

# サブミリ波天文学最前線

## —SMA, ASTE そして ALMA による 原始星星周エンベロープのサブミリ波 分子輝線観測—



高 桑 繁 久

〈台湾中央研究院天文及天文物理研究所 台湾台北市 10617 P.O.Box 23-141〉  
e-mail: takakuwa@asiaa.sinica.edu.tw

波長が1ミリ以下の電波であるサブミリ波による天文学は、電磁波による天文学の最後の未開拓領域である。現在、SMA, ASTE といった新たなサブミリ波望遠鏡の台頭、そしてALMA計画の推進により、サブミリ波天文学は黎明期を迎えている。本稿ではSMA, ALMA プロジェクトにおける筆者のサブミリ波天文学の研究経験をもとに、サブミリ波観測によって新たに増えてきた星形成の描像を概説する。

### 1. はじめに

#### 1.1 星形成とサブミリ波分子輝線

星間空間中にも“雲”が存在する。この雲は分子ガスおよび固体微粒子からなり「星間分子雲」と呼ばれる。星間分子雲中には、主成分の水素分子に加えて、一酸化炭素CO、一硫化炭素CS、シアン化水素HCNなど数多くの分子も含まれている。このような分子が放出する電波である「分子輝線」の観測は、星間分子雲を調べる主要な観測手法である。とりわけ波長が1-7ミリの電波「ミリ波」の分子輝線を用いたこれまでの観測的研究から、星間分子雲中にガス密度  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、温度 10 K、大きさ 3,000-5,000 天文単位（1天文単位は地球と太陽の平均距離に相当し約 1.5 億 km）程度の分子ガスの塊「エンベロープ」が形成され、このエンベロープが重力収縮を起こして中心に新たな星「原始星」を形成するという「星形成」の描像が得られてきた<sup>1)3)</sup>。

しかしながらこのような星形成の描像は、あくまでミリ波分子輝線によるガス密度  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、温度 10 K 程度の分子ガスの観測から得られたものである。エンベロープ内のより高密度、高温の分子ガス、おそらくは中心の原始星により密接に関連しているであろう分子ガスの内部構造、内部運動は一体どのようなになっているのであろうか？この問題に答えることは、エンベロープ内の分子ガスの幅広い物理状態にわたって総合的に星形成を理解することにつながる。これを調べるためには、ミリ波分子輝線と比べてより高温 ( $>40 \text{ K}$ )、高密度 ( $>10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) の分子ガスを選択的に観測できる波長が1ミリ以下の電波「サブミリ波」の分子輝線の観測が必須である。

#### 1.2 サブミリ波天文学の黎明—SMA と ASTE—

しかしながら、このようなサブミリ波分子輝線を観測できるサブミリ波望遠鏡は、前世紀まではJCMT, CSO などごく少数に限られていた。とり

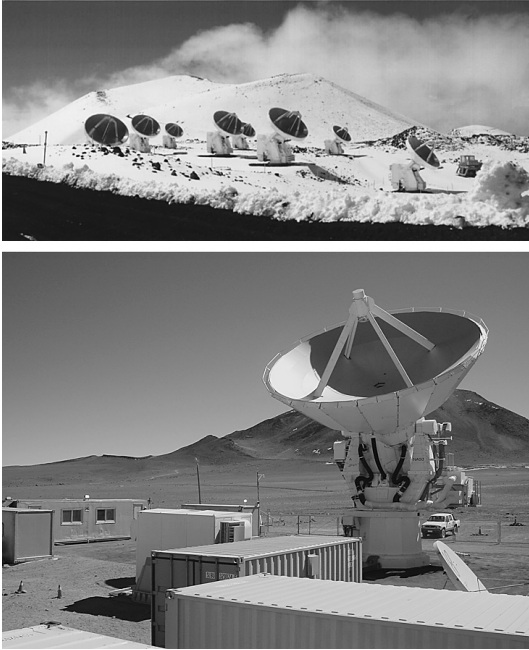


図1 ハワイ・マウナケア山頂のSMA（上図），およびチリ・アタカマ砂漠のASTE（下図）。

わけ、複数のアンテナを組み合わせることにより高い解像度を得ることができる「干渉計」をサブミリ波で実現するには、多くの技術的困難が伴っていた。

アメリカ合衆国スミソニアン天文台および台湾中央研究院天文及天文物理研究所は、合同で、サブミリ波での干渉計の実現に取り組んだ。この取り組みは、ハワイ島マウナケア山頂に口径6mの高精度パラボラアンテナを8台設置し、世界初の本格的サブミリ波干渉計を構築しようとする「SMA」計画として結実する<sup>4)</sup>（図1上）。筆者は1999年に博士号を取得後、台湾中央研究院そしてスミソニアン天文台にそれぞれ3年間在籍し、SMAの開発に一貫して取り組んできた。本誌編集委員の斎藤正雄氏と、マウナケア山頂4,100mでの息苦しい中何度も夜通した記憶は、今ではなつかしい思い出である。数々の困難、トラブル、ミスにさいなまれながらも、2002年の年末くらいからようやくまとめた観測ができるように

なった。実はSMAはすばるのすぐ隣に位置している。すばるはNHKの科学番組でもたびたび登場し、一般の方にも馴染みが深い。NHKのカメラがちょっとぶれればSMAが入ってくるのであるが、筆者が見た限りではNHKはSMAを全く映してくれない。そもそもSMAは日本の望遠鏡ではないので日本では注目が集まらないのであるが、実はそこでも体を張っている日本人がいるので、皆様ぜひSMAにも注目して欲しい。とにかくSMAの開発の成功により、観測波長1.3 mm (230 GHz), 0.8 mm (345 GHz), 0.4 mm (690 GHz)で、最高0.2-0.3秒角の解像度での観測が世界で初めて可能となった。

一方、ほぼ同時期に、日本のグループも新たなサブミリ波望遠鏡の開発に着手していた。これは南米チリ・アタカマ砂漠に口径10mのパラボラアンテナ1台を設置し、高感度サブミリ波単一望遠鏡を構築しようとするものでAtacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) と呼ばれる（図1下）。ASTEの観測波長帯は0.8 mm帯で、22秒角の解像度をもつ。アタカマ砂漠は標高が4,800mとマウナケアより高く、観測条件（空の透明度や水蒸気量の低さ）が倍程度よい。サブミリ波単一望遠鏡はマウナケア山頂にもJCMT, CSOと2台あったが、ASTEはその観測条件のよさからJCMT, CSOとは比較にならない高感度のサブミリ波観測を行うことができる。さらにSMAのような電波干渉計では天体の広がった構造からの電波放射を拾うことができない「ミッシングフラックス」の問題があり、SMAの場合10秒角以上に広がった構造については10パーセント以下にまで感度が落ちてしまう<sup>5)</sup>。単一電波望遠鏡であるASTEは解像度ではSMAに劣るものの、天体のどのような構造からの電波放射も拾うことができる。つまり、ASTEによる高感度サブミリ波分子輝線観測とSMAによる高解像度サブミリ波分子輝線観測は、相補的な役割を果たす。すなわち、SMAとASTEを組み合わせさせたサブミ

リ波観測は、現在までのところ世界最高のサブミリ波観測手法である\*1。

## 2. SMA による原始星 L1551 IRS5 に付随するエンベロープのサブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ) の観測

それでは以下に、SMA, ASTE による原始星周エンベロープのサブミリ波分子輝線観測の結果を示していく。筆者は SMA による最初の観測対象として、近傍（距離 140 pc; 1 pc は 3.26 光年に相当）の代表的な星間分子雲であるおうし座分子雲中の最も明るい（30 太陽光度）原始星である L1551 IRS5 を選んだ。野辺山ミリ波干渉計を用いたミリ波分子輝線による L1551 IRS5 に付随するエンベロープの観測では、大きさ 2,500 天文単位程度のエンベロープ内の分子ガスが、原始星の周りを回転しつつ原始星に落ち込んでいる様子にとらえられている<sup>1), 6), 7)</sup>。また、近年の超高解像度ミリ波連続波干渉計観測によると、L1551 IRS5

は 50 天文単位程度南北に離れた連星系であること、さらに北側の原始星には第 3 の原始星も付随していることがわかっている<sup>8)</sup>。ミリ波観測によって示唆されてきた L1551 IRS5 のこのような描像に、サブミリ波観測はどのような変革をもたらすのであろうか？

図 2 に SMA によるサブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ; 342.9 GHz) を用いた L1551 IRS5 の観測結果を示す<sup>5)</sup>。図 2 左図を見てわかるように、野辺山ミリ波干渉計によるミリ波分子輝線  $C^{18}O$  ( $J=1-0$ ; 109.8 GHz) の観測が示す大きさ 2,500 天文単位程度の伸びたエンベロープ<sup>7)</sup>の中に、原始星に付随した大きさ 400 天文単位程度のサブミリ波分子輝線の構造が見られることがわかる。上記で述べたように、ミリ波分子輝線は温度 10 K, ガス密度  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  程度の分子ガスを見るのに対して、サブミリ波分子輝線はより高温 ( $>40 \text{ K}$ ), 高密度 ( $>10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) の分子ガスを見ることができると。したがって、L1551 IRS5 におけるミリ波分子

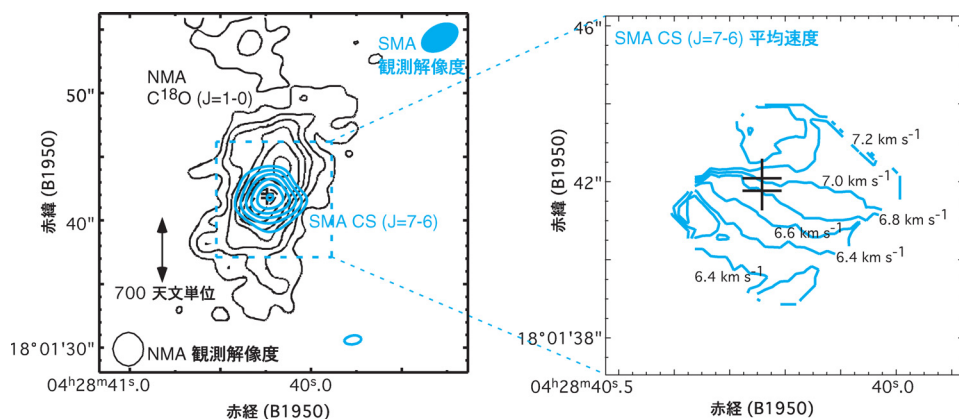


図 2 (左) SMA により観測された L1551 IRS5 におけるサブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ) の強度分布 (青色のコントラスト) と、NMA により観測されたミリ波分子輝線  $C^{18}O$  ( $J=1-0$ ) の強度分布 (Momose et al., 1998) の比較。右上の楕円は SMA 観測の解像度を表す ( $3.2 \times 2.0$  秒角, P.A. =  $-60^\circ$ )。CS 輝線のコントラストレベルは 1.9 K から 0.75 K おき。十印は原始星連星の位置を表す。(右) L1551 IRS5 におけるサブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ) の平均速度図。コントラストレベルは  $0.2 \text{ km s}^{-1}$  おき。CS 輝線のコントラストレベルは 1.9 K から 0.75 K おき ( $1 \text{ K} = 0.63 \text{ Jy beam}^{-1}$ )。

\*1 現在、ヨーロッパのグループが同ジータカマ砂漠に口径 12 m のサブミリ波単一望遠鏡「APEX」を設置し、開発実験を行っている。

輝線とサブミリ波分子輝線のこのような分布の違いは、サブミリ波分子輝線がミリ波分子輝線に比べて選択的に中心星近傍の高温、高密度領域を観測していることを示唆する。

さらに興味深いことに、サブミリ波分子輝線  $\text{CS} (J=7-6)$  が示す分子ガスの速度構造も、ミリ波分子輝線  $\text{C}^{18}\text{O} (J=1-0)$  が示す速度構造とは異なっていることが明らかになった。図2右図にサブミリ波分子輝線が示すガスの平均速度の分布を示す。図を見てわかるように、サブミリ波分子輝線はエンベロープの長軸方向に沿って卓越した速度勾配を示している。一方、ミリ波分子輝線  $\text{C}^{18}\text{O} (J=1-0)$  はエンベロープの長軸方向のみならず、短軸方向にも速度勾配を示していることがわかっている。一般にエンベロープの長軸方向に沿った速度勾配は原始星の周りの回転運動を、短軸方向に沿った速度勾配は原始星に落ち込むガスの運動を表していると考えられる<sup>1),7)</sup>。すなわち、ミリ波分子輝線はエンベロープの外縁部の分子ガスが回転しつつ中心星に落ち込んでいる様子をとらえているのに対して、サブミリ波分子輝線は、原始星近傍のより高温、高密度領域で回転運動が卓越し、原始星周囲を回転する円盤が形作られている様相をとらえていることが明らかになった。

しかしながら、先に述べたように SMA のような電波干渉計の場合、天体の広がった構造からの電波放射を拾うことができないミッシングフラックスの問題が常につきまとう。実際、SMA による本観測結果と、サブミリ波単一望遠鏡 CSO を用いた L1551 IRS5 の  $\text{CS} (J=7-6)$  の中心1点の観測結果<sup>9)</sup>を比較すると、SMA の観測は CSO の観測によって得られる全電波強度の 11% しか拾っていないことがわかった。これは SMA による本観測によって得られた大きさ 400 天文単位程度のコンパクトな星周回転円盤に加えて、1,500 天文単位以上に広がったサブミリ波分子輝線の構造も共存していることを示唆する。すなわちサブミリ波分子輝線が観測している高温 ( $>40 \text{ K}$ )、高密

度 ( $>10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) の分子ガスが、原始星周エンベロープにおいて 1,500 天文単位以上に広がっているということである。原始星周エンベロープの1次元球対称の理論モデルでは、このような高温、高密度の分子ガスが 1,500 天文単位以上に広がっていることは説明できない<sup>10),11)</sup>。この広がったサブミリ波分子輝線の構造の起源は謎である。

### 3. SMA+JCMTによる原始星 IRAS 16293-2422 のサブミリ波分子輝線 $\text{HCN} (J=4-3)$ 観測

そこで筆者らは、広がった ( $>1,500$  天文単位) 構造からコンパクトな ( $<500$  天文単位) 構造までサブミリ波分子輝線のすべての構造を拾うことを目指し、おうし座分子雲について近傍 (距離 160 pc) に位置するへびつかい座分子雲中の原始星 IRAS16293-2422 について、SMA および JCMT を用いたサブミリ波分子輝線  $\text{HCN} (J=4-3; 354.5 \text{ GHz})$  の観測を遂行した。IRAS16293-2422 (以下 I16293 と略記) はへびつかい座分子雲中でもっとも明るい (23 太陽光度) 原始星である。これまでのミリ波連続波の干渉計観測から、I16293 は南東-北西に 800 天文単位程度離れた二つの原始星からなる原始星の連星系であることが知られている<sup>12)</sup>。さらに I16293 には、ギ酸、ジメチルエーテル、アセトアルデヒドなど多くの複雑な有機分子も検出されており<sup>13)</sup>、星間化学の観点からも注目を集めている天体である。

図3に筆者らの観測結果を示す<sup>14)</sup>。図3左図は、サブミリ波単一望遠鏡 JCMT により観測した、I16293 におけるサブミリ波分子輝線  $\text{HCN} (J=4-3)$  の分布である。15 秒角の解像度をもつ JCMT による観測では、原始星連星に付随する 3,000 天文単位程度にまで広がったサブミリ波分子輝線の構造が見られた。これに対して図3右図は、1 秒角の解像度で SMA のみで観測した場合の、I16293 におけるサブミリ波分子輝線  $\text{HCN} (J=4-3)$  の分布である。SMA のみの観測では、



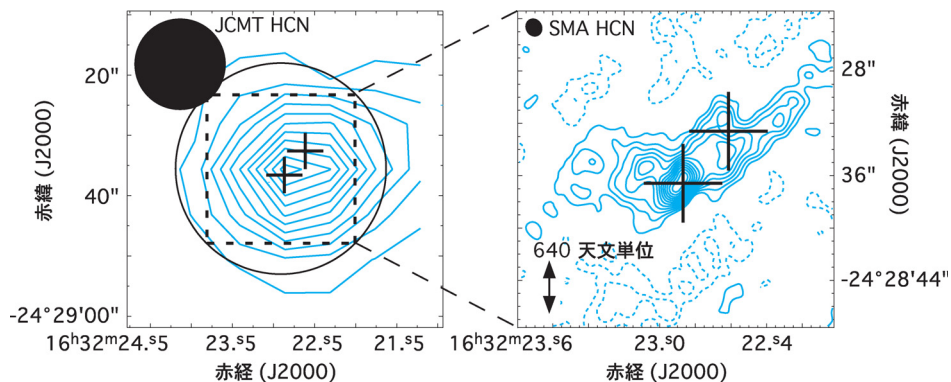


図3 JCMT (左) および SMA (右) の観測による、原始星連星 IRAS 16293-2422 におけるサブミリ波分子輝線 HCN ( $J=4-3$ ) の強度分布. JCMT の図中の円は SMA 観測の視野を表す. それぞれの図中の十印は原始星連星の位置, 左上の楕円は観測の解像度, すなわち JCMT の観測は 15 秒角, SMA の観測は  $1.3 \times 1.2$  秒角 ( $P.A.=30^\circ$ ) を表す. JCMT の観測のコンタレベルは  $4.76 \text{ K km s}^{-1}$  から  $4.76 \text{ K km s}^{-1}$  おき, SMA のコンタレベルは  $33.5 \text{ K km s}^{-1}$  から  $22.3 \text{ K km s}^{-1}$  おき. JCMT のみの観測では解像度が悪いため, 原始星周エンベロップの詳細構造はわからない. 一方, SMA のみの観測では高い解像度は達成できるものの, ミッシングフラックスの効果のためエンベロップの広がった ( $>2,600$  天文単位) 成分をとらえることができない. SMA のコンタレベルは  $33.5 \text{ K km s}^{-1}$  から  $22.3 \text{ K km s}^{-1}$  おき ( $1 \text{ K}=0.16 \text{ Jy beam}^{-1}$ ).

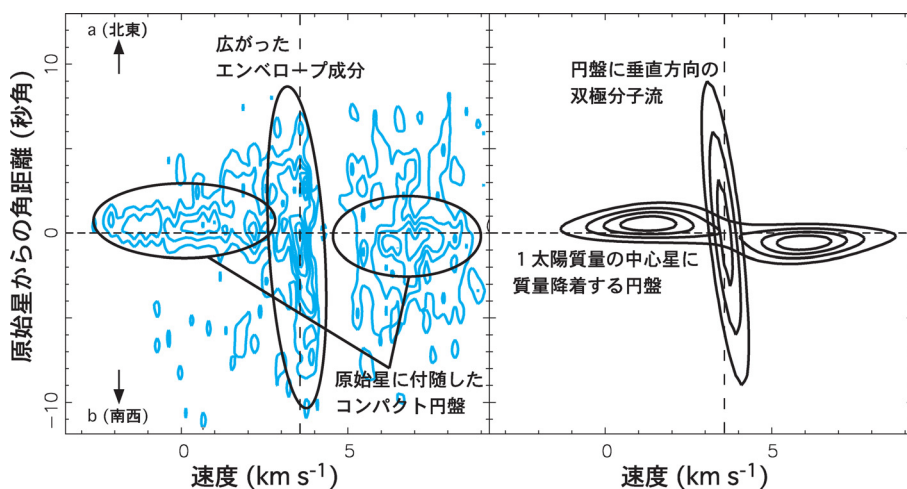


図4 (左) 表紙の図中の  $a-b$  軸 (白の波線), すなわち Source A に付随する円盤成分の短軸方向 ( $P.A.=74^\circ$ ) に沿った, SMA+JCMT の観測によるサブミリ波 HCN 輝線の位置-速度図. コンタレベルは  $11.2 \text{ K}$  から  $11.2 \text{ K}$  おき. 図中の水平の波線は原始星 Source A の位置, 縦の波線は中心速度  $3.6 \text{ km s}^{-1}$  を表す. 原始星に付随するコンパクト円盤成分と広がったエンベロップ成分が別々の速度構造を示していることがわかる. (右) 左図の観測の位置-速度図を説明するモデル. 原始星に付随するコンパクト円盤成分の速度構造は 1 太陽質量の中心星への質量降着運動, 広がったエンベロップ成分の速度構造は円盤に垂直方向への双極分子流の運動で説明できる.

ミッシングフラックスの効果により JCMT の観測で見られた広がったサブミリ波分子輝線の成分ははっきりせず, 南東側の原始星 (以下 Source A

と呼ぶ) に付随した大きさ 500 天文単位程度の円盤状のガスの塊が卓越して見られることがわかる. そして SMA と JCMT の観測イメージを結合

し、広がった構造とコンパクトな構造両者を拾ったイメージ(表紙)では、Source A に付随するコンパクトな円盤状の構造が広がったエンベロープ構造の中に埋もれている様子が見て取れる。すなわち L1551 IRS5 の観測で示唆されていたように、I16293 においても、原始星に付随するコンパクトなサブミリ波分子輝線の成分とより広がった成分の両面があることが明らかになった。

さらにコンパクトな成分と広がった成分とでは、その速度構造も異なっていることがわかった。図4左図に Source A に付随するコンパクト成分の短軸方向(表紙の図中の破線  $a-b$ )に沿ったサブミリ波分子輝線 HCN ( $J=4-3$ ) の位置-速度図を示す。図4左図はコンパクト成分と広がった成分が、それぞれ独自の速度構造を示していることを表している。すなわちコンパクト成分は原始星 Source A に近づけば近づくほど速度の大きさが增大しているのに対して、広がった成分は原始星から遠ざかれば遠ざかるほど速度が増大している。図4右図はこのような速度構造を説明するモデルを示したものである。Source A に近づけば近づくほど速度の大きさが增大しているコンパクト成分の速度構造は、1太陽質量程度の中心星にガスが落ち込んでいる様子を表していると解釈できることがわかった。一方で、広がった成分は、コンパクト成分と垂直方向に放出されている質量放出現象「双極分子流」の運動を反映していると解釈できることもわかった。すなわちコンパクト成分は原始星近傍で原始星に落ち込む分子ガスの構造、広がった成分は双極分子流によって外に押し出されているエンベロープの分子ガスの構造であるということである。

#### 4. ASTE を用いた原始星周エンベロープにおける広がったサブミリ波分子輝線の観測

SMA, JCMT を用いた L1551 IRS5 および I16293 のサブミリ波分子輝線観測は、原始星周エンベ

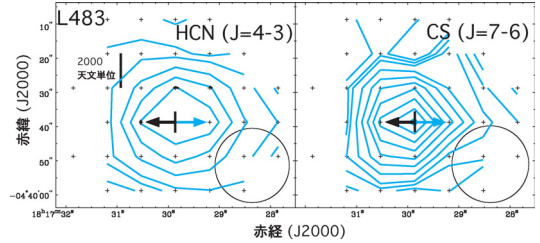


図5 ASTE 観測により得られた、原始星 L483 におけるサブミリ波分子輝線 HCN ( $J=4-3$ ) (左図)、および CS ( $J=7-6$ ) (右図) の強度分布。コンタレベルは  $2\sigma$ ,  $4\sigma$ ,  $6\sigma$  から以降は  $4\sigma$  おき ( $1\sigma=0.0733 \text{ K km s}^{-1}$ )。図中の十印は観測点、中心の十印は原始星の位置を表す。青と黒の矢印はそれぞれ青方遷移、赤方遷移した双極分子流の方向を表す。右下の円は観測の解像度。

ロープにおいて、原始星近傍のコンパクト (<500 天文単位) なサブミリ波分子輝線の成分のみならず、広がった (>1,500 天文単位) サブミリ波分子輝線の成分も存在していることを示した。それでは原始星周エンベロープにおいて、このような広がったサブミリ波分子輝線の構造は一般にどれだけ普遍的に存在し、その速度構造はどのようになっているのか? この問題に取り組むため、筆者は現在、ASTE を用いた原始星周エンベロープのサブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ), HCN ( $J=4-3$ ) の高感度観測のプロジェクトを行っている。ここではその成果の一部を紹介したい<sup>15)</sup>。

図5は、ASTE を用いた近傍(距離 200 pc)の原始星 L483 におけるサブミリ波分子輝線 HCN ( $J=4-3$ ), CS ( $J=7-6$ ) の観測結果である。図を見るとわかるように、原始星の西側に 3,000 天文単位以上伸びたサブミリ波分子輝線の構造が見られることがわかる。すなわち L483 においても、L1551 IRS5, I16293 同様、広がったサブミリ波分子輝線の構造が存在しているのである。

図6, 図7は、それぞれ L483 およびもう一つの原始星 B335 における、サブミリ波分子輝線 CS ( $J=7-6$ ) の示す速度構造を表したものである。図

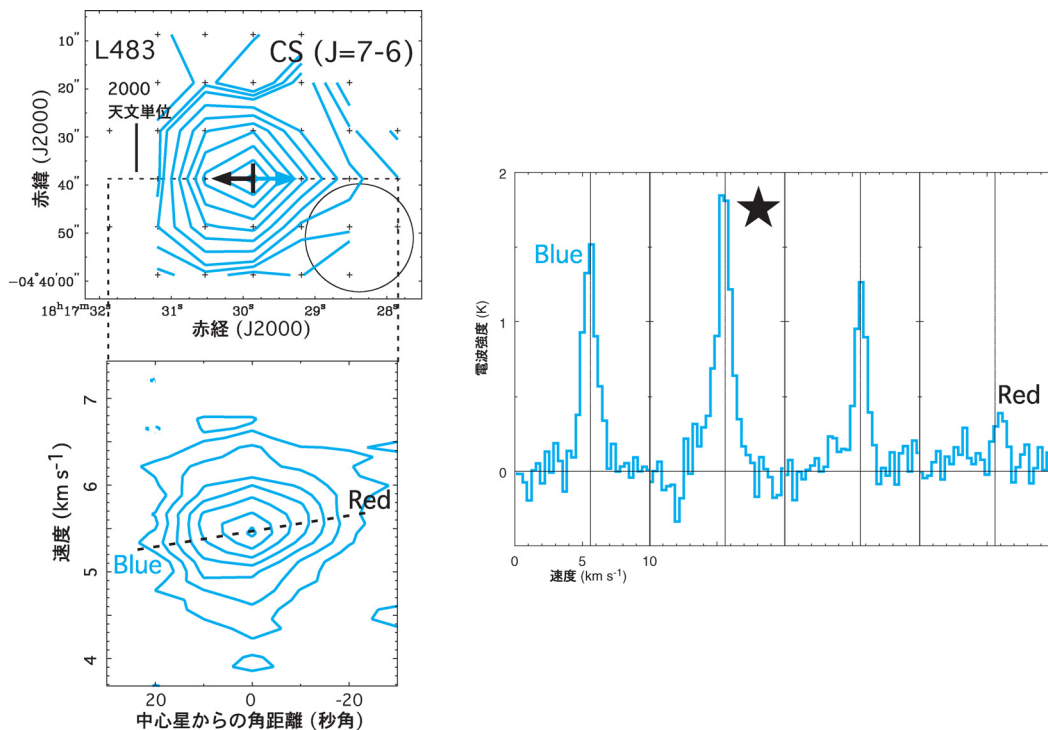


図6 ASTE観測によって得られた、原始星L483におけるサブミリ波分子輝線CS ( $J=7-6$ ) が示す速度構造。左上図は図5と同じ輝線強度の分布を表し、左下図は左上図の波線、すなわち付随する双極分子流の方向に沿った位置-速度図を表す。コンタレベルは $2\sigma$ から $2\sigma$ おき ( $1\sigma=0.133$  K)。右図は同じ方向に沿った輝線の分布を示し、星印のついた輝線は原始星方向の輝線を表す。縦の波線は原始星方向の中心速度 ( $=5.6$   $\text{km s}^{-1}$ ) を表す。

6, 7の左上図は輝線の強度分布を示し、左下図は原始星に付随する双極分子流の方向に沿った（左上図の破線）サブミリ波分子輝線の位置-速度図、右図は同じ方向に沿った分子輝線の分布を示している。図からわかるように、サブミリ波分子輝線が双極分子流の軸の方向に示す速度勾配は、L483においては西側が赤方遷移（われわれから遠ざかる速度）で東側が青方遷移（われわれに向かってくる速度）、B335においては西側が青方遷移、東側が赤方遷移となっている。一方、これまでの観測から、双極分子流の速度構造はL483においては原始星の西側が青方遷移で東側が赤方遷移、B335においては西側が赤方遷移、東側が青方遷移であることがわかっている<sup>16), 17)</sup>。さらにL483, B335におけるこれまでのミリ波分子輝線の観測

によると双極分子流と垂直方向に原始星に落ち込む分子ガスの運動が観測されており、この運動は速度勾配としては双極分子流と全く同じセンスとなる<sup>18), 19)</sup>。すなわちL483, B335においては、サブミリ波分子輝線の示す速度構造は、ミリ波分子輝線が示す原始星に落ち込む分子ガスの運動、あるいは双極分子流が示す速度構造とは正反対になっているのである。

### 5. 原始星星周エンベロープのサブミリ波分子輝線観測のこれまでのまとめ

SMA, ASTEを用いた原始星星周エンベロープのサブミリ波分子輝線観測は、これまでのところ以下のようにまとめられる。

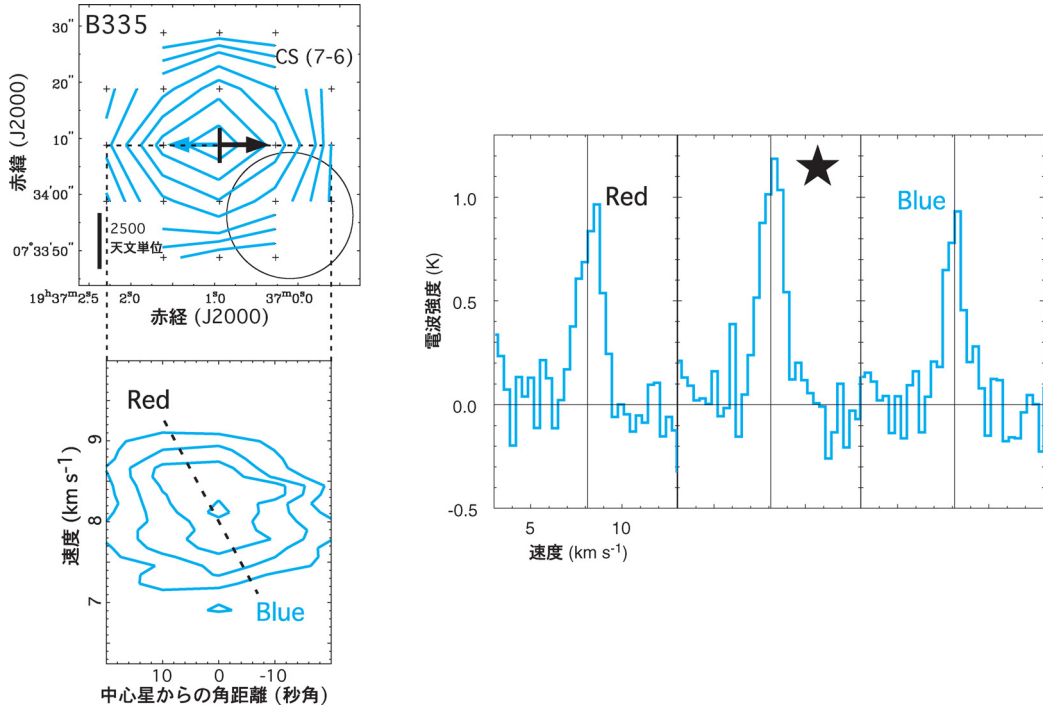


図7 ASTE観測によって得られた、原始星B335におけるサブミリ波分子輝線CS ( $J=7-6$ ) が示す速度構造。左上図は輝線強度の分布を表し、コンタレベルは  $2\sigma$ ,  $4\sigma$ ,  $6\sigma$ , 以降は  $4\sigma$  おき ( $1\sigma=0.0733 \text{ K km s}^{-1}$ )。左下図は左上図の波線、すなわち付随する双極分子流の方向に沿った位置-速度図を表す。コンタレベルは  $2\sigma$  から  $2\sigma$  おき ( $1\sigma=0.133 \text{ K}$ )。右図は同じ方向に沿った輝線の分布を示し、星印のついた輝線は原始星方向の輝線を表す。縦の波線は原始星方向の中心速度 ( $=8.1 \text{ km s}^{-1}$ ) を表す。

- 原始星周エンベロープにおいてサブミリ波分子輝線は、大きさ 500 天文単位程度の中心星に付随したコンパクトな構造とともに、2,000–3,000 天文単位以上に広がった構造も示している。
- 中心星に付随したコンパクトなサブミリ波分子輝線の構造は、中心星の周りの回転運動 (L1551 IRS5), もしくは中心星に向かって落ち込む分子ガスの運動を示している (I16293)。
- 広がったサブミリ波分子輝線の起源ははっきりしない。I16293 の場合のように双極分子流に付随した分子ガスの成分を見ている場合もある一方、L483, B335 では双極分子流、さらにはミリ波分子輝線が示す速度構造とは正反対の速度構造を示している。

原始星周エンベロープにおける広がったサブミリ波分子輝線の存在は、高温 ( $>40 \text{ K}$ )、高密度 ( $>10^7 \text{ cm}^{-3}$ ) の分子ガスが 2,000–3,000 天文単位以上に広がって存在していることを示している。これは、原始星を中心においた一次元球対称のエンベロープモデルでは説明できない<sup>10), 11)</sup>。一つの解釈として、双極分子流によってエンベロープに“空洞” (キャビティー) が空けられ、その表面が原始星からの光に直接照らされて高温になり、サブミリ波分子輝線を放射しているということが考えられる。実際、双極分子流によるキャビティーを取り入れた最近の理論的モデルでは、キャビティー方向の温度がキャビティーと垂直方向の温度と比べて選択的に上昇しているという結果が得



られている<sup>20)</sup>。筆者は、サブミリ波分子輝線は原始星近傍に付随した分子ガスのみならず、こういったエンベロープの表層部分も合わせて見ているのではないかと考えている。サブミリ波分子輝線が示すミリ波分子輝線と異なった速度構造は、こういったキャビティーの表層部分の速度構造を見ているのかもしれない。

## 6. そして ALMA へ

しかし ASTE の 22 秒角の解像度では、広がったサブミリ波分子輝線の起源を特定するまでには至っていない。一方で SMA による干渉計観測では高い解像度は得られるものの、広がった空間成分をサンプルすることはできない。現状では SMA と JCMT のデータを結合した I16293 の結果のみが、原始星に付随するコンパクトな成分から広がった空間成分までをくまなくサンプルした観測結果である。

日本、米国、欧州のグループが 3 者共同で、南米チリ・アタカマ砂漠 (ASTE と同じ場所) に建設中のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計「Atacama Large Millimeter and submillimeter Array (ALMA)」はこのような問題に最後の答えを与えると期待される。ALMA は米欧のチームが建設する口径 12 m のアンテナ 64 台、および日本のグループが建設する 12 m アンテナ 4 台、7 m アンテナ 12 台からなる。米欧のアンテナは、干渉計として天体の詳細構造を 10 ミリ秒角を切る解像度で探ることを目的とし、12 m アレイと呼ばれる。一方で日本のグループが建設する 12 m アンテナは単一鏡として、7 m アンテナは 12 m アレイと単一鏡の間を“埋める”干渉計として使用され、これらをまとめて「Atacama Compact Array (ACA)」と呼ぶ。すなわち ACA は 12 m アレイがサンプルできない広がった構造をとらえることを目的としている。このように ALMA は天体のすべての大きさの構造をくまなくとらえることができる究極のミリ波、サブミリ波観測装置であ

る。

ALMA は筆者のこれまでのサブミリ波分子輝線観測から垣間見えてきた新たな原始星周エンベロープの姿を、すべて露わにするであろう。そして星は一体どのようにして形成され、その周りで惑星系がどのように形成されるのか、生命の起源は？ といった自然科学一般にかかわる問題についても新たな知見をもたらすに違いない。筆者は ALMA によって、自ら自然科学に革命を起こすべく、ALMA の開発、科学的研究両面において奮闘していきたいと考えている。科学者が一番研究できると言われている 30 代に、SMA, ASTE, そして ALMA によるサブミリ波天文学の黎明期を迎えることができるのはとても幸運であると思う。この機会は絶対に逃してはいけない。なにをさておいても研究成果だけは残していくつもりである。

## 謝 辞

本稿は、筆者の学術論文<sup>5), 14), 15)</sup>をもとに、サブミリ波天文学の現状のできるだけ平易な解説を試みたものである。本稿を完結するに当たっては、多くの方々からご指導、ご協力をいただきました。とりわけ、台湾中央研究院の大橋永芳、Paul T. P. Ho 両博士には、筆者がサブミリ波天文学を進めるに当たって語り尽くせないほどのご指導、激励をいただきました。また国立天文台の川辺良平教授は、筆者の帰国後の研究活動を一貫して見守ってくださいました。ここに改めて深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Ohashi N., Hayashi M., Ho P. T. P., Momose M., Hiran, N., 1996, ApJ 466, 957
- 2) Ohashi N., Hayashi M., Ho P. T. P., Momose M., 1997a, ApJ 475, 211
- 3) Ohashi N., Hayashi M., Ho P. T. P., Momose M., Tamura M., Hirano N., Sargent A. I., 1997b, ApJ 488, 317

- 4) Ho P. T. P., Moran J. M., Lo K. Y., 2004, ApJ 616, L1
- 5) Takakuwa S., Ohashi N., Ho P. T. P., Qi C., Wilner D. J., Zhang Q., Bourke T. L., Hirano N., Choi M., Yang J., 2004, ApJ 616, L15
- 6) Saito M., Kawabe R., Kitamura Y., Sunada K., 1996, ApJ 473, 464
- 7) Momose M., Ohashi N., Kawabe R., Nakano T., Hayashi M., 1998, ApJ 504, 314
- 8) Lim J., Takakuwa S., 2006, ApJ 653, 425
- 9) Moriarty-Schieven G. H., Wannier P. G., Mangum J. G., Tamura M., Olmsted, V. K., 1995, ApJ 455, 190
- 10) Masunaga H., Miyama S. M., Inutsuka S., 1998, ApJ 495, 346
- 11) Masunaga H., Inutsuka S., 2000, ApJ 531, 350
- 12) Mundy L. G., Wootte, A., Wilking B. A., Blake G. A., Sargent A. I., 1992, ApJ, 385, 306
- 13) Cazaux S., Tielens A., G G. M., Ceccarelli C., Castets A., Wakelam V., Caux E., Parise B., Teyssier D., 2003, ApJ 593, L51
- 14) Takakuwa S., Ohashi N., Bourke T. L., Hirano N., Ho P. T. P., Jorgensen J. K., Kuan Y.-J., Wilner D. J., Yeh S. C. C., 2007b, ApJ, 662, 431
- 15) Takakuwa S., Kamazaki T., Saito M., Yamaguchi N., Kohno K., 2007a, PASJ 59, 1
- 16) Tafalla M., Myers P. C., Mardones D., Bachiller R., 2000, A&A 359, 967
- 17) Hirano N., Kameya O., Kasuga T., Umemoto T., 1992, ApJ 390, L85
- 18) Myers P. C., Bachiller R., Caselli P., Fuller G. A., Mardones D., Tafalla M., Wilner D. J., 1995, ApJ 449, L65
- 19) Saito M., Sunada K., Kawabe R., Kitamura Y., Hirano N., 1999, ApJ 518, 334
- 20) Nakazato T., Nakamoto T., Umemura M., 2003, ApJ 583, 322

**Frontier of Submillimeter Astronomy**  
**—SMA, ASTE, and ALMA Observations**  
**of Protostellar Envelopes in Submillimeter**  
**Molecular Lines—**

**Shigehisa TAKAKUWA**

*Institute of Astronomy and Astrophysics,  
 Academia Sinica, P.O. Box 23-141, Taipei 10617,  
 Taiwan, R.O.C.*

**Abstract:** With the advent of new submillimeter instruments such as SMA, ASTE, and ALMA, we are now at the dawn of submillimeter astronomy. Our recent observations in submillimeter molecular lines with the SMA and ASTE have revealed new aspects of protostellar envelopes in the course of star formation. In particular, the distributions of submillimeter molecular lines are more extended ( $>2,000$  AU) than expected, and the velocity structures traced by submillimeter molecular lines are different from those by millimeter molecular lines.