

銀河系中心は爆発したか？

坪井 昌 人*

始めに

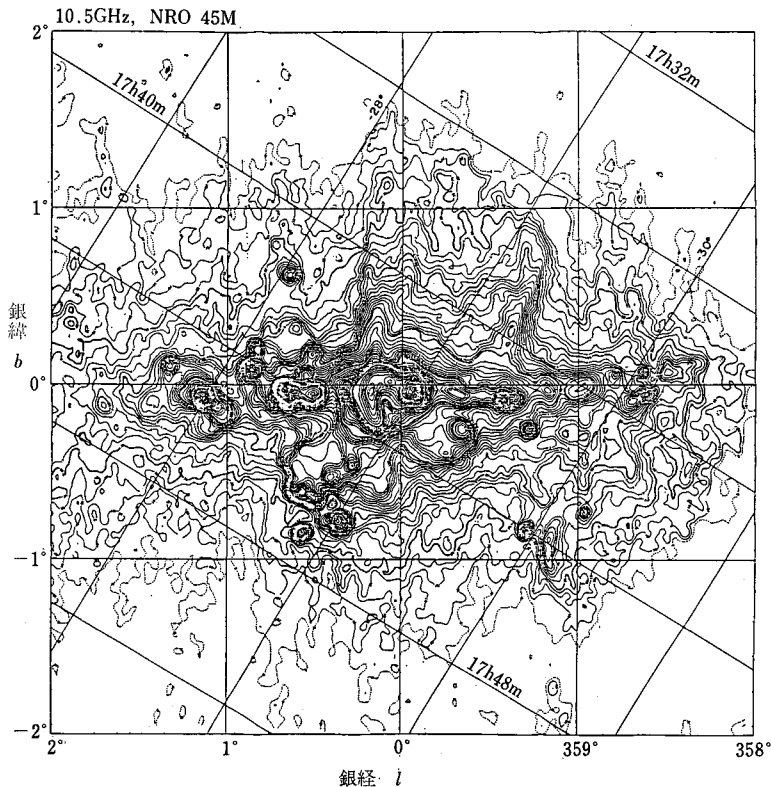
銀河系中心と呼ばれる天体は、文字どおりの我々の銀河系の中心に位置する最も活動性に富んだ複雑な領域である。この銀河系中心を観測するためにはガスやチリの密度が濃い銀河面を 8.5 kpc (約 2 万 8 千光年) も見透さなければならないため、可視光では観測することはできず電波により初めて直接観測が可能となった。このため電波天文学の初期から数多くの発見がなされてきたが、現在でも望遠鏡の分解能や感度の向上にともない発見が続いている電波天文学の中心的テーマの一つである。

銀河系中心はそれ自体我々の銀河系の中心として大変興味深い天体であるが、数ある銀河中心核のなかで最も近い銀河中心核であるという側面も持っている。従って現代天文学の最大の謎の一つである活動銀河中心核(ブラックホール?)の活動性の解明にミニ・ケースとして

大きな手懸りを与えてくれるとこれまで期待されてきた。しかし観測が進むに従い、この様な単純な期待は疑問視されはじめた。というのは一般の活動銀河の中心領域においては中心核の支配が他を圧倒している様に見えるのに比べ、銀河系中心では中心核そのものよりも周りの高密度な分子雲、磁場などが大きな役割を演じているらしいことがわかってきたからである。

最近になって、多くの通常銀河で銀河中心領域からの爆発噴出現象が見つかり、今度は我々の銀河系中心の構造と活動性の詳細な観測がこれら通常銀河の中心核の活動性の理解に役立つはずであると期待されるようになった。

ここでは主として野辺山宇宙電波観測所のグループの結果を紹介しながら「銀河系中心では他の銀河で見られるような爆発は起こっているか?」というテーマについて考えてみたい。



* 国立天文台野辺山宇宙電波観測所 Masato Tsuboi:

図1 野辺山 45 m 鏡による銀河系中心領域の 10.5 GHz 全電波強度図 (祖父江, 半田, 1984 年)

これまでの観測

図 1 に野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡による銀河系中心の周波数 10.5 GHz の電波強度図を示す。この図の中央を水平に横切る形で見えている電波強度の峰の連なりが銀河面である。これらの峰のほとんどが銀河系中心の近く実際にある天体と考えられている。そして、この図の真中の一番強いものが銀河系中心であり、“SgrA”と呼ばれる。この SgrA の左側には“鎌”の形をした構造が突出して、銀河系中心は極めて非対称な形をしていることが判る。この“鎌”の形の構造は“電波アーク”と呼ばれている。

また、同じ頃に Yusef-Zadeh は米国の VLA (大電波干渉計) を用いて 1.6 および 5 GHz でこれまでにない分解能と感度で銀河系中心の電波写真を撮った。この結果を図 2 に示す。この観測により電波アークは銀河面に垂直な直線状フィラメントとそれに螺旋状に巻付く形のスパイラル構造の二つの性質の異なる構造からできていることがわかった。

この観測に使われた周波数の電波を出す放射機構としてはシンクロトロン放射と熱的放射の両方が考えられる。前者は磁場に相対論的電子が絡みつき螺旋運動することによって放射される。また、後者は熱いプラズマから放射される電波である。放射機構を決定するため熱いプラズマからのみで再結合線で観測が行われた。再結合線はスパイラル構造からは受かったが直線状フィラメントからは受からなかった。したがって、直線状フィラメントの放射機構はシンクロトロン放射でありスパイラル構造の放射機構は熱的放射である可能性が高い。このことから電波アークの直線状フィラメントは銀河面に垂直に貫く磁場構造を表わしていると予想された。

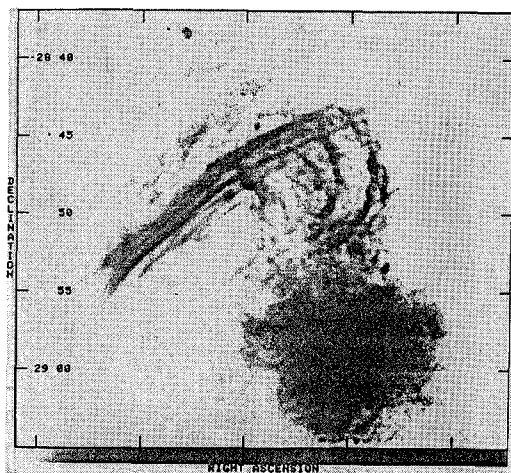


図 2 VLA による銀河系中心領域の 1.5 GHz 全電波強度 (Yusef-Zadeh & Morris, A.J. 94, 1178 (1987))

銀河系中心偏波ローブ (プルーム) の発見

銀河系中心の垂直磁場の存在を証明し、かつ、その構造を直接見るため野辺山 45 m 鏡に独自に開発した 10 GHz-4 ch 偏波計を取付け 1984-5 年に銀河系中心を偏波観測した。この偏波計は隣合う 4 つの周波数で同時に偏波を測定し Faraday 回転を補正し磁場の 3 次元構造を決定できるユニークなものである。この結果を図 3, 4 に示す。(開発、観測の状況はすでに井上 允氏が天文月報第 78 巻 8 号に書かれている。)

図 3 は銀河系中心 $2^{\circ}5 \times 3^{\circ}$ の領域の偏波強度図である。影をつけた部分が偏波強度、等強度線で示した分布が図 1 と同じ電波強度である。非常に大きなローブ状をした偏波領域が電波アークの両端から銀河面に垂直に伸びていることがわかる。この構造は電波アークとして見えていたものよりはるかに大きく、全体の長さは 250 pc にのぼる。また、偏波率は北側のローブで 30% に達し放射機構はシンクロトロン放射であることが確定した。

図 4 はこのローブの大局的磁場構造を示している。ローブ内の磁場はその長軸に平行である。また、Faraday 回転測定 (rotation measure, RM) が銀河面で反転していることからローブは銀河面の上下で折れ曲っていると予想され、この折れ曲り原因は銀河回転によって磁場が引きずられているためと想像されている。

また、この 2 つのローブの間の部分は電波アークに相当し、その直線状フィラメントからも強い偏波強度が予想されたが、実際は中央のコンパクトな成分以外では偏波強度も弱く偏波率も低かった。しかし、このコンパクト

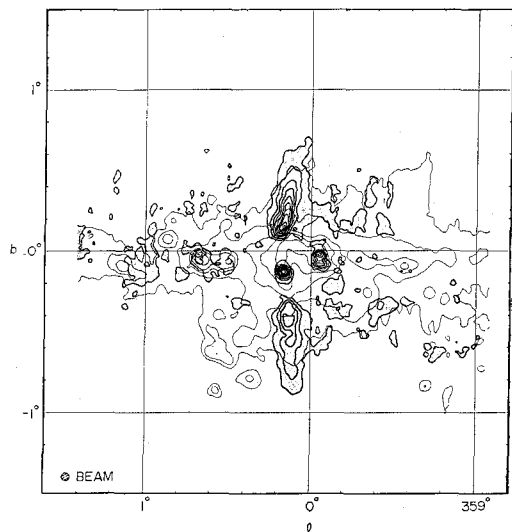


図 3 野辺山 45 m 鏡による銀河系中心領域の 10 GHz の偏波強度 (影をつけた部分) と全電波強度 (コントア)

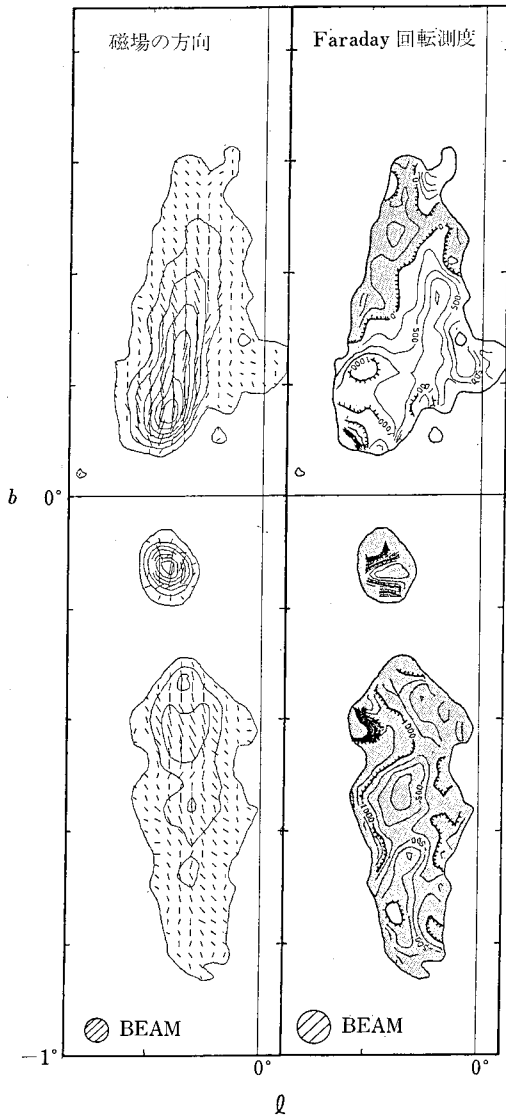


図 4 銀河中心偏波ロープ内の天球上に投影した磁場の方向(左)と Faraday 回転測定(右). Faraday 回転測定で影をつけた部分は向こう向きの磁場, それ以外の部分はこちら向きの磁場を表わす. (Tsuboi et al., A.J. 92, 818 (1986))

トな成分での Faraday 回転測定は極めて大きかった。これから電波アークの偏波強度と偏波率が低い原因はもともとここが偏波していないのではなく、電波アーク内またはその外側にある熱的電子と磁場による Faraday 回転による消偏波 (depolarization) であると推定される。もし、この消偏波がなければこの構造を偏波で見たととき、一本の直線構造として見えたはずである。

以上のことから我々はこのロープの立体構造は図5のような銀河面で折れ曲った1本のシンクロトロン放射しているチューブであると考えている。これらの南北2つ

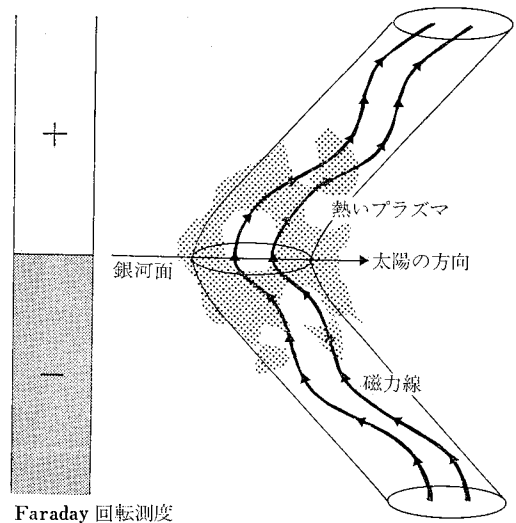


図 5 銀河中心偏波ロープの立体構造 (Tsuboi et al., A.J. 92, 818 (1986))

のロープ状偏波領域と電波アーク上のコンパクトな成分を合わせて“銀河中心偏波ロープ(ブルーム)”と呼んでいる。我々の観測によって銀河系中心に巨大な垂直磁場構造と相対論的電子の加速機構が存在することが明らかになった。しかし、どうやって磁場が作られ電子が加速されるかという機構については全く謎であった。

磁場や電子加速のエネルギー源は？

銀河中心偏波ロープの磁場の成因と電子の加速機構については、内田・柴田の唱えた磁場の捩れによる加速機構や銀河系中心での爆発などが考えられている。ここではおもにエネルギー収支の観点から考えてみよう。

銀河系中心付近での最も大きなエネルギー源は恒星の運動エネルギーと重力ポテンシャルであるが、これらが直接作用して磁場構造を作り相対論的電子を加速し銀河中心偏波ロープを作っているとは考えにくい。おそらく分子雲の運動と磁場の相互作用が直接的な原因となっているのであろう。この分子雲の運動エネルギーの大きさは磁場のエネルギーに比べ 10^{4-7} 倍と大きく、エネルギー源としては十分である。したがって、磁場の成因と電子の加速機構が磁場の捩れによる加速であっても銀河系中心での爆発であっても、これらの分子雲の構造と運動の観測が有力な手懸かりを与えてくれると思われる。そこで我々野辺山のグループは銀河系中心付近の分子雲を広くかつ高分解能に観測することにし、CS ($J=1-0/2-1$) を選んだ。CS は水素分子密度が 10^4 cm^{-3} 以上の高密度領域をサンプルするのに適した分子線で前景後景にあたる渦状腕の分子雲が銀河系中心の分子雲に重なって見えてしまうことも少ない。

野辺山 45 m 鏡による分子線観測

銀河系中心と電波アークを含む広い領域の分子雲を 45 m 鏡の細いビームで観測するには、システムの S/N を向上させ 1 観測点あたりの観測時間をできるだけ少なくすることが必要であった。我々は超伝導素子 (SIS 素子) を開発してこれを利用した超低雑音受信機を作り、1987 年 2 月に 40 GHz 帯で受信機雑音温度 (SSB) として 100-150 K を達成した。観測速度は約 10 倍に向上し、広い領域の高分解能観測ができるようになった。この超低雑音受信機による銀河系中心自体と電波アークを含む領域の CS (J=1-0/2-1) 観測は 1987 年 5 月からはじまった。夏の観測のため観測条件はあまり良くなく、CS (J=2-1) では観測領域一部でのみ十分な S/N を得るにとどまったが、CS (J=1-0) では観測領域全体で十分な S/N が得られた。

図 6 a, b, c (=表紙) は CS (J=1-0) で観測した分子雲の 2 次元分布である。また、図 7 (ア), (イ) は銀河面にそった位置・速度図 (銀経・速度図) である。正銀経側の分子雲の分布の形状は赤方変位側も青方変位側もフィラメント状であり、図 2 の連続波観測で見えるスパイラル構造と対応がつく。この部分の銀経・速度図上の正銀経側には楕円状の分布が見える。これは動径方向の運動をともなった回転するリングを表わしていると考えられる。このリングの動径方向の速度は 60 km/s、回転速度は 30 km/s である。負銀経側は後述のシェル構造によって荒らされてリング構造がよくわからないが半径は 40 pc 位であろう。

図 8 は銀河面に垂直な方向の位置・速度図 (銀緯・速

度図) である。この正銀緯側に U 字型をした分布がある。これからリング構造の膨張速度は銀河面付近では 0 km/s であるが銀河面から離れるに従って増加し 60 km/s に達することがわかる。また、CS (J=1-0) と CS (J=2-1) の輝度温度と分子雲の拡がりからこの構造の質量を評価すると $10^6 M_{\odot}$ になり、含まれる運動エネルギーは 10^{52-53} erg に達することがわかった。これは超新星爆発 10-100 個分のエネルギーに相当する。このリング構造を“40 pc 分子リング”と呼ぶことにする。

強い連続波電波源である電波アークに対してリングの青方偏移側にあたる HI ガスが吸収で見えることから、リングの動径方向の運動は膨張運動であると考えられる。このリング構造は銀河系中心での爆発現象で作られたのであろう。この爆発の原因としてはその莫大なエネルギー量からパースト的星生成による連続的な超新星爆発が推測される。また、半径と膨張速度から求めたこの構造の年齢は約 8×10^5 年である。

銀河面の近くでは図 6 a, b (=表紙) に見えるように銀河系中心の両脇に「50 km/s 分子雲」と「20 km/s 分子雲」と呼ばれる大きな分子雲がある。図 7 (イ) の銀経・速度図によると、これらの分子雲はおもに 1 本の嶺にそって赤方偏移側に集中し、速度的にも非対称な形をしている。この分子雲の嶺は正銀経側ではほぼ一定速度であるが銀経 0° 付近の「50 km/s 分子雲」と「20 km/s 分子雲」の境で急に速度勾配が増し速度は 0 km/s に近づいていく。

もしこの分子雲の嶺が一つの軌道にあるとするとその形から離心率の大きな楕円状軌道にそった運動が想像される。そうだとするとこの楕円状軌道は銀河系中心領域

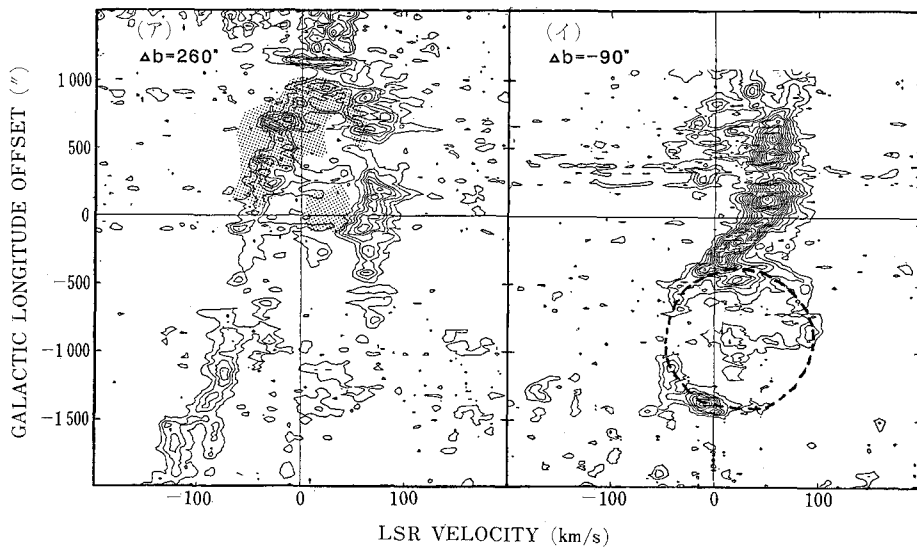


図 7 銀経・速度相関図

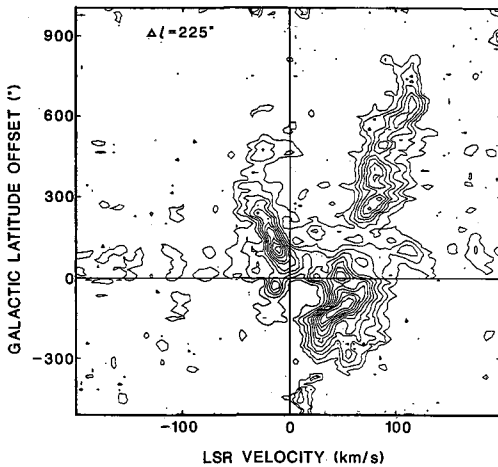


図 8 銀緯・速度相関図

の外側を回っていた分子雲が、分子雲どうしの衝突などにより角運動量を失い、銀河系中心領域に落ちて来た現場であると考えることができよう。このようにして銀河系中心に対する分子雲の供給が行なわれているのだろうか？

さらにこれより負銀経側ではこの「20 km/s 分子雲」の端と SgrC 周辺の大きな分子雲がおおきなリング構造をつくって分布しているようである（図 7 (イ) 参照，点線）。図 6b (=表紙) の負銀経側にも位置・速度図上のリング構造に対応して半径 20 pc 程度の樽形をした構造が見える。おそらく、この大きな構造もいくつかの超新星爆発の連鎖により周囲の星間ガスが掃き集められながら膨張している泡状構造（スーパーバブル）であり、「40 pc 分子リング」と同様のものではなからうか。この構造の質量は $10^6 M_{\odot}$ 、運動エネルギーは 10^{52-53} erg に達すると推定される。この構造の年齢は「40 pc 分子リング」より若く約 3×10^5 年である。

このような泡状構造は 10^6-7 年前に銀河系中心領域に落下してきた分子雲が燃料になり激しい星生成がおこった証拠であろうか？

40 pc 分子リングと電波アークとの相互作用

40 pc 分子リングは前述の様に電波アークに対して前方偏移成分のみ吸収するのでこれを囲む形で存在すると考えられる。図 7 (ア) の影を付けた部分はパークス 64 m 鏡によって行われた再結合線の位置・速度関係である。分解能が十分ではないが、この図から電離ガスも CS で見える分子雲と同じ様にリング構造の一部になっていることがわかる。連続波で見える電波アークのスパイラル構造は膨張するリング上の電離されたフィラメントということになる。この電離ガスと分子雲は直線状フィラ

ントと力学的相互作用をしていると期待されていた。我々はこの領域でフィラメントにそった高密度分子雲の大規模な嶺を発見した。（図 9 参照）これがまさしく力学的相互作用の現場であるのかもしれない。

この相互作用している部分は電波アーク全体に比べればわずかな部分で、もしここからのみ相対論的電子が垂直磁場のチューブに供給されている場合は、電波アークは高周波側で強度の落ちたスペクトルを持つはずである。なぜならフィラメント中を伝わる間に電子はシンクロトロン放射によってエネルギーを失い、高エネルギーを持った電子の数が減ると考えられるからである。ところが電波アークはその全体にわたって数 10 GHz という高い周波数にまで平坦なスペクトルを持っている。すなわち、構造全体が非常に高エネルギーまでエネルギー分布ののびた相対論的電子で満たされているらしい。このように電波アークの相対論的電子がどこでどうやって加速されているのか、いまだによくわからない。

おわりに：垂直磁場のチューブは爆発でつくられたか？

野辺山 45 m 鏡による偏波観測と分子線観測により銀河系中心に新しい天体である銀河中心偏波ローブと「40 pc 分子」リングなど膨張する泡状構造が発見された。前者の存在は電波天文学者の間ではすでに「常識」になっていて、銀河系中心に巨大で強力な垂直磁場構造と相対論的電子の加速機構が存在する証拠と考えられている。後者については確認のための観測が続けられているが、大量の超新星爆発で作られた可能性が高く銀河系中心のバースト的星生成の証拠になるかもしれない。

この膨張する泡状構造と偏波ローブの因果関係についてはまだはっきりはわからないが、著者の考えているシナリオは、次のようなものである。

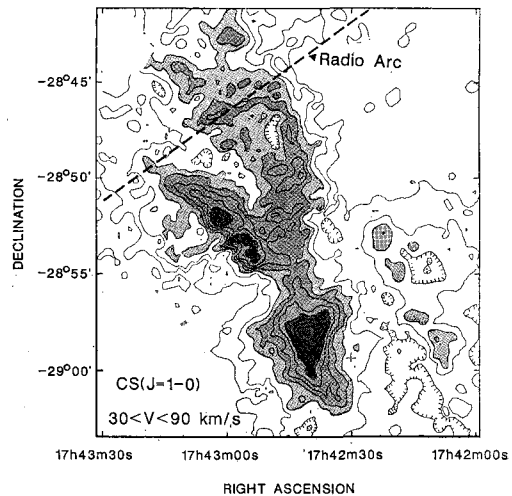


図 9 分子雲と電波アークの相互作用

1) 銀河系中心に大きな分子雲が落ちてくる。超新星爆発などで圧縮され、バースト的星生成がおこる。

2) 大量の超新星が爆発し、それで作られたいくつかの膨張する泡状構造が銀河系中心の磁場を掃き集める。

3) さらにこれらの泡状構造自身は銀河面を突き抜け、集めた磁場を上下に引っ張り巨大な垂直磁場チューブを作る。

さて、「銀河系中心では爆発は起こっているか?」という最初の問いであるが、ここまでくれば YES と答えていだろう。

爆発の傍証

銀河系中心が 10^6 年前に爆発したという証拠は別の観測からも得られている。最近、西ドイツの γ 線天文学者たちがコンプトン望遠鏡という装置を用いて銀河系中心から強い 1.81 MeV の γ 線輝線が出ていることを発見した。この γ 線輝線は放射性同位体 ^{26}Al の崩壊に伴うものである。 ^{26}Al の半減期は 7.2×10^5 年であるのでこの γ 線輝線が受かるということは銀河系中心でここ 10^6 年間に ^{26}Al が大量に生成されたことを表わしている。もし定常的に ^{26}Al が生産されていたとすると半減期は短いが大量にできる ^{44}Ti の 1.16 MeV の γ 線輝線も受かるはずであるが観測で受かっていない。そこでかれらは ^{26}Al は銀河系中心で 10^6 年前に爆発的につくられたと考えた。

この γ 線観測から予想される爆発と“40 pc 分子リング”や樽形をした泡状構造の年齢は一致する。“40 pc 分子リング”や樽形をした泡状構造をつくった激しい星生成がこの ^{26}Al を生産したのかもしれない。

銀河系中心から 230 pc ほど離れたところには OH と H_2CO の吸収線の電波観測からもうひとつ別の膨張リングがあることが知られている。このリングは $10^6\text{--}7$ 年位前に起こった銀河系中心の爆発で作られたらしい。この爆発はおそらく 40 pc 膨張リングを作った活動の一つ前の銀河系中心の活動ではないかと思われる。またさらに、50 km/s 分子雲中にはコンパクト H II 領域が発見されており、すでに星生成が始まっていることが知られている。しかし、これが次のバースト的星生成に繋っていくのかは今のところ全く想像の域を出ない。

☆

☆ ☆

☆ ☆ ☆

理科年表読本

星空へのガイドブック

～スカイウォッチングを楽しもう～

磯部琇三 著 B6/定価1,800円

星空をみる楽しみとして、タダから100億円までのコスト別に観測方法を紹介。STEPを追いつながら知識が得られる好著。

くもった日の天文学

～天文情報相談室～

木下 宙・西村史朗・新美幸夫・池内了 編
B6/定価1,300円

国立天文台に問い合わせの多い問題をテーマごとに解説。読者が知りたい項目を簡潔に述べ、天文学のおよその内容がこれ1冊で十分に理解できる構成です。

宇宙経由/野辺山の旅

森本雅樹 著 B6/定価1,300円

ポップアップ宇宙

～ビッグバンからブラックホールまで～

村山定男 監訳 西城恵一 訳 B4変/定価3,800円

丸善エンサイクロペディア シリーズ

MARUZEN

宇宙・天文大辞典

小田 稔 監訳 B5/定価15,000円

理科年表 (64年版)

国立天文台 編 ポケット版:定価 980円
机上版:定価1,900円

本年度版は、「日本付近の被害地震年代表」を全面改訂。有史以来の地震の発生時期、規模、被害など、最近の研究成果をもとに訂正されている。

復刻版 **理科年表** ～大正十四年発行・初版本～

A6/定価2,500円

丸善(出版事業部)

〒103 東京都中央区日本橋 3-9-2 第二丸善ビル
営業 (03) 272-0391 編集 (03) 272-0393