Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

João Vitor Nogueira dos Santos

A Origem Quimio-dinâmica da Corrente Estelar Typhon

São Paulo
2025

João Vitor Nogueira dos Santos

A Origem Quimio-dinâmica da Corrente Estelar Typhon

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientador(a): Prof.(ª) Dr.(ª) Silvia Rossi
Coorientador: Dr. Guilherme Limberg

São Paulo

2025

Agradecimentos

Minha formação vai além do pessoal, ela representa a luta daqueles que não tiveram o direito à educação superior. Essa não é uma conquista minha. Agradeço aos meus pais, Adi e Neli, que foram e são a base da minha vida, por todo o apoio emocional e financeiro que tive desde sempre. Sem vocês, isso não seria possível;

Ao meu primo Gleyver e meus irmãos Isabella e Maike, pelos conselhos, pela amizade e por ser exemplos em minha vida;

Ao Diogo, amigo que me acompanha desde o ensino médio e responsável pelo meu ingresso na universidade de São Paulo. Obrigado por sua confiança e por sempre me incentivar;

A Luana, Pedro, Carlos, Thayná, Lafê e amigos do Besouro, que me ajudaram a suportar esses 4 anos de faculdade. Agradeço por não desistirem de mim, mesmo eu faltando em quase todos os roles durante a graduação;

À Silvia Rossi, ao Hélio Dotto Perottoni e ao Guilherme Limberg, que me orientaram durante a graduação, colocaram esperança em mim e no meu trabalho, e cativaram minha vontade de aprender. Espero que no futuro consiga retribuir à sociedade com o que me ensinaram, me tornando um infinitésimo do que vocês são. Não poderia pedir por melhores orientadores.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, sob o projeto n^o: 2024/22429-3;

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

Resumo

No modelo hierárquico de formação de galáxias, prevê-se que o halo da Via Láctea seja formado por sucessivas acreções de galáxias anãs. Nesse cenário, é esperado que o halo estelar contenha vestígios dessas interações. Entre esses vestígios, as correntes estelares se destacam como estruturas filamentares formadas por estrelas com movimentos coerentes, representando um estágio intermediário na dissolução de galáxias anãs ou aglomerados globulares à medida que interagem com o potencial gravitacional de uma hospedeira massiva, nesse caso a Via Láctea. Recentemente, com os dados astrométricos da missão Gaia, uma nova corrente estelar, denominada Typhon, foi descoberta. Porém, como diversos processos podem perturbar as correntes estelares, as informações dinâmicas por si só não são suficientes para determinar se essa corrente originou-se de uma galáxia satélite ou de um aglomerado globular. Por isso, além das análises dinâmicas e cinemáticas, informações químicas de uma amostra representativa dessa população estelar são essenciais para desvendar a origem dessa estruturas. Devido à escassez de estrelas identificadas na literatura como pertecentes a corrente estelar Typhon, sua origem permanece incerta. Com isso, o objetivo deste projeto foi identificar novos membros da corrente estelar Typhon, calcular a dispersão de metalicidade da estrutura e, finalmente, determinar sua origem. O estudo resultou na identificação de 196 estrelas pertencentes ao Typhon, sendo a maior amostra de candidatas pertecentes a essa estrutura na literatura. Estimamos que Typhon tem uma metalicidade média de $[Fe/H] = -1.58^{+0.08}_{-0.09}$ e dispersão de $0.27^{+0.12}_{-0.15}$ dex. A dispersão de metalicidade resolvida, superior ao critério de maior que 0.1 dex estabelecido por Willman e Strader (2012), corrobora para a afirmação de que a corrente estelar Typhon foi formada a partir da dissolução de uma galáxia satélite. Considerando essa origem e uma acreção recente, uma massa estelar da ordem de $10^6 M_\odot$ foi estimada para a galáxia anã originária.

Abstract

In the hierarchical model of galaxy formation, the Milky Way's halo is predicted to be formed by successive accretions of dwarf galaxies. In this scenario, the stellar halo is expected to contain remnants of these interactions. Among these remnants, stellar streams stand out as filamentary structures formed by stars with coherent motions, representing an intermediate stage in the dissolution of dwarf galaxies or globular clusters as they interact with the gravitational potential of a massive host—in this case, the Milky Way. Recently, with astrometric data from the Gaia mission, a new stellar stream named Typhon was discovered. However, as various processes can disturb stellar streams, dynamical information alone is not sufficient to determine whether this stream originated from a satellite galaxy or a globular cluster. Therefore, in addition to dynamical and kinematical analyses, chemical information from a representative sample of this stellar population is essential to unveil the origin of this structure. Due to the scarcity of stars identified in the literature as belonging to the Typhon stellar stream, its origin remains uncertain. Thus, the objective of this project was to identify new members of the Typhon stellar stream, calculate the structure's metallicity dispersion, and, finally, determine its origin. The study resulted in the identification of 204 stars belonging to Typhon, tripling the number of candidate members in the literature. We estimate that Typhon has a mean metallicity of $[Fe/H] = -1.58^{+0.08}_{-0.09}$ and a dispersion of $0.36^{+0.08}_{-0.08}$ dex. The resolved metallicity dispersion, being greater than the 0.1 dex criterion established by Willman e Strader (2012), corroborates the claim that the Typhon stellar stream was formed from the disruption of a satellite galaxy. Considering this origin and a recent accretion, a stellar mass of the order of $10^6 M_\odot$ was estimated for the progenitor dwarf galaxy.

Lista de Figuras

4.1 O espaço de ações, (J_ϕ vs J_z) para a amostra estelar analisada. A distribuição das estrelas de fundo, provenientes dos levantamentos (SEGUE, LAMOST, Gaia XP e DESI), é mostrada como pontos em cinza. As 196 estrelas candidatas a membros da corrente Typhon estão representadas por símbolos de estrela, com a cor indicando sua distância de apocentro(r_{apo}) em kpc. 26

4.2 Distribuição espacial e cinemática das estrelas candidatas da corrente Typhon. A figura mostra a posição das candidatas na projeção cartesiana , X-Z. Cada estrela candidata é representada por uma seta, que indica a direção de seu vetor velocidade, enquanto a cor corresponde à sua distância de apocentro. As linhas em cinza representam as trajetórias orbitais do subgrupo de referência identificado na vizinhança solar. O painel esquerdo detalha as órbitas associadas à corrente estelar Typhon, enquanto o painel direito concentra-se nos identificados. 27

4.3 Distâncias médias de pericentro e apocentro de alguns remanescentes de galáxias anãs conhecidas no halo da Via Láctea (representados pelos círculos coloridos), o Typhon está representado como estrela laranja. As linhas tracejadas representam curvas de iso-excentricidade. 28

4.4 Distribuição da energia orbital (E) versus o momento angular em Z (L_Z) para remanescentes de satélites. Os círculos preenchidos coloridos representam algumas das galáxias anãs conhecidas no halo da Via Láctea (Orphan, LMS-1, Cetus, Sgr e GSE). Os pontos com o símbolo de estrela verde, no topo do painel, representam a população estelar associada ao Typhon. . . . 29

4.5 O painel superior exibe um histograma da metalicidade média, no qual se observa o perfil gaussiano dos dados. No painel inferior esquerdo, a metalicidade média é apresentada em função da dispersão de metalicidade, com as linhas verticais e horizontais em preto indicando o valor médio da metalicidade e da dispersão de metalicidade, respectivamente. O painel inferior direito mostra um histograma da dispersão de metalicidade, que também segue um perfil gaussiano. Nos histogramas, a linha preta vertical sólida representa o valor médio, enquanto as linhas verticais tracejadas em vermelho indicam o intervalo de um sigma em relação à linha sólida. 31

4.6 Diagrama da dispersão de metalicidade ($\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]}$) versus magnitude absoluta na banda V (M_V) para aglomerados globulares (círculos vazios em azul) e galáxias anãs esferoidais (círculos preenchidos em vermelhos) satélites da Via Láctea, com dados compilados a partir de Willman e Strader (2012). Os aglomerados globulares ocupam a região de baixa dispersão de metalicidade ($\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]} \lesssim 0.1$ dex) representado pelo traçado em azul, enquanto as galáxias anãs exibem dispersões maiores. O marcador em "X" representa a corrente estelar Typhon. Considerando que esta estrutura foi recentemente acrescida pela Via Láctea, a sua magnitude absoluta ($M_V \approx -11.44$) foi estimada utilizando a relação entre a dispersão de metalicidade medida e a magnitude da sua galáxia anã progenitora. 32

4.7 Relação Luminosidade-Metalicidade para galáxias anãs do grupo local e a corrente estelar Typhon. Os pontos em azul são galáxias anãs do grupo local presentes em Kirby et al. (2013) e o triângulo amarelo representa o Typhon. 33

Lista de Tabelas

4.1 Número de estrelas candidatas a membros do Typhon com suas metalicidades médias obtidas de cada catálogo. 25

Sumário

1. Introdução 15

2. Dados 17

2.1 Gaia 17

2.2 Gaia XP 17

2.3 LAMOST 18

2.4 SEGUE 18

2.5 DESI 19

2.6 Amostra final 19

3. Métodos 21

3.1 Tratamento dos dados 21

3.2 Cálculo dos parâmetro orbitais 21

3.3 Seleção das estrelas candidatas 22

3.4 Determinação da metalicidade média e sua dispersão 23

4. Análise e Resultados 25

4.1 Análise da seleção 25

4.2 Características cinemáticas e dinâmicas da amostra 26

4.3 Perfil químico das estrelas escolhidas 30

4.4 Estimativa das propriedas da galáxia anã originária 32

5. Conclusões 35

Referências 37

Capítulo 1

Introdução

Apesar de representar apenas uma pequena fração da massa estelar total da Galáxia, o halo estelar é crucial para reconstruir a história de formação e evolução da Via Láctea (Helmi, 2020; Bonaca, 2024; Deason e Belokurov, 2024). Nesse contexto, as correntes estelares distribuídas pelo halo galáctico desempenham um papel fundamental, servindo como registros fósseis de interações e acreções de galáxias satélites ou de aglomerados globulares ao longo da história da Galáxia. Nossa contribuição é, portanto, decifrar e reconstruir o passado a partir desses objetos antigos.

As correntes estelares, estruturas alongadas, representam o estágio intermediário do *tidal stripping*, processo através do qual uma galáxia massiva, como a Via Láctea, remove estrelas de um sistema menor, galáxias anãs ou aglomerados globulares, por conta de forças de maré (Helmi e White, 1999; Bonaca, 2024). Por possuírem uma origem comum, as estrelas que compõem essas correntes apresentam características químicas, cinemáticas e dinâmicas semelhantes (Deason e Belokurov, 2024).

O Typhon, uma corrente estelar identificada em 2022, é a primeira estrutura desse tipo a ser encontrada na vizinhança solar, com um apocentro que chega no halo externo e a ter sua composição química analisada em detalhes (Ji et al., 2023). Com uma órbita extremamente alongada, que se estende para além de 100 kpc do centro galáctico em seu ponto mais distante e se aproxima do sistema solar em seu ponto mais próximo, o Typhon representa a primeira estrutura do halo galáctico que amostra a população estelar do halo externo (Tenachi et al., 2022). Caso sua origem seja comprovada, teremos confirmação de que a região mais externa do halo é povoada por destroços de galáxias anãs.

Correntes estelares, como o Typhon, podem ser originadas a partir da dissolução de galáxias anãs ou aglomerados globulares em que a natureza do progenitor pode ser deter-

minada por seu histórico de formação estelar. Galáxias anãs possuem matéria escura, o que lhes permite reter gás enriquecido por supernovas e sustentar uma formação estelar por longos períodos, resultando em uma população com alta dispersão de metalicidade. Em contraste, aglomerados globulares não possuem matéria escura para reter esse material, formando a maioria de suas estrelas em um único e breve surto, o que os torna sistemas mono-metálicos sem uma dispersão de metalicidade relevante (Willman e Strader, 2012). A confirmação da origem desta corrente estelar permitirá a derivação de informações sobre seu objeto progenitor. Se for determinado que sua origem é uma galáxia anã, ela representará a primeira corrente confirmada na região mais externa do halo Galáctico. Por outro lado, se o progenitor for um aglomerado globular, torna-se relevante investigar a qual galáxia anã este aglomerado esteve originalmente associado.

Dessa forma, uma definição de qual é seu progenitor será possível somente quando a distribuição de metalicidade da corrente estelar Typhon for obtida para uma amostragem significativa de objetos, uma vez que a amostra limitada no trabalho de Tenachi et al. (2022) levou a uma dispersão de metalicidade não resolvida, impedindo uma conclusão sobre a origem da estrutura. Assim, o projeto envolve os seguintes passos: seleção dos levantamentos de dados, identificação de estrelas membros próximas à vizinhança solar, identificação de estrelas membros distantes, determinação da distribuição de metalicidade e, por fim, interpretação de sua origem.

Capítulo 2

Dados

Neste capítulo, serão apresentados detalhadamente os levantamentos de dados utilizados, destacando suas características, assim como as técnicas de tratamento aplicadas para obtenção de uma amostra de estrelas que seja apropriada para o estudo da corrente estelar Typhon.

2.1 Gaia

A missão espacial Gaia foi concebida para construir o mais preciso e extenso mapa tridimensional da Via Láctea, tendo obtido dados astrométricos e espectrofotométricos de aproximadamente dois bilhões de objetos (Gaia Collaboration et al. 2016; Gaia Collaboration et al.2022). A partir desses dados astrométricos, que incluem o movimento próprio e paralaxes, combinados com velocidades radiais, é possível calcular os parâmetros orbitais e cinemáticos das estrelas. No campo da arqueologia galáctica, seus dados permitiram a identificação e caracterização da ordem de centenas de correntes estelares, o que representa um aumento de uma ordem de magnitude no número de estruturas conhecidas anteriormente (Mateu, 2023). Devido à sua abrangência e precisão, os dados do Gaia são amplamente utilizados em combinação com outros levantamentos.

2.2 Gaia XP

O catálogo espectral Gaia XP (De Angeli et al., 2023; Collaboration et al., 2023) fornece espectrofotometria de baixa resolução ($R \sim 20$ - 100) para mais de 220 milhões de fontes na Galáxia, cobrindo a faixa de $\lambda \approx 330$ a 1050 nm (do óptico ao infravermelhor próximo). Contudo, essa resolução espectral é inferior à de levantamentos espectroscópicos como

o LAMOST (Cui et al., 2012; Deng et al., 2012; Zhao et al., 2012; Liu et al., 2014). Tais determinações são afetadas por erros sistemáticos que manifestam dependência da distribuição de energia espectral estelar normalizada e da magnitude G da fonte(Huang et al., 2025), sendo o efeito mais proeminente na região azul do espectro, onde há uma maior sensibilidade à metalicidade.

2.3 LAMOST

O *Large sky Area Multi-Object Spectroscopic Telescope* (LAMOST) (Cui et al., 2012; Liu et al., 2014) é um levantamento espectroscópico, composto pelo *LAMOST ExtraGAlactic Survey* (LEGAS) e o *LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration* (LEGUE)(Deng et al., 2012; Zhao et al., 2012). Sua arquitetura única permite a captura de mais de 4000 espectros simultaneamente em uma única exposição, com magnitude limite de $r = 19$ e uma resolução de $\lambda/\Delta\lambda \equiv R = 1800$. Essa capacidade confere ao LAMOST um grande potencial para mapear vastas regiões do céu, tornando-o uma fonte de dados valiosa para estudos da estrutura e evolução da Galáxia. A escolha do LAMOST para este trabalho se justifica por dois motivos principais: ele fornece metalicidade $[Fe/H]$ e velocidade radial em nossas regiões de interesse — a vizinhança solar e o halo galáctico — e já continha membros conhecidos da corrente estelar Typhon em seus catálogos (Tenachi et al., 2022).

2.4 SEGUE

O levantamento *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration* (SEGUE) (Yanny et al., 2009) foi um projeto focado em investigar a estrutura da Via Láctea, resultando em um catálogo com mais de 348 mil espectros de estrelas individuais. Utilizando um telescópio de $2,5$ m, o SEGUE realizou observações no espectro visível com uma resolução de $R = 2000$. Essa estratégia permitiu a obtenção de dados para uma vasta amostra de estrelas do halo galáctico. A sua escolha para este trabalho é vantajosa por duas razões principais: trata-se de uma fonte de dados ainda não explorada para esta estrutura e sua maior profundidade em relação ao LAMOST possibilita a identificação de membros em regiões mais distantes.

2.5 DESI

O *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI)(DESI Collaboration, 2024) é um espectrógrafo de resolução média, operando com R $\sim$ 5000 no intervalo de comprimento de onda de 3600 Å $< \lambda <$ 9800 Å. Ele está montado no foco primário do telescópio Mayall de 4 metros de abertura, localizado no hemisfério norte. O principal objetivo desse levantamento é estimar parâmetros cosmológicos para o modelo Λ Cold Dark Matter (ΛCDM). No entanto, o DESI também está sendo utilizado para o estudo da Via Láctea com o DESI Milky Way Survey(MWS) (Koposov et al., 2024), focado no halo estelar, que abrange cerca de 7 milhões de estrelas com magnitude r $\leq$ 19.

2.6 Amostra final

As estimativas de distâncias para as estrelas foram obtidas por meio do algoritmo `STARHORSE`, com exceção do levantamento DESI DR1, que utilizou sua própria metodologia de determinação de distância. O `STARHORSE` (Queiroz et al., 2018; Santiago et al., 2016) consiste em um código que implementa um método Bayesiano de ajuste a isócronas, projetado para determinar distâncias, extinções e idades. Este procedimento baseia-se na comparação dos dados observacionais, juntamente com um conjunto de observáveis e distribuições a priori (*priors*), com os modelos de evolução estelar gerados pelo PAdova and TRiestre Stellar Evolution Code (PARSEC)(Bressan et al., 2012). Em que a escolha por este algoritmo, que já foi extensivamente validado em simulações e aplicado previamente ao halo galáctico, como em Limberg et al. (2023); Perottoni et al. (2022), justifica-se pela insuficiência das paralaxes fornecidas pela missão Gaia para a determinação precisa das distâncias das estrelas localizadas no halo galáctico.

Por fim, a base de dados final para este estudo é composta por quatro amostras, todas construídas a partir da combinação dos seguintes elementos: dados astrométricos da missão Gaia, estimativas de distância obtidas pelo algoritmo `STARHORSE`, e dados espectroscópicos provenientes dos levantamentos previamente mencionados. O uso combinado desses levantamentos foi essencial, uma vez que suas áreas de observação distintas aumentam a cobertura do céu e, com isso, a chance de identificar estrelas pertencentes à corrente Typhon.

Capítulo 3

Métodos

Levando-se em contas as caracteristiscas físicas e químicas da corrente estelar Typhon, foram consideradas as etapas descritas abaixo para a seleção de estrelas candidatas e a caracterização da distribuição de metalicidade da estrutura.

3.1 Tratamento dos dados

Para refinar a busca por novos membros da corrente Typhon, o tratamento dos dados aplicou filtros que, além de espelhar as propriedades de estrelas previamente associadas à estrutura, também asseguram a seleção de alvos com parâmetros confiáveis. O objetivo foi selecionar estrelas gigantes, pobres em metais e com órbitas de alto apocentro. Especificamente, os critérios exigiam: temperatura efetiva entre 4000 K e 7000 K, apocentro orbital superior a 70 kpc, metalicidade $[Fe/H] < -1$ (medida da abundância de ferro de uma estrela em relação ao hidrogênio comparada com a proporção encontrada no Sol), erro de distância inferior a 20% e, por fim, a análise foi limitada às estrelas cuja solução astrométrica do Gaia era resolvida.

3.2 Cálculo dos parâmetro orbitais

A identificação de membros da corrente Typhon requer a análise de seus parâmetros orbitais. Para realizar esses cálculos, foi utilizado o pacote `AGAMA`, dedicado à modelagem de galáxias (Vasiliev, 2019). Nele, é utilizado o potencial gravitacional da Via Láctea descrito por McMillan (2017), de tal forma que a posição do Sol foi definida como $(x, y, z)_\odot = (-8,23; 0,00; 0,00)$ kpc (Bovy, 2020), e sua velocidade peculiar como $(v_x, v_y, v_z)_\odot = (11,10; 7,20; 7.25)$km s^{-1} (Schönrich et al., 2010), adotando uma velocidade

circular no raio solar de 243 km s^{-1} (Bovy, 2020). Nesse modelo, a Galáxia é representada como um sistema espiral com um disco (fino e espesso), um bojo e um halo de matéria escura. Adicionalmente, uma abordagem de Monte Carlo com 50 realizações por estrela foi usada para levar em conta as incertezas das medidas observacionais, garantindo uma determinação confiável dos parâmetros orbitais.

3.3 Seleção das estrelas candidatas

Os membros de uma corrente estelar conservam as características químicas e dinâmicas de seu sistema progenitor (Helmi, 2020). Contudo, como os dados químicos detalhados nem sempre estão disponíveis, a maneira mais eficiente de identificar essas estruturas é por meio de suas propriedades cinemáticas e dinâmicas.

A metodologia foi executada em duas fases. Primeiramente, o foco foi identificar estrelas da corrente Typhon na vizinhança solar, ou seja, distância menor que 5 kpc. Utilizando a amostra de estrelas próximas ao Sol, foi criado um diagrama com a amplitude do movimento orbital (J_ϕ vs J_Z). Essas coordenadas são análogas aos momentos angulares e, justamente por serem conservadas em uma geometria axissimétrica, foram utilizadas neste trabalho. Nesse espaço de ações, uma região retangular foi definida para englobar todos os membros da Typhon previamente conhecidos na literatura Tenachi et al. (2022), como mostrado na figura 4.1. Adicionalmente, exigiu-se que as candidatas tivessem um vetor-velocidade similar ao das estrelas conhecidas, critério justificado pelo fato de que estrelas membros de uma mesma corrente estelar na mesma fase orbital compartilham vetor velocidade semelhantes.

Na segunda fase, a busca foi expandida para candidatas em qualquer fase de suas órbitas, utilizando a amostra completa, sem restrição de distância. Aplicou-se o mesmo critério de seleção no espaço de ações utilizado na primeira fase. Sabendo que todos os membros do Typhon devem compartilhar, aproximadamente, a mesma trajetória, um critério adicional foi imposto: a velocidade de cada candidata deveria ser tangente à órbita média calculada a partir do grupo da vizinhança solar. As estrelas que satisfizeram ambas as condições foram consideradas membros finais. É importante destacar que este método recuperou todas as estrelas da primeira etapa e esta amostra mais ampla foi a utilizada nas análises subsequentes.

3.4 Determinação da metalicidade média e sua dispersão

A fim de derivar a metalicidade média e a dispersão de metalicidade para a corrente estelar Typhon, conforme apresentado por Li et al. (2022), a determinação do perfil químico foi baseada na premissa de que as estrelas seguem uma função de distribuição de metalicidade de perfil gaussiano. Além disso, considera-se que esta distribuição é independente da posição da estrela ao longo da corrente. A média e a dispersão de metalicidade são derivadas por meio de um amostrador de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC).

Para a amostragem dos dados, utilizou-se o EnsembleSampler do pacote emcee (Coullon e Webber, 2021) com 50 walkers. O processo foi dividido em uma fase de *burn-in*(referente a quantidade de iterações descartadas inicialmente, pois o sistema ainda não tinha atingido um regime estável) de 500 iterações, seguida pela amostragem principal com mais 500 iterações após o início do amostrador. A execução foi otimizada para computação paralela, empregando 16 processadores através do MultiPool da biblioteca schwimmbad(Price-Whelan e Foreman-Mackey, 2017).

Capítulo 4

Análise e Resultados

Com base no método de seleção abordado no capítulo anterior, esta seção apresentará e discutirá as características cinemáticas e químicas da amostra obtida de estrelas candidatas à corrente estelar Typhon.

4.1 Análise da seleção

A aplicação da metodologia de seleção, descrita no capítulo anterior, foi realizada de forma independente para cada levantamento. A tabela 4.1 sumariza o número de candidatas ao Typhon obtidas após a aplicação dos filtros de qualidade e dos critérios de seleção no espaço de ações e nas respectivas órbitas. Enquanto a contagem de estrelas previamente associadas a essa estrutura era de apenas 16 (Tenachi et al., 2022), o presente estudo resultou na identificação de uma amostra de 196 estrelas candidatas, o que a estabelece como o maior conjunto catalogado na literatura até o momento.

Tabela 4.1 - Número de estrelas candidatas a membros do Typhon com suas metalicidades médias obtidas de cada catálogo.

Levantamento	Candidatas ao Typhon	$\langle[Fe/H]\rangle$
Gaia XP	2	-1.17
LAMOST	38	-1.58
SEGUE	34	-1.62
DESI	122	-1.45
Total	196	-1.50

O significativo aumento no número de candidatas é um reflexo direto da aplicação de critérios de seleção em levantamentos diversos. Enquanto o trabalho de Tenachi et al. (2022) se concentra em membros próximos, em uma mesma fase da órbita do Typhon, a

inclusão da compatibilidade orbital e a remoção da restrição de distância de 5 kpc permitiu a identificação de membros distantes e de estrelas que se encontram em diferentes fases da sua trajetória nos diferentes catálogos.

4.2 Características cinemáticas e dinâmicas da amostra

Esta seção apresenta a análise das características cinemáticas e dinâmicas das 196 estrelas candidatas a membros da corrente estelar Typhon.

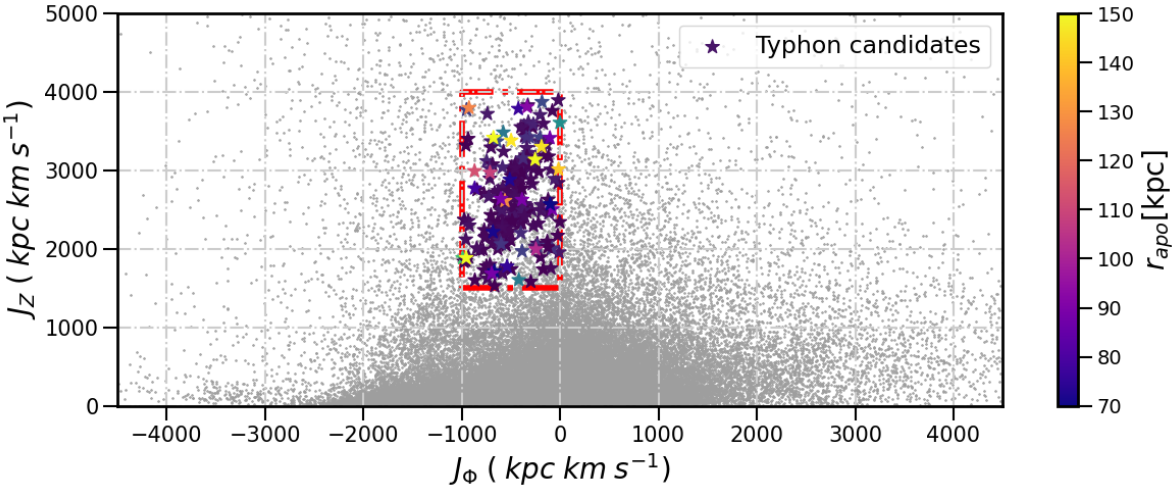

Figura 4.1: O espaço de ações, (J_ϕ vs J_z) para a amostra estelar analisada. A distribuição das estrelas de fundo, provenientes dos levantamentos (SEGUE, LAMOST, Gaia XP e DESI), é mostrada como pontos em cinza. As 196 estrelas candidatas a membros da corrente Typhon estão representadas por símbolos de estrela, com a cor indicando sua distância de apocentro(r_{apo}) em kpc.

A Figura 4.1 exibe a distribuição das estrelas no espaço de ações orbitais (J_ϕ vs J_z). No painel, as candidatas do Typhon (coloridos pela distância de apocêntro) formam um agrupamento coeso com estrelas de fundo provenientes dos catálogos do DESI, Gaia XP, SEGUE e do LAMOST. Este agrupamento está concentrado na região $-1 \times 10^3\ kpc\ km\ s^{-1} < J_\phi < 0$; $1.5 \times 10^3\ kpc\ km\ s^{-1} < J_z < 4.0 \times 10^3\ kpc\ km\ s^{-1}$. O valor negativo de J_ϕ indica que a corrente Typhon possui uma órbita prógrada, movendo-se no mesmo sentido da rotação do disco galáctico. Os altos valores de J_z confirmam que a estrutura realiza grandes excursões verticais em relação ao plano da Galáxia, o que é consistente com suas órbitas de alto apocentro, representadas na Figura 4.2.

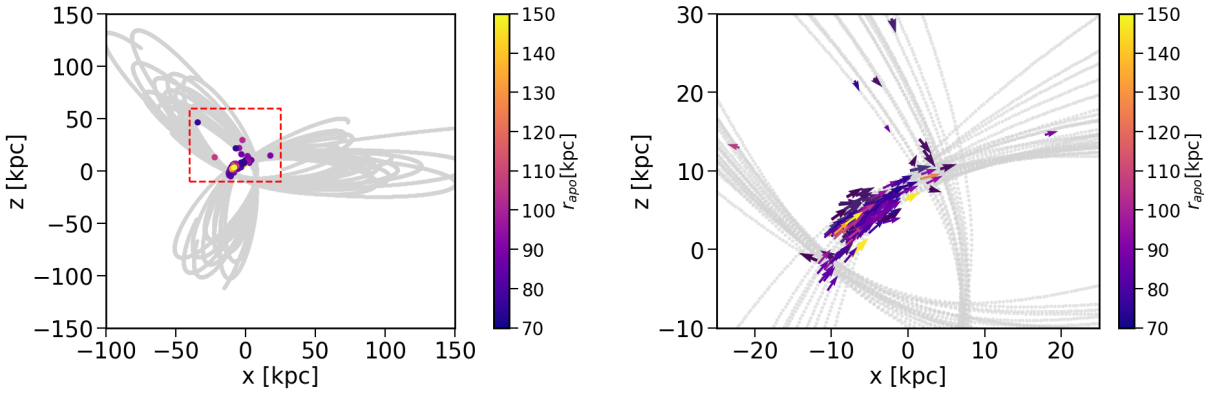

Figura 4.2: Distribuição espacial e cinemática das estrelas candidatas da corrente Typhon. A figura mostra a posição das candidatas na projeção cartesiana , X-Z. Cada estrela candidata é representada por uma seta, que indica a direção de seu vetor velocidade, enquanto a cor corresponde à sua distância de apocentro. As linhas em cinza representam as trajetórias orbitais do subgrupo de referência identificado na vizinhança solar. O painel esquerdo detalha as órbitas associadas à corrente estelar Typhon, enquanto o painel direito concentra-se nos identificados.

A Figura 4.2 ilustra a distribuição espacial e a cinemática das candidatas. As setas representam o vetor velocidade de cada estrela, com a cor corresponde à sua distância de apocentro. Em cinza, são mostradas as órbitas de referência. Observa-se uma concentração de estrelas próximas à posição do Sol $(x, z)_\odot = (-8.2240, 0.0028)$, o que reflete um viés observacional, já que objetos mais próximos tendem a ser mais brilhantes e fáceis de detectar. Crucialmente, a figura demonstra que os vetores de velocidade são tangentes às suas respectivas trajetórias orbitais, uma condição imposta pelo nosso método de seleção.

Conforme ilustrado na Figura 4.2 fica evidente que, embora haja uma variação, todas as estrelas selecionadas possuem órbitas que alcançam o halo externo. Além disso, embora nenhum critério de coesão das estrelas selecionadas tenha sido imposto previamente na seleção, a distribuição espacial das estrelas revela explicitamente uma estrutura filamentar coesa, característica de uma corrente estelar.

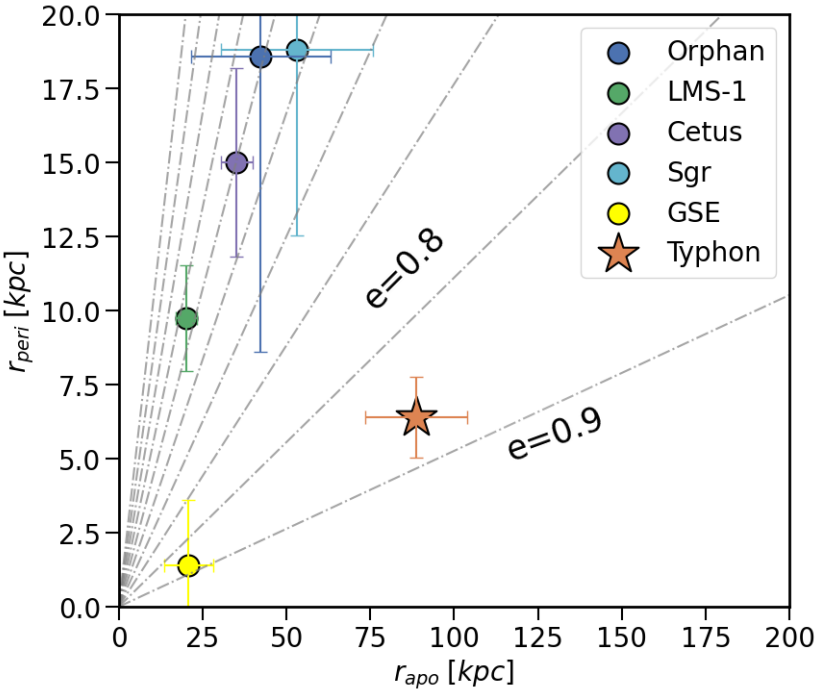

Figura 4.3: Distâncias médias de pericentro e apocentro de alguns remanescentes de galáxias anãs conhecidas no halo da Via Láctea (representados pelos círculos coloridos), o Typhon está representado como estrela laranja. As linhas tracejadas representam curvas de iso-excentricidade.

A relação entre a excentricidade (e) e os raios de apocentro (r_{apo}) e pericentro (r_{peri}) é apresentada na Figura 4.3. O gráfico compara remanescentes de galáxias anãs conhecidas do halo (círculos coloridos) e o Typhon (estrela laranja), sendo as linhas tracejadas representativas de valores constantes de excentricidade. A distribuição orbital do Typhon demonstra uma natureza extremamente radial, exibindo o apocentro mais elevado e uma das maiores excentricidades dentre o grupo de comparação.

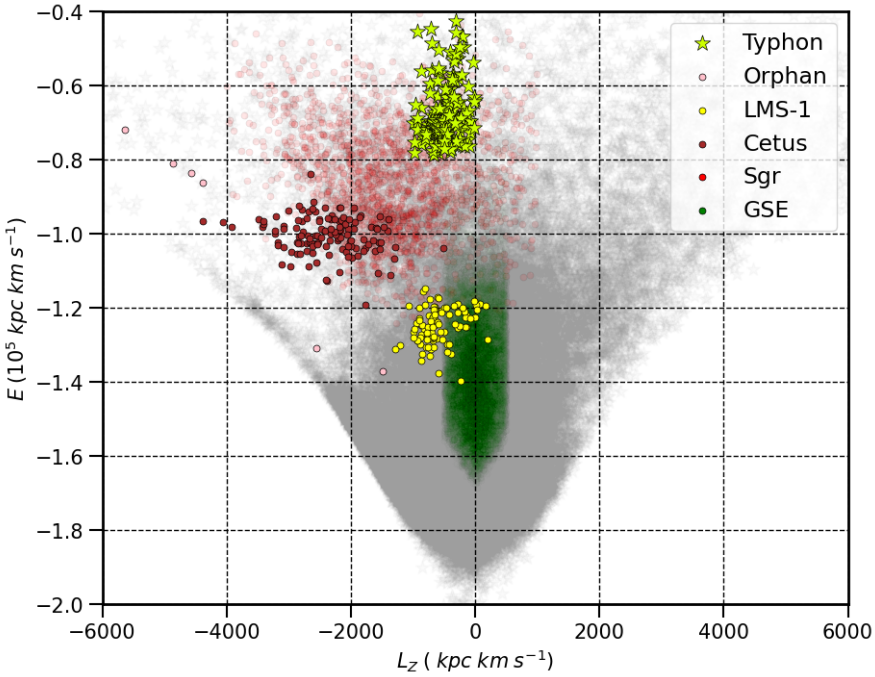

Figura 4.4: Distribuição da energia orbital (E) versus o momento angular em Z (L_Z) para remanescentes de satélites. Os círculos preenchidos coloridos representam algumas das galáxias anãs conhecidas no halo da Via Láctea (Orphan, LMS-1, Cetus, Sgr e GSE). Os pontos com o símbolo de estrela verde, no topo do painel, representam a população estelar associada ao Typhon.

O diagrama L_Z versus E (energia orbital e momento angular em Z) na Figura 4.4 ilustra as distribuições dinâmicas de diversos remanescentes de satélites galácticos no halo da Via Láctea. Esses remanescentes (Orphan (Prudil et al., 2021), Wulkong/LMS-1 (Limberg et al., 2024), Cetus (Thomas e Battaglia, 2022), Sagittarius (Sgr)(Limberg et al., 2023) e Gaia-Sausage/Enceladus (GSE)(Limberg et al., 2022)) ocupam regiões que refletem suas distintas histórias de acreção. Nesse contexto, a energia orbital (E) é uma integral de movimento importante, pois fornece informações sobre o período de acreção do objeto que deu origem a esses remanescentes. A população estelar associada ao Typhon (estrelas verdes) concentrando-se na região de alta energia orbital ($-0.8 \times 10^5 < E < -0.4 \times 10^5$ kpc^2 km^2 s^{-2}) e em valores próximos a $L_Z \approx 0$. Essa posição no diagrama é altamente indicativa de um sistema com de alta energia, sugerindo uma história de acreção mais recente em comparação com os outros satélites (Rocha et al., 2012).

4.3 Perfil químico das estrelas escolhidas

A análise do perfil químico, apresentada na Figura 4.5, foi conduzida exclusivamente com base nas candidatas provenientes do catálogo LAMOST. Esta restrição metodológica se deve às altas incertezas nas medições de metalicidade provenientes de outros catálogos utilizados, garantindo assim a confiabilidade da nossa amostra. O ajuste de um modelo Gaussiano aos dados, por meio de MCMC, resultou em uma metalicidade média de $-1.58^{+0.05}_{-0.04}$ dex e uma dispersão de metalicidade de $0.27^{+0.12}_{-0.15}$ dex. Para este cálculo, um termo de erro sistemático de 0.2 dex foi adicionado em quadratura ao erro do levantamento, que foram considerados subestimados dadas as capacidades instrumentais. O erro sistemático inicial foi determinado pela dispersão de metalicidade observada em aglomerados globulares. Para refinar essa estimativa e obter o erro intrínseco do levantamento, utilizamos um método que se baseia na natureza mono-metálica desses aglomerados, cuja dispersão intrínseca teoricamente é nula. No entanto, as incertezas subestimadas nos dados espectroscópicos resultam em uma dispersão de metalicidade observada que é estatisticamente diferente de zero. Medimos esse valor residual, que foi diretamente interpretado como o erro intrínseco do levantamento de dados. Dessa forma, determinamos de maneira robusta o erro sistemático a ser aplicado em nossas análises, conforme detalhado na Figura 4.5.

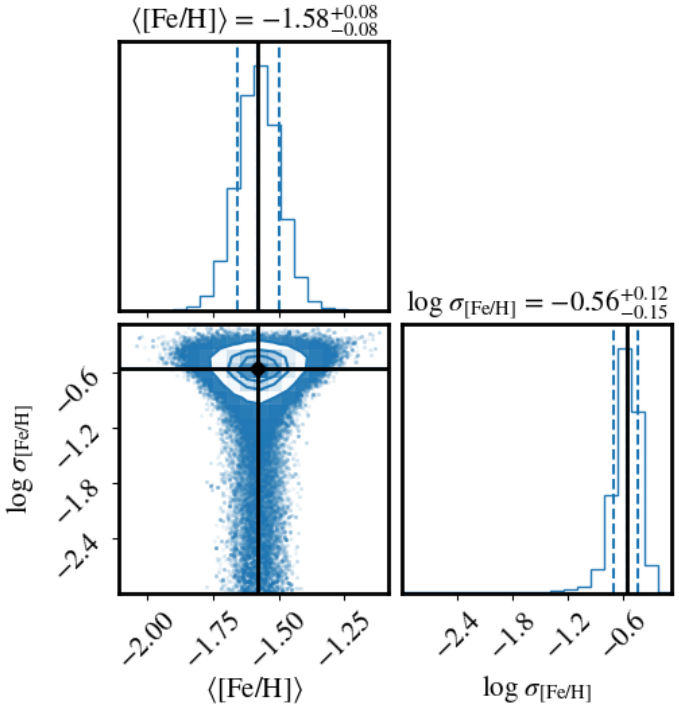

Figura 4.5: O painel superior exibe um histograma da metalicidade média, no qual se observa o perfil gaussiano dos dados. No painel inferior esquerdo, a metalicidade média é apresentada em função da dispersão de metalicidade, com as linhas verticais e horizontais em preto indicando o valor médio da metalicidade e da dispersão de metalicidade, respectivamente. O painel inferior direito mostra um histograma da dispersão de metalicidade, que também segue um perfil gaussiano. Nos histogramas, a linha preta vertical sólida representa o valor médio, enquanto as linhas verticais tracejadas em vermelho indicam o intervalo de um sigma em relação à linha sólida.

A dispersão de metalicidade ($\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]}$) pode funcionar como ferramenta para diferenciar a origem de correntes estelares no halo galáctico, como mostrado por Willman e Strader (2012). Aglomerados globulares são tipicamente populações mono-metálicas e quimicamente homogêneas, exibindo uma $\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]}$ próxima de zero. Em franco contraste, galáxias anãs, devido à sua história de formação estelar prolongada e enriquecimento químico subsequente, manifestam uma dispersão de metalicidade significativa e mensurável, conforme ilustrado na Figura 4.6. O valor de $\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]} = 0.27^{+0.12}_{-0.15}$ dex obtido para o Typhon é substancialmente diferente de zero e corrobora esta distinção. Embora a magnitude absoluta na banda V (M_V) seja inicialmente desconhecida, o traçado da Figura 4.6 demonstra que o Typhon, independentemente de sua luminosidade, se distancia estatisticamente dos aglomerados globulares. Desta forma, conclui-se, com robustez, que o Typhon é a primeira corrente estelar descoberta, originária de uma galáxia anã, na região mais externa do halo.

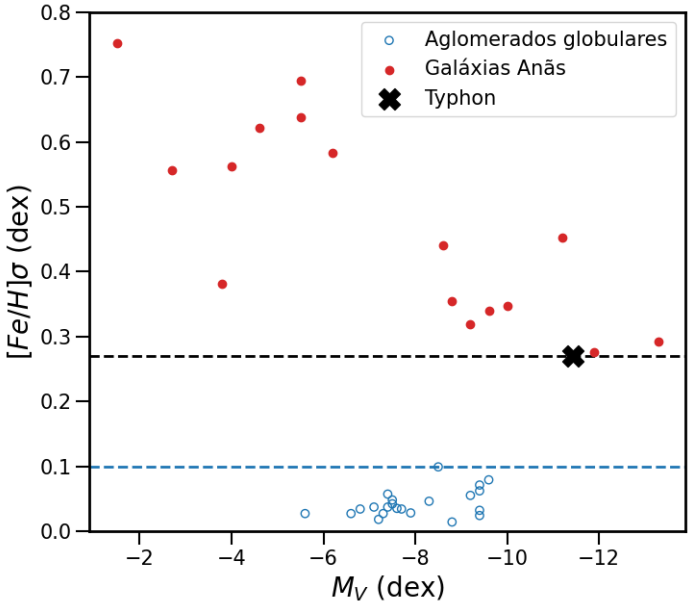

Figura 4.6: Diagrama da dispersão de metalicidade ($\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]}$) versus magnitude absoluta na banda V (M_V) para aglomerados globulares (círculos vazios em azul) e galáxias anãs esferoidais (círculos preenchidos em vermelhos) satélites da Via Láctea, com dados compilados a partir de Willman e Strader (2012). Os aglomerados globulares ocupam a região de baixa dispersão de metalicidade ($\sigma_{[\mathrm{Fe/H}]} \lesssim 0.1$ dex) representado pelo traçado em azul, enquanto as galáxias anãs exibem dispersões maiores. O marcador em "X" representa a corrente estelar Typhon. Considerando que esta estrutura foi recentemente acrescida pela Via Láctea, a sua magnitude absoluta ($M_V \approx -11.44$) foi estimada utilizando a relação entre a dispersão de metalicidade medida e a magnitude da sua galáxia anã progenitora.

4.4 Estimativa das propriedas da galáxia anã originária

Em Ji et al. (2023), a espectroscopia de alta resolução de sete estrelas da corrente estelar Typhon revelou um enriquecimento em elementos alfa. A partir dessa assinatura química, os autores interpretaram o Typhon como possível remanescente de uma acreção antiga. Contudo, essa conclusão entra em conflito com as suas características dinâmicas, que indicam uma acreção relativamente recente. Entre outras possibilidades, para conciliar essa discrepância, o estudo propõe que o Typhon seja, na verdade, a cauda de um evento de acreção mais massivo, já que galáxias progenitoras mais massivas seriam significativamente mais afetadas pela fricção dinâmica, explicando a juventude dinâmica observada.

A análise das propriedades dinâmicas do Typhon, conforme ilustrado nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, corrobora com os achados anteriores que sugerem um evento de acreção relativamente recente da sua galáxia progenitora. Adicionalmente, uma investigação da excentricidade orbital (Figura 4.3) mostra que galáxias anãs destruídas, como o Gaia-

Sausage-Enceladus, apresentam tipicamente órbitas radiais, enquanto os sistemas anões sobreviventes tendem a possuir órbitas mais polares. A órbita de Typhon, conforme o gráfico (Figura 4.3), é claramente radial, apresentando excentricidade entre 0.8 e 0.9. Esta observação é um forte indício de que ocorreu um evento de acreção recente, o que corrobora a hipótese de que o Typhon é o remanescente de uma galáxia anã destruída, cuja órbita ainda não sofreu notáveis efeitos de circularização pela fricção dinâmica.

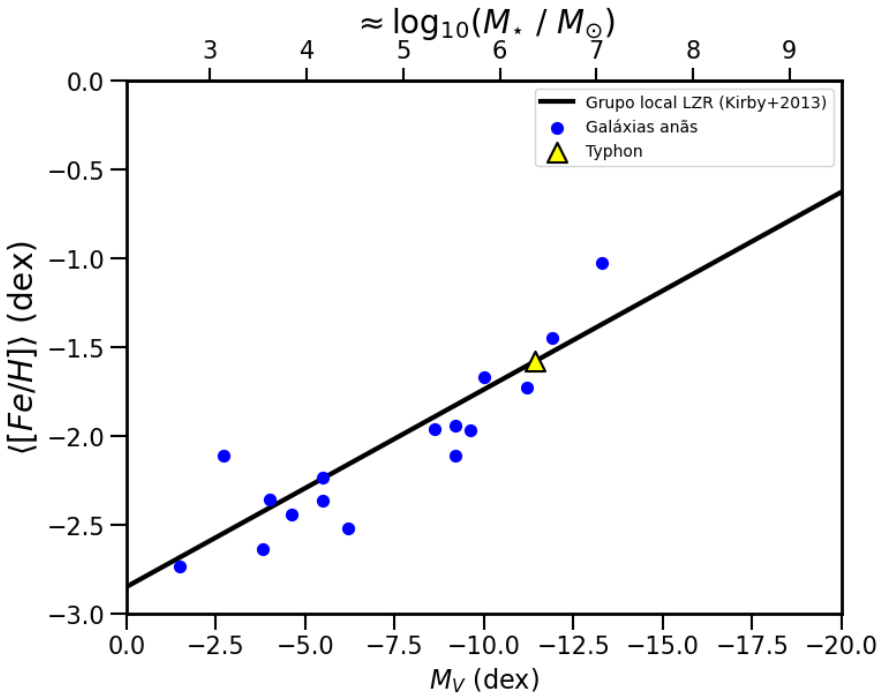

Figura 4.7: Relação Luminosidade-Metalicidade para galáxias anãs do grupo local e a corrente estelar Typhon. Os pontos em azul são galáxias anãs do grupo local presentes em Kirby et al. (2013) e o triângulo amarelo representa o Typhon.

A Figura 4.7 ilustra a relação luminosidade-metalicidade (LZR), graficando a metalicidade média ($\langle$[Fe/H]$\rangle$) versus a magnitude absoluta na banda V (M_V) para as galáxias anãs satélites da Via Láctea (círculos azuis). A magnitude M_V serve como indicador para a luminosidade, a qual é correlacionada com a massa estelar aproximada ($\log_{10}(M_\star/M_\odot)$) apresentada no eixo superior. Nesse contexto, a metalicidade média das estrelas do Typhon, determinada nesse trabalho, foi utilizada para estimar a massa estelar e a magnitude absoluta na banda V de sua galáxia anã progenitora. A linha preta sólida representa o ajuste da LZR para o grupo local, conforme estabelecido por Kirby et al. (2013). O triângulo amarelo (Typhon) representa a metalicidade média e magnitude absoluta estimada para a estrutura. Considerando a acreção recente da corrente estelar Typhon, inferida a partir

das características dinâmicas e cinemáticas obtidas, sua localização, por definição, alinhada com a LZR sustenta consistentemente a interpretação de que o Typhon é o remanescente de uma galáxia anã progenitora com uma massa estelar inicial comparável à da galáxia anã esferoidal de Sextans $\approx 10^6 M_\odot$.

Os resultados obtidos sugerem uma interpretação que diverge da proposta por Ji et al. (2023), a qual postulava que o Typhon seria remanescente de uma grande acreção. Este trabalho sustenta que a galáxia anã progenitora do Typhon possuía uma massa estelar da ordem de $10^6 M_\odot$, indicando um evento de menor porte. Tal conclusão é reforçada por evidências de simulações: Amarante et al. (2022) demonstrou que o evento de acreção do GSE (um dos últimos grandes eventos) não é capaz de reproduzir correntes estelares com as características orbitais do Typhon, notadamente suas órbitas com apocentro superior a 50 kpc e momento angular vertical (J_z) maior que 1000 kpc $\cdot$ km/s. Consequentemente, inferimos que o Typhon se originou de um evento de acreção de menor massa.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo central determinar a origem da corrente estelar Typhon, investigando se seu progenitor foi uma galáxia anã ou um aglomerado globular. Para tanto, foi desenvolvida e aplicada uma metodologia de seleção baseada em critérios cinemáticos e dinâmicos , utilizando uma combinação de dados espectroscópicos dos levantamentos LAMOST, SEGUE e DESI, juntamente com dados astrométricos do Gaia e estimativas de distância via STARHORSE. A aplicação desta metodologia resultou na identificação de 196 estrelas candidatas a membros da Typhon , o que estabelece a maior amostra catalogada na literatura e representa um aumento significativo que mais que triplica o número de membros previamente conhecidos.

A análise química desse novo conjunto de estrelas, focada nas candidatas do LAMOST, revelou uma metalicidade média de $\langle[\mathrm{Fe/H}]\rangle = -1.58^{+0.08}_{-0.09}$ dex e uma dispersão de metalicidade de $0.27^{+0.12}_{-0.15}$ dex. Este valor de dispersão resolvido, sendo superior ao critério de 0.1 dex estabelecido por Willman e Strader (2012), é incompatível com o perfil químico mono-metálico esperado de um aglomerado globular. Portanto, com base nesta evidência, concluímos que a corrente estelar Typhon é o remanescente da dissolução de uma galáxia anã acretada pelo halo da Via Láctea.

Adicionalmente, utilizando-se a Relação Luminosidade-Metalicidade (LZR), e considerando a acreção como recente, foi estimada uma massa estelar da ordem de $10^6 M_\odot$ para a galáxia anã progenitora , indicando que o Typhon se originou de um evento de acreção de menor massa. Esta caracterização inicial é crucial para posicionar o Typhon no contexto dos eventos de acreção que formaram o halo da Via Láctea e entender a natureza de seu sistema formador.

Referências Bibliográficas

Amarante J. A. S., Debattista V. P., Beraldo E Silva L., Laporte C. F. P., Deg N., Gastro Library. I. The Simulated Chemodynamical Properties of Several Gaia-Sausage-Enceladus-like Stellar Halos, ApJ, 2022, vol. 937, p. 12

Bonaca Ana Price-Whelan A. M., Stellar Streams in the Gaia Era, arXiv e-prints, 2024, p. arXiv:2405.19410

Bovy J., A purely acceleration-based measurement of the fundamental Galactic parameters using Gaia EDR3, arXiv e-prints, 2020, p. arXiv:2012.02169

Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., PARSEC: stellar tracks and isochrones with the Padova and Trieste Stellar Evolution Code, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, vol. 427, p. 127

Collaboration G., Vallenari A., Brown A. G. A., et al.,, A&A, 2023, vol. 674, p. A1

Coullon J., Webber R. J., Ensemble sampler for infinite-dimensional inverse problems, arXiv preprint arXiv:2010.15181v2, 2021

Cui X.-Q., Zhao Y.-H., Chu Y.-Q., et al.,, Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, vol. 12, p. 1197

De Angeli F., Weiler M., Montegriffo P., et al.,, A&A, 2023, vol. 674, p. A2

Deason A. J., Belokurov V., Galactic Archaeology with Gaia, New A Rev., 2024, vol. 99, p. 101706

Deng L.-C., Newberg H. J., Liu C., et al.,, Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, vol. 12, p. 735

DESI Collaboration The Early Data Release of the Dark Energy Spectroscopic Instrument, AJ, 2024, vol. 168, p. 58

Gaia Collaboration Prusti T., et al., The Gaia mission, Astronomy Astrophysics, 2016, vol. 595, p. A1

Gaia Collaboration Vallenari A., et al., Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties, arXiv e-prints, 2022

Helmi A., Streams, Substructures, and the Early History of the Milky Way, ARA&A, 2020, vol. 58, p. 205

Helmi A., White S. D. M., Building up the stellar halo of the Galaxy, MNRAS, 1999, vol. 307, p. 495

Huang B., Yuan H., Xiao K., Zhang R., , 2025 Recalibration of the Landolt UBVRI Standard Stars and the Generation of 5.4 Million New UBVRI Standard Stars using LAMOST and Gaia

Ji A. P., Naidu R. P., Brauer K., Ting Y.-S., Simon J. D., Chemical abundances of the Typhon stellar stream, MNRAS, 2023, vol. 519, p. 4467

Kirby E. N., Cohen J. G., Guhathakurta P., Cheng L., Bullock J. S., Gallazzi A., The Universal Stellar Mass-Stellar Metallicity Relation for Dwarf Galaxies, ApJ, 2013, vol. 779, p. 102

Koposov S. E., Allende Prieto C., Cooper A. P., Li T. S., Beraldo e Silva L., Kim B., Carrillo A., Dey A., Manser C. J., Nikakhtar F., Riley A. H., Rockosi C., Valluri M., Aguilar J., Ahlen S., Bailey S., Blum R., Brooks D., Claybaugh T., Cole S., de la Macorra A., Dey B., Forero-Romero J. E., Gaztañaga E., Guy J., Kremin A., Le Guillou L., Levi M. E., Manera M., Meisner A., Miquel R., Moustakas J., Nie J., Palanque-Delabrouille N., Percival W. J., Rezaie M., Rossi G., Sanchez E., Schlafly E. F., Schubnell M., Tarlé G., Weaver B. A., Zhou Z., DESI Early Data Release Milky Way Survey value-added catalogue, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2024, vol. 533, p. 1012

Li T. S., Ji A. P., Pace A. B., Erkal D., Koposov S. E., Shipp N., Da Costa G. S., Cullinane L. R., Kuehn K., Lewis G. F., Mackey D., Simpson J. D., Zucker D. B., Ferguson P. S.,

Martell S. L., Bland-Hawthorn J., Balbinot E., Tavangar K., Drlica-Wagner A., De Silva G. M., Simon J. D., S ^{5}: The Orbital and Chemical Properties of One Dozen Stellar Streams, ApJ, 2022, vol. 928, p. 30

Limberg G., Ji A. P., Naidu R. P., Chiti A., Rossi S., Usman S. A., Ting Y.-S., Zaritsky D., Bonaca A., Borbolato L., Speagle J. S., Chandra V., Conroy C., Extending the chemical reach of the H3 survey: detailed abundances of the dwarf-galaxy stellar stream Wukong/LMS-1¡SUP¿¡/SUP¿, MNRAS, 2024, vol. 530, p. 2512

Limberg G., Queiroz A. B. A., Perottoni H. D., Rossi S., Amarante J. A. S., Santucci R. M., Chiappini C., Pérez-Villegas A., Lee Y. S., Phase-space Properties and Chemistry of the Sagittarius Stellar Stream Down to the Extremely Metal-poor ([Fe/H] $\lesssim$ -3) Regime, ApJ, 2023, vol. 946, p. 66

Limberg G., Souza S. O., Pérez-Villegas A., Rossi S., Perottoni H. D., Santucci R. M., Reconstructing the Disrupted Dwarf Galaxy Gaia-Sausage/Enceladus Using Its Stars and Globular Clusters, ApJ, 2022, vol. 935, p. 109

Liu X.-W., Yuan H.-B., Huo Z.-Y., et al., Setting the scene for Gaia and LAMOST, Setting the scene for Gaia and LAMOST, 2014, vol. 298, p. 310

Mateu C., galstreams: A library of Milky Way stellar stream footprints and tracks, MNRAS, 2023, vol. 520, p. 5225

McMillan P. J., The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way, MNRAS, 2017, vol. 465, p. 76

Perottoni H. D., Limberg G., Amarante J. A. S., Rossi S., Queiroz A. B. A., Santucci R. M., Pérez-Villegas A., Chiappini C., The Unmixed Debris of Gaia-Sausage/Enceladus in the Form of a Pair of Halo Stellar Overdensities, ApJ, 2022, vol. 936, p. L2

Price-Whelan A. M., Foreman-Mackey D., schwimmbad: A uniform interface to parallel processing pools in Python, The Journal of Open Source Software, 2017, vol. 2, p. 357

Prudil Z., Hanke M., Lemasle B., Crestani J., Braga V. F., Fabrizio M., Koch-Hansen A. J., Bono G., Grebel E. K., Matsunaga N., Marengo M., da Silva R., Dall'Ora M., Martínez-Vázquez C. E., Altavilla G., Lala H., Chaboyer B., Ferraro I., Fiorentino G.,

Gilligan C., Nonino M., Thévenin F., Milky Way archaeology using RR Lyrae and type II Cepheids. I. The Orphan stream in 7D using RR Lyrae stars, A&A, 2021, vol. 648, p. A78

Queiroz A. B. A., Anders F., Santiago B. X., Chiappini C., Steinmetz M., Dal Ponte M., Stassun K. G., da Costa L. N., Maia M. A. G., Crestani J., Beers T. C., Fernández-Trincado J. G., García-Hernández D. A., Roman-Lopes A., Zamora O., StarHorse: a Bayesian tool for determining stellar masses, ages, distances, and extinctions for field stars, MNRAS, 2018, vol. 476, p. 2556

Rocha M., Peter A. H. G., Bullock J., Infall times for Milky Way satellites from their present-day kinematics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, vol. 425, p. 231

Santiago B. X., Brauer D. E., Anders F., Chiappini C., Queiroz A. B., Girardi L., Rocha-Pinto H. J., Balbinot E., da Costa L. N., Maia M. A. G., Schultheis M., Steinmetz M., Miglio A., Montalbán J., Schneider D. P., Beers T. C., Frinchaboy P. M., Lee Y. S., Zasowski G., Spectro-photometric distances to stars: A general purpose Bayesian approach, A&A, 2016, vol. 585, p. A42

Schönrich R., Binney J., Dehnen W., Local kinematics and the local standard of rest, MNRAS, 2010, vol. 403, p. 1829

Tenachi W., Oria P.-A., Ibata R., Famaey B., Yuan Z., Arentsen A., Martin N., Viswanathan A., Typhon: A Polar Stream from the Outer Halo Raining through the Solar Neighborhood, ApJ, 2022, vol. 935, p. L22

Thomas G. F., Battaglia G., The Cetus-Palca stream: A disrupted small dwarf galaxy, A&A, 2022, vol. 660, p. A29

Vasiliev E., Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2, MNRAS, 2019, vol. 484, p. 2832

Willman B., Strader J., "Galaxy," Defined, AJ, 2012, vol. 144, p. 76

Yanny B., Newberg H. J., Johnson J. A., Lee Y. S., Beers T. C., Bizyaev D., Brewington H., Fiorentin P. R., Harding P., Malanushenko E., Malanushenko V., Oravetz D., Pan

K., Simmons A., Snedden S., Tracing Sagittarius Structure with SDSS and SEGUE Imaging and Spectroscopy, ApJ, 2009, vol. 700, p. 1282

Zhao G., Zhao Y.-H., Chu Y.-Q., et al.,, Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, vol. 12, p. 723