

銀河円盤の湾曲

佐々木敏由紀*

1. はじめに

満天の空に雲と見まがう程に見事に横たわる天の川は、昔から人の心をとらえ夏の夜の風物詩となっている。天の川の中の微かな光を出す星々を丹念に数えあげ、天の川がレンズ状に星が集めた天体であることを最初に示したのはハーシェル (1784) であった。しかし、天の川の姿を正しく知るには、星間塵による吸収の少ない電波天文学の誕生までそれから一世紀半以上待たねばならなかった。天の川から放射される中性水素線を初めて検出してから全天の銀河面の構造が明らかになるまで6年を要した。1957年のことである。近くの系外銀河に見られるように天の川の円盤も渦巻模様に見える平坦な薄い円盤であった。特に、太陽以内の銀河面はそうであった。同時に、太陽以遠の銀河面はその平坦な薄い内部円盤に対して系統的に円盤の垂直方向にずれていることがわかった。銀河中心、太陽を結ぶ線を基準に、北天側 ($0^\circ < l < 180^\circ$) で北銀極の方に、南天側 ($180^\circ < l < 360^\circ$) では南銀極の方にかなり対称的に湾曲していた。南天側の湾曲した方向にはマゼラン星雲があり、すかさず、マゼラン雲による潮汐効果によって銀河面の湾曲が生成するという説明が、カー、パルク (1957) によってなされた。これが銀河円盤の湾曲の観測の始めであり、その成因説の第一号である。

光学観測によると渦巻銀河 (棒渦巻銀河も含む) のガス円盤は薄く (数百 pc の厚み、系全体の大きさの数%以下)、かつ平坦なものが多い。それ故銀河の理論モデルを構築する際には無限に薄く無限遠まで平坦な面を仮定する場合が多い。だが、近年の電波干渉計を用いた高感度で高空間分解能の電波観測によると渦巻銀河には、光学観測で検出される星の円盤 (光学円盤) より大きい中性ガス円盤があり、そのガス円盤が天の川銀河と同様に湾曲している例が多く見だされてきている。銀河円盤の湾曲は天の川銀河だけの特殊な現象ではなく、渦巻銀河に共通するかなり一般的な現象と見做せるようになってきた (ボスマ, 1981)。

ここでは、湾曲している円盤を持つ銀河の観測をまとめ、湾曲の成因についての諸説について紹介しよう。併せて、筆者によってなされた湾曲円盤の光学的検出の意味するところを述べ、銀河進化を明らかにする上での役割に触れたいと思う。

* 京大理 Toshiyuki Sasaki: Bending of Galactic Disks

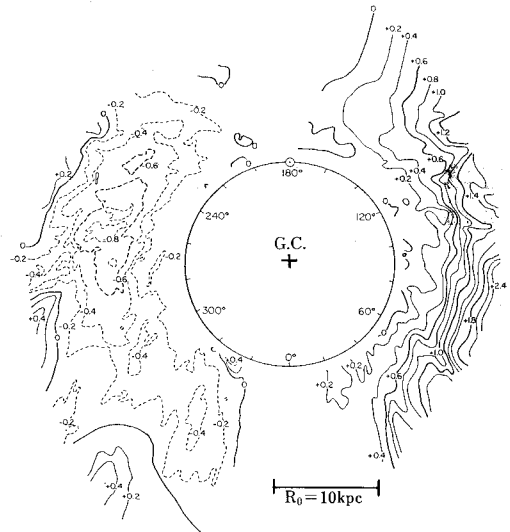


図1 天の川銀河の中性水素の銀河面からのずれ (kpc). 北銀極方向が正。北天では一様に正にずれているが南天では、銀河面の上下に波打っている。(Henderson et al. 1982 Ap. J., 263, 116)

2. 銀河円盤の湾曲の観測

天の川銀河での円盤の湾曲については既にふれた。最近完了した南天の銀河面の詳細観測を加えた解析によって明らかになった、中性水素分布の重心位置の銀河面からのずれを図1に示す。大局的には、北天側では銀河面の上に、南天側では下に湾曲している。北天側では湾曲による銀河面からのずれは銀河中心からの距離 R に従って急激に増えて、 $R=20$ kpc, $\phi=70^\circ$ 方向で 2.4 kpc に達する。ここで ϕ は銀心経度で、 $R=\infty$ で ϕ が銀経となる。一方、南天側では $R=17$ kpc, $\phi=260^\circ$ で -850 pc となるが、 R が大きくなると銀河面に近づき、 $R>24$ kpc で銀河面の上下に銀河回転方向に波長 14 kpc 程度、振幅数百 pc で波打っている。この図上で、マゼラン雲は $R=38$ kpc, $\phi=265^\circ$ に位置し、下側に最もずれている方向の延長線上にあたる。

干渉計によって分解能が良くなったとはいえ見かけのサイズが大きくて明るい銀河に限られてはいるが、系外銀河においても電波観測により次々と銀河円盤の湾曲を示す渦巻銀河が見出されてきている。銀河面を上から見るように観測する (銀河面法線と視線方向のなす角 i が小さい) 銀河では、主としてその速度場の銀河回転からのずれとして湾曲が検出される。図2に速度成分として

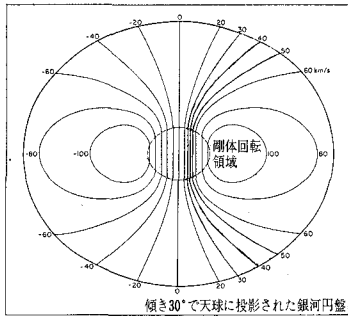


図 2 傾き 30° で天球に投影された、回転運動のみを持つモデル銀河の速度場。中心部は剛体回転、外側では非一様回転。短軸方向は速度 0 で、対称的である。

銀河回転のみを持つモデル銀河を傾き $i=30^\circ$ で観測した際の速度場を示す。銀河回転としては、中心部で速度が直線的に増え最高回転速度 250 km/s に達したあと、ゆっくりと減少するように与えてある。図から明らかのように回転運動のみであれば短軸方向には視線速度は零で短軸に関して対称性を示す。中心部の剛体回転部は短軸に平行な等速度線となる。M83 で観測された速度場は図 3 のようであった。光で観測される銀河は中心部の半径で 1/2 以下の部分に相当する。その部分での速度場は普通であるが、その外側では回転運動からのずれを示している。南側に伸びている腕を除けばよい対称性を示し、回転運動からのずれは局所的な運動ではなく大局的なふるまいであり、外縁部での銀河面の湾曲と見做されている。ログスタド他 (1974) は銀河面を同心リングでモデル化し、回転曲線、密度分布を与えることにより各リングを銀河面に対して傾けて中性水素の分布、速度場を共に説明しうることを示した (図 4)。このモデルでは銀河面は半径 $4'$ まで平坦でそれ以遠で湾曲し、半径 $16'$ で傾き $i=30^\circ$ となっている。速度場の観測によ

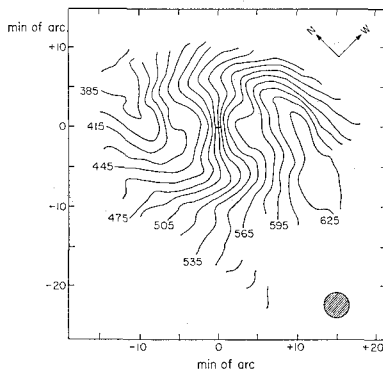


図 3 M83 で観測された中性水素の速度場 (km/sec)。図 2 と比較することにより外側で回転運動以外の速度成分があることがわかる。(Rogstad et al. 1974 Ap. J., 193, 309)

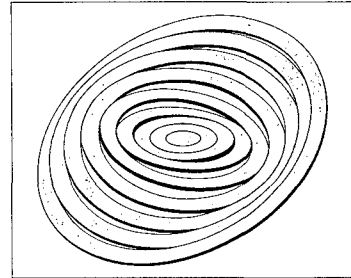


図 4 M83 で観測された中性水素の分布、速度場を説明するモデル。銀河円盤は 9 個の輪に分割され、それぞれが少しずつ傾いて湾曲する円盤を成す。(Rogstad et al. 1974)

て湾曲の存在を示すにはモデルの介在が不可欠であり、銀河形状の真円からのずれや非対称性、中心部での膨張運動や局所的な運動があると問題を複雑にする。

銀河面を真横から観測することができれば、銀河面の湾曲は直接的に検出することができる。そのためには、高空間分解能の観測が必要である。サンシシ (1976) は 5 つの横向き銀河について中性水素分布を明らかにした。そのうち 4 つの銀河 NGC 4244, 4565, 4631, 5907 については円盤の湾曲が検出された。NGC 5907 で検出された横向き銀河での典型的な湾曲を写真 1 に示す。最大回転速度に相当する 2 速度帯における中性水素分布を等高線 (輝度温度 2, 4, 8, 12, 16, 20 K) で表わして



写真 1 NGC 5907 の 2 つの速度成分に対する中性水素分布。光学観測による写真の上に重ねてあるが、中性水素の分布は、光学円盤以上に伸びて存在し、光学円盤の端あたりから湾曲がはじまっている。中心から $8'$ のところで $1.6'$ の湾曲 (距離 11 Mpc とすると、それぞれ 26 kpc と 5 kpc)。上が北、左が東。(Sancisi 1976 A. A., 53, 159)

ある。重ねて示してある銀河写真はパロマー山シュミット望遠鏡で撮影したものである。この銀河では、湾曲が検出された上記4つの銀河のうち最大の湾曲を示し、銀河中心から8'のところでは1/6の湾曲を示す。NGC 5907の距離を11 Mpcとするとそれぞれ26 kpcと5 kpcである。最近の高感度な観測では湾曲するガス円盤がもっと遠くまで広がっており、湾曲は最大のずれを示したあと増加が止まり長軸方向と平行になるか、むしろ、銀河面に近づく徴候すら見せている(サンシシ, 1983)。ともかく速度場から推定した系外銀河の湾曲(これをボスマに従って運動学的湾曲といい、直接的な検出と区別しておこう)の存在がこれまで確立したことになる。この観測はそれのみにとどまらず、その成因についても議論を投げかけた。我々の近傍で孤立している銀河は少ない。さがせば近くに銀河を伴っている銀河が多い。湾曲を示す銀河もそうである。天の川銀河には大小マゼラン雲が湾曲する円盤の延長線上に存在する。後で見ると、このことが湾曲の成因として、伴銀河の近銀点通過時の潮汐効果によるという説を広く受容させてきた。NGC 5907にも近傍に同程度の明るさの銀河 NGC 5866, 5979がある。その間の距離と空間運動から推定して近傍通過に要する時間は 4×10^9 年である。この時間は、ハンター、トゥームレ(1969)が示した湾曲の持続時間(潮汐力による銀河面のずれの位相が一致して湾曲として観測される時間)の 5×10^8 年よりはるかに長い時間であり、伴銀河の近傍通過による潮汐力以外の成因、あるいは湾曲の持続化の機構の必要性を示した。このサンシシによる横向き銀河の観測以降、湾曲の成因についての諸説が展開されるようになる。

銀河を構成するのは水素ガスのみではない。星成分が質量的には多くを占めている。そこで翻って、光学観測による湾曲の検出について見ていこう。

直接写真を視察することによって星の円盤の湾曲、傾いたダスト・レーンが横向き銀河であれば容易に認められる。前者の例は、NGC 4762であり後者はNGC 3190, 5866である。銀河の回転曲線を求めるためのスペクトル観測によって回転速度からのずれが1960年代にバービッチ他によって指摘され、銀河面の湾曲もその原因の一つとして示唆されてきた。また、リンデンベール(1965)は湾曲の成因を論ずる際、湾曲例として渦巻銀河と棒渦巻銀河の中間的性質を示すいくつかの銀河をあげた。内側と外側の円盤構造の軸比が異なることは、円盤が真円と仮定すると外側の円盤が湾曲を示していることになると述べた。

しかし、ダスト・レーンやスペクトル観測によって速度場測定に用いられる電離ガス領域はもとのガス円盤の反映であり、湾曲の成因との関係で興味を持たれる星の

円盤の湾曲を示すわけではない。また、軸比の変化に基づくリンデンベールの例は内部円盤が楕円形状であれば湾曲を考える必要もない。光学観測に基づく星の円盤の湾曲の確かな例は少ない。特に、中性水素での湾曲は、光学円盤の更に外側で検出されている。光と電波による湾曲の直接的な比較ができる程暗い部分までの光学観測が行なわれている銀河は極く少数である。

最近になってイナネン他(1982)はM31の黄色と赤色の2色による直接写真観測を行い星の円盤の湾曲を示した。写真2は彼らによる赤色乾板の硬調プリントである。湾曲はガス円盤と同じ方向に起っているが、星の湾曲の方がより大きい。天の川銀河については、星の空間分布を調べることにより湾曲のふるまいを調べることができるが星間吸収のため困難が大きい。それでも南天竜骨座領域のOB型星の空間分布より中性水素と同じ湾曲をグラハム(1970)が示した。しかし、カシオペア座領域でのM型巨星の表面分布より、古い種族の星の円盤では湾曲が見られないことを示唆する結果が市川・佐々木(1981)によって発表されている。サンシシ(1976)によってガス円盤の湾曲の直接観測の行なわれた横向き銀河 NGC 4565, 5907について、光での観測によってその両端でわずかに湾曲を示す徴候が得られている。

近くに大きな銀河を伴う銀河では光でも湾曲を示すものは多い。NGC 3190, 3623, 3628, 4762, 5403がそうである。これらは明らかに潮汐効果に起因すると思われる。表1に光、電波での観測により湾曲が検出されている銀河の一覧を示しておいた。互いに接触していたり共通な外被で覆われていたりする銀河(M81, 82など)は

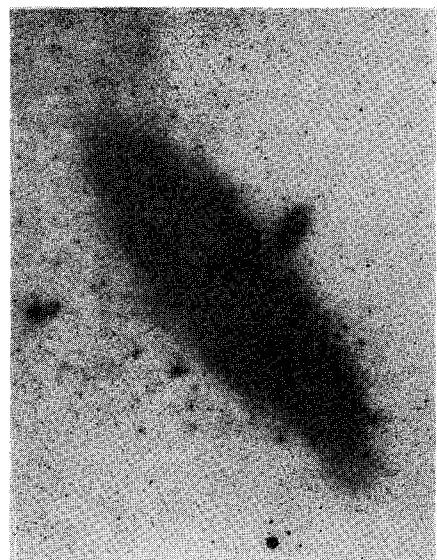


写真2 アンδροメダ星雲 M31 の長時間写真。両端で銀河の湾曲が見られる。上が北、左が東。(Innanen et al., 1982, Ap. J., 254, 515)

表1 円盤の湾曲を示す銀河

銀河名 NGC	タイプ	B等級 B_T^0	色指数 $(B-V)_T^0$	銀河面の† 傾き(度)	湾曲の検出*1		伴銀河
					光学観測	電波観測	
224 M31	Sb I-II	3.59	0.74	77	直接*2	直接/運動*3	M32
262? Mrk 348	S0/a			13		運動?	
300	Sd	8.38		42		運動	
598 M33	Scd II-III	5.79	0.44	55	直接?	直接/運動	M31
628	Sc I	9.48	0.51	35		運動	ほぼ孤立
1097?	SBb I-II	9.91	0.92	50	直接?		
1448?	Scd	10.54		84:	直接?		孤立
2146	SBab	10.52	0.58	52:		運動	
2712	SBb I	12.25	0.57	56:		直接	孤立
2805?	Sd	11.40	0.41	38:		運動?	NGC 2820
2841	Sb I	9.58	0.73	67		直接/運動	
2903	Sbc I-II	9.05	0.53	70	運動?	直接	
3190	Sa II-III	11.41	0.84	69:	直接		Leo group
3198?	SBc II	10.45	0.42	73		運動?	
3504?	Sab	11.52	0.63	60	直接?/運動?		
3623	Sa II	9.59	0.76	76	直接		Leo triplef
3628	Sb	9.47	0.64	89	直接	直接	Leo triplet
3646	Sbc I	11.50	0.54	60	運動		
3718	SBa	10.80	0.62	57		直接	NGC 3729
3963?	Sbc I-II			25:		運動?	NGC 3958
4017	Sbc	13.5:				直接/運動	NGC 4016
4088?	Sbc I-II	10.60	0.48	67:		運動?	NGC 4085
4203	S0-	11.34	0.84	25:		運動	
4244	Scd IV	9.66	0.24	86		直接	
4274?	SBab II-III	10.69	0.81	69:	直接?		
4565	Sb I	9.49	0.64	87	直接	直接	NGC 4562
4618	SBm	11.02	0.37	30:		運動	NGC 4625
4631	SBd III	9.03	0.37	85		直接	NGC 4656
4762	SB0			90	直接		NGC 4754
5005?	Sbc II	10.19	0.71	66	運動?		
5033	Sc I-II	10.18	0.44	59		直接/運動	
5055	Sbc II	8.93	0.64	59		直接/運動	
5112	SBcd II			43:		運動	NGC 5107
5236 M83	Sc I-II	7.85		46		運動*4	NGC 5253
5301	Sb II-III			77		直接	孤立
5403	SBb			76:	直接		
5457 M101	Scd I	7.96	0.40	27		運動	NGC 5474
5474	Scd	11.09	0.44	20		運動	NGC 5457
5529	Sc			~85:	直接		
5866	S0+	10.39	0.74	~90:	直接		
5907	Sc II	10.08	0.56	87	直接*5	直接*5,6	ほぼ孤立
6503	Scd III	10.15	0.50	74		運動	(QSO 1749+70.1)
6591?	Sbc I-II	11.25	0.88	30:	直接?		
7331	Sbc I-II	9.51	0.64	69	直接	直接/運動	
IC 10	Im	9.96		35		運動	
IC 342	Scd I-II	7.86		35		直接/運動	UGC 2826?
UGC 12423	Sc	14.8:	0.84	~90:	直接	直接?	
天の川銀河	Sbc II		0.53		?	直接	LMC/SMC

† 視線方向と銀河面方線とのなす角度。0°(真上より), 90°(真横より)。

*1 直接: 表面輝度(密度)分布より, 運動: 速度場の歪みより検出

*2 写真1参照

*3 祖父江・沢阿氏の記事参照(1982, 天文月報 75, 13)

*4 図3, 4参照

*5 図5参照

*6 写真2参照

除いてある。観測の欄の直接、運動は直接的な湾曲の検出、運動学的湾曲をそれぞれ示している。疑問符(?)は湾曲以外の説明も可能なものである。湾曲を示す銀河は Sb~Scd 型に集中しているが、それ以外の型にないわけではない。色指数についても各タイプの平均の値と大差ない。銀河円盤の湾曲は特異な現象ではなく電波観測のなされている銀河でかなりの頻度で見出される渦巻銀河に共通な現象と言えよう。

3. 成因諸説

天の川銀河での円盤の湾曲の発見以来いくつかの成因説が提唱されてきた。ハンター、トゥームレ (1969) は自己重力円盤による理論解析から、天の川銀河の湾曲を説明するそれ以前の説を批判し、マゼラン雲が 5×10^8 年前に銀河中心から 20 kpc の所を通過したことにより湾曲を説明できることを示して、一件落着いたかに見えた。しかし、前章で触れたように孤立銀河での湾曲の検出以降、銀河のミッシング・マスとの関連で大質量ハローと結びつけて湾曲を説明する理論が数多く提出されてきている。また、初期の理論も再考されつつある。以下にそれらの成因諸説を見ていこう。

(1) 伴銀河との潮汐相互作用説： 現位置のままではマゼラン雲の天の川銀河に及ぼす潮汐力は一桁程不足し、半径 16 kpc で銀河面からのずれ 100~200 pc しかひき起こさない。同時に非一様銀河回転により湾曲の位相がずれてしまう。ハンター、トゥームレは様々な質量分布を持つ自己重力円盤による解析によって、銀河面に加えられた外力による湾曲の振舞を明らかにした。それによると銀河面内の密度分布がゆるやかに零になるならば、銀河面に垂直方向の自由振動の固有振動数スペクトルは連続的となる。時間がたつと振動の位相はずれてきてしまい、長期に渡る湾曲の持続が困難であることを示した。湾曲の持続時間として、 $5 \sim 10 \times$ (銀河回転時間) を求めた。その結果マゼラン雲が 5×10^8 年前に銀河中心から 20 kpc のところを通過することにより湾曲は説明可能とした。しかし、湾曲の量は観測値の 1/3 であり定量的には不十分であった。藤本・祖父江 (1977) による数値計算の結果でも量的には不足であった。

(2) 銀河間ガス圧説： カーン、オルチェ (1959) は局所銀河群中の銀河の運動より群を束縛するためには、銀河間ガスの存在が必要であることを示した。銀河間ガスで満たされた空間を運動する時に銀河面に現われる影響として銀河面の湾曲を考えた。磁場を伴う球状ハローを仮定し、ハローの周囲の銀河間ガスの流れによる圧力差を磁場によって円盤に伝え湾曲をひき起すのであるが、仮定されているハロー磁場の不確かさが批判されている。

(3) 銀河面の才差運動説： リンデンベール (1965) によって提唱された。銀河回転と質量分布の対称軸のずれによる才差運動によって銀河面垂直方向の運動が励起される。ハンター、トゥームレによって銀河面内の密度分布が端で急激に零になっていない限りは持続しないと批判された。

(4) 銀河間ガス雲の落下説： M 33, NGC 300 の近傍に観測された中性水素雲を銀河近傍の銀河間空間に存在するものと見做し、銀河に落下することによって湾曲が起るとした。高速度雲を銀河間ガスとしたためである。

(5) 大質量ハローによる湾曲の安定化説： 一様速度の銀河回転曲線に示唆される大質量ハローによって球状の重力ポテンシャルができる。球状ポテンシャル中の運動の安定によって、一度できた湾曲が長期間持続する。これは、NGC 5907 など光学円盤の外側でガス円盤の湾曲が観測されていることを根拠としている。NGC 5907 では、 5×10^9 年間湾曲を維持するには星の円盤と同程度の質量を持つ軸比 1.5 より小さい球状ハローが存在すればよいことを数値モデルにより示した。

(6) 3軸不等楕円体ハロー中での軌道運動の不安定説： 楕円銀河の観測から示唆されるように銀河ハローも3軸不等楕円体であれば、そのポテンシャル中で閉軌道を運動する天体はある軌道において重力場と共鳴し銀河面と垂直方向に軌道が傾き湾曲として観測されることになる。

(7) 旗不安定性説： 旗が風でたなびくように円盤と球状成分の星の相対運動による角運動量交換によって湾曲が励起される。大質量ハローでなくとも小さな広がった球状成分でも不安定性を起こしうる。

(8) ハロー・円盤ガスの相互作用説： ケルヴィン・ヘルムホルツ不安定性と同じ機構であるがそれと異なって回転方向の波数が1の摂動が最も成長率が大きくガス円盤のみに湾曲が励起される (吉井・藤本の説)。

(9) ガス運動応答説： 星の円盤内に生じた摂動に対してガス運動が応答し、銀河面と垂直方向の運動として増幅されガス円盤の湾曲が生じる (ネルソン・松田の説)。NGC 5907 に見られるような星円盤のないところでの大振幅の湾曲の説明は困難と思われる。

(10) 原始銀河ガス雲の収縮説： ラーソン (1976) による銀河円盤の収縮の数値計算は、宇宙年齢に渡っての収縮が銀河外縁部で継続していることを示している。パップ、イナネン (1982) は $10^{12} M_{\odot}$ をもつ原始銀河雲を互いに傾いた回転軸を持つ系として内と外の2つの成分に分離し、収縮によって互いに円盤になったあと、外の円盤のガスが徐々に内部の円盤に落ちていく過程として湾曲を説明している。

以上が今までに提起されてきた湾曲の成因諸説であるが、どれが正しく実際の湾曲を生ずる機構なのか詳細な観測と理論結果とのつきあわせが不可欠である。各成因説で念頭においている成分は異なるようである。星の円盤でもガス円盤でも同様に湾曲が生じるもの、星の円盤だけで生じるもの、ガス円盤のみで生じるものと分かれている。前章で述べたように光と電波で同程度の広がりまで湾曲を観測した例は少ない。直接的に検出できる横向き銀河では、光学円盤の終端あたりからガス円盤の湾曲がはじまる。そこで、もっと暗い輝度までの光学観測を精度よく試みたら、光学円盤をガス円盤と直接比較できるところまで検出できるかもしれない。そう考えて、NGC 5907 について試みた光学観測の結果について次に示そう。

4. NGC 5907 での銀河円盤の光学観測

ヴァン・デ・クルート (1979) は NGC 5907 をはじめ電波観測のなされている 8 つの銀河についての表面測光を行った。NGC 5907 については、パロマー山シュミット望遠鏡で III α -J 乾板に撮影した像を 2 枚重ね合わせた結果を示している。それでもガス円盤の湾曲と比較するには不十分である。我国には東京天文台木曾観測所にパロマー天文台シュミット望遠鏡とほぼ同程度の能力をもつシュミット望遠鏡がある。空の暗さもパロマー山にそうひけをとるものではない。望遠鏡の観測時間もいづらか余裕がある。III α -J 乾板をうまく増感をして検出量子効率が最大になるように露出をして、多数枚の乾板にデジタル画像処理を施したのち重ね合わせれば、ヴァン・デ・クルートのデータより暗いところまで表面測光が可能と考え観測を開始した。4 年前である。III α -J 乾板の増感処理、現像液の選択等と余計な月日がたってしまったが、木曾観測所の方々の協力により、III α -J、III α -F 乾板を用いて長時間露出のものがそれぞれ 10 枚近く撮影できた。相対的に質のよいものを選び京大宇宙物理学教室のジョイス・レーベル社マイクロデンシトメーターで測定し、画像処理を施し、各画像を重ね合わせることで背景の空の 0.5% 以下の部分 (27.6 Jmag/□") までの表面測光のデータが得られた。予期した通りヴァン・デ・クルートの結果より外側までのデータが得られた。データは誤差解析のち等高線図、輝度プロファイル図、色指数分布図などとして処理された。

目的は光学円盤の湾曲とガス円盤の湾曲とを比較することである。長軸と直交する方向に沿った輝度プロファイルをいくつかの半径の所で描き、その輝度プロファイルの対称点を決め長軸からのずれとして湾曲量を測定した。その結果を図示したのが図 5 である。中性水素分布についてはサンシシ (1976) の 10 速度帯での等高線と

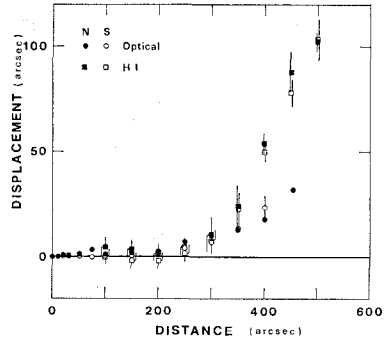


図 5 NGC 5907 で観測された銀河円盤の長軸からのずれ (秒角)。横軸は銀河中心からの半径 (秒角)、四角は中性水素での観測、丸は光での観測。銀河中心で北と南を折り返してある。銀河中心から 350 秒のところからガスと星の円盤の分離が起っている。

長軸に直交する直線との交点の midpoint を各等高線について求めて、大きく値が異なるデータを捨てて平均し、その点の長軸からのずれを測定誤差とともに図 5 に示してある。光学観測によるデータの精度は誤差を示してあるもの以外は丸の大きさ以下である。図 5 から光でも銀河円盤の湾曲は僅かであるが見られる。半径 24 kpc で 1.7 kpc の湾曲である。対応するガス円盤の湾曲は 4.3 kpc である。光学円盤とガス円盤の分離は半径 300''~350'' から起こっているようである。図 5 に示してある光学データは、III α -J による青色域の湾曲量であるが、III α -F による赤色域でも同量の湾曲が検出されている。このこと

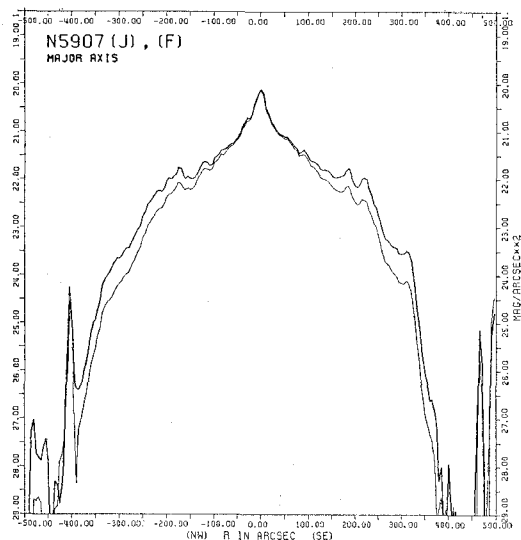


図 6 NGC 5907 の長軸方向の輝度分布 (等級/(秒)²)。横軸は中心からの半径 (秒角)。中心部のバルジ成分、中心から 300 秒までのびている円盤成分がある。300 秒~350 秒で円盤成分が急激に減少している。太線は III α -J、細線は III α -F による観測。

は、電離ガス輝線による寄与は少なく星の円盤の湾曲と考えられる。この結果の意味するところは、湾曲の成因としてガスにも星にも湾曲を起し、かつ湾曲の分離を生じることを説明できねばならない。単に重力的な作用や軌道不安定性では無理なようである。

湾曲の分離を示す $300'' \sim 350''$ 以遠の銀河円盤の様子を明らかにするために図6に長軸方向の輝度プロファイル、図7(表紙)に色指数分布を示そう。長軸方向の輝度プロファイルでは、中心部に小さなバルジ成分と半径 $300''$ まで広がった円盤成分が見られるのは普通の銀河と同じであるが、 $300''$ 以遠では円盤成分の急激な減少が見られ、銀河円盤の終端を示している。この終端における輝度の急激な減少はヴァン・デ・クルとサーレ(1981, 82)による横向き銀河の観測でかなり一般的に認められる。横向き銀河の場合、見透すことによる積分効果によって上向き銀河では観測できない暗い輝度まで検出していることになる。上向き銀河でも暗い輝度まで観測することができれば、輝度プロファイル終端部での急激な減少が検出されよう。M51でも輝度プロファイルに急激な減少が外縁部で見られるがそれは伴銀河との潮汐効果によるものと理解されている(岡村他 1976)。

色指数分布(図7=表紙)では中心から外縁部に向けての青化が見られる。中心部で(J-F) ~ 1.1 , $R=400''$ で0.2である(J-F=1.04(B-V)である)。NGC 5907はSc型であるが、Sc銀河は一般に外縁部に向けての青化が見られる。渦状腕成分が外縁部へ向って卓越してくるために青化が起ると考えられている。渦状腕成分が卓越してくるとは、若い星の割合が大きくなっていくことを示し、別の言葉で言えば、円盤の形成が盛んに行なわれているということである。

これらの光学観測をまとめると(1)星の円盤でも湾曲が見られ半径 $300'' \sim 350''$ から外でガス円盤との分離が生じる。(2) $300''$ あたりから星円盤の輝度の急激な減少が起る。(3) $250'' \sim 300''$ から青化が顕著になる。これらの結果は特異な例ではないようである。星円盤とガス円盤の分離についてもNGC 4565においても同様なことが認められる。このような特徴が統一的に説明できる湾曲の成因はなんであろうか。

次の2つの可能性がある。

(a) 星の円盤の湾曲が起り、ガス運動の応答によってガス円盤の湾曲が増幅される。

(b) ガス円盤の湾曲が先に起り、星円盤の湾曲が副次的に起る。

星円盤の外縁部での輝度の急激な減少が観測されているので、星円盤のないところでガス運動の応答を考えるのは無理がある。(b)については湾曲の成因のうち銀河間ガス圧説(2)あるいは、ハロー・円盤内のガスの相互

作用説(8)によってガス円盤のみの湾曲が生じ、ガス円盤中で誕生した星が星の円盤となっておちつくことで湾曲の分離は説明できるであろう。しかし、外縁部における星円盤の輝度の急激な減少と青化は他の原因で説明しなくてはならない。筆者は成因(10)に基づく説明が一番よいのではないかと考えている。湾曲している銀河円盤は、収縮中の原始銀河円盤であり、その中で誕生した若い星々が星円盤として銀河面に落ちつくことで、星円盤の若干の湾曲が生じ、青化が見られ、星円盤の成長に伴う外縁部での密度の急激な減少となって表われているのである。ガス円盤と星円盤の湾曲量の差は $1 \sim 2 \text{ kpc}$ であり、星間運動の速度 $\sim 10 \text{ km/s}$ では $\sim 10^8$ 年かかることになり、質量の大きな星が巨星に進化した段階で湾曲している星円盤として観測されているのであろう。

5. おわりに

渦巻銀河には、単に平坦な円盤内に物質が存在するのみではなくて、ハローもあれば、ハロー内には高速度中性水素雲も存在し、円盤内でも星の年齢による速度分散の系統的変化、銀河面の波打ちや湾曲が見られる。

本稿では、銀河円盤の湾曲について述べてきたが、湾曲だけが独立した現象ではなく他の現象と相互にかかわりあっているはずである。湾曲の成因についても、湾曲以外の他の観測事実をもあわせて説明しようとしているものもある。3軸不等ハロー中の軌道運動の不安定性説(6)は高速度中性水素雲や星の速度分散の年齢依存性、旗不安定性説(7)は銀河中心部円盤の傾き、ガス運動応答説(9)は、中心部円盤の傾き、銀河面の波打ち等を説明する。銀河内の各構成部の様々な現象は相互に作用し因果関係で結ばれている。

継続する銀河円盤への収縮は、銀河の構造を決定する上でかなり重要であり、銀河円盤の湾曲、外縁部の青化と急激な密度減少を惹起するのみならず、渦状腕を励起し、高速中性水素雲をつくり、速度分散の年齢依存性を生じるといふのは言いすぎであろうか。NGC 5907という銀河一例についての限られた観測に基づいた推論である。より多くの銀河の観測と正しいモデルの構築が必要である。