



惑星状星雲研究この十年と今後の展望

田村 眞一

(東北大学理学研究科天文学専攻 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

e-mail : tamura@astroa.astr.tohoku.ac.jp

本稿は筆者が大学院生と共に起こった筆者自身の研究を主とする、惑星状星雲研究の概観を述べ、今後の展望を描こうとするのが目的である。惑星状星雲の生成から始まり、進化する様を観測データを中心に述べる。簡単に今後期待される研究の方向についてコメントする。

1. 序

天文月報の読者であれば惑星状星雲 (Planetary Nebulae, 以下 PN 又は PNe) という天体の存在を知らない人は皆無だと思われる。天文関係の書籍や雑誌には必ずといって良いほどに美しい写真が掲載されている。中でも最近のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって観測された PNe の映像は単に美しさに魅せられた人々だけでなく多くの研究者の注目を浴びている (図1)。

PNe が近代天体物理学誕生の源となった天体であったことは既に知られている。第二次世界大戦前後に PNe の物理素過程研究に貢献した数々の日本人天文学者の名前を忘れてはならないだろう。2-m 級の望遠鏡が PNe 観測の主流になってからは分光・撮像を基に個々の PN の物理特性が調べられ、その対象は銀河系全体にまで広がった。近頃は近傍銀河の距離尺度決定に用いられる等の役割を通して、宇宙論の分野にまで登場したりする。

PNe については既に天文月報 (1977年6月号, 1983年7月号) で解説し、又、多少専門的内容を含めて全体的まとめを試みた (「惑星状星雲」, 1981年,

地人書館)。それらは、その時点での筆者の興味に重点がおかれていたり、世界的にみれば研究動向も短い時間の間に急速に変化したため、今振り返ってみると、必ずしも公正な記述だとは言えない憾みがある。従って、本文の第一の目的は最近の研

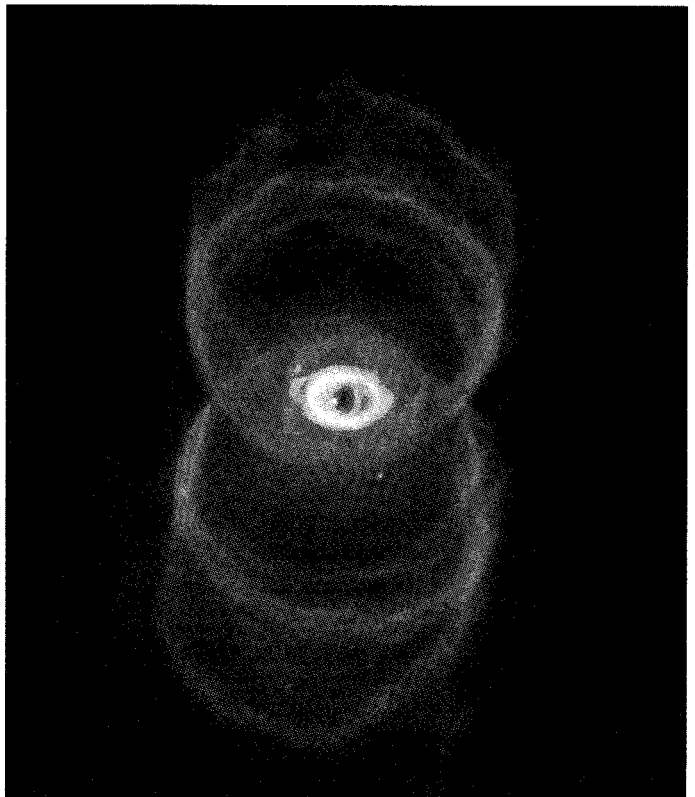


図1 砂時計星雲 (MyCn 18 = PNG 307.5-04.9)。MyCn 18 は発見者に因む命名。PNG 307.5-04.9 は Strasbourg-ESO カタログ中の登録名である。サイズは約 10"。HST Public Images による。

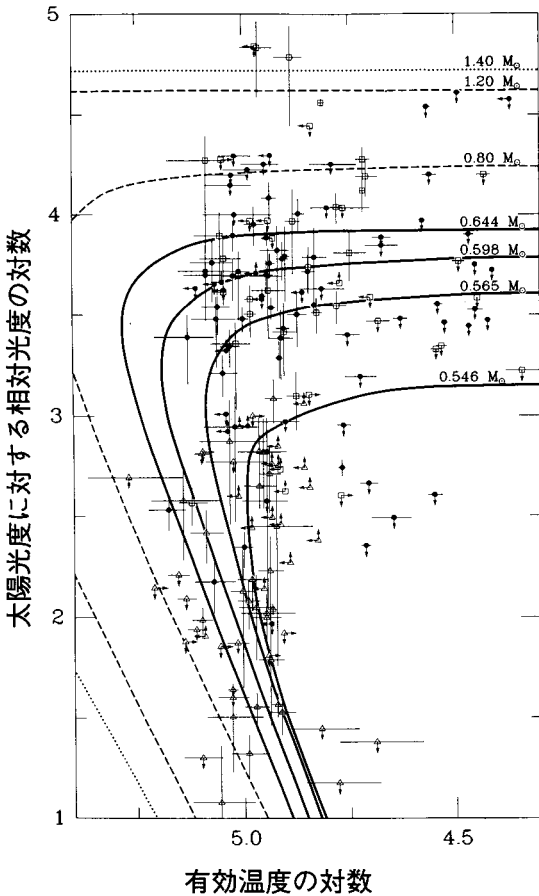


図2 惑星状星雲中心星のHR図上に占める位置。理論計算における進化経路が中心星の質量と共に実線、破線、点線で示されている。(Shaw, R. A. and Kaler, J. B. 1989, ApJS, 69, 495 による.)

究動向を、筆者を中心とするグループの研究を通して、紹介することだが、第二の目的は天文学研究の専門家であるか否かを問わず読者にPNeの面白さを伝えたいということである。

2. 惑星状星雲 (PN, PNe) の定義

さて、まず初めに惑星状星雲とはどのように定義されているかを述べよう。これは高温星（白色矮星）の周囲の膨張電離ガスのことである。琴座の環状星雲のように、みかけ状大きな広がりを持つ例の他に全く恒星のようにみえるものもあり、こ

の場合“惑星状”星雲と呼ぶにふさわしくない例がかなり多い。HR図上初期質量が小さい（通常は1～2 M_{\odot} 程度を考えるが、8 M_{\odot} ぐらいまでを対象とする）恒星が進化し、赤色巨星に達した時一部の質量を周囲に放出した結果であると理解されている。残りの星（中心星と呼ばれ0.5～1.4 M_{\odot} の質量を持つと推定される）は急速に高温になり、その輻射によってガスは電離される。図2に、HR図を示し中心星の進化の経路と実際に観測される中心星の位置を表した。現在、銀河系内で1000個以上のPNeが確認されている。近年の観測技術の向上はアンドロメダ星雲（M 31）や大小マゼラン星雲（LMC, SMC）中に多くのPNeを検出出来るようにした。そして、PNeを見出すことの出来る最も遠い銀河は Fornax Cluster（炉座銀河団, 17 Mpc）にまで達している。

3. 基本データ及びテキスト

Kohoutekの努力により、新しいPNeの登録やHII領域あるいは銀河と混同したものについて改訂が重ねられ、最初の本格的カタログが1967年に出版された。今日ではPK-Catalogと呼ばれている¹⁾。その後、ストラズブルグのAcker達の努力により銀河系内PNe 1820個がカタログ化されている。これはStrasbourg-ESO Catalog²⁾と呼ばれ、研究者にとっては必携のデータブックになっている。ストラズブルグ大学の計算機にログイン出来れば“SIMBAD”というプログラムによって直接このようなデータにアクセス出来る。

PNeについての研究を始めると電離ガスからの輝線スペクトル情報が必要となる。このような時自分自身が観測を試みるのであれば、既に得られている利用可能なデータがあると良い。これが2nd Kaler Catalog³⁾である。但し、CD-ROMは(AAS CD-ROM series, vol. VIII, 1997)に含まれるはずであったが予告通りにはなっていない。

PNeについて勉強を始めようと志すと、すぐにテキストが必要になる。詳しい説明を省き、以下に



適切と判断した、それ程古くない幾つかを列挙しておこう。

*Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei= 通称 AGN², D.E. Osterbrock, 1989, University Science Book, Mill Valley, California

*Physical Processes in the Interstellar Medium, Lyman Spitzer, Jr. 1978, John Wiley & Sons, New York= 星間物理学, 高窪啓弥訳, 1980年, 共立出版

*Planetary Nebulae, S. R. Pottasch, 1984, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht

*The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae, G. A. Gurzadyan, 1997, Springer, Berlin

*星間物理学, 小暮智一, 1994年, ごとう書房

*Proceedings of IAU Symposia, Nos. 34('67), 76('77), 103('82), 131('87), 155('92), 180('96).

4. 研究課題

PNe はそのみかけの形のため膨張電離ガスに興味集中するが、研究課題には実に様々な分野が関わっている。原子・分子の素過程をはじめとして恒星の内部構造や進化の問題であったり、拡散恒星大気中の輻射場や流体力学の問題であったり、又、ガスと星間塵の混合物と輻射との相互作用の問題であったりする。一方、PNe を観測対象とする場合、波長域は可視域にとどまらずX線、紫外線、赤外線、電波等の広い領域にわたっている。このため、実に多種多様な専門分野から PNe 研究に参入した研究者がいる。

このような事実で代表されるように、研究すべき課題は多岐にわたるが一人よがりになることを恐れず大胆にまとめると、「PNe の問題は中小質量星が漸近巨星枝段階でどのような機構の下に、その一部の質量を放出したかを解くことにある。」と聞いてよい。恒星は、基本的には水素をヘリウムに変えながら、HR 図上主系列星時の初期質量に応じて内部構造を変化させ赤色巨星への道をたどる。更に、中心部においてヘリウムが燃えつきた後、小質量星も中質量星も炭素-酸素核をつくり、こ

の燃料によって最初の赤色巨星枝に沿ってミラ型変光星の位置まで進化する。この炭素-酸素核をつくる段階を漸近巨星枝 (Asymptotic Giant Branch ; AGB) という。

Iben and Renzini⁴⁾は AGB 星が熱パルス (表面輝度の短時間内の急変動) を発生し、これが駆動力となり恒星風を通し質量が放出されることを示した。PNe の起源を説明するのに最も信頼できる理論だといえる。このような現象の現場を観測出来れば、理論の検証と共に質量放出率の推定と放出された物質の星間空間への拡散の仕方の解釈とは割合簡単に出来る。こうして、質量放出直後の AGB 星 (及び Post-AGB 星) 探査が行われるようになった。もし電離ガスが存在する兆候があれば PNe の初期の天体、初期惑星状星雲 (Proto-Planetary Nebulae, PPNe) と断定して良い。赤外線衛星、IRAS はこの目的のために有力な情報を提供した。Volk and Kwok⁵⁾は IRAS によって得られた 4-バンドの測光データから作られる二色図と近赤外線域スペクトルに基づいて候補星を選びだした。

次の問題は、現在観測されている様々な形が作られた原因と過程を解明することである。これまで、いくつかの形態分類の試みがなされたが、残念ながら分類を裏付ける理論と先導的原理に欠けているように思われる。気体力学的三次元シミュレーションが期待されている理由がここにある。そして、膨張運動の詳細な観測資料が必要である。

5. 我々の研究結果

前節に述べた主要な研究課題については多くの研究論文が出版されている。これまでに開催された PNe 関係シンポジウムの集録を参照されたい。

5-1.

第一に、Post-AGB 星あるいは Proto-Planetary Nebulae (PPNe) についての我々の研究を紹介しよう。PPNe 候補は Volk and Kwok によって赤外線域の観測的特性によって選ばれたが個々の具体的特性を調べなければならない。図3にこれら候補の一

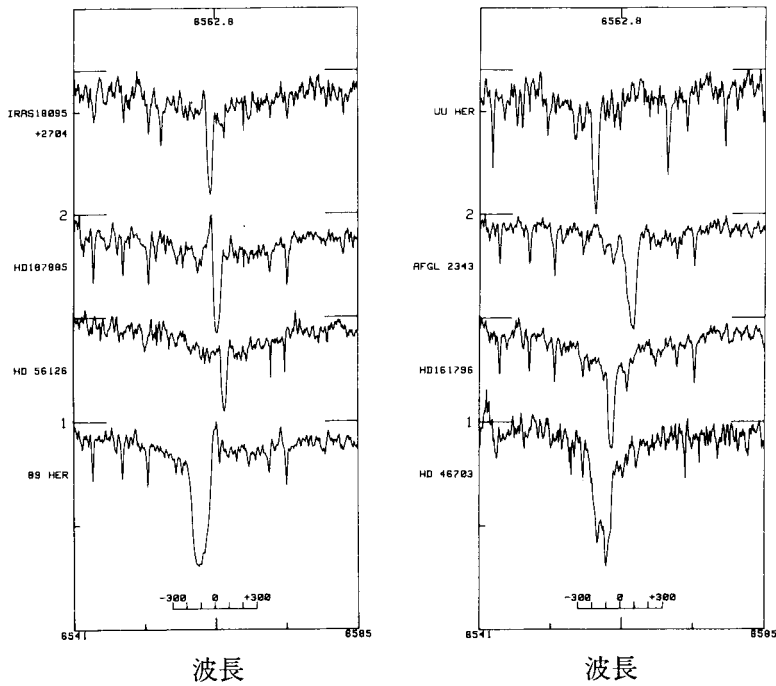


図3 初期惑星状星雲 (Proto-Planetary Nebulae) 候補のF型超巨星からの H_{α} 線域高分散スペクトル。速度のスケール (km/sec) を下端部に示してある⁶⁾。

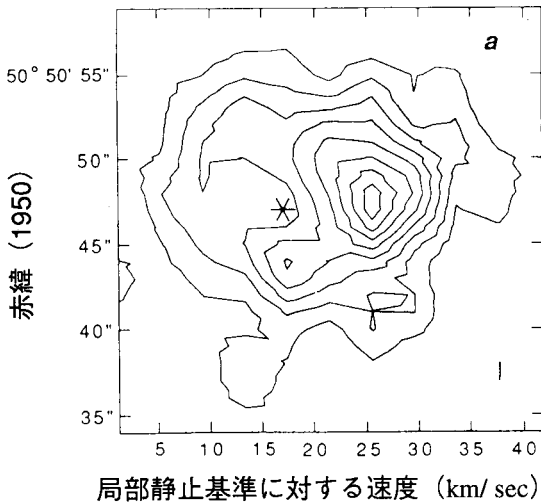


図4 IRAS 21282+5050 の電波域 CO 輝線による位置-速度。図の一部⁷⁾ (位置角 0°). * は中心星の位置。電離ガス域は未だ小さく、 $1.2''$ 以下。

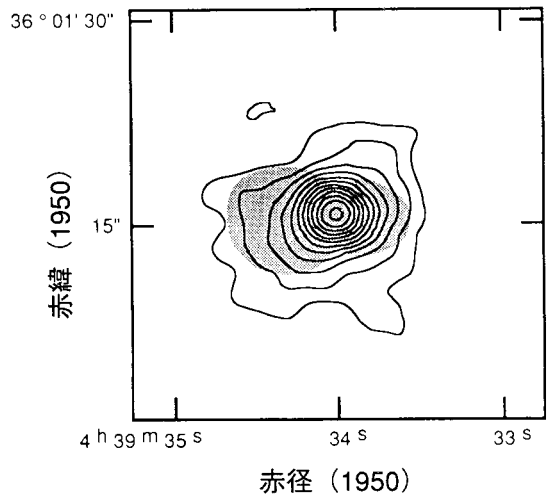


図5 CRL 618 の電波域 CO 輝線による積分強度図⁸⁾。線影部分は可視域で観測される像。



部について H_α 線を中心とするスペクトルの診断を行った (Tamura and Takeuti⁶⁾).

顕著な吸収線と共に変化に富む輝線成分の重量が見られる. このような恒星は変光星でもあるため, スペクトル自身も種々の時間間隔にわたる変動を示すが, 変光周期のどのようなタイミングに対応しているか詳しい解析はまだ実行されていない. このようなスペクトル線輪郭を説明する拡散恒星大気の構造が解明されれば, 前述の Iben and Renzini の理論と進化上の直接的リンクが出来る.

Post-AGB 星や PPNe は目立った電離ガス域が未発達で, 分子や星間塵に覆われていると予想される. 実際, CO 分子輝線によって電波干渉計を用いてその構造や速度場が調べられている. IRAS21282+5050⁷⁾や CRL 618⁸⁾である.

彼は出口修至氏のまとめ(Proc. IAU Symp.No. 180, 1996)を読んでいただきたい. いずれも赤外線

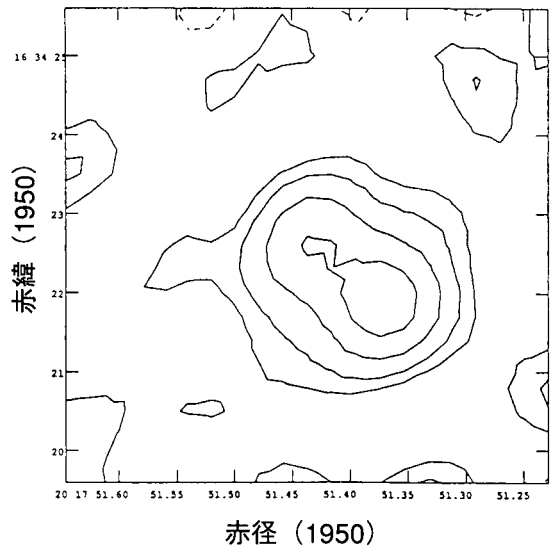


図6 IC 4997 の 1667MHz 連続波による積分強度図⁹⁾.

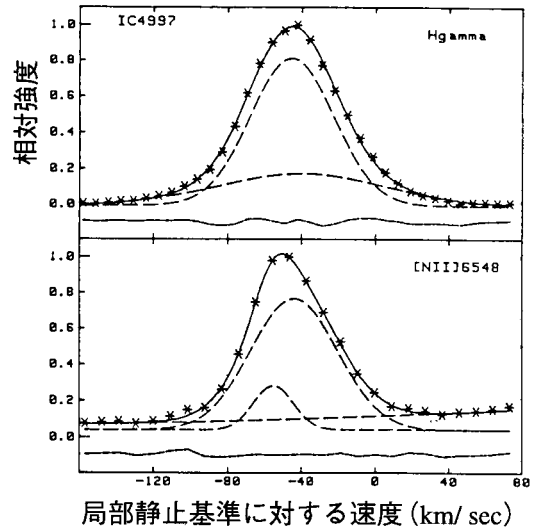
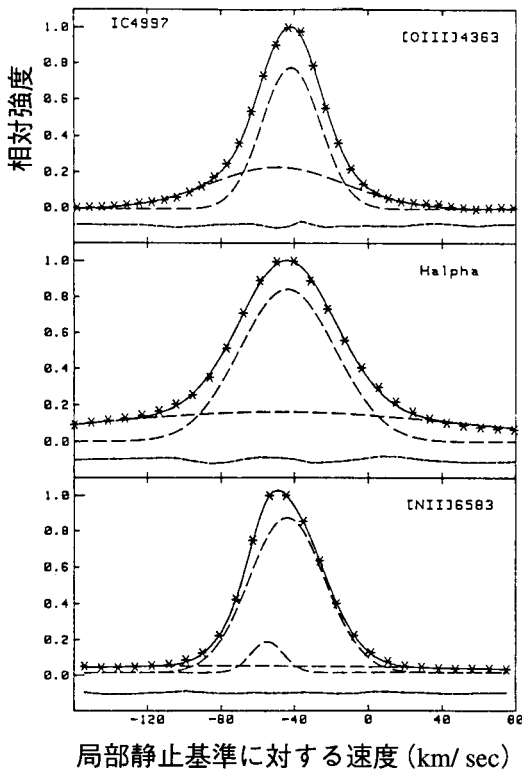


図7 IC 4997 の高分散輝線スペクトル⁹⁾.

源としては強いが可視域では殆ど特徴の無い天体である。10" ~ 15" 程度のサイズの中の CO 分子を放射源とする積分強度図，速度場が得られている。電離ガス構造の大きさと比較すると，両者共にまだ十分に PNe に進化していない PPNe の段階にあることがわかる（図 4 及び図 5）。

5-2.

このような PPNe が発達するとどうなるのだろうか？ サイズが小さく，中心星の存在が判然としない PNe がこれに対応する。カタログ中にはこのような例が多くみられる。しかし，距離が大きいためみかけ上サイズが小さく見えるのか，本質的に PPNe から進化したばかりであるかを判定しなければならない。これが第二の課題である。我々の研究グループはこの課題に集中的に取り組んできた。例として IC 4997 を取り上げてみよう。輝線スペクトル強度比が時間と共に変動する有名な PN である。他の観測特性から，OH メーザー線を検出出来ると予測して VLA (Very Large Array, 米国) による観測を試みた (Tamura et al.⁹⁾)。もしメーザー源が同定できれば，既に知られている Vy 2-2 と共に星雲物質と中心星の輻射との関係を明きらかにできるサンプルになるはずだったが，結果は否定的なものであった。しかし，副産物として 1667 MHz 帯の連続波により，これまで恒星状にしか見えなかった未知の構造を得ることが出来た。それが図 6 である。双極流の存在を示唆するピーナツ状の構造が明らかである。すぐに，その速度場を調べたい。しかし，この時点では，二次元検出器を持たず，又 高空間分解能の下での良い観測条件を日本国内では望むべくもなかった。ただ，速度分解能に関しては，たとえ一次元検出器でも世界的にひけをとらない観測は可能だった。IC4997 の分光的特徴は [NII]6548, 6583 の線輪郭にある。又，[OIII]4363 にみられる幅広い成分でもあった。図 7 としてこれらの輝線輪郭を示しておこう。ただし，後者については強調

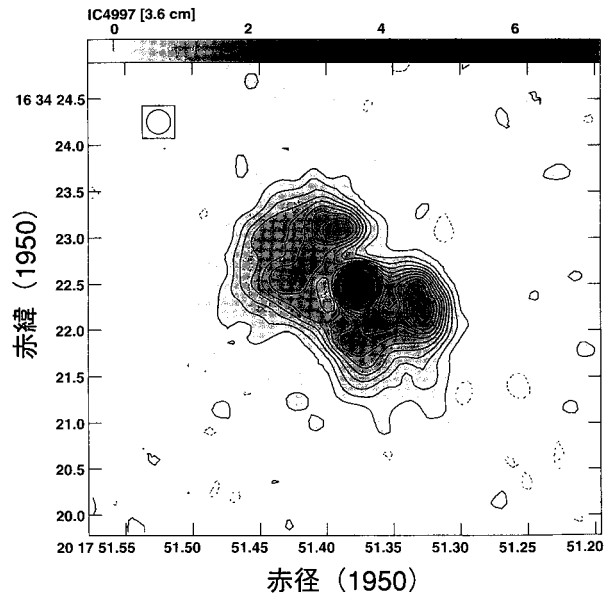


図 8 IC 4997 の 5GHz 連続波による積分強度図¹⁰⁾。図 6 に比べ高周波数帯の観測であるため解像度が良くなっている。

しなかった。何故なら，観測機器によるものか，本当に IC4997 起源であるかを判定出来なかったからである。その後のテストの結果，輝線スペクトル中ウイング部の強度がゼロとなる巾 (FWZI) の値で 80 km/sec 以上，しかも相対値で 20% 程度以上の強度を持つ成分は PN 起源として良いということがわかったので再考慮する余地ができた。つまり全部のデータは高速の双極流の存在を示している。その後 5GHz のもっと分解能の高い VLA 観測と二次元検出器による詳細な分光観測が行われ，我々の最初の見解が支持される結果を示している (Miranda et al.¹⁰⁾)。彼らの VLA 観測の積分強度図だけを図 8 に示してある。

5-3.

PNe が持つ特性のうち，膨張運動は最も基本的で重要な観測量であると共に理論を構築する上でカギとなる物理量である。これまでに説明してきた Post-AGB 星や PPNe でも，たとえ分子のような中性ガスであれ電離ガスとの関連で膨張運動が問題

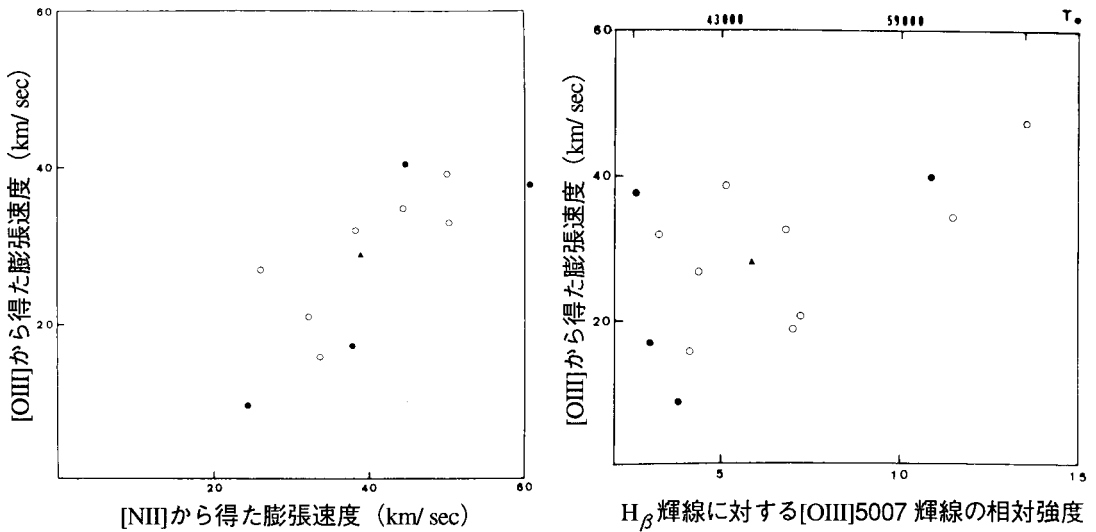


図9 a, b 視直径が小さい惑星状星雲についての膨張速度観測¹¹⁾。
 a) は二種のイオン間の差(加速現象)を示している。
 b) は中心星の温度を輝線強度比から推定し、進化との関連を示した。

とされる。これが第三の課題である。

一般に電離ガスは光学的に透明であるから、ドップラー・シフトの結果赤側と青側へのずれ双方が輝線輪郭中に観測される。図1に示したMyCn18の場合でも形態を説明するためには、速度のデータが必要になる。しかし、視線方向に存在するガスの運動の結果として輝線輪郭を解析することは可能だが、スリット分光である限り三次元のガスの流れを再現するにはかなりの時間と努力を要する。マルチ・スリットを用いる工夫やファブリー・ペローが応用されたりしている。岡山天体物理観測所188-cm望遠鏡とクーデ分光器を用いての観測は検出器が一次元配列であったため、最初から分散方向と直角となるスリットに沿った空間情報を得ることは諦めていた。それでも、検出器が写真乾板であった頃に比べれば、格段に能率が良くなり速度の測定精度も向上した。今では、ほぼ2~3 km/secの速度分解能を達成することはそれ程難しいことではない。問題は天候と割り当てになる観測時間であった。柴田克典、矢動丸康の両氏

が院生時代、それぞれ在籍期間が違ったものの、中心となり実行した課題であった。現在までに、約80天体から H_{α} 、[NII]、[OIII]、HeIIの4種のイオンについて膨張速度を得ている。実に、ほぼ15年を要した。観測上の都合や電離状態の差があるため、4種のイオン全部についての膨張速度が得られているわけではない。しかし、同一の機器により、上記のような速度分解能で観測されている例は他にあまりない。Acker達も同様の観測をしていることはすでに知られている。データと予備的解析、統計上の問題点とを整理して昨年オランダで開催されたIAU Symposium No. 180の際に報告した。速やかにまとめ、完成された論文として出版すべく準備中である。一部の結果や特に興味をもった個々のPNについては、すでに幾つかの論文として公表している。ここでは一つの例を取り上げておこう¹¹⁾(Tamura and Shibata¹¹⁾)。

この論文で議論したPNeは全てみかけ上恒星のように見えるものであったが、土台となったデータは上述の仕事の中に含まれている。図9 a, bに結

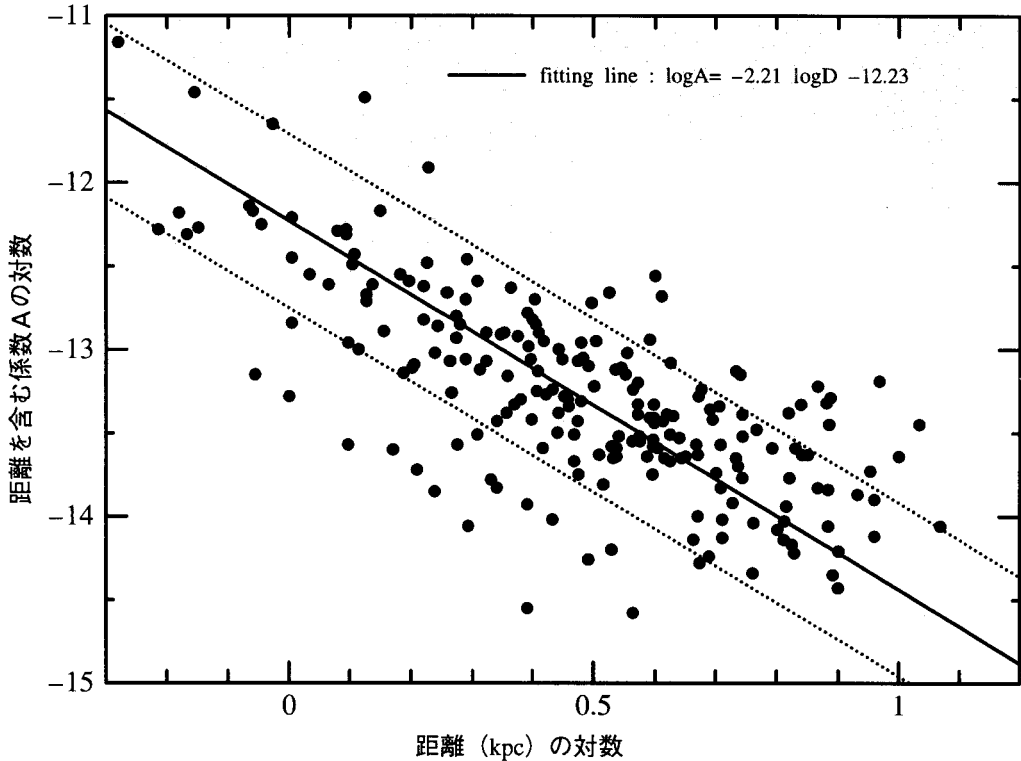


図 11 IRAS 4バンド輻射を用いた，惑星状星雲までの距離を求める方法を示す図¹⁵⁾．縦軸の A は黒体放射が距離によって希釈される時プランク函数での最良のフィッティング係数．A の中に距離因子が含まれている．横軸は Cahn, Kaler, Stanghellini¹⁶⁾ が与えた距離．

から二度めの質量放出が起きているのだというシナリオが考えられている．FWZI で 450 km/sec にまで達する図 10 の広がった成分はこの活動を具体的に示した観測結果である．最初の我々の発見後，Meaburn and Lopez¹³⁾ がこのようなガス流の存在を確かめ，Abell 30 の中心部で生じている詳細なガス運動の有り様を明らかにした．尚，この中心部の構造は HST により奇麗な放射状フィラメントになっていることがわかり，且つこの部分の X 線像が Rosat 衛星によって示された¹⁴⁾．

5-5.

このように，膨張速度の観測に基づいて Post-AGB 段階からの PNe の成因，又これから PNe への進化を理解するための研究を行ってきた．定性的には大筋の描像を得ることに成功したと考えるが，

HST や Rosat の観測結果は問題を益々複雑にしている．理論家は問題を単純化して把握しようとし，観測家は起こっている現象を事細かに説明しようとする．私は後者に属すが，膨張運動の研究に限って言えば， $2 V_{\text{exp}} \sim \text{半径}$ の関係を完成させるのが一つの区切りであろう．そのためには一方の半径を正確に決めたい．これは視直径 ($2 \theta''$) によるものの，距離の精度が重要となる．これについては，つい最近 IRAS 衛星の 4 バンド輻射から推定する方法を考えだし，ほぼファクター 2 程度の不確かさはあるが，数多い IRAS 点源としての PNe について距離を決めることが出来た¹⁵⁾．全ての PNe 中に含まれる星間塵量が等しいと仮定し，4 バンド輻射を温度 T_{dust} の黒体で近似し，プランク函数でフィッティングする時，係数 A に距離が



含まれることに着目した方法である。 T_{dust} を最も良いフィッティングになるように決め、 A を求めた。これを他の距離尺度、例えば Cahn, Kaler, Stanghellini¹⁶⁾ の結果を用いると、実際の距離が得られる(図 11)。このようにして、これまで未知であった約 50 個の PNe について距離を与えることが出来た。

6. 今後の展望

現象を単純化して考えたいという理論家の意図に反して、PNe の観測は、特に HST の撮像結果は事態を益々複雑にしている。PNe の三次元的気体力学シミュレーションは理論家に努力してもらうことにして、今後我々観測家はどうかすれば良いのだろうか？

結論をいえば、M 31 (アンドロメダ星雲) 中の PNe にターゲットを据え、これまでの手法に従ったデータを集めることだろう。何故なら距離の呪縛から開放されるからである。ハワイ島山頂にスバル望遠鏡が間もなく完成する。電波域、赤外線域、X線域の観測設備と共に世界第一級の観測機器を手にするようになる。188-cm 望遠鏡と写真乾板で世界と太刀打ちしようと思った若い頃の自分を思い出しながら、これからの若者に私達が果たせなかった夢のような研究を実現して欲しいと願っている。

参考文献

- 1) Perek, L. and Kohoutek, L., 1967, Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, Academia, Praha
- 2) Acker, A., Ochsenein, F., Stenholm, B., Tylenda, R., Marcout, J., and Schohn, C. 1992, The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, ESO, Munchen

- 3) Kaler, J. B., Shaw, R. A., and Browning, L. 1997, PASP, 109, 289
- 4) Iben, I., and Renzini, A. 1983, ARA&A, 21, 271
- 5) Volk, K. M., and Kwok, S. 1989, ApJ, 342, 345
- 6) Tamura, S., and Takeuti, M. 1993, ASP Conference, vol. 45, p. 309
- 7) Shibata, K. M., Tamura, S., Deguchi, S., Hirano, N., Kameya, O., and Kasuga, T. 1989, ApJ, 345, L55
- 8) Shibata, K. M., Deguchi, S., Hirano, N., Kameya, O., and Tamura, S. 1993, ApJ, 415, 708
- 9) Tamura, S., Kazes, I., and Shibata, K. M. 1990, A&A, 232, 195
- 10) Miranda, L. F., Torrelles, J. F., and Eiroa, C. 1996, ApJ, 461, L111
- 11) Tamura, S. and Shibata, K. M. 1990, PASP, 102, 1301
- 12) Yadoumaru, Y., and Tamura, S. 1994, PASP, 106, 165
- 13) Meaburn, J., and Lopez, J. A. 1996, ApJ, 472, L45
- 14) Conway, M., Chu, Y. H., and Chang, T. H. 1997, AAS Meeting(S&T, 1997, May, p.17)
- 15) Tajitsu, A., and Tamura, S. 1997, AJ, submitted
- 16) Cahn, J. H., Kaler, J. B., and Stanghellini, L. 1992, A&AS, 94, 339

A Review on the Planetary Nebulae Research during the Last One Decade and a Perspective

Shin'ichi TAMURA

Astronomical Institute, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-77

Abstract: This article aims to present a review on the research field of planetary nebulae based upon author's work in collaboration with his graduate students, and to draw a perspective for future study.

Emphases are on the interpretation of Planetary Nebulae development from Post-AGB phase to their compact stage as well as on the analyses of individual objects.

It is also shortly mentioned that the promising opportunity of PNe research should be opened with the SUBARU telescope.