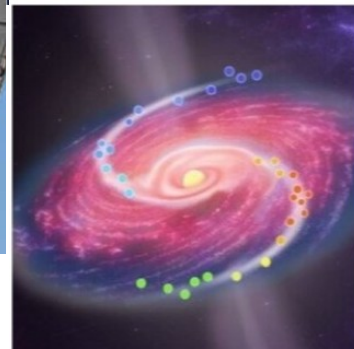
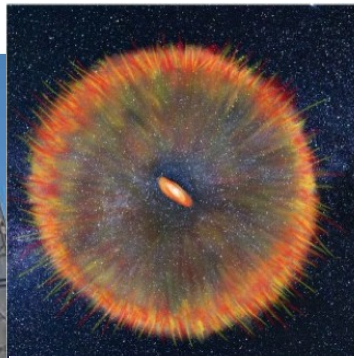


メタノールメーザーにおける 電波と光の共同観測

キーワード

- * 大質量星形成
- * メタノールメーザー
- * 強度変動（周期的、突発）



米倉覚則（茨城大学）

yoshinori.yonekura.sci@vc.ibaraki.ac.jp

主な共同研究者

杉山孝一郎（NARIT[タイ]）[言だしっぺ]

内山瑞穂（JAXA/ISAS）[opt/IR]

元木業人、藤澤健太（山口大学）

廣田朋也（NAOJ/水沢）

Ross Burns（NAOJ/KASI）[VLBI]

M20 関係者 [masermonitoring.com]

メーザーの特徴

- 強い (H₂Oメーザー[> 百万Jy]、6.7 GHz CH₃OHメーザー[7000 Jy])
- コンパクトな領域から放射されている
- 線幅細かい

➔ 高い空間分解能を達成できる**VLBI 観測が可能！**

=> 運動をトレースできる

- 強度変動 (強いから捉えやすい)
- 偏波情報
- 励起に必要な環境を推定可能

x 観測量 (強度など) から物理量の導出が困難

主なメーザーと励起機構

• H ₂ O	AGB, YSO	shock
• CH ₃ OH (class I)	YSO	shock
• CH ₃ OH (class II)	<u>high-mass</u> YSO	radiation
• SiO	AGB, (YSO)	shock
• OH	AGB, YSO	radiation
• H ₂ CO		
• NH ₃		

メタノールメーザーの分類

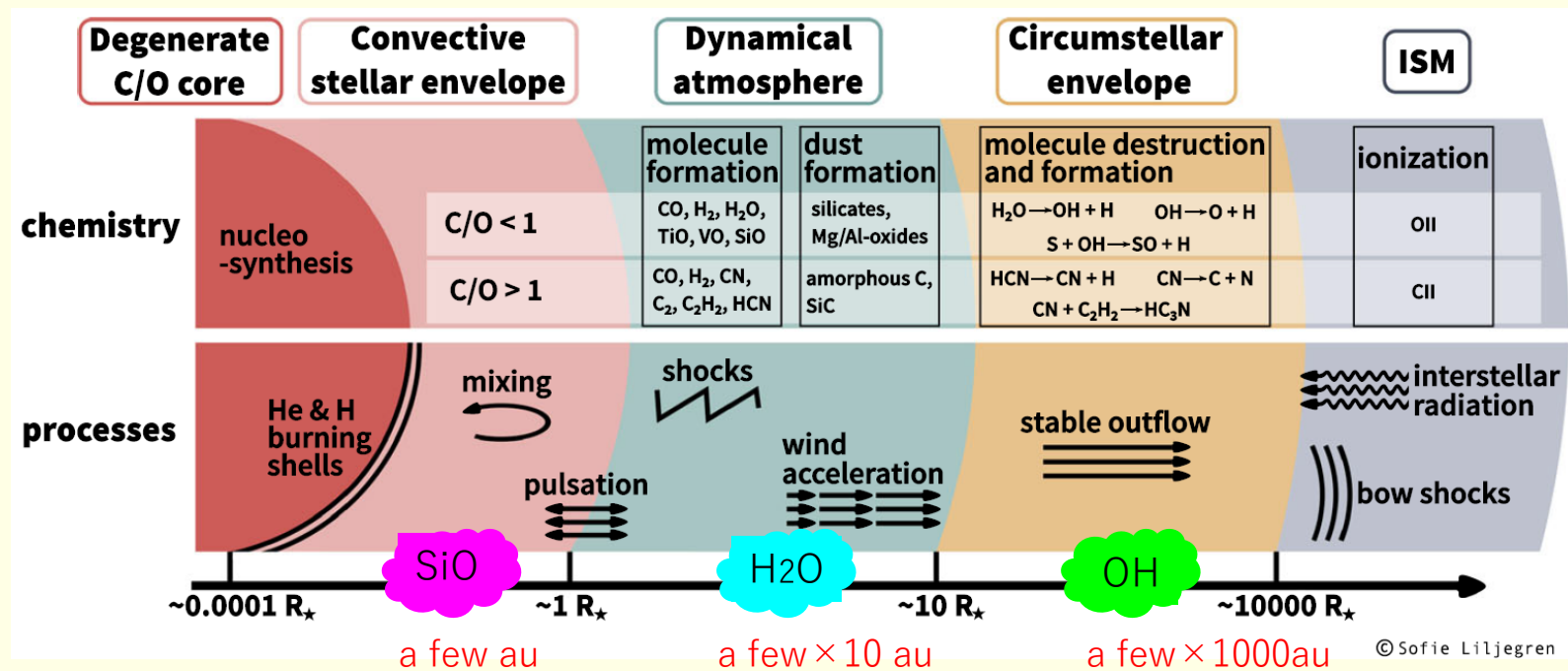
表2 メタノールメーザーの class 分類

class	周波数 [GHz]
I	0.834, 5.0, 9.9, 25.0, 25.8, 26.8, 27.4, 28.1, 29.6, 30.3, 36.1, 44.1, 84.5, 95.2, 104.3, 132.9, 146.6, 229.8
II	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 29.0, 37.7, 38.4, 86.6, 86.9, 107.0, 108.8, 156.6, 156.8, 157.2

表3 class I & II メタノールメーザーの特徴

分類	class I	class II
発生領域	アウトフローと分子雲の境界	降着円盤上
励起メカニズム	衝突励起	放射励起
メーザースポットのサイズ	数百 au	数 au
典型的な輝度温度	$10^6 - 10^8$ K	$> 10^{10}$ K

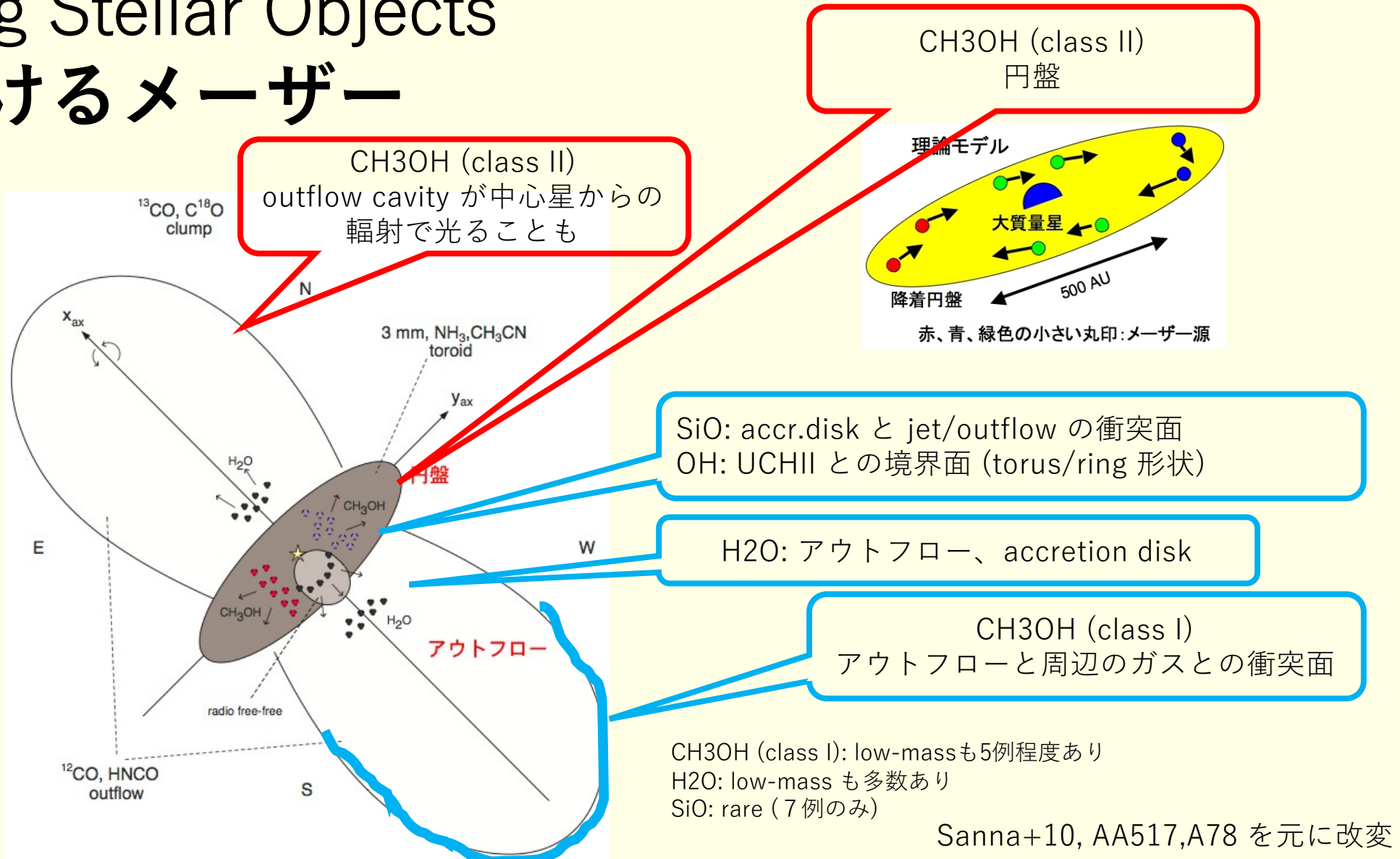
晩期型星（AGB, OH/IR star and Extreme-OH/IR star）におけるメーザー



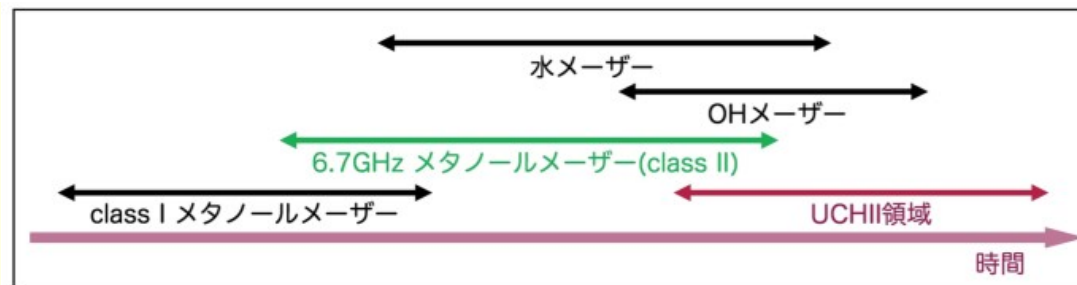
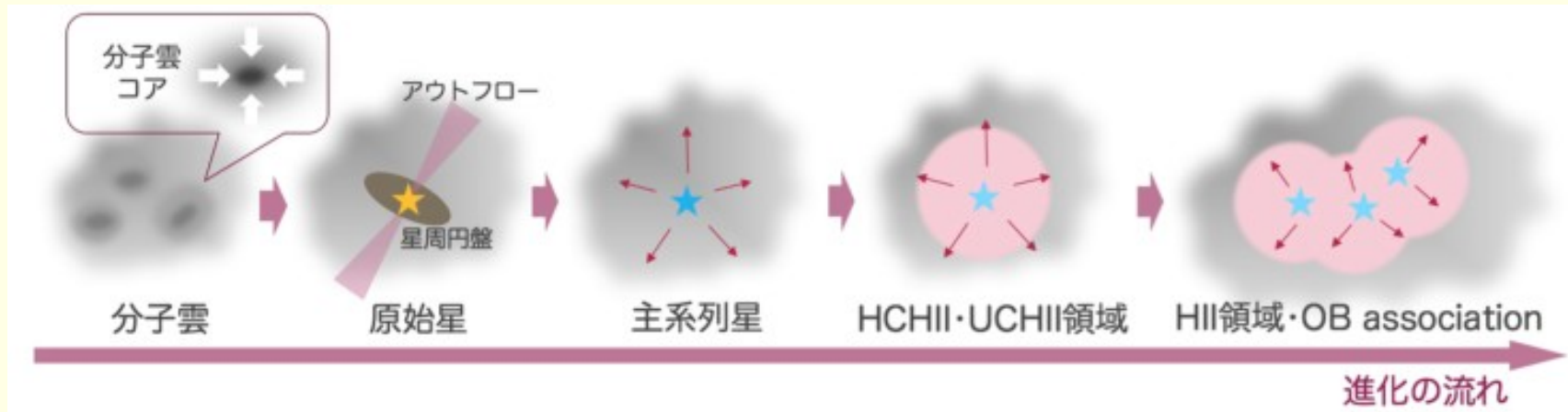
Hofner & Olofsson(2018)

中川さん（鹿児島大学）提供

Young Stellar Objects におけるメーザー

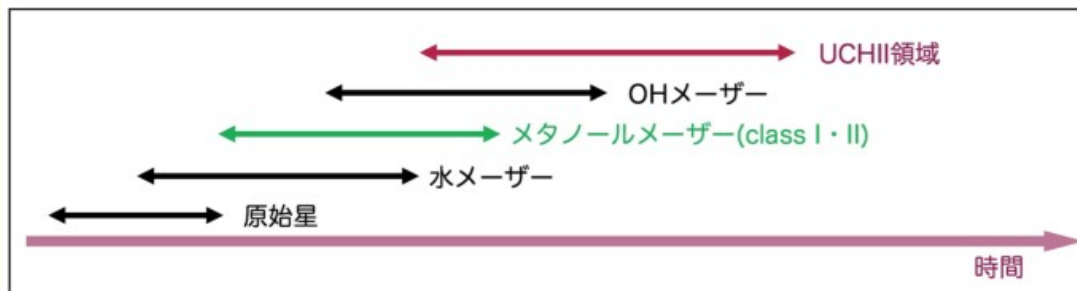


大質量星形成における各メーザーの出現時期



統一的な見解は
得られていない

Ellingsen+07 IAU Symp 242



Reid 07 IAU Symp 242

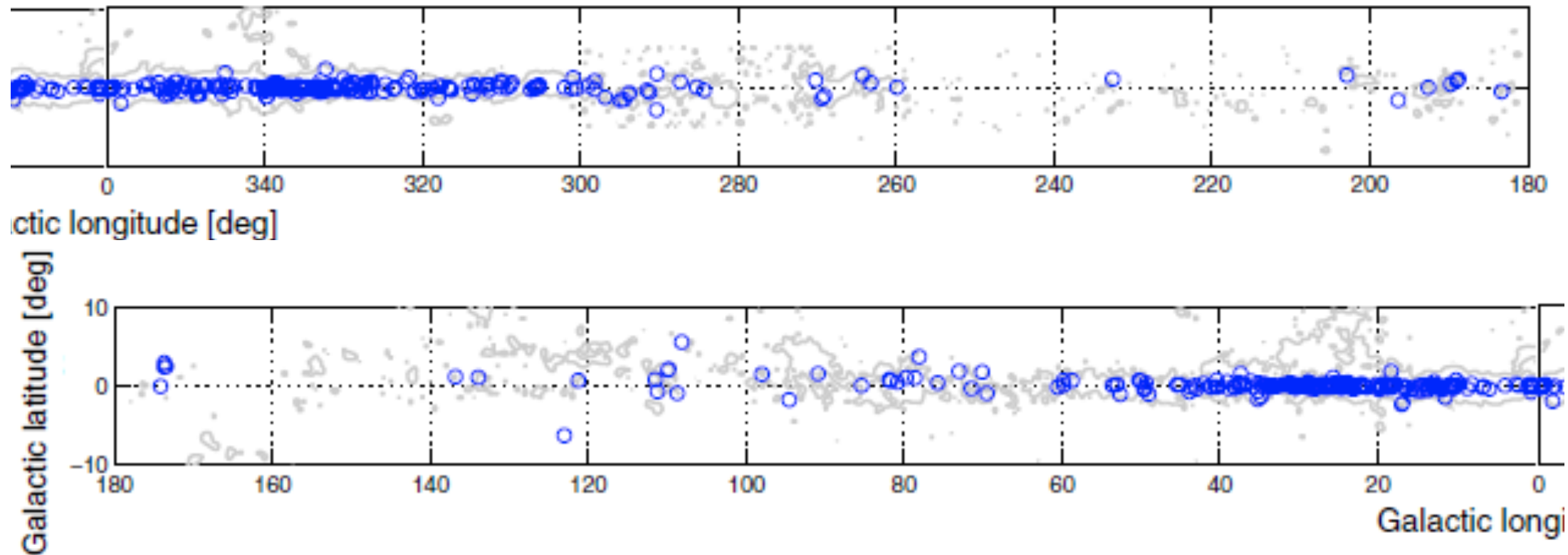
6.7 GHz メタノールメーザー

- 1991 年に初検出 (Menten91)
- H₂O メーザーに次いで強い (最も強いものは ~ 7000 Jy)
- ~ 1000 天体で検出。
- 南天 $[186 < \text{銀経(度)} < 60]$ は無バイアスサーベイ済み
@ Parkes 64-m + Multibeam (Green+09 など)
- 北天は、バイアス観測のみ
IRAS などの赤外線点源、分子コア、他のメーザーなど
=> compiled by Pestalozzi+ (2005)
- 大質量星の形成過程のみに付随 (e.g., Minier+03)
=> 大質量星形成の指標
- 円盤起源・アウトフロー起源 (multi-epoch VLBI [動画撮像] で確認)
- 赤外線励起 (cf. H₂O は衝突励起)
- 励起条件 (Gragg+05)
 $n(\text{H}) \sim 10^{(4-9)}$ 個 cm^{-3} , $T_{\text{dust}} \sim 120-300$ K

- 南天
強度変動するもの (かつ静穏期強度が非常に弱いもの) は見落としあるかも
- 北天
無バイアスサーベイ未実施：
暗いものや、強度変動するもの は、見落としあるかも

2005年時点で検出されていた 6.7GHzメタノールメーザー源の分布

(2005年時点で) 519天体がカタログ化 (Pestalozzi+ 05)



6.7 GHz CH₃OH メーザー：強度変動

（衝突励起ではなく）赤外線励起なので、
比較的安定と思われていたが.....

- 周期的な変動（連続的な変動）（20天体くらい）
 - 周期的な変動（間欠的な変動）（数天体）
 - 突発的な変動（2天体）
- などがモニター観測により検出された（茨城の観測結果を含まない数）

周期的な変動の例

G9.62

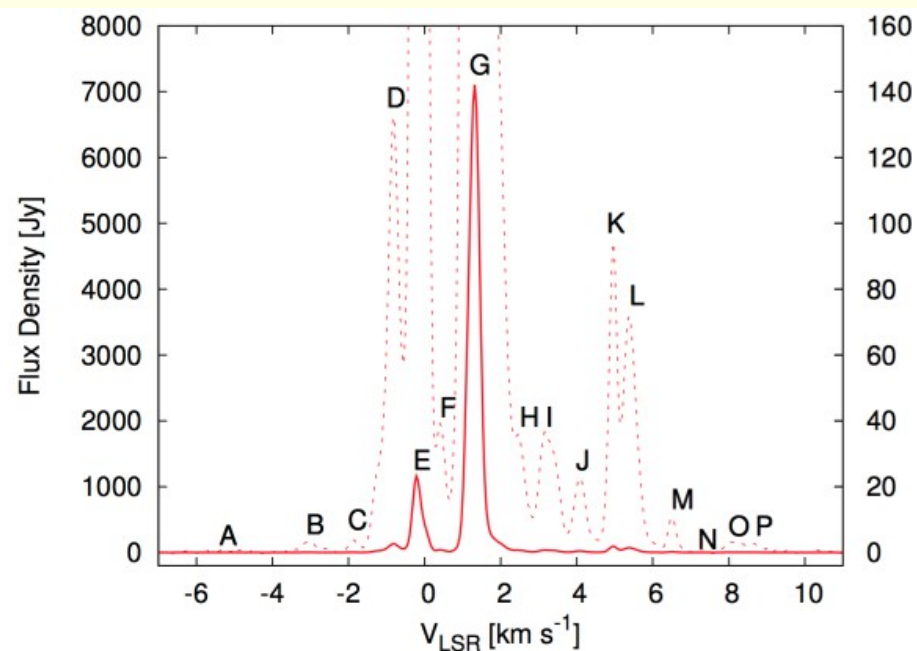
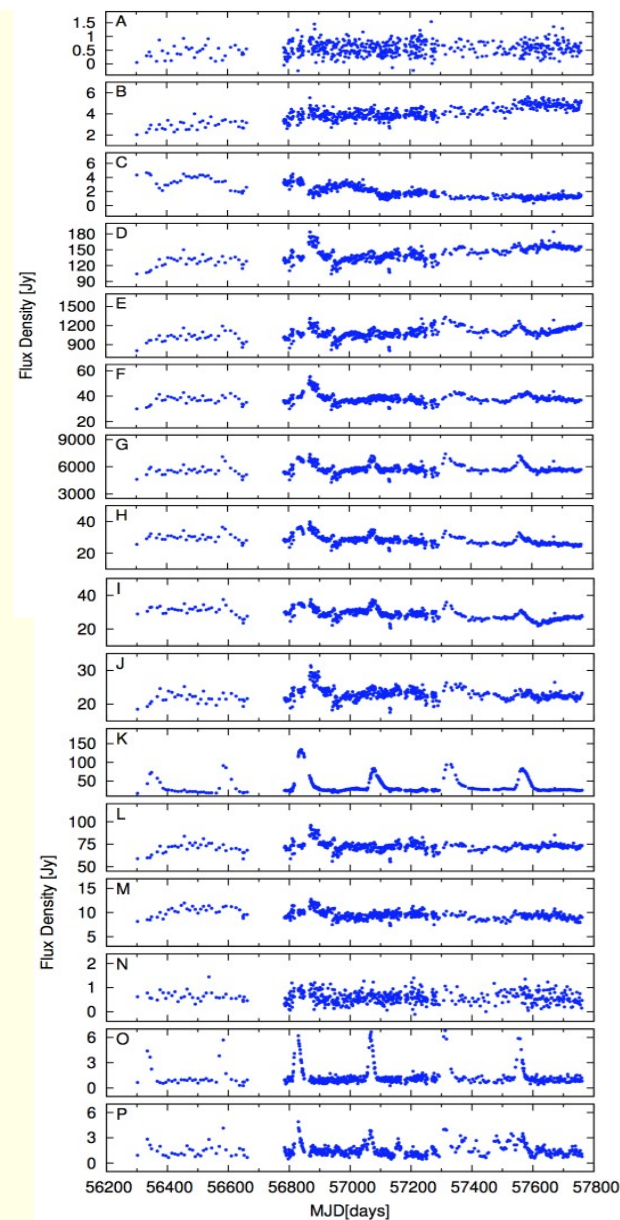
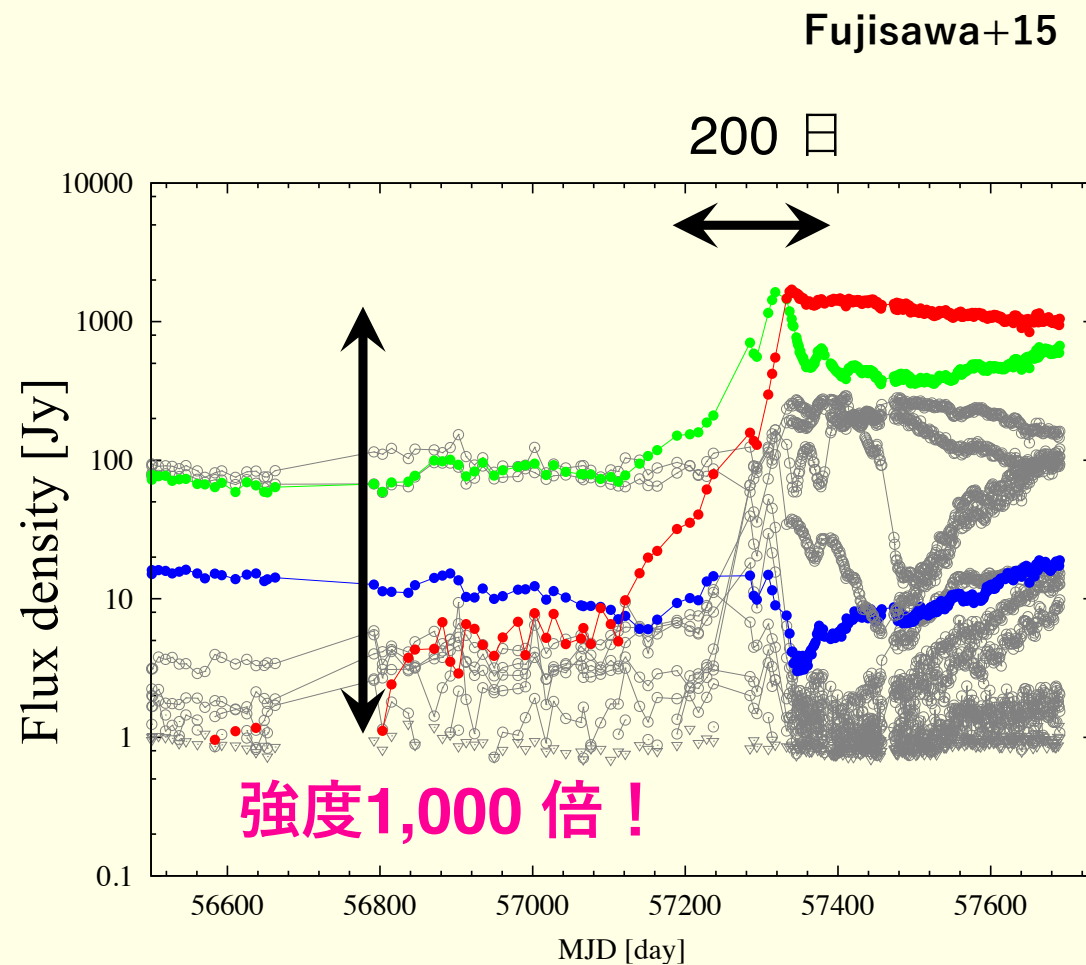
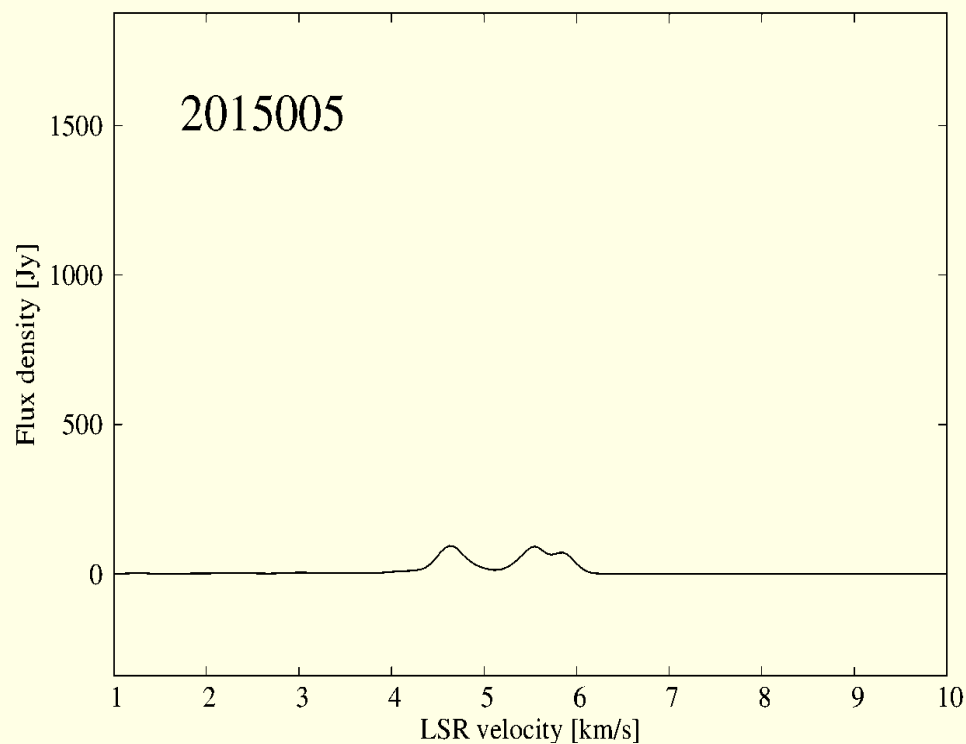


図5 実線：2013/10/22（フレア時）日立局観測スペクトル。破線：実線を50倍したもので、右縦軸が対応する目盛である。



突発的な変動の例

S255IR-NIRS3



* 日立32-mで取得されたモニターデータ

6.7 GHz CH₃OH メーザー：強度変動機構

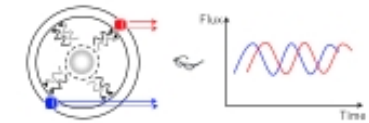
- 種光子 => 増幅
種光子：[HC/UC]HII領域の制動放射（自由-自由放射）
シンクロトロン放射やCMBでも ok
- メーザー強度変動の原因：
 - （1）種光子強度の変動
 - （2）増幅場所の増幅効率の変動
（反転分布の度合い、メーザー増幅に適した領域の変動）
- 周期変動のモデル
 - pulsation
 - CWB (colliding wind binary)
 - spiral shock
 - ...
- 突発変動のモデル
 - accretion burst（過去に 2 例のみ）

周期変動の変動機構：様々なシナリオ (e.g., Goedhart+ 08)

- Stellar pulsational instability (Inayoshi+ 13)
 - ZAMS直前の原始星半径膨張期に生じ得る不安定期
 - **脈動変動**による周囲のダスト温度変動
- Colliding wind binary (van der Walt 11)
 - **連星近接点における恒星風同士の衝突**
 - それによる、種光子としての free-free放射の周期的な強度変動
 - **周囲に HII領域が卓越している進化後期のみで成立**
- Circumbinary spiral shock (Parfenov & Sobolev 14)
 - **circumbinary disk** を形成している進化初期で成立
 - 周期的に形成される spiral shock wave による、円盤inner gapとレーザー放射領域間を暖め、レーザー放射に適切な励起環境のガス柱密度を、視線方向に増加させる

杉山さん (タイ/NARIT) 提供

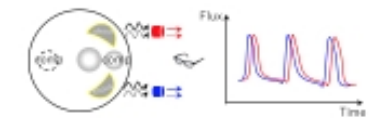
Stellar pulsational instability (Inayoshi+ 13)



- ZAMS直前の $\sim 10^5$ yr で不安定
- 高い質量降着率 $> 10^{-5} \text{ M}_{\odot}/\text{yr}$ 条件下で成長
- 周囲のダスト温度を周期的に変化させる
- “ κ 機構” に起因し、**sinusoidal** な周期パターンを再現

19

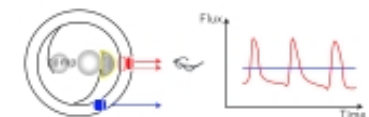
Colliding wind binary (van der Walt 11)



- 周囲に HII領域を形成している進化後期で成立
- 連星近接点における恒星風同士の衝突
- 種光子としての free-free放射の周期的な強度変動を励起
- 離心率により、**intermittent** な周期パターンを再現

20

Circumbinary accretion disk with spiral shock (Parfenov & Sobolev 14)

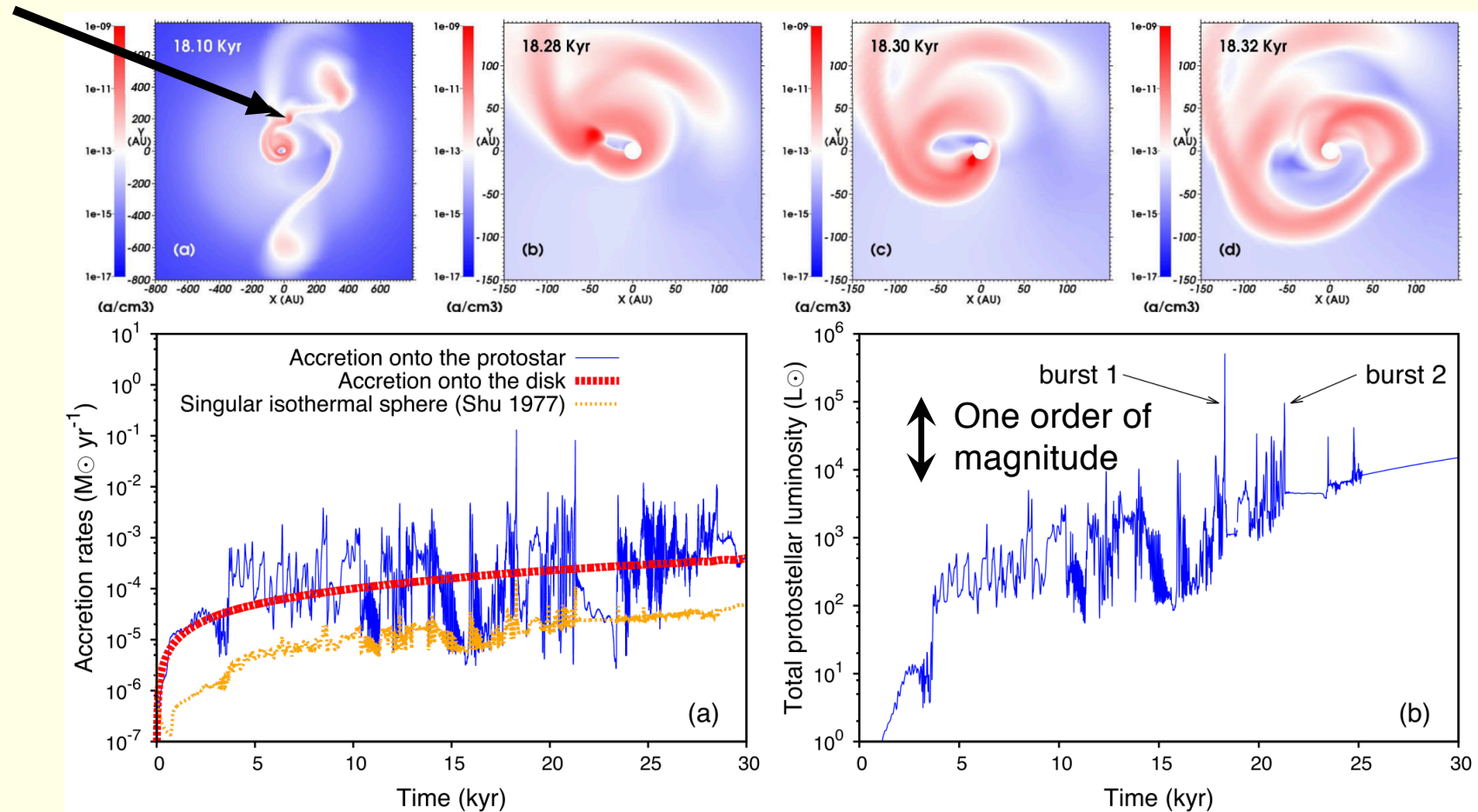


- circumbinary disk を形成している進化初期で成立
- 周期的に形成される spiral shock wave が、円盤inner gapとレーザー放射領域間を加熱
- 離心率により、**intermittent** な周期パターンを再現
- レーザー放射に適切な励起環境のガス柱密度が増加、という条件を視線方向に満たしたレーザー成分に限定して、フラックス密度が変化

突発変動 (accretion burst) の変動機構

(e.g., Meyer+ 17, 18)

時々かたまりが (中心星、ディスクに) 落ちる => 中心星の光度が 1 ケタ以上上昇



6.7 GHz メタノールメーザー強度変動

• 中心星の変光が、メーザー強度変動の主要因であるもの

• 脈動

• 中心星変光 (accretion burst)



• 中心星の変光を捉える事が、メーザー強度変動機構の解明に、必要不可欠である

*1:新たなモデルが必要。
*2:複数の大質量星の形成を
考える必要がある。
*3:特殊な幾何学的配置を考
える必要がある。
*4:磁気リコネクションでエ
ネルギーが足りない場合
は、放射サイズ変化を考慮す
る必要あり。

				VLBI 観測結果	
				全成分が変動	一部成分が変動
単一鏡観測結果	周期変動	連続的	HII領域有り	* 1	* 2
			HII領域無し	脈動	* 2
		間欠的	HII領域有り	恒星風衝突 (* 3)	恒星風衝突
			HII領域無し	spiral shock (* 3)	spiral shock
	突発変動		HII領域の有無は問わない	中心星変光	磁気リコネクション もしくは 放射領域サイズ変化 (* 4)

茨城32m電波望遠鏡の紹介

- (～2007) 衛星通信アンテナ
- (2009～) 32-m アンテナ 2 台を電波望遠鏡に改造 (Yonekura+16)
- 主用途：VLBI @ 6.7 (メタノールレーザー), 8, 22 (H₂Oレーザー) GHz
(年間 200–500 時間)
- 空き時間 (≥ 5,000 時間 x 2 台)

→ 大規模な
6.7 GHzメタノールレーザー
単一鏡モニター観測を
実施する事にした



茨城大学（日立32m電波望遠鏡）による 6.7 GHz メタノールメーザーのモニター観測

- (1)～450天体を～10日に1回観測（2012年－2015年）（観測は毎日実施）
- (2)変動の兆候が見られる～150天体について、～5日に1回観測（2015年－2017年）（観測は毎日実施）
- (3) 上記(1)(2)のハイブリッド（2017年－現在）

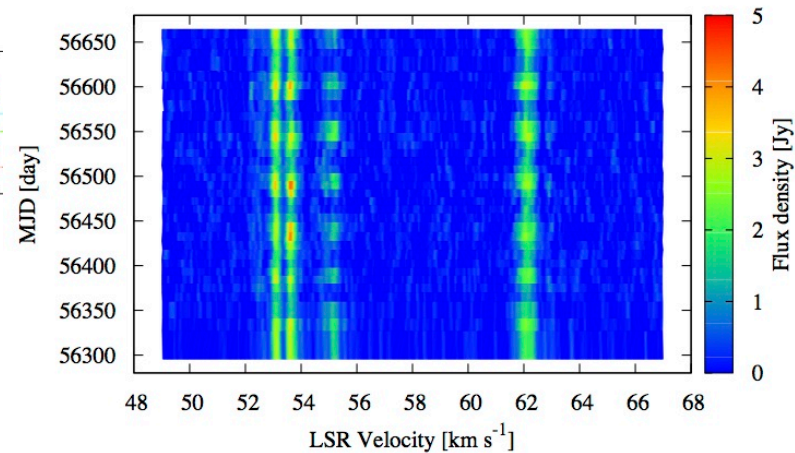
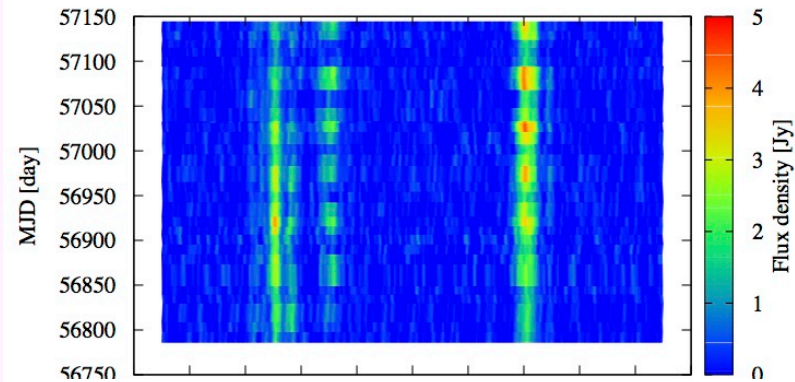
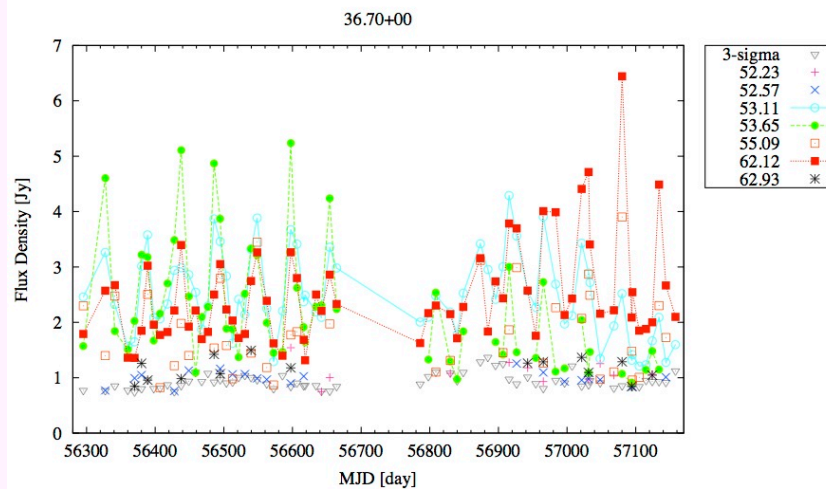
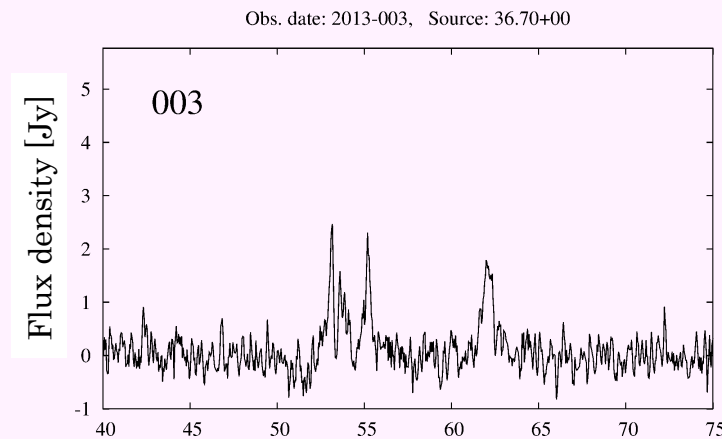
主な成果

- **既知の～20天体以外に、新たに20-30天体**において周期的な強度変動を検出
(K.Sugiyama+ in prep.)
- **3例目の accretion burst 候補を検出**
 - => 世界中でフォローアップ観測（現時点で7編の査読付き論文が公表）
 - => SOFIA による FIR フォローアップ観測により accretion burst と確定

周期的な強度変動を示す天体の観測例

新検出（連続的）

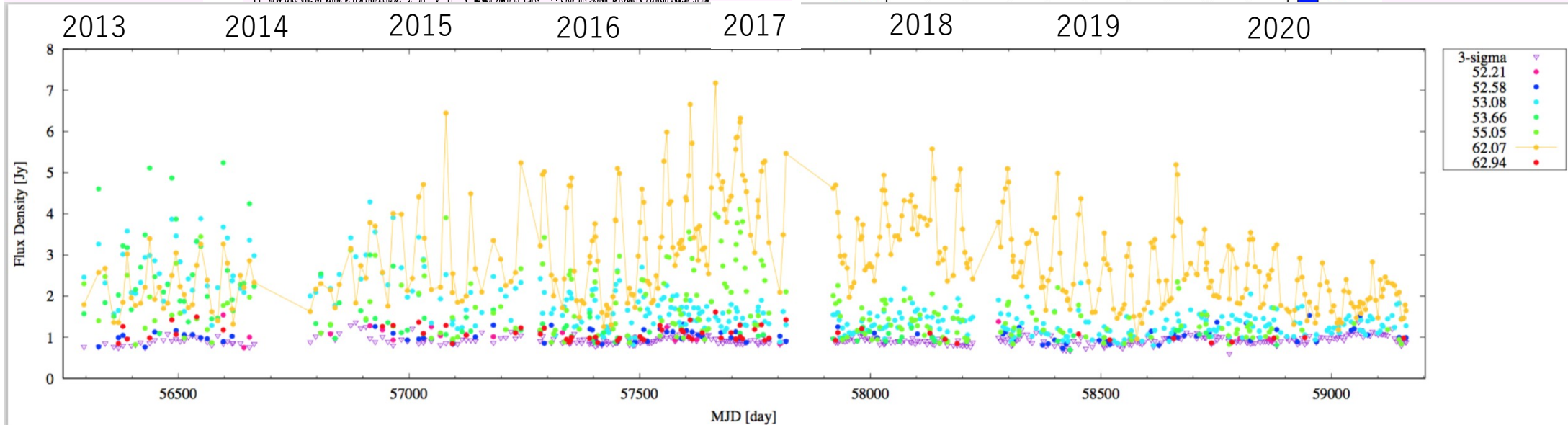
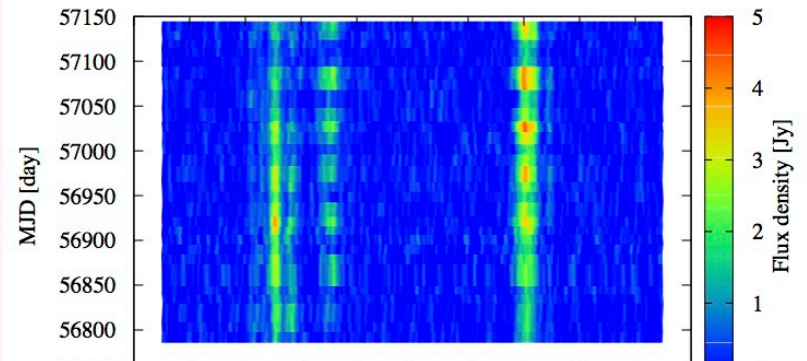
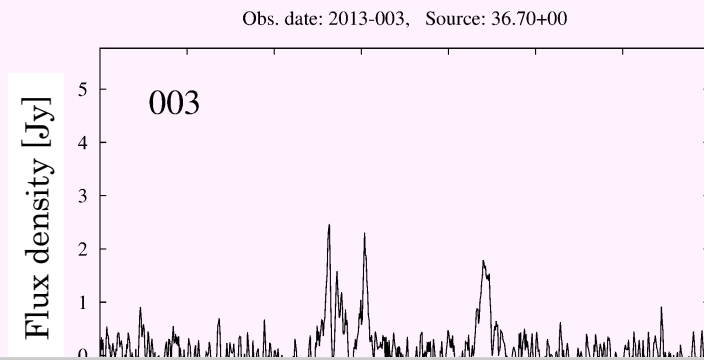
周期 = 55 day



周期的な強度変動を示す天体の観測例

新検出（連続的）

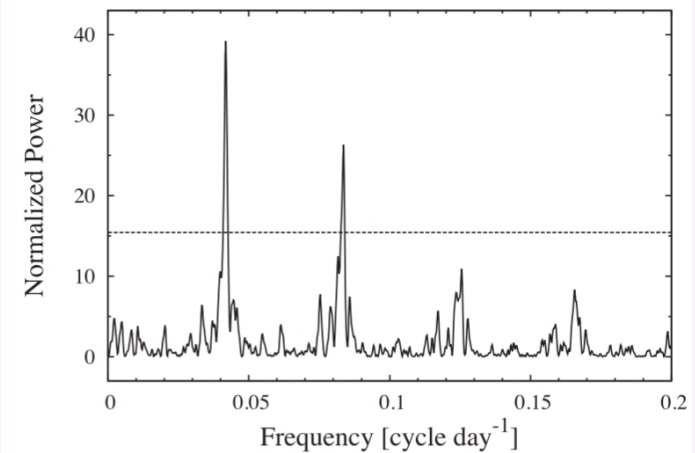
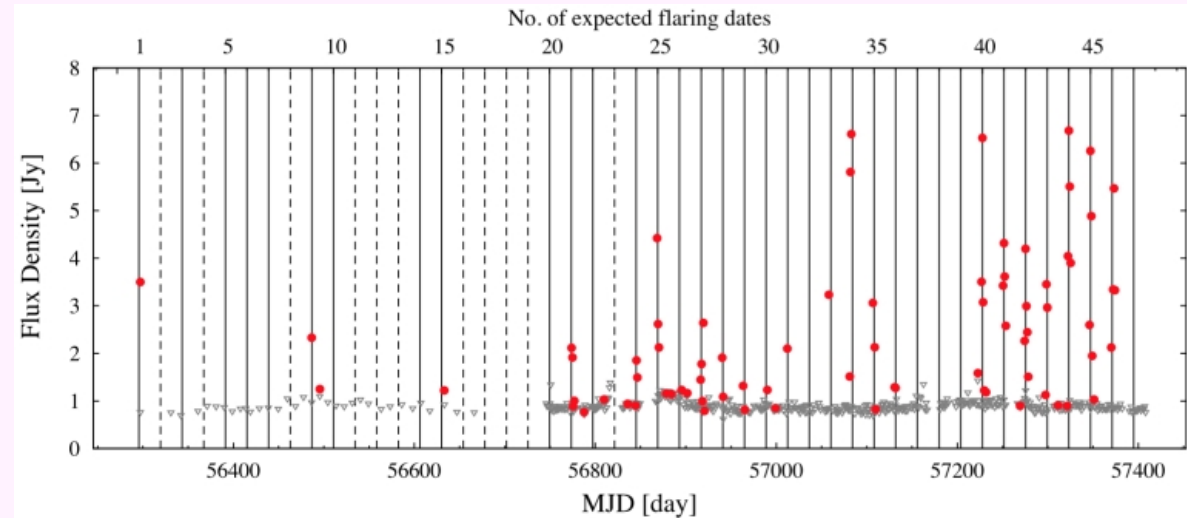
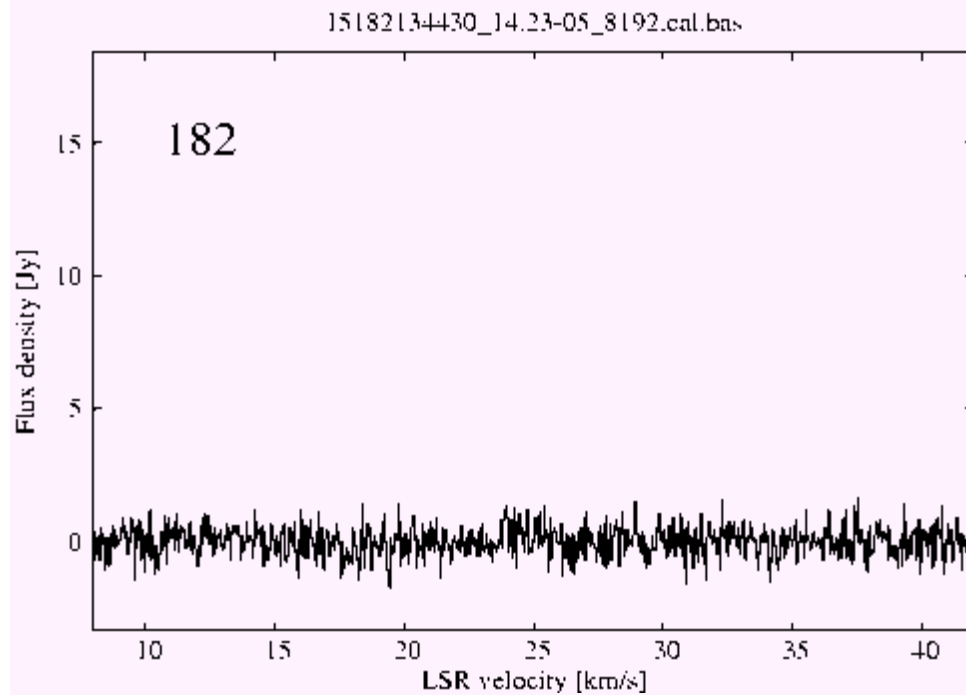
周期 = 55 day



周期的な強度変動を示す天体の観測例

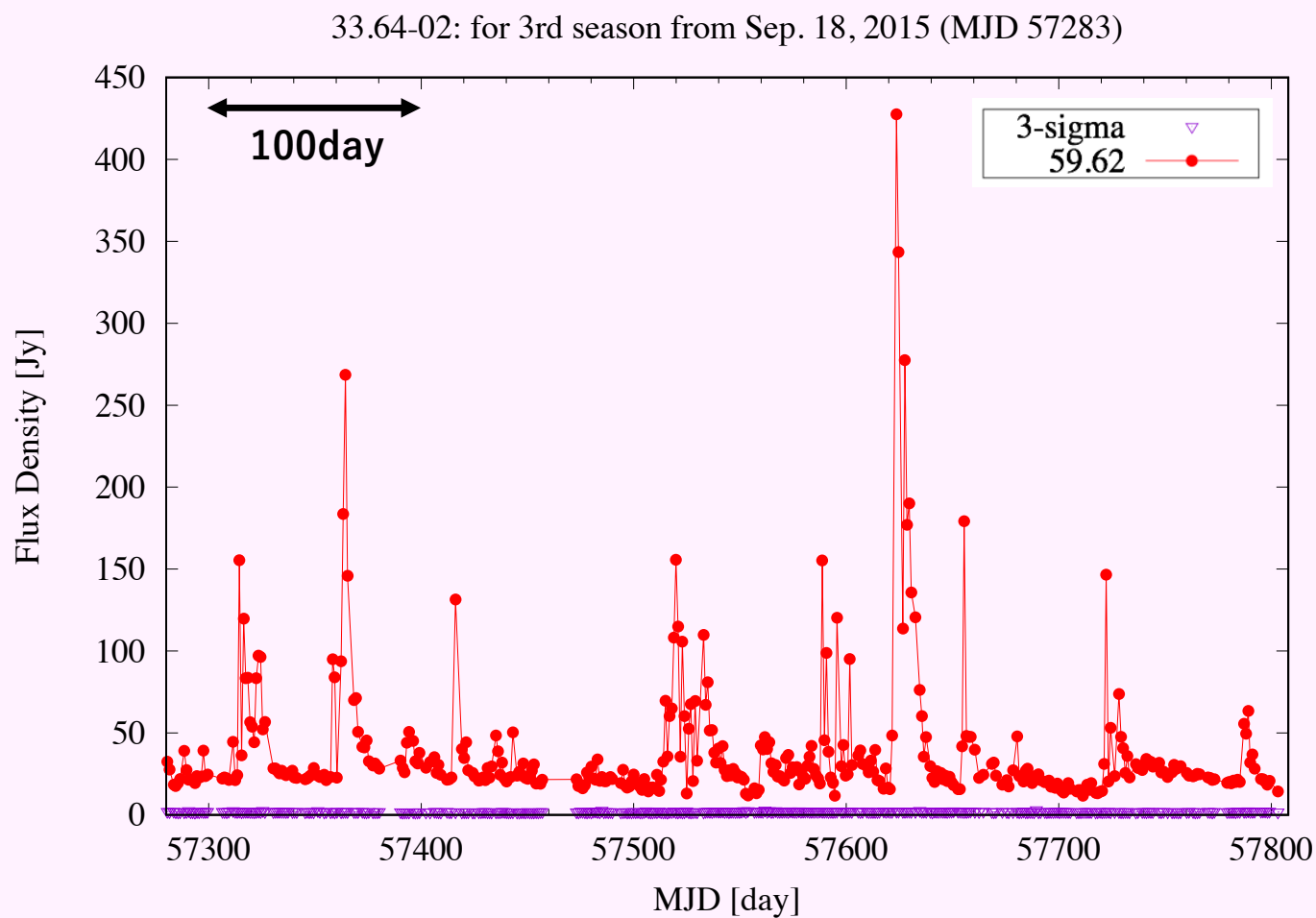
新検出 (間欠的)

周期 = 24 day

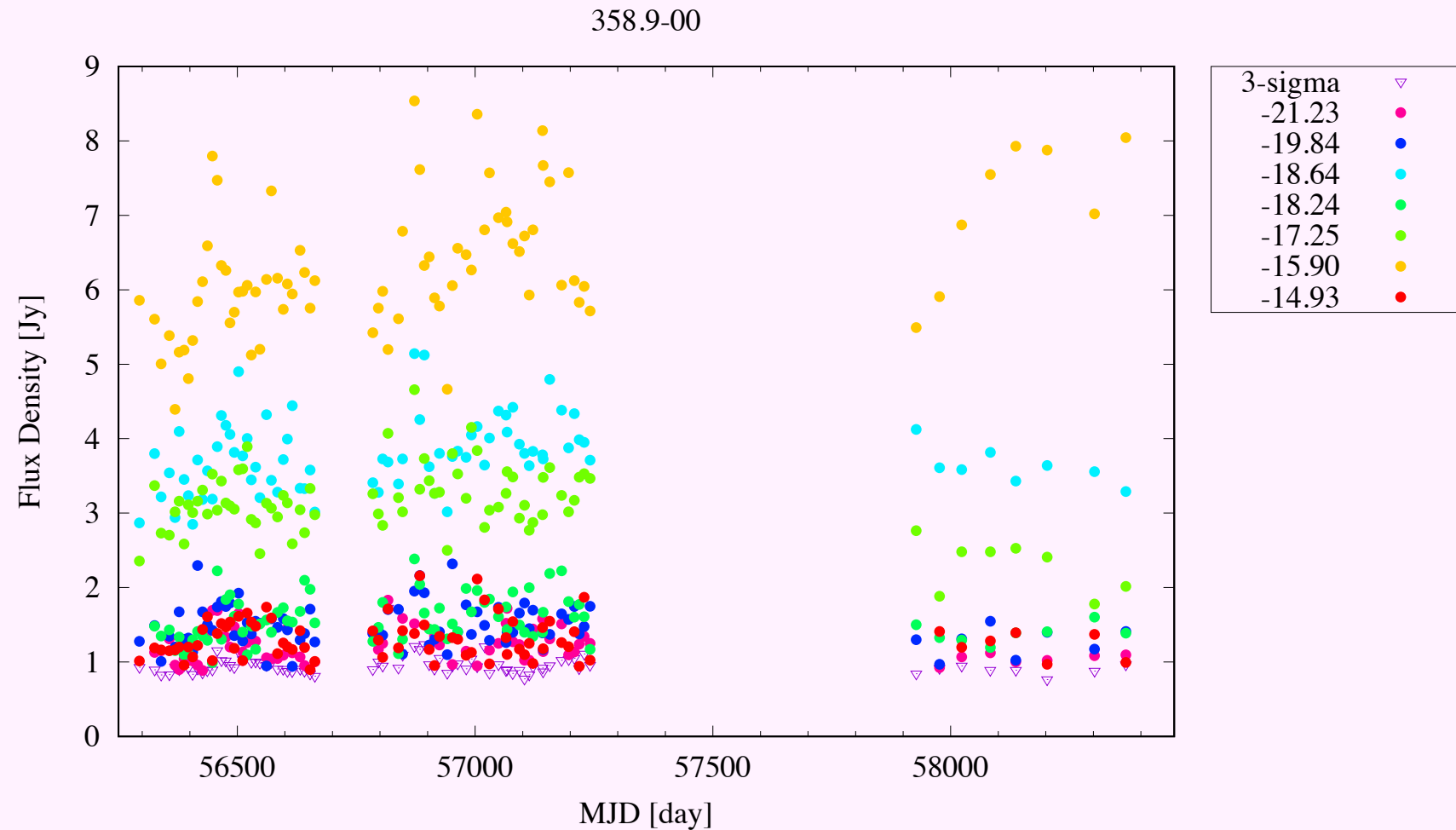


Sugiyama+17, PASJ,69, 59

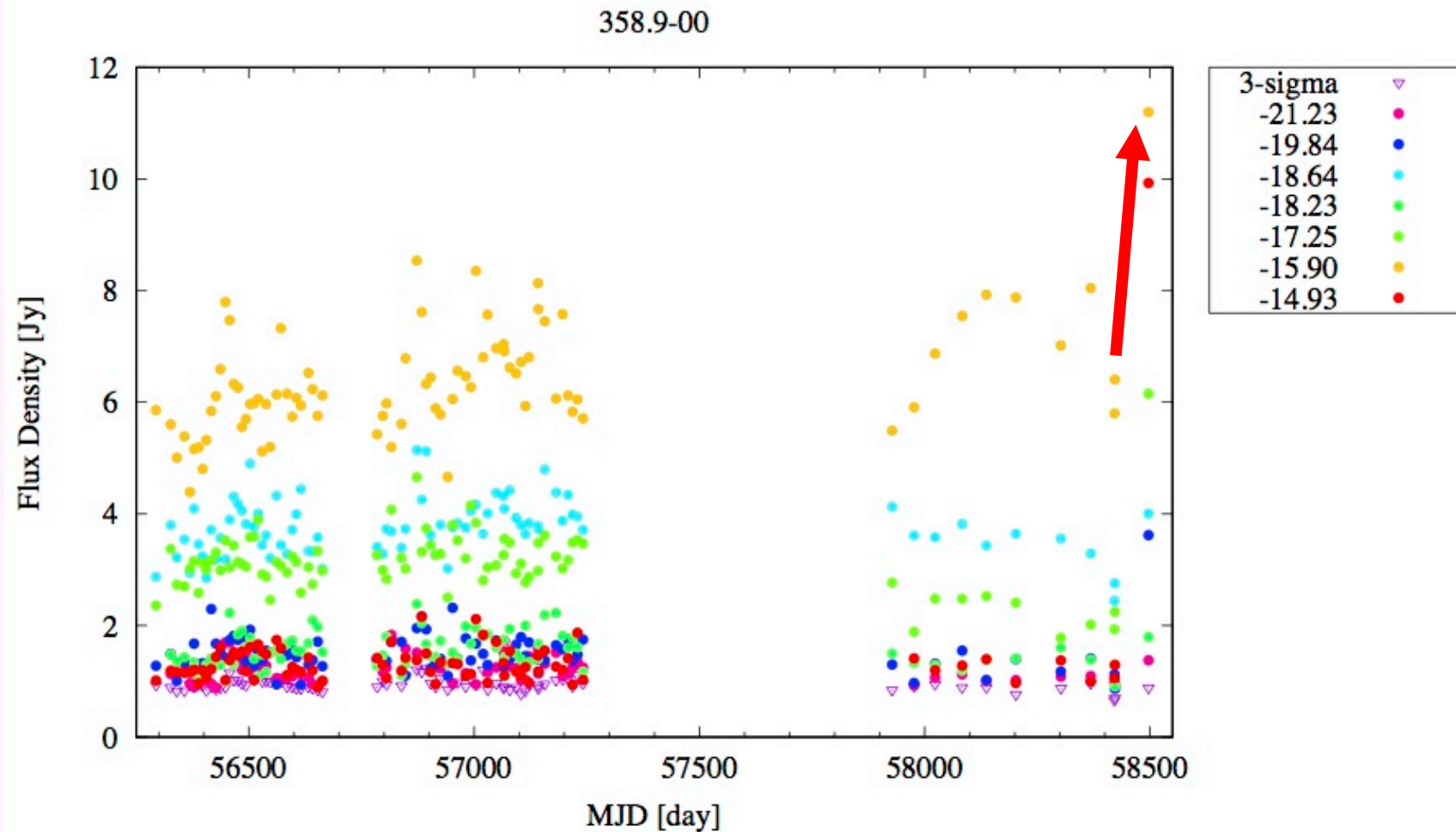
突発的な強度変動を（繰り返し）示す天体



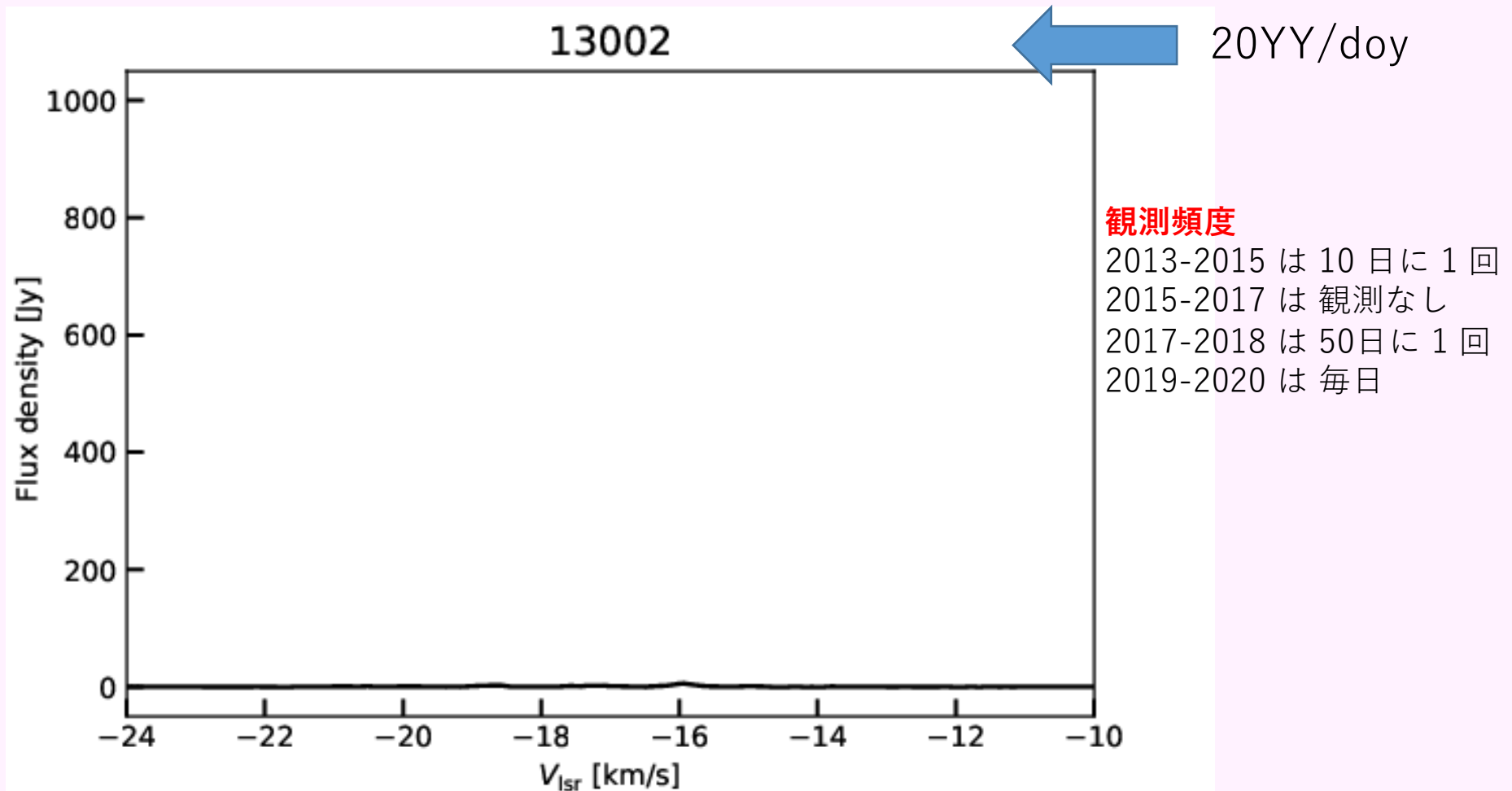
突発的 (accretion burst) 強度変動天体 G358.931-0.030 / 増光^前の light curve



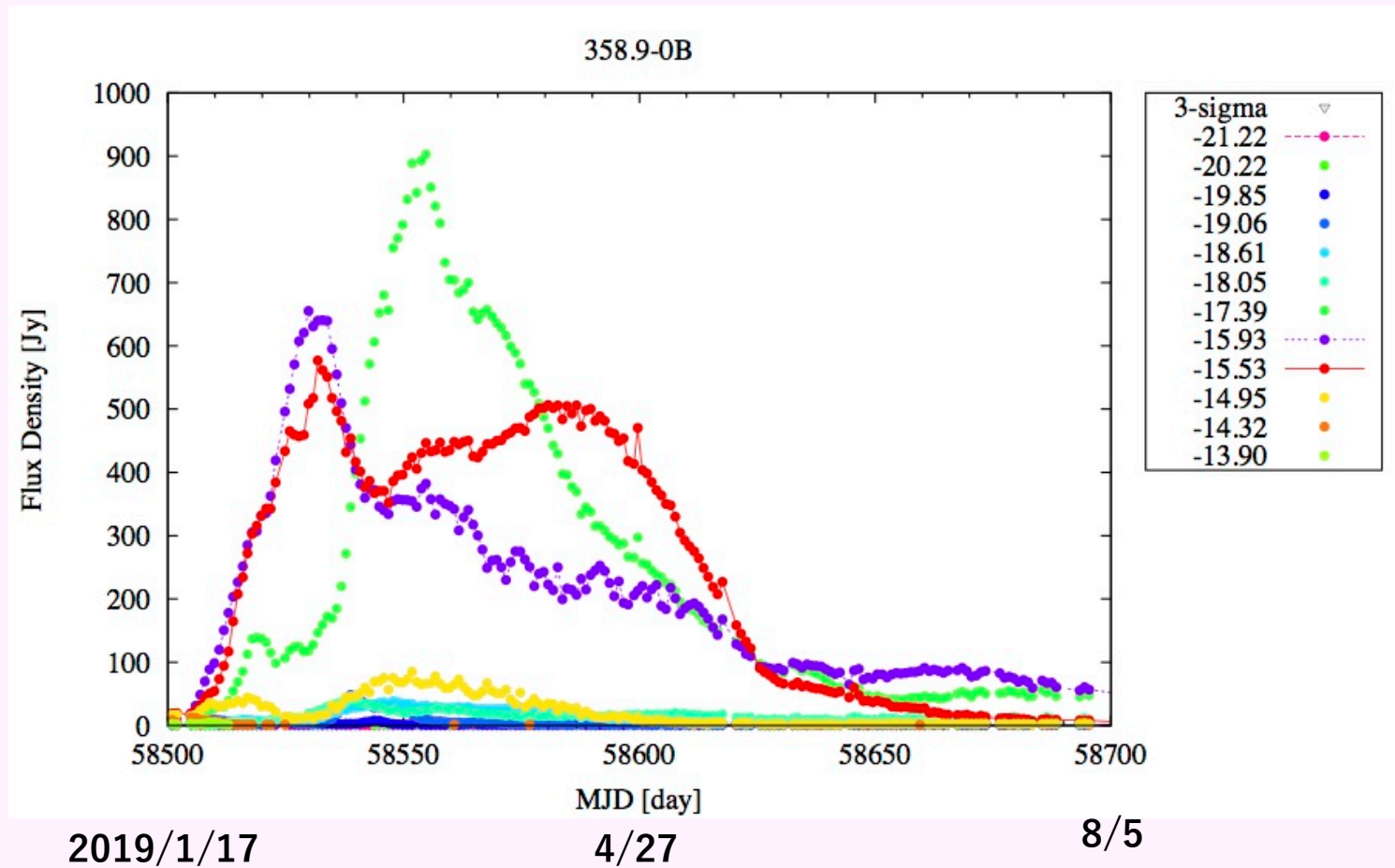
突発的 (accretion burst) 強度変動天体 G358.931-0.030 / 増光時の light curve



突発的 (accretion burst) 強度変動天体 G358.931-0.030 の スペクトル動画



突発的（accretion burst）強度変動天体 G358.931-0.030 の light curve



G358.931-0.030 増光検出後の フォローアップ観測

- 2019/Jan./14, 01:14 UT 観測実施
=> Jan./15, 14:23 UT 増光検出
- Jan./18 02:35 UT “M20-ML” に情報展開
- Jan./29 ATel #12446 (Sugiyama+19)
- Jan./30 朝 光・赤外線天文学大学間連携に打診
- Feb./03 SMA に打診 => Feb./06 Filler 観測
=> 多数のメタノールメーザー遷移が新検出
(199-230 GHz)。
(SMA Newsletter Jan-2020 参照)
- フォローアップ（ラインサーベイ）が加速。
- SOFIA で増光が確認された事により（3例目の）
accretion burst であると確定

Bursting activity of the 6.668-GHz CH₃OH maser detected in G 358.93-00.03 using the Hitachi 32-m

ATel #12446; Koichiro Sugiyama (National Astronomical Observatory of Japan), Yu Saito, Yoshinori Yonekura, and Munetake Momose (Ibaraki University)
on 29 Jan 2019; 07:39 UT

Credential Certification: Koichiro Sugiyama (koichiro.sugiyama@nao.ac.jp)

Subjects: Radio, Variables, Young Stellar Object

 Tweet

A bursting activity as a drastic flux rising has been detected in the 6.668-GHz CH₃OH maser associated with the star-forming region G 358.93-00.03. The 6.668-GHz CH₃OH maser in G 358.93 was firstly reported by Caswell et al. (2010, MNRAS, 404, 1029) with the peak flux density of 10 Jy at Vlsr = -15.9 km/s on 2006 Mar 31. Using the Hitachi 32-m radio telescope, we initiated a flux monitor observation of the CH₃OH maser in G 358.93 on 2013 Jan 2, and its flux density had been weaker than 10 Jy until 2018 Oct 31. Although the subsequent observation in our monitor had been conducted 75 days later, the peak flux density at Vlsr = -15.9 km/s increased to 11 Jy on 2019 Jan 14 and two days later on 2019 Jan 16 other spectral feature at Vlsr = -15.4 km/s suddenly showed a flux rising from 9 Jy to 19 Jy. Five days later on 2019 Jan 21 the spectral feature at Vlsr = -15.9 km/s came back to the brightest one as a flux density of 19 Jy. Daily flux monitor since then has revealed a drastic flux rising as follows: 31 Jy on Jan 22, 49 Jy on Jan 23, 70 Jy on Jan 24, 89 Jy on Jan 25, and 99 Jy on Jan 26. During the flux rising at Vlsr = -15.9 km/s, other eight spectral features in Vlsr from -19.8 to -14.3 km/s showed flux risings together.

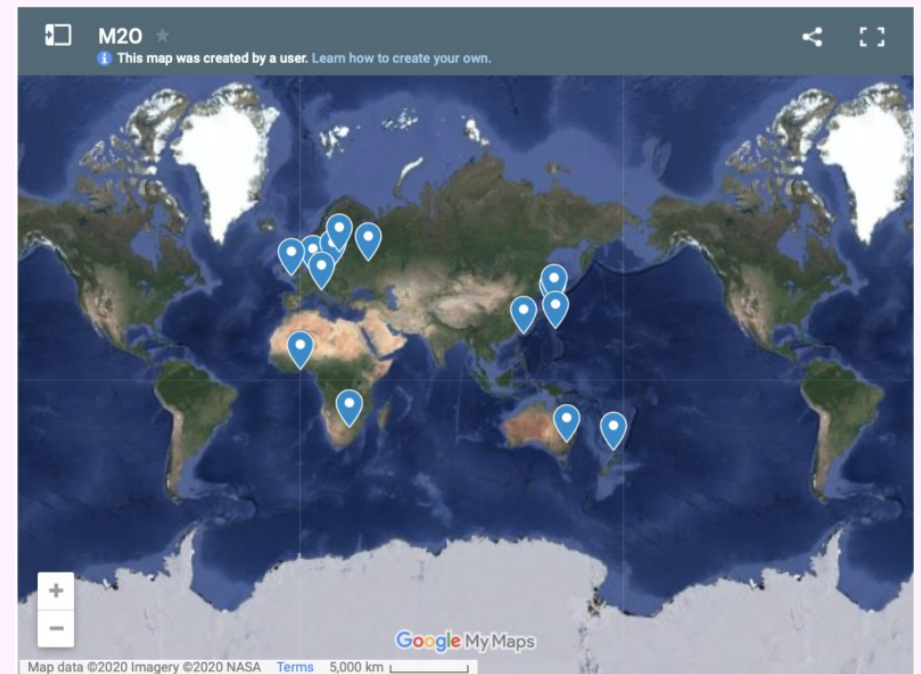
Figures of comparisons among spectra observed in each date and flux variations for each spectral feature can be seen at the following URL:

<http://vlbi.sci.ibaraki.ac.jp/iMet/G358.9-00-190114/>

M20 Maser Monitoring Organization

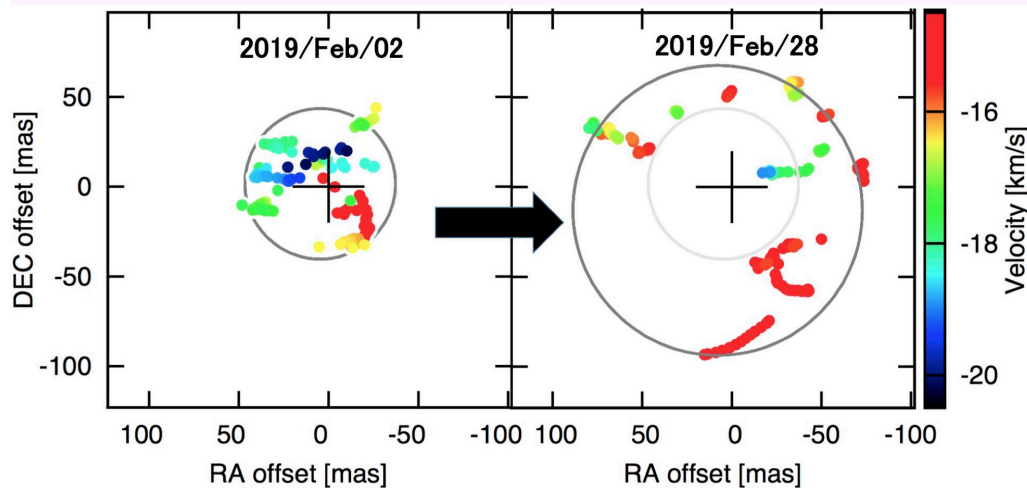
- 2017年9月発足
- 主に世界中の（主にcm波で）maser 観測を行っている電波望遠鏡関係者が、24時間連続モニター、相互 follow-up などを目指して集結
- 69 members (2020/Aug)

<https://www.masermonitoring.com>

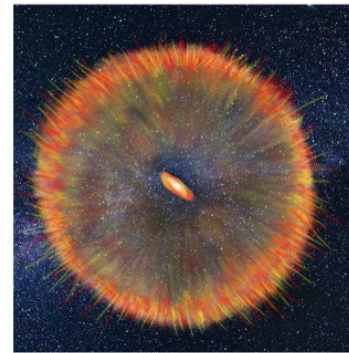


multi-epoch imaging: LBA Observations

熱波 (heat-wave) が外に伝搬する
様子をとらえた



2019年2月2日および2月28日に LBA+南ア で行われた
VLBI 観測結果 (Burns+20)。

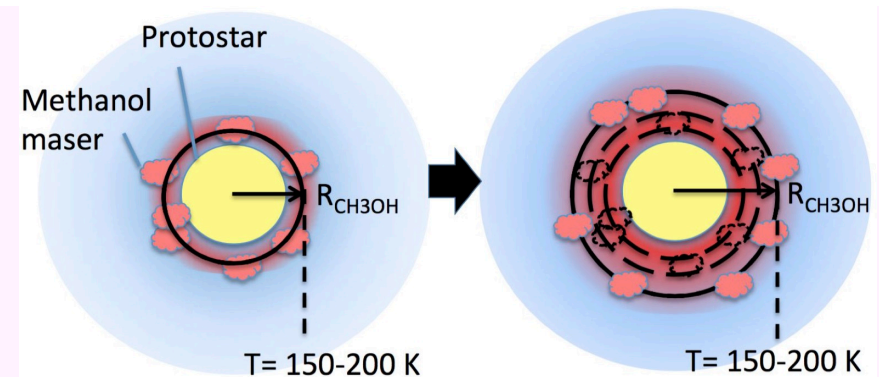


Maser “heat-wave” in an accreting high-mass protostar

Methanol masers trace the outward propagation of thermal energy in a high-mass protostar G358-MM1, following an accretion event. Multi-epoch data were observed with the Southern Hemisphere’s Long Baseline Array.

[LEARN MORE](#)

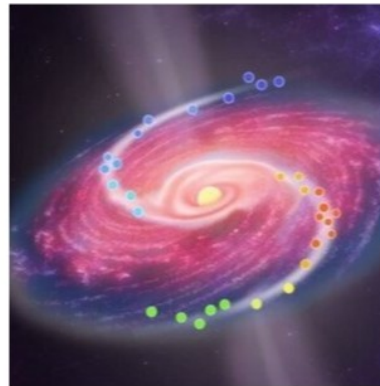
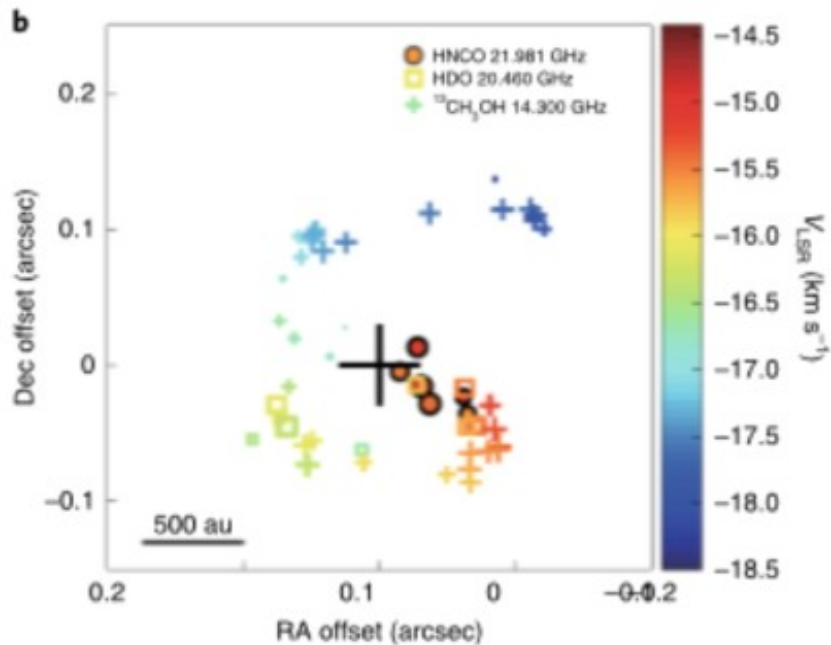
Credit: Katharina Immer (Joint Institute for VLBI ERCI, The Netherlands)



円盤の温度変化と
メーザー放射場所のモデル (Burns+20)。

VLA observations

spiral-arm accretion flow を trace



Credit: Xi Chen (Guangzhou University, China) and Zhi-Yuan Ren (National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing, China)

New maser species tracing spiral-arm accretion flows in a high-mass young stellar object

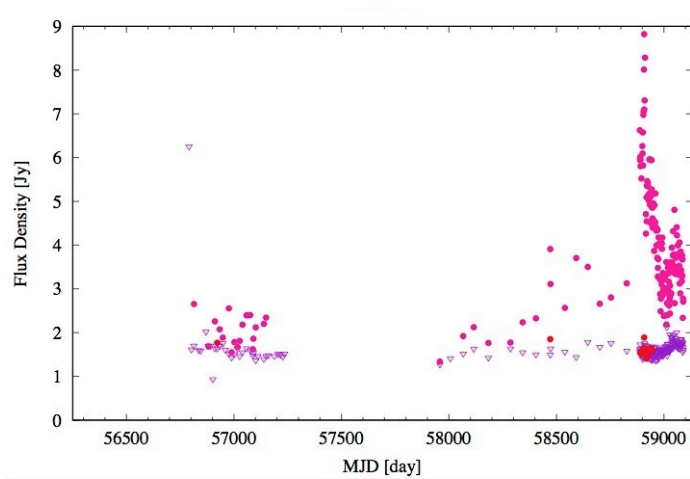
Three new molecular maser species, HDO, HNC/O and $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ trace a spiral arm structure in the disk of the actively accreting high-mass protostar G358.93-0.03. Observations were conducted with the Karl G. Jansky Very Large Array (VLA; USA).

[LEARN MORE](#)

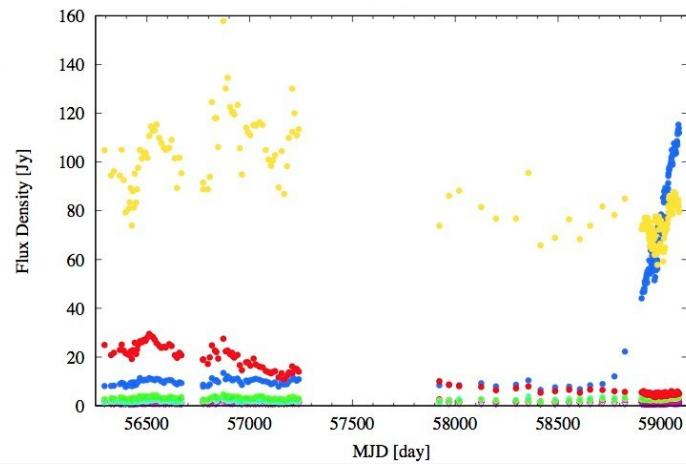
Xi Chen+20

突発的変動の検出例

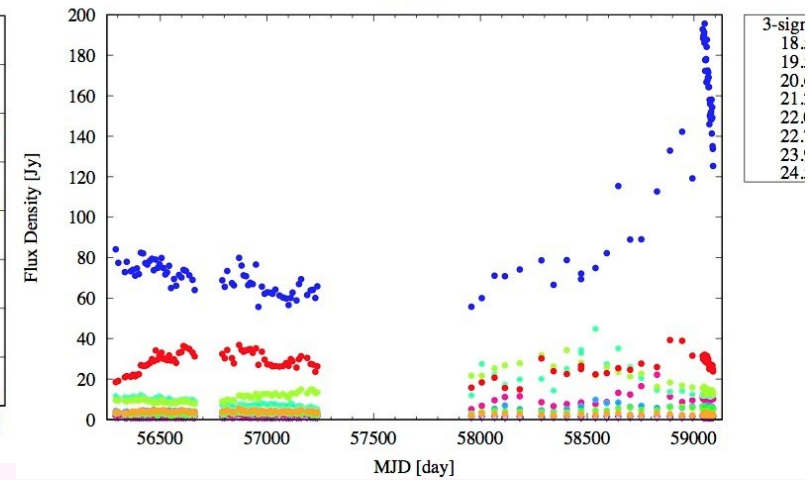
2020/2/10検出



2020/2/28検出



2020/7/13検出

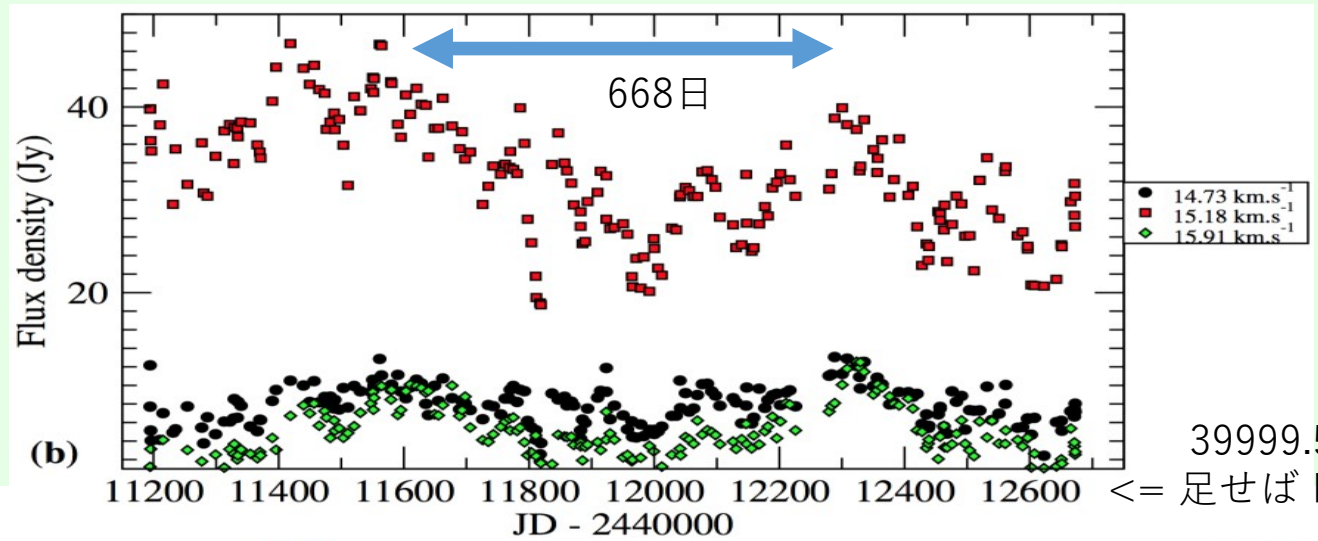


OISTER との共同観測：周期変動天体

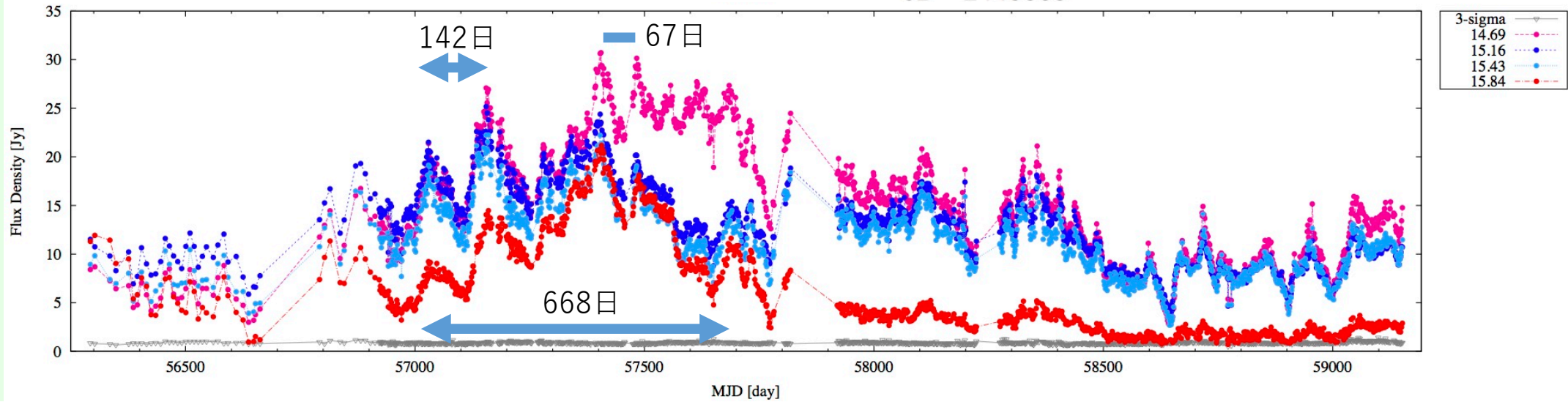
- 鹿児島 1-m 望遠鏡を用いた強度変動の観測 (PI: 内山さん)
- 茨城におけるメタノールレーザーモニター観測開始直後 (2013年) にターゲット選定を行った
- 観測時期の関係で L が大きいところ (180-230 くらい) から選んだ
- 周期が比較的長いものを選んでしまった (天体選定にやや難あり?)
- 2 天体
 - Mon R2 (213.70-12.59)
 - S269 (196.45-1.68)

S269 (G 196.45-1.68)

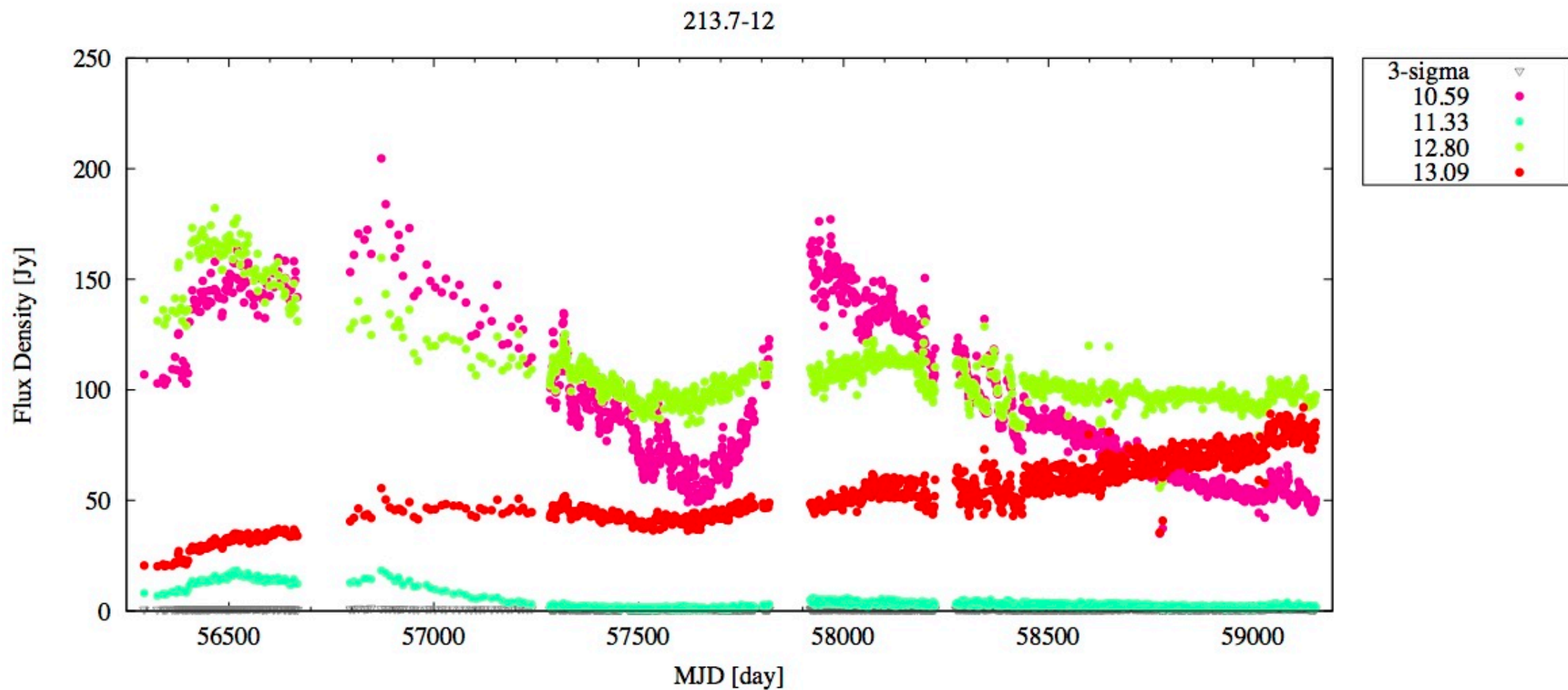
- 668 日周期
(Goedhart+04) =>
- 142 日周期, 67 日周期
(茨城モニター観測)



39999.5 を
≤ 足せば MJD



Mon R2 (G 213.70-12.59)



OISTER との共同観測：周期変動天体

- 鹿児島 1-m 望遠鏡を用いた強度変動の観測 (PI: 内山さん)
- 茨城におけるメタノールレーザーモニター観測開始直後 (2013年) にターゲット選定を行った
 - 観測時期の関係で L が大きいところ (180-230 くらい) から選んだ
 - 周期が比較的長いものを選んでしまった (天体選定にやや難あり?)
- 2 天体
 - Mon R2 (213.70-12.59)
 - S269 (196.45-1.68)
- その後、広島かなた望遠鏡でも観測
 - => 詳細は内山さんの講演を参照
- 今なら、より良い観測ターゲットを選出可能
 - 周期の短いもの
 - 強度変動の激しいもの
 - レーザーの全速度成分が強度変動を示すもの

OISTER との共同観測：突発現象

突発現象 follow-up 観測

成功事例：G358

メーザー観測にて突発現象を検出 => M20 に alert を出す =>

- Subaru ToO (PI 内山さん)
- M20 に参加している内山さんからのツテで個別に観測依頼 (広島など)
=> 今後どう進めるべきか？

(OISTER 全体に alert を出す or 現状のやり方で進める or ...)

突発現象 opt/NIR モニター観測

- 電波 (メーザー) よりも光赤外の方が先行して変動するはず
=> opt/NIR で多天体の継続的なモニター観測ができれば最高！

[問題点]

- (大質量原始星は埋もれているので) opt : ほとんど見えない。NIR : かなり暗い。
- 結構混んでいるところ (銀河面) (コンタミ大)、遠い天体 (暗い) が多い。
- 7 年近く変動がみられない天体が増光した => ターゲットを絞り込めない
=> 450 天体全てをモニターしないとダメ



まとめにかえて

メタノールメーザーだけでなく
連続波観測（@ 6 GHz or 8 GHz, 検
出感度 ~ 1 mJy）もできます

（星形成に限らず）こんな観測して
みたい！ という相談をお待ちして
います