

セ イ フ ァ ー ト 星 雲

兼 古 昇*

1. はじめに

銀河系外星雲の研究において、現在核活動が大変注目されており、これはおもに電波星雲に関係してクローズアップされてきました。そのようなとき、ご存知のように準星 (QSO) という不可解な天体が発見され、QSO は銀河系内の天体だ、いや遠方の銀河系の爆発だなどという議論が沸騰しましたが、星雲核活動がまだほとんど明らかになっていないせいもあって、決定的なことはわからないままになっています。

このように核活動が注目を浴びるずっと以前、1943年のことですが、Seyfert という人は、核が異常に強い輝線を放射している 12 個の星雲を特異な星雲として分類し、そのうちの 6 個の詳しい観測をしています。これらのセイファート星雲は、ほとんどが電波星雲ではありませんので、近年核の活動の議論ではあまり深く考えられませんでした。ところがつぎつぎと集積されてくる QSO の観測資料を眺めているうちに、その光学的性質、特に輝線スペクトルの様相は、セイファート星雲のそれに酷似していることに筆者たちは気付きました。つまりセイファート星雲核を詳しく調べれば、QSO の正体も解明できるのではないかと考えたわけです。

ソビエトでは早くからセイファート星雲に関心がもたれていましたが、アメリカなどでも QSO の研究がややゆきづまりはじめたので、筆者たちのような立場で研究してゆこうとする気運が世界的にも現われ、今年の 2 月中旬には、アリゾナ大学で「セイファート星雲とそれに関係した天体」と題して研究会がひらかれています。そこでの議論の詳しいニュースはまだはいりませんが、ここではとりあえず筆者たちの考えを中心に話しを進めることにしましょう。

2. セイファート星雲とは

セイファート星雲は次の 3 つの光学的性質によって定義されています

(1) 非常に明るく小さい核を持つ。核の大きさは約 100 パーセクと推定され、ここから星雲全体の光の

5% から 50% が放射されている。

(2) 星雲核から放射される輝線スペクトルが強く、低い励起状態から高い励起状態までのものがある。

(3) 輝線は異常に広がっている。ドップラー速度に換算すると、 $\pm 500 \sim \pm 4500$ km/sec に相当する。

現在この定義を満たす星雲として、Seyfert が最初にあげた 12 個のうちの 8 個 (4 個は(3)の性質がないため除かれた) と最近発見された 3 個の合計 11 個**が知られています (第 1 表)。これらを形態的に分類すると、渦巻星雲が 9 個、楕円星雲、コンパクト星雲 (compact galaxy) が各 1 個ずつで、渦巻星雲のうち 1 つは互に相互作用をしあっている星雲群の中の 1 つです。また 3 個が電波星雲です。

定義の 3 つの性質のほかに、最近明らかにされた特徴として、次の事がらをあげることができます。

(4) 電波星雲である場合、電波源は星雲核に一致する。

(5) NGC 1275 の電波強度がセンチメートル波で時間的に変化する。8000 メガサイクルでは約 4 年半の間に 68% 一方的に増加している (第 1 図)。また 3C120 にも電波強度の変化が最近発見された。

(6) 核からの赤外線外放射が強い。2 色図にプロットしたのが第 2 図で比較のため QSO もプロットしてある。

(7) NGC 4151 は可視光が変光する。波長領域で異なるが数カ月の間に 1 等級近い変化をしている (第 3 図)。

第 1 表 セイファート星雲

| 星 雲 | スペクトル線の幅 (\pm km/sec) | | 特 徴 |
|------|-----------------------------|---------------------------------|------|
| | パルマー線 H_{β} | 禁 制 線 [O III] $\lambda 5000$ | |
| 楕円星雲 | Zw II 0430+05 | — | — |
| | NGC 1275 | 3000 | 2250 |
| | NGC 1068 | 1800 | 1500 |
| 渦巻星雲 | NGC 7469 | 2500 | 700 |
| | NGC 5548 | 4500 | 1000 |
| | NGC 4939 | — | — |
| | NGC 4151 | 3750 | 650 |
| | NGC 4051 | 1800 | 600 |
| | NGC 3516 | 4250 | 700 |
| | NGC 3227 | 2000 | — |
| 星雲 | VV 150 | — | — |

コンパクト星雲 }
電波星雲 3C120 } 電波強度
電波星雲 3C84 } が変化

弱い電波星雲 3C71

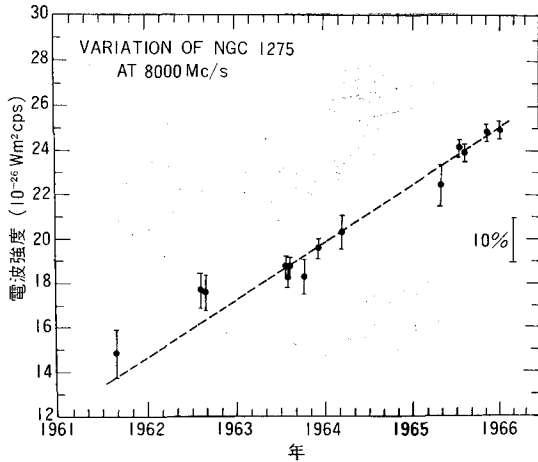
変光する

interacting galaxy

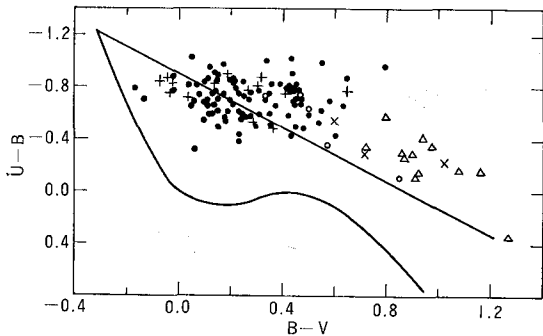
* 北海道大学理学部

N. Kaneko: On the Seyfert Galaxies

** さらに増え、7 月現在では 17 個



第1図 NGC 1275 の電波強度 (8000 Mc/s) の変化



第2図 セイファート星雲核の2色図
 ○ セイファート星雲 ● QSS + QSG
 × 非電波源のコンパクト星雲
 △ radio N galaxy

以上のセイファート星雲の特徴のうち、(3)~(7)は QSO にもまったくあてはまる性質です。ただ両者の違う点は QSO のスペクトル線が非常に大きな赤方偏位をしていることだけです。

3. 輝線の輪郭

輝線の相対強度から、核内の電離ガスの電子密度、電子温度、化学組成といった物理量は今までにだいたい調べられています。その結果から核構造を推定する仕事もなされてはおりますが、十分なものはまだありません。核の大気構造をさらに詳しく知るには、星の大気と同様輝線輪郭を解析すればよいはずで、そこでもう少し詳しくセイファート星雲の輝線輪郭を調べてみましょう。

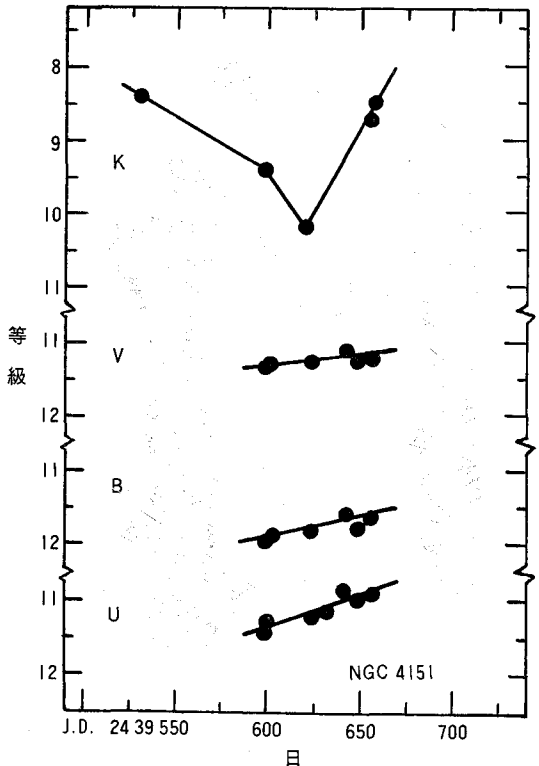
第1表には各星雲のバルマー線と禁制線の幅がドップラー速度で与えられています。第4図には Seyfert が観測した NGC 1068 と NGC 4151 の輝線輪郭が示してありますが、一見して次のような両者の違いが理解できます。

(1) NGC 1068 のバルマー線と禁制線は、輪郭とその

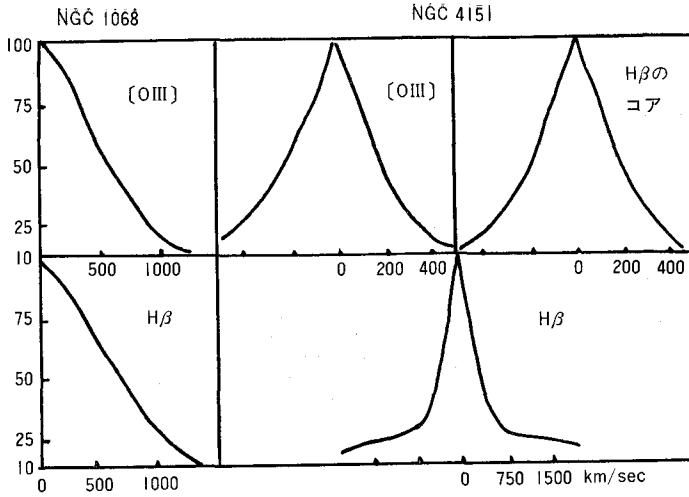
幅がよく似ている。

(2) NGC 4151 の場合、バルマー線は禁制線にくらべて数倍幅広く、その輪郭には禁制線に類似した中心部分の core と幅広いその wing の2成分が区別される。ここで、(1)と(2)の性質をそれぞれ 1068 型、4151 型(または core-wing 型)と呼ぶことにすれば、第1表に示したように、ほとんどの星雲が 4151 型となります。NGC 1275 は楕円星雲であるため、ただちに渦巻星雲の NGC 1068 と同一視できませんが、両方とも 1068 型で電波星雲ですので、輝線輪郭の型と電波の有無とに関係があるのではないかと想像されます。電波源の準星 (QSS) の 3C273 は禁制線が幅広いので 1068 型のように、非電波源の準星 (QSG) の Ton 256 は 4151 型ですから、上の対応が準星でも成り立っています。

また Seyfert は、バルマー線の幅広いものほど、星雲核が明るく、星雲の全光度に対する核の光度の比率も大きいという相関をみつめています(第5図)。これは、バルマー線に特有な wing の発達の数度合いと核活動とが密接に関係していることを示唆するものと解釈できます。そこで、4151 型を中心にして、セイファート星雲の核構造を調べることにしましょう。



第3図 NGC 4151 の変光
 UBVK はそれぞれ 3600, 4400, 5500, 22000Å 近くの等級で、ユリウス日 J. D. 2439550 は 1967年2月28日。



第4図 NGC 1068 と NGC 4151 の輝線輪郭
 NGC 1068 の輪郭は対称なので片側のみを示す。NGC 4151 の上と下の図ではスケールが異なることに注意。

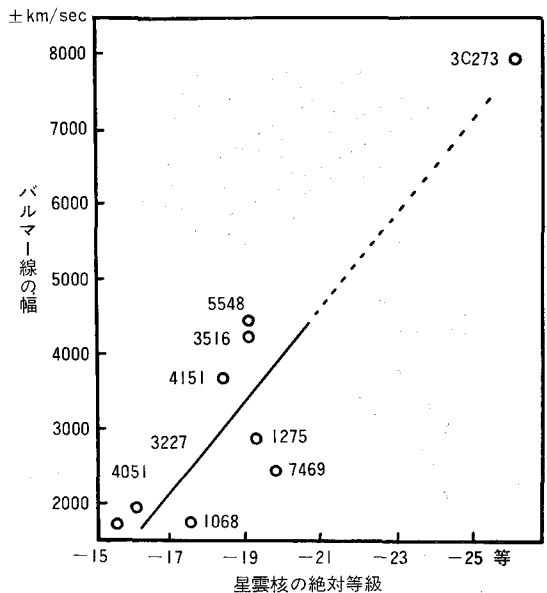
4. 核モデル

セイファート星雲の核構造を考えると、まず問題になるのは、スペクトル線の異常に広い幅をどう解釈するかということです。Woltjer は、セイファート星雲の核はかなり定常的なものであろうと考え、輝線の幅を核の急速な回転によるものと説明しました。つまり彼のモデルでは、核の中心部分は星の密度が非常に高いので高度に励起された禁制線とバルマー線の core を放射し、一方核の外側では星の放射エネルギーが弱まるため禁制線は励起されず、回転は中心部分より速いのでバルマー線だけが幅広い wing となって放射されます。これに対して Burbidge 夫妻と Sandage は、無秩序運動をするガス雲のドップラー効果によって輝線の幅がつけられるに違いないと主張しました。この考えの根拠は、スペクトル線のむらがいかに運動しているガス雲によってつけられたように見えるからということです。さらにバルマー線の wing はガス雲をとりまく外側のガス殻が数 1000 km/sec の速度で膨張していれば説明できると述べています。ところが、Woltjer と Burbidge のモデルのどちらにも難点があります。つまりどちらのモデルでも、少なくとも低い励起の禁制線にはバルマー線のような wing が生じるはずなのに観測では全くありません。禁制線は密度が高くなれば放射されにくくなりますので、核の外側からバルマー線のみを放射させようとするれば、外ほど密度が高いという極めて不自然な核モデルを考えなければなりません。

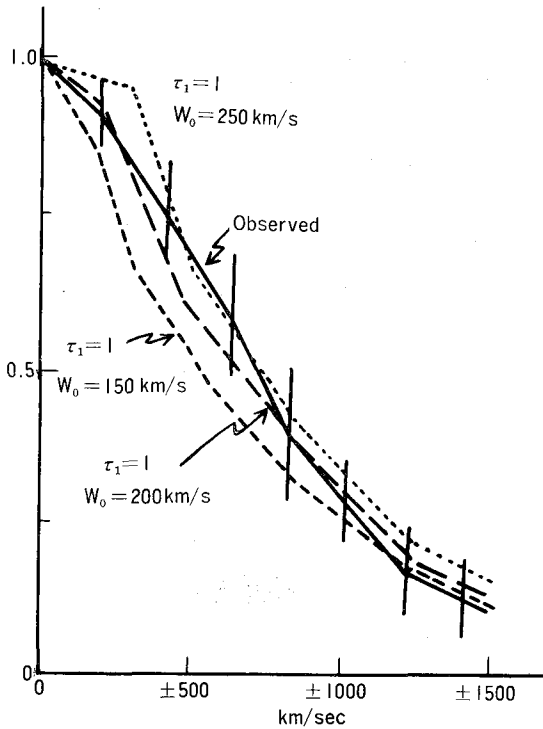
この困難をさけるために Dibaj と Pronik は、ガス雲には2種類あると考え、低密度 ($N_e \leq 10^4 \text{cm}^{-3}$) のガス雲は数 100 km/sec の速度で運動しているのでバルマー

線の core と禁制線は同じ幅を持ち、禁制線の放射を許さない程度に高密度 ($N_e \geq 10^7 \text{cm}^{-3}$) のガス雲が数 1000 km/sec で運動しているためバルマー線のみ wing がつけられると説明しました。彼らの計算によると低密度と高密度のガスの総体積はそれぞれ直径が1~10パーセクと0.1パーセクの球の体積に相当します。これだけのガスがたくさんのガス雲にわかれて、それぞれ数10パーセクと数パーセクの領域をしめていると彼らは考えています。ところが NGC 5548 のバルマー線の core ではガス雲の存在を示すと思われるような不規則な輪郭になっていますが、wing の輪郭はなめらかです。このため輝線幅がガス雲の運動のみによってつけられているとは考えにくくなります。

星雲核内の電子温度は約 15000 度なので、自由電子が約 1000 km/sec の速度で運動しています。その電子で輝線の光子が散乱されれば 1000 km/sec の速度に相当する波長だけずれる、つまりスペクトル線が数 1000 km/sec 程度に広がることになります。このため筆者たちは、輝線が電子散乱を受けてどのような輪郭になるか実際に計算してみました。第6図は筆者たちが理論的に求めた輪郭を NGC 1068 のバルマー線と比較したもので、1500



第5図 バルマー線幅と核等級の相関
 セイファート星雲で成り立つ相関の延長上に QSO の 3C273 がのる。

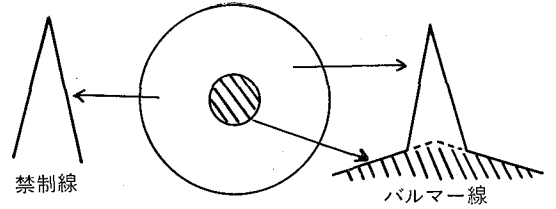


第6図 理論と観測との比較
波線は理論、実線は観測の輪郭で W_0 はガス
の運動速度。 $W_0=200$ が最もよく合う。

km/sec の幅が電子散乱を考慮すればガスの運動は ± 200 km/sec で十分説明できることを示しています。同様に wing の幅も数回の散乱で説明できて、そのガス領域の大きさは約 0.1 パーセクと計算されます。これは Dibaj 達の結果とよく合いますので、高密度領域はたくさんのガス雲にわかれた状態にはないことになります。第7図は筆者たちの考えている核モデルで、中心の高密度領域をニュークレット (nuclet) と呼んでいます。また電子散乱の効果は wing では決定的ですが、禁制線とバルマー線の core でもかなりきいていられると思われま

す。このモデルは NGC 4151 に発見された変光と深い関係があります。光が核を横切るために要する時間よりも短い期間には、光度の変化がならされて、変光が観測されません。第3図をみると NGC 4151 は1カ月ぐらいで変光していますから、変光をおこす領域の大きさは 0.1 パーセク以下となり、これは nuclet とほぼ一致する大きさです。したがって変光は nuclet で起こっているでしょう。NGC 5548 のバルマー線の輪郭は、NGC 4151 のそれと特によく似ていますので、この核も変光するに違いないと筆者たちは予想しています。

QSO の 3C273 も変光のしかたからその大きさは 0.15 パーセクぐらいと考えられていますが、バルマー線の幅 ± 8000 km/sec を電子散乱によるものと解釈すれば、バ



第7図 4151 型の核モデル
nuclet (斜線部分) はバルマー線の wing (斜線部分) を放射し、核の外側は core と禁制線を放射する。

ルマー線を放射する領域は約 0.1 パーセクとなり、上の大きさとよく合います。QSO の構造もセイファート星雲の核構造とよく似たものなのでしょう。

5. セイファート星雲核の成因

セイファート星雲核は他の星雲の核よりも多量のガスを含んでいます。これは多分、ガスが星雲核の外から供給されているためでしょう。第4図からわかるように、NGC 4151 の禁制線とバルマー線の core は、頂点が長波長側にずれた非対称な輪郭をしています。この原因の1つとして、NGC 4151 の低密度領域のガスが約 75 km/sec の速度で核の中心に向かって落ち込んでいることが考えられます。NGC 5548 のバルマー線にも同様の非対称な輪郭がみとめられます。大谷氏たちは、セイファート星雲によく似た星雲の NGC 4258 の観測をしておりますが、これもガスが中心に向かって落ち込んでいるらしいとのこと。おそらく、このようなガスの落ち込みによって星雲核が成長し、NGC 4258 から NGC 4151 へと進化するのでしょう。

Nuclet 内のガスは高密度であるため、星に与えるガスの影響は小さくないと思われま

す。坂下氏の推定では、星雲核内のガスの密度が 10^7cm^{-3} を越えると、その中を運動していた星は約 1000 万年で静止してしまいます。このような状態になれば、星は核の中心に落ち込みますので、星どうしが激しく衝突しあいます。多分この結果として星雲核の爆発が起こるのでしょ

う。NGC 1068 の禁制線とバルマー線は類似した輪郭をしていますので、NGC 4151 などにくらべるとガスはかなり一様な分布をしていると思われま

す。これは星雲核の爆発によって NGC 4151 の nuclet がこわれ、NGC 1068 に進化すると解釈できそうです。NGC 1068 の核に含まれるガスは約 300 km/sec の速度で膨張していますが、これは上の考えを裏付けるものかもしれません。