

ミリ波で見る誘発的星形成

丹羽隆裕 (八戸高専)

2012年 第42回天文・天体物理若手 夏の学校 @ 福
井県東尋坊温泉三国観光ホテル (Aug 1 - 4, 2012)

はじめまして？

名前： 丹羽隆裕（にわたかひろ）

現職： 八戸工業高等専門学校（高専）
総合科学科（＝一般教養学科） 助教

出身： 愛知県春日井市

経歴： 豊田高専電気工学科 → 神戸大学（学部、院）
→ 兵庫県立西はりま天文台（研究員） → 現職

専門分野：

- * 赤外線／電波天文学
反射星雲、輝線星雲内での誘発的星形成
- * 天文教育、天文を利用した地域貢献

かつての仕事① 「公開」 天文台として

- 毎日：観望会、貸し出し望遠鏡の操作指導（シフトで交替）
観望会での「天然プラネタリウム」、なゆた望遠鏡での解説
立場上、「地方公務員」予算立てとか発注とか、折衝とか…
- 週末：昼間の星の観望会、施設ガイドツアー

基本的には

相手に

…と

研究者

(さ

個人的な印



佳園

いは

と

出か



者まで

多い

天文台業務：自分の研究 = 9 : 1 (春から初冬まで)

天文台業務：自分の研究 = 7 : 3 (初冬から春まで)

かつての仕事②（一応） 研究者として

一応、部署がある…天文観測技術係（丹羽を含めて2名）

近赤外線3色同時撮像／偏光装置（NIC）のソフトウェア開発

「公開天文台の研究者」としての普及活動

町役場（環境推進課）からの講師依頼

2010年カレンダー作成（レイアウト、デザイン）

定例イベントでの星空解説、クイズ大会など

星空案内、解説用の音声ポッドキャストの収録、配信

現在の仕事 高専の先生として

相手

15歳（高校1年）～20歳（大学2年生）まで

講義：物理学

物理Ⅰ～Ⅲ, 応用物理Ⅰ～Ⅴ

$F=ma$ から シュレディンガー方程式（の手前）まで

部活の顧問：

女子バレーボール部、演劇部、天文愛好会

大会の引率、部会への出席などなど…結構目白押し

寮での教育：

委員会への出席（週1回）、宿直（月1回）

その他：

講義の質問、学生の相談、講義の準備、などなど…

はじめに

星形成の「現場」…分子雲

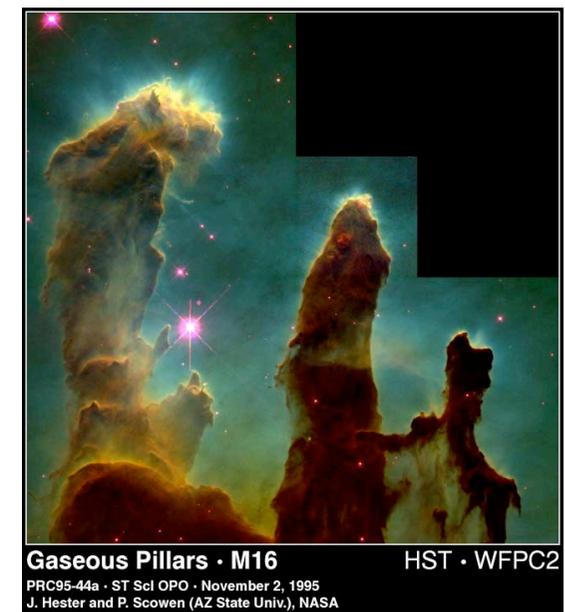
周囲の空間（星間空間）よりも
密度の高い「水素ガスの固まり」

$$n \approx 10^3 \sim 10^4 \text{cm}^{-3}$$

分子雲の中でも特に密度が高い部分（=分子雲コア）が、
自身の重力でつぶれると、星が生まれる

$$n \approx 10^4 \sim 10^5 \text{cm}^{-3}$$

可視光線では、「暗黒星雲」として観測される



星形成のメカニズム

何はともあれ、大事なものは重力

星形成のポイント：

(誤解が多い言い方かもしれないけど、基本的には)
ある程度密度の高いガスを放置しておけば勝手にできる

→自発的星形成

古くから研究されてきた分、理論も観測も蓄積がある

もう一つの星形成：

分子雲に外部からの圧力が加わって、星形成が促進される

→誘発的星形成

観測的にはまだ新しい分野で、十分な研究資料に欠ける

…アイディア自体は30年前に提案されていたが、

理論先行で、観測が追いついていない

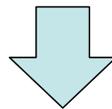
誘発的星形成領域の成因（外圧源）

分子雲の圧縮源はいろいろある

- ① 分子雲同士の衝突
- ② 紫外線
- ③ 若い天体による双極分子流（アウトフロー）

要因となる各現象の特徴

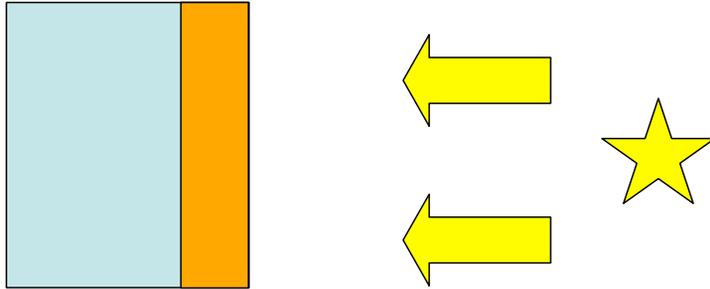
- ① 規模は大きい为数が少ない
- ② 星形成領域（特に大質量星形成領域）ならば、あらゆる場所で誘発的星形成の可能性がある
- ③ 空間分解能の問題がシビア



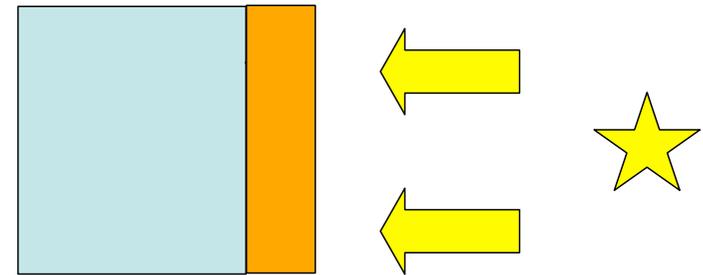
これまでの研究…②に注目

誘発的星形成とは？

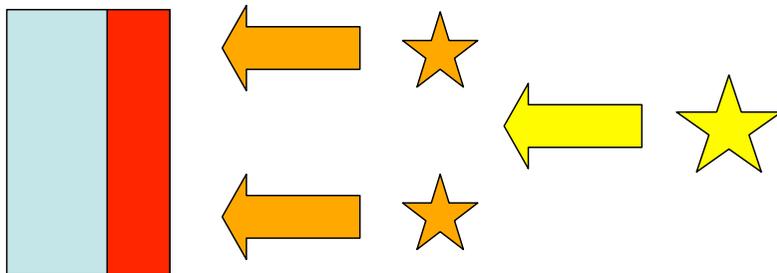
①大質量星の輻射が
近くにある分子雲を圧縮する。



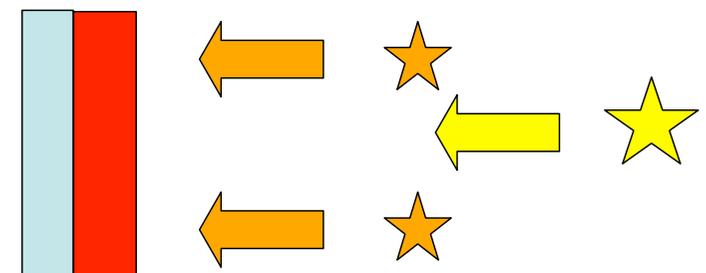
②圧縮を受けた分子雲が星を形成する



③新しく形成された星の輻射と
大質量星が更に奥の分子雲を圧縮する



④「第2世代」の星が形成される
以下、これを繰り返して進化する



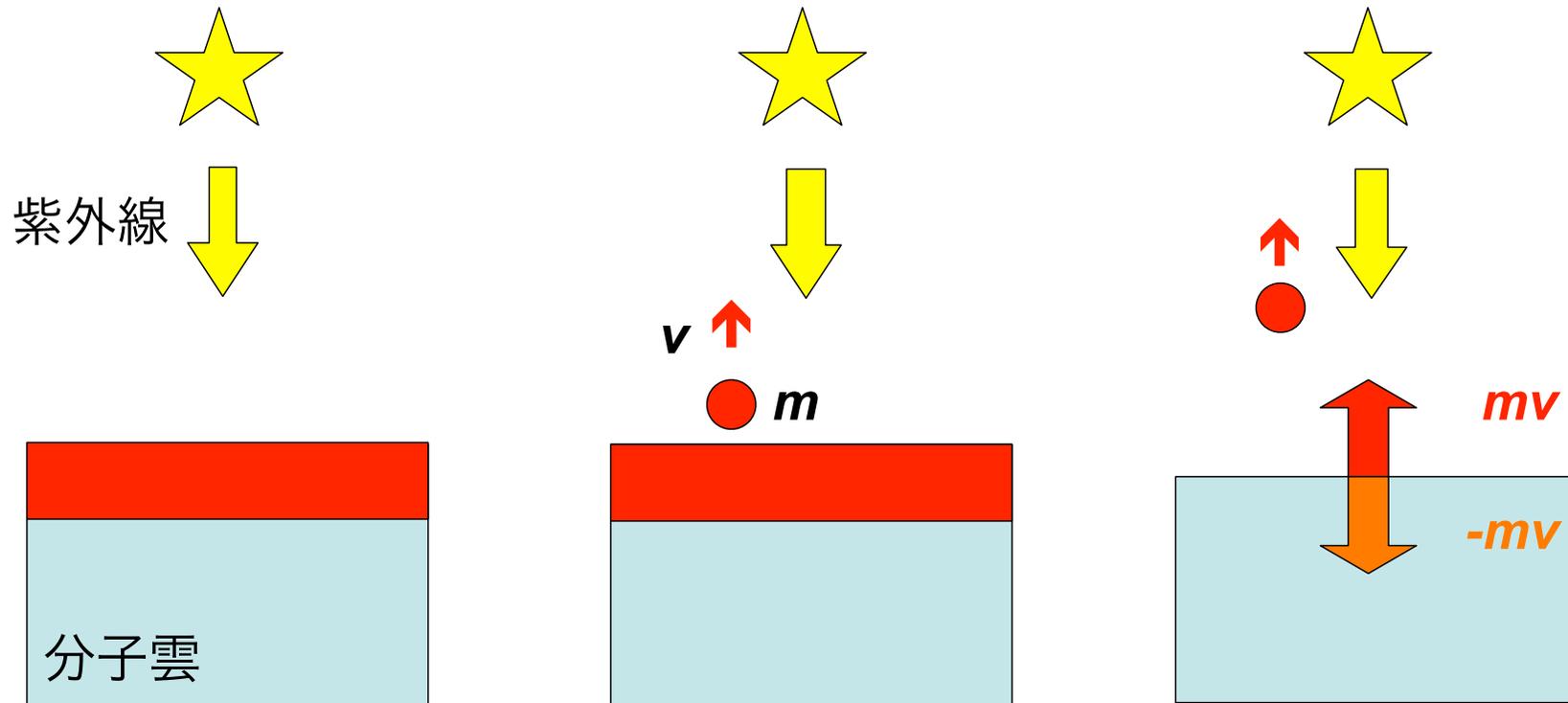
誘発的星形成領域最大の特徴：

形成された星が、分子雲側から若い順に並んで見える

紫外線で分子雲を圧縮する方法

Rocket effect (Oort & Spitzer 1955)

・・・ニュートンの第3法則（作用・反作用）の応用



①分子雲表面が紫外線によって電離
電離波面の形成

②電離波面で分子が電離した分子が、HII領域側に飛び出す

③電離波面で運動量が保存されるため
ニュートンの第三法則に従って分子雲が力を受ける

誘発的星形成をとりまく最近（？）の話

褐色矮星 (<0.1 Msun) の形成現場である可能性 (理論予測)

理論モデルによる、初期質量関数(IMF)の予測 (Whitworth+ 2004)

→自発星形成よりも、多くの褐色矮星を形成できる可能性

紫外線によるコア・星周円盤の破壊

→原始星の星周円盤が紫外線で破壊され、物質の降着が止まる

その結果、形成天体の質量が低くなる (Robberto+ 2006)

太陽系形成との因果関係の示唆 (観測事実・隕石の組成解析)

太陽近傍での中性子星／パルサーの発見

隕石に含まれる超短寿命核種 (^{26}Al) の発見

→太陽質量程度の星の形成過程では生成できない…外部からの流入？

超小規模な連鎖的星形成 (観測事実)

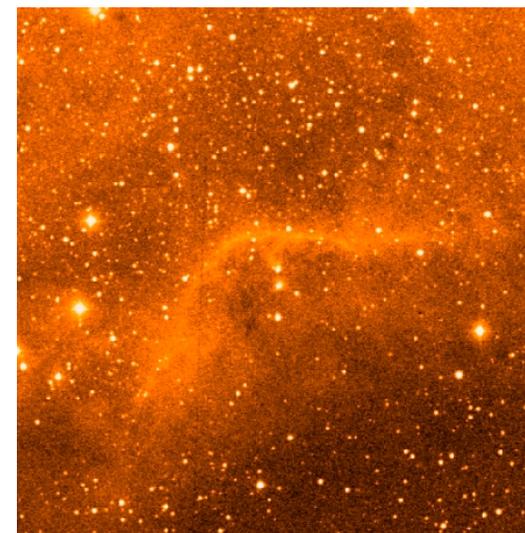
低質量原始星からの双極分子流による誘発星形成 (Shimajiri+ 2008)

候補天体 — Bright Rimmed Cloud

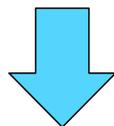
HII領域に付随する、分子雲の一種

(Sugitani+ 1991, Sugitani & Ogura 1994)

- ① 視直径60' 以上のHII領域に付随
→ある程度の紫外線強度を持った大質量星が必要
- ② 可視光線 (DSS-R) で弓状の明るい構造が見える
→紫外線による分子雲表面の電離で光っている
- ③ 原始星候補天体 (IRAS点源) が付随
→星形成領域であることが示唆されている

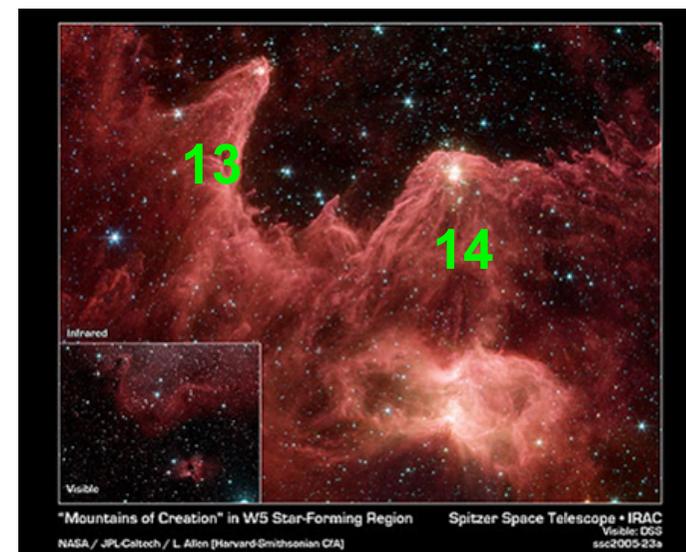


BRC14 (DSS-R)



全天に89天体が存在、カタログ化
誘発的星形成領域の有力候補

観測で実証された天体多数



BRC13, 14 (Spitzer IRAC/MIPS)

誘発的星形成をとりまく主な謎

外圧源は、本当に「圧縮」を行っているのか？

☆「誘発的星形成は、効率的なメカニズムなのか、無駄が多いのか？」

例：紫外線…分子雲表面の分子が破壊されてしまう

→定量的な評価が少ない

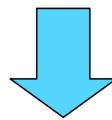
形成される分子雲コアと星の質量の関係は？

☆もともとは、大質量星の形成メカニズムとして提唱されている

低質量星でも誘発的星形成が起きる（最新の観測）

星団形成に与える影響は？

→観測例が少なく、統計的に議論ができない。



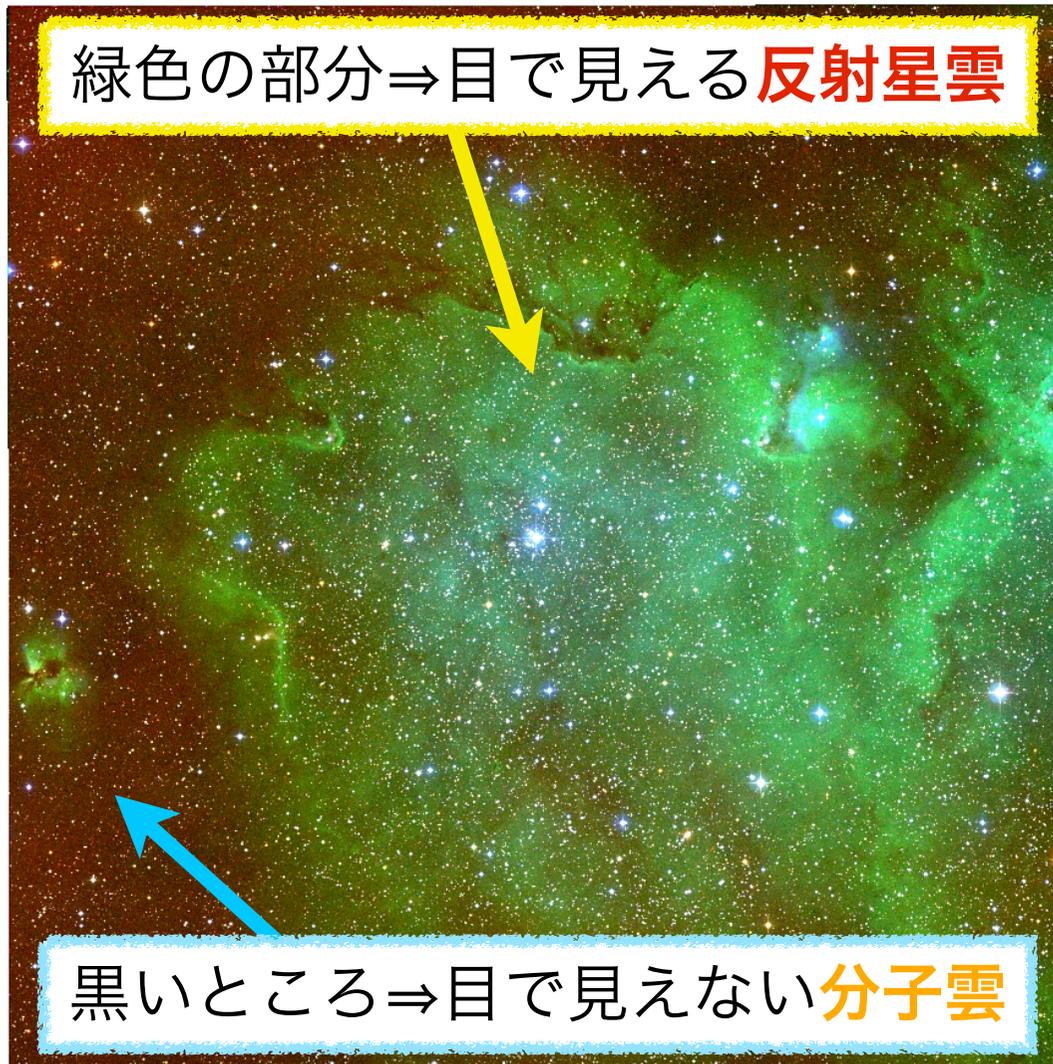
誘発的星形成領域特有の「分子雲の性質」は何か？

BRCを含むHII領域での分子雲のマッピング調査

実際の観測 — W5-East

観測対象 — W5-East HII region

Westerhaut カタログ…HII 領域



カタログの宿命？

大質量クラスター：
Cassiopeia OB6 cluster

分子雲複合体：
W3/4/5 cloud complex

反射星雲：IC 1848-A

分子雲：W5 NE、W5A
(Wilking+84)

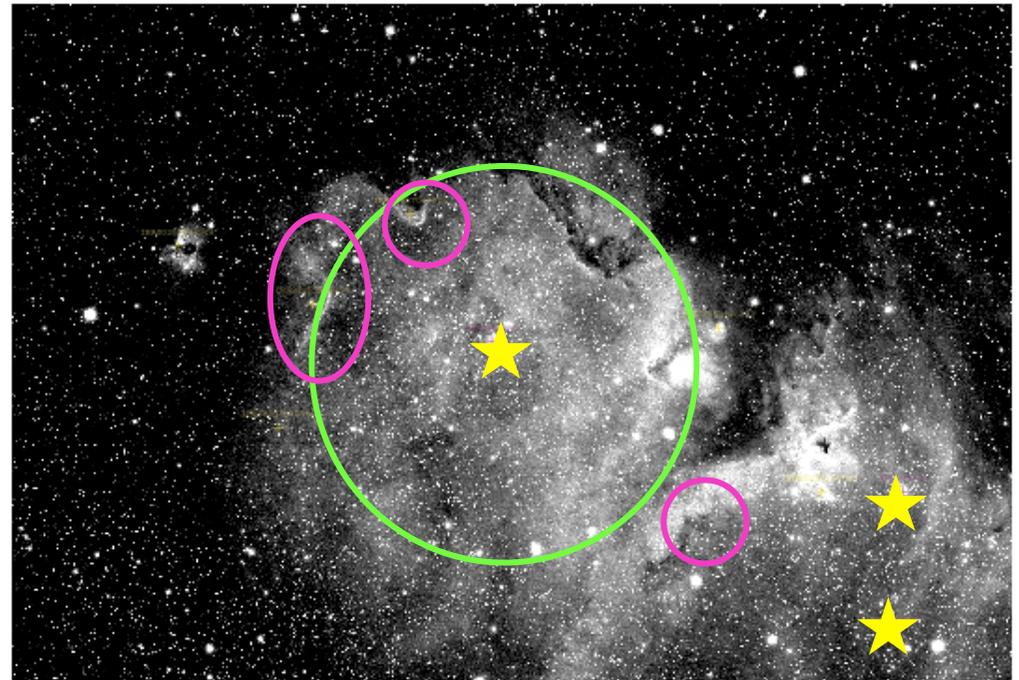
ターゲット詳細

距離：約2kpc

HII領域のサイズ：約30pc

○ HII領域 ○ BRC

★ 励起星



可視光線(DSS)での画像、視野:1.8°×0.8°

主な特徴

- (1) 主な励起星は一つで、しかもHII領域はほぼ球形(Karr et al. 2003)
⇒ 分子雲への影響 (UVなど) が等しい
…紫外線強度の違いなど、複雑なことを考えなくて済む
- (2) BRCが3つ存在する
⇒ BRC以外の領域はどうなっているのか？
…低質量星の誘発的星形成は、BRCに限定された現象なのか？

調べること①

まずは圧縮の証拠

① HII 領域周囲の分子雲の分布はどうなっているか？

⇒ 密度が比較的低い、分子雲の観測
BRC に限った話なのか？

② 高い密度を示すコアはあるのか？

⇒ 密度が高い、分子雲コアの観測、分子雲との分布比較

③ 星を作っている兆候はあるか？

⇒ 分子雲が重力的に束縛されているか…ビリアル質量

④ 存在する分子雲は、圧縮されているのか？

⇒ 密度の空間分布…密度プロファイルの検証

観測

望遠鏡：

野辺山宇宙電波観測所 45m電波望遠鏡

観測装置：

マルチビーム受信機BEARS (Sunada et al. 2000)

観測輝線・領域：

^{13}CO (J=1-0, 110.2 GHz)

W5-East . . . 全域 (0.6平方度)

(感度：0.6 K、 $\Delta v=0.2$ km/s)

C^{18}O (J=1-0, 109.7 GHz)

. . . ^{13}CO の輝線強度が強い部分を選択的に観測

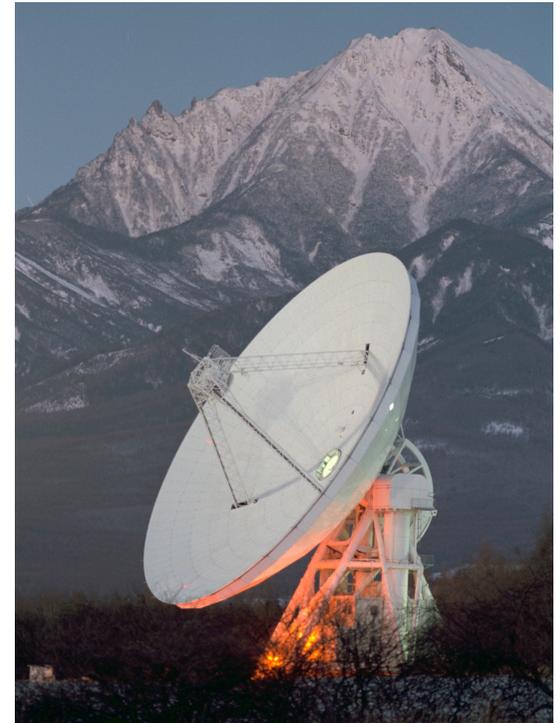
W5-East . . . 約900平方分 (感度：0.3 K、 $\Delta v=0.1$ km/s)

観測手法：

W5-East . . . ポジションスイッチング法

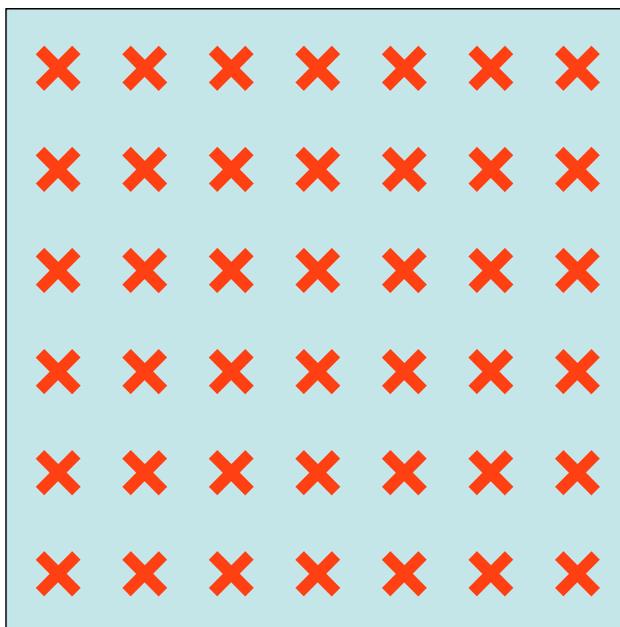
総観測時間：

80時間 (2005年1月、5月)



電波観測の手法

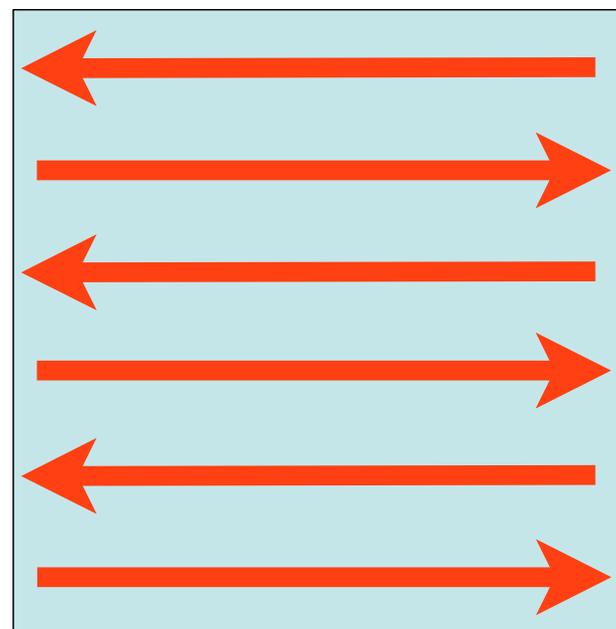
ポジションスイッチング



1点ずつ観測し、観測領域を埋める

1点ごとにOFF点（輝線のない部分）を観測し、熱雑音を取り除く

OTF (On The Fly) マッピング



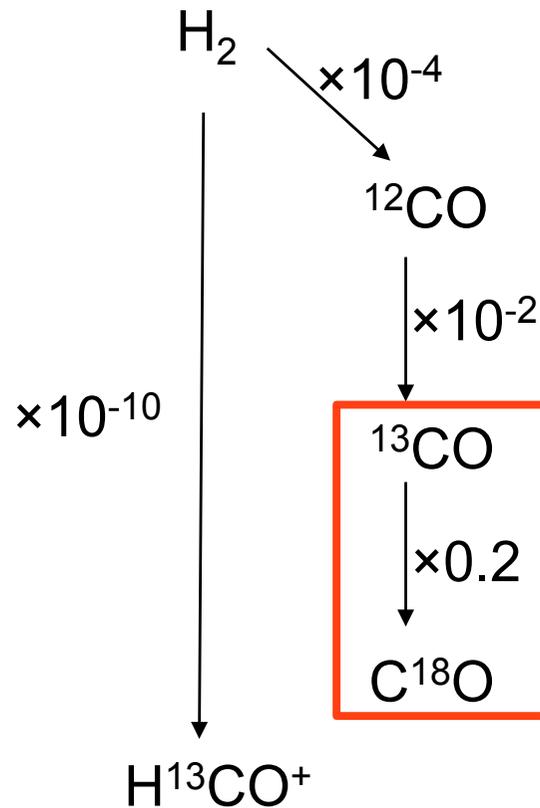
× OFF点

望遠鏡を移動させながら、連続的にスペクトルを取得する

OFF点（輝線のない部分）の観測は1本のスキャンごと

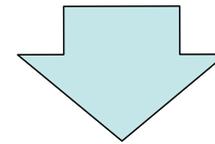
観測輝線

CO — 密度トレーサー：分子雲の密度を反映する分子種



(水素分子の存在比 = 1)

存在比が大きなものほど
低密度で、 $\tau > 1$ になってしまう



密度の高い分子雲は (基本的に)
存在比の小さな分子種で観測する
(臨界密度が高い)

観測が比較的容易で
 $n \sim 10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ を階層的に観測できる
2 輝線を使う

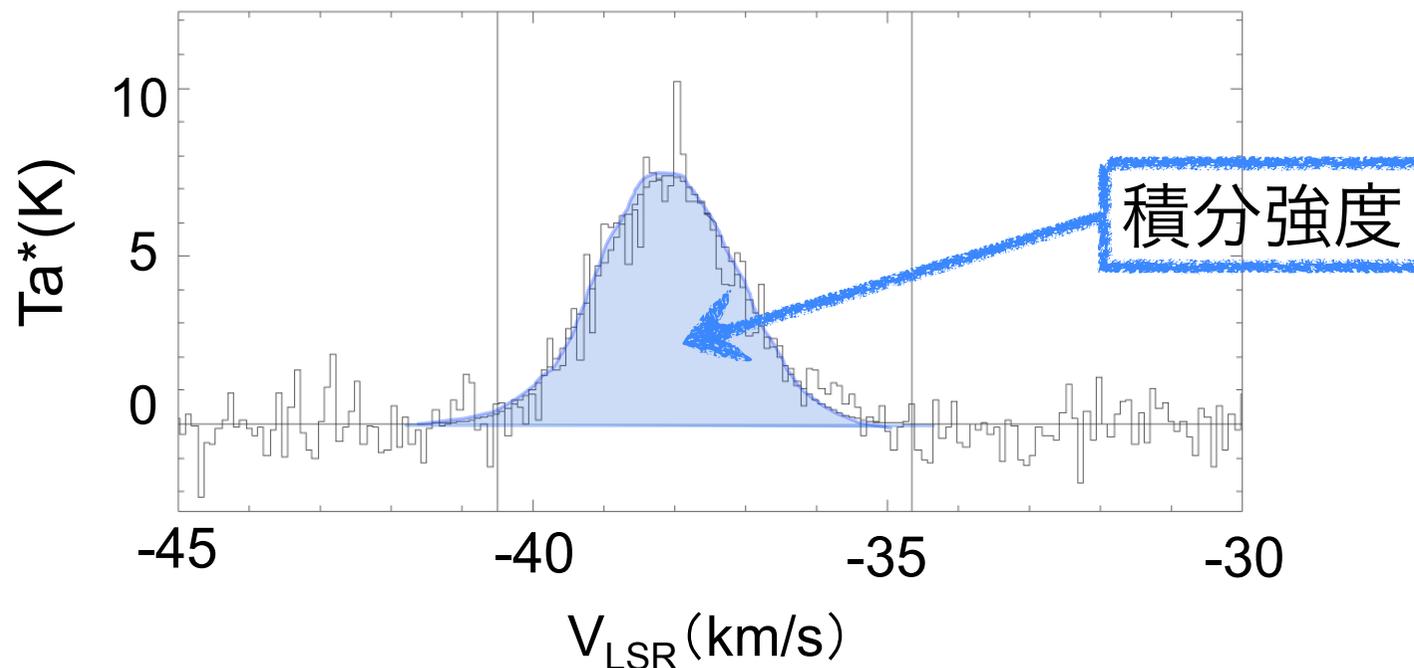
解析手順

求めたパラメータ：

柱密度 (cm^{-2})、密度 (cm^{-3})、半径、質量

- (1) 観測結果からr.m.s(1sigma)を計算する
- (2) **積分強度図**を作り、分子雲コアを抽出

component no.	peak [k]	x of peak [CH]	x of peak [MHZ]	x of peak [km/s]	half width [km/s]
1	7.3941	535.6	110200.648	-38.081	2.278



W5-East に存在する分子雲

W5-Eastの全面マッピング (^{13}CO)

一般的な観測の定義に基づいて
計8つの分子雲を ^{13}CO で検出

柱密度： $6\sim 9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$

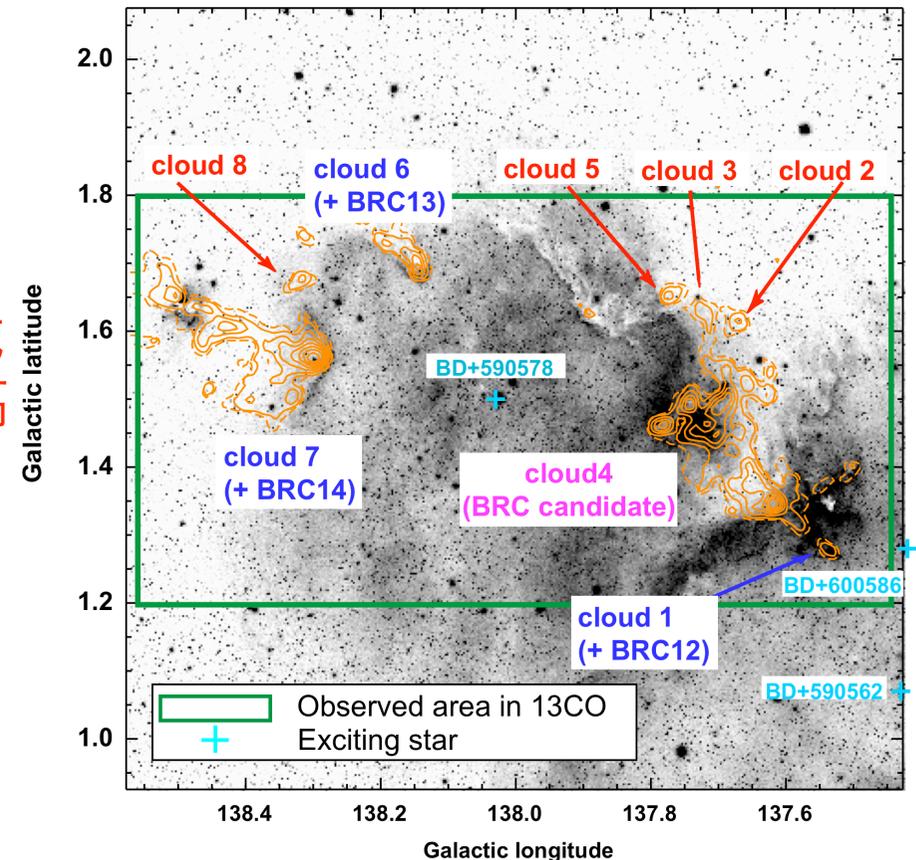
質量： 460～36000 太陽質量

⇒ 巨大分子雲が多く、これから形成される星の多くが星団である可能性が高い

* 紫外線強度の強いcloud 6は、ほうき星のような形状を持つ。

* cloud 5周辺のように、可視光線では暗黒星雲の帯が見えるにも関わらず、分子雲が検出されない帯状の構造もある

* HII領域に接触する分子雲は、総じてHII領域側の電波強度が高い ⇒ 圧縮？

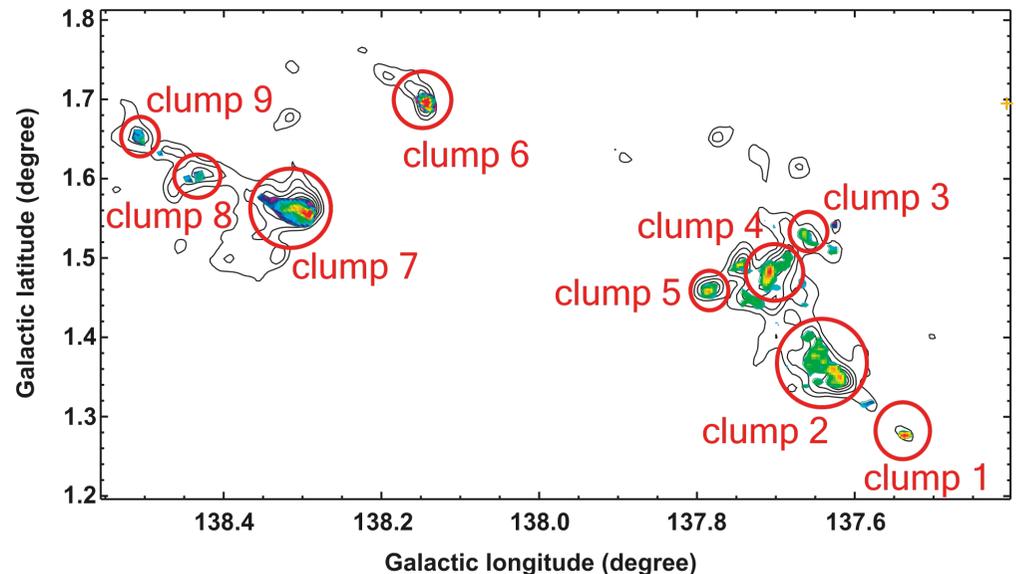


可視画像と分子雲の分布
(可視画像は白黒反転)

高密度領域の探査 — 分子雲コア

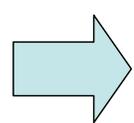
さらに密度の高いコア ($n(\text{H}_2) \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) を C^{18}O 輝線で探査する

^{13}CO では単一の構造にしか見えなくても、 C^{18}O では複数に分裂した小さなコアが観測できる



分子雲コアは、収縮して星を作りつつあるのか？

評価方法： 内圧と自己重力の釣り合いの関係（ビリアル平衡）から算出される平衡状態の質量（ビリアル質量）と、実際の質量の比較



Clump 2, 5, 7, 8がビリアル質量を上回る質量を持ち、重力収縮による星形成の兆候を示す…（8を除くと）全てHII領域に接したコア

分子雲圧縮の証拠を探る — 柱密度

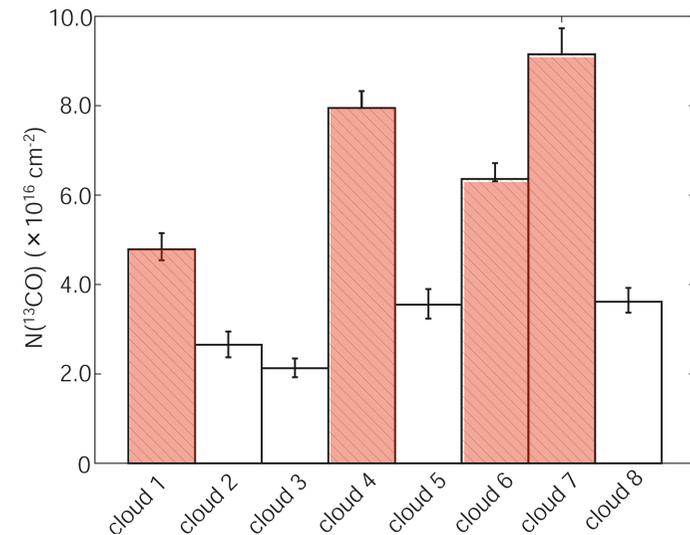
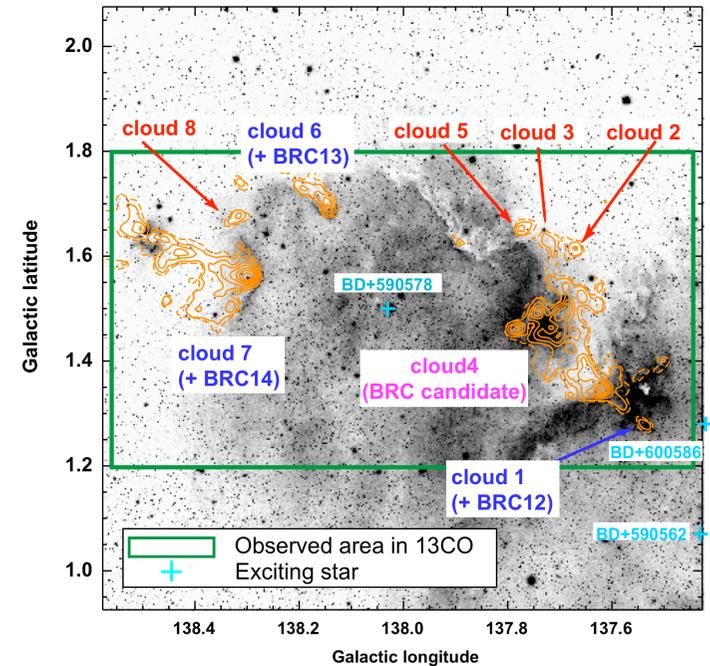
各分子雲の電波強度のピーク（密度が最も高いと考えられる部分）で柱密度の比較を行う

HII領域に接している分子雲の柱密度（赤で示したグラフ）は、そうでないものと比較して平均で2倍大きな柱密度を持つ

電波強度のピーク地点では少なくとも、HII領域の影響の有無が見えた

これを圧縮と言い切っていいものなのか？

各分子雲での「密度プロファイル」を取って実証を試みる



密度のプロファイルを見る

HII領域からの圧縮の検討：

^{13}CO 、 C^{18}O の柱密度プロファイル

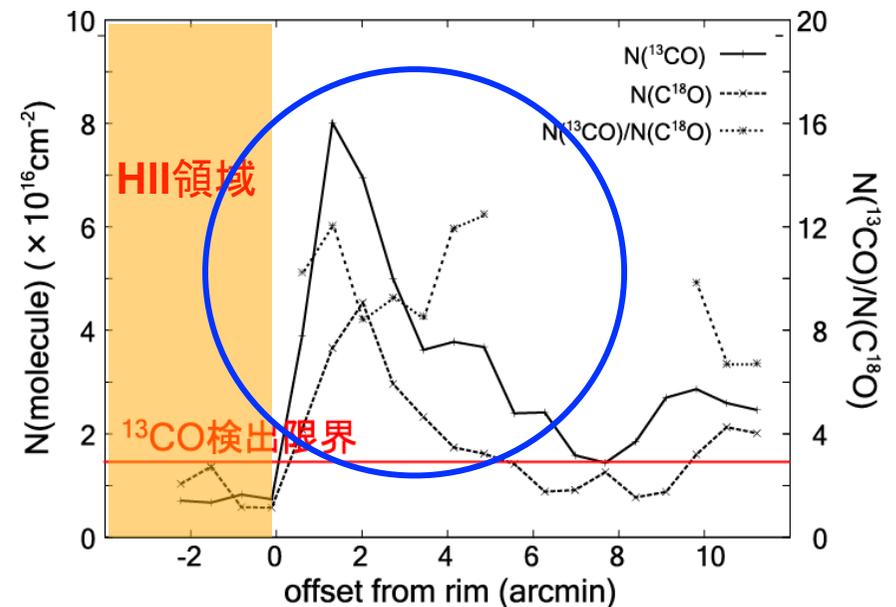
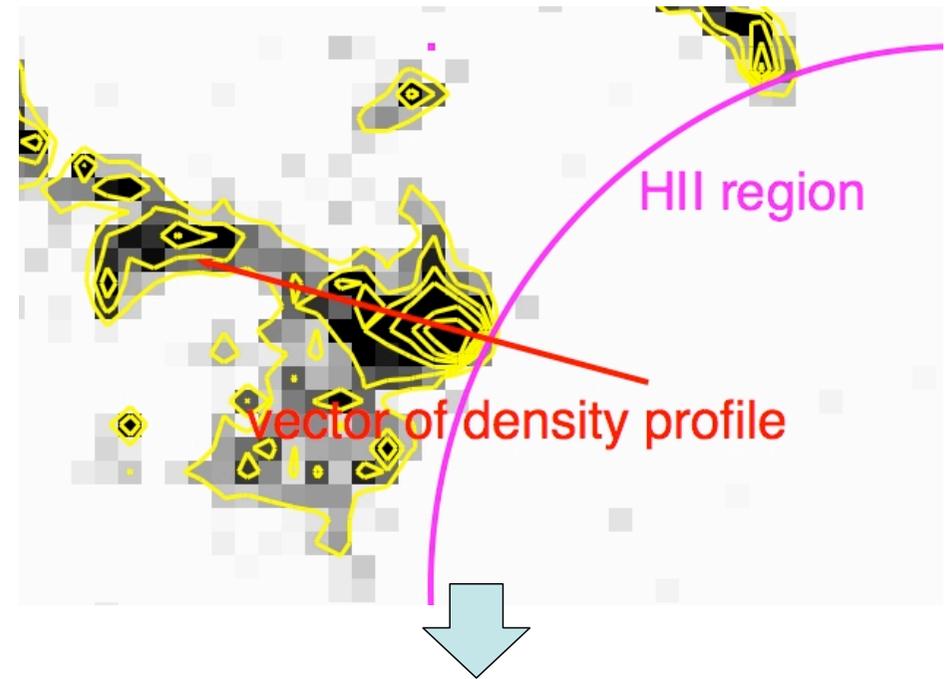
赤線で描かれた矢印上の柱密度を測り
グラフ上にプロットしたもの

これで何を見るのか？

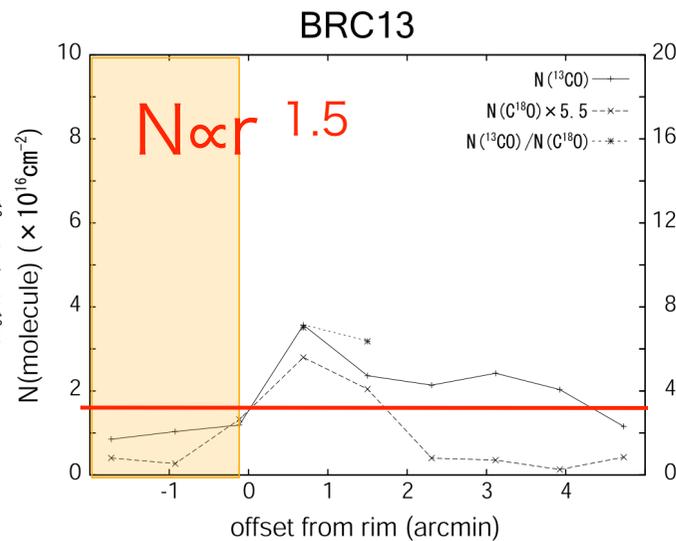
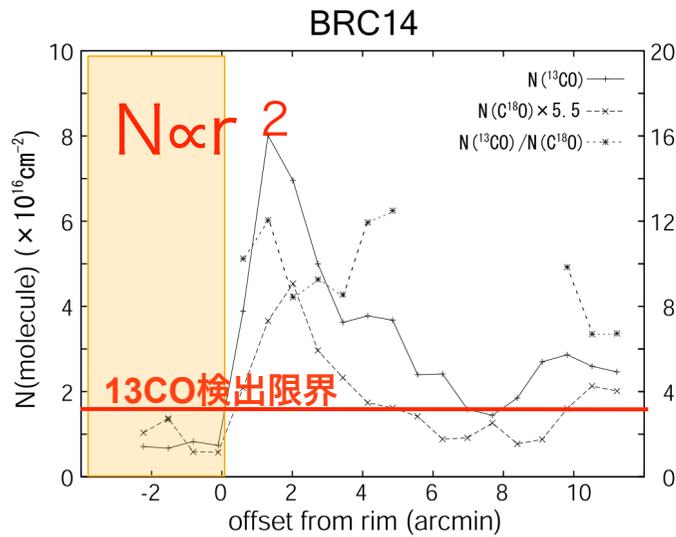
・・・プロファイルの非対称性

HII領域側からの圧縮がかかっているならば
プロファイルに偏りが出るはず
(=圧縮がなければ、プロファイルは
左右対称の形を持つ)

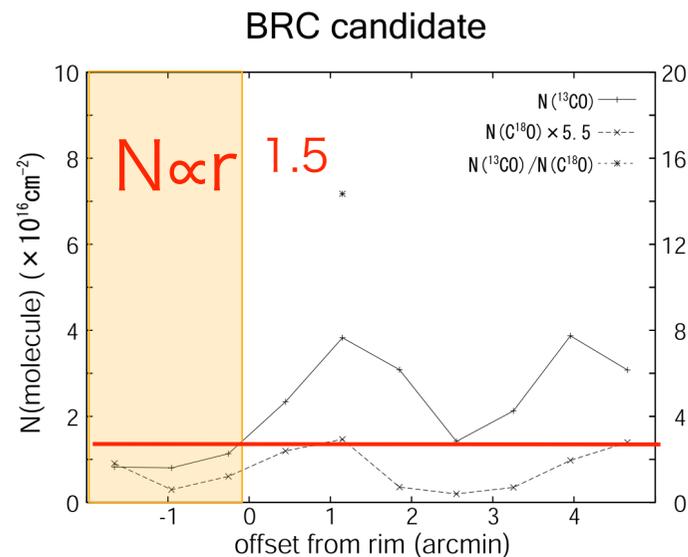
HII領域に面した分子雲3カ所で検証



HII 領域に接した分子雲のプロファイル



圧縮がない分子雲
 $N_{\alpha r} 1$



HII領域に接するピーク3地点を通る
柱密度プロファイル

それぞれの特徴

- * HII領域側では、いずれの分子雲も検出限界以下
- * 左右に非対称な密度構造を持ち、特にHII領域に近い側(約1')で、急激に密度が上昇する傾向が見える

HII領域に面した分子雲は、紫外線によって圧縮されている傾向が見える

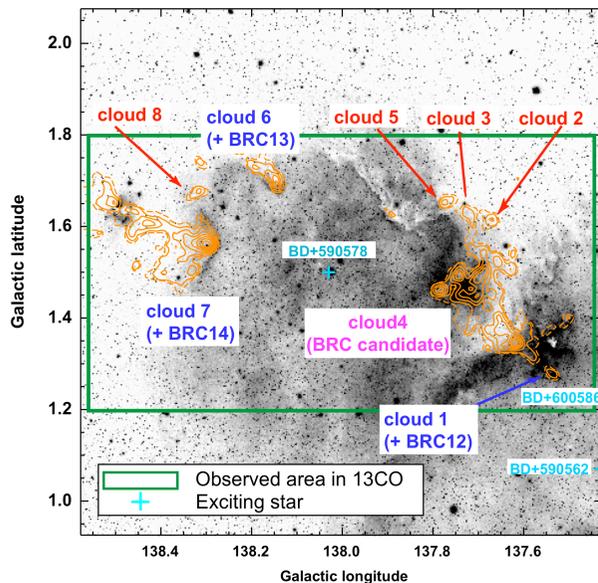
状況証拠を整理する ①

誘発的星形成は起きているのか？

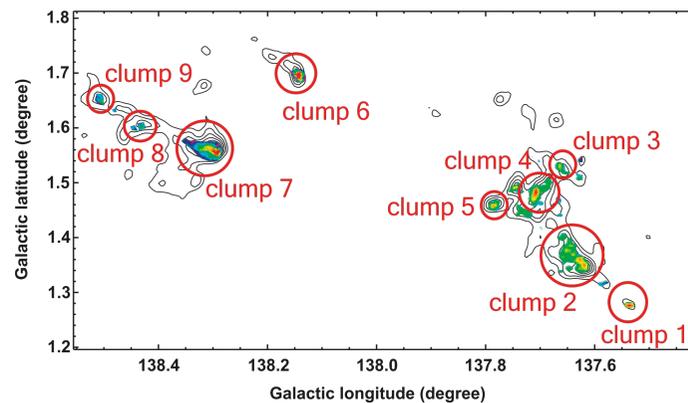
分子雲からのアプローチ

- ① 分子雲の分布 ...HII 領域の周囲にある
- ② コアはありそうか？ ...分子雲コアがいくつかある
- ③ 圧縮しているか？ ...柱密度プロファイル

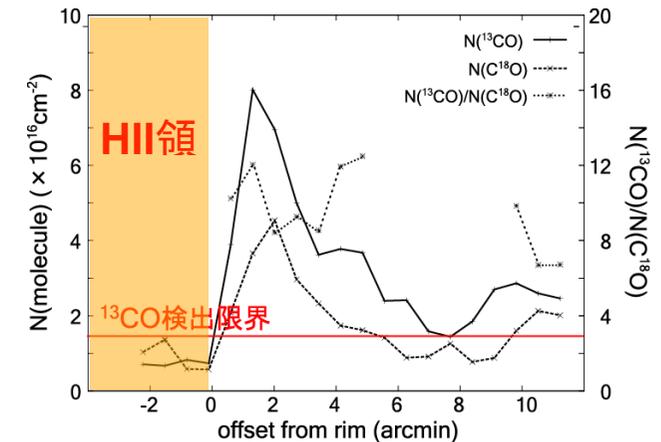
① 分布



② コア



③ 圧縮の証拠

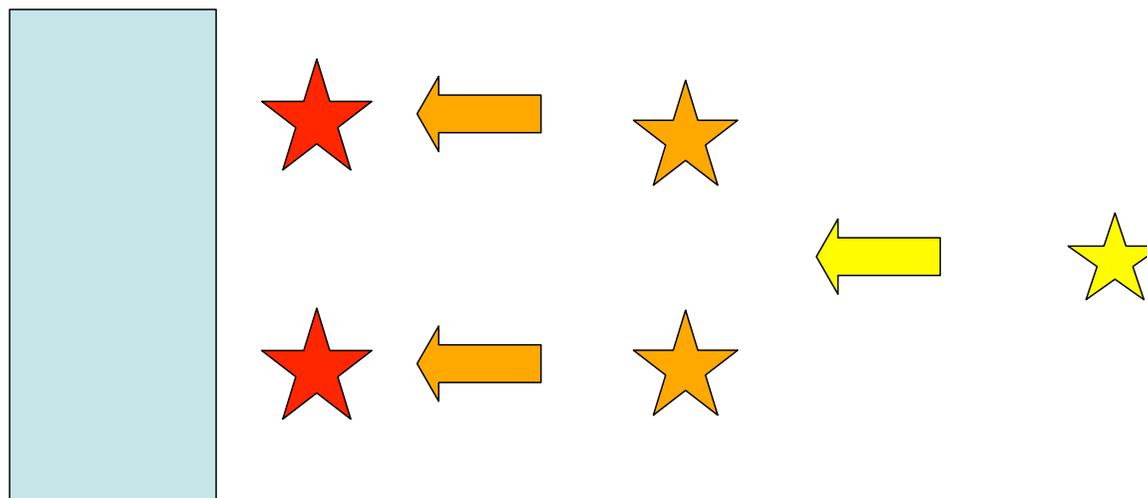


分子雲から見ると、大丈夫そう

調べること②

裏付けが欲しい

形成された星からのアプローチ



具体的には、

分子雲

Class I

Class II

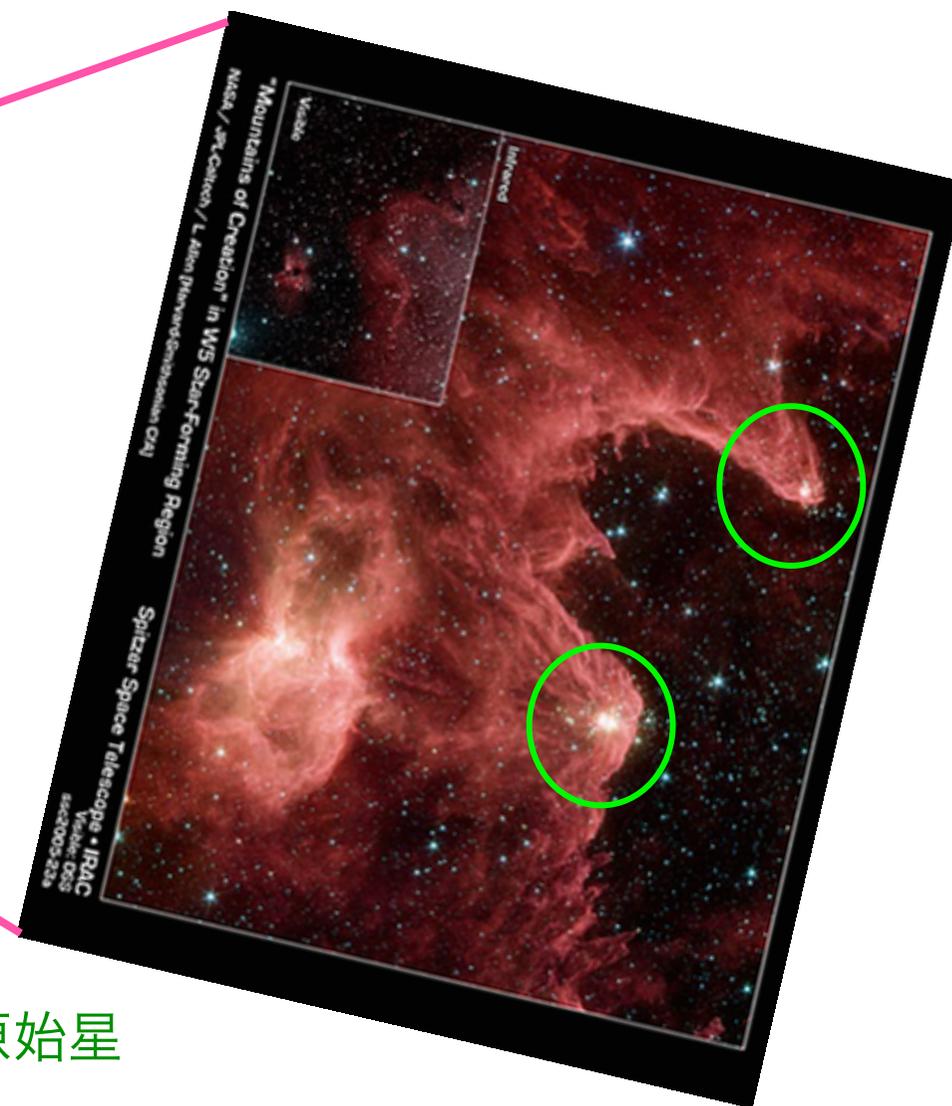
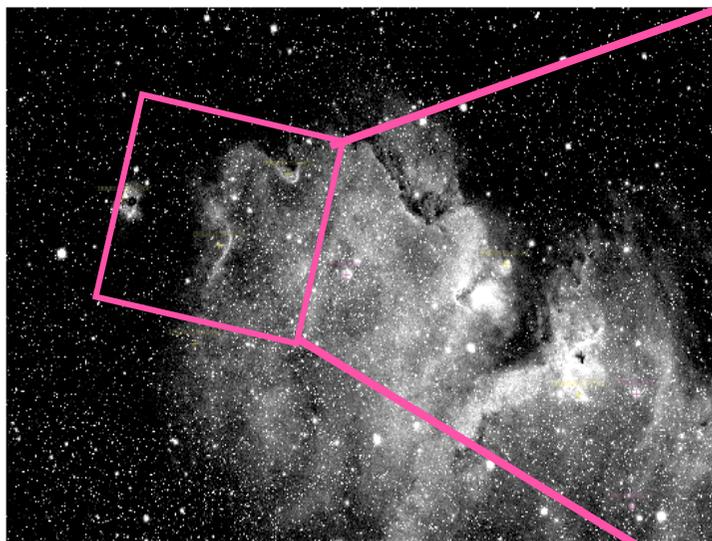
Class III

(H α 輝線星)

星の並びが見たい

Spitzer による観測 — 近・中間赤外線

中間赤外線による観測・・・電波とは見え方が違う

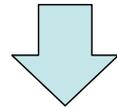


「弓」の部分に明るい点がある・・・原始星

若い低質量天体の選定

若い天体のSEDの成分

= 星周物質の量 + 星本来の光 (黒体放射)



原始星周りの星周物質の量をSEDから推測

⇒ ある程度の年齢を見積もる

○の部分の傾きで、天体の年齢をクラス分け

Class I ($\sim 10^5$ yr) :

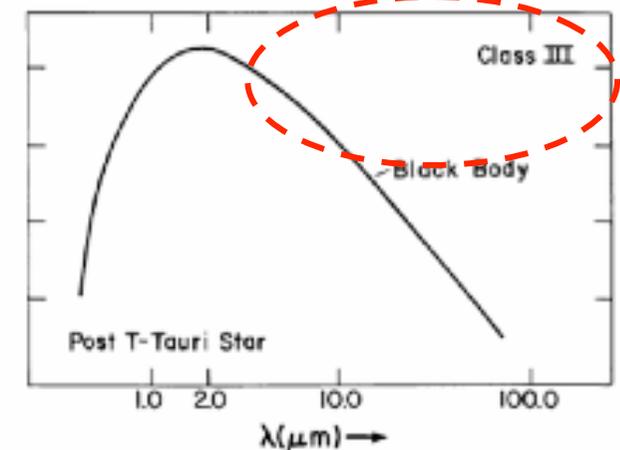
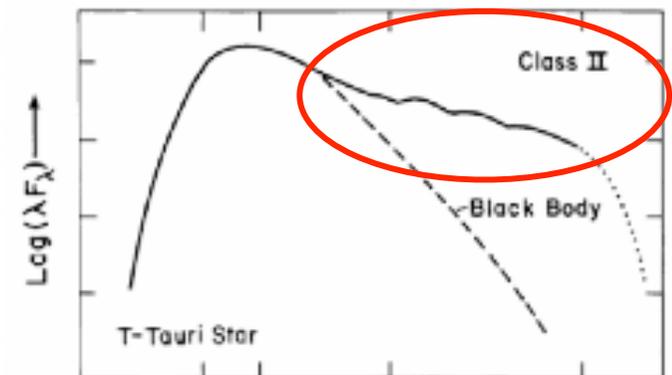
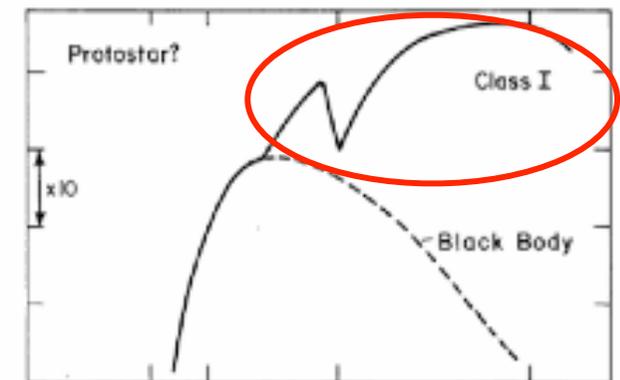
星周物質が豊富で、活発な質量降着が
起きている、形成初期段階の恒星

Class II ($\sim 10^6$ yr) :

星周物質の質量降着が落ち着いた天体
多くが原始惑星系円盤を持つ

Class III ($\sim 10^7$ yr) :

星周物質や円盤を失った天体
星由来のH α が観測される



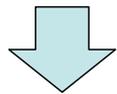
低～中質量天体の分布を探る

Spitzer宇宙望遠鏡のデータから求めた、Class I、Class II の分布図
(Koenig et al. 2008)

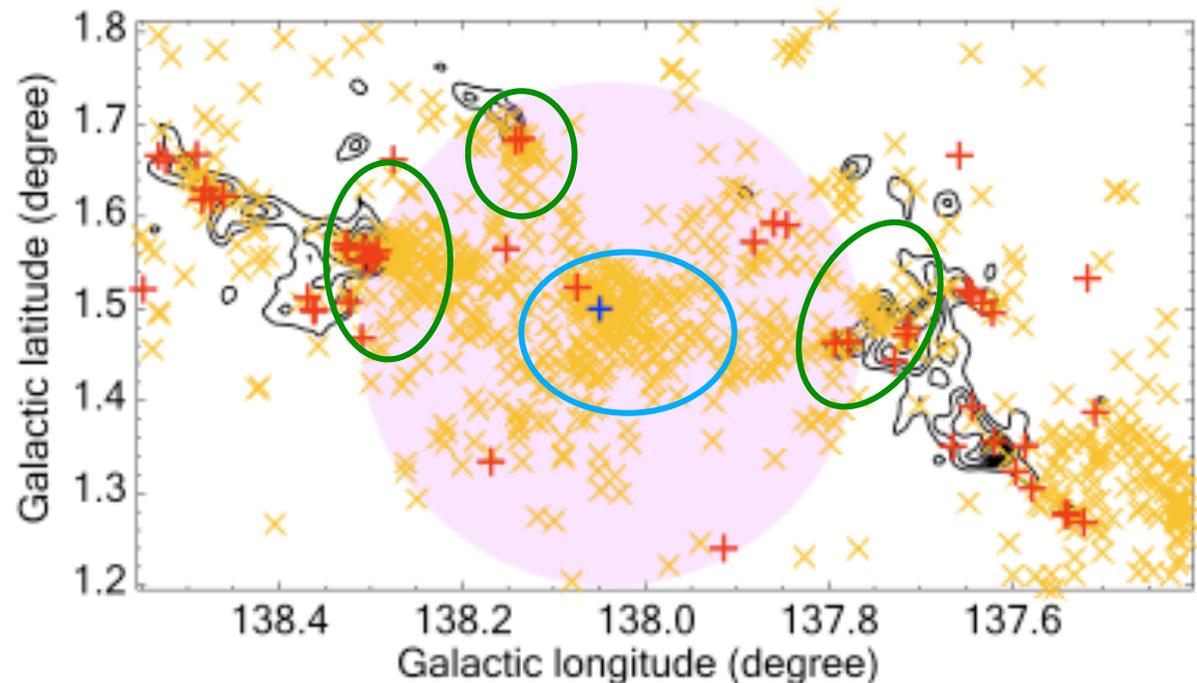
若い天体の分布が均一でない・・・密集している部分としていない部分が顕著

- ① 分子雲のうち、HII領域に接している部分
・・・分子雲が圧縮を受け、星形成が促進された痕跡
- ② 中心の大質量星の周辺に密集している星団
・・・中心の大質量星と共に生まれた星団 (Nakano et al. 2008)

ほとんどのClass I天体は
分子雲の中にある



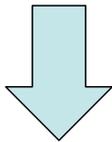
年齢が若い天体ほど分子雲
に近く、年を取っているもの
ほど遠い傾向が見える



若い天体の面密度分布

データの可視化・・・Class II天体の面密度分布を見る

中心星の星団⇒Class II 候補⇒Class I 候補⇒ガスの順に、年齢の並びがハッキリ見えている・・・典型的な誘発的星形成領域



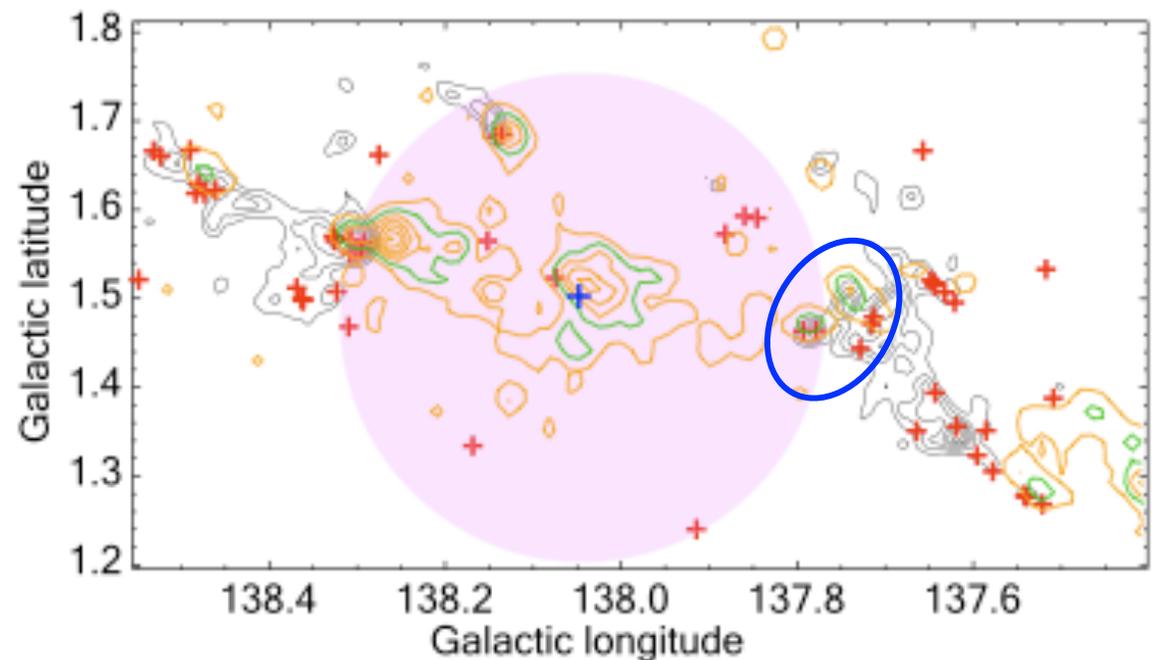
W5-Eastの星形成は主に、中心星から東西の巨大分子雲へ進行している

西側の巨大分子雲にはBRCが存在しないが・・・

- * 圧縮を示唆する柱密度の高さ
- * 年齢順の並びを示すClass IIの面密度分布

・・・ 新たな誘発的星形成領域の発見

⇒HII領域周辺は、BRCに限らず誘発的星形成が進行することを実証



ちょっと挑戦的な議論 — 進化のシナリオ

議論 — 進化のタイムスケール

W5-East、BRC14はどのように進化したか？

⇒ タイムスケールの見積もり・・・YSOの dynamical time の計算

計算のポイント：

進化トラックによって年齢が既知の星団とそのサイズを基準とした計算

⇒ 既知の年齢を基準としたタイムスケールの見積もりが可能

星団の速度分散は、どれも等しいと仮定

⇒ 星団のサイズ比がそのまま年齢に反映できる

「星団」

⇒ 面密度ローカルピークの半値(R)

年齢の基準

⇒ 励起星付近の星団 (Nakano+ 08)

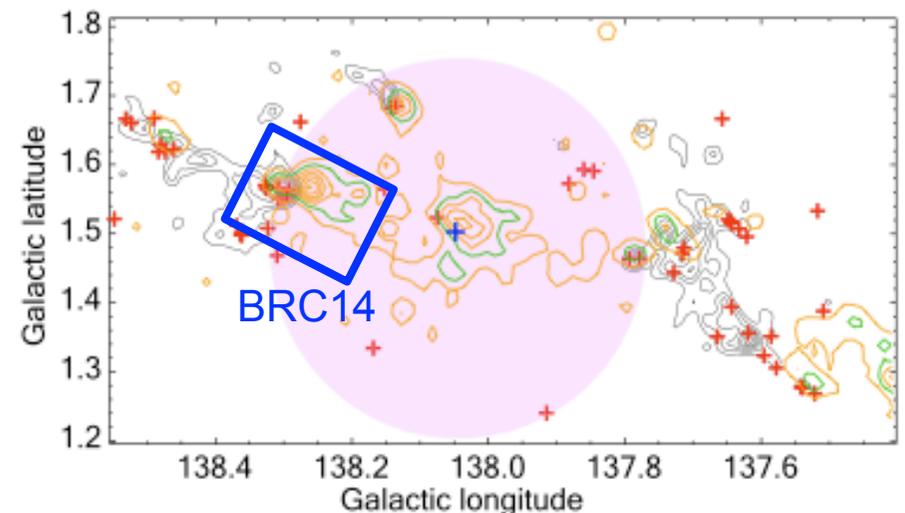
星団の速度分散 (σ_v) の計算

$$\text{dynamical time} = R / \sigma_v$$

年齢を求める星団

(1) HII領域と分子雲の境界付近

(2) BRC14の高密度コア



議論 — シナリオを検証する

タイムスケール計算に用いた速度分散 (σ_v)

・・・励起星周辺の星団年齢とサイズから計算

$$\sigma_v = \frac{R}{age} = \frac{2.1 pc}{4 Myr} = 0.5 \text{ km s}^{-1}$$

BRC14の各分子の速度分散 (@積分強度ピーク)

^{13}CO 1.0 km s⁻¹

C^{18}O 0.7 km s⁻¹

H^{13}CO^+ 0.9 km s⁻¹ (core A)

0.7 km s⁻¹ (core B)



どの輝線よりも
 σ_v の方が小さい

Joergens (2006)

・・・Cha I の T Tauri starの視線速度 > コアの速度分散
(1.3 ± 0.3 km s⁻¹) (0.9 ± 0.3 km s⁻¹)



BRC14では
逆センス

理由・・・不明 (要検討)

予測 (希望) ...星形成環境の違いを反映している?

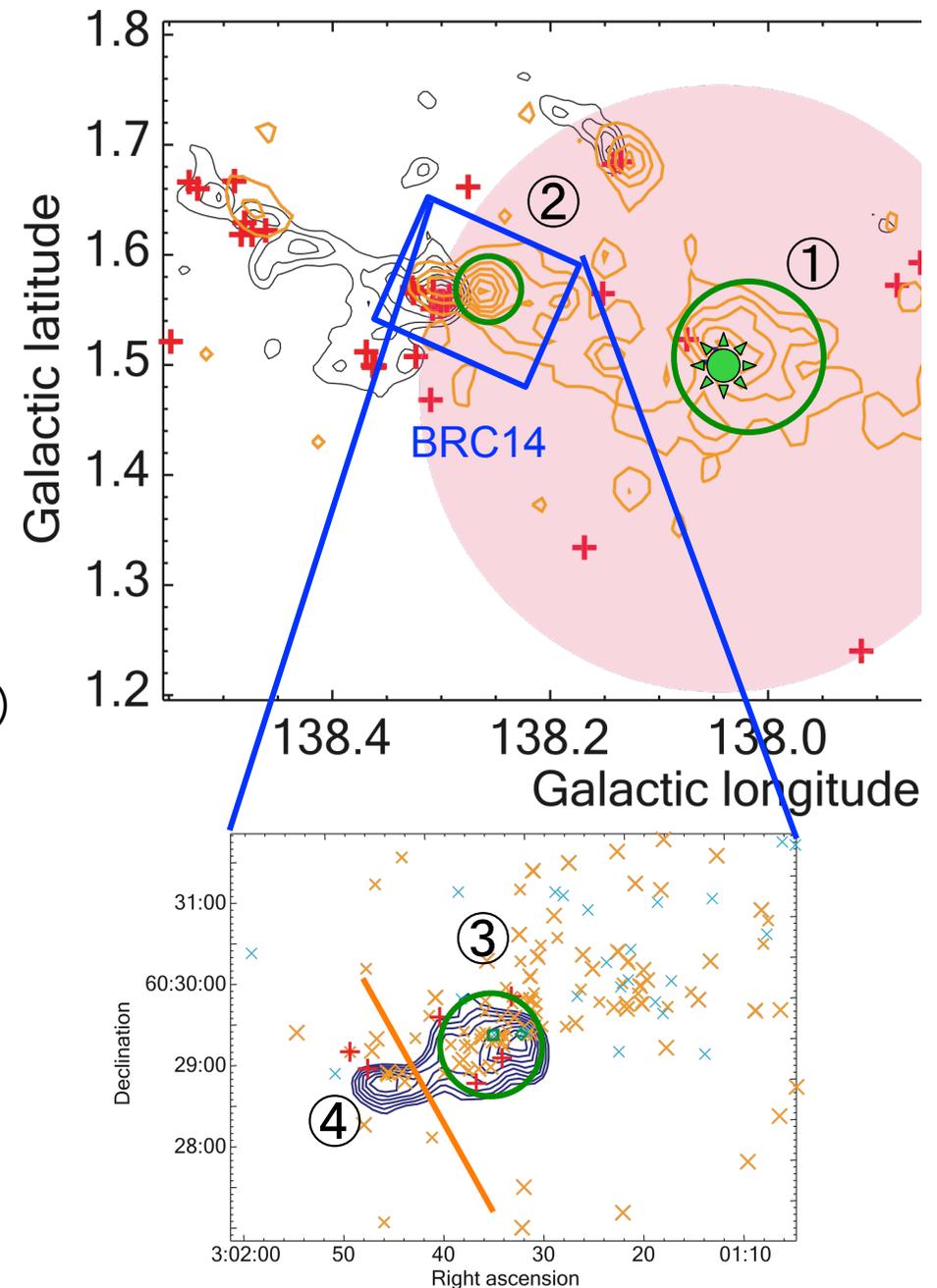
Cha I → HII領域なし、低質量、自発的星形成

BRC14 → HII領域あり、大質量、誘発的星形成

議論 — BRC14の進化のシナリオ

誘発的星形成のシナリオ

- ① 4Myr (進化トラックにより既知)
($R = 2.1\text{pc}$ 、 $\sigma_v = 0.5\text{ km s}^{-1}$)
励起星を含む、HII領域中心の星団
- ② 1Myr (dynamical time、 $R = 0.64\text{pc}$)
境界面での Class II 天体の形成
⇒ Class II の典型的な年齢に一致
- ③ 0.4Myr (dynamical time、 $R = 0.24\text{pc}$)
core A と Class I 天体の形成
⇒ Class I の典型的年齢に (ほぼ) 一致
... cluster-forming core
- ④ $\leq 0.3\text{Myr}$ ($R \leq 0.18\text{pc}$)
星団形成の兆候が弱いcore B の形成
... proto cluster-forming core



W5-East HII 領域のまとめ

^{13}CO : 8個の分子雲を検出

⇒ 視野0.6平方度の均一感度によるマッピングを実現

各分子雲の柱密度の特徴 :

⇒ リムの付随する分子雲の柱密度が、付随しないものに比べて2倍大きい

C^{18}O : 9個の分子雲コアを検出

⇒ HII領域に曝されたコアは、そのほとんどが圧縮していることが判明

年齢の若い天体の空間分布の特定

原始星候補、Class II 候補天体を同定

⇒ 若い天体が年齢順に並ぶ傾向から、W5-Eastの誘発的星形成を確認

「BRC候補天体」の同定

^{13}CO 柱密度、若い天体の空間分布が、BRCと同じ傾向を持つ天体

⇒ BRCに限らない、大局的な誘発的星形成が起きていることが分かる

W5-East の進化シナリオ

(不定性は大きい) 誘発的星形成のシナリオを良く再現してる

何を考えればいいのか？ — これから

「誘発的星形成領域」の観測から思うこと

大質量星なんてどこでも生まれる

- … 星形成領域は「必ず何かしら外圧が加わる」と思っているかもしれない。
⇒ 特定の場所に限らない、サーベイ観測が必要

が、遠い。

- … 空間分解能の問題で苦しい観測かもしれない
⇒ 「あたり」を付けるための大まかな観測から、ALMA、TMTへ

知っていることから始める

- … 誘発的星形成は「分かりやすい」
⇒ 密度プロファイル、ビリアル質量 … 教科書的な検証でも十分研究になる

研究の「マイルストーン」探し

- … 最新の研究を追うのはとても重要
⇒ 研究に先鞭をつけた「先駆者たちの古い論文」はもっと重要

ありがとうございました
またお会いしましょう！！
