

低エネルギー宇宙線で輝く X線の天の川 —「すざく」の銀河面観測が明らかにした 新事実



信 川 久実子

〈奈良女子大学理学部 〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋町西町〉

e-mail: kumiko@cc.nara-wu.ac.jp

天の川銀河の中心と銀河面からは、ヘリウム状鉄イオンと中性鉄原子からの特性X線が見つかっている。ヘリウム状鉄輝線は高温のプラズマから放射されるが、中性鉄輝線はX線や宇宙線で鉄原子が電離される必要がある。「すざく」の観測で、銀河中心領域の中性鉄輝線は、巨大ブラックホールSgr A*の過去の大フレアを分子雲が反射して出ていることが明らかになった。一方、銀河面の中性鉄輝線の起源は謎のままである。われわれは「すざく」の10年分の銀河面観測データを詳細解析し、中性鉄とヘリウム状鉄輝線の高精度で高統計な銀河面分布を得た。その結果ヘリウム状鉄輝線の大部分は、暗いX線源から出ていると考えて矛盾なかった。しかし中性鉄輝線は、点源の集まりではたかだか50%程度しか説明できず、分子雲からの放射の寄与が最も大きいことを明らかにした。また分子雲への照射粒子が、X線ではなく低エネルギー宇宙線が主に寄与していることも示した。

1. 銀河中心・銀河面の鉄輝線放射

天の川銀河の中心付近と銀河面には、個々の天体に分解できない拡散X線放射が存在する¹⁾。いわばX線の天の川である。その起源はX線天文学が始まって以来の謎である。銀河中心・銀河面拡散X線放射の最大の特徴は、過去の日本のX線天文衛星「てんま」が発見した、鉄からの特性X線である²⁾。のちに「あすか」衛星は、実はこの鉄輝線が、異なるエネルギー（6.4, 6.7, 7.0 keV*¹）をもつ3本の輝線に分離できることを示した³⁾。

輝線のエネルギーの違いは電離状態の違いを表す。3本のうち6.7と7.0 keVの輝線は、それぞれ、電子が2個しか残っていないヘリウム状と、

電子が1個しか残っていない水素状に高階電離した鉄イオンからのX線である。これらは、温度数千ケルビンという高温のプラズマから放射される。一方、6.4 keVの輝線は中性状態の鉄原子からの特性X線であり、低温物質からの放射を示唆する。中性鉄輝線は、低温の鉄原子が存在するだけでは決して放射されない。外部から照射された高エネルギー粒子、たとえばX線や宇宙線で鉄原子を電離する必要がある。つまり中性鉄輝線は、背後に高エネルギーな現象が潜んでいることを示している。

2005年打ち上げの「すざく」衛星は、鉄輝線バンドで過去最高の感度とエネルギー分解能をもつ^{4), 5)}。「すざく」はその特長を最大限生かし、

*¹ keV=キロ電子ボルト。

これまでに銀河中心領域 ($|l| < 1^\circ$) の中性鉄輝線の起源を明らかにした。つまり、巨大ブラックホール Sgr A* (いて座エースター) の過去の大フレアを周囲の分子雲が反射している (X線反射星雲) という活動的な姿である^{6), 7)}。この点についての詳しい解説は、天文月報2011年7月 (第104巻第7号) の「巨大分子雲を照らす銀河中心ブラックホールの過去の大爆発」や、天文月報2015年12月 (第108巻第12号) 『すざく』10周年記念特集: 『すざく』と銀河中心が織りなした驚きのドラマ」を参照されたい。

本稿のテーマは、銀河面上の中性鉄輝線である。その起源については長年議論が続いてきた。先行研究の多くは、高階電離鉄と中性鉄輝線をひとまとめにした単一起源で説明しようとするものであった。その結果、無数の暗い点源 (激変星やフレア星など) の集まりとする説が現在優勢である^{8), 9)}。しかし、「すざく」が銀河中心でX線反射星雲シナリオの確証を得られたのは、3本の鉄輝線を分離して議論したからである。広大な銀河面で同様の議論を行うには、中性鉄と高階電離鉄輝線の高精度かつ高統計なデータが必要だ。「すざく」は、2015年8月に科学観測を終えるまでの10年のミッションの間に、延べ2,000時間以上に

わたる銀河面観測を行った。これだけのデータがあれば、過去最高の精度と統計でもって鉄輝線分布を取得できる。中性鉄輝線の起源解明へ向け、まさに機は熟した。

2. 東西非対称な中性鉄輝線分布¹⁰⁾⁻¹²⁾

図1は、「すざく」で取得した中性鉄とヘリウム状鉄の銀河面分布である。銀河中心の東側と西側の分布を重ねている。ヘリウム状鉄の分布は東西ほぼ対称に分布している。中性鉄の分布も一見すると東西対称のようだが、よく見ると図中の黒色の四角領域は非対称であり、銀経1.5-3.5度 (銀河中心東側) 付近と-20度付近で、明らかに局所的な超過がある。ヘリウム状鉄と中性鉄の分布の違いは、両者の起源が異なっていることを示唆している。そこでまず、この特徴的な二つの超過領域において中性鉄輝線の起源を調べた。

図2は、銀河中心東側と西側 ($1.5^\circ < l < 3.5^\circ$ と $-3.5^\circ < l < -1.5^\circ$) での分布を拡大したものだ。興味深いことに、ヘリウム状鉄の東西対称な分布と西側の中性鉄は同じ形をしている。しかし、東側の中性鉄はその分布とは異なる。つまり、未知の非対称な成分が存在している。前述のとおり、中性鉄輝線は低温物質からの放射である。実は東

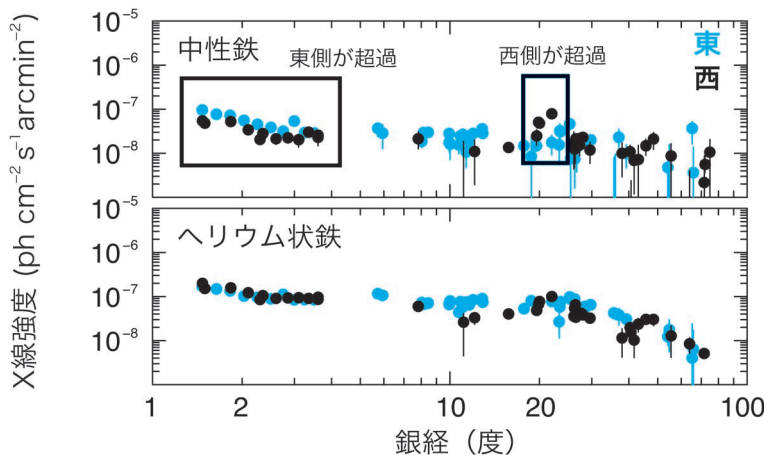


図1 「すざく」で取得した中性鉄とヘリウム状鉄の銀河面分布。 $1^\circ < l < 100^\circ$ のデータ (東) を青、 $-100^\circ < l < -1^\circ$ のデータ (西) を黒で示した。

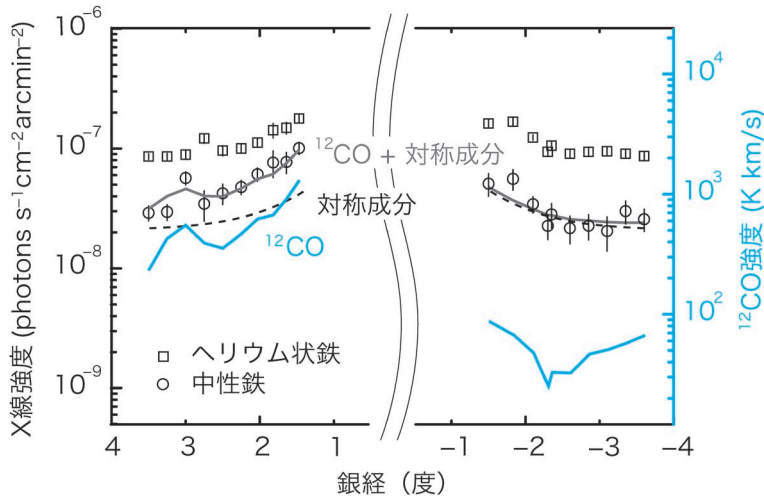


図2 1.5° < l < 3.5° と -3.5° < l < -1.5° の領域での、ヘリウム状鉄、中性鉄輝線と分子雲の分布。

側の領域では、西側に比べてたくさんの分子雲が電波で観測されている。銀経3度には、銀河面から北に向かって伸びる巨大分子雲 Clump2 が存在する。「なんてん」で観測した ^{12}CO の分布と比較したところ、東側の中性鉄輝線の超過は分子雲の密度に比例していることがわかった。したがって、分子雲にX線あるいは宇宙線陽子・電子が衝突して生じたと考えられる。銀河中心領域を除く銀河面上で、真に広がった鉄輝線放射が観測的に見つかったのは、これが初めてである。

では、いったいなにが分子雲に照射しているのだろう。その手がかりとなるのはスペクトルだ。X線や宇宙線によって分子雲中の中性鉄が電離され特性X線を出すとき、トムソン散乱(X線照射の場合)や制動放射(宇宙線照射の場合)によって、連続X線も同時に放射される。X線と宇宙線陽子・電子の場合で、特性X線と連続成分が生じる素過程が異なるため、観測されるX線スペクトルも照射粒子によって異なる。とくに顕著に違いが現れるのは、中性鉄輝線の等価幅(連続X線に対する輝線強度の比)である。

図3は、照射粒子ごとに、出てくる中性鉄輝線

の等価幅を照射粒子のべき関数として計算したものである。X線および電子照射の場合、等価幅は数百eVから1 keV程度と低い値だが、陽子の場合には1 keV以上の大きな値になることもある。これはおもに、それぞれの粒子における中性鉄電離の断面積の違いが現れている¹³⁾。さらに等価幅は、照射粒子の種類に関係なく、鉄の存在量(アバundance)に比例する。銀河中心領域での鉄のアバundanceは、X線や赤外線の観測によって、1から1.5太陽組成と測定されている^{7), 14), 15)}。図中の帯の幅はその範囲を示している。

銀河中心の東側から西側のスペクトルを引き、分子雲に相関する成分だけ取り出すと(図4)、等価幅は $1.3 \pm 0.4^{+0.2}_{-0.2} \text{ keV}^{*2}$ 、連続X線のべきは 3 ± 1 であった。この観測値と先ほどの計算値を比較してみる。図3の四角で囲んだ領域(銀河中心東側)が、誤差も含めた観測値の範囲である。観測した等価幅が高い値であることから、電子起源は棄却される。

X線照射の可能性は、かろうじて棄却できない。この説に立てば、近傍に明るいX線星がないので、照射源は Sgr A* しかありえない。この場

*2 第1項目は統計誤差、第2項目は東西のスペクトルを引き算する際に生じる系統誤差。

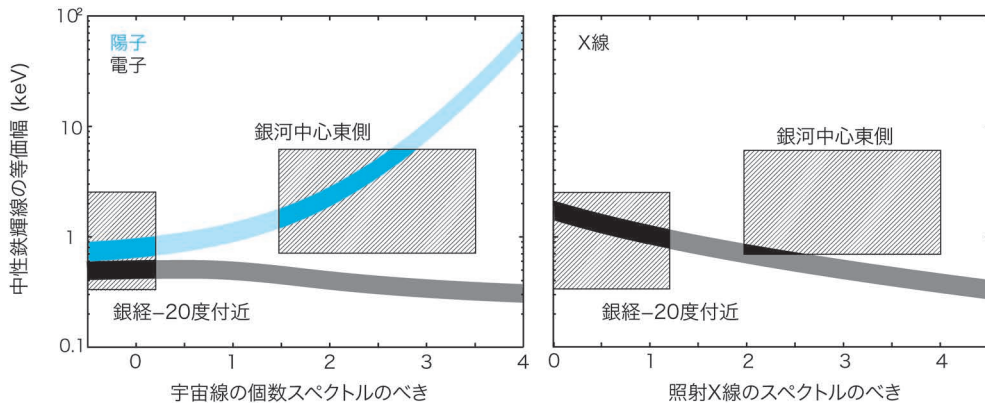


図3 中性鉄輝線の等価幅 (左: 宇宙線起源, 右: X線起源). 帯で示したのは, 鉄のアバundanceが1-1.5太陽組成の場合に, 各照射粒子で生じる中性鉄輝線の等価幅の計算値. X線シナリオでは, 等価幅が最も大きくなるトムソン散乱角 (90度) を仮定した. 四角領域は, 銀河中心東側および銀経-20度付近における観測値 (誤差を含む).

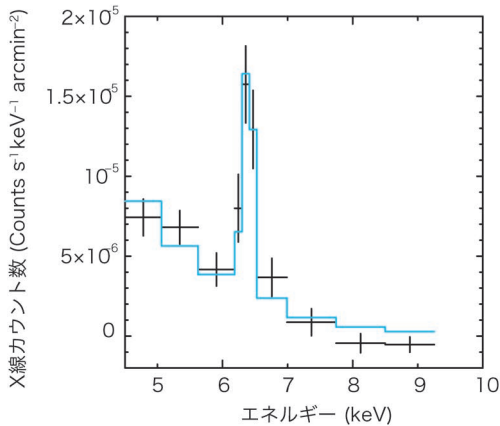


図4 図2の東側から西側のスペクトルを引いて得た, 分子雲に相関する成分.

合Sgr A*の光度は, 1500年前に $10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ である必要がある¹⁶⁾. 過去のSgr A*の活動性を考えると^{7), 17), 18)}, この程度の光度になることは不思議ではない. そのため, 銀河中心の東側にもX線反射星雲が存在しているのかと一見思われた. ところが, 奇妙なことが見つかった. Sgr A*が一樣に巨大分子雲Clump2を照らしているならば, 分子雲のいずれの部分でもガス密度に比例して中性鉄輝線が強くなるはずだ. しかし観測事実はそ

れと異なっていた. 北に向かって伸びるClump2のガス密度は, 銀河面上 ($b \sim 0^\circ$) に比べて面外 ($b \sim 1^\circ$) のほうが1.4倍高い. 一方で, 中性鉄輝線の超過成分は反対に, 銀河面上に比べると面外は強度が1/2になっていた. Sgr A*起源説でこれを説明するのは困難である.

宇宙線陽子起源の場合, 中性鉄の電離に寄与するのはMeV^{*3}程度の低エネルギー帯域である. 中性鉄輝線の超過成分の強度, 分子雲の密度, 連続X線からわかる陽子のスペクトルのべきから, 銀河中心東側のMeV陽子 (0.1-1000 MeV) のエネルギー密度は 80 eV cc^{-1} と測定できた. この値は, GeV以上で測定されている典型的な値 1 eV cc^{-1} ¹⁹⁾より1-2桁高い値である. この値の妥当性や, 陽子の加速源については, 後の章で触れたい.

銀経-20度付近の中性鉄超過の起源も同様に調べた. この領域は太陽系から見てちょうど渦状腕 (near 3 kpc arm) の接線方向に位置するため²⁰⁾, 見通す物質が多い. 実際, 超過領域に対応した視線方向に濃い分子雲が存在した. つまり分子雲からの拡がった放射による超過と考えられ

*3 MeV=メガ電子ボルト.

る。ここでもスペクトルから照射粒子を探った。超過領域から、それ以外の銀河面領域 ($10^\circ < |l| < 30^\circ$ かつ $|b| < 0.5^\circ$) のスペクトルを引くと、分子雲に相関する成分の等価幅は $0.67 \pm 0.22^{+0.16}_{-0.11}$ keVとやや小さい値であった。観測した連続X線のべきとともに、観測値の誤差範囲を図3に重ねてみると、スペクトルだけでは照射粒子が制限できないことがわかる。

X線照射の場合、分子雲から100 pc離れているX線源で必要光度は $\sim 4 \times 10^{38}$ erg s⁻¹である¹⁶⁾。この値は中性子星のエディントン限界光度より2倍高い。候補となりうる明るい低質量X線連星系が、射影距離で75-150 pcの位置に2天体存在するが、奥行き方向の距離を考えると、いずれも超過に対応する分子雲から数kpc離れている。つまり、銀経-20度でもX線起源説は困難である。もっとも可能性が高い照射粒子は宇宙線である。エネルギー密度は、陽子と電子の場合でそれぞれ、20, 0.03 eV cc⁻¹と求まる。

3. 星の集まりだけでは説明できない銀河面上の中性鉄輝線^{10), 12)}

前章で、局所的に東西非対称に分布する中性鉄輝線が分子雲起源であることがわかった。では、銀河面全体にわたって存在している中性鉄輝線の起源は何だろうか。これまでは銀経分布をもとに議論してきたが、次は銀緯分布に着目する。銀緯分布が指数関数とした場合に、強度がe⁻¹になる厚みをスケールハイトと定義し、中性鉄と、比較のためにヘリウム状鉄のスケールハイトを測定した。

$10^\circ < |l| < 30^\circ$ かつ $|b| < 0.5^\circ$ の銀河面領域で測定したヘリウム状鉄のスケールハイトは ~ 140 pcであった。この値は、鉄輝線の起源と一般的に考えられている激変星やフレア星のもの (130-300 pc)²¹⁾⁻²³⁾と矛盾しない(図5)。一方、中性鉄のスケールハイトは ~ 70 pcと小さく、X線源の集まりでは説明できない。むしろ、鉄輝線と同

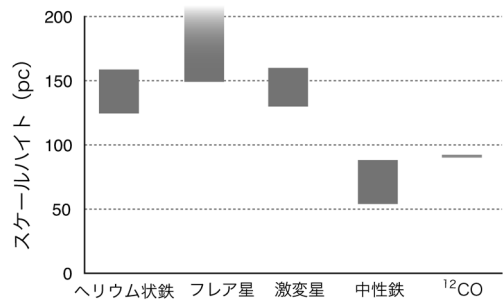


図5 ヘリウム状鉄、中性鉄のスケールハイト¹⁰⁾と、X線源²¹⁾⁻²³⁾、分子雲(¹²CO)¹²⁾の比較。

表1 X線源と銀河面上の鉄輝線等価幅の比較。

天体	等価幅 (eV)	
	中性鉄	ヘリウム状鉄
強磁場激変星 ^{24), 25)}	120	160
弱磁場激変星 ^{26), 27)}	70	400
フレア星 ²⁷⁾	≤20	300
銀河面 ¹⁰⁾	100	430

じ領域で測定した¹²COのスケールハイト ~ 90 pc¹²⁾と似た値である。つまり、銀河面上の中性鉄輝線の多くが分子雲から放射されている。

銀河面から取得したスペクトルの形も、中性鉄輝線がX線源の集まりだけでは説明できないことを示している。銀河面全体 ($10^\circ < |l| < 30^\circ$ かつ $|b| < 0.5^\circ$ の領域) で取得したスペクトルで中性鉄とヘリウム状の等価幅を測定すると、それぞれ $\sim 100, \sim 430$ eVであった(表1)。高階電離鉄の等価幅だけ見れば、弱磁場激変星やフレア星とほぼ等しいので、その起源天体の多くがX線源と考えて矛盾しない。しかし、中性鉄輝線の等価幅を同時に説明することはできない。事実、銀河面上の高階電離鉄輝線がすべてX線源であったとしても、中性鉄輝線においては銀河面全体の強度のたかだか50%程度しか説明できない。つまり、強い中性鉄輝線を放射する天体の寄与が必要である。図3に示したように、X線や宇宙線が分子雲に照射して放射される中性鉄輝線は、大きな等価幅 (>300 eV)を示す。したがって、銀河面の

中性鉄輝線の半分以上は分子雲起源の拡散放射だろう。

ここでも問題は、照射粒子はX線か宇宙線かということだ。低質量X線連星系のような明るいX線源が、円盤状に分布している星間ガスを照射して生じる中性鉄輝線の光度を、典型的なX線源のスペクトルや星間ガスの密度を仮定して計算すると、 $\sim 3 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ である。これは、銀河面全体の中性鉄輝線の光度 $\sim 3 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ の10%にすぎない。したがって、照射粒子として最も寄与しているのは、X線ではなく低エネルギー宇宙線（陽子または電子）と考えられる。銀河面全体の中性鉄輝線放射の半分が宇宙線起源である場合、陽子または電子のエネルギー密度はそれぞれ、 $10, 0.01 \text{ eV cc}^{-1}$ だろう。

4. 星間空間における低エネルギー宇宙線測定

「すぎく」が10年間で蓄積した膨大なデータは、低エネルギー宇宙線の分子雲への衝突が、銀河面上の中性鉄輝線放射に最も寄与している、という新事実を明らかにした。このことは、銀河面拡散X線放射の研究にとどまらない重要な意義があると筆者は考える。中性鉄を電離するMeV陽子やkeV電子といった低エネルギーの銀河宇宙線は、太陽磁場の影響を受けるため、太陽磁気圏内での観測は困難である。そのため、打ち上げから35年かけて2012年に太陽磁気圏を脱出したボイジャー1号の観測²⁸⁾を除くと、低エネルギー宇宙線のデータはほとんど皆無だった。今回の結果は、中性鉄輝線で低エネルギー宇宙線を探查・測定できることを初めて実証したものだ。

MeV陽子(0.1–1000 MeV)の場合、銀河面上のエネルギー密度は $10\text{--}80 \text{ eV cc}^{-1}$ であった。この値は、GeV以上で測定されている宇宙線の典型的な値($\sim 1 \text{ eV cc}^{-1}$)と比べて1桁高い。一方、GeV以上での典型的な宇宙線スペクトルのべき2.7を0.1 MeVまで外挿すると、MeV帯域

でのエネルギー密度は数百 eV cc^{-1} 程度になるが、今回の測定結果はそれより1桁低い。

これまで測定データがなかったため、低エネルギー宇宙線の加速源はほとんど議論されてこなかった。低エネルギー宇宙線は拡散しにくいので、近傍(数pc以内)に加速源が存在していると考えられる。一般的に、銀河系内の宇宙線加速源として最も有力な候補は、超新星残骸である。しかし、中性鉄輝線の超過のあった2領域にも、また銀河面全体のデータの中にも、既知の超新星残骸は含まれていない。たとえば、統計加速や磁気リコネクションといった加速機構が寄与している可能性が考えられるが、起源を特定できる情報はまだ得られていない。一方で、最近「すぎく」の観測から、二つの超新星残骸で宇宙線起源と考えられる中性鉄輝線が見つかった^{29), 30)}。低エネルギー宇宙線は、超新星残骸を含む銀河面上のあちこちで作られているのかもしれない。

中性鉄輝線を用いた低エネルギー銀河宇宙線研究は「すぎく」で始まったばかりである。銀河面上の低エネルギー宇宙線のスペクトルや、分子雲との衝突で出てくる中性鉄輝線の等価幅といった基本的な情報は、銀河面の多くの領域でわからないままだ。また、銀河中心の東側領域を除くと、中性鉄輝線放射に寄与しているのが陽子か電子かという点も区別できていない。もし、鉄輝線を数eVのエネルギー分解能で分光できれば照射粒子が区別できる。陽子は鉄原子を電離する際、K殻電子だけでなく、外殻電子も複数電離する。そのため中性鉄輝線の幅は10 eV程度に広がる³¹⁾。一方、電子やX線では輝線幅は広がらない。こうした超精密分光を含む、低エネルギー宇宙線の実態により迫る観測は、将来への課題としたい。

謝辞

本稿は、筆者が京都大学大学院でまとめた博士論文が元となっています。温かく厳しいご指導をいただいた小山勝二名誉教授と鶴剛教授、共同研

究者の山内茂雄教授，鳥居和史氏，田中孝明氏，福井康雄教授に，心より感謝いたします。また，本稿執筆の機会を与えていただいた馬場彩氏に御礼申し上げます。最後に，公私ともに一緒に歩んでくれる夫に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Worrall D. M., Marshall F. E., Boldt E. A., Swank J. H., 1982, ApJ 255, 111
- 2) Koyama K., Makishima K., Tanaka Y., Tsunemi H., 1986, PASJ 38, 121
- 3) Koyama K., Maeda Y., Sonobe T., Takeshima T., Tanaka Y., Yamauchi S., 1996, PASJ 48, 249
- 4) Mitsuda K., Bautz M., Inoue H., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 5) Koyama K., Tsunemi H., Dotani T., et al., 2007, PASJ 59, S23
- 6) Koyama K., Inui T., Matsumoto H., Tsuru T. G., 2008, PASJ 60, S201
- 7) Nobukawa M., Ryu S. G., Tsuru T. G., Koyama K., 2011, ApJL 739, L52
- 8) Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E., Forman W., Vikhlinin A., Sunyaev R., 2009, Nature 458, 1142
- 9) Warwick R. S., Byckling K., Pérez-Ramírez D., 2014, MNRAS 438, 2967
- 10) Yamauchi S., Nobukawa K. K., Nobukawa M., Uchiyama H., Koyama K., 2016, PASJ 68, 59
- 11) Nobukawa K. K., Nobukawa M., Uchiyama H., et al., 2016, ApJL 807, L10
- 12) Nobukawa K. K., 2016, Ph.D. thesis, Kyoto University
- 13) Tatischeff V., Decourchelle A., Maurin G., 2012, A&A 546, A88
- 14) Cunha K., Sellgren K., Smith V. V., et al., 2007, ApJ 669, 1011
- 15) Martin R. P., Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., et al., 2015, MNRAS 449, 4071
- 16) Sunyaev R., Churazov E., 1998, MNRAS 297, 1279
- 17) Nakashima S., Nobukawa M., Uchida H., et al., 2013, ApJ 773, 20
- 18) Su M., Slatyer T. R., Finkbeiner D. P., 2010, ApJ 724, 1044
- 19) Neronov A., Semikoz D. V., Taylor A. M., 2012, PhRvL 108, 051105
- 20) Dame T. M., Thaddeus P., 2008, ApJL 683, L143
- 21) Patterson J., 1984, ApJS 54, 443
- 22) Ak T., Bilir S., Ak S., Eker Z., 2008, New Astronomy 13, 133
- 23) Revnivtsev M., Sazonov S., Krivonos R., Ritter H., Sunyaev R., 2008, A&A 489, 1121
- 24) Ezuka H., Ishida M., 1999, ApJS 120, 277
- 25) Hellier C., Mukai K., Osborne, J. P., 1998, MNRAS 297, 526
- 26) Rana V. R., Singh K. P., Schlegel E. M., Barrett P. E., 2006, ApJ 642, 1042
- 27) Xu X.-J., Wang Q. D., Li X.-D., ApJ 2016, 818, 136
- 28) Stone E. C., Cummings A. C., McDonald F. B., et al., 2013, Science 341, 150
- 29) Sato T., Koyama K., Takahashi T., Odaka H., Nakashima S., 2014, PASJ 66, 124
- 30) Sato T., Koyama K., Lee S.-H., Takahashi T., PASJ 68, S8
- 31) Garcia J. D., Fortner R. J., Kavanagh T. M., 1973, Rev. Mod. Phys. 45, 111

X-Ray Study of Neutral Iron Line Emission in the Galactic Ridge: Contribution of Low-Energy Cosmic Rays

Kumiko K. NOBUKAWA
Nara Women's University, Nishi-machi, Kita-Uoya-cho, Nara 630-8506, Japan

Abstract: K-Shell lines of neutral, He-like and H-like iron have been detected in the Galactic ridge. In order to investigate the origin of the neutral iron line, we analyzed the Suzaku 10-year archive data. We measured scale heights and equivalent widths of the three iron lines separately. The scale height of the He-like iron line is roughly consistent with those of point sources, while that of the neutral iron is similar to molecular clouds rather than point sources. We discovered clear enhancements of the neutral iron line at $1.5^\circ < l < 3.5^\circ$ and $l \sim -20^\circ$, which are associated with molecular gas. Even in non-excess areas, any assembly of point sources does not reproduce the spectra: at least a half of the neutral iron line emission should be contributed by the diffuse emission from molecular gas, and the most plausible irradiating particle is low-energy cosmic rays.