

「あすか」衛星による銀河面サーベイ観測

山内茂雄* , 金田英宏** , 衣笠健三***,
杉崎睦**** , 鳥居研一****

* <岩手大学人文社会科学部 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-34>

email: yamauchi@iwate-u.ac.jp

** <宇宙科学研究所 赤外線天体物理学部門 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1>

email: kaneda@koala.astro.isas.ac.jp

*** <ぐんま天文台 〒377-0702 群馬県吾妻郡高山村中山 6860-86>

email: kinugasa@astron.pref.gunma.jp

**** <宇宙開発事業団 筑波宇宙センター宇宙環境利用研究システム 〒305-8505 つくば市千現 2-1-1>

email: sugizaki.mutsumi@nasda.go.jp

torii.kenichi@nasda.go.jp

銀河系内に存在する星間物質による吸収の影響や、観測機器の位置分解能力が不十分であったことなどのため、私たちの銀河系に所属する X 線天体についての情報は限られたものであった。しかし、「あすか」衛星の登場により、吸収の影響を受けない波長の短い X 線領域での撮像分光観測が初めて可能となった。ここでは、私たちが行ってきた「あすか」衛星による銀河面サーベイ観測において、これまでに得られた成果を紹介したい。

1. はじめに

宇宙ではどのような天体が X 線を放射しているのだろうか。この疑問に答えるべく、さまざまな天文衛星によるサーベイ観測が行なわれて、たくさんの X 線天体が発見され、他の波長の観測結果も交えてその性質が明らかにされてきた。最近では、ドイツの ROSAT 衛星が初めの半年を全天サーベイ観測にあて、明るい天体だけでも 18811 個の天体を検出している (ROSAT Bright Source Catalog¹⁾)。ところが、透過力の強い X 線といえども銀河円盤に近い領域では、銀河系内にある星間物質の吸収の影響を受けてしまう。例えば、ROSAT で観測可能な軟 X 線 (波長の長い X 線) バンドではせいぜい 3 kpc 程度までの天体しか検出することができない。一方、これまでの硬 X 線 (波長の短い X 線) の観測は撮像能力を持たない検出器によるものため、

天体が密集して存在する銀河円盤上では、暗い天体を分離して検出することが難しかった。このため、我々の銀河系に存在する X 線天体の研究では、星間物質による吸収の影響を受けない硬 X 線による撮像分光観測が重要である。「あすか」衛星は硬 X 線を含む広いエネルギー領域 (0.5–10 keV, 1 keV はエネルギー 1.6×10^9 erg, 波長 1.2×10^7 cm の X 線) で撮像能力を持ち、位置精度約 1 分角、検出感度 3×10^{13} erg s⁻¹ cm⁻² とこれまでの硬 X 線検出器より 1 桁以上高い性能を持つ。そこで銀河自身の吸収に制限されることのない完全なサンプルにより、銀河系内 X 線研究のあらたな地平を開くことを目指して、私たちは「あすか」を用いた銀河面の硬 X 線サーベイを行ってきた。「あすか」の検出器の一つである GIS の視野 (有効直径約 40 分角) が連続するように 30 分角ずつ場所をずらしながら、1 点一万秒ずつ観測する計画をたて、



Galactic Plane Survey 0.7-7keV

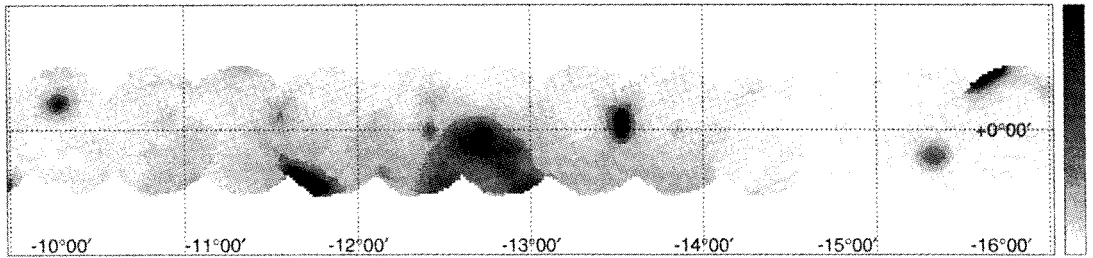


図1: 「あすか」による銀河面サーベイ観測で得られたイメージの一部。座標は銀河座標。

1996年春より現在までに $b = 0^\circ$ の線に沿った $l = -45^\circ \sim +45^\circ$ の領域と銀河中心領域 $4^\circ \times 4^\circ$ の領域の観測を行なった。現在、これらプロジェクトのデータと銀河系内の個別天体を観測した公開データを合わせて解析を進めている。銀河中心領域については現在解析が進行中のため、別の機会に紹介を譲るとして、ここでは銀河円盤領域について、これまでに得られた成果を紹介する。

2. X線天体の検出

観測した領域のうち、興味深い領域のイメージを図1に示す。この領域には、後で紹介する新X線パルサー、非熱的放射スペクトルを持つシェル型超新星残骸などが存在する。これらを含めて全ての領域のデータについて天体探査を行ない、約200天体を検出した。ROSAT Bright Source Catalogと比較すると、ROSATで見つかった天体は「あすか」による観測でもほぼ検出されているが、「あすか」では観測されたがROSATでは見られないものが多数あることがわかった。検出した天体について、他波長のカタログとも比較しているが、対応天体の見つかったものは3分の1程度であり、未同定天体が多数を占めている。個々の天体のスペクトルを解析すると、軟X線に感度を持つROSATやEinstein衛星でも検出されているX線天体は星間吸収量が小さく（すなわち比較的近傍に位置する）、軟X線領域で明るい（ソフトなスペクトルを持つ、という）天体に限られていることがわかった。これ

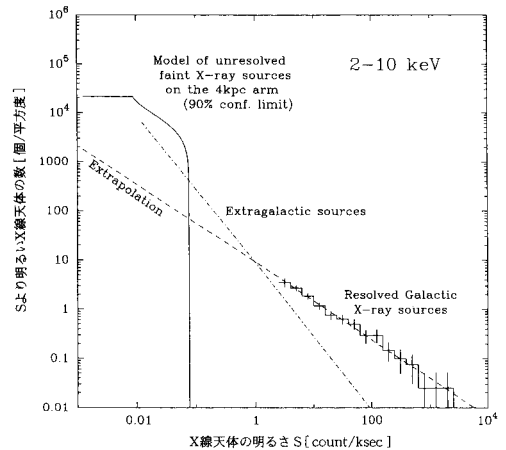


図2: 2-10 keV のエネルギーバンドで求めた $\log N$ - $\log S$ 関係 (十字: データ, 点線: ベストフィット関数). 銀河系外 X 線源の $\log N$ - $\log S$ 関係を一点鎖線で、GRXE がすべて点源起源であったとした場合に必要とされる天体数の制限を実線で示した。

らは硬X線領域でもX線を強く放射する（ハードなスペクトルを持つ、という）天体や銀河中心方向などに位置するため強い吸収を受けた天体が、「あすか」銀河面サーベイによって観測されてきたことを示している。また、硬X線における銀河系内天体の $\log N$ - $\log S$ 関係（X線強度と天体数の関係）を初めて求めることができた。2-10keVのエネルギーバンドの $\log N$ - $\log S$ 関係を図2に示す。この $\log N$ - $\log S$ 関係の傾きは、単一のX線源が銀河円盤のような平面上に一樣分布していた時の値 (-1) より有意に大きい²⁾。これはX線源が銀河腕に沿って分布しているか、またはX線源の個々の明るさのばらつきが大きいためではないかと考えられる。

3. X線パルサー

銀河系内の中性子星の分布は、超新星の発生率や星の種族の分布、進化の研究に欠かせない基本的なデータである。中性子星の分布を知るにはパルサーを捜すのが確実な方法である。銀河面サーベイから、3つの新たなX線パルサーを発見した(表1)。また、別の観測データの解析からパルサーが発見され、同じ領域を観測した銀河面サーベイのデータが長期変動の様子を調べる際に非常に役立ったものが3つある。X線パルサーの研究において、特に以下の点が重要であると考えられる。

3.1 Anomalous X-ray Pulsar の発見

最近、Anomalous X-ray Pulsar (AXP)と呼ばれる特徴的なパルサー群が注目を浴びている。これらは5-10秒程度の自転周期、低光度で通常のX線パルサーに比べてソフトなスペクトル、そして可視光領域での対応天体が未発見などの特徴を持っている。一般にX線パルサーは伴星からの質量降着をエネルギー源として輝いているが、これらAXPは 10^{15} ガウスにもおよぶ超強磁場の中性子星(マグネター)ではないかという説が有力である。また、ソフトガンマ線リピーターとの関連も指摘されている。しかし、AXPはまだ5個程度しか知られておらず、その正体は謎に包まれたままである。「あすか」の観測から見つかった3つのパルサー(1RXS J170849.0-400910, AX J1845.0-0300, 1E1841-045)はこれら、AXPの謎を解く上で重要なサンプルとなっている。

3.2 暗いパルサーの発見

「あすか」により発見できたパルサーは典型的には「かに星雲」の約1/1000の強度の暗いパルサーであり、銀河面の大きな吸収や他の明るい点源のために、過去の軟X線望遠鏡を搭載した衛星(Einstein, ROSAT)や非撮像型の衛星(「ぎんが」、RXTE)では、パルスの検出が不可能であったもの

である。これらの暗いパルサーはAXPを除いては150秒以上の比較的長い自転周期を持っている。これは、質量降着型パルサーのモデルを検証する上で重要である。仮に強磁場の中性子星が高速回転していると、強い遠心力のために少量の物質は降着することができない。したがって、高速回転する中性子星がパルサーとして観測されるためには、多量の物質の降着が必要であり、そのために明るく輝くことになる。銀河面サーベイで見つかったパルサーは低光度であり、質量降着率が小さいと考えられる。そのような小さな質量降着率にも関わらずパルサーとして観測されているということは、遠心力が小さいことを意味し、中性子星がゆっくりと回転していることに対応する。従来は質量降着率が大きく高速回転するパルサーが良く知られていたが、「あすか」の高感度の観測により、暗いパルサーの姿がようやく明らかになり始めたといつて良い。

長いパルス周期を持つ天体は、中性子星ではなく白色わい星を含む連星系である可能性もある。中性子星か白色わい星かを明らかにするには、今後の多波長観測が重要である。

4. 超新星残骸

超新星残骸の発見およびその研究は星間物質の進化の他、様々な分野にインパクトを与える。超新星残骸はこれまで電波の波長でサーベイされ、220個がカタログされている⁹⁾。また、ROSAT衛星による全天サーベイで新たに超新星残骸が発見され、X線サーベイも超新星残骸の検出には有効であることを実証した。しかし、ROSATでは星間物質による吸収のため、銀河面上では検出が難しい。また、電波超新星残骸のうち、X線放射が発見されているのはそのうち4分の1程度であり、大部分の超新星残骸のX線領域での特徴は不明のままになっている。「あすか」銀河面サーベイでは、観測領域内に含まれていた約50個の既知の超新星残骸のうち、サーベイ領域の端に構造の一部が検出されたというものを含めて、20個ほどが確実に検

表 1.

X 線天体名	周期 (秒)	強度 [†] (erg s ⁻¹ cm ⁻²)	タイプ	文献
AX J1845.0-0300*	7	4.2×10^{-12}	AXP, トランジェント	3)
1RXS J170849.0-400910	11	3.1×10^{-11}	AXP	4)
1E 1841-045*	12	1.0×10^{-11}	AXP	5)
AX J1820.5-1434	152	2.3×10^{-11}		6)
AX J1749.2-2725	220	3.0×10^{-11}	トランジェント	7)
AX J170006-4157*	715	4.1×10^{-12}		8)

* : 「あすか」で X 線パルスが発見され、銀河面サーベイのデータから長期的強度変動の有無が調べられたもの。
† : 観測された 2-10 keV のエネルギーフラックス、吸収の補正は行っていない。

出できている。このうち「あすか」で初めて X 線を検出したものが 10 個以上ある。この他に確実な検出とまでは言えないものの超新星残骸の位置に拡がった弱い X 線放射が存在しているものや電波シェルの内側の領域に点源状の構造 (パルサーか?) を示すものもある。検出できた超新星残骸は、総じて大きな吸収 ($N_H > 10^{22} \text{Hcm}^{-2}$) を受けていることが特徴的で、このような超新星残骸を検出できたことは、「あすか」の性能がなせる技である。

G352.7-0.1 を始めとして、いくつかの電波超新星残骸からシェル型の構造とともに珪素、硫黄の輝線を伴う熱的スペクトルを検出した。超新星残骸の進化を記述した Sedov 解を用いると年齢は数千年と見積もられ、これは超新星爆発の際の衝撃波によってはき集められた星間物質が光っている段階に相当する。G352.7-0.1 のスペクトル解析の結果、X 線を放射しているガスの重元素の存在比が宇宙組成の値よりも大きいことがわかった。銀河中心方向に位置すること、吸収量が大きいことを考慮すると、銀河中心近傍の重元素量が多い領域で起こった超新星ではないかと考えられる¹⁰⁾。また、この他にも熱的スペクトルを持ち、元素組成が宇宙組成と同じ程度の値を示すものがある¹¹⁾。

一方、「あすか」により SN 1006 のシェルから非熱的放射が発見された¹²⁾。これは 10^{14} eV にもおよ

ぶ超高エネルギー電子の存在を意味し、この加速メカニズムはフェルミ加速によるものと考えられている。すなわち、宇宙線の発見以来の謎であった発生源と加速メカニズムについてその解明の糸口が得られたのである (天文月報 1999 年 12 月号富田氏の記事も参照)。本プロジェクトでも ROSAT が発見した超新星残骸 RX J1713.7-3946 が、SN 1006 と同じ非熱的放射のシェル構造を持つことを明らかにした¹³⁾。サーベイでは RX J1713.7-3946 のシェル構造の一部が視野に入っていた (図 1 $-12^\circ \sim -13^\circ$ あたりの明るい半月状の構造) が、ここから輝線を伴わないスペクトルが検出された。距離こそ異なるものの、スペクトルや実サイズなどの特徴は SN 1006 とおりふたつであり、SN 1006 twin と私たちは呼んでいる。また、この他にも統計不足ではあるものの明確な輝線放射が見られないものがあり、これも SN 1006 と同じ種類の超新星残骸であるのかも知れない。

硬 X 線バンドでシェル状、またはアーク状の構造を持つ未同定天体がいくつも見つかった。これらの位置に既知の超新星残骸は存在しないので、これらは超新星残骸候補である。このような未同定天体がまだまだたくさん存在しているようである。

5. 銀河円盤に沿って広がる X 線放射

私たちの銀河系には、銀河円盤に沿って観測機器の位置分解能力では点源に分解することのできない、広がった X 線放射が存在しており、銀河面 X 線放射 (Galactic Ridge X-ray Emission, 以下 GRXE) と呼ばれている。「てんま」衛星によって電離が進んだ鉄イオンからの輝線が発見されるにいたって、この放射が 10^7 – 10^8 K にもおよぶ高温プラズマガスからの放射であることが明らかになった¹⁴⁾。 10^8 K もの高温ガスの存在とその起源は、星間物質の進化および銀河系のダイナミクスにも関わる重要な問題である。しかし、その起源はもちろんのこと、そもそも、これが低光度天体がたくさんあるために広がった天体としてみえているのか、それとも本当に広がった高温ガスが存在しているのか、という根本的な疑問に対し、未だ確固たる決着がつかっていない。

検出した点源を除いた視野内の X 線スペクトルの例を図 3 に示す。電離状態にある珪素、硫黄、鉄からの輝線がはっきりと見え、高温プラズマガスからの放射であることがわかる。スペクトル解析の結果、従来からその存在が知られていた温度が 8×10^7 K 程度の熱的ハード成分に加え、 9×10^6 K 程度の熱的ソフト成分の存在が確認された。そしてこのソフト成分とハード成分のスペクトルパラメータは、場所ごとにほとんど変化しないことがわかった¹⁵⁾。この 2 成分は銀河系内でどのような分布をしているのだろうか。ソフト成分の寄与が大きい 0.7–2 keV とハード成分の寄与が大きい 2–10 keV の 2 つのバンドの強度分布を図 4 に示す。ハード成分は「ぎんが」で得られた鉄輝線の分布¹⁶⁾と良く似ており、中心から離れるにしたがって緩やかに減少していき、そしてちょうど銀河腕の方向に一致する銀

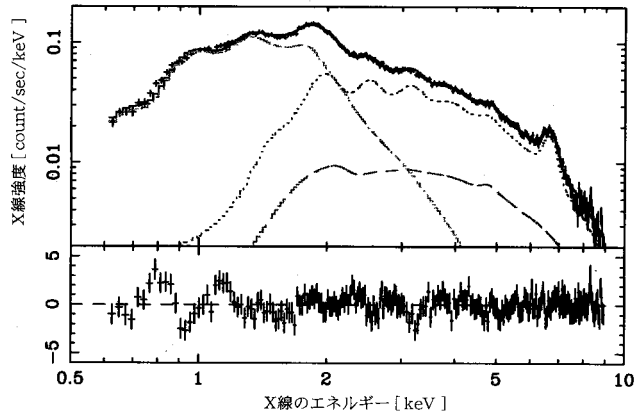


図 3: 銀河円盤領域で観測した GRXE のスペクトル。検出器のレスポンスが含まれている。十字は観測データ、黒の実線はベストフィットモデルを表し、熱的ソフト成分 (一点鎖線)、熱的ハード成分 (点線)、宇宙 X 線背景放射 (破線) のそれぞれの寄与も示した。また、下段はベストフィットモデルとの差を示す。

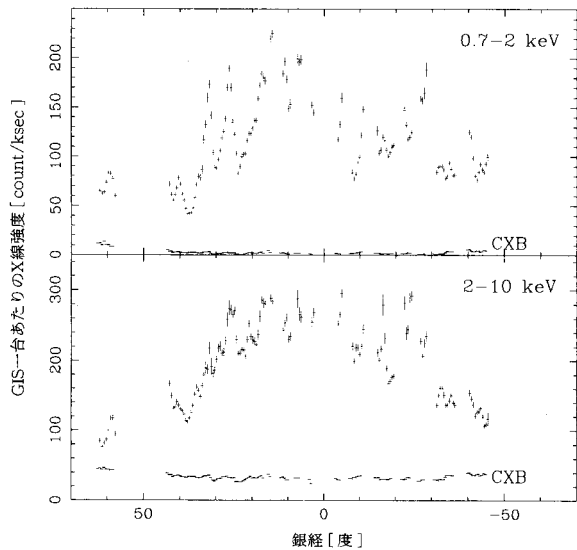


図 4: GRXE の銀経方向の強度分布: 0.7–2 keV (上) と 2–10 keV バンド (下)。下方の CXB は、各観測点ごとに見積もった宇宙 X 線背景放射の寄与の大きさを表す。

経 ± 30° あたりを境にして強度が急激に弱くなる。この熱的ハード成分は近赤外線の強度分布とも良く似ており、銀河系の構造と関連しているようである。一方、ソフト成分は変動が大きく、ハ

ード成分のような大局的な構造はあまり見られない。

銀河円盤方向のスペクトル変化はあまり見られないのに対し、銀緯方向のスペクトル変化は顕著である。銀河円盤から離れるにつれ、星間物質による吸収の影響が少なくなるためソフトになり、ハード成分は鉄輝線を伴った熱的成分から非熱的成分へと移行する¹⁵⁾。ハード成分には熱的成分以外に非熱的成分が存在することは、「ぎんが」衛星の観測により示唆され¹⁷⁾、最近のアメリカのX線天文衛星RXTEの観測によっても明らかになった¹⁸⁾。「ぎんが」、RXTEともに視野が大きいので、非熱的成分と熱的成分の空間的な分布の違いを議論するのは困難であったが、「あすか」によると、お互いに住み分けているように見える。一方、 γ 線領域でも1970年代に銀河円盤に沿って拡がった放射成分が発見され、加速された電子からの制動放射と考えられてきた。50keVから100MeV領域までのエネルギースペクトルを硬X線領域まで延長すると、非常に不思議なことに「ぎんが」、「あすか」によるGRXEの観測強度とよく一致する。この一致が偶然のものであるのか、またX線を放射する非常に高温なプラズマの起源と宇宙線電子の加速に関連があるのかが注目される。

以上のように、GRXEには、大きく分けて独立な3成分（熱的ハード成分、熱的ソフト成分、非熱的ハード成分）が存在するようである。ソフト成分は大きな吸収量を必要とし、観測を行なったどの領域にも存在することから銀河面放射の1成分と考えられる。ガスの温度、電離度、表面輝度、揺らぎの強度とスケールなど、多くの点でその起源は超新星残骸であると考えたとつじつまが合う。それに対して熱的ハード成分はどうか。個別天体の集合であるとしたら、その天体は強い鉄輝線を持ち、 8×10^7 K程度の高温ガスで説明できるような天体でなければならない。このような天体がどのくらいの数必要なのだろうか。GRXEが微弱点源の集合であるとして、その $\log N - \log S$ 関係を仮定すると、表面輝度の空間揺らぎが計算でき、観

測値からそのモデルに制限が付けられる。そこで、銀河系の構造によると思われる大局的な空間構造を除き、視野内3分角 \times 3分角ごとの強度の揺らぎを調べてみた。解析の結果、有意な揺らぎが検出されたが、その値は銀河系外のX線天体を銀河円盤を通して見た時に予測される揺らぎ¹⁹⁾と、誤差の範囲内で良く一致することがわかった。従って、GRXE自身には輝度の揺らぎは必要ではなく、GRXEを点源で100%説明するには、 1.6×10^{31} ergs⁻¹以下の明るさを持つ天体が、3分角 \times 3分角の領域に100個以上含まれていなければならないことになる²⁾。この制限を図2に示したが、分解できた微弱なX線天体の $\log N - \log S$ 関係から外挿して1桁程度多くの天体が必要となり、これは極めて考えにくい。また揺らぎ解析などから得られた個々の天体の光度の上限から、超新星残骸説も難しい。このように既知の天体による集合説は困難であり、真に拡がったプラズマが銀河面に閉じ込められているという可能性が残る。それでは、銀河系の重力で閉じ込めておくことのできないほどの高温のガスがどのようにして生成されたのだろうか。

これらの観測結果を説明するのに、銀河面磁場が重要な役割を果たしていると考えるとつじつまの合うことが多いことから、磁気リコネクションにより星間ガスを加熱し、磁場によって高温プラズマを閉じ込めるというシナリオが提案されている²⁰⁾。このシナリオでは、ガス密度の低い高銀緯では粒子加速によって磁場エネルギーが散逸し、その結果、非熱的な放射が生まれると考える。最近、磁気流体シミュレーションにより、条件によっては銀河面プラズマを 8×10^7 K程度まで加熱することは可能であることが示されている²¹⁾。

5. おわりに

「あすか」による銀河面硬X線サーベイでは、これまでにない感度で暗い天体まで検出することができ、銀河系内天体の研究に欠かせないデータを供給してくれた。検出した天体の大多数は対応天

体は見つかっていないが、既知天体の特徴との比較からこれら未知天体の性質を調べつつある。このサーベイ観測において、多数の X 線放射超新星残骸が検出された。衝撃波で集められた星間物質が光っている段階にある、熱的スペクトルを持つ超新星残骸の系統的な解析は、個々の超新星残骸の特徴だけでなく、銀河系内における星間物質の元素組成分布を調べることにもつながるだろう。また、SN 1006 のような非熱的放射スペクトルを持つ超新星残骸、およびその候補天体の詳細観測により、超新星の衝撃波面での粒子加速のメカニズムの研究、および超新星残骸の寄与の定量的な評価が可能となるだろう。一方、GRXE の起源については「あすか」によるスペクトル解析、画像解析の両面から、真に拡がった放射成分である可能性が高くなったきたといえる。しかし、 8×10^7 K の高温プラズマガスがいかんして生成されたのか、なぜ銀河円盤から流れ出さずにとどまっているのか、という大きな疑問が残る。GRXE の他の 2 成分、すなわち、より高銀緯まで拡がった非熱的放射成分や、銀河円盤に広く存在する熱的ソフト成分との関連も含めて、さらに検出感度、空間分解能の良い検出器による観測が謎を解く鍵を与えてくれるに違いない。

謝辞

本研究はたくさんの方に支えられて実現されました。銀河面サーベイプロジェクトを提案された小山勝二教授（京大）をはじめ、観測、データ解析を進めるにあたり、貴重な御意見を頂いた、「あすか」銀河面サーベイチームの皆さんに感謝します。「あすか」衛星の開発、較正、そして運用に多大な尽力を頂いた、「あすか」チームの皆さんに感謝します。

参考文献

- 1) Voges W. et al., 1999, A&A 349, 389
- 2) Sugizaki M. 1999, Ph.D. Thesis, University of Tokyo
- 3) Torii K. et al., 1998, ApJ 503, 843

- 4) Sugizaki M. et al., 1997, IAU Circ.6585; Sugizaki M. et al., 1997, PASJ 49, L25
- 5) Vasisht G., Gotthelf E.V. 1997, ApJ 486, L129; Torii K. 1998, Ph.D. Thesis, Osaka University
- 6) Torii K. et al., 1997, IAU Circ.6678; Kinugasa K. et al., 1998, ApJ 495, 435
- 7) Torii K. et al., 1998, ApJ 508, 854
- 8) Torii K. et al., 1999, ApJ 523, L65
- 9) Green D.A. 1998, A Catalog of Galactic Supernova Remnants,
<http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>
- 10) Kinugasa K. et al., 1998, PASJ 50, 249
- 11) Yamauchi S. et al., 1998, Astron. Nachr. 319, 111
- 12) Koyama K. et al., 1995, Nature 378, 255
- 13) Koyama K. et al., 1997, PASJ 49, L7
- 14) Koyama K. et al., 1986, PASJ 38, 121
- 15) Kaneda H. 1997, Ph.D. Thesis, University of Tokyo; Kaneda H. et al., 1997, ApJ 491, 638
- 16) Yamauchi S., Koyama K., 1993, ApJ 404, 620
- 17) Yamasaki N. Y. et al., 1997, ApJ 481, 821
- 18) Valinia A., Marshall F.E. 1998, ApJ 505, 134
- 19) Ueda Y. et al., 1999, ApJ 518, 656
- 20) Makishima K. 1994, in New Horizon of X-ray Astronomy, ed. Makino F., Ohashi T., (Universal Academy Press, Tokyo) p171
- 21) Tanuma S. et al., 1999, PASJ 51, 161

Galactic Plane Survey with ASCA

Shigeo YAMAUCHI

Faculty of Humanities and Social Sciences, Iwate University, 3-18-34 Ueda, Morioka, Iwate, 020-8550, Japan

Hidehiro KANEDA

Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 229-8510, Japan

Kenzo KINUGASA

Gunma Astronomical Observatory, 6860-86 Nakayama, Agatsuma, Gunma 377-0702, Japan

Mutsumi SUGIZAKI and Ken'ichi TORII

National Space Development Agency of Japan, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, Japan

Abstract: Our knowledge of the Galactic X-ray sources is quite incomplete due to the Galactic absorption in the low energy band and limited spatial resolution of detectors in the high energy band. ASCA Galactic Plane Survey Project was planned to cover all the Galactic inner disk. This project provides us with the first opportunity to remove the galactic absorption and make an unbiased sample of many categories of the Galactic X-ray sources. We report on the results obtained from the project.