

論文の内容の要旨

論文題目:

Infrared Observation of PAH Emission in Galactic Planetary Nebulae

(系内惑星状星雲における PAH 放射の観測的研究)

氏名: 大澤 亮

宇宙空間には Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (以下 PAH) と呼ばれる有機物が存在していると考えられている。PAH とは炭素による 6 員環が結合してできた骨格の周囲に水素原子が結合した物質の総称である。PAH の典型的な大きさは数 10\AA 程度で、PAH は星間空間に存在する微粒子 (星間ダスト) の中でも特に小さな部類に属する。PAH は紫外線を吸収することによって分子の振動モードを励起する (Leger & Puget, 1984)。この振動モードが脱励起されるときに、PAH は赤外線領域に強いバンド放射を放つ。これは Unidentified Infrared (UIR) バンド放射や PAH feature と呼ばれる。ここでは以後 PAH feature と呼ぶ。特に強い PAH feature は 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, および $11.3\ \mu\text{m}$ に存在する。それぞれの放射は固有の振動モードに帰属する。PAH feature は星形成を活発に行なっている銀河や反射星雲といった星間空間、あるいは post-asymptotic giant branch (post-AGB) 星や惑星状星雲 (planetary nebula, 以下 PN) といった星周環境のどちらにおいても観測されている (e.g., Acke & van den Ancker, 2004; Peeters et al., 2002b)。このように PAH feature は多様な天体から観測されるため、PAH は宇宙空間に普遍的に存在しており、極めて一般的な星間ダストの一種であると考えられている。

PAH がどこで作られているのかを特定することは、PAH がどのような環境で形成されるのかを探るために重要である。PAH は AGB 星が放出した物質の中で作られたのち、星間空間に広がっていくと信じられている (Buss et al., 1991)。しかしながら、AGB 星では星表面の温度が低すぎるため PAH の励起に必要な紫外光を十分に放出できない。そのため、AGB 星の周囲では PAH feature はほとんど検出されていない (Boersma et al., 2006)。PAH は本当に AGB 星の周囲で形成されているのかを観測的に確かめる必要がある。

これまでの観測的研究によって PAH feature のスペクトル形状には天体によってばらつきがあることが知られている。特に $6\text{--}9\ \mu\text{m}$ に見られる PAH feature は顕著なスペクトル形状の変化を示す。このスペクトル形状の変化は、主に feature のピーク位置によって、3 つのクラスに分類されている (Class A, B, and C; Peeters et al., 2002a)。様々なアプローチからスペクトル形状の変化について研究がなされてきたが、スペクトル形状の変化を引き起こす要因については未だ特定されていない (e.g., Bauschlicher et al., 2008; Hudgins et al., 2005)。一方で、星周環境 (post-AGB, PN) で観測される PAH feature と星間空間 (銀河, 反射星雲) で観測される PAH feature は一般的に異なるクラスに属することが報告されている。星周環境では Class B の PAH feature がよく観測される一方、星間空間では Class A の PAH feature が一般に観測される。この事実から、PAH が星周環境から星間空間へと移動していく過程を調べることで PAH feature のスペクトル形状の変化の原因を調べることができると期待される。

PN は中小質量星の進化における最終段階である。PN は豊富な星周物質によって覆われている。この星周物質は PN に至る前の AGB 星時代に放出された物質の名残である。PN の中心星は

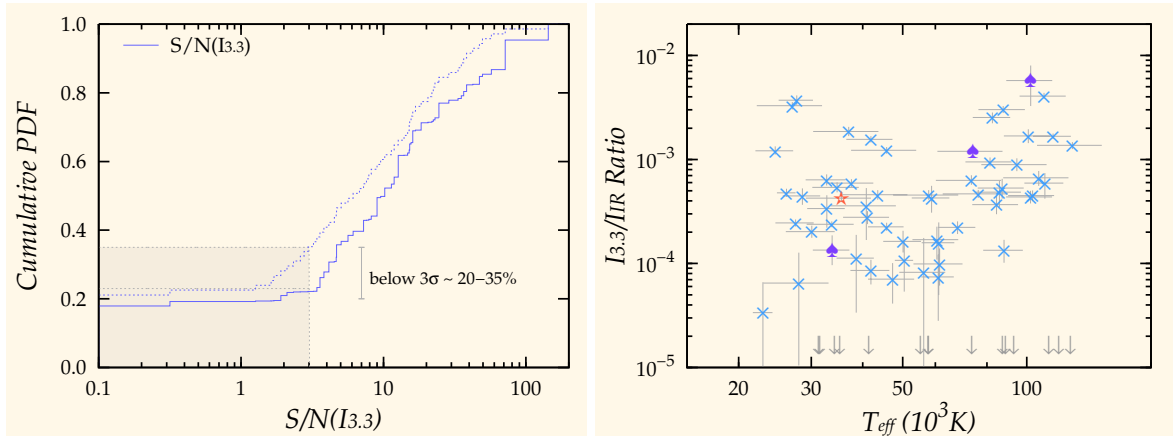


Figure 1 左: 3.3 μm PAH feature 強度の signal-to-noise 比の累積度数分布. $S/N=3$ を検出の閾値とすると PAH feature の未検出率は 20–35% になる. 右: 3.3 μm PAH feature 強度と総赤外放射強度の比を PN の有効温度に対してプロットしたもの. $T_{\text{eff}} \simeq 50\,000\text{ K}$ 付近に最小値を持つ “U” 字型の分布をしている.

高温であり大量の紫外光を放出している. そのため PN では PAH feature が頻繁に観測されている. PN の星周物質は星間空間へと放出される直前の状態にある. PN は星周環境で見られる PAH feature と星間空間で見られる PAH feature の違いを研究するために適した天体である.

これまで PN における PAH feature は観測的, および理論的に研究されてきた. しかし, 観測において十分な感度が達成されていなかったため, 先行研究では統計的な議論をおこなうために十分な数の天体を観測できていない (e.g., Smith & McLean, 2008). このことは特に 3 μm 付近の観測において顕著である. 近年では *Spitzer Space Telescope* (以下 *Spitzer*; Werner et al., 2004) によって中間赤外域では高感度での観測がなされてきた. しかし, 依然として 2–5 μm の波長帯では改善していない. PAH feature の観測から PAH の性質に迫るためには近赤外 (2–5 μm) および中間赤外 (5–15 μm) に存在する PAH feature すべてを観測することが重要である. 近赤外線のスペクトルを高感度で取得することが求められている.

本論文では, まず系内惑星状星雲 2.5–5.0 μm 分光カタログ (以下 PNSPC カタログ) を紹介する (Chapter 3). PNSPC カタログは赤外線天文衛星「あかり」による観測に基づいている (Murakami et al., 2007). 「あかり」に搭載された近赤外線カメラ Infrared Camera (以下 AKARI/IRC; Onaka et al., 2007) は 2.5–5.0 μm において $\sim 10\text{ mJy}$ の感度でスペクトルを取得することができる. AKARI/IRC の高い感度のおかげで, 銀河系内の 70 を超える惑星状星雲の近赤外スペクトルが PNSPC カタログに含まれている. スリットを用いない分光モードで観測したため, PNSPC カタログのスペクトルは従来の観測に比べて絶対的な強度に高い信頼性がある. そのため他波長で得られたデータとの比較にも使用できる. また, PNSPC カタログはターゲットの選定において星周ダストによる放射が顕著な中間赤外線のデータを利用していない. そのため, 星周ダストの性質という点において, PNSPC カタログはバイアスの少ないサンプルであると考えられる. 以上の理由から PNSPC カタログを用いることで, PN における PAH の特性や PAH feature の進化を詳細に調べることができると期待される.

Chapter 4 では PNSPC カタログのサンプルに基づいて 3 μm の波長帯に見られる PAH feature の性質について議論する. 6–9 μm および 11–12 μm に存在する PAH feature は強い plateau 放射や hydrogenated amorphous carbon による放射と混在している. 一方で, 3.3 μm に存在する PAH feature は他の放射による影響が少ないため, PN における PAH の検出率を測定するのに適している. 本研究によって初めて銀河系内の PN での PAH 検出率は 65–80% であると推定された (Figure 1, 左). また, 中心星の有効温度 (T_{eff}) を PN の進化の指標として用いることで PAH feature の進化を調べた. 3.4 μm と 3.3 μm に存在する PAH feature の強度比 ($I_{3.4}/I_{3.3}$) は PAH 内部の aliphatic な構造の量を表していると考えられる. 本研究によって $I_{3.4}/I_{3.3}$ 比は進化した PN ほど高いことが明らかになった. 進化した PN では, PAH はより aliphatic な構造を多く持つことが示唆される. 3.3 μm PAH feature の強度と総赤外放射強度の比 ($I_{3.3}/I_{\text{IR}}$) は PN 内部の PAH の相対的な量を示していると考えられる. Figure 1 (右) に $I_{3.3}/I_{\text{IR}}$ の進化を示した. PN における PAH の存在量は $T_{\text{eff}} = 50\,000\text{ K}$ を中心とした “U” 字型の変化を示すことがわかった.

Table 1 PNにおけるPAH featureの進化

観測量	物理的意味	変化
$I_{7.7}/I_{11.3}$	PAH 電離度	減少
$I_{3.3}/I_{11.3}$	サイズの小さな PAH の相対量	減少
$I_{3.4}/I_{3.3}$	PAH における aliphatic 構造の量	増加
$I_{\text{PAH}}/I_{\text{IR}}$	PN における PAH 存在量	“U” 字

Chapter 5 では *Spitzer* によって取得された中間赤外線のスเปクトルとあわせて, PAH の性質をより詳しく調べる. $7.7 \mu\text{m}$ と $11.3 \mu\text{m}$ に現れる PAH feature の強度比 ($I_{7.7}/I_{11.3}$) を調べることによって PN の PAH は他の天体に比べて電離度が低いことが確認された. また, $3.3 \mu\text{m}$ と $11.3 \mu\text{m}$ に現れる PAH feature の強度比からはサイズの小さな PAH ($N_C \lesssim 50$, N_C は PAH の炭素数) は完全に水素原子が剥ぎ取られていることもわかった. 以上の結果はこれまでに観測的, 理論的研究で報告されてきた結果と整合する. 中心星の有効温度と PAH feature の強度比を比較することによって, PN の PAH はサイズが大きくなる方向に進化しており, スペクトル形状は Class B PAH から Class A PAH に向かって変化していることが明らかになった. Figure 2 (左) には $3.3 \mu\text{m}$ と $11.3 \mu\text{m}$ に存在する PAH feature の強度比 ($I_{3.3}/I_{11.3}$) が中心星の有効温度に対してプロットされている. この比はサイズの小さな PAH が多いほど大きな値を示す. $I_{3.3}/I_{11.3}$ 比は有効温度が高くなるほど減少しており, 進化に沿ってサイズの小さな PAH の量が相対的に減っていることを示唆している. Figure 2 (右) は $6.2 \mu\text{m}$ に存在する PAH feature のピーク位置の進化を表している. Class A PAH は $\sim 6.22 \mu\text{m}$ にピークを持つ. 一方, Class B PAH は典型的に $6.24\text{--}6.28 \mu\text{m}$ にピークを持つ. ピーク位置は PN の進化に沿って短波長側に移動しており, 進化した PN では Class A PAH feature が観測されることを示唆している.

本研究によって明らかになった PN における PAH feature の進化を Table 1 にまとめた. PAH は紫外光による光解離や荷電粒子によるスパッタリングによって変性を受けることが知られている. しかし, こうした PAH の変性では観測された PAH feature の進化を包括的に説明することはできない. そこで, 私は PAH feature の進化は PN の中心星の進化, および星雲の力学的進化と密接に結びついていると考え, 以下に示すような仮説を提唱する. Figure 3 は PN の構造と PAH feature の進化を駆動する機構を示した模式図である. PN は中心星に近い側から順に (1) PN の恒星風, (2) reverse shock によって加熱された領域, (3) forward shock によって星周物質が掃き集められたシェル, (4) forward shock 到達前の AGB wind 領域といった構造をで近似される. 領域 1,2 はほぼ電離された高温のガスで満たされている. 領域 3 は高密度のシェルで photo-dissociation 領域とみなすことができる. PAH は AGB 星時代にすでに形成されていたならば, PAH は領域 3,4 の両方に存在している. しかし, 領域 4 には紫外光が届かないため PAH は励起されない. よって PAH feature は領域 3 に存在する PAH の性質だけを反映していると考えられる. PN の進化に

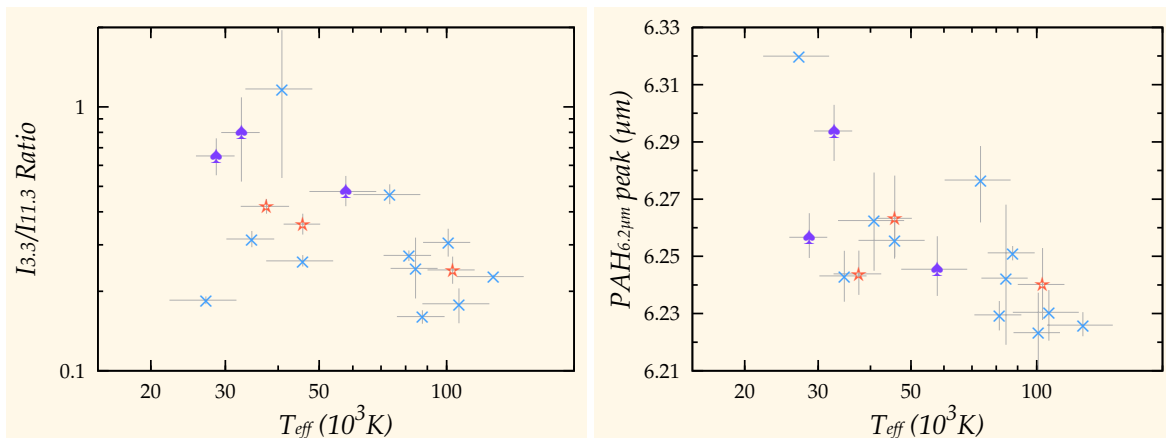


Figure 2 左: $3.3 \mu\text{m}$ と $11.3 \mu\text{m}$ に存在する PAH feature の強度比の進化. 小さいサイズの PAH が多いほどこの比は大きくなる. 右: $6.2 \mu\text{m}$ に存在する PAH feature のピーク位置の進化. Class A PAH は $\sim 6.22 \mu\text{m}$ に, Class B PAH はより長波長側にピークを持つ.

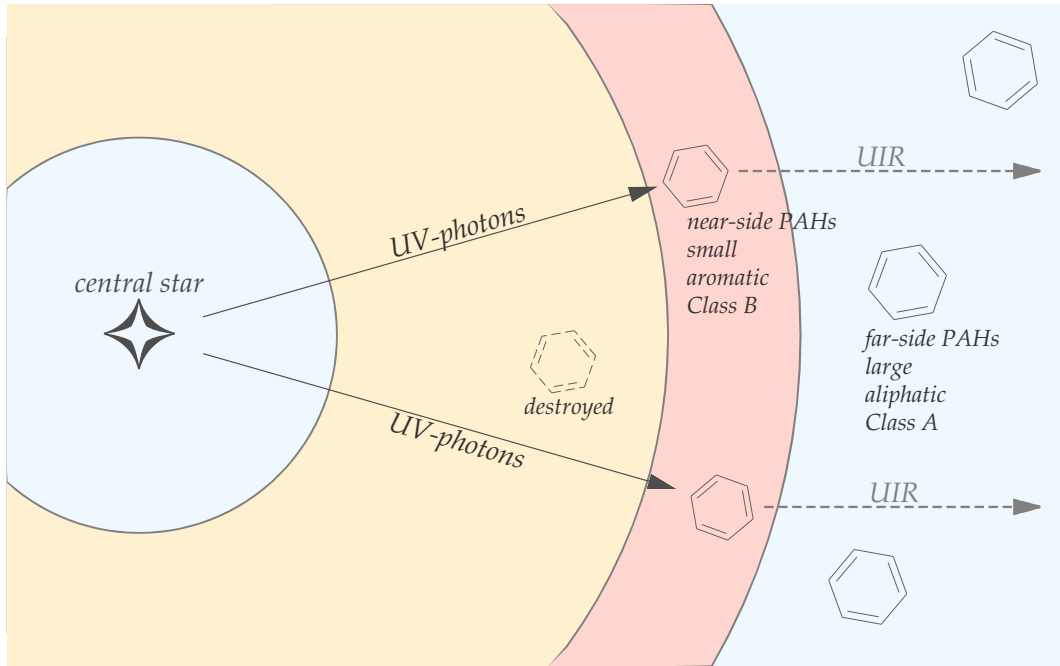


Figure 3 PAH feature の進化を駆動するメカニズムの模式図

伴って領域 3 のシェルは膨張し、領域 4 に存在する物質を取り込んでいく。AGB 星進化の初期に形成された PAH ほど中心星から遠くに位置していると考えられる。PAH の性質が形成された時期によって異なっていると仮定すると、シェルの膨張に伴って領域 3 に存在する PAH の性質が段階的に変化していくことが期待される。進化の初期に形成された PAH を *far-side PAH*、後期に形成された PAH を *near-side PAH* と定義する。*far-side PAH* は Class A feature をもち、典型的にサイズが大きく、多量の aliphatic な構造を含む一方で、*near-side PAH* は Class B feature を持ち、サイズが小さくほぼ aromatic な構造のみからなると仮定すれば、シェルの膨張に伴って観測された PAH feature の進化が再現される。

本研究によって PN の PAH feature はシェルの内部にある PAH の性質だけを反映しており、シェルの膨張が PAH feature の進化と密接に関わっていることが示された。晩期型星周囲での PAH feature の進化を探るためには、PAH の変性だけではなく、星雲の力学的進化も考慮に入れることが重要である。本研究で提案した仮説は PAH が AGB 星期に形成されたことを強く支持している。PAH の性質の違いには形成時の物理状態が密接に関わっていることが示唆される。AGB 星周囲でのダスト形成環境を進化に沿って詳細に調べることが PAH の性質を解明するために重要である。本研究では PN を空間分解せず点源として扱った。しかし、実際には PN は複雑な構造を持った天体であることが知られている。本研究で提唱した仮説を空間分解能の高い観測によって検証することが今後の課題である。

References

- Acke, B., & van den Ancker, M. E. 2004, *A&A*, 426, 151
 Bauschlicher, C. W., Peeters, E., & Allamandola, L. J. 2008, *ApJ*, 678, 316
 Boersma, C., Hony, S., & Tielens, A. G. G. M. 2006, *A&A*, 447, 213
 Buss, R. H., Tielens, A. G. G. M., & Snow, T. P. 1991, *ApJ*, 372, 281
 Hudgins, D. M., Bauschlicher, C. W., & Allamandola, L. J. 2005, *ApJ*, 632, 316
 Leger, A., & Puget, J. L. 1984, *A&A*, 137, L5
 Murakami, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, 369
 Onaka, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, 401
 Peeters, E., Hony, S., van Kerckhoven, C., Tielens, A. G. G. M., Allamandola, L. J., Hudgins, D. M., & Bauschlicher, C. W. 2002a, *A&A*, 390, 1089
 Peeters, E., et al. 2002b, *A&A*, 381, 571
 Smith, E. C. D., & McLean, I. S. 2008, *ApJ*, 676, 408
 Werner, M. W., et al. 2004, *ApJS*, 154, 1