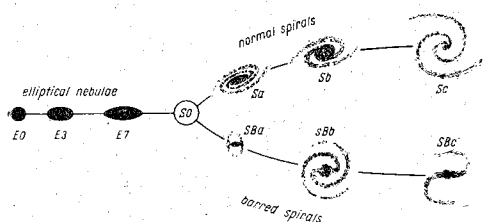


楕円型星雲

高柳 和 智*



第1図 ハッブルの標準分類

ハッブルの分類

今日銀河系外星雲と呼ばれているものが、われわれの銀河系と同じような恒星の大集団、つまり、別の銀河系であるということがはっきりしてきたのは1920年頃である。いろいろな形に見えているこれらの星雲を、その見かけ上の形態で分類したのは、1926年のハッブルの論文に始まるといえよう。その後、ホルンベルグ、ファン・デン・パー、モルガン、ボークルールなどによっていくつかのくわしい分類が試みられている。ここでは、古典的ではあるが、最も基礎的なハッブルの分類について、まず最初に簡単にふれておこう。

見かけ上いろいろな形をもった銀河系外星雲も、大別すると規則型と不規則型に分けられる。さらに、規則型は第1図に示すような系列に分類される。E0からE7までが楕円星雲で、S0以後は渦状星雲と呼ばれるものである。これらの渦状星雲は、普通の渦巻き型(図中、上の系列)と、棒をもつ棒渦巻き型(下の系列)に分けられ、右へ行くほど、つまり、a, b, cと進むにつれて、いずれも渦巻きが開いている。楕円型と渦巻き型の中間に位置するS0型は、渦巻きの芽生えがかすかに認められるものである。古典的進化論では、銀河系外星雲は楕円型から渦巻き型へ進化すると考え、左の方を早期型、右の方を晩期型と呼んだ。現在ではこの考えは通用しなくなったが、早期型とか晩期型とかいう呼び方は今でも時々聞かれる。

第1表

型	E	SO	S	Irr	Pec	All
n	199	329	934	52	14	1528
f(%)	13.0	21.5	61.1	3.4	0.9	100

(G. de Vaucouleurs)

不規則型(Irr)は、大小マゼラン雲で代表される不定形のもので、先の系列のいずれにも入らないものである。全天に分布しているこれらの星雲の度数分布は、ボークルールによれば第1表のようにになっている。この表のSは渦巻き型全部で、全体の61%を占め、圧倒的に多い。Irrは不規則型、Pecは、いずれにも分類されない特異なものを意味する。以後、全体の13%を占める楕円型星雲についてながめよう。

偏平度とその度数

楕円型星雲は、一般には楕円(円も含む)に見えているので、次の式で定義される偏平度nを大文字のE後に付ける習わしになっている。

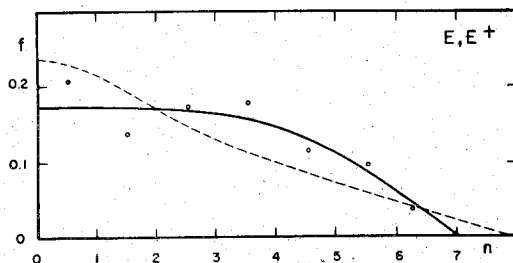
$$n = 10 \left(1 - \frac{a}{b} \right) \quad a: \text{長軸} \quad b: \text{短軸}$$

実際に観測されるものはE0からE7までであり、その度数分布は第2図中の実線で表わされている。もし真の偏平度が0から7のものまで一様に存在し、向きはでたらめであると仮定すれば、見かけの度数分布は図中の破線のようなになるはずである。これと先の観測結果を比較すると、n=3~6の間では、明らかに観測結果が理論値を上まわる。このことは、楕円型星雲が偏平度に対して一様な分布ではなく、E3~E6あたりのものが割合に多いことを物語っているものと考えられる。

力学的にみて、楕円型星雲の偏平度と、その星雲の回転の大きさには当然正の相関関係が予想される。渦状星雲と異つて、楕円星雲の回転は、現状ではほとんど観測できないので、全角運動量などを取扱う場合には、この偏平度が大きな手がかりになる。

輝度・色・分光エネルギーの分布

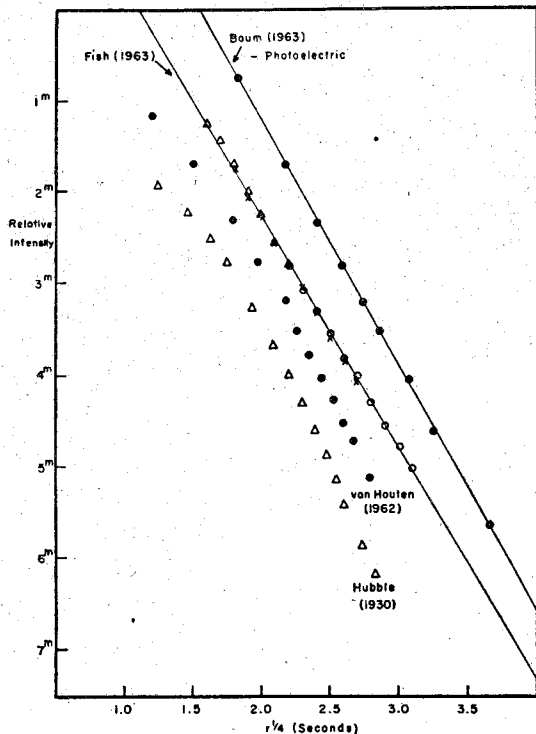
表面輝度分布は直接観測することができ、しかも、楕円型星雲における質量の空間分布や、その中の星の運動



第2図 偏平率nの相対度数分布
実線: 観測値 破線: 理論値

(G. de Vaucouleurs)

* 京大理
K. Takayanagi; Elliptical Galaxies.



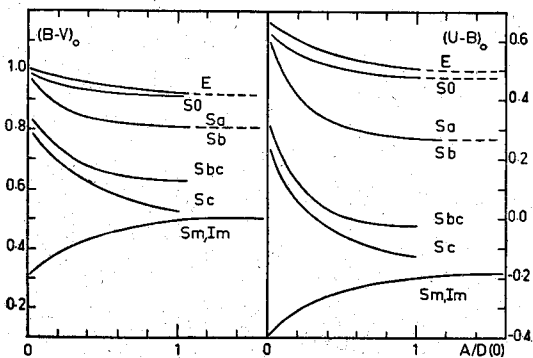
第3図 楕円型星雲の表面輝度分布 (R. A. Fish)

を調べる上で最も基礎的な資料の一つである。ハッブルは、1930年に写真を用いていくつかの楕円型星雲の表面輝度分布をくわしく調べ、次の実験式でよく表わされることを示した。

$$I(r) = \frac{I_0}{(1+r/a)^2}$$

I_0 : 中心輝度
 a : $I_0/4$ までの中心距離

その後、幾人かの人達がハッブルと同じように写真を用いて楕円型星雲の表面輝度をくわしく調べているが、特にボークルールとデニソンは、外側の領域でハッブルの法則より急速に暗くなることを見出した。さらに、ボークルールは次に示す式の方が、ハッブルの法則よりよく観測と一致していることを示した。

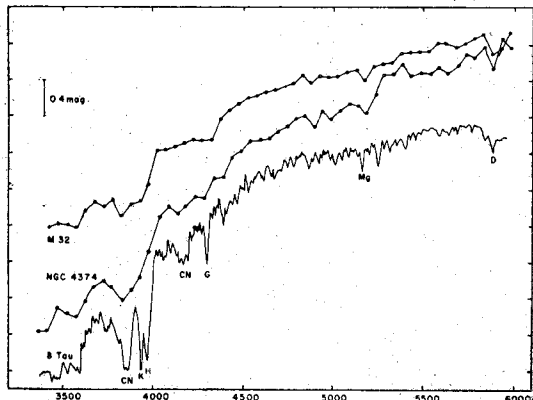


第4図 銀河系外星雲の色指数分布 (G. de Vaucouleurs)

$$\log I(r) = -Ar^{1/4} + B \quad A, B: \text{定数}$$

最近、バオムは光電管を用いていくつかの楕円星雲の表面輝度分布を観測し、ボークルールの1/4乗法則にかなりよく合致していることを示した(第3図)。ただ、中心附近や極端に外側ではこの法則からずれることはいなめない。色指数の分布についてはごく少数のものを除いてまだくわしい観測がないが、ボークルールがダイアフラムの口径を変えて光電的に測光した結果がある(第4図)。それによると、楕円星雲では(B-V)、(U-B)のいずれも、ダイアフラムを上げたもの(したがって星雲の外側まで含む)ほど青くなる傾向をもっている。ということは、外側ほど青い星が多いことを示しているものと思われる。この傾向は渦状星雲で一層強く表わされる。一般的には晩期型ほど強いといえる。ただ、不規則型(図中、 S_m, I_m)だけは例外で、中心ほど青い傾向をもっている。

さらに進んでこれらの星雲を構成している星の種類を知るためには、その部分の分光エネルギー曲線を知る必要がある。1948年、ステッピンスとホイットフォードは、近くにある8個の銀河系外星雲について6色測光で観測した。その後、ティフトやバオムなど幾人かの人達が、大体3500Åから11000Åにおよぶ波長域で多色測光を行っている。これらの観測結果からは、楕円星雲の光の大部分はかなり低温の星によっていることがわかった。モルガンとメイヨールは、大型の楕円星雲(gE)の光の主な源がK型の巨星であることを示している。また、コードは光電走査分光器の観測から、M32のエネルギー曲線は晩期型巨星のものによく似ていることを見出した。第5図は、オークが観測したエネルギー曲線である。楕円星雲のスペクトル型はほとんどG型を示している。観測は主に中心附近に限られているが、楕円星雲では色指数が中心附近と外側とあまり変わらないので、上の結果は星雲全体について当てはまるものと思われる。



第5図 M32 (E2) と NGC 4374 (S0) のエネルギー (J. B. Oke)

第2表 $\lambda 3727$ [O II] の輝線をもつ銀河系外星雲

型	Mt. Wilson	Lick
E	18 (%)	12 (%)
SO	48	27
Sa	62	45
Sb	80	62
Sc	85	68

(D. E. Osterbrock)

ガスの存在

スペクトルに現れる輝線や吸収線およびラジオの観測から、一般に渦状星雲には、かなりの量のガスの存在が認められている。これに反して、楕円型や SO 型は種族 II の星からできていて、ガスはほとんど存在しないものと考えられていたが、いくつかのものにはガスの存在が観測されている。たとえば、 $\lambda 3727$ [O II] の輝線が認められるものの割合は、オスターブロックによれば第2表ようになる。この輝線は一般に散光星雲とか H II 領域の特徴とされているものであり、この線が銀河系外星雲に見えていることは、その中に星間ガスが存在していると考えてよい。第2表から、楕円型の約 15% のものにこの線が観測されているだけで、渦状星雲に比べるとかなり少ないことがわかる。 $\lambda 3727$ は正確には 2.8 \AA の間隔の二重線であるが、一般には内部運動が大きいために分離していない、NGC 4278 (E) におけるこの線は、一つの幅広い線として観測されている。幅は 12 \AA で約 900 km/sec の視線速度に相当する。また、NGC 4486 (M87) は中心附近にジェットをもった特異な楕円型星雲で、かなり強い電波を出している星雲だが、ミンコウスキーによれば、これの $\lambda 3727$ は二つの山をもった線でその間隔は 10 \AA あり、視線速度の違いは 700 km/sec である。この線を出している場所のごく中心附近の

第3表

Object	ハッブルの型	m_{pg}	ラジオ指数 $m_r - m_{pg}$
3 C 33	EO	18	-11.4
3 C 298	EO	18	-10.1
3 C 327	SO	17	-9.4
NGC 6166	E	14	-6.0
NGC 4486	EO	10	-5.9
3 C 66	E	13	-5.3
NGC 4261	E 3	11	-4.6
NGC 1218	E	13	-4.4
NGC 5128	Ep	6	-4.0
NGC 533	E 3	13	-3.6
NGC 4374	E 1	10	-2.0
NGC 584	E 4	11	-1.9

(D. E. Osterbrock)

小さな領域で、例のジェットとは直接の関係はないらしい。電波とこの線とは発生の上から何らかの関係があるのかもしれないが、真疑のほどはまだわかっていない。

最近の電波望遠鏡の発達によって、銀河系外星雲の電波観測がしきりに行われるようになってきた。電波源の強さは普通 158 Mc での値で代表させ、次式で定義されるラジオ等級 (m_r) を用いる。

$$m_r = -53.45 - 2.5 \log S_{158}$$

($S_{158} \text{ Wm}^{-2}(\text{c/s})^{-1}$ は 158 Mc における光束密度)

また、測光における色指数に相当するものとして、ラジオ指数 (R) が定義されている。これは上で定義されたラジオ等級と写真等級の差で表わされる。つまり、

$$R = m_r - m_{pg}$$

このようなラジオ指数の観測はいろいろな星雲についてなされているが、ここでは楕円型についてだけ取り上げ、ラジオ指数の大きいものから順に並べて第3表にあげた。

これらの電波発生の機構については、まだ決定的解釈がないので、はっきりしたことはいえないが、現在の多くの人は、磁場の中の相対論的電子に起因した非熱的電波だろうと考えている。これが正しいとすれば、これらの星雲における磁場の問題などが考えられる。今後の観測と研究に期待したい。

ポテンシャルエネルギーと質量

先に述べたように、ポークルールはほとんどの楕円型星雲の表面輝度分布は r の $1/4$ 乗法則によく合致することを示した。この輝度分布がそのまま質量分布を表わしている、つまり M/L がどこまでも一定とすれば、一つの星雲の全ポテンシャルエネルギーは次のフィッシュの式で表わされる。

$$\Omega = -0.35 \frac{GM^2}{R} \left(\frac{a}{b} \right)^{2/3}$$

(G : 万有引力の定数 M : 全質量)
(R : 有効半径 a/b : 長軸と短軸の比)

ここで、全ポテンシャルエネルギー Ω を求めるためには、 M , R , a/b を知らなければならない。 a/b は写真観測からすぐわかる。 R は全体の半分的光を出す円の半径でポークルールの $1/4$ 乗法則にしたがっているとすれば、 $\log [I(r)/I(o)] = -3.33$ を満たす r として求めることができる。問題は全質量の M である。次にこれについてふれておこう。

一般に、渦状星雲には輝線を出す斑点がかなり外側まで観測できるので、それを用いて回転曲線が求められる。回転曲線がわかると、モデルを作ってその全質量 (正確には回転曲線のわかっているところまでの内部質量) が計算される。しかし、楕円星雲では回転曲線が観測から出せないで、別の方法を用いる。楕円星雲のスペクトルには、各星自体に起因した吸収線が星の運動の

第 4 表

モデルの種類	$\Omega = cM^x$ としたときの x の値
シンクロトロン放射	2.33
衝突 (Collision)	2.00
全放出	1.50
ホイルの分裂モデル	1.00
フィッシュの観測結果	1.30~1.80

ために幅広くなっているものが観測され、この幅から星雲内での星のランダムな運動を出すことが可能である。一方、星雲自体が定常状態であれば、これには次のポリアル定理が使える。

$$2T + U = 0$$

(T : 運動エネルギー U : 位置エネルギー)

ここで U は先に述べた Ω にほかならないし、 T は吸収線の幅から求めた星のランダム運動から与えられる。ただし、楕円星雲のように、回転がほとんどなく、星の軌道は十分混合されていなければならない。以上のことを考えて、全質量は次式で与えられる (フィッシュ)。

$$M = \frac{8.6 \langle \sigma^2 \rangle}{G} \left(\frac{b}{a} \right)^{2/3}$$

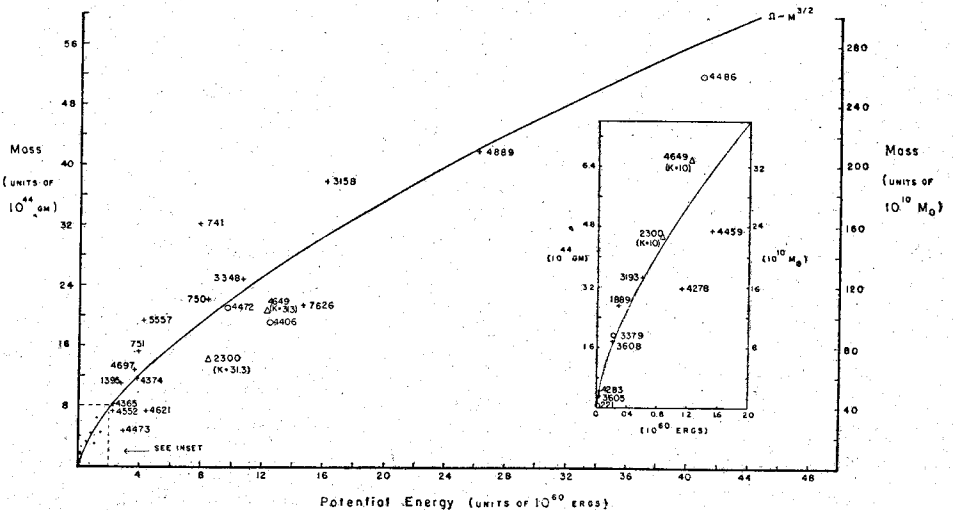
($\langle \sigma^2 \rangle$: 中心における速度分散)

($\langle \sigma^2 \rangle$ については、ミンコウスキーがいくつかの星雲 (大部分 E 型) について測定しているので、この値と先に述べた R , a/b , G の値から M が計算できる。しかし、 $\langle \sigma^2 \rangle$ のわかっているものはわずかしかないので、この数少ないもので M を計算し、 M/L の値を求める。ポベダによれば、 M/L は M の 0.27 乗に比例するといふことだが、実際にあたってみるとかなりのばらつきがあり、ここで議論している楕円型星雲の範囲 (10^3 倍くらい) では、むしろ $M/L = \text{定数}$ として差しつかえない。フィッシュは、 M/L のわかった 5 個の平均値 31.3 を用いて、29 個の楕円型星雲の質量 M とポテンシャルエネルギー Ω を計算し、

第 6 図の結果を得た。図中の曲線は、

$$\Omega = 9.6 \times 10^{-8} M^{3/2}$$

で、誤差の範囲でよく観測結果を表わしている。質量が $3 \times 10^9 M_\odot$ から $3 \times 10^{12} M_\odot$ にわたって、上の関係が成立することは、大部分の楕円型星雲が、同じ物理学的過程を経て形成されたことを物語っているもの



第 6 図 楕円型星雲の質量—ポテンシャルエネルギーの関係 (R. A. Fish)

と思われる。そこで、フィッシュは、これらの星雲の形成過程で考えられる 4 つのモデルについて、現在のポテンシャルエネルギーの質量依存度を調べた。その結果だけを第 4 表にあげる。ここで、シンクロトロン放射モデルだけは $\Omega = cM^{2.33}$ となり、観測結果からかなり離れるが、他 3 つのモデルは誤差の範囲で大体観測と合っている。これらの過程がどのように起ったかは判定できないが、銀河系外星雲の形成をさぐる手がかりにはなりそうである。

ポークルールの $r^{1/4}$ 法則がほとんどの楕円星雲について成り立つことは先に述べたが、これはいかなる理由によるものであろうか。この問題にはまだ正しい解答が与えられていない。しかし、いろいろと力学的考察がなされているので、それについて簡単にふれておこう。

アゲキアンは、各天体が重力だけで結びついていて、全体が回転している集団では、回転速度と星の平均のランダム運動の比がある値を境にして、その集団は球状に進化するか、円盤状に進化するかに分れることを運動学的に示した。ほとんど回転のない楕円型星雲が球状に近い集団であり、回転の速い渦巻き型星雲が円盤状になっている観測事実は、アゲキアンの理論の正しさを表わす一面であろう。

また、ベルツァー、ガモフ、ケラーは、楕円星雲がハッブルの法則や、ポークルールの法則のような表面輝度分布をもつためには、それを構成している粒子が十分な回数の衝突をした結果であるから、これらの星雲がまだガスであった時代にすでに現在の形は形成されていたはずであると考へた。さらに、ほとんど回転のないこのようなガス体の中で星が生まれたとき、ガス圧の支えを失ったこれらの星は中心に向かって落ちる。したがって、星は垂直運動をしているとして楕円星雲の密度分布などを論じている。その他にも力学的研究はあるが、まだ十分説明できるものはない。この分野における今後の研究に期待したい。