

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

**Propriedades Estruturais do Disco Galáctico
Usando Aglomerados Abertos na Vizinhança Solar**

Gabriel Corrêa de Aguiar

Dissertação realizada sob orientação dos Professores Dr. Charles J. Bonatto e Eduardo L. D. Bica apresentada à Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Física.

Porto Alegre, RS, Brasil

18 de dezembro de 2017

*Nobody exists on purpose. Nobody belongs anywhere. We're all going to die.
Come watch TV.*

Agradecimentos

Quero, primeiramente, agradecer aos meus pais, Mario e Dilcia, que sacrificaram tudo para que eu pudesse chegar onde estou. Meu pai, trabalhando de sol a sol, perdendo noites de sono e, mesmo assim, sendo presente na minha vida pessoal e acadêmica, sempre disponível para uma conversa, um abraço, ou um dos nossos famosos debates políticos. Sempre educando com suas ações, apresentando o valor do caráter e da ética moral. O valor de se respeitar os diferentes, de se ter um senso de justiça que vá além do que for conveniente. Mostrando que ser forte é saber entender quando os outros precisam de ajuda, e não impor força sobre os mais fracos. Minha mãe, que, depois de colocar dois filhos na universidade, enfiou a cabeça nos livros e conquistou o seu diploma universitário na melhor universidade pública do país, sendo constantemente elogiada por professores e colegas. Dessa experiência eu tirei o significado de dedicação, de passar por cima da maior tristeza em nossas vidas e, ainda assim, lutar para conquistar algo tão difícil.

Agradeço aos meus demais familiares, que sempre se colocaram a disposição para ajudar, mesmo eu tendo optado por uma carreira tão alheia ao dia-a-dia deles.

Por fim, gostaria de agradecer à compreensão dos meus orientadores, Charles e Bica, por auxiliar em um dos momentos mais difíceis da minha vida, que acabou afetando a produção desta dissertação. Vocês tornaram mais fácil algo que sempre foi minha maior dificuldade: pedir ajuda.

Resumo

Neste trabalho foram usados aglomerados abertos de três catálogos distintos (WEBDA, DAML02 e MWSC) e diferentes métodos de determinação de parâmetros para determinar as propriedades estruturais do Disco Fino da Via-Láctea na vizinhança Solar, como a escala de altura dos aglomerados e uma determinação para o deslocamento vertical do Sol com relação ao plano do Disco Galáctico. Tendo em vista o maior número de objetos, sua metodologia consistente entre todos os objetos catalogados e uma maior capacidade de detectar objetos distantes do Sol, o catálogo MWSC, aqui chamado de CatA, foi nosso principal objeto de estudo. Os demais servindo, principalmente, como comparação, para garantir consistência com resultados obtidos de catálogos anteriores. Cada catálogo gerou um valor diferente para cada parâmetro estudado, porém estes valores concordam entre si, de acordo com os erros esperados embutidos na obtenção de dados e nas diferentes características de cada catálogo.

Na busca por determinar os parâmetros estruturais mais básicos, como os descritos acima, encontramos duas populações distintas de aglomerados, traçando diferentes perfis exponenciais, altura com relação ao plano e assinaturas de idade diferentes. Para diferenciar estas populações, usamos um sub-índice $j = 1$ para a população com menor escala de altura, $\sim 69pc$ para CatA, com maior proporção de objetos jovens e com maior relevância para regiões próximas ao plano do Disco, $Z < 200pc$. Já para a população predominantemente composta por aglomerados relativamente velhos, com maior relevância em distâncias verticais superiores a $200pc$, com escala de altura de aproximadamente $409pc$, novamente referente à CatA, usamos o sub-índice $j = 2$. Ambas as populações surgem naturalmente dos três catálogos ao expandirmos o perfil de probabilidade das distribuições dos aglomerados com relação à altura vertical, Z . Em todos os catálogos, o ponto de encontro destas duas populações ocorre em uma altura de $Z \sim 200pc$. A população $j = 2$ apresenta valores muito próximos aos presentes na literatura, quando os objetos utilizados para tal determinação não são aglomerados, mas sim estrelas do campo, por exemplo.

Outra característica compartilhada por todos os catálogos foi a detecção de uma sutil flutuação na distribuição de objetos com relação à altura. Esta flutuação apresenta um acréscimo de aglomerados na parte Sul do Disco e, na mesma região ao Norte, um decréscimo. Com auxílio de distribuições do tipo Hess, pudemos verificar que estas flutuações possuem uma relação antissimétrica e apresentam um foco em uma região distante $\sim 400pc$ do Sol, $\sim 8.85kpc$ do Centro Galáctico e com uma altura modular em relação ao Disco de $\sim 125pc$. As causas para esta sutil

flutuação na distribuição vertical dos *OCs* seguem em aberto, entretanto.

Abstract

In this work three distinct open clusters catalogues (WEBDA, DAML02 and MWSC) with different methods for the parameter determination were used to derive the thin Disk structural properties in the Milky Way, such as open cluster scale height and a determination of vertical displacement of the Sun relative to the plane of the Galactic Disk. Considering the larger number of objects, its consistent methodology among all cataloged objects and a more efficient capacity to detect distant objects from the Sun, the MWSC catalog, here called CatA, was our main object of study. The others serving, mainly, as a comparison, to guarantee consistency with results obtained from previous catalogs. Each catalog generated a different value for each parameter studied, but these values agree with one another, according to the expected errors built into the data collection and the different characteristics of each catalog.

In the search for determining the basic structural parameters, as described above, we found two distinct open cluster populations, fitting different exponential profiles, height relative to the plane, and different age signatures. To differentiate these populations, we used an index $j = 1$ for the population with smaller scale height, $\sim 69pc$ for CatA, with larger proportion of young objects and of larger relevance for regions near the Disk plane, $Z < 200pc$. For the population predominantly composed of relatively old clusters, with a larger relevance in vertical distances of more than $200pc$, with a height scale of approximately $409pc$, again referring to CatA, we used the index $j = 2$. Both populations arise naturally from the three catalogs as we expand the distribution of clusters probability profile relative to the vertical height, Z . In all catalogs, the meeting point of these two populations occurs at a height of $Z \sim 200pc$. The population $j = 2$ presents values very close to those in the literature, when the objects used for such determination are not clusters, but field stars, for example.

Another characteristic shared by all catalogs was the detection of a subtle fluctuation in the distribution of objects with respect to height. This fluctuation presents an increase of clusters in the South part of the Disk and, in the same region to the North, a decrease. With the aid of Hess-type distributions, we can verify that these fluctuations have an antisymmetric relationship and have a focus on a region distant $\sim 400pc$ from the Sun, $\sim 8.85kpc$ from the Galactic Center and a modular height of $\sim 125pc$ in relation to Disk. The causes for this subtle fluctuation in the vertical distribution of the *OCs* remain open, however.

Capítulo 1

Introdução

Para termos um entendimento completo da Via-Láctea é fundamental que tenhamos um amplo conhecimento de sua estrutura espacial. As galáxias espirais são atualmente divididas estruturalmente, a grosso modo, em Disco, Bojo e Halo, (Majewski, 1993). Cada uma dessas estruturas morfológicas possui características físicas próprias e cada uma exige uma diferente abordagem. O Disco das galáxias espirais é a região onde se encontram os braços espirais que dão nome para estas galáxias (Hubble, 1936), onde a presença de gás e a forte formação de estrelas dão um brilho mais azulado à região. Por ser a região com maior formação de estrelas, é aqui também que se formam os aglomerados abertos. Morfológicamente, existem dois ramos distintos de discos, os com ou sem uma barra na região central. O Bojo é a região central da Galáxia, apresenta uma forma lenticular e em muitos casos, apresentam um buraco negro em seu centro. O Halo é a região que envolve a galáxia, onde encontramos os aglomerados globulares, nuvens de gás e poeira e também matéria escura.

Para se estudar as estruturas do Disco Galáctico, pode-se usar informações de estrelas individuais, ou, como neste caso, os aglomerados abertos (sigla inglesa *OCs*). Os *OCs* são uma excelente forma de se determinar parâmetros estruturais para o disco, pois são estruturas próximas a uma População Estelar Simples (*SSP*), onde todas suas estrelas foram formadas da mesma nuvem de gás e, assim, compartilhando de condições iniciais similares. Além disso, a maioria das estrelas da Galáxia são originárias de *OCs* e/ou associações (Lada & Lada, 2003), fazendo dos *OCs* uma janela para visualizar a Galáxia como um todo. Não bastasse isso, *OCs* também são muito abundantes no Disco Galáctico e permitem uma maior precisão na determinação de seus parâmetros, tais como distância, idade e metalicidade, em comparação com estrelas individuais. Por outro lado, *OCs* podem ser muito difíceis de serem obser-

vados, pois alguns tem uma densidade estelar quase indistinguível do *background* Galáctico (Binney & Merrifield, 1998). Outra limitação na utilização de *OCs* está no quão ao passado podemos olhar, já que estas estruturas são muito jovens, se comparadas com as idades de seus 'primos', os Aglomerados Globulares (*GC*). Enquanto um *GC* pode ter idades de 10 Gyr, ou mais, um *OC* com idade superior a 1 Gyr é artigo pouco comum em catálogos.

1.1 Aglomerados Abertos

Aglomerados de estrelas são considerados os blocos de construção das galáxias (Froeblich et al., 2007). Os dois tipos morfológicos mais relevantes de aglomerados estelares são os Abertos e os Globulares. *OCs* são objetos típicos da população dos discos das galáxias (Kharchenko et al., 2003), sendo assim uma grande ferramenta no estudo da estrutura do disco. Por suas características morfológicas, e sua grande abundância no disco Galáctico, *OCs* podem ter seus parâmetros determinados de forma mais consistente e com maior precisão, se comparados aos parâmetros de estrelas individuais (Kharchenko et al., 2012), permitindo uma mais precisa investigação de parâmetros Galácticos, e investigando propriedades básicas de aglomerados abertos, podemos traçar a evolução estelar a longo prazo na Via-Láctea (Froeblich et al., 2007).

Morfolologicamente, *OCs* são objetos com um número, em média, reduzido de estrelas, se comparados com os *GCs*, podendo constituir de uma densidade estelar pouco maior que a do campo (Binney & Merrifield, 1998) o que aumenta a dificuldade de construir um catálogo completo de *OCs*. No disco da Via-Láctea, detectar aglomerados abertos por meios ópticos pode gerar catálogos incompletos, considerando que comprimentos de onda inferiores a $1\mu m$ sofrem mais com os efeitos de extinção por nuvens e pelo meio interestelar (Froeblich et al., 2007).

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é recalcular os valores de alguns parâmetros do disco da Galáxia usando *OCs* da vizinhança Solar, comparando os resultados obtidos com três diferentes catálogos disponíveis. Em Particular, com o catálogo MWSC, composto pelos resultados de Kharchenko et al. (2012), Kharchenko et al. (2013), e Schmeja et al. (2014), podemos buscar um entendimento mais profundo sobre a estrutura da Galáxia.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Cap.2 apresentamos os catálogos usados e suas diferenças, indicamos as razões que nos levaram a escolher o nosso catálogo principal e descrevemos o referencial aplicado às amostras. No Cap.3 detalhamos os métodos aplicados na obtenção dos valores dos parâmetros e descrevemos as estruturas encontradas no disco galáctico. O Cap.4 descreve nossas conclusões baseadas nos resultados.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Dados

Neste capítulo, algumas das características dos catálogos utilizados serão detalhadas e, com base nessas informações, iremos selecionar a forma que cada um dos catálogos será usado. Os catálogos são MWSC (Kharchenko et al., 2012, 2013, Schmeja et al., 2014), DAML02 (Dias et al., 2002), e WEBDA, (Mermilliod, 1995). Por praticidade, os catálogos acima citados serão chamados CatA, CatB e CatC, respectivamente.

2.1.1 Catálogo WEBDA - CatC

CatC é a base de dados com o menor número de objetos e também a mais desatualizada, dentre as aqui apresentadas. Foi, por muitos anos, uma fonte para obtenção de dados de *OCs*, até o surgimento de catálogos mais completos, como CatB e CatA. Aqui, CatC apresenta, na vizinhança solar, pouco mais de 950 objetos, sendo principalmente preenchido por aglomerados relativamente jovens, com idades na casa das centenas de milhares de anos.

Este catálogo utiliza informações encontradas independentemente e, por isso, utiliza métodos distintos para cada caso. Isso gera alguns inconvenientes, pois a população de *OCs* não é homogeneamente observada, podendo haver diferentes resultados para o mesmo objeto, dependendo do método utilizado. Entretanto, continua hoje uma boa ferramenta para se observar a Galáxia.

2.1.2 Catálogo DAML02 - CatB

CatB é o *primo rico* do CatC. Este catálogo utiliza uma metodologia muito parecida, na qual engloba resultados obtidos independentemente, além de outros já contidos em CatC. Porém, aqui o número de objetos é substancialmente maior e mais atualizado. O autor do catálogo é responsável por um considerável número de objetos, dando a esta base de dados uma maior estabilidade quanto à variação de método de obtenção dos dados.

Além disso, CatB também possui uma maior capacidade de observar objetos distantes, dando maior profundidade à amostra. A representatividade com relação às idades é muito semelhante à CatC, fazendo deste catálogo um ótimo método para o estudo de *OCs* jovens. Isso com um bom número de objetos observados na vizinhança Solar, 1152.

2.1.3 Catálogo MWSC - CatA

CatA é, dentre os 3 aqui listados, o mais complexo. Com a intenção de homogeneizar a metodologia de extração de dados, os autores estabeleceram uma ferramenta que procura sobredensidades de estrelas e, assim, determina quais são os *OCs*. Também usam um só método para extrair os resultados de todos os objetos catalogados, com um *software* que detecta sobredensidades estelares. Ao se olhar individualmente os objetos, esse método pode gerar erros, mas para se observar estruturas no disco, este método parece o mais adequado, pois proporciona uma melhor estimativa de erro nas medidas.

O catálogo também apresenta novos *OCs* com alta latitude (Schmeja et al., 2014), região pouco 'aproveitada' pelos catálogos anteriores. Este catálogo apresenta o maior número de objetos, 1542 na vizinhança Solar, uma melhor representação de *OCs* velhos (aqui definidos como os com mais de um bilhão de anos), uma maior profundidade da amostra, chegando a uma completeza de aproximadamente 2kpc, Kharchenko et al. (2012, 2013).

2.2 A Vizinhança Solar, via *OCs*

Primeiramente devemos definir a Vizinhança Solar. É aqui definida como a região dentro de uma distância igual, ou inferior, a $2kpc$. Esse limite para distância Solar (r_{\odot}) foi adotado para minimizar efeitos de completeza no catálogo, na determinação da altura do Sol com relação ao plano da Via Láctea (Z_{\odot}), idade, entre

outros parâmetros (Bonatto et al., 2006).

Essa opção para a nossa base de dados gera um problema para as regiões mais distantes do plano Galáctico, ou seja, alto Z . Se considerarmos que cada conjunto de dados com mesma altura forma um plano, teremos planos com áreas cada vez menores, conforme $|Z|$ cresce. A área dos planos é simplesmente a área de um círculo de raio r . Com uma simples equação trigonométrica podemos reescrever r em função das variáveis R e Z , distância limite da região ($2kpc$) e altura do plano, respectivamente.

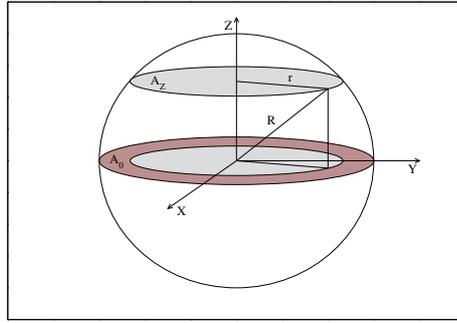


Figura 2.1: Apresentamos aqui a representação visual das áreas calculadas nas equações abaixo

$$\begin{aligned} R^2 &= r^2 + Z^2 \\ r^2 &= R^2 - Z^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Substituindo 2.1 em 2.2 nós podemos encontrar a área de um plano qualquer (A_Z) e compará-la com a área do plano com $Z = 0$ (A_0). Dividindo a diferença das áreas (ΔA_Z) por A_0 nós encontramos uma relação direta entre a altura do plano (Z) e o quão significativa é a diferença entre as áreas (Ω_Z)

$$\begin{aligned} A_r &\equiv A(r) = \pi r^2 \\ A_Z &\equiv A(Z) = \pi(R^2 - Z^2) \\ A_0 &\equiv A(Z = 0) = \pi R^2 \\ \Delta A_Z &\equiv \Delta A(Z) = A_Z - A_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
&= \pi(R^2 - Z^2) - \pi R^2 = -\pi Z^2 \\
\Omega_Z &\equiv \left| \frac{\Delta A_Z}{A_0} \right| = \frac{Z^2}{R^2} = \frac{Z^2}{4kpc^2}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Com essa equação chegamos à conclusão de que podemos utilizar esta geometria para delimitar nossa Vizinhança Solar e obter bons resultados para populações com altura de até $0.5kpc$, onde Ω_Z atinge um valor de aproximadamente 10%.

A forma exponencial com que a densidade de aglomerados cai, (Bonatto et al., 2006), nos permite focar numa região ainda mais interna do disco, com altura máxima de $300pc$. Nessa região Ω_Z não passa dos 2.25%, fazendo com que a diferença nas áreas seja insignificante.

O próximo passo a ser feito é determinar se nosso catálogo principal concorda com os anteriores. Comparando-os podemos encontrar quais pontos diferenciam os catálogos analisados e buscar entender os motivos dessas diferenças. Portanto comparamos $\ell(^{\circ})$, $b(^{\circ})$, t (yr) e $r_{\odot}(kpc)$ dos objetos catalogados em um histograma, Fig.??, onde levamos em consideração as diferenças no número de objetos em cada catálogo e usamos um valor relativo, n/N , para comparar as amostras, onde n é o número de objetos presentes na região, por exemplo entre $b = 0^{\circ}$ e $b = 15^{\circ}$, enquanto N é o número total de objetos para o catálogo em questão.

Fig.??a podemos ver que os catálogos concordam entre si com relação à distribuição de OCs em $b(^{\circ})$. A principal diferença está nos intervalos de latitude em que nenhum OC foi catalogado. CatC tem dois intervalos sem objetos: $(-75^{\circ}, -60^{\circ})$ e $(45^{\circ}, 75^{\circ})$. CatB preenche a lacuna de objetos para latitudes negativas presente em CatC, mas não a lacuna de 45° à 75° . CatA, por outro lado, não apresenta nenhuma lacuna. Isso é, provavelmente, o resultado de uma busca de OCs de alta latitude absoluta presente em Schmeja et al. (2014). Ainda que com déficit de OCs próximos ao Sol catalogados em altas latitudes absolutas, os catálogos CatB e CatC ainda podem ser extremamente úteis, tendo em vista que as regiões de alta latitude absoluta possuem poucos OCs , pois essas regiões englobam principalmente áreas distantes do disco, onde há pouca concentração de OCs .

A Fig.??b mostra que os três catálogos apresentam o mesmo perfil ao traçar a distribuição de OCs com relação à $\ell(^{\circ})$, fazendo com que a amostra com maior número de objetos seja a mais indicada para extrair dados.

Na parte inferior da Fig.?? podemos ver como os catálogos apresentam suas amostras com relação à r_{\odot} e $\log(t)$ e, assim, estabelecer diferenças bastante relevantes. A Fig.??c revela até que ponto existe um aumento no número de objetos no catálogo correlacionado com a profundidade em que se observa. CatA mantém um

crescente número de *OCs* até uma distância de $r_{\odot} \sim 1.8kpc$, maior que os valores para CatB ($\sim 1.2kpc$) e CatC ($\sim 1.0kpc$). Essa informação nos dá uma estimativa da completeza da amostra. Por exemplo, CatA tem sua amostra completa até $1.8kpc$ (Kharchenko et al., 2013), como no histograma. Já a Fig.??d apresenta diferenças mais sutis entre os catálogos, mantendo um perfil de distribuição muito semelhante. Contudo, CatA apresenta mais representatividade para *OCs* velhos, $t > 10^9yr$, principalmente se comparado com CatC. Outra diferença aparece para a população mais jovem, $t \sim 10^7yr$, que é significativamente mais relevante em CatC se comparado com CatA.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

Neste capítulo vamos abordar os dados obtidos usando os três catálogos, tendo assim uma forma de determinar se estes concordam entre si, e também determinar importantes parâmetros do disco. Para extrairmos estes parâmetros, vamos usar uma variação da equação usada em Bonatto et al. (2006):

$$\phi_j(Z) = \phi_{0,j} \times e^{-\frac{|Z-Z_{\odot}|}{Z_{h,j}}} \quad (3.1)$$

Onde aproximamos a distribuição dos *OCs* no disco a uma exponencial decaindo com a altura (Z). Aqui, $\phi_{0,j}$ é uma constante de proporcionalidade, Z_{\odot} é a altura estimada do Sol com relação ao Disco, e $Z_{h,j}$ é a escala de altura. Nessa versão da equação o sub-índice j diferencia populações distintas.

3.1 Parâmetros do Disco Local

Para podermos aplicar a eq.3.1 aos dados, precisamos, primeiramente, construir uma distribuição dos objetos em cada catálogo e então usar um método de aproximação da equação aos pontos distribuídos, deixando os parâmetros livres para minimizar o erro calculado. Usamos um modelo de binagem variável, fixando uma relação sinal/ruído de 5.1, usado para otimizar o número de pontos e as barras de erro na Fig.3.1, para transformar os catálogos em distriuições de probabilidade $\phi(Z')$ e, usando um algoritmo baseado na mínimos quadrados não lineares, aproximamos a distribuição a uma curva, da qual extraímos os valores dos nossos parâmetros (Fig.3.1.a).

Porém, para melhor visualizarmos a distribuição, é melhor realizarmos uma rotação no nosso referencial. Notar, como observamos os objetos da posição do

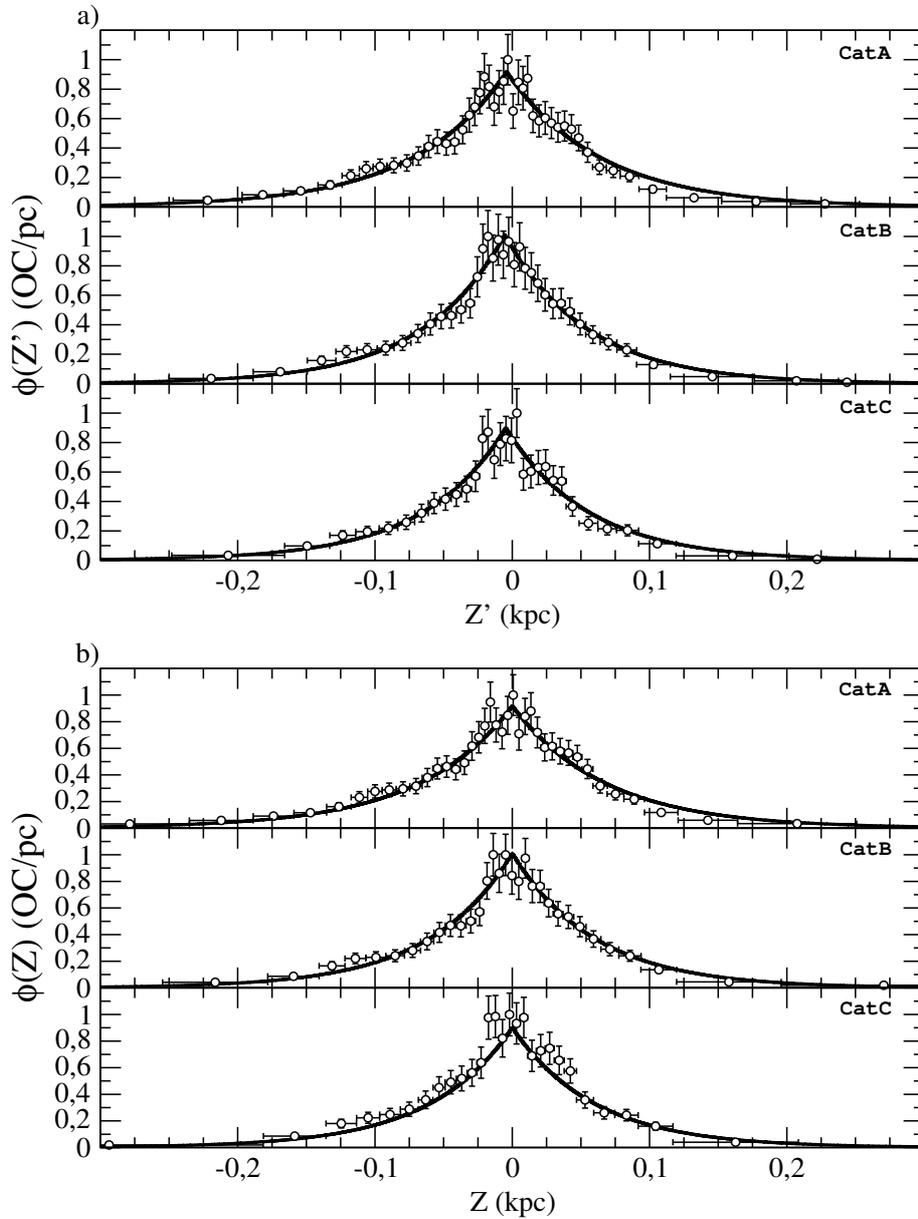


Figura 3.1: Distribuição de *OCs* com altura até 0.3 kpc dos três catálogos (círculos) e as respectivas aproximações (linha contínua) obtidas usando Eq.3.1. O painel superior apresenta um gráfico dos dados antes da rotação do referencial, enquanto o painel inferior mostra o referencial corrigido. A diferença dos dois painéis é apenas que o painel a) está centrado na altura solar enquanto o painel b) está centrado no disco Galáctico.

Sol, e passamos a usar como ponto de referência o centro galáctico, acabamos com um referencial com um certo ângulo θ com relação ao plano do Disco. Ainda que pequena, essa distorção pode afetar os resultados, principalmente no que diz respeito aos *OCs* mais distantes. Portanto, denominamos o referencial original dos catálogos, $S' = (X', Y', Z')$, e um novo referencial, $S = (X, Y, Z)$, que permanece alinhado com o Disco Galáctico. Para determinarmos os valores dos ângulos presentes em cada catálogo usamos uma relação trigonométrica simples, usando o valor de Z_{\odot} e $X'_{\odot} = 8.5kpc$ (Bonatto et al., 2006, Kharchenko et al., 2012). Os valores destes ângulos são apresentados na tabela 3.1, juntamente com os demais parâmetros de cada catálogo. Com os valores de θ determinados, podemos calcular as coordenadas cartesianas dos objetos no referencial S , usando a seguinte relação:

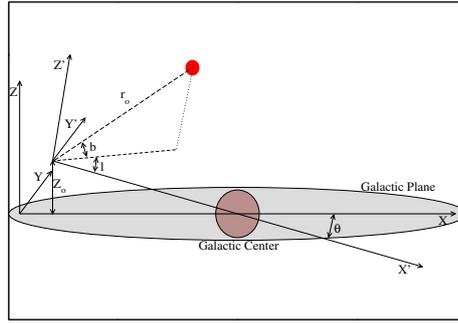


Figura 3.2: Representação visual da diferença entre os referenciais $S = (X, Y, Z)$ e $S' = (X', Y', Z')$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

Com o novo referencial podemos refazer a distribuição e comparar com a curva obtida de S' . Essa distribuição é apresentada na Fig.3.1.b. Analisando caso a caso, é possível dizer que, a região mais próxima do plano do Disco ($|Z| < 0.3kpc$) não sofre grandes prejuízos ao se analisar os dados sem a correção de referencial, com exceção do CatC, onde a curva aproximada usando os parâmetros da tabela 3.1 fica

Tabela 3.1: *OCs* com altura de até $0.3kpc$, em módulo

Catálogo	CatA	CatB	CatC
$Z_{\odot}(pc)$	4.13 ± 1.30	5.47 ± 1.06	4.68 ± 1.60
$Z_{h,1}(pc)$	67.79 ± 3.96	59.97 ± 3.15	59.83 ± 4.74
$\phi_{0,1}(\frac{OC}{kpc})$	0.92 ± 0.03	1.01 ± 0.03	0.90 ± 0.03
$\theta(^{\circ})$	$-1'40.16''$	$-2'12.80''$	$-1'53.67''$
RMS	0.07	0.06	0.08

levemente abaixo dos pontos presentes na distribuição. CatA e CatB são muito bem representados pela curva obtida com o referencial S' .

Além de representar os dados de forma mais intuitiva, essa mudança de referencial propicia que uma distribuição do módulo da altura seja feita de forma mais rígida, pois agora a distribuição está centrada rigorosamente em $Z = 0$, e não em $Z' = -Z_{\odot}$.

Analisando os valores apresentados na tabela 3.1 podemos ver, primeiramente, que os catálogos parecem concordar, dentro dos erros, uns com os outros. Os valores de Z_{\odot} estão um tanto abaixo de estimativas anteriores (Bonatto et al., 2006, Buckner et al., 2014), que calculam valores acima de $10pc$, chegando em alguns estudos aos $30pc$, mas consistentes com a amostra. Os valores para $Z_{h,1}$ podem ser interpretados como a representação da diferença entre amostras com diferentes proporções de *OCs* velhos.

3.2 Flutuações

Com um olhar mais criterioso e, objetivamente, atento nas distribuições apresentadas na figura 3.1 podemos notar um comportamento anômalo. Os três catálogos parecem ter uma depressão na mesma região (ζ_N). Flutuações desse tipo em catálogos com centenas de objetos são comuns, porém a ocorrência de uma flutuação similar em três catálogos diferentes pode ser mais que coincidência. Essa flutuação chama ainda mais a atenção quando percebemos que ela permanece nos dois referenciais apresentados. Além disso, pode-se notar que ao Sul (ζ_S) há uma maior concentração de *OCs*, presente nos três catálogos.

Essas flutuações são pequenas, mas chamam a atenção. Elas são contra-intuitivas, pois a região ζ_N fica ao norte do Disco, e como o Sol também está deslocado ao norte, essa região é mais facilmente observada do que a região ζ_S , que fica ao Sul e, portanto, tem uma maior densidade de objetos entre os alvos e o Sol. Entretanto ζ_N apresenta menos objetos que ζ_S .

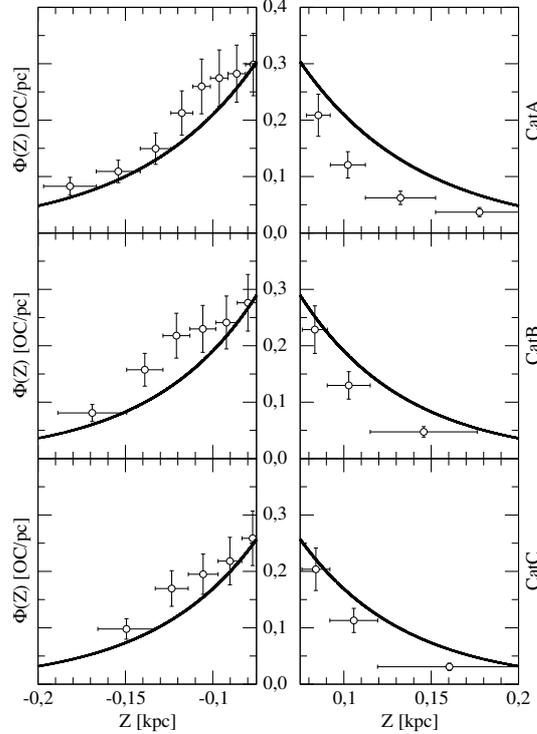


Figura 3.3: Aqui é apresentado um zoom nas regiões de interesse da Fig.3.1, para os três catálogos, para melhor visualização das flutuações

Nesta sessão pretende-se buscar correlações que possam explicar a origem dessas flutuações, com mapas de densidade, por exemplo.

A primeira relação que tentamos traçar é entre OCs e nuvens de poeira (Dutra et al., 2002), de modo que a fuga à curva em ζ_N seria o resultado do obscurecimento de objetos. Como as regiões aparentam estar postas de forma simétrica em relação ao centro do disco, esperamos que haja uma maior incidência de objetos e nuvens se sobrepondo na região ζ_N , se comparada com ζ_S . Essa correlação é apresentada na Fig.3.4.

A Fig.3.4 nos mostra que as regiões Norte e Sul do disco tem um comportamento muito similar no que se refere à sobreposição com nuvens escuras. Ainda que as nuvens possam ser um fator na não detecção de aglomerados abertos em ζ_N , não parecem estar diretamente ligadas com os comportamentos dos OCs nas regiões destacadas. Com essa possibilidade fora do caminho, nos voltamos para correlações intrínsecas das populações. Utilizamos mapas de densidade de probabilidade relacionando a altura (Z) com ℓ , r_\odot , ρ (distância do OC ao Centro Galáctico projetada

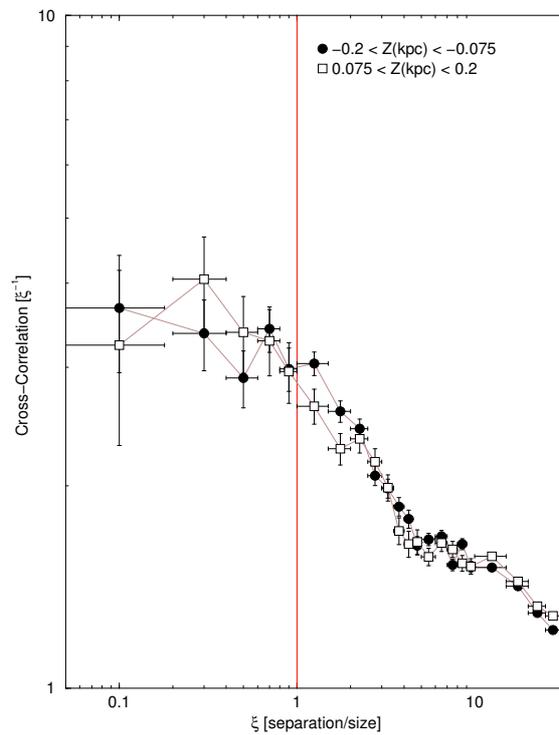


Figura 3.4: Corelação entre nuvens de poeira e CO (Dutra et al., 2002) e os objetos presentes nas flutuações. Os círculos pretos representam objetos de ζ_S e os quadrados brancos representam objetos de ζ_N . A região à esquerda da linha $\xi = 1$ representa os objetos com possibilidade de serem obstruídos pelas nuvens catalogadas por Dutra et al. (2002).

no plano, ou $\rho^2 = X^2 + Y^2$) e t (idade). Transformando o catálogo de valores discretos em um contínuo de probabilidades, onde cada ponto é "espalhado" em uma gaussiana com largura determinada pelos valores dos erros embutidos nos catálogos, apresentamos as figuras 3.5 a 3.8.

A Fig.3.5 apresenta $Zvs\ell$ para a região que, por enquanto, designamos com o sub-índice $j = 1$, ou $|Z| < 0.3kpc$. Os valores usados para o "espalhamento" em ℓ foram fixados em 1° para melhor visualização, tendo em vista que os erros em longitude tendem a ser pequenos. Na parte superior da imagem temos a distribuição para toda a região $j = 1$, podendo-se destacar aqui a maior densidade de objetos com longitude entre 0 e 180° . A parte central apresenta um corte nas regiões de interesse ζ_N e ζ_S , evidenciando a diferença na distribuição dos OCs , porém sem apresentar uma região 'causadora' da mesma. A parte inferior nos mostra que ζ_S é mais populosa que ζ_N , mas sem apresentar regiões em especial. Nem a região Sul tem áreas que possam ser indicadas como responsáveis pelo excesso em ζ_S e nem a parte norte mostra regiões com especial ausência de OCs para explicar a depressão em ζ_N .

A Fig.3.6 mostra como os dados se distribuem em relação a r_\odot , supondo que exista algum fator que diminua a abrangência na detecção de OCs . Se, no mesmo plano de altura há a possibilidade de encontrarmos OCs a maiores distâncias, essa diferença apareceria nessa comparação. O gráfico no topo da Fig.3.6 mostra o comportamento provável dos OCs para a região $j = 1$, de onde podemos visualizar o problema da ausência de OCs próximos ao Sol, mesmo usando CatA, que tinha como um dos objetivos preencher esses "espaços vazios" na Vizinhança Solar. Seguindo para o gráfico central na Fig.3.6 temos a comparação entre ζ_S e ζ_N , onde fica evidente que os OCs parecem se distribuir de forma similar, ainda que a região sul apresente maior concentração de aglomerados, entretanto sem indicar uma região responsável pelas flutuações na distribuição. Na parte inferior da Fig.3.6 temos a representação da diferença de probabilidade entre ζ_N e ζ_S . Aqui vemos o surgimento de uma região a ser destacada, pois apresenta uma diferença entre a quantidade de ζ_N e ζ_S destoante do restante do gráfico.

Para representar temporalmente a amostra CatA, apresentamos a Fig.3.7, onde o gráfico do topo apresenta a população $j = 1$ por completo. Fica evidente a relação entre espalhamento e idade, com os OCs mais velhos estando presentes em regiões mais distantes do plano do Disco, enquanto os mais jovens se concentram nas regiões com menor altura. Esse padrão já era esperado e foi encontrado também por outros autores, como Buckner et al. (2014), mas não com uma imagem tão evidente, como no estudo presente. É fácil notar a densidade de objetos variar e atingir alturas mais

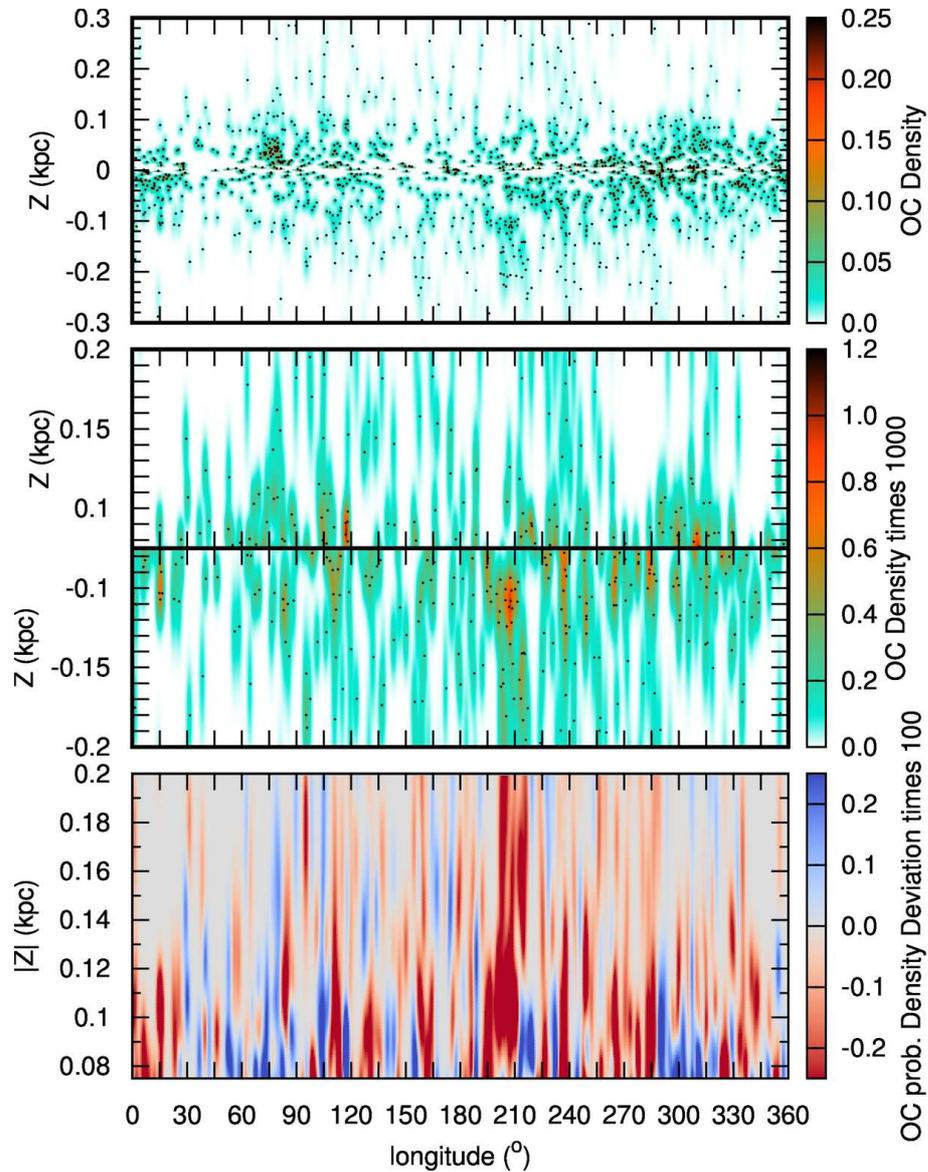


Figura 3.5: No painel superior, apresentamos a distribuição de OCs na região de interesse, com altura inferior a $0.3kpc$. A densidade de probabilidade é apresentada pela escala de cor, enquanto os pontos pretos representam os valores retirados de CatA. No painel central, apenas as regiões ζ_S e ζ_N são apresentadas, para fins de comparação. O painel inferior representa a relação entre as regiões de interesse, onde quanto mais vermelha a região, maior a probabilidade de densidade de objetos presentes em ζ_S em relação a ζ_N , e quanto mais azul, menor.

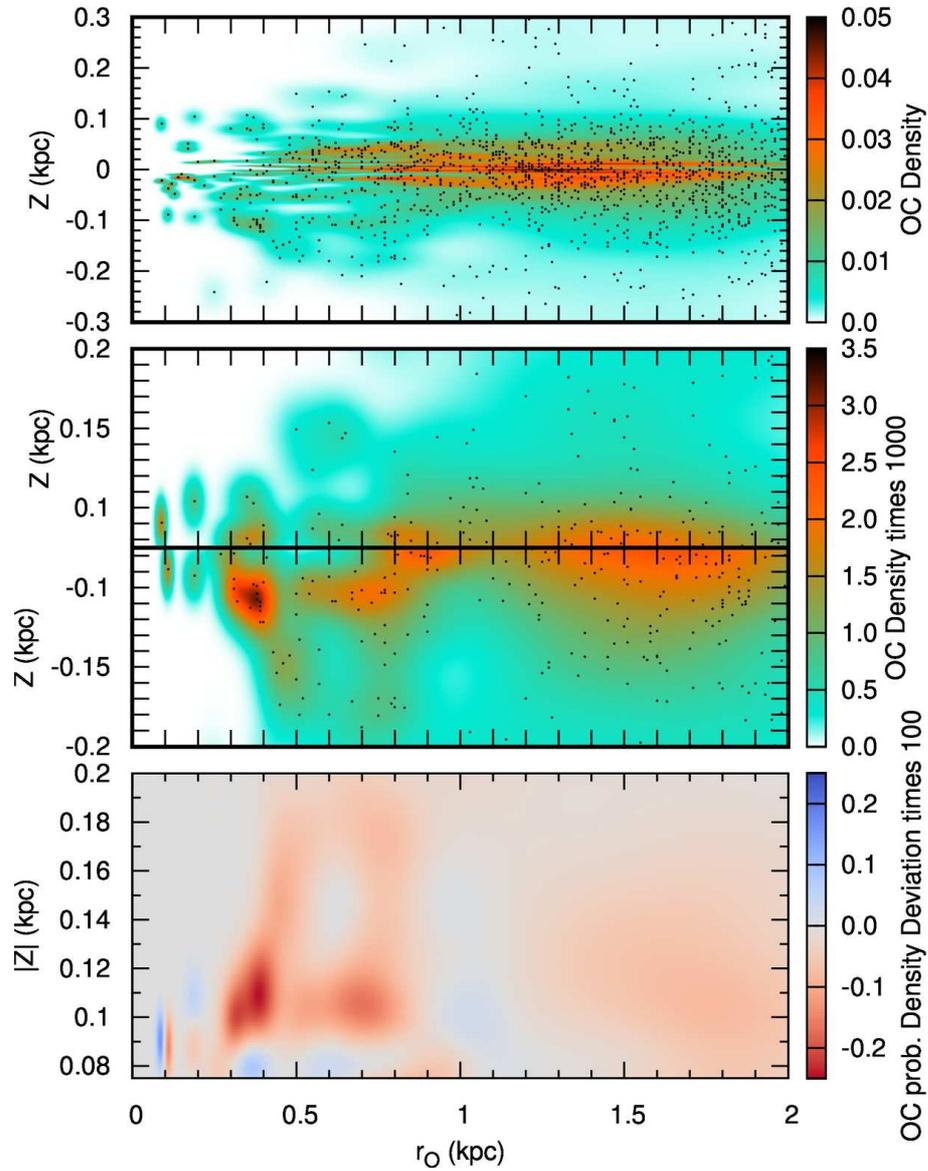


Figura 3.6: No painel superior, apresentamos a distribuição de OCs na região de interesse, com altura inferior a $0.3kpc$. A densidade de probabilidade é apresentada pela escala de cor, enquanto pontos pretos representam os valores retirados de CatA. No painel central, apresentamos uma comparação visual entre as regiões ζ_S e ζ_N . O painel inferior apresenta a diferença nas densidades de probabilidade das regiões, para buscar as áreas mais significativas para o surgimento das flutuações presentes na distribuição de OCs . Quanto mais vermelha a região, maior a probabilidade de encontrar um objeto em ζ_S em comparação com ζ_N . Quanto mais azul, a relação entre ζ_S e ζ_N se inverte.

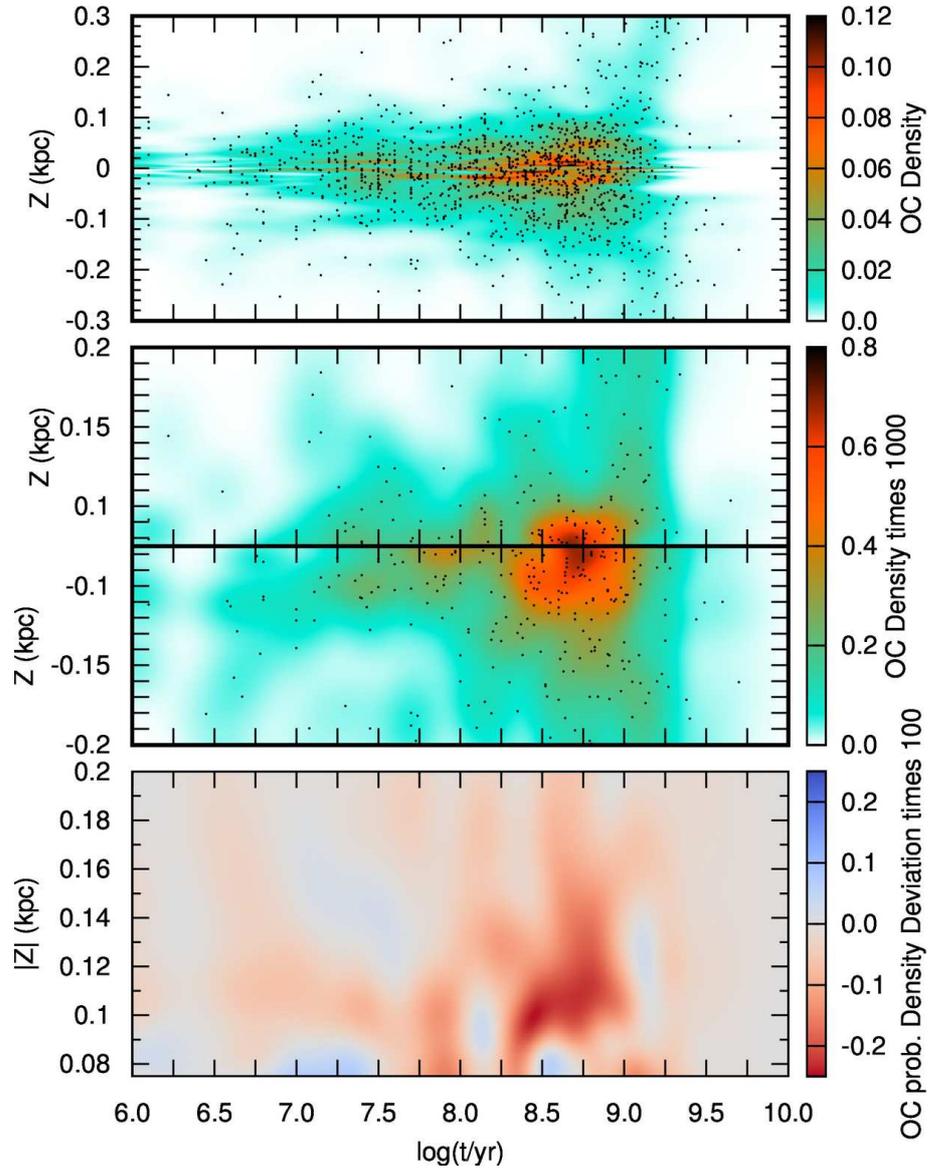


Figura 3.7: No painel superior, apresentamos a distribuição de *OCs* na região de interesse, com altura inferior a $0.3kpc$. A densidade de probabilidade é apresentada pela escala de cor, enquanto pontos pretos representam os valores retirados de CatA. O painel central apresenta uma comparação direta entre ζ_N e ζ_S . No painel inferior é apresentada a diferença na densidade de probabilidade entre as regiões estudadas. As áreas vermelhas apresentam mais objetos ao Sul do que ao norte, enquanto que as regiões azuis apresentam comportamento contrário.

elevadas conforme observamos *OCs* mais velhos. O gráfico apresentado no centro da figura corresponde a um zoom para melhor comparar as regiões ζ_N e ζ_S . Há uma aparente simetria no comportamento de "expansão" conforme os *OCs* envelhecem, porém ζ_S mantém mais *OCs* no que parece ser todo o espectro de idades. Não há, entretanto, nenhum evidente foco que possa ser a fonte da discrepância encontrada em Fig.3.3. Em busca de encontrar discrepâncias que tenham escapado à análise comparada das regiões de interesse, foi feita uma nova distribuição de probabilidades, dessa vez subtraindo dos valores obtidos em ζ_N , os valores calculados para ζ_S . Esta distribuição é apresentada na parte inferior da Fig.3.7 e nos apresenta com uma idade preferencial para o divergente número de *OCs* nas regiões comparadas, entre $10^{8.25}$ e 10^9 yr.

As Fig.3.6 e Fig.3.7 nos apresentam algumas informações sobre a posição e idade onde a discrepância é mais evidente, mas é preciso maior informação para determinarmos a origem dessa assimetria. Para tal tarefa, vamos comparar ζ_N e ζ_S usando ρ como parâmetro. Se obtivermos uma região com assimetria mais acentuada, podemos usar a informação da Fig.3.6 para estimar a origem da fonte da diferença entre as duas regiões. Na parte superior da Fig.3.8 temos a população $j = 1$ relacionada com ρ . Duas características do Disco Galáctico ficam bem representadas aqui: o espessamento do disco, relacionado com a distância ao núcleo, e a diferença de agrupamento dos *OCs* da orla interior ($\rho < 8.5kpc$) e da orla exterior ($\rho > 8.5$). Essas duas características se completam, apresentando uma região densa e próxima ao plano na orla interior, e uma região esparsa e atingindo alturas distantes do plano na orla exterior. Como apresentado na Fig.3.7 e, com as informações sobre a disposição dos *OCs* apresentados na Fig.3.8, podemos formular uma suposição sobre as idades dos objetos presentes na orla exterior e interior. Os objetos parecem se comportar de forma análoga à relação de idades, sugerindo que a orla exterior apresenta maior concentração de *OCs* velhos, enquanto a orla interior teria uma média de idade mais baixa. Sendo assim, os *OCs* não se distanciam apenas do plano do Disco com o tempo, mas também do núcleo Galáctico.

A parte central da Fig.3.8 faz um zoom para melhor compararmos visualmente as regiões ζ_N e ζ_S . Com este corte, a diferente concentração de objetos é consistente, porém sem indicar alguma região onde essa diferença seja mais relevante. O que nos leva para o gráfico apresentado na parte inferior da Fig.3.8, onde é apresentada a subtração das probabilidades de encontrarmos um objeto, com relação a $|Z|$ e ρ . Analisando este gráfico podemos constatar que a orla interior é levemente mais populosa em ζ_N , porém a orla exterior apresenta um pico na distribuição de proba-

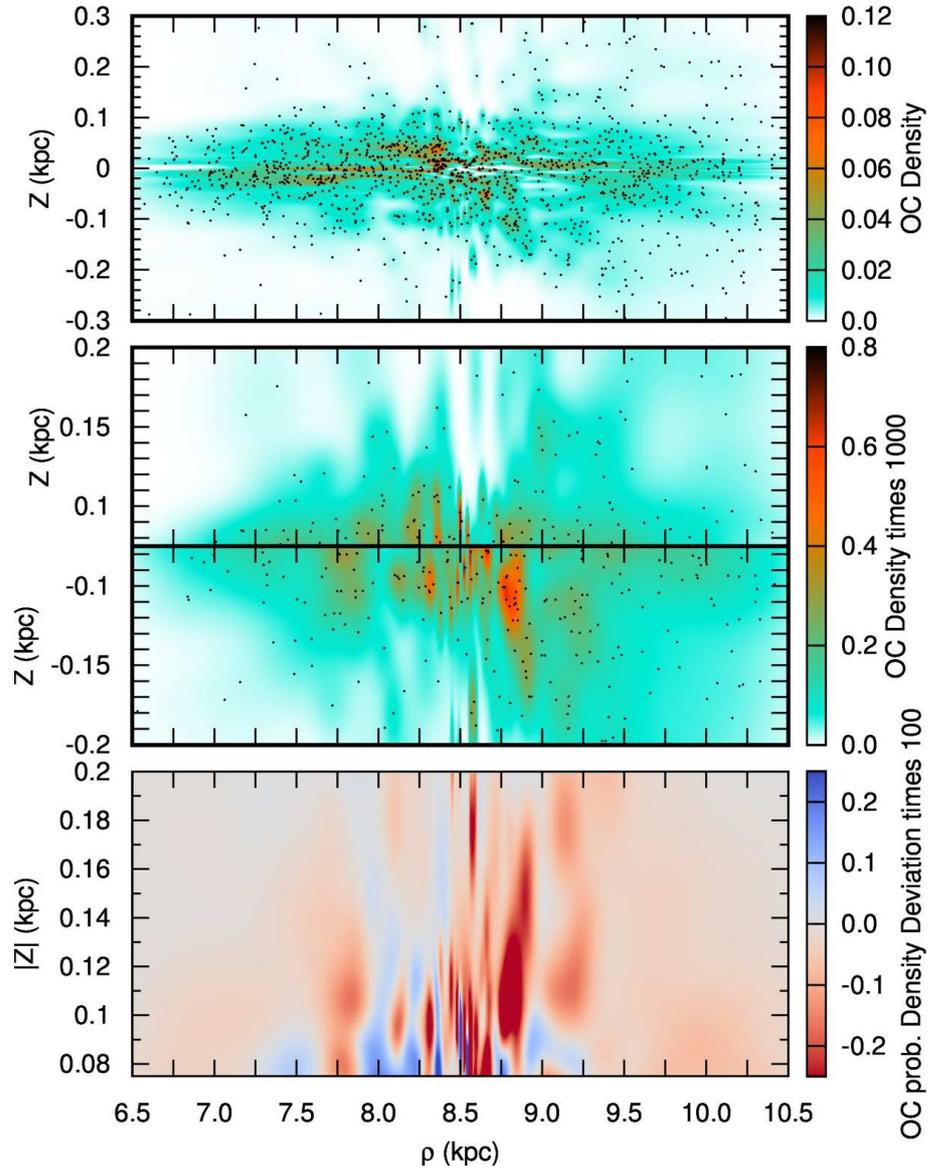


Figura 3.8: No painel superior, apresentamos a distribuição de *OCs* na região de interesse, com altura inferior a $0.3kpc$. A densidade de probabilidade é apresentada pela escala de cor, enquanto pontos pretos representam os valores retirados de CatA. O painel central compara as regiões ζ_N e ζ_S . No painel inferior subtraímos, pixel por pixel, os valores presentes em ζ_S dos obtidos em ζ_N , criando um mapa da diferença nas densidades de probabilidades. As regiões vermelhas representam sobredensidades ao Sul, enquanto as regiões azuis representam uma sobredensidade ao Norte.

bilidade em ζ_S . Este pico é mais intenso numa região que varia de $\rho = 8.7 - 9.0 kpc$, com uma altura de $|Z| = 0.09 - 0.16 kpc$.

As Fig.3.5 a 3.8 apresentam uma possível origem para a discrepância entre ζ_S e ζ_N . Os *OCs* presentes nos locais com maior flutuação se encontram entre 300 e 500 *pc* distantes do Sol, 8.7 e 9 *kpc* distantes do Centro Galáctico, possuem uma idade entre 10^8 e 10^9 yr, e uma altura relativa ao plano variando entre 90 e 150 *pc*. Porém, ainda que a diferença na densidade de *OCs* seja mais significativa na região e idades delimitadas acima, essas diferenças aparecem fora destas delimitações, de forma provavelmente menos significativa.

3.3 Estrutura e População

Ao identificar apenas uma região discrepante responsável pelas flutuações, nós chegamos a um problema: como pode apenas uma região ser a representação de flutuações opostas, em hemisférios opostos? A hipótese proposta, então, foi que as flutuações deveriam estar ligadas, fazendo com que os *OCs* que deveriam aparecer em ζ_N apareçam em ζ_S . Como consequência desta proposta, o perfil da altura modular dos aglomerados do disco deveria ser fiel à Eq.3.1, em uma exponencial negativa, sem flutuações. Para testar esta hipótese, apresentamos a Fig.3.9.

A Fig.3.9 mostra o comportamento dos objetos presentes nos três catálogos usados neste trabalho, e mostra que as flutuações não são mais aparentes, reforçando a hipótese de correlação entre as flutuações. A parte mais interessante, entretanto, aparece quando vamos para regiões mais distantes do plano do disco, com alturas a partir de 200 *pc*, em módulo. Consistentemente temos um maior número de *OCs* do que o esperado pela distribuição exponencial descrita pelos parâmetros apresentados na Tab.3.1. Esses *OCs* parecem, entretanto, aproximar uma segunda exponencial, com uma escala de altura significativamente mais elevada. O comportamento apresentado na Fig.3.9 é muito semelhante ao apresentado em (Gilmore & Reid, 1983), onde, usando estrelas ao invés de aglomerados abertos, é apresentada uma diferença comportamental dos objetos estudados, que foram, portanto, divididos em duas populações: o disco fino e espesso, onde o ponto de intersecção ficava em $|Z| \sim 1 kpc$.

O catálogo CatA apresenta uma maior escala de altura, enquanto CatC tem a menor escala de altura, para a região. Essa diferenciação pode ser traçada às diferenças dos catálogos, apresentadas em Fig.???. CatA possui mais objetos, é completo a maiores alturas e tem uma mais significativa população de *OCs* velhos, se comparado com CatB e, mais visivelmente, CatC. Com o número de objetos e

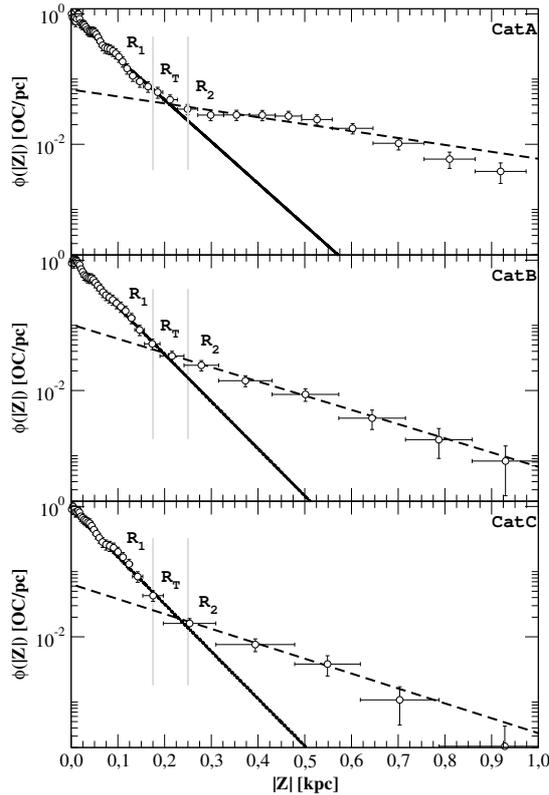


Figura 3.9: Apresentamos a distribuição de *OCs* com relação ao módulo da altura ($|Z|$) para os três catálogos utilizados. A linha cheia preta foi criada usando os dados da Tab.3.1, que considerava apenas objetos próximos ao disco, aproximando o comportamento dos objetos presentes na região R_1 , enquanto a linha tracejada é obtida utilizando a distribuição modular e usando apenas os objetos contidos na região R_2 . As linhas em cinza são usadas para delimitar a vizinhança entre R_1 , R_T e R_2 , que foram determinadas visualmente.

Tabela 3.2: Parâmetros das populações R_1 e R_2 . Parâmetros com sub-índice $j = 1$ se referem à população presente na região R_1 , e os com $j = 2$ estão presentes em R_2

Catálogo	CatA	CatB	CatC
$Z_{\odot}(pc)$	4.13 ± 1.30	5.47 ± 1.06	4.68 ± 1.60
$Z_{h,1}(pc)$	67.79 ± 3.96	59.97 ± 3.15	59.83 ± 4.74
$\phi_{0,1}(\frac{OC}{pc})$	0.92 ± 0.03	1.01 ± 0.03	0.90 ± 0.03
$Z_{h,2}(pc)$	409.33 ± 52.82	199.09 ± 7.99	189.95 ± 9.13
$\phi_{0,2}(\frac{OC}{pc})$	0.07 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.06 ± 0.01
$\theta(^{\circ})$	$-1'40.16''$	$-2'12.80''$	$-1'53.67''$

a capacidade de profundidade dos catálogos, é esperado que CatC apresente uma escala de altura menor.

Classificar o comportamento apresentado na Fig.3.9 como o resultado de duas diferentes populações é ousado, por ser em uma altura onde, inicialmente, deveríamos identificar apenas a componente do disco fino. Para tanto, designamos, pelo gráfico em Fig.3.9 três diferentes regiões: R_1 ($|Z| < 175pc$), R_T ($175pc < |Z| < 250pc$) e R_2 ($|Z| > 250pc$). A região R_T serve apenas para separar as regiões R_1 e R_2 , evitando a *contaminação* das amostras R_1 e R_2 . Podemos, agora, construir uma distribuição para comparar R_1 e R_2 com relação às idades.

A Fig.3.10 indica uma clara diferença comportamental entre as populações presentes em R_1 e R_2 . Como esperado, R_1 apresenta uma população jovem muito representativa, com uma clara queda na densidade de objetos a partir de $\sim 10^9yr$. R_2 , por outro lado, possui uma população jovem consideravelmente menos relevante, chegando a uma diferença de densidade de duas ordens de grandeza entre OCs com $10Myr$ e $1.6Gyr$, em CatA. As diferenças entre os catálogos ficam, claramente, praticamente isoladas em R_2 , pois os comportamentos em R_1 são consistentes entre si. Como mencionado anteriormente, CatA possui mais objetos com idades e r_{\odot} elevados, evidenciando os diferentes comportamentos, enquanto CatC possui uma base de dados incompleta para determinarmos comportamentos com precisão para R_2 .

As imagens apresentadas indicam que os OCs em R_1 e R_2 se comportam como duas populações distintas, portanto calculamos os parâmetros de R_2 e os comparamos com os apresentados em Tab.3.1:

Os resultados apresentados para a escala de altura da população $j = 2$ são semelhantes aos resultados obtidos para o Disco fino, quando usamos estrelas de campo para determinar os parâmetros (Bovy et al., 2015).

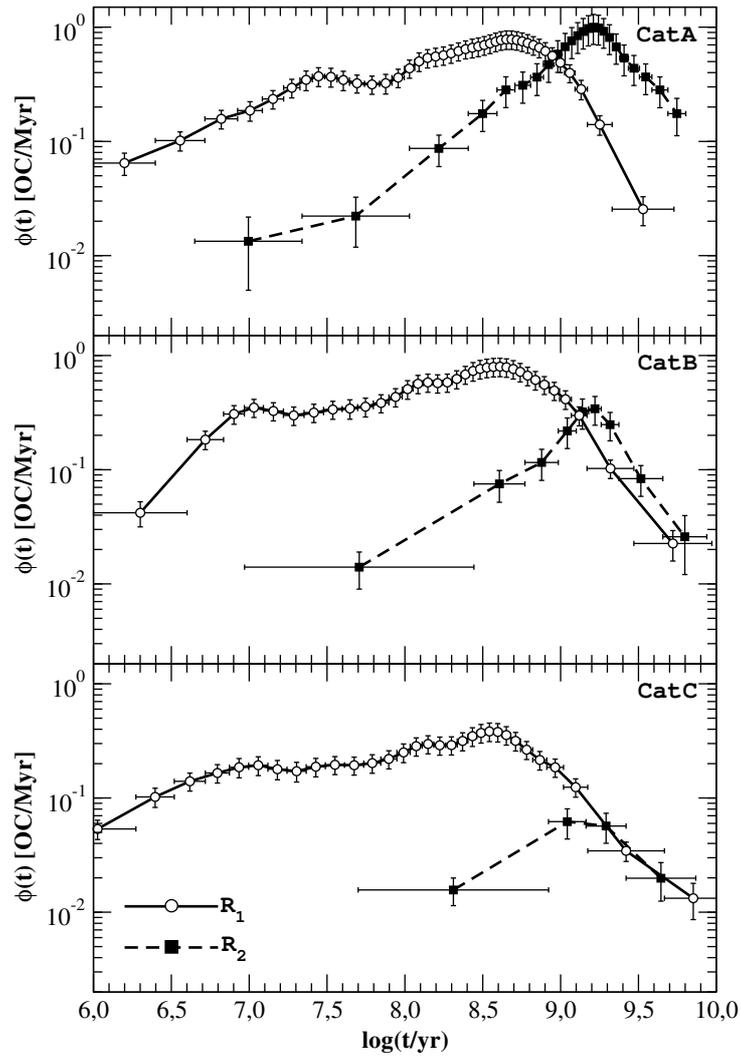


Figura 3.10: Apresentamos a distribuição de idades dos *OCs*, separados por região, para cada um dos três catálogos usados. A linha cheia, com pontos marcados por esferas brancas, representa a distribuição dos *OCs* presentes em R_1 , enquanto a linha tracejada, com pontos marcados por quadrados pretos, representa a distribuição dos *OCs* da região R_2 .

Capítulo 4

Considerações Finais

Determinamos alguns dos parâmetros estruturais da população de *OCs* da vizinhança Solar presentes no Disco Galáctico, onde encontramos uma dependência da escala de altura do disco com a altura dos *OCs*. Essa dependência nos levou a determinar a existência de duas possíveis sub-populações, com diferentes comportamentos estruturais e formadas por *OCs* com um diferente espectro de idades. Denominamos de $j = 1$ a população jovem próxima ao plano do Disco, que apresenta uma escala de altura de $\sim 69pc$, $\sim 60pc$ e $59pc$ para os catálogos CatA, B e C, respectivamente. Já a população $j = 2$, composta por aglomerados mais velhos e mais distantes do plano do Disco, apresentaram uma escala de altura de $409pc$, $199pc$ e $190pc$, para os catálogos CatA, B e C, respectivamente. Ao levar em consideração as escalas de altura de R_2 é preciso lembrar a diferença entre os catálogos, que mostram que tanto CatB quanto CatC apresentam poucos objetos catalogados que possam pertencer a esta população, o que prejudica a obtenção de parâmetros. CatA, portanto, é a melhor representação de R_2 , ainda que apresente um valor de $Z_{h,2}$ substancialmente mais elevado. Os parâmetros destas distintas populações se assemelham aos resultados obtidos com diferentes métodos. O uso de *OCs* para determinar a escala de altura do disco fino apresenta escalas de altura semelhantes a $Z_{h,1}$ na literatura (Bonatto et al., 2006, Buckner et al., 2014), enquanto os resultados obtidos com estrelas gigantes vermelhas (Bovy et al., 2015) tendem para valores mais próximos aos obtidos de R_2 .

O estudo proveniente das flutuações encontradas na região $75 < |Z(pc)| < 200$ mostra que, ainda que pequenas, as diferenças são consistentes e que apresentam uma maior representação em uma distância solar (r_{\odot}) variando entre 300 e 500pc, uma distância projetada no plano do disco (ρ) entre 8.7 e 9kpc, com objetos com idades variando de $10^{8.25}$ a $10^9 yr$ e uma altura modular ($|Z|$) variando de 90 a 160pc.

Essas diferenças apresentam um comportamento aparentemente antissimétrico, com o acúmulo de objetos ao sul sendo, de alguma forma, compensado por uma redução de objetos ao norte, de forma que o perfil exponencial da distribuição modular se mantenha. Essas flutuações estão presentes em todos os catálogos usados neste estudo, com características similares. Um estudo específico dos *OCs* presentes nestas regiões podem dar mais informações. Identificar se existem diferenças de metalicidade entre ζ_S e ζ_N seria o próximo passo. Outra possibilidade é avançar para regiões mais distântes do Sol.

Bibliografia

- [1] Binney J. & Merrifield M. 1998, in *Galactic Astronomy*, Princeton series in astrophysics (Princeton, NJ: Princeton University Press)
- [2] Bonatto C., Kerber L.O., Bica E., & Santiago B.X. 2006, *A&A*, 121, 121-135
- [3] Bovy J., Rix H.-W., Schlafly E.F., Nidever D.L., Holtzman J.A., Shetrone M., Beers T.C. 2015, *ApJ*, 823, 30
- [4] Buckner A.S.M. & Froebrich D. 2014, *MNRAS*, 444, 290-302
- [5] Cohen M. 1995, *ApJ*, 444, 874
- [6] Dias W.S., Alessi B.S., Moitinho A., & Lépine J.R.D. 2002, *A&A*, 389, 871
- [7] Dutra C. M., Bica E. 2002, *A&A*, 383, 631
- [8] Froebrich D., Scholz A., Raftery C.L. 2007, *MNRAS*, 374, 399–408
- [9] Gilmore G., Reid N. 1983, *MNRAS*, 202, 1025
- [10] Hubble E. 1936, *Science*, 84, 509
- [11] Janes K., Phelps R.L. 1994, *AJ*, 108, 1773
- [12] Kharchenko N. V., Pakulyak L. K., & Piskunov A. E. 2003, *Astron. Rep.*, 47, 263
- [13] Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Schilbach E., Röser S., & Scholz R.-D. 2012, *A&A*, 543, A156
- [14] Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Schilbach E., Röser S., & Scholz R.-D. 2013, *A&A*, 558, A53
- [15] Lada C.J. & Lada E.A. 2003, *ARA&A*, 41,57

- [16] Majewski S.R. 1993, *ARA&A*, 31, 575
- [17] Mermilliod J.-C. 1995, in Egret D., Albrecht M.A., eds, *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 203, *Information and On-Line Data in Astronomy*. Kluwer, Dordrecht, p. 127
- [18] Schmeja S., Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Röser S., Schilbach E., Froebrich D., & Scholz R.-D. 2014, *A&A* 568, A51