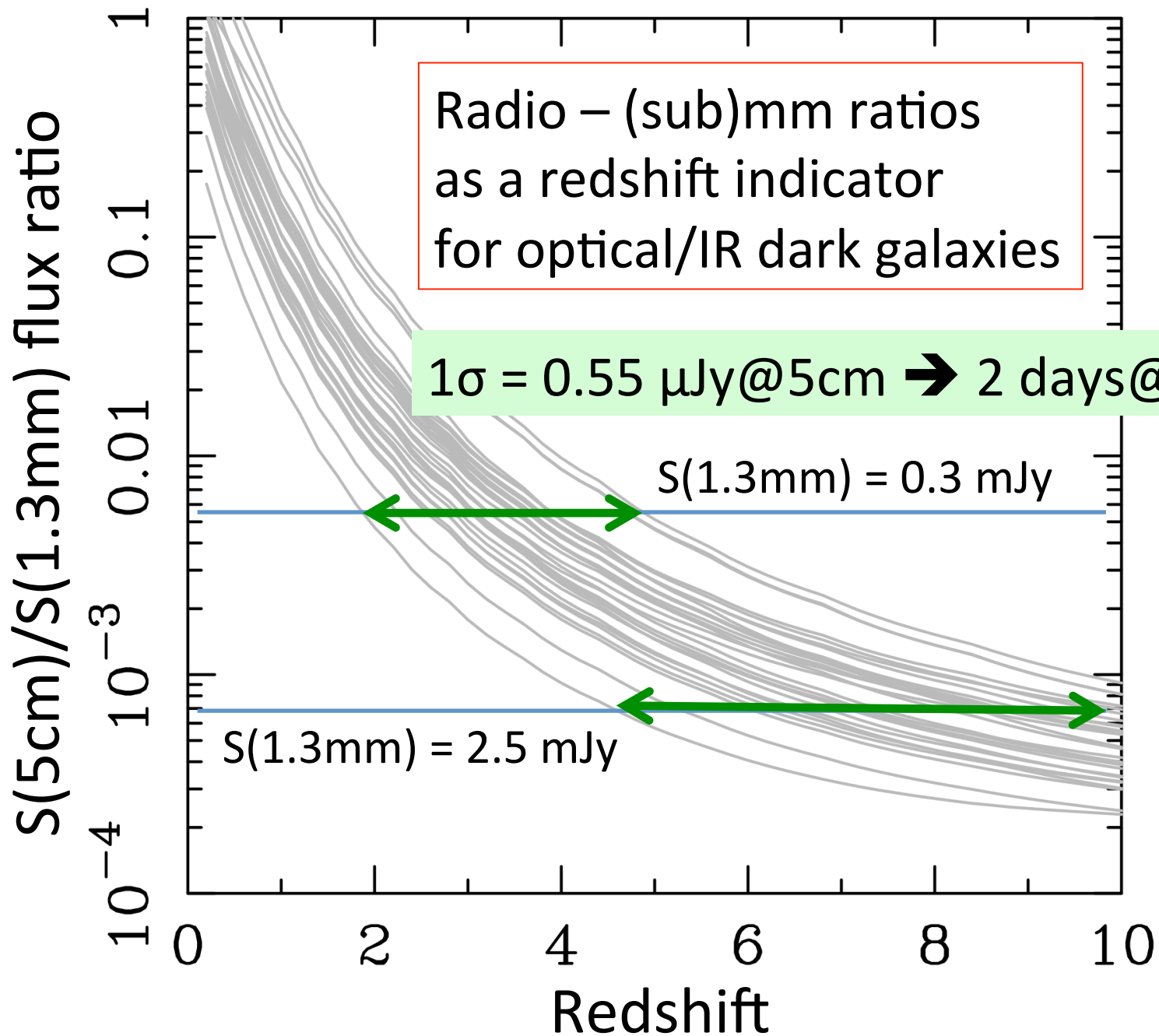
R. Braun "Science Capabilities and Focus of SKA1-low, -mid and -survey"

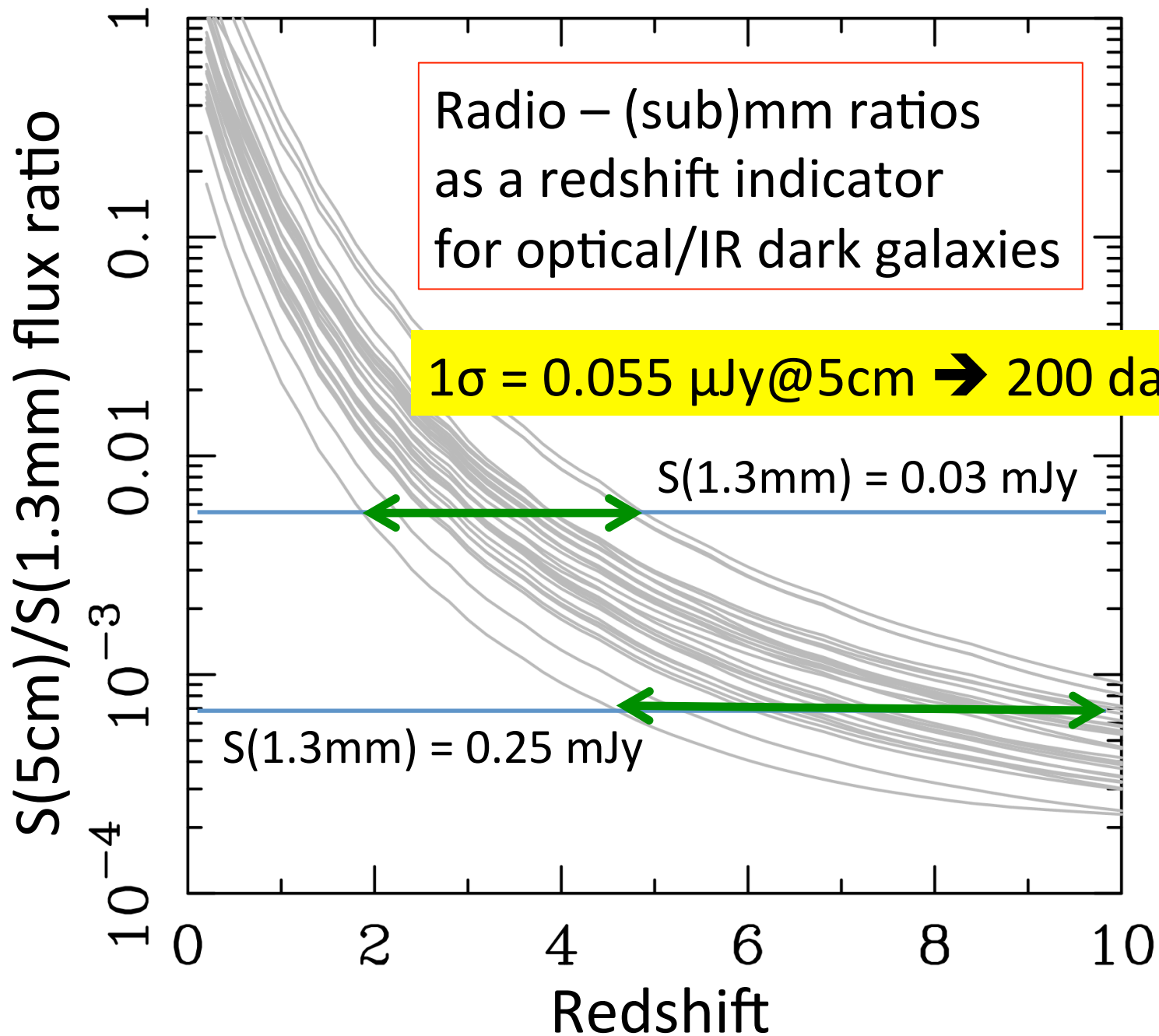
<https://indico.skatelescope.org/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=241>

次はJWST→SKA2へ

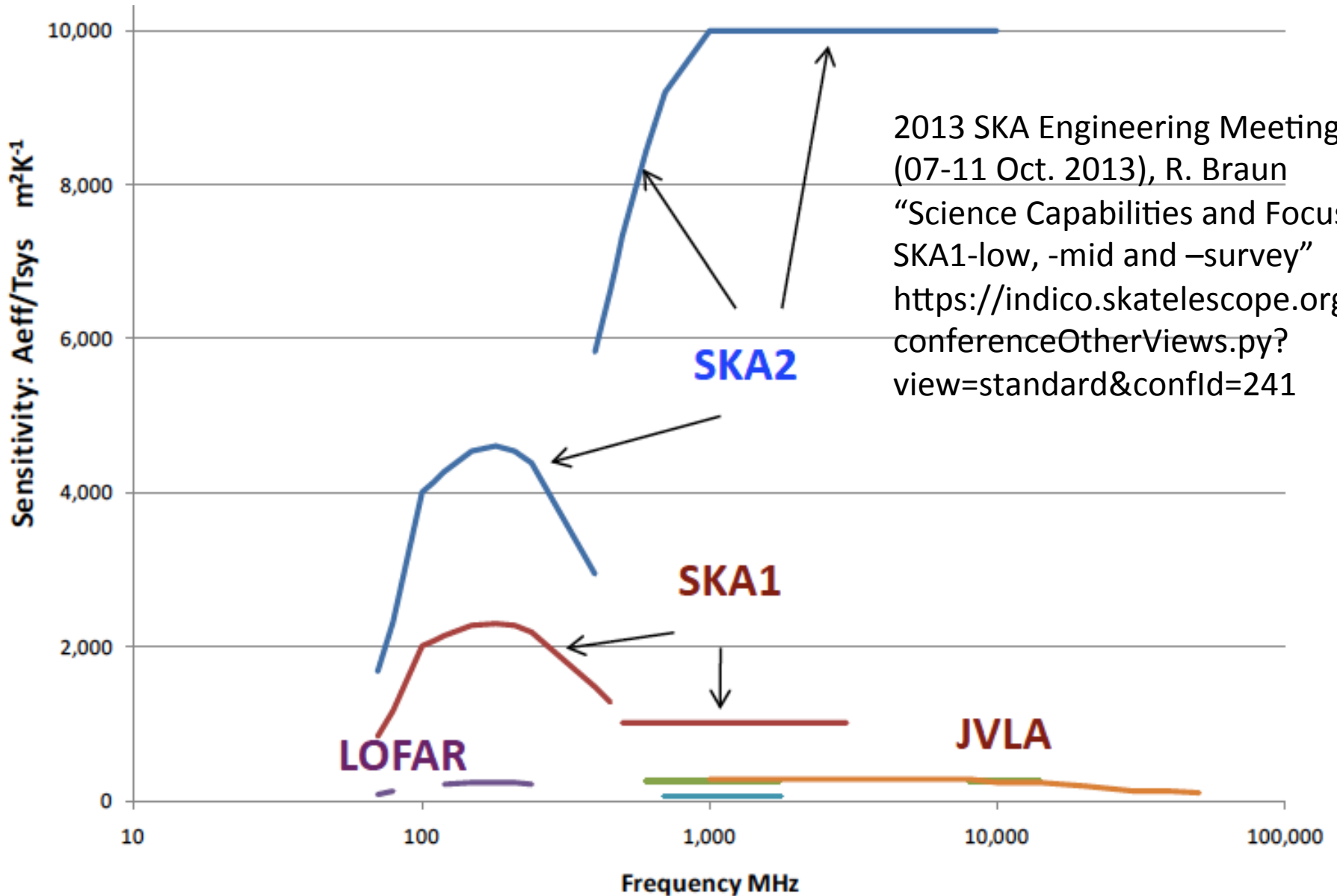
Confusion limits (D=35m)







SKA1/2への期待(2): 感度

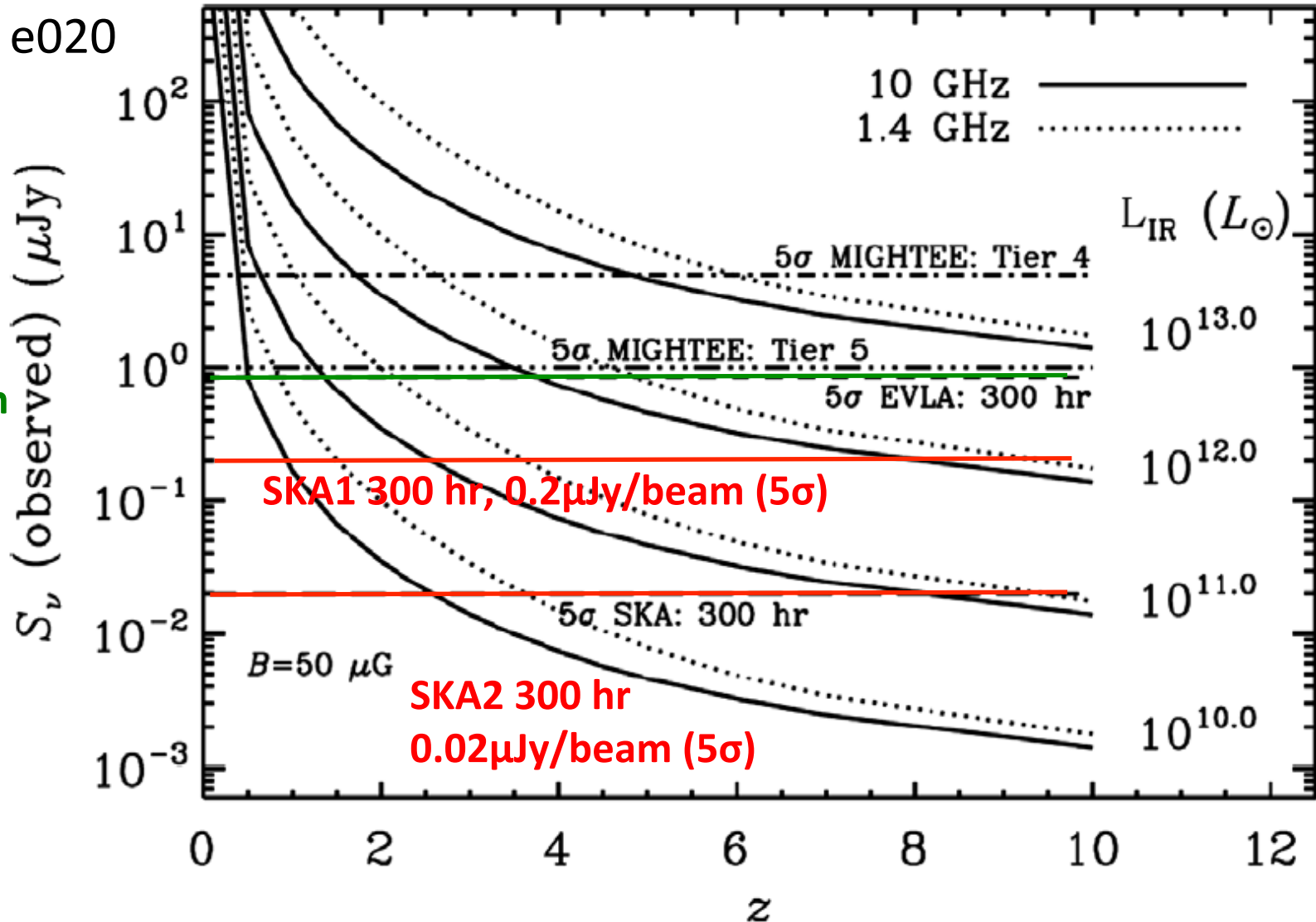


2013 SKA Engineering Meeting
(07-11 Oct. 2013), R. Braun
“Science Capabilities and Focus of
SKA1-low, -mid and -survey”
[https://indico.skatelescope.org/
conferenceOtherViews.py?
view=standard&confId=241](https://indico.skatelescope.org/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=241)

SKA2 can hunt LIRGs @z~8 !?

Norris et al. 2013,
PASA, 30, e020

SKA1なら ULIRGs@z~8まで行けそう。



JVLA 300 hr
~1 $\mu\text{Jy}/\text{beam}$
(5 σ)

※JVLA
exposure
calc.とは
合わず??

まとめ

- 宇宙再電離期の銀河研究を進める上で、SKAとALMAの連携はとても重要。
- 星間物質の進化を追う上で、分子ガスの理解も不可欠。個々の銀河が見える → SKA-high
- SKA-lowによるHITモグラフィーと相補的役割
- 野辺山、ALMAにより切り開かれてきた「星間化学的な知見を系外銀河に応用する」という流れを、是非、高赤方偏移銀河に適用したい。→ SKA-high
- SKA-midによる深い電波連続波とALMAによるダスト連続波の組み合わせ → 宇宙再電離期の「普通」の星形成銀河に手が届く。

日本がSKA-high (10~20? 35? GHz)をリードしなければいけないこれだけの理由

- サイエンスの必然性と我が国における伝統
 - 宇宙再電離期への幅広い興味・関心
 - 22GHz水メーザー、HALCA等 先駆的AGNサイエンス
 - CCS(40GHz帯)発見+アンモニア等 星間化学の伝統
 - 銀河中心のサイエンス(連続波、偏波、CS等)
- これまでの日本の電波天文学の蓄積
 - 野辺山、スペースVLBI、大学連携VLBI、VERA
 - ALMA-Band1
- それを支えてきた産業界の技術・経験

日本がイニシアチブを！ (+NRAOも巻き込んで)