

天の川銀河近傍における中性子星分布

大川 祐満・栗田 泰生

[研究論文] 天の川銀河近傍における中性子星分布

大川祐満¹・栗田泰生²

1 機械工学科

2 基礎・教養教育センター

Distribution of the neutron stars around the Milky Way Galaxy

Yuma OKAWA¹, Yasunari KURITA²

Abstract

We investigate position and characteristic age of the observed neutron stars listed in the ATNF pulsar catalogue, finding a stream structure composed of neutron stars. The neutron star stream extends to the galactic halo and surrounds the galactic plane in analogy with the stellar streams. The neutron stars included in the stream are found to be relatively young, typically less than 10^7 years old. It is also found that neutron stars that are older than 10^{10} years are mainly located at the outer edge of the Milky Way Galaxy.

Keywords: Milky Way Galaxy, neutron star, stellar stream

1. はじめに

天の川銀河の姿は、未だ完全には解明されていない。我々が天の川銀河の中に存在しているため、天の川銀河の全体像を直接外から眺めることができないためである。しかしながら人類は、様々な観測技術を開発し、少しずつ天の川銀河の構造を明らかにしてきた。例えば中性水素原子が放つ 21cm 線の電波観測により、天の川銀河が渦巻銀河であることがわかった。その後、各種観測により天の川銀河は棒渦巻銀河であると考えられるようになった。

近年では、天の川銀河の構造を知るために天の川銀河の地図を作成しようという取り組みがなされている。具体的な取り組みとして、VERA 計画¹⁾や BeSSeL Survey などが知られている。それらの取り組みでは青色の若い星など恒星をターゲットとして観測が行われている。また、2019 年にワルシャワ大学の Skowron 等²⁾は、天の川銀河に含まれるセファイド変光星をターゲットにし、それらの詳細な位置情報から 3 次元地図を作成した。そして天の川銀河の銀河面は平らではなく端が S 字状に歪んでいることを発見した。

天の川銀河の形成過程についても研究が進展しており、天の川銀河に含まれる古い恒星の化学組成や金属量の調査、そして恒星の固有運動に関する力学的情報から、過去の矮小銀河合体の痕跡が見つかっている³⁾。現在では、小さな矮小銀河が集まって天の川銀河が形成されたと考えられている。

今現在、天の川銀河に吸収されつつある矮小銀河の姿とも言える恒星ストリームも数十個発見されている。恒星ストリームは、銀河円盤を取り巻くリング状の恒星分布で、矮小銀河や球状星団が天の川銀河から受ける潮汐力により細長く変形したものであると考えられている。

本研究では中性子星という特殊なコンパクト天体に着目し、観測された中性子星の情報から位置分布と年齢分布を調べた。中性子星は、規則的なパルス状電波を放出しているためパルサーとも呼ばれている。このパルス波を観測することにより、中性子星の位置情報を知ることができ、さらにパルス波の時間変化から中性子星の特性年齢を評価することができる。そのため、天の川銀河近傍の中性子星の位置分布および年齢分布を調べることは、天の川銀河の構造や歴史を調べる上で有効な手法となり得る。

本論文の構成を述べる。2 章では使用する中性子星データの出自および解析方法を述べる。3 章で、中性子星の位置分布と特性年齢分布を示し、それらに対する考察を 4 章で述べる。5 章で結論を述べる。

2. 解析方法

2.1. 使用データ

本論文では、オーストラリア国立望遠鏡機構 (ATNF : Australia Telescope National Facility) が公表している中性子星カタログ (ATNF pulsar catalogue: 1.63ver)⁴⁾ とカタログ付属の論文からデータを引用した。カタログには 2020 年 11 月時点において 2,811 個の中性子星が記載されているが、その中から地球からの距離が記載されている 2,706 個のデータを用いた。

2.2. 赤道座標から銀河座標への座標変換

銀河系内の中性子星の位置を調べるためには、赤道座標よりも銀河座標を選ぶのが自然である。そのため中性子星データにおいて、赤道座標系 (α, δ) から銀河座標系 (l, b) への座標変換が必要となる。この座標変換は以下のように与えられる。

$$b = \sin^{-1}\{\sin \delta \cos l - \cos \delta \sin l \sin(\alpha - \alpha_N)\},$$

$$l = \tan^{-1}\left\{\frac{\sin \delta \sin l + \cos \delta \cos l \sin(\alpha - \alpha_N)}{\cos \delta \cos(\alpha - \alpha_N)}\right\} + l_N.$$

ここで $l = 62.9^\circ$, $\alpha_N = 18^h 51.4^m$, $l_N = 32.9^\circ$ である。

また、本論文では太陽を原点とする3次元直交座標系 (x, y, z) も用いる。 x 軸は、銀河面に沿ってオリオン座 (Orion: Ori) といて座 (Sagittarius: Sgr) を結ぶ方向とし、Sgr 方向 (銀河中心方向) を正、Ori 方向を負とした。または x 軸は、太陽系と銀河中心を結ぶ方向と言い換えることもでき、 x 軸正方向は太陽から銀河中心に向かう方向である。 y 軸は銀河面に沿ってケフェウス座 (Cepheus: Cep) と帆座 (Vela: Vel) が並ぶ方向にとり、Cep 方向を正、Vel 方向を負とした。 z 軸は、太陽から銀河の北極がある方向にとり、銀河の北極側を正とした。

2.3. 元期の統一

地球の歳差運動や天体の固有運動によって、星の位置は変化する。そのため赤道座標系で天体の位置を表すには、いつの赤道座標系で表現されているのかの基準、つまり元期(epoch)を定める必要がある。現在使われている元期は、ユリウス年(Julian year)の J2000.0 という元期が用いられている。J2000.0 元期が使用される前は、ベッセル年(Besselian year)の B1950.0 元期が使われていた。中性子星データの中には、B1950.0 元期でのみ表記されているものもあり、それらについては J2000.0 元期の表記に変換する必要がある。この元期の変換には、鈴木雅之氏のホームページ「歳差の計算」⁵⁾を用いた。

例えば、おうし座のかに星雲 (Crab Nebula, M1) の中心部にある、通称かにパルサー (Crab Pulsar) は B0531+21 と表記される。これは頭文字が B であることから B1950.0 元期で表現されていることがわかり、その赤道座標値は、 $(\alpha, \delta) = (5^h 31^m 31.39612^s, 21^\circ 58' 54.4878'')$ である。これをユリウス年の J2000.0 元期での座標に変換すると、 $(\alpha, \delta) = (5^h 34^m 31.94013^s, 22^\circ 0' 52.157'')$ となる。本研究では、この例のように、解析に用いた中性子星データをすべてユリウス年の J2000.0 元期での座標値に統一した。

2.4. 特性年齢

中性子星は強い磁場を持ち、しかも高速に回転している。この回転により、中性子星は強いパルス状の電波を放射している。この電波放射により回転エネルギーを失い、中性子星の回転周期は遅くなる。中性子星からのパルス波を観測することにより、中性子星の自転周期 P が得られる。このパルス波を長期間にわたり観測することで、周期変動 \dot{P} も決定される場合がある。周期と周期変動の関係は、電磁放射によるエネルギー損失を考慮することで

$$\dot{P} = kP^{(2-n)} \quad (1)$$

とモデル化される⁶⁾。ここで、 n は制動指数である。式(1)より次式が得られる。

$$dt = \frac{1}{k} P^{n-2} dP \quad (2)$$

k を定数として扱えば初等的に積分することができ

$$t = \int_{P_0}^P \frac{1}{k} P^{n-2} dP = \frac{1}{k(n-1)} (P^{n-1} - P_0^{n-1}) \quad (3)$$

ここで、現在の自転周期を P 、初期の自転周期を P_0 とした。式(1)より

$$k = \dot{P} P^{n-2} \quad (4)$$

であるから、式(4)を式(3)に代入して

$$t = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right] \quad (5)$$

が得られる。このように、自転周期と周期変動から中性子星の年齢 t を見積もることができる。

中性子星の年齢がある程度古い場合、初期自転周期 P_0 は現在の自転周期 P より非常に短く ($P_0 \ll P$)、式(5)の第2項は第1項に比べて非常に小さくなるため、無視できるようになる。磁場の減衰がなく、真空中の場合を考えると制動係数 n は $n = 3$ と置くことができる⁶⁾。このときの年齢は特性年齢 (Characteristic age) τ と呼ばれ、次の式で与えられる：

$$\tau = \frac{P}{2\dot{P}} \quad (6)$$

この特性年齢は必ずしも中性子星の真の年齢ではないが、天文学的な年齢のオーダー評価として有用である。

我々は、距離のわかっている 2,706 個のうち、自転周期 P と周期微分 \dot{P} が分かっている中性子星 1,437 個に対して特性年齢を計算した。その結果は 3.2 節で述べる。

3. 解析結果

3.1. 中性子星の位置分布

銀河座標での中性子星の位置分布図を作成すると、Fig. 1 が得られる。この図から、銀河面に多くの中性子星が集中していることがわかるが、同時に、銀河面から離れた領域にも中性子星が存在していることもわかる。

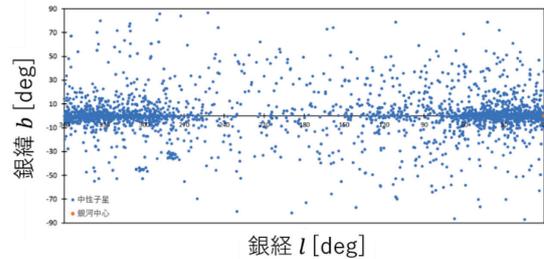


Fig. 1 : 銀河座標での中性子星の位置分布

Fig. 2 に、天の川銀河の北極方向 (z 軸正方向) から x - y 平面 (銀河面) に投影したときの中性子星の位置分布を示す。

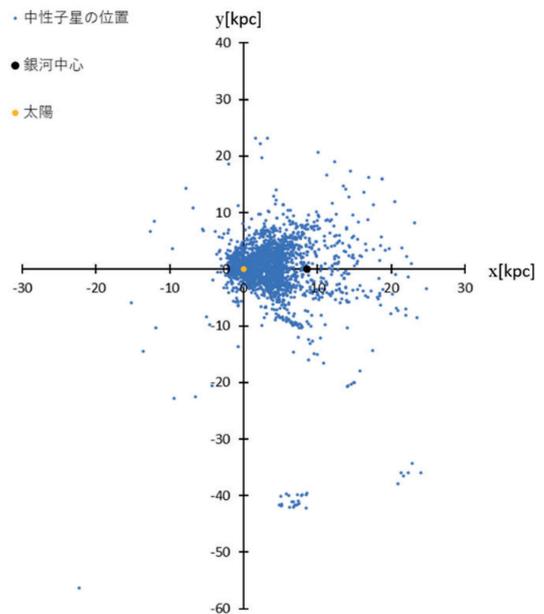


Fig. 2 : 銀河の北極方向からみた中性子星位置分布

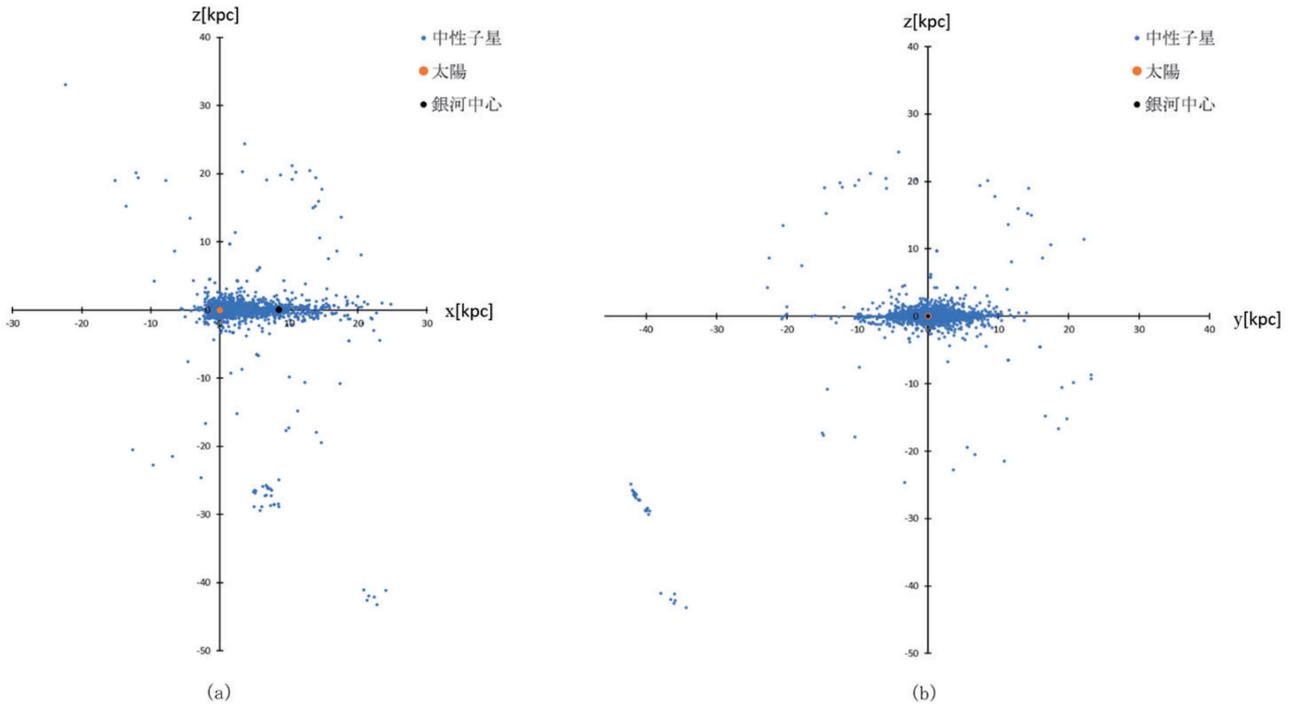


Fig. 3 : 銀河面を真横からみた中性子星の位置分布

次に、銀河面を真横から見たときの位置分布を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a) は y 軸正方向に投影した図であり、Fig. 3 (b) は x 軸負方向に投影した図である。

Fig. 3 (a)、(b)において、z 軸の座標値が $z = -30$ または $z = -40$ 付近にある塊は、大小マゼラン雲にある中性子星である。これらの塊以外の中性子星で、銀河面から離れた位置に存在している中性子星は、マゼラン雲以外の銀河ハローに分布している中性子星である。特に Fig. 3 (b)をみると、中性子星たちが銀河面を帯状に囲むように分布している様子がみえる。この帯状の分布に着目する。

これらの中性子星たちは、ハローに存在する球状星団に含まれる中性子星という可能性があるため、球状星団の位置分布と中性子星の位置分布を比較した。球状星団の位置情報は Harris およびそのデータベース⁷⁾を用いた。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、ハローには球状星団に含まれない中性子星も多く存在することがわかる。特に Fig. 4 の点線に囲まれた部分は、球状星団とは異なる位置に存在する中性子星で、Fig. 3 (b)と合わせて考えると、銀河面を取り囲むストリーム状に分布していることがわかる。

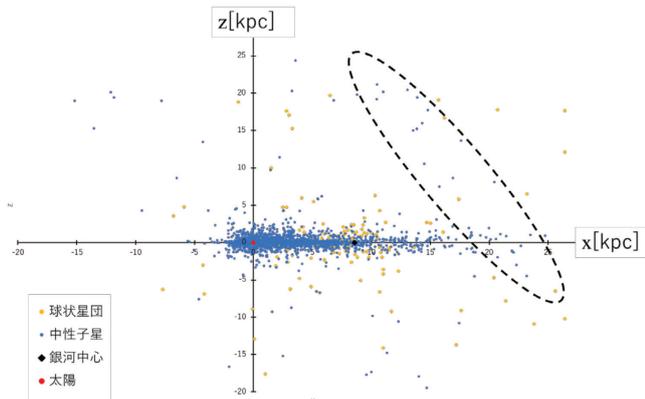


Fig. 4 : 中性子星と球状星団の位置分布

3.2. 中性子星の特性年齢分布

自転周期および周期微分の両方のデータが得られている 1,437 個の中性子星に関して、式(6)を用いて特性年齢を計算し、年代ごとに色分けしてプロットした。その結果が Fig. 5、Fig. 6 である。Fig. 5 は銀河の北極(z 軸正方向)からみて銀河面に投影した分布図であり、Fig. 6 は銀河面を真横からみて y 軸正方向、つまり帆座からケフェウス座を見る方向に投影した図である。

Fig. 5、Fig. 6 より、天の川銀河には、100 億年(10Gyr)以上前に誕生した古い中性子星から数百年前に誕生した新しい中性子星まで、幅広い年代の中性子星が分布していることが分かる。ここでの特性年齢は、自転周期の経年変化により計算された年齢であるため、中性子星が超新星爆発により誕生した時点からの年齢を意味する。したがって、10Gyr つまり 100 億年以上前に誕生した中性子星は、10Gyr 以上前に超新星爆発したことを意味しており、その起源となる母星の多くは、天の川銀河形成初期に存在していた恒星と考えられる。

銀河ハローに存在する中性子星は、特性年齢が未確定な中性子星も多いが、特性年齢が評価できたものについては超新星爆発後 5000 万年(50Myr)未満しか経過していないものが多く、比較的若い中性子星であることがわかる。

また、 $(x, z) = (8, -28)$ 付近 と $(x, z) = (22, -42)$ 付近に位置している大小マゼラン雲においては、超新星爆発後 50Myr 未満の中性子星ばかりであり、こちらも他の銀河ハロー内中性子星と同様に、若い中性子星が多く含まれていることがわかる。マゼラン雲には SN1987A で誕生した中性子星も存在すると考えられているが、超新星残骸に含まれる塵や星間ガスの影響のためか、この超新星爆発によって形成された中性子星は未だパルサーとしては観測されていない。

次に銀河面に存在する中性子星に着目すると、年齢が 100 億年(10Gyr)以上の古い中性子星も多く含まれていることがわかる。そのような古い中性子星は銀河中心付近にはあまり見られず、銀河の外縁部分に渦巻くように分布していることがわかる。これらの古い中性子星の分布は銀河の渦状腕に沿って分布しているようにも見える。

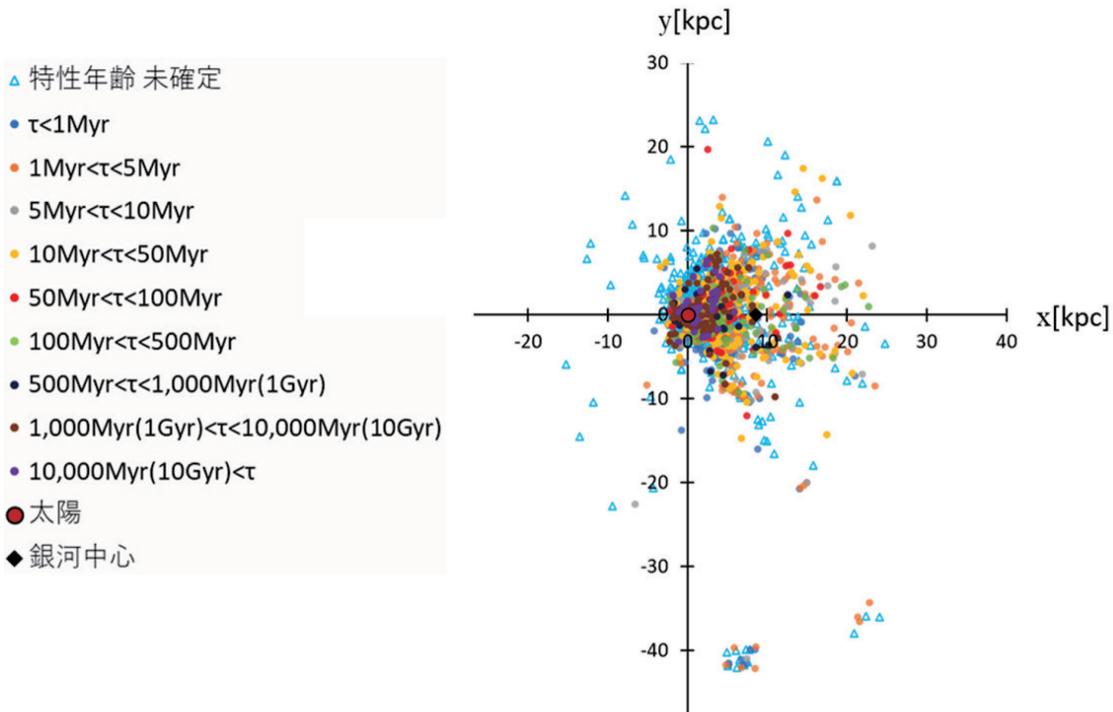


Fig. 5 : 中性子星特性年齢の銀河面分布

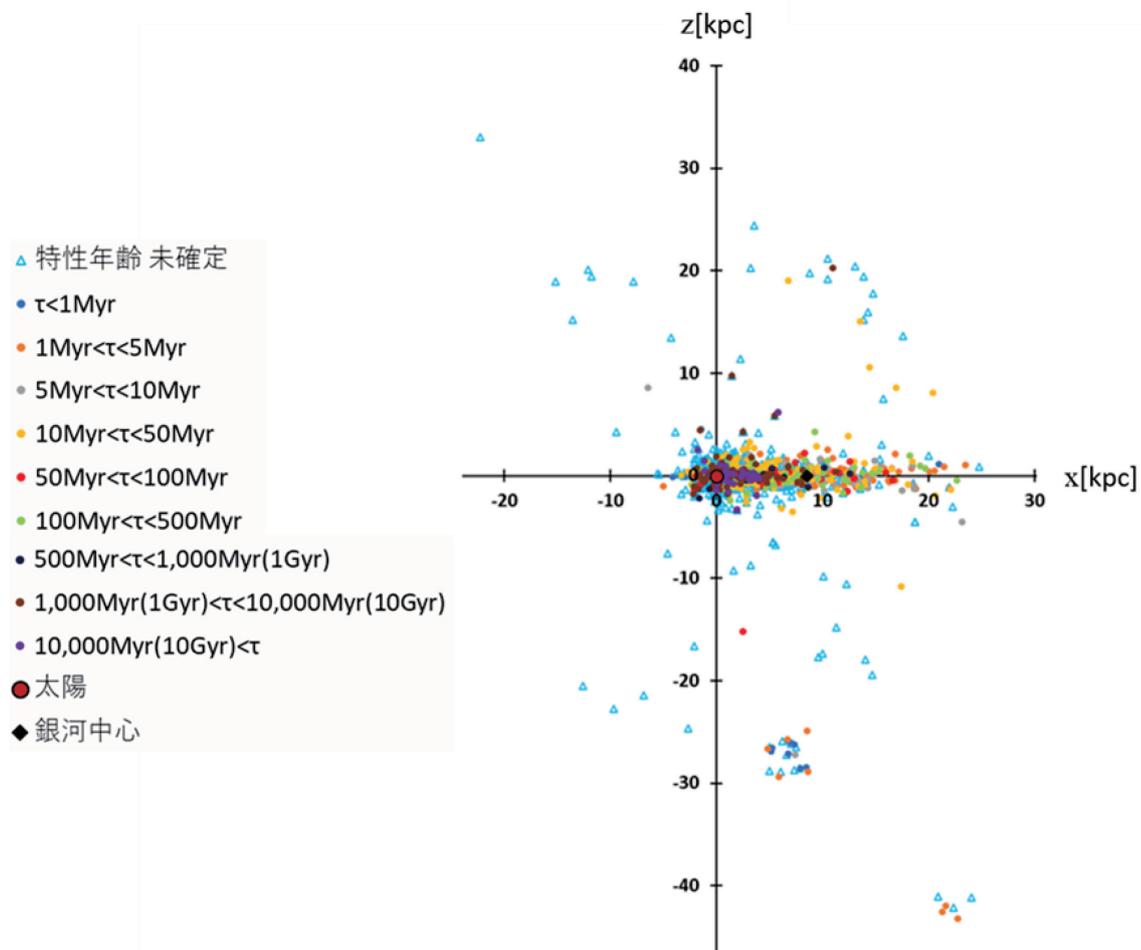


Fig. 6 : 中性子星特性年齢の銀河側面分布

4. 考察

本研究で発見された中性子星ストリームは、恒星とは別に中性子星たちのみでストリーム構造を形成するとは考えにくい。中性子星は超新星爆発により形成されるため、その母星である恒星の分布と関係があると考えるのが自然である。そこで、従来知られている恒星ストリームとの関係を考えると、いて座矮小楕円銀河 (Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy, SagDEG)⁸⁻⁹⁾ から引き剥がされた、いて座ストリーム (Sagittarius Stream)¹⁰⁻¹³⁾ と呼ばれる恒星ストリームは位置的に近いことがわかる。この SagDEG は天の川銀河の極軌道を周回しており、その運動から生じるストリームは銀河中心から約 5 万光年 (約 15kpc)、地球から約 7 万光年 (約 20kpc) に位置している。このいて座ストリームは、天の川銀河近傍に広く分布しているが、Fig. 4 の点線内で示した領域にも存在する。

中性子星ストリームが、いて座ストリームに含まれる構造であると仮定した場合、そこに含まれる中性子星の起源を考えることは興味深い。SagDEG は天の川銀河に比べて古い恒星を多く含むことが知られており、星間塵をほとんど含んでいない矮小銀河である。つまり、星間塵がほとんどないということは、超新星爆発の痕跡がないということであり、古い星が中心であることから超新星爆発を引き起こすような大質量星も少ないと考えるのが自然である。一方で、本論文の特性年齢の結果をみると、中性子星ストリームの中性子星は比較的新しいものばかりである。つまり、もともとの SagDEG に当初からあった中性子星というよりも、引き剥がされた後に形成された中性子星と考えるべきである。

1 つのシナリオとして考えられるのは、SagDEG が過去に天の川銀河からの潮汐力による破壊作用を受けたときに、その衝撃で大質量星を生み出し、その大質量星が超新星爆発を起こした結果、中性子星が生まれたというシナリオである。仮にこのシナリオが正しければ、中性子星ストリームに含まれる中性子星たちは、SagDEG と天の川銀河の衝突的な相互作用の痕跡とも言える。その場合、中性子星の特性年齢から、2 つの銀河の衝突はおおよそ 50Myr 前に起こったのではないかと見当がつくことになる。

次に銀河面に集中している 10Gyr 以上の古い中性子星に着目する。これらの中性子星は天の川銀河の形成初期に存在していた大質量星が起源であるが、それらが銀河面の外縁に分布していることが興味深い。この分布の形成過程についても、いくつかのシナリオが考えられる。1 つは天の川銀河形成初期に銀河中心付近で形成された大質量星が超新星爆発し、その後銀河の回転運動にしたがって外縁部に移動してきたというシナリオである。もう 1 つは、銀河中心付近で形成された中性子星は、10Gyr の長い時間の中でブラックホールとの連星合体をくり返し、ブラックホールに吸収されたために姿が見えなくなったというシナリオである。銀河中心には、巨大ブラックホール Sgr A* が存在することは観測的にも知られているが、その形成過程は解明されていない。宇宙誕生以来 10Gyr 程度の時間で、太陽質量の 10^6 倍ほどの巨大ブラックホールがどのように成長できたのかは大きな謎である。近年の重力波による直接観測により、ブラックホール連星合体や中性子星とブラックホールの連星合体が多数観測されるようになってきている¹⁴⁾。過去の天の川銀河の歴史においても同様の合体現象が多数起きてきたと考えるのが自然である。つまり、銀河中心付近の中性子星やブラックホールが衝突合体をくり返すことで巨大ブラックホールが形成されたのだとすれば、銀河中心付近に古い中性子星が存在しないことも自然である。このように天の川銀河における中性子星の年齢

分布は、銀河中心の巨大ブラックホール形成問題へも興味深い示唆を与える。

5. 結論

我々は、ATNF カタログに記載の中性子星の位置分布を調べることで、天の川銀河の銀河面を取り囲むストリーム状の中性子星分布があることを発見した。また、中性子星の特性年齢を調べたところ、中性子星ストリームを構成する中性子星たちの特性年齢は 50Myr 未満の年齢のものが多く、比較的若い中性子星の集まりであることが示唆された。このことは、中性子星ストリームの形成過程や関連する恒星ストリームとの関係を解明する上での手がかりになることが期待される。

銀河面に位置する中性子星の特性年齢分布をみると、10Gyr 以上の年齢の中性子星は銀河中心から離れた銀河面の外縁部に多く位置しており、銀河中心付近には見つかっていない。これは、天の川銀河の進化過程の解明にひとつの示唆を与えるものと期待される。

参考文献

- [1] see, for example, VERA collaboration, Special feature: Astronomy Catalog and recent results from VERA, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 72, Issue 4, (2020).
- [2] Dorota M. Skowron, Profile Jan Skowron, Przemek Mróz, Andrzej Udalski, Paweł Pietrukowicz, Igor Soszyński, Michał K. Szymański, Radosław Poleski, Szymon Kozłowski, Krzysztof Ulaczyk, Krzysztof Rybicki, Patryk Iwanek, “A three-dimensional map of the Milky Way using classical Cepheid variable stars”, *Science* 365, 478-482, (2019).
- [3] Helmi, Amina; de Zeeuw, P. Tim, “Mapping the substructure in the Galactic halo with the next generation of astrometric satellites”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 319, 657, (2000).
- [4] ATNF pulsar catalogue, The ATNF Pulsar Database (csiro.au), Australia Telescope National Facility.
- [5] <http://mntsuzuki.la.coocan.jp/trans.htm>
- [6] Jiang, L., et al., “Characteristic age and true age of pulsars”, *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 23, 95-98, (2013).
- [7] Harris, 1996, *AJ*, 112, 1487, Catalogue of Parameters for Milky Way Globular Clusters: The Database, <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>
- [8] Karachentsev, I. D., et al., “A catalog of neighboring galaxies”, *Astrophysical Journal*, 127, 2031-2068, (2004).
- [9] Fahlman, G. G., et al., “The main-sequence stars of the Sagittarius dwarf galaxy”, *Astrophysical Journal*, 459, 65-68, (1996).
- [10] Lynden-Bell, R. M.; Lynden-Bell, D. “Ghostly streams from the formation of the Galaxy's halo”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 275 (2): 429-442.
- [11] Newberg, Heidi Jo; et al. “The Ghost of Sagittarius and Lumps in the Halo of the Milky Way”, *The Astrophysical Journal*. 569 (1): 245-274. (2002).
- [12] Majewski, Steven R.; et al., “A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms”. *The Astrophysical Journal*. 599 (2): 1082-1115, (2003).
- [13] Belokurov, V.; et al., “The Field of Streams: Sagittarius and Its Siblings”, *The Astrophysical Journal*, 642 (2): L137-L140, (2006).
- [14] R. Abbott, et al., “GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run”, arXiv:2010.14527 [gr-qc]

工学教育研究推進機構運営会議

議長 上平 員丈

構成委員	木村 茂雄	河原崎徳之	栗原 誠	納富 一宏	馬嶋 正隆
	黄 啓新	高村 岳樹	山口 淳一	小池あゆみ	岡崎 美蘭
	高橋 勝美	一色 正男	井上 秀雄	兵頭 和人	山家 敏彦
	塩川 茂樹	工藤 嗣友	脇田 敏裕	野田 毅	吉満 俊拓
	高橋 正雄	三井 和博	星野 潤	井藤 晴久	

神奈川工科大学研究報告

B-46 理工学編 通巻 46 号

令和 4 年 3 月 1 日 発行

編集兼発行者 神 奈 川 工 科 大 学

〒 243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030

電 話 046-241-6221

印 刷 者 株式会社スクールパートナーズ

当該研究報告に掲載された論文の著作権は本学に帰属する。