



ISO が開いた新しい赤外線天文学

奥田 治之

〈宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: okuda@astro.isas.ac.jp

1995年11月にESA（ヨーロッパ宇宙機構）によって打ち上げられた空飛ぶ赤外線天文台（ISO）は望遠鏡を冷却していた液体ヘリウムの枯渇とともに28ヶ月間にわたる観測の幕を閉じた。その間、多種多様な天体の観測に成功し赤外線天文学に新たな展望を開いた。

1. スペースからの赤外線観測

1960年代中頃に始まった赤外線による天体観測は、初めは主として地上望遠鏡によって行われた。赤外線は地球大気中に含まれる水蒸気などによって強い吸収を受けるため、地上からの観測は波長20 μm 以下の、しかも、吸収の隙間をぬった狭い波長帯（窓）に限られる。吸収は高度とともに急減し、気球高度の40 km付近まで上がればその影響はほとんどなくなり、赤外線全域（1～1000 μm ）にわたって観測が可能になる。しかしながら、わずかに残った吸収はその逆過程である熱放射として明るく輝き、それに比べて桁違いに微弱な天体からの赤外線放射の観測にとって大きな障害となる。従って、大気の吸収と放射から完全に解放される大気圏外は赤外線観測にとって理想的な観測条件を備えた場所である。ただ、この利点を最大限に活用するためには、観測器自身の熱放射を避けるため、望遠鏡を始め、測光器、分光器など光学系そのものを極低温度に冷却することが要求される。これがスペースでの赤外線観測を技術的に難しくし、その実現を大きく遅らせた理由である。

初めての赤外線観測衛星はIRAS（Infrared Astronomical Satellite）と呼ばれ、1983年にアメリカ、オランダ、イギリスの三国共同で打ち上げられ、遠赤外域の4つの波長帯（12, 25, 60, 100 μm ）で全天のサーベイ観測を行った。観測は大成功をお

さめ、銀河系内の宇宙塵の詳しい分布図を全天にわたって描き出すとともに、赤外線銀河や惑星系形成の名残を示す星の発見などめざましい成果を上げ、スペースにおける赤外線観測の威力をまざまざと示した。

6年後の1989年には、宇宙背景放射の精密観測を目的にしたCOBE（Cosmic Background Explorer）がNASAによって打ち上げられ、マイクロ波背景放射が完全な黒体放射スペクトルを示すことを明らかにして、ビッグバン宇宙論に決定的な基盤を与えるとともに、銀河形成の種とも言うべき背景放射の強度揺らぎを検出するなど画期的な成果をもたらした。

さらに6年後の1995年には、我国で初めてのスペース赤外線望遠鏡（IRTS）が共用の宇宙プラットフォームであるSFU（Space Flyer Unit）によって打ち上げられ、星間空間に普遍的に分布する有機物質（PAH）の存在を明らかにするなど拡散状の赤外線放射の観測でユニークな成果を収めた。その数ヶ月後、ヨーロッパ宇宙機構（ESA）は赤外線スペース天文台（ISO: Infrared Space Observatory）と呼ばれる大がかりな赤外線観測衛星の打上げに成功した。この衛星は名前が示すように、広い波長域（2.5-200 μm ）にわたって、撮像、測光、分光、偏光観測など様々な観測に対応できる汎用、多目的の空飛ぶ赤外線天文台である（天文月報、86巻、2号、田辺俊彦氏の記事参照）。



この計画はおよそ15年の歳月と、総額約700億円という巨額を投じて実現したものである。そもそも、ISOはヨーロッパに閉じた計画としてESAが進めてきたものであるが、打上げ軌道として近地点1000 km、遠地点70000 km、周期24時間という長円軌道が選ばれたため、ヨーロッパが用意した独自の受信局（マドリド近郊のヴィラフランカ局）一局では軌道全周にわたる受信が出来ない。前にも述べたように、赤外線衛星は一般に極低温冷却を必要とし、このISOの望遠鏡もおよそ2000リットルの液体ヘリウムによって冷却されている。此の液体ヘリウムはおよそ18ヶ月で蒸発し、従って衛星の寿命もそこで尽きる。一方、衛星にはデータレコーダーが搭載されていないため、受信時間外およそ6時間分の観測データは捨てなければならない。ESAはこの貴重な観測時間を救うため我国に受信支援を申し入れてきたが、国内の衛星計画の運用上全期間にわたる定常的な支援は無理であることがわかり、米国が第2の受信局（カリフォルニア州、ゴールドストーン局）を用意し、我国はヨーロッパ局の運用に伴う人的支援を行うということで、ヨーロッパからの不可視時間帯における観測データの収集可能になった。此の見返りとして、日米両国の研究者にも、一定時間の専有観測時間の割り当てが認められ、また、一般公募の観測にも応募できることになり、我国の研究者も観測に参加する機会が与えられることになった。

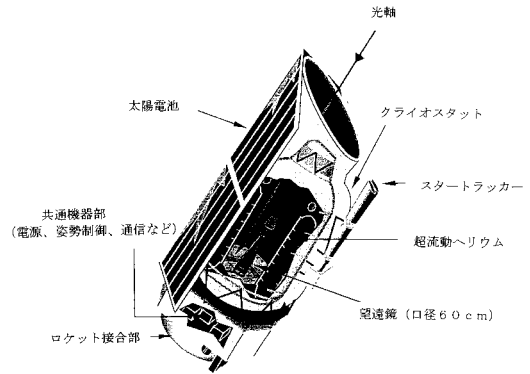


図1 ESA（ヨーロッパ宇宙機構）が打上げたスペース赤外線天文台（ISO）の概観図。直径60 cmの望遠鏡が約2000リットルの液体ヘリウムによって絶対温度2 K (-271℃)まで冷却されている。

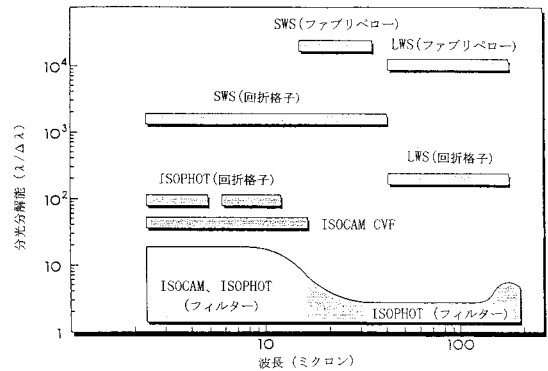


図2 ISOに搭載された観測器の性能。各々の観測器の観測波長域 (μm)と分光分解能 (λ/Δλ)を示す。ISOCAM (赤外線カメラ), ISOPHOT (赤外線測光器), SWS (短波長分光器), LWS (長波長分光器), CVF (円盤型干渉フィルター)

2. ISOによる観測

ISOには、図1に示すような口径60 cmの望遠鏡が搭載され、約2000リットルの超流動状態の液体ヘリウムによって観測機器を含めて全体がおよそ1.8 Kに冷却されている。望遠鏡の焦点部には4種類の観測装置が備えられ、図2に示すように、さまざまな観測手法に対応できるように設計されている。すなわち、ISOCAMによる近、中間赤外域での撮像観測、ISOPHOTによる近赤外から遠赤外の全域にわたる測光観測、SWSによる近、中間赤

外域での分光観測、LWSによる遠赤外域での分光観測と数種類の波長帯における偏光観測など、ほとんど全ての種類の観測をすることができるようになってきている。特に、2次元アレイを用いた赤外線カメラと本格的な分光装置を備えた赤外線衛星はISOが初めてである。また、望遠鏡の分解能も近赤外域では1-3秒角という高いものが用意され、精密な姿勢制御機構とともに、天体の高分解赤外線像を観測する一方、超高感度の測光器や分光器などを目的に応じて選択しながら、さまざまな天体を多角的に観測できるという意味では天文台とい



う名前にふさわしい道具立てになっている。

打上げは、1995年11月、南米ギアナのクールー基地から行われ、打上げ後、全ての観測機器は正常に働き、つい最近の1998年4月8日に液体ヘリウムがなくなるまで観測を続けた。衛星の運用、観測データの受信、その後の解析などの処理は前記のヴィラフランカ局に設けられたISO運用センター(VILSPA)が受け持ち、総勢約100名のスタッフが常時働いた。第2受信局には米国ゴールドストーン局が選ばれ、ここでは受信のみを担当し、取得データはそのままりアルタイムでVILSPAに送られ、一括して解析処理が行われた。VILSPAには、我国からも専任の研究者1名が出向き、現地の要員と共同して観測プログラムの作成から、観測データの取得、整理、配布などの任務に着いている。

観測機器は非常に複雑なものばかりで、当初はこれが全て正常に働くかどうか危ぶまれたが、多少の不具合はあったものの、全て順調に働き、連日、膨大なデータを送り続けた。観測は世界中の1000人近い研究者からの提案を受けて順次行われ、終了までに26000件を越える観測が実行された。観測期間は当初18ヶ月が予定されていたが、液体ヘリウムの蒸発量が思いのほか少なく、最終的には、およそ28ヶ月間と大幅に伸びることになった。これによって当初は断念されていた全天観測が可能になり、特に、オリオン領域、牡牛座暗黒星雲など代表的な星形成領域の観測が出来ることになるなど予期せぬ幸運にも恵まれた。行われた観測は多岐にわたり、また、未解析のデータも大量に残っているが、ここでは、これまでに得られている結果から代表的なものを選んで紹介する。

3. ISOが開いた新しい宇宙

◇分光観測

ISO観測の最大の特徴は、なんと言っても本格的な分光観測の導入である。すなわち、近、中間赤外線と遠赤外線の両領域にわたって高分解能

(1000～20000)の分光観測ができたことである。赤外線領域はスペクトル線の宝庫で、水素原子では主量子数の高い準位間の遷移線(パッシェン、ブラケットなど)、種々の分子の振動、回転線、重い原子の微細構造線、固体物質の持つ様々な吸収、放射バンドなど極めて多彩で豊富なスペクトル線が存在する。特に、水素分子の振動、回転線、水分子の持つ多様なスペクトル線、種々の固体物質のバンドスペクトル、さらに、有機物質起源のスペクトル線など他の波長域では得られない情報を担ったものが多い。観測は多種多様な天体にわたって行われ、期待に違わず、新しいスペクトル線の検出ラッシュが続いている。

1) 氷、氷、氷、

星間空間の温度は10数Kから数100Kと低温であるため、多くの物質が固相で存在する可能性が高い。従来は、星の光の赤化(散乱、吸収)現象というような間接的な証拠から大きさが $1\mu\text{m}$ 以下の固体微粒子(ダスト)が存在することがわかってきた。それが、ダストからの熱放射(赤外線)を直接観測することができるようになり、その存在は陰から陽に移り、星間空間でのダストの分布、組成、温度などについての理解は飛躍的に進んだ。その結果、シリケートなどの珪酸塩鉱物のダストや H_2O 氷粒子の存在などが明らかにされていた。ただ、これらの観測はほとんどが、地上から行われてきたため、大気吸収に妨げられて自由に観測波長域が選べなかったり、また、氷の観測では水蒸気の吸収の影響を強く受けるために精度の高い観測は困難であった。大気圏外で観測するISOでは、この難点が一挙に取り除かれ、広い範囲の波長帯で精度の高い観測が行われている。図3にはSWSによる観測の一例を示したが、ここには、 H_2O ($3.3\mu\text{m}$)を始め、 CO_2 ($4.2\mu\text{m}$)、 CO ($4.7\mu\text{m}$)、 CH_4 ($7.6\mu\text{m}$)など数多くの氷の吸収バンドが見えている。なかでも、 CO_2 の氷(ドライアイス)の吸収バンドは様々な天体で観測されて、ドライア

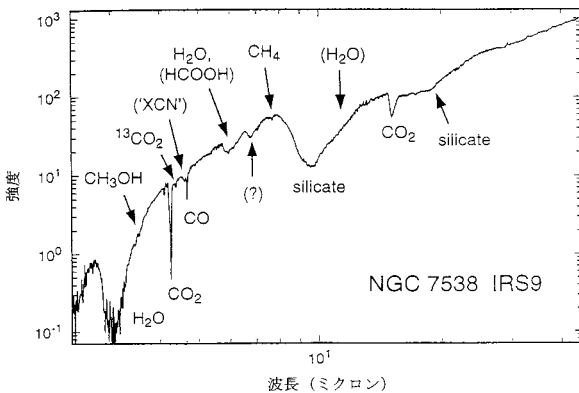


図3 赤外線星 NGC 7538 IRS9 の赤外線スペクトル。H₂O (水), CO₂ (ドライアイス), CO (一酸化炭素), CH₄ (メタン), などの氷の吸収が見える。合せて silicate(珪酸塩鉱物)の吸収が10 μ m, 20 μ m 付近に認められる。(SWS, Whittet 等による観測)

イスが星間空間にごく一般的に存在することが明らかになった。日本の観測でも、長田等が行った銀河中心方向にある赤外線五つ子星にもはっきりとドライアイスの吸収を確認している。一方、シリケートの放射バンドもいままでは不定形シリケートによると思われる幅広い特徴を持ったものが多かったが、ISO の観測では結晶性のシリケートの微細構造を示すスペクトルを持ったものも検出されるようになった。

星間空間におけるダストは熱エネルギー輸送の主要な役割を担っており、また、様々な星間原子、分子反応の仲介役としても重要な働きをしていると考えられている。従って、その組成、形態、存在量などの諸特性を正しく理解することは星の形成、進化、ひいては銀河系の形成問題を解く鍵を握っている。ISO による観測がこれらの研究に新しい展開をもたらすものと期待されている。

2) 有機高分子ダストの存在

初めての赤外線衛星 IRAS の重要な成果の一つが、中間赤外放射における波長 12 μ m 付近の強力な超過成分の発見であった。この成因としてベンゼン環を多数含んだ有機物質、多環式芳香族炭化

水素化合物 (PAH) のバンド放射で説明できるという仮説が提案されている。一方、我国では、電通大の坂田氏等によって、高温プラズマ中でのメタンの燃焼によって実験的に生成された炭化物 (QCC) が候補物質として提案されている。いずれも、これらの物質のなかに含まれるベンゼン環を持つ C-H, C-C 結合の伸縮運動、屈曲運動に起因する放射過程であると考えられている。その後、このような放射は気球観測によって近赤外域 (3 μ m 付近) にも存在することが確認され、また、航空機からの観測によって独立した天体の中にも同種の放射が存在することが知られるようになり、そのスペクトル構造が調べられている。ISO では衛星観測の利点を生

かして、近赤外から中間赤外にわたる広い波長域での分光観測が行われ、星の周辺、星間雲、電離ガス雲、さらには系外銀河に及ぶ様々な天体に類似のスペクトル構造が検出された。このように、ISO は有機物質起源の高分子ダストが宇宙空間に普遍的に存在することを確定的なものにした。

因みに、ISO に 8 ヶ月先立って、我国最初の赤外線衛星 (IRTS) が再利用型の宇宙プラットフォーム (SFU) によって打ち上げられたが、この衛星には、近赤外、中間赤外分光器が搭載されていた。これによって星間赤外線放射の観測が行われ、PAH 起源と考えられる赤外放射が銀河面の隅々にまで分布していることを明らかにしている。

その他、このような PAH 起源と思われるスペクトルバンドは系外銀河にも数多く観測され、遠距離にある赤外銀河にも検出されている。そんなわけで、このスペクトル構造を利用して超遠距離にある銀河の赤方変位の決定に利用できるのではないかと考えられている。

3) 水素分子

宇宙物質の主成分が水素であることを考えると、低温で密度の高い星間雲の中では水素分子として存在しているのが自然である。従来は、電波観測



によって、COの回転線(2.6 mm)の測定を行い、そこから衝突による励起源である水素分子の存在を間接的に推定してきたが直接的な検出は難しかった。というのは、水素分子はその構造の対称性の良さから双極子放射が禁止されているためである。そのため、その検出は禁制線である振動・回転線や四重極放射である純回転線によって初めて可能になる。前者は近赤外線領域に、後者は中間赤外線領域で放射される。いままでは、地上観測によって、2 μm付近の振動線が原始星周りに検出されたり、航空機による観測から、回転線の一本(S(1), 17 μm)が発見されるなどごく散発的なものに限られてきた。それが、ISOの出現によって事情は一変し、観測天体は種類、数ともに大幅に広がり、また、異なる準位間の遷移が数多く検出されるようになった。特に、後者の情報はスペクトル線の強度のエネルギー依存性から、H₂分子の励起温度を正確に推定することが出来るため、天体の物理状態を推定するのに極めて有効である。図4にSWSによって観測されたオリオンの大星雲のスペクトルを示したが、そこには、水素分子の振動・回転線がびっしりと受かっている。また、LkH α 224, 225という若い星形成領域では多数の回転輝線が観測され、その強度のエネルギー依存から、温度の高い(各々、500 K, 800 K)水素ガス雲の存在する事実と、その総質量(0.01, 0.04 太陽質量)などが求められている。その他、さまざまな系外銀河(普通の渦巻星雲、衝突銀河、スターバースト銀河など)の中にも多量の水素分子の存在が

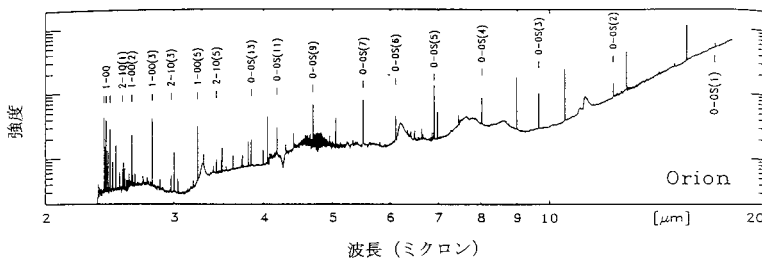


図4 オリオン星雲で観測された水素分子線(振動, 回転線)の群。(SWS, Rosenthal, Drapatz 等による観測)

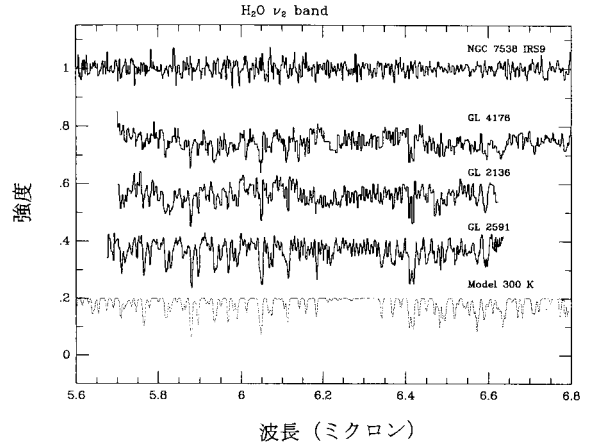


図5 各種の赤外線星を背景に検出された水(H₂O)の吸収スペクトル。点線はモデル計算による吸収プロフィール(SWS, van Dishoeck 等による観測)

検出されたり、中には、星の進化のなれの果てである惑星状星雲の一つである螺旋星雲(NGC7293)のような天体では赤外線放射の主要部分(50%)が水素分子のスペクトル線で占められているものさえあるということもわかった。

4) 水(H₂O)スペクトル線の洪水

水(H₂O)も宇宙における元素の存在比から言って豊富に存在が予想される物質であり、赤外域に多数のスペクトル線を持っている。しかしながら大気中に含まれる水蒸気の吸収や放射の影響をまともに受けるため大気中での検出は不可能である。ISOの搭載されたSWS, LWSの2種類の分光計は中間赤外域, 遠赤外域に分布する振動・回転線や、

純粋な回転線など豊富な水のスペクトル線の観測に大活躍している。その結果、星の外周大気や星間雲の中に続々と水の吸収線, 輝線を発見している。例えば、図5は、SWSによる観測結果であるが、大質量の若い星に付随したガス雲の近赤外放射を背景に水の

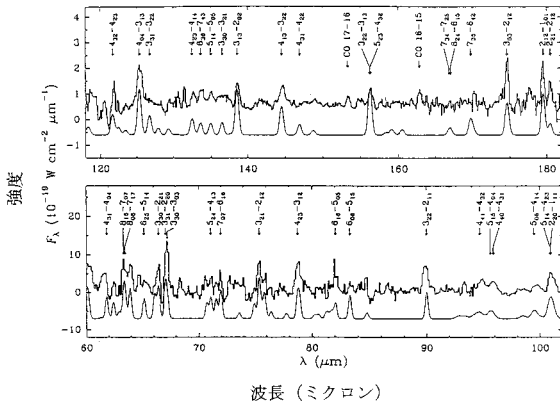


図6 W Hya (海へび座W) 星に検出された水 (H_2O) の輝線スペクトル下段の細い実線はモデル計算による放射スペクトル (LWS, Barlow 等による観測)

振動・回転線の吸収を見ることが出来る。また、図6は、SWSによって観測された進化の進んだ巨星の一つである海蛇座のW星 (W Hya) の遠赤外スペクトルであるが、そこには、多数の水の回転線が輝線として見えている。これらのスペクトル線の解析からは、関係する水分子の温度 (300 ~ 500K) や存在比 (10^5) が正確に求められている。このように、ISOによる観測は星間空間における水の存在形態を明らかにし、その物理状態の的確な診断を可能にするなど、星間物理研究に新たな展望を開いた。

その他、水の存在はさまざまな太陽系天体、土星、天王星、海王星やその衛星など、また、たまたま現れた Hale-Bopp 彗星にも検出されており、また、天の川銀河の中心、多くの系外銀河の中にも水の存在が確認されている。水の観測は ISO の観測成果の中での最大のハイライトである。

5) 微細構造線

中間赤外、遠赤外領域には、C, N, O, Ne, S などの重い原子の微細構造線 (スピン・軌道角運動量の相互作用に起因するスペクトル線) が数多く存在する。これらのスペクトル線の何本かは今までに地上、航空機、気球などによる観測によって

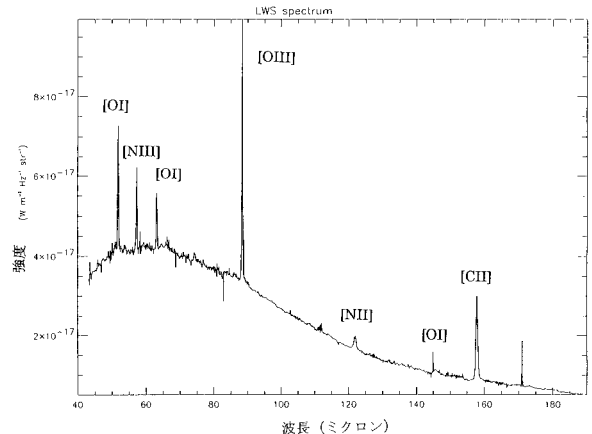


図7 η Car (竜骨座エータ) 星領域の遠赤外スペクトル。(LWS, Onaka 等による観測)

検出されていたが、全波長域が自由に観測できる ISO によって観測される原子種の数が大幅に増え、また、異なる電離度のスペクトル線が同時に観測できるようになった。その結果、関係する天体の物理状態の量的評価が可能になり、星の大気、星間ガス雲、さらには、活動銀河核を含めたさまざまな銀河における物理状態の診断に威力を発揮している。例えば、尾中、中川等のグループは銀河面に広く分布する低密度電離領域を中間赤外、遠赤外域での微細構造線の観測によって見いだした。そこには、酸素、窒素、炭素イオンの他に中性酸素も含めて多数の微細構造線が検出されている。また、銀河中心部分には他の銀河面には見ることのできない OH の吸収線も存在することが見つかり、銀河中心固有の低温ガスの存在を暗示するなど、星間空間がさまざまな物理相を持った複合的な領域であることが明らかになってきた。

一方、多数の系外銀河の赤外スペクトル観測が行われ、電離度の高いスペクトル線 [OIV] と低電離度の [NeII] 線の強度比が、Seyfert 銀河や QSO 等のような活動銀河核 (AGN) と高光度赤外銀河、スターバースト銀河などを区別する良い指標 (前者は高電離度、後者は低電離度が強い) になっていることがわかった。また、赤外銀河の Arp 220 の



LWS による観測によって、OH メーザー線の励起に関係していると考えられてきた波長 $35\mu\text{m}$ を初めとする何本かの OH 分子の吸収線が観測されて、赤外線がこのメーザー線の励起源であるという仮説の正しかったことを示す発見もなされている。

6) 星の大気

一般に星の表面温度は数千度～数万度の範囲に分布し、その放射の主要部分は可視光領域にあるが、進化の進んだいわゆる晩期型の星では、光球の膨張とともに表面温度が下がり、放射の極大が赤外域に移ってくる。同時に、大気中には多様な分子が存在するようになり、赤外域に豊富なスペクトル線が現れてくる。また、膨張した外層大気は星の重力圏を振り切り、大量のガスが放出されるようになると、そこに含まれる重い元素類が固化して星周塵を形成する。その熱放射が赤外線として観測される。辻を中心とした日本のグループは、この AGB (漸近巨星枝) 型星と呼ばれる進化の進んだ星の測光、分光観測を系統的に行い、進化の終末期にある星の大気構造を詳しく調べた。その結果、早期 M 型巨星、超巨星の大気に、光球起源とは考えられない水のスペクトル線を検出し、これらの星がいままで知られていなかった数 100 K の温度を持つ分子ガス雲に取り囲まれていることを明らかにした。また、大小マゼラン星雲には、広い年令層にわたる球状星団が存在するが、田辺等は、マゼラン星雲に含まれる 20 個の星団中の AGB 星を観測し、星の進化の終末期を系統的に追跡することに成功している。

ISO の持つ感度からすれば星の観測は極めて容易で、星の観測はほとんどあらゆる種類に及んでいる。特に ISO の持つ分光的機能を駆使した研究からは、水を初めとする様々な分子種、固体物質(氷など)の検出が行われ、また、従来地上観測な

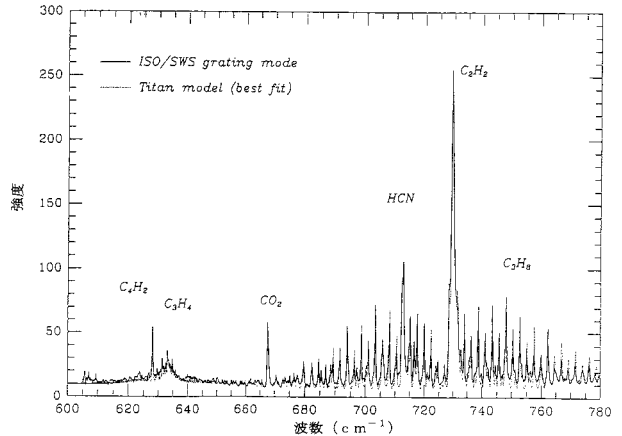


図 8 土星の衛星タイタンの中間赤外線スペクトル 数多くの分子線が分解されて見えている。(細い点線はモデル計算、観測との差がほとんど見えない)(SWS, Coustenis 等による観測)

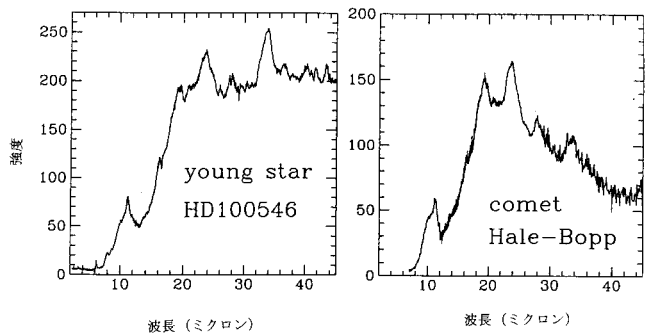


図 9 ヘールボップ彗星と恒星 (HD100546) 周辺ダストで観測されたシリケート (Silicate) の吸収バンド、両者は非常によく似ていて同一起源を思わせる。(SWS, Crovisier 等による観測)

どでは、もっぱら非晶質のシリケート鉱物のスペクトル ($9\mu\text{m}$, $18\mu\text{m}$) として観測されていた低温星周辺のダストが、ISO によって長波長域の観測にのびた結果、 $33\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ に結晶性のスペクトルを示すダストが存在することがわかるなど、いままでの常識を覆すような重要な情報が数多く得られ、星の大気の研究に新天地を開いた。

7) 太陽系天体の観測

太陽系天体の温度範囲は数 100 K 付近にあり、その放射はまさに赤外域にあって、様々な観測が

行われている。木星や土星の大気からは CO_2 , CH_4 などのスペクトルが高分解能で観測され、図 8 に示すように、まるで、実験室での分光データを思わせるような結果が得られている。また、HD のような同位体分子からの放射も検出されて、D/H 比のような重要な情報も得られるようになった。一方、たまたま現れた Hale Bopp 彗星もいち早く観測され、 CO , CO_2 や H_2O (OH) などのスペクトルが検出され、その強度が太陽からの距離に応じて変化し、それが物質の昇華温度の低い方から見えてくるなど興味深い結果が得られている。また、図 10 に示すように、 $11.3 \mu\text{m}$ 付近には結晶性のシリケートである Olivine に相当する放射が認められた。面白いことに、Hale Bopp 彗星に見つかったこの Olivine の特徴が、IRAS で発見された惑星系形成の名残を残した星 (HD100546, ヴェガ型星) を取り巻くダスト円盤のスペクトルにも見つかった。結晶性のダストが形成されるためには、高密度でしかもゆっくりとした冷却過程が要求される。これが惑星起源にとってどのような意味を持つのか興味深い問題である。このように、ISO の観測は星間空間におけるダストの物理状態だけでなくその形成過程の解明にもつながる貴重な情報を提供している。

◇測光観測

ISO には、高感度の赤外線カメラ (ISOCAM) と測光器 (ISOPHOT) が備えられている。赤外線カメラは近赤外 ($2.5 \sim 5 \mu\text{m}$)、中間赤外 ($5 \sim 18 \mu\text{m}$) の波長帯をカバーし、最高 32×32 素子の 2 次元アレイ検出器が使われていて、いままでにない高分解能 (最高 1.5 秒角) の撮像観測が可能になっている。一方、測光器は近赤外から遠赤外の広い波長帯 ($2.5 \sim 200 \mu\text{m}$) を覆い、フィルターの切り替え一つで多様な波長帯での観測が可能である。どちらも、精密なポインティング装置によって長時間の指向観測が出来ることから、2 次元アレイによる観測効率の改善とともに検出限界は大幅

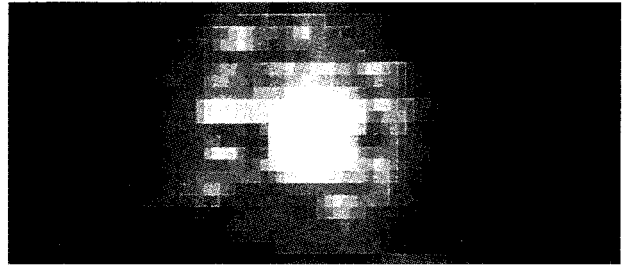


図 10 Y CVn (獵犬座 Y) 星の周りに観測された宇宙塵の輪 (ISOPHOT, Izumiura 等による観測)

に向上し、微弱な天体、遠距離の天体の観測に威力を発揮している。さまざまな観測が行われているが、ここではその代表例のいくつかを紹介するにとどめる。

1) 星を取り巻くダストリング

進化の進んだ星は主系列と呼ばれる星の集団を離れて外層大気を膨張させながら巨星、超巨星への道を歩んでいわゆる漸近巨星枝 (AGB) 型星という集団を形成する。この段階では、膨張した外層大気から大量のガスが流れ出し、温度の低下とともに中に含まれる重い元素が固体微粒子に成長して星周塵層を形成する。星周塵は中心の星の光を吸収しそれを改めて赤外線として再放出して赤外線星として輝く。このような赤外線星は地上観測によっても、また、IRAS の観測でも数多く観測されているが、これを取り巻く星周塵の構造まで分解して観測することは難しかった。泉浦等は、波長、 $90 \mu\text{m}$, $170 \mu\text{m}$ の遠赤外線で AGB 星の一つである獵犬座 Y 星 (YCVn) という炭素星の周りの赤外線強度分布を詳しく調べ、それが星を取り巻くリングに分解できることを明らかにした (図 10)。このように、ダストの分布がリング状になるのは、中心の星からのガスの吹き出しがいつも一定ではなく間欠的に行われていることを示しており、観測結果から、ガスの吹き出しは今から 1 万 5 千年前におよそ 1 万年間にわたって現在のおよそ 100 倍の放出を維持した後、現在は小休止の状態にあるとして説明が付く。これは AGB 星内



部の熱核反応が脈動的に変化していることを示唆する興味深い結果である。

2) 暗黒星雲の中で生まれる星の群

銀河系空間には星間雲と呼ばれるガス雲が存在し、それが、背景の星の光を遮って暗黒星雲として見えている。この暗黒星雲の中で密度が高く温度が低いものでは自己重力によって収縮が始まり、やがては、中心に星が形成されると考えられている。このような星の前身を原始星と読んでいるが、このような天体の温度は数 100 K 以下の低温度であり、赤外線ではしか観測できない。いままでも、地上観測や、IRAS 等による観測で数多くの候補天体が見つかったが、それらは比較的質量が大きく明るいものに限られていた。ISO による感度向上と、カメラによる撮像観測の実現は研究の質、量を飛躍的に向上させた。例えば、ISOCAM を使って観測した蛇遺座ロー星 (ρ -Oph) 周りの暗黒星雲 (距離約 500 光年) の赤外線像 (図 11 = 表紙) を見ると、暗黒星雲の中で展開されている星形成の様々な局面を見ることが出来る。そこには、広がった暗黒星雲が長波長の赤外線では明るく輝いて見え、その中で誕生してまもない重い星は、強力な紫外線を放射して周囲のダストを温めてより短波長の赤外線を放射して所々に明るい固まりとして見えている。孤立して散在している点源には主系列星に届く直前の T-Tau 型星と呼ばれる若い星や、質量の小さい原始星も含まれていると考えられる。詳しい研究はこれから行われるが、見つかった天体の中には、長年探し求められてきた褐色矮星 (質量が小さすぎて (太陽質量の 0.08 倍以下) 中心で熱核反応が起こらなくて星に成りきれなかった星) が含まれていると考えられている。このような観測は他の暗黒星雲でも数多く行われ、これらの研究の積み重ねによって、星間雲の中での星の生成効率や生成される星の質量分布とその下限など星形成研究の基本的な課題に迫れる可能性が出てきた。

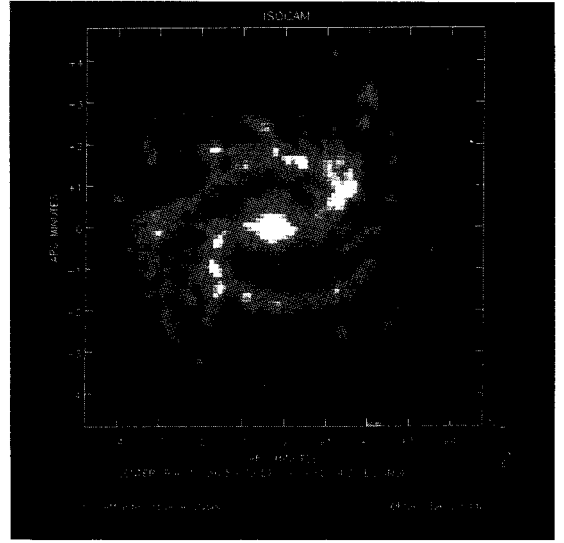


図 12 渦巻銀河 (M83) の赤外線 ($7 \mu\text{m}$) 像 (ISOCAM による観測)

3) 様々な銀河の赤外線像

近距離にあって大きな広がりを持ったアンドロメダ銀河は IRAS によって赤外線像が描かれた数少ない銀河の一つであるが、それ以外の銀河を分解して観測することが ISO によって初めて可能になった。特に、広い視野にわたって高い分解能で一度に撮像できる赤外線カメラ (ISOCAM) は銀河のような広がった天体の観測に威力を発揮した。図 12 はこの ISOCAM を使い、波長 $7 \mu\text{m}$ で撮った M83 と呼ばれる渦巻銀河の赤外線像である。一見、光で見た銀河の構造とよく似ているが、ここで見えているのは、銀河の中で盛んに形成されている新しい星を取り巻く暖かい星間塵からの赤外線放射である。従って、この図は銀河の中での星形成の活動状況をつぶさに写し出したものである。このようにして、銀河全体での星形成の様子が一目で見ることができるようになった。

一方、衝突銀河の一つであるアンテナ銀河を赤外線 ($5.5\text{--}16.5 \mu\text{m}$) で撮像してみると、図 13 (= 表紙) に示すようなパターンが浮かび上がってきた。これを、普通の光で撮った写真に重ねてみると、赤外線の最も強いところは衝突中の 2 つの銀河の中



心部分 (NGC4038, NGC4039) ではなく、ちょうど銀河の腕と腕が重なり合っている部分(A)であることがわかる。すなわち、銀河の衝突部分で激しい星形成が起こっており、その結果、そこが赤外線でも最も明るく輝いているものと考えられている。

4) 赤外線で見える宇宙の最深度

ビッグバンで始まった一様、等方的な宇宙から、現在見られるような極めて多様、かつ不均一な宇宙にどのように進化してきたか、とりわけ、初めての銀河 (原始銀河) や星 (種族 III) が、いつ、どのように形成された来たかは今まで観測の光の当たらない宇宙進化の暗黒時代であった。近年、様々な手段でこの問題への取り組みが始まっているが未だ確定的な事実が見つかっていない。Hubble 望遠鏡による宇宙深部の観測が行われて超遠距離の銀河の姿が見えてはきたがこれが果たして原始銀河か否かは定かでない。もしも原始銀河がダストの吸収を受けているならばこのような可視光線の観測では見ることができない。それならばダストからの直接放射である赤外線で見えてはということになる。

このような考えから、いくつかのグループが、これまでにない高感度を持つ ISO の観測器を使ってこの問題に挑戦した。我国でも谷口、川良を中心にしたグループがこの問題に取り組み、世界で最も深い観測をすることに成功した。観測領域には銀河系内のダストの吸収、放射の影響を最小限に押さえるために、全天で最も星間雲の希薄な領域 (Lockman Hole) が選ばれた。観測は、中間赤外域で最も深い観測深度の得られる $7\ \mu\text{m}$ 帯を ISOCAM で、また、ダストの熱放射の最も強いと思われる遠赤外領域 ($90\ \mu\text{m}$, $170\ \mu\text{m}$ 帯) を ISOPHOT によって行うことになり、前者の観測には $3' \times 3'$ という領域に合計 13 時間の観測時間を投入し、また、後者の観測にも、 $40' \times 40'$ の領域に 18 時間という思い切った観測時間を割り当て、どちらも世界一深い観測になった。

観測結果の解析は、まさに雑音との戦いであった。特に放射線が検出器を叩いた場合の影響は甚大で、取扱をひとつ間違えると偽の天体を誤って取り上げかねないということで解析は慎重を極めた。図 14 (=表紙) は ISOCAM を使って Lockman Hole の一角を波長 $7\ \mu\text{m}$ で撮った赤外線像の例であるが、この中には数 10 個の赤外線源が群がっている。上に述べたように複雑な解析を経たデータだけに観測結果には一抹の不安があったが、同一場所を地上望遠鏡 (ハワイ大学, $2.2\ \text{m}$ 望遠鏡) で撮った K バンド ($2.2\ \mu\text{m}$) の赤外線像と比べてみると、両者の対応は極めて良いことがわかり結果は十分信頼できるものと考えられている (天文月報, 91 巻, 9 号, 谷口義明氏の記事参照)。この観測の検出限界は IRAS よりも 1000 倍も改善されており、従って、これが目的の原始銀河であるかどうかはわからないにしても、ここに写っている天体は赤外線で見えた最も深い宇宙の姿であることに違いない。事実、その後ハワイ大学のグループと共同で世界最大の Keck 望遠鏡を使って行われた赤方変位の観測によれば、多くの銀河が数 10 億光年以上の距離にあることがわかった。

一方、ISOPHOT による観測データの解析からは図 15 (=表紙) のような結果が得られた。これほど深い観測は他に対比するものがなく結果が正しいものかどうかの検証が難しい。ただ、全く独立に行われた 2 つの波長での観測結果が図から見て取れるように非常によい相関を示すことから結果が全く雑音によるものとは考えにくい。観測限界は IRAS の一桁以上深いと推定され、従来の観測では見えていなかった新しい赤外線源が浮かび上がってきたものと考えられる。また、この波長域では星が見えるはずがなく、一方、この領域が全天で星間ガス雲の最も希薄なことから考えると、これが星間塵雲の赤外線放射の揺らぎではないことも明らかである。このようなことから写っている天体の大部分は銀河であると結論され、しかもその暗さからいつて宇宙の最深度に存在する銀河群であると考えて良い。



観測された銀河の数密度は従来、IRAS等によって観測された明るい赤外線銀河の密度から推定される値に比べて10倍近く大きい。このことは宇宙初期においてこれらの銀河の内部では非常に活発な星形成が行われた時代があったことを物語っている。

このような観測は、ISOの観測能力をぎりぎりまで利用するといった観測であったので、観測時間をどこまで押せるかに不安があった。我々の結果を見て自信をつけたヨーロッパのグループは、観測の後半になって、大々的なサーベイを実行したと聞いている。その結果がどうなったのか大変興味あるところである。いずれにしても、ISOの観測によっていよいよ宇宙の始まりに光が当たるようになってきた。今後の発展が楽しみである。

終わりに、

以上は、ISOで得られた代表的な観測成果の概要を紹介したものである。およそ2年半にわたる観測期間中の観測は、ほとんど有りとあらゆる種類の天体に及び、さまざまな手法で膨大なデータが取得された。未だ、観測データはほんの一部しか解析が出来ておらず、ここに紹介したものはそのまた一部に過ぎない。それにもかかわらず、それらはいずれも新鮮な驚きを与えるものばかりであり、ISOによって赤外線天文学の新しい領域が次々と開かれていることがわかって頂けると思う。特に、ISOで取り入れられた2次元アレイカメラによる撮像観測と、なによりも、分光観測の本格的な導入は観測内容の質的飛躍をもたらしたのが印象的である。それによって、天体現象の物理的、化学的情報が直接的に得られるようになり、現象の本質的解明が可能になった意義は極めて大きい。その意味でISOは赤外線天文学に新しい展開をもたらした歴史的ミッションであった。観測されたデータは多岐にわたっているが、観測者による一通りの解析が行われた後一定期間において全世界の研究者に開放されることになっており、今後は広く世界中の天文学者の利用に供される。IRASの例がそうで

あったように、これらのデータは今後5年、10年と世界中の研究者によって利用されあらゆる天文学の基礎データとして利用されて21世紀の天文学の新しいページを開くことに大いに貢献することであろう。

尚、ISO計画への参加にあたっては、我国における研究計画の全体の取りまとめや、ISO研究者会議への出席その他で辻隆氏に、日本側の研究者組織の取りまとめには田辺俊彦氏に大変お世話になった。また、現地受信局(スペイン、VILSPA)での、観測並びにデータ受信支援と日本側研究者とのさまざまな相談、助言役として、川良公明、佐藤康則両氏には約3年間にわたって現地に赴任し、献身的な支援をしていただいた。また、この計画への日本の参加にとって、文部省、宇宙研の関係者の理解と努力に負うところが大きかった。

参考文献

- 1) 田辺俊彦, 赤外スペース天文台, 天文月報 第86巻, 第2号, 1993
- 2) 谷口義明, 天文月報, 第91巻, 第9号, 1998
- 3) First ISO Results, Special issue of Astronomy and Astrophysics, vol.315, No. 2, 1996
- 4) Submillimetre and Far-Infrared Space Instrumentation, ESA SP-388, 1996
- 5) IRTS Symposium, ASP.CONF.SER. No. 124, 1996
- 6) First Workshop on Analytical Spectroscopy, ESA SP-419, 1997

New Infrared Astronomy Opened by ISO

Haruyuki OKUDA

Institute of Space and Astronautical Science, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa, 229-8510, Japan

Abstract: ISO(Infrared Space Observatory), launched by ESA in November 1995, has ended its mission in April 1998, by exhaustion of liquid helium to cool the telescope, after successful operation for 28 months. It has produced tremendous data of variety of celestial bodies covering from solar system to cosmological objects. With unprecedented sensitivities and particularly spectroscopic capabilities, it has opened new realms of infrared sky. Typical products so far analysed are briefly reviewed.