

# Cloudy Stars

——惑星状星雲の形成に関連して——

田 村 眞 一\*

## 1. 序

Cloudy Stars という聞き慣れない名称が昨年(1977年)のロンドンにおける IAU Symposium No. 103, “Planetary Nebulae” で話題になった。電離ガスの雲に取り囲まれた恒星という意味から、周雲恒星とでも訳されるであろうか。

Planetary Nebulae (惑星状星雲) の定義は、“小口径望遠鏡で惑星状に見えるガス星雲” から、より本質的に、“高温の白色矮星のまわりを取り巻く膨脹電離ガス” というように変化している。惑星状星雲の研究の主題が赤色巨星のような、拡散大気を持つ恒星からの物質流出に関する理論や関連星の観測面からの理解にしばられてきたことが、自然の成り行きとして Cloudy Stars という表現になったと想像する。

惑星状星雲に関する研究の現状については、私自身の興味から、かなり片寄った立場であったと思うのだが、すでに天文月報(1977年, 6月号)で、その時点での重要な事項を述べている。更にもっと広い見地から、この天体に興味をもつ幅広い読者を想定して、非常に大雑把ではあるものの1981年12月に、惑星状星雲がからむ問題の総まとめを試みた(星雲星団シリーズ「惑星状星雲」; 1981年, 地人書館)。従って、改めてこの誌上で惑星状星雲の一般論を語る必要はないと思う。

$\alpha$  Ori (ベテルギウス) に代表される赤色巨星からの物質流出が最終的に惑星状星雲となる過程はどのようなものであろうか? これが究極的には、惑星状星雲あるいは太陽程度の質量をもつ恒星の進化における最終段階を研究するときの本質的問題点の1つであることはあきらかであろう。この稿では問題点をしぼり、Cloudy Stars という名称の由来を土台に据え解説を試みる。しかしながら、内容は1つのシナリオを構成しながら、あらずじを述べるのではなく、これは観測現場にある者の通弊なのだが、注目されている様々の現象をあれこれ述べたてることになろう。このような方式をとるのは、概して、天体物理学では、ある問題をはじめから理論に導かれて観測し検証することで解決する場合よりは、様々の天体現象の観測から枝葉末節の部分がとり払われ、残った本質的特徴について解釈が試みられ、最後に理論が構築さ

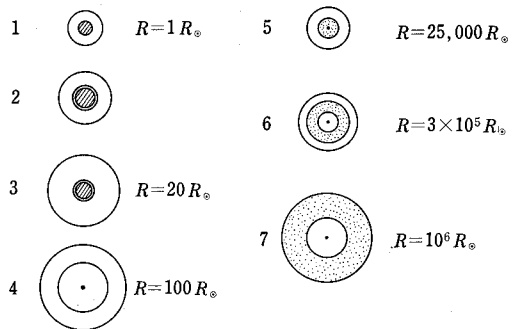


図 1 惑星状星雲が出来る過程。

番号は本文中の順番に対応している。半径は単なる概念的なものなので、太陽半径単位でわきに記してある。図中斜線部は、高温高密度の中心核を表わし、点をほどこした部分は電離水素領域である。

れているという場合の方が圧倒的に多いからである。

以下、まず初めに、惑星状星雲形成について提案されている最近の最も都合のよい考え方について述べ、これによって説明されるかもしれない惑星状星雲の前段階(先駆者)としてのいくつかの恒星にみられる現象を紹介する。最後に、近頃話題の多い A30 という惑星状星雲に言及するだろう。

## 2. 期待されるシナリオ

赤色巨星から惑星状星雲が形成されるという考えは、それ程新しいものでなく、すでに 30 年ぐらい前に、提案されている。以後、今日にいたるまでに、最も確からしいと期待されて作りあげられた1つのシナリオを図 1 に示しておこう。

- ① まず初めに、太陽程度の質量と半径をもつ星を考えよう。高密度、高温の中心部では、水素がヘリウムに変換する核反応に必要なエネルギーが供給されている。
- ② 中心部での水素の核反応が終り、エネルギー生成は中心部のまわりのうすい水素層でまかなわれる。外層は膨脹を始める。
- ③ 中心部は大部分がヘリウムとなり、収縮をはじめめる。外層は膨脹をつづける。ここで赤色巨星が出来あがる。(半径はおおよそ、太陽の 20 倍ぐらい。)
- ④ 星の外層が太陽の 100 倍ぐらいまで拡がると(太陽が地球軌道まで膨脹したと考えるとよい)、この外層から物質の流出がはじまる。中心部には、高温の

\* 東北大理 Shinichi Tamura: Cloudy Stars in Connection with the Planetary Nebulae

矮星が生ずる。

- ⑤ そして、中心星が十分高温になると、高密度の電離水素領域が出来る。惑星状星雲の誕生である。太陽半径の25000倍もの大きさになったとはいえ、この頃には、まだ惑星状にみえることはない。
- ⑥ 電離水素領域が十分大きくなれば望遠鏡によって、惑星状と認められるだろうし、観測されるスペクトルには、酸素や窒素等の禁制線が見い出されるようになる。
- ⑦ 全ての水素と他の元素がほとんど電離されると最もはなやかな惑星状星雲の時期をむかえるが、電離水素が拡大する一方で密度は減少をつづけているから表面輝度最大となった後は、徐々にくらくらになり、視界から消え去ることになる。

我々が天体写真集等でみかける惑星状星雲の大部分は⑥の段階以後にある。本稿で問題にしようとする部分は、④から⑤に移行する段階だといつてよい。

これまでに惑星状星雲の形成に関与する赤色巨星大気における様々の不安定性が論じられてきた。重力不安定、熱不安定、振動不安定等である。これらはそれぞれに魅力のあるものであったが、いわば星雲物質を瞬時に作るもので、その後の星間空間への物質流を説明することは重要視されず、研究の対象外であった。

そこで、主として、観測からすでに十分知りつくした量のみを用い、もっと適切なモデルが作られないかというモチーフから考え出されたのが次の雪かきモデルである。

### 3. 雪かきモデル (Interacting Stellar Winds Model)

Kwok, Purton, and Fitzgerald (1978) が初めて、このモデルを提案したときは、モデル自体が極めて単純なもので、定性的議論がなされたのみであったが、主として観測者を中心に支持された。何故ならば、あまり無理な仮定をせずに、現実の惑星状星雲の観測量を説明出来たからである。

図2にこのモデルを示しておこう。このモデルの本質的な点は、赤色巨星時代の恒星風(速度、 $V \sim 10 \text{ km/sec}$ )と中心星が高温になってからの高速の恒星風(速度、 $V \sim 1000 \text{ km/sec}$ )との相互作用を考え、後者が雪かきの役目を演じ、前者をはき寄せ、惑星状星雲のガス殻の速度として  $V_s \sim 50 \text{ km/sec}$  程度のガス流をつくることにある。このモデルの目論みは、惑星状星雲の周囲の星間塵の存在、あるいは  $\text{CO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2$  といった分子の存在まで説明しようとしたものであり、全般的には成功している。しかし問題がないわけではない。(a) 現実の惑星状星雲を説明出来る程、高速恒星風は運動量を供給出来るか、(b) 赤色巨星時代の恒星風の残存物質は惑星状星雲をつ

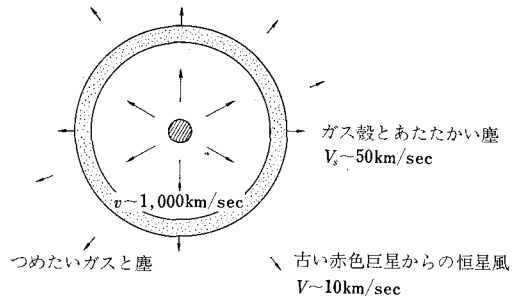


図2 惑星状星雲形成の雪かきモデル。  
斜線は中心に位置する高温矮星を、周囲の点をほどこした部分は、電離水素のガス殻およびこれに混在しているあたたかい星間塵をさしている。さらにこれらの外周に、赤色巨星時代の恒星風が残っている。

くだけ十分の質量があるか、等である。これらの検討は、後に Kwok (1982) 自身によってなされ、どちらの問題も解決されたと考えている。

このモデルが提案されたときには、 $1000 \text{ km/sec}$  という恒星風の存在には、単なる仮定ということもあり違和感をいだいた。しかし中心星からの恒星風そのものは、必要な存在であった。何故なら Mathews や私自身の気体力学的研究では、星間空間へ膨脹運動を始めたガス殻は、中心星からの何らかの物質流で支えなければ、中心星へ向う逆流を生ずるからである。

しかし、最近ではもっと直接的に高速恒星風の存在が示唆されている。

可視域で観測される星雲の  $\text{He II } 4686$  輝線を用い、中心星の色温度を推定したものと、国際紫外天文衛星(IUE)による紫外部のエネルギー分布からの直接的決定に較べ、前者の方が、はるかに高い値を示す。この差を説明するためには、 $\text{He}^{++}$  をつくる電離源として中心星に高温のコロナの存在を考え、これからの  $1,000 \text{ km/sec}$  程度の恒星風による衝突電離が有望のように思われる。

更に IUE による観測では、直接、惑星状星雲の中心星からの高速恒星風が普遍的なものかもしれないことが示された。Benvenuti Perinotto の報告によると6個の惑星状星雲で紫外部における輝線が示す  $\text{PCyg}$  輪郭から  $V_{\infty} \sim 1,000\text{--}3,000 \text{ km/sec}$  の終末速度が得られている。

一方赤色巨星からの恒星風又は物質流については、 $\alpha \text{ Ori}$  や  $\text{Her}$  で以前から知られていた。その上、これらの赤色巨星や超巨星の拡散した外層を、光検知器の発達により、直接観測することが可能になった。

全ては雪かきモデルに都合よく見える。それでは現実には赤色巨星→惑星状星雲という道すじをたどっている現象や天体をみることが出来るだろうか？ 答えはイエスである。次に、雪かきモデルによって説明出来るだろう

個々の恒星にみられる現象の特徴をみてみよう。

4. 赤色巨星, 赤外線星, 共存星

本稿で私が主張したい主眼点は、赤色巨星 ( $\alpha Ori$ ) → 赤外線星 (CRL 618, CRL 2688) → 共存星 (V1016Cyg, HBV475, HMSge) のような経過をたどり、惑星状星雲が形成されるだろうということである。この矢印は、雪かき作業の経過を示すものであるが、もう少し説明が必要かもしれない。

いくつかの惑星状星雲には、赤色巨星時代の拡散大気の痕跡と思われるものの存在が知られている。

それは赤外線観測で明らかにされつつある星間塵の存在であり、更に、これに関連しているだろう分子の存在である。これらは、赤色巨星大気の拡散の途上で作られたのであろうし、雪かきの結果、はき集められたものに違いない。赤外線星では、中心星からの紫外光子が外層の物質を電離できるほど多くはなく、単に中心星の連続光を散乱しているか遮蔽しているのだろう。星間塵は、紫外光を吸収し、赤外部に黒体として光子を再放射していると考えられる。

図3に赤外線星の代表例を示しておこう。又、図4には、CRL618の構造についての1つの解釈を示してある。中心星はすでにかなり高温になっているが、電離水素領域はまだ拡がっていない。赤外線源となっている星間塵やつめたいガスの雲によって分厚く周囲を被われているだろう。そして、洩れた中心星の一部の光によって、反射星雲がつくられていると考えられる。

この構造は、不思議なことに Minkowski の足跡星雲として有名な MI-92 と酷似している。足跡と呼ばれる理由は図5に示す通りである。CRL618 も MI-92 も双極流を示すことがその特徴といえる。原始惑星状星雲ではこの双極流は普遍的なことか？ これは、これから解

決を要する問題点である。

ともあれ、赤外線星あるいはこれと類似の反射星雲では、雪かき作業の途中を示していると考えられる。最外縁部の近くにあると考えられる分子 (例えば  $H_2$ ) の存在、紫外輻射であたためられた星間塵、高温の中心星 ( $\sim 30,000^\circ K$ )、そのまわりの膨脹電離水素領域、PCyg 輪郭で示唆される中心星からの高速恒星風の存在等々がその理由である。

さて、中心星が更に高温になったら、この赤外線量はどうなるだろうかそれが共存星であるとして、さらにシナリオが書けないか？ これが現在の私の研究のモチーフである。

共存星は、これ自身について解説が必要だと思われるが、それは別の機会にゆずろう。

共存星あるいは共生星の命名はかなり以前にさかのぼる。しかし最近では、スペクトル中に、M型星大気にみ

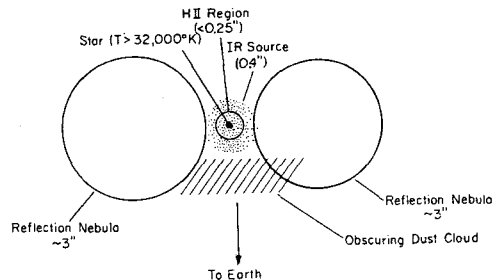


図4 CRL618の構造の模式図、中心星は  $32,000^\circ K$  以上の温度になっており、中心部に電離水素領域がみられる。そのまわりに赤外線源がある。図3の反射星雲に対応するものが2つの丸で示され、我々との間には、星間塵の雲が中心星をかくすように存在している。  
(Ap. J., 202, 407, 1975 の Fig. 5) 参考

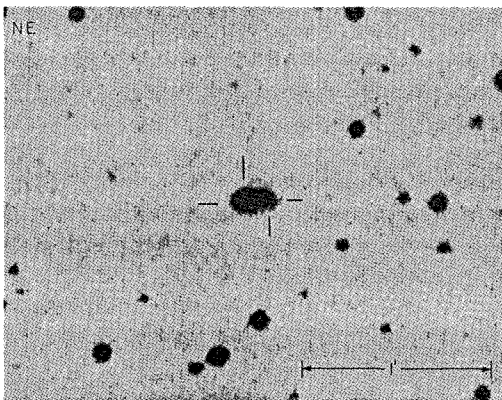


図3 赤外線星, CRL618の写真。上が北、右が東。2つの反射星雲が示されている。  
(Ap. J., 202, 407, 1975) 参考

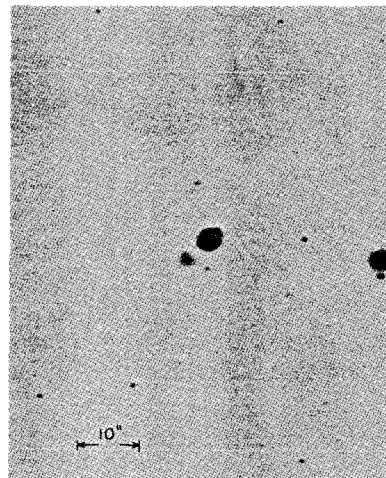


図5 MI-92 (Minkowski の足跡星雲)。上が北、左が東。  
(Ap. J., 200, 1, 1975 の Plate 1) 参考

られるような TiO 吸収帯と, HeII 4686 のような高励起輝線を同時に示すような一群の恒星を, このような名前で定義している. 銀河系の中に 100 個余りが発見されているが, 特に, 単なる M 型星が H $\alpha$  輝線を示し, しかも増光スペクトル全体が, 惑星状星雲と類似の特徴を示すようになった, V1016 Cyg, HBV 475, HMSge に注目したい.

これらの中心星の表面温度はいずれも 100,000° K 以上と推算されている. しかも 1,000 km/sec 近くの恒星風の存在が予想され確認されているものもある. 定性的には, 雪かき機の威力が上昇し, 雪かきの作業がかなりすすみ, 電離ガス領域が拡大し, 惑星状星雲として観測される直前にまで達していると考えられる.

共存星には, M 型星の特徴が残っていることは明らかであるけれども, これが, この種の恒星のどのような構造に起因しているのかは, いまだに知られていない. もちろん, 共存星を連星系であるとすれば, この M 型星成分は高温矮星の同伴者であろうが, ここにあげた 3 つの共存星については, 単独の星であるか, 連星系であるか, 研究者の間でも議論が分かれており, これから一層の研究が必要とされる天体である.

ともあれ, 雪かきのイメージによって, 簡単に, 赤色巨星 → 赤外線星 → 共存星 → 惑星状星雲という道すじを考えてきた. これが正当な解釈であるか否かは, 現在我々がすでに現実の惑星状星雲で得ている観測量がきめてになる. この中で半径と膨脹速度の関係を図 6 に示しておいた. これは半径が増大すればガス殻の膨脹速度は増大

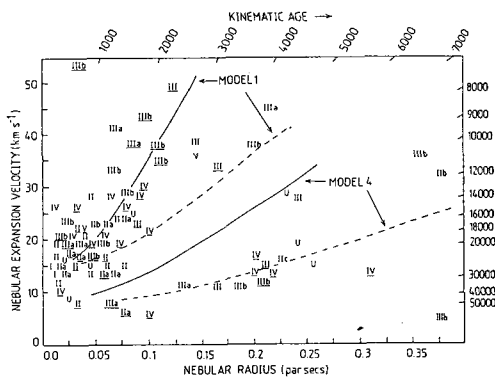


図 6 惑星状星雲の半径—膨脹速度関係.  
横軸は半径 (pc), 縦軸は膨脹速度 ([OIII] 輝線による). ローマ数字と U がそれぞれ惑星状星雲で, ローマ数字は Vorontzov-Velyaminov (1934, Astr. Zh., 11, 40) による形態分類を示す. U は未分類である.  
点線と実線は星間塵を含むモデル.  
(Kerch and Salpeter, Ap. J., 202, 195, 1975) 座標軸の周囲の数字は, 膨脹の時間尺度である.  
(Robinson et al., M.N., 199, 649, 1982 の Fig. 2a) 参考

することを示す. 球対称ガス流が外側に向って圧力勾配があるとき, このような性質を示すことは理論面の検討から予想されたことではある. 問題は, 半径が小さく, 我々からみて, まだ恒星と区別の出来ない「恒星状」惑星状星雲での全く異った二つのガス流の存在を, どのようにして図 6 と関係づけ, 解釈するかである.

5. おわりに, Abell 30 のこと

簡単な偏見にみちた定性的シナリオによって惑星状星

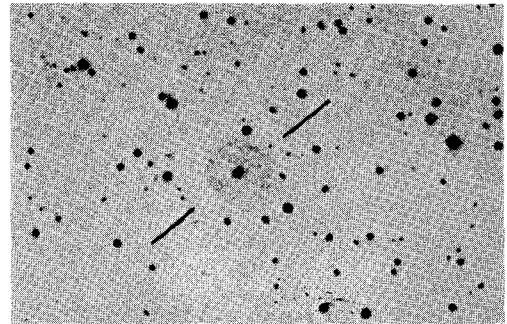


図 7 Abell 30. Perek and Kohontěk のカタログによる.  
中心星のまわりの, 約 2' 程度のシャボン球が, 膨脹ガス.

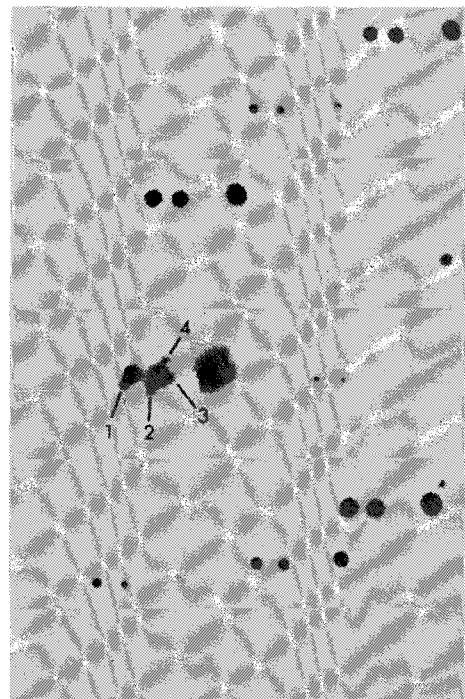


図 8 Abell 30 の中心星 (3点, 露出像, パロマーシュミット望遠鏡).  
左から, 赤, 緑-黄, 紫の 3 色像. 図中の数字の 1 は近接した星, 2, 3, 4 はコンパクトな星雲である.  
(Nature, 285, 463, 1980, Fig. 1a) 参考

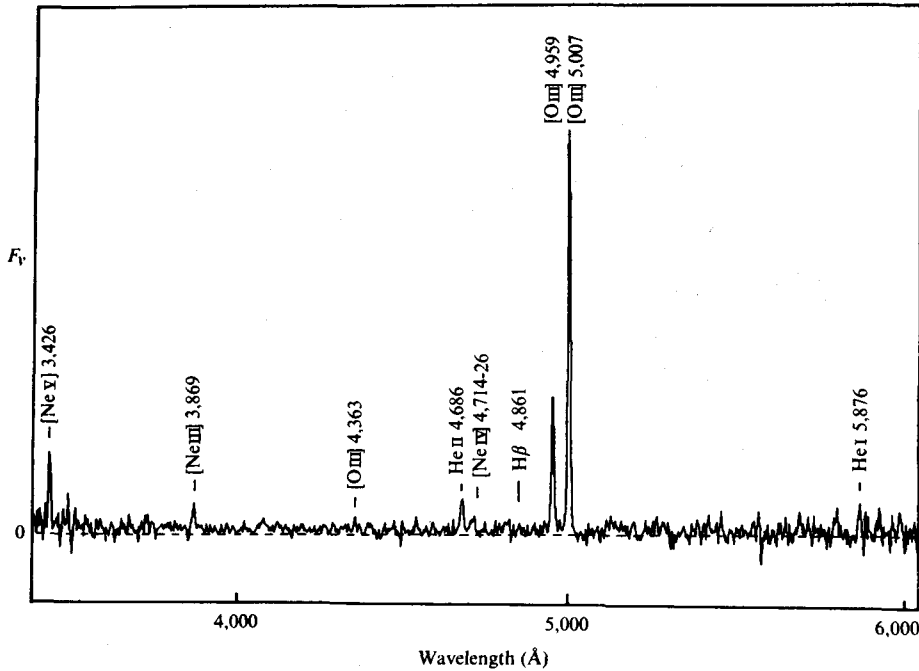


図9 図8の2のコンパクトな星雲のスペクトル。  
 $H_{\beta}$  4861 がほとんどみられないのに、 $He II$  4686 がかなり強いことに注目されたい。  
 (Nature, 285, 463, 1980, Fig. 2) 参考

雲の形成を考えてきた。この稿を閉じる前に、これまでの思考の流れには乗っているものの、多少異った点からもう1つの惑星状星雲のグループに言及しておきたい。Abell 30 問題である。Abell 天体は、膨脹の結果、かなりかすかになった惑星状星雲を意識して探索されたもので、ほとんどが眼視あるいは小口径望遠鏡で“惑星状”と認識することは出来ない。

Perck and Kohoutek のカタログ中の写真を図7として示してあるが、このシャボン球状の星雲の中心星が、図8のように、いくつかのかたまりをもっている。このスペクトルは、図9で示されるように通常の惑星状星雲と異なり、水素の輝線がほとんどみられず、ヘリウムの輝線が異常に強いことが問題なのである。図7のシャボン球の部分のスペクトルは、通常の惑星状星雲のそれとあまり変らない。

このことは、ただちに、次のように考えられた。図1の経路をたどり、水素を主とした外層の膨脹により第1回目の惑星状星雲形成が終了した後、中心星は、ヘリウムを主とした層がむき出し状態になって残っているものと考えられる。そして、このヘリウム層が第2回目の惑星状星雲形成につながるのであろう。ヘリウム層の放出は、何が引き金になったのか、又何故球対称でなく、いくつかのかたまり状となったのか、これから研究しなければならないことが多々ある。都合のよいことには、同

様の状態にあると考えられるもう1つの惑星状星雲、Abell 75 がみつかった。

2度目の惑星状星雲形成についても雪かき機構が働くだろうか？ そもそも惑星状星雲は多重殻をもつことが普遍的なのだろうか？ 天文学における惑星状星雲の認識は、それ程新しいものではなく、この天体が、輻射伝達の理論や希薄ガスの分光学を通じて、天体物理学にはたした役割も小さいものではない。

X線から電波までの広い波長域にわたる観測がもたらした様々の情報が、いま新たに、この種の天体のもつ別の側面、恒星進化の最終段階に注目して、“惑星状”にみえることが本質的ではなく、Cloudy Stars としての特徴の方が、より本質的であると考えられるようになったのである。

