

超新星残骸と分子雲との相互作用 — 星の生と死の接点 —

瀬田 益道

I. Physikalisches Institut, Universitaet zu Koeln, Zuelpicher Str. 77 50937 Koeln, Germany

E-mail: masu@zeus.ph1.Uni-Koeln.DE

分子雲は超新星残骸と相互作用を起こすと、衝撃波により加熱圧縮されることが予想されます。この作用が星形成のトリガーとなるという説もあり、理論的にも相互作用領域は興味深い場所です。私たちは、超新星残骸 W44 領域で、巨大分子雲と超新星残骸との相互作用の現場を初めてとらえる事に成功しました。東大-NRO 60 cm サーベイ望遠鏡で相互作用の兆候を見出し、野辺山 45m 鏡では CO や HCO^+ 分子輝線の高速成分（ウイング）を検出して相互作用の証拠を得ました。それに続く岡山 188cm 鏡による近赤外水素分子輝線の検出、サブミリ波 CO 輝線観測でのショック領域のマップ作成により相互作用は確実にになりました。本稿では私たちの W44 の研究の概略を紹介いたします。

1. はじめに

星にも一生があり、分子雲から生まれ、その質量に応じた死を逃げる事が知られています。太陽の7倍以上の質量を持つ重い星の場合は、最後に超新星として輝き、星としての一生を終えます。超新星とは星の爆発であり、周りの空間に物質とエネルギーを放出します。超新星自身は一年を待たずに暗くなってしまうますが、爆発の破片は周りの希薄な物質を掃き集めながら膨張を続けます。この超新星の名残は超新星残骸と呼ばれ、電波から X 線まで様々な波長の電磁波を發し、その輝きは数千年にわたり続きます¹⁾。かに星雲や白鳥座の網状星雲は超新星残骸の代表例です。大質量星の寿命一千万年は宇宙スケールでみれば非常に短命であると言えます。したがって超新星残骸で発生した衝撃波は膨張するうちに、まだその近傍に存在すると思われる、超新星爆発を起こした大質量星を生み出した分子雲に出会うと考えられます。分子雲は衝撃波により加熱圧縮などの作用を受ける事が予想され、出会いによる相互作用はその検証の場となります。またこの作用が分子雲からの

星の誕生のトリガーとなるとする説もあります。さらに衝撃波が作り出す高温領域は星間化学の研究の場としても興味深い領域です。ところが実際に相互作用の現場を観測でとらえた例は非常に少ないのが現状です。筆者は、この超新星残骸と分子雲との相互作用、いわば星の生と死の接点を研究テーマとしてきました。現在（1996年11月）は日本学術振興会の海外特別研究員としてドイツのケルン大学に滞在しています。ここでは超新星残骸と分子雲との相互作用を、超新星残骸 W44 での具体例を中心に簡単に紹介したいと思います。

2. CO 輝線で超新星残骸 W44 近傍の分子雲を探る

星と星の間は空虚な空間ではなく、水素を主成分とした星間物質が存在します。その中で、低温で密度が比較的大きい領域には分子が存在し、分子雲と呼ばれています。分子雲の姿は電波望遠鏡を用いて調べられてきました。一般に分子のエネルギー状態に遷移が起こると、エネルギーの大きさに応じて特定の周波数に輝線を發します。多くの分

子の輝線はミリ波の周波数帯に現れ、それを電波望遠鏡がとらえるという具合です。分子雲の主役は水素分子です。ところが、低温（ ~ 10 K）の分子雲では水素分子は基底状態にあり輝線としては観測できないため、我々に姿を見せてくれません。そこで別の分子を代わりに用いて分子雲の様子が探られてきました。一番有力なプローブは、CO 分子輝線です。CO は低温の星間空間でも回転が容易に励起されます。115 GHz に現れる輝線は、 $J=1$ から $J=0$ (J は回転量子数) への遷移に対応していて CO($J=1-0$) 輝線と呼ばれます。銀河面全域にわたる CO($J=1-0$) 輝線のサーベイは Columbia 大学により行われ、そのポスターは世界中の研究機関に展示されています。ケルン大学の廊下にも、かに星雲やオリオン星雲の美しい光学望遠鏡の写真と並び、CO サーベイの結果が張り出されています。

さてこの CO マップを眺めていると、銀河中心から 34 度ほど離れた位置に、明るく輝線の幅の広い領域があります。ここには超新星残骸 W44 が存在しています。超新星残骸は、膨張に伴い掃き寄せられた磁場に高速の電子がからみつき、シンクロトロン放射を起こしています。シンクロトロン放射は、分子雲の観測に用いられる輝線とは異なり、広い周波数領域で同時に放出される電磁波であり連続波と呼ばれます。その様子を 10 GHz で眺めた結果²⁾を図 1 に示します。中央に位置する歪んだ殻状の天体が W44 です。太陽系から約一万年離れた天体です。

1993 年の初春、東大-NRO 60 cm サーベイ望遠鏡は W44 に向けられました。60 cm 鏡はその広い視野を生かして、CO($J=2-1$) 輝線による広範囲にわたる景色を描き出します。CO 輝線の強度分布は基本的に分子雲の物質量を示します。すなわち強い領

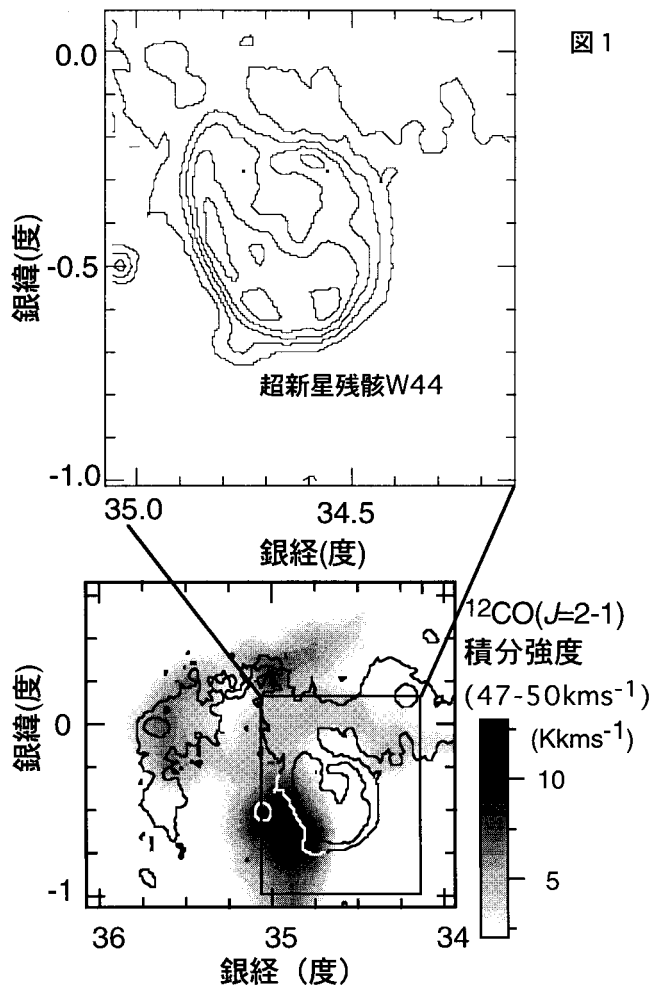


図 1

図 2

図 1 10 GHz 電波連続波²⁾で見た超新星残骸 W44

図 2 60cm 鏡を用いて $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線で見た W44 領域の分子雲 (グレースケール). W44 領域には複数の分子雲が存在するが、その一例 ($47\text{--}50 \text{ km s}^{-1}$ の積分強度図) を示す. コントアは 10 GHz 連続波を表し、枠の内部に超新星残骸 W44 が存在する. 白抜きのコントアの位置で分子雲は超新星残骸と相互作用を起こしている.

域は分子がたくさん集まっている領域です。しかし、そこでの物理状態（例えば温度や密度）は単一の輝線の観測のみでは良く分かりません。物理状態を調べる有力な方法は、異なる遷移の輝線を観測し、それらの強度比を求める事です。分子の励起は主として、水素分子との衝突により起きています。高い励起状態への励起には、高温、高密度が必要である事は容易に想像できます。実際には、異なる励起状態からの輝線の強度の比を、励起機構と輻射輸送の適当なモデルに基づき解釈して分子雲の物理状態を調べます。60 cm 鏡では Columbia

大学のサーベイと協力し、CO 分子の異なる遷移 $J=1-0$ と $J=2-1$ の輝線強度比を LVG (Large Velocity Gradient) と呼ばれるモデルに基づいて調べています³⁾。

さて超新星残骸 W44 領域は CO($J=2-1$) 輝線ではどう見えるでしょうか。図 2 に結果の一例を示します。実線のコントアは図 1 と同じ連続波を表しています。図中の枠で囲まれた領域に W44 が在ります。CO($J=2-1$) で見た分子雲はグレースケールで表しています。図で白抜きのコントアで表された位置に、W44 の左端に接するように分布する分子雲

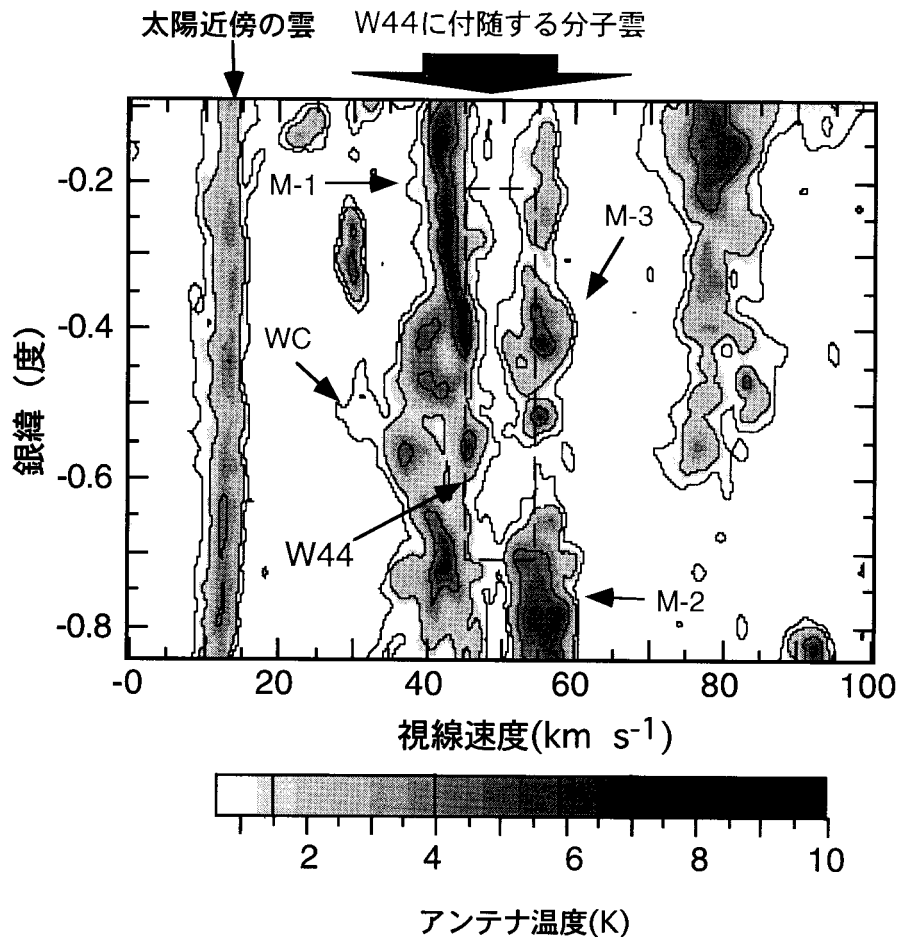


図 3 45 m 鏡 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線観測による W44 方向の典型的な位置-速度図 (銀経 34.7 度)

が見えます。W44の形はこの分子雲のために歪んでいるように見えます。この分子雲は質量は太陽質量の10万倍、直径は100光年と巨大なため、巨大分子雲に分類されます。さらに分子雲が超新星残骸と接する領域ではCO輝線の強度比R 2-1/1-0が非常に高い(>1)事が判明しました。強度比が非常に高いとは、分子雲が、光学的に薄く、高温高密度である事を意味します。分子雲に超新星残骸の衝撃波が押し寄せ、そこでの相互作用により分子雲の物理状態が変化すると推測されました。

もしここで相互作用が明確になれば大きな発見でした。これまで超新星残骸と分子雲との相互作用の観測例は少ないという事実があります。日本

でも名古屋大学のグループが新たな相互作用候補の探索を行いました。明確な例は見いだせませんでした⁴⁾。世界的にも唯一IC443が相互作用の明確な天体として知られているに留まります。一例からのみ相互作用の一般的描像を描くのは危険です。しかもIC443は比較的小質量の分子雲との相互作用例であり、分子雲のまばらな銀河系の外域の天体です。外域の観測では、超新星残骸とは関連の無い分子雲による影響が少なく、初めの観測としては賢明な選択でした。ところが星の母胎である分子雲は銀河系のより内側に集中していて、そこでこそ多くの超新星残骸と分子雲との相互作用が予想されるのです。しかしながら、相互作用領域の特定の困難さのため、これまで銀河系内域の観測が非常に少なかったのです。W44は銀河系内域に位置し、付随しているのは巨大分子雲です。ここでの相互作用を明確にできれば、CO輝線の強度比が相互作用の指標として使える根拠となり、今後の同種の研究に大きな道を開くのです。それには強度比が高い事以外での強力な証拠、例えば衝撃波で加速されたガスをとらえる必要がありました。空間分解能を高めて強度比の高い領域を覗けばそれが見えるかもしれません。

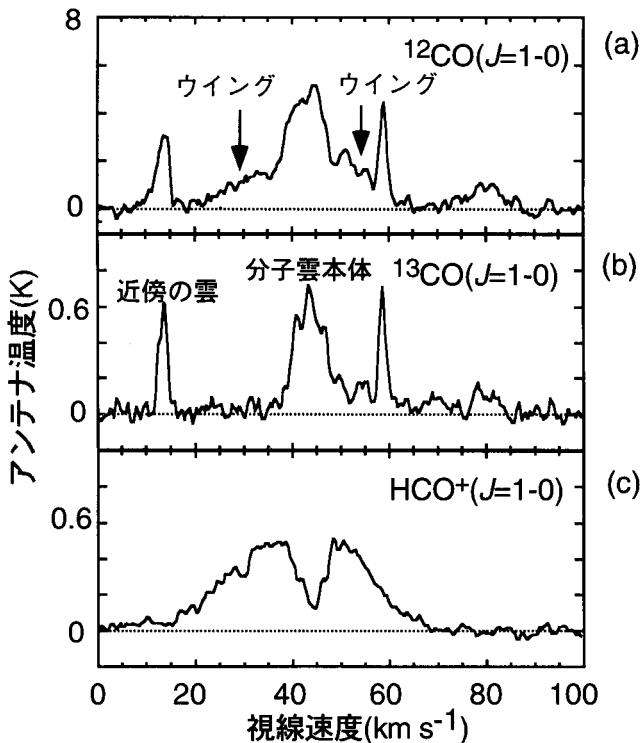


図4 (銀経, 銀緯)=(34.75度, -0.40度)におけるスペクトル。(a) ^{12}CO , 40 km s^{-1} の分子雲本体からウイングが延びている。(b) ^{13}CO , 分子雲本体の成分のみが見える。(c) HCO^+ , 分子雲本体に対応する速度における窪みは自己吸収である。線幅 60 km s^{-1} にわたる加速されたガスが明瞭に見えている。

3. 野辺山 45 m 鏡で詳しく見てみると

60cm 鏡が設置されている野辺山には、ミリ波領域では世界一の性能を持つ45 m望遠鏡があります。高い空間分解能で相互作用の現場をおさえるには最適な装置です。私たちは、45 m 鏡に搭載されているマルチビーム受信機を用い、W44 全域の $\text{CO}(J=1-0)$ 輝線のマップを作成しました。45 m 鏡は $17''$ の

空間分解能を持ちます。この高い分解能を生かし、たくさんの分子雲を分離する事に成功しました。図3にW44方向の典型的な位置-速度図を示してあります。縦軸に座標、横軸には視線速度を表しています。視線速度は第一近似として、太陽系からの距離に対応します。大きな速度ほど太陽系から離れているのです⁵⁾。図中の破線はW44の位置を示しています。分子雲はコントア付きのグレースケールで表しています。W44の近傍に多数の分子雲が見えます。位置的速度的な連続性を基に数個の分子雲に分離できそうです。試しに分離した分子雲にはM-1, M-2, M-3と名付けてあります。これまで知られていた 30 km s^{-1} に及ぶ輝線幅の広が

りは、実は複数の分子雲が重なり合い分解されずに見えていた結果と言えます。

さて図3を注意深く見ていると、図の中央のWCと示した付近で、CO輝線が速度方向に淡く拡がっている事に気がきます。淡い成分は、スペクトルでは分子雲の本体から翼のようによく伸びる成分に対応するため、ウイングと呼ばれています。これは一例ですが、このようなウイングが超新星残骸と分子雲が接している領域で多数見いだされたのです。中でも一番大きなウイングを示す ^{12}CO スペクトルを図4(a)に示します。中心の成分 (40 km s^{-1} 付近) は超新星残骸に接している分子雲の本体であり、そこからウイングが明瞭に伸びています。

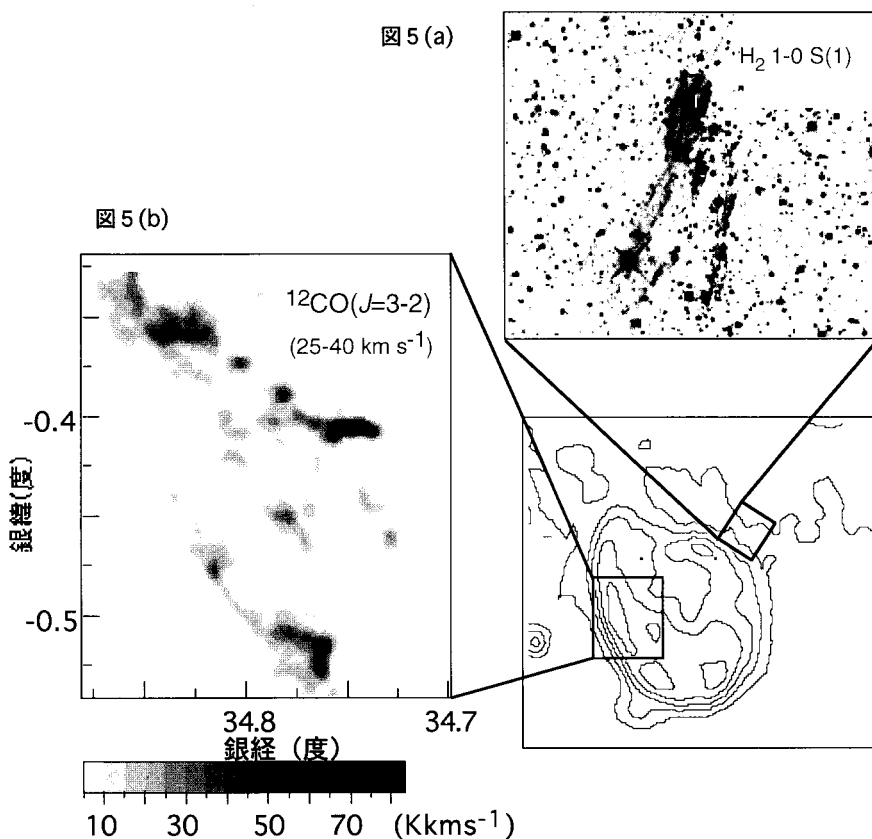


図5 (a) 岡山 188 cm 鏡による近赤外水素分子輝線 $\nu=1-0 \text{ S}(1)$ のイメージ。連続波成分を引いていないために星が写っているが、中央部分のフィラメント状の天体が超新星残骸の衝撃波で励起された水素分子輝線である。
(b) JCMT15 m 鏡による ^{12}CO (J=3-2) 輝線観測で浮かび上がったショックガス。

図4 (b), (c)には同じ領域の ^{13}CO , HCO^+ 分子輝線スペクトルを示しています。通常の領域では ^{13}CO のスペクトルのように分子雲はウイングを持ちません。ウイングは超新星残骸との相互作用により加速されたガスと解釈できます。加速されたガスは、図4 (c)の HCO^+ 輝線でも 10 km s^{-1} から 70 km s^{-1} にかけて線幅 60 km s^{-1} に達する広い輝線として見えています。スペクトル中央部の窪みは自己吸収です。超新星残骸との相互作用で、加速されたガスがウイングとして観測され、高温高密度に分子雲の物理状態が変化して CO 輝線強度比が高くなったと考えると観測は説明されます。ウイングの発見により相互作用の強い観測的証拠が得られました。

4. 近赤外水素分子輝線で見える 数千度のガスの姿を見る

電波望遠鏡による輝線観測では分子雲の比較的低温の領域を見えています。しかし衝撃波の影響を受けたショックガスは数千度の高温に達する事があります。水素分子は数千度に加熱されると、振動状態が励起され、その輝線は近赤外の波長域に現れます。近赤外望遠鏡を使うと数千度の分子ガスを選択的に観測する事が可能です。W44でも分子雲に衝撃波の影響でこのような高温領域が形成されているはずで、よって水素分子輝線が検出できれば、ショック領域の存在のより強力な証拠となります。また近赤外の高温ショック領域観測は、電波による低温ショック領域の観測と互いに補い合い、相互作用領域の深い理解に繋がります。

梅雨明けの暑い日、筆者は岡山天体物理観測所に向かいました。夕暮れを待ち、近赤外分光撮像装置 OASIS を搭載した 188 cm 望遠鏡を、W44 の位置するわし座に向けました。野辺山での電波観測からショックガスの存在が予想される領域の水素分子輝線による撮像から開始です。近赤外の撮像は電子の目がとらえ、コンピュータ画面に写しだされます。しかしなかなか強い輝線は受かりませ

ん。ウイング検出領域のリストには不検出の文字が並びます。天体が沈む頃、画面に突然、非常に強い輝線が写りました。高温のガスがあったのです。図5 (a)に水素分子輝線のイメージを示します。点状の天体は星ですが、中央付近にフィラメント状に広がる水素分子輝線が見えています。輝線の素性を調べるには分光観測が一番です。大急ぎで OASIS を分光モードに切り替え、輝線のフィラメントの明るい位置にスリットを合わせます。2 μm の近赤外の波長帯には水素分子の $v=1-0\text{ S}(1)$ 輝線を始め複数の遷移が存在します⁶⁾。分光観測ではそれぞれの輝線が分離されて見えてきます。その強度を比較する事で、水素分子輝線を放射している領域の特徴が判明します。分光観測の結果、この輝線は、衝突励起された 2000 K の高温分子からの放射である事が判明しました。超新星残骸の衝撃波により生成された高温のガスが起源と考えられ、ショック領域の存在をより確実にしました。

水素分子輝線の検出は、相互作用を確実にすると同時に新たな疑問も呈しました。強い水素分子輝線の検出された領域では小さな CO ウイングしか検出されていません。逆に大きな CO ウイングを検出した領域では、画像処理の結果ようやく見えてくる淡い水素分子輝線しか検出できませんでした。それぞれの領域では、大きさや質量の異なる分子雲が相互作用しています。 CO ウイングや水素分子輝線の形成には、分子雲の特性が反映されるようです。また水素分子輝線が観測された位置とウイングの位置には少しずれがあります。これは分子雲の内部に形成されたショック領域の構造を示していると考えられます。相互作用している分子雲の特性と水素分子輝線の関係、さらに分子雲内部に形成されるショック領域の構造の解明には W44 は絶好の場所と考えられます。まずは衝撃波の影響を受けた分子雲であるショックガスの分布を明確に押さえる必要があります。野辺山での CO 観測では確かにショックガスをとらえています。ところが、衝撃波の影響を受けていない分子雲本体も同

時に見えています。数千度の高温のショックガスのみを選択的に見ている近赤外との比較が難しいのです。低温のショックガスのみをトレースするプローブが必要です。何が良いプローブでしょうか。ショック領域でCO輝線の強度比が高いと言う事は一つのヒントを与えていました。すなわちJ=2-1輝線よりさらに高い励起状態のCOの遷移を観測すれば、ショック領域が明瞭に描き出せる事が期待できました。高い励起状態のCO輝線の遷移がある電磁波の波長帯はサブミリ波と呼ばれています。

5. サブミリ波観測で浮かび上がったショックガス

日本には、残念ながらサブミリ波観測の可能な望遠鏡がありません。サブミリ波観測には大気中の水分が少ない環境が不可欠です。そのような土地は世界でも限られ、ハワイ・マウナケア山頂、チリ北部の砂漠、そしてケルン大学の電波望遠鏡が在るスイス・アルプスなどです。望遠鏡の観測時間獲得に向け戦略を練ります。ショックガスの詳細な分布に加え、研究を深めるにはそこでの物理状態が大切です。高い分解能で分子雲内部での温度や密度の変化を調べるのです。それにはCOに加え、 HCO^+ などの輝線の強度比の利用が有効な手段です。物理状態の導出には望遠鏡のビームのサイズを揃える事が望ましいのです。今後の研究の展開を考えると、既に取得した野辺山のデータと比較ができるサブミリ波望遠鏡が望まれます。ハワイのマウナケアにある15mの電波望遠鏡James Clerk Maxwell Telescope(JCMT)が適任です。野辺山45m鏡でのCO(J=1-0)輝線とJCMT15m鏡でのCO(J=3-2)輝線は、ほぼ等しいビームサイズを持ちます。17"の空間分解能で分子雲の物理状態が明確になります。幸い両方の観測提案とも採択されました。ところが今年の野辺山の観測割り当ての日は雪が降ってしまい、その大部分の日を失って

しまいました。天気には勝てません。

野辺山の不運を挽回すべく筆者は、この春、サブミリ波の観測のためJCMTのあるハワイへ飛び立ちました。海辺の緑多き町ヒロとは対照的に望遠鏡の設置されているマウナケア山頂は草木も無く乾燥した、第一級の観測地です。毎晩夜半過ぎに中腹の宿泊基地から4200mの山頂に登ります。星のまたたきの小さな日は期待に胸が踊ります。観測ではCOウイングの検出位置を中心にCO(J=3-2)輝線でのマッピング領域を拡げました。その場で早速解析を行い観測へのフィードバックを急ぎます。解析が進むと、画面上にはきれいにショック領域が見えてきました。共同研究者Glenn White教授と二人してにやりとします。山頂での仕事は大変です。高山では頭の働きの鈍ります。さらに公用語は英語です。毎朝観測が終わる頃にはへとへとです。

CO(J=3-2)輝線で観測の結果、衝撃波の影響を受けていない成分に隠されていたショック領域が明瞭に浮かび上がりました。J=3-2輝線では、J=1-0輝線と比べて、衝撃波の影響を受けていない分子雲本体の成分が非常に弱くなり、逆に衝撃波で加速されたウイング成分が非常に強くなったのです。相互作用領域では異常に高い励起状態が形成されているようです。図5(b)にCO(J=3-2)輝線の積分強度図を示します。ウイングに対応する速度範囲のみで輝線強度を積分した図です。ショックガスの分布を表していると考えられます。ショック領域は帯状に分布しています。その向きは超新星残骸の膨張方向に垂直なようです。60cm鏡や45m鏡の観測から確実視されていたショック領域の詳細分布が明確になりました。

6. ケルン大学とKOSMA

さてハワイから日本に戻ると休む間もなく、筆者はケルン大学にやってきました。ケルンはライン川沿いの大きな街です。中央駅前には有名な大聖堂がそびえ建っています。ケルン大学はスイスの

3150 m の山に、3 m のサブミリ波望遠鏡 KOSMA を擁しています。ケルンに来た目的の一つが KOSMA です。サブミリ波の輝線の一つの用法としてショックガスのプローブが挙げられます。今年の冬は KOSMA を、W44 に向け、より高い励起状態の輝線の観測を計画しています。

まだドイツに到着して半年、ヨーロッパ初体験の筆者には全てが新鮮です。日本との違いは言葉を始めいろいろ目につきます。例えばドイツの大学では発表の後に拍手の代わりに机をたたく習慣があります。はじめてそれを見たときは、あまりの眠い発表に対するブーイングかと思ったりしました。他にも、研究のスタイルから街並みまでドイツの描写には事欠かないのですが、紙面も終わりつつあるのでこの辺で本筋に戻ります。

7. 最後に

さて筆者の研究の次の段階は衝撃波領域の物理状態の解明であると考えます。サブミリ波観測で明確となった超新星残骸と相互作用する分子雲の、ショック領域における物理状態の精密な定量化が目標です。超新星残骸により分子雲が加熱圧縮される事は判明しましたが、星形成のトリガーとなるかまではまだ踏み込んでいません。加熱や圧縮のスケールを明確にして、星形成のトリガーとしても超新星残骸の役割を解明したいと考えています。またショックガスの分布を明確にした事で、星間化学の研究の場としても W44 は興味深い場所となりました。ショック領域特有の化学反応が予想されます。さらに最近チリでは 60 cm 鏡の 2 号機が観測を開始しました。将来は CO の $J=3-2$ と $J=2-1$ 輝線の同時観測が可能になる予定です。輝線強度比 $R_{2-1/1-0}$ が超新星残骸と分子雲との相互作用の指標となる事を示しましたが、強度比 $R_{3-2/2-1}$ はショック領域特定により優れた指標である事が期待できます。2 号機で天の川を覗けば、これまで埋もれていた多くの超新星残骸と分子雲との相互作用領域の発見が期待できます。

本研究は、東京大学の長谷川哲夫先生をはじめとする 60 cm 鏡の運営メンバー、OASIS の開発者達と協力しながら進めてきました。草稿にコメント頂いた、高野秀路博士、岡朋治博士に感謝します。ドイツからの原稿の送付に関しては平野尚美博士に協力頂きました。なお本文中では専門的な参考文献は載せていませんが、ここで述べた成果は近いうちに *Astrophysical Journal* に掲載される予定です⁷⁾。専門的な議論や文献に興味をもたれる方はそちらをごらん下さるようお願い申し上げます。

参考文献

- 1) Reynolds S., 1988, Springer-Verlag, *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, 439
- 2) Handa T. et al. 1987, *PASJ*, 39, 709
- 3) Sakamoto S. et al., 1994, *ApJ*, 425, 641
- 4) 立松健一, 1987, *天文月報*, 220
- 5) 赤羽賢司他, 1987, 共立出版, *宇宙電波天文学*, 176
- 6) 毛利秀明他, 1996, *天文月報*, 438
- 7) Seta M. et al. *ApJ*, submitted

Interaction between the supernova remnant W44 and giant molecular clouds Masumichi SETA

I. *Physikalisches Institut, Universitaet zu Koeln, 50937 Koeln, Germany*

Our observations established the supernova remnant (SNR) W44 as the first unambiguously identified example of interaction between the SNR and GIANT molecular clouds. The interaction is characterized by broad (60 km s^{-1}) emissions of ^{12}CO and HCO^+ , and very high CO $J=2-1/J=1-0$ ratios.

The detection of near-infrared emission lines from collisionally excited H_2 confirmed the existence of shocked molecular gas. In addition, a high resolution CO($J=3-2$) map shows the detailed structure of shocked regions and it will become a fundamental guide for the study of shock chemistry.