

# 銀河電波と中心核の爆発

祖父江 義明\*

## 1. 銀河電波

私達の住む銀河系を可視光で見ると天の川になる(図1)。しかし天の川は太陽から高々 1 kpc (キロパーセック, 3000 光年) 以内の星の分布を示すに過ぎない。遠い星の光は星間塵にさまたげられて見えないからである。銀河の全景はもっと波長の長い光, 例えば電波で見ることができる。図2は 150 MHz の電波で見た銀河系である。天の川とよく似た輝度分布をしているがよく見ると銀河面の近くがより明るく, 中心の方向で鋭いピークをもっていることがわかる。電波の星間吸収は非常に小さく, 銀河中心(太陽から 10 kpc) や, 銀河面近くに分布する電離領域, 超新星レムナント (SNR) などをすべて見通しているためである。

さらに注意深くこの図を見ると, 銀河電波の分布は平らな円盤から予想されるなめらかなものではなくて, 無数の尾根や谷間が銀河面から上下にのびていることに気がつく。このような尾根構造を電波スパア(突起)とよんでいる。図3にはもっと良い分解能で見た 820 MHz の電波輝度分布を示してある。さらにたくさんのスパアが銀河面からのびている。中でもひとときわ立派なのが,

銀経  $l=20^\circ$  の銀河面近くから北に向ってのびる大円弧状のスパアである。これをノース・ポーラー・スパア (NPS) 又はループ I と呼んでいる。この領域をさらに高分解の観測で拡大してみると図4のような, まことに印象的な大円弧になる。残念ながらこの図では NPS の銀河面の近くが切れてしまっている。

では銀河面とこの大円弧がどのようにかかわっているのか, 又その名の通り銀河面をつきぬけてループを作っているのかどうか, さらに銀緯  $b=20^\circ$  以下の最も明るい部分の細かな構造はどうか。この疑問に答える目的で行なった高分解能(ビーム幅  $9'$ ) の 1420 MHz 連続波による電波観測の結果が表紙に示した図のとおりである。銀河面に近づくとつれて尾根の幅はどんどん狭まる一方, 輝度はおとろえずに低銀緯までのび,  $b \approx 2^\circ$  でふっと消えている。銀河面をつきぬけて下へのびている様子はない。

無数の電波スパアと銀河系の構造, そして NPS 大円弧の成因について考えてみよう。

## 2. 電波スパアと銀河系の渦状構造

まずスパアと渦状腕の位置関係から調べよう。

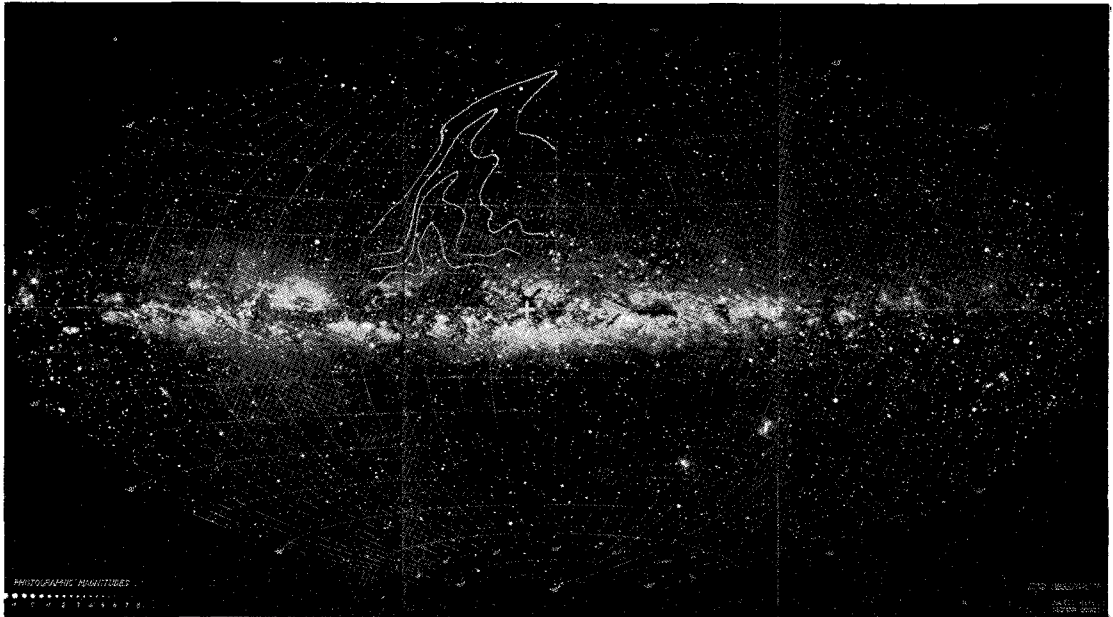


図1 目で見る天の川。+印は銀河中心方向を示す。(ルント天文台による)

\* 名大理, 宇宙理学教室。Y. Sofue: Radio Background and the Galactic Center Explosion

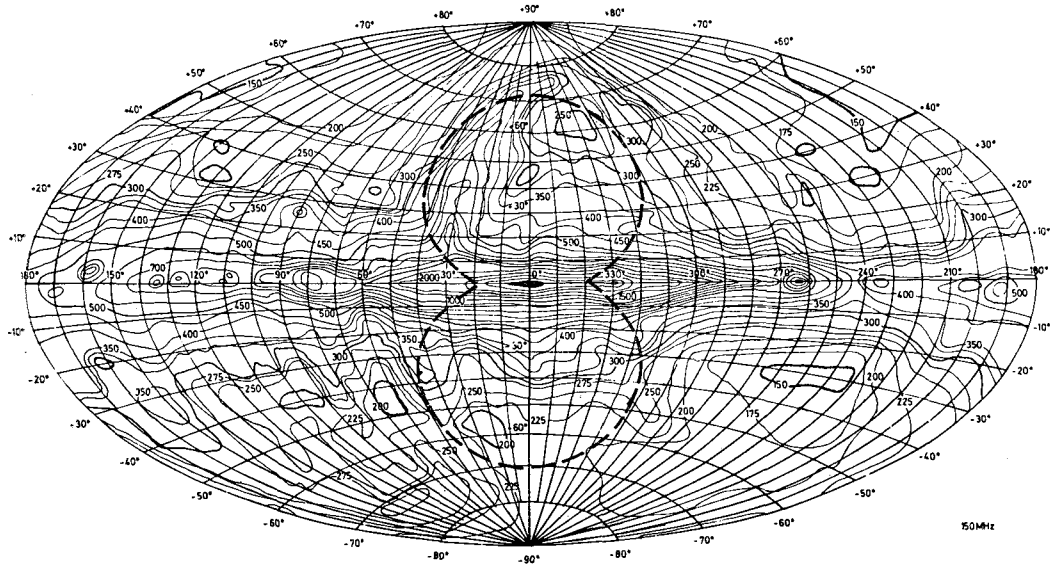


図 2 150 MHz 全天電波図 (ランデッカー・ヴィーレブンスキーによる). 点線は図 8 のショックフロントを撮影したもの.

**腕の接線方向からの電波:** 中性水素原子の出す 21 cm 輝線から明らかにされた銀河系の渦巻き構造を図 3-b に示す. さらに渦状腕と電波スパーの位置関係を図 3-a と b に示す. 連続波電波では発信地の距離が分からなから、銀河面に投影した電波図をつくることは出来ない. 従って天球上での見かけの位置を比較するわけである. 主な中性水素ガスによる腕の接線方向が直線でかき入れてある.  $l=30^\circ$  のスカタム腕,  $l=50^\circ$  の射手座腕,  $l=80^\circ$  の方向に太陽が属する白鳥座腕などである. これらの接線方向に対応して電波輝度分布にもそれぞれ明かるくかがやく山が認められる. 各腕の中にある超新星レムナントや電離ガス領域, そしてガスと共に圧縮された宇宙線電子と磁場によるシンクロトロン放射が腕の方向でかさなって強く見えるためである.

**腕の上下にひろがる電波の土手, スパー:** 目を銀河面の外に向けてみよう. 電波図には先にみたように無数の電波スパーが見つかるが, 主なものはおおむね渦状腕の接線方向から上下にのびていることに気がつくだろう (図 3 a-b). この様子は特に白鳥座の局所腕 ( $l=80^\circ$ ) に対応する電波の強い領域から上下に対称にのびる円弧上の 2 本のスパーに顕著である. 射手座腕 ( $l=50^\circ$ ) の上下ではスパーと共に電波強度が段をなして高まっている.

このような現象を理解するのはたやすい. つまり渦状腕の上下に電波の放射域がふくれていけばよいわけである. 銀河衝撃波の理論によれば銀河円盤内を回転する星間ガスや磁場, そして宇宙線電子は腕に突入する際に急激に圧縮される. 圧縮された中性水素ガスは渦状腕として観測され, 同時に圧縮, 加速された磁場と電子の放出

するシンクロトロン放射がこの方向で強く観測される. ところで磁場と宇宙線は銀河面から重力にさからって浮き上がろうとする不安定な性質をもつ. 渦状腕の中でおこる急激な圧縮によってこの性質は助長され, 宇宙線電子と磁力線はいきおいよく腕から吹き上げられる (図 5). こうして腕の上空に土手のように分布する電波放射領域が形成されこれらが太陽から見るとスパーとして腕の上下に観測されるわけである.

以上のようなシナリオが正しいかどうかをためす為に, 中性水素ガスの観測から知られた腕の上下におよそ 1 kpc の高さに電波放射域が存在するとして全天の電波輝度分布を模型的に作ってみよう. 得られた電波輝度のモデル図が図 3-c であるが, 図 3-a に見られるスパー構造をよく再現している. しかしここに例外的なのがノース・ポラー・スパーである.

### 3. ノース・ポラー・スパー (NPS)

渦状腕の上下に電波放射域が分布するとする単純なモデルではこのスパーは再現出来ない. では NPS は何に起因しているのだろうか.

**NPS は SNR か:** NPS はループ I という別名の通り, きれいな円弧を描く. スパーに垂直に電波強度の分布を見てみると超新星レムナント (SNR) でおなじみの球殻状の衝撃波から予想されるものに類似している. この事実と, 丸いという事実から, 多くの研究者はこれを至近距離の SNR の一部ではなからうかと考えてきた. NPS に最初に注目したハンブリー・ブラウンは 1961 年の論文で, 当時のわずかな資料をもとに二つの仮説を提

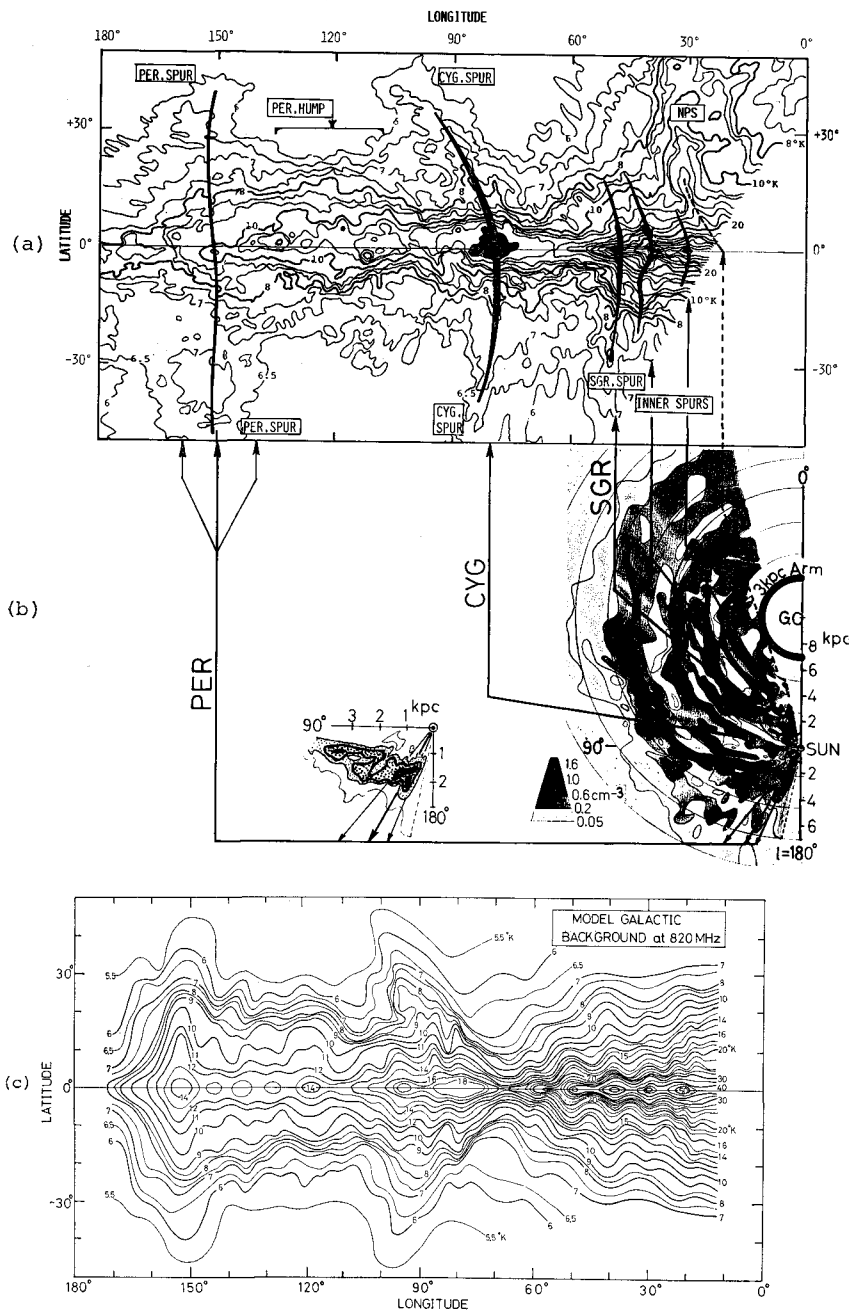


図 3 (a) 820 MHz 銀河電波の輝度分布 (ベルクイゼンによる). 太い線は主なスパーの位置. (b) 中性水素ガスによる銀河系の渦巻き構造 (ウェスタハウトによる). 腕の接線方向とスパーの位置関係を直線で示してある. (c) 図 5 のような仮説のもとに作られた電波輝度分布のモデル図. (a) の分布をよく再現する.

案した。第一は、私達の局所腕と射手座腕を結ぶ磁場の橋がかかっていて、これを太陽から見上げると NPS のようにうつとする銀河構造に帰する考え、そして第二の仮説が、ま近にある SNR の一部分であろうとする考えであり、これが今まで続く SNR 説の出所といえる。SNR 説は一寸違った形でやはり同じところに小田等によっても提唱されている。

NPS がループ状であることがはっきりするにつれて、

SNR 説が有力となり、以後 20 年間これが SNR であることを裏づけようとする努力がえんえんとなされて来た。しかし未だに決定的な証拠があがっていない。この間に銀河系内の方々に数 10 ケの新しい SNR が見つかかり、殆んど議論の余地なしに SNR としての市民権を獲得して来たのに対し、至近距離にあるはずの NPS が今だに議論ふんぷんとさせているのはなぜか。

SNR 説には一つ決定的な困難がある。電波強度が相

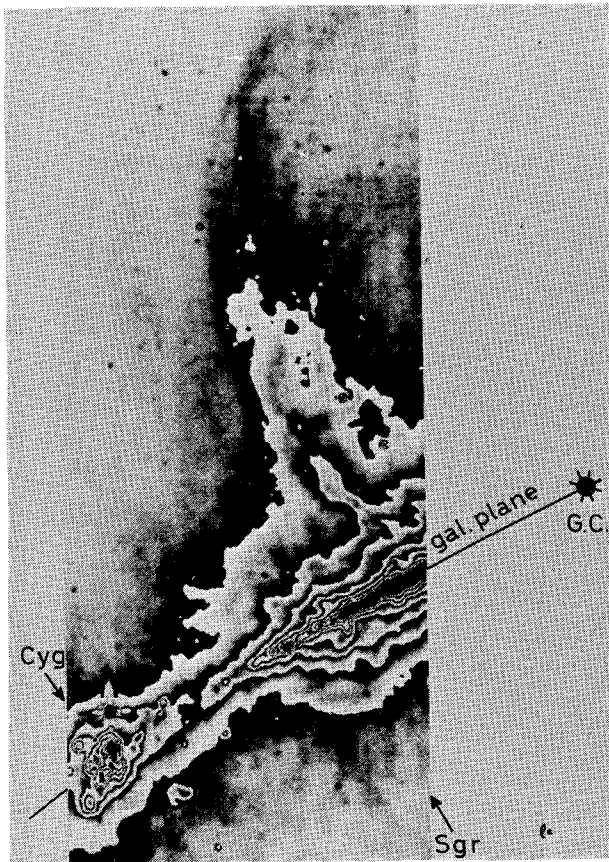


図 4 408 MHz に於けるノース・ポラー・スパー付近と銀河面の電波輝度分布 (ハスラム等による). 輝度は数段階に分かれ, それぞれグレースケールで示してある.

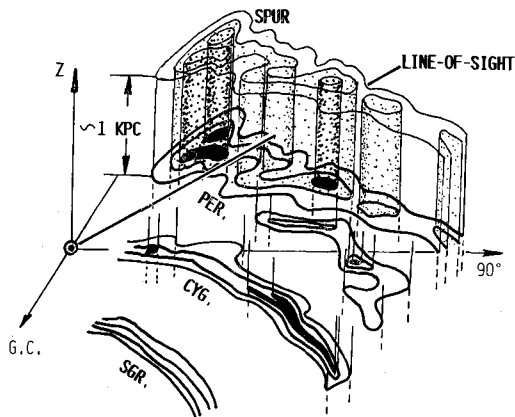


図 5 渦状腕の上空に位置する磁場と宇宙線からなる電波の輻射領域. 太陽から見るとこれがスパーとして見える.

当に強いにもかかわらず, 光で見えないのである. 今まで確実に SNR であるとされて来たもののうち, 比較的近い (2 kpc 以内) ものは例外なく光学写真に撮られている. 光で見えればスペクトル線から温度や密度, さらに

そのドップラー効果を使って運動が推定できる. 白鳥ループ, つまり白鳥座の網状星雲などはその代表である. 図 6 は S147 と呼ばれる非常に古い SNR で直径は 80 pc ある. 図のようにきれいな円弧状の球殻構造をもち, これを 5 GHz の電波で見るとやはり図 7 のように円弧状に見え, 一見 NPS に似かよっている. しかしこの電波輝度を 1420 MHz に換算すると球殻部分でも 0.5K ときわめて低い. 一方 NPS の輝度は 1420 MHz で 3~5K であるから S147 に比べてはるかに高い. エネルギー規模, 年齢ともに白鳥ループと大差ない SNR とすれば, その大円弧上どこにも光のフィラメントが見つからないのはなぜか.

NPS は X線でもぼんやり光っている.  $l=30^\circ$  付近の峯に沿って見ると軟 X線 (1 keV 以下) の強度は  $b=30^\circ-50^\circ$  で最も強く, 銀河面の近くでは見えなくなる. 至近距離にある SNR であるとすれば, X線強度があたかも銀河面ガスの吸収を受けているような銀緯依存性をもつことは理解しにくい.

というようなわけで SNR 説は未だ立証されたとはいえず, むしろ迷宮入りした感がある. ではこの説を暫時わきにおいて, 全く別の見地から NPS をみなおしてみたらどうだろうか.

**NPS は GER か:** ひんびんと略語がとびかかって恐縮だが, GER とは SNR に対して, これから提案しようとする銀河爆発レムナント (galactic explosion remnant) の略である. さて NPS についての観測事実をもう一度列記しよう. (1) シンクロトロン放射による電波の峯が円弧状にのびている. (2) 峯に垂直な電波輝度分布は球殻衝撃波を示唆する. (3) スパーは  $l=20^\circ, b \approx 2^\circ$  から高銀緯に向けて出発する.  $l=20^\circ$  は中心核爆発によるとされる 3 kpc 膨張リングの接線方向である. (4) 電波の峯の幅は  $b$  と共に増大する. (5) 光では見えない. (6) 峯に沿った X線強度は  $b=30^\circ-50^\circ$  で最強である. (7) 幅  $10^\circ-15^\circ$  の中性水素ガスのスパーが  $l \sim 30^\circ$  で銀河面に垂直に北にのびているが,  $b < 20^\circ$  で電波のシャープな峯との相関はみられない. ここではこのローカルな中性水素スパーは無関係という立場をとる.

さて NPS は (1)(2) の事実から球殻状の衝撃波現象であろうと思われる. (3)(4) の事実から銀河面と密接に関わっている. 3 kpc 膨張リングとの相関を重視すれば, 銀河中心核の活動と関係した現象と考えてよいだろう. NPS の根元を 3 kpc リングに一致させればそのサイズは約 10 kpc の大球殻である. 距離は 8~9 kpc と遠く, さらに銀河面から数 kpc の希薄なハロー中に存在するはずだ. この考えは (5) の事実と矛盾しない. 軟 X線の銀

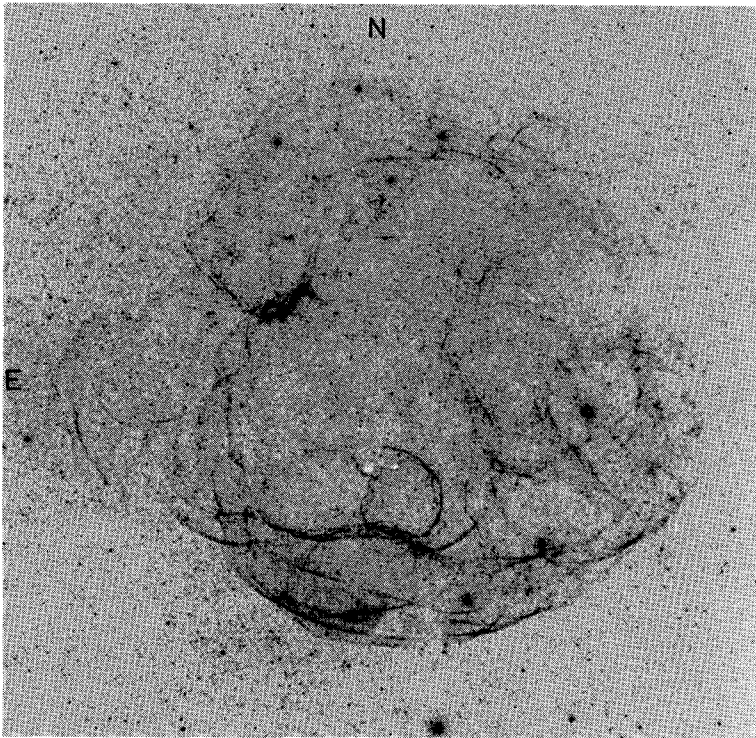
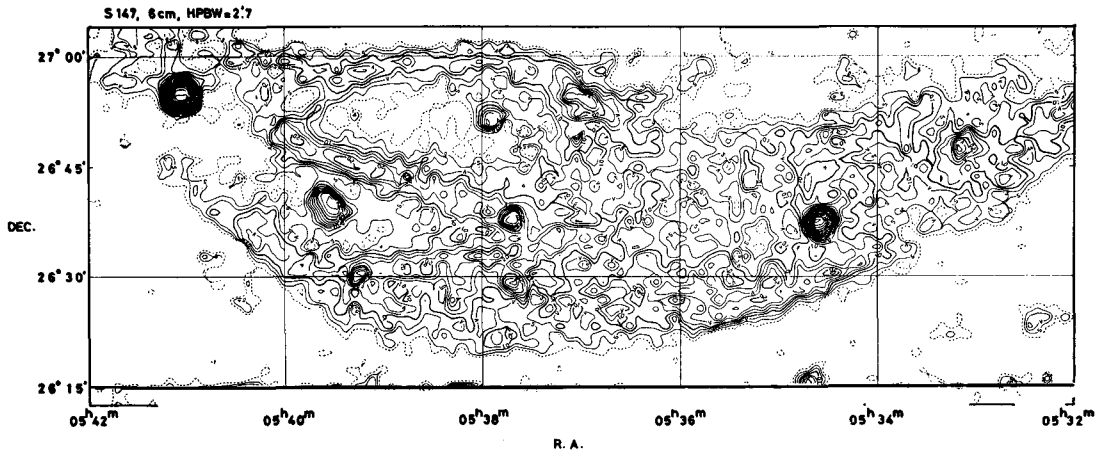


図 6 典型的な古い超新星レムナント, S147. 推定年令  $1.5 \times 10^5$  年, 直径 80 pc (写真: ヴェン・デン・ベルグによる)

図 7 超新星レムナント S147 南部の 5 GHz 電波輝度分布. ボン 100 m 鏡にて著者観測



河面吸収によって (6) の低銀緯吸収が現れる. ただし高銀緯で弱くなる理由は説明をまたねばならない.

つまり, NPS を銀河中心核の爆発に伴う大球殻状の衝撃波であると考えられないか. この推論を次節以下で理論的に確めていこう.

#### 4. 中心核爆発と衝撃波の伝播

銀河系の中心核で各種の爆発現象が生じていることは中心域で観測されるいくつかの膨張リング構造でよく知られている. 解放されるエネルギーの総量は一回の爆発について  $10^{55}$ - $10^{56}$  エルグと推定される. このエネルギ

ーは他の渦巻銀河, 例えば NGC 4258 などの中心核爆発で推定されているエネルギーと同量であるが, 楕円銀河の中心核爆発や準星などのエネルギー,  $10^{50}$  エルグに比べれば小さい.

爆発にともなってまわりの星間ガス中に強い衝撃波 (ショック) が発生する. この衝撃波は銀河円盤をつきぬけてハローへ, さらに銀河間空間へと伝播する. 銀河円盤内では濃い星間ガスにさまたげられて強い減速をうけるショックも, ハローの方向へはたやすく吹きぬけて高速度で伝播するだろう. 銀河円盤内, ハローさらに銀河間空間のガス分布を与えてショックフロントの伝播の様

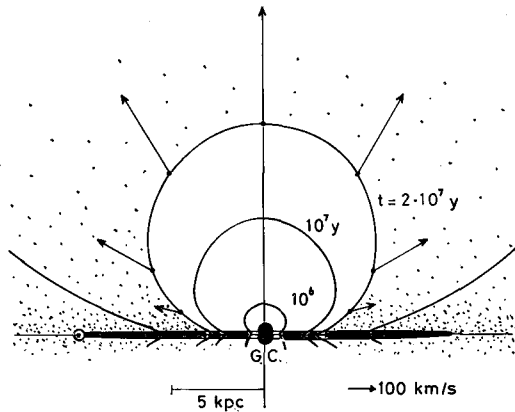


図 8 銀河中心核の爆発 (エネルギー  $10^{56}$  エルグ) に伴うショックフロントの伝播. 爆発後  $2 \times 10^7$  年のフロントが NPS として観測されている.

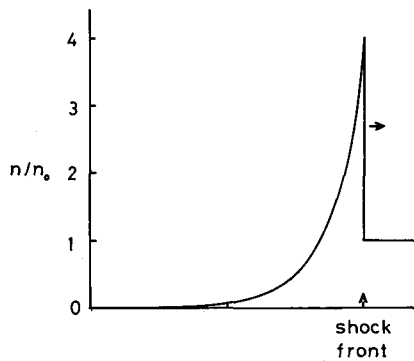


図 9 ショックフロントの内側のガス密度分布.

子を調べてみよう. 計算にはラウムバツハ・プロブスタイン及び坂下らの方法を用いる.

**銀河内のガス分布:** 計算を簡単にする為にガスは断熱的であるとする. この近似は高温希薄なハローではよい近似である. ガスの分布は回転対称とし, 次の三つの成分の重ね合わせであるとする. a) 半径方向に 7 kpc,  $z$  方向 (面に垂直) に 100 pc のスケールハイトでガウス函数的に減少する密度をもつ回転楕円体. 中心での密度を水素原子の個数にして  $1 \text{ cm}^{-3}$  とする. b)  $z$  方向にスケールハイト 1 kpc で指数函数的に減少するハロー成分. 銀河面で  $0.1 \text{ cm}^{-3}$  の密度をもつ. c) 全体をとりかこむ密度  $10^{-6} \text{ cm}^{-3}$  の銀河間ガス. これらをたしあわせた密度分布は銀河系円盤はもとよりハローのガス分布の観測をほぼ再現するようにとられている.

**NPS or GER モデル:** さて爆発のエネルギー  $E$  をパラメータとしてショックフロントの伝播を計算しよう. 太陽から見かけ上ショックフロントの形が最もよく NPS の峯に一致する時刻  $t$  を,  $E$  をパラメータに含んだまま求める.  $t$  に於ける銀河面内のショックフロント

の速度  $v$  がやはり  $E$  をパラメータに含んで同時に求まる. 一方 3 kpc リングの膨張速度が観測から 53 km/s と知られているからこの速度  $v$  を 53 km/s に等しく置くことによって  $E$  が逆に求まる. 同時に  $t$  も知ることが出来る. こうして得られた爆発のエネルギーは  $E=10^{56}$  エルグ, NPS の爆発後の年令は  $t=2 \times 10^7$  年となる. 計算から得られる NPS の  $z$  方向の半径は 12 kpc, そこに於ける膨張速度は 500 km/s である. 銀河面のショックフロントは半径 3 kpc, 膨張速度は先に合わせたとおり 53 km/s である. 図 8 はショックフロントの時間的な変化を示す.

このモデルに従えば  $b \sim 30^\circ$  付近の NPS の膨張速度は 300 km/s, このあたりの銀河中心からの距離は約 7 kpc, 銀河面からの高さ約 4 kpc である. 断熱的な強いショックの場合, フロント近く的气体密度はまわりのそれに比べて 4 倍に圧縮される. ガス密度の半径方向の分布は図 9 に示すようになる. ガスは半径の 1/20 程の薄い球殻に圧縮されている. 磁場と宇宙線電子も同時に圧縮, 加速されるからフロント直後のシンクロトロン放射率はまわりの数十倍に増大する. この球殻を接線方向に見通せば電波輝度はショックが通過する以前の約 10 倍になる. ハローの電波放射率はまだはっきりしていないが, 1420 MHz でハロー成分を 1K 程度とすると NPS で 10K 位となる. 波面が理想的な球からずれていることや, ゆらぎを考慮すれば, 最も明るい部分で数度 K という観測値に近い値を得る. こうして 3 kpc リング, 銀河面との相関などを含めて前節 (1)~(4) の観測事実をほぼ再現することが出来る.

では X 線はどうか.  $b=30^\circ \sim 40^\circ$  方向のショックフロントの速度は 300 km/s であるから, フロント直後のガスの温度は約  $5 \times 10^6 \text{ K}$  の高温に加熱されている.  $z \sim 4$  kpc の高度ではハローのガス密度は  $2 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$  であるから, フロント直後のガス密度は  $8 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$  となる. これらの値からフロントを接線方向に見とおして最も明るい部分の軟 X 線強度は星間吸収を補正したのち 0.3 keV 付近で約  $20 \text{ keV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ , さらに 0.7 keV 付近で約  $40 \text{ keV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1} \text{ keV}^{-1}$  となり, 観測される NPS の X 線強度に近い. 銀河面ガスによる吸収, 及び銀河面近くではショックの速度が遅くなることを考慮すれば, 峯にそって低銀緯で強度が弱くなるという観測にも矛盾しない. 又高銀緯,  $b > 50^\circ$  ではハロー密度が著しく低くなるためにやはり X 線強度は弱くなる. さらに高温希薄なハロー領域で, 高々まわりの 4 倍にしか圧縮されない断熱的なショックであるから, 可視光域の輝線はもとより, 連続光でも非常に低輝度である. 光学観測にかからない理由である.

NPS は北天ではっきりとループ状をしているが, 銀

河面の南では、まだ良い観測がないこともあってはっきりしていない。しかし GER 説から予測される位置、 $l=320^\circ$ ,  $b=-20^\circ$  から南にのびる NPS と対称的なスパークは注目に値する(図 2)。銀河の回転軸( $l=0^\circ$ )に関する東西非対称に関しては GER 説では明らかでない。爆発の非対称、ハローガス分布の非対称を考慮に入れたモデルの検討と共に、南天のくわしい電波観測がのぞまれる。

## 5. 結 び

ノース・ポーラー・スパーク(ループ I)の解釈についてはこのほかに、先に述べた渦状腕と腕の間に走るサブリッチであるとする説や、局所腕に巻きつく螺旋磁場の一部であるとする説などがある。しかし電波輝度の分布からみて、SNR あるいは GER のように衝撃波現象としてとらえる方が自然のようだ。

ループ I に気をよくして他にも似た構造がないかと探してみる。ループ II, III, IV といういずれも視直径  $40^\circ \sim 80^\circ$  の電波ループが天球上に指摘されているが、い

れも非常に低輝度で、やはり光で顕著な構造は見えない。これらはおそらく第 2 節で見たたくさんの方の見かけ上の現象と考えるのが妥当だろう。電波バックグラウンドは銀河構造、特に渦状腕の立体的な構造を複雑に反映している。見かけ上大きく広がった低輝度の対象をはっきりと同定しようとするならばきわめて注意深くしなければならない。銀河面近くの強い電波放射を引き去った、レジデュアルについての輝度分布を作るようなデータ処理が望まれる。これは今後の課題である。

電波天体の同定あるいは分類に際しては、光学写真に撮られてはじめて電波銀河であるとか、準星である、あるいは電離ガス領域又は SNR であるとして到着するのが常のようだ。しかし NPS が写真にとれない以上、そして人間の目が光にしか感じない限り、立派な電波天体がいづまでも確固とした市民権をもてないというのではかわいそうな話だ。電波などのデータの範囲でなるべく早く決着をつけてやらねばなるまい。ここに紹介した新しい考え方がその一助になればうれしい。

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価320円(〒49円) 80-1 月号・12月5日発売!

### ●1月号のおもな内容

- ★1980年の流星群の状況について、富岡啓行さんの解説。
- ★京都大学飛騨天文台の太陽望遠鏡が、テスト撮影を始めましたが、太陽の観測にどんなプラスがあるのか、どんな成果を期待されているのかなど、台長に就任された川口市郎先生の説明です。
- ★流星の眼視観測で、光度の測定はなにを基準にして測定するのでしょうか。また痕と残像の判定は? 藪保男さんの解説です。
- ★新連載「HII領域めぐり」——磯部瑠三さんの担当。
- ★その他、読者の工作は月面専用望遠鏡、木星の環、天体写真とフィルム②、1月の星空など満載。

## カセット

# 四季の星座めぐり

●藤井旭=企画・構成/定価5800円/12月中旬発売予定  
本だけでは理解しづらい、星座の見つけ方・楽しみ方を解説テープと星座図で立体的に構成。星座を学ぼうとする方や、学校の教材などに最適です。

《体裁・内容》カセット・テープ(C-40 2本) / 四季の星座ガイドブック/カラー星座カード12ヵ月/カラー全天星座図/ポケット星座早見

## 天文年鑑1980

●天文年鑑編集委員会編/B6判・450円発売中

カラー版

## 藤井旭の 四季の星座教室

●藤井旭著/B5変型判・1800円発売中

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5  
振替東京7-6294 電話03(292)1211