

惑星状星雲の形成

田村 真 一*

1. 序

惑星状星雲は比較的小きな望遠鏡で観察すると惑星のように見え、分光器によりそのスペクトルを撮ると、普通の恒星とは異った非常に特徴的な多くの輝線がみえる。夏の夜空をかざる琴座の環状星雲は代表的惑星状星雲の一つである。星雲とは云いながらアンドロメダ星雲や南天でみられるマゼラン星雲とは異なり、星の集まりではなく高い温度(40,000~150,000°K)を有する1個の星のまわりをとりまく電離ガスの包被である。形成の原因は異なるが冬の夜空をかざるオリオン星雲もまた高温星の周りをとりまく電離ガスであり、高温星の紫外輻射を吸収しガスの大部分を占める水素原子が陽子と自由電子に分かれている(電離と云う)。このような天体を総称して電離水素領域(H II region)と呼ぶ。

さて惑星状星雲の研究は天体物理学の他の分野と同様に分光学が天文学にとり入れられた時に始まる。惑星状星雲研究の草創期における大問題は惑星状星雲の輝線スペクトル中波長 5000 Å 近くにみられる強い二重線は何かということであった。実験室ではこれに該当する元素あるいはイオンを同定することが出来ず「星雲素」なる新たな元素が一時考えられた。この問題は 1928 年に今は亡きボーエンによって二階電離酸素の禁制遷移によるものとして解決された。この研究は近代天体物理学の歴史における偉大な業績の1つとして永く記憶されるだろう。ボーエンの仕事によって示されるように惑星状星雲は原子スペクトルの理論を検証する宇宙における実験室となった。その後の研究における理論面からの興味は高温の中心星からの紫外輻射がどのような過程を経て電離ガス包被の可視域における輝線スペクトルに変換されるかを定性的かつ定量的に説明するための理論を構築することであった。一方観測面での興味の1つは多くの惑星状星雲についてその高分散スペクトル輝線が弓状構造を示すことの解釈についてであり、また観測される輝線から電離ガスの化学組成、温度や密度を求めその物理状態を明らかにすることだった。図 1a に示すような球対称の理想的惑星状星雲の中心星に矩形のスリットを置いて分光観測をしている場合を考えよう。① 電離ガス包被が膨張しており、② ある波長の輝線に対して電離ガス包被が透明であれば、観測者に向う部分と共に遠ざかる

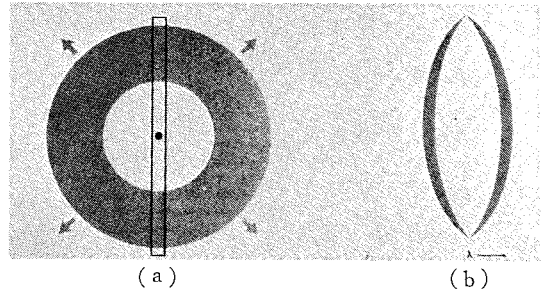


図 1 輝線スペクトルの弓状構造と電離ガス包被の膨張との関係

部分から放射される輝線もみえ、ドップラー効果により輝線は二本に分かれる。輝線の分れ具合はスリット各部の電離ガスの膨張速度のうち視線成分の大きさの違いによる。当然、中心星の部分にあたる電離ガスの膨張速度が最も大きくスリットの両端ではほとんどゼロになり図 1b のような二つの弓を合わせたような輝線が生ずると考えられる。電離ガスは約 10,000°K の電子温度(自由電子の平均的運動エネルギーを温度に換算した値)で電子の個数密度が 1,000~10,000 個/cm³ 程度というのが一般的値である。従って極めて高温稀薄なガスと云えよう。(1 気圧の地球大気を構成する分子の個数密度はおおよそ 10¹⁹ 個/cm³!!) つまり惑星状星雲は何らかの原因で中心星から物質が放出され、これらの物質が中心星の強い紫外輻射により電離され膨張するガス包被となったものと考えられる。

惑星状星雲を最も手短かにまた適切に説明していると筆者が思うのは最近シカゴ大学から出版された「天文学および天体物理学の用語辞典」であり、興味ある諸氏の御一見を願いたい。

惑星状星雲はそれ自体が様々の形態を示す故に我々の興味を呼び起す。同時に(イ)中心星との関連で星の進化が、(ロ)中心星の紫外輻射を説明するために星の大気構造が問題となる。更に(ハ)特徴的スペクトルから化学組成が知られ、我が銀河系における分布状態が明らかになるにつれ銀河系の化学的進化や構造が議論されたり、(ニ)最近の星間空間における高階電離酸素 O VI の発見によりその電離輻射源として考えられるなど、惑星状星雲をとりまく諸問題は多角的になってきている。その上赤外観測や高分解能の電波観測の惑星状星雲の研究に対する寄与は、我々の惑星状星雲に関するイメージを更に拡大しつつある。その一つとして NGC 7027 にお

* 東北大学理学部 S. Tamura: The Formation of Planetary Nebulae

ける, (a) 星間塵による赤外輻射の発見; (b) 電波観測により異常に輝度温度の高いコンパクト部分が見出され, これについての解釈はまだ出来ていない; 等の事柄を上げなければならない. このような時期に惑星状星雲研究のすべてを述べることは至難のワザである. しかし筆者自身の研究の興味からかなりバイアスのかかった現状把握を試みたい. 更に現状を把握したいと思いた研究を志す読者のために次の文献を列挙しておく.

- IAU Symposium No. 34; Planetary Nebulae, 1968
 Mém. Soc. Roy. Sc. Liège 6^e serie, t.V; Les nébuleuses planétaires, 1973
 Astrophysics of Gaseous Nebulae, D.E. Osterbrock, 1974

2. 電離ガス包被の膨張

図1により説明したように惑星状星雲の著しい特徴はそのスペクトル線の弓状構造によって示される電離ガス包被の膨張であろう. 電離ガスの化学組成(元素の個数比)は水素が最も多く, これを1とすると次に多いのが10分の1程度のヘリウムで, その他の元素は多いものでも10,000分の1以下である. 中心星からの紫外輻射は比較的高エネルギーの部分から順次吸収されるので星に近い部分には電離ポテンシャルの高いイオン(例えば, [Ne V], He II)が存在し, 星から遠い部分には電離ポテンシャルの低いイオン(例えば, [O II], H I)が存在するという電離構造を示す傾向がある. 一方輝線の弓状構造のふくらみ具合は電離ガスの平均的膨張速度を表わす. 従って種々の電離ポテンシャルのイオンについて膨張速度を調べると図2のような結果となる. 横軸にはイオンの電離ポテンシャル(云いかえれば, イオンの存在する場所の星からの距離の目安), 縦軸には各イオンの示す膨張速度をとってある. これまでの観測結果では電離ポテンシャルの低いイオン程膨張速度が大きい, つまり電離ガスは星から離れるに従って加速されているという結論が得られた. 従って少量の不純物である比較的重い元素を「水素の河」の流れに浮ぶ木の葉だと考えると, 我々は木の葉の流れによって電離ガスである「水素の河」の流れ具合を知ることが出来た. これまでの観測では膨張速度の一般的な値は10~30 km/sec, 速いもので50 km/secという値が得られている. 温度

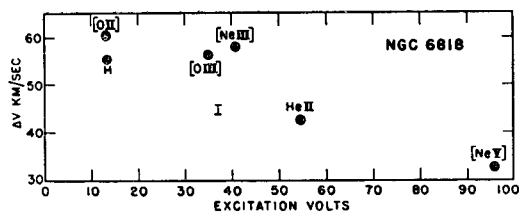


図2 電離エネルギーと膨張速度

約10,000°Kのガスは約10 km/secの音速を有することになるから殆ど超音速流になっていることがわかる.

そこである一定の中心星の物理状態を設定したとき, どのような性質をもった電離ガス包被のモデルが観測されるような電離ガスの流れを実現出来るか調べられた. 中心星の重力が殆んど影響しない程十分に中心星から離れたところに一定の厚さのガス殻を置く. そして, このガス自身のガス圧のため真空に近い星間空間にどのようにガスが流れるかについての数値実験を行った. この数値実験では観測されるような範囲の速度および加速の現象を実現出来, しかもこのような膨張現象が約 $10^4 \sim 10^5$ 年程度の時間尺度の間つづくことが見出された(図3). 星の一生は 10^9 年ぐらいの時間尺度であるから惑星状星雲の膨張現象は星の一生の間の一瞬の出来事といってよい. この数値実験では始めに置いたガス殻の中心星に近い内側は, 星間空間に面している外側と同様真空に近いから, 中心星に向う流れも生ずる. しかしこのような流れはこれまで観測されていない. 従ってガス殻の内側の壁を何かで支えてやる必要がある. 中心星からの定常的高速粒子の流れがこの役割を演じていると考えられている. さてガス殻の膨張を記述する流れの場をきめるのは特別な原因を考えない限りガスの圧力勾配であり, 従って理想気体ではガスの密度と温度に依存する. これらの物理量はガスの化学組成と共に観測される輝線強度を決定する量であるから特に重要である. これまでのところ

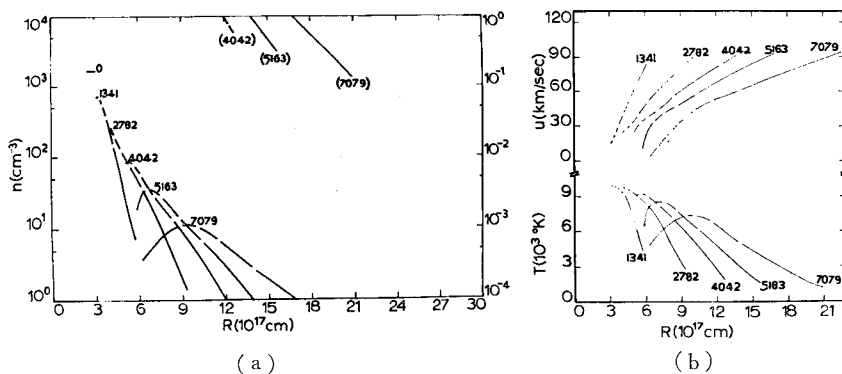


図3 惑星状星雲(電離ガス包被のモデル)

a. 密度(電子の個数; n)と星雲の半径(R)

b. 膨張速度(u)および温度(T)

図中の数字は年で表わした時間

理論的研究は次の二つに分けてなされてきた。(I)ガスの速度、密度、温度の分布を求めるときは水素、ヘリウム以外の元素についてはその電離構造を無視するか簡単にして取扱う(水素の河の流れを定性的に実現させることに重点を置く考え方);(II)化学組成既知の静的一様ガスを中心星からの紫外放射の輸送機構を比較的正確に取扱って電離するモデルを考える(水素、ヘリウム以外の金属、つまり木の葉の浮び方の法則性を調べることに重点を置く考え方)。観測的立場からは(I)は高分散スペクトルにおける弓状構造を解きあかす研究であり、(II)は低分散スペクトルにおける数多くの輝線の強度比を説明することである。最も望ましいのは(I)、(II)を同時に取扱うことであろう。

ペレック・コホウテクの「惑星状星雲のカatalog」でもみられるように様々の惑星状星雲の形態を説明し、基本的物理量である化学組成、速度、密度、温度を輝線スペクトルと共に統一的に説明することは今後も大事な研究であると云える。

3. 惑星状星雲の親星

3-a. ハーマン・シートン経路

さて次に、これまで述べてきた電離ガス包被がいかなる星から、いかなる機構によって生じたかについて言及

しよう。

一体惑星状星雲の中心星は恒星の進化のどのような段階にあるのだろうか? 約50個の惑星状星雲とその中心星の観測データを解析してH-R図上の位置と進化の経路がハーマンとシートンによって調べられた。図4にこれを示す。

惑星状星雲の中心星をH-R図に位置づけるためには中心星の有効温度(T^*)と光度(L)が必要であり、従って距離が必要となる。惑星状星雲は中心星の紫外放射を可視域の輝線に変える変換器であるから、輝線の測定により中心星の有効温度を知ることが出来る。このような

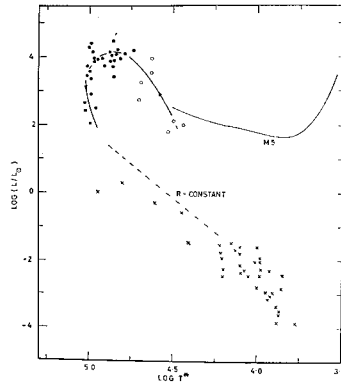


図4 ハーマン・シートン経路。黒丸と白丸が惑星状星雲、×印は白色矮星、M5は球状星団の水平枝、縦軸は光度(L/L_{\odot})、横軸は中心星の温度(T^*)を表わす。惑星状星雲は矢印のように膨張、進化する。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価240円(〒45円) 77-7月号・6月5日発売!

●7月号おもな内容

- ★夏は旅の季節。みちのくの星の旅をご案内します。ガイドは地元のベテランふじい旭さん。「星空への招待」の帰りなどまわってみてはいかがですか?
- ★天王星にも輪があった。6月号で速報をお伝えしましたが、くわしいニュースが入りましたので紹介します。
- ★今年の夏は、ペルセウス座流星群が最高の条件です。夏の流星群のガイドを載さんにおねがいします。
- ★プロミネンス・アダプターを作ってみませんか? 太陽が活動期に入り、夏休みの工作に手ごろです。
- ★そのほか、近代の接眼鏡、メシエ探訪など

星図・星表めぐり

1974年から75年にかけて、日本天文学会の会誌「天文月報」に連載された「星図・星表めぐり」をまとめたものです。

天文月報に連載中から各方面より単行本化が望まれていたものです。一般向きの星図の解説から専門家向けのものまで、24編の原稿はいずれもその道の専門家の手によるものばかりです。

星図や星表はどんなものがあるか、どんなリストがあるかなどを調べるための本です。

●日本天文学会編/B5・104ページ

定価1,200円・好評発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1211

考えに基づいて惑星状星雲の H_{β} 輝線のフラックス ($\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$) と視直径 (θ) および中心星の等級という観測量のみを使って、距離と中心星の温度を決める方法が考え出された。その後この方法は改良され、ハーマンとシートンはヘリウム輝線のフラックスも考慮して中心星の光度パラメーター、 A (中心星までの距離を含む) と中心星の有効温度 (T^*) を決めることが出来た。距離については他の輝線の強度比を用い電子密度 (N_e) を求め、次のような手続きで決める。 H_{β} 線で惑星状星雲を観測したとき、その表面輝度 (S_{β}) は H_{β} 線発光に関する再結合の理論により惑星状星雲の半径 (R) との間には次のような関係が成り立つ。

$$S_{\beta} \sim RN_e^2.$$

従って半径が求まり、視直径 θ がわかっているときは惑星状星雲までの距離 (r) は

$$r = R/\theta,$$

から求まる。このようにして最終的に中心星の光度 (L) と有効温度を求め、図4のような惑星状星雲の中心星に関する H-R 図が出来たのである。ハーマンとシートンの研究によれば比較的小きな質量 ($\sim 1 M_{\odot}$) の星が H-R 図中の水平枝の部分を進化し、どこかの段階でおよそ 1 割程度の質量を放出し白色矮星になると考えられる。

さて、それではハーマン・シートン経路で示されるような惑星状星雲の親星となるべき候補はどんなものが考えられるだろうか？ 現段階では赤色超巨星やミラ型変光星が最もふさわしいようだ。先にも述べたように惑星状星雲中に星間塵が発見されていることは、赤色超巨星のような低い温度 ($\sim 2,500 \text{K}$) の膨らんだ大気を持つ星が惑星状星雲の親星たるべきことを支持している。一方ミラ型変光星と呼ばれる長周期変光星は低温であることを示す吸収線スペクトルと高温の輝線スペクトルの二つの顔を持つ。大部分が共存星 (Symbiotic Star) と考えられているが、多分高温星と低温星の複合体と考えられたからであろう。共存星のスペクトルが晩期型星スペクトルと典型的惑星状星雲のスペクトルの丁度中間的スペクトルを示すことから、惑星状星雲の親星としてまた惑星状星雲形成時の現象を示す例としてこれら一群の共存星に注目する考え方もある。

3-b. 質量放出機構

この節を終える前に質量放出機構にふれねばならない。この方面の研究は恒星の内部構造とその進化を取扱う研究者による寄与が大きい。進化の段階がすすんだ星の問題として専門家の解説が必要な部分である。

質量放出機構としては大きく分けて次の二つが考えられている。ここではこれらを列挙するのみにとどめておこう。いずれの場合でも星の重力をふりきって星の一部の質量がどのような原因で放出されたか考慮したもので

ある。

(1) 赤色超巨星のような膨らんだ大気における力学的不安定性 (あるいは脈動不安定性) に起因するとする説。膨らんだ大気においては水素やヘリウムの電離を通じてエネルギーが蓄えられ、大気の外層部の全エネルギーが正となるぐらいに大きくなる。星の脈動の振幅が成長し大気を膨らめ、ついには星の重力から解放され大気全体が星間空間へ放出される。

(2) 高温の青い小さな星のヘリウム燃焼殻から異常に大きな光度が発生し (熱的不安定性)、この輻射により輻射に対して不透明になっている星の表面の一部がはぎとられるという説である。

どのような質量放出機構をどのような親星にあてはめるのが適当かを知るためには、惑星状星雲形成の現象を観測し、その環境や種々の物理量を求めるのが最もよい。このような視点から次の節へ進もう。

4. HBV 475, V1016 Cyg, Z And

惑星状星雲形成時にあると考えられる恒星状の惑星状星雲 (正確にはまだ惑星状星雲といい切れない) が注目されるようになってきた。これまで観測され、調べられた惑星状星雲は電離ガス包被がある一定の大きさまで膨らみ、我々の目には惑星状にみえるものに研究の重点がおかれてきた。ハーマン・シートン経路が明らかにされてから距離が大きいために恒星状にみえるのではなく、若くてまだ惑星状にみえるまで膨張していない惑星状星雲に興味をそそがれその例として表題のような天体が注目されている。筆者自身も観測をつづけ、年々変化するスペクトル線を実際にみる事が出来るので、HBV 475 に重点をおいて話を進めよう。

コホウテク (チェッコスロバキア) がハンブルグ天文台のシュミット望遠鏡を用い、この天体が H_{α} 輝線を示し、写真実視等級で約 2 等増光していることを 1969 年に見出した。そして彼がこの天体をハンブルグ・ベルゲドルフ変光星 475 番として登録し、惑星状星雲を作りつつあるのではないかと注目した時から研究者の特別の関心を持たれ研究がつづけられている。そして次の点から HBV 475 は惑星状星雲と認定してよいだろう。① 典型的惑星状星雲と良く似た輝線スペクトルを示す。② 視線速度は約 -30 km/sec 。③ H_{α} 輝線が分光器輪郭よりかなり太くなっていて膨張ガスが存在することを示唆している。④ 連続スペクトルの一部はウォルフ・レイエ星のそれに似ており、発光帯になってみえる程膨らんだ電離ヘリウムの輝線 (中心星の大気で生じたと推定される) の幅から星の大気が約 $2,000 \text{ km/sec}$ の速度で膨張していると考えられる。

さて増光が発見される以前、HBV 475 はどんな星だ

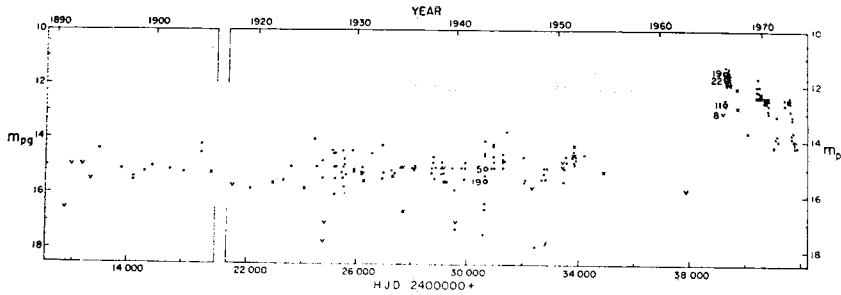


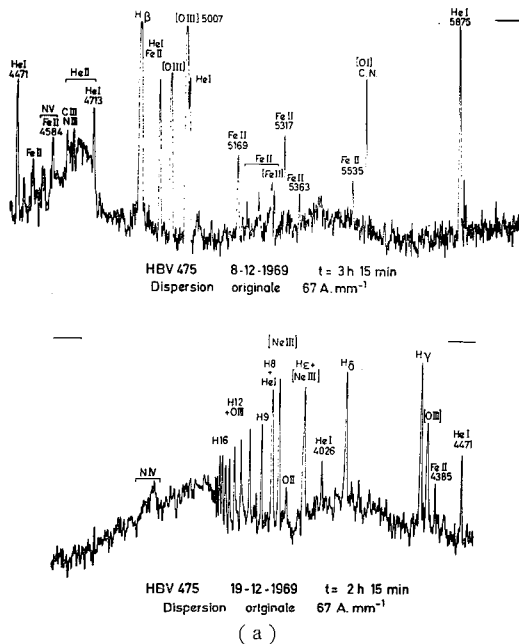
図 5 HBV 475 の光度変化

ったのだろうか？ 図 5 に光度変化の様子を示しておく。1960 年代後半になり何か活動が生じたのは明らかだろう。活動前は (m_{pg}) 14.5 等の何ら輝線を示さない M 型星だった。図の光度曲線は V1016 Cyg や Z And とよく似ており、スペクトルも細部の違いはあっても全体的には良く似ている。V1016 Cyg や Z And の特徴はかなり以前から調べられており共存星と考えられていた。HBV 475 との違いはこれら共存星の輝線スペクトルには高い励起状態の輝線がみえ、むしろ新星に近いという点である。しかし HBV 475, V1016 Cyg と Z And は同じ星のカテゴリーに属するとみなされ、共に惑星状星雲の親星として電離ガス包被を形成しつつあると考えられている。

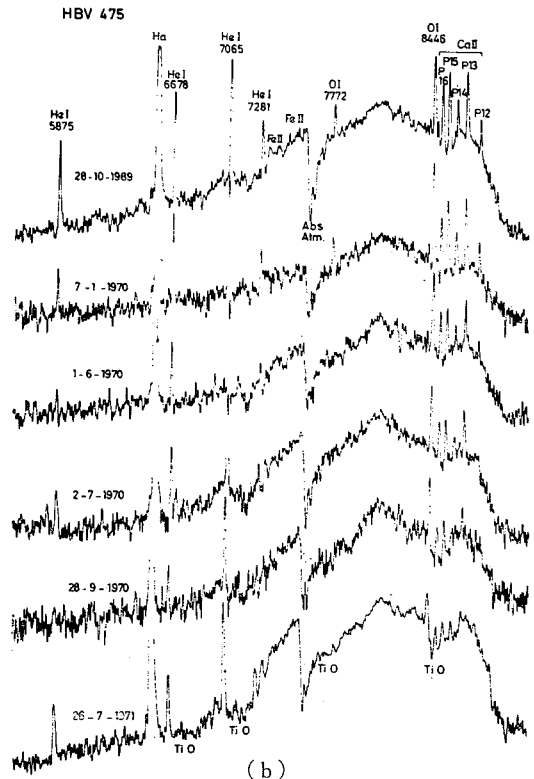
HBV 475 については増光が発見された 1969 年以來スペクトル観測がなされているので、筆者自身のスペク

とどめるが、前節の質量放出機構と結びつけて考えるまでには到っておらず、専ら年々変化するスペクトルの蒐集と整約の段階である。解釈まではもう少し時間を要すると思われる。

スペクトルの輝線強度比から HBV 475 の電離ガス包被の電子温度は約 7,000°K、電子密度は 10^8 個/cm³ 以上という事が比較的簡単にわかる。波長 5,007 Å の [O III] の輝線はいくつかの要素に分けられ、それぞれ 0~200 km/sec の範囲の膨張速度を示している。このことは電離ガス包被は一様でなく、いくつかの雲に分かれていると云える。連続スペクトルから中心星を予想すると $\lambda\lambda$ 5,200~3,200 Å ではウォルフ・レイエ星と考えられ $\lambda\lambda$ 5,700~7,300 Å では K5 の星と考えられる。一方 UVB の三色測光では $B-V=+0.36$, $U-B=-1.00$



左: 図 6 a HBV 475 のスペクトル (アンドリラ)
 右: 図 6 b HBV 475 のスペクトル (アンドリラ)
 各スペクトルに日付が記入してある。



(b)

