

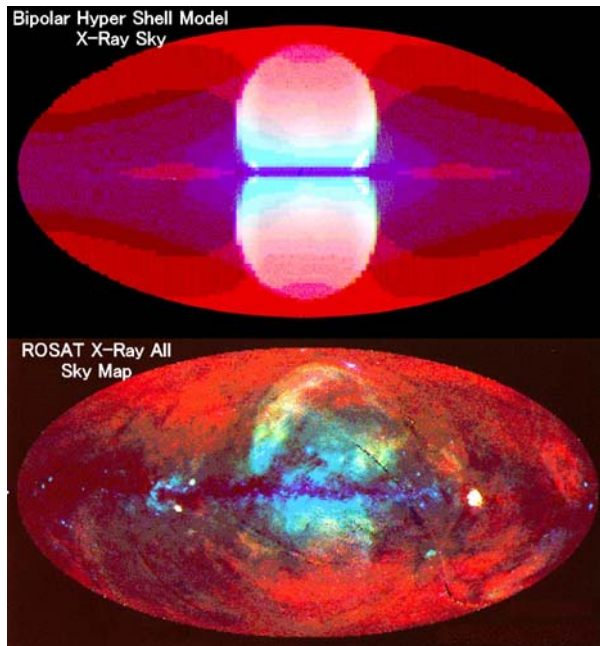
Did the galaxy explode? - 30 Years of Lone Fighting Controversy -

Yoshiaki Sofue

2006, Astronomical Herald, ASJ

Half-a-Century Debate

2022, revised



1, Huge radio loop on the Sky

If you look at the summer Milky Way from the constellation Sagittarius to the northern sky with radio waves, you will see a huge arc with a diameter of 120 degrees. Since the brightest part extends from the galactic plane to the northern silver crest, it is traditionally called the North Polar Spur (NPS: North Polar Spur Protrusion). The entire arc is traced in a circle and is also called Loop I. Other loops have been traced on the all-sky radio maps, labeled as Loops II, III, and IV, with some researchers claiming to have found V and VI.

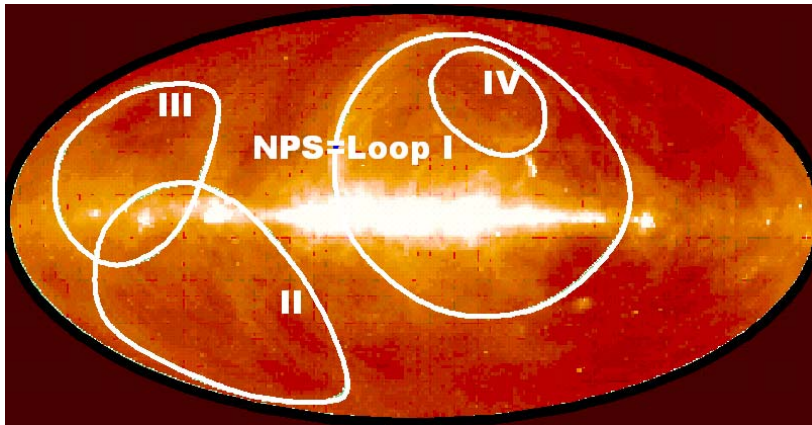


Figure 1: A 408 MHz all-sky radio map (Haslam et al.) showing loops I-IV. This is the basis for the supernova remnant theory.

Immediately after the discovery of radio arcs in the 1950s and 1960s, the theory that they were supernova remnants (SNR) at close range was proposed, and since then the SNR theory has been widely believed, mainly by European researchers. Assuming that the loops are supernova remnants, and applying the known relationship between surface brightness and diameter for shell-shaped supernova remnants such as the Veil Nebula in Cygnus, the actual diameter of each loop is about 100 pc. Therefore, the distance is also close, and it is an account that is abnormally dense at the position of 100-200 pc from the Sun. However, the spherical shell structure of the filament, which is visible in the light peculiar to supernova remnants, is not visible. It was a strange theory that I couldn't believe.

2. All sky radio map and spur

In the 1970s and 1980s, it seemed that the precision of loop observations would improve as the all-sky radio map was created on a grand scale. On the other hand, however, the existence of various radio spur structures rising from the galactic plane became clear, and I became interested in the relationship between radio spurs and spiral structures. Since some of the roots of the loops are aligned with the tangential direction of the spiral arms, I thought that the arm of the magnetic field and cosmic rays bulged like a bank in the sky and looked vertically. Most of the spur structures are well reproduced by constructing a spiral arm model and calculating the brightness distribution.

However, only the NPS draws a clean loop, although it cannot be said to be perfect, and

the cross-sectional brightness distribution also indicates that it is a shell-shaped shock wave. However, if it is a supernova remnant at close range, there are various unreasonable things. Around that time, radio observations of extra-solar galaxies progressed, and in starburst galaxies such as NGC253, gigantic shells and jet structures that erupted from the galactic plane into the sky, began to be observed.

The author, who loves maps, spent his days and nights looking at the all-sky radio map (Fig. 2a), and one day he came up with an idea. There may be a large explosion at the center of the Milky Way galaxy, and the remnants of that may be the NPS. Looking at the radio map with that in mind, I found that the radio structures that erupted in the sky were concentrated in the direction of the galactic center, and Loop I looked like a bubble that erupted from the galactic plane.

3. Big explosion model

However, at the time, this idea was an absurd idea and nobody took it seriously. Once you have an idea, you can test it with a really simple model. All you have to do is place a galactic disk, a halo, and intergalactic gas surrounding the Milky Way, and make a big explosion at the center. First, we calculated the propagation of the MHD high-speed wave developed by Uchida by assuming it to be a shock wave. Furthermore, we calculated the wave front propagation of Sakashita and Melenhoff's adiabatic shock waves.

Both results are as expected, and the shock wave front that expands into a spherical shape in the central region immediately after the explosion eventually becomes pinched and constricted in the direction of the disk, growing into an Ω shape that expands above and below the galactic plane. It is a diagram of a baked rice cake drawn in a cartoon. And if you project the Ω -shaped wave front onto the celestial sphere and superimpose it on the radio diagram, you will find that it exactly matches the NPS. Furthermore, assuming that the magnetic field and cosmic rays are in pressure equilibrium, and giving the synchrotron emissivity to the power of the gas density, the radio wave intensity distribution can be reproduced very well. FIG. 2b shows the radio wave intensity distribution calculated considering the synchrotron radiation in the spiral arms.

A blast energy of 10^{55-56} ergs at the center is required for a good match. It is about 10,000 times the energy of a Type II supernova explosion. At the time, it was thought of

as a central point explosion, but today it can be thought of as the energy of a medium-sized starburst. However, compared to the SNR theory, it was a bold hypothesis that was 100 times greater in terms of distance and 10,000 times greater in terms of energy.

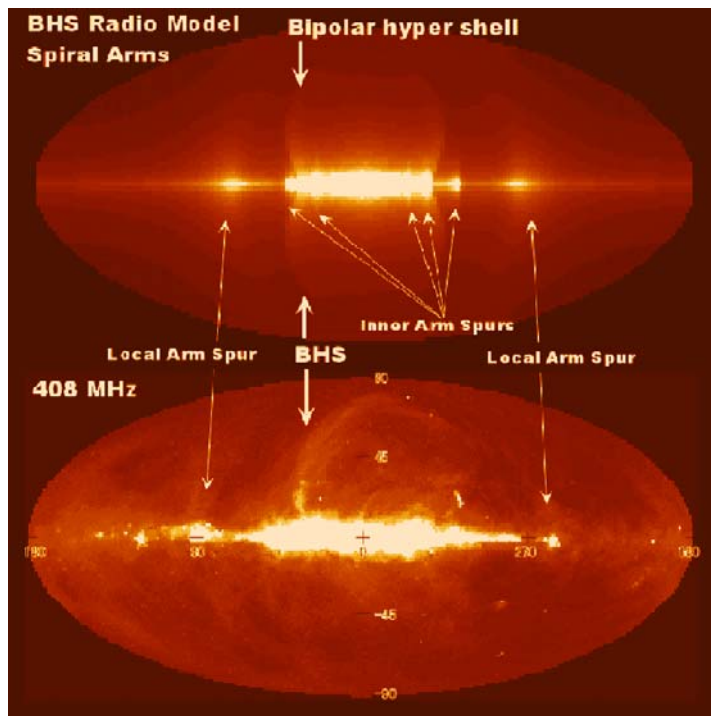


Figure 2 Bottom: 408 MHz all-sky radio map by Haslam et al. Top: A model radio map based on the galactic center explosion and spiral arm structure.

4. X-ray distance is the decisive factor

(Ref: Soft X-ray observations by McCammon et al. in the 1980s and all-sky X-ray maps by ROSAT by Snowden et al.)

Since soft X-rays are scattered and absorbed by metal ions contained in the interstellar medium, the absorption coefficient is proportional to the density and distance of the interstellar gas, and the lower the energy (energy to the power of -2.5), the larger the absorption coefficient. In the interstellar gas of normal metallic composition, X-rays with energies of 0.25, 0.75, and 1.5 keV penetrate gas column densities of 1.6×10^{20} , 2.5×10^{21} , and 1.4×10^{22} hydrogen atoms cm^{-2} . After passing, the intensity is attenuated by a factor of e . Assuming that the average density of the interstellar gas is 1 hydrogen

atom cm^{-3} , they correspond to distances of 41 pc, 640 pc, and 3600 pc, respectively. For example, if 1.5 keV X-rays are absorbed, the source is farther than 3.6 kpc.

Let's look at the ROSAT X-ray intensity maps of 0.25, 0.75, and 1.5 keV (Figure 3: The cover is a composite of red, green, and blue). Now the X-rays from the NPS in question are absorbed all over the 0.25 band, indicating that the source is more than 40 pc away. This is consistent with the SNR theory. However, as the energy rises, it can be seen that it undergoes rapid absorption as it approaches the galactic plane. Even 1.5 keV is absorbed almost completely in the galactic plane, not just a fraction of e. From this it can be clearly seen that the source is several times 3.6 kpc far away.

By the way, if loop I-IV is a supernova remnant at a position of 100 pc, absorption should be almost zero in any energy band, and a complete loop must be drawn. Figure 4 shows Loop I superimposed on the ROSAT X-ray map, clearly absorbed in the galactic plane.

Cover image ROSAT all-sky X-ray map by Snowden et al. (bottom). X-ray intensity distribution based on the galactic center explosion model (top). Red, green and blue indicate X-ray intensities of 0.25, 0.75 and 1.5 keV, respectively.

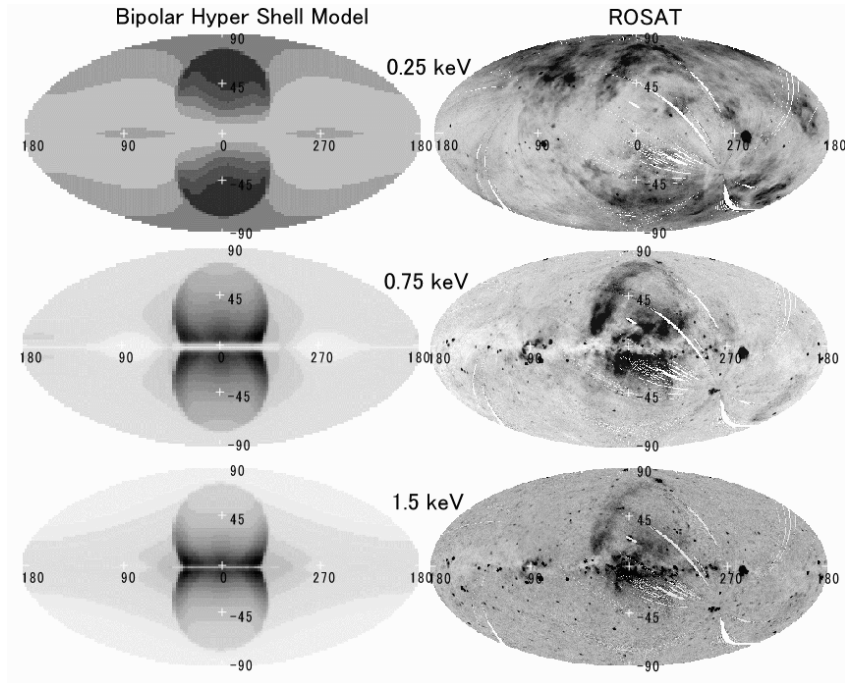


Figure 3 Right: ROSAT all-sky X-ray map by Snowden et al. Left: X-ray intensity distribution based on the galactic center explosion model. X-ray intensities of 0.25, 0.75 and 1.5 keV are shown from the top.

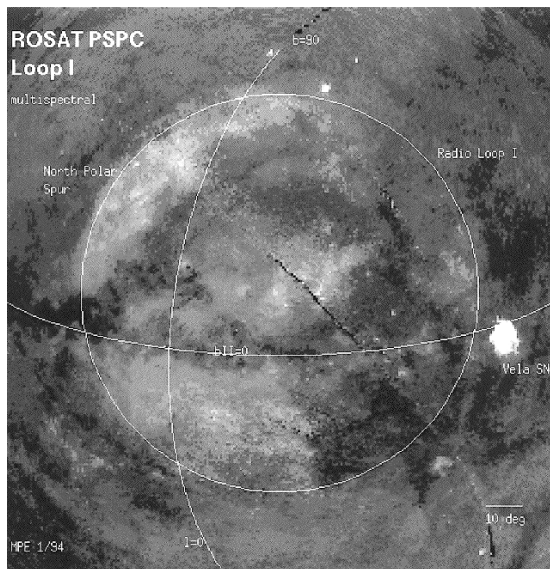


Figure 4: ROSAT-X-ray map fitted with Loop I.

4. Bipolar hypershell model - Giant Galactic Bubbles -

Then, can X-ray observations be successfully reproduced with a large explosion model at the center of the galaxy? In the above-mentioned shock wave model from the center, it was found that a spherical shell with an omega-shaped swelling is formed above and below the galactic plane. Let's call this a hyperbolic hypershell.

In the calculation of the shock wave, the density and velocity of the gas on the wavefront, and thus the temperature, can be obtained, and the X-ray emissivity according to the energy can be calculated. On the other hand, the interstellar gas distribution from the galactic plane to the halo is known from HI and CO emission line observations, so it can be given as a model. Furthermore, for the spiral arm, we give the spiral with a pitch angle of 12 degrees and the overdensity along it.

In this way, the X-ray emissivity from the explosion wave front and the distribution of the absorptance by the Milky Way are given, so the radiative transport for each line of sight is solved, and the 0.25, 0.75 and 1.5 keV bands in the whole sky are obtained. The x-ray distribution at can be drawn computationally. The calculation results are shown on the left side of FIG. The intensity of each energy band is represented by red, green, and blue, and the combined result is shown on the cover.

Comparing the simulation results with the ROSAT observations in Figure 3 and the figure on the cover, it can be said that the reproduction is almost satisfactory. In particular, it can explain the strong absorption in the galactic plane and the distribution of X-ray radiation that is concentrated in the galactic center and spreads vertically like a dumbbell.

In order to reproduce the X-ray spectrum, a shock wave front temperature of 10 million degrees and a wave front expansion speed of 200 km/s are required. For that reason, there must have been a 10^{55} erg explosion at the center of the galaxy 15 million years ago. It is natural to assume that a normal-sized starburst has occurred.

By the way, the giant bipolar shell found in NGC253 by X-rays and radio waves can also be reproduced with a model with almost the same parameters as our Galactic bipolar hypershell (Fig. 5). In other words, the Milky Way galaxy was in the past a member of famous starburst galaxies such as NGC253.

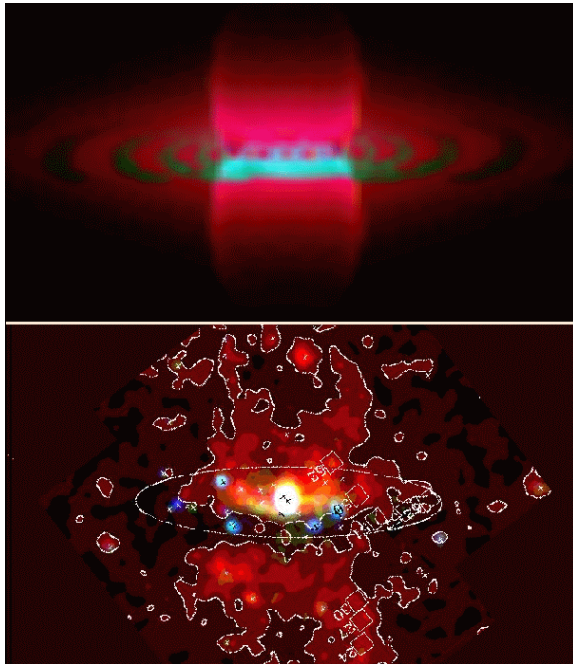


Figure 5: X-ray bipolar shell (bottom) observed in the starburst galaxy NGC253 and reproduction by the bipolar hypershell model (top). It looks exactly like the hypershell of the Milky Way galaxy.

5. The 30-year controversy continues (half-a-century debate since 1977)

"Well, how did the readers feel about this?" Of course, I believe this theory to be true. Between the supernova remnant theory and the galactic center explosion theory, I think it is clear that the latter is the winner. But the industry is not so sweet.

Although it's not as frequent as it once was, papers are still written that refer to loops I, II, and so on as supernova remnants. The home page of ROSAT is decorated with color photographs as shown in Figure 4. One person even wrote a doctoral thesis on the supernova remnant theory based on ROSAT data. On the other hand, I have yet to come across any papers related to the center of the galaxy, other than my series of papers. Ever since I wrote my first paper in the 1970s, the galactic explosion theory has been frowned upon.

"Should I be happy or sad about this situation?" It is exhilarating to advance the theory of winning alone without anyone noticing, but it also makes me sad that no one recognizes the victory (value?). I would be happy if everyone could adopt my ideas and

discuss the Galactic Starburst on a grand scale, but if that happens, it might be too noisy. It's been 30 years, so the situation may not change for the next 30 years. There was also a retrial of Galileo, so it may be useless to rush.

銀河系は爆発したか？—孤軍奮闘の30年論争—

2006 祖父江義明

半世紀論争

2022

1, 巨大な電波ループ

夏の天の川をいて座から北天にかけて電波で眺めると、直径120度におよぶ巨大な円弧が覆い被さってくる。もっとも明るい部分は銀河面から北の銀頂にむけてのびるので、古来ノースポーラースパー(NPS: North Polar Spur 突起の意味)とよばれている。円弧全体を丸くたどってループ I ともよぶ。全天の電波図にはこのほかのループもたどって、ループ II、III、IV の名前がつき、研究者によっては V、VI まで見つけたと主張するものもある。

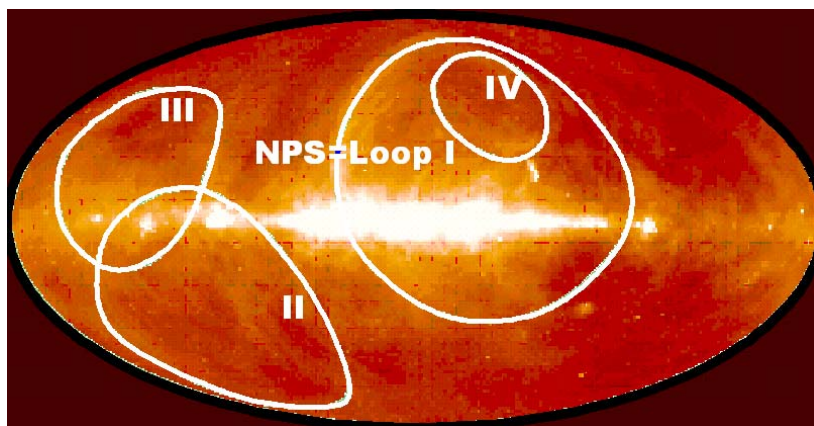


図1：408MHz 全天電波図（ハスラムらによる）にループ I—IV を描いたもの。超新星残骸説の根拠となっている。

1950—60年代に電波円弧が見つかって直後、これらは至近距離にある超新星の残骸（SNR）であるとする説が唱えられ、以来主としてヨーロッパの研究者を中心にSNR説が広く信じられてきた。ループが超新星残骸であると仮定して、白鳥座の網状星雲などシェル型の超新星残骸について知られている表面輝度と直径の関係をあてはめると、実直径はいずれも100pcほどになる。したがって距離も至近で、太陽から100—200pcの位置に異常に密集している勘定である。ところが超新星残骸特有の光で見えるフィラメントの球殻構造は見えていない。私にとってはどうも納得できない不思議な説であった。

2. 全天電波図とスパー

1970～1980年代に入り、全天の電波マップが盛大に作られるようになると、ループ観測の精度も上がるかに思えた。しかし一方で銀河面から立ち上るさまざまな電波スパー構造の存在があきらかになり、筆者は電波スパーと渦状構造の関連について興味をもつようになった。ループの根本のいくつかは渦状腕の接線方向に一致していることから、磁場と宇宙線の腕が上空に土手のように膨らんでいるのを縦に見通していると考えたのである。渦状腕モデルをたてて輝度分布を計算してみるとほとんどのスパー構造が見事に再現される。

しかしNPSだけは、完全とはいえないが、きれいなループを描いており、断面の輝度分布もシェル（球殻）状の衝撃波であることを示している。ただ至近距離の超新星残骸とするといろいろと無理がある。そのころ系外銀河の電波観測が進み、NGC 253などスターバースト銀河で、銀河面から上空に噴き出す巨大なシェルやジェット構造が観測されるようになった。

マップが大好きな筆者は、ハスラムらの408MHz全天電波図（図2a）を日夜眺め暮らすうちに、ある日考えた。ひょっとして天の川銀河系においても、中心で大爆発があり、その名残がNPSなのではないだろうか。そのつもりになって電波図を眺めてみると、上空に噴き出す電波構造は銀河中心の方向に集中していて、ループIも銀河面から噴き出した泡のように見える。

3. 大爆発モデル

しかしこの考えは、当時としては突拍子もない発想で誰も相手にしてくれなかった。考えついてしまえば実に簡単なモデルで検証できる。銀河ディスクとハロー、そして銀河系をかこむ銀河間ガスを置き、中心で大爆発を起こしてやればよいのである。最初は内田によって開発されたMHD高速波の波面を衝撃波に見立てて伝播を計算してみた。さらに坂下、メレンホフの断熱衝撃波の波面伝播を計算してみた。

いずれの結果も予想どおりで、爆発直後に中心域で球形に膨張する衝撃波面も、やがてディスク方向ではばまれてくびれて、銀河面上下に膨らむ Ω 形に成長する。漫画に描く焼き餅の図である。そして Ω 状の波面を天球上に投影して、電波図に重ねてみると、NPSにぴたりと一致する。さらに磁場と宇宙線が圧力平衡にあると仮定し、シンクロトロン放射率をガス密度のべき乗であたえて電波強度分布をつくってみると、観測を実によく再現する。さらに渦状腕におけるシンクロトロン放射も考慮して計算した電波強度分布が図2bである。

良い一致を見るためには中心での爆発エネルギーは 10^{55-56} エルグが必要である。タ

イプⅡの超新星爆発エネルギーのおよそ1万倍である。当時は中心の点爆発とも考えたが、今日では中規模スターバーストのエネルギーと考えればよい。しかしSNR説に比べて、距離にして100倍、エネルギーにして1万倍かけはなれた大胆な仮説であった。

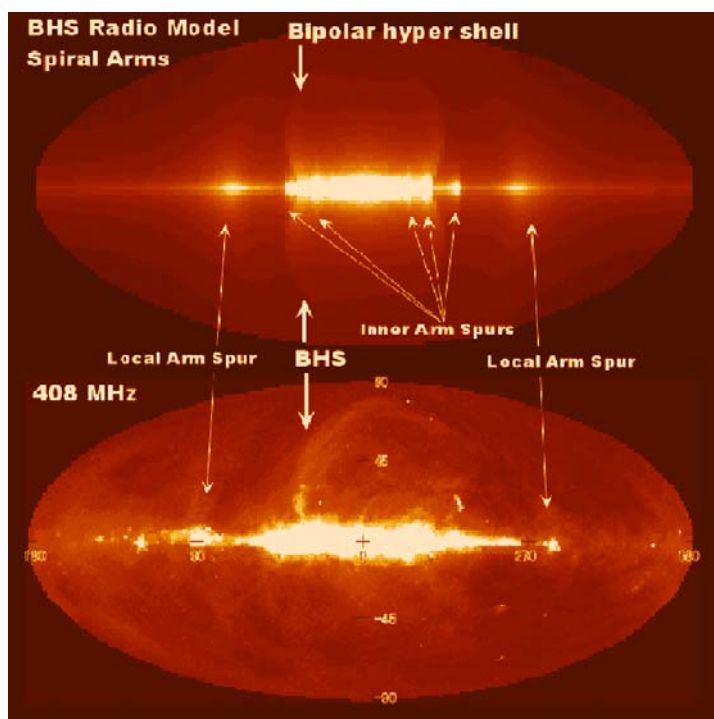


図2 下：ハスラムらによる408MHz全天電波マップ。上：銀河中心の爆発と渦状腕構造にもとづくモデル電波図。

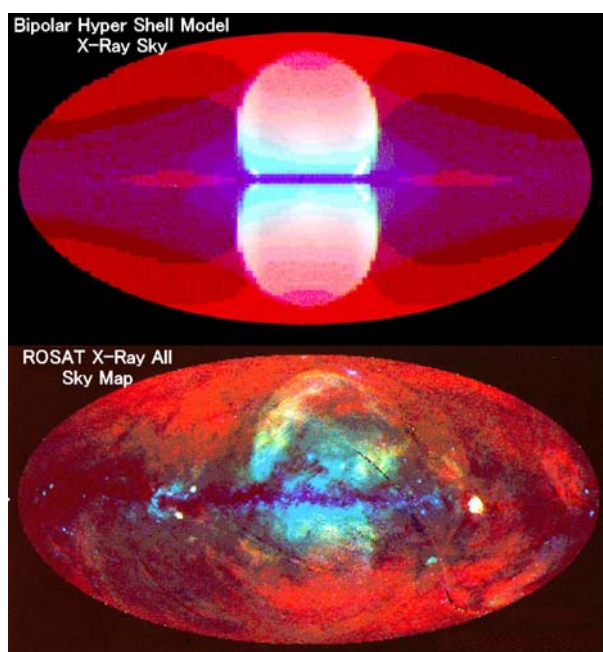
4. X線距離が決め手

距離100pcのSNRか、8kpcの銀河中心爆発か、その決め手を、1980年代のマッキヤモンらソフトX線観測、そして1990年代のスノウデンらによるROSATによる全天X線マップが与えてくれた。

ソフトX線は星間物質に含まれる金属イオンで散乱吸収されるので、吸収係数は星間ガスの密度と距離に比例し、またエネルギーが低いほど（エネルギーの -2.5 乗）大きくなる。通常の金属組成の星間ガス中では、エネルギー0.25、0.75、1.5 keVのX線は、ガスの柱密度 1.6×10^{20} 、 2.5×10^{21} 、 1.4×10^{22} 水素原子 cm^{-2} を通過すると、強度が e 分の1に減衰する。星間ガスの平均密度が1水素原子 cm^{-3} とすると、それぞれ、41pc、640pc、3600pcの距離に対応する。たとえば1.5keVのX線が吸収を受けていれば、放射源は3.6kpcよりも遠方にあるということになる。

そこで ROSAT による 0.25, 0.75, 1.5 keV の X 線強度マップをながめてみよう (図 3 : 表紙は赤、緑、青で合成したものえ)。さて件の NPS からの X 線は、0.25 帯では全面にわたって吸収され、放射源が 40 pc よりも遠方であることがわかる。これは SNR 説と矛盾しない。ところが、エネルギーが上がると、銀河面に近づくにつれ急激な吸収を受けていることがわかる。たとえ 1.5 keV でも銀河面では e 分の 1 どころではなく、ほぼ完全に吸収されている。このことから放射源が 3.6 kpc の数倍遠方であることがはっきりと分かる。

ちなみにループ I—IV が仮に 100 pc の位置にある超新星残骸だとすれば、どのエネルギー帯でみても吸収はほとんどゼロのはずで、完全なループを描かなければならない。図 4 はループ I を ROSAT の X 線マップに重ねたものだが、銀河面で明らかに吸収されている。



表紙図 スノウデンらによる ROSAT 全天 X 線マップ (下)。銀河中心の爆発モデルによる X 線強度分布 (上)。赤、緑、青はそれぞれ 0.25, 0.75, 1.5 keV の X 線強度を示す。

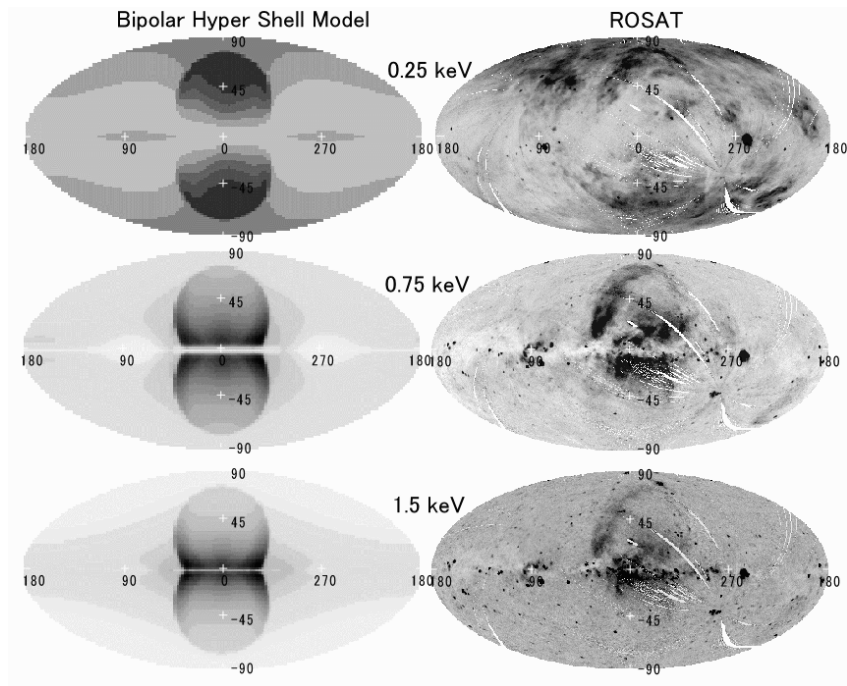


図3 右：スノウデンらによる ROSAT 全天X線マップ。左：銀河中心の爆発モデルによる X線強度分布。上から 0.25, 0.75, 1.5 keV の X線強度を示す。

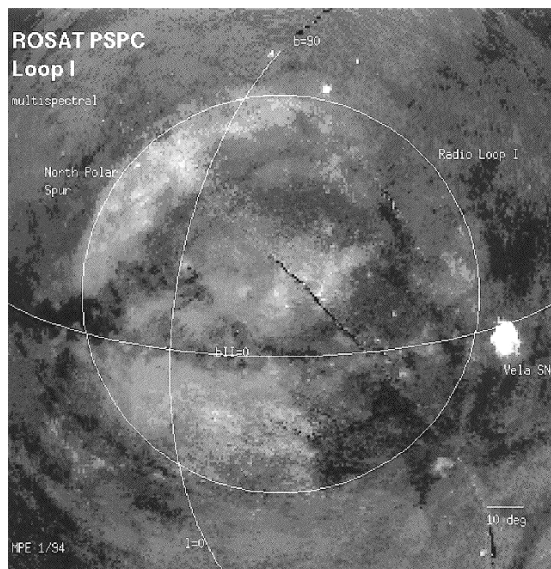


図4：ROSAT—X線マップにループ I をフィットした図。

4. 双極ハイパーシェルモデル

ではX線観測を、銀河中心の大爆発モデルでうまく再現することができるだろうか。すでに述べた中心からの衝撃波モデル、銀河面の上下にΩ形に膨らむ球殻ができることが分かった。これを双曲ハイパーシェルと呼ぼう。

衝撃波の計算で、波面のガス密度および速度、したがって温度が求められ、エネルギーに応じたX線放射率を計算することができる。いっぽう銀河面からハローにかけての星間ガス分布は、HIやCO輝線観測で知られているので、モデル的に与えることができる。さらに渦状腕については、ピッチ角12度の渦巻きとそれに沿う密度超過をあたえる。

このようにして、爆発波面からのX線放射率と、銀河系による吸収率の分布が与えられるので、視線ごとに放射輸送を解いて、全天で0.25, 0.75, 1.5 keV帯でのX線分布を計算で描くことができる。計算結果を図3の左に示す。エネルギー帯ごとに強度を赤、緑、青で表して合成したものを表紙に示す。

図3および表紙の図で、シミュレーション結果を、ROSAT観測と比較すれば、ほぼ満足のいく再現がされているとあって良いであろう。とくに銀河面で強い吸収を受けている様子、銀河中心に集中して上下にダンベル状に広がったX線放射の分布、などを良く説明することができる。

X線スペクトルを再現するためには衝撃波面の温度は1000万度、波面の膨張速度は秒速200 kmが要求される。そのためには、今から1500万年前に銀河系の中心で 10^{55} エルグの大爆発があったはずである。通常の規模のスターバーストが起きたと考えるのが自然である。

ちなみにNGC 253にX線および電波で見つかった巨大な双極シェルも、我が銀河系双極ハイパーシェルとほとんど同じパラメータのモデルで再現できる(図5)。つまり天の川銀河系は、過去においてNGC 253など著名なスターバースト銀河の仲間であったことがうかがえる。

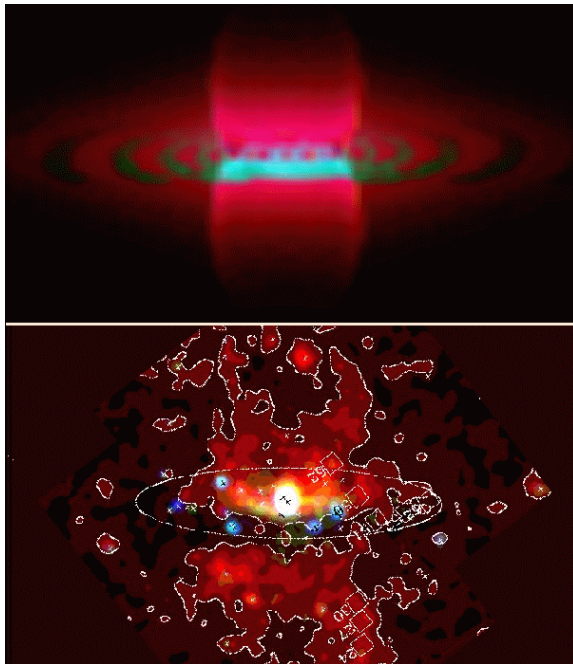


図5：スターバースト銀河NGC 253に観測されたX線の双極シェル（下）と、双極ハイパーシェルモデルによる再現（上）。天の川銀河系のハイパーシェルに瓜二つである。

5. 30年論争はつづく

さて、読者の皆さんはどうお感じになっただろうか。もちろん筆者はこの説が正しいと確信している。超新星残骸説と銀河中心爆発説では、後者に軍配が上がることは明白だと思っている。ところが業界はそれほど甘くないのである。

ひとところほど頻繁ではないが、いまだにループ I、II、III を超新星残骸とする論文が書かれたりする。ROSAT のホームページには図4のようなカラー写真が飾られている。ROSAT データをもとに超新星残骸説で博士論文を書いた人さえいる。いっぽう銀河系の中心部と関係づけた論文には、私の一連の論文以外にはまだお目にかかっていない。1970年代に最初の論文を書いて以来、銀河爆発説は四面楚歌である。

この事態は喜ぶべきなのか、悲しむべきなのか。だれも気がつかないうちに一人勝ちの理論を進めていくのは爽快だが、誰も勝ち（価値？）を認めてくれない寂しさもつもの。皆が私の考えを取り入れて盛大に銀河系スターバーストを論じてきくたら嬉しいとは思いますが、そうなればそうで逆に騒々しくてかなわなないかも知れない。今まで30年たったのだから、これから30年は情勢が変わらないのかもしれない。ガリレオ再審もあったことだし、あせっても仕方ないことかもしれない。