

アンドロメダ大星雲 I

— 中性水素ガスの分布 —

祖父江 義明*

アンドロメダ大星雲 (メシエ 31, M31, NGC 224) は私達北半球の住人が肉眼でみることのできるただ二つの銀河の一つである (もう一つはもちろん天の川銀河系)。当然のことながら最もよく研究されている銀河の一つであり、つねに天体写真の花形でもある。

ところが実はこの有名なアンドロメダ大星雲に、はっきりした渦状腕があるのか、その腕は右まきなのか左まきなのか、それも一本なのか複数本なのか、といった論争がいまだに結着をみないままに続いているのを知ったら驚くだろう。たしかにハッブルタイプの Sb 型に分類され、写真で見るといかにも左まき (S 字型) に渦をま

いている印象をうける (図 1。同銀河の回転の方向も左まき、つまり反時計まわり) しかしこの印象を専門的にうらづけた天文学者はまだいない。

このシリーズは最も身近かで代表的な銀河でありながら、多くの問題を残す M31 についていろいろな角度から調べることによって、渦状銀河の観測的な研究の様々な方法と、問題点を把握していただくのを目的としている。今回は銀河の渦巻き構造を決定するのにもっとも進んだ手段とされる中性水素 (HI) ガスの 21 cm 輝線による電波観測をもとに、M31 のガスの分布と渦状腕の関係を調べよう。次回は M31 の運動学、特に密度波



図 1 アンドロメダ大星雲 (M31)
(ハッブル・アトラスより)
上側が手前、北は左方向

* 名大・理 Yoshiaki Sofue: The Andromeda Galaxy. I —The HI Gas—

理論から推定されるいろいろな性質をやはり HI ガスの運動を調べることによって探る。回を追って光学、紫外線、X線などでみるアンドロメダ星雲の姿を概観し、HI ガスの分布との関連を明らかにする。さらに光学観測で明らかにされた若い星々の分布とガス分布の比較から、この銀河では星の形成がどのように進行しているのかを探る。最後に、ガスや若い星々の分布と関連して、磁場の構造などを、連続波電波観測のデータをもとに調べることにする。

表1 アンドロメダ星雲—M31—の諸元

位置	α (赤経) ₁₉₅₀ 0 ^h 40 ^m
	δ (赤緯) ₁₉₅₀ 41°00'
	l (銀経) 121°2
	b (銀緯) -21°6
回転軸の傾斜角	i 77° (90°=真横むき)
距離	d 690 kpc *
太陽系に対する速度	v_{LSR} -300 km/s
銀河系に対する速度	v_{GSR} -70 km/s
最大回転速度	V_{ROT} 260 km/s
全質量	M $3 \times 10^{11} M_{\odot}$
HI ガスの全質量	M_{HI} $4 \times 10^9 M_{\odot}$
ハッブルタイプ	Sb 型
直径	D 約 60 kpc

* 1 kpc = 3.1×10^{21} cm = 3260 光年

1. M31 は“はず”向き

M31 は私達の銀河系とよく似た Sc 型の渦状銀河である。局所銀河群では銀河系と並んで最も大型で、銀河系とは姉妹の間がらとあったところだ。質量は約 $3 \times 10^{11} M_{\odot}$ 、太陽からの距離は約 690 kpc である。御存知のとおりアンドロメダ座にある (赤経 = 0^h40^m, 赤緯 = 41°00')。表1 参照)。

ところがこの M31 は私達の視線に対して、回転軸が 77° と大変はずにかまえている (90° を真横向きとする)。そのために見事なはずの渦巻構造が実はよく見えない。写真でごらんの通り一見腕がよく発達しているように見えるが、一本一本の腕をトレースしようとしても残念ながらあまり判然としない。

私達は銀河面にどっぷりつかっているために自分達の住む銀河系の素顔さえ正面から拝んだことがない。そのうえ妹銀河はあらぬ方角をむいているとは何と不幸となげく前に、何とかその素顔つまり正面像をながめるてだてはないものだろうか。

かくてアンドロメダ大銀河の研究はまずこの“はずむき”との闘いにはじまる。ところで M31 に住む天文学者も同じ悲哀をかこっているのを御存知だろうか。私達の銀河系もまた M31 に対して約 70° と大きく傾いてい

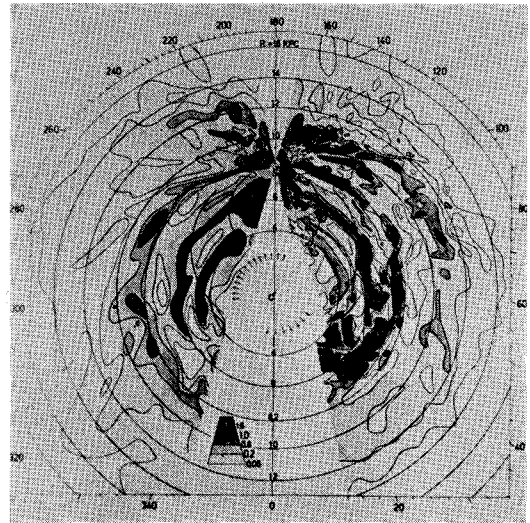


図2 銀河系の“正面像”。HI ガスの分布 (ウェスタハウト, カーによる)

るうえに、M31 から見た銀緯はたった 13° と大変ひくい。

2. 私達の銀河系は真横向き

太陽系から眺めると私達の銀河系は真横を向いている。では私達は銀河系の正面像をまったく想像できないのだろうかという、じつはこれを推定する方法がある。

銀河系円盤は回転している。この回転はレコード板のような剛体回転ではなく、各半径 (銀河中心からの距離) に応じて角速度が異なるような微分回転をしている。微分回転のために太陽系から銀河面をとおしてある方向を見ると、視線上の各点の速度は一定でなく、太陽からの距離に応じて変化する。この変化の様子は銀河系の回転の法則に依存する。つまり銀河回転の法則がわかれば逆に視線上のガスや星の視線速度を知ることによって太陽からの距離、従って銀河面上での位置を知ることができる。この方法を中性水素ガスの出す波長 21 cm の輝線のドップラー効果から求めた視線速度に応用して、ガスの銀河面分布を推定することができる。図2はこうしてオランダの天文学者等によって得られた銀河系の“正面像”である。図2のような分布図は銀河系全体を見透すことのできる電波天文学の登場をまっしてはじめて可能となったわけであるが、もちろん同じ手法は太陽から見えるはんいの星や電離水素領域 (H II 領域) に対しても適用できる。

3. 速度—空間変換

類似の手法を用いて、M31 など大きく傾いた銀河の中性水素ガスの正面像を、速度の情報を十分いかして求める方法を考えてみよう。この方法をかりに速度—空間変換法 (Velocity-to-Space Transformation, VST) と名

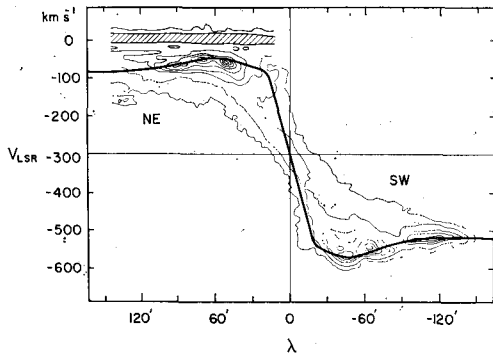


図 3 M31 の回転曲線. 等高線は長軸にそった H I 輝線強度の速度分布

づけよう. VST 法を M31 の中性水素ガスの 21 cm 電波観測のデータに適用してみることにする.

速度—空間変換を行うためにはまず銀河の微分回転の法則を見いださねばならない. 銀河の回転速度を半径に対してプロットした図を回転曲線とよぶ. 回転曲線は銀河の長軸上の各点で 21 cm 線のドップラー速度プロファイルを測り, 速度の最大値を半径に対してプロットすることによって容易に得られる. M31 の回転曲線を図 3 に示す. 私達の銀河系や多くの渦状銀河のそれとよく似た形をしていて, M31 が典型的な渦状銀河であることを反映している.

M31 の銀河円盤が円運動をしていると仮定すれば, この回転曲線から銀河面上の長軸以外の任意の点で視線速度がどう現われるかを計算することができる. 銀河の長軸方向の距離を ξ , 短軸方向に銀河面上ではかった距離を η とする. $\xi-\eta$ 平面上に計算された視線速度の分

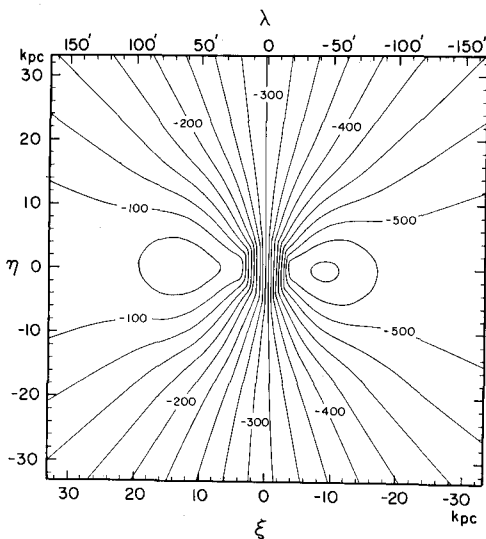


図 4 M31 の視線速度場

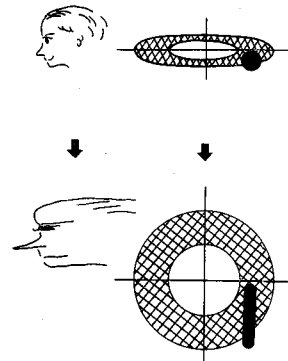


図 5 逆投影法による銀河の“正面像”. 短軸方向の分解能が悪く, 凹凸も無視する.

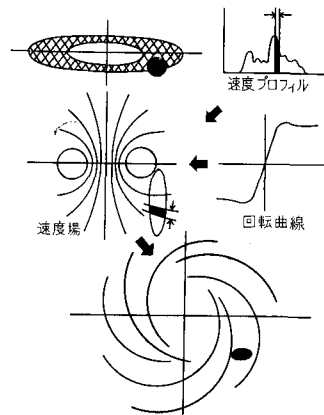


図 6 VST (速度—空間変換) 法による銀河の“正面像”

布を描いたのが図 4 の速度場である.

いま角分解能 θ の電波望遠鏡に速度分解能 Δv のスペクトル計を組合せて速度プロファイルを観測するとしてよう. 銀河の距離を d とすると, この速度プロファイルは ξ 方向に $\Delta \xi = \theta \cdot d$, η 方向には $\Delta \eta = \theta \cdot d / \cos i$ の範囲の中性水素ガスの運動と分布に関する情報がもりこまれている (図 5, 6 参照). しかし速度プロファイル上では $\Delta \xi \times \Delta \eta$ 内のガスは速度分解能 Δv で分離することができる. この Δv に対応する空間領域を速度場上に囲ってみると図 6 で黒くぬりつぶした部分 ($\partial \eta \times \partial \xi$) に相当する. つまり η 方向の空間分解能は $\Delta \eta$ から $\partial \eta$ に改善される. もちろん ξ 方向の分解能は変わらず $\partial \xi = \Delta \xi = \theta \cdot d$ であることはいうまでもない.

ここで銀河の“正面像”が従来どんな方法で推定されて来たかをふりかえてみよう. たとえば中性水素ガスの場合は観測各位置での積分強度 (速度プロファイルを速度に対して積分したもの) の天球上での分布を求める. 次に銀河面の傾斜角が銀河全体に一定であり, かつ凹凸が一切ないものと乱暴に仮定した上で, 天球分布をその

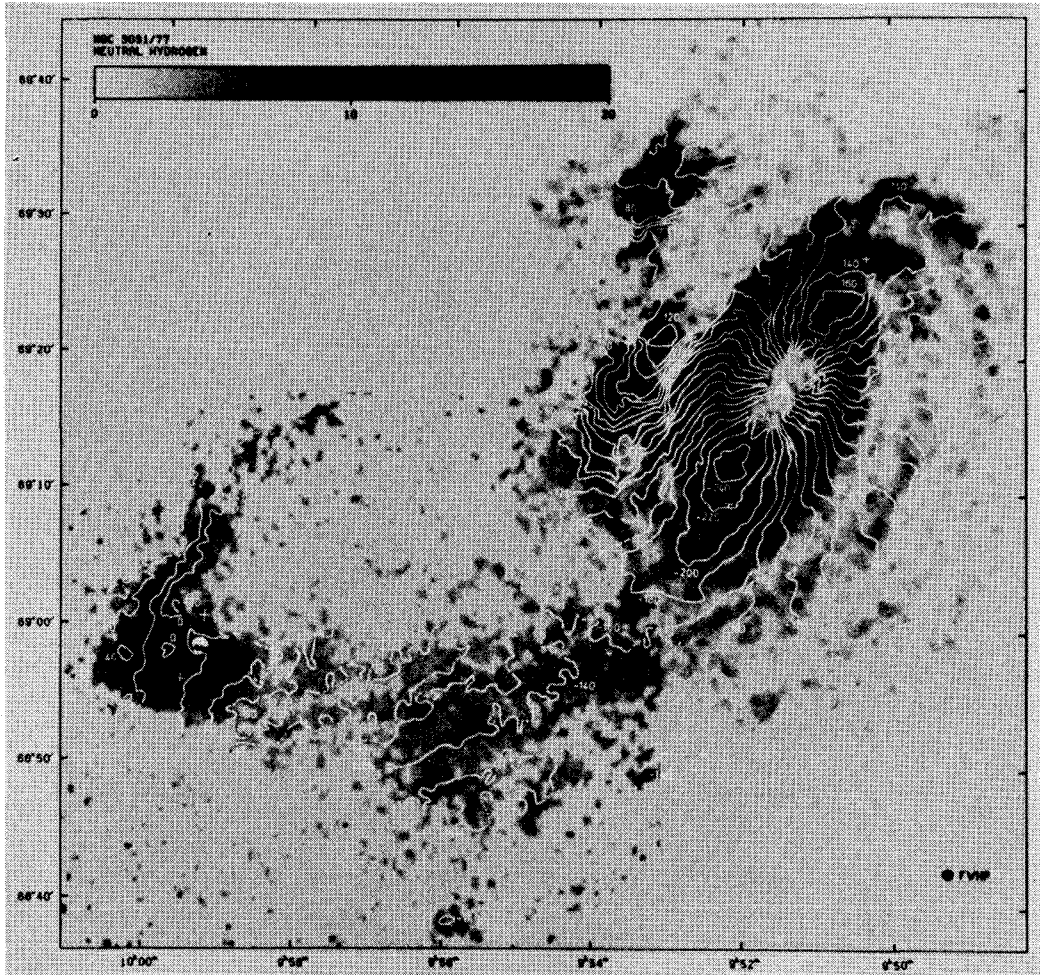


図7 M81のHIガスの分布(グレースケール). 等高線は視線速度場(ヴァン・デア・クルーによる)

銀河面に逆投影する(図5). この方法を逆投影法とよぼう.

逆投影法は銀河面の傾斜角が比較的小さな銀河に対しては有効である. 実際 M51 のようにほとんど正面向きの銀河や M81 (図7) のように i が 60° 以下の銀河に対しては, この方法でかなり信頼に足る正面分布を推定することができる. 一方 i が 60° – 70° をこえる大きくかたむいた銀河に逆投影法を応用しようとするると重大な危険を犯すことになる(図5).

逆投影法によって生ずる大きな誤差に次の三つがあげられる. 第一に傾斜角 i の設定による誤差. η 方向の距離はみかけの距離に $1/\cos i$ をかけて推定する. i が 90° に近い程 i の不確実性が η に大きくひびく. M31 の場合 $i=77^\circ \pm 3^\circ$ であるから $\eta=20$ kpc での誤差は ± 6 kpc にのぼる. 第二に銀河面のたわみによる誤差. 銀河面は真平でなく, 伴星雲による潮汐力などでたわんでいることが多い. 銀河が横向きに近いほどたわ

みの影響が逆投影による η の推定に大きくひびく. 第三に面外構造による誤差. HI ガスは銀河面に垂直方向 (z 方向) にひろがっている. ガス円盤の厚さが z 方向に 200 pc とすると M31 の場合 η 方向に $200 \text{ pc}/\cos i \sim 1$ kpc にわたる HI ガスが視線上に同時に含まれる. 銀河の周辺部では厚さは 1 kpc をこえるから, この種の誤差は数 kpc にのぼる. これらの誤差は望遠鏡の角分解能が理想的にシャープであってもまぬがれないものであるが, 速度—空間変換を用いればかなりの程度改善される.

しかしすべてばら色というわけにもゆかない. 速度—空間変換の短所は次の点である. 第一に銀河の短軸の近くでは物体の運動方向が視線に垂直に近く視線速度をもたないためにこの方法が適用できない. また長軸の近傍では観測者に近い側と遠い側が望遠鏡のビームの中で判別できない. このような理由で今回解析する M31 の場合 $|\xi| < 2$ kpc, $|\eta| < 3$ kpc では良い結果が得られない.

4. M31 の中性水素ガスの分布

速度-空間変換法 (VST) を M31 の最新の H I ガス観測データに適用してみよう。データはボンの 100 m 電波望遠鏡を用いて M. S. ロバーツらによって得られた (表 2)。望遠鏡の角分解能は $\lambda 21 \text{ cm}$ において $\theta = 9'$ 、スペクトル計の速度分解能は $\Delta v = 5.5 \text{ km/s}$ である。逆投影法による単純な空間分解能は M31 銀河面上で $\Delta \xi = \theta \cdot d = 1.8 \text{ kpc}$ 、 η 方向に $\Delta \eta = \theta \cdot d / \cos i = 9 \text{ kpc}$ である。これに対して VST 法をもちいると η 方向の分解能は $\delta \eta \approx 1.5 \text{ kpc}$ に改善されるはずである。M31 の諸要素としては表 1 のものを用い、回転曲線は図 3、速度場として図 4 のそれを採用する。

図 8 a, b (a=表紙) にこうして得られた M31 の H I ガスの銀河面分布を示す。図の等高線値は銀河面に垂直に見透した時の水素原子の単位面積あたりの個数 (コラム密度) を 10^{19} cm^{-2} を単位として表わしたものである。この図にみられる M31 のガス分布に関していくつかの特徴をあげてみよう。

表 2 M31 中性水素観測データ

観 測	ボン 100 m 鏡 (一部は NRAO 90 m 鏡) (M. S. ロバーツ等)
測定領域	$5^\circ \times 1.5^\circ$
ビーム幅	8'8
周波数, 波長	1420 MHz ($\lambda 21 \text{ cm}$)
観測点	$4'5 \times 4'5$ 毎
速度分角能	5.5 km/s
感度 (rms)	50 mK

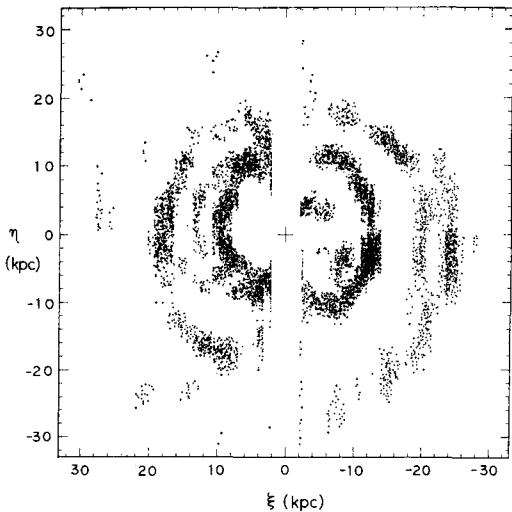


図 8(b) (a=表紙) 図 8(a) から大きなスケール (5 kpc x 5 kpc 以上) の凹凸を差しひいたものをグレースケールで示す。腕の形がよく現われる。

(i) “10 kpc リング”: ガスの大部分は半径 $R = 8 \text{ kpc}$ から 12 kpc のリング状の領域に集中している。その質量は銀河全体の H I ガス量の 60% にあたる。リング内にコラム密度が $\sim 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 以上のいくつものピークが見られる。

(ii) 渦状腕: さて M31 の渦巻構造はどうなっているだろうか。 $R \leq 15 \text{ kpc}$ では図にみる通りリング状の構造が顕著であって、いわゆる渦状腕は見えない。しかしもっと外側には $(\xi, \eta) = (-3 \text{ kpc}, 18 \text{ kpc})$ から南西 (図上の右) に向ってのびる大きく発達した渦状腕が見られる。この渦状腕の存在は今回の解析ではじめて明らかにされたものであるが、はっきりと銀河回転 (反時計回り) によってなびくセンス (トレーリング) の渦状腕である。このほかにもいくつかの腕がトレースされる。図 9 に主な腕をまとめて示そう。パーデによって光学的に見出された腕 (長軸近傍でのみトレースされている) との対応関係は図 9 で明らかである。

(iii) 広がった成分: H I ガスは腕だけに集中しているのではなくて、直径が実に 60 kpc (20 万年光年) におよぶ大きな円盤状のべったりした分布をもつ。このように大きなスケールの構造は従来の高分解能の干渉計観測でははっきりしなかったことである。(次節参照)

(iv) 非対称性: 図 8 (a) の一番低い等高線で描かれる最も外側のりんかくの非対称性に気がつくだろう。南ではりんかくがほぼ円形であるのに対して、北から西にかけてはいくつかの腕状の突起が顕著である。非対称の原因は明らかではないが、伴星雲 M32 や NGC 205、又は隣の銀河 M33 による潮汐変形が可能性としてあげられる。(ii) であげた南西に発達した大きな腕に対応する腕は北西側では内側にいちじるしくひしゃげて、一見すると一本腕を連想させるのもおもしろい。

(v) 動径分布: M31 を輪切にしたガス分布を図 10 に示そう。中心からの距離 R に対して H I ガスのコラム密度をプロットしてある。ガスが $R = 8 - 12 \text{ kpc}$ に集中して “10 kpc リング” をつくっていることや、 $R \sim 30 \text{ kpc}$ までだらだらとのびる円盤成分がはっきりする。 R が 20 kpc 以内の若い星や H II 領域などもよく似た分布をもっている。

5. 干渉計観測などとの比較

VST 法で作られた図 8 によって得られる M31 の銀河構造などに関する情報の特質を知る上にも、いままでいろいろな方法で得られた H I ガスの分布図と比較してみよう。

まず図 11 は前節で使ったロバーツらの全く同じデータを VST を用いずに積分して得られる M31 の天球 H I ガス分布図である。この図での空間分解能は M31 銀河面上で $\Delta \xi = 1.8 \text{ kpc}$ 、 $\Delta \eta = 9 \text{ kpc}$ となる。図 8 ある

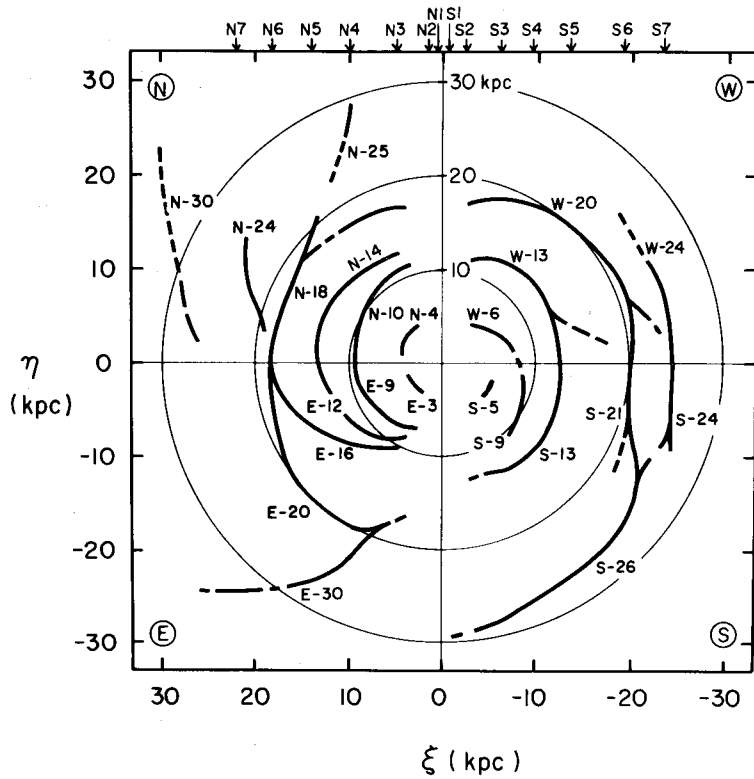


図 9 M31 の主な腕の位置。上部の矢印はバーズの腕の位置。

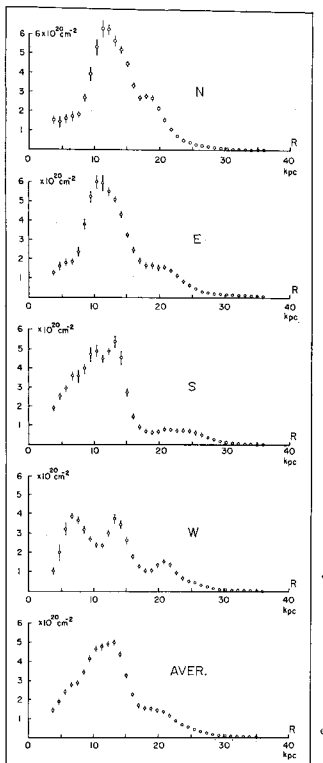


図 10 M31 を輪切りにした HI コラム密度の半径に対する分布。

いは図 8 を天球上に投影した図 12 と比較してみると、同じデータを用いていながら速度に関する情報を無視した分布図 (図 11) では大部分の腕構造がつぶされて見えなくなってしまっている。VST 法がいかにか有効であるかが判然とする。

図 13 はアンウィングがケンブリッジの 5 km 電波干渉計によって得た M31 の HI ガス分布である。逆投影法で銀河面分布になおしてある。この干渉計の角分解能は $1'$ であるから、 ξ, η 方向の銀河面上での分解能は $\Delta\xi=0.2 \text{ kpc}$, $\Delta\eta=1 \text{ kpc}$ である。図 8 のそれにくらべてずっと良い。実際、より小さなスケールの構造がはっきりと見えている。このように干渉計観測の特長は高い角分解能であるが、反面集光力は 100 m 鏡など大口径の

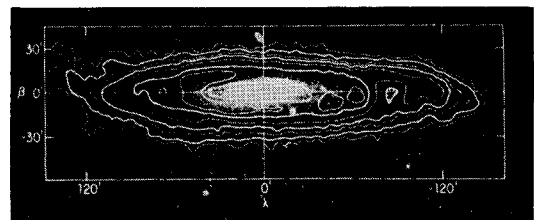


図 11 100 m 鏡による M31 の HI ガスの積分コラム密度の天球分布。VST 法使用前 (ロバーツ等による。)

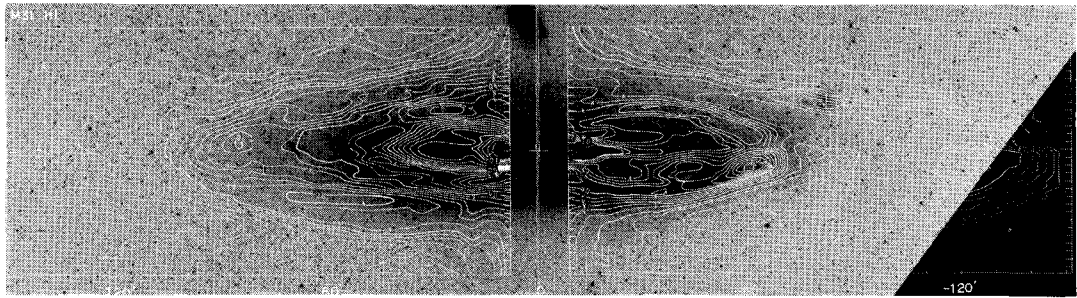


図 12 表紙図を天球上に投影して、写真（パロマチャート）に重ねたもの。

シングル・ディッシュに比して小さく、感度が低い。さらに干渉計では最小のアンテナ基線長に対応する角度よりも大きなスケールの強度分布を検出することができない。このような理由のために図 13 で見る M31 の構造は半径 R が約 15 kpc より内側に限られ、直径 60 kpc に及ぶ大円盤は検出されていない。

以上で私達は M31 の H I ガスの分布を VST 法で求め、その結果が広い範囲（直径 ~ 60 kpc）の構造を比較的よい分解能 ($\delta\xi \times \delta\eta \sim 1.8 \times 1.5$ kpc) で示していること、またその結果が銀河の“正面像”としてかなり信頼にたるものであることなどを見て来た。ところで今まで私達は M31 の回転が完全な円運動であると考えて来た。しかし実際には渦状腕などに起因する非円運動を無視するわけにはゆかない。次回は密度波仮説に立って M31 の非円運動について調べよう。

VST 法の開発と M31 への応用は加藤龍司君との共同研究で行われた。日本天文学会欧文報告 (PASJ) 1981

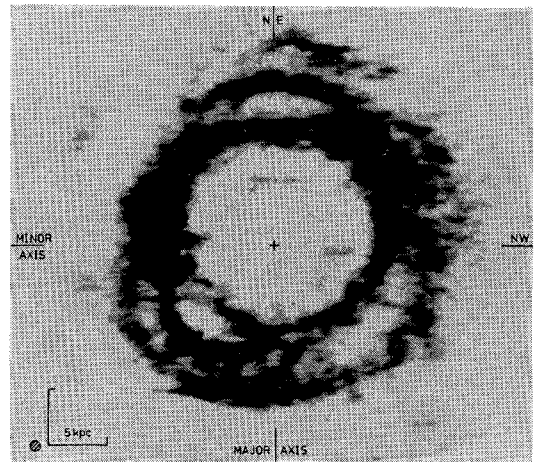


図 13 ケンブリッジ 5 km 干渉計による M31 H I ガス分布。逆投影法で正面像になおしてある。(アンウィンによる)

年 3 号に論文が掲載される。

お知らせ

1982 年 IAU 総会について

IAU の第 18 回総会は 1982 年 8 月 17 日-26 日に、ギリシアの Patras でひらかれる。総会中に予定されている Joint Discussions は Solar Luminosity Variations, Evolution in Old Stellar Populations in Galaxies, Extragalactic Distance Scale and Hubble Constant, Exploration of the Solar System, Origin and Evolution of Interplanetary Objects, Active Galactic Nuclei, と Mass-Loss Phenomena である。総会の前後に予定されている IAU のシンポジウムやコロキウムは Cataclysmic Variables and Related Objects (8 月上旬, Tel Aviv), Solar and Stellar Magnetic Fields: Origin and Coronal Effects (8 月 2-6, Zürich), Solar Radio Noise (8 月 9-13, Trieste), Planetary Nebulae (8 月 10-14, London), Activity in Red-Dwarf Stars (8 月 10-13, Catania), Internal Kinematics and Dynamics of Galaxies (8 月 10-13, Besancon), Supernovae Remnants and their X-ray Emission (8 月 30-9 月 2, Venice), Seventh Conference on Astrophysical

and Laboratory X-ray and UV Spectroscopy (8 月 30-9 月 1, Dublin), Evolution of the Early Universe and its Present Structure (8 月 30-9 月 2, Crete), Dynamical Trapping and Evolution in the Solar System (8 月 30-9 月 2, Thessaloniki), Planetary Rings (8 月 30-9 月 4, Toulouse) である。IAU の General Members になっているものには総会への招待状がくる。それ以外で招待状のほしいものは下記まで申し込まれたい。

また 35 才以下の若い天文学者には、総会出席について若干の補助のことがあるので、希望者は申し込まれたい。

この総会で、新しい General Member が認められる。その申し込みは IAU の国内委員会である天文学研究連絡委員会を通じて行われる。Member としての必要条件は IAU Information Bulletin No. 45, 1981 年 1 月 pp. 7-8 にある。自薦、他薦とも、研究連絡委員会委員に申しでられたい。

以上の締切りは 11 月末とする。

8 月 31 日 日本学術会議・天文学研究連絡委員会
委員長 古在由秀
〒181 三鷹市大沢東京天文台