

X線天文衛星「すざく」の最近の成果

宇宙航空研究開発機構

ASTRO-EII (すざく)プロジェクトチーム

「すざく」とは

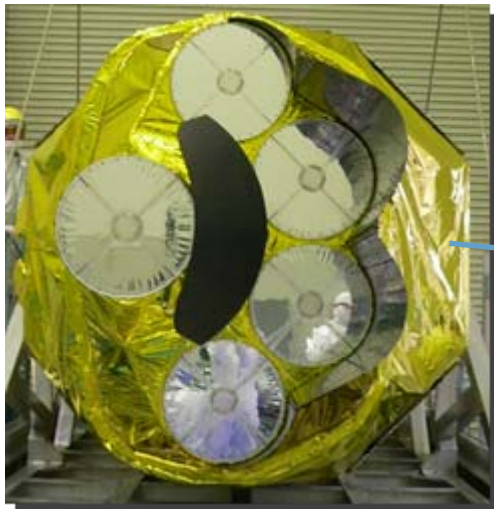
【ミッション】

- 宇宙の構造形成、ブラックホール直近領域の探査などを
 - 広帯域X線分光 (0.3–700keV)
 - 高分解能X線分光
(半値幅6eV、0.3–10keV)により実現することを主要目的として、JAXA と NASAを中心とする国際協力により開発
- 世界のX線天文観測衛星の中で、米国のChandra衛星、欧州のXMM-Newton 衛星と相補的な役割
- 軌道上天文台として、国際公募により観測

【経緯】

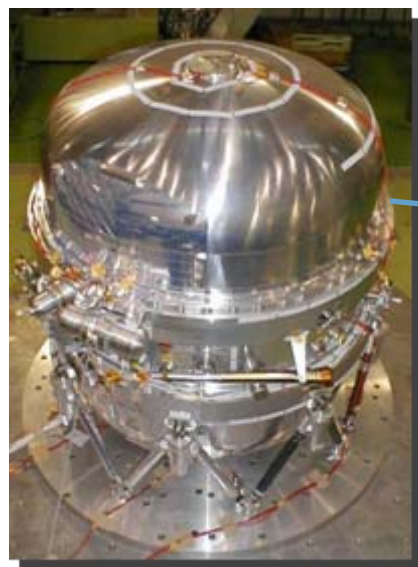
- 2005年7月10日:M-V-6により打上げ
- 2008年6月:2年2ヶ月の実運用を行い、ノミナル運用期間(2年以上と定義)を終了
- 2008年6月:後期運用に移行

「すざく」の搭載観測機器



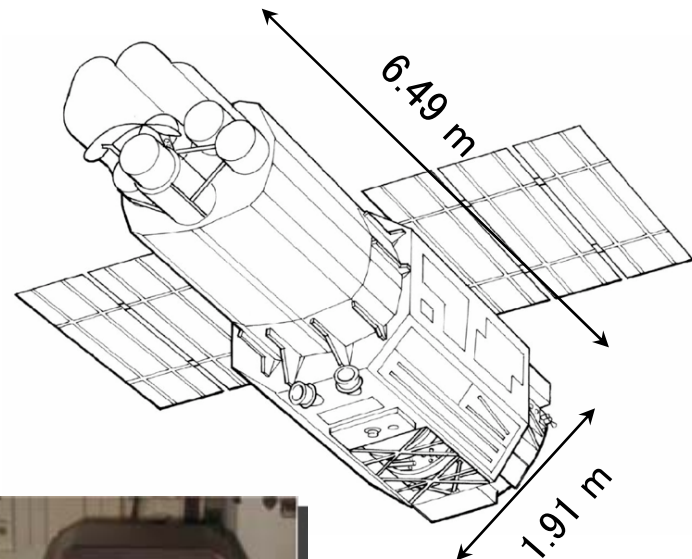
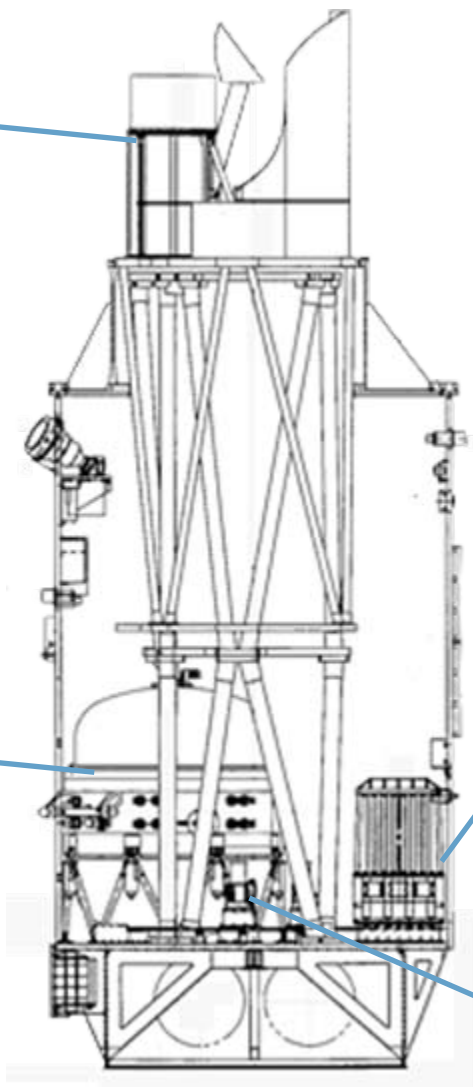
X線望遠鏡 (XRT)

NASA/GSFC*-名古屋大
学-JAXA



X線マイクロカロリメータ (XRS)

NASA/GSFC-Wisconsin大
-首都大-JAXA



硬X線検出器 (HXD)
東大-理研-埼玉大-広
島大-金沢大-JAXA -...



X線CCDカメラ (XIS)
(XIS0-3の4台)

MIT-京都大-大阪大-立教大
学、愛媛大学-JAXA

* Goddard Space Flight Center

「すざく」の主な履歴

2005年	7/10	打上げ・初期運用開始
	8/8	XRS 液体Heを消失し、機能停止
	9/10	試験観測開始
2006年	4/1	第1期国際公募観測開始
	9月	電荷注入によるCCDの放射損傷対策開始
	11/9	X線CCDカメラ(XIS2)損傷, 使用中止*
2007年	1月	日本天文学会欧文誌すざく特集号発行
	4/1	第2期国際公募観測開始
	5/28	試験観測データを一般公開
2008年	1月	日本天文学会欧文誌すざく第2特集号発行
	4/1	第3期国際公募観測開始
	4/24-25	NASA Senior Review (2010年までの延長)
	6月	X線CCDカメラ・硬X線検出器 フル成功基準達成 後期運用にはいる
2009年	1月	日本天文学会欧文誌すざく第3特集号発行
	4/1	第4期国際公募観測開始
	6/23	X線CCDカメラ(XIS0)の一部(<1/8)を損傷*

* X線CCDカメラの損傷の詳細については15ページの補足を参照

「すざく」国際会議

- 「すざく」の科学的成果を中心とする高エネルギー天文学／宇宙物理学の国際会議。これまでに3回開催。

回	会議名称	開始場所	開催日	参加者概数 (日本以外から)	発表論文数
1	The Extreme Universe in the Suzaku Era	京都	2006年12月 4日-8日	400 (150)	320
2	The Suzaku X-ray Universe	サンディエゴ	2007年12月 10日-12日	250 (150)	150
3	The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H	小樽	2009年 6月29日-7月2日	290 (90)	260

「すざく」の最近の成果

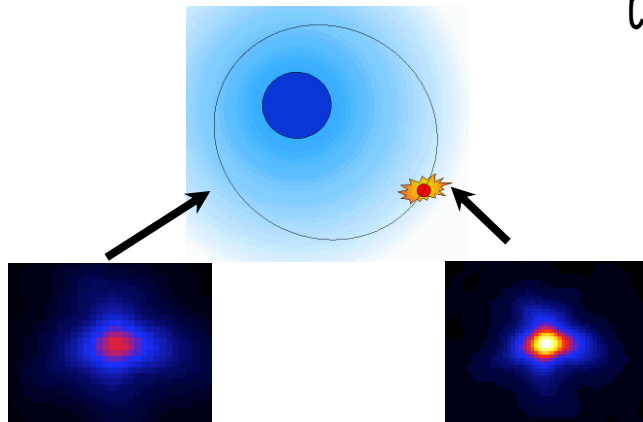
小樽すざく国際会議発表論文から

- [1] 超高エネルギーまで電子を加速するTeV*ガンマ線連星
- [2] 新星は新たな宇宙線の起源か？
- [3] 銀河を満たす230万度のガスとX線で輝く太陽系
- [4] 「すざく」が解明した天の川分子雲の3次元分布
- [5] 銀河系の中心を流れる「プラズマの川」

* TeV = テラ電子ボルト。テラは10の12乗

[1] 超高エネルギーまで電子を加速するTeVガンマ線連星(1)

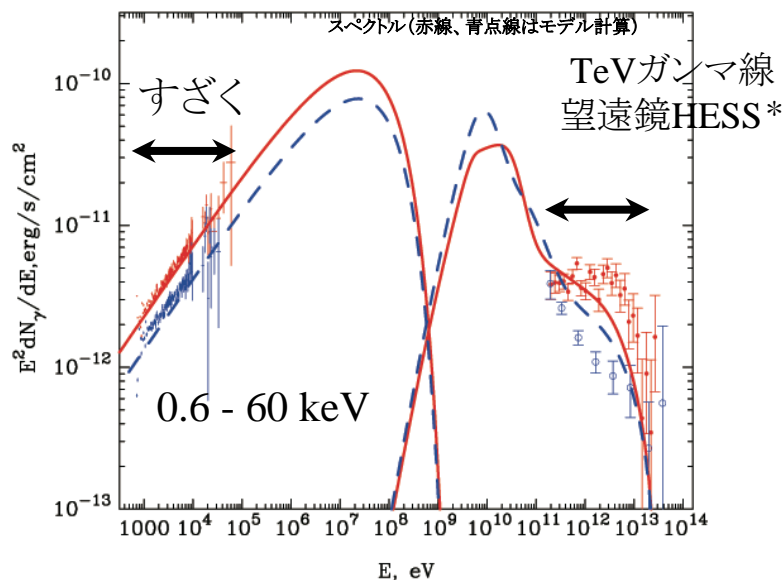
謎のTeVガンマ線連星 LS5039 は、1秒でテラ電子ボルトまで電子を加速する宇宙で最も効率のよい宇宙線加速の現場だった



X線連星は連星系を構成するコンパクト星(ブラックホールや中性子星)に恒星から質量降着を起こして、X線で明るく輝く事が知られており、X線天文学がはじまって以来、広く研究がおこなわれてきました。

ところが、最近、X線光子の10億倍もエネルギーの高いTeVガンマ線を放射する連星系が新しく発見され、謎の天体現象として注目を集めていました。LS5039と呼ばれる天体は、約4日間の連星周期を持ち、TeVガンマ線で明るく輝く「TeVガンマ線連星」です。

「すざく」を用いて、連星周期の1.5倍、約一週間という長期観測をおこない、すざくの特徴の広い帯域での感度を生かし、硬X線までのびるシンクロトロンスペクトルを連星の全周期にまで観測することに成功しました。そして、この天体が、たった一秒で電子をテラ電子ボルトまで加速する、極めて効率のよい加速器を持った、新しい種族の連星だということを発見しました。



LS5039の想像図、X線・ガンマ線像(上)とスペクトル(下)

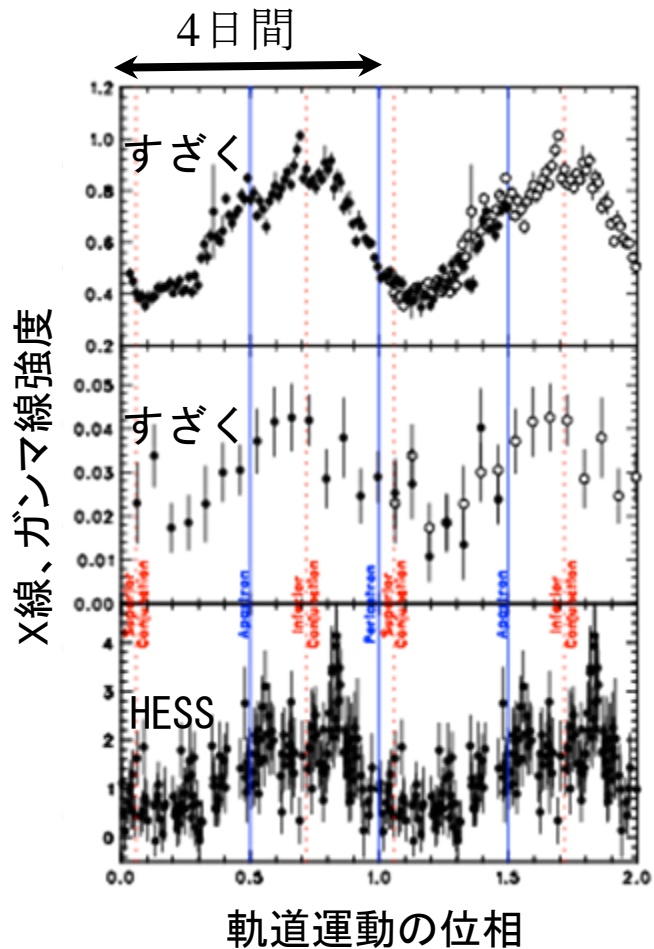
* HESS: 大気チェレンコフ光を利用して宇宙からのTeVガンマ線を観測する装置の一つ。ヨーロッパを中心とする国際協力でナミビアに設置された。

高橋忠幸、岸下徹一(JAXA)、田中孝明、内山泰伸(SLAC)、Khangulyan (マックスプランク)、Aharonian (ダブリン高等研究所)、他

(1) Takahashi, T, Kishishita, T, Uchiyama, Y, Tanaka, T, Yamaoka, K, Khangulyan, D, Aharonian, F A, Bosch-Ramon, V, Hinton, J A, ApJ 697, 1, pp. 592-600 (2009)

(2) Kishishita, T, Tanaka, T, Uchiyama, Y, Takahashi, T, ApJ 697 L1-L5 (2009)

[1] 超高エネルギーまで電子を加速するTeVガンマ線連星(2)



X線、ガンマ線光度曲線

「すざく」はシンクロトンX線が連星の軌道周期に同期して周期的に放射されている事を発見し、強度変動に対して、そのスペクトルの形がほとんど変化しないことを見いだしました。このような現象が宇宙で見つかったのは初めてです。

この変動は、電子をX線を放射するテラ電子ボルトまで加速する領域の大きさが変動することで説明されます。そして粒子加速は、その変動の時間スケールよりも短いことが要求されることから、この天体は、磁場が3ガウスと強く、これまで発見された宇宙の加速器の中でも最も速く(効率よく)電子を加速する天体の一つであることがわかりました。

この解釈を進めると、TeVガンマ線で発見された連星周期に連動した強度変動の振る舞いが、中心の星から可視光子とTeVガンマ線の吸収で説明されるのに対して、それが影響しないGeV*ガンマ線では、TeVガンマ線と正反対の強度変動することが予言されます。小樽会議での最新のFermi衛星の観測結果の発表でまさにその予言が正しいことが明らかとなりました。

* GeV = ギガ電子ボルト

高橋忠幸、岸下徹一(JAXA)、田中孝明、内山泰伸(SLAC)、Khangulyan (マックスプランク)、Aharonian (ダブリン高等研究所)、他

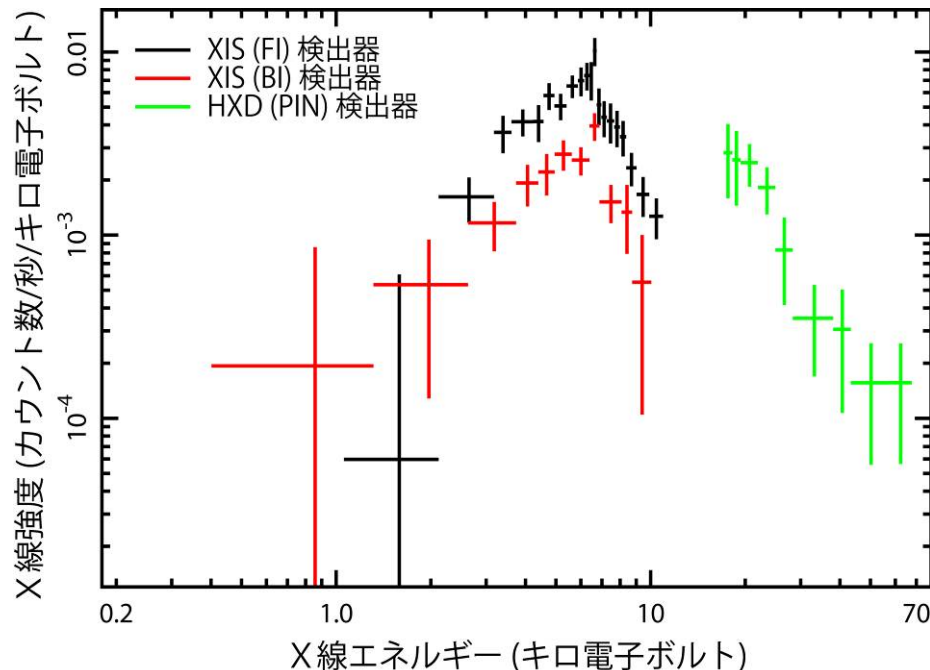
(1) Takahashi, T, Kishishita, T, Uchiyama, Y, Tanaka, T, Yamaoka, K, Khangulyan, D, Aharonian, F A, Bosch-Ramon, V, Hinton, J A, ApJ 697, 1, pp. 592-600 (2009)

(2) Kishishita, T, Tanaka, T, Uchiyama, Y, Takahashi, T, ApJ 697 L1-L5 (2009)

[2] 新星は新たな宇宙線の起源か？(1)

立教大学を中心とした研究チームは「すざく」で、新星V2491Cygから過去最高のエネルギー(70キロ電子ボルト)を持つX線を検出した。さらに、X線の光子スペクトル(エネルギー別のX線強度)がエネルギーのべき乗の形をもつ($f \approx E^{-0.1}$)という非熱的X線の特徴を、新星からはじめて発見した。

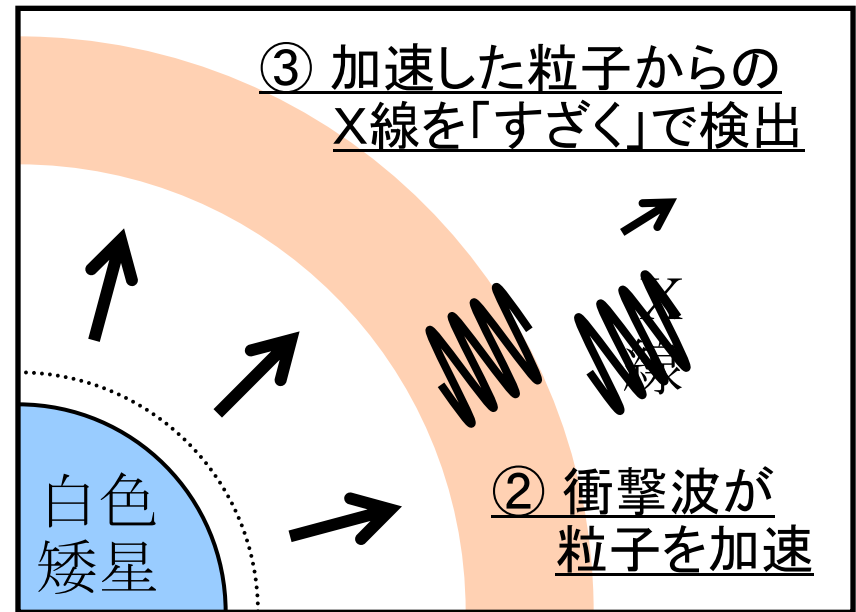
新星とは、連星系にある白色矮星の表面に相手の星から降り積もったガスが、白色矮星の重力で圧縮・加熱されることで起きる暴走的核融合の事である。これまでも、爆発により形成される衝撃波が粒子を加速して高エネルギーX線を放射すると期待されていたが、今回発見されたX線放射は予想を遙かに凌ぐ強度と高いエネルギーを示した。この発見は、「すざく」による高い感度によって初めて可能になったものである。



[2] 新星は新たな宇宙線の起源か？ (2)

この様に加速された粒子は、地球に大量に降りそそぐ超高エネルギー放射線(宇宙線)の起源として大変有力視される。宇宙線の起源は、1912年の発見以来謎とされ、現在も活発に研究が続けられている。今回のX線放射の発見は、新星で、高エネルギー粒子加速が起きていることを示しており、新星が宇宙線の起源を担っている可能性を初めて示したという点で意義深いものと考えている。

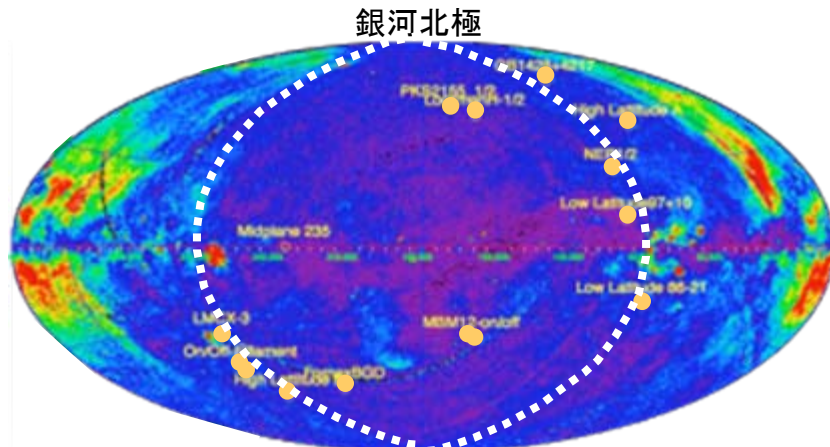
新星が宇宙線の起源になっていることを証明するためには、今後、同様の現象が多くの新星で起きている事を示し、新星で発生している高エネルギー粒子の総量を定量的に評価することが重要である。「すざく」はこれらの観測的証拠を得るために現在最も有力な観測機器であり、さらなる発展をめざして観測を行いたい。



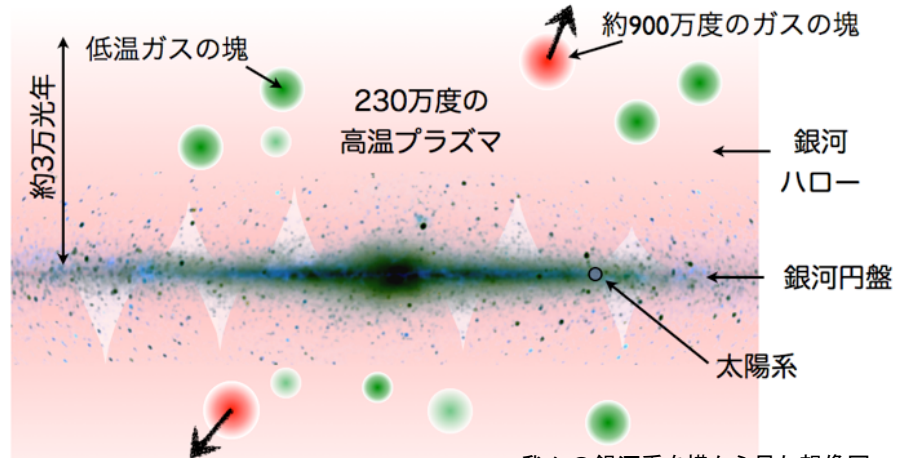
① 白色矮星の表面で水素の核燃焼に火がついて爆発

[3] 銀河を満たす230万度のガスとX線で輝く太陽系 (1)

遠くと近くを見る: 超軟X線背景放射の起源が、太陽系内(= 約10億km)と銀河ハロー(= 数万光年)にあることを初めて明らかにした



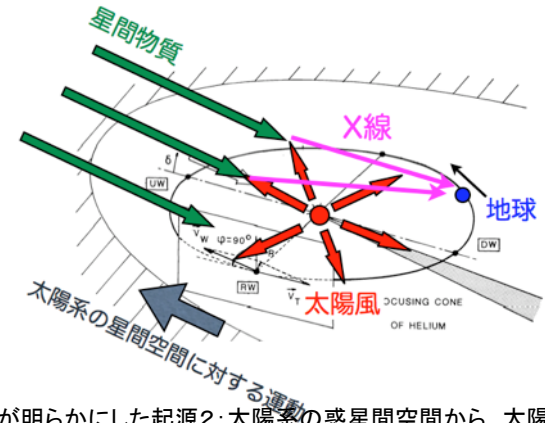
ドイツのローサット衛星による軟X線(0.5-1キロ電子ボルト)での全天画像 (反銀河中心方向を中心に射影) 黄色が今回用いた「すざく」の観測方向(14ヶ所)



我々の銀河系を横から見た想像図 「すざく」が明らかにした起源1: 銀河ハローの230万度の温度の高温プラズマ。視線方向に平均した温度は驚くほど一定。しかし、強度は方向により大きく異なる(0-8LU)。

軟X線では、個々の天体とは別に、空全体がぼんやりと光っています。1 キロ電子ボルト 以上のX線は、我々の銀河系を越えた遥か遠方の沢山の活動銀河核と考えられています。しかし、1 キロ電子ボルト以下には高電離イオン起源の放射が存在し、その起源はよくわかっていませんでした。

我々は、「すざく」によって様々な方向からの高電離イオンの放射を観測し、その放射が我々の銀河系の距離の全く異なる二つ現象(銀河を満たす230万度の高温ガスとX線で輝く太陽系)により生じている事を初めて明らかにしました。

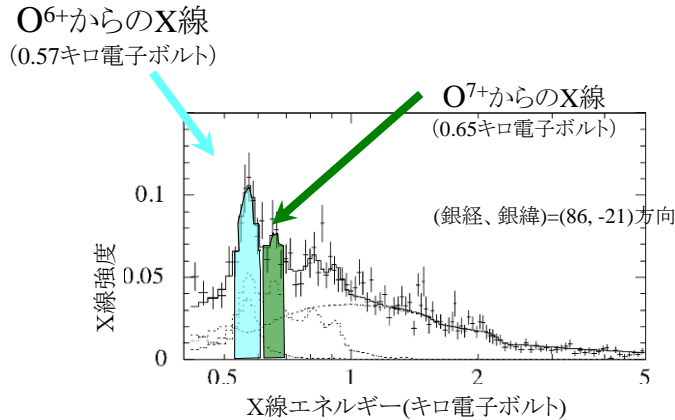


「すざく」が明らかにした起源2: 太陽系の惑星間空間から、太陽風と太陽系内に流れ込んだ星間物質により生じるX線。強度はどの方向も約2 LU。

山崎典子、満田和久、吉野友崇、竹井洋(JAXA)、McCammon(ウイスコンシン大)、藤本龍一(金沢大)、他

T. Yoshino, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Hagihara, K. Masui, M. Bauer, D. McCammon, R. Fujimoto, Q.D. Wang, and Y. Yao, PASJ(日本天文学会欧文報告), 61巻, 8月号掲載予定 (2009)

[3] 銀河を満たす230万度のガスとX線で輝く太陽系 (2)



観測の鍵となったのは、 O^{6+} 、 O^{7+} の2種類の電離状態にある酸素イオンからの放射でした。「すざく」は空の様々な方向の酸素イオンからの放射強度を、精度良く測定することのできる初めての観測装置です。

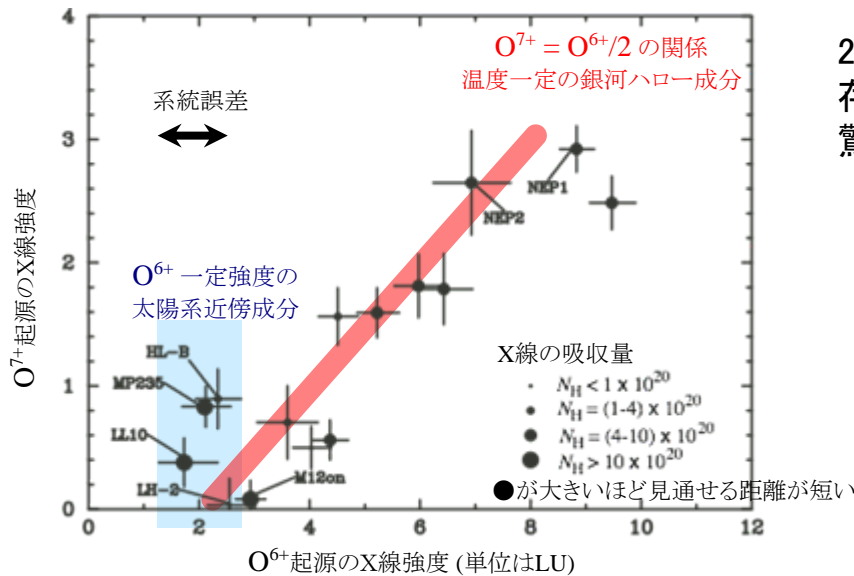
1. 銀河円盤中の星間物質のために、100から300光年先までしか見通せないような場所でも、 O^{6+} イオンからのX線が一定量は検出される。

我々の近くをX線放射源が取り囲んでいることを示します。太陽風の O^{6+} イオンが惑星間空間を流れる星間物質と衝突してX線放射している、と考えられます。この結果は太陽風と星間空間の相互作用を探る新たな観測手法を拓きました。

2. 太陽系起源を超える酸素イオンからのX線放射が多くの方に存在し、その放射源の O^{6+}/O^{7+} イオンからのX線強度の数の比は驚くほど一定である。

これは、銀河円盤を越えた向こう、銀河系の中に見230万度の一定温度に見える高温プラズマが存在することを示します。このような高温プラズマは、超新星爆発によって暖められたガスが銀河ハローに逃げ出して作られたと考えられます。それは冷えてやがて銀河ディスクに戻るでしょう。その詳しい状態を調べることは、今後、銀河系内でのエネルギーや物質循環についての新たな知見をもたらします。

電離状態の異なる酸素輝線の強度の相関



LU: 輝線強度の単位 $\text{光子 cm}^{-2} \text{秒}^{-1} \text{ステラジアン}^{-1}$

山崎典子、満田和久、吉野友崇、竹井洋(JAXA)、McCammon(ウイスコンシン大)、藤本龍一(金沢大)、他

T. Yoshino, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, T. Hagihara, K. Masui, M. Bauer, D. McCammon, R. Fujimoto, Q.D. Wang, and Y. Yao, PASJ(日本天文学会欧文報告), 61, 8月出版予定 (2009)

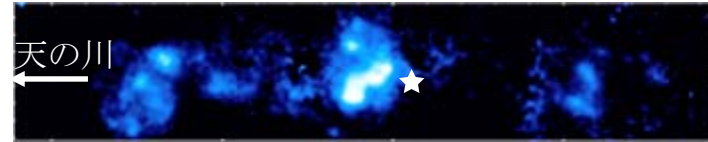
[4]「すざく」が解明した天の川分子雲の3次元分布 —激動のX線スナップ写真—

天の川は1000億個の「太陽」が渦巻く渦状銀河です。渦巻きの中心には300万個の太陽に相当する巨大質量ブラックホールがあり、1000光年内の周辺には3000万個の「太陽」を生み出せるほど大量の分子ガスが分布しています。分子ガスの塊は分子雲になり、収縮して星が生まれます。渦巻きの中心に落ちた分子ガスを飲み込んでブラックホールは成長します。このような分子ガスのダイナミクスは、その空間分布と密接に関係しています。分子ガスが棒状の分布なら、容易に分裂して分子雲をつくり、一部は中心に落ち込みます。天の川中心部における星生成やブラックホール成長などの解明に分子ガスの空間分布が鍵を握っています。

分子ガス分布の解明は従来から電波観測で行われてきましたが、得られた描像は不確実なものでした。私たちは天の川中心領域に様に存在する超高温(約7000万度)のプラズマを発見しました。このプラズマはX線を放射します。そして分子雲はその中に浮かんでいます。「すざく」はこれらの研究をさらに進めるため、世界初のX線投影写真をとりました。分子雲は外部からのX線に照射されると特有のX線(特性X線という)を再放射します。特性X線の観測で分子雲の空間分布がわかることとなります(上図)。しかしこれは分子雲の2次元分布であり、奥行き方向はわかりません。

私たちからみて分子雲の背後からでるX線は分子雲で吸収されます(中図)。病院で撮るX線写真と同じです。しかし前面からのX線は吸収されません。したがって私たちが観測した天の川中心付近のX線はこれらの混合になります。その混合比がプラズマ中の分子雲の位置(奥行き方向)になります。

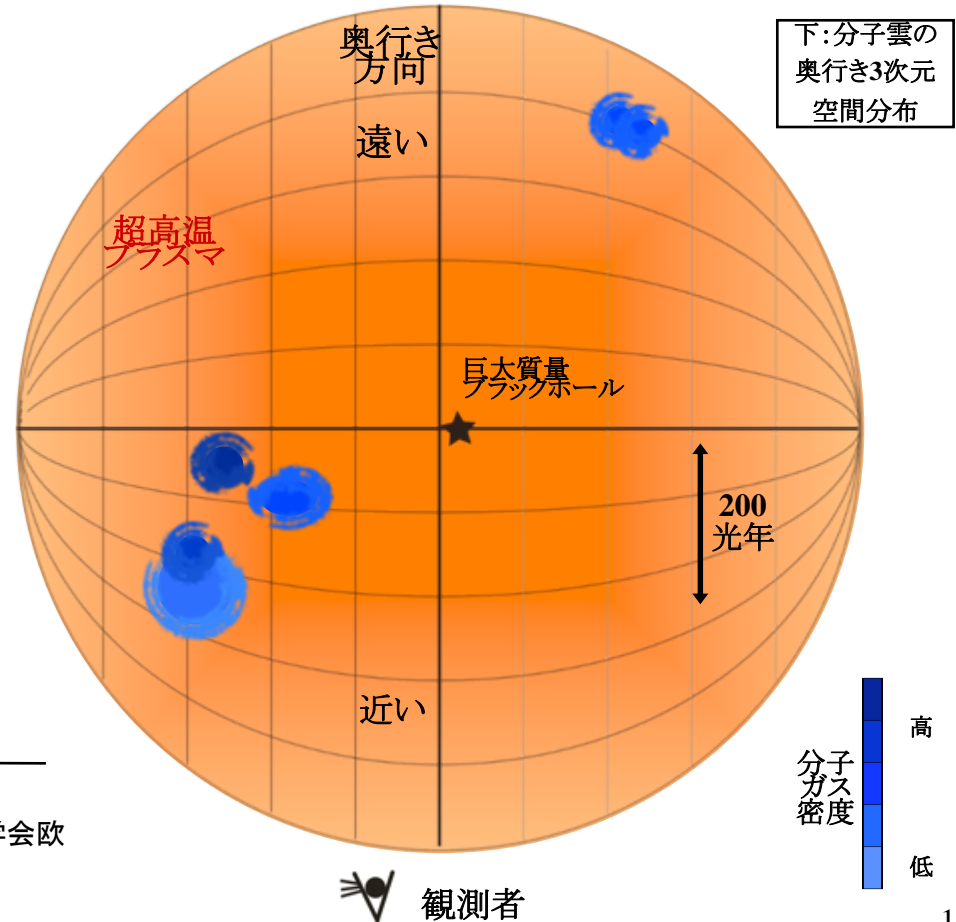
大量の観測データを分析し詳しく解析した結果が下図です。上図と合成すれば分子雲の3次元の空間分布が分かります。それは約30度傾いた棒状の分布、つまり激動の天の川中心の一瞬を捕らえたX線スナップ写真です。



上:分子雲の2次元空間分布



中:超高温プラズマの2次元空間分布



下:分子雲の奥行き3次元空間分布

劉 周強、小山勝二、福岡亮輔、信川正順、鶴剛 (京都大)

S.G. Ryu, K. Koyama, M. Nobukawa, R. Fukuoka, T. G. Tsuru, 日本天文学会欧

文報告 61巻に掲載予定 (2009)

[5] 銀河系の中心を流れる「プラズマの川」

私たちはX線天文衛星「すざく」を用いて銀河系の中心部を流れる「プラズマの川」とその源流である「プラズマの湖」を発見しました。川の幅は約24光年で長さ約65光年、湖の大きさは約28光年×約40光年です(図1)。これまで日米欧のX線衛星が何度もこの場所を観測していましたが、淡い構造だったため発見に至りませんでした。「すざく」は世界で初めて発見し、高い精度のX線データを取得することに成功しました。

X線スペクトル解析の結果、このプラズマの温度は約1000万度であり、硫黄とアルゴンが大量に含まれていることがわかりました(図2)。この川の流れは秒速約500kmです。長さから速度から湖の中央から川の前まで約5万年かかった計算になります。

私達は、湖の中心位置で約5万年前に超新星爆発が起こり、その痕跡(超新星残骸と呼びます)を現在観測しているのだと考えています。爆発後1万年程度で湖が作られ、その後約4万年かけて川の流れができました。これまで知られていた超新星爆発残骸はほとんど全て丸い形をしています。今回の発見は従来の常識を覆しました。

このような湖と川の構造の成り立ちについて、私たちは以下のような仮説を立てています。過去の電波観測から、湖の周辺には「巨大分子雲」と呼ばれる冷たいガスが存在していることが分かっています。この巨大分子雲が「山」の働きをし、プラズマが周辺に広がるのをせき止めました。しかし、一方向だけ山が無く、その方向に川が作られたものと考えています。

川の流れの先には、これまでの日本のX線衛星「ぎんが」「あすか」「すざく」の観測から、銀河系中心領域に、大規模なプラズマ球が存在していることが分かっています。今回発見した川はこの「プラズマの海」に繋がっているのだと考えています。しかし、海を満たすにはこの超新星爆発だけでは明らかに不十分です。まだ見つからない、湖と川がたくさん隠れているに違いないと思います。私たちは今後「すざく」や次期X線天文衛星ASTRO-Hでより精密な観測を行い、それらが発見して行きたいと考えています。

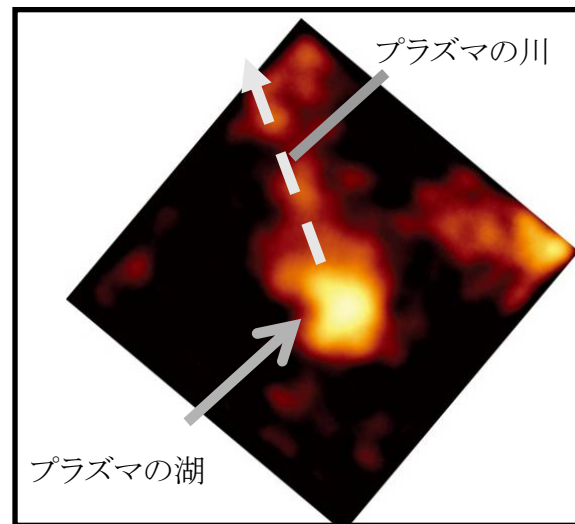


図1:「すざく」のCCDカメラで撮影したX線画像

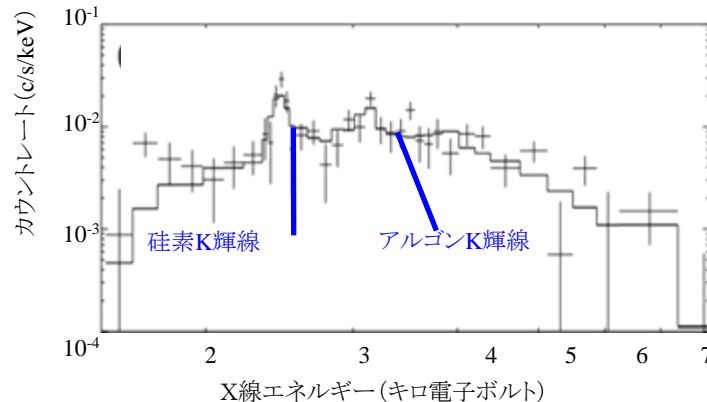
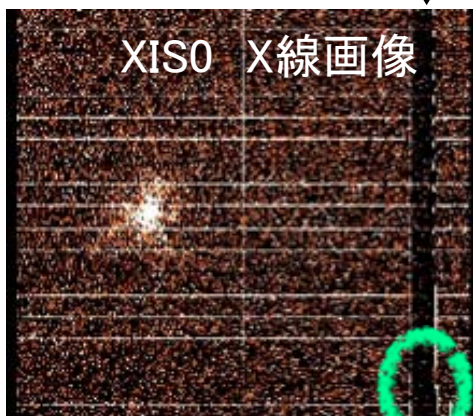


図2:「すざく」のCCDカメラで得た「プラズマの川」のX線スペクトル

(補足) X線CCDカメラに6/23に発生した障害について

1, 2 を除いて正常

1. 電荷が飽和



2. 雑音が高い

- 2009年6月24日に受信した衛星データにより4台ある「すぎく」のX線CCDカメラ (XIS)の1台、XIS0の一部に異常があることが判明した。その後の調査の結果、6月23日2時47分から異常が発生し、XIS0の視野の約1/8について電荷が飽和したため、観測に使用できない状況であることがわかった。
- 調査の結果、CCDの画像領域の数画素から突然電荷が溢れ出していることから、CCD表面のごく一部が破損したと考えられる。
- 本現象は2006年11月9日に別のX線CCDカメラ (XIS2)にも同様の現象が生じ、こちらについては溢れ出す電荷量が多く画像全体に影響が出たため、観測を中止している。
- 4台のX線CCDカメラは機能冗長、すなわち同じ方向を観測してデータを重ね合わせるによりを使用しているため、カメラの一部に支障が生じた場合も、観測時間を延ばすことにより、支障なく観測できる。