

自己紹介

- 岡 朋治（おかともはる）と申します。
- 電波天文学をやっています。
- 銀河系中心と星間物質の研究をしています。
- 大学教員もしています。
- 夏の学校は19年ぶりです。
- 趣味：いろいろあります。

<http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/>





「星間現象と電波天文と銀中」

宇宙電波天文学の基礎と最近の私の悩み

岡 朋治（慶應義塾大学理工学部）

電波利用

- 社会の様々な場所で
 - 携帯電話
 - テレビ・ラジオ放送
 - 通信
 - 無線LAN
 - オービス
 - その他様々
- 電波利用法
 - 周波数割り当て（総務省）



某A社製スマートフォン



東京スカイツリー (建設中)

テレビ放送 (イメージ)

電波利用

- 社会の様々な場所で
 - 携帯電話
 - テレビ・ラジオ放送
- 通信
 - 無線LAN
 - オービス
 - その他様々
- 電波利用法
 - 周波数割り当て（総務省）



某A社製スマートフォン



東京スカイツリー (建設中)



テレビ放送 (イメージ)

電波利用

- 社会の様々な場所で
 - 携帯電話
 - テレビ・ラジオ放送
 - 通信
 - 無線LAN
 - オービス
 - その他様々
- 電波利用法
 - 周波数割り当て（総務省）



東京スカイツリー

総務省 電波利用ホームページ 12/07/27 9:31

総務省 MIC Ministry of Internal Affairs and Communications The Radio Use Web Site

お問い合わせ | サイトマップ | English

検索

文字サイズ

申請・届出をする

無線局情報を探す

Myメニュー

よく見るページをお気に入りとしてここに設定することができます

詳しくはヘルプをご覧ください

電波監理の概要

周波数割り当て・公開
周波数割当てプロセス・周波数の公開（国等の電波の利用状況等）など

無線局機器の手続き・検査
手続きの確保、無線局の検査など

電波監理の現状
電気通信行政の組織など

国際対応
ITU-R（国際電気通信連合）、WRC（世界無線通信会議）など

電波監理の概要
電波監理の業務内容

電波利用システム
各種システムの紹介

電波利用に関する制度

無線局機器に関する基準認定制度
技術基準適合証明制度など

電波の安全性に関する調査及び評価技術
電波の生体への影響など

無線従事者制度
無線従事者免許、認定学校等一覧など

電波利用料制度
電波利用料制度の目的など

非常通信協議会
非常通信協議会の活動内容、周波数料など

特定実験試験局関係
特定実験試験局の概要、告示周波数など

その他の制度
電波出射率規制と制度、高度利用設備など

マスメディア集中防限措置について
放送法のマスメディア集中防限措置について

ご案内/資料集

総務省案内
電波関係各課案内

資料集
技術基準適合証明等の公示、総合通信局の管轄地域と所在地、手数料一覧など

電波に関する関連情報
パブリックコメント、電波監理審議会情報、調査研究会情報など

電波の利用状況の調査・公表制度
平成24年度 電波の利用状況の調査結果など

最新情報

2012年07月19日 周波数割当て計画のページを更新しました。

2012年07月19日 基幹放送事業者の周波数割当て状況のページを更新しました。

2012年07月19日 コミュニティ放送の現状のページを更新しました。

2012年07月19日 電波の利用状況の調査・公表制度のページを更新しました。

2012年07月19日 コミュニティ放送事業者のページを更新しました。

平成23年10月1日から電波利用料が改定

音声読み上げ文字拡大機能

電波関係法令集

700/900MHz帯周波数再編ポータルサイト

1/2 ページ

電波利用

- 社会の様々な場所で
 - 携帯電話
 - テレビ・ラジオ放送
 - 通信
 - 無線LAN
 - オービス
 - その他様々
- 電波利用法
 - 周波数割り当て（総務省）



東京スカイツリー

電波利用ホームページ

総務省 MIC Ministry of Internal Affairs and Communications

電波利用ホームページ The Radio Use Web Site

12/07/27 9:31

お問い合わせ | サイトマップ | English

検索

文字サイズ

申請・届出をする

無線局情報を探す

Myメニュー

よく見るページをお気に入りとしてここに設定することができます

詳しくはヘルプをご覧ください

電波監理の概要

周波数割当て・公開
周波数割当てプロセス・周波数の公開
(国等の電波の利用状況等) など

電波利用に関する制度

無線局機器に関する基準認定制度
技術基準適合証明制度など

電波の安全性に関する調査及び評価技術
電波の健康への影響など

無線従事者制度
無線従事者免許、認定学校等一覧など

電波利用料制度
電波利用料制度の目的など

非常通信協議会
非常通信協議会の活動内容、異議申し立てなど

特定実験試験場関係
特定実験試験場の概要、告示周波数など

その他の制度
電波出射率規制と制度、高周波利用設備など

マスメディア集中防衛措置について
放送法のマスメディア集中防衛措置について

ご案内/資料集

館内案内
電波関係各課案内

資料集
技術基準適合証明等の公示、総合通信局の管轄地域と所在地、手数料一覧など

電波に関する周波数情報
パブリックコメント、電波監理審議会情報、調査研究会情報など

電波の利用状況の調査・公表制度
平成24年度 電波の利用状況の調査結果など

最新情報

2012年07月19日 周波数割当てプロセスのページを更新しました。

2012年07月19日 基幹放送事業者の周波数割当て状況のページを更新しました。

2012年07月19日 コミュニティ放送の現状のページを更新しました。

2012年07月19日 電波の利用状況の調査・公表制度のページを更新しました。

2012年07月19日 コミュニティ放送事業者のページを更新しました。

平成23年10月1日から電波利用料が改定

音声読み上げ文字拡大機能

電波利用法令集

700/900MHz帯周波数再編ポータルサイト

1/2 ページ



我が国の電波の使用状況

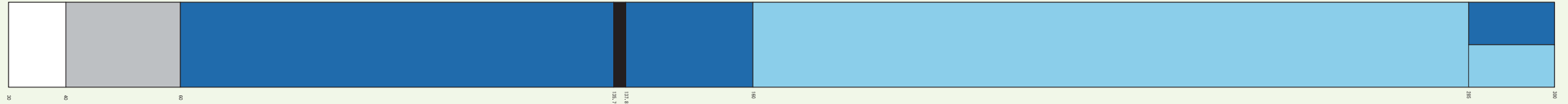
Japan Frequency Allocation Chart



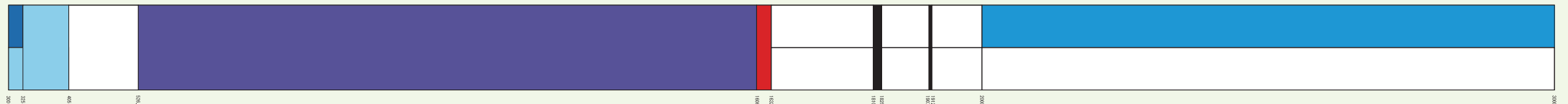
- 固定（各種用途）
- 移動（各種用途）
- 固定 / 移動（各種用途）
- 携帯電話
- PHS
- MCA
- 簡易無線
- 広帯域移動無線アクセス
- コードレス電話
- 特定ラジオマイク
- 特定小電力無線
（医療用テレメータ・ラジオマイク等）
- ラジコン・市民ラジオ等
- 無線LAN・無線アクセス
- 産業科学医療用（ISM）
- ITS関連システム
- RFID
- 航空通信
- 航空無線航行
- 衛星位置指示無線標識
- 海上無線航行
- 船舶通信
- ラジオバイ
- テレビジョン放送
- 衛星放送
- 音声放送
- 固定衛星
- 移動衛星
- 宇宙運用
- 気象衛星 / 気象援助
- 地球探査衛星
- 無線航行衛星（GPS等）
- 宇宙研究
- 電波天文
- 標準電波
- 各種レーダー
- アマチュア

P ブランバンド

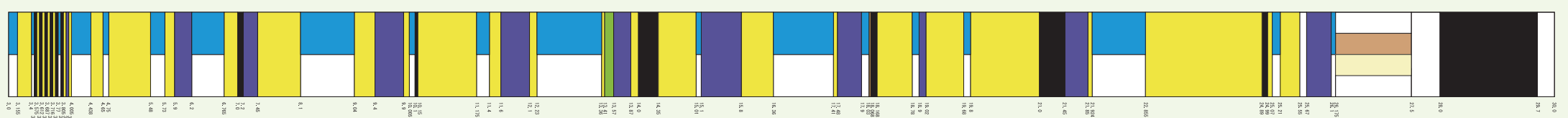
30kHz~300kHz 長波(LF)



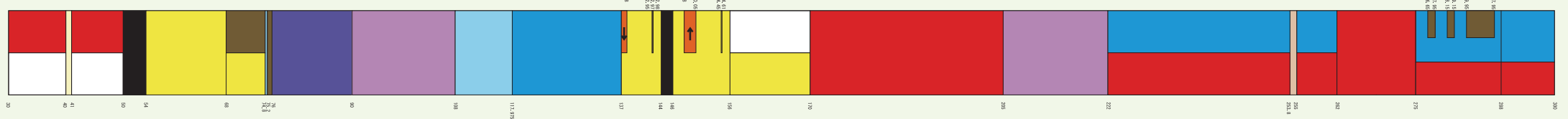
300kHz ~ 3000kHz(3MHz) 中波(MF)



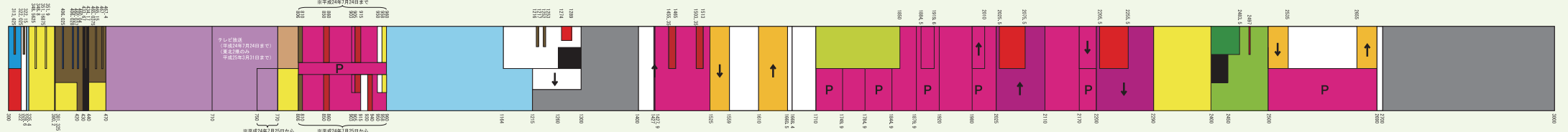
3MHz ~ 30MHz 短波(HF)



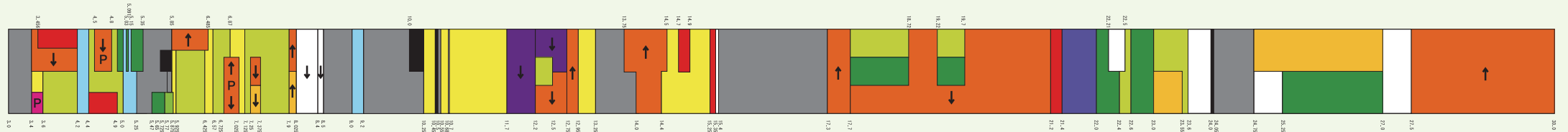
30MHz ~ 300MHz 超短波(VHF)



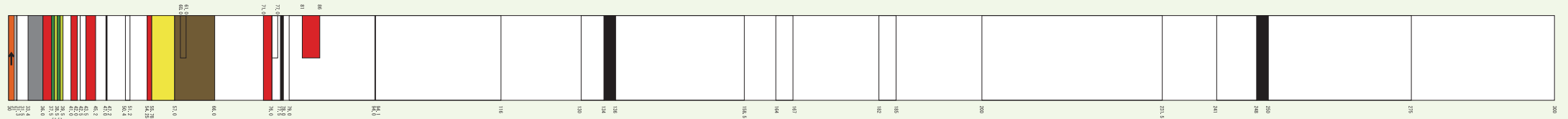
300MHz ~ 3000MHz(3GHz) 極超短波(UHF)



3GHz ~ 30GHz マイクロ波(SHF)



30GHz ~ 300GHz ミリ波(EHF)



(平成24年3月現在)



この印刷物は、印刷物の焼却・リサイクルできます。



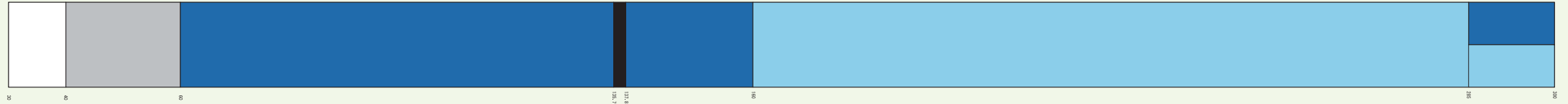
我が国の電波の使用状況

Japan Frequency Allocation Chart

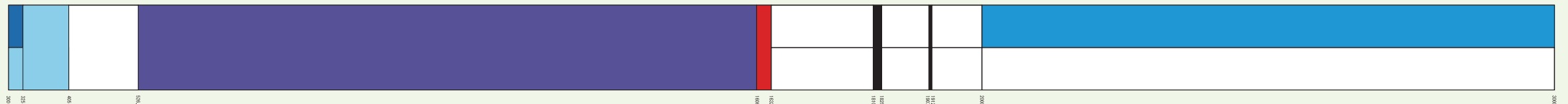


- 固定 (各種用途)
- 移動 (各種用途)
- 固定 / 移動 (各種用途)
- 携帯電話
- PHS
- MCA
- 簡易無線
- 広帯域移動無線アクセス
- コードレス電話
- 特定ラジオマイク
- 特定小電力無線 (医療用テレメーター・ラジオマイク等)
- ラジコン・市民ラジオ等
- 無線 LAN・無線アクセス
- 産業科学医療用 (ISM)
- ITS 関連システム
- RFID
- 航空通信
- 航空無線航行
- 衛星位置指示無線標識
- 海上無線航行
- 船舶通信
- ラジオバイ
- テレビジョン放送
- 衛星放送
- 音声放送
- 固定衛星
- 移動衛星
- 宇宙運用
- 気象衛星 / 気象援助
- 地球探査衛星
- 無線航行衛星 (GPS 等)
- 宇宙研究
- 電波天文
- 標準電波
- 各種レーダー
- アマチュア

30kHz~300kHz 長波(LF)



300kHz ~ 3000kHz(3MHz) 中波(MF)



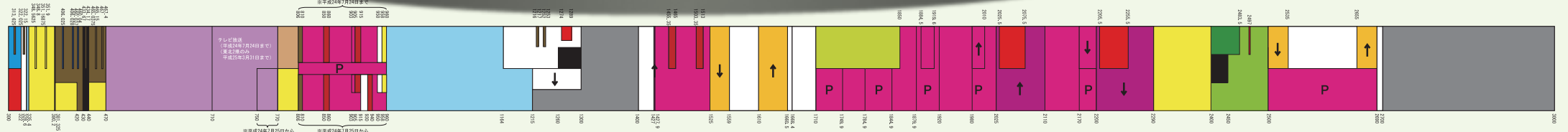
3MHz ~ 30MHz 短波(HF)



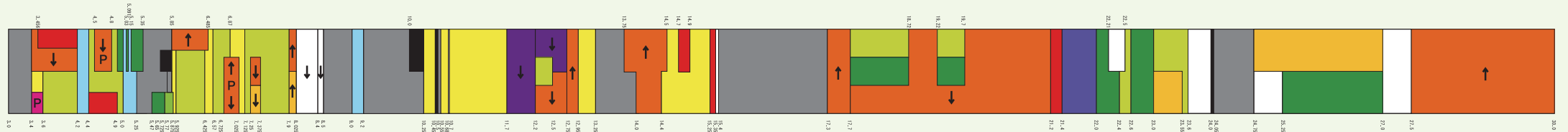
30MHz ~ 300MHz 超短波(VHF)



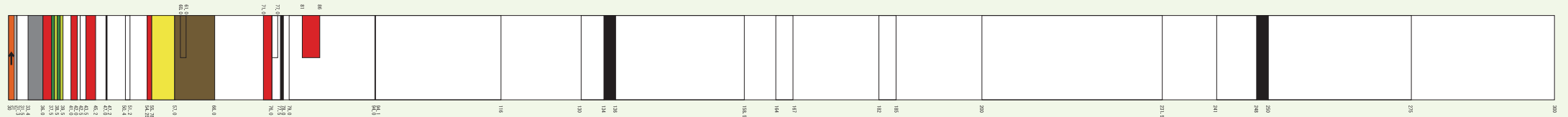
300MHz ~ 3000MHz(3GHz) 極超短波(UHF)



3GHz ~ 30GHz マイクロ波(SHF)



30GHz ~ 300GHz ミリ波(EHF)



P ブランバンド

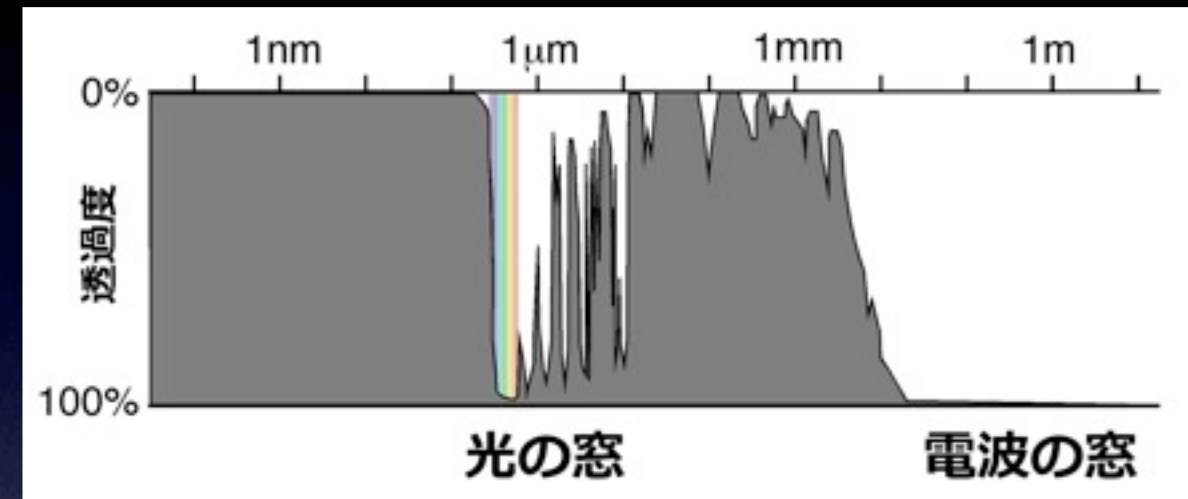
(平成24年3月現在)



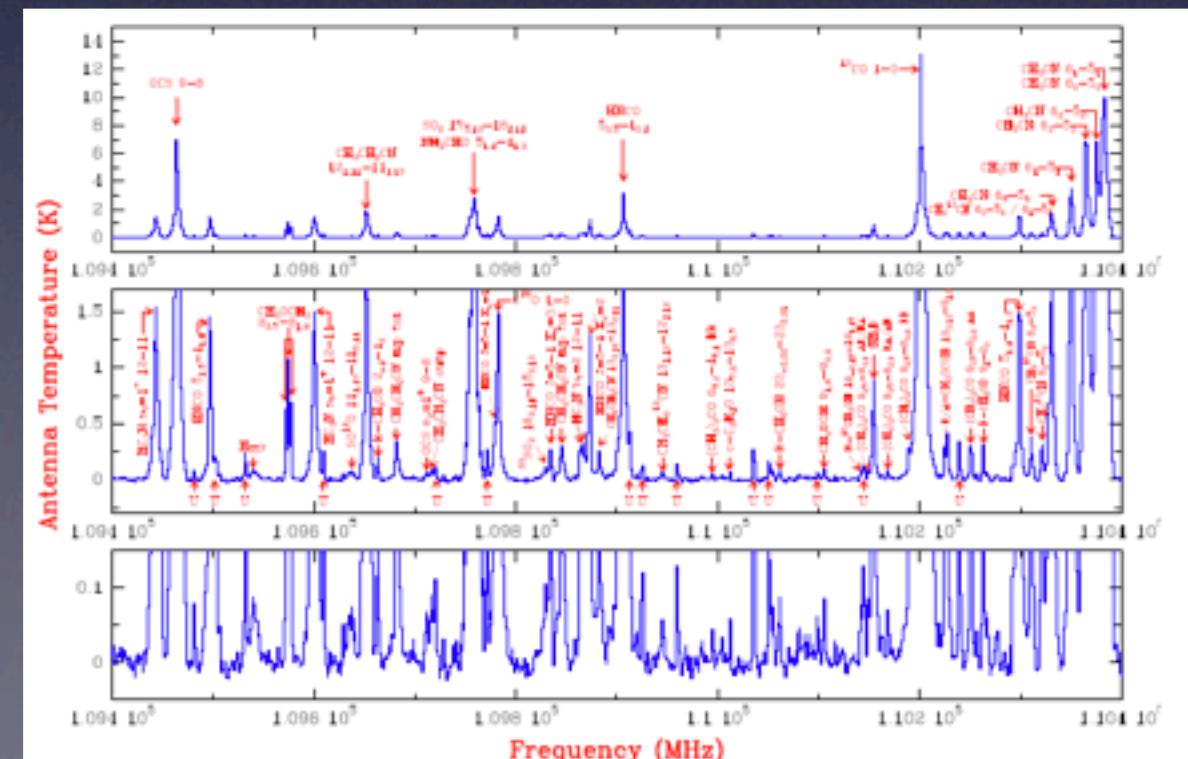
この印刷物は、印刷物の焼却・リサイクルできます。

電波の性質

- 物質透過性が高い
 - 物の内部を見通す
 - 「大気の窓」
- 波動性が強い
 - 信号処理が容易
 - スペクトル線の解析
 - 化学組成、物理状態
 - 運動



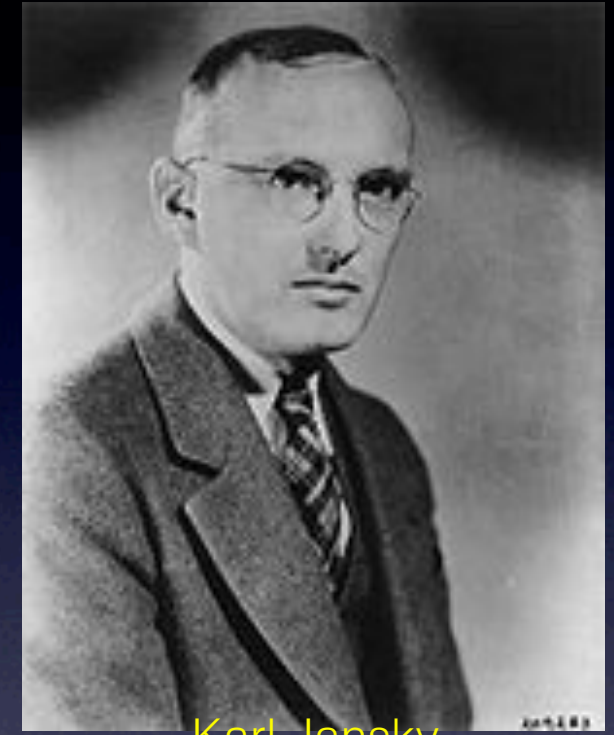
大気透過度



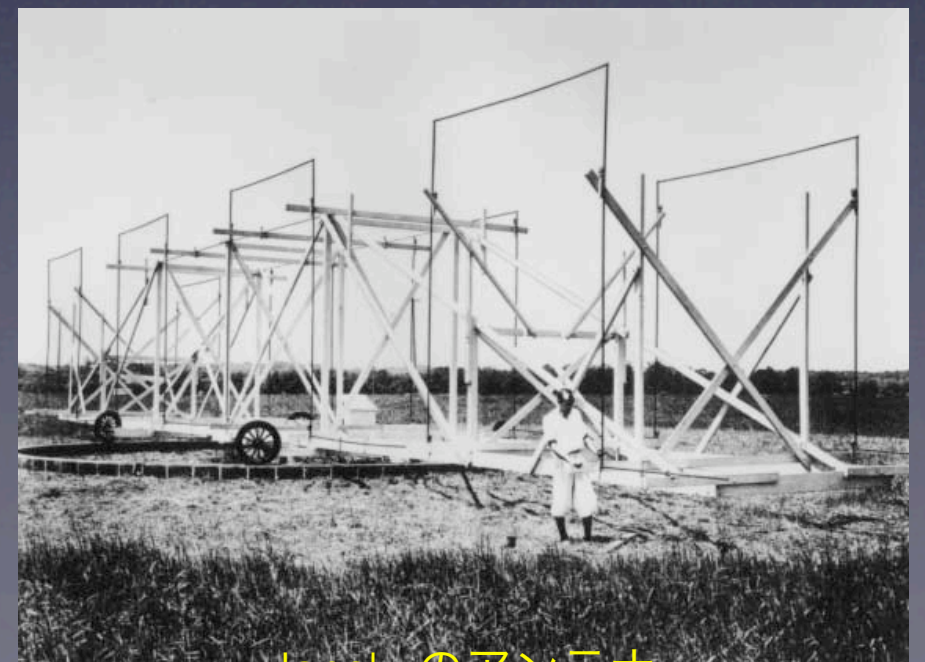
Orion-KL 3 mm帯のスペクトル

宇宙電波の発見

- Karl Jansky (1905-1950)
 - アメリカの物理学者・無線技術者
- 未知の電波雑音を発見 (20.5 MHz)
 - 23時間56分の周期で強度が変動
 - 太陽系外からの電波と結論 (1931)
- 銀河系の中心「いて座A」からの強烈な電波
 - シンクロトロン放射



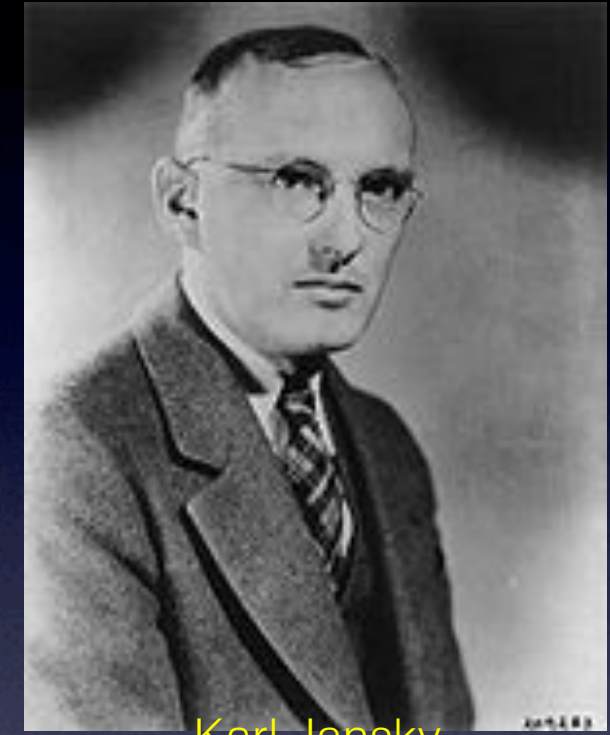
Karl Jansky



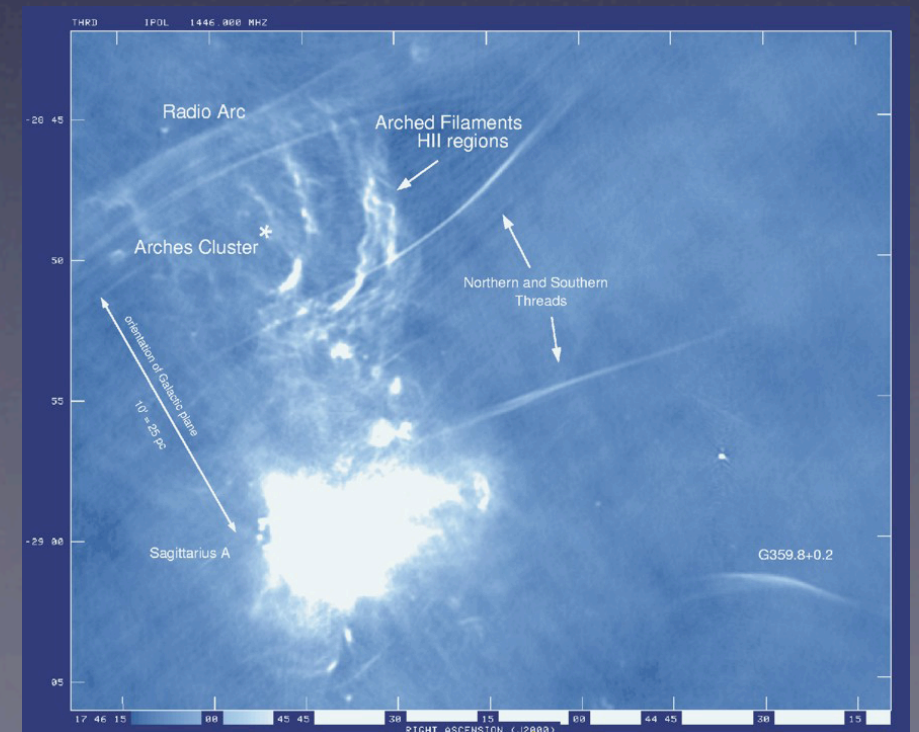
Janskyのアンテナ

宇宙電波の発見

- Karl Jansky (1905-1950)
 - アメリカの物理学者・無線技術者
- 未知の電波雑音を発見 (20.5 MHz)
 - 23時間56分の周期で強度が変動
- 太陽系外からの電波と結論 (1931)
- 銀河系の中心「いて座A」からの強烈な電波
 - シンクロトロン放射



Karl Jansky



Sgr Aの電波写真

電波望遠鏡の発展

- アンテナの巨大化
 - 集光力+解像度
- 電波干渉計の発展
 - 解像度の追求
- 超長基線干渉計の出現
 - 究極の解像度



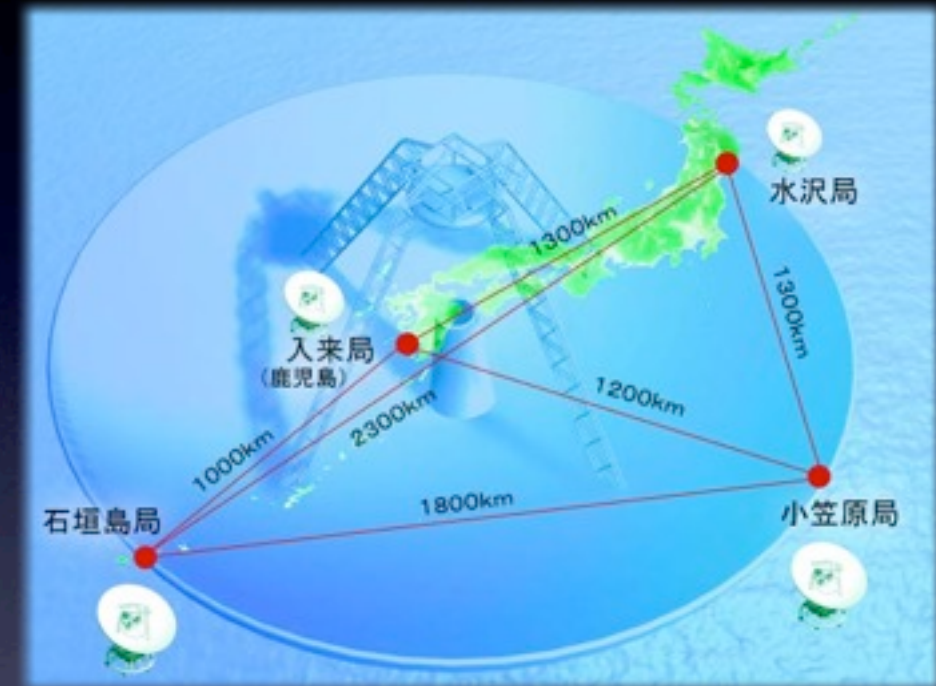
Arecibo天文台 305m電波望遠鏡



Very Large Array

電波望遠鏡の発展

- アンテナの巨大化
 - 集光力+解像度
- 電波干渉計の発展
 - 解像度の追求
- 超長基線干渉計の出現
 - 究極の解像度



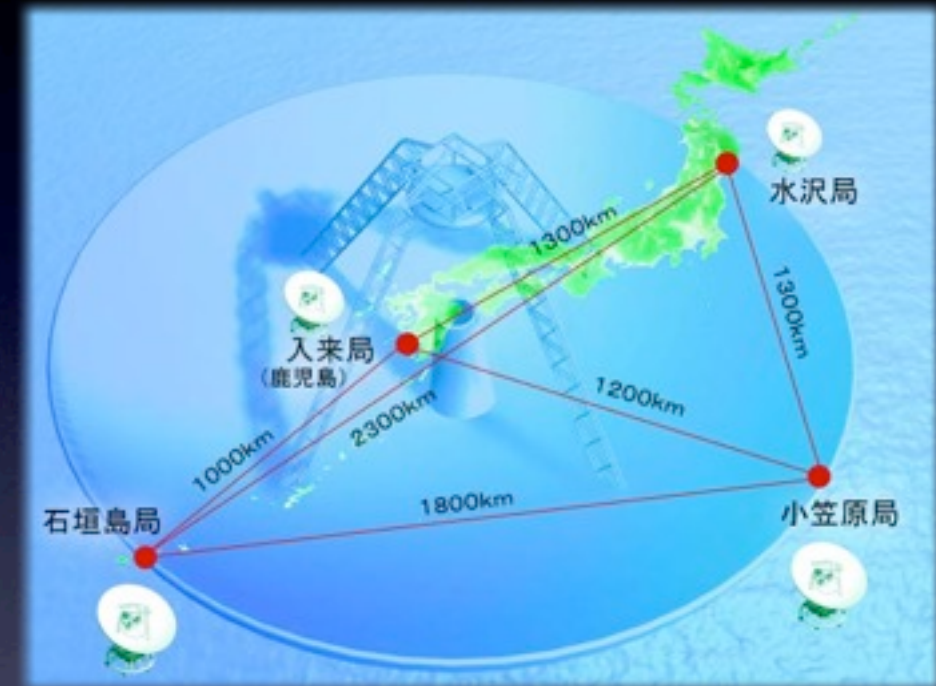
国立天文台 VERA



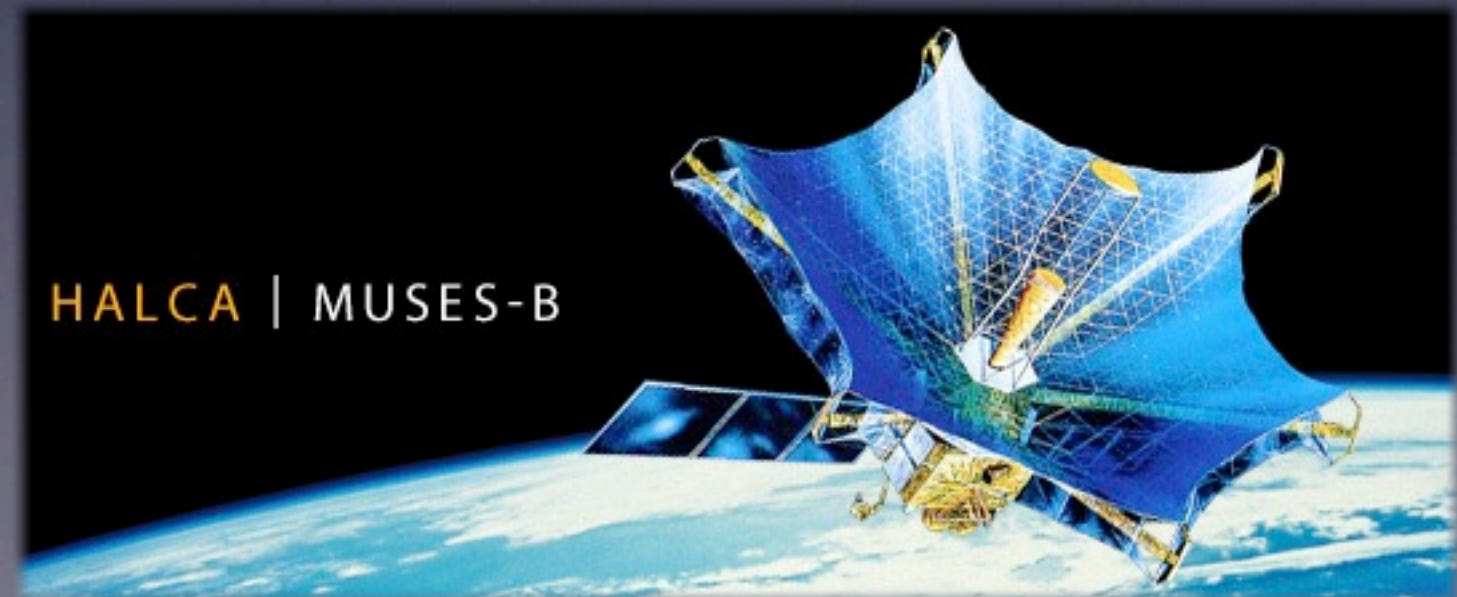
Very Large Array

電波望遠鏡の発展

- アンテナの巨大化
 - 集光力+解像度
- 電波干渉計の発展
 - 解像度の追求
- 超長基線干渉計の出現
 - 究極の解像度



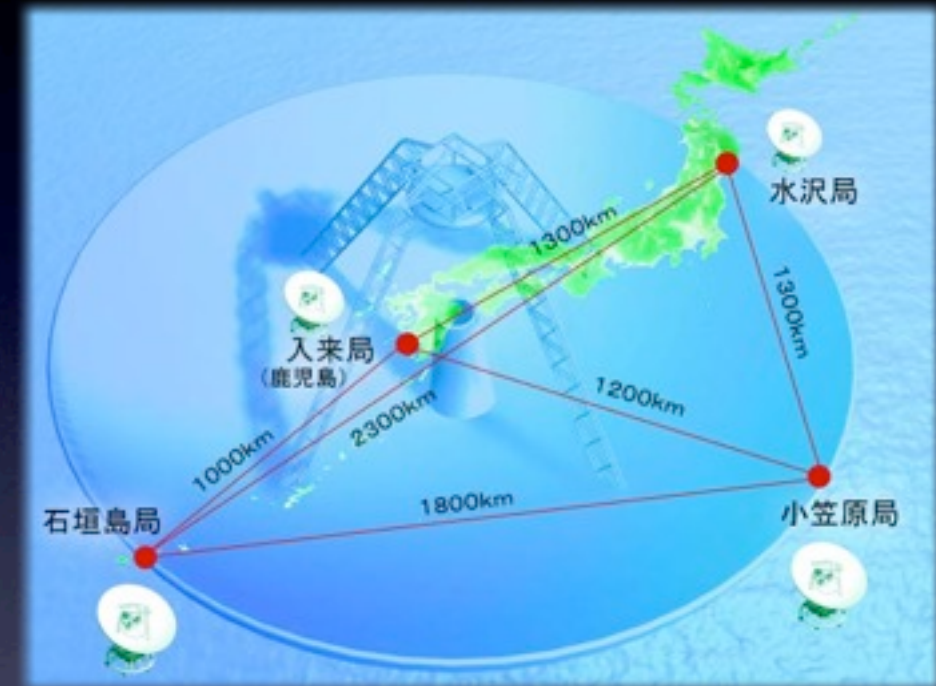
国立天文台 VERA



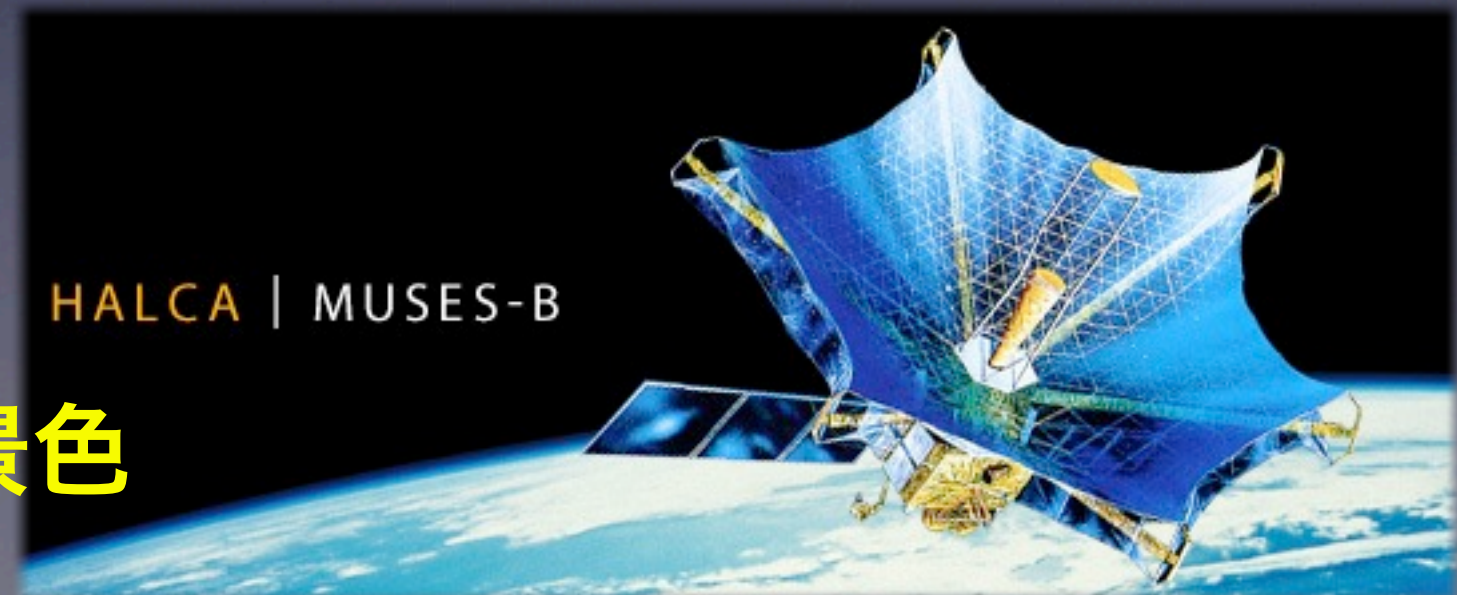
電波天文衛星「はるか」

電波望遠鏡の発展

- アンテナの巨大化
 - 集光力+解像度
- 電波干渉計の発展
 - 解像度の追求
- 超長基線干渉計の出現
 - 究極の解像度



国立天文台 VERA

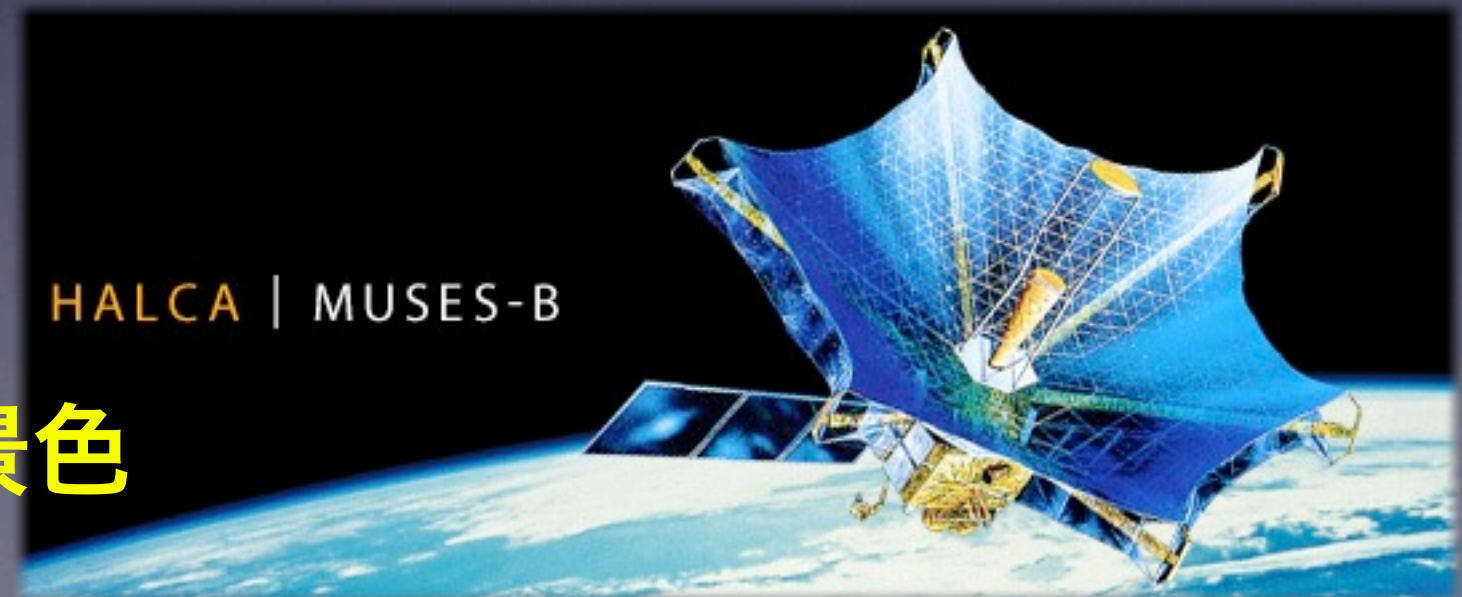


電波天文衛星「はるか」

予想だにしなかった景色

電波望遠鏡の発展

- アンテナの巨大化
 - 集光力+解像度
- 電波干渉計の発展
 - 解像度の追求
- 超長基線干渉計の出現
 - 究極の解像度



予想だにしなかった景色

電波天文衛星「はるか」

今日のお話

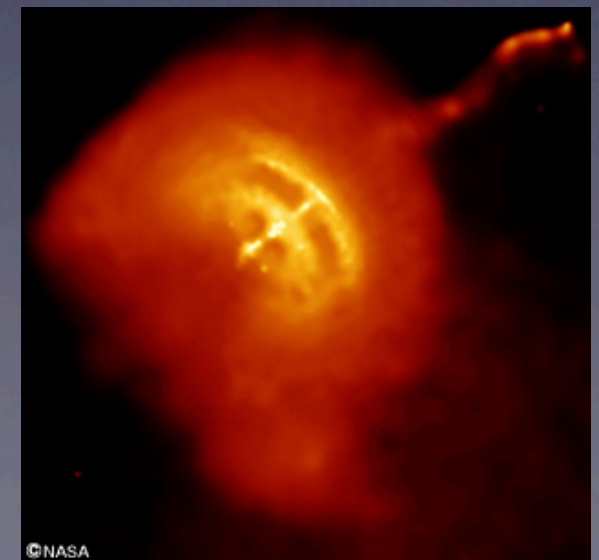
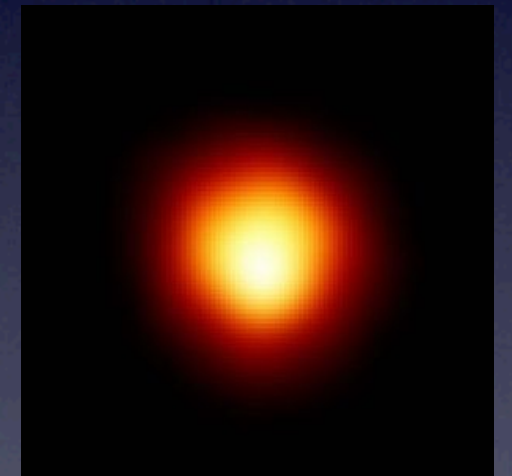
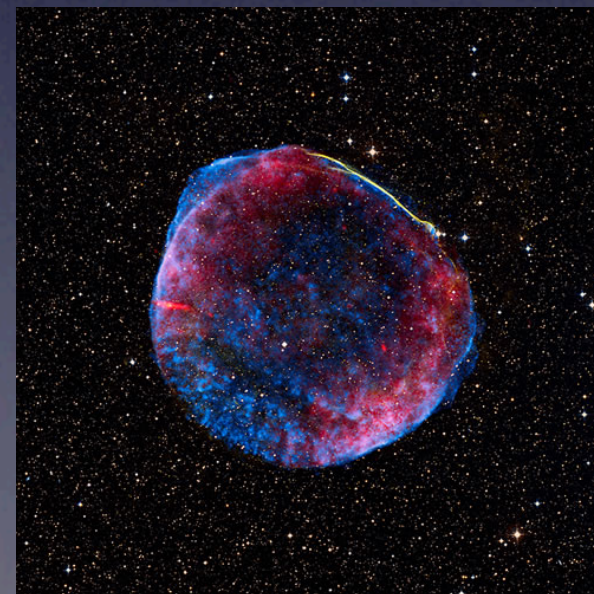
- 「宇宙電波と星間現象」
 - 星の一生と電波
 - 銀河の構造と電波
- 「最近の悩みについて」
 - 銀河系中心の星間物質



恒星の一生

- 星間分子雲
- 原始星
- 主系列星
- 赤色巨星
- 超新星爆発
- 中性子星/ ブラックホール

進化



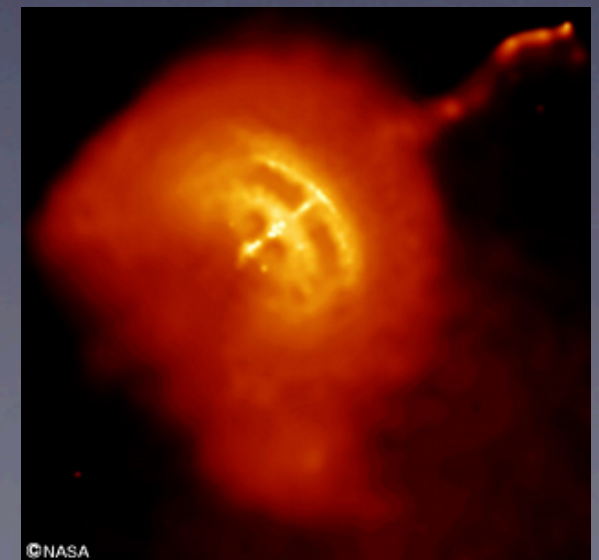
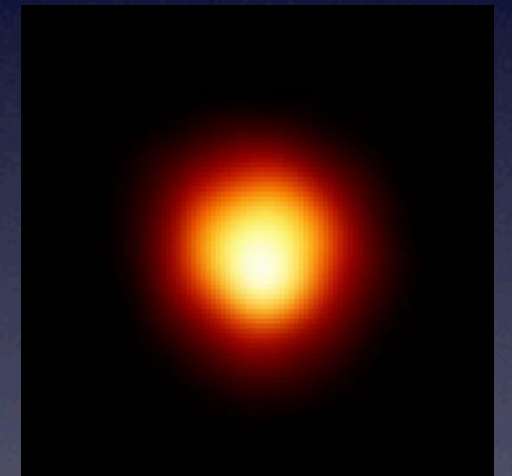
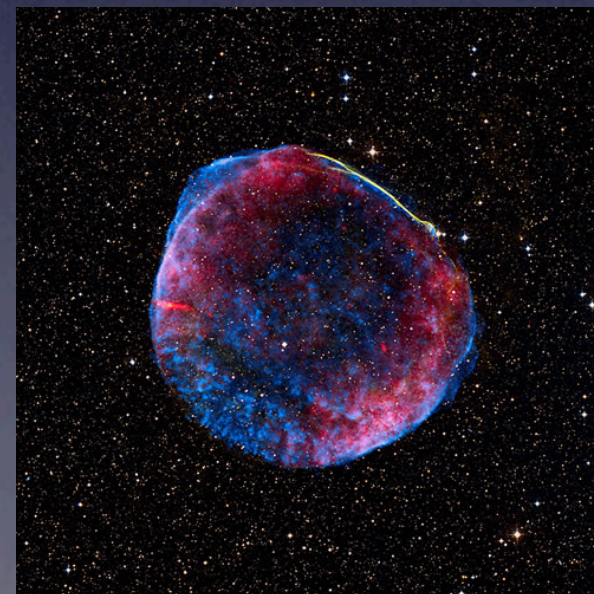
© NASA

© NASA

恒星の一生

- 星間分子雲
- 原始星
- 主系列星
- 赤色巨星
- 超新星爆発
- 中性子星/ ブラックホール

進化



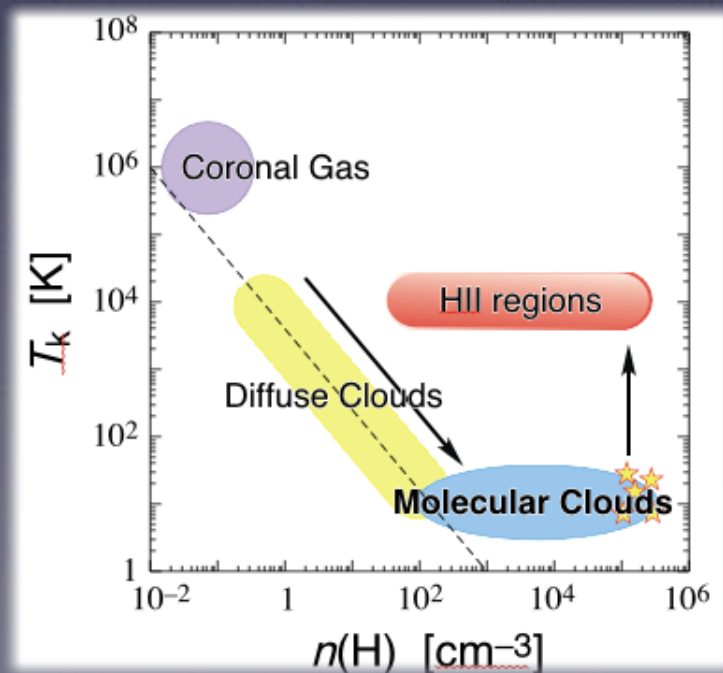
© NASA

© NASA

物質進化のプロセス

星間分子雲

- ガス・塵が凝集した雲
 - $n(\text{H}_2)=100-10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - $T_k=10-20 \text{ K}$
- 高密度分子雲コア
 - 星形成の現場



オリオン座巨大分子雲

星間

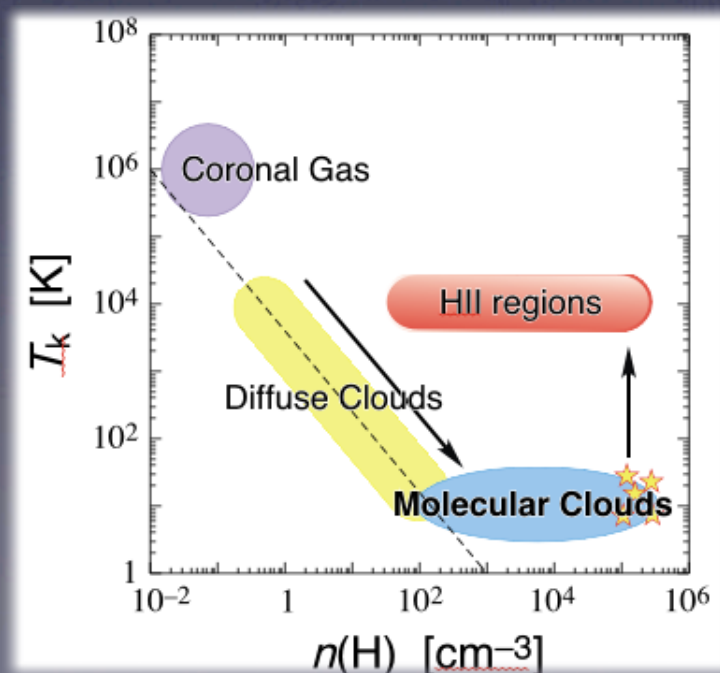
- ガス・塵が凝集した雲

- $n(\text{H}_2) = 100 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$

- $T_k = 10 - 20 \text{ K}$

- 高密度分子雲コア

- 星形成の現場



1970ApJ...161L..43W

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 161:L43-L44, July 1970
 © 1970. The University of Chicago. All rights reserved. Printed in U.S.A

CARBON MONOXIDE IN THE ORION NEBULA

R. W. WILSON, K. B. JEFFERTS, AND A. A. PENZIAS

Bell Telephone Laboratories, Inc., Holmdel, New Jersey, and
 Crawford Hill Laboratory, Murray Hill, New Jersey

Received 1970 June 5

ABSTRACT

We have found intense 2.6-mm line radiation from nine galactic sources which we attribute to carbon monoxide.

We have detected intense line radiation from the direction of the Orion Nebula at a frequency of 115, 267.2 MHz (in the "local standard of rest" system) which we attribute to the transition $J = 1$ to $J = 0$ in carbon monoxide. The observed spectrum is dominated by a single line with a peak antenna temperature of about 40° K and a width of 2.4 MHz (6.2 km sec⁻¹).¹ A spectrum measured with 2-MHz resolution is shown in Figure 1. This feature is most intense in a direction about 1'2" northwest of the center of the continuum source, which corresponds closely to the direction of the OH emission, the IR star, and the IR nebula (cf. Fig. 2*b* of Schraml and Mezger 1969). A series of spectra taken at 1' intervals of right ascension (approximately the beam width of the antenna) at a declination of $-5^{\circ}24'21''$ (1950) clearly show line features out to at least 25' in each direction from the center. About one-twentieth of the peak antenna temperature was observed at these limits. The angular distribution is strongly peaked to the center, is asymmetrical, and decreases smoothly but not monotonically from the center (Fig. 2). The center frequency of the line changes only slightly with angle, while the width of the line generally decreases away from the center of the source. The full angular width at half-maximum is 5'5". In contrast to this, the map of Ori A made in the 1.95-cm continuum by Schraml and Mezger (1969) shows a width at one-twentieth of the peak temperature of only 10' and a half-power width of 4' with a monotonic decrease from the center of the source.

The frequency of the transition $J = 1$ to $J = 0$ in ¹²C¹⁸O is given as 115, 271.201 MHz in the NBS tables (Cord, Lojko, and Peterson 1968). Our observed center frequency thus corresponds to a velocity of 10.5 km sec⁻¹ with respect to the "local standard of rest" with a full width at half-maximum of 6.2 km sec⁻¹. This may be compared with OH velocities reported in the range -8 to $+24$ km sec⁻¹ (Palmer and Zuckerman 1967), H₂O velocities from -8 to $+18$ km sec⁻¹ (Knowles, Mayer, and Sullivan 1969), and a 109α recombination-line peak at -2.6 km sec⁻¹ (Mezger and Höglund 1967).

Preliminary measurements of a number of other galactic sources have shown the same spectral line in the direction of W3, Sgr A, Sgr B2, M17, W43, W44, W49, and W51. In each of these sources, the velocities of the most intense CO feature generally correspond well with published velocities in other lines.

This work was done with a specially constructed line receiver mounted on the NRAO 36' paraboloid. Schottky barrier diodes developed by C. A. Burrus of Bell Laboratories were used in Sharpless wafer units both in the signal mixer and in a harmonic mixer used to control the frequency of the local oscillator klystron. Calibration noise was provided

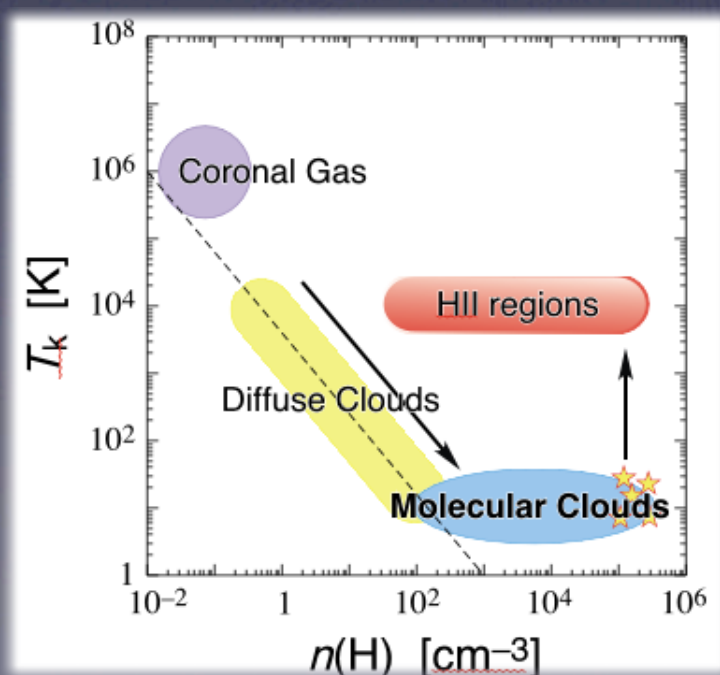
¹ These numbers come from a measurement using the National Radio Astronomy Observatory (operated by Associated Universities, Inc., under contract with the National Science Foundation) fifty-channel spectral-line receiver (nominal 100-kHz resolution). The remainder of our measurements were made with the NRAO forty-channel receiver (2-MHz measured resolution).

L43

CO 検出を報告する論文 (Wilson et al. 1970)

星間

- ガス・塵が凝集した雲
 - $n(\text{H}_2) = 100 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - $T_k = 10 - 20 \text{ K}$
- 高密度分子雲コア
 - 星形成の現場



1970ApJ...161L..43W

L44

R. W. WILSON, K. B. JEFFERTS, AND A. A. PENZIAS

by an avalanche diode mounted in a wave guide. Details of these devices will be published elsewhere. The low-noise 1390-MHz IF preamplifier and forty-channel line receiver were provided by NRAO.

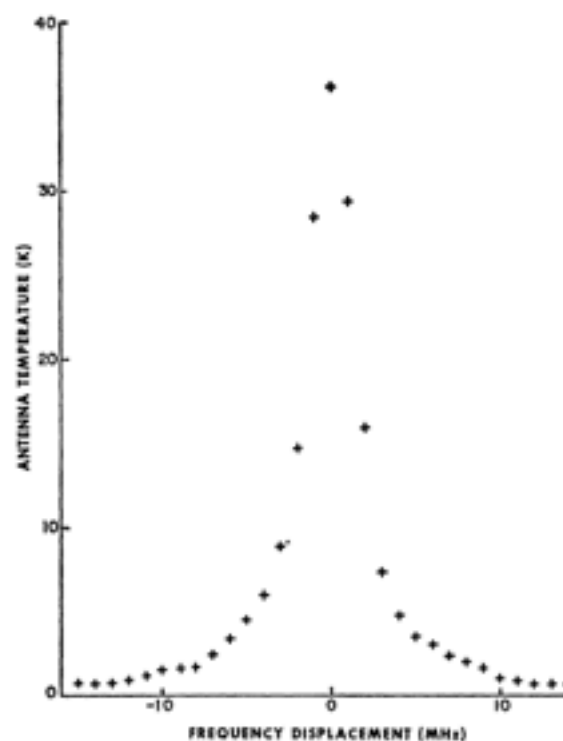


FIG. 1

FIG. 1.—Spectrum of CO radiation in the Orion Nebula made with the NRAO forty-channel line receiver. The center frequency is 115, 267.2 MHz.

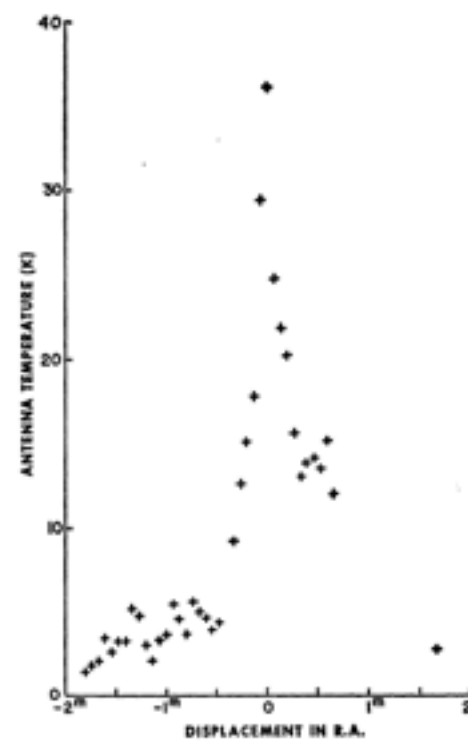


FIG. 2

FIG. 2.—Distribution in right ascension of the peak antenna temperature of CO radiation at a declination of $-5^{\circ}24'21''$.

We are grateful to the staff of NRAO for their cooperation, especially D. Buhl, E. K. Conklin, and G. Grove. S. Weinreb contributed to the planning and construction of the receiver and arranged for the equipment supplied by NRAO to be available in a timely manner.

We wish to acknowledge stimulating discussions with P. Thaddeus and P. Solomon which led us to undertake the study of molecules in this part of the spectrum.

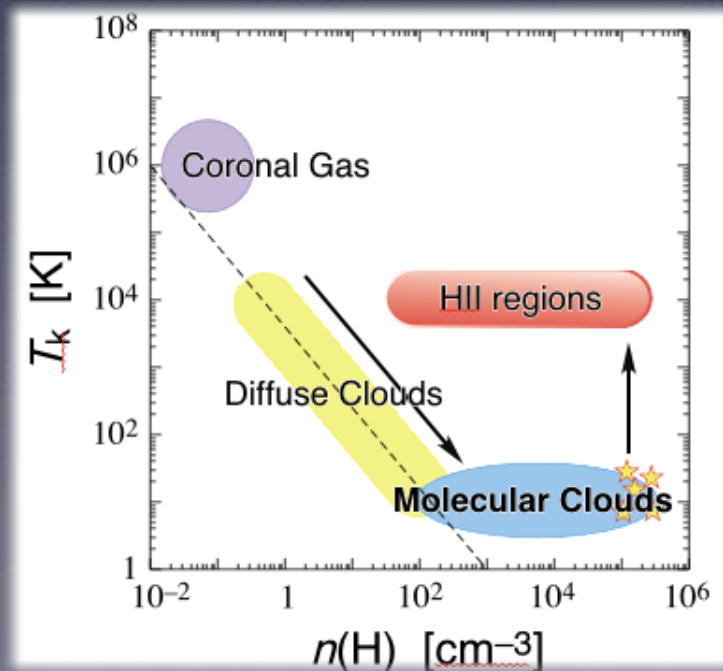
REFERENCES

- Cord, M. S., Lojko, M. S., and Peterson, J. D. 1968, *Microwave Spectral Tables* (NBS Monog. 70, vol. 5).
 Knowles, S. H., Mayer, C. H., and Sullivan, W. T., III. 1969, *Science*, **166**, 221.
 Mezger, P. G., and Höglund, B. 1967, *Ap. J.*, **147**, 490.
 Palmer, P., and Zuckerman, B. 1967, *Ap. J.*, **148**, 727.
 Schraml, J., and Mezger, P. G. 1969, *Ap. J.*, **156**, 269.

CO 検出を報告する論文 (Wilson et al. 1970)

星間分子雲

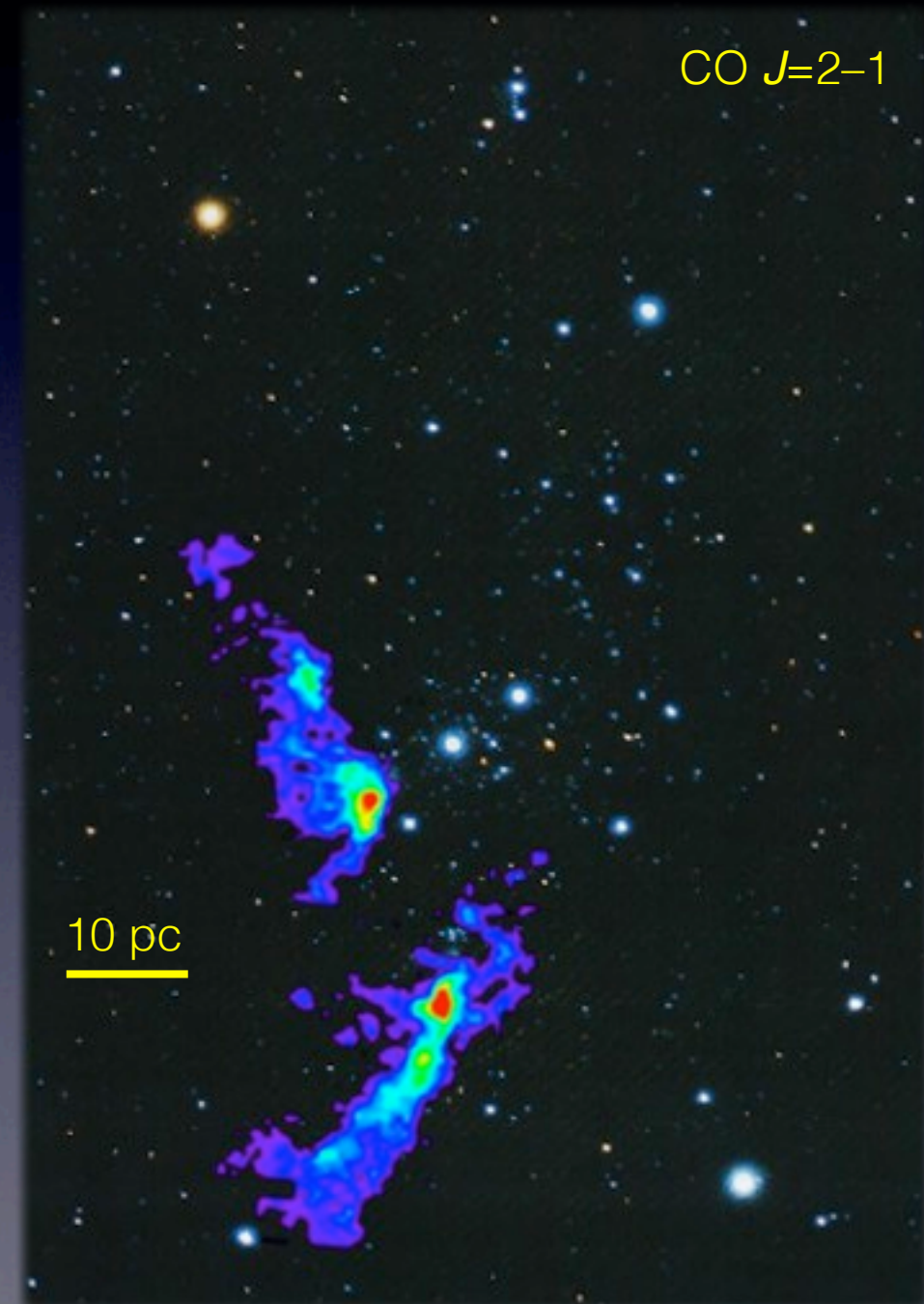
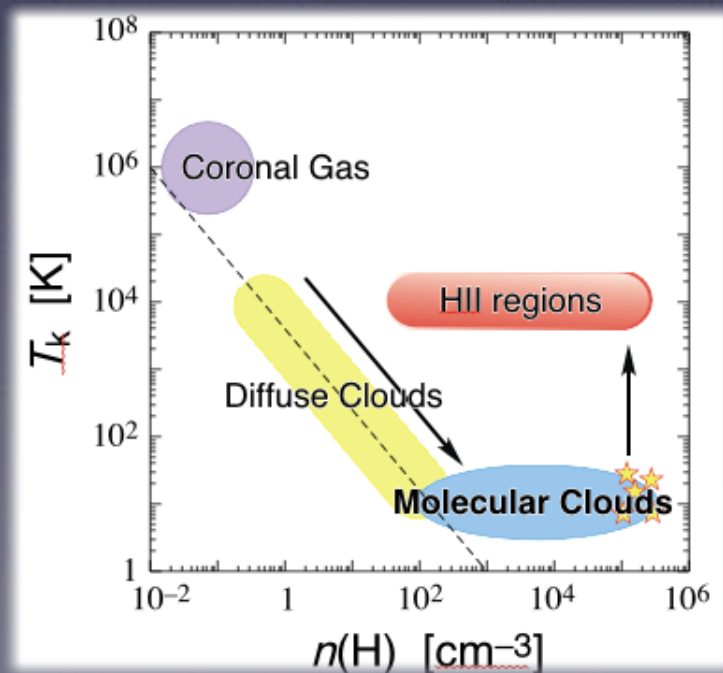
- ガス・塵が凝集した雲
 - $n(\text{H}_2)=100-10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - $T_k=10-20 \text{ K}$
- 高密度分子雲コア
 - 星形成の現場



オリオン座巨大分子雲

星間分子雲

- ガス・塵が凝集した雲
 - $n(\text{H}_2)=100-10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - $T_k=10-20 \text{ K}$
- 高密度分子雲コア
 - 星形成の現場



オリオン座巨大分子雲

星間分子雲の観測

- 分子振動回転準位

- $E_{vJ}/h = \omega(v+1/2) + BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^2$

- v : 振動準位、

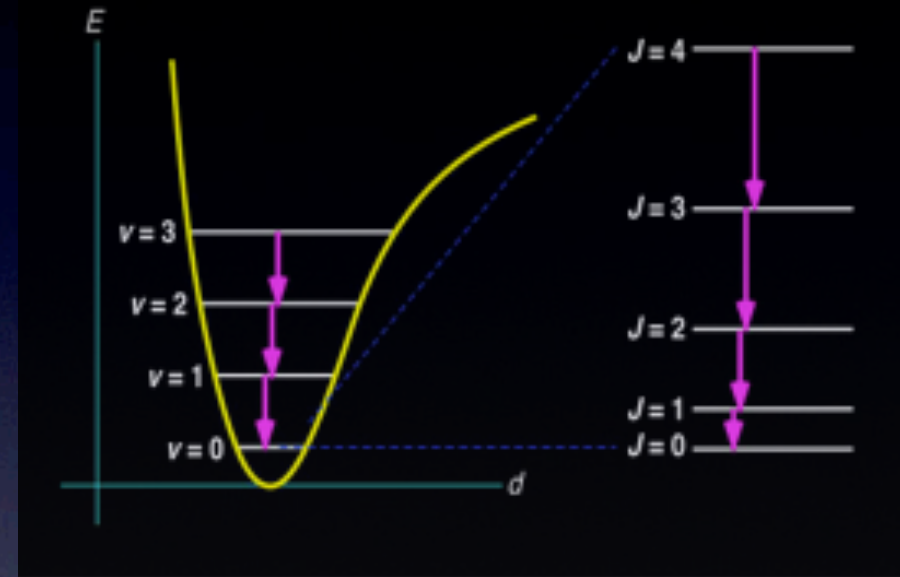
- J : 回転準位

- 回転遷移スペクトル線

- $J+1 \rightarrow J$ 遷移

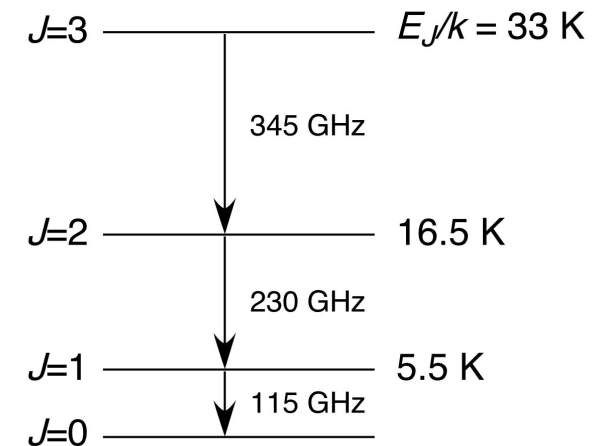
- ミリ波～サブミリ波帯

- CO, HCN, HCO⁺, SiO, etc..



二原子分子のエネルギー準位

$$E_J = hBJ(J+1)$$



一酸化炭素分子の回転エネルギー準位

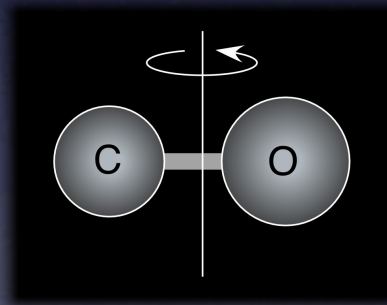
星間分子雲の観測

- 分子振動回転準位

- $E_{vJ}/h = \omega(v+1/2) + BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^2$

- v : 振動準位、

- J : 回転準位

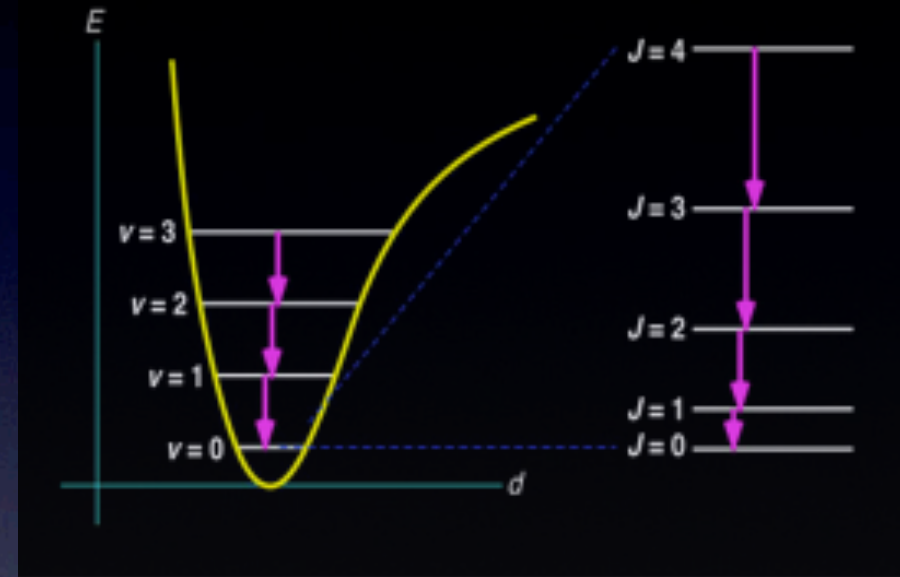


- 回転遷移スペクトル線

- $J+1 \rightarrow J$ 遷移

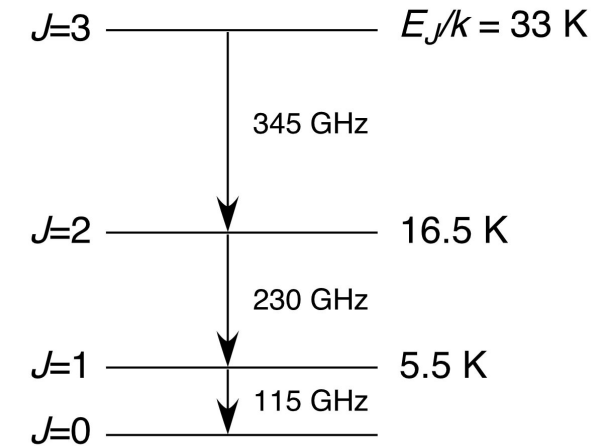
- ミリ波～サブミリ波帯

- CO, HCN, HCO⁺, SiO, etc..



二原子分子のエネルギー準位

$$E_J = hBJ(J+1)$$



一酸化炭素分子の回転エネルギー準位

星間分子雲の観測

- 回転スペクトル線の励起

- 衝突励起 (C) > 自発放射 (A)

- $C \propto n(\text{H}_2) \langle \sigma v \rangle$

- $A \propto \nu^3 \mu^2$ (μ : 電気双極子モーメント)

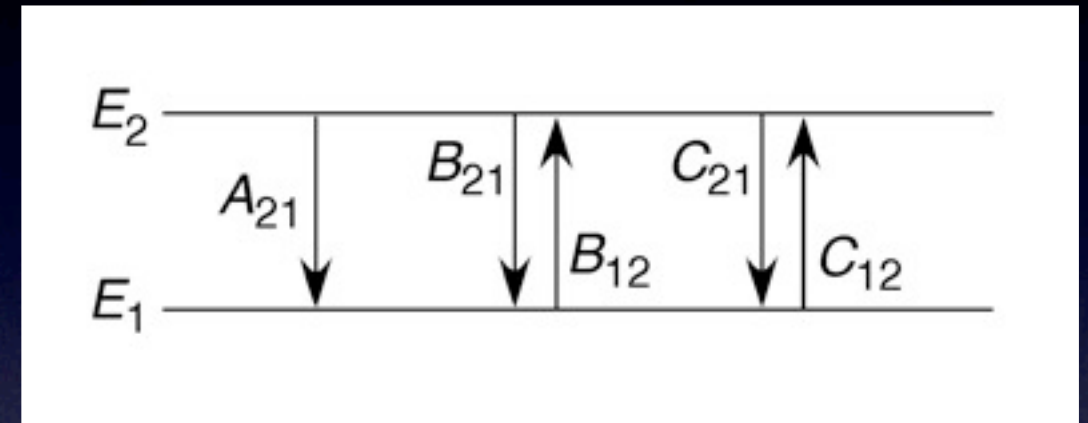
- スペクトル線放射に必要な条件

- $n(\text{H}_2) > n_{\text{crit}}, T_k > E_J/k$

- 回転スペクトル線の放射

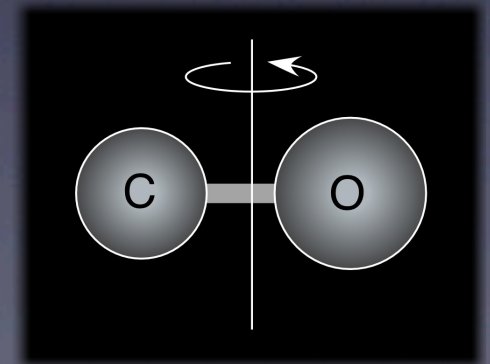
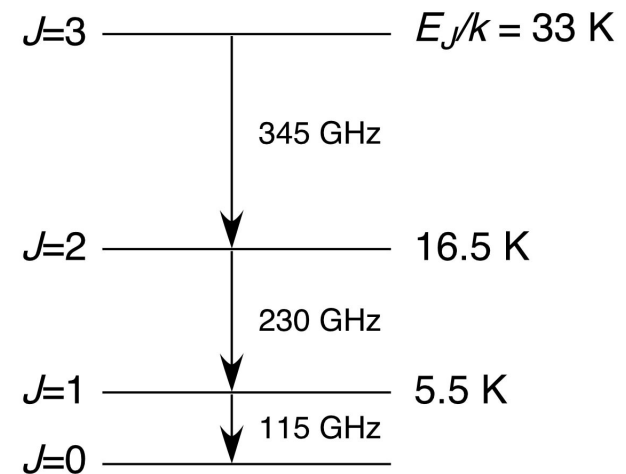
- High- J : 高温・高密度領域

- High- μ : 高密度領域



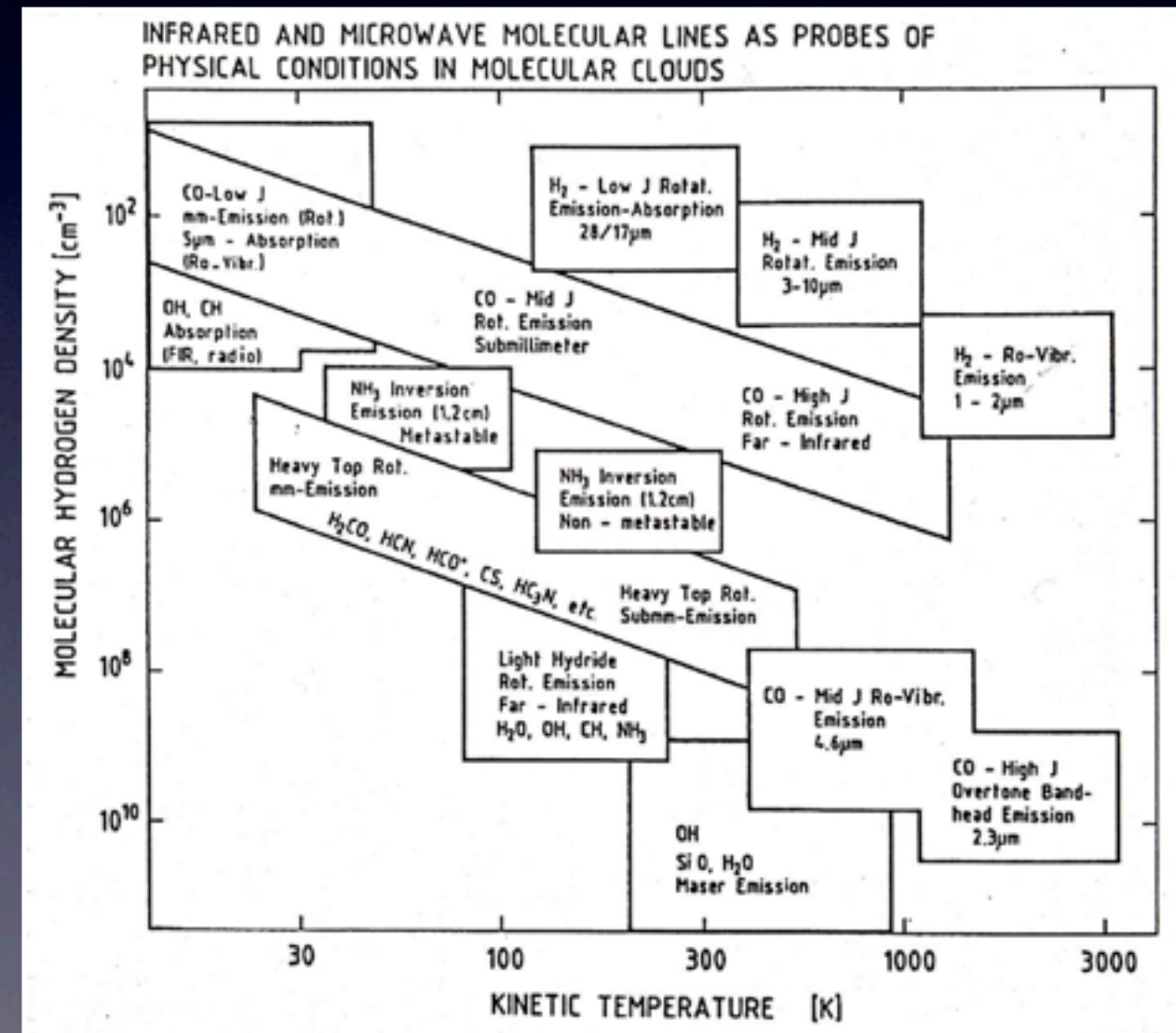
輻射励起と衝突励起

$$E_J = hBJ(J+1)$$



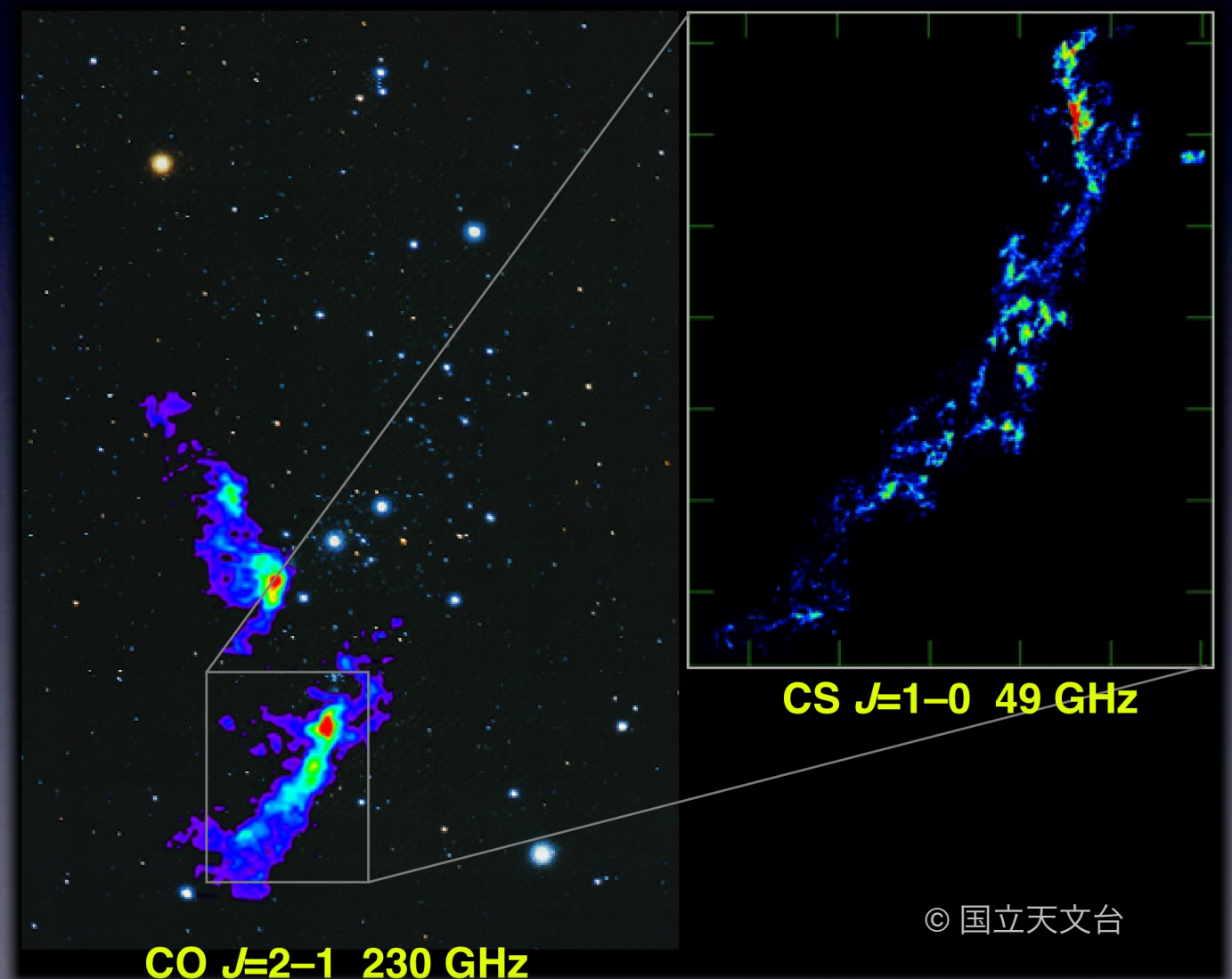
星間分子雲の観測

- 回転スペクトル線の励起
 - 衝突励起 (C) > 自発放射 (A)
 - $C \propto n(\text{H}_2) \langle \sigma v \rangle$
 - $A \propto \nu^3 \mu^2$ (μ : 電気双極子モーメント)
 - スペクトル線放射に必要な条件
 - $n(\text{H}_2) > n_{\text{crit}}, T_k > E_J/k$
- 回転スペクトル線の放射
 - High- J : 高温・高密度領域
 - High- μ : 高密度領域



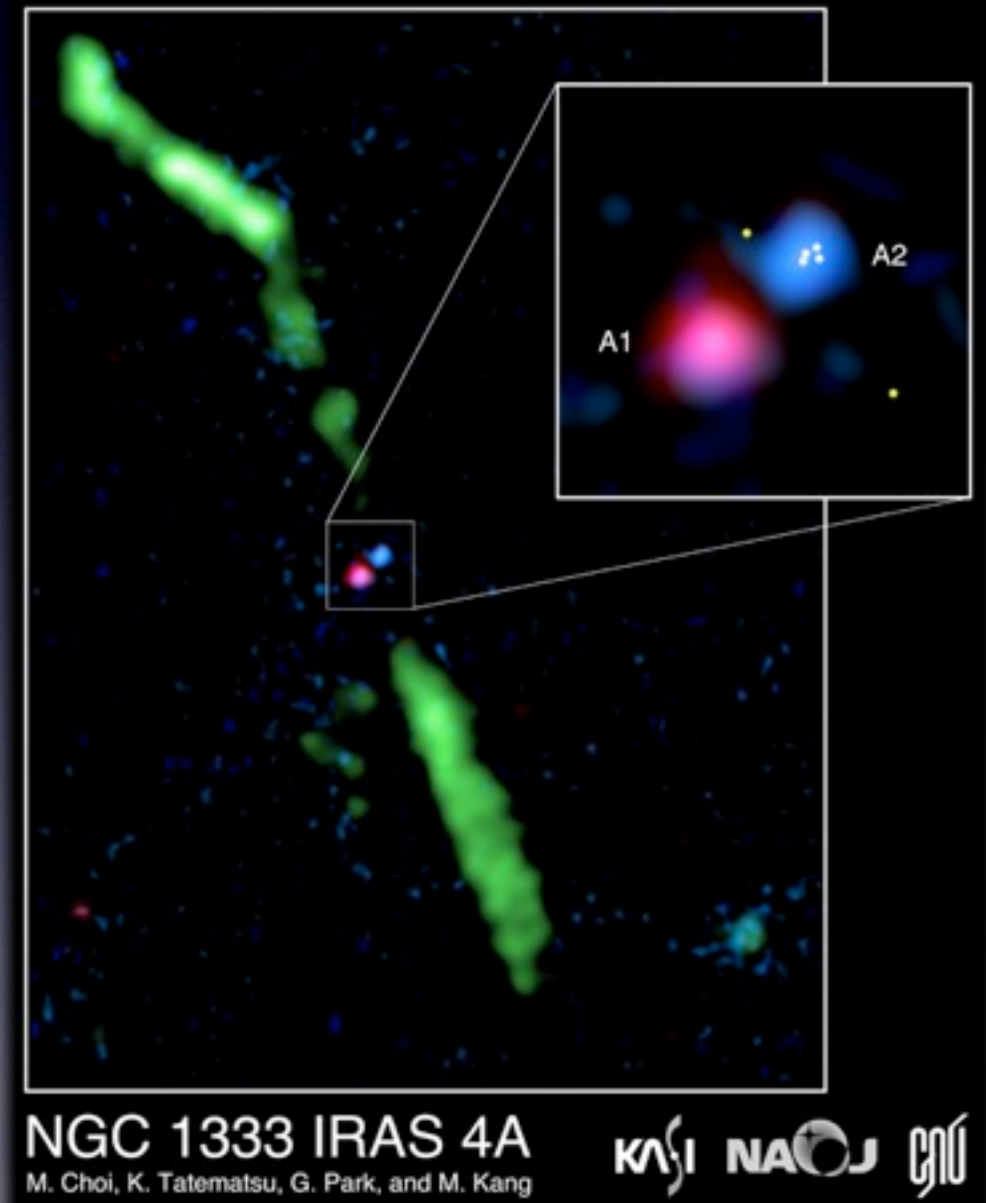
分子スペクトル線で見た景色

- 高密度コア
 - 星形成の現場
 - CS等：高密度プローブ
- 原始星
 - 双極分子流/ジェット
 - SiO：難揮発性分子
- 大質量星形成領域
 - 強烈な紫外線 → 電離・解離・加熱
 - 強力な双極流 → 衝撃波



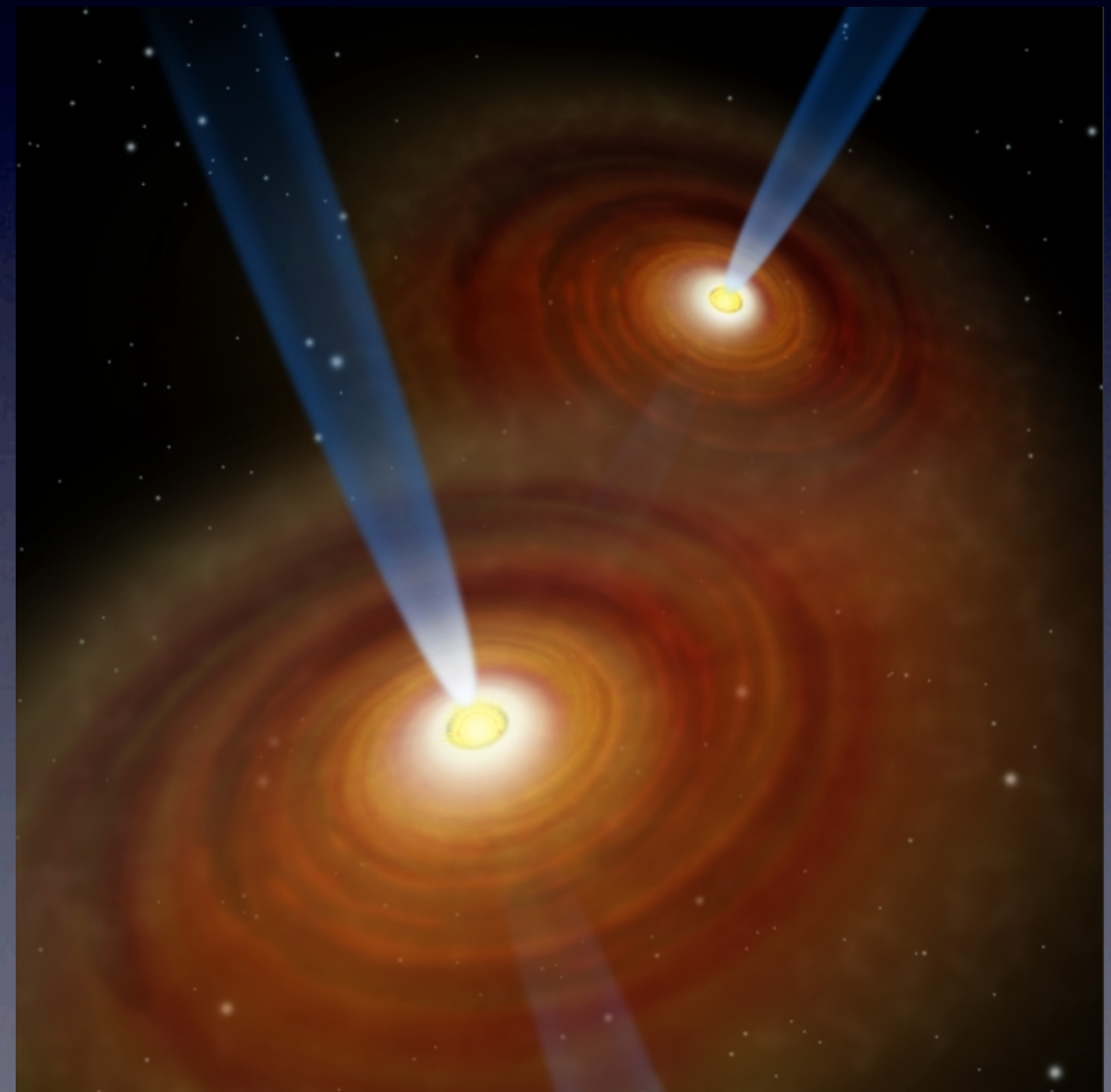
分子スペクトル線で見た景色

- 高密度コア
 - 星形成の現場
 - CS等：高密度プローブ
- 原始星
 - 双極分子流/ジェット
 - SiO：難揮発性分子
- 大質量星形成領域
 - 強烈な紫外線 → 電離・解離・加熱
 - 強力な双極流 → 衝撃波



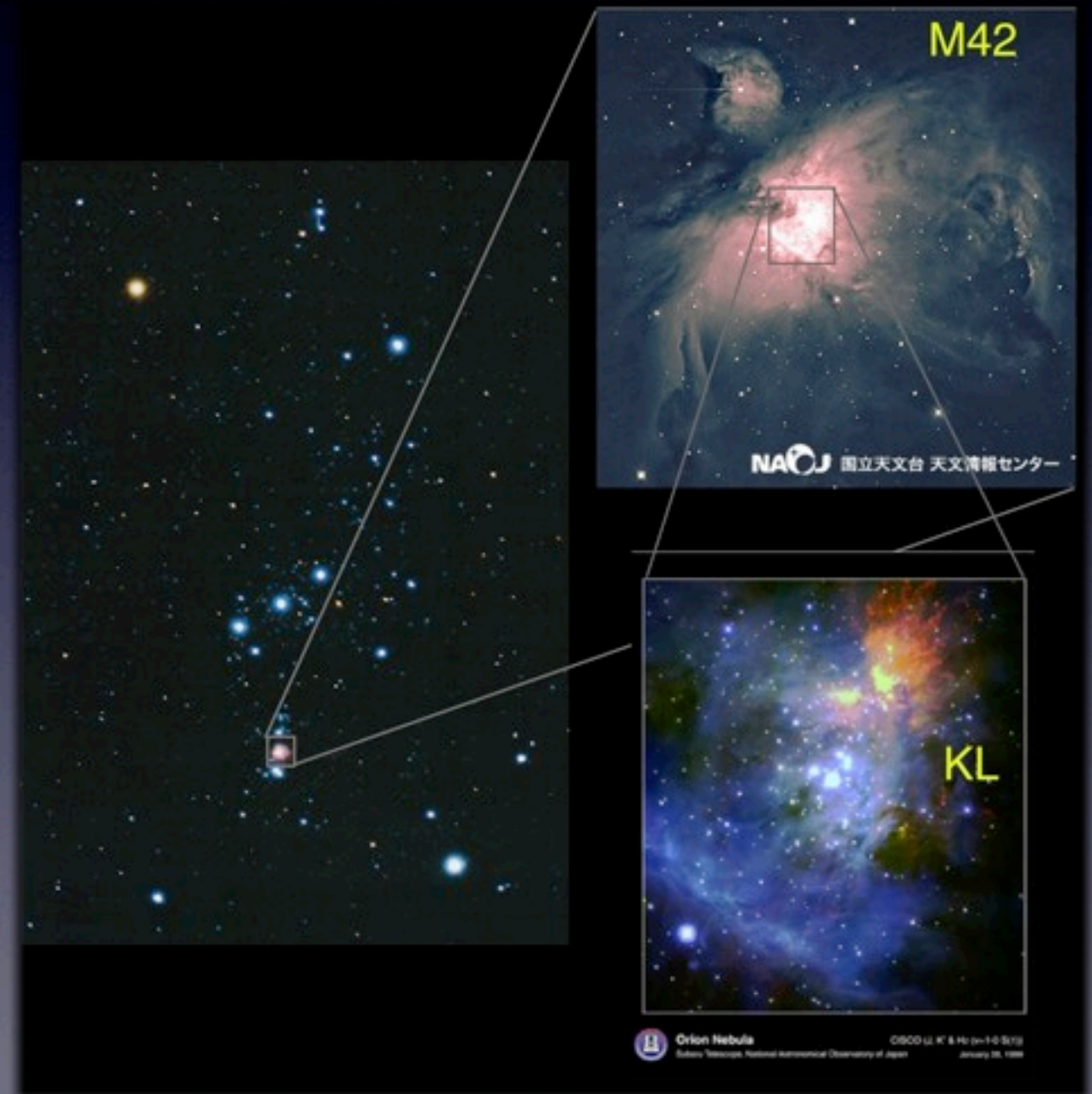
分子スペクトル線で見た景色

- 高密度コア
 - 星形成の現場
 - CS等：高密度プローブ
- 原始星
 - 双極分子流/ジェット
 - SiO：難揮発性分子
- 大質量星形成領域
 - 強烈な紫外線 → 電離・解離・加熱
 - 強力な双極流 → 衝撃波



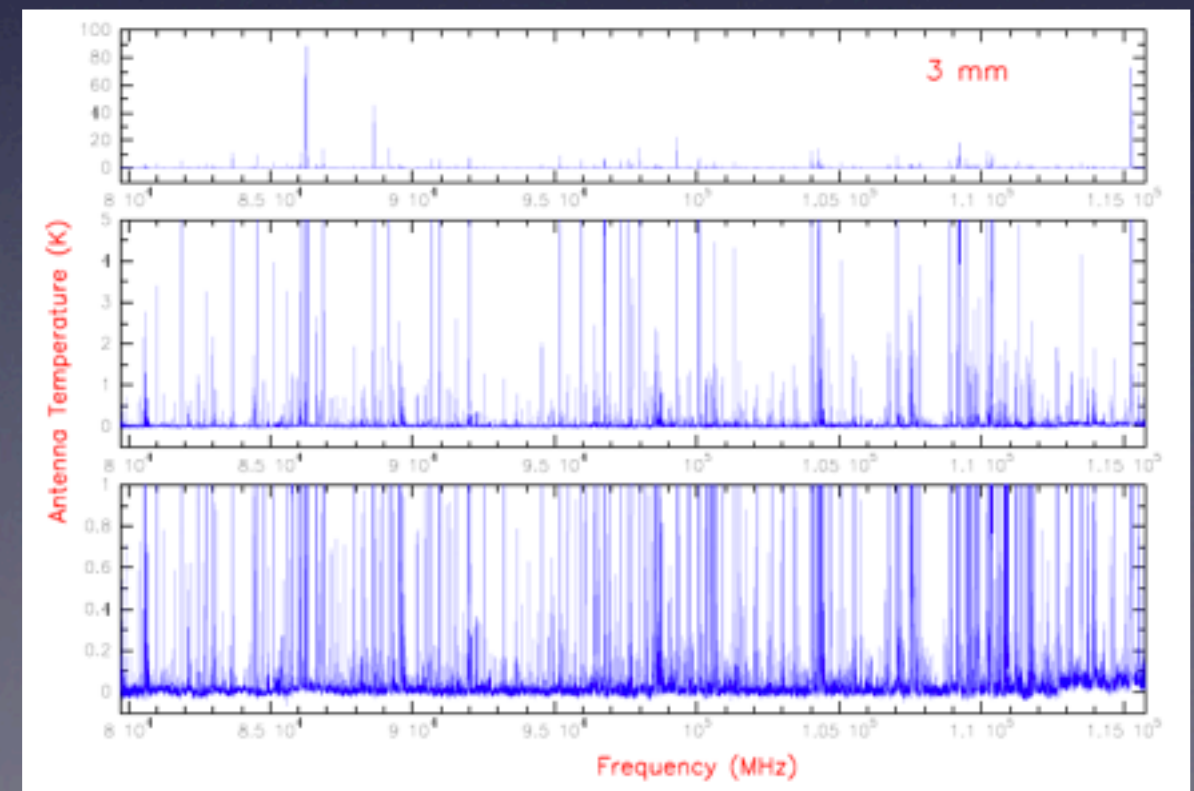
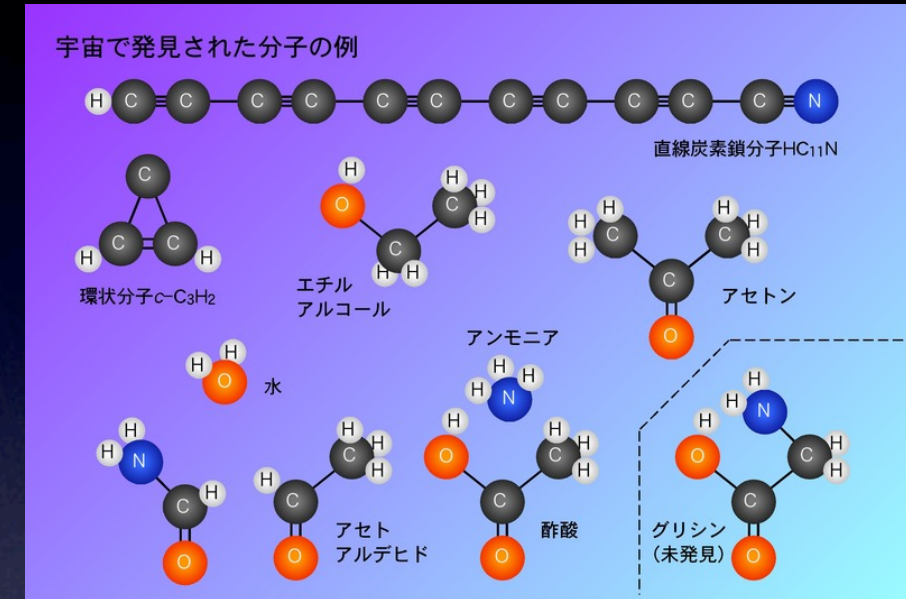
分子スペクトル線で見た景色

- 高密度コア
 - 星形成の現場
 - CS等：高密度プローブ
- 原始星
 - 双極分子流/ジェット
 - SiO：難揮発性分子
- 大質量星形成領域
 - 強烈な紫外線 → 電離・解離・加熱
 - 強力な双極流 → 衝撃波



様々な星間分子

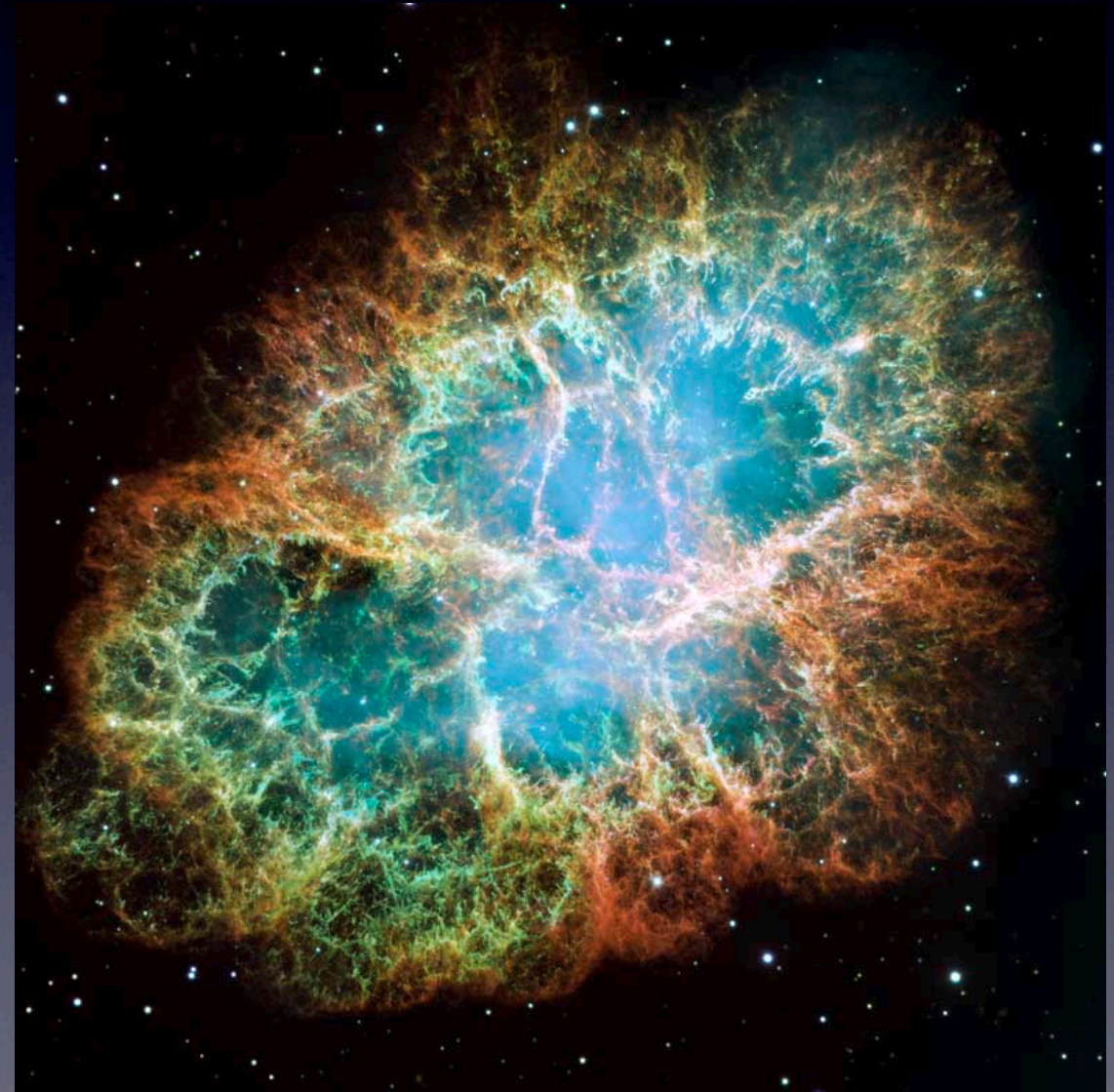
- 約140種の星間分子
 - CH, CN, CO, CS, NO, CS, OH, SO, SiO, SiS
 - H₂O, CCH, HCN, HNC, HCO, HCO⁺, HOC⁺, N₂H⁺, HNO, H₂S, HCS⁺, OCS, SO₂, SiC₂
 - NH₃, H₂CO, HNCO, H₂CS, CCCH, CCCN, CCCO, HNCS
 - CH₂NH, CH₂CO, NH₂CN, C₄H, HCCCN
 - CH₃OH, CH₃CN, NH₂CHO, CH₃SH, CH₃NH₂, CH₃CCH, CH₃CHO, CH₂CHCN, HC₅N
 - HCOOCH₃, CH₃CCCN, CH₃CH₂OH, CH₃OCH₃, CH₃CH₂CN, HC₇H, HC₉H, HC₁₁N, etc.
- 炭素鎖分子
- 大型有機分子 → 生命の起源？



Orion-KL 3 mm帯のスペクトル

超新星爆発

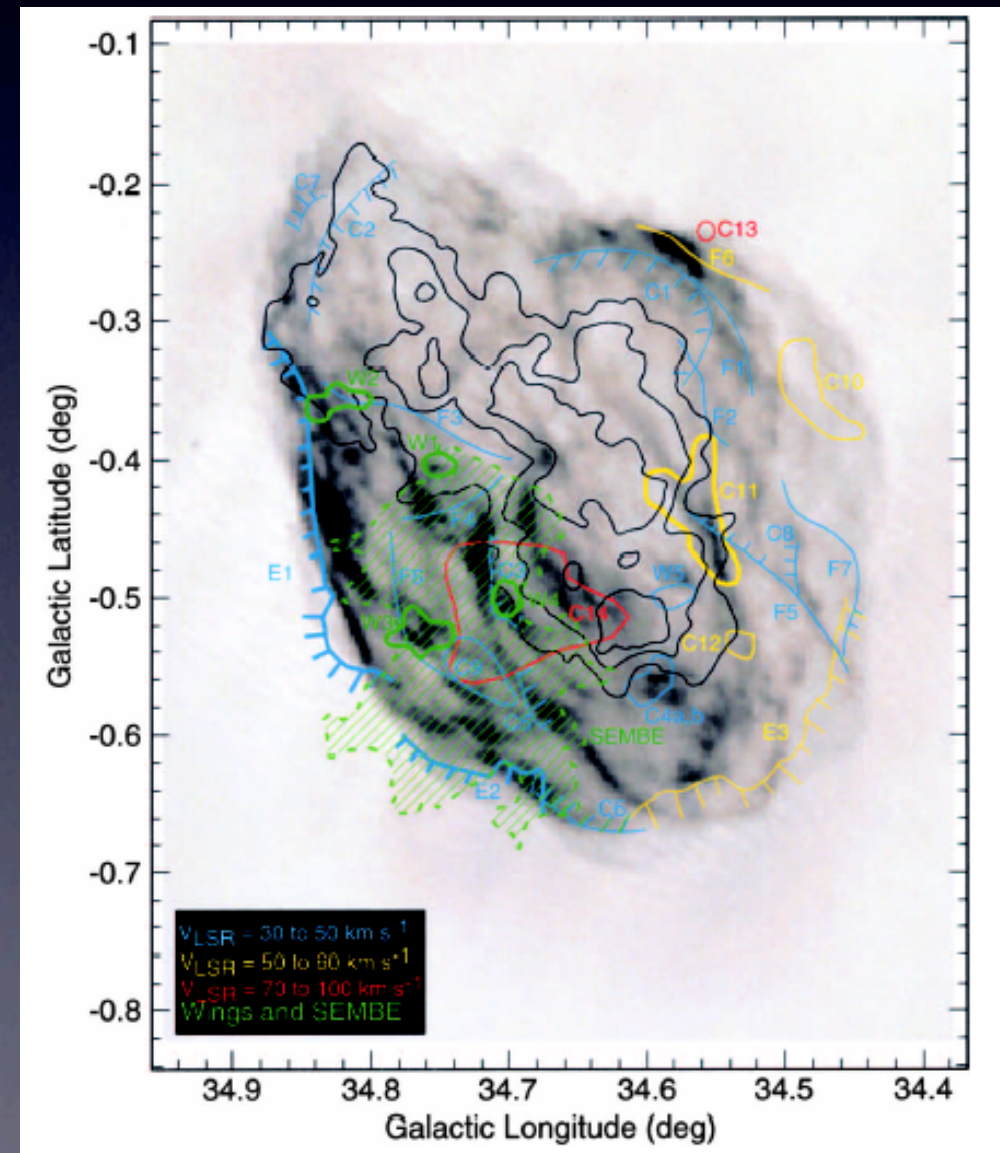
- 最期の大爆発
 - エネルギー $\sim 10^{51}$ erg
- 星間物質に多大な影響
 - 解離・電離
 - 圧縮・加熱・加速
 - 粒子加速
 - γ 線放射
 - 宇宙線の起源
- 超新星残骸 / 分子雲相互作用



© NASA, ESA, Hester & Loll (Arizona State Univ.)

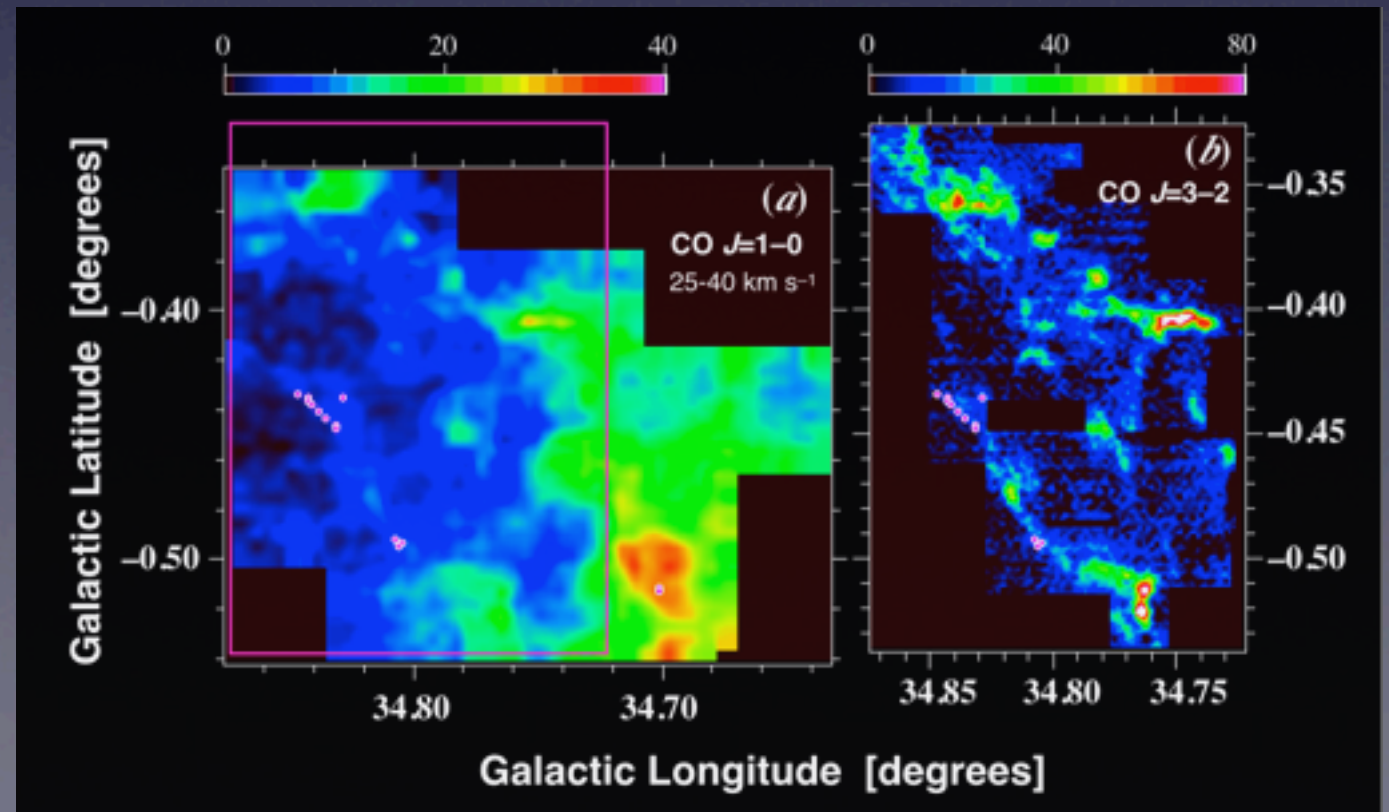
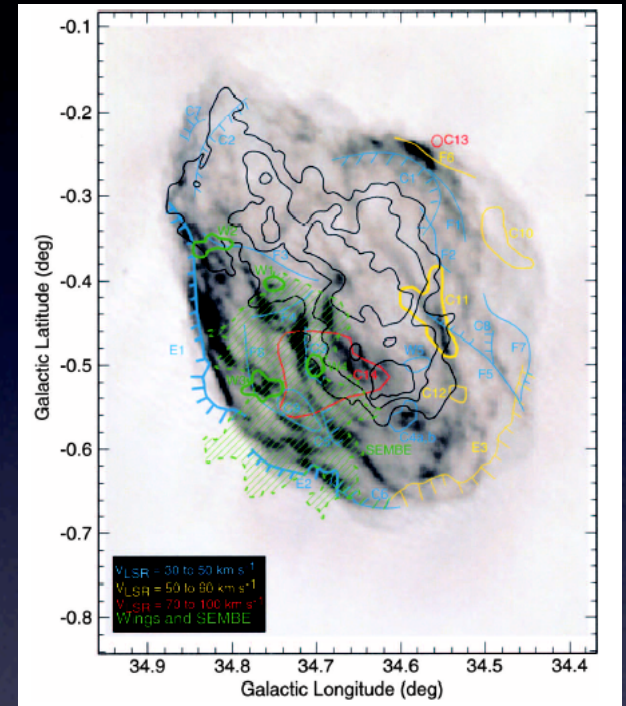
超新星残骸/分子雲相互作用

- 超新星残骸W44
 - 混合形態型 (mixed-morphology)
 - 電波でshell-type
 - X線でcenter-filled
 - 電波パルサーが付随
 - γ 線放射
- 巨大分子雲と相互作用
 - 高速度wing
 - OH 1720 MHzメーザー



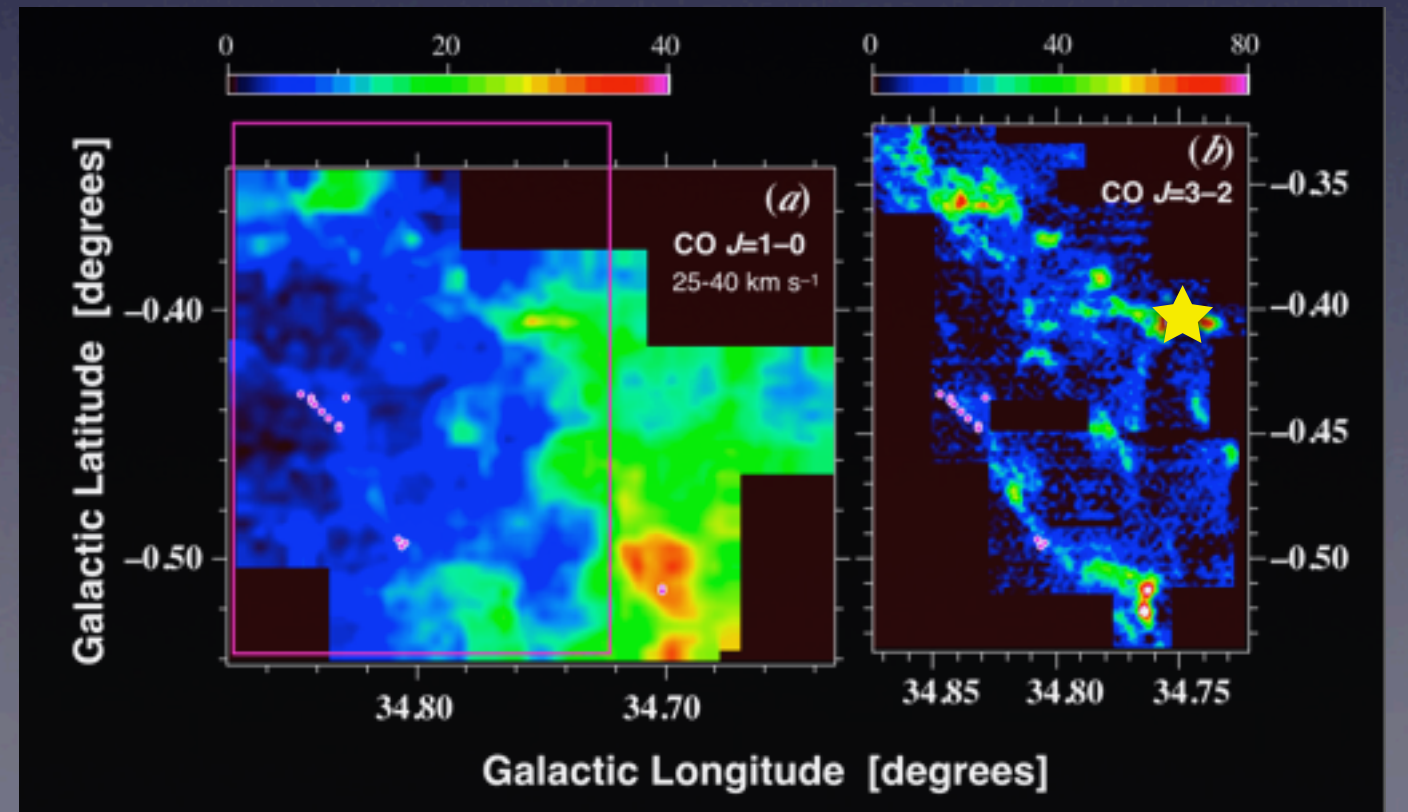
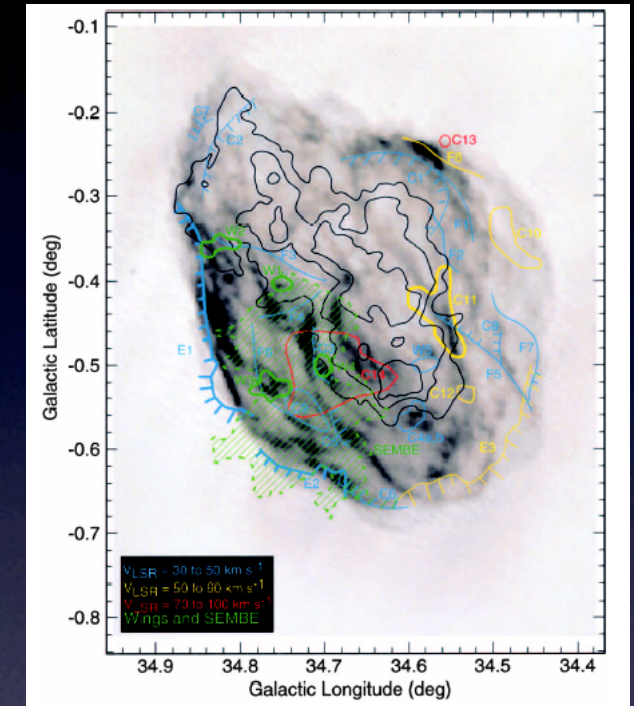
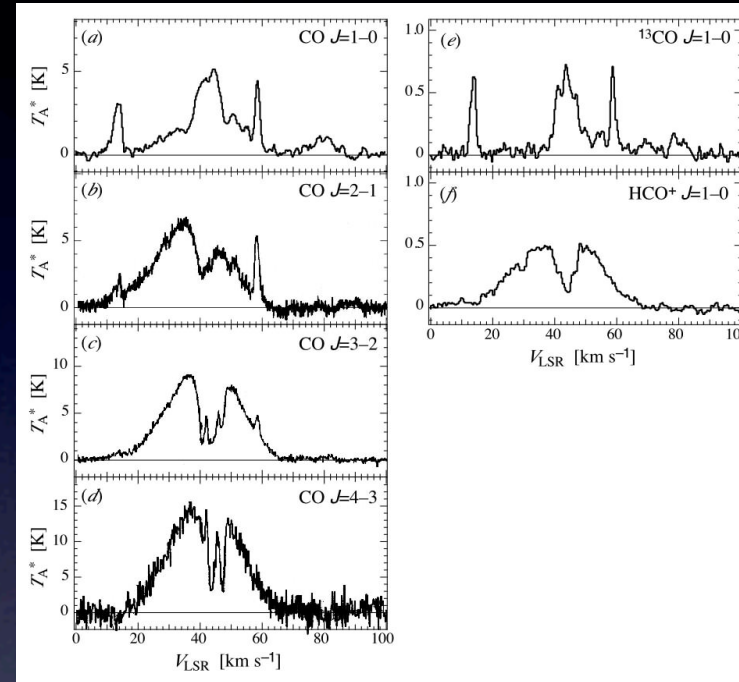
超新星残骸/分子雲相互作用

- 超新星残骸W44
 - 混合形態型 (mixed-morphology)
 - 電波でshell-type
 - X線でcenter-filled
 - 電波パルサーが付随
 - γ 線放射
- 巨大分子雲と相互作用
 - 高速度wing
 - OH 1720 MHzメーザー



超新星残骸/分子雲相互作用

- 超新星残骸W44
 - 混合形態型 (mixed-morphology)
 - 電波でshell-type
 - X線でcenter-filled
 - 電波パルサーが付随
 - γ 線放射
- 巨大分子雲と相互作用
 - 高速度wing
 - OH 1720 MHzメーザー

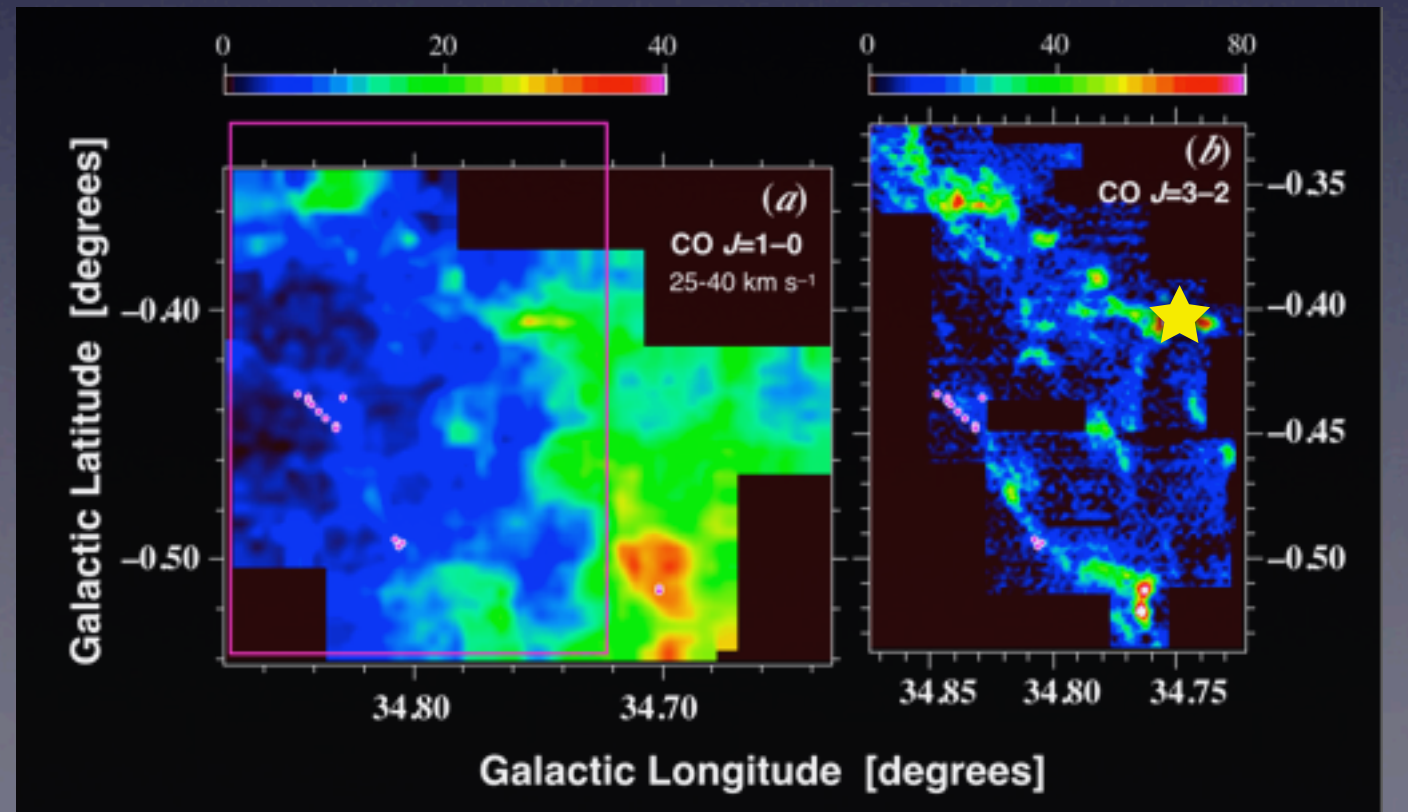
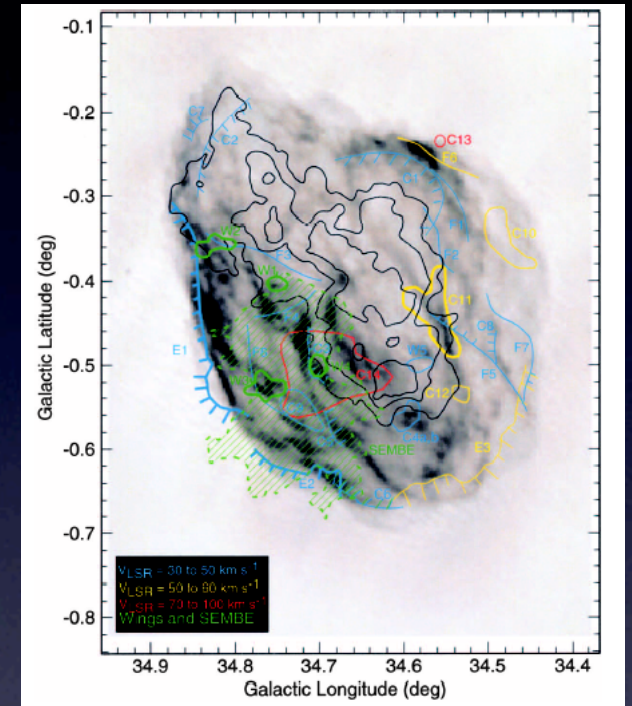
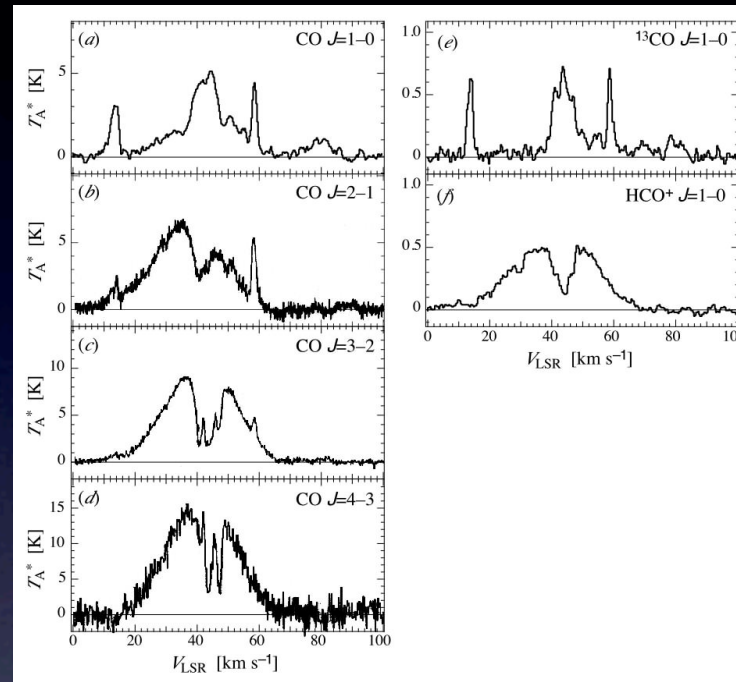


超新星残骸/分子雲相互作用

- 超新星残骸W44

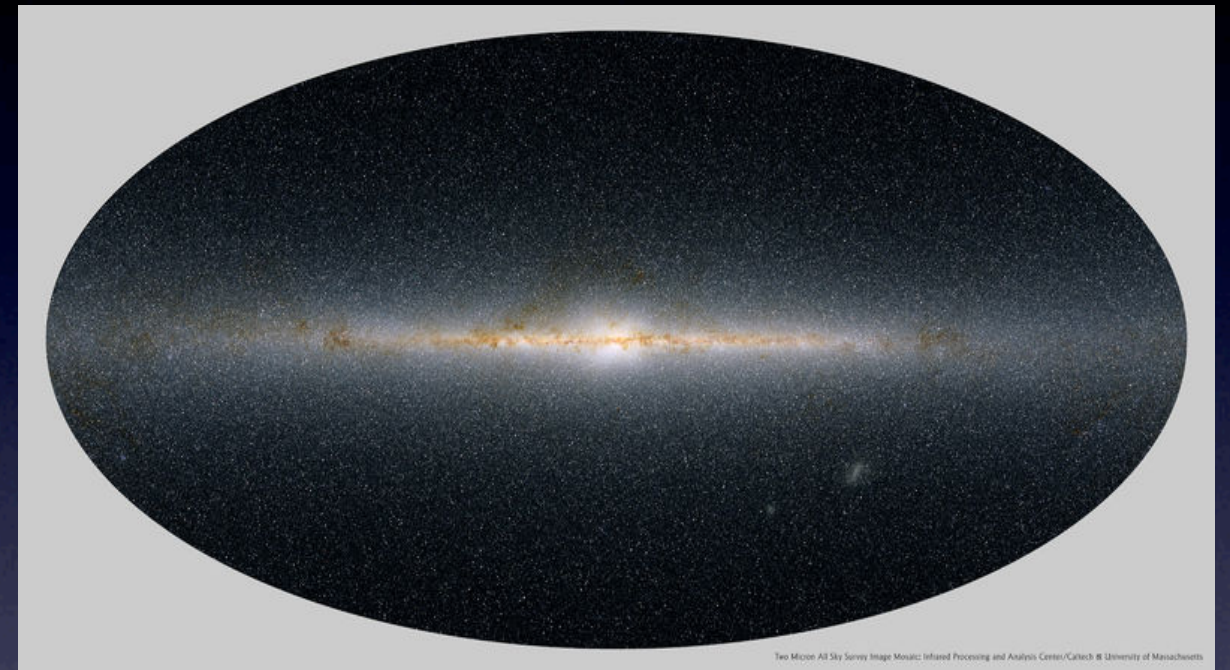


指田朝郎 (慶應義塾大学)



銀河系構造

- 銀河系回転
- 渦状腕の存在
- 棒状構造の存在
- 中心領域の特異性



Two Micron All Sky Survey Image Montage Infrared Processing and Analysis Center/Carnegie Mellon University of Massachusetts

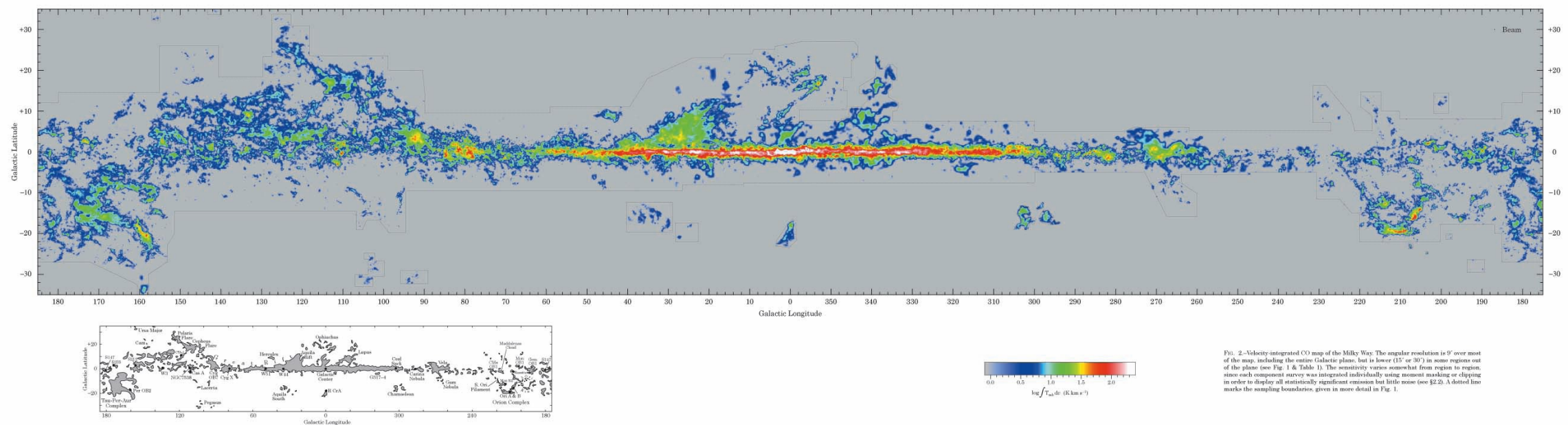


FIG. 2—Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is 9' over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower (15' or 30') in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment masking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.2). A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in Fig. 1.

銀河系構造

- 銀河系回転
- 渦状腕の存在
- 棒状構造の存在
- 中心領域の特異性

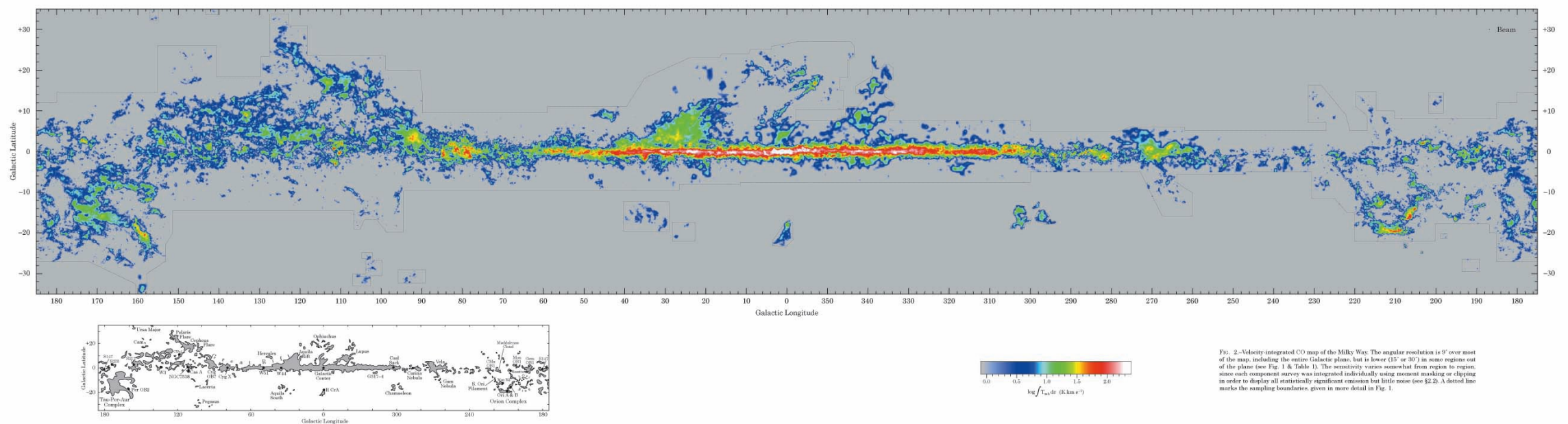
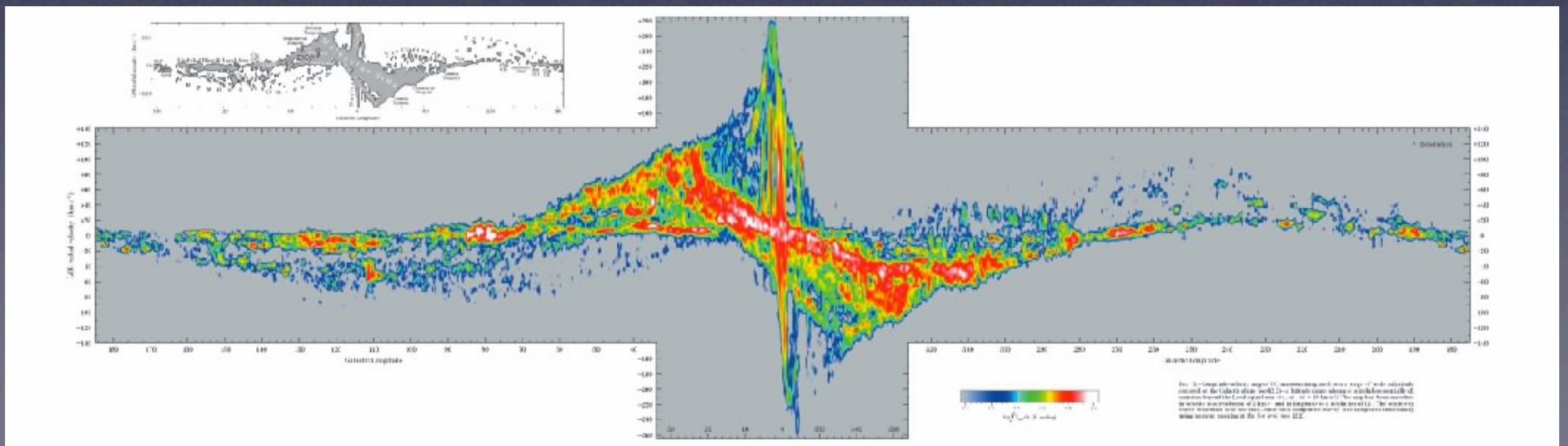


FIG. 2—Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is $9'$ over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower ($15'$ or $30'$) in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment masking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.2). A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in Fig. 1.

銀河系構造

- 銀河系回転
- 渦状腕の存在
- 棒状構造の存在
- 中心領域の特異性



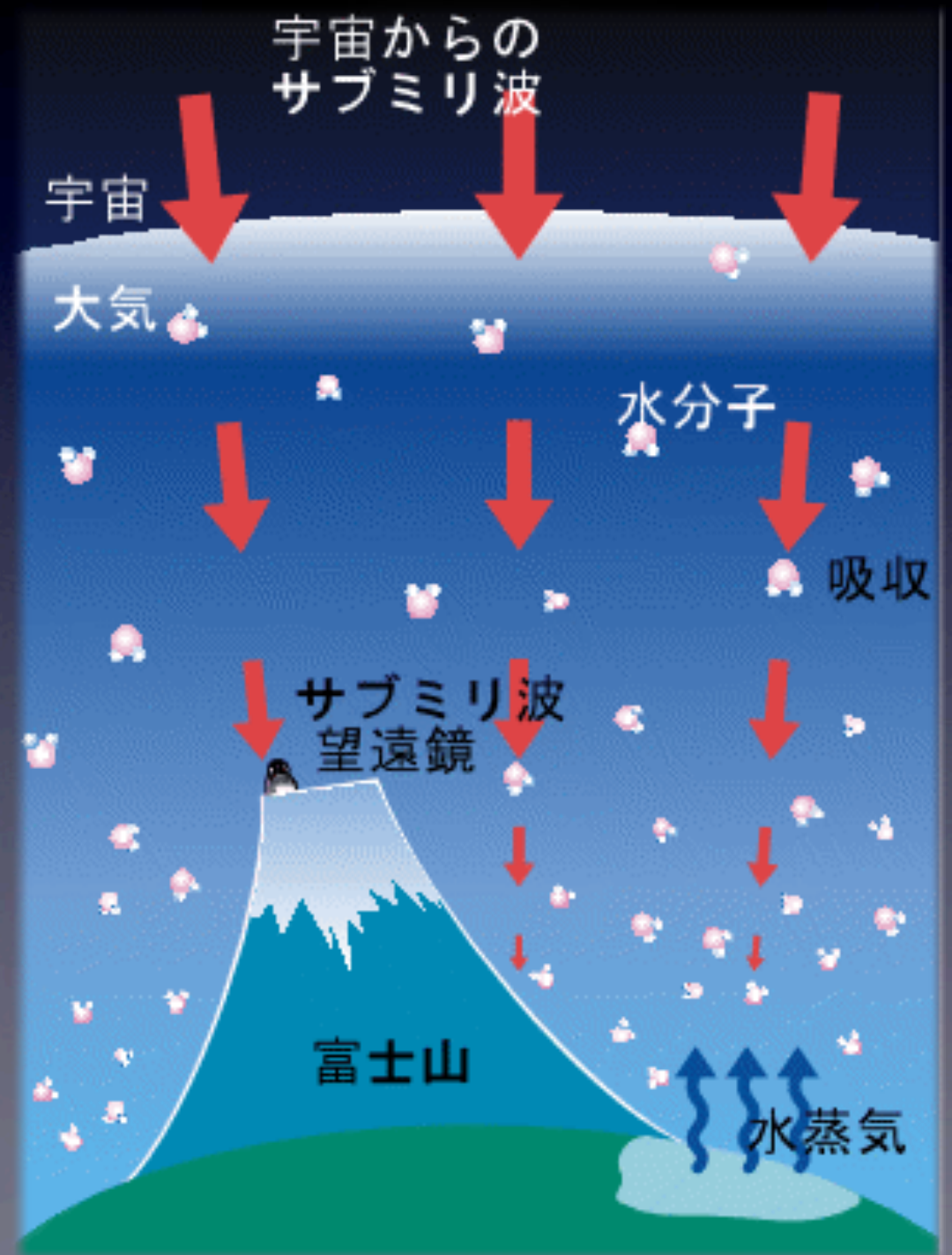
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - 3P_1 - 3P_0 : 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich領域



星間分子雲の前駆体

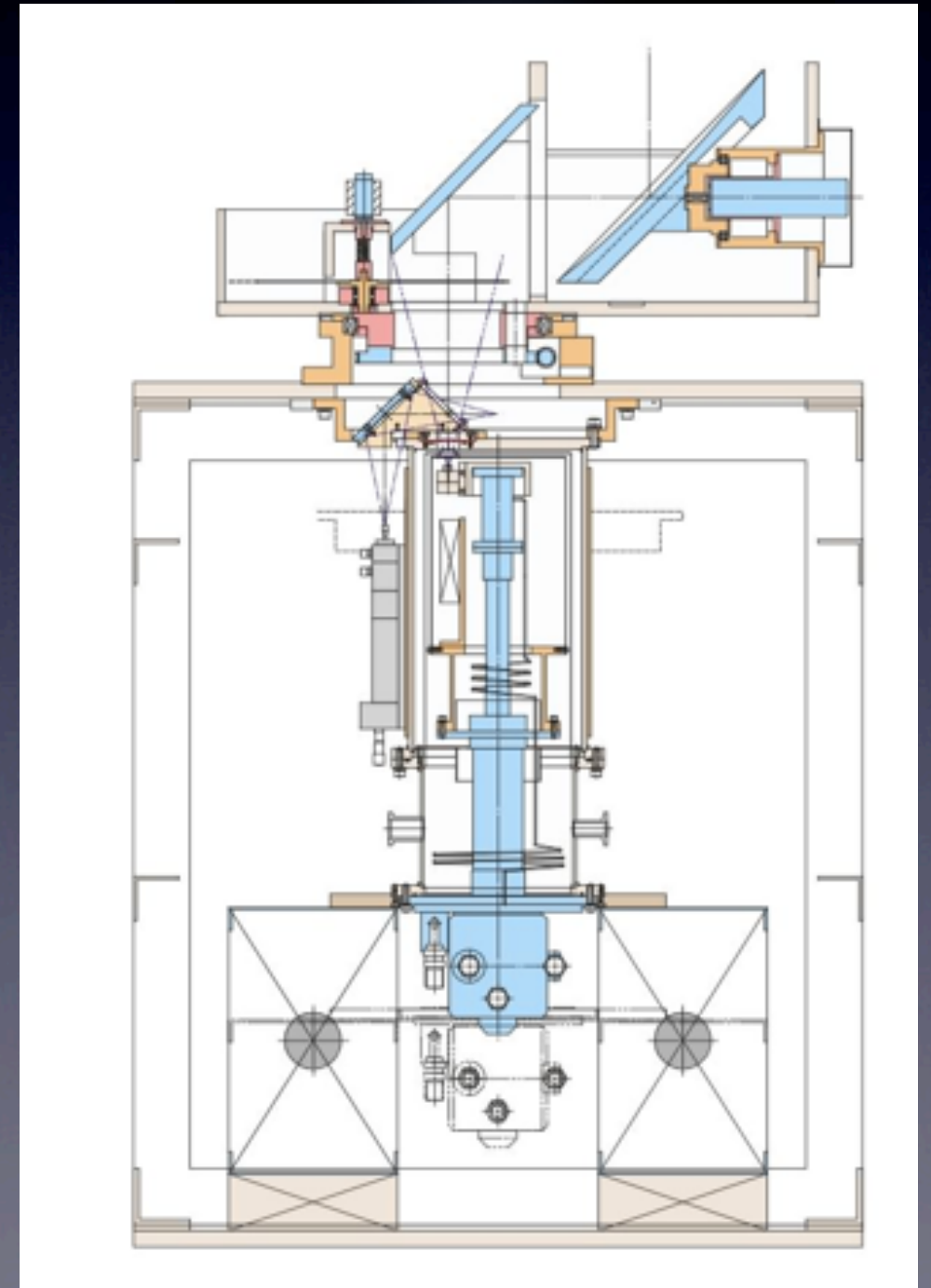
- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域



星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域

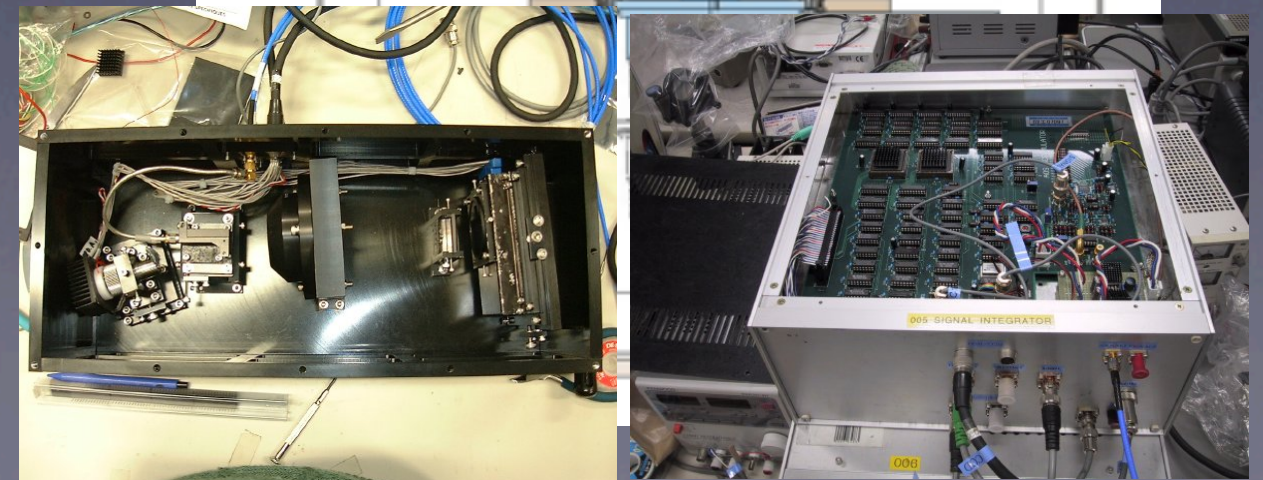
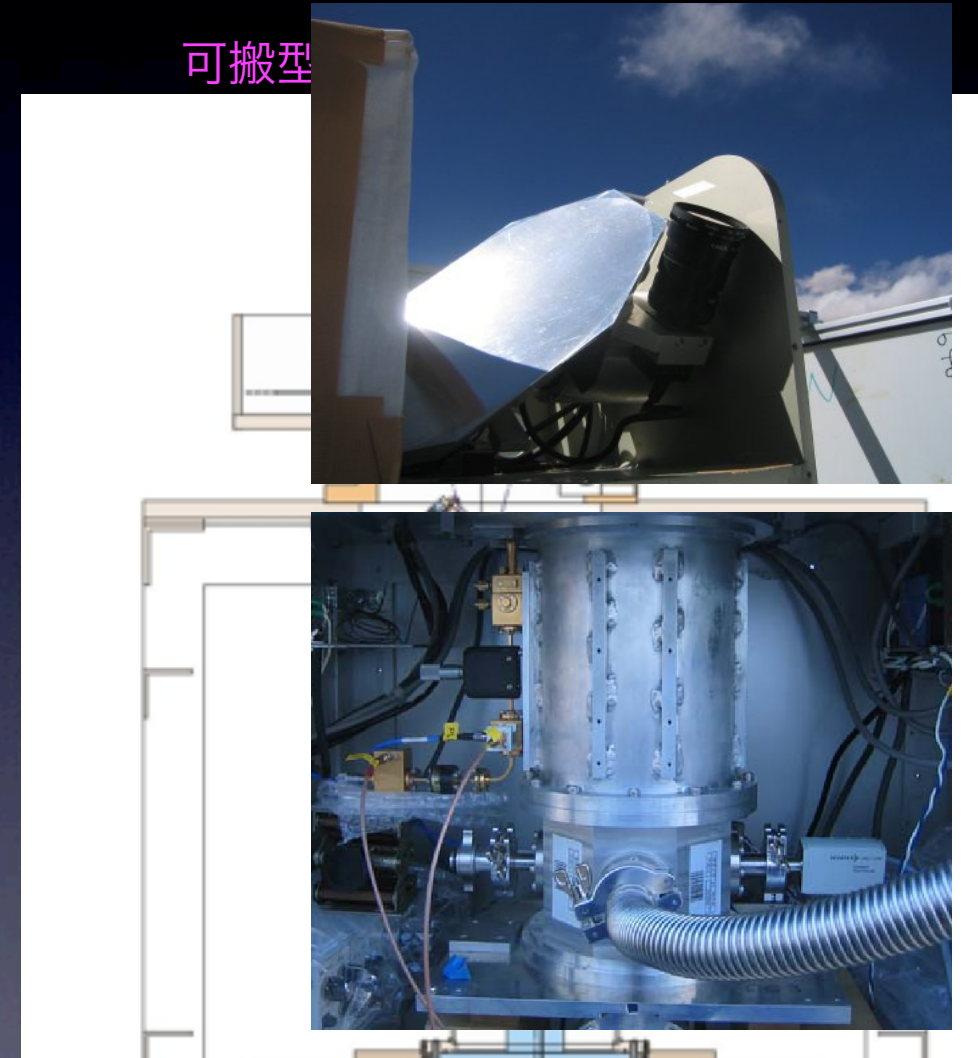
可搬型18cmサブミリ波望遠鏡



星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域

可搬型



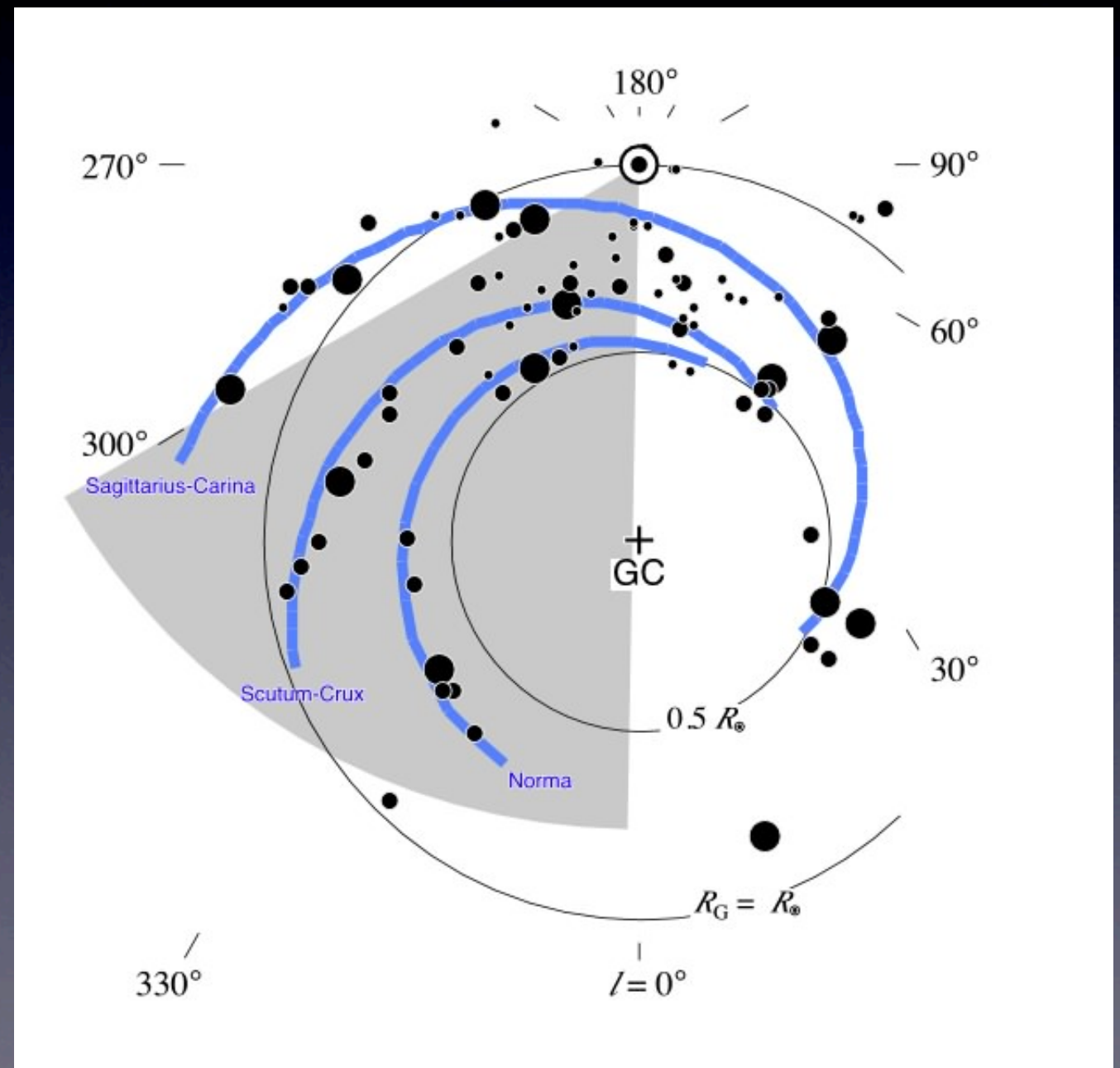
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域



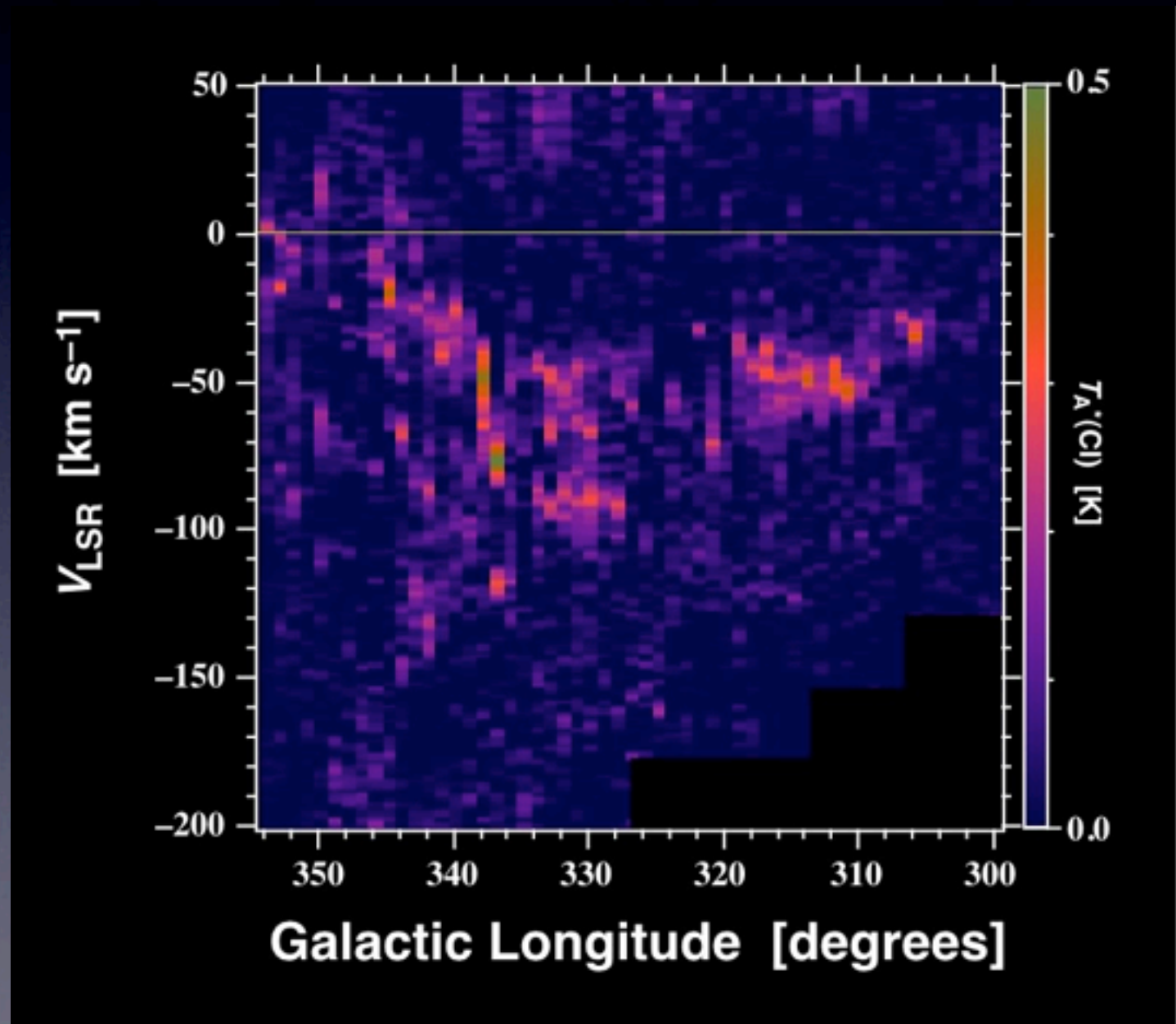
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域



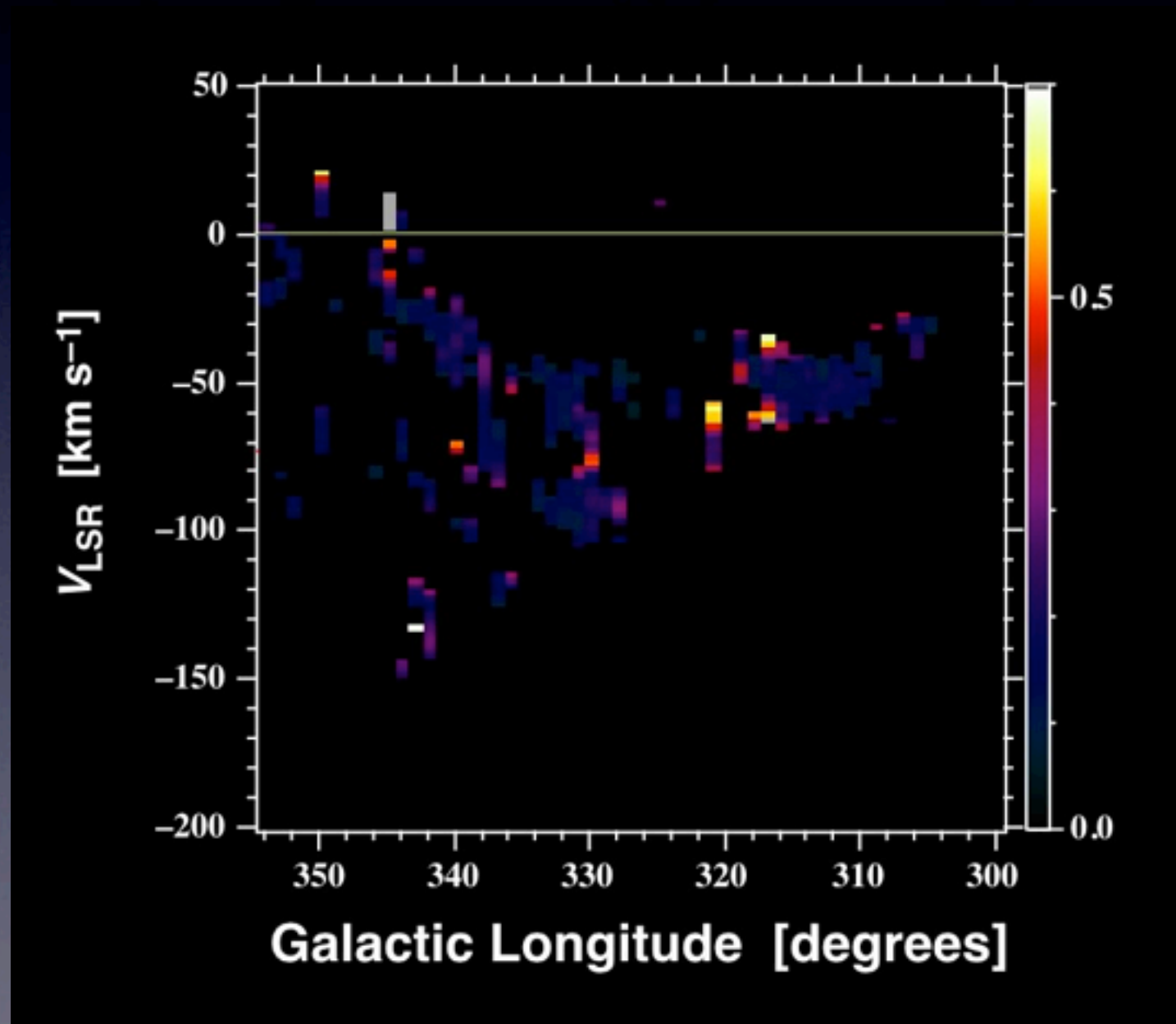
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich領域



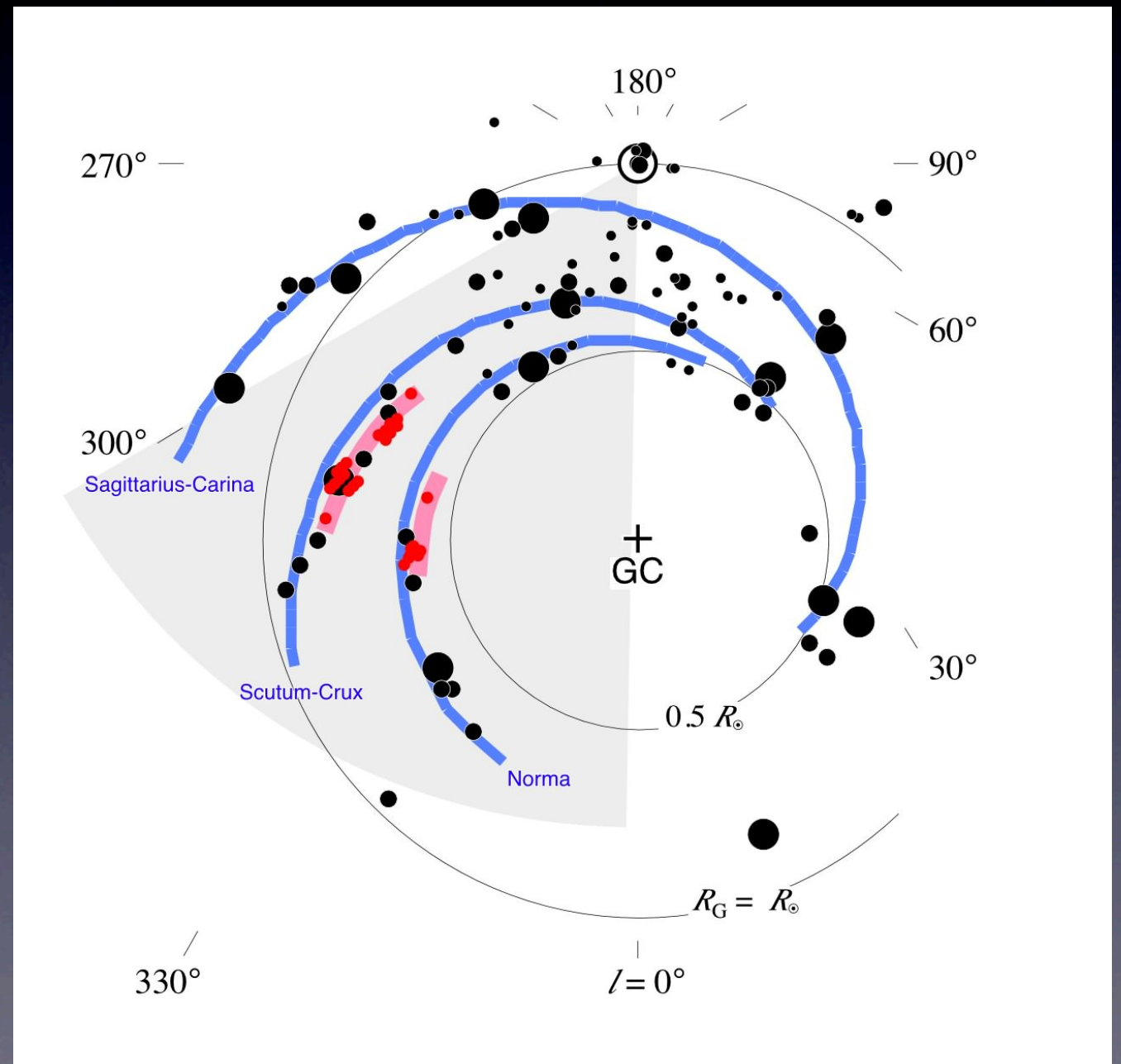
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich領域



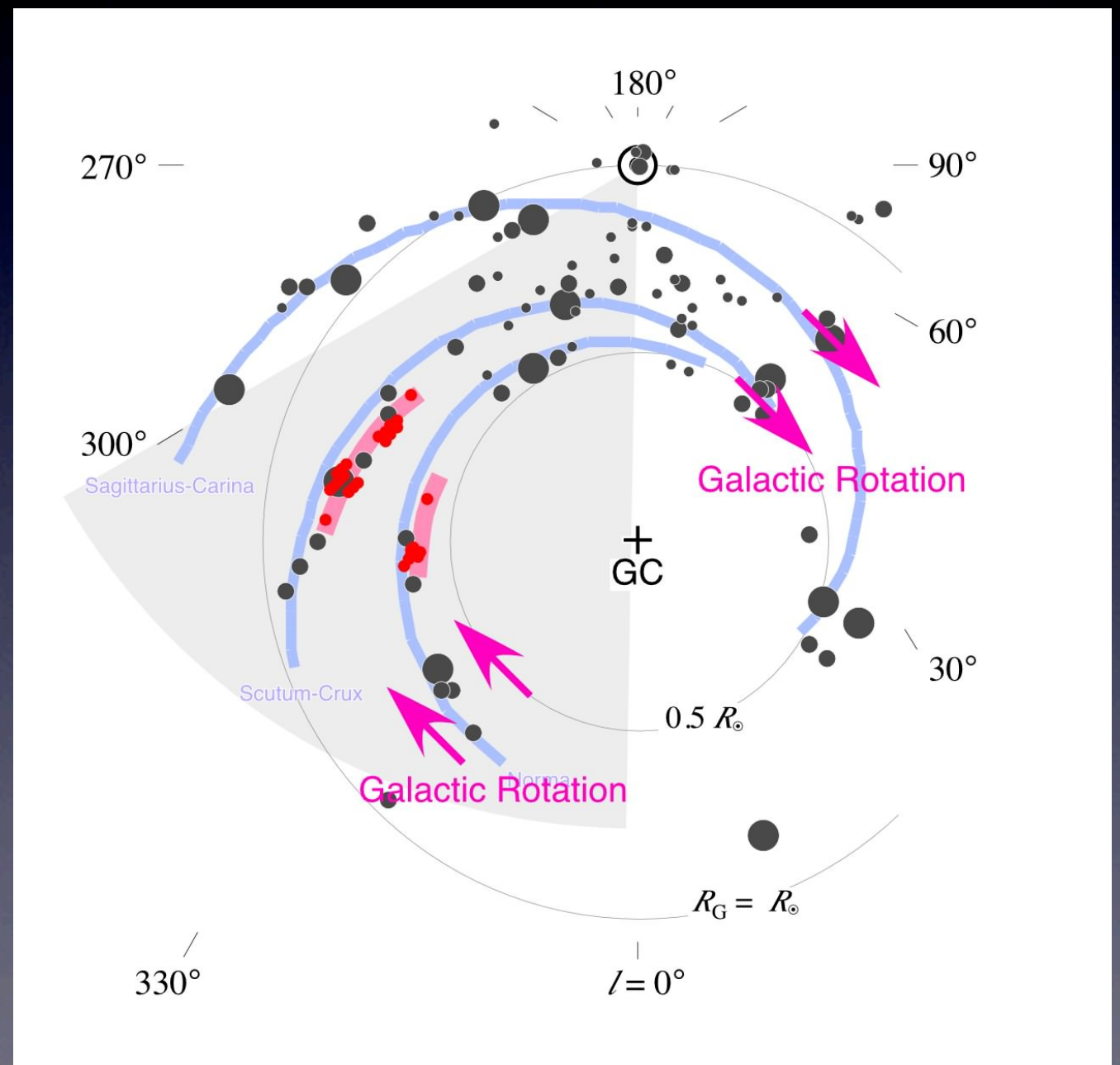
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域



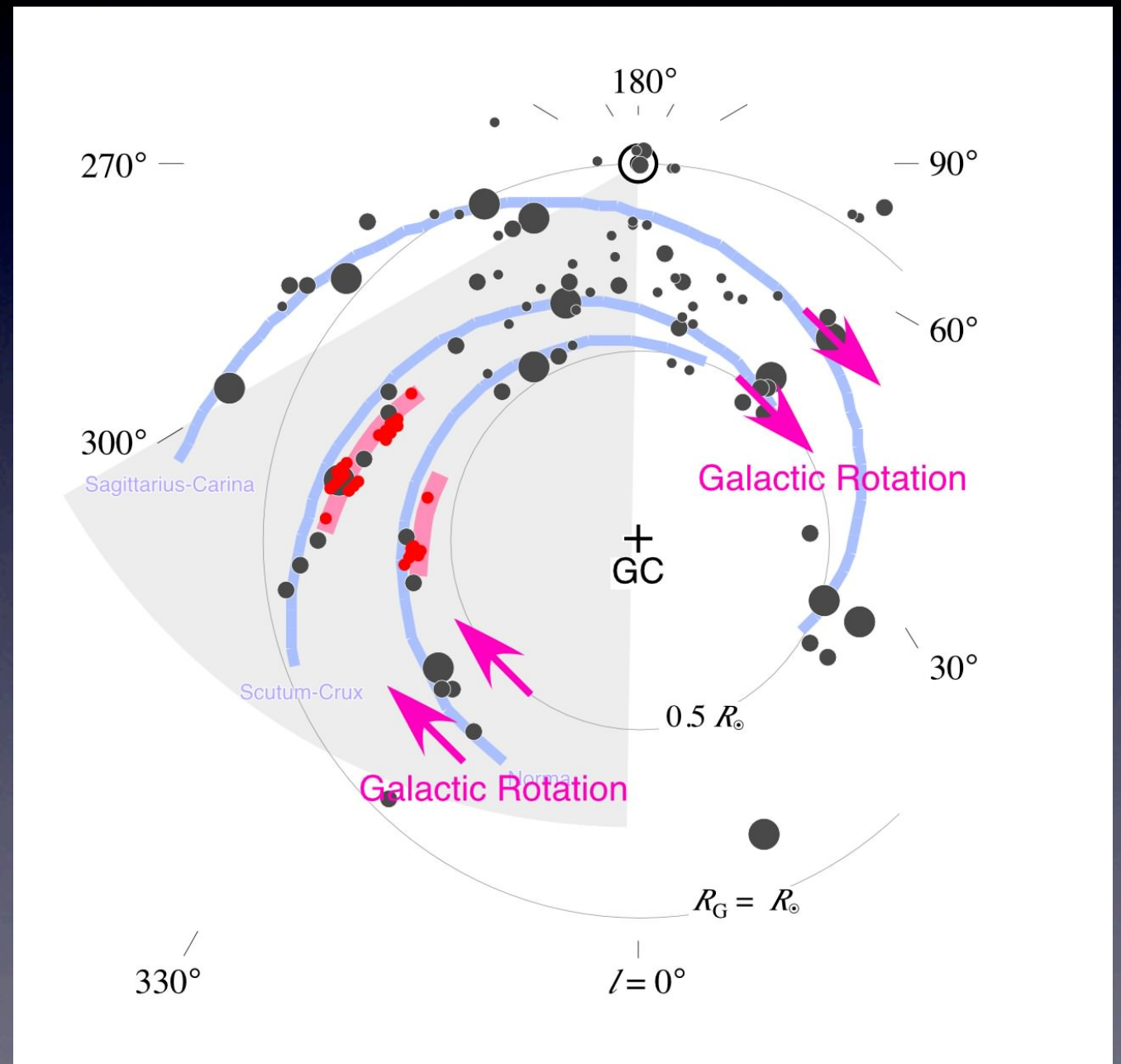
星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich領域



星間分子雲の前駆体

- 渦状腕における相変化
 - 原子雲 → 分子雲 → 星形成
 - $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$
 - $\text{C}^+ \rightarrow \text{C}^0 \rightarrow \text{CO}$
- C^0 スペクトル線
 - $^3P_1 - ^3P_0$: 492 GHz
 - 化学的に若い分子雲から放射
 - 渦状腕の手前に C^0 -rich 領域

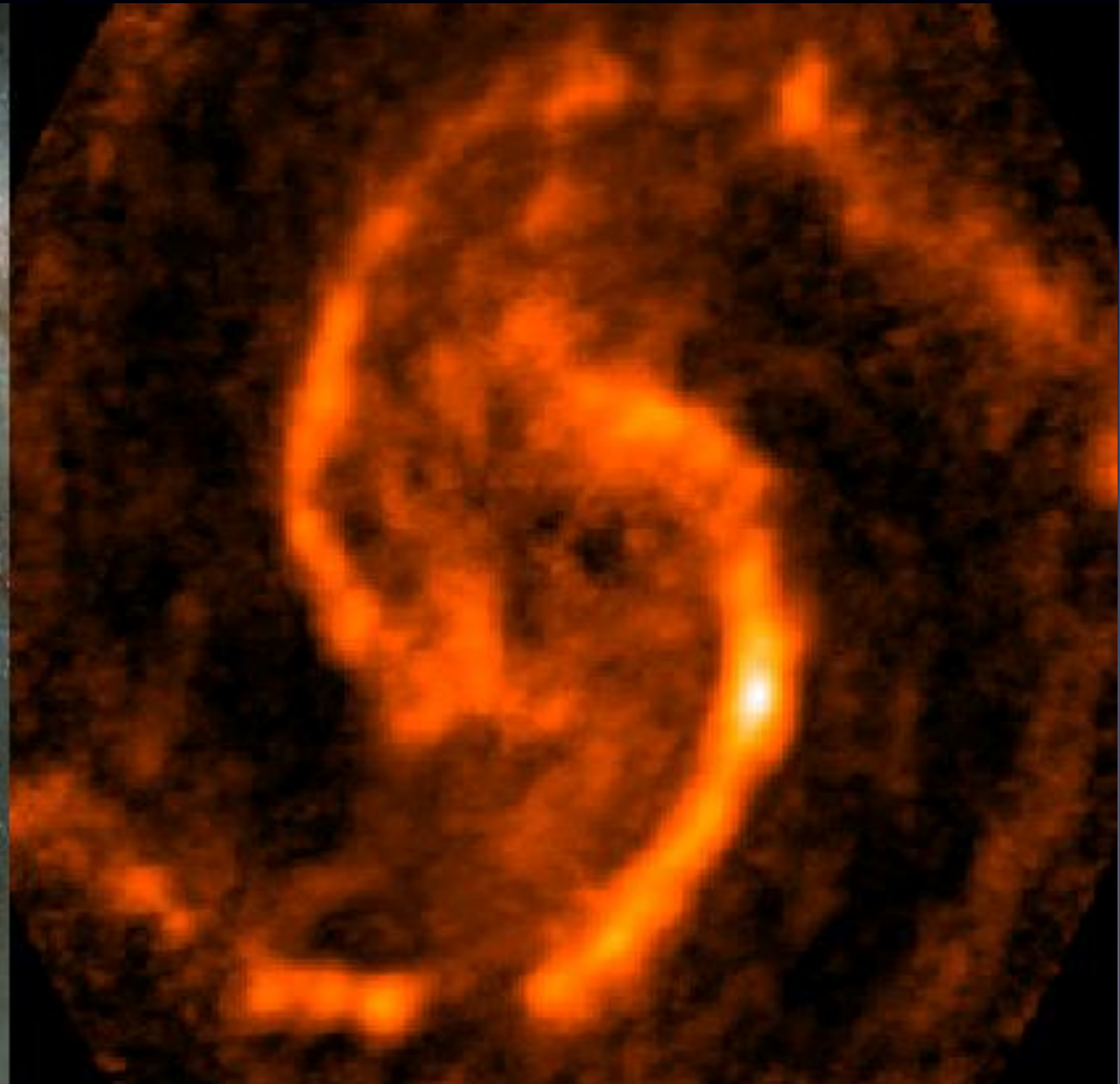


渦状腕との遭遇によるガスの相変化

星間分子雲の前駆体

可視光

電波(CO 115GHz)

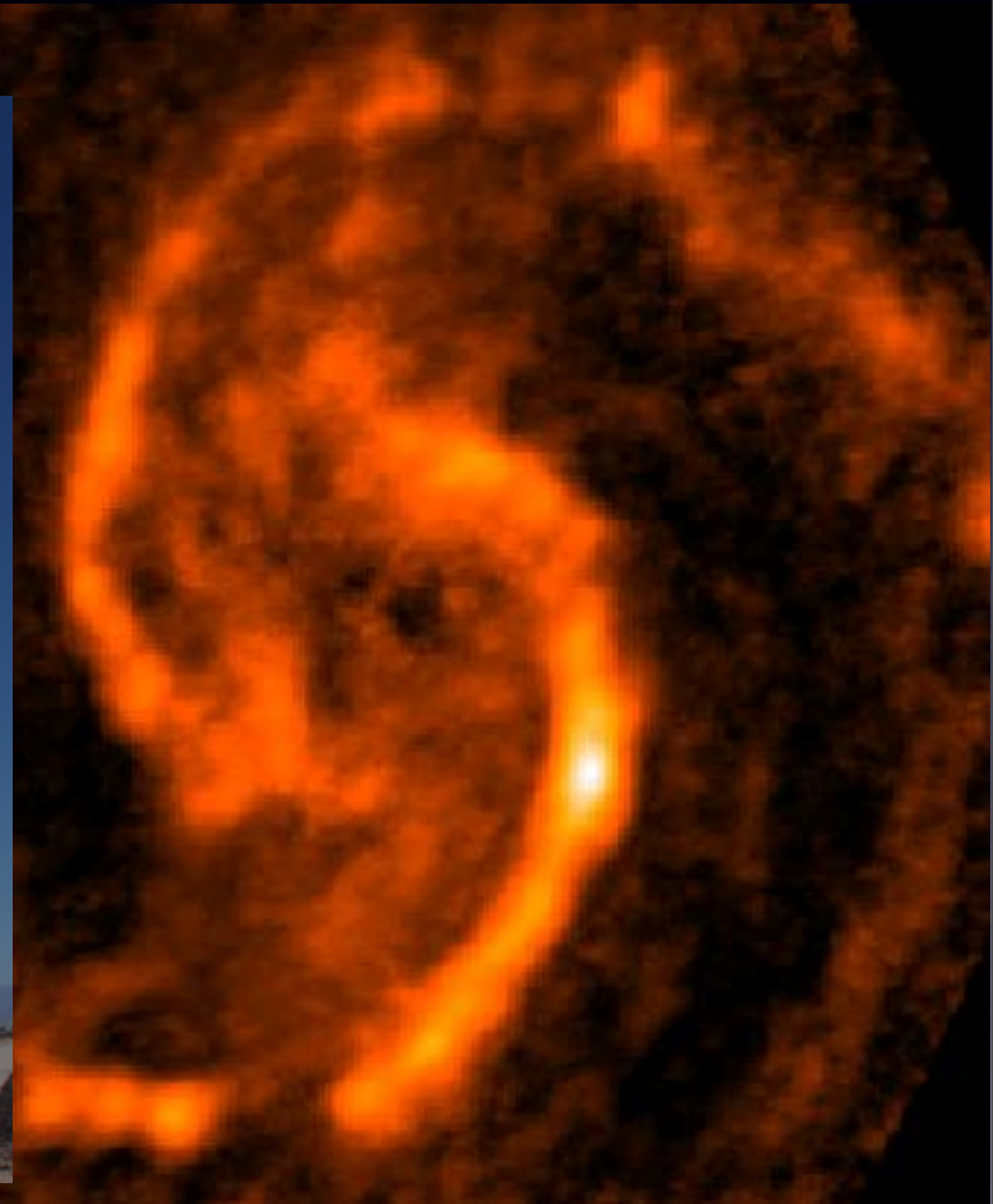


渦状腕との遭遇によるガスの相変化

星間分子雲の前駆体

可視光

電波(CO 115GHz)



ALMAに期待！



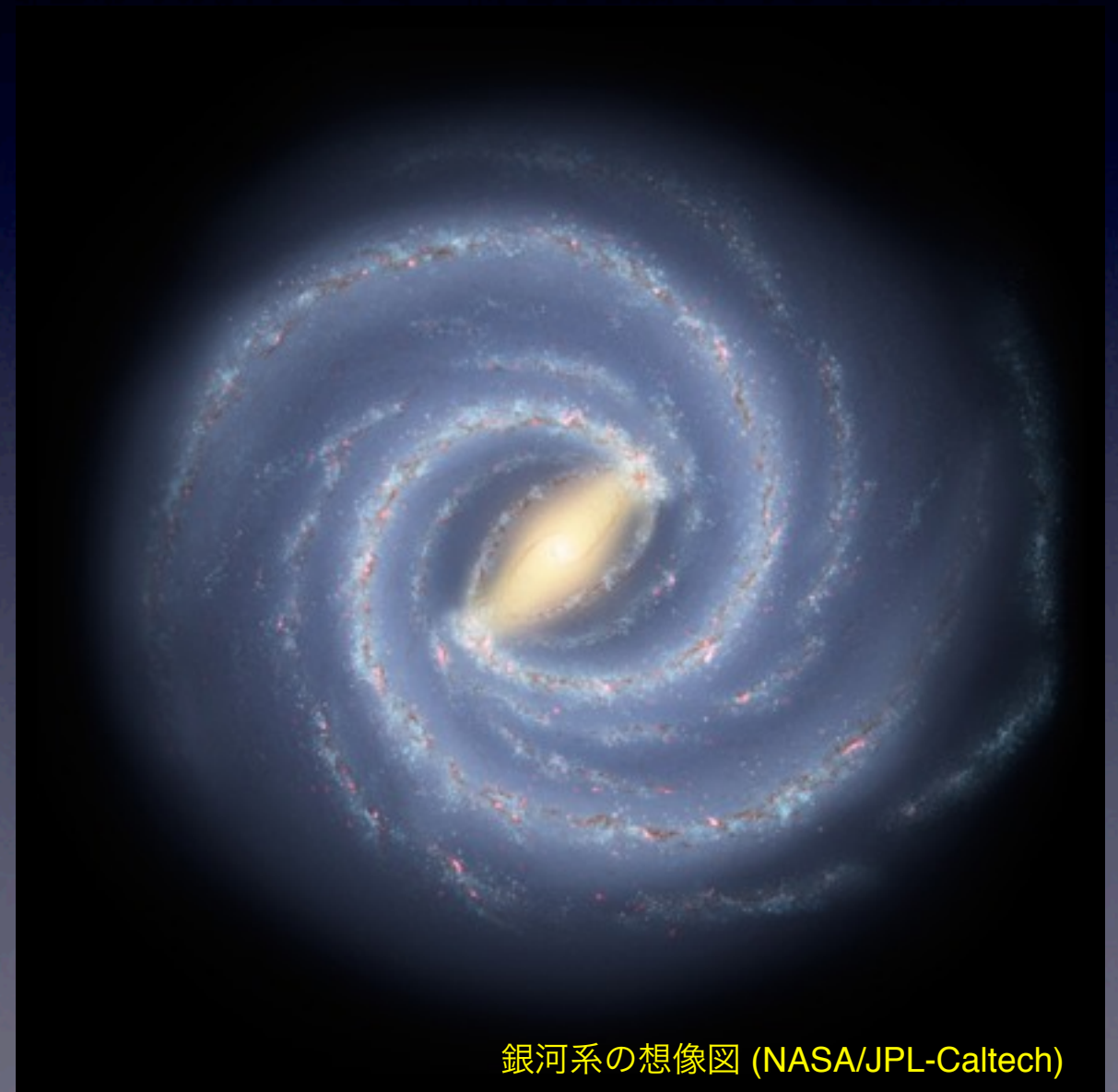
ALMA/NAOJ



そろそろ本題に入りましょうか…

銀河系の中心核

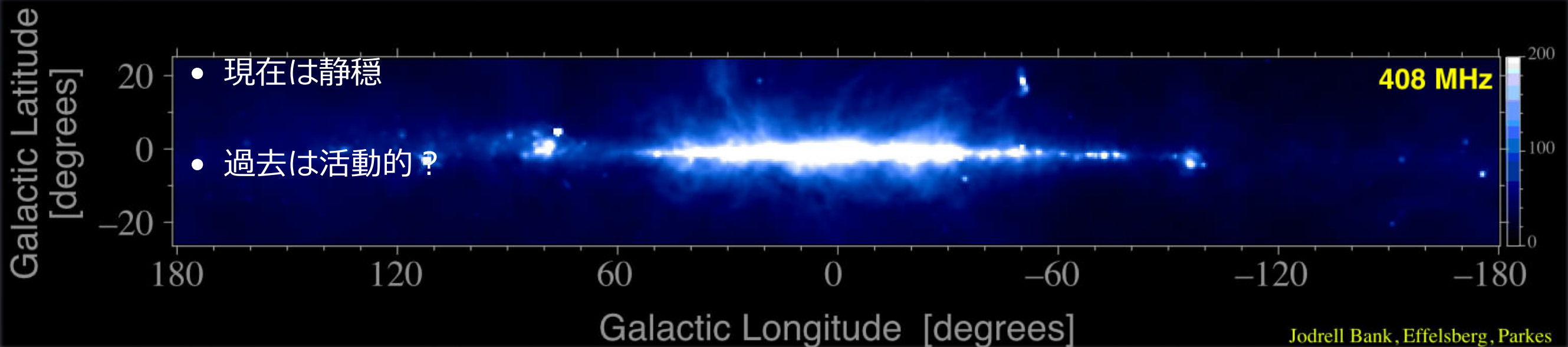
- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量
 - 現在は静穏
 - 過去は活動的？



銀河系の想像図 (NASA/JPL-Caltech)

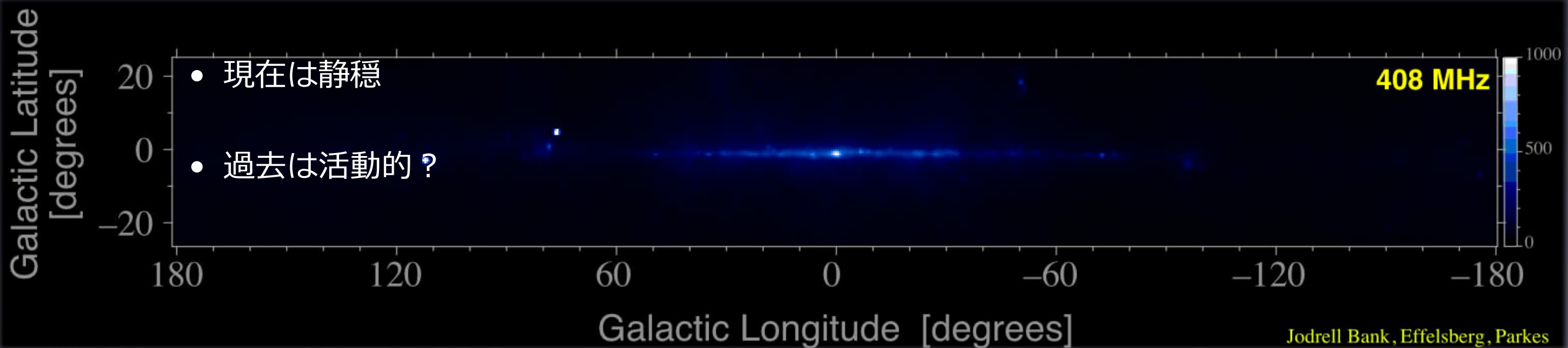
銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



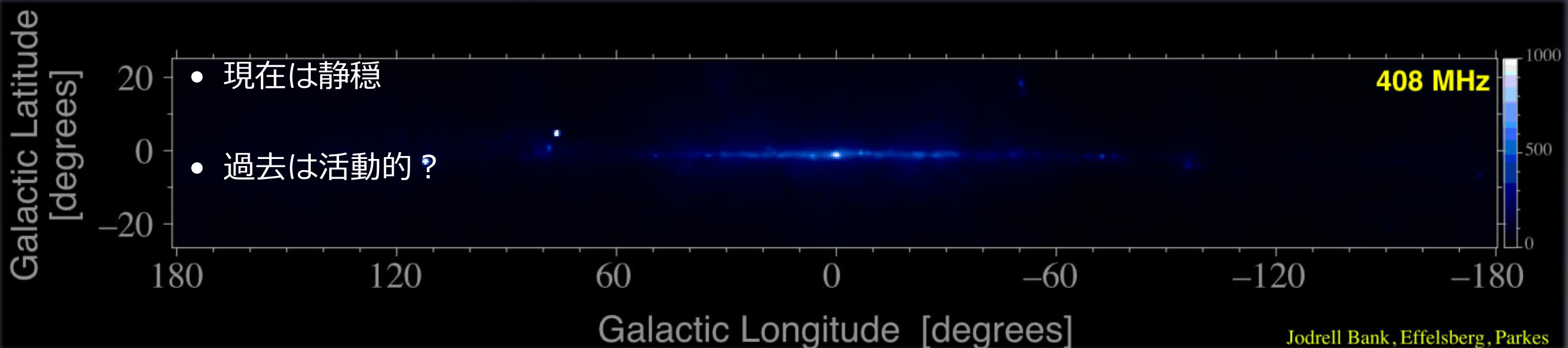
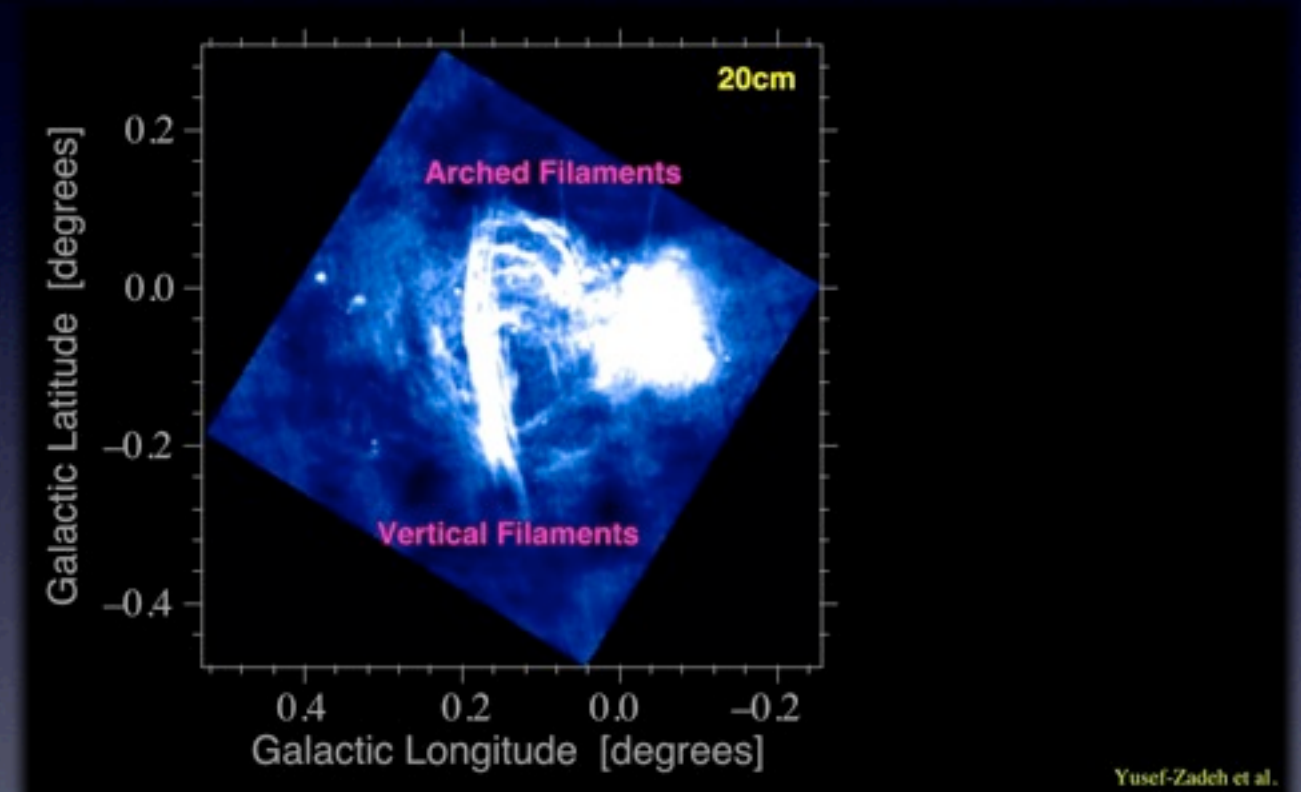
銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



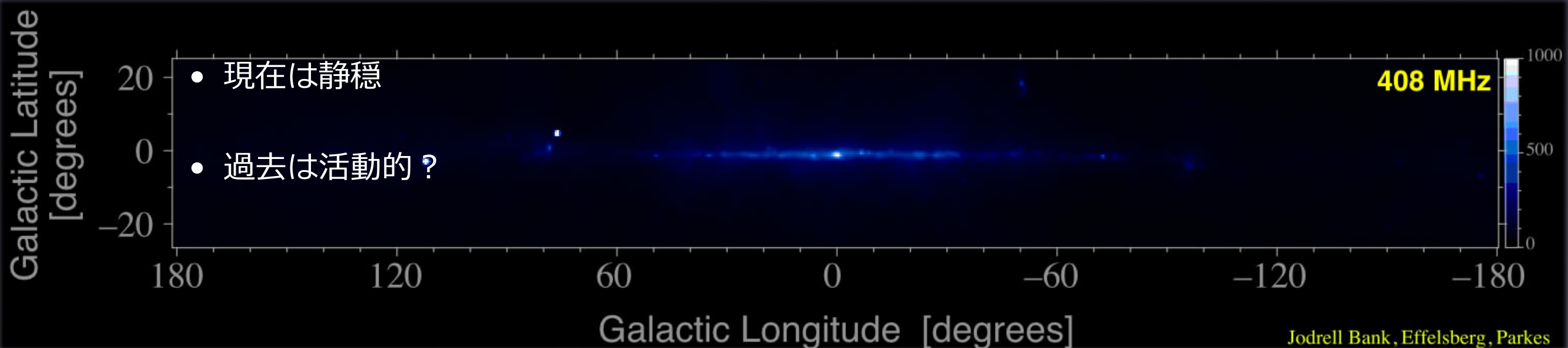
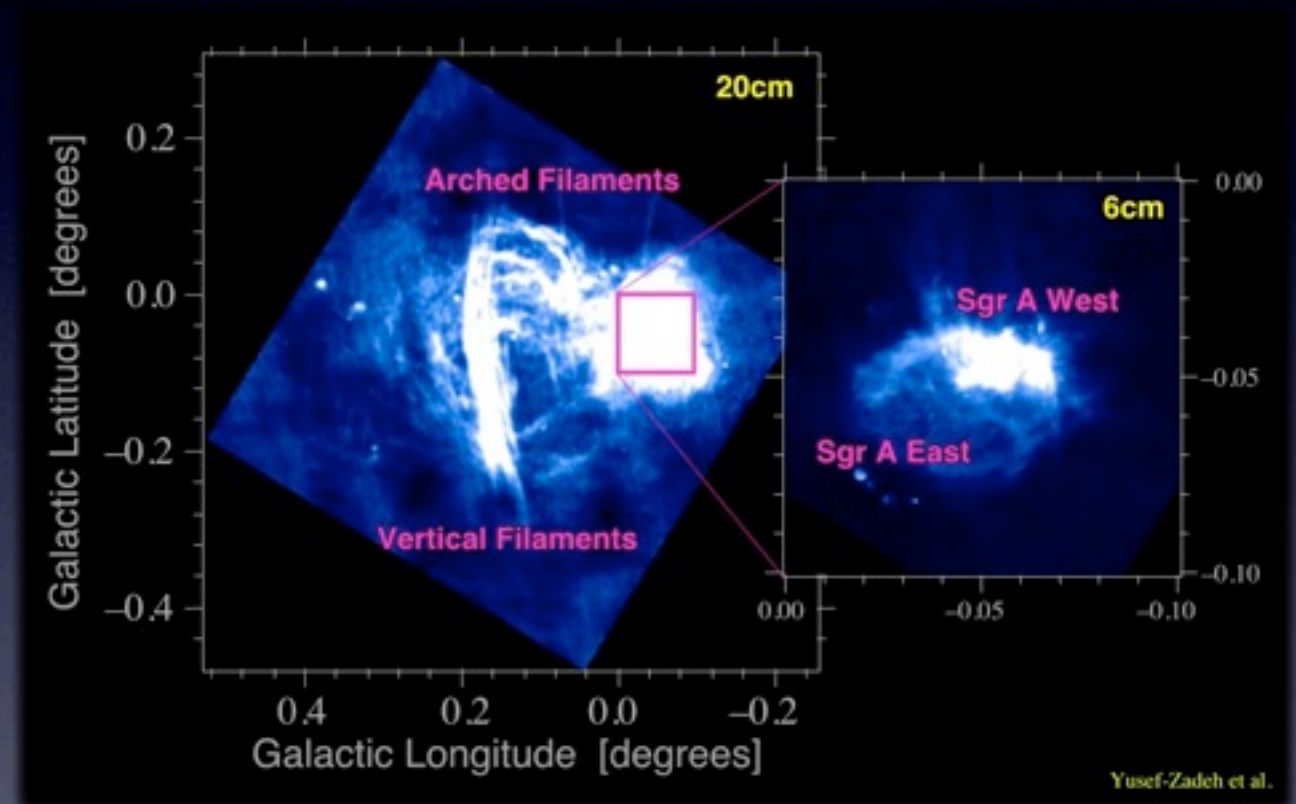
銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



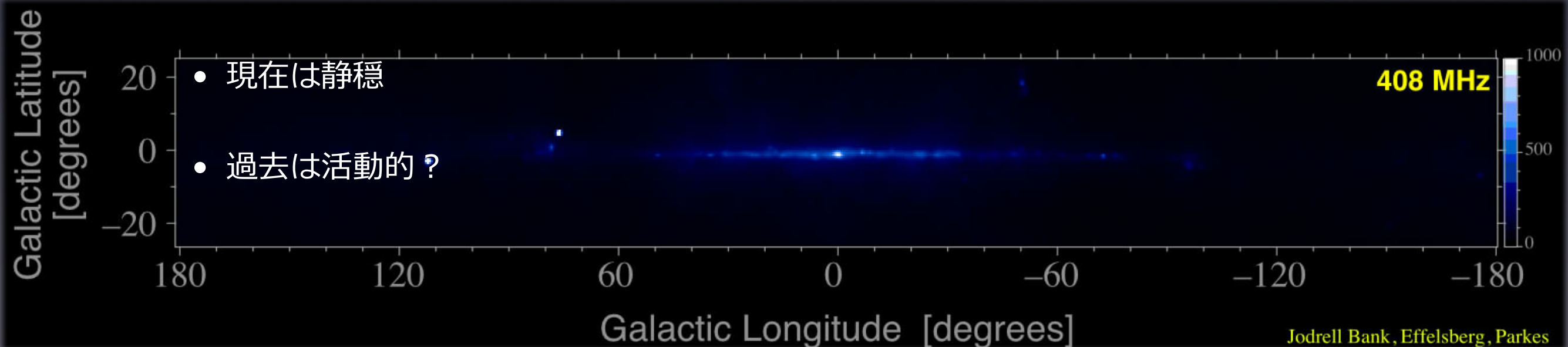
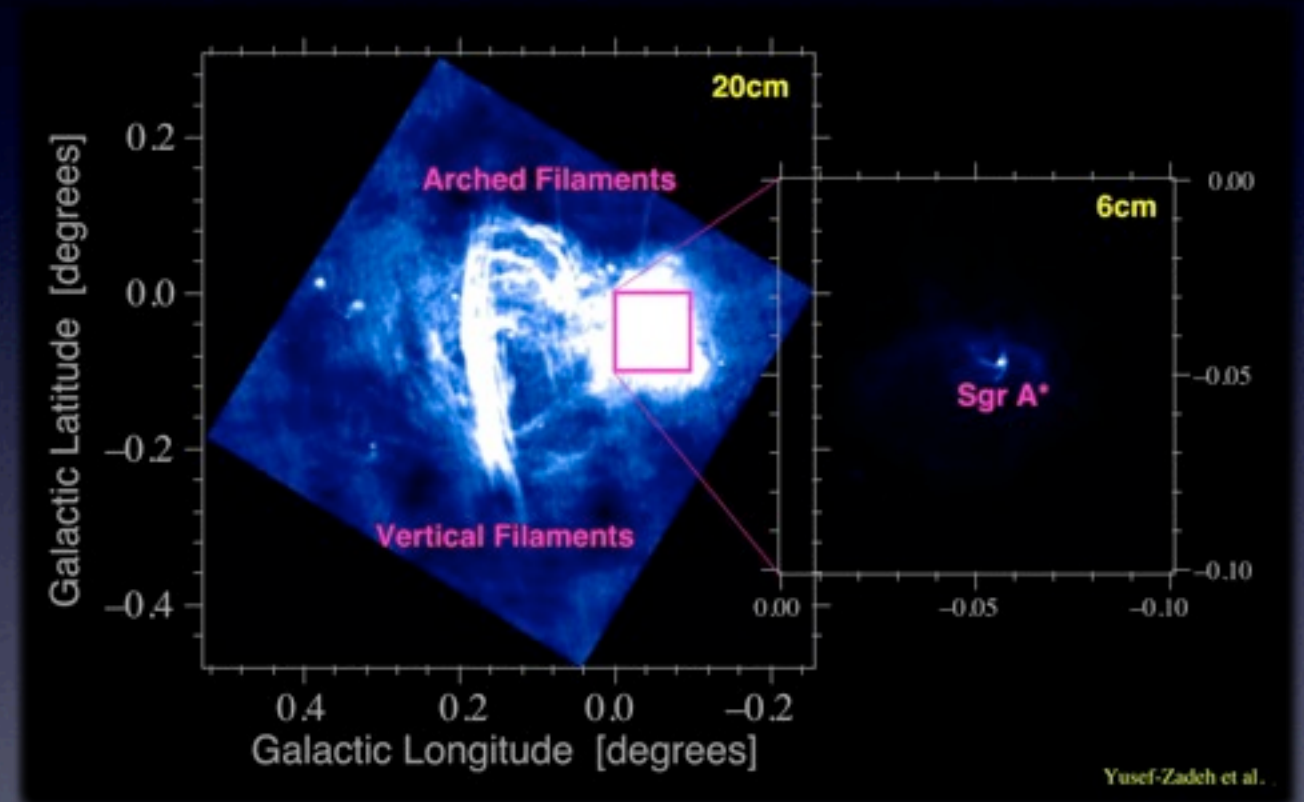
銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



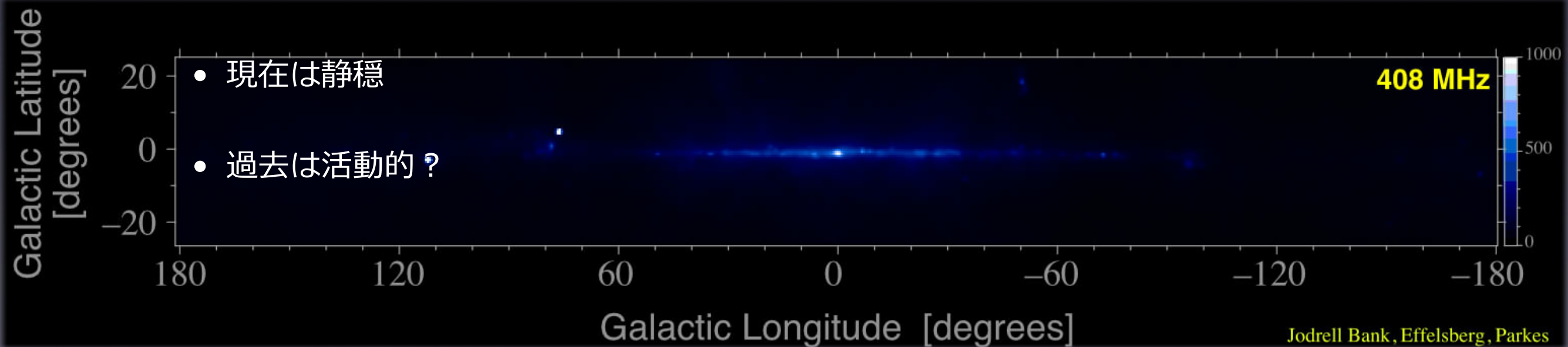
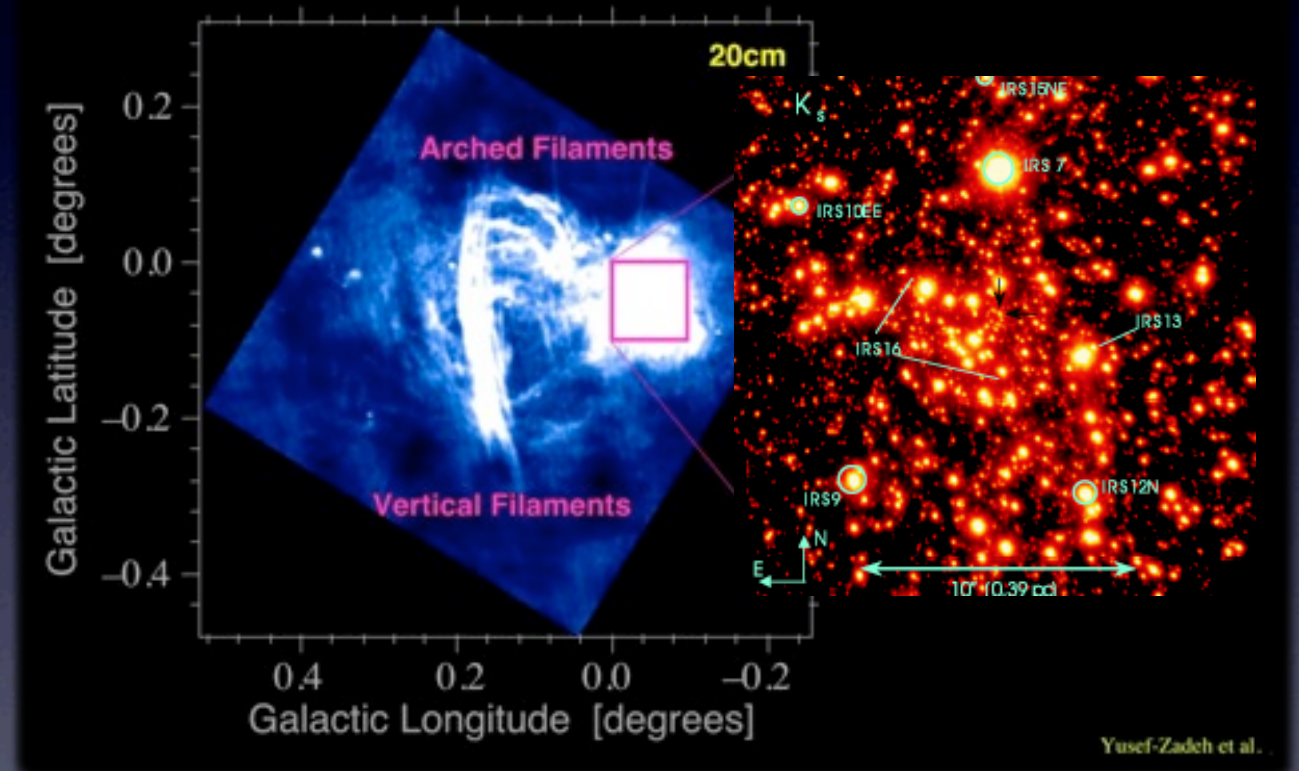
銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



銀河系の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量



銀河中心核

- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/>

銀河中心核

- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



M104

楕円銀河M87 (HST)

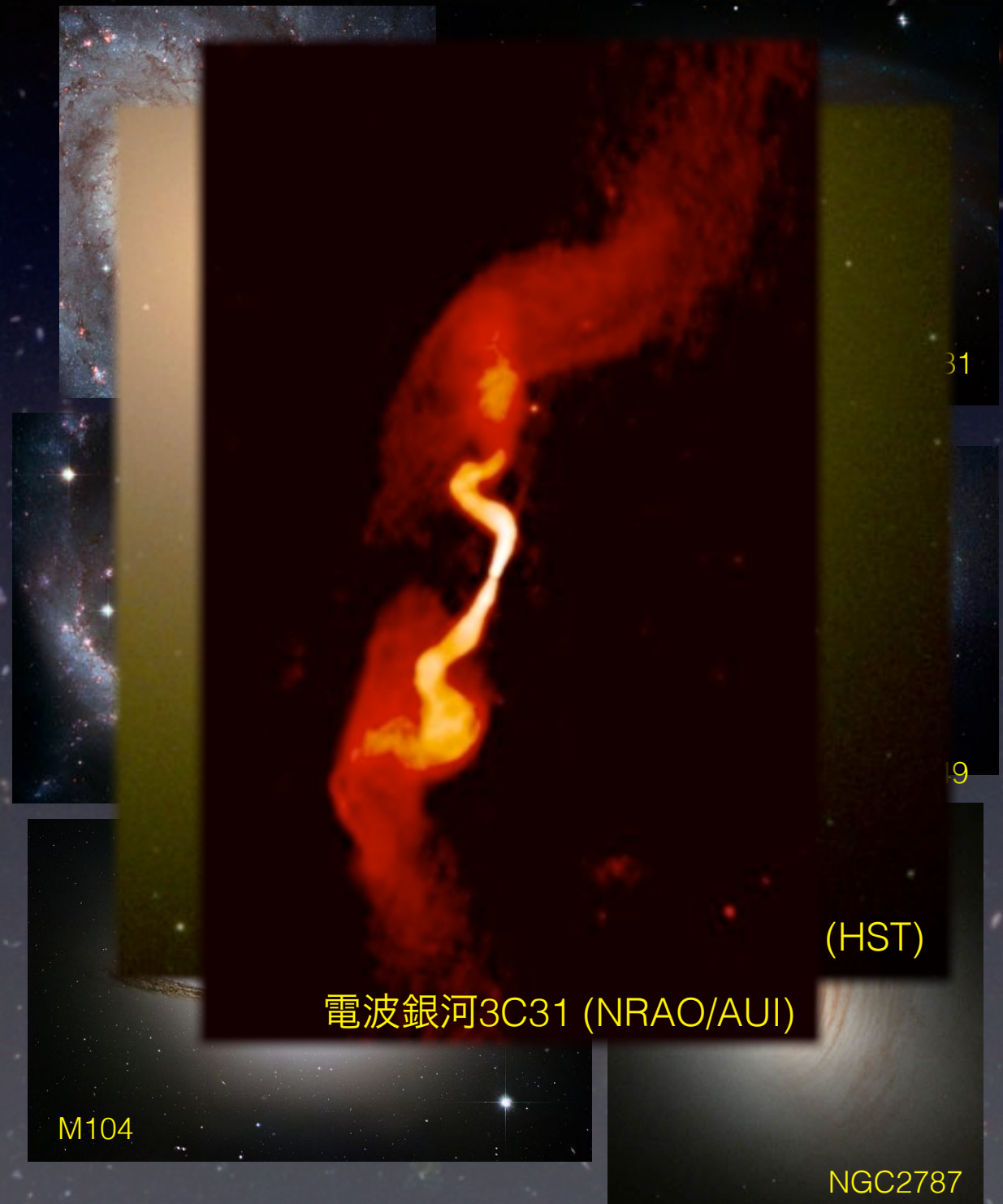


NGC2787

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/>

銀河中心核

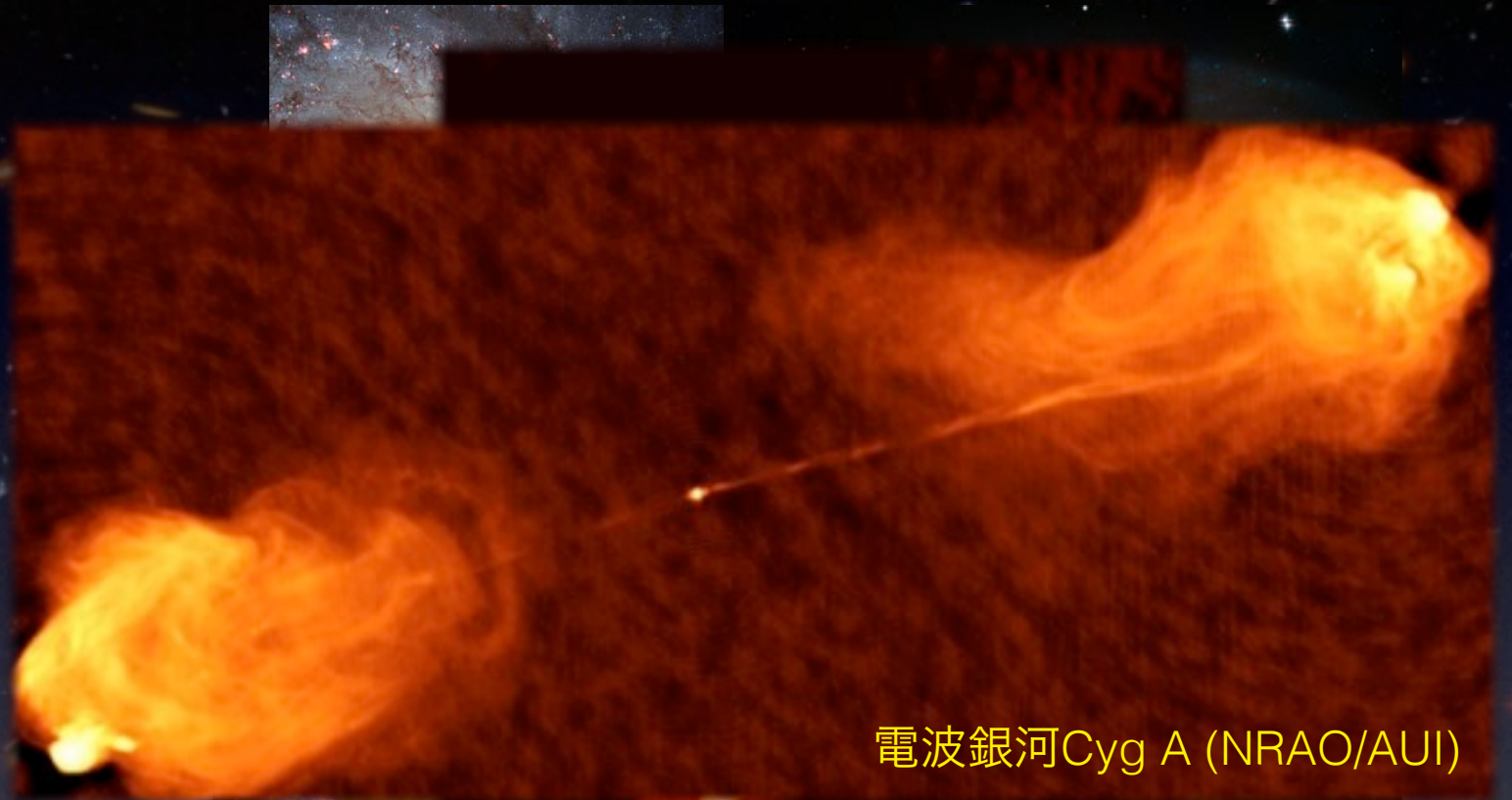
- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



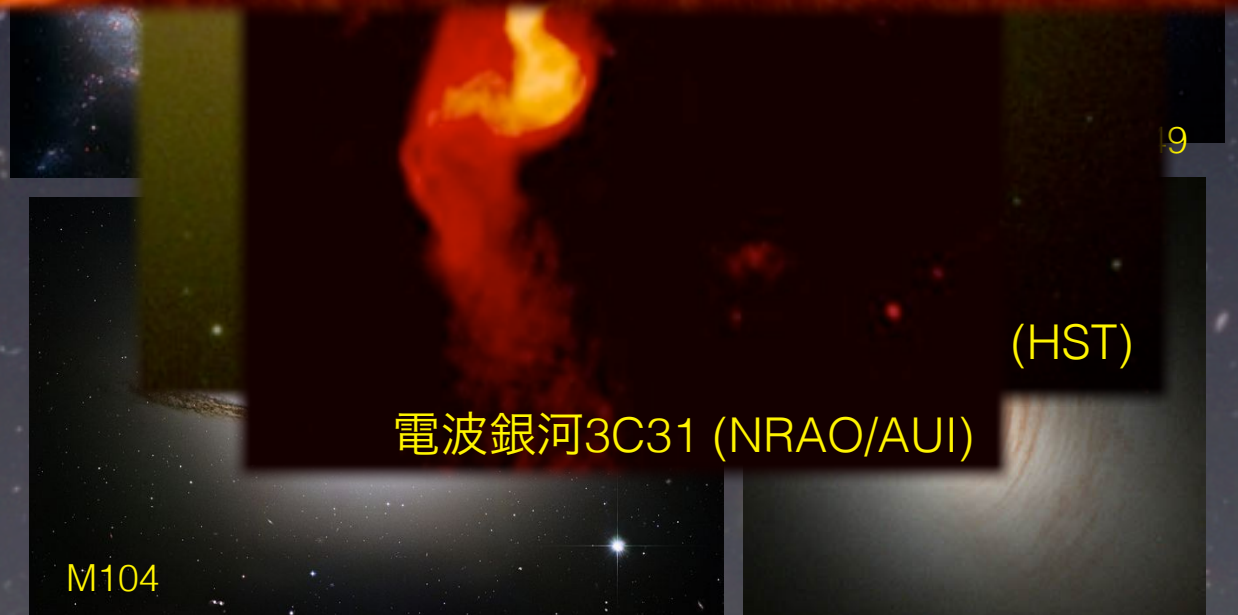
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/>

銀河中心核

- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



電波銀河Cyg A (NRAO/AUI)



電波銀河3C31 (NRAO/AUI)

(HST)

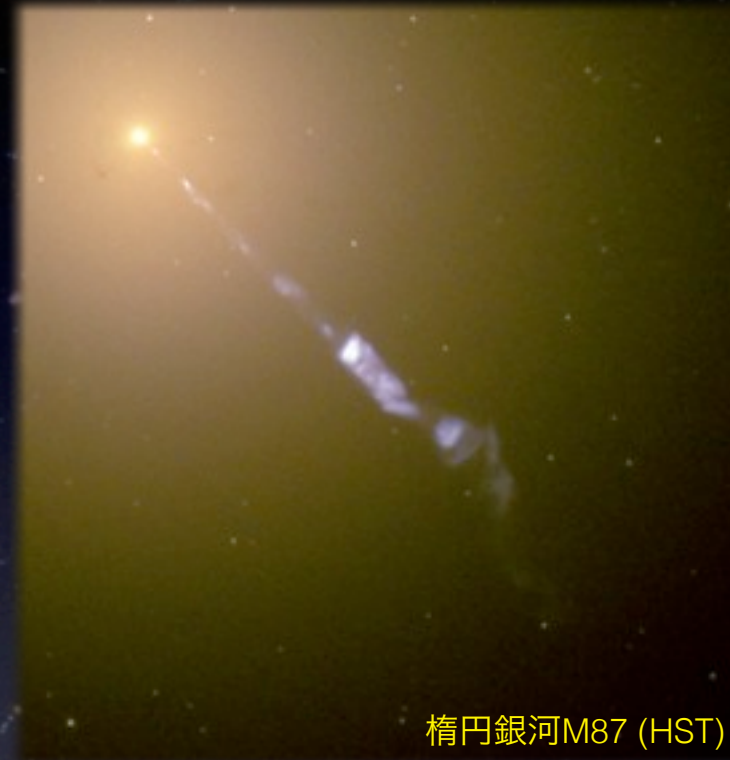
M104

NGC2787

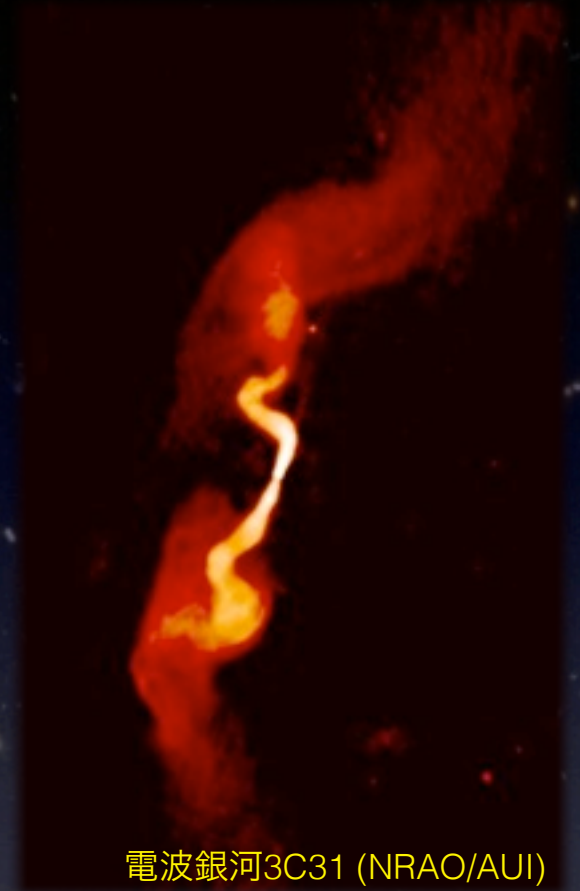
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/>

銀河中心核

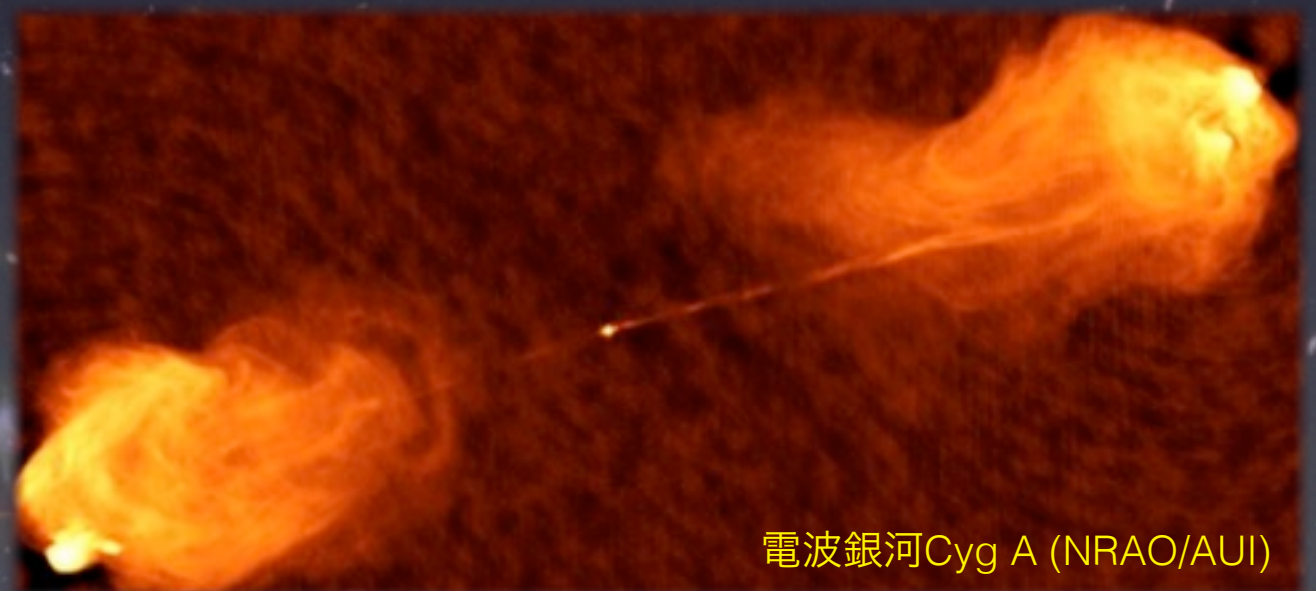
- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



楕円銀河M87 (HST)



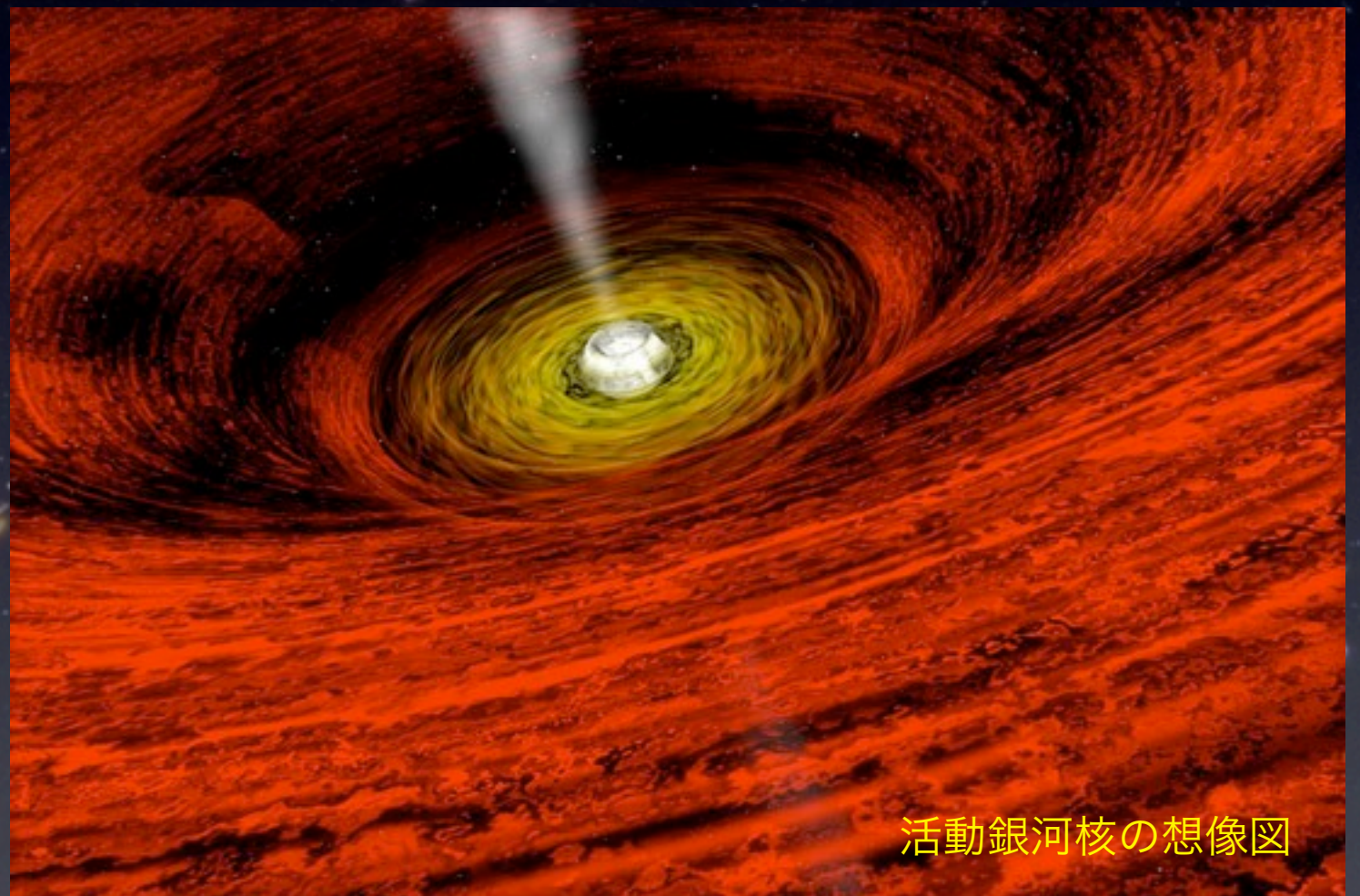
電波銀河3C31 (NRAO/AUI)



電波銀河Cyg A (NRAO/AUI)

銀河中心核

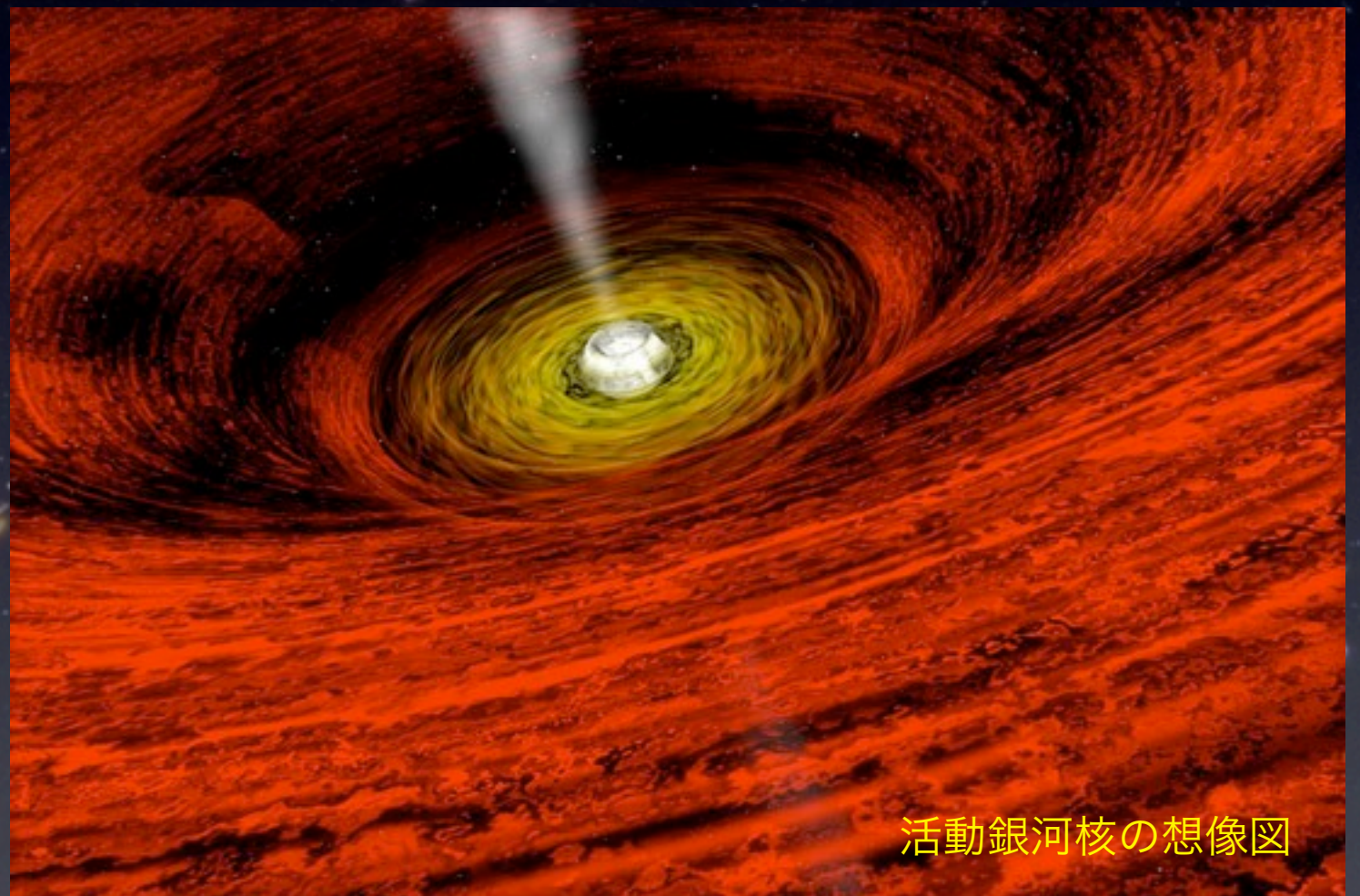
- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核



活動銀河核の想像図

銀河中心核

- 活動銀河核
 - 明るい中心核
 - 激しい時間変動
 - 長大なジェット
- エネルギー源
 - 超大質量ブラックホール
 - 重力エネルギー解放
- 低光度活動銀河核

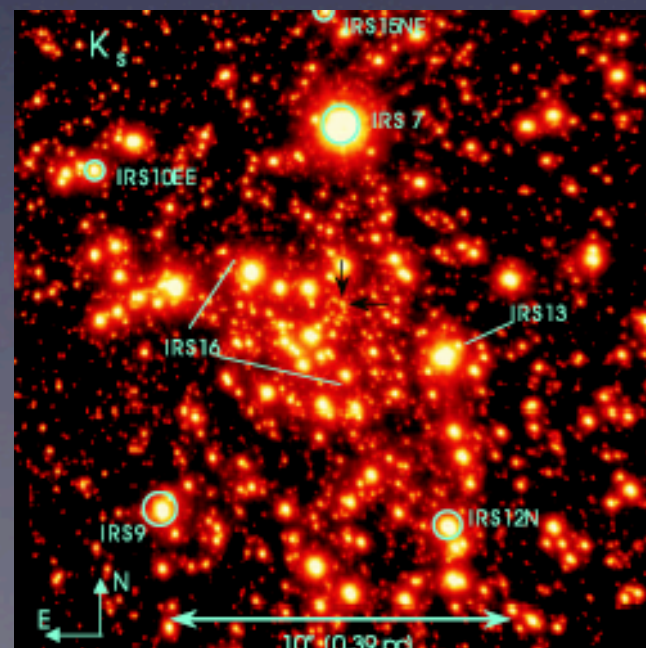
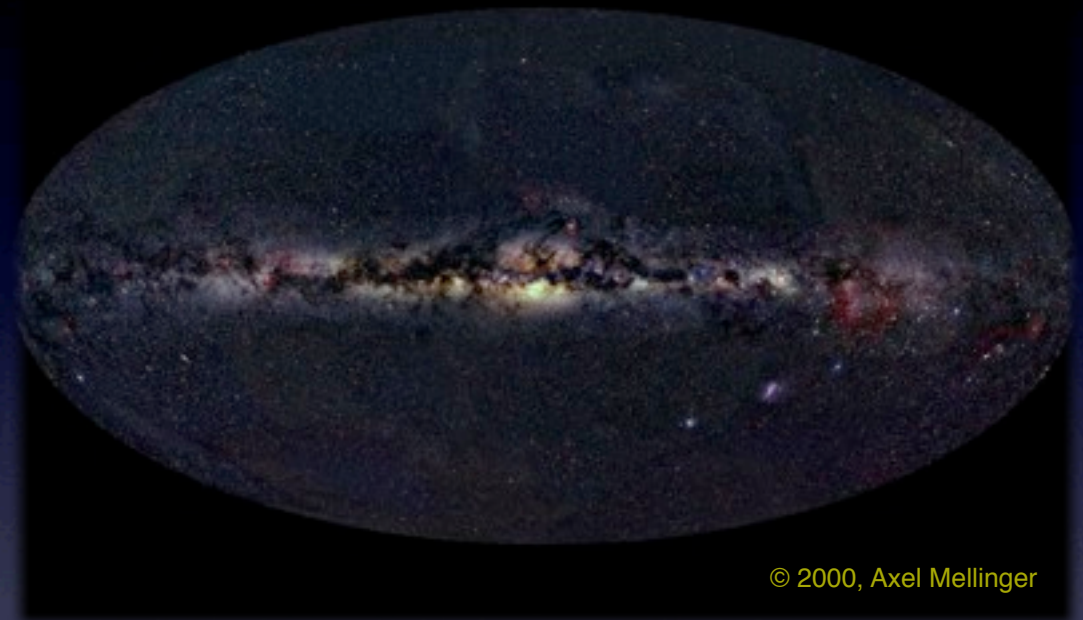


活動銀河核の想像図

- ほとんどの銀河に超大質量ブラックホール

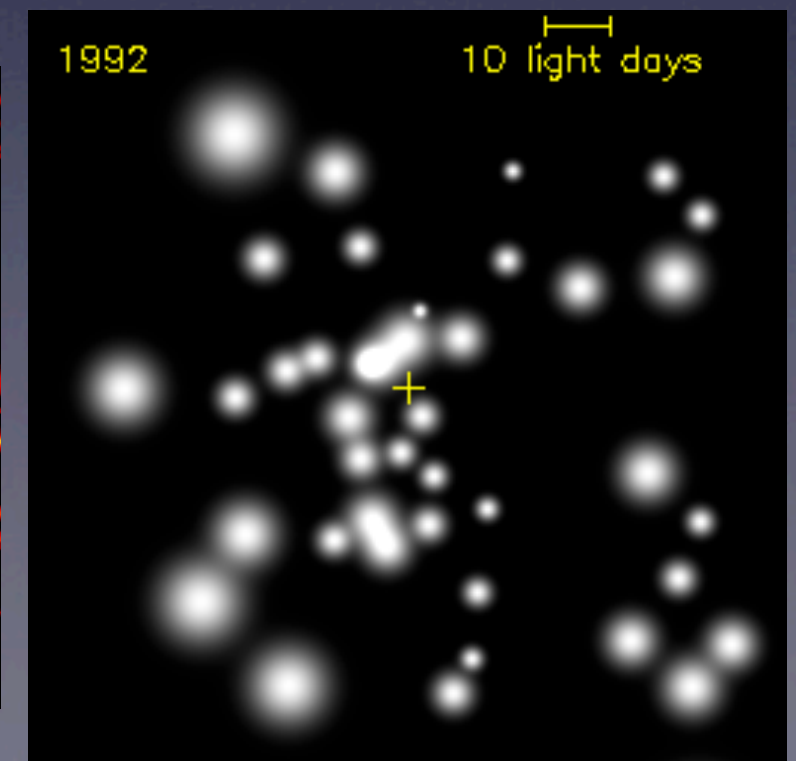
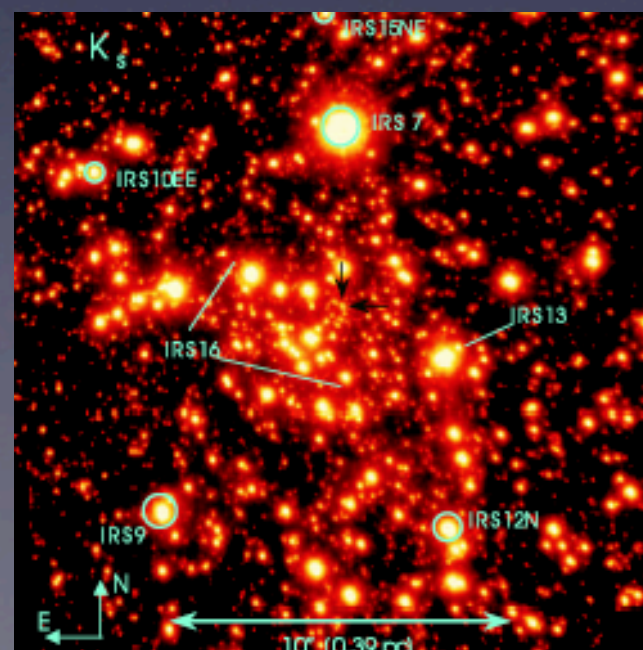
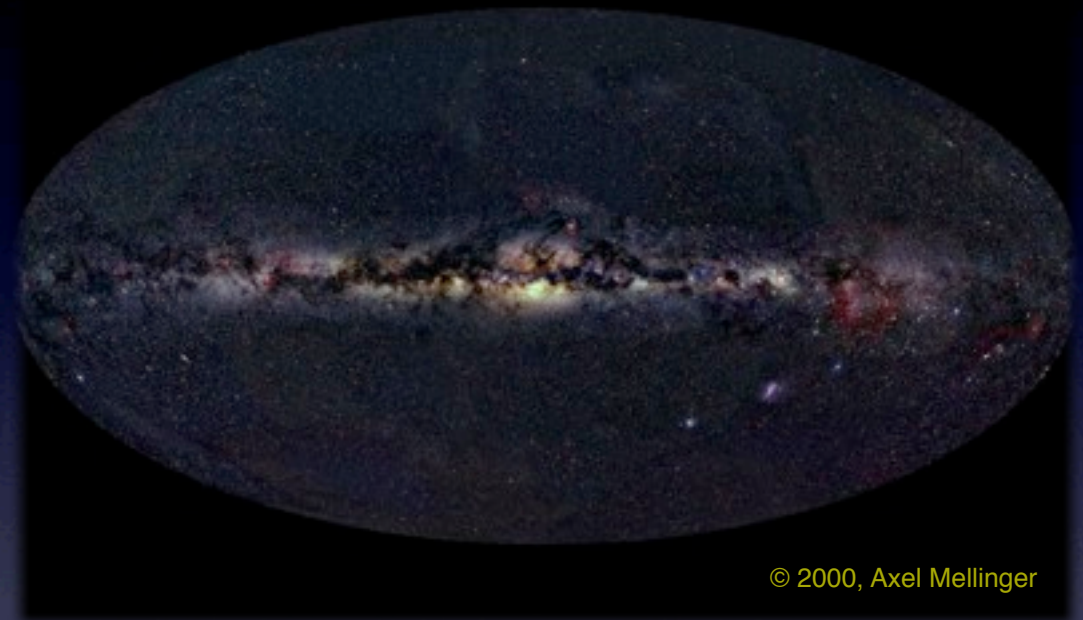
天の川銀河の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量
 - 現在は静穏
 - 過去は活動的？



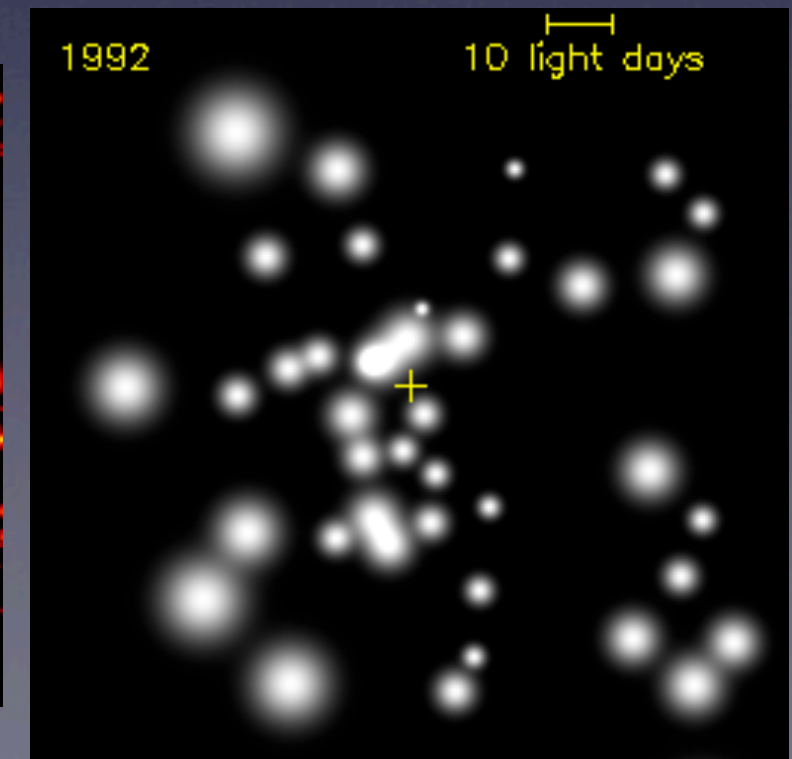
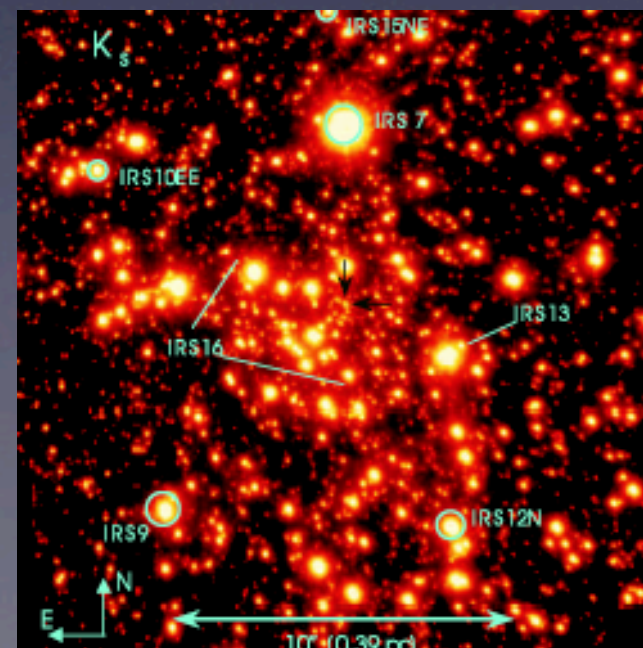
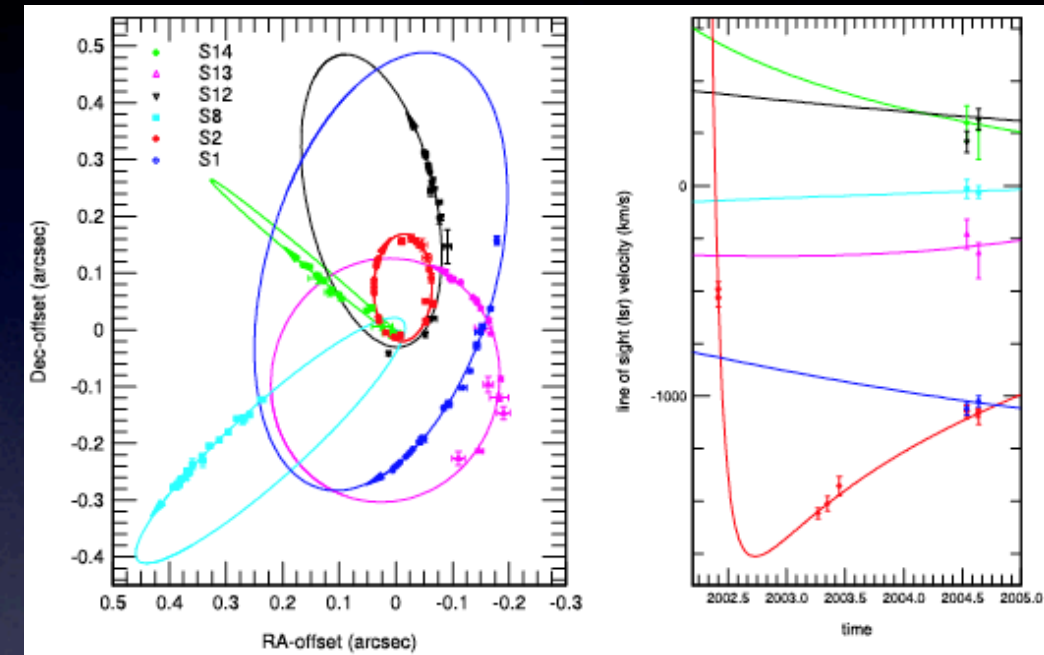
天の川銀河の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量
 - 現在は静穏
 - 過去は活動的？



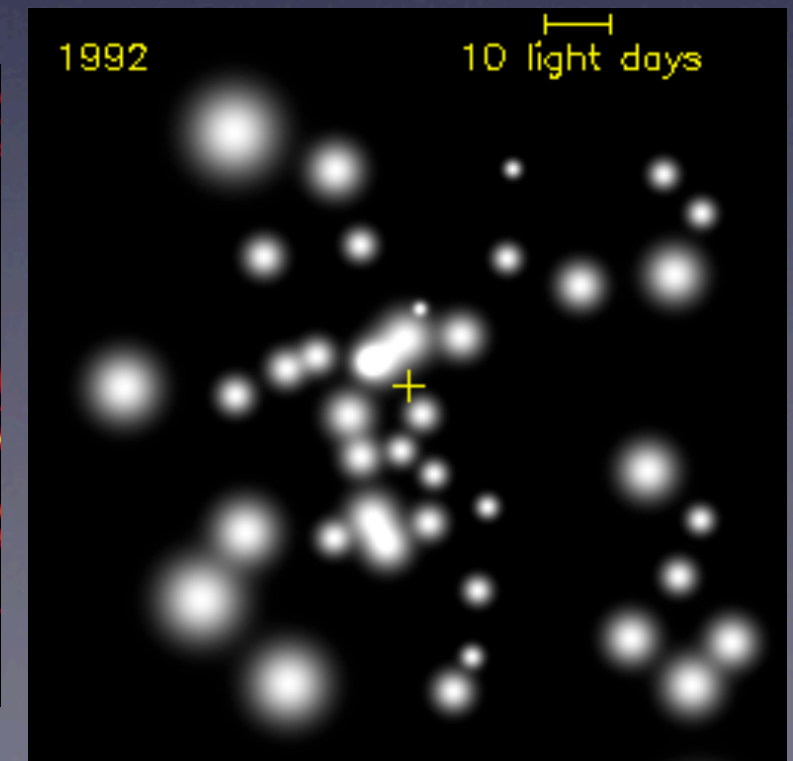
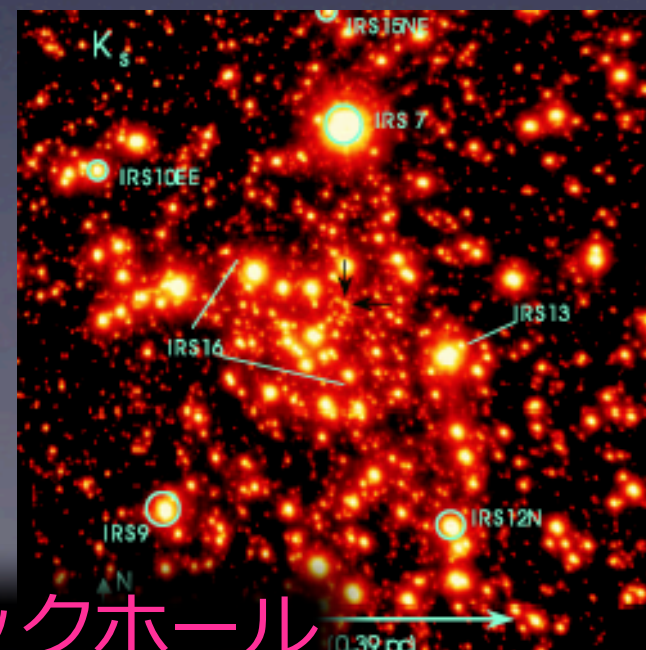
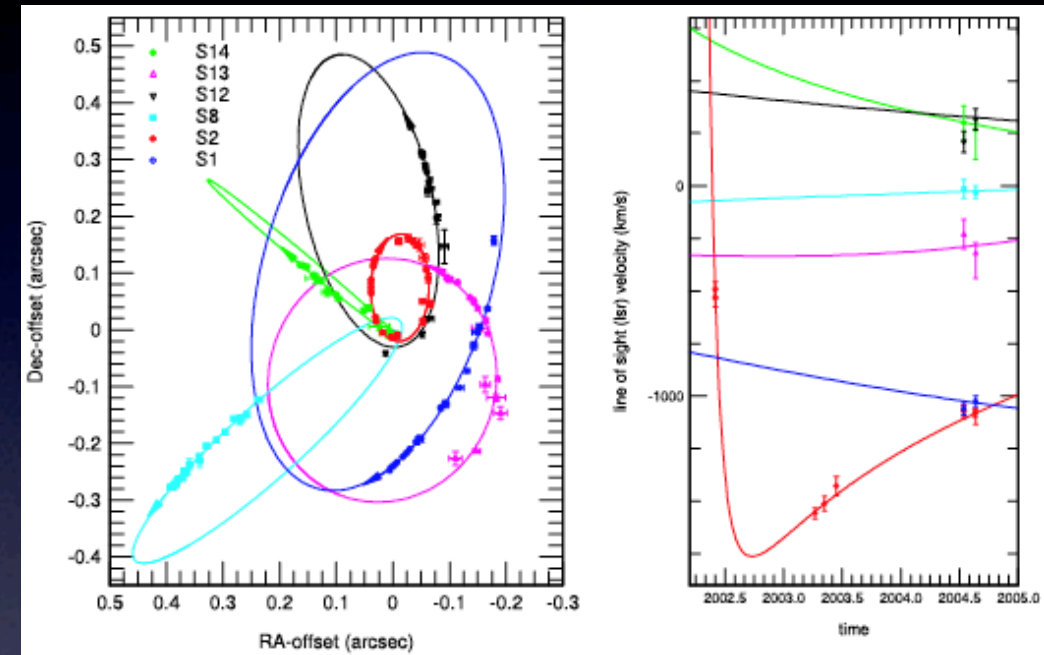
天の川銀河の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量
 - 現在は静穏
 - 過去は活動的？



天の川銀河の中心核

- いて座A*
 - 強烈な点状電波源
 - 時折フレア活動
 - 巨大な星団の中心
- 超大質量ブラックホール
 - 4百万太陽質量
 - 現在は静穏
 - 過去は活動的？
- 最も近傍の超大質量ブラックホール



2種類のブラックホール

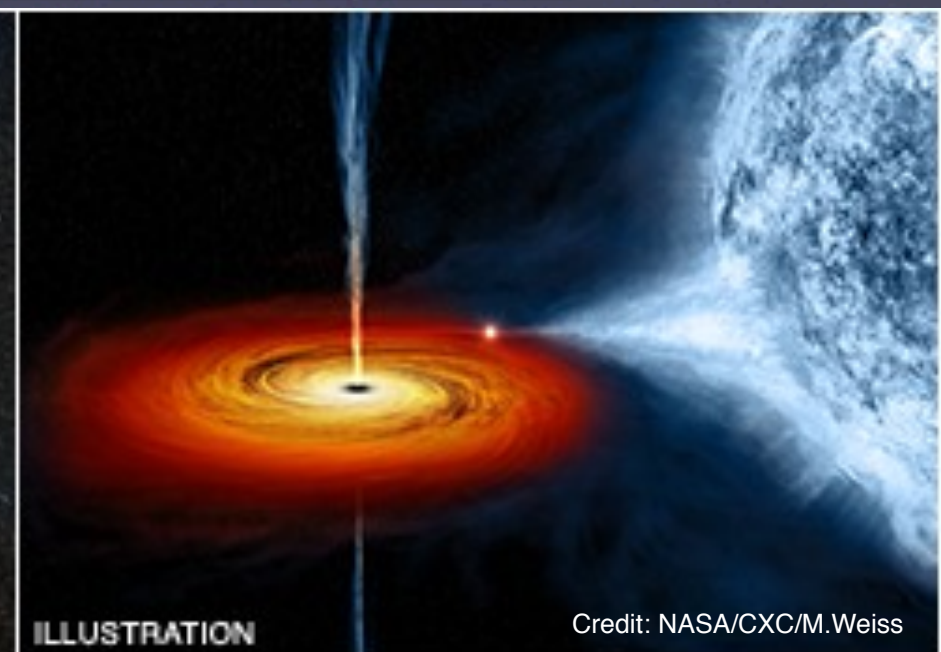
- 恒星質量ブラックホール
 - 大質量星が超新星爆発
 - 芯の質量 > 限界
 - 数～数十太陽質量
- 超大質量ブラックホール
 - 銀河中心核
 - 数百万～数十億太陽質量
- 中間質量ブラックホール



Crab nebula © NASA, ESA, Hester & Loll (Arizona State)

2種類のブラックホール

- 恒星質量ブラックホール
 - 大質量星が超新星爆発
 - 芯の質量 > 限界
 - 数～数十太陽質量
- 超大質量ブラックホール
 - 銀河中心核
 - 数百万～数十億太陽質量
- 中間質量ブラックホール



2種類のブラックホール

- 恒星質量ブラックホール
 - 大質量星が超新星爆発
 - 芯の質量 > 限界
 - 数～数十太陽質量
- 超大質量ブラックホール
 - 銀河中心核
 - 数百万～数十億太陽質量
- 中間質量ブラックホール



HLX-1 © Heidi Sagerud, Nature

超大質量ブラックホールの形成過程

- 銀河中心部で爆発的星形成
 - 高密度巨大星団
- 星同士の暴走的合体
 - 巨大星の形成
 - 中間質量ブラックホール
- 中心へと沈降
 - 中間質量ブラックホール連星系
 - 超大質量ブラックホール

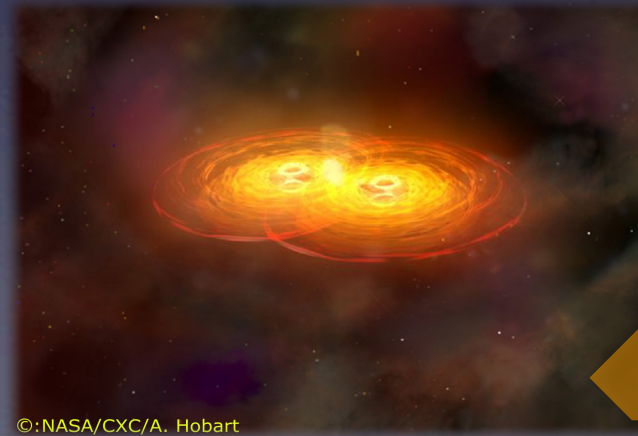
爆発的星形成



高密度大星団



暴走的合体



超大質量ブラック



天の川銀河中心部の巨大星団

- 天の川銀河の構造
 - 円盤部 + バルジ
 - 太陽系は円盤部の外れ
 - 円盤部の塵
 - 円盤部・バルジの恒星
 - 中心部はよく見えない
- 銀河系中心分子層
 - 大量の分子ガス + 塵



天の川銀河中心部の巨大星団

- 天の川銀河の構造
 - 円盤部 + バルジ
 - 太陽系は円盤部の外れ
 - 円盤部の塵
 - 円盤部・バルジの恒星
 - 中心部はよく見えない
- 銀河系中心分子層
 - 大量の分子ガス + 塵



The Center of the Milky Way Galaxy
NASA / JPL-Caltech / S. Stolovy (Spitzer Science Center/Caltech)

Spitzer Space Telescope • IRAC
ssc2006-02a



© 2000, Axel Mellinger

天の川銀河中心部の巨大星団

- 天の川銀河の構造
 - 円盤部 + バルジ
 - 太陽系は円盤部の外れ
 - 円盤部の塵
 - 円盤部・バルジの恒星
 - 中心部はよく見えない
- 銀河系中心分子層
 - 大量の分子ガス + 塵
- 星団の直接検出は極めて困難



The Center of the Milky Way Galaxy
NASA / JPL-Caltech / S. Stolovy (Spitzer Science Center/Caltech)

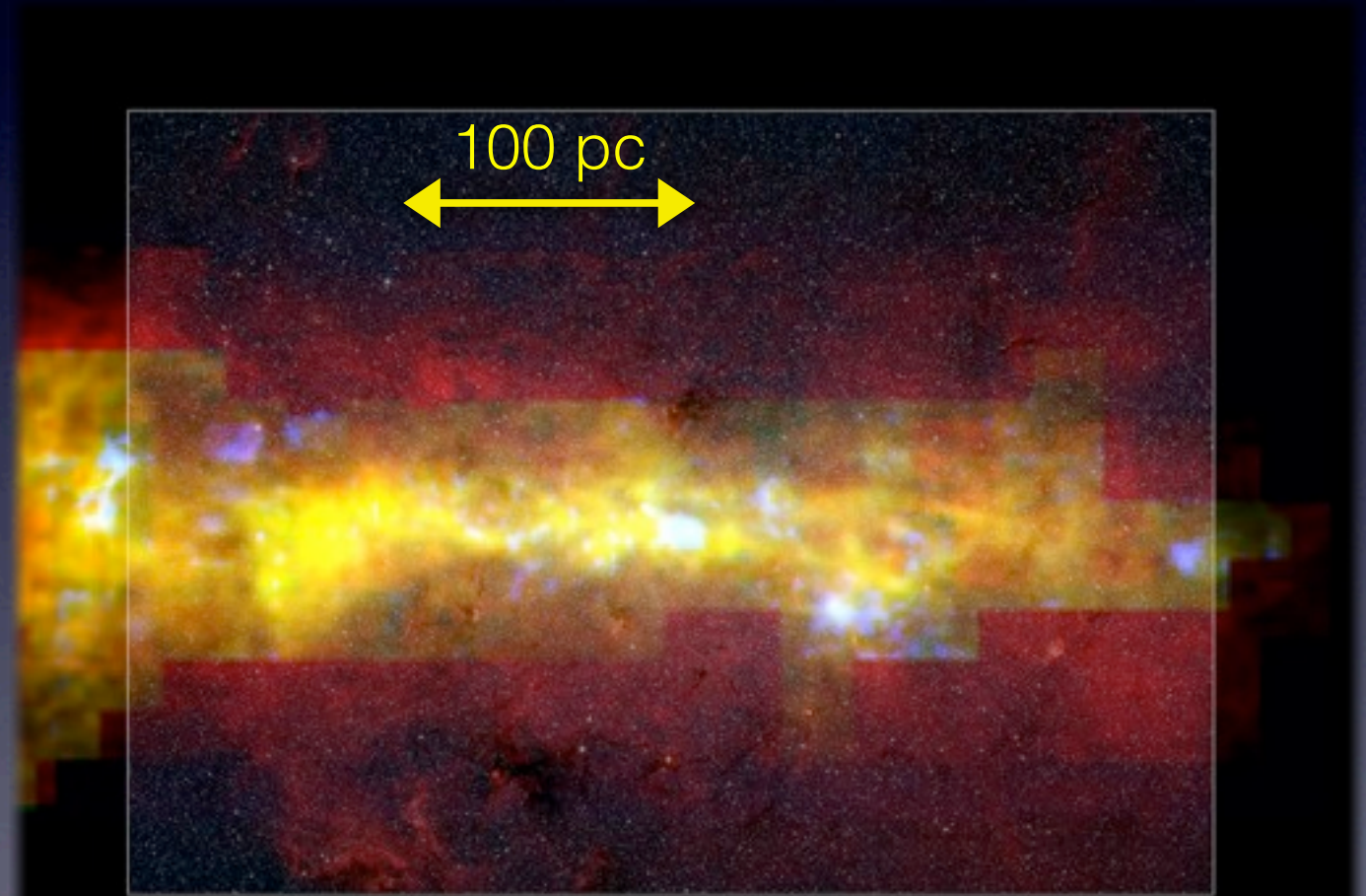
Spitzer Space Telescope • IRAC
ssc2006-02a



© 2000, Axel Mellinger

Central Molecular Zone

- Warm and dense molecular gas
 - $T_k = 30\text{--}80\text{ K}$
 - $n(\text{H}_2) \geq 10^4\text{ cm}^{-3}$
- Large velocity dispersion
 - Expanding arcs/shells
- Abundant SiO and COMs
 - Interstellar shocks
 - Non-equilibrium chemistry



The Center of the Milky Way Galaxy
NASA / JPL-Caltech / S. Stolovy (Spitzer Science Center/Caltech)

Spitzer Space Telescope • IRAC
S006-02a

野辺山45m望遠鏡観測

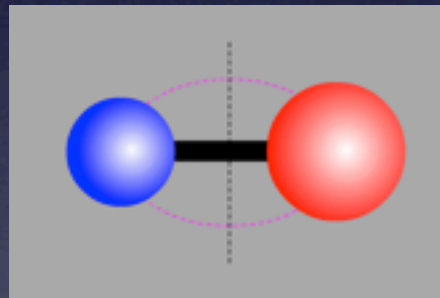
- 野辺山宇宙電波観測所45m望遠鏡
 - 口径45m：分解能1/240度（16秒角）
- 長期共同利用観測
 - 1995年～1996年
 - 合計400時間
 - 一酸化炭素分子 $J=1-0$ (115.271 GHz)
 - 観測点数：44,000点
 - 希薄で冷たいガス



Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455

野辺山45m望遠鏡観測

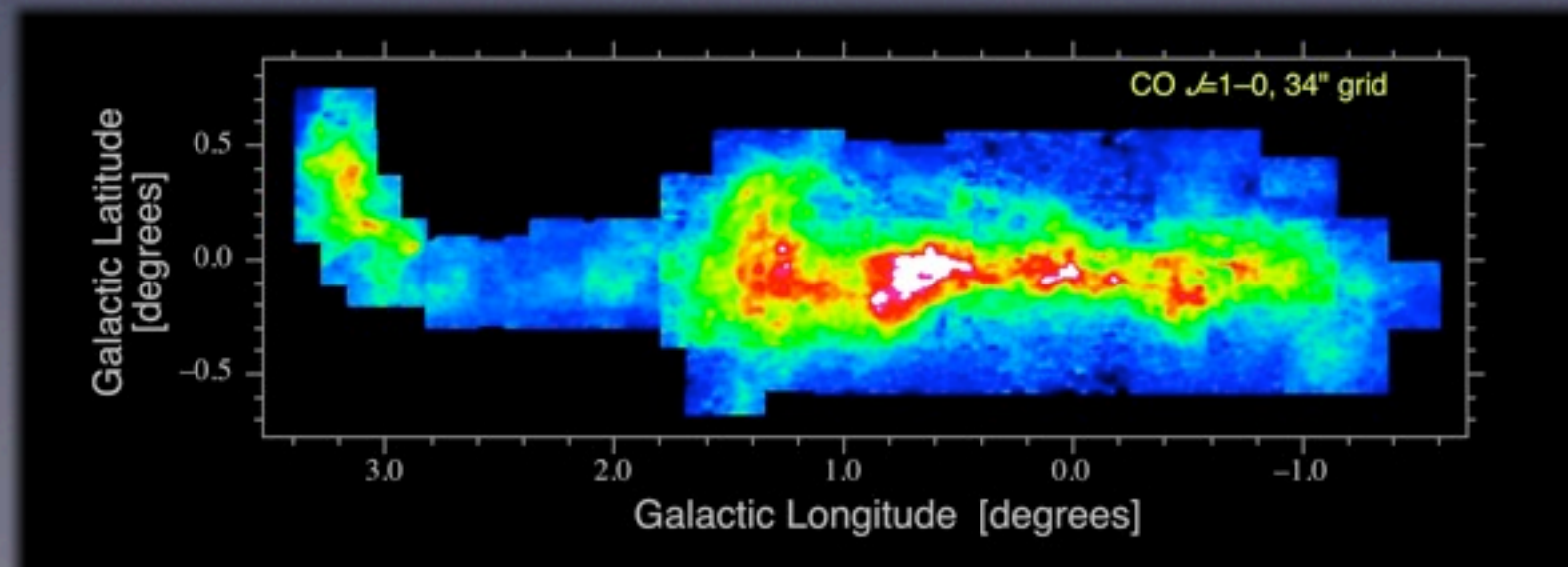
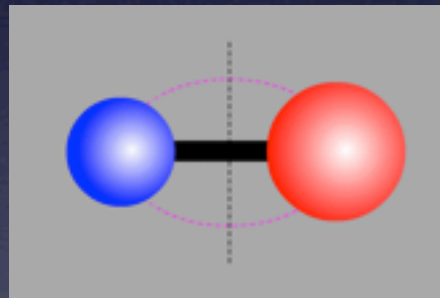
- 野辺山宇宙電波観測所45m望遠鏡
 - 口径45m：分解能1/240度（16秒角）
- 長期共同利用観測
 - 1995年～1996年
 - 合計400時間
 - 一酸化炭素分子 $J=1-0$ (115.271 GHz)
 - 観測点数：44,000点
 - 希薄で冷たいガス



Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455

野辺山45m望遠鏡観測

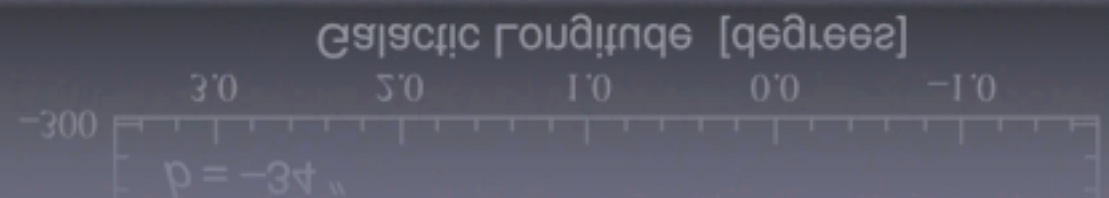
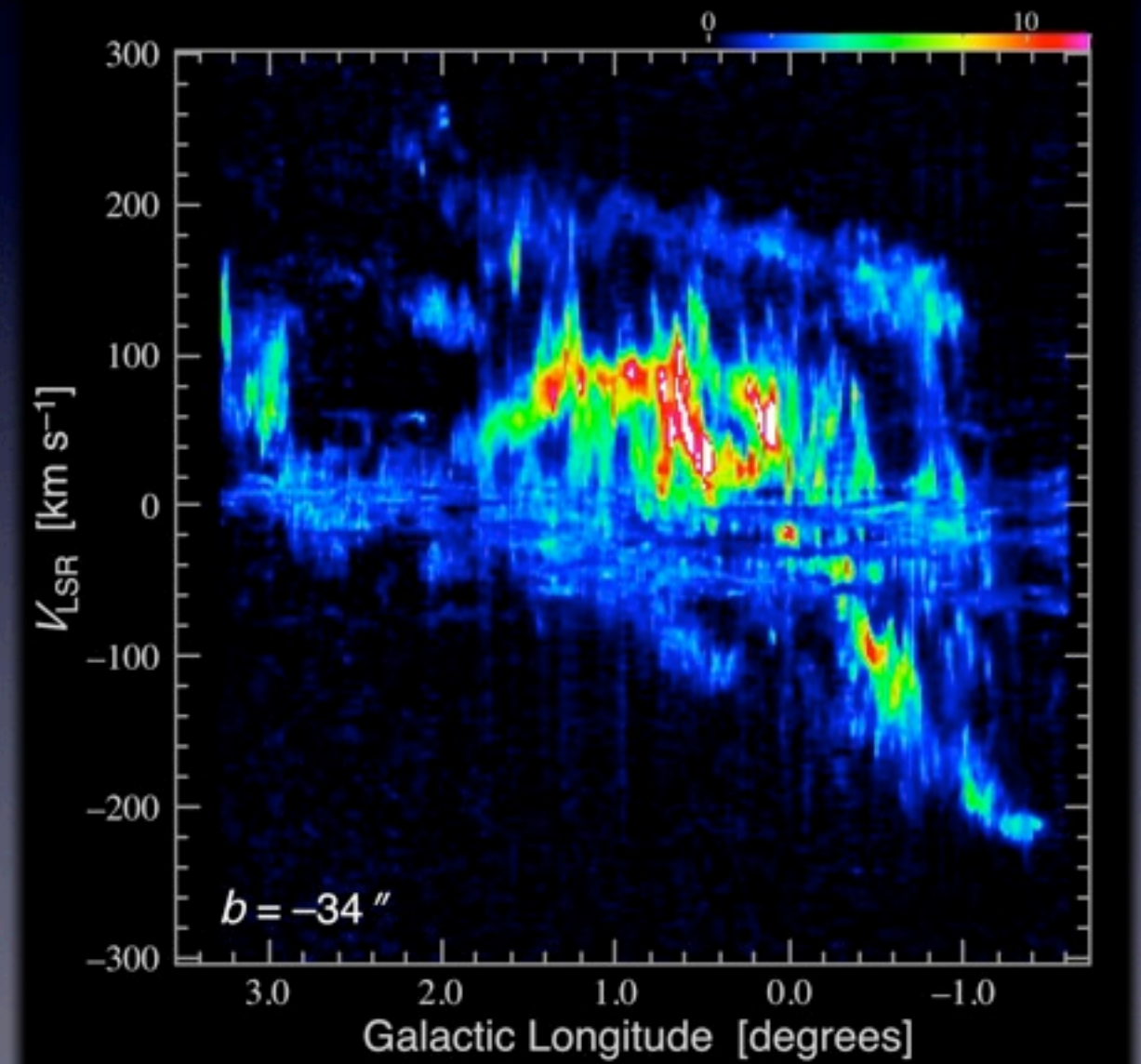
- 野辺山宇宙電波観測所45m望遠鏡
 - 口径45m：分解能1/240度（16秒角）
- 長期共同利用観測
 - 1995年～1996年
 - 合計400時間
 - 一酸化炭素分子 $J=1-0$ (115.271 GHz)
 - 観測点数：44,000点
 - 希薄で冷たいガス



Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455

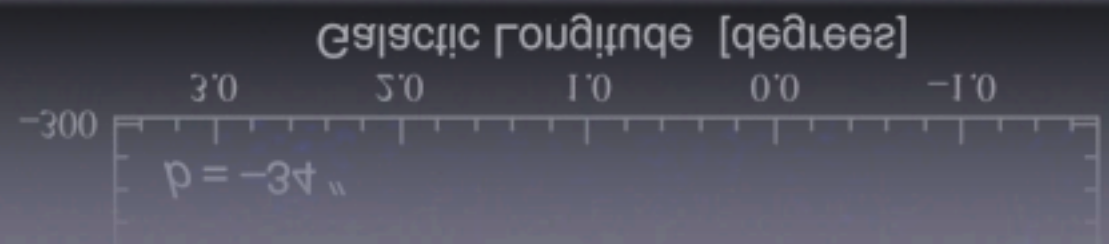
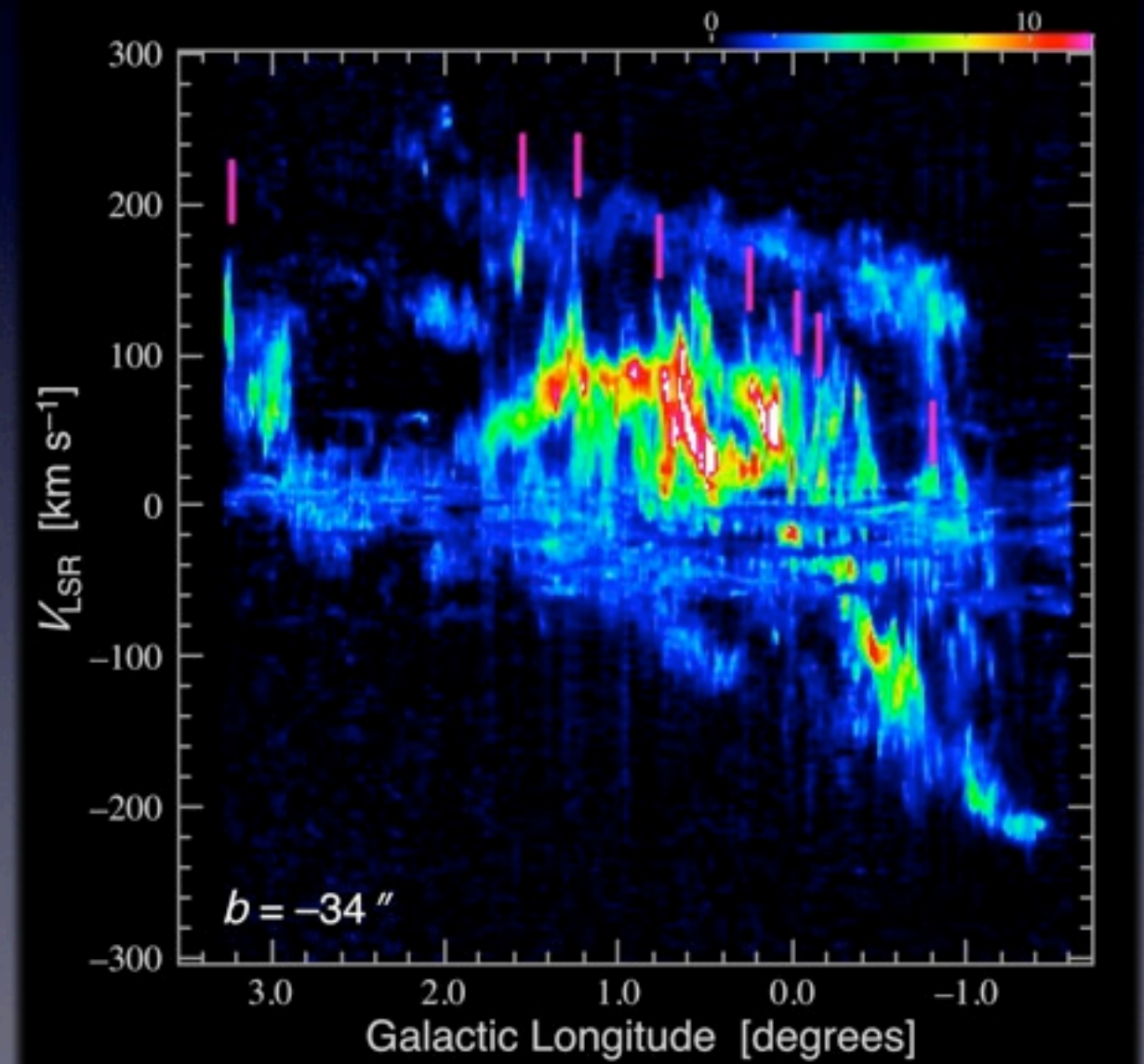
高速度コンパクト雲

- Discovered in CO $J=1-0$ survey
 - NRO 45m telescope
 - Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455
- Spatially Compact
- Large velocity width
 - Short expansion time
 - Enormous kinetic energy
- Isolated/ with GMCs



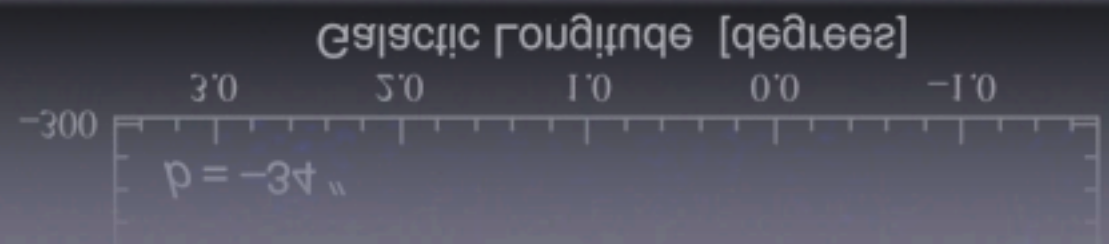
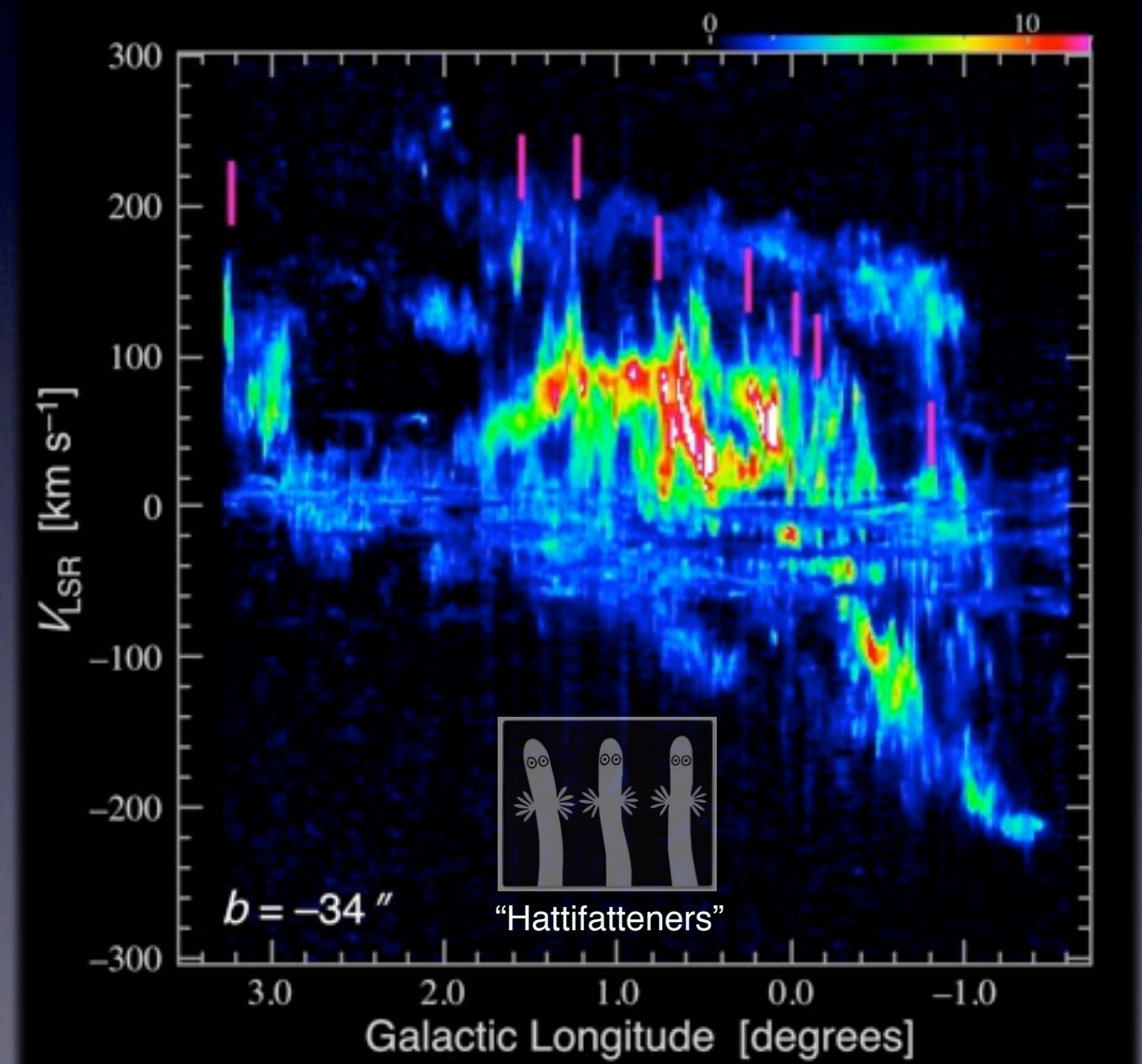
高速度コンパクト雲

- Discovered in CO $J=1-0$ survey
 - NRO 45m telescope
 - Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455
- Spatially Compact
- Large velocity width
 - Short expansion time
 - Enormous kinetic energy
- Isolated/ with GMCs



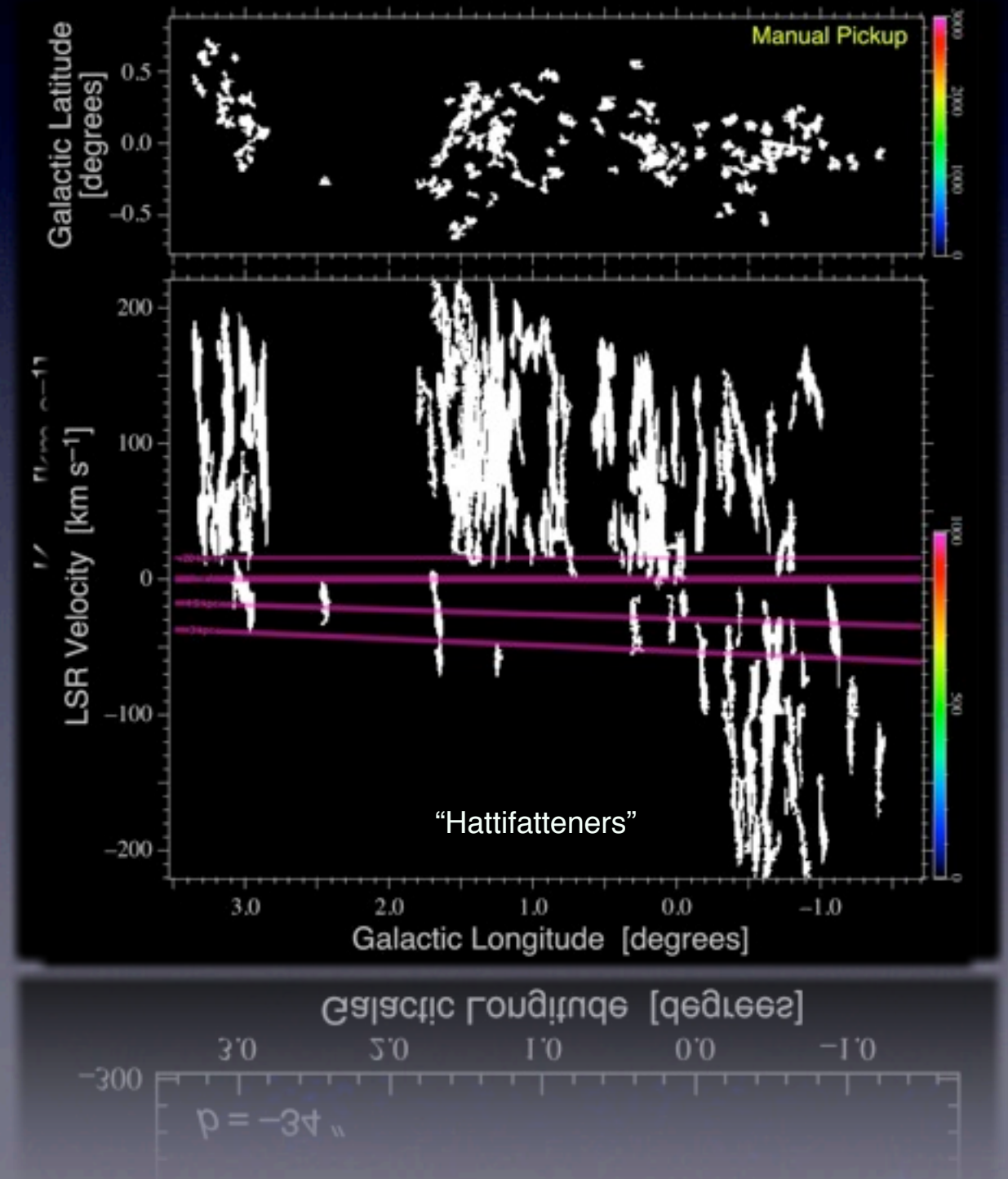
高速度コンパクト雲

- Discovered in CO $J=1-0$ survey
 - NRO 45m telescope
 - Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455
- Spatially Compact
- Large velocity width
 - Short expansion time
 - Enormous kinetic energy
- Isolated/ with GMCs



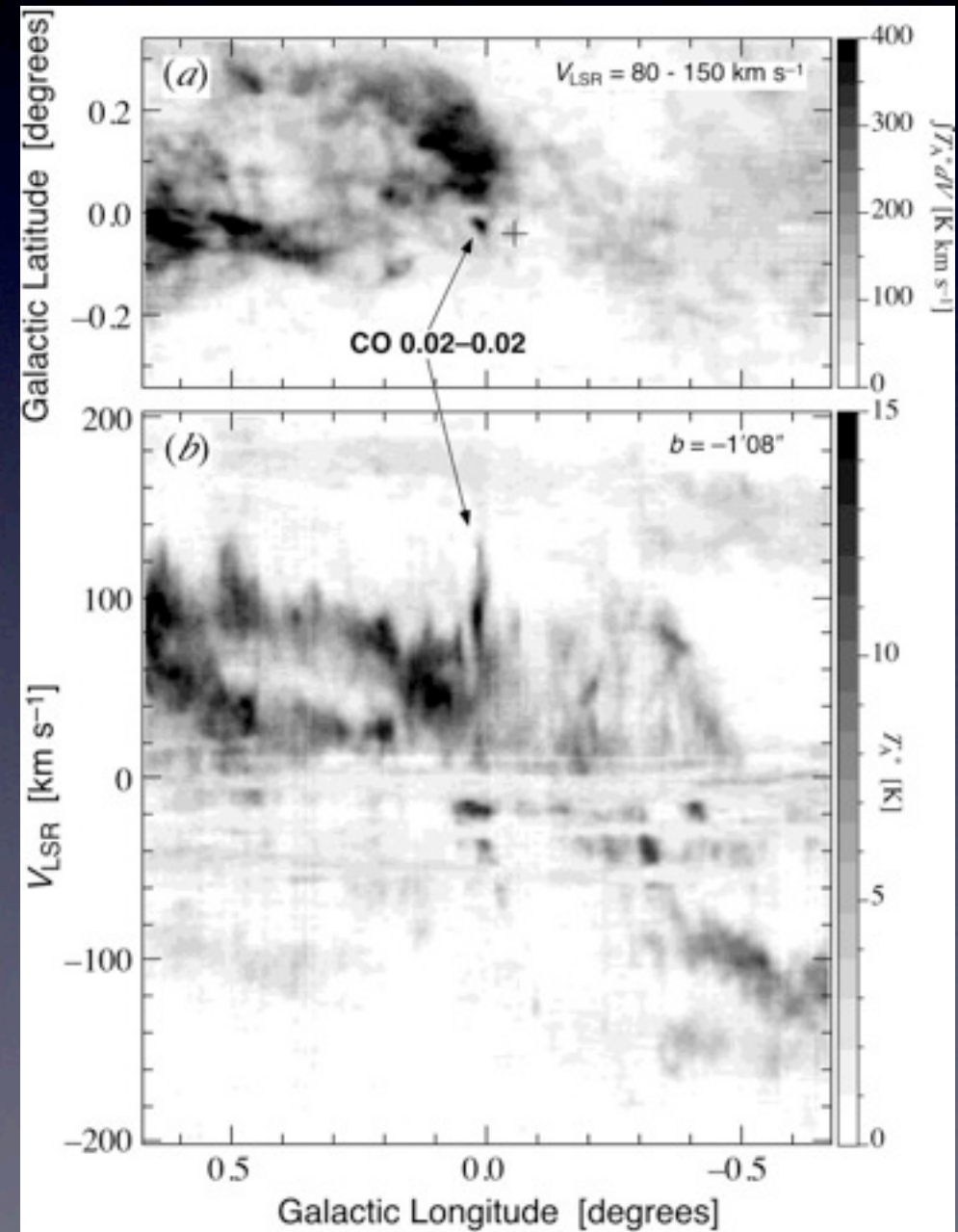
高速度コンパクト雲

- Discovered in CO $J=1-0$ survey
 - NRO 45m telescope
 - Oka et al. 1998, ApJS, 118, 455
- Spatially Compact
- Large velocity width
 - Short expansion time
 - Enormous kinetic energy
- Isolated/ with GMCs



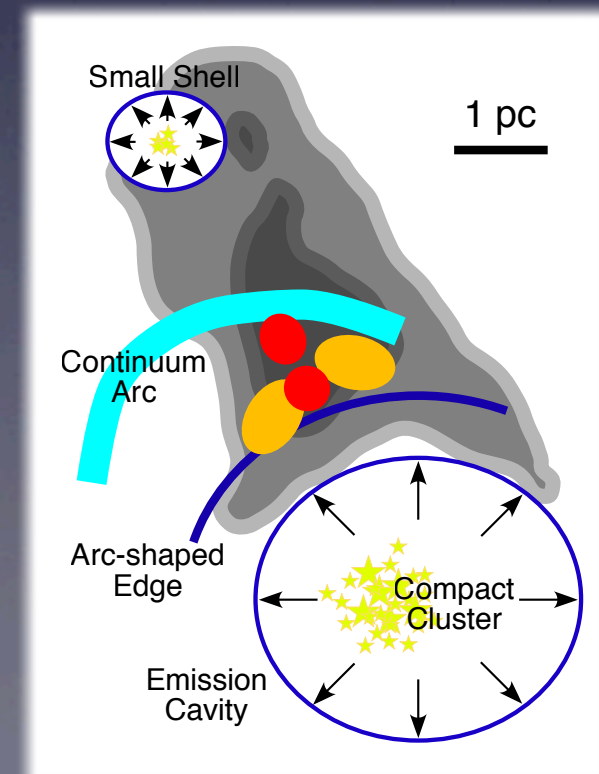
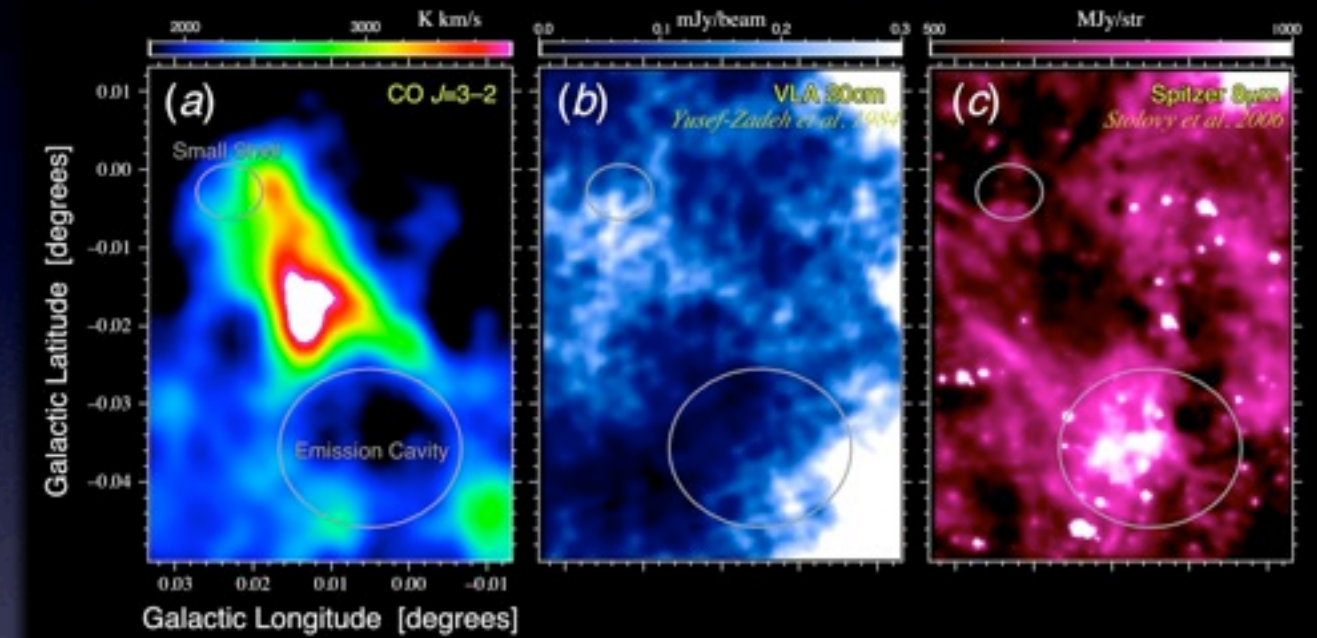
HVCC CO 0.02-0.02

- Compact/ very large velocity width
 - $t_{\text{exp}} = (3-5) \times 10^4$ yrs
 - $E_{\text{kin}} = (3-8) \times 10^{51}$ erg
- Emission cavity
- Group of mid-IR sources
- Faint radio continuum shell
 - Associated with a massive cluster
 - Accelerated by a series of SNe?



HVCC CO 0.02–0.02

- Compact/ very large velocity width
 - $t_{\text{exp}} = (3-5) \times 10^4$ yrs
 - $E_{\text{kin}} = (3-8) \times 10^{51}$ erg
- Emission cavity
- Group of mid-IR sources
- Faint radio continuum shell
 - Associated with a massive cluster
 - Accelerated by a series of SNe?



ASTE 10m望遠鏡観測

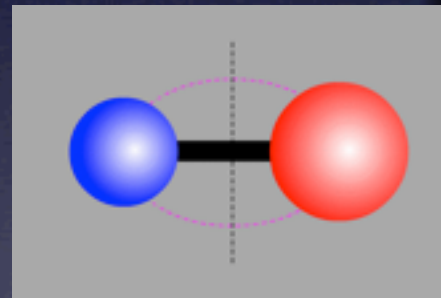
- アタカマサブミリ波望遠鏡実験
 - チリ共和国北部、標高4800m地点に設置
 - 口径10m：分解能1/180度（22秒角）
- 銀河系中心プロジェクト
 - 2005年～2010年
 - 合計250時間
 - 一酸化炭素分子 $J=3-2$ (345.795 GHz)
 - 観測点数：30,000 点
 - やや濃密で温かいガス



Oka et al. 2012, ApJS, 201, 14

ASTE 10m望遠鏡観測

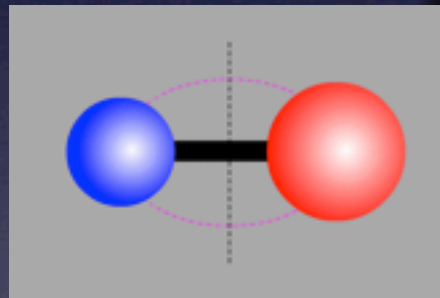
- アタカマサブミリ波望遠鏡実験
 - チリ共和国北部、標高4800m地点に設置
 - 口径10m：分解能1/180度（22秒角）
- 銀河系中心プロジェクト
 - 2005年～2010年
 - 合計250時間
 - 一酸化炭素分子 $J=3-2$ (345.795 GHz)
 - 観測点数：30,000 点
 - やや濃密で温かいガス



Oka et al. 2012, ApJS, 201, 14

ASTE 10m望遠鏡観測

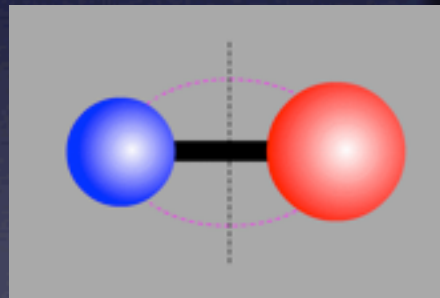
- アタカマサブミリ波望遠鏡実験
 - チリ共和国北部、標高4800m地点に設置
 - 口径10m：分解能1/180度（22秒角）
- 銀河系中心プロジェクト
 - 2005年～2010年
 - 合計250時間
 - 一酸化炭素分子 $J=3-2$ (345.795 GHz)
 - 観測点数：30,000 点
 - やや濃密で温かいガス



Oka et al. 2012, ApJS, 201, 14

ASTE 10m望遠鏡観測

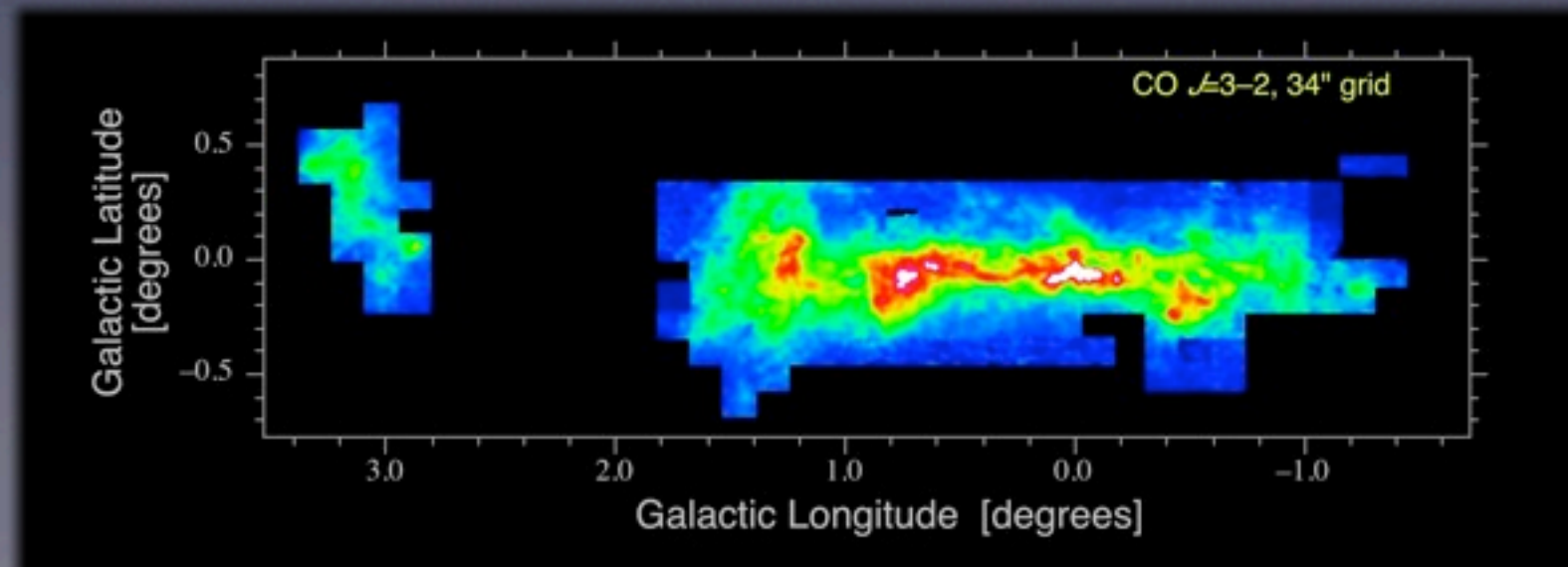
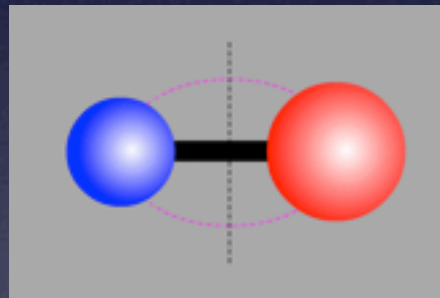
- アタカマサブミリ波望遠鏡実験
 - チリ共和国北部、標高4800m地点に設置
 - 口径10m：分解能1/180度（22秒角）
- 銀河系中心プロジェクト
 - 2005年～2010年
 - 合計250時間
 - 一酸化炭素分子 $J=3-2$ (345.795 GHz)
 - 観測点数：30,000 点
 - やや濃密で温かいガス



Oka et al. 2012, ApJS, 201, 14

ASTE 10m望遠鏡観測

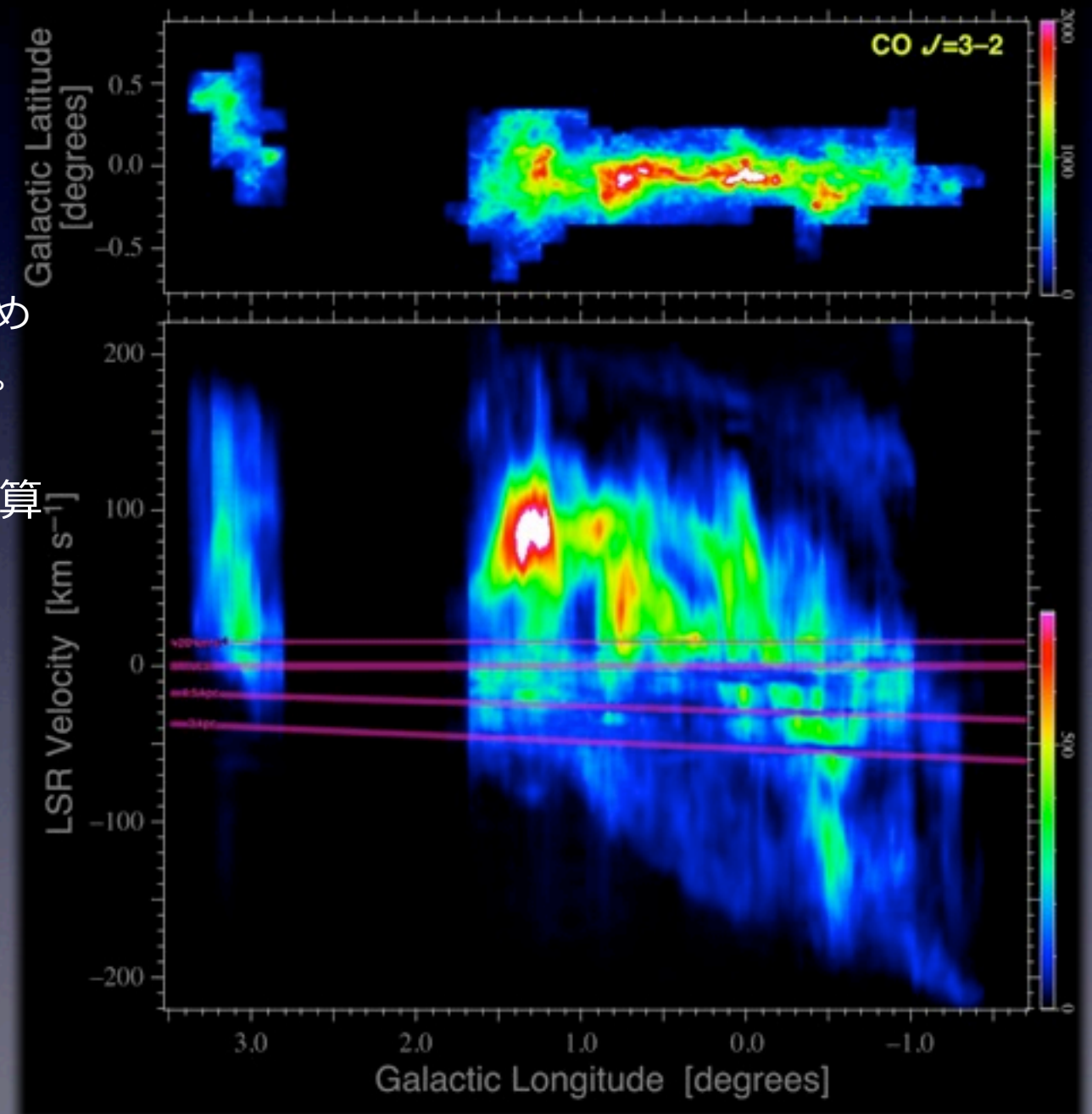
- アタカマサブミリ波望遠鏡実験
 - チリ共和国北部、標高4800m地点に設置
 - 口径10m：分解能1/180度（22秒角）
- 銀河系中心プロジェクト
 - 2005年～2010年
 - 合計250時間
 - 一酸化炭素分子 $J=3-2$ (345.795 GHz)
 - 観測点数：30,000 点
 - やや濃密で温かいガス



Oka et al. 2012, ApJS, 201, 14

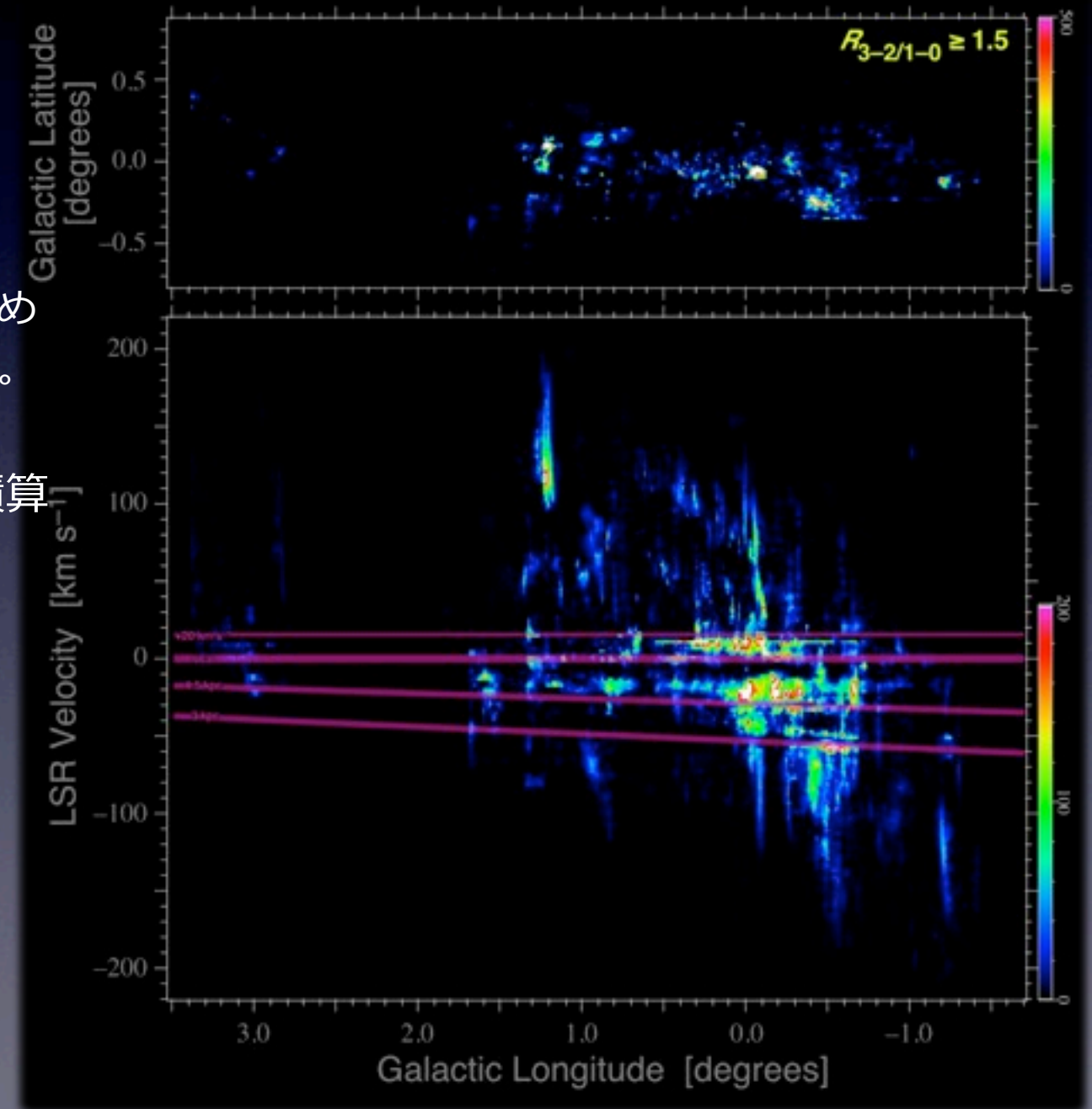
「温かく濃密な」分子ガスの抽出

- 三次元（空間2+速度1）データ
 - 分子が出す電波の詳細観測
→ ガス雲の速度も分かる。
 - 温かく濃密なガスでは、高周波の電波が強いため
高周波電波と低周波電波の強度比が大きくなる。
 - 比が大きい($R_{3-2/1-0} \geq 1.5$) ピクセルだけを積算
 - 温度 50 K以上
 - 水素分子密度 10^4 cm^{-3} 以上
- 温かく濃密な分子ガスの分布
 - Sgr A, $L=+1.3^\circ$, $L=-0.4^\circ$, $L=-1.2^\circ$
 - 全て、極めて広い速度幅を有する



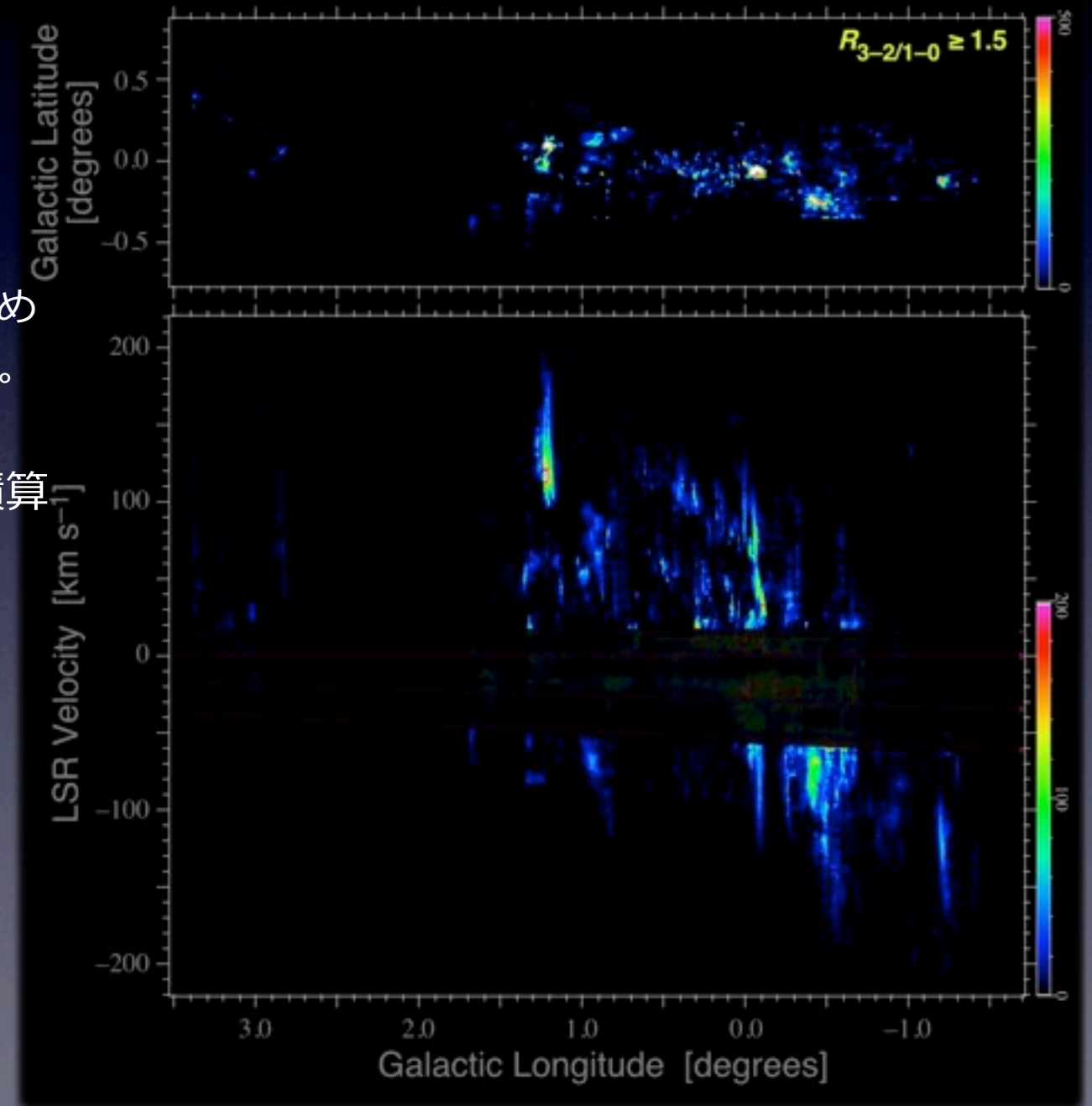
「温かく濃密な」分子ガスの抽出

- 三次元（空間2+速度1）データ
 - 分子が出す電波の詳細観測
→ ガス雲の速度も分かる。
 - 温かく濃密なガスでは、高周波の電波が強いため
高周波電波と低周波電波の強度比が大きくなる。
 - 比が大きい($R_{3-2/1-0} \geq 1.5$) ピクセルだけを積算
 - 温度 50 K以上
 - 水素分子密度 10^4 cm^{-3} 以上
- 温かく濃密な分子ガスの分布
 - Sgr A, $L=+1.3^\circ$, $L=-0.4^\circ$, $L=-1.2^\circ$
 - 全て、極めて広い速度幅を有する



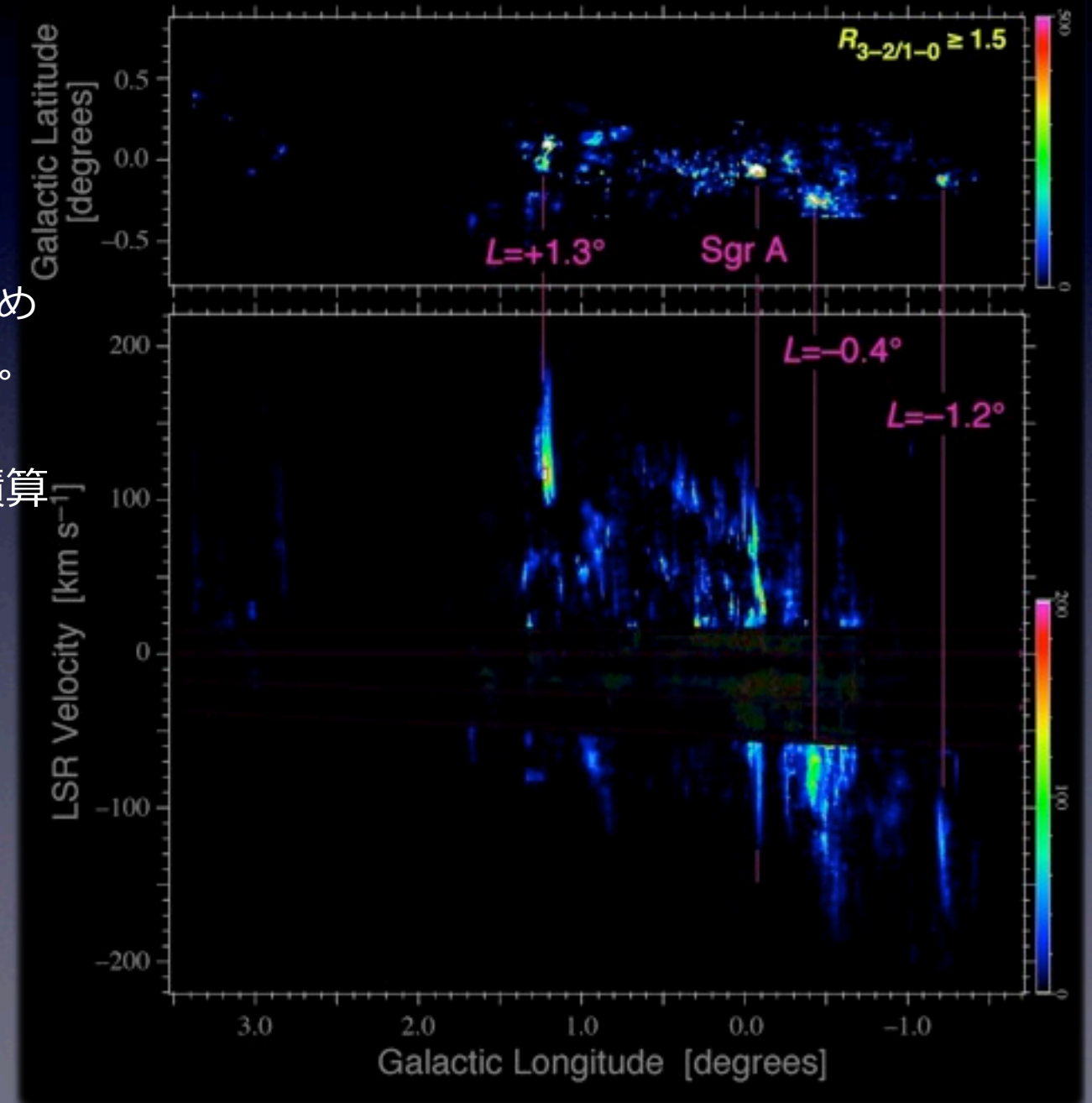
「温かく濃密な」分子ガスの抽出

- 三次元（空間2+速度1）データ
 - 分子が出す電波の詳細観測
→ ガス雲の速度も分かる。
 - 温かく濃密なガスでは、高周波の電波が強いため
高周波電波と低周波電波の強度比が大きくなる。
 - 比が大きい($R_{3-2/1-0} \geq 1.5$) ピクセルだけを積算
 - 温度 50 K以上
 - 水素分子密度 10^4 cm^{-3} 以上
- 温かく濃密な分子ガスの分布
 - Sgr A, $L=+1.3^\circ$, $L=-0.4^\circ$, $L=-1.2^\circ$
 - 全て、極めて広い速度幅を有する



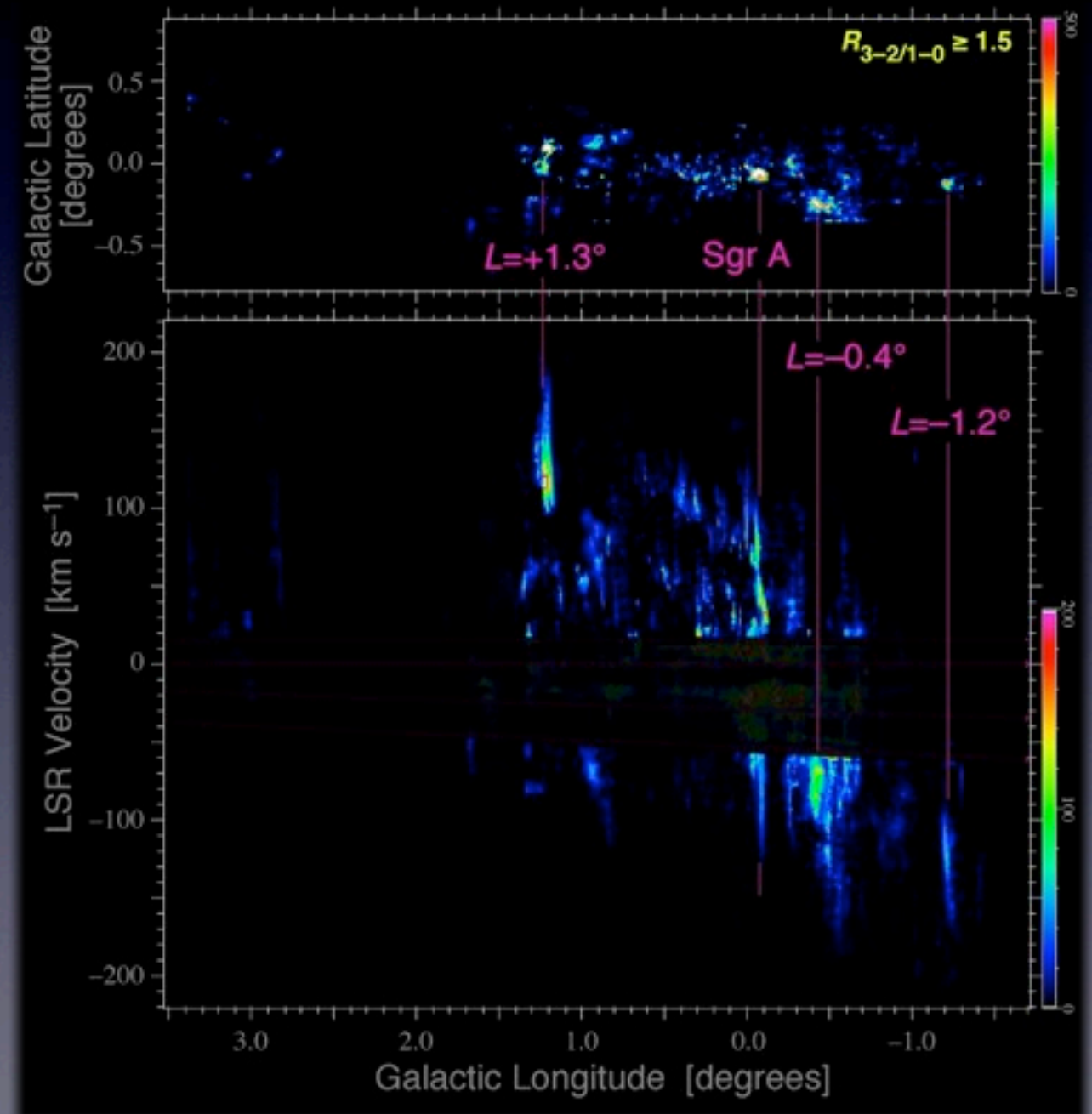
「温かく濃密な」分子ガスの抽出

- 三次元（空間2+速度1）データ
 - 分子が出す電波の詳細観測
→ ガス雲の速度も分かる。
 - 温かく濃密なガスでは、高周波の電波が強いため
高周波電波と低周波電波の強度比が大きくなる。
 - 比が大きい($R_{3-2/1-0} \geq 1.5$) ピクセルだけを積算
 - 温度 50 K以上
 - 水素分子密度 10^4 cm^{-3} 以上
- 温かく濃密な分子ガスの分布
 - Sgr A, $L=+1.3^\circ$, $L=-0.4^\circ$, $L=-1.2^\circ$
 - 全て、極めて広い速度幅を有する



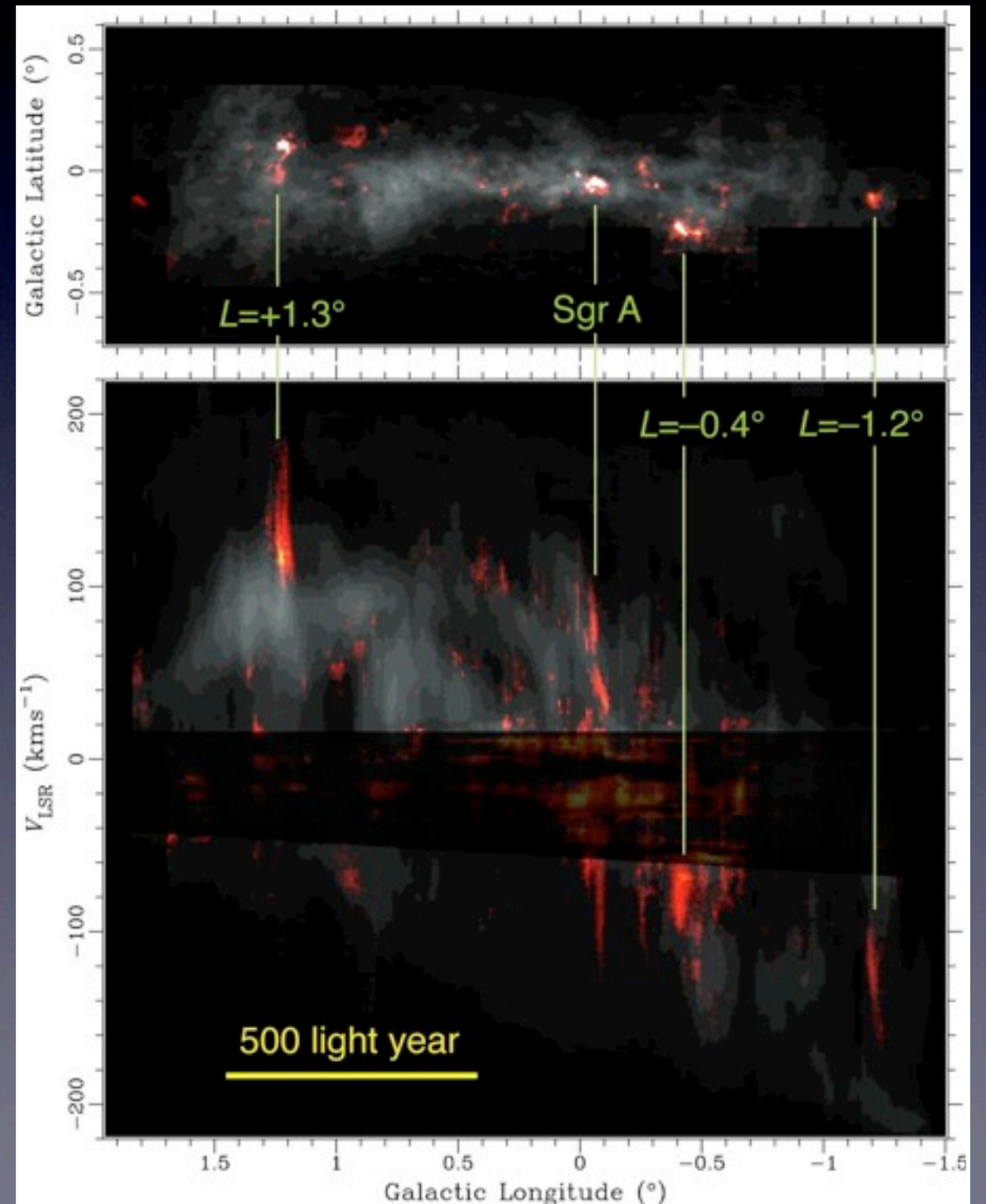
4つの「温かく濃密な」分子ガス塊

- Sgr A
 - 中心核「いて座A*」を含む
 - 回転円盤状構造
- $L=+1.3^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-0.4^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-1.2^\circ$
 - 既知の対応天体なし



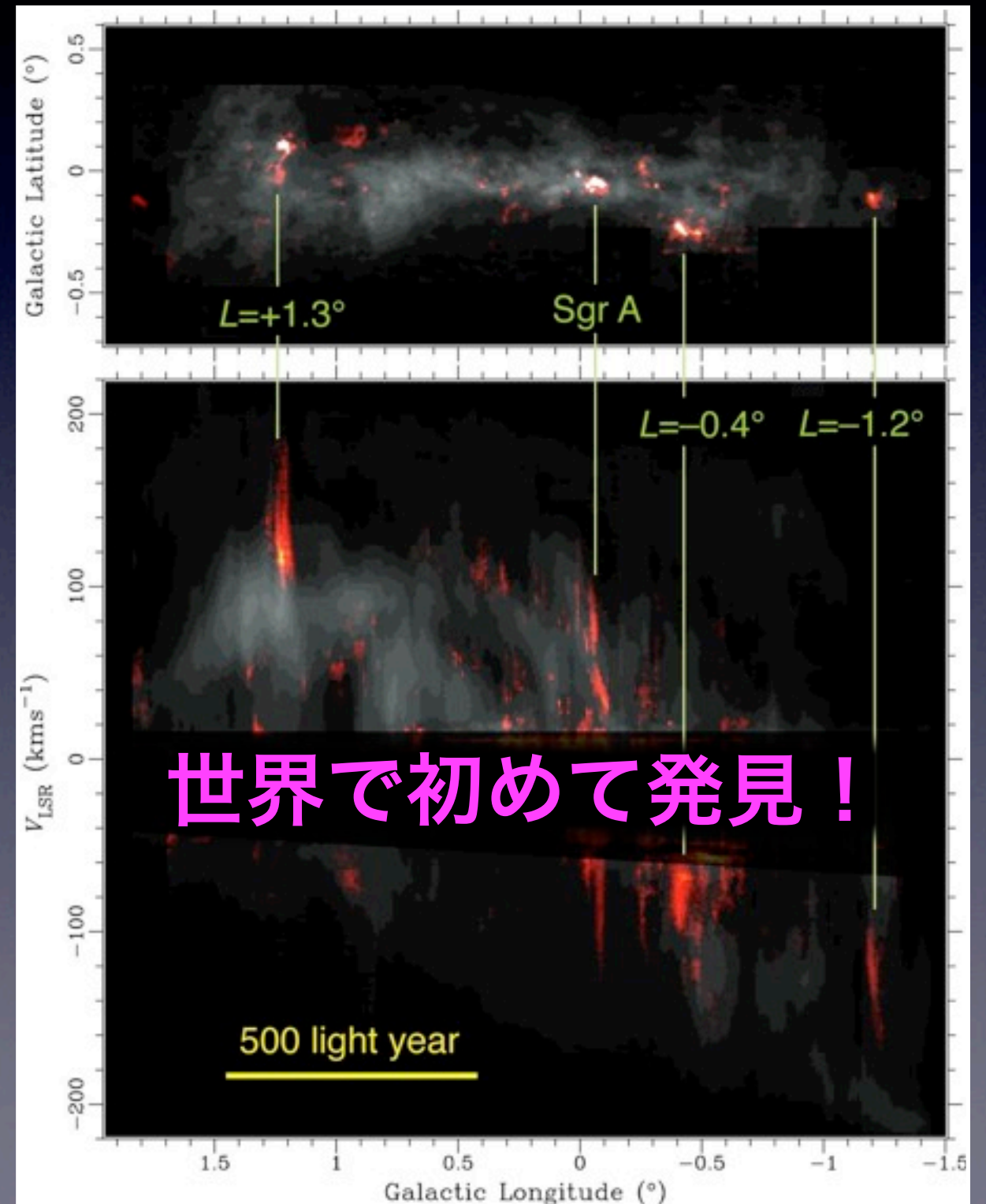
4つの「温かく濃密な」分子ガス塊

- Sgr A
 - 中心核「いて座A*」を含む
 - 回転円盤状構造
- $L=+1.3^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-0.4^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-1.2^\circ$
 - 既知の対応天体なし



4つの「温かく濃密な」分子ガス塊

- Sgr A
 - 中心核「いて座A*」を含む
 - 回転円盤状構造
- $L=+1.3^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-0.4^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-1.2^\circ$
 - 既知の対応天体なし

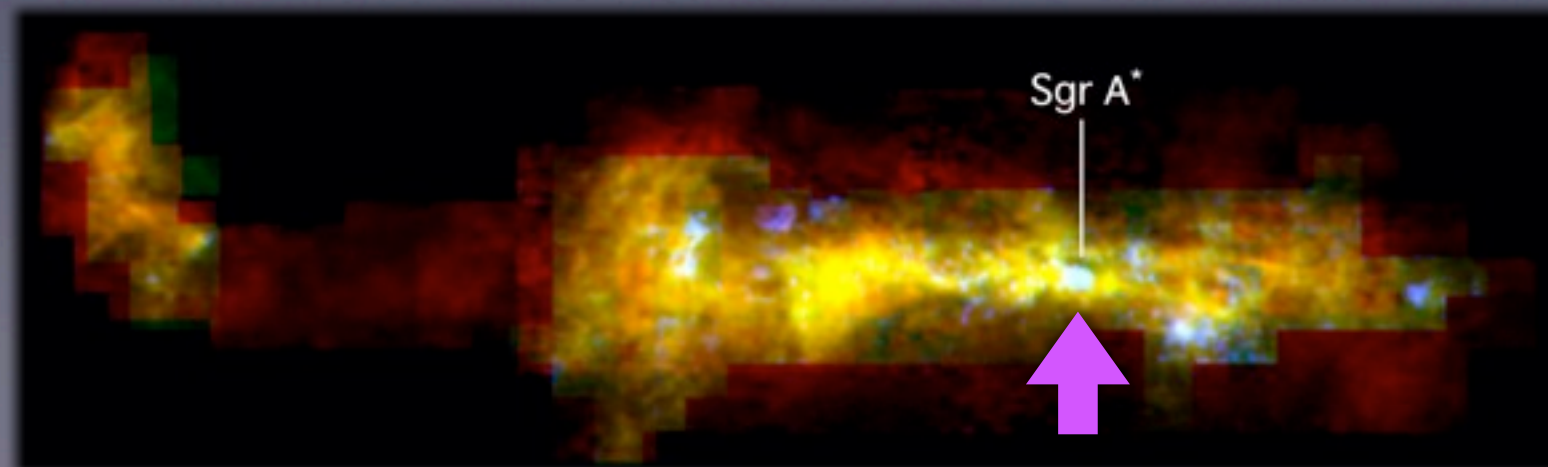
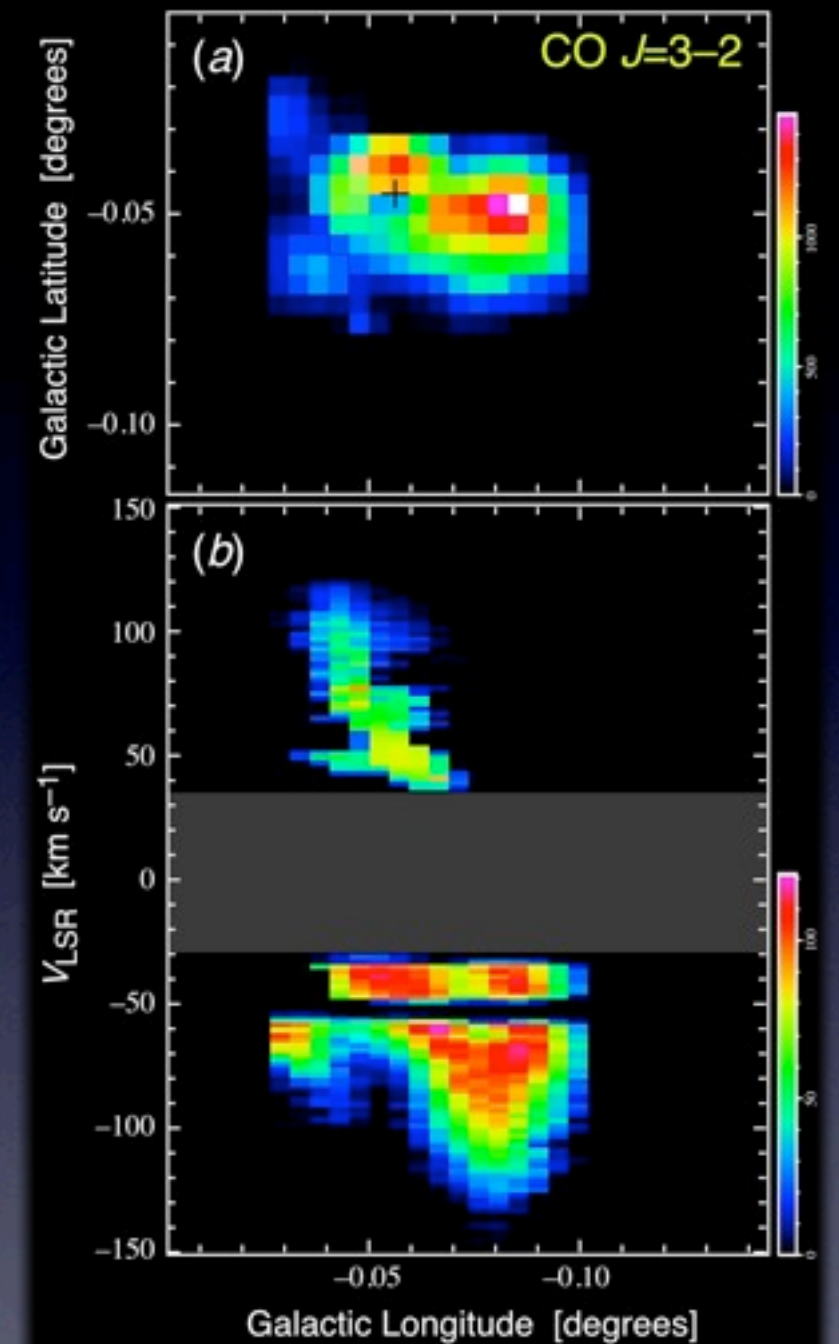


Sgr A

- 「大きな」中心核円盤
 - ドーナツ状の分子塊 + α
 - 回転速度 = 110 km s^{-1}
 - ブラックホールへの落下速度 = $30\sim 60 \text{ km s}^{-1}$
- 巨大ブラックホール周囲の「燃料貯蔵庫」
 - 質量 = 20-60万太陽質量
 - 数十万年後に落下
 - 活動銀河核へ？

赤：115 GHz
緑：346 GHz
青： $R_{3-2/1-0} \geq 1.5$

Oka et al. 2011, ApJ, 732, 120

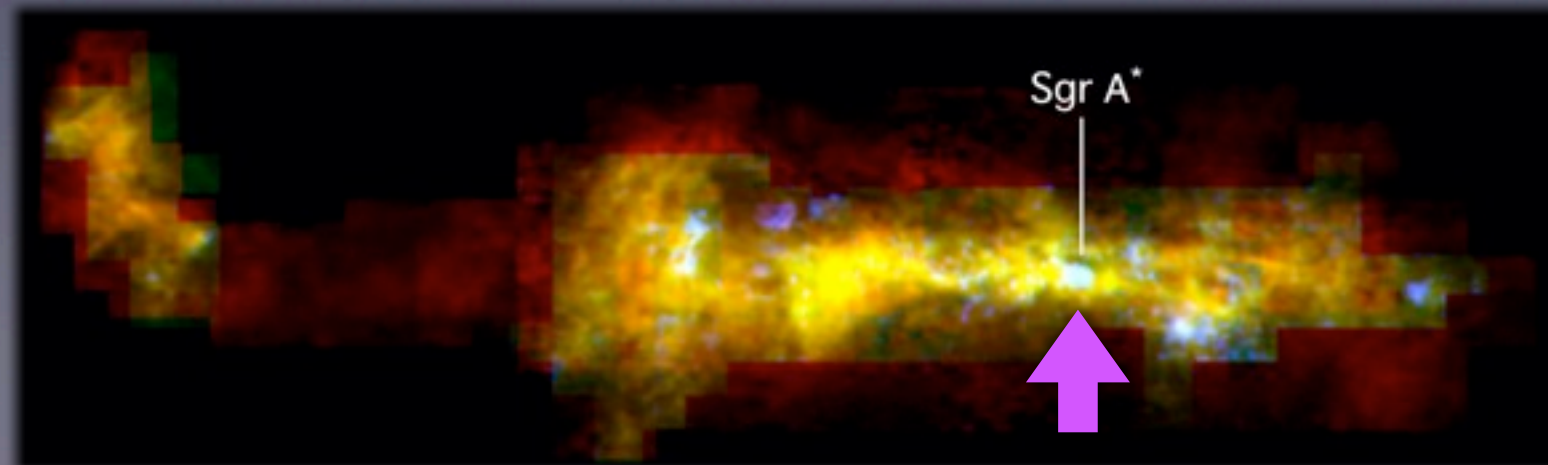
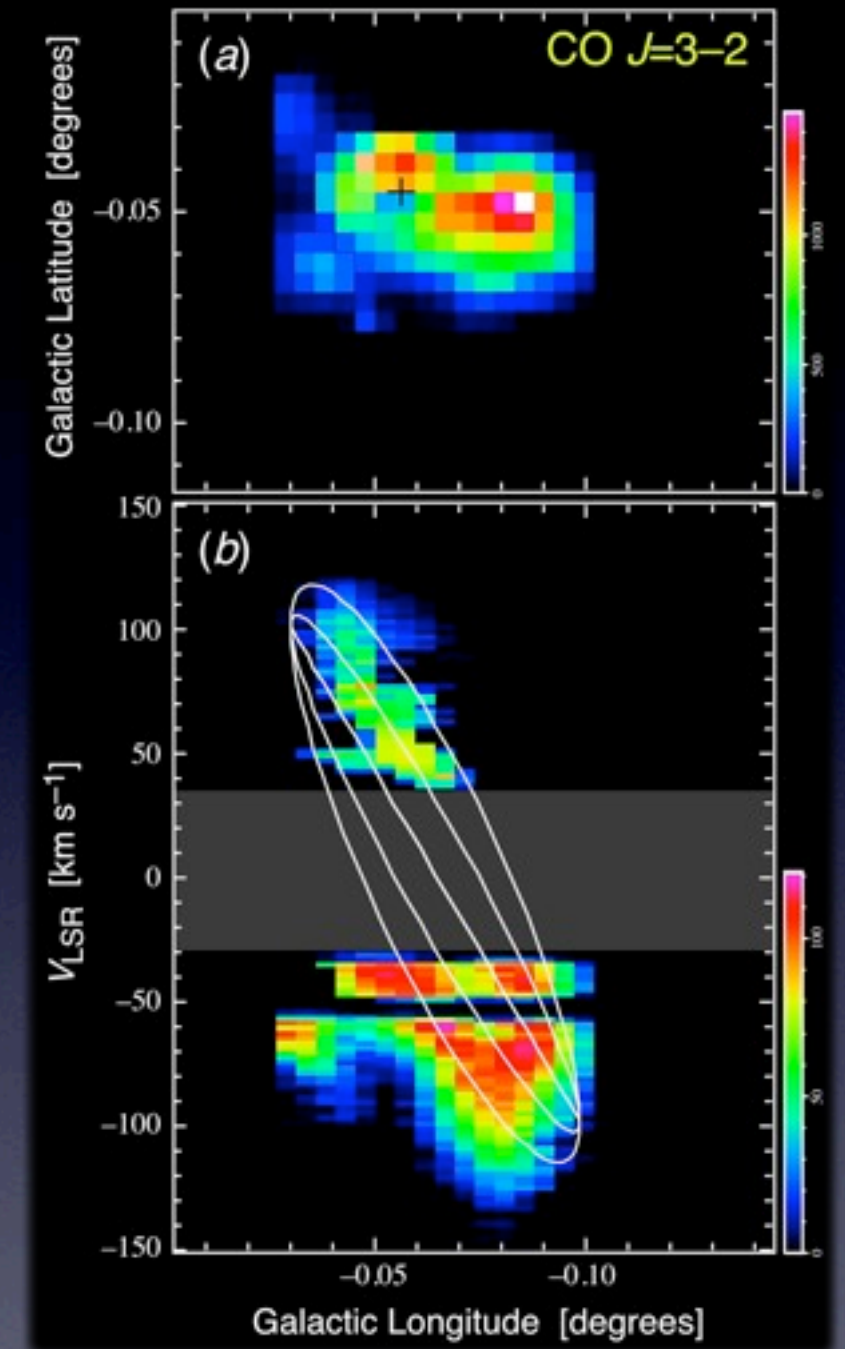


Sgr A

- 「大きな」中心核円盤
 - ドーナツ状の分子塊 + α
 - 回転速度 = 110 km s^{-1}
 - ブラックホールへの落下速度 = $30\sim 60 \text{ km s}^{-1}$
- 巨大ブラックホール周囲の「燃料貯蔵庫」
 - 質量 = 20-60万太陽質量
 - 数十万年後に落下
 - 活動銀河核へ？

赤：115 GHz
緑：346 GHz
青： $R_{3-2/1-0} \geq 1.5$

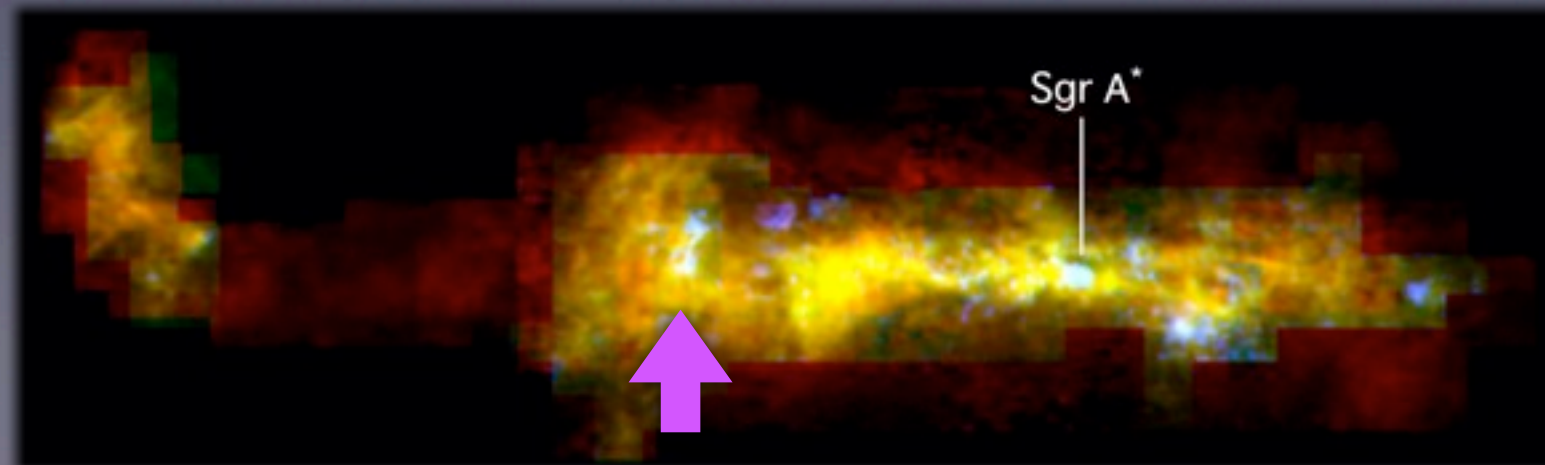
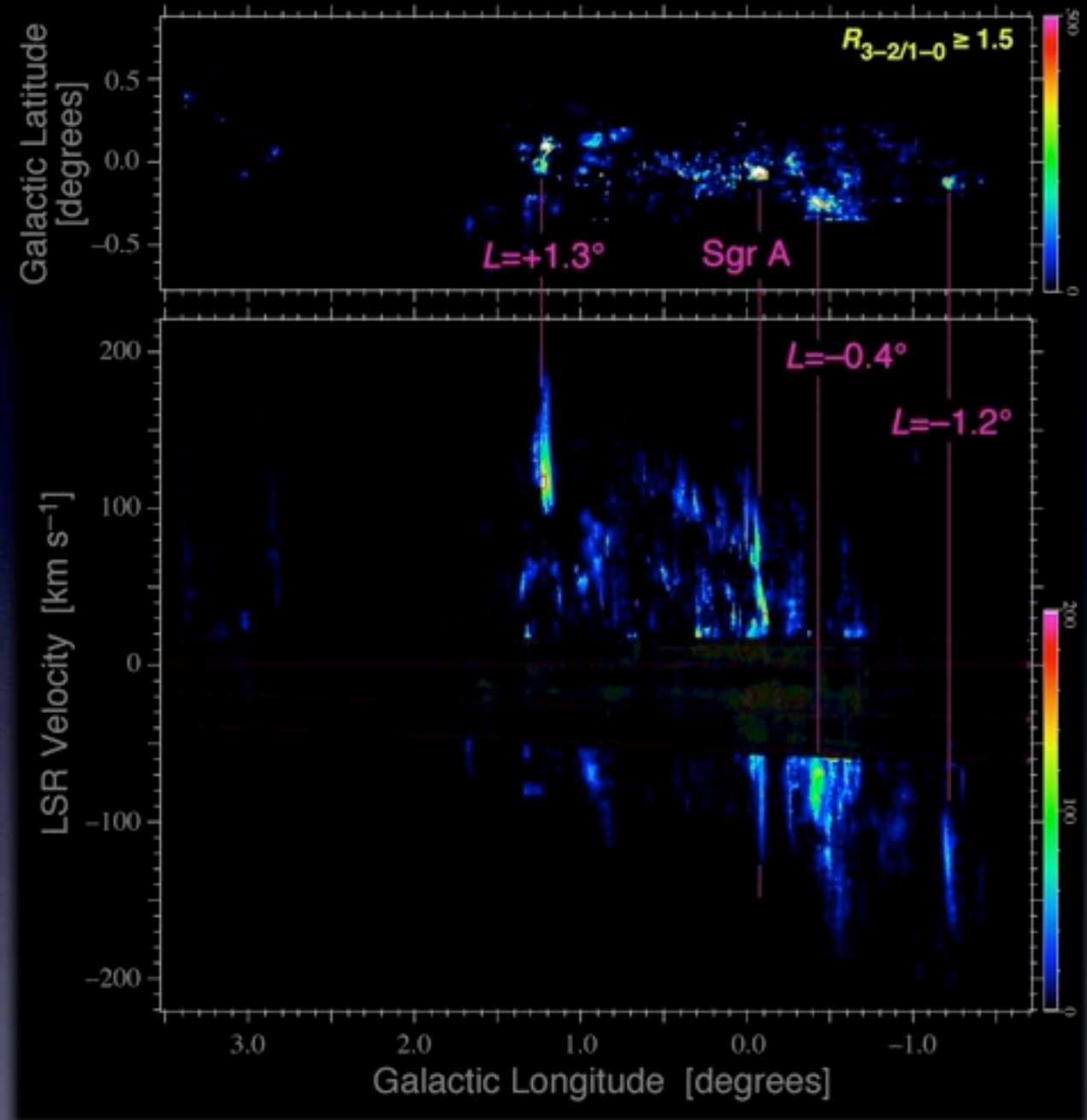
Oka et al. 2011, ApJ, 732, 120



$L = +1.3^\circ$

- 2つの膨張する球殻構造
 - 年齢 = $29 \text{ 光年} \div 70 \text{ km/s} \sim 6 \text{ 万年}$
 - 運動エネルギー = $2 \times 10^{52} \text{ erg}$
- 野辺山45m望遠鏡追観測
 - 高密度ガスに含まれるHCN, HCO⁺分子
 - 少なくとも9つの膨張する球殻構造
 - 衝撃波領域で増加するSiO分子
 - 球殻の速度端にSiO雲

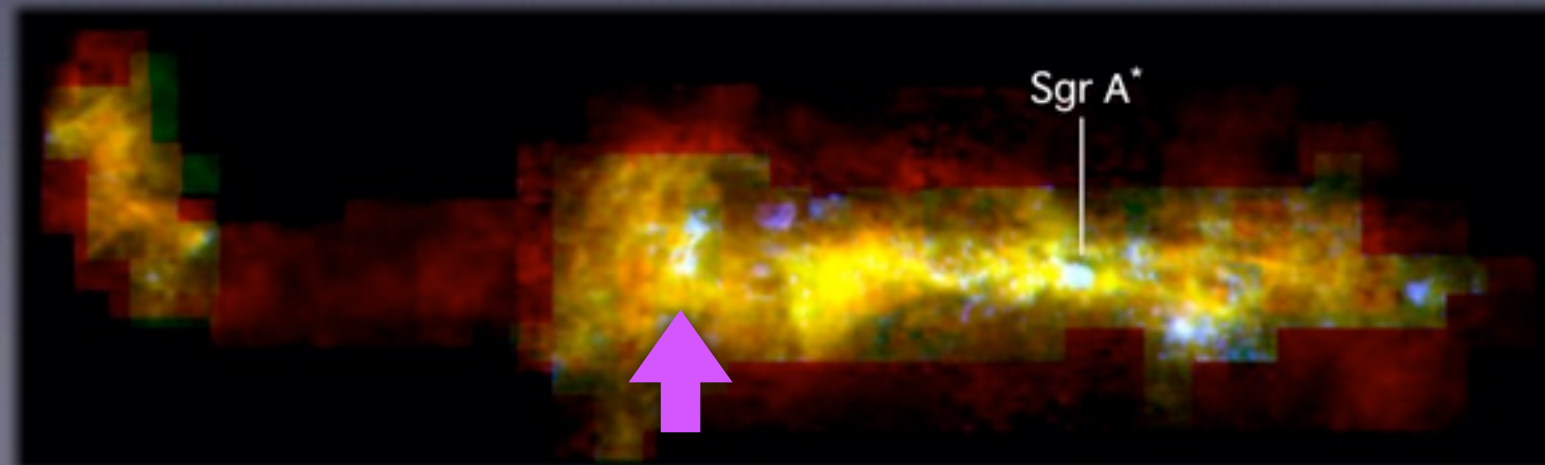
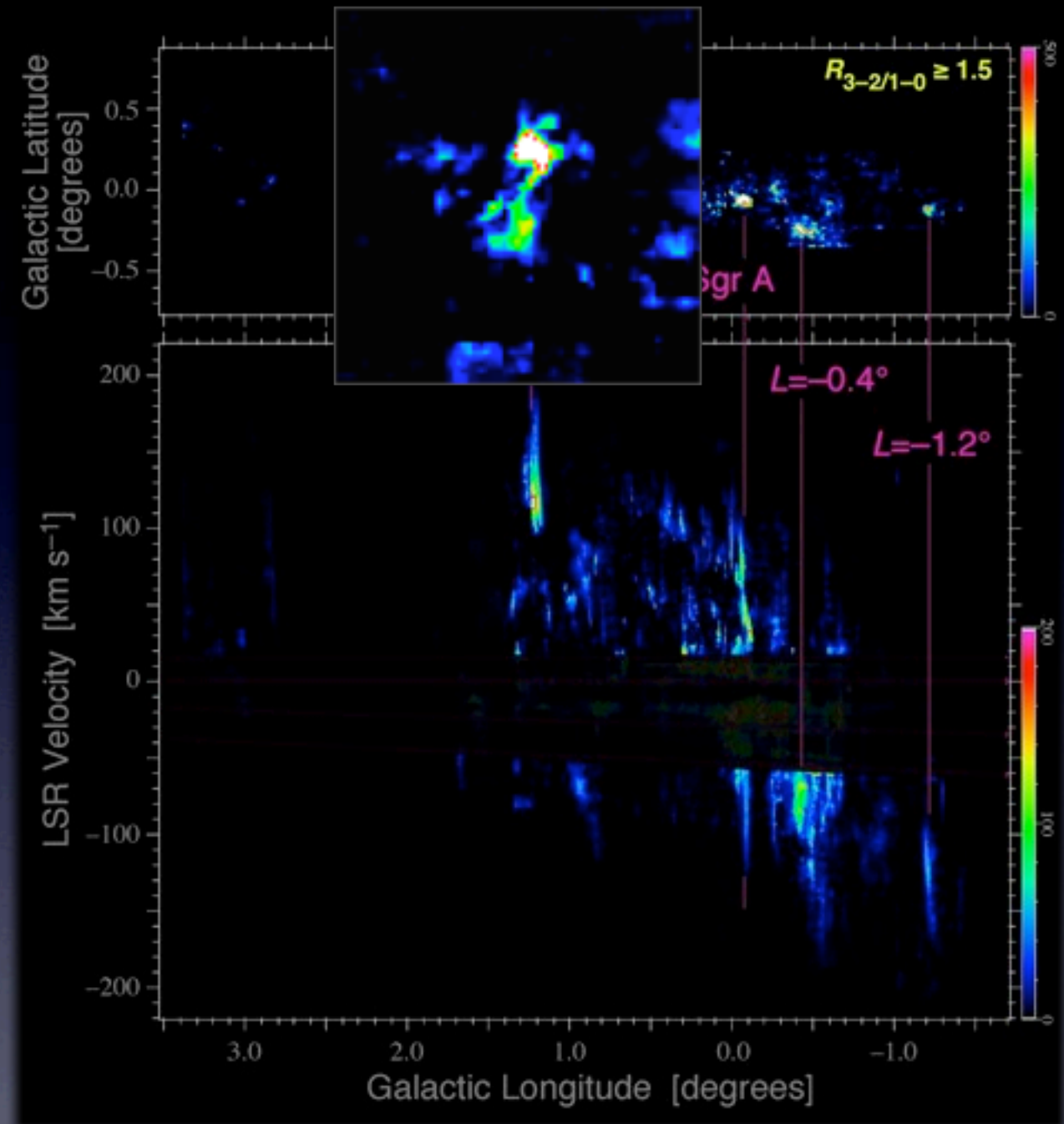
Tanaka et al. 2007, PASJ, 59, 323



$L = +1.3^\circ$

- 2つの膨張する球殻構造
 - 年齢 = $29 \text{ 光年} \div 70 \text{ km/s} \sim 6 \text{ 万年}$
 - 運動エネルギー = $2 \times 10^{52} \text{ erg}$
- 野辺山45m望遠鏡追観測
 - 高密度ガスに含まれるHCN, HCO⁺分子
 - 少なくとも9つの膨張する球殻構造
 - 衝撃波領域で増加するSiO分子
 - 球殻の速度端にSiO雲

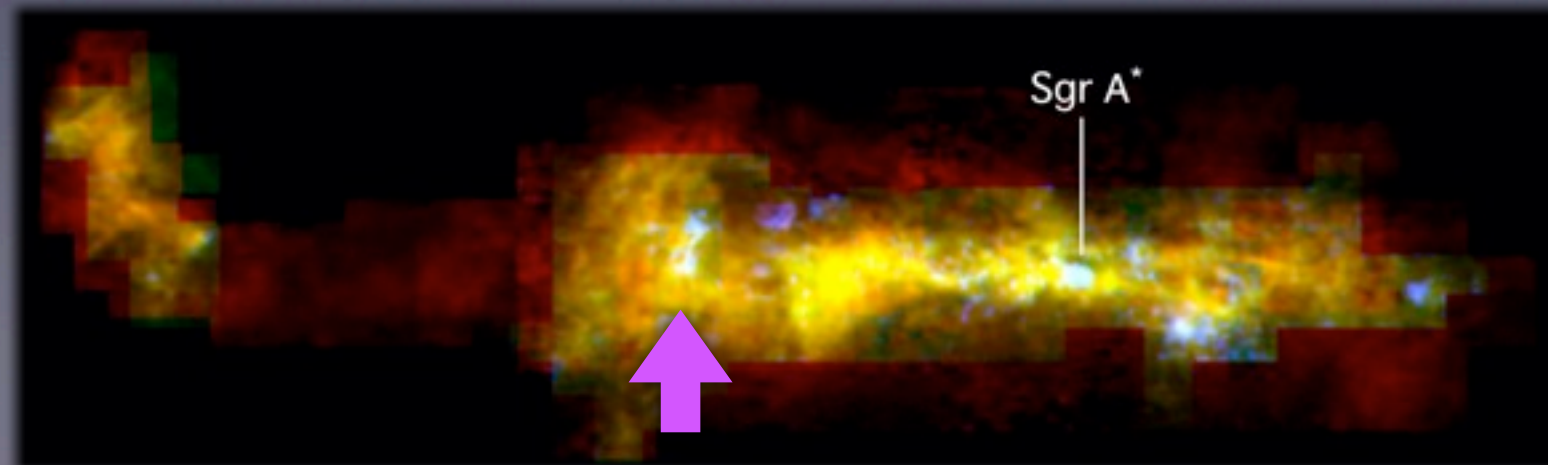
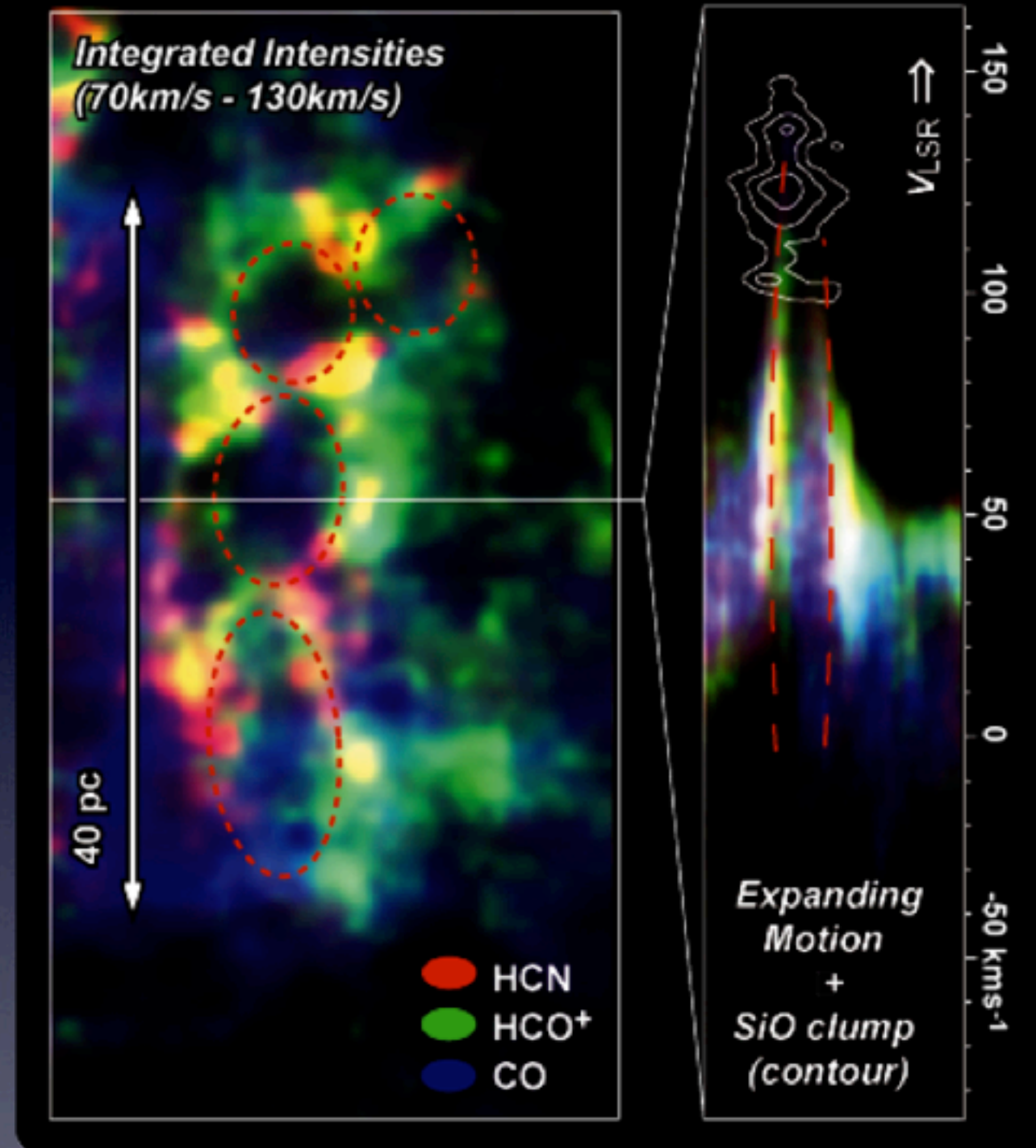
Tanaka et al. 2007, PASJ, 59, 323



$L = +1.3^\circ$

- 2つの膨張する球殻構造
 - 年齢 = $29 \text{ 光年} \div 70 \text{ km/s} \sim 6 \text{ 万年}$
 - 運動エネルギー = $2 \times 10^{52} \text{ erg}$
- 野辺山45m望遠鏡追観測
 - 高密度ガスに含まれるHCN, HCO⁺分子
 - 少なくとも9つの膨張する球殻構造
 - 衝撃波領域で増加するSiO分子
 - 球殻の速度端にSiO雲

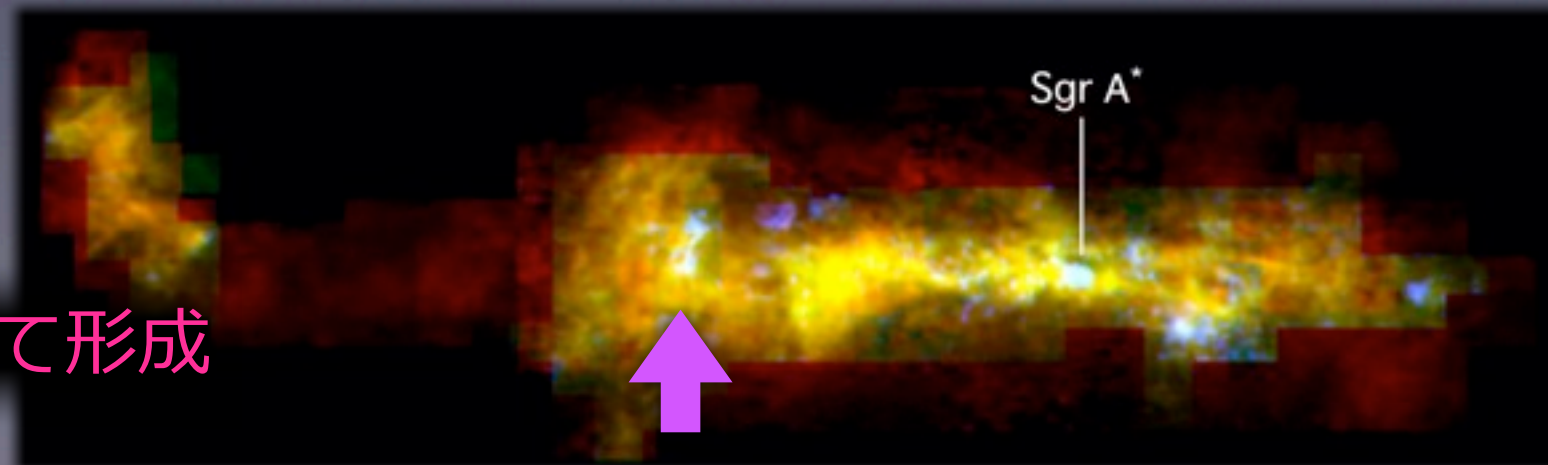
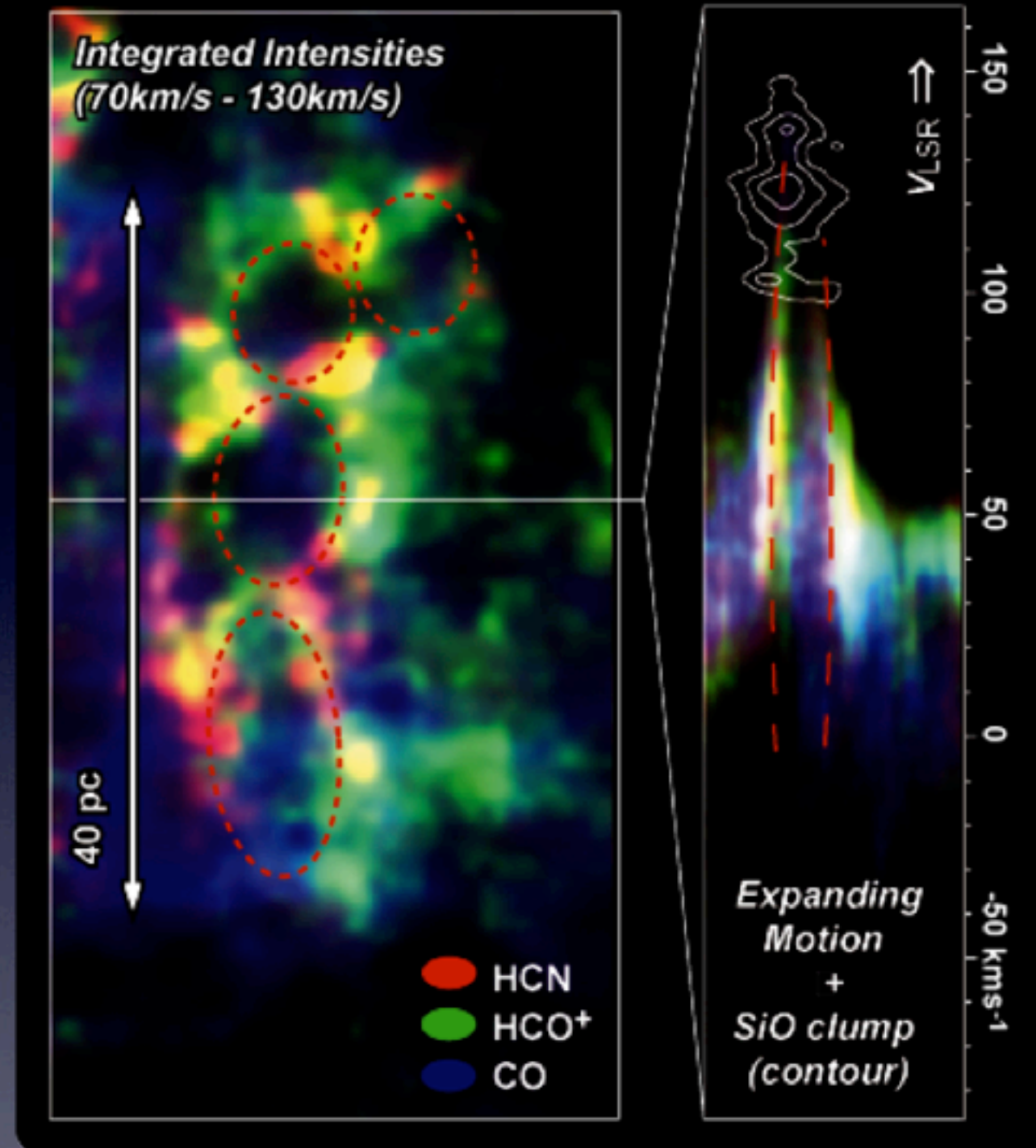
Tanaka et al. 2007, PASJ, 59, 323



$L = +1.3^\circ$

- 2つの膨張する球殻構造
 - 年齢 = $29 \text{ 光年} \div 70 \text{ km/s} \sim 6 \text{ 万年}$
 - 運動エネルギー = $2 \times 10^{52} \text{ erg}$
- 野辺山45m望遠鏡追観測
 - 高密度ガスに含まれるHCN, HCO⁺分子
 - 少なくとも9つの膨張する球殻構造
 - 衝撃波領域で増加するSiO分子
 - 球殻の速度端にSiO雲

• 多重の超新星爆発によって形成



$L = +1.3^\circ$ とは何か？

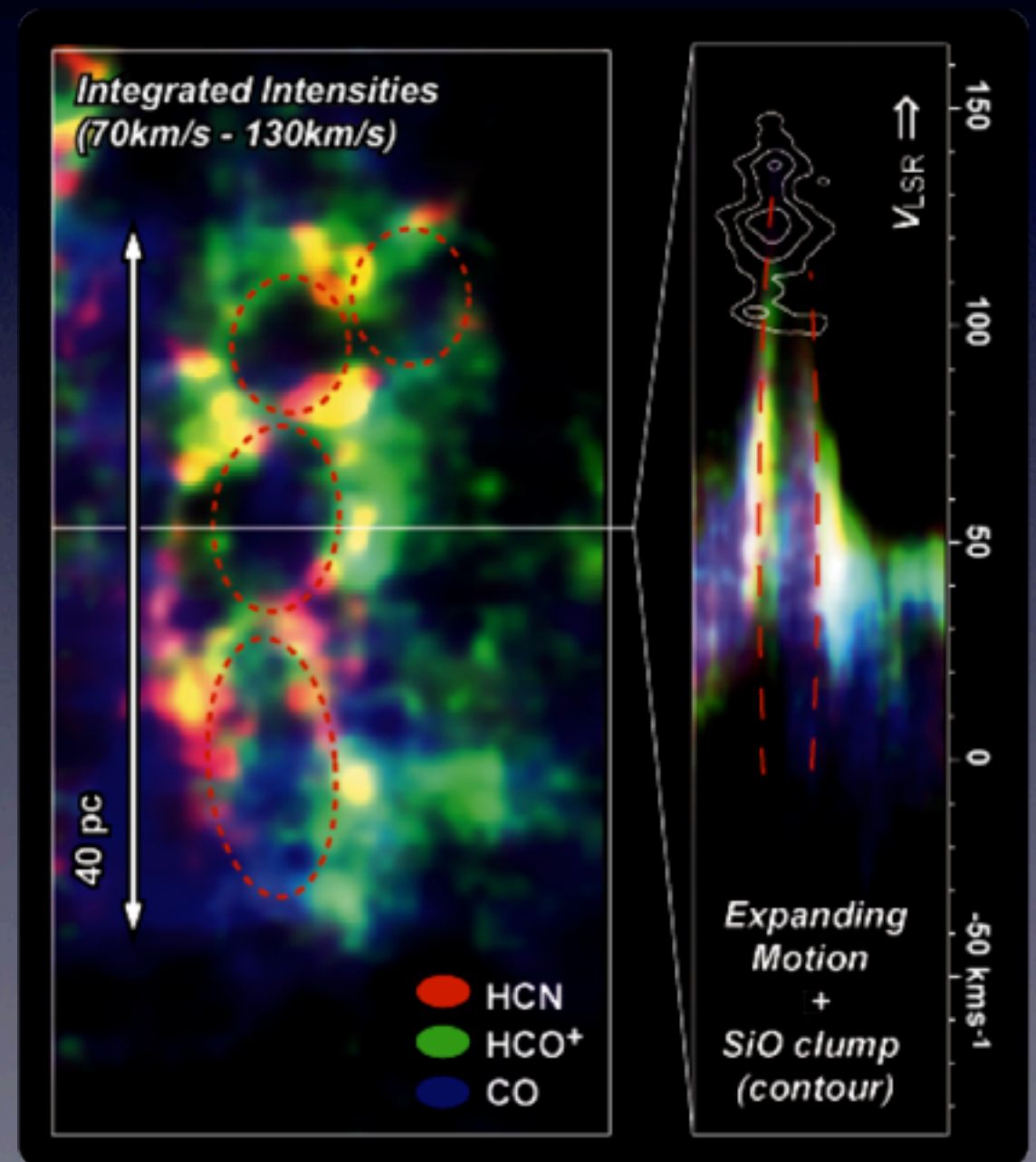
- 超新星発生率

- 超新星数 = 運動エネルギー / ($10^{51} \eta$)
= 50~200個 ($\eta = 0.1 \sim 0.4$: 変換効率)

- 超新星発生率 = 1~3発/千年
 - (天の川銀河全体) = 5~10発/千年

- どれだけの星団が必要か？

- 標準的な質量分布、同じ年齢
- 星団質量 = 数十万~数百万太陽質量



$L = +1.3^\circ$ とは何か？

- 超新星発生率

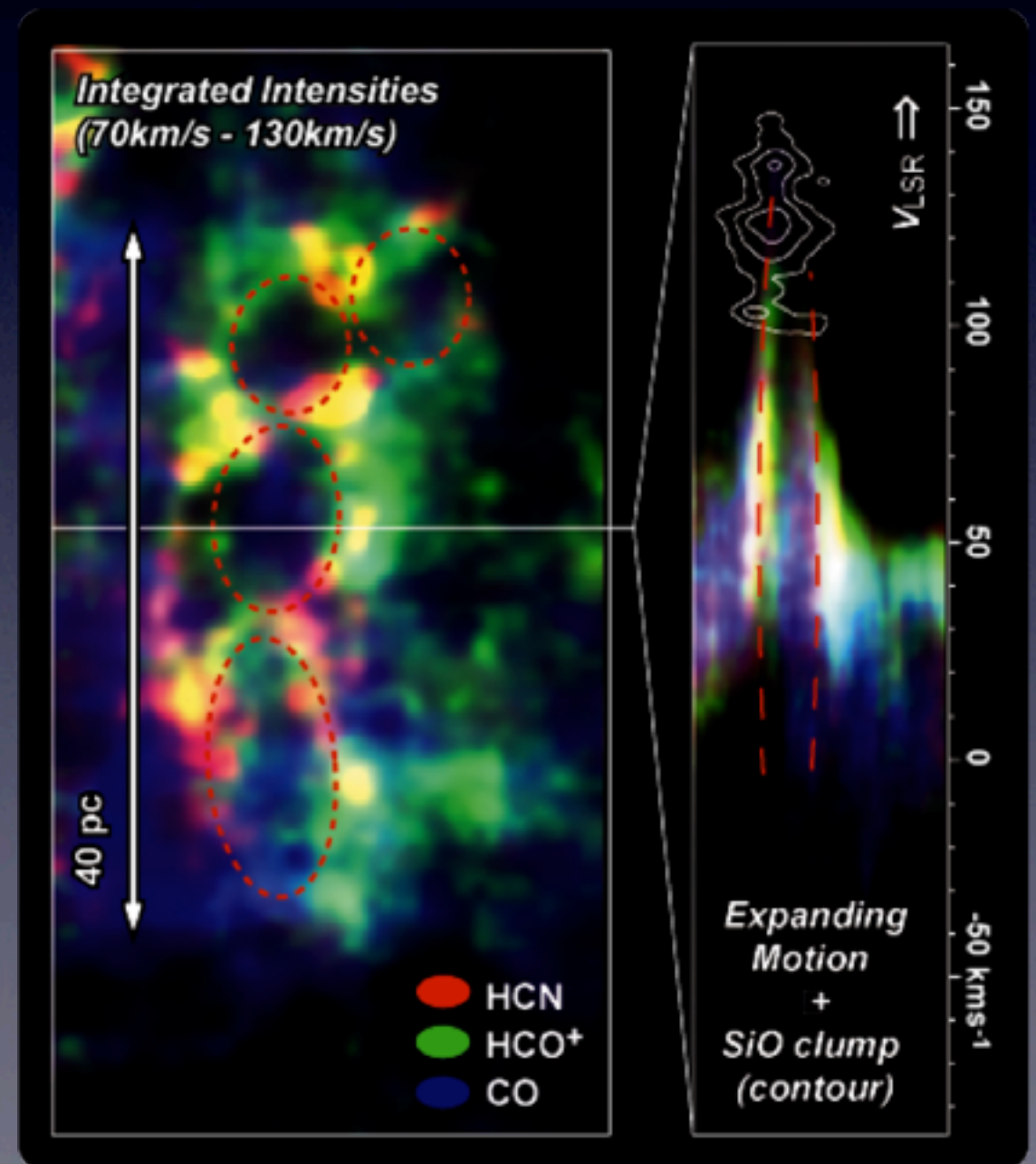
- 超新星数 = 運動エネルギー / ($10^{51} \eta$)
= 50~200個 ($\eta = 0.1 \sim 0.4$: 変換効率)

- 超新星発生率 = 1~3発/千年
 - (天の川銀河全体) = 5~10発/千年

- どれだけの星団が必要か？

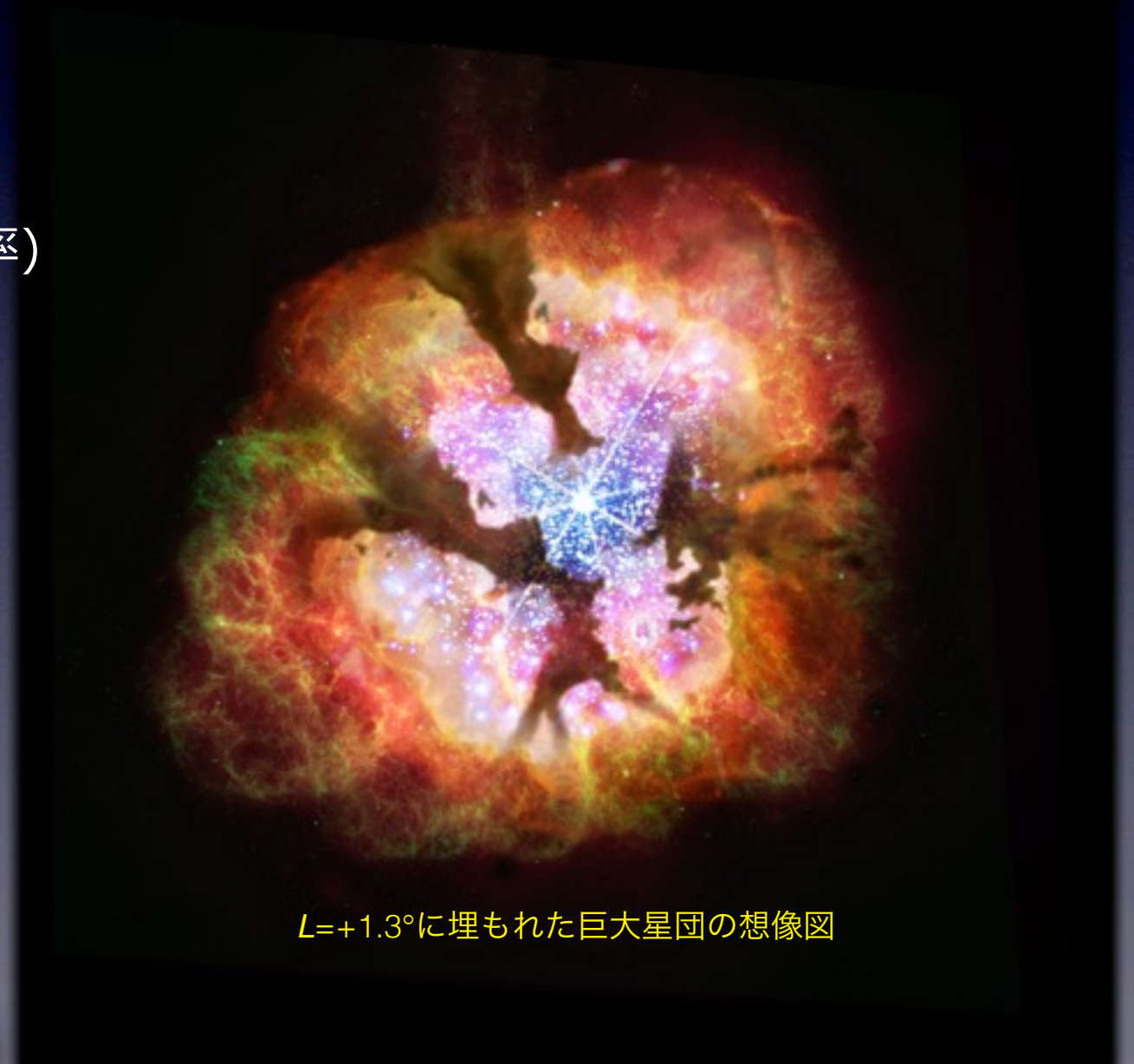
- 標準的な質量分布、同じ年齢
- 星団質量 = 数十万~数百万太陽質量

- **巨大な星団が埋もれている？！**



$L=+1.3^\circ$ とは何か？

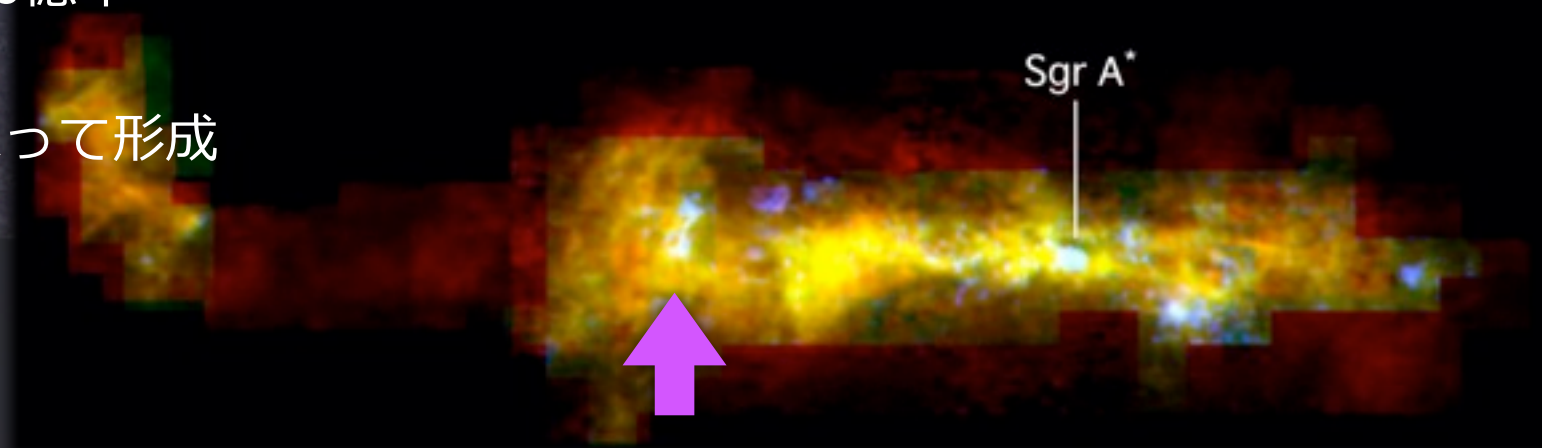
- 超新星発生率
 - 超新星数 = 運動エネルギー / ($10^{51} \eta$)
= 50~200個 ($\eta=0.1\sim0.4$: 変換効率)
 - 超新星発生率 = 1~3発/千年
 - (天の川銀河全体) = 5~10発/千年
- どれだけの星団が必要か？
 - 標準的な質量分布、同じ年齢
 - 星団質量 = 数十万~数百万太陽質量
- **巨大な星団が埋もれている？！**



$L=+1.3^\circ$ に埋もれた巨大星団の想像図

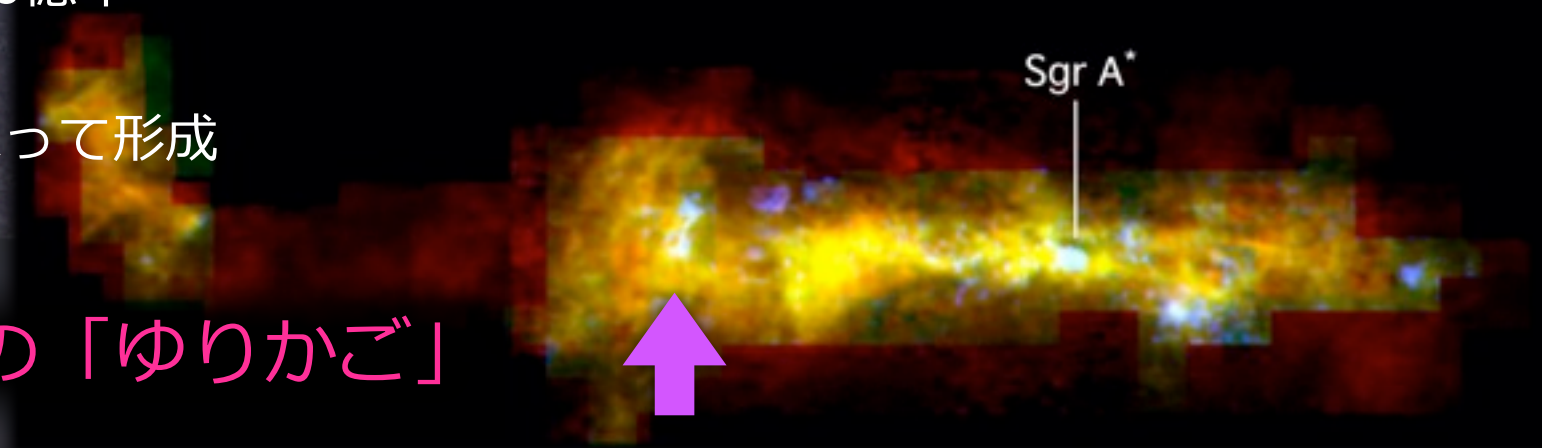
$L = +1.3^\circ$ 星団の正体

- 巨大な球状星団?
 - ω -Centauri (NGC 5139)
 - G1 (M31)
 - 星団の年齢 = 1千万~3千万年
 - II型超新星が起きている
 - 電離ガス星雲が付随しない
- ⇔ 典型的な球状星団の年齢 ~ 100億年
- 銀河中心領域での爆発的星形成によって形成



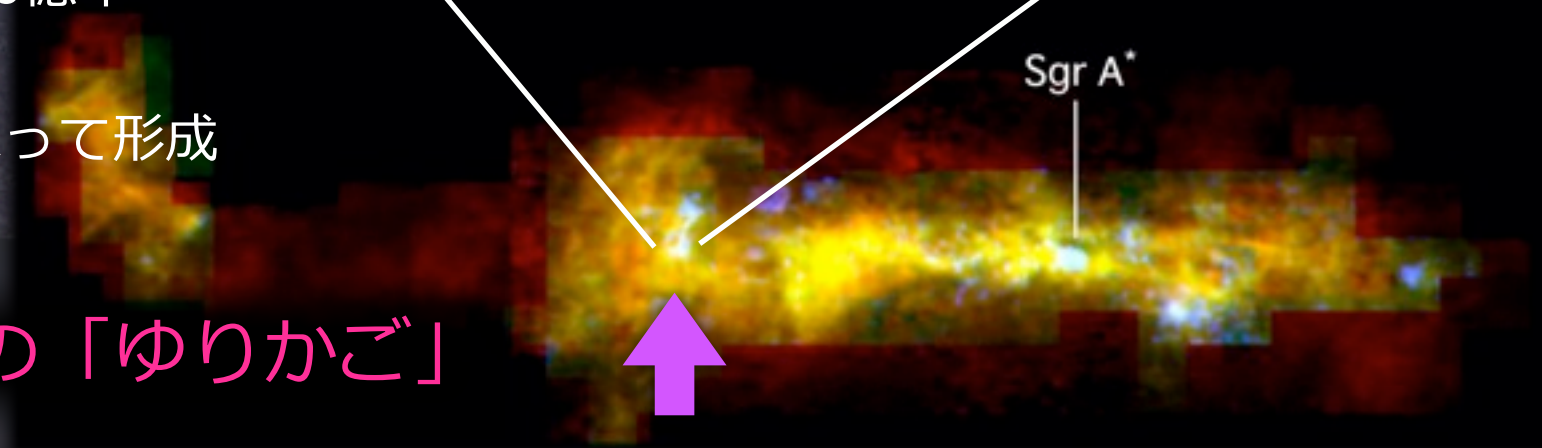
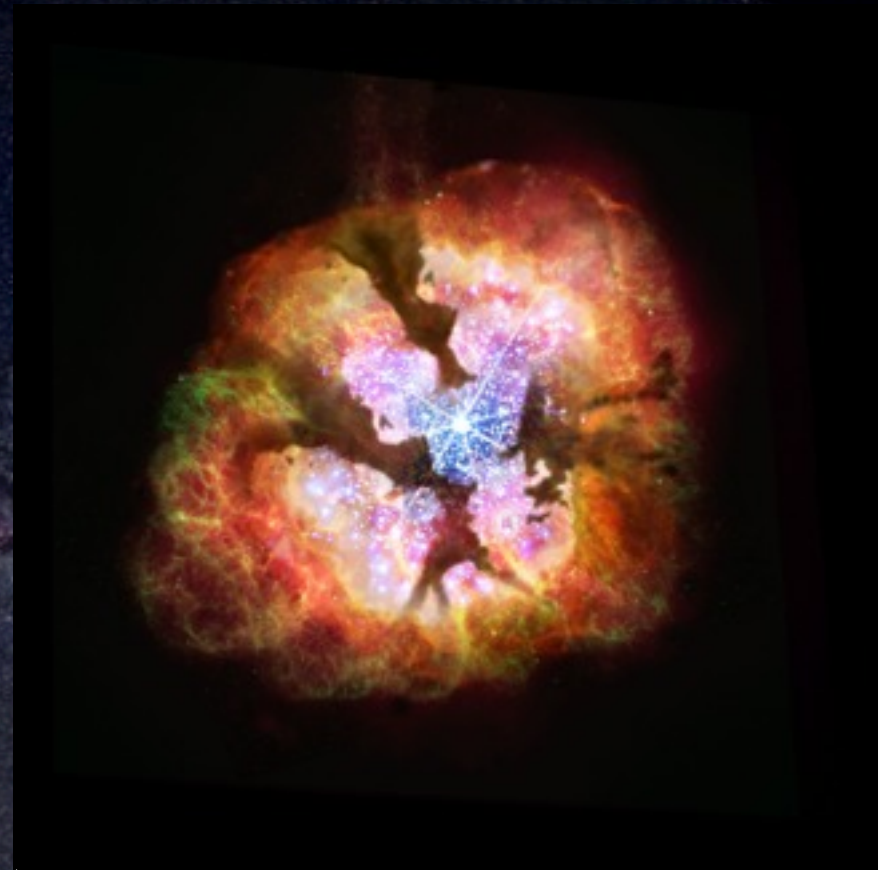
$L = +1.3^\circ$ 星団の正体

- 巨大な球状星団?
 - ω -Centauri (NGC 5139)
 - G1 (M31)
- 星団の年齢 = 1千万~3千万年
 - II型超新星が起きている
 - 電離ガス星雲が付随しない
- ⇔ 典型的な球状星団の年齢 ~ 100億年
- 銀河中心領域での爆発的星形成によって形成
- **中間質量ブラックホールの「ゆりかご」**



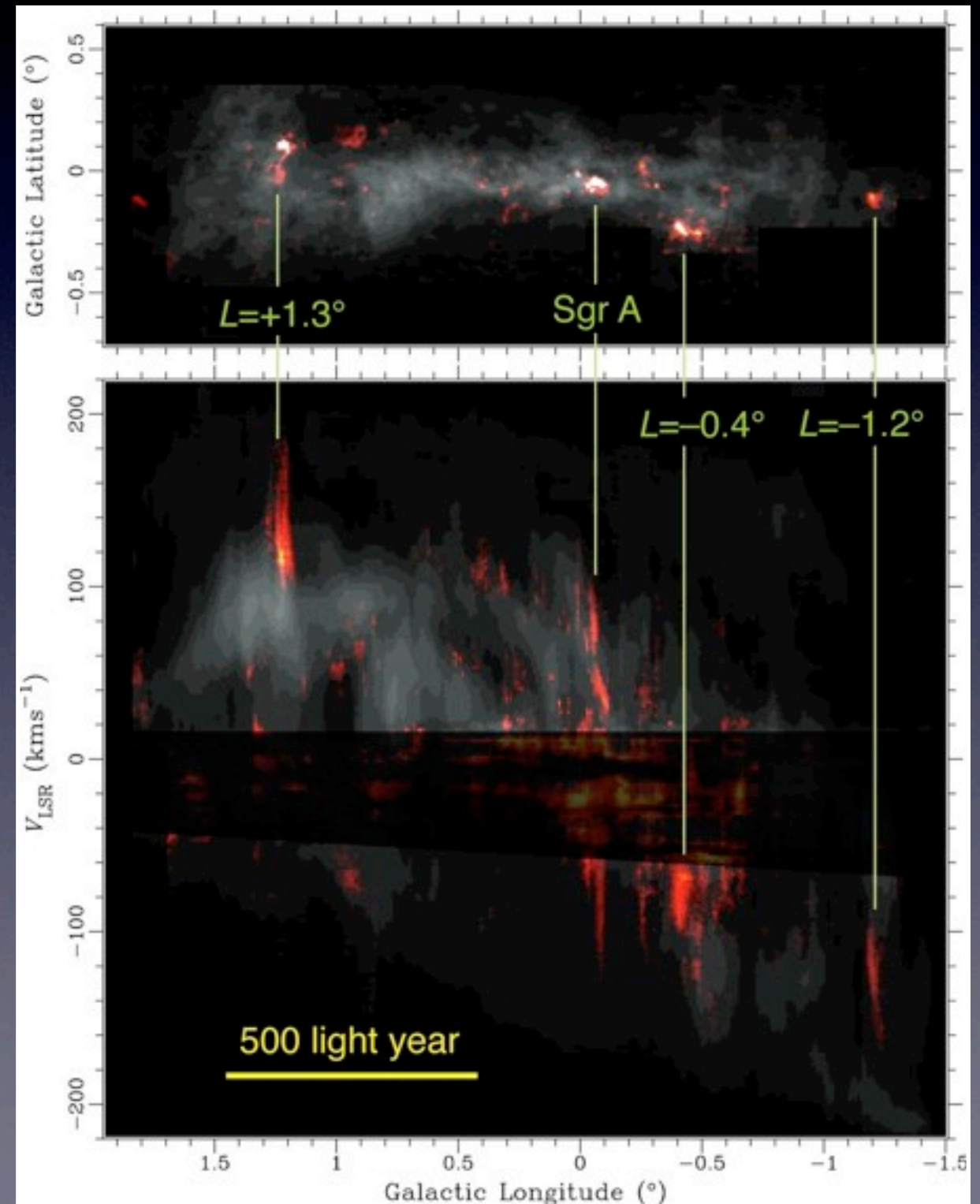
$L = +1.3^\circ$ 星団の正体

- 巨大な球状星団?
 - ω -Centauri (NGC 5139)
 - G1 (M31)
- 星団の年齢 = 1千万~3千万年
 - II型超新星が起きている
 - 電離ガス星雲が付随しない
- ⇔ 典型的な球状星団の年齢 ~ 100億年
- 銀河中心領域での爆発的星形成によって形成
- **中間質量ブラックホールの「ゆりかご」**



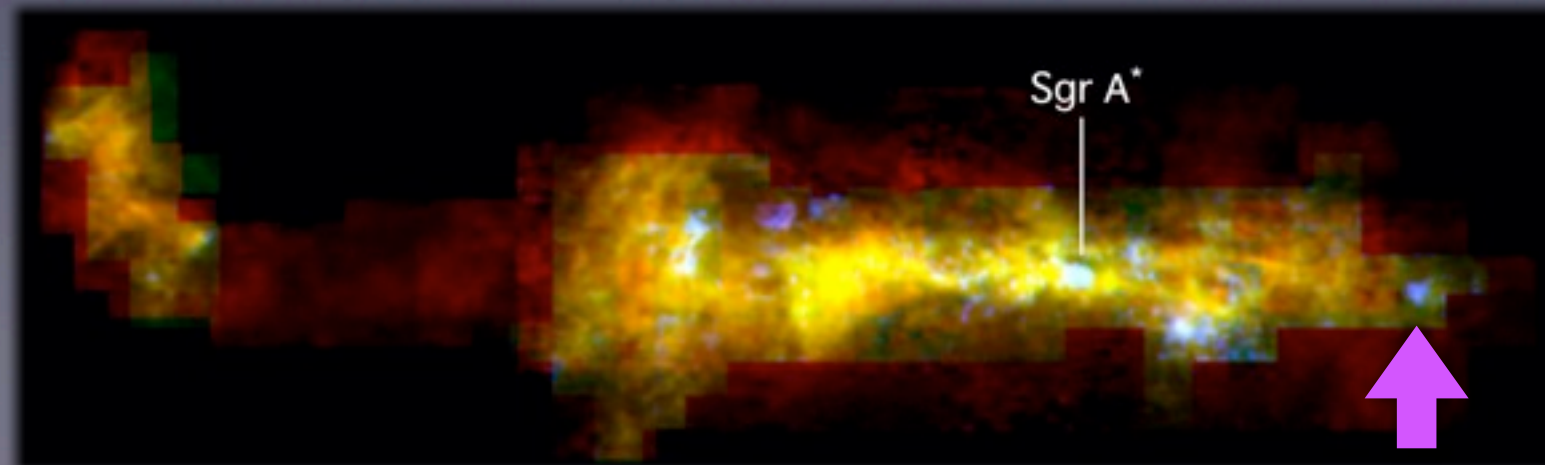
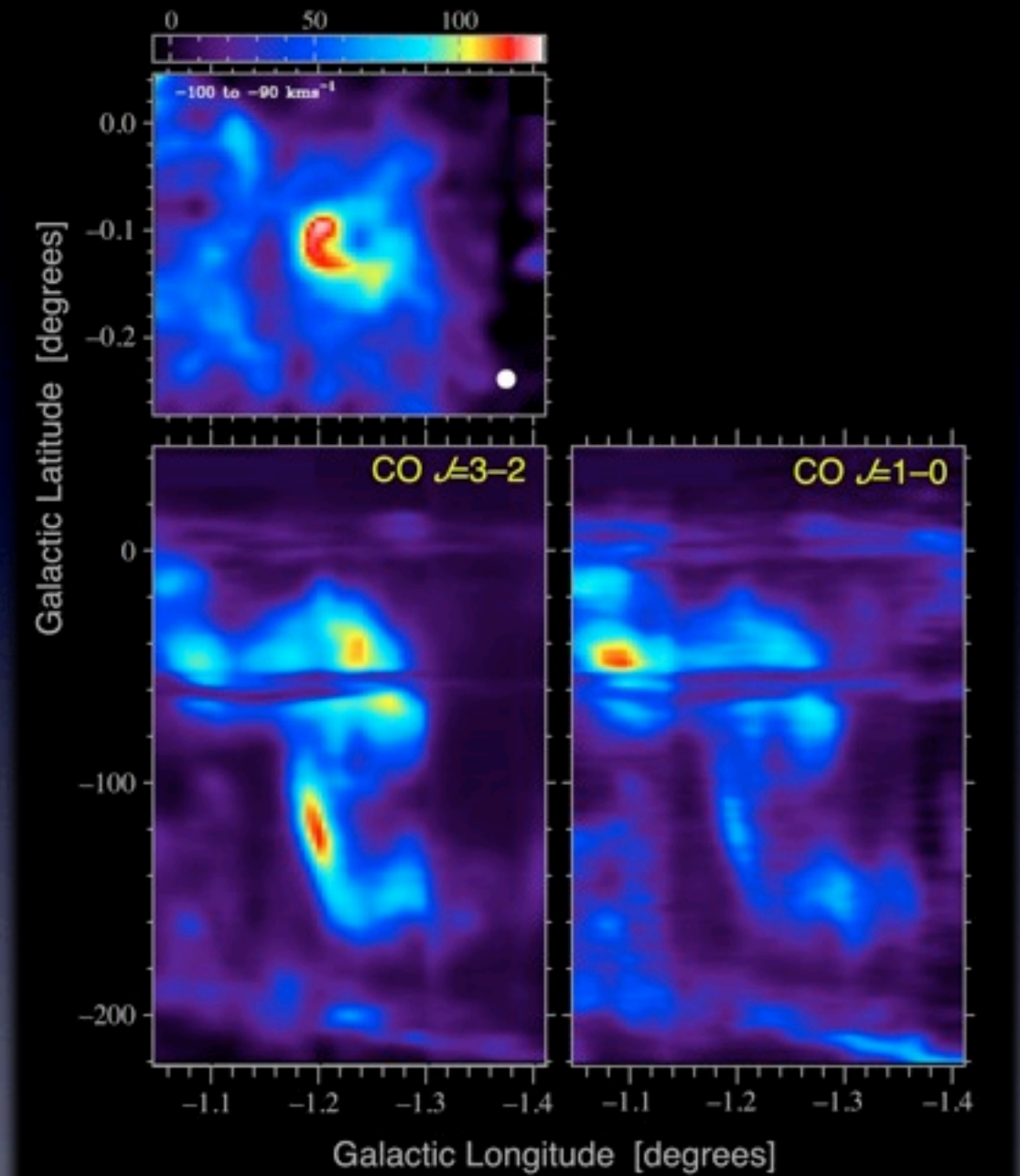
4つの「温かく濃密な」分子ガス塊

- Sgr A
 - 中心核「いて座A*」を含む
 - 回転円盤状構造
- $L=+1.3^\circ$
 - 巨大星団が付随
- $L=-0.4^\circ$
 - 既知の対応天体なし
- $L=-1.2^\circ$
 - 既知の対応天体なし



$$L = -1.2^\circ$$

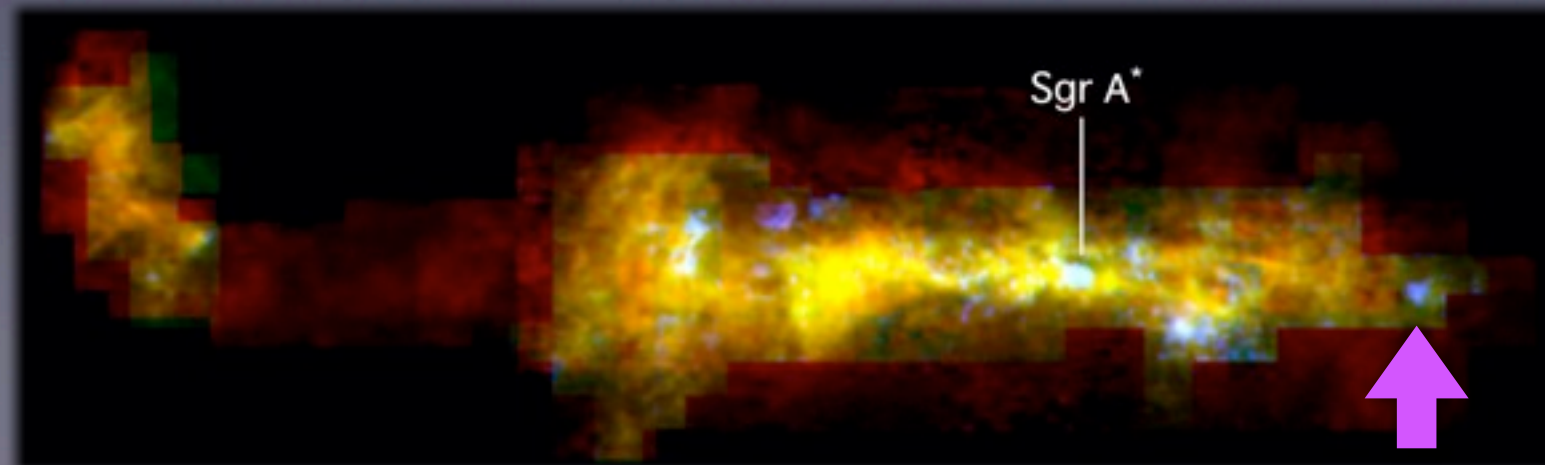
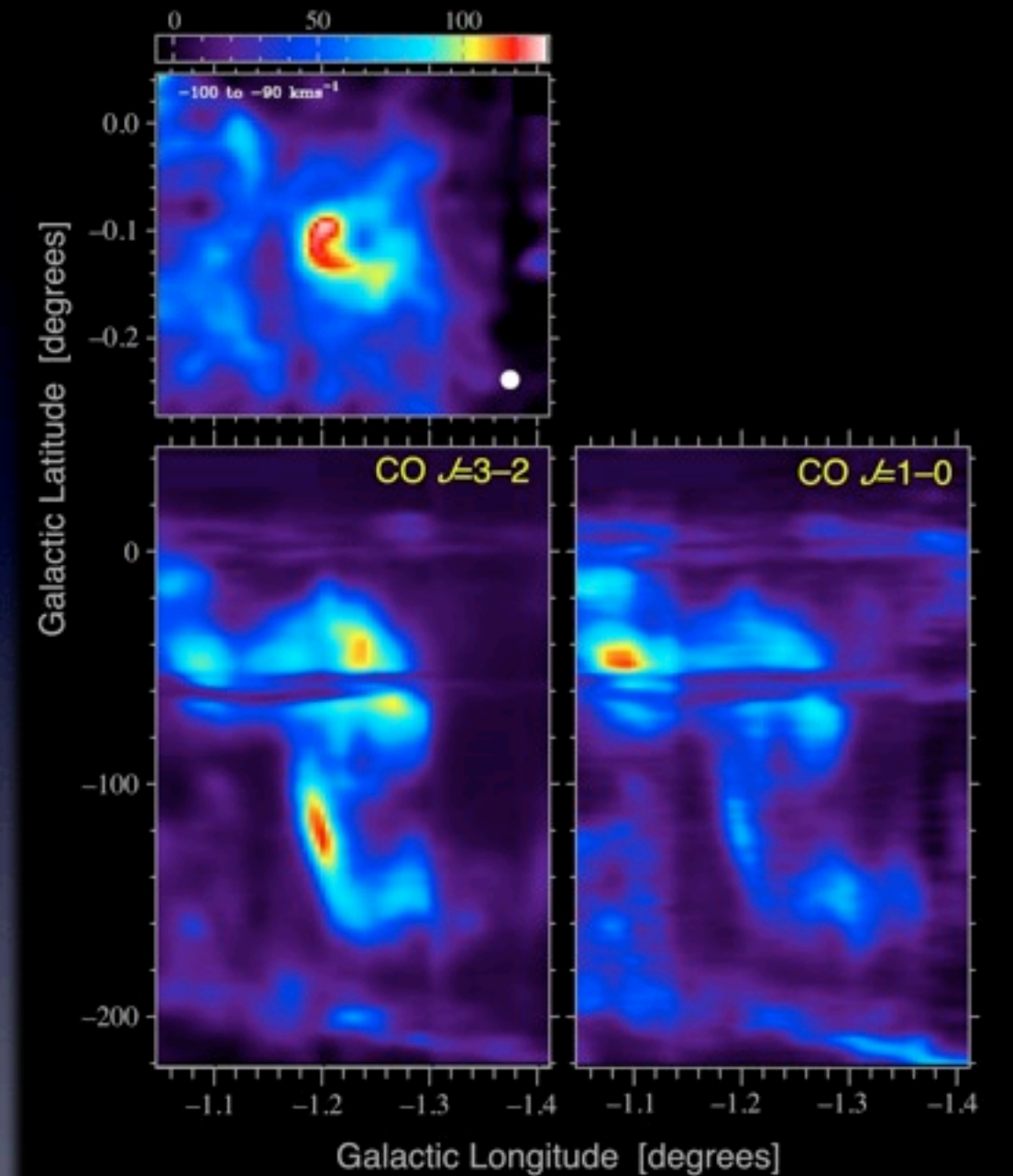
- $L = +1.3^\circ$ の対称位置
- 明瞭な膨張球殻構造
 - 年齢 = 9万年
 - 運動エネルギー $\sim 10^{51}$ erg
- 超新星の数
 - 運動エネルギー / $(10^{51} \eta) = 3 \sim 10$ 個
- 星団質量 = 1万~十万太陽質量



$$L = -1.2^\circ$$

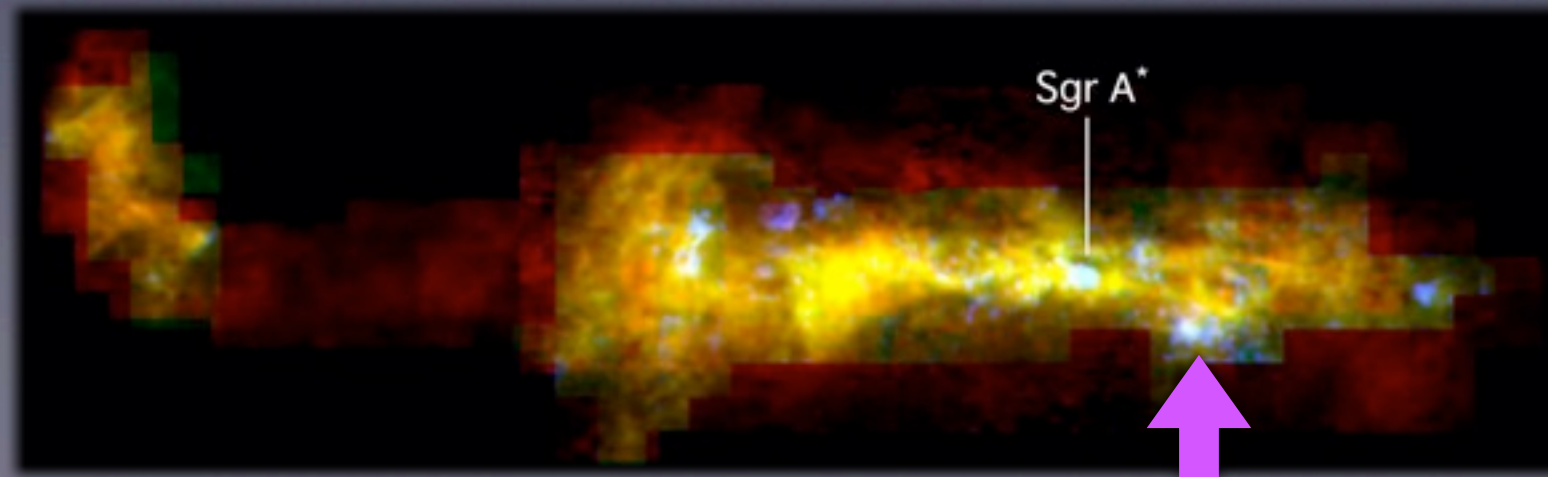
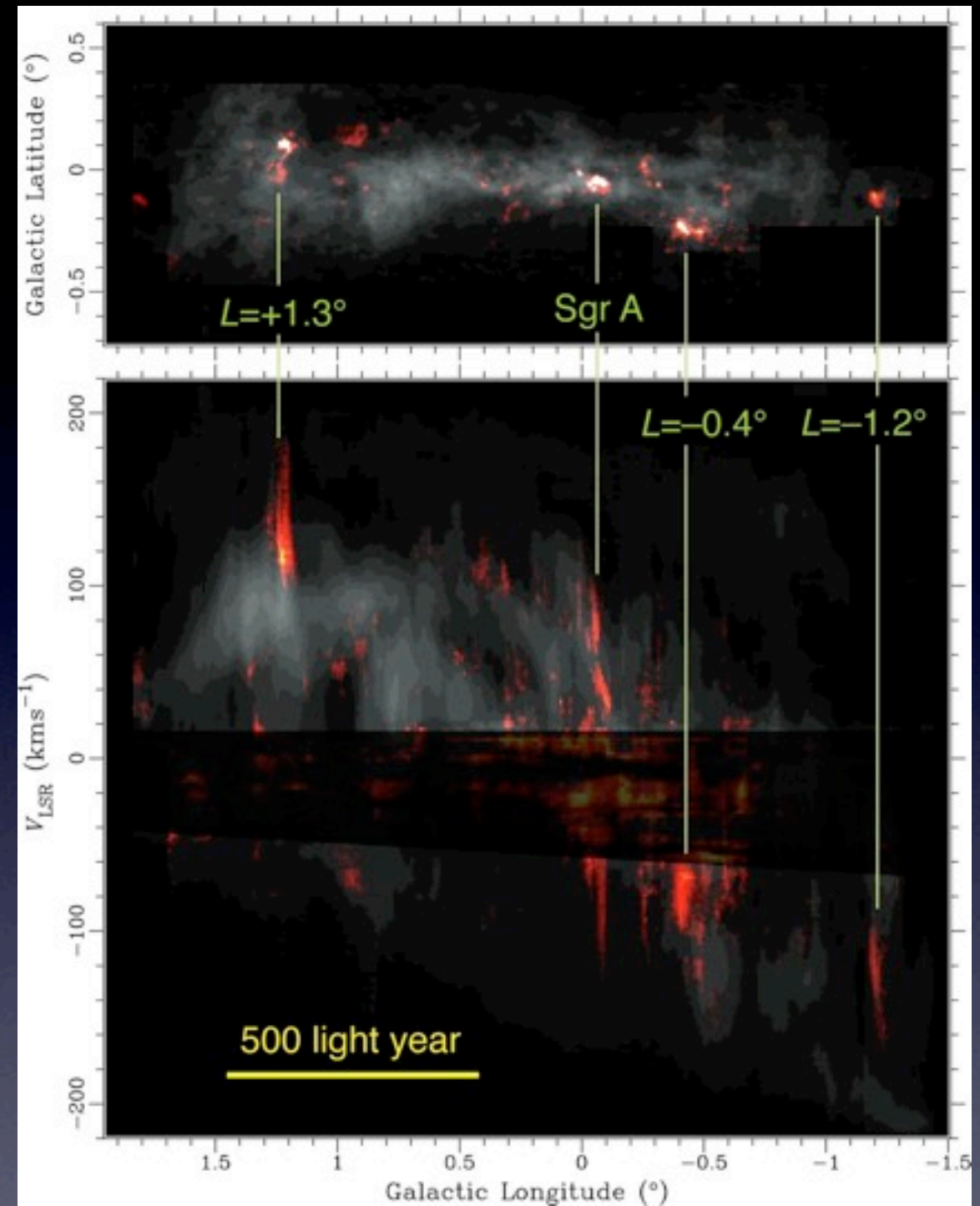
- $L = +1.3^\circ$ の対称位置
- 明瞭な膨張球殻構造
 - 年齢 = 9万年
 - 運動エネルギー $\sim 10^{51}$ erg
- 超新星の数
 - 運動エネルギー / $(10^{51} \eta) = 3 \sim 10$ 個
- 星団質量 = 1万~十万太陽質量

- **ここにも巨大な星団**



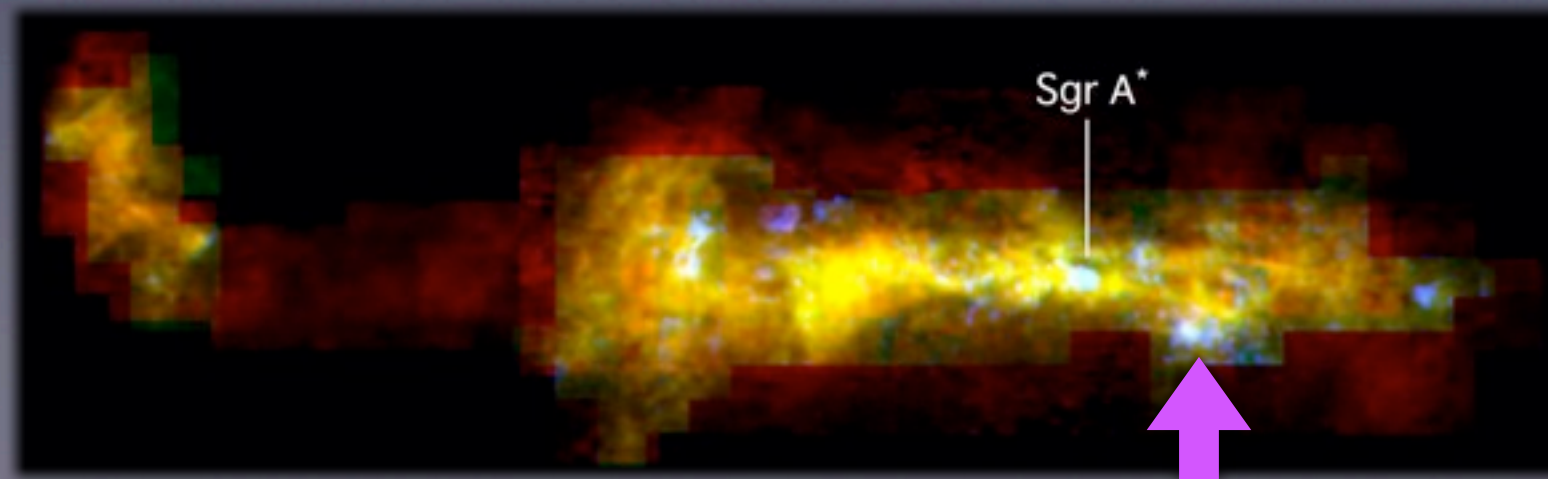
$$L = -0.4^\circ$$

- やや大きめ半球殻構造
 - 直径 ~ 50光年
 - 内部構造は複雑
- コンパクトな二つの雲
 - 異常な速度幅
 - 回転運動の気配
 - 巨大な「見えない質量」？



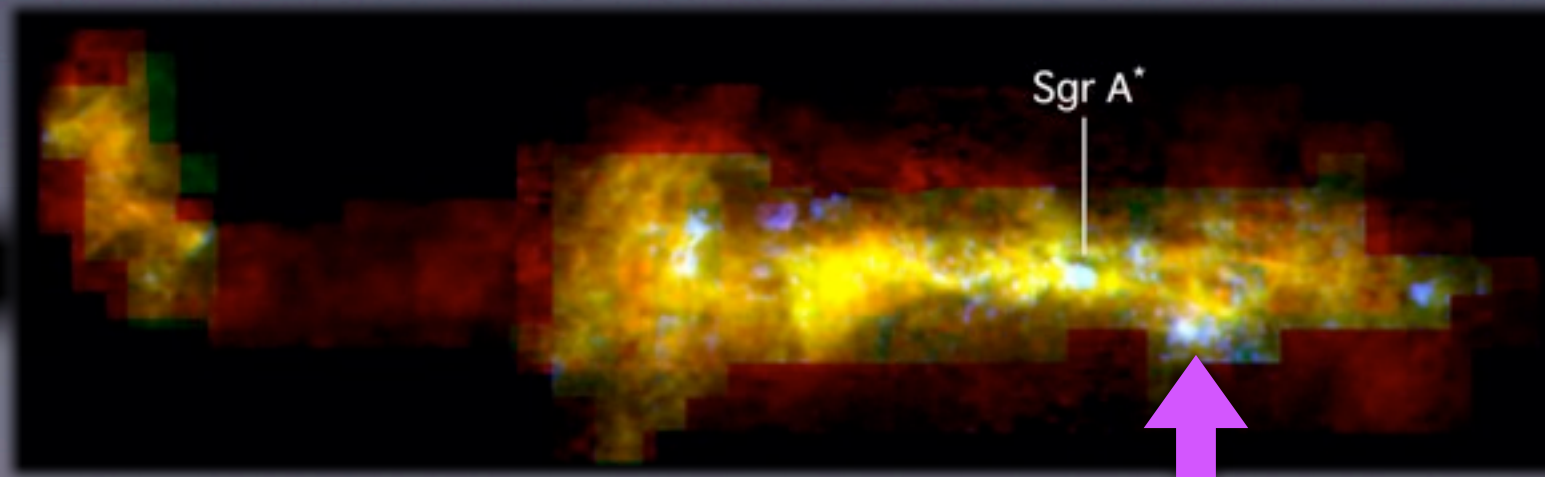
$$L = -0.4^\circ$$

- やや大きめ半球殻構造
 - 直径 ~ 50光年
 - 内部構造は複雑
- コンパクトな二つの雲
 - 異常な速度幅
 - 回転運動の気配
 - 巨大な「見えない質量」?



$$L = -0.4^\circ$$

- やや大きめ半球殻構造
 - 直径 ~ 50光年
 - 内部構造は複雑
- コンパクトな二つの雲
 - 異常な速度幅
 - 回転運動の気配
 - 巨大な「見えない質量」?
- 中間質量ブラックホール?



ALMAによる高分解能撮像観測

- アタカマミリ波サブミリ波干渉計
 - チリ共和国北部、アタカマ高地
 - 東アジア・北米・欧州
- 分子スペクトル線高分解能撮像
 - 詳細な分布・運動の把握
 - 回転/ 膨張/ 乱流
 - 中間質量ブラックホール探査



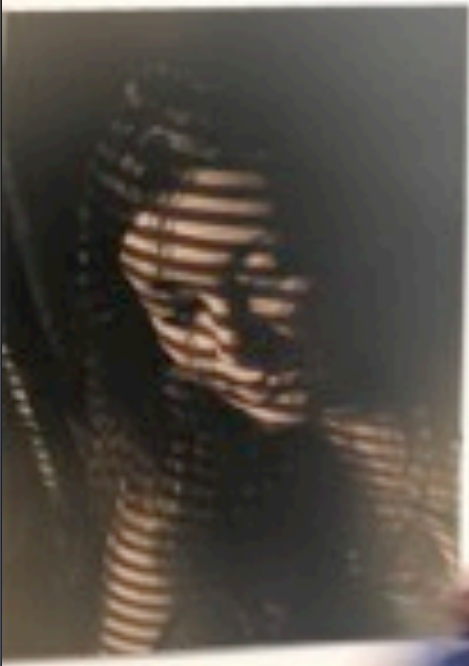
悩みをまとめると…

- 「高速度コンパクト雲」とは何か？
 - 膨張運動か、回転運動か？
- 「温かく濃密な」分子ガス塊との関係は？
 - 多重の超新星爆発によって形成 → 巨大星団が付随
 - 中間質量ブラックホールの「ゆりかご」？
- 中間質量ブラックホール探査の可能性
 - ALMAによる高解像度観測に期待



Sgr A*





PHOTOFUNIA
photofunia.com

PHOTOFUNIA is a leading online photography marketplace and community. It provides a platform for photographers to sell their work and for buyers to purchase high-quality images. The site features a wide range of categories, from stock photography to fine art, and offers a secure and easy-to-use transaction process.



Thank you for listening.