

「大質量星生成領域を水素分子輝線で観てみると」

臼田 知史

日本学術振興会特別研究員

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: usudatm@cc.nao.ac.jp

銀河系内にも大質量星生成領域や超新星残骸など活動性の高い領域が数多く存在します。これらの集合体で、系外の活動銀河で観られるスターバースト現象は説明できるのでしょうか？ 我々は活動的な領域でよく観測されている水素分子輝線に着目し、どのような励起機構や物理状態で放射されているのかを明らかにするために、銀河系内の大質量星生成領域の分光観測をおこないました。現在までに何が明らかになっているのかを紹介します。

1. はじめに

夜空に輝く無数の星にもそれぞれ個性があり、様々な色、明るさの星が存在します。今回の話で主役を演じるのは大質量星と呼ばれる太陽の約10倍以上の質量の星です。大質量星はアウトフローと呼ばれる、ガスを吹き出す現象を起こして元気に生まれてきます。主系列星になってからも、明るく熱いためにとても目立った存在で周囲に様々な影響を与えます。例えば周りのガスを電離したり解離したり、たまには周りのガスを吹き飛ばしたりと暴れ放題です。でもこうした星の寿命は短く百万～一千万年も経つと超新星爆発を起こして華々しい最期を遂げるのです。つまり太く短い一生の間に周囲の環境に多大な影響を与える存在なのです。

なぜ我々が大質量星に関する研究をするのかと言うと、大質量星が大きな放射・運動エネルギーを持つことから、銀河の進化や星生成の歴史において中心的な役割を演じていると考えられるからです。つまり銀河内の星生成の歴史を初め、銀河の進化について知るためには、大質量星の周囲で何が起きているのか？ どのような影響を与えるのか？ などについて理解しなければならないと考

えるからです。こう考える理由の一つに、銀河の進化に多大な影響を与えるスターバースト現象を起こしている銀河で観測されるスペクトルと、大質量星の関与する領域のスペクトルがよく似ていることがあります。しかし残念ながら大質量星の生成から爆発に至る各進化段階においてどのような観測量からどのような物理状態が分かるのかについてはまだ明らかになっていません。そこで我々はその第一歩として大質量星生成領域に着目して観測的研究を開始したのです。

2. 近赤外ファブリペロ・イメージャ

それでは具体的に我々がどのような観測装置、手法で研究をおこなっているかについて説明しましょう。

我々は波長1～5ミクロンの近赤外線と呼ばれる波長域で分光観測をおこなっています。なぜ近赤外域の分光観測が有効かと言うと次の3つの理由が上げられます。

(1) 赤外線は可視光に比べて波長が長いので、星間塵による減光の影響が小さい。大質量星は一般的に巨大分子雲のように星の材料となるガスの豊富な領域で生成されます。ガスの多い領域には星間塵も多いので光の散乱や吸収による

減光の効果が無視できません。一体どの程度減光の影響があるのかについて簡単に説明すると、例えば暗黒星雲のように可視光で10等級（強度が1万分の1）の減光を受ける領域でも、波長2ミクロンの近赤外線では1等級（5分の2）しか影響を受けないのです。

- (2) 近赤外域では最近の2次元アレイ検出器の発展が著しく、高性能かつ素子数の多い検出器を使った観測ができるようになってきました。したがって観測効率がひじょうに良くなっています。
- (3) 近赤外域には原子、分子、イオンの数多くのスペクトル線が存在します。様々な天体の物理状態を知るためには分光観測をおこない、得られる輝線や吸収線の強度や強度比を実験室の結果やモデル計算と比較することによって天体の物理状態や存在している物質の種類などを探ることができます。更に、高い波長分解能で線スペクトルを観測すると、ドップラー効果により天体の力学的構造を知ることができます。

次に我々の分光観測装置について説明しましょう。可視光や近赤外線でおこなわれている分光観測はスリットと回折格子を組み合わせたものが一般的です。この手法では複数の線スペクトルを同時に取ることができますが、観測できるのはスリットに入ってくる領域に限られます。つまり「空間1次元+波長1次元」の情報を同時に知ることができます。一方、別の分光方法としてはファブリペロ分光器を用いたものがあります。この分光器は2枚の平行反射板間の干渉を利用したもので、2次元アレイ検出器と組み合わせることによりある波長の2次元の空間分布を知ることができる装置です。つまり、「空間2次元+波長0次元」の情報を同時に得ることができるのです。我々は輝線の空間分布や物理状態の空間変化などについて知るために、世界的にも数少ない後者の近赤外分光撮像装置（ファブリペロ・イメージャ）を開発しました。1号機（FINAC）は東京都小金井市の郵政省通信総合研究所の1.5 m望遠鏡¹⁾に、性能

を向上させた2号機（MUSE）は国立天文台三鷹の赤外シミュレータ1.5 m望遠鏡²⁾にそれぞれ装備しました。どちらのファブリペロ・イメージャも約4分角という世界最大視野を持ち、この広視野の特徴が我々の数々の観測に活かされています。

3. 近赤外水素分子輝線

水素分子は星間物質、特に分子雲の主要分子であるにもかかわらず、永久双極子モーメントがないために通常の星間分子のように強い純回転遷移線を示しません。そのため地上から観測可能な近赤外域に存在する、水素分子輝線の中でも強い振動回転遷移線がよく観測されています。水素分子は軽く小さい分子であるため、最も低い回転エネルギー準位間でも約500 K、振動エネルギー準位間では約6000 Kのエネルギー差があり、分子雲の温度に比べるとひじょうに高いのが特徴です。そのため水素分子輝線が検出される領域は星生成が起っていたり、大質量星や超新星残骸が存在するような活動的な領域に限られます。また銀河系内の天体だけでなく系外の活動銀河でも検出されています。しかし、活動銀河で観測される水素分子輝線がどのような励起機構によって放射されているのか？ 励起源は何か？ などについてはこの輝線がNGC1068で初めて発見されてから³⁾約20年経つ現在でも論争が続いています⁴⁾。その原因の一つとしてどのような観測量がどのような励起機構や物理状態を表しているのかが未だ明らかになっていないことがあります。そこで我々は、どのような現象が起きているのかが分かりやすい銀河系内の活動領域（大質量星生成領域や超新星残骸など）に目を向けました。こうした天体について詳細な近赤外分光観測をまずおこない、上述した不明瞭な点を明らかにすることが先決であると考えます。その第一歩として太陽系から最も近い大質量星生成領域であるオリオン大星雲の研究を開始しました。

4. オリオン大星雲における水素分子輝線の励起機構

オリオン大星雲はトラペジウムと呼ばれる OB 型星の放射する紫外線によって電離された HII 領域です。この周辺には巨大分子雲や赤外線観測により発見された多数の原始星が存在することから、現在盛んに星生成が起こっている領域としてよく研究されています。したがってこの領域について詳細に研究することは、大質量星生成領域全体を理解するために適したケーススタディになると考えられます。

そこで我々は近赤外ファブリペロ・イメージャ (FINAC) を用いてオリオン大星雲の中心領域 $6' \times 8'$ (2.6 光年 \times 3.4 光年) を観測しました。特に水素分子の励起機構についてその空間変化や、各領域毎の物理状態を研究するために、2 本の水素分子輝線 ($H_2 v=1-0S(1)$, $2-1S(1)$: $S(1)$ は $J=3-1$ を表します) と 1 本の水素原子再結合線 ($Br \gamma$: $n=7-4$) で分光撮像観測をおこないました⁵⁾。図 1 a

は水素分子輝線 $1-0S(1)$ (波長 $2.122 \mu\text{m}$)、図 1 b は水素原子再結合線 $Br \gamma$ (波長 $2.166 \mu\text{m}$) のイメージで、連続光成分は差し引いてあります。これらのイメージはモザイクイメージと言い、領域の異なる複数の撮像フレームを組み合わせている画像です。

図 1 a と 1 b を比較してみると $Br \gamma$ 輝線の分布は励起星トラペジウムを中心にほぼ同心円状に分布しているのが分かります。一方、水素分子輝線の分布を観るとトラペジウムから約 1.5 分角北西にピーナツの形をした強い放射天体が存在するのが分かります。これはオリオン KL と呼ばれる天体で、今まさに大質量星が生まれている場所です。その他の特徴としては、KL 領域からの水素分子輝線を除くと水素分子輝線の分布が $Br \gamma$ の分布を囲んでいるのが分かります。

それでは次に各領域についてどのような特徴があるのか? どのような物理状態にあるのか? について説明しましょう。

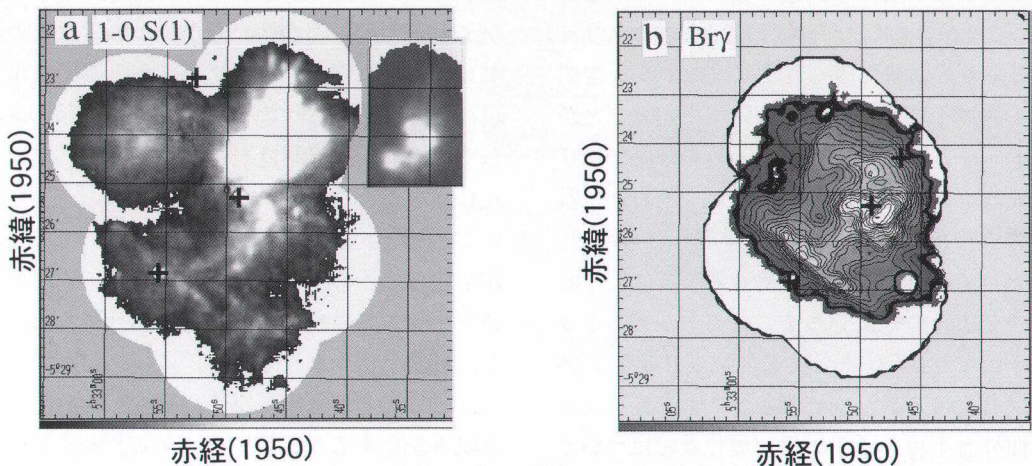


図 1 : (a) オリオン大星雲中心領域の水素分子輝線 ($H_2 v=1-0 S(1)$) の空間分布図。空間分解能は約 $8''$ 、波長分解能は約 250 km s^{-1} 。+印は下から $\theta^2 A$, $\theta^1 C$ (トラペジウム), BRUN643 の位置を表す。右上の図では、KL 領域について、強度の表示レベルを変えている。

(b) オリオン大星雲中心領域の水素原子再結合輝線 ($Br \gamma$) の空間分布図。空間分解能は約 $8''$ 、波長分解能は約 250 km s^{-1} 。+印は下から $\theta^2 A$, $\theta^1 C$ (トラペジウム), BN の位置を表す。

4-1. ブライトバー領域における水素分子の励起機構

——高密度光解離領域——

トラペジウムから約2分角南東にBr γ 輝線が急激に弱くなり棒状に分布している領域が見られます(図1b)。これがブライトバー領域です。ミリ波の分子線の観測により、更に南東には分子雲が存在することが明らかになったことから、ブライトバーはHII領域と分子雲との相互作用の場として有名な天体です。この相互作用の場では一体何が起きているのでしょうか?

13.6eVより高エネルギーの紫外線は水素原子を電離しHII領域を形成します。それより低エネルギーの遠紫外線はHII領域の外側まで達しHII領域に接する分子雲のガスを励起・解離したり、水素原子より電離エネルギーの小さい原子(炭素など)を電離します。こうした領域は「光解離領域(PDR)」と呼ばれ星間ガスの相が大きく変化し、その物理・化学状態が大きな影響を受けている領域です。星間空間には紫外線の影響を受けている中性水素原子ガス雲や分子雲が多数存在するため、光解離領域は星間ガスで一般に見られる重要な領域の一つと言えます。

ブライトバーで水素分子輝線が観測⁶⁾されて以来、光解離領域における水素分子の励起機構についていくつかの天体で議論が始まりました。励起機構を判断するためには複数の輝線強度比を調べれば分かるため主に分光観測が行われてきました。現在理論的に提案されている励起機構は4種類ありますが、主なものは衝撃波の伴う領域で見られる熱的励起と紫外線による励起です⁴⁾。前者の場合は、輝線強度比 $v=2-1S(1)/1-0S(1)$ ($=R_{2-1/1-0}$) は約0.1になるのに対して後者の場合は約0.6になるため、この2本の強度比による二つの励起機構の区別が一般に試みられてきました⁷⁾。しかし実際に光解離領域で観測される値は0.1~0.6の間の値を取り、二つの励起機構が観測ビーム内で共存していると考えられていました。ところが1990年前

後になり高密度分子ガスが存在する光解離領域では分子間の衝突による励起・脱励起の効果が無視できなくなり、強度比 $R_{2-1/1-0}$ は紫外線励起であるにも関わらず密度や紫外線強度によっては約0.1まで低くなることが理論的に予言されました^{8), 9)}。いったい光解離領域において、水素分子はどのような機構で放射されているのでしょうか?

我々は輝線強度比の空間分布に注目しました。それは、これまで観測されている光解離領域は一つのスリットや開口位置でしか観測されていないために空間分布や変化については殆ど議論されていなかったからです。また、我々独自のファブリペロ・イメージャの特色を活かせる観測方法でもあります。図2a(表紙)はブライトバー領域の水素分子輝線強度比 $R_{2-1/1-0}$ の空間分布をカラーで示し、1-0S(1)輝線強度($=I_{1-0}$)の等高線を重ねたものです。この図から空間分布を比較すると I_{1-0} の強い領域では比が低く、弱い領域では比が高いという、 I_{1-0} と $R_{2-1/1-0}$ とは反相関関係にあることが分かったのです。これを分かりやすくするために、横軸に I_{1-0} 、縦軸に $R_{2-1/1-0}$ を取ると図3aの様になり、きれいに反相関関係を示します。この関係を、密度が 10^4 , 10^5 , 10^6cm^{-3} の高密度光解離領域のモデル計算結果と比較することにより次の2つのことを明らかにしました。

- (1) この相関は密度が高いほど I_{1-0} が強く $R_{2-1/1-0}$ が低くなることで説明可能です。密度が上がるにつれて衝突励起・脱励起の効果が効きやすくなるために I_{1-0} は上がり $R_{2-1/1-0}$ は低くなるのです。また、水素分子輝線は光学的に薄い輝線のため、ガスが増えると輝線強度が強くなります。
- (2) ブライトバーは紫外線強度 G_0 が 10^5 (単位は太陽系近傍の値)、見かけの傾角82度、平均密度 $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^{-3}$ の淡いガス成分中に 10^6cm^{-3} 以上の高密度なガスのクランプ(塊)が存在する密度構造で観測結果とよく一致する。2種類の密度成分の足し合わせで強度と強度比を説明する場合、図3aの一点鎖線に沿って2種類の

密度の割合が変わります。この曲線は我々の観測結果とひじょうに良く一致します。つまり観測結果を2種類の密度成分の足し合わせでよく説明することができるのです。2本の一点鎖線で囲まれた領域に比べて観測点には分散がありますが、これは可視光で約2等程度の減光が空間的にバラついていることや幾何学構造がきれいに傾角82度ではなく約±2度のバラツキがあることで説明できます。つまり、我々は輝線強度と強度比の空間分布を調べて、その間に反相関関係があることを発見し、ブライツバーは高密度な光解離領域であることを証明することができたのです⁹⁾。

4-2. KL領域における水素分子の励起機構

——衝撃波領域——

代表的な大質量星生成領域であるKL領域はこれまでに様々な波長の観測が行われ、原始星IRc2からのアウトフローが周囲の分子雲に衝突し衝撃波が生じている領域であることが知られています。水素分子輝線に関してはピーク1とピーク2と呼

ばれるアウトフローの両極付近では、分光観測の結果から衝撃波に伴う熱的励起であることが分かっていますが、我々の過去の1-0S(1)の観測により明らかにした橋状構造やフィンガー領域¹⁰⁾でどのような励起機構になっているのかは分かっていませんでした。そこで我々はKL領域全体における励起機構を明らかにするために2-1S(1)輝線の観測をおこないました。図2b(表紙)は2a同様に強度比 $R_{2-1/1-0}$ の空間分布をカラーで示し、 I_{1-0} の等高線を重ねたものです。この図より、アウトフローの方向だけでなく円盤の方向でも強度比がほぼ0.1と一定で、KL領域は全域に渡って純粋に衝撃波により励起されていることが分かりました。この結果は我々の過去の観測より明らかにした「KLのアウトフローはもともと等方的であり、橋状構造はアウトフローと円盤の相互作用によって生じた」とする説や、「フィンガー領域では高密度な分子ガスのフィラメントにIRc2からのアウトフローが衝突し輝線を放射している」という説を支持することができたのです^{10), 11)}。

KL領域で見られる衝撃波領域における水素分

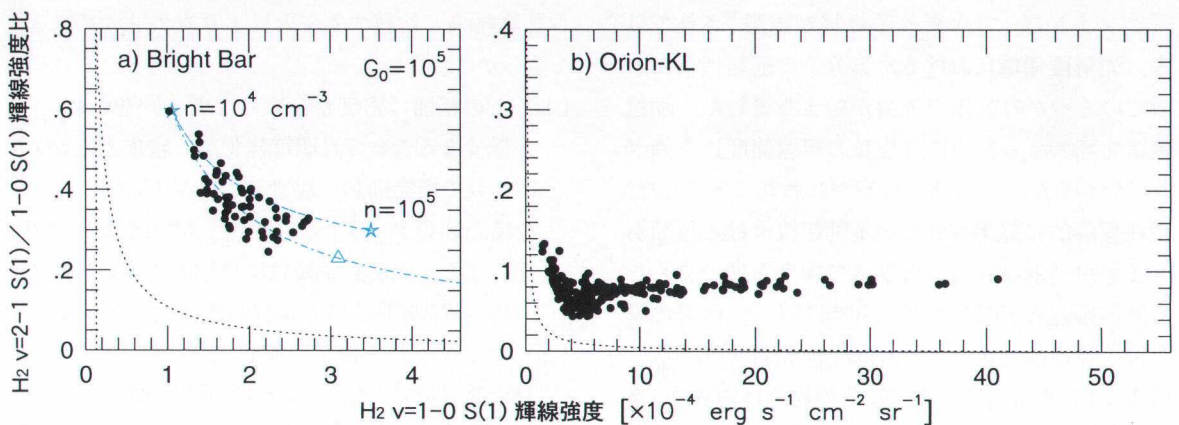


図3：(a) オリオンブライツバー領域の水素分子輝線強度比 $R_{2-1/1-0}$ と輝線強度 I_{1-0} の相関図。黒丸が観測点で、点線は3 σ レベルを表す。星印は分子ガス密度 10^4 、 10^5 cm^{-3} の場合に見かけの傾角(82度)の効果을考慮した際のモデル計算値。2本の一点鎖線はそれぞれガスの密度成分として(10^4 と 10^5)または(10^4 と 10^6)の2種類のガスが混在する場合の計算値で、 Δ 印は 10^4 成分が95%、 10^6 成分が5%の場合を表す。

(b) オリオンKL領域の水素分子輝線強度比 $R_{2-1/1-0}$ と輝線強度 I_{1-0} の相関図。黒丸が観測点で、点線は3 σ レベルを表す。

子の励起機構とブライトバーの様な高密度光解離領域における励起機構を直接比較するために、KL領域全体についても強度比 $R_{2-1/1-0}$ と I_{1-0} の相関を調べてみました (図3b)。この2つの相関図を比較すると、高密度光解離領域の場合に見られる反相関関係と衝撃波領域における I_{1-0} に依らない一定の $R_{2-1/1-0}$ の関係には明らかな違いが見られることが分かります。つまり、このような相関図を作ることにより、衝撃波により励起されているのか？ 紫外線により励起されている領域なのかを区別できることを発見したのです。

この方法はオリオンのその他の領域で早速有効に利用できました。それはオリオンSと呼ばれる領域で、KL天体から約2分角南方に位置し、水素分子輝線が強い数個のクランプ構造をしています (図1a, 図4)。この領域の近傍にはトラペジウムが存在することから紫外線は豊富です。その一方で、いくつかの分子雲コアや遠赤外線点光源が存在することからアウトフローを伴う原始星がある可能性もあります。そのため水素分子を励起している源が主に何であるのかは全く分かっていませんでした。しかし、 $R_{2-1/1-0}$ と I_{1-0} の相関関係を調べると、KLの場合に見られる傾向と同じであることが分かりました。そこでミリ波の高速分子流 (CO $J=2-1$) のマップ¹²⁾と比較するとクランプの分布がよく一致することも分かりました (図4)。したがって、この領域における水素分子輝線は原始星からのアウトフローに伴う衝撃波起源であることを明らかにすることができたのです⁹⁾。

衝撃波領域としては原始星のアウトフロー天体以外に超新星残骸が考えられます。しかし最近のIC443における分光観測結果から、今回我々が明らかにした $R_{2-1/1-0}$ と I_{1-0} の相関関係が成り立っていることも確認されました¹³⁾。つまり、この相関図が水素分子の励起機構の判断に有用な方法であることが裏付けられました。

オリオンS領域 H₂ v=1-0 S(1) + CO J=2-1

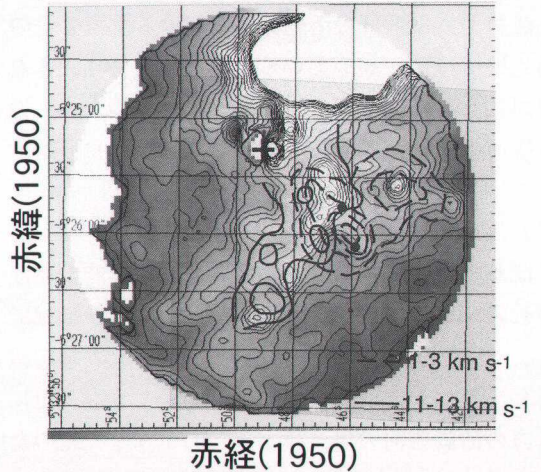


図4：オリオンS領域で得られた水素分子輝線(H₂v=1-0S(1))の強度分布をグレイスケールで示す。太いコントアは一酸化炭素分子輝線(CO J=2-1)の強度分布を表し、実線は速度が $V_{LSR}=11-13 \text{ km s}^{-1}$ の赤方偏移成分、破線は $V_{LSR}=1-3 \text{ km s}^{-1}$ の青方偏移成分の分布を示している。空間成分は水素分子が約8"、CO輝線が12"分解能。

5. 今後の課題

今回高密度光解離領域における水素分子輝線の励起機構について考察したブライトバー領域は紫外線強度が強い天体です ($G_0=10^5$)。それでは紫外線強度が弱い領域ではどのような輝線強度、強度比になるのでしょうか？ この疑問に答えるべく我々は紫外線強度の異なる光解離領域についてもファブリペロ・イメージャを用いて水素分子輝線の分光撮像観測を続けています。詳細の結果は省略しますが、基本的にはブライトバーと同様な傾向が見られます¹⁴⁾。しかしその一方でこれまでのモデル計算とは異なる結果もいくつか見つかっています。こうした食い違いが物理的に何に依っているのか？ どのような現象が起きているのかは今後明らかにしなければならぬ課題です。また、大質量星の生成から爆発に至る各進化段階でどのような観測量からどのような物理状態が分かるのかという問題に

答えを出すには、大質量星生成領域だけでなく超新星残骸や年老いた大質量星などの天体についても観測的研究をする必要があります。

最終的には系外の活動銀河における水素分子の励起機構は何が効いているのか？ という大きな問題にも我々は答えを出そうと思っています。系外銀河の場合、個々の活動領域を空間的に分解することができないため、今回我々が見つけた $R_{2-1/1-0}$ と I_{1-0} の相関関係は一般には使えません。もちろん、すばる望遠鏡で 0.1 秒角以下の空間分解能が達成される場合には、近傍の活動銀河内の各領域で $R_{2-1/1-0}$ と I_{1-0} の相関関係を調べることで励起機構を判断することができるでしょう。しかし、更に遠方の活動銀河の場合はどうでしょう？ そのため我々は新たな励起機構を判断する観測的指標を現在調査中です。具体的には高々数千 K の衝撃波領域では衝突励起されない、励起温度（振動準位）の高い輝線による判断です。しかし残念ながらこれまでのモデル計算では高振動準位の成分については正確に計算に入れていないため、実際輝線強度や強度比がどのようになるのかは殆ど分かっていません。したがって、高密度光解離領域や衝撃波領域においてどのような輝線強度、強度比になっているのかを観測的に明らかにする必要があります。この答えは近い将来、きっと明らかにできると考えています。

そして数年後に新たな観測的指標を武器に、すばるという世界屈指の望遠鏡を用いて、更なる宇宙の謎の解明を求めて進んで行きたいと思っています。

最後に本研究を進めるにあたり協力いただいた指導教官の田中培生助教授を初め、菅井肇、林正彦、片坐宏一、川端拓信、井上素子、高見道弘、周藤浩士、青木哲郎、高見英樹、廣本宣久の各氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Sugai, H., et al., 1994, ApJ 427, 511
- 2) Takami, M., et al., 1997, in preparation
- 3) Thompson, R.I., et al., 1978, ApJ, 222, L49
- 4) 毛利英明他, 1996, 天文月報, 438
- 5) Usuda, T., et al., 1996, ApJ 464, 811
- 6) Hayashi, M., et al., 1985, MNRAS 215, 31P
- 7) Tanaka, M., et al., 1989, ApJ 336, 207
- 8) Sternberg, A., Dalgarno, A., 1989, ApJ 338, 197
- 9) Burton, M.G., et al., 1990, ApJ 365, 620
- 10) Sugai, H., et al., 1994, ApJ 420, 746
- 11) Sugai, H., et al., 1995, ApJ 442, 674
- 12) Wilson, T.L., Mauersberger, R., 1991, A&A 244, L33
- 13) Richter, M.J., et al., 1995, ApJ 454, 277
- 14) Usuda, T., 1996, Ph. D. thesis, University of Tokyo

The Excitation Mechanism of H₂ Emission Lines in Massive Star Forming Regions

Tomonori USUDA

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

National Astronomical Observatory

2-21-1 Osawa, Mitaka, 181 Tokyo, JAPAN

e-mail: usudatm@cc.nao.ac.jp

ABSTRACT: Molecular hydrogen emission lines have been detected in active regions (ex. star forming regions, supernova remnants, active galaxies etc.). However, the excitation mechanism and the origin are not well understood yet. We observed the near infrared molecular hydrogen emission from Galactic HII regions with massive star formations to understand the physical conditions of line emitting regions. As the results, we found that it is possible to distinguish between the shock regions and high density photo dissociation regions by using the relation between 1-0S(1) intensity and the ratio 2-1S(1)/1-0S(1).