

1. イントロ

定義

(3)と(4)は重ならないか？

- (1) 古典ミラ 可視で発見。赤外で小振幅。1665/1667MHzのOHが多い。タイプ I OHメーザー
- (2) IRCメーザー IRエクセス(I-K>5)+1612MHz OHメーザー(タイプ II)=M型超巨星、M型ミラ
- (3) RLOH/IR 1612MHz OHメーザー(タイプ II) IR源の知識なしのOHサーベイで発見。
- (4) 超巨星 M>9Mo、Mbol<-7.1でコアHe燃焼期にある晩期赤色超巨星でOH/IR星
- (5) AGB星 0.8Mo<M<9Moなので、Mbol>-7.1 (AGB limit: Paczynski 1971)

II. タイプ

a). タイプ VM I : 低光度 (L<10^4 Lo) で低ΔV 強い水吸収バンド

Teff 低いと L(脈動開始) 下がる(Keekey 1970)。: 高メタル—>低Teff—>低光度VM?

$$Q = PM^{0.5}R^{-1.5}$$

ここに、Pは日、MはMo、RはRo、LはLoで測った。kkkk

L=R^2T^4なので、

$$\log Teff = (1/4)\log L + (1/3)\log Q - (1/3)\log P - (1/6)\log M$$

$$Q = 0.12 \text{ for fundamental mode, } 0.05 \text{ for 1st OT (Fox, Wood 1982)}$$

を使い、観測PとL(距離=運動距離)からTeffを決めると、仮定した各モード毎に下図となる。

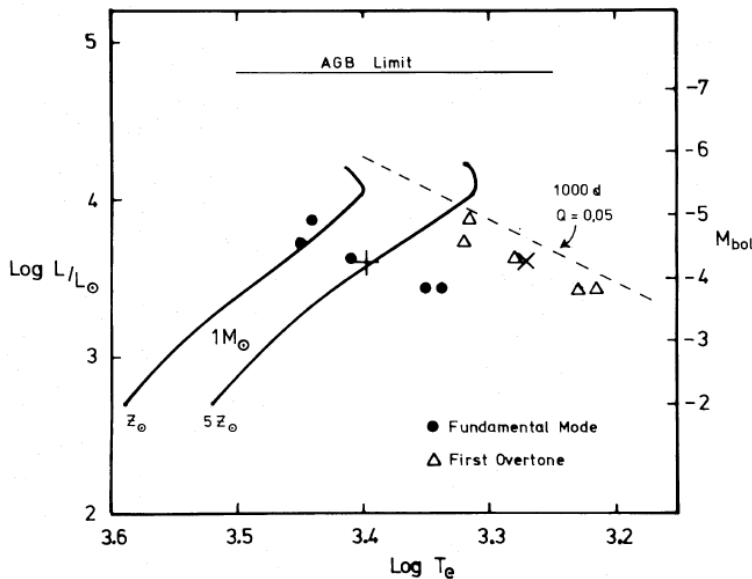


図1 実線は1MoのAGB進化路線。

左 Z=Z_o

右 Z=5Z_o

● : 低L天体 1stOTの場合

+ : その平均値

△ : 低L天体 Fundの場合

× : その平均値

Fundなら進化パスに合うが、1stOTだとTeffが低く過ぎることが分かる。

左図はMario07DATA

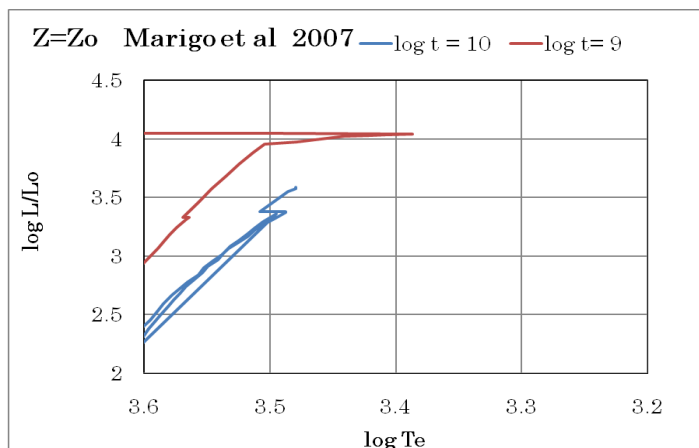
UBVJHK 9t10NEW.xls

マスでは、2.3Moと1.05Moである。

論文の図と比較すると当時とは進化パスが大きく変わっていることが分かる。

Zを大きくして観測を説明できるか？

観測の T_e を疑うべきか？



| OBJECT | TYPE | M_{bol} | PERIOD (days) | $T_{eff} (1 M_{\odot})$ | |
|---------------------------|------|-----------|------------------|-------------------------|------------|
| | | | | $Q = 0.12$ | $Q = 0.05$ |
| 19.2-1.0 | ... | -4.4 | 590 | 2830 | 2110 |
| 20.3-0.1 | VM | -4.3 | 730 | 2570 | 1920 |
| 26.4-1.9 | ... | -4.9 | 620 | 2780 | 2077 |
| 42.3-0.1 ^a ... | ... | -3.8 | 820: | 2200 | 1650 |
| 45.5+0.1 | VM | -3.8 | 760 | 2260 | 1690 |

図1で、もし質量を上げると T_{eff} はさらに下がる。 T_{eff} がマスに鈍感、 $T \propto M^{-1/6}$ 、で太陽メタルの進化パスがかなり暖かいことを考慮すると $M=1-2.5M_{\odot}$ ならよいが、 $M>2.5M_{\odot}$ は観測と合わない。**この論理は分からない。つまり、マスを上げると、観測の T_{eff} は下がるが、進化パスは左へ移るので乖離がさらに大きくなるということ？**

論文IIIには周期は出ていないが、 $\Delta V < 36 \text{ km/s}$, $M_{bol} \sim -4$ 天体が多数ある。**その後の変光モニターは？**これらの低光度(運動近距離を採用して)天体を説明するにはFund脈動がどうしても必要となる。銀河系バルジに多数見つかった低光度II型OH/IR星もこのグループに属する。

というわけで、

- (1) $L < 10^4 L_{\odot}$ となるOH/IR天体は、1stOTでは計算された T_{eff} が低すぎ、Fundamentalモードと考えられる。
- (2) 進化トラックとの比較から、低光度OH/IRは1-2.5 M_{\odot} の高メタル星であろう。
- (3) そうらしい天体候補は多数あり周期決定が望まれる。

b). タイプVM II : 高光度で大 ΔV 強い水吸収バンド しかし、勿論例外も存在する。

- (1) 光度がAGBリミット($M_{bol} = -7.1$)を超えない。OH2.6-0.4 は超えているが精度は低い。
- (2) 変光幅が大きい。
- (3) 水の吸収が強い。超巨星 VX Sgr, VY CMa, RS Cnc は穏やかな水吸収
——> VM I の上に位置するAGB星？

c). タイプ SG : $\Delta V > 29 \text{ km/s}$, $L > 10^4 L_{\odot}$, 弱い水吸収。CO吸収あり。

全て $M > 9 M_{\odot}$ なのか、 $5 M_{\odot} < M < 9 M_{\odot}$ を含むのかまだ不明。

L が計算された9つのタイプSG星中、4星はAGBリミットより0.5等以上低い。ここはAGB星と核燃焼型超巨星が混在する領域である。ただ、 $M > 9 M_{\odot}$ の超巨星でこれほど低光度だとファンダメンタルや1stOTで脈動することは考えにくいので高次の振動星か非脈動星かも知れない。

IRCメーザーの NML Tau や VY CMa は脈動していない。

——> SGの大部分は $M > 9 M_{\odot}$ の超巨星と言ってよいだろう。

Engels 1982 の異議

電波が強い超巨星が存在する証拠はない。

理由1: ミラの周期光度関係の外挿にのる。——> 単純な外挿は誤り。

理由2: 調べた星の ΔL が超巨星のより大きい。——> 確かに問題

Engels が調べた星のうち OH26.2-0.6 のみがタイプSGであった。SEDが急で水の吸収が測りにくい。

LMCでの観測ではVMでもフェイズにより水吸収が弱い。

——> OH26.2-0.6 はタイプVMであろう。

——> 少なくともメーザーの強い星のいくつかは $M > 9 M_{\odot}$ の超巨星である。

なぜなら、

- (1) $\Delta V > 35 \text{ km/s}$ の40%はAGBリミットより明るい。
- (2) それらのメーザーは極端種族Iの運動特性を有し、近距離運動距離の採用は合理性がある。
- (3) 2kpc内にあるOHで明るい超巨星 VY CMa, VX Sgr, NML Cyg の L_{OH} は遠距離にあってもOHサーベイにかかるほどに明るい。

したがって、太陽サークル内には多数のIRC超巨星が存在するはずである。

III 脈動モード

M < 2. 5M_oの星の進化の概像

- (1) AGBのどこかでミラになるがメーザーは出さない。
- (2) AGBを上がる途中でメーザーになる。

最初のメーザータイプ、タイプI(メインライン)、タイプII(1612MHz)、混合型?は不明。

長周期OHメーザーと古典的ミラとの関係がメーザー天体の進化を解釈するキーである。。

タイプII: 大気はより乱れていて(たぶんそれがサテライトラインの原因)、OHでより明るく、数は少ない。

古典的ミラで成立する関係(ΔV -P, ΔV -カラー、P-L)の外挿はメーザー源にフィットしない。

——>多くの試み, Engels+2 1981, Engels 1982, は不満足。この論文で詰める。

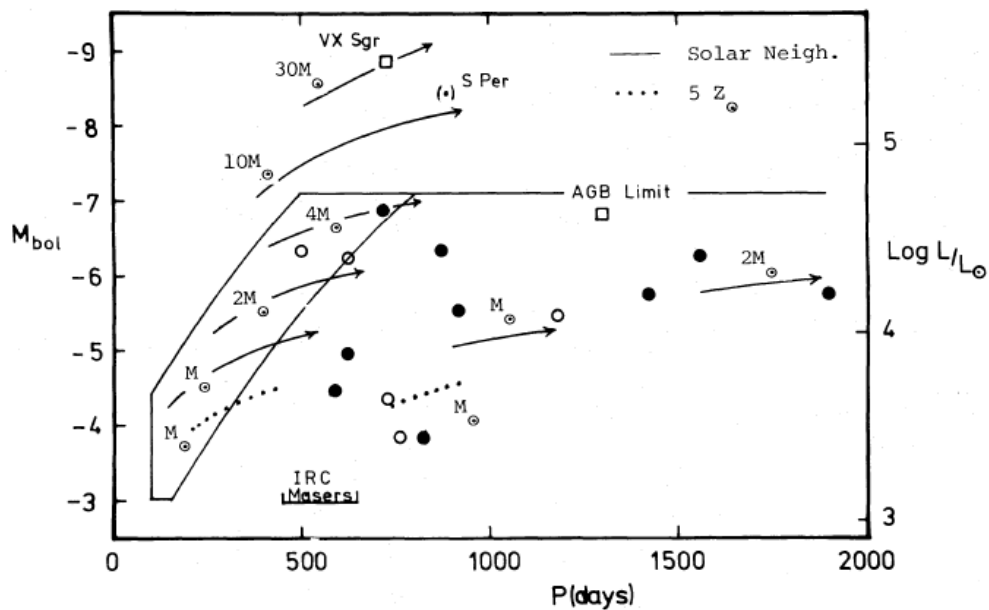


図2 古典的LPVとOH/IR星のP-L関係。

左側の箱はマゼラン雲の古典的ミラ。箱を貫く実線は1stOTの脈動質量=一定のライン。

箱の右側の実線はFundamentalの脈動マス=一定ライン。

□: SG, ○: VM, ●: 未定

図2の特徴は、

- (1) マゼラン箱中に3天体ある。それらのOHエネルギー変換効率は低い。 $\langle M_{\text{bol}} - M_{\text{oh}} \rangle = -0.3$
特に赤くもない。 $\langle K - L \rangle = 2.8$
1stOTであろう。 $M_{\text{bol}} < -6$ でIRCミラより明るい。
- (2) OH/IRの大部分はマゼラン箱の右側にある。約半分は同じ M_{bol} の箱の右縁周期の倍以上の周期を持つ。
OHエネルギー変換効率は高く、赤い。 $\langle M_{\text{bol}} - M_{\text{oh}} \rangle = +1.1$ $\langle K - L \rangle = 5.3$
Fundamentalであろう。
計算では relaxation oscillation が起きると周期が0.5-1倍になる。

したがって、図の線より本当は左側に移るだろう。

(3) 図2の左下端、長いPと低い(L<10⁴L_o)に星がない。モデルもそこには到達しない。

低Lメーザーは短周期側に固まっている。

マスロスがあると、Minit=一定線はさらに寝る。したがって、マゼラン雲のP-L関係は質量系列である。

バルジのLPVもマゼラン雲と大体重なるが、バルジではMbol=-5.6に上限がある。多分マス上限に対応。

バルジではメタル効果が出て、あるPではLが低い。マゼランミラ箱の右側ににじみ出る。

マゼラン箱の左縁はAGBの脈動開始があるステージで起きることを意味する。

右縁の解釈はもう少し難しい。AGBリミット以下では箱の右側にマゼラン変光星は存在しない。Wood+2 1983 は箱の右縁で1stOT→Fundamentalへのスイッチングが起きると考えた。それがタイプII OH/IRか？

図2でマゼラン箱の3星を1stOTとして除くと、残りのOH/IR星で粗いP-L関係が成り立つ。つまり、1stOTとFundamentalのそれぞれでP-L関係が成立している。それぞれの関係はマス系列である。そして、P<400dの低Lミラは1-2.5Moの低質量星である。

IRCミラ(I-K>5) P=450d(IK Tau)-650d(WX Psc) について。

M(1stOT)=1Moのトラックはマゼラン箱の右縁をL=10⁴L_o、P=450dで越える。

M(1stOT)=2Moのトラックはマゼラン箱の右縁をL=2×10⁴L_o、P=650dで越える。

これらのマス=一定ラインの位置はIRCミラが1-2.5Moの1stOTという話に合致する。

同じLでもメーザーが強い(Radio Luminous)星との違いは、まだFundamentalになっていないので、厚いシェルが発達しておらず、メーザー励起に必要な赤外放射が足りない所為である。

IV. 進化シナリオ

a) 低マス(1Mo<M<4Mo) 下の図に示されている。

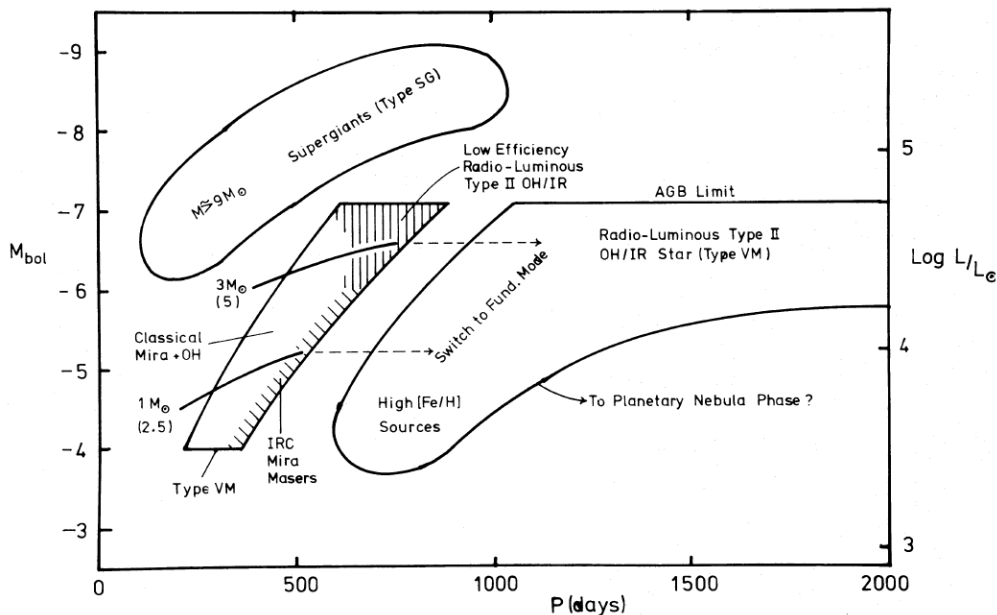


図3 低マスOH/IR星の進化図。マスラインについての括弧なし数字はZ=1Z_o、括弧内はバルジやSMR

(1) 赤色巨星が下からAGBに入ってくる。初めは非変光でメーザーなし。

(2) AGBを昇るどこかで1stOTの古典的ミラとなる。

(3) その後、まずタイプI(R Cas, o Cet) OHメーザー

- (4) 次に $\Delta V < 10 \text{ km/s}$ のタイプII (T Vir, RS Vir) OHメーザー。赤外超過は少し。
- (5) AGBをさらに上がると、L, P, IR超過が増加し、OHメーザーと ΔV が大きくなる。
- (6) 星がマゼラン箱の右縁に達すると、脈動が強まり、大気の乱れが大きくなり、
 $\Delta V \sim 30 \text{ km/s}$ 程度になるが、依然1stOTである。IRCミラ (IK Tau, WX Psc, IRC-20197) が相当する。
 時に熱パルスに伴い、Fundamentalモードに遠足して、大きな ΔV や少し厚いシェルを作ったりする。
- (7) ファンダメンタルモードへのスイッチングが起き、Lが変わらずに図2, 3の右側に移る。
 周期の比が 2 to 4 なので、**どうして 2 とか 1 to 2 と書かないのか?**
 Radio Luminous Type II OH/IR Star の誕生。

b) 中間マス ($4 M_{\odot} < M < 9 M_{\odot}$)

ここの星が低マスと同じ進化をたどる証拠は少ない。
 しかし、1-9 M_{\odot} の星はAGBに乗るので1-4 M_{\odot} と4-9 M_{\odot} が似たシナリオをたどりそう。

c) 高マス ($9 M_{\odot} < M$)

Lが大きいので、IR超過がなくても十分な赤外輻射——>OHプロセスが可能。
 脈動モードは不明だが、VX Sgr, S Per, MC 超巨星は1stOTと矛盾しない。
 ただ、非常に赤い26. 2-0. 6はファンダメンタル脈動のタイプSGかも知れない。

多くのタイプSGメーザーは脈動=0である。Lだけでシェルを作れる (VY CMa, NML Cyg)
 M超巨星はメーザー時期の割合が高い。

古典的ミラ、IRCミラではかなりきれいな相関が ΔV , P, カラー, Lに成立したのにRLOHIRを加えると乱れるのは何故だろうか?

——>グループ内の基本パラメーター、脈動モード、マス、年齢、Teff, など多すぎるために違いない。
 Olsson 1981 (in Physical Processes in Red Giants) が年齢とマスの効果を調べた。

V. 数密度

RL typeII OH/IR の密度の求め方

- (1) BHMW (Baud, Habing Mathews, Winnberg 1981) の表1にある、 $l = 10^{\circ} - 90^{\circ}$ で $\Delta V =$ 小—中の電波源全てが太陽から10kpc以内、スケールハイト140pcの箱内にあると仮定。

——> $n = 4 / \text{kpc}^3$ 高密度側に偏っている?

- (2) BHMWの銀河系天体分布モデルのパラメーターを使い太陽付近の密度評価。

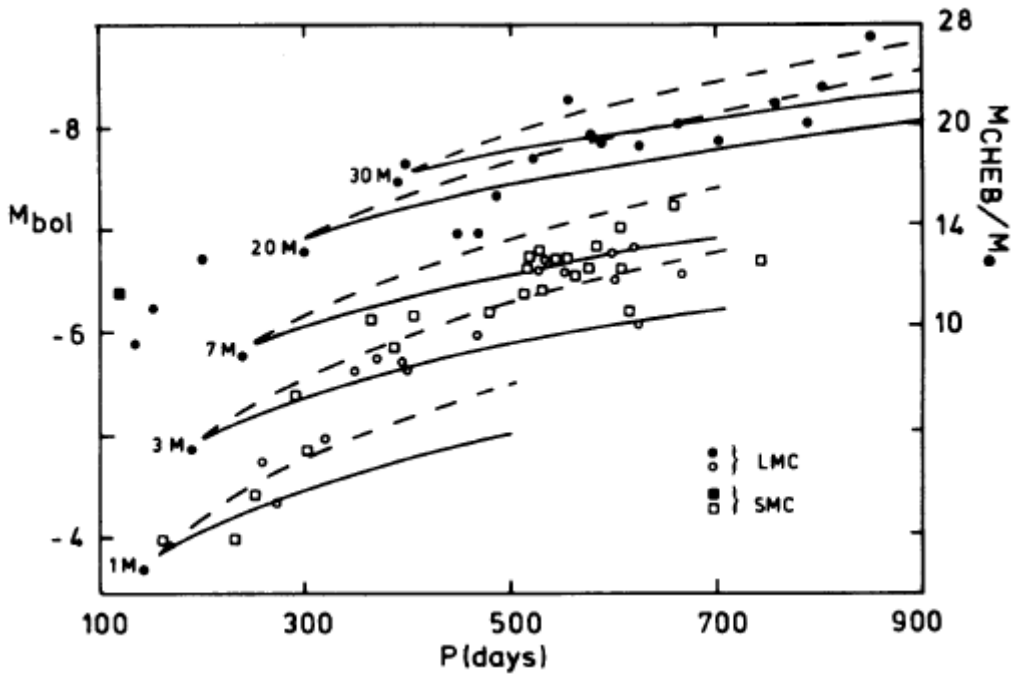
明るいメーザー源 1 kpc^{-3}
 古典的ミラ 250 kpc^{-3} 寿命 = $7 \cdot 10^5 \text{ yr}$ (Wood, Cahn 1977)

——> ミラがVMタイプの母星ならば、VMの寿命 = $< 10^4 \text{ yr}$
 VMのマスロスレートは $1 - 10 \cdot 10^{-5} M_{\odot} / \text{yr}$
 なので、両者はつじつまが合う。

メーザーのこの低密度は単一脈動モードとは合致しない。

$dM_{\text{bol}} / dt = -8 \cdot 10^{-7} / \text{yr}$ (Wood, Cahn 1977)

$\Delta M_{\text{bol}} = (dM_{\text{bol}} / dt) \cdot (\text{ミラ寿命}) = -8 \cdot 10^{-7} / \text{yr} \cdot 7 \cdot 10^5 \text{ yr} = 0.6 \text{ mag}$ = 古典ミラの間の光度上昇分
 ところが、WBF (1981) の一定質量周期進化の図2を見ると、もし1stOTで $P = 1200$ 日まで進化するとさらに0.5等加算され、時間としては新たに $7 \cdot 10^5 \text{ yr}$ が必要となる。



WBF1981の図2 理論的な周期—マス—半径関係による1stOT(鎖線)とFund(実線)

したがって、モードスイッチングがないと、つまり古典ミラと強いメーザーが同じモードとすると、両者の数は同じくらいになってしまう。

仮に、強いメーザーの母星マス > 2.5 Mo としても、強いメーザーの数は同一モードでは説明しきれないほど少ない。

* 板君のB'とCが1stOTとFundだとすると、この議論と矛盾する。

| | | |
|-------|--------|------|
| | 1stOT | Fund |
| Wood: | 古典ミラ | メーザー |
| 板 | SR的(?) | 古典ミラ |

板解釈だとメーザーは単に高質量ミラということになるのか？そのヘンがはっきりしない。

もう一つの可能性として、マスロスがある。

$$Q = PM^{0.5}R^{-1.5} \quad \text{で} \quad R \text{一定のまま} \quad M \text{が減ると} \quad P \text{が伸びる。}$$

$$\text{その影響は} \quad (d \log P / dt) = -0.5 (d \log M / dt) = -0.5 (\log e) (d \ln M / dt) = -(1/4.6) (d \ln M / dt)$$

結局、 $(d \log P / dt) = 3.4 \cdot 10^{-7} \text{yr}^{-1} - (1/4.6) (d \ln M / dt)$ となる。右第1項は Wood, Cahn 1977 から。

$M = 5 \text{ Mo}$ 、 $dM / dt = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Mo / yr}$ の場合で評価すると、第2項 = $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ Mo / yr} = 4 \cdot$ 第1項となり、

したがって、P変化が5倍となり、2倍変化する時間は $\log 2 = 0.3 = (1.7 \cdot 10^{-6}) \cdot dt$ から $dt = 1.8 \cdot 10^5 \text{ yr}$ となる。

このシナリオ、古典ミラが脈動モード一定のままマスロスレートを上げる、はスイッチングと比べるとどうだろう？

1. メーザーの寿命 = $< 10^4$ 年。マスロスでこの短さにするためには $dM / dt > 10^{-4} \text{ Mo / yr}$ が必要となる。
2. スwitchingなしでのマスロス急増のメカニズムが疑問。
3. 低質量星の場合に周期を2-3倍にするには、マスを1/4-1/9に減らす必要(式1)があるが、その余裕なし。
したがって、スイッチングは低メーザーに必要である。

結局、スイッチングが高マスロス・メーザーを引き起こすと考えられる。

ただ、マスロスが進化に大きな影響を及ぼすことは確実である。

図3の経路は修正が必要であろう。

VI. 残された問題

AGB(1-9Mo)タイプII OH/IR 星の進化シナリオにはまだ問題点がある:

論文IIIとこの論文の IIa で述べた結論は、 $\Delta V < 36 \text{ km/s}$ メーザーの多分1/3は $M < 2.5 \text{ Mo}$ であることを要求している。これらの星は古い円盤種族である。この結論はBHMWが導いたスケールハイト=140pc、メーザーの赤経分布、 $\Delta V > 31 \text{ km/s}$ メーザーの運動学特性と矛盾する。

(1)スケールハイト

$31 < \Delta V < 35 \text{ km/s}$ メーザーの範囲に低マスメーザーがあり得るだろうか？

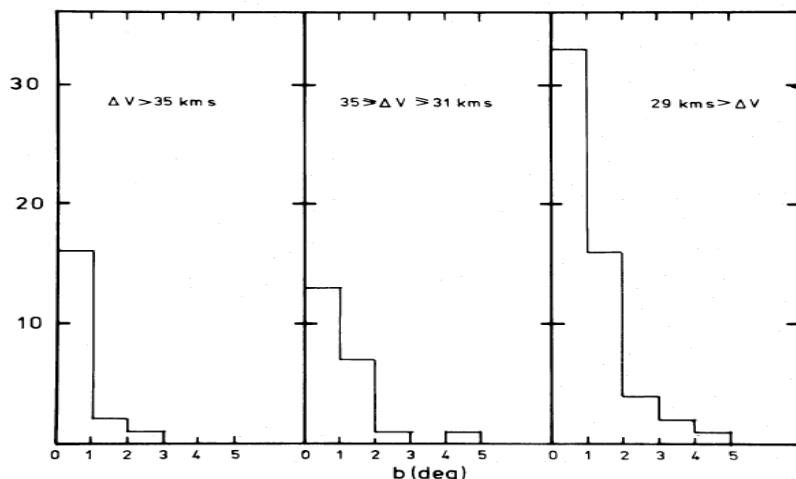


図4 ΔV による緯度分布の変化。

図4を見ると、 $35 > \Delta V > 31$ グループは >35 より <29 グループに似ている。

——> $M < 5 \text{ Mo}$ (極端種族Iでないという意味)星が $\Delta V < 35$ までは混入している。

$\Delta V > 35$ は $M > 5 \text{ Mo}$ のみ。

ふーん、5Moが境目なのか。Marigoで見ると、 $t(\text{TO}) = 5 \cdot 10^7 \sim 1 \cdot 10^8 \text{ yr}$ あたりらしい。

$35 > \Delta V > 31$ に1-2.5Moが混ざっているかどうかは未解決。IRCミラ(1-2Mo)の多くが $\Delta V > 31$ であることは重要である。あれっ、じゃ前の文章とどうつながるんだ？読み違えかなあ？

$\Delta V < 29$ グループの星マス範囲は広い。スケールハイトもマスごとに異なるはず。BHMWは140pcを与えたがこれは平均値。したがって、古い円盤種族(1-2.5Mo、スケールハイト=150-300pc)が $\Delta V < 29$ グループ内においてもおかしくない。関連して、速度分散の平均=35km/sは古い円盤種族的。

(2)赤経分布

強いタイプIIメーザー(強いって見かけじゃないよな?)の赤経分布が ΔV に依らない(BHMV)は、メーザーの多くが1-2.5Moであるという事実と折り合いが付きにくい。

例えば、メーザー分布はPN(低マス星から生まれる)分布と似ているのか？

PNの分布は答えられるほどはっきりしていない。

Cahn, Kaler(1971) $D > 3 \text{ kpc}$ では星間吸収のため観測が不十分

$R_{\text{gc}} = 4-5 \text{ kpc}$ で高密度帯? <——>メーザーも(BHMW)

現在のところ、タイプIIメーザーとPNの関係は不明と言える。

VII. 将来観測

多くのメーザーで周期(特に南天)が不明なことが問題。その後25年間での増加が問題だ!

特にAGBリミット近い 285.05+0.07, 305.91-1.91, 315.22+0.01 などが重要 済んでる?

これらAGBリミットソースがミラのように大振幅なのか？それともHeコア燃焼の超巨星的か？論文Ⅲ天体の多くはスペクトルデータはほとんどない。2μ mでは暗すぎるのである。より長波長？多くのメーザーで位置精度が悪いため光学同定ができない。

VIII. 結論

強いタイプII OH/IR星の進化位置を明らかにした。

a). 1-4Mo タイプVM と タイプVM I

古典ミラとしてAGBを上がる。まずタイプIOHメーザー、続いてタイプIIメーザーとなる。

1stOT脈動を 10^6 年続け、明るくなり、シェルが厚くなりIRCミラメーザー(WX Psc)が誕生する。

その後スイッチングが起き、ファンダメンタルモードに変わると、マスロスが急増し、タイプII OH/IR星となる。 $\Delta V=20-35\text{km/s}$ だが、多くは <31 である。2μ スペクトルの強いH₂O吸収が特徴。

$M_{\text{bol}}=-4\sim-6$

b) 5-9Mo タイプVM II

AGB進化は1-4Moと似ていると考えられるが、確実な観測が少ない。

明るいので、ファンダメンタルモードになる前から1stOTでもIRCミラメーザーの明るい部分を占めているだろう。

VN IIメーザーはファンダメンタルモードで $-7.3 < M_{\text{bol}} < -6$ 、 $P=1200+\text{day}$

例が余りに少ない。

$\Delta V=25-36\text{km/s}$ で多くは >31 である。やはり強いH₂O吸収を示す。

c) 9+Mo タイプSG

コア燃焼超巨星で、Pが測られた少数例では1stOT。Pは不規則だろう。

AGBリミットの上にある候補 349.18+0.20 はファンダメンタルかも知れない。

$\Delta V > 35$ H₂O吸収は弱いかあまり強くない。

明るい星ほど、早くメーザーになる。したがって、メーザーでいる相対期間は延びる。

多分これも電波サーベイでSGタイプが比較的多く見つかる理由だろう。