

# すばる中間赤外線装置COMICSで さぐる大質量星形成

岡本 美子（北里大学）

1. イントロダクション
2. 超コンパクト(UC)HII領域の電離星
3. 超コンパクト(UC)HII領域の電離ガス運動

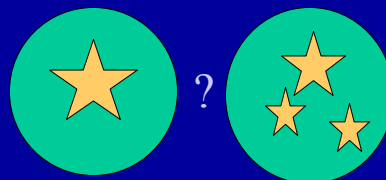
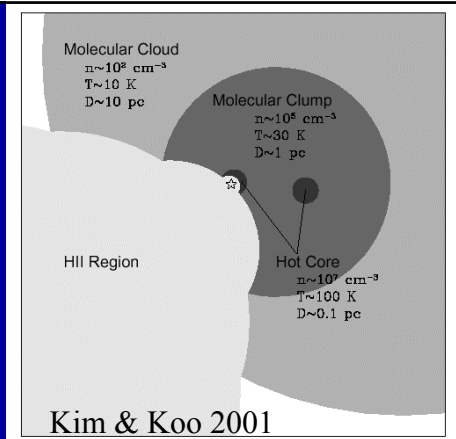
## イントロ： 大質量星形成研究の意義

- 星形成としての興味
  - 小中質量星とはどのように異なるのか
  - 星形成の各段階の対応天体とタイムスケール
  - 初期状態と途中のプロセス
    - スタートの質量、途中の質量降着・放出(アウトフロー)、合体の可能性、周辺物質との相互作用 など
    - クラスター形成と孤立星形成との違い
  - 環境による大質量星形成の違い
    - Metallicity、分子雲質量、外圧などの影響
- 系外銀河における星形成の理解の基礎
  - 銀河の活動性を担う

- 大質量星形成に関する天体
  - Cold cores
  - Warm cores
  - Hot cores
    - 0.1pc, 100K,  $10^5\text{cm}^{-3}$ ,  $\text{NH}_3$ , etc
  - Hypercompact HII regions ← Protostarの形成？
  - Ultracompact HII regions ← 主系列星の形成？ S
    - 0.1pc,  $n_e \sim 10^5\text{cm}^{-3}$ , EM  $> \sim 10^6\text{cm}^{-6}\text{pc}$ ,  $10^5\text{yr}$
  - OB stars/associations
- 広いmass range:
  - 3桁のluminosity range, 6桁の電離光子数range
  - 質量と形成ステージがカップル
- 込合った領域 → SEDを天体ごとに分離できていない

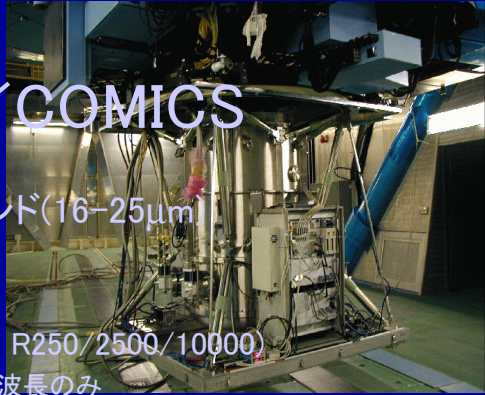
## Cloudの性質 vs形成される星

- 割とよく性質がわかっているのはUCHIIsとhot cores
  - わかっているのは全体量
    - 温度、密度、電離フラックス、cloud質量など
- いったいそこから・そこにどのくらいの質量の星が生まれる(生まれている)のかはよくわかっていない
  - Cloudの進化を考える上で重要
- 若い段階から追うのは困難
  - →UCHII領域段階で見してみる



Hot cores/UCHIIRs

# すばる／COMICS

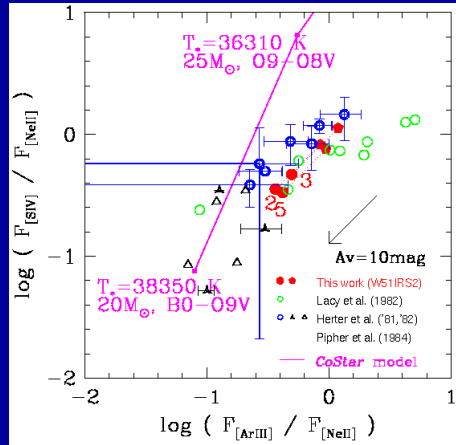


- Nバンド(8–13 $\mu\text{m}$ ), Qバンド(16–25 $\mu\text{m}$ )
- 観測モード:
  - 撮像(30" x 40"),
  - ロングスリット分光(40"; R250/2500/10000)
    - 高分散分光は特定輝線波長のみ
- 感度(1 $\sigma$ 1s):
  - 撮像 30mJy (N), 400mJy (Q)
  - N分光 340mJy(R250), 2.5Jy(R2500), 7Jy(R10000)
  - Q分光 3Jy(R2500), 7.5Jy(R5000)
- 空間分解能
  - 8.2mの回折限界 (0.3" @ 10 $\mu\text{m}$ , 0.7" @ 20 $\mu\text{m}$ )

## 1. 超コンパクト質量HII領域の 電離星

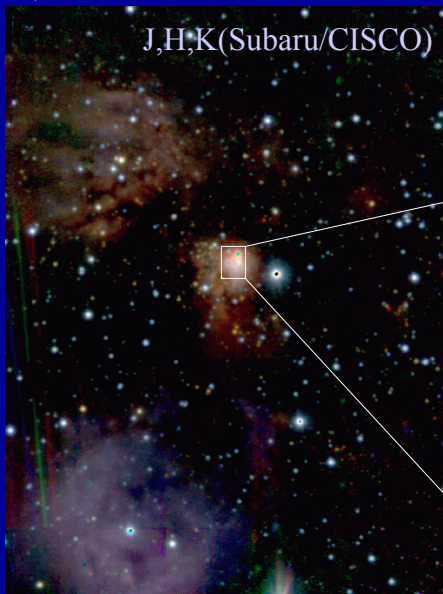
# UCHII領域の大質量星の質量分布

- 電離星の質量と数の決定
- 2つの情報から
  - トータル電離フラックス←電波連続波
  - 電離放射場の硬さ←金属イオンMIR禁制線
    - [NeII]12.8 $\mu$ m 22eV
    - [ArIII]8.99 $\mu$ m 28eV
    - [SIV]10.51 $\mu$ m 35eV
  - モデルとかなり異なる
  - モデルによってもかなり異なる
  - クラスター効果
  - Metallicityの影響
- 系外銀河の埋もれたHII領域にも応用可能



Okamoto et al. 2001

# すばるによるMultiplicityの直接検証



K3-50A

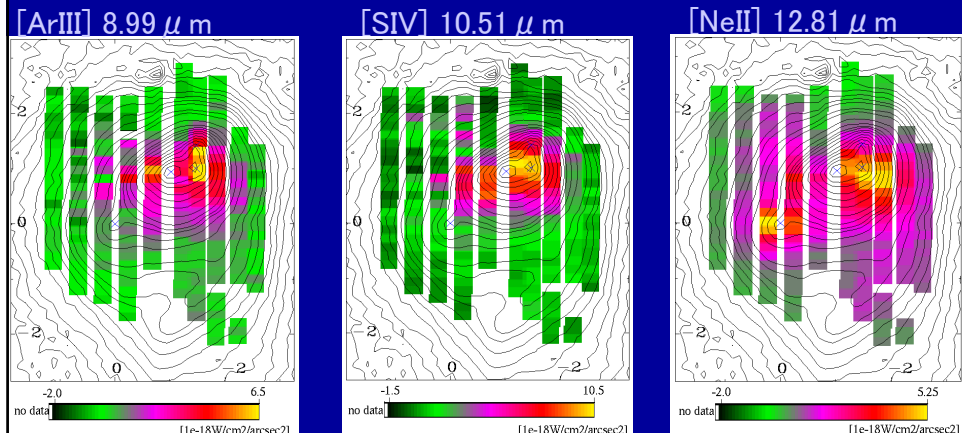
8.8,9.7,11.7(Subaru/COMICS)



5" ~0.2pc

# Multiplicityの直接検証

- Subaru+COMICS 0.4'' resolution
- K3-50A (Okamoto et al. 2003)
  - O5.5→O6–O8+O9.5



## 2. 超コンパクト質量HII領域の 電離ガスの運動\*

\* 一部、北里学術奨励研究助成(第16期)の助成による

# 形成シナリオ: 降着 vs 合体

- 形成過程について、小質量星のような確立したパラダイムがない
  - 放射圧が降着を妨げる
  - 降着率が高ければOK?
    - $>10^{-3}$  Msun/yr, Dust opacityにも依存
  - 連星率・クラスタ密度との関係
    - オリオンでは大質量星の方が小質量星よりも連星率が大
  - 降着円盤に関しては最近B型星のまわりに発見したとする例がいくつか出てきた (IRAS20126+4104; Zhang et al. 1998など)
    - サイズ~10000AU
- 形成中・直後の星周構造を観測的に明らかにする必要がある
  - 大質量星形成に関連したどのような星周構造が形成されるのか? (Disk? Outflow?)

# COMICSによるUCHII領域 電離ガス運動の観測

## — MIRイオン輝線の高分散分光観測R10000

- [NeII]12.8 $\mu$ m (22eV), [ArIII] 8.99 $\mu$ m (28eV), [SIV] 10.5 $\mu$ m (35eV)
- RRLよりも高い電離エネルギー
  - →より星近傍をトレース可能
- 30km/sの分解能だがプロファイルフィットにより中心速度はa few km/sで決定可能
  - UCHIRsの線幅は~20-60km/s
- ロングスリット分光→速度プロファイルの空間分布

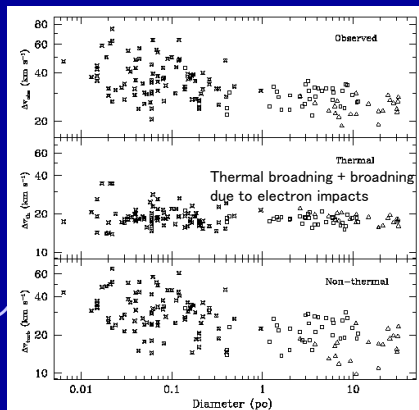


FIG. 4.—Line width vs. diameter relationship for H II regions. Triangles: extended H II regions (Garay & Rodriguez 1983); squares: typical H II regions (Churchwell et al. 1978); stars: compact and ultracompact H II regions (Table 1). Top: Observed line width. Middle: Thermal line width. Bottom: Nonthermal line width.

Garay & Lizano 1999

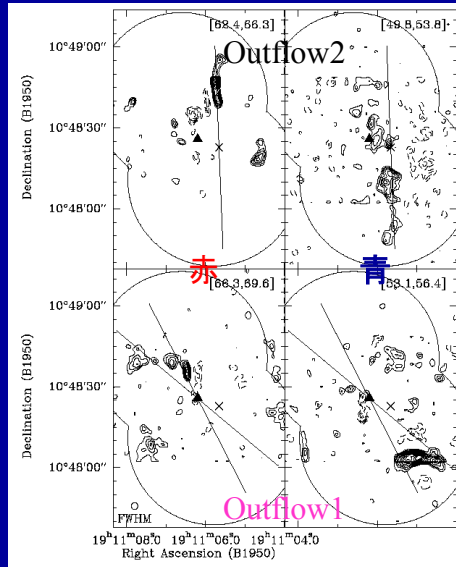
# G45.12+0.13の場合

- Cometary UCHII (WC89a)
  - ただし、multipleに近い
- 9.5kpc  $\rightarrow$  1'' $\sim$ 0.046pc
- かなりmassiveな星の生成
  - $\text{Log}(N_{\text{c}}) 49.53 \text{ s}^{-1} \rightarrow \text{O5}$
  - IRAS FIR  $\rightarrow$  O5 (Cluster仮定)
- $n_{\text{e}}: 1.13 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  (peak)
- EM:  $1.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-6} \text{ pc}$  (peak)
- $L_{\text{total}} = 1.7 \times 10^6 L_{\text{sun}}$
- 2' scaleのCOアウトフロー

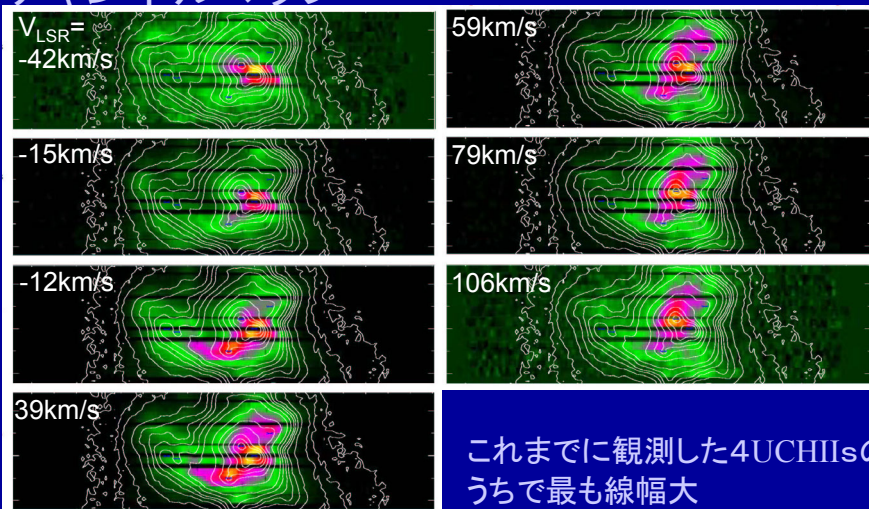
Fig4  $^{13}\text{CO } J=1 \rightarrow 0$  outflow (Hunter et al. 1997)

▲: Radio peak of UCHII region.

×: Suggested origin of the 2nd flow



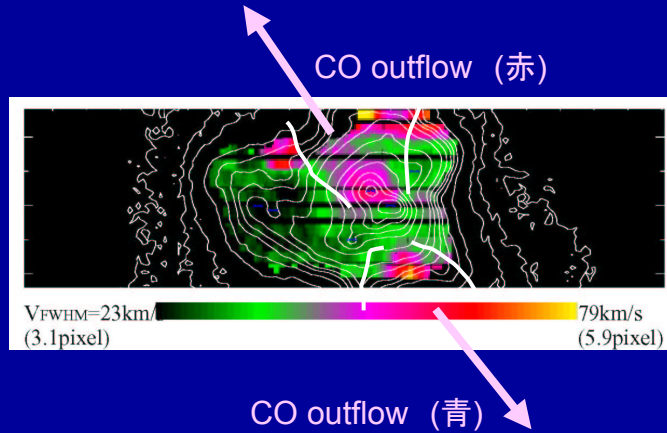
# G45.12+0.13のslit scanによる[N III]輝線チャンネルマップ



これまでに観測した4UCHIIsのうちで最も線幅大

# 速度幅のアウトフロー方向への enhancement

1成分gaussianでフィットしたときの[Nell]輝線幅(FWHM)



## 物理量: アウトフローvs電離ガス

- アウトフロー駆動とUCHII現象は段階が異なる現象
  - エネルギー規模, 年齢に大きな隔たり
- UCHII形成時点でoutflowで生じた構造が残存
  - UCHIIのradio/MIR/NIR放射が、outflow軸に関連したようなアーチ構造を持っている & 電離ガス運動のoutflowとの関連

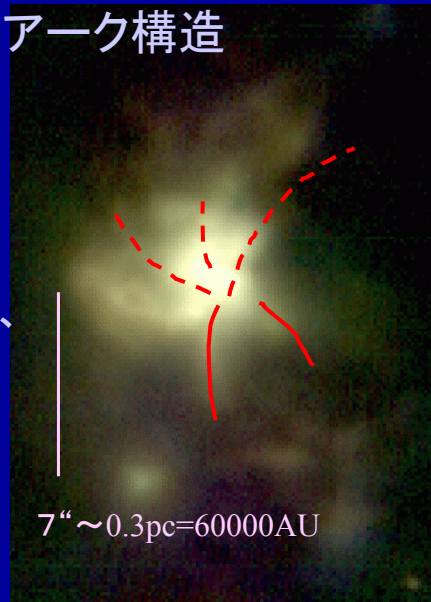
	Outflow (Hunter et al. 1997)	UCHII region (from $\Delta v$ of [Nell])
Energy [erg]	$5.6 \times 10^{48}$	$1.9 \times 10^{45}$ ( $1/2 M_{\text{ionized gas}} \Delta v^2$ )
Moment [ $M_{\text{sun}}$ km/s]	31000	50 ( $M_{\text{ionized gas}} \Delta v$ )
$\tau_{\text{dynamical}}$ [yr]	$2 \times 10^5$	$6 \times 10^3$ (UCHII size / $\Delta v$ )

電離ガス質量 $\sim 1.3 M_{\text{sun}}$ : 電子密度とサイズからすべてH+として求めた

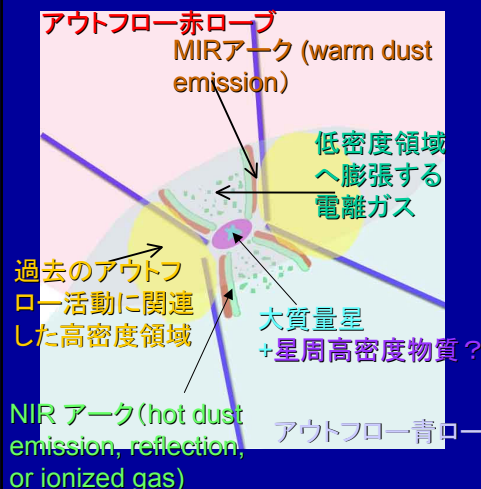


## 複数のアーク構造

- アウトフローに沿ったような複数のアーク構造が、Nband域各波長、[NeII]放射、NIR (J,H,K)放射で観測される



## MIR/NIR/電波観測から考えられる中心部の構造



1. 過去のアウトフロー活動で、アウトフローローブの方向に周辺よりも密度の低い領域を形成

2. 大質量星からのUV放射開始後、電離ガスが低密度領域へ膨張。運動はシャンパン流的になっており、この低密度領域で[NeII]速度幅が増加。はき寄せられた物質がMIR/NIRアークとして見えている

→ O型星でも小質量星的な降着による形成？

# Simpleな形状を持つUCHII

- G35.20-1.74 (3.3kpc(Araya et al. 2002))
  - 典型的なcometary UCHIIIR
  - 2slit位置 (cometaryの軸に並行と垂直)
  - 分子線LSR速度: 中心は42-46km/s、ウイング込
  - RRLLSR速度 47-48km/s
  - Radio continuum → O7.5相当
- G33.92+0.11 (7.1kpc (Fish et al 2003))
  - Radioではcore-haloだがNバンドではbipolar
  - 1slit位置 (bipolarの軸)
  - 分子線LSR速度 106-108km/s
  - RRLはLSR速度 98.7-103.3km/s
  - Radio continuum → O7.5相当
- これらの[NeII]ガス運動をCOMICS高分散分光で観測

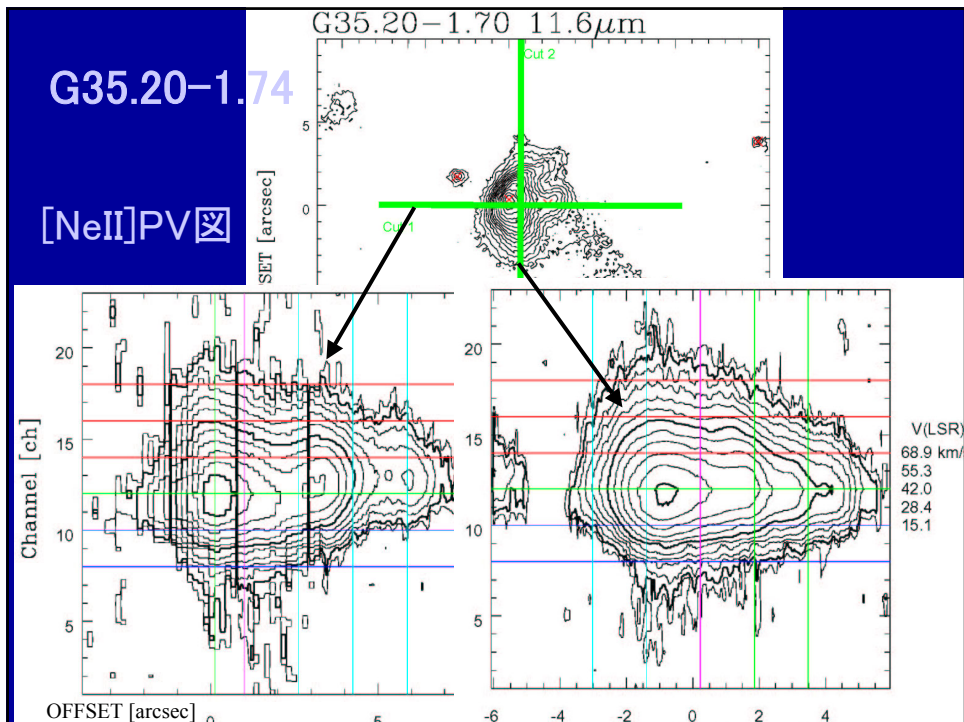


G35 2cm 10''x10''



G33 2cm 10''x10''

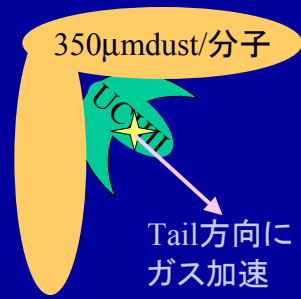
Wood & Churchwell 1989



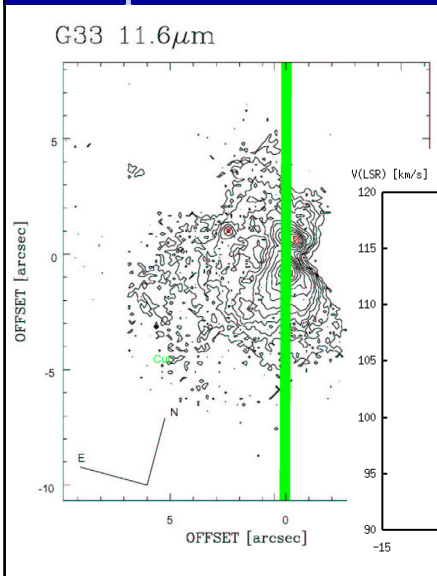
# G35.20-1.74

シャンパン流的cometary HII領域として  
よく説明できる

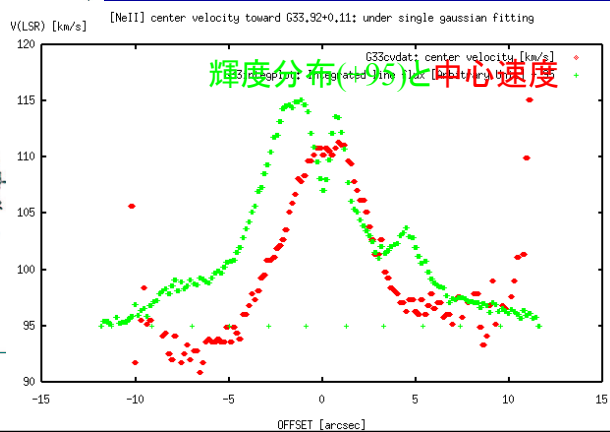
- ・ 「NeII」輝線
    - V(LSR)が40-50km/s
    - cometaryの軸上ではtail側にかけて赤くなる
    - PV図でどのCutでも赤い側にウイング
  - ・ 分子線 (Hofner et al. 2000等)
    - V(LSR)はおおよそ42-45km/s
    - 青い側にウイング
  - ・ 350 $\mu$ mダスト放射 (Hunter et al. 2000)
    - 北側と東側にパー状に分布
    - Cometaryのheadが北東
  - ・ 速度範囲は20km/s程度
- 視線向こう側に開いたシャンパン流膨張



# G33.92+0.11の場合： bipolar軸にそった[NeII]ガス加速



- ・ 分解能に近い線幅
  - プロファイルに1成分 gaussian fit
- ・ 南北極方向への加速

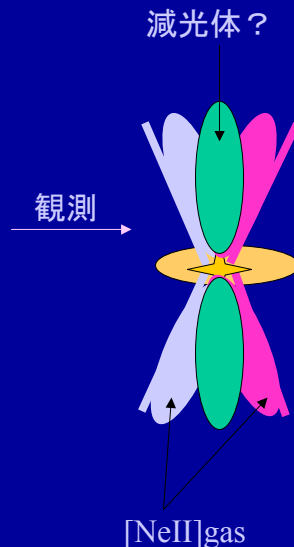


# G33.92+0.11

- [NeII]は分子線よりも青い
  - RRLも青いがRRLより分子との差が大(数km/sと15km/s)
- 中心で一定に近く、その外で距離に対して線形に加速、さらに外では再び一定速度
  - ただし、全体として9km/s/pc程度の加速にのっているよう
  - 加速量は15km/s、率 125km/s/pc
- ほぼedge-onで見たbipolar ionized outflowか？
  - 北側が赤いので向こう側
  - 11.7 $\mu$ m像で北側が弱いのと矛盾しない
- 11.7 $\mu$ mより8.8 $\mu$ mの方が中心の2ピークの距離が小
  - おそらくbipolarの中心部に電離星
- 電離フローの開口角77度
- NIRでは中心星は見えていない。
  - 350mm peakにUCHIIがあるので矛盾はしない

## 構造

- 分子ガスよりも赤いほうが見えていないのは不思議
  - 青と赤の2成分系に単純化して考えた場合、赤側が見えなくなるのにおよそ10%程度までそちらが減光しているとするとこれは $\tau$ にすると、2程度以上に相当
  - $A_v$ にすると $\sim 70$ mag、
  - $N(H)=1.1e23$  [cm $^{-2}$ ]相当。少し大きすぎる？
- 向こう側への運動をさえぎるものがある？
- 輝線の $\tau$ の問題？



## 加速メカニズムは何か？

- ・ 加速領域の大きさ・加速が線形であること・加速度・速度分布(中心速度、速度幅)が重要だろう
- ・ 考えられるメカニズム
- ・ 降着円盤による磁気圧: 開口角が大きすぎでは
- ・ 放射圧
  - この場合、点源放射源による放射圧加速は、点源から遠くなるほど光子との衝突頻度が落ちるため、加速度が小さくなりそう
- ・ 星風: もとをたどれば放射圧

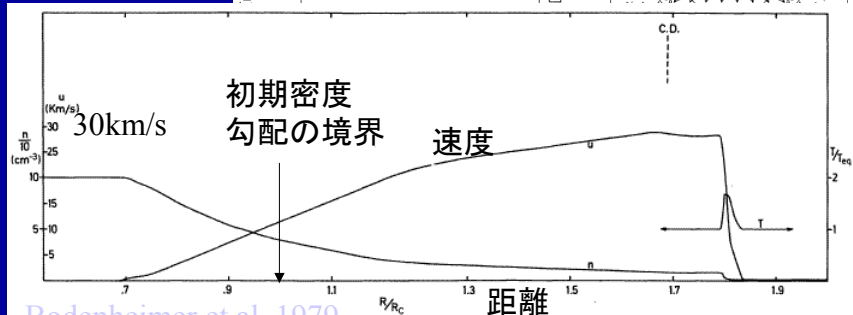
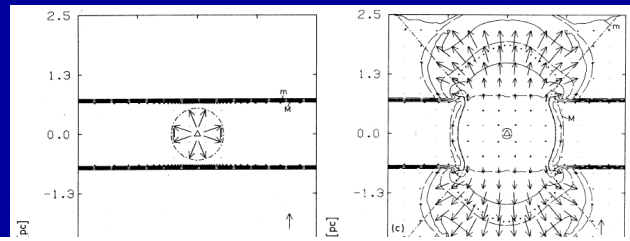
## 考えられる加速メカニズム

- ・ 圧力勾配(シャンパン流)
  - 数十km/sまでの速度を実現可能。
  - 速度プロファイルも高密度物質塊の切れ目付近で距離によっておよそ線形の速度勾配を実現可能。その外では加速がゆるくなり、やがて一定速度になる。G33で観測された速度勾配によく似ている。
  - 速度分布から考えて、中心に東西に伸びたような高密度塊が必要
- ・ 光蒸発ディスク
  - disk状の減光は検出できていないので、あったとしても非常に小さなディスク
  - 速度と中心星質量から考えて~100AU半径のdiskからのフローというのは考え得る
  - ただし、Hollenbach et al. 1994のモデル論文には速度場の情報が無い。

→disk的な平坦高密度構造がbipolarに垂直な方向

# シャンパン流の場合

Tenorio-Tagle 1979



Bodenheimer et al. 1979

## まとめ

- ・ UCHII領域の電離ガスの運動をCOMICSのNバンド高分散分光モードを用いて観測
  - [NeII]ガス運動の様子が見えてきた
  - G45.12+0.13: 過去のアウトフロー活動に関係した構造
  - G35.20-1.70: わかりやすいシャンパン流UCHII領域。分子よりも赤い方(視線奥側)へ物質が流出。
  - G33.92+0.11: MIRではbipolarなUCHIIIに見え、特徴的な速度分布。
    - ・ 中心片側~0.1pcの範囲に渡って距離に対して線形の加速。
    - ・ 板状高密度ガス塊の存在可能性
- ・ 今後、電離エネルギーの違う輝線を使うと奥行き方向などをさらに分解して運動を調べられる
  - [ArIII]8.99 $\mu$ m (28eV), [SIV]10.51 $\mu$ m (35eV)