未同定赤外バンドと物理量

左近 樹1

1. 赤外線観測と宇宙塵

宇宙空間には、分子ガスや原子ガスなどの気体と一 緒に、1ミクロンより小さな固体微粒子が漂っている. これらは、星間塵あるいは星間ダスト呼ばれ、その中 にはケイ素を含む鉱物や、有機物の元になるような炭 素系の大きな分子が含まれている. こうしたダストは, 水素や一酸化炭素などの分子が集まってできた密度の 濃い分子雲中に取り込まれていき,ひとたび分子雲中 に星が誕生し星からの紫外線や可視光が供給されるよ うになると、受け取ったエネルギーを熱放射や分子の 格子振動によって解放する. このダストからの放射の エネルギーは、ちょうど赤外線の波長域に対応するた め,赤外線の分光観測を行うことにより,ある天体固 有の物理環境下で、どのような組成や分子構造をもつ ダストがどういった状態で存在しているかを探ること ができる. そのためには,実験室においてさまざまな 物理環境下でのダストの光学特性や化学的な性質を探 る試みと実際の天体物理環境下でのダストの性質を観 測的に明らかにする試みとのコラボレーションが必要 となる.

1.1 未同定赤外バンド

本研究で着目するダストは、多環式芳香族炭化水素 (polycyclic aromatic hydrocarbon; PAH) を含む炭素 系の大きな分子である. PAHは、紫外線光子を吸収 し励起され、そのエネルギーを炭素-炭素や炭素-水素 の伸縮振動、屈伸振動などの格子振動モードに対応す

1. 東京大学理学系研究科天文学専攻



 図1: (a)ISO Short Wavelength Spectrometer(SWS)によって 取得された一連の未同定赤外バンドのスペクトルの例 (HD44179). (b)各バンドに対応する格子振動モードの模式
図. 丸数字は(a)の図中の各バンドの識別番号に対応している. るプロセスを通して解放し,主に中間赤外域にバンド 放射として寄与すると考えられている.それぞれの 格子振動のエネルギーと波長との対応から,PAHは, HII領域,反射星雲などの若い星の周辺や惑星状星雲 などの進化した星の周囲をはじめ[1],遠くの銀河に いたるまで宇宙空間の様々な天体において幅広く普 遍的に観測される未同定赤外 (unidentified infrared; UIR)バンドの有力なキャリアの一つとして考えられ ている.1973年に11.2ミクロンバンドが宇宙空間に初 めて見つかって[2]以降,UIRバンドは様々な天体の 中間赤外スペクトルにおいて,主に3.3,6.2,7.7,8.6, 11.2,及び12.7ミクロンに一連のバンドとして見られ ることが明らかになった (図1a参照).

1988年にフランスの気球観測AROMEによってUIR バンドのうちの3.3, 6.2ミクロンバンドが我々の銀 河拡散光中にも初めて見つかり[3]、ヨーロッパの赤 外線宇宙天文台 (Infrared Space Observatory; ISO) 及び日本の赤外線宇宙望遠鏡 (Infrared Telescope in Space; IRTS) の登場によって、3-12ミクロンのUIRバ ンドのスペクトルの全貌が明らかになった[4:5]. これ により、PAHを含む炭素系ダストが銀河中に拡散し ている星間物質の進化や一生を理解する上で重要なメ ンバーであることが明らかになった. その後, IRTS, ISO, 米国の Spitzer 宇宙望遠鏡 (SST), 及び地上の大 型望遠鏡によって取得されるスペクトルの詳細な研究 によって,バンド強度比,中心波長位置,バンド形状 が、例えば若い星周辺と進化した星周辺との間で[6]、 あるいは、我々の銀河面において銀河中心からの距離 に従って[7],また楕円銀河などの固有な物理環境を 反映して[8]系統的に変化することが報告されるよう になった

一方,実験室や理論計算をもとに,図1に示すよう にバンドの同定が進み[9],同時に電離度や,分子形状, 大きさの違いが,統計的にバンド強度比を大きく変化 させることが明らかになってきた[10].しかしながら, 実験室環境で扱うPAHと実際の宇宙空間中のUIRバ ンドの担い手の間には,分子サイズや形態において ギャップがあり、実験室系で見られる物理量とPAH の赤外スペクトル変化の関係が、実際の宇宙空間に存 在するUIRバンドキャリアに対して成り立つかはいま だ明らかではない.従って、実際の宇宙環境において、 比較的物理量を決めやすい対象を選んで、それを宇宙 の大規模な実験場として用いて、物理量とUIRバンド の変化を定量的に評価してやることが重要になる.こ うした取り組みが進めば、宇宙空間におけるキャリア の普遍性ゆえに、身近な系内の星、惑星系形成環境か ら遠方の銀河の星団形成環境に至るまで、様々な天体 環境におけるダストの物理環境や化学進化の様子を探 るための重要な指標として、UIRバンドを幅広く応用 することが可能になる.

1.2 若い星周辺の物理環境

以上の試みの一貫として, 我々は, 星雲をまとった Herbig Ae/Be型星周辺におけるUIRバンドの変化を 調べる取り組みを始めている. Herbig Ae/Be型星は, 中心星の質量がおよそ2-8M 程度の前主系列星であ り、水素ガスの電離領域は中心星から数AUに限られ ており, 星雲を含めてほとんどの場所において主な電 子の供給源は炭素となる.この結果,新しく生まれた 星の周囲の環境に典型的な炭素と水素の量の比 C/H = 2×10⁴[11]を考慮すると, Herbig Ae/Be型星周辺は, HII領域などと比べてはるかに電子密度の少ない環境 にあることが分かる. こうした環境では、PAHの周 辺に電子が少ないため、星からの光子を受けて陽性に 電離したPAHへの電子の再結合のプロセスはあまり 進まず、中心星に程近い星雲中では、平衡状態として 陽性に電離するPAHが支配的となることが容易に考 えられる. したがって, こうしたHerbig Ae/Be型星 周辺でのUIRバンドの変化の観測は、輻射場強度、電 子密度といった物理量とPAHの電離に関わるスペク トル変化を定量的に評価する上で、とても理想的な手 段となる.最新の実験室におけるデータからは、11.2 ミクロンバンドの短波長側の裾に見られる,小さな 11.0ミクロンバンドが、電離したPAHのベンゼン環

に一組だけ炭素-水素結合を持つ場合(図1b参照) の炭素-水素面外屈伸振動モードに対応する事が報告 され[12],同じ振動モードで電気的に中性なPAHによ って担われる11.2ミクロンとの比が、PAHの電離に関 わる重要な指標となることが示唆されている.今回は、 11.0ミクロン及び11.2ミクロンバンドに注目し、実際 の観測で得られるUIRバンドスペクトルにおいて、輻 射場強度及び電子密度と11.0ミクロン強度との定量的 な評価の結果について紹介する.

2. 観測概要とスペクトル

我々は、2005年7月にハワイ島マウナケア山頂の すばる望遠鏡の中間赤外観測装置COMICS (Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer)[13]を用い て、Herbig Ae/Be天体MWC1080について、中間赤 外において地上から観測可能な帯域の一つである10ミ クロン帯の低分散分光観測(波長分散 $\lambda/\Delta \lambda \simeq 250$) を行った、MWC1080は、1kpcの距離にあり、スペク トルタイプがB0型の中心星の周りに、拡散した星雲 が付随している[14]という環境にある。我々は、星雲



図2:分光スリット位置.背景はすばる望遠鏡COMICSの 11.7ミクロンフィルターによるMWC1080の撮像画 像.スリット上の目盛りは,中心星の位置を原点と して,1秒角おきに示す.

中のUIR放射が中心星からの距離に従ってどのように 変化するかを調べるために、中心星を通り星雲を貫く ようにスリットをあて (図2参照), 総積分時間1800秒 のスペクトルデータを取得したスリットに沿って得ら れた星雲中のスペクトルには、顕著なUIRバンドが見 られ、中心星からの距離∆dに従って11.0ミクロン及 び11.2ミクロンバンドのスペクトルがどのように変化 するかを調べた (図3参照). 図3中のスペクトルは11.2 ミクロンバンド強度で規格化してあり、中心星付近に おいて、11.2ミクロンバンドの短波長側の裾野に位置 する11.0ミクロンバンドの強度が相対的に増している 様子が読み取れる、図4aには、中心星からの距離 Δd に対する相対バンド強度比 *I*11.0µm/*I*11.2µmの変化の様子 を示す. 中心星付近 ($\Delta d \simeq 0$) において, $I_{11.0\,\mu m}/I_{11.2\,\mu m}$ □ 0.3 にまで増加することが観測的に明らかになり、 11.0ミクロンバンドが陽性に電離したPAHによって 担われる事を考慮すれば、中心星付近においてPAH の陽性への電離が進んでいることが示唆される.

3. PAHの電離と物理量

ここではPAHの電離に関わる物理環境について、 簡単なジオメトリを仮定し, 定量的な評価を行う. ま ず、PAHの分子は星からやってくる輻射場中の紫外 光子や可視光子を吸収するが、これらの入射光子エネ ルギーの積分値すなわち輻射場強度Uの大きい場所で は、PAH分子に入射する電離光子の数が増えるため、 効率よく電子が剥ぎ取られ陽性への電離が進む. 一 方,電子密度n,の高い領域では陽性に電離したPAH に対して電子の再結合が起こりやすく、陽性への電離 は抑制される.従って、PAHの電離状態は、この両 者プロセスの平衡状態によって決まると考えられ、す なわち U/n_{e} との相関が示唆される[16]. そこで、今回 スリット上の各点で得られたUIR相対バンド強度比 $I_{11.0 \mu m}/I_{11.2 \mu m}$ とその場所における U/n_e との関係を調べ た. ここでは, MWC1080の距離 d=1000pcとし, 拡 散的な星雲中に中心星があり星雲を照らしている状況



図3: 観測されたスペクトルから、光球成分やダストの熱放射などを含む連続成分を差し引いた上で、11.2ミクロンバンド強度で規格化した、11.0ミクロン及び11.2ミクロンバンドスペクトル、ここで連続成分は10.9ミクロン付近と11.65ミクロン付近の極小値を結ぶ直線で定義[15].スペクトルは2ピクセルずつの平均で、中央のスペクトルが中心星近傍でのスペクトルで、中心星からの距離に従って見易さのために垂直軸方向に1ずつずらして表示している。

を想定する.この時,中心星からの距離rの場所における輻射場強度U(r)は,太陽近傍における輻射場強度 を単位として記述すると,

$$U(r) = \frac{\int_{912\text{\AA}}^{1\mu m} \pi B_{\lambda}(T_{*}) \left(\frac{R_{*}}{r}\right)^{2} d\lambda}{\int_{912\text{\AA}}^{1\mu m} 4\pi J_{\lambda}^{\odot} d\lambda}$$
(1)

と表わされる[17]. ここで、T_{*}は中心星の有効温度



/11.0μm//11.2μm. 11.0ミクロンバンドの強度は10.9ミク ロンから11.1ミクロンの区間に含まれるエネルギー の積分値, 11.2ミクロンバンドの強度は11.1ミクロン から11.5ミクロンの区間に含まれるエネルギーの積 分値として定義してある. (b)中心星からの距離Δdに 対する11.2ミクロンバンドのバンド幅(1/cm).

で $T_* = 10^{431}$ K[18], R_* は中心星の有効半径で $R_* = 3.2$ × 10^9 mを採用, また J_{λ}^{G} は太陽近傍における輻射場 [19]である.電子密度 n_e は観測領域付近で一定値 $n_e =$ 100_{50}^{500} (個/cm³)をとる[20]と仮定して,スリット上の 各点に対する $U(r)/n_e$ を求め,UIR相対バンド強度比 $I_{11.0\mu m}/I_{11.2\mu m}$ との関係を調べたものが図5である.ここ では, $U(r)/n_e$ の増加に伴う顕著なUIR相対バンド強 度比 $I_{11.0\mu m}/I_{11.2\mu m}$ の増加が見られ,UIR相対バンド強 度比 $I_{11.0\mu m}/I_{11.2\mu m}$ と $U(r)/n_e$ との定量的な関係の一例を 得ることに成功した.スリットの南東部分について示 した図5b中の $U(r)/n_e = 10000$ 付近に見られるへこみの 場所は $\Delta d = 1^{-2^{m}}$ の位置に対応し、この場所には速度



図5 : U(r)/n_eに対するUIR相対バンド強度比I_{11.0µm}//I_{11.2µm}の プロット. (a)スリットの北西部分. (b)スリットの南 東部分.

差 Δv =400km/s の双極流出ガスがあり,実際,図4b に示す11.2ミクロンバンドのバンド幅に,速度幅に対応する $\Delta \lambda$ =0.01-0.02 μ m程度の増加が見られている. 流出ガス中の電子密度は,今回仮定した一定値 n_e = 100(個/cm³)より高く[20],その結果, Δd =1"-2"の位置において実際の $U(r)/n_e$ は局所的に見積もりより低いと考えられる.つまり,流出ガスとの相互作用が考えられる場所では電子密度が高いために,PAHの電離が抑制されていることを示唆する結果であるといえる.

4. 本研究の意義と展望

本研究ではMWC1080周辺におけるPAHの電離環境 に着目し、観測的に11.0ミクロンと11.2ミクロンの相 対バンド強度比 *I*_{11.0µm}/*I*_{11.2µm}と,輻射場強度と電子密 度の比*U*/*n*_eとの間に定量的な関係を得ることに成功

した. かつてより、PAHの電離環境によって、6-9ミ クロン帯のUIRバンドと11-13ミクロン帯のUIRバン ドの強度比が電離度の増加と共に増大することが実験 及び理論計算から報告され、実際に反射星雲中で7.7 ミクロンと11.2ミクロンの相対バンド強度比 J174m/ I11.24mが熱源となる星に近い場所で増加する様子が観 測的にも報告されている[21]. しかしながら、6-9ミ クロン帯のUIRバンドは炭素-炭素間の振動, 11-13ミ クロン帯のUIRバンドは炭素-水素間の振動というよ うに別々の振動モードによって担われるため、分子 のサイズや構造,水素化の度合いなど他の様々な要素 によって複雑に影響されてしまい、電離度に関わる物 理量との定量的な関係を評価するのは難しい. この 点,今回着目した11.0及び11.2ミクロンバンドは,共 に、水素が1つだけ付いたベンゼン環の炭素-水素間 の面外屈伸振動モードであり、電離状態のみが異なる だけなので、定量的な評価には適している、反射星雲 NGC1333において、11.0ミクロンバンドの11.2ミクロ ンに対する相対バンド強度が中心星SVS3の近傍にお いて増加することが報告されており[22],今回得られ た結果は、彼らの研究の結果と一貫している、本研究 では、実験室データとの対応に加えて、すばる望遠鏡 の高い空間分解能を生かし、各場所において、PAH の電離に関わる物理量である輻射場強度Uと電子密度 n。を考慮することにより、得られたバンド強度の変化 がPAHの電離度変化として最も適切に解釈されるこ とを示した.

今後, MWC1080のように環境内に広いU(r)/n_eの 範囲を実現し, 星雲を付随するHerbig Ae/Be天体周 辺において同様の評価を行うことによって, 相対バ ンド強度比 I_{11.0µm}/I_{11.2µm}をPAHの電離環境すなわち U(r)/n_eの一般的な指標として使うことができるかの 吟味を行う事が必要となる. もし, この試みが進展す れば, UIRバンドの普遍性ゆえに, 星周ディスク内の 物理環境や, 星, 惑星系形成の現場から遠方銀河の星 団形成の現場に至るまで, 幅広い分野において, UIR バンドを用いた物理量の評価が可能になる. 特に, 惑

星形成の分野において,近年Herbig Ae/Be型星を初 めとする原始惑星系円盤の構造のモデル化が著しく 進みつつあり、円盤中の電子密度や温度分布を探る 上でPAHを初めとするダストを用いた評価手法が注 目されてきている. これらの観測的な研究は現在始 まったばかりで、我々のグループではUIRバンドのス ペクトルの物理環境に応じた定量的な基礎データを 構築すると同時に、それらを実際のHerbig Ae/Be型 **星の円盤の物理環境の理解に応用することで、円盤の** 幾何学構造や表面温度や電離度などの物理状態、さら には円盤進化に伴う炭素質ダストの化学進化を探る試 みを進めている.更なる地上大型望遠鏡を用いた高 空間分解観測, Spitzer宇宙望遠鏡や, 2006年2月22日 に打ち上げられた日本の赤外線天文衛星「あかり」 によるの高感度の観測が進めば、UIRバンドが、悩ま しげな "Unidentified" Infrared Bands から "Useful" Infrared Bandsとして広く利用される日もそう遠くな いであろう.

謝辞

本研究は、岡本美子氏をはじめ、尾中 敬教授、片 ざ宏一氏、金田英宏氏との共同研究によるもので、同 時にすばる望遠鏡のCOMICSグループの方々に観測 や議論においてお世話になったことを心から感謝申し 上げます.また、本研究を紹介する機会を与えてくだ さいました城野信一氏、また研究会で貴重なアドヴ ァイスを下さった科研費特定「系外惑星」ダスト班の 方々に感謝申し上げます.筆者は日本学術振興会の援 助を受けています.

参考文献

- [1] Tokunaga, A.T., 1997, ASP conf.ser. 124, 149
- [2] Gillett, F.C. et al., 1973, ApJ 198, L65
- [3] Giard, M. et al., 1988, A&A 201, L1
- [4] Mattila, K. et al., 1996, A&A 315, L535

- [5] Onaka, T. et al., 1996, PASJ 48, L59
- [6] Peeters, E. et al., 2002, A&A 390, 1089
- [7] Sakon, I. et al., 2004, ApJ 609, 203
- [8] Kaneda, H. et al., 2005, ApJ 632, L83
- [9] Allamandola, L.J. et al., 1989, ApJS 71, 773
- [10] Hony, S. et al., 2001, A&A 370, 1030
- [11] Snow, T.P. and Witt, A.N., 1995, Science 270, 1455
- [12] Hudgins, D.M. and Allamandola. L.J., 1999, ApJ 516, L41
- [13] Kataza, H. et al., 2002, aprm. conf. 17
- [14] Eisner, J.A. et al., 2004, ApJ 613, 1049
- [15] Witteborn, F.C. et al., 1989, ApJ 341, 270
- [16] Bakes, E.L.O. et al., 2001, ApJ 556, 501
- [17] Li, A. and Lunine, J.I., 2003, ApJ 594, 987
- [18] Millan-Gabet, R. et al., 2001, ApJ 546, 358
- [19] Mezger, P.G. et al., 1982, A&A 105, 372
- [20] Poetzel, R. et al., 1992, A&A 262, 229
- [21] Bregman, J. et al., 2005, ApJ 621, 831
- [22] Sloan, G.C. et al., 1999, ApJ 513, L65