

Artigos Gerais

A velocidade de rotação dos braços espirais da Via Láctea (*The rotation velocity of the spiral pattern of the Milky Way*)

Wilton S. Dias¹ e Jacques Lépine²

¹*IP&D, UNIVAP, São José dos Campos, SP, Brasil*

²*Departamento de Astronomia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

Recebido em 13/12/2005; Aceito em 1/2/2006

Nós determinamos a velocidade de rotação do padrão espiral da galáxia através da observação dos locais de nascimento de aglomerados abertos de estrelas no disco galáctico em função da sua idade. Nossa medida não depende de qualquer modelo da estrutura espiral, como a existência de um certo número de braços, ou a presença da barra na região central. Os resultados, primeiro confirmam que uma fração dominante dos aglomerados abertos se formam nos braços espirais. Nós encontramos o resultado de que os braços giram como corpos rígidos, como predito pela teoria clássica de ondas espirais, e mostramos que o raio de corrotação encontra-se próximo à órbita solar galáctica. Essa proximidade tem muitas conseqüências interessantes, como a preservação da vida na Terra e um novo entendimento da história de formação estelar na vizinhança solar e da evolução da abundância de elementos no disco galáctico.

Palavras-chave: Via Láctea, estrutura espiral, braços espirais, .

We determine the rotation velocity of the spiral pattern of the Galaxy, by direct observation of the birthplaces of open clusters of stars in the galactic disk as a function of their age. Our measurement does not depend on any specific model of the spiral structure, like the existence of a given number of spiral arms, or the presence of a bar in the central regions. The results first confirm that a dominant fraction of the open clusters are formed in spiral arms, a question which has been a subject of controversy. We find that the spiral arms rotate like a rigid body, as predicted by the classical theory of spiral waves, and show that the corotation radius is close to the solar galactic orbit. This proximity has many interesting consequences, like the preservation of life on the Earth, and a new understanding of the history of star formation in the solar neighborhood, and of the evolution of the abundance of elements in the galactic disk.

Keywords: Milk Way, spiral structure, spiral arms.

1. Introdução

De acordo com a teoria clássica de ondas espirais na Galáxia [1,2], o padrão espiral gira como um corpo rígido, enquanto o gás e as estrelas do disco galáctico apresentam rotação diferencial. Os braços espirais estão restritos a um intervalo entre as ressonâncias interna e externa de Lindblad, enquanto que o padrão de velocidade angular Ω_p é igual a $\Omega \mp \kappa/2$, Ω sendo a velocidade angular de rotação do disco e κ a frequência epicyclica. O raio galáctico onde $\Omega = \Omega_p$, chamado raio de corrotação, encontra-se entre as ressonâncias de Lindblad. Uma vez que κ , a frequência epicyclica, é uma função apenas de Ω e de sua derivada $d\Omega/dr$ [3], para uma curva de rotação da Galáxia, os raios de ressonância de Lindblad e a corrotação dependem apenas da velocidade do padrão espiral.

O raio de corrotação em nossa Galáxia é motivo de

controvérsia. Lin [2] e seus colaboradores situaram o raio de corrotação nos limites do disco da Galáxia, cerca de 16 kpc do centro galáctico (CG). Alguns autores [4,5] acreditam que a corrotação encontra-se próxima à órbita do Sol (R_0), enquanto outros autores [6,7,8] acreditam que o padrão espiral gira tão rápido que a corrotação está situada a 3-4 kpc do centro da Galáxia e com isso a ressonância externa de Lindblad encontra-se próxima à órbita do Sol.

Além dessa discussão, em paralelo à teoria clássica, há diferentes interpretações da estrutura espiral, como a de que os braços são constituídos por uma série de ondas transientes com diferentes velocidades (e conseqüentemente diferentes raios de corrotação) [9,10], e a idéia de que os braços não são ondas de densidade, mas o resultado de auto-propagação de processos de formação estelar estocásticos [11]. Assim é de fundamental im-

¹E-mail: wilton@univap.br.

portância a determinação da velocidade de rotação do padrão espiral, bem como verificar se diferentes braços apresentam diferentes velocidades de rotação.

Neste trabalho nós apresentamos um novo método de medir a velocidade dos braços, baseado nas órbitas dos aglomerados abertos estelares. Trata-se da primeira determinação com base observacional da velocidade do padrão espiral de rotação.

A hipótese básica que adotamos é que no disco das galáxias espirais, em épocas atuais, a formação estelar e especialmente a formação de aglomerados de estrelas, ocorrem apenas (ou quase apenas) nos braços espirais. É conhecido, desde antes da teoria dos braços espirais, que as ondas de choque que ocorrem nos braços são os mecanismos ativadores da formação estelar. Há evidências observacionais desse processo em outras galáxias, pois vemos regiões HII e estrelas de alta

massa concentradas em braços espirais. O fato de os aglomerados abertos estelares jovens serem traçadores da estrutura espiral é conhecido há várias décadas [12].

Os resultados do nosso trabalho claramente justificam nossa hipótese inicial.

A distribuição no plano galáctico dos aglomerados abertos obtidos do nosso catálogo [13] é mostrada na Fig. 1, para aglomerados mais jovens que 7 milhões de anos (painel da esquerda), e para aglomerados mais velhos que 30 milhões de anos (painel da direita). Pode-se ver a partir dessa figura que os aglomerados iniciam sua vida nos braços espirais e que em cerca de 20 milhões de anos eles migram para regiões inter-braços. Porém a estrutura espiral não visível no painel da direita pode ser recuperada através de uma correção na posição dos aglomerados.

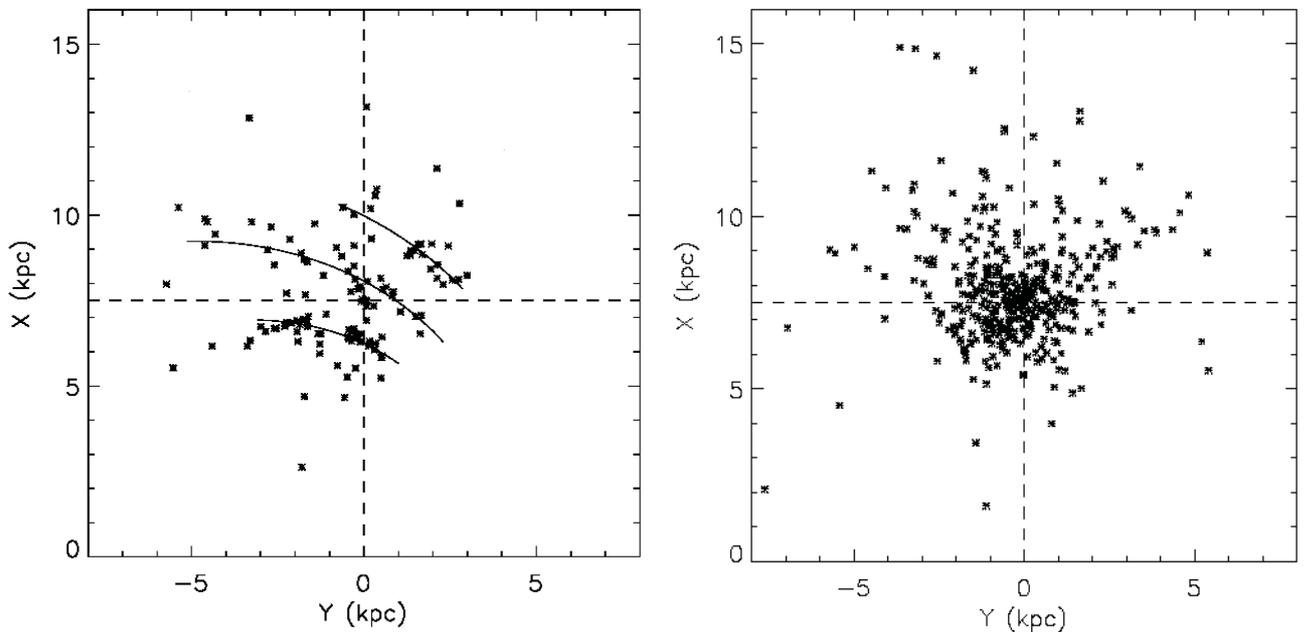


Figura 1 - Amostra de aglomerados abertos estelares com idade < 7 milhões de anos (esquerda) e > 30 milhões de anos (direita), na vizinhança solar. O Sol está nas coordenadas $(0,7,5)$ e o centro galáctico em $(0,0)$; distâncias são dadas em kpc.

2. Local de nascimento dos aglomerados abertos

Como um primeiro passo, nós encontramos o local de nascimento de cada aglomerado, integrando suas órbitas para trás no tempo, por um tempo igual à sua idade, a partir das condições iniciais atuais (posição e velocidade espacial). O local de nascimento de um aglomerado é suposto como representar um ponto do braço espiral, um tempo T no passado. Em um dos métodos empregados nós usamos para encontrar os locais de nascimento a integração numérica da órbita (uti-

lizamos Runge-Kutta de ordem 4) no plano galáctico, considerando um potencial axi-simétrico da Galáxia. A força gravitacional radial agindo sobre a partícula é a força centrípeta associada com a velocidade da curva de rotação num dado raio. As velocidades de um dado aglomerado nas direções radial e tangencial galactocêntricas são derivadas dos movimentos próprios e velocidades radiais observados. Porém para a integração das órbitas são necessários além da velocidade, a distância e idade dos aglomerados. Obedecendo a esse critério encontramos 212 aglomerados abertos em nosso catálogo. No entanto, em alguns casos, dependendo do

método adotado para derivar a velocidade de rotação do padrão espiral, como mostrado a seguir, gostaríamos de utilizar uma amostra maior de aglomerados.

Por essa razão utilizamos um segundo método para determinar os locais de nascimento, baseado na hipótese de órbitas puramente circulares. Nós simplesmente giramos as posições dos aglomerados de um ângulo $\Omega_p \times T$, a partir de suas posições atuais até os locais de nascimento utilizando a curva de rotação da Galáxia. Nesse caso utilizamos 612 aglomerados que apresentavam distâncias e idades conhecidas em nosso catálogo.

3. Determinação da velocidade de rotação do padrão espiral

A forma mais simples de proceder, depois de obtidos os locais de nascimento, é observar diretamente a rotação do padrão espiral que eles formam, como ilustrado na Fig. 2. Nós primeiro ajustamos segmentos de espirais (indicados por linhas pontilhadas) aos locais de nascimento da amostra de aglomerados abertos jovens (5-8 milhões de anos, não mostrada). Depois giramos esses segmentos de espiral em torno do centro galáctico para obter o melhor ajuste de aglomerados mais velhos (9-15 milhões de anos, local de nascimento dos aglomerados mostrados por asteriscos ou cruzes na figura, ajustados com linhas sólidas). O ângulo de rotação nesse exemplo é $\alpha = 8^\circ$.

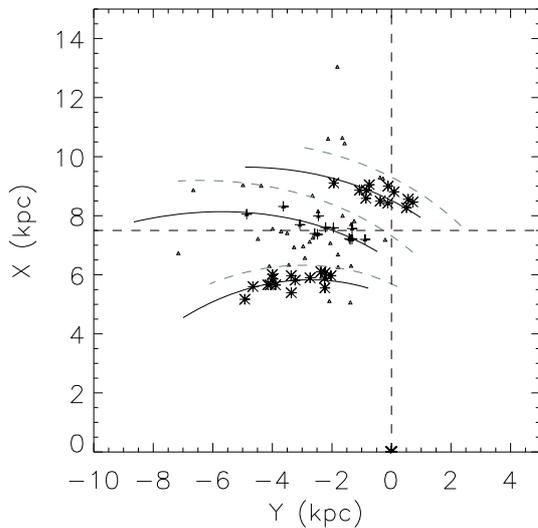


Figura 2 - Locais de nascimento de aglomerados abertos com idades entre 9-15 milhões de anos (média 11,6 milhões de anos) no plano galáctico, obtidos pela rotação direta com a curva de rotação com velocidade constante de 210 km/s. A linha pontilhada foi ajustada à amostra de aglomerados jovens, não mostrada, com idades entre 5-8 milhões de anos (média de 6,2 milhões de anos). As linhas sólidas são os mesmos braços das linhas pontilhadas, girados por um ângulo de 8° , em torno do centro da Galáxia. Diferentes símbolos foram usados apenas para indicar os aglomerados que pertencem à cada braço, ou no caso dos triângulos para indicar aglomerados que distam mais que 0,5 kpc do braço.

Para cada intervalo de idades, o único parâmetro ajustado é o ângulo α . Os valores de α necessários para ajustar amostras de diferentes idades são mostrados na Fig. 3. Para maximizar o número de aglomerados em cada amostra, nós permitimos uma pequena intersecção entre os intervalos de idades. No exemplo da Fig. 3, adotamos os locais de nascimento obtidos por uma rotação circular. Uma vez que a maioria dos aglomerados utilizados estão situados dentro de um raio galactocêntrico de $R_0 \pm 2.0$ kpc, nossos cálculos utilizam apenas a fração da curva de rotação situada nesse intervalo (Fig. 4). Devido ao fato de a curva de rotação ser bem conhecida próximo ao Sol, mostrando-se relativamente plana, uma aproximação linear é suficiente nesse intervalo (maiores detalhes podem ser consultados em [3]).

Com as inclinações das retas ajustadas podemos calcular Ω_p , uma vez que 1° /milhão de anos é equivalente à 17 kms/s/kpc.

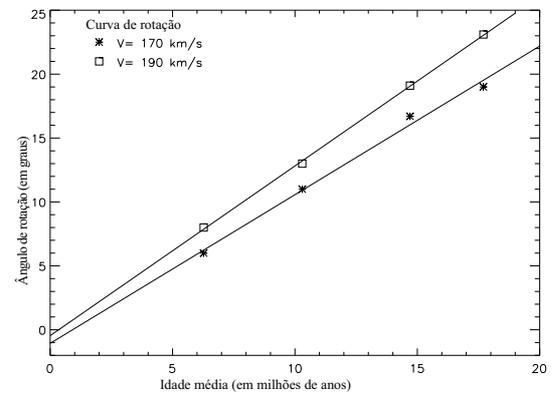


Figura 3 - Ângulo de rotação necessário para ajustar os locais de nascimento das amostras de diferentes idades com o mesmo padrão espiral que representa a estrutura espiral atual. Nesse exemplo, os locais de nascimento foram determinados com duas curvas de rotação da Galáxia (curvas com velocidades constantes com $V=170$ km/s e $V=190$ km/s). Os intervalos das amostras são, em milhões de anos, 0-8 (média 6,27), 7-14 (média 10,3), 12-18 (média 14,7), 15-22 (média 17,7). Com as inclinações das retas ajustadas podemos calcular Ω_p , uma vez que 1° /milhão de anos é equivalente à 17 kms/s/kpc. O raio de corotação derivado ($= V_0/\Omega_p$) é 8,6 e 8,1 kpc respectivamente, nesse exemplo.

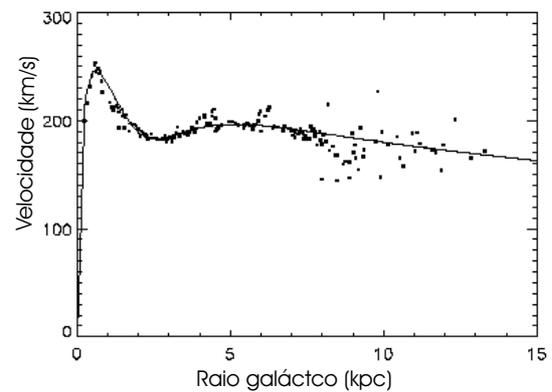


Figura 4 - Curva de rotação da Galáxia construída com dados de Clemens [14] corrigidos para $R_0 = 7,5$ kpc e $V_0 = 190$ km/s. A curva é ajustada pela expressão $V = 228 \exp(-r/50 - (3,6/r)^2) + 350 \exp(-r/3,25 - 0,1/r)$.

Um segundo método para determinar a velocidade do padrão espiral é mais conveniente para o caso de amostras pequenas uma vez que não separa os aglomerados em intervalos de idades. Nesse método o local de nascimento de um aglomerado supostamente representa um ponto do braço espiral, num tempo T no passado. Se nós girarmos esse ponto para frente (no tempo) por um ângulo $\Omega_p \times T$ em torno do CG, nós obtemos um ponto do braço nos dias atuais. Assim, as posições atuais dos braços podem ser reconstruídas usando aglomerados de idades diferentes. Ω_p é não conhecido.

Esse método adota intrinsecamente a hipótese de

que os aglomerados não migraram para fora do braço que nasceram durante o tempo T . Portanto é válido para aglomerados jovens com idades até cerca de 20 a 30 milhões de anos. Na Fig. 5 apresentamos as posições atuais e “reconstituídas” por $\Omega_p \times T$ para efeito de comparação. É possível notar que a melhor estimativa de Ω_p é dada pela maior coincidência entre as posições (algo entre 20 e 30 km/s/kpc). Nós variamos Ω_p até obter a menor diferença dos pontos com relação ao grupo de 3 braços (Fig. 6), representados pelos segmentos de espirais.

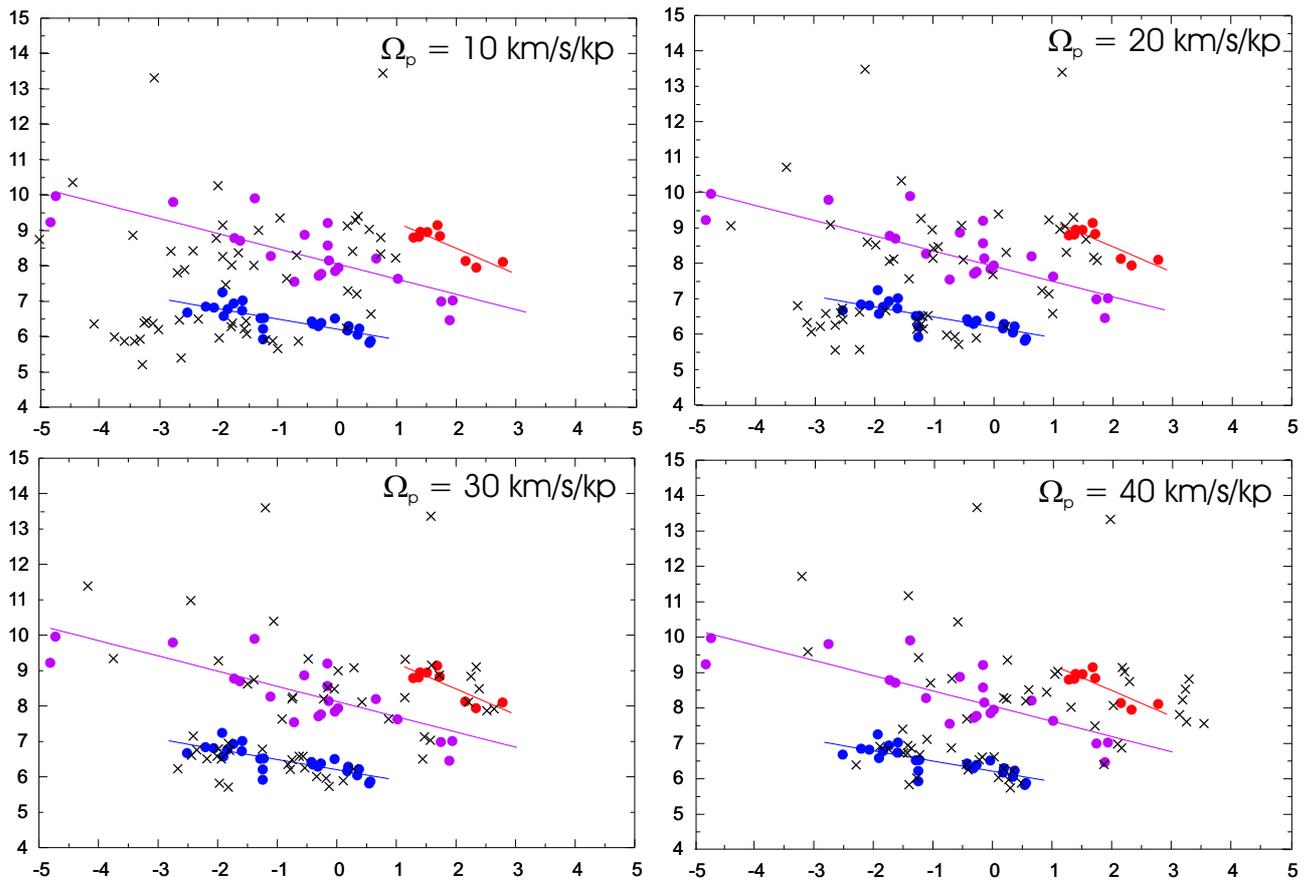


Figura 5 - Nos painéis são apresentadas as posições atuais dos aglomerados abertos (●) e as posições re-determinadas (×) obtidas por $\Omega_p \times T$. Os segmentos referentes aos braços são apenas indicativos de suas localizações. Os eixos e posição do Sol e do centro galáctico são os mesmos apresentados na Fig. 1. Pela comparação visual pode-se perceber que o valor de Ω_p que melhor reproduz as posições atuais deve estar entre 20km/s/kpc e 30 km/s/kpc.

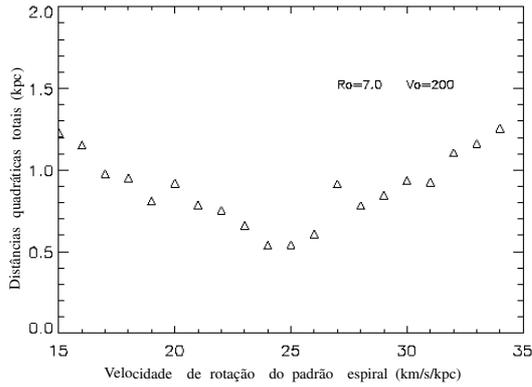


Figura 6 - Procedimento para encontrar a melhor estimativa de Ω_p . O melhor valor (25 km/s/kpc) é dado pela mínima soma dos quadrados das distâncias dos aglomerados abertos aos braços ajustados. Neste caso, $R_0 = 7,0$ kpc, $V_0 = 200$ kms/s, com a curva de rotação de Clemens [14], usando a integração das órbitas para obter os locais de nascimento dos aglomerados, e com a amostra de aglomerados com idades ente 0 e 30 Myr.

Os locais de nascimento obviamente dependem da curva de rotação adotada. Em nosso trabalho testamos diferentes curvas de rotação e valores de R_0 e V_0 . Nós resumimos os resultados encontrados na Fig. 7 para os valores de Ω_p e Fig. 8 para o raio de corrotação.

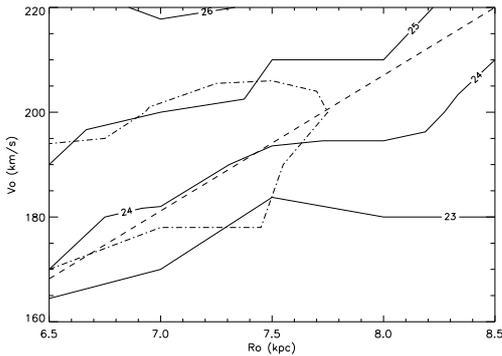


Figura 7 - Mapa de contorno da velocidade de rotação do padrão espiral obtido com as curvas de rotação de CO. As linhas pontilhadas representam o lócus da melhor estimativa da razão V_0/R_0 , baseado nas constantes de Oort. As linhas de contorno pontilhadas representam a região onde o melhor ajuste foi obtido.

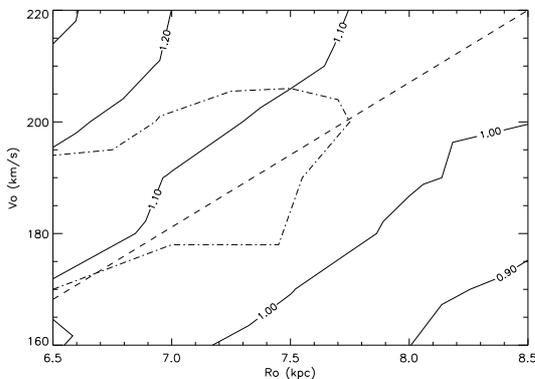


Figura 8 - Mapa de contorno da razão do raio de corrotação e o raio da órbita solar, R_c/R_0 , baseada na mesma análise da Fig. 7.

4. Erros associados com as idades dos aglomerados

Na maior parte dos catálogos como o nosso, métodos diferentes utilizados por diferentes autores, com diferentes dados são utilizados para determinar as idades dos aglomerados. Nós seguimos nesse trabalho a discussão feita por de la Fuente e de la Fuente [15], que compararam idades publicadas por diferentes autores para uma amostra de aglomerados bem estudados, encontrando uma diferença média de 22%. Numa série de testes, depois de estimar Ω_p nós multiplicamos as idades dos aglomerados por um fator entre 0,8 e 1,2, aleatoriamente distribuídos, e em seguida re-determinamos Ω_p . O valor mínimo mostrado na Fig. 6 tornou-se menos pronunciado, mas nenhum efeito sistemático foi introduzido. Em geral, nosso método não é excessivamente dependente da idade dos aglomerados, uma vez que a idade é usada numa direção para determinar o local de nascimento e depois na direção oposta para girar o ponto correspondente até sua posição na posição atual do braço. Nós adotamos como erro na medida de Ω_p o erro na determinação do mínimo da Fig. 6, o qual já inclui o efeito de erros aleatórios das idades dos aglomerados.

5. Implicações e predições

Os valores do raio de corrotação R_c que obtivemos com diferentes métodos e diferentes subamostras de aglomerados abertos mostram R_c ligeiramente maior que R_0 em todas as determinações (R_c/R_0 situado no intervalo 1,02 a 1,14, sendo a melhor estimativa $R_c/R_0 = 1.08 \pm 0.06$). Dentro da precisão do nosso método, os três principais braços na vizinhança solar apresentam a mesma velocidade de rotação.

Nossos resultados fortalecem a idéia de que os braços espirais da nossa Galáxia giram como corpos rígidos. A velocidade de rotação do padrão espiral é 25 km/s/kpc, para $R_0 = 7.5$ kpc and $V_0 = 190$ km/s. Para quase todos os aglomerados, foi possível determinar o local de nascimento o qual coincide com a posição de um braço espiral na época do nascimento. Essa observação, que não é facilmente realizável em galáxias externas, fornece um suporte robusto à visão de que os braços espirais são os mecanismos de formação estelar.

A proximidade do Sol ao raio de corrotação quer dizer que ele tem uma pequena velocidade com relação aos braços espirais, e que há longos períodos entre passagens sucessivas do Sol pelos braços espirais. A passagem do Sol por braços espirais é uma provável explicação para picos (surtos) na história da formação estelar na vizinhança solar [16]. Além disso, os encontros com braços espirais, local com maior probabilidade de ocorrer explosões de supernovas e perturbações gravitacionais da nuvem de Oort, fazem com que um maior número de objetos como cometas sejam lançados em

direções internas do Sistema Solar, o que pode estar associado com eventos de extinção em massa da vida terrestre (ou extra-terrestre) [17].

Referências

- [1] C.C. Lin, and F.H. Shu, *ApJ* **140**, 646 (1964).
- [2] C.C. Lin, C. Yuan and F.H. Shu, *ApJ* **155**, 721 (1969).
- [3] J. Binney and S. Tremaine, in *Galactic Dynamics*, edited by J.P. Ostriker (Princeton University Press, Princeton, 1987).
- [4] L.H. Amaral and J.R.D. Lépine, *MNRAS* **286**, 885 (1997).
- [5] Yu N. Mishurov and I.A. Zenina, *A&A* **341**, 81 (1999).
- [6] M.D. Weinberg, *ApJ* **420**, 597 (1994).
- [7] P. Englmaier and O. Gerhard, *MNRAS* **304**, 512 (1999).
- [8] W. Dehnen, *AJ* **119**, 800 (2000).
- [9] J. Binney and C. Lacey, *MNRAS* **230**, 597 (1988).
- [10] J.A. Sellwood and J.J. Binney, *MNRAS* **336**, 785 (2002).
- [11] P.E. Seiden and H. Gerola, *ApJ* **233**, 56 (1979).
- [12] W.W. Roberts, *ApJ* **158**, 123 (1969).
- [13] W.S. Dias, B.S. Alessi, A. Moitinho and J.R.D. Lépine, *A&A* **389**, 871 (2002).
- [14] D.P. Clemens, *ApJ* **295**, 422 (1985).
- [15] Marcos R. de la Fuente and Marcos C. de la Fuente, *New A.* **9**, 475 (2004).
- [16] H.J. Rocha-Pinto, J. Scalo, W.J. Maciel and C. Flynn, *ApJ* **531**, L115. (2000).
- [17] E.M. Leitch and G. Vasisht, *New A.* **3**, 51 (1998).