

図1 a) コロンビア大学の1.2m 鏡によって CO (1-0) 輝線でみたオリオン分子雲²⁾。黒丸は光で見えるオリオン座を示している。b) オリオン座の東京大学60cm 鏡による CO (J=2-1) 輝線の電波強度図³⁾。

い CO の $J=2-1$ の遷移の観測を行った。図 1 b) に CO 分子の輝線強度図を示す⁴⁾。この 2 つの電波強度図を比べることにより、分子雲の温度分布がわかる。

この分子雲の領域は、ガス密度は 1000 個 cm^{-3} 以上、温度は 20-40 K で、そのまわりの中性水素領域と比較すると、ガスの密度は 100 倍以上なのに対して温度は低い。このために、重力収縮がふつうの中性水素ガスの宇宙空間より起こりやすく、星が生まれてくる源となっている。この分子雲の周りには、OB 型星や T Tauri 型星などの若い星々が存在する。このなかで、どのような過程

でこのような星ができていくかが 1 つの大きな天文学的な問題となっている。

3. 分子雲を細かくみる

さて、この分子雲を細かく見て行くのであるが、どれくらい細かく見て行く必要があるのであろうか？我々の太陽系は、太陽とほぼ同時に作られたと考えられている。つまり太陽ができるためには、小さくとも太陽系程度の大きさのガスの塊（クランプ）があったはずである。太陽系（冥王星軌道で直径約 80 AU）をオリオン座まで持っていくと見かけの大きさは、 $0''.16$ である。これは、ミリ波

干渉計でまだ達成されていない分解能である。しかし、これは最悪条件の場合で、この分解能があれば星の卵を見つけることができるという最低限の数字である。実際はクランプの大きさは80 AUよりも大きかったらう。また、分子雲のなかには太陽よりも重い星が存在するので、さらにクランプのサイズは大きくなるだろう。1～数秒角の分解能でも星の卵は見られるかもしれない。

コロンビアサーベイや60 cmサーベイの分解能(=8分角)は、1.2 pcのスケールに相当する。これでは、星の卵を見るためにはあまりにも分解能が足りない。分解能を上げようとすると、観測時間の制約から観測できる領域の広さは狭くなる。しかし、広域サーベイの結果のおかげで後に続く高分解能観測は領域を限定して観測できるので効率的である。

野辺山宇宙電波観測所の立松らは、図1bの3つの分子雲の中からオリオンA分子雲を選んで、野辺山の45 m電波望遠鏡を使って観測した⁵⁾。図2に得られた硫化炭素(CS)の分布を示す。この位の装置になると望遠鏡の分解能は、CS(1-0)輝線の見える49 GHzで36"である。広域サーベイのビームサイズの13分の1までになった。特にCSによる分子雲の観測は、CSの励起密度が高いためにオリオンA分子雲のなかでも密度の高い($n_{\text{H}_2} = 10^5 \text{cm}^{-3}$ 以上)領域を選択的に示している。図2を見てもわかるとおり、分子雲は芯の通った構造ではなく、ところどころに密度の高いガス塊(分子雲コア)を持ち、それが集まって分子雲を作っている。

立松らは、CSのマップから、約125個の分子雲コアを同定した。これらのクランプの典型的な大きさは、0.16 pc、質量は80太陽質量である。同時に、領域によ

る分子雲コアの違いについても明らかにした。オリオンA分子雲では、北側でコアの大きさは小さくて重く、南側でその逆の傾向があることがわかった。この分子雲コアが星の卵なのであろうか？それを確かめるためには、さらに分解能を上げた観測をすればいい。オリオンA分子雲の北側の分子輝線強度が強い領域を対象を絞って、より高分解能観測をめざした。

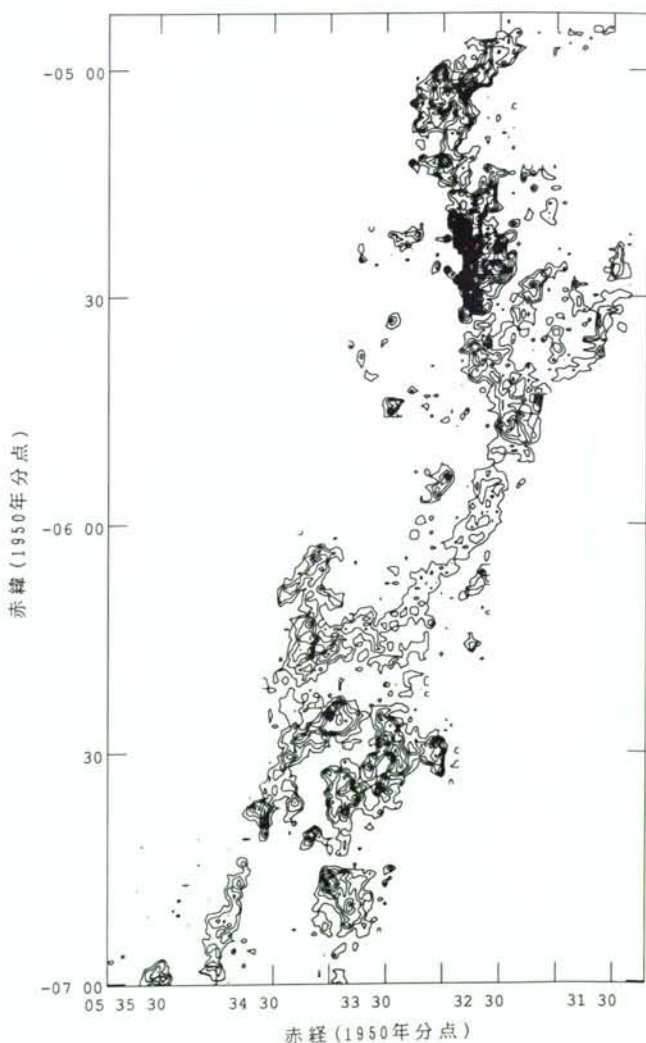


図2 野辺山45m鏡による、オリオンA分子雲のCS分子輝線の分布。



図3 M42とNGC1977光の画像に重ねられた ^{13}CO の分布¹⁷⁾.

4. OMC-1, OMC-2

図2のマップのなかで、赤緯 $-5^{\circ}30'$ より北側の分子線強度の強い部分が、OMC-1, OMC-2と呼ばれている領域である。この領域は、オリオン分子雲のなかでも特に強度に強い領域で、ミリ波天文学の初期から観測されている。図3は、かなり古い観測であるが、光で見えるオリオンの星雲と ^{13}CO 分子の分布を重ねたマップである。このマップでわかるとおり、OMC-1, OMC-2はオリオン大星雲(M42)とNGC1977星雲に付随している分子雲である。この分子雲について、高密度領域を浮き彫りにするために励起密度の高い分子で観測を行う。このような分子の代表は、アンモニアやCSである。

図4にさきほどの45m鏡のCS(1-0)による結果の拡大図と、マックスプランク研究所の100m鏡で観測されたアンモニアのOMC-1, OMC-2の分布を示す。どちらの分子線で見ても、大まかな構造は一致していて、さらに、その構造がいくつかのクランプに分かれている。この中のクランプのうちOMC-1の中にある最も電波強度の強いクランプがオリオンKLである。オリオンKLのピークは、アンモニアでもCSでも一致しているが、そのほかのピークについては、一致していない。この違いは、励起状態の違いだけでは

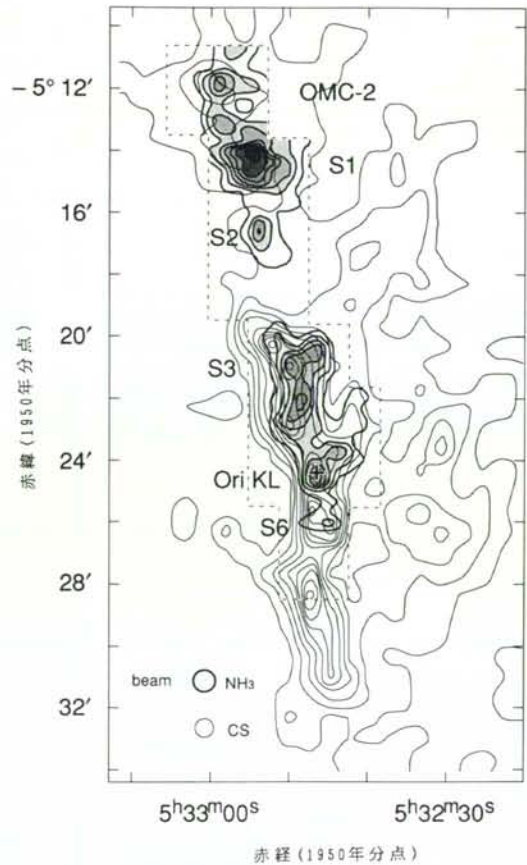


図4 OMC-1, OMC-2領域のCS(1-0)¹⁸⁾とアンモニア(1,1)¹⁹⁾の分布の違い。点線はアンモニアの観測領域である。

説明しにくく、分子雲の化学組成が違っていると考えざるを得ない。とくにアンモニアについては、気層の反応だけでは説明しにくく、分子雲中の星間ダストと深いかわり合いを持っていると考えられている。現状では、CSの方がアンモニアより分子雲の物質分布を素直に示すと考えられているので、CSを使って干渉計の観測を行った。

5. OMC-1の干渉計観測

このOMC-1を野辺山のミリ波干渉計を用いてCS(1-0)で観測を行った。観測した波長は7mmで干渉計の視野は、 $140''$ であるので、OMC-1すべての観測を行おうとすると1視野では不十分で、計6視野についてモザイク観測を行った。

空間分解能は9"であった。図5aに全積分強度図を示す。一番東側に南北に伸びるリッジ状の構造がOMC-1で、A-Dで示されるクランプに分裂している。これらのクランプのパラメータは、表1の通りである。これらは45m鏡で立松らが同定した分子雲コアに含まれている。分解能で約4倍良くなったのであるが、分子雲コアがさらに分裂して見えるようなことはなかった。しかし、それぞれの分子雲コアの構造は、今回の観測で詳しくわかった。B, Cについては、平べったい形をしているが、Dについては三角形にちかい形状である。C, Dについては、もう少し分解能をあげれば

さらに分裂していくように見える⁷⁾。

それぞれの分子雲コアの形がわかったことで、OMC-1全体の方向(位置角 $\sim 10^\circ$)とB, C, Dの各クランプの伸びている方向(位置角 $\sim 20^\circ - 30^\circ$)がずれていることがわかった。このためにOMC-1が波打った構造を持っているように見えている。単にOMC-1リッジが分裂して各クランプができたとしても波打ったような構造にはならない。また、元々バラバラであるのなら、B, C, D 3つのクランプの方向が同じようになるのは説明がつかない。このあたりの星間磁場の方向は、(20度-30度)+90度であるので、各クランプの方向を決めるのに星間磁場がからんでいるのではないかと疑っているところである。

表1 OMC 1 のCS 観測で見えた分子雲コア

クランプ	大きさ(")	質量(M_\odot)
A	14 × 34	40
B	21 × 69	87
C	51 × 103	190
D	53 × 82	250

質量は、CSの励起温度を50K、輝線が光学的に薄いと仮定したときの値。

この観測では、OMC-1のクランプの構造のほかにもおもしろい構造が見られた。我々に対して、 $V_{LSR} = 7.4 - 8.8 \text{ km s}^{-1}$ の速度成分を持ったガスの成分を抜き出すと図5bのような強度分布となる。2本の細長く伸びた構造が得られた(図5b矢印)。これは、アンモニアの観測ではじめて観測され⁸⁾、この構造の長さは3'.3(0.45 pc)で、特に2

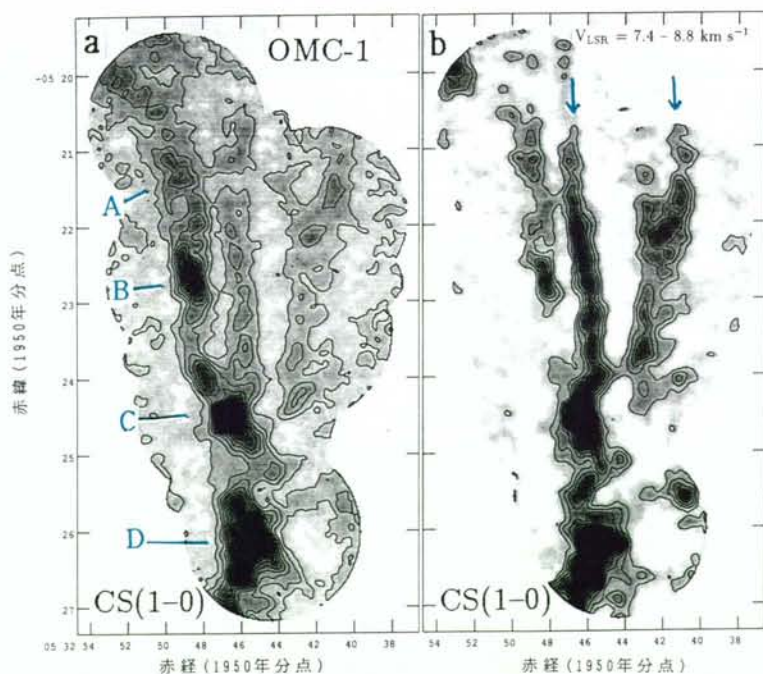


図5 干渉計によるOMC-1のマップ
(a) OMC-1のCS(1-0)による全積分強度図。
(b) $V_{LSR} = 7.4 - 8.8 \text{ km s}^{-1}$ での積分強度図。

本のうち東側の構造は、9"のビームで見ても分解されず、長さとの比は、25以上と非常に細長い構造であることがわかった。しかも、構造は連続的で、図5aのOMC-1のクランプのように分裂していない。このような細長い構造は、力学的に不安定で、分子雲の寿命と比較して十分短い時間に分裂してしまう。後述のオリオンKL領域からの高速分子流などによる影響でわりと新しくできたのではないかと考えられる。

6. オリオンKL

図5aのなかで、Cで示されているのが、オリオンKL領域である。この領域は、中心に、BN, IRc2などの強力な赤外線を出す赤外線星があり、数100 km s⁻¹の速度を持った双極高速分子流^{9),10),11)}と、それと垂直に分布する分子ガスディスクがそのまわりに存在している^{12),13)}、典型的な星形成領域の形態を示している。BNは、約20太陽質量の星で、すでにかなり成長しているとされており¹⁴⁾、現在高速流を盛んに出しているのはIRc2である。IRc2はそのまわりに高密度ガスを伴っているために吸収でよく見えないので、その性質はあまりよくわかっていない。質量についても25-50太陽質量であろうとされている。我々はこの領域の構造、運動を解明するために野辺山干渉計(NMA)を用いてCS輝線を中心として、オリオンKLについて観測を行なった。

図6に得られた積分強度図を示す¹⁵⁾。49 GHzのCS(1-0)輝線については、OMC-1の観測よりも少々分解能が良くなっており、5"×8"の分解能で、視野140"について観測が行なわれた。中心の強い輝線のほかに、南北、東西方向に伸びるディスク構造と、ディスクとほぼ垂直に伸びるリッジ状の構造が見られる。これらのリッジ状の構造は、高速分子流の両側に位置し、高速分子流によって圧縮された回りのガスが見えているのだと考

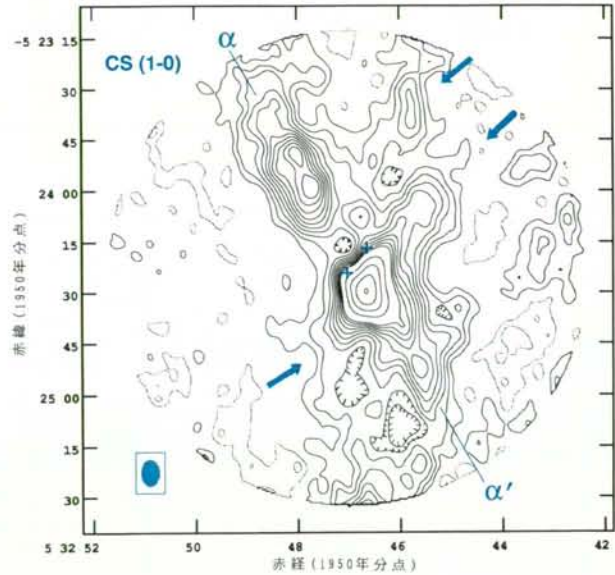


図6 干渉計によるオリオンKLのCS(J=1-0)のマップ。2つの十字はIRc2とBNの位置を、右下の楕円は合成ビームの大きさを示している。αα'の線は図7での位置速度図を作成したところ。矢印は、リッジ状の構造を示している。

えられる。ディスクは直径0.3 pc、PA~30°でほぼ横からみた状態になっている。ディスクに平行な方向の速度構造を調べると図7ようになる。図7は、ディスクは回転運動していて中心に近づくほど、回転速度が速くなるような速度構造を考えれば説明できる。この運動から推定される中心部(半径25"以内)の質量は100-150太陽質量である。

このオリオンKLの中心部70"の領域を波長3 mmの連続波で観測を行った¹⁶⁾。周波数が上がったため、分解能は2"となった。得られたマップを図8に示す。49 GHzのCSの観測では分解できなかった中心部については、4つの電波源(CntA-CntD)に、また北東側のディスクも3つの電波源(CntE-CntG)に分解された。このうちAクランプはBN天体に対応し、強度は低周波の観測から予想されるf-f放射と同程度である。他の電波源は、分子ガスの中にある星間塵からの熱放射を見ていると考えられる。

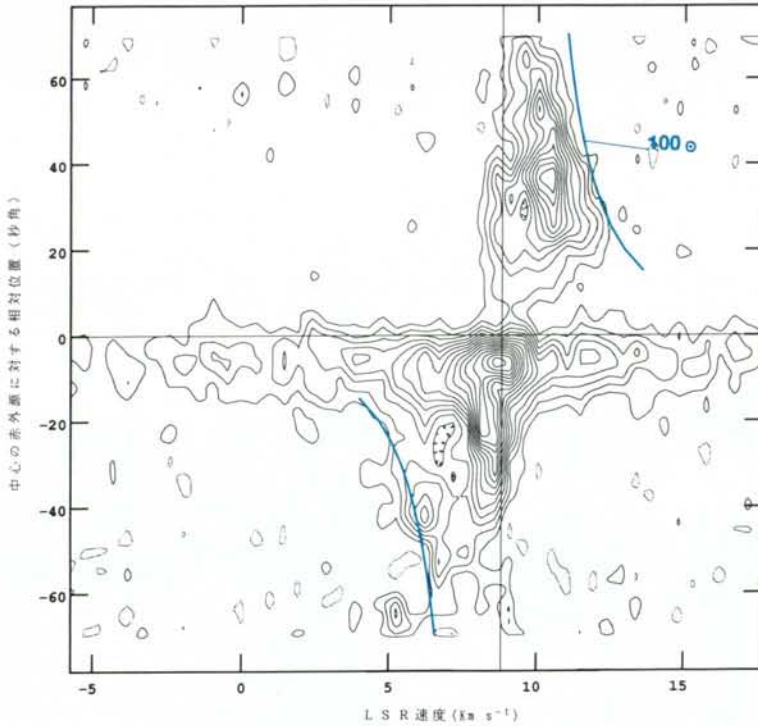


図7 オリオンKLのディスクの速度構造. 実線は, 100太陽質量が中心にあったときのガスの運動速度である.

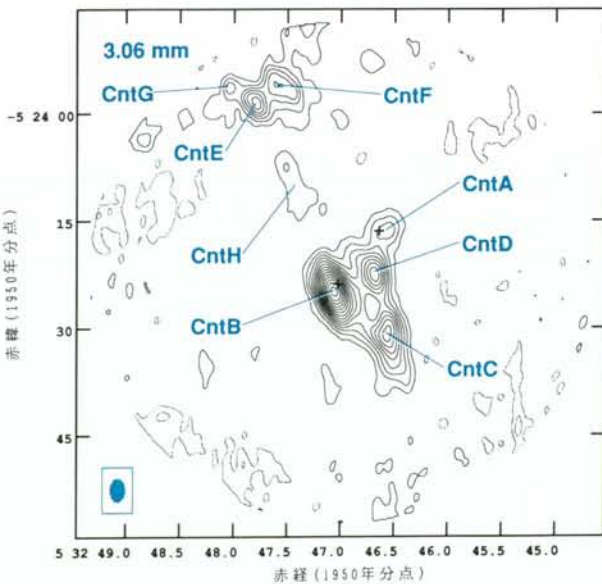


図8 3mm連続波によるオリオンKLのマップ. 計8つの電波源が受かっている. 右下の楕円は合成ビームの大きさを表す.

星間塵は, 分子雲のなかにほぼ一定の割合で存在し, その熱放射は, COの分子と並んで分子雲の質量を求めるのに利用される. 星間塵からの電波強度を分子ガスの柱密度へ変換する係数が調べられていて, それを用いるとあとは温度を仮定するだけでクランプの質量を求めることができる. 各クランプのサイズ, 質量は表2のようになる. 典型的には, これらのクランプの大きさ0.01 pc (2000 AU), 質量は1-7太陽質量である.

この2"という分解能は, 現在オリオンの分子ガスの構造を見る際の限界に近い分解能である. CSの観測で, 双極分子流とそれに垂直な回転ディスクが見えてきて, 重力的に結合された1つのまとまった星形成系が見えてきた. ところが3mmの観測ではそれをさらにバラバラにしてしまった. 3mmでみえたクランプは, それぞれ数太陽質量で, クランプのガスすべてが星にな

表2 3mm連続波でのピークのパラメータ

電波源	大きさ(")	電波強度(mJy)	質量(M _☉)
CntA	5.5×3.9	95	-----
CntB	7.5×4.2	828	6.9
CntC	8.1×4.0	490	4.1
CntD	6.5×4.4	384	3.2
CntE	4.7×3.4	159	3.8
CntF	7.9×4.7	235	5.7
CntG	4.1×3.3	52	1.3
CntH	14.0×3.4	99	2.4

質量は, CntB-CntDについては星間塵の温度を160K, CntE-CntHについては50Kと仮定して求めた。

るのではないので, もし1太陽質量程度の星を作ると思えば, ちょうど良い重さのクランプである。最終的にもっと小さい星になるのなら, もっと小さな構造が見えるかも知れない。また, これらのクランプは中心部の IRc 2 の重力圏内である。この3mmで見えているクランプは, クラスタ星形成の起こっているまさに現場を見ているのかも知れない。

7. まとめ

約20"のスケールから2"のスケールまで, 分子雲の構造を追って見てきた。分解能を上げればそれだけ細かい構造が見えるのは, 当たり前のことである。これら20"スケールから2"スケールまででどのスケールの構造に注目し, 分子雲や星がどのように作られていくか, シナリオをどう作って行くのがこれからの課題である。

またもう1つの課題は, 分解能の追求である。現在の最高の分解能でも, 2000 AU程度であるので, 1つは, 現在の数倍は分解能を上げたい。これは, 現在野辺山のミリ波干渉計で観測周波数の

高周波化を行っている。星間塵からの放射は強くなるので, 分解能の向上は期待できる。さらに, オリオンKLだけでなく, たとえばOMC-1のほかの分子雲コアについても同様の観測をしてやる必要がある。とにかく, まだまだたくさんやらなければならない事がある。

謝 辞

最後にこの原稿を書くにあたって資料を提供していただいた東京大学天文学教育センターの長谷川氏, 阪本氏, 野辺山宇宙電波観測所の立松氏, 梅本氏にこの場を借りてお礼申し上げます。ありがとうございました。

参 考 文 献

- 1) Kutner et al. 1977, *Astrrophys. J.*, **215**, 521.
- 2) Maddalena et al. 1986, *Astrophys. J.*, **303**, 375.
- 3) Genzel et al 1981 1981, *Astrophys. J.*, **244**, 844.
- 4) Sakamoto et al. 1992, in preparation.
- 5) Tatematsu et al. 1992, submitted to *Astrophys. J.*
- 6) Batrla et al. 1983, *Astron. Astrophys.*, **128**, 279.
- 7) Murata et al. 1992, in preparation.
- 8) Murata et al. 1990, *Astrophys. J.*, **359**, 125.
- 9) Zuckerman et al. 1976, *Astrophys. J. Letters*, **209**, L137.
- 10) Kwan and Scoville 1976, *Astrophys. J. Letters*, **210**, L39.
- 11) Erickson et al. 1982, *Astrophys. J. Letters*, **261**, L103.
- 12) Hasegawa et al. 1984, *Astrophys. J.*, **283**, 117.
- 13) Vogel et al. 1985, *Astrrophys. J.*, **296**, 600.
- 14) Scoville et al. 1983, *Astrophys. J.*, **275**, 201.
- 15) Murata et al. 1992, submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan*.
- 16) Murata et al. 1992, *Publ. Astron. Soc. Japan.*, in press.
- 17) Kutner et al. 1976, *Astrophys. J.*, **209**, 452.