

# メタノールで探る動力学的な銀河系構造 研究を目指して



松本 尚子

〈国立天文台 水沢 VLBI 観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: naoko.matsumoto@nao.ac.jp

国内の VLBI 観測網、<sup>ベラ</sup> VERA および大学 <sup>バイエルビーアイ</sup> VLBI 連携による 6.7 GHz メタノールメーザー源の位置天文学的な観測成果を報告します。これは、国内では初めて、世界では 2 例目の成果となります。この研究によって、今後 VERA や大学 VLBI 連携による 6.7 GHz メタノールメーザー源の観測で、太陽系から数 kpc 程度までの天体の距離を測定できることが実証されました。また、今まで運動が小さいために数例しかとらえられてこなかった大質量星形成領域の 6.7 GHz メタノールメーザー源の天球面上の固有運動も W3(OH) でとらえることに成功しました。そして、W3(OH) の超コンパクト H II 領域の周りを取り囲む厚い円盤構造の中に 6.7 GHz メタノールメーザー源も存在している可能性が高いことを運動学的に示しました。これらのステップを超えて、現在では銀河系の棒状構造による銀河系ガスの運動への影響を調べるべく観測を進めています。

## 1. VERA とともに歩んだ大学時代

今年の 3 月に晴れて博士号を取得することができました。この区切りの良い時期に、私の学生時代のお話も交えながら、私の博士論文の研究についてご紹介させていただきます。

### 1.1 そこに VERA があった

時は 9 年前の春にさかのぼります。直感の赴くまま鹿児島大学理学部物理科学科へ入学した私を、運命と言えるその瞬間はひっそりと待ち受けていました。当時は宇宙工学も天文学もよくわからないまま謎だらけの宇宙にただ憧れていました。

新入生オリエンテーションのときに、大学で運用している望遠鏡の見学ツアーが組み込まれていました。場所は大学からバスで 1 時間ほどの所にある、鹿児島県薩摩川内市の山中の農学部附属農場入来牧場敷地内。バスで山道を登ってきた新入生たちを迎え入れたのは、牧場の中で抜きん出た



図 1 鹿児島大学農学部附属農場入来牧場の敷地内にある VERA 入来局と後ろに控える 1 m 光赤外線望遠鏡。

存在感を発揮している VERA 望遠鏡でした (図 1)。真っ白な巨体が青空と緑の中で視野いっぱいに入ってくる光景はまさに圧巻でした。これぞ運命の出会い。ここで宇宙を存分に学べると確信した瞬間でした。

### 1.2 宇宙は本当に謎だらけだった

高校生の頃は図書室にあった『ホーキング、宇宙を語る』などをわけもわからず読みながら、宇宙のことを考えれば考えるほどわからないことだらけでした。その分だけ、計り知れないほど奥深く、ワクワクすることがたくさん詰まっている、きっと大学へいけば幅広い知識と専門的なことをみっちり教わって、宇宙のことが手に取るようになるようになるだろう。そんな期待を胸いっぱい膨らませていました。しかし、大学の講義を受けて半年経った頃には、星の質量や距離などの基本的なことさえ体重計に乗るようには簡単に測定できないこと、宇宙論もモデルによっていくつかの可能性があり、確実に答えが決まっているわけではないことなどが次々とわかり、今の天文学の最前線の知識でも宇宙は謎だらけなのだ、真正面から引導をわたされてしまいました。

入学当初は大学がゴールだと思っていた私ははたと思い直し、私も宇宙の解明の一翼を担おうと、受け身から180度心境を変えました。ここで、将来も見据えて博士後期課程までの進学を決心しました。あとはもうまっしぐらでした。机でじっくり考えるよりも、動き回るほうが性に合っている私は、早々に研究室へ顔を出し、研究室の先輩や先生からさまざまなことを教わりました。

### 1.3 VERA プロジェクト

今思うと、鹿児島大学はVERA望遠鏡の運用を通じて日常的に国立天文台の方とのかかわりが強く、少し特殊な環境だったかもしれません。VERAは国立天文台で進めているプロジェクトの一つで、銀河系内に散らばって存在しているメーザー源の年周視差を測定しています。これによって、一つ一つのメーザー源までの距離を精度良く求め、銀河系の地図を作るべく研究を進めています。

「年周視差」というのは、地球が太陽の周りを公転していることにより1年周期で変化する(=年周)天体の微小な位置変化(=視差)のことを言

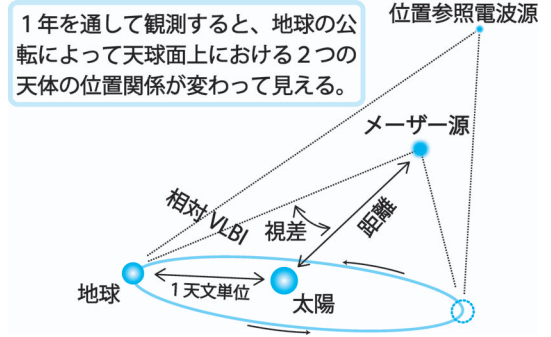


図2 地球の公転と年周視差の関係図。

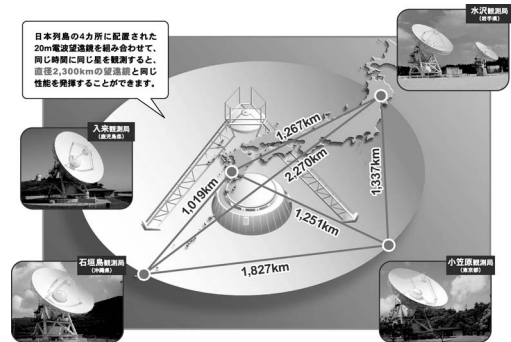


図3 国内4カ所にあるVERA望遠鏡 (VERAパフレットより)。

います (図2)。

この年周視差と距離は、近似的に反比例の関係にあり、近くにある天体ほど視差が大きくなります。現在、世界的に定義されている、太陽系から銀河系中心までの距離は8.5 kpc (=約2万8千光年)で、この距離にある天体の年周視差の大きさは0.018 ミリ秒角になります (1 ミリ秒角=1°の360万分の1)。

物を細かく見る能力、すなわち視力は近似的に観測する電磁波の波長を瞳の大きさを割った値に比例します。この関係に乗っ取って、銀河系内に散らばって存在する数多くのメーザー源までの距離を精度良く測ろうとするVERAプロジェクトのために、日本国内に4台の電波望遠鏡が作られました (図3)。

この4台の望遠鏡で同じ天体を同時に観測し、

後で、4台の観測データを干渉計の名のとおり掛け合わせることで、仮想的に望遠鏡同士の最長距離（最大基線長）に匹敵する直径をもつ巨大な望遠鏡と同等の視力を実現しています。この技術のことをVLBI（Very Long Baseline Interferometry; 超長基線（電波）干渉計法）と呼んでいます。

この良い視力をもつ装置で観測するのにちょうど良いコンパクトさと明るさをもつ観測対象がレーザー源です。この「レーザー」というのは、いわゆるレーザーの波長が長いバージョンのもので、Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation（=MASER; 分子や原子のエネルギー状態の遷移が行われる際の誘導放射によるマイクロ波増幅）の略称です。宇宙空間の中で非常に密度の高いガスの塊の中で、衝撃や赤外線放射によって分子のエネルギー状態が不安定な準位まで励起され、誘導放射が起こりやすい状態になります。そして、天体から見て観測者に対する方向にガス中の分子の運動速度がおおよそ熱的なランダム運動の範囲内で一致していれば誘導放射される電波の増幅が起こります。これが、小さな領域から放射される明るいレーザー源として観測されます。小さな領域といってもVLBIで観測される典型的な大きさは数天文単位程度の領域だと考えられています<sup>1)</sup>。太陽系スケールで見ると、数

天文単位の放射領域は、太陽から火星くらいまでの半径をもつことに相当します。

特にVERAプロジェクトでは、晩期型星と呼ばれる太陽質量程度の年老いた星の周りのガスや、銀河系の腕を構成している星形成領域のガス中で見られる、43 GHz帯の一酸化ケイ素（SiO）レーザーと22 GHz帯水（H<sub>2</sub>O）レーザー源を主に観測しています。そして、近年6.7 GHz帯の受信機が新たに設置され（図4）、メタノール（CH<sub>3</sub>OH）レーザー源の観測も始まっています。

#### 1.4 大学 VLBI 連携

国内でVERAよりも高感度な観測を実現しているのが大学VLBI連携です。こちらは、国立天文台と電波望遠鏡を運用している各大学（北海道大学・茨城大学・筑波大学・岐阜大学・大阪府立大学・山口大学・鹿児島大学）が連携し、宇宙航空開発研究機構、情報通信研究機構、国土地理院の協力のもと、一緒にVLBI観測を行う取り組みです。VERAの望遠鏡配置に各大学や宇宙科学研究所が所有する望遠鏡を加えると、主に短い基線を埋めるような形になります（図5）。そして、特に山口局・白田局・日立局・高萩局の電波望遠鏡の鏡面の直径が30m・60m級の大口徑アンテナが参加しているため、より高感度な観測を実現しています。



図4 大阪府立大学制作の6.7 GHz帯の受信機（右）をVERA入来局に設置（2009年）。

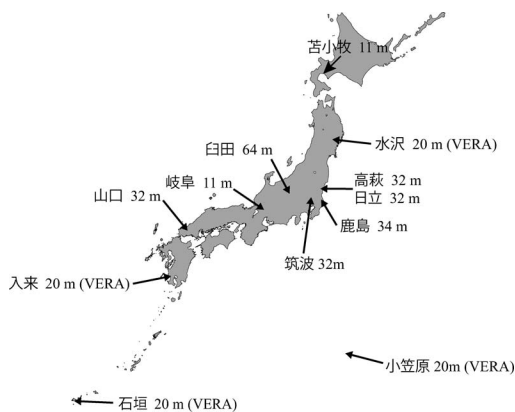


図5 日本国内に広がる大学VLBI連携網。

## 2. 研究テーマ

博士前期課程では、脈動型変光星に分類される晩期型星の星周ガスに付随している一酸化ケイ素メーザー源を使って星の脈動と星周ガスの関係を調べる研究を行い、非等方なガスの放出現場をとらえました<sup>2)</sup>。次に、博士後期課程では、銀河系スケールの研究を行いたいと思い、銀河系棒状構造にアプローチできるような研究テーマにしました。見込みはあるものの、チャレンジングさももつこのテーマはなおさら魅力的でした。実際に、観測したい天体が弱くて検出できないまま博士後期課程の最初の1年間が過ぎました。

### 2.1 銀河系棒状構造周辺のメーザー源

銀河系の棒状構造に焦点を当てて研究を行うにあたって、ねらったメーザー源は銀経 $-40^\circ$ から $+40^\circ$ の範囲にある天体のうち、VERAで見える北天の天体です。なかでも、星形成領域に付随しているメタノールメーザー源と晩期型星に付随している一酸化ケイ素メーザー源・水メーザー源に注目しました。

この範囲にあるメーザー源のうち、星形成領域に付随しているものは、棒状構造をもつ銀河系の中で、銀河系の腕の付け根部分だと考えられている分子リングもしくはその内側に存在している可能性のあるものを選び、晩期型星に付随しているものは、銀河系棒状構造のポテンシャルに従って回っていると考えられているバルジと呼ばれるラグビーボール型の構造の中に存在している可能性のあるものを選びました。

もし、これらのメーザー源の運動の軌道要素を、棒状構造全体にわたって多数の天体についてとらえることができれば、運動を支配している銀河系棒状構造のポテンシャルを見積もることができると期待できます。これは、銀河系の基本的な物理量を導く、非常に重要な研究です。

そして、それぞれのメーザー源について、運動をとらえるため観測を行ってきました。特に今回

は、成果がでてきたメタノールメーザー源の観測結果についてご紹介したいと思います。

### 2.2 新登場メタノールメーザー源

この研究を始めた頃、VERAでタイミングよく新しい周波数帯の受信機が設置されました。その新しい受信機の周波数帯は6.7 GHz帯。これは、近年注目を集めだしたメタノールメーザー源を観測するための装置です。従来の22 GHzや43 GHzの周波数帯の観測よりも波長が長くなるため視力が悪くなってしまいますが、それ以上に心強いのが明るさです。この6.7 GHzメタノールメーザー源には水メーザー源と同様に明るいものも多く存在しています。さらに、より高い周波数の観測に比べると、位置参照電波源となるクェーサーも検出できるものが多くなります。そのため、私が見たかった遠くの領域のメーザー源もVERAで検出することが容易になります。

この新しい装置で、まずは銀河系棒状構造周辺にあると言われている分子リング領域にあると考えられる75天体のメタノールメーザー源を試験観測しました。その結果、検出率35%で天体を検出することができました。そのうち、VERAで絶対座標に準拠した天体の運動(=絶対固有運動)を計測するのに適した10天体を厳選し、このメタノールメーザー源を使った研究を博士論文で扱いました。しかし、まずは大学VLBI連携やVERAで6.7 GHzメタノールメーザー源の年周視差計測や絶対固有運動計測の前例がありませんでしたので、試験的にW3(OH)という星形成領域の年周視差・絶対固有運動の測定を行いました。

### 2.3 大質量星形成領域に付随する6.7 GHzメタノールメーザー源

ここで、メタノールメーザー源自体やそれにかかわる星形成領域の研究も興味深いものがありますので、少しご紹介したいと思います。

6.7 GHzメタノールメーザー源はちょうど20年前に発見された新しいメーザー源で<sup>3)</sup>、これまでの大規模探査の結果から、大質量星形成領域の

初期の段階にしか付随していないと言われてい  
ます<sup>4)</sup>。この 6.7 GHz メタノールレーザー源はその  
速度構造や空間分布から星周ガス円盤や中心星から  
放出されるガスの構造を反映しているのではない  
かと言われていいます。このような星形成領域等  
のガスの運動を数キロメートル毎秒程度の精度で  
測るためには、分子輝線のドップラーシフト量を利用  
して求める視線速度やレーザー源の VLBI 観測  
による天球面上の固有運動を測定することが有効  
です。ここ数年の VLBI 観測結果からは、星周  
ガス円盤やジェットなどの構造でカテゴリー分け  
できそうだということがわかってきました<sup>5)</sup>。今  
後、メタノールレーザー源が示す構造について理  
解が深まっていくと、今まで濃いガスに埋もれて  
なかなか見えなかった大質量星形成領域の初期  
段階の星へ降着するガスの様子や反対に初期の星  
から放出されるガスの様子をこのメタノールレ  
ザー源を通して調べることができる可能性があり、  
星形成シナリオに迫ることができる重要な情報  
として注目されています。

#### 2.4 超有名天体 W3(OH) のメタノールレーザー源

今回ご紹介する W3(OH) に付随する 6.7 GHz  
メタノールレーザー源の研究は、国内の VLBI 装  
置で初めて行った 6.7 GHz メタノールレーザー  
源の年周視差・絶対固有運動計測です<sup>6)</sup>。

W3(OH) はメタノールレーザー源の中では最  
も明るく観測しやすい天体の一つで、初めて観測  
するのに最適な天体でした。しかもこの天体はア  
メリカの電波干渉計 VLBA ですでに年周視差計  
測が行われ、精度良く距離が測定されていたの  
で<sup>7), 8)</sup>、大学 VLBI 連携、そして VERA で初めて  
年周視差計測を行ったときに答え合わせができる  
という寸法です。また、W3(OH) という名前のと  
おり、さまざまな波長の OH (水酸基) レーザー  
源が検出されています。また、この W3(OH) は超  
コンパクト H II 領域に分類され、星形成の比較  
的初期に、密度の高いガスに埋もれた大質量星が  
光りだして、周りのガスを紫外線で電離させてい

るコンパクトな電離領域です。

この W3(OH) に付随している 6.7 GHz メ  
タノールレーザー源を大学 VLBI 連携と VERA に  
よって約 2 年間に 6 回観測されたデータを使って  
年周視差と絶対固有運動を求めました。

VERA で初めて得られた W3(OH) に付随する  
6.7 GHz メタノールレーザー源までの年周視差の  
大きさは  $0.598 \pm 0.067$  ミリ秒角。距離は視差楕円  
の大きさの逆数で得られ、 $1.67 (+0.21/-0.17)$   
kpc。約 11% の精度で距離測定ができました。一  
般的に許容される年周視差の精度は統計学的に  
10% 程度以下のため<sup>9)</sup>、今回得られた距離が  
VERA や大学 VLBI 連携で測定できる距離の目  
安となりました。

また、この天体の OH レーザー源は詳細に調べ  
られてきたレーザー源の一つで、星間塵からの赤  
外線放射で励起されることが示唆されています<sup>13)</sup>。  
そこで、6.7 GHz メタノールレーザー源の  
環境を理解するために、OH レーザー源との空間  
的な関係を調べました。

まずは天球面上で領域が重なっているかどうか  
についてです。W3(OH) に付随する 1.665 GHz  
帯 OH レーザー源と 6.7 GHz 帯メタノールレ  
ザー源は全体的な分布や速度構造は似ているもの  
の、ミリ秒角のスケールでは有意に位置がずれて  
いることが過去の研究からわかっていました<sup>1)</sup>。  
また、どちらのレーザー源も超コンパクト H II  
領域の全体の領域に対して西側に偏って分布して  
いることも特徴的です。位置関係については図 6  
からも見て取れます。しかし、この二つが独立な  
環境下にあるかどうかという点については、天球  
面上の分布だけでは断定できません。

そこで、次に注目すべきことは、両レーザー源  
の運動傾向が 3 次元で一致しているかどうかで  
す。もし地球から見て、両者が重なっているよう  
に見えても、奥行き方向の分布や天球面上の運動  
は全然違うかもしれませぬし、その逆も言えま  
す。奥行き方向の距離は今の測定精度では調べら

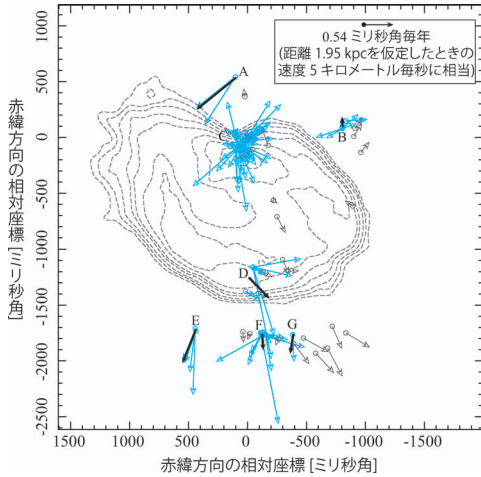


図6 W3(OH)に付随する6.7 GHzメタノールメーザー源の内部固有運動<sup>6)</sup>(青矢印)とOHメーザー源の固有運動<sup>11)</sup>(灰色矢印)と15 GHz連続波源(破線)が示す超コンパクトH II領域の分布<sup>11)</sup>。

れません。しかし、運動傾向はVLBIという装置を使えば視線速度に加えて、天球面上の運動も同時に精度良くとらえられます。もし3次元的に運動傾向も似ていれば、物理的に同じ流れのガス塊中に両メーザー源が共存している可能性が高くなります。

得られた固有運動は図6の青矢印ようになりました。ラベル付けしたメーザー群別の平均運動も太い黒矢印で示しています。また、過去に求められたOHメーザー源の運動を灰色のベクトルで示しています。これらの運動はCでラベル付けした辺りのメーザーに対する相対運動です。南側のメーザー群はCのメーザー群に対して離れていくような傾向を示していることがわかります。一方で北側のメーザー群の運動傾向については、検出されたスポット数が少ないので、今回は運動傾向を議論できるような意味のあるデータではないと判断しました。

結果として、6.7 GHzメタノールメーザー源の南-北の膨張傾向はOHメーザーとよく似た運動傾向を示していることがわかりました。したがっ

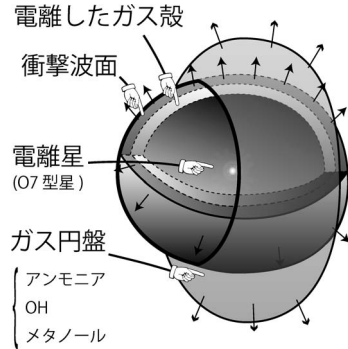


図7 W3(OH)周辺の想像図。

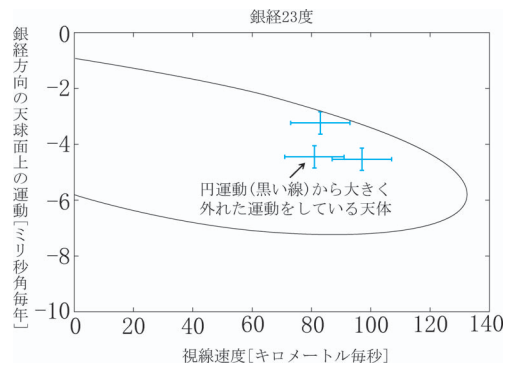


図8 回転速度一定の円運動モデルでは説明できない、ゆっくりとした運動傾向の例。

て、このメタノールメーザー源もOHメーザー源と同様の環境下に存在していることが示唆されました。この超コンパクトH II領域では、アンモニアの吸収線の観測も行われています。吸収線は背景からの放射エネルギーを吸収して暗くなって見られるもので、言い換えると、超コンパクトH II領域の手前にあるアンモニアの分布が見えています<sup>12)</sup>。これは、超コンパクトH II領域に対して西側半分のみにはしか分布しておらず、OHメーザー源の観測から得られていた南北に速度勾配がある視線速度や西側のみアンモニアの分布から、トーラス状の厚みのある円盤もしくはドーナツ型のガス分布をしているのではないかと言われていました。6.7 GHzメタノールメーザー源の西側みの空間分布、OHメーザー源と似た視線速度の分布、そして今回初めて得られた天球面上の固有

運動も OH メーザー源と似ていることから、図 7 のような構造の中に OH メーザー源とともに 6.7 GHz メタノールメーザー源も存在していることを確認しました。

## 2.5 そして銀河系のサイエンスへ

以上のことから、VERA や大学 VLBI 連携で 6.7 GHz メタノールメーザー源の絶対固有運動・年周視差計測ができることを確認しました。そして、現在、私は銀河系の運動学的な研究を目指して、銀河系棒状構造周辺のメタノールメーザー源の観測を続けています。そして、銀河系の棒状の構造、すなわち、棒状構造がもつポテンシャルが、運動学的に銀河系内のガスや星の運動にどのような影響をどの程度与えているのか調べています。博士論文ではその片鱗として、銀河系の回転速度よりも特にゆっくりとした運動を見つけました。その様子を図 8 に示しました。このような運動傾向は、回転速度一定の銀河系モデルでは説明できず、銀河系の何らかの構造に関係していると考えられます。今後、観測を進めてデータサンプルを増やし、定量的な評価をしていきたいと思えます。そして、この研究を邁進させるためにも、今後の国内・東アジア VLBI の発展を期待しています。

## 最後に

本研究は日本学術振興会の特別研究員制度によって支援されている研究です。本原稿の投稿を勧めてくださった天文月報編集委員長の柏川伸成氏、そして、博士後期課程でたいへんお世話になり、また本原稿を作成するにあたりアドバイスくださった元主任指導教員の本間希樹氏をはじ

め、元指導教員の柴田克典氏、元指導補助助教の廣田朋也氏に感謝の意を捧げます。

## 参考文献

- 1) Menten K. M., et al., 1992, ApJ 401, L39
- 2) Matsumoto N., et al., 2008, PASJ 60, 1039
- 3) Menten K. M., 1991, ApJ 380, L75
- 4) Xu Y., et al., 2008, A&A 485, 729
- 5) Bartkiewicz A., et al., 2011, A&A 525, A120
- 6) Matsumoto N., et al., 2011, PASJ, in press
- 7) Hachisuka K., et al., 2006, ApJ 645, 337
- 8) Xu Y., et al., 2006, Science 311, 54
- 9) Lutz T. E., Kelker D. H., 1973, PASP 85, 573
- 10) Elizur M., 1992, Astronomical masers (Kluwer Academic Publishers, the Netherlands), 9.3
- 11) Bloemhof E. E., Reid M. J., Moran J. M., 1992, ApJ 397, 500
- 12) Reid M. J., Myers P. C., Bieging J. H., 1987, ApJ 312, 830

### For a Kinematic Investigation of the Galactic Structure with Methanol

Naoko MATSUMOTO

Mizusawa VLBI Observatory (NAOJ)

Abstract: This is the first report of astrometric observations with Japanese VLBI Network and VERA of the 6.7 GHz methanol masers. We obtained a distance and internal proper motions of a massive star forming region of W3(OH). These results show a capability of parallax measurements of 6.7 GHz methanol masers with current situations of VERA/JVN. For a circumstellar structure of W3(OH), we kinematically confirmed that a high probability of the 6.7 GHz methanol maser exists in a torus structure surrounding an ultracompact H II region of W3(OH).