

Stock Kümelerinin Kinematik ve Dinamik Özellikleri

Hikmet Çakmak¹  

¹ İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü, İstanbul 34134, Türkiye

Accepted: March 15, 2025. Revised: March 15, 2025. Received: November 28, 2024.

Özet

Açık yıldız kümeleri bir galaksinin önemli bileşenlerinden biridir. Kümedeki yıldız üyelerinin aynı gaz bulutundan ve birbirine yakın zamanlarda oluşması, kinematik ve dinamik özelliklerinin de birbirine benzer olmasını sağlamaktadır. Bu bakımdan bu kümelerin galaksi içinde bulundukları konumlar galaksinin o bölgesine ait genel kinematik ve dinamik özelliklerinin bir göstergesi olacaktır. Bu çalışmanın temel amacı, Samanyolu galaksisinde güneş civarındaki kinematik ve dinamik özelliklerin Stock açık yıldız kümeleri üzerinden ortaya konulmasıdır. Bilinen 22 Stock açık yıldız kümesinden 19'u bu makale çalışması için seçilmiş ve bunların kinematik özellikleri Gaia DR3 verileri kullanılarak belirlenmiştir. 16 Stock kümesi galaksimizin Perseus ve Orion-Cygnus kollarında Güneş civarında dağılırken, 3 küme ise Sagittarius-Carina kolunda galaksi merkezine yakın bir konumda bulunmaktadır. Yapısal ve astrofizik parametreler incelendiğinde, sarmal kollarda bulunan kümelerin merkez ve limit yarıçaplarının genellikle küçük olduğu, sarmal kollar arasında bulunan kümelerin ise nispeten büyük olduğu gözlenmiştir. Stock 13 dışındaki kümeler küçük boyutlu kümelerdir. Kümelerin merkez ve limit değerleri $R_{\text{merkez}} < 1.5$ pc, $R_{\text{lim}} < 7$ pc'tir. Stock kümeleri çoğunlukla genç ve orta yaşlı kümelerdir. Bu ise kümelerin dinamik genişleme ve büzülme evrim aşamalarına henüz geçmediklerini göstermektedir.

Abstract

Open star clusters are an important component of a galaxy. The fact that the stellar members of a cluster are formed from the same gas cloud and at similar times ensures that their kinematic and dynamical properties are similar. In this respect, the location of these clusters in the galaxy will be an indicator of the overall kinematical and dynamical properties of that region of the galaxy. The main objective of this study is to investigate the kinematical and dynamical properties of the Milky Way galaxy in the solar neighborhood using Stock open star clusters. Of the 22 known Stock open star clusters, 19 were selected for this paper and their kinematical properties were determined using Gaia DR3 data. 16 Stock clusters are distributed around the Sun in the Perseus and Orion-Cygnus arms of our galaxy, while 3 clusters are located close to the galaxy center in the Sagittarius-Carina arm. The analysis of structural and astrophysical parameters reveals that the core and limit radii of clusters located in the spiral arms are generally small, while clusters located between the spiral arms are relatively large. Clusters other than Stock 13 are small size clusters. Their core and limit values are $R_{\text{merkez}} < 1.5$ pc and $R_{\text{lim}} < 7$ pc. Stock clusters are mostly young and middle-aged clusters. This indicates that the clusters have not yet passed through the dynamic expansion and contraction stages of evolution.

Anahtar Kelimeler: (Galaksi:) evrim – (Galaksi:) kinematik ve dinamik, – (Galaksi:) açık kümeler ve gruplar: bireysel: Stock [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24]

1 Giriş

Açık kümeler (AK'ler), küresel kümelerle birlikte bir galaksinin temel bileşenleri arasında yer alır ve galaksinin genel kinematik, dinamik ve kimyasal özelliklerinin anlaşılmasında kilit rol oynar. Bir galaksinin bu özelliklerini doğru bir şekilde belirleyebilmek, AK'lerin yapılarının, dağılımlarının ve hızlarının detaylı bir şekilde incelenmesine bağlıdır. AK'lerin evrimleri ve galaksiyle etkileşimleri, galaktik yapıdaki yerlerini anlamamıza ve yıldız oluşum süreçlerine dair önemli ipuçları elde etmemize olanak tanır. AK'ler, galaksi içinde yer aldıkları ortamla sürekli etkileşim halindedir ve bu durum dinamik evrimlerinde önemli bir rol oynar. Bu kümeler, galaksi diskindeki dev moleküler bulutlarla karşılaşmalar, sarmal kol şokları ve galaktik çekim potansiyelinin neden olduğu gelgit etkileri gibi dış etkilerle karşı karşıya kalır. Aynı zamanda, yıldız evrimi sırasında kütle kaybı, kütle ayrımı ve buharlaşma gibi içsel süreçler de AK'lerin

dinamik yapısında değişikliklere yol açar. Bu süreçler, kümelerin kütlelerini azaltır ve ilkel moleküler yapılarını kaybetmelerine neden olur (Lamers & Gieles 2006; Gieles ve diğ. 2007; Gutermuth ve diğ. 2009; Gouliermis 2018).

Converse & Stahler (2011) tarafından belirtilen bir diğer önemli dinamik etki ise kümelerin çekirdeklerinin içe doğru büzülmesi, dış kısımlarının ise genişlemesidir. Bu, enerjinin iç kısımdan dış kısımlara aktarılmasıyla gerçekleşir ve kütle ayrımı sonucunda, düşük kütleli yıldızlar kümelerin dış kısımlarına yönelir. Kümeler oluştuklarından itibaren birkaç milyon yıl (Myr) boyunca, kütlelerinin büyük bir kısmını bu dinamik etkiler nedeniyle kaybeder ve orijinal yıldızlarının önemli bir kısmı galaksiye dağılır. Bu etkileşimler, AK'lerin uzun vadeli yapılarını ve galaksi içindeki evrimlerini şekillendirir.

Bu çalışma, 2022 Eylül ayından bu yana yürütülmekte olunan "Samanyolu Galaksisindeki Açık Kümelerin Kinematiki" isimli 122F109 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılmıştır. Projenin temel amacı açık kümelerin uzay tabanlı güncel astrometrik, fotometrik ve tayfsal verilerinin bir arada

* hcakmak@istanbul.edu.tr

Çizelge 1. Seçilen Stock kümelerinin ekvatorial ve galaktik koordinatları.

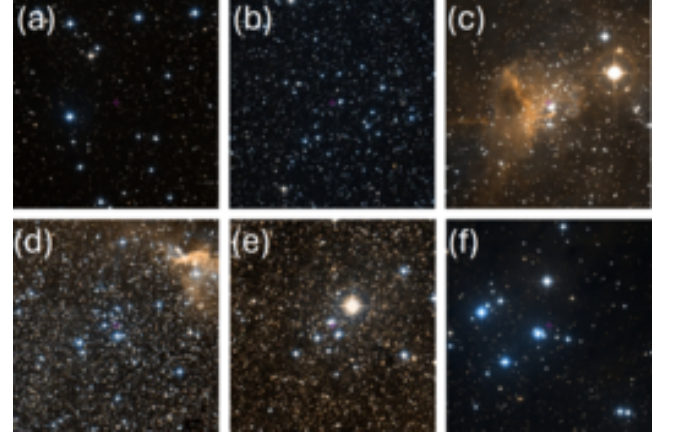
Küme	α_{J2000} (h m s)	δ_{J2000} ($^{\circ}$ ' ")	l ($^{\circ}$)	b ($^{\circ}$)
Stock 1	19 36 35.8	+25 06 57.6	60.24	2.26
Stock 2	02 14 50.0	+59 19 00.0	133.43	-1.89
Stock 3	01 12 01.4	+62 16 58.0	125.35	-0.45
Stock 4	01 52 54.0	+57 04 03.0	131.25	-4.81
Stock 5	02 04 40.9	+64 20 29.3	130.76	2.59
Stock 6	02 23 40.0	+63 51 10.3	132.88	2.78
Stock 7	02 29 39.7	+60 39 28.7	134.68	0.03
Stock 8	05 28 08.4	+34 25 34.8	173.37	-0.18
Stock 10	05 38 45.0	+37 56 36.5	171.62	3.56
Stock 12	23 35 33.2	+52 40 10.4	111.44	-8.48
Stock 13	11 13 04.9	-58 53 10.6	290.51	1.59
Stock 14	11 43 47.8	-62 32 41.6	295.22	-0.67
Stock 16	13 19 25.9	-62 39 42.1	306.15	0.06
Stock 17	23 46 00.8	+62 12 44.1	115.38	0.27
Stock 18	00 01 35.7	+64 37 28.3	117.62	2.26
Stock 20	00 25 12.7	+62 37 13.2	119.93	-0.10
Stock 21	00 30 16.6	+57 55 44.7	120.05	-4.83
Stock 23	03 16 24.8	+60 05 55.9	140.08	2.09
Stock 24	00 39 48.9	+61 58 34.5	121.55	-0.89

analiz edilmesiyle kümelerin kinematiği, yörünge dinamiği ve kimyasal yapılarının belirlenmesidir. Bu proje kapsamında temel analizleri yapılan 2000'e yakın küme içinden Stock kümeleri bu çalışma için seçilmiştir. Analizler için kümelerin GAIA DR3 verileri kullanılmıştır.

Alman astronom Jürgen Stock, 1950'lerin başında Warner and Swasey Gözlemevinde (Ohio eyaleti Cleveland'ta Case Western Reserve Üniversitesi) çalışırken bu kümelerin gözlemlerini yapmıştır. Daha sonra bu kümeler Çekoslovak Georg Alter tarafından Stock kümeleri olarak tasnif edilmiştir (Mackie 2001). Toplam olarak 24 Stock açık kümesi bulunmaktadır. Ancak GAIA DR3 verilerinin öz hareket grafiklerinin analizleri sonucunda çalışmaya elverişli 19 küme seçilmiştir. Bu çalışmada yürütülen projenin hedefleri doğrultusunda Stock kümelerinin kinematik ve dinamik özellikleri sunulacaktır. Çizelge 1'de, kümelerin ekvatorial ve galaktik koordinatları listelenmiş, *Aladin Sky Atlas*'tan ise Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda merkez ve limit yarıçapları küçük olan kümelerin çoğunlukla sarmal kolları, büyük olan kümelerin ise sarmal kollar aralarında dağıldıkları gözlenmiştir. İncelenen kümelerin çoğunlukla genç ve orta yaşlı kümeler olması sebebiyle bunların henüz dinamik genişleme ve büzülme evrim aşamalarına geçmedikleri düşünülmektedir.

2 Küme Çalışma Verisi

Küme analizleri için proje temel çerçevesi kapsamında kümelerin ekvatorial koordinatları (RA, DEC), *Gaia* fotometrik parlaklıkları (G, G_{BP}, G_{RP}), trigonometrik paralaks (ϖ), öz hareket bileşenleri ($\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}$) ve radyal hız (V_R) verileri 2022 yılının haziran ayında yayınlanan *Gaia* DR3 kataloğundan alınmıştır (Gaia işbirliği 2023). Ayrıca proje kapsamında gerçekleştirilen literatür taraması ile kümelerin bilinen metal bollukları derlenmiştir. Metal bollukları küme yaşını belirlemede kullan önemli bir parametredir. Bu açıdan spektroskopik metotla belirlenmiş metal bollukları özellikle bulunmaya çalışılmıştır. *Gaia* DR3 verilerinin analizi sonucunda elde edilen öz-hareket büyüklükleri, küme yaşı ve uzaklık gibi değerler öncelikle projede kapsamında referans olarak alınmış olan



Şekil 1. Seçilen bazı Stock kümelerinin Aladin Sky Atlas'tan alınan gökyüzü görüntüleri. (a) Stock 2, (b) Stock 4, (c) Stock 8, (d) Stock 13, (e) Stock 14 ve (f) Stock 23.

Cantat-Gaudin ve diğ. (2020) kataloğundaki değerler ile doğruluk mertebelerinin tespiti amacıyla karşılaştırılmıştır.

3 Küme Üyelerinin Tespiti

TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında belirlenen temel çerçeveye göre üyeliklerin tespiti bir Python paketi olarak hazırlanmış olan UPMASK (Unsupervised Photometric Membership Assignment in Stellar Cluster; Krone-Martins & Moitinho 2014) kodu kullanılarak yapılmıştır. UPMASK bir kümeleme algoritması kullanarak farklı kümeleme değerlerindeki (İng., k-means) üyelik olasılıklarını yüzde olarak hesaplamaktadır. Açık kümelerde küme üyeleri çoğunlukla öz-hareket grafiklerinde belirli bir yoğunluk noktası şeklinde bir kümeleme göstermektedir. Bu bakımdan kümelemenin doğru bir şekilde elde edilmesi için UPMASK kodunda öz-hareket ve trigonometrik paralaks değerleri şeklinde üç parametrelili bir seçim işlemi uygulanmıştır. Buna göre UPMASK kodu genellikle 5 ila 36 arasındaki bütün k-means değerleri için çalıştırılmış ve küme üyelerinin büyük bir çoğunlukla seçilebildiği k-ortalama değerine ait üyelik verileri analiz için kullanılmıştır. Hesaplanan bu üyelik verilerinde üyelik yüzdesi $P \geq 50$ olan yıldızlar küme üyesi olarak kabul edilmiştir.

4 Kümelere İlişkin Parametrelerin Hesaplanması

4.1 Yapısal Parametreler

Bir kümenin bulunduğu alan içindeki dağılımını ve yoğunluğunu gösteren R_{merkez} ve R_{lim} yapısal parametreleri, King (1962) tarafından analitik olarak ortaya konulmuş olan ve Radyal Yoğunluk Profili olarak isimlendirilen

$$\sigma(R) = \sigma_{\text{bg}} + \frac{\sigma_0}{1 + (R/R_{\text{merkez}})^2} \quad (1)$$

bağıntısı ile elde edilebilmektedir. Burada $\sigma(R)$, R uzaklığındaki yıldız yoğunluğu, σ_{bg} zemin yıldız yoğunluğu ve σ_0 , kümenin merkez yıldız yoğunluğudur. RDP değerleri, küme merkezi ekvatoryal koordinatı etrafında oluşturulan eş-merkezli halka alanları içinde kalan yıldız yoğunluklarının hesaplanmasıyla elde edilir. İkinci adımda bu RDP değerlerine Eşitlik 1 bağıntısına uyan bir eğri fit edilerek kümenin merkez yarıçapı R_{merkez} elde edilir. R_{lim} değeri ise Bukowiecki ve diğ. (2011) tarafından

verilen

$$R_{\text{lim}} = R_{\text{merkez}} \sqrt{\frac{\sigma_0}{3\sigma_{\text{bg}}} - 1} \quad (2)$$

bağıntısı göre hesaplanır. Burada eğri fit işlemi sonucunda elde edilen parametreler kullanılarak hesaplama işlemi yapılır.

4.2 Astrofizik Parametreler

Kümelerin yaşlarını belirleme işlemi, uygun (PAдова and TRIeste Stellar Evolution Code) PARSEC eş-yaş eğrilerinin (Bressan ve diğ. 2012) seçilerek *Gaia* renk-parlaklık diyagramlarına (CMD) fit edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu fit işlemiyle kümenin *Gaia* renk artık değeri elde edilirken aynı zamanda kümenin uzaklığı da hesap edilmektedir.

Belirlenen eş-yaş eğrileri küme üyesi yıldızların kütlelerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Eş-yaş eğrisinin anakol kısmı etrafındaki üyelerin kütle frekans dağılımlarına

$$\log\left(\frac{dN}{dM}\right) = -(1 + \chi) \log(M) + C \quad (3)$$

şeklinde bağıntıya göre bir lineer eğri fiti yapılarak kütle dağılım fonksiyonunun χ katsayısı elde edilir. Burada χ değeri kütle fonksiyonu doğrusunun eğim değeri olup elde edilen fonksiyonla kümenin toplam kütlesi de hesaplanmaktadır.

4.3 Kinematik ve Dinamik Parametreler

Kümelerin Galaktik yörünge parametrelerinin elde edilmesi için python kütüphanesinde bulunan GALPY paketi kullanılmıştır. Bovy (2015) tarafından geliştirilen bu GALPY paketi sadece Galaktik yörünge parametrelerini değil aynı zamanda uzay hızı bileşenleri ve yörünge biçimi gibi diğer parametrelerin hesaplanmasına imkan vermektedir. Bu çalışmada yörünge hesapları için paket içindeki MWpotential2014 Samanyolu galaktik potansiyeli fonksiyonu hesaba katılmıştır.

Bir açık kümedeki yıldızların bulundukları bölgeyi geçmeleri için geçen süre gevşeme zamanı (İng., relaxation time) t_{rlx} olarak tanımlanmaktadır. Kinematik açıdan önemli bir gösterge olan bu parametre

$$t_{\text{rlx}} = \frac{8.9 \times 10^5 \sqrt{N} R_{\text{hm}}^{3/2}}{\log(0.4N) \sqrt{m}} \quad (4)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Spitzer & Hart 1971). Burada N küme üye sayısını, R_{hm} yarı-kütle yarıçapını ve m kümenin ortalama kütlelerini göstermektedir. R_{hm} değeri Larsen (2006) tarafından

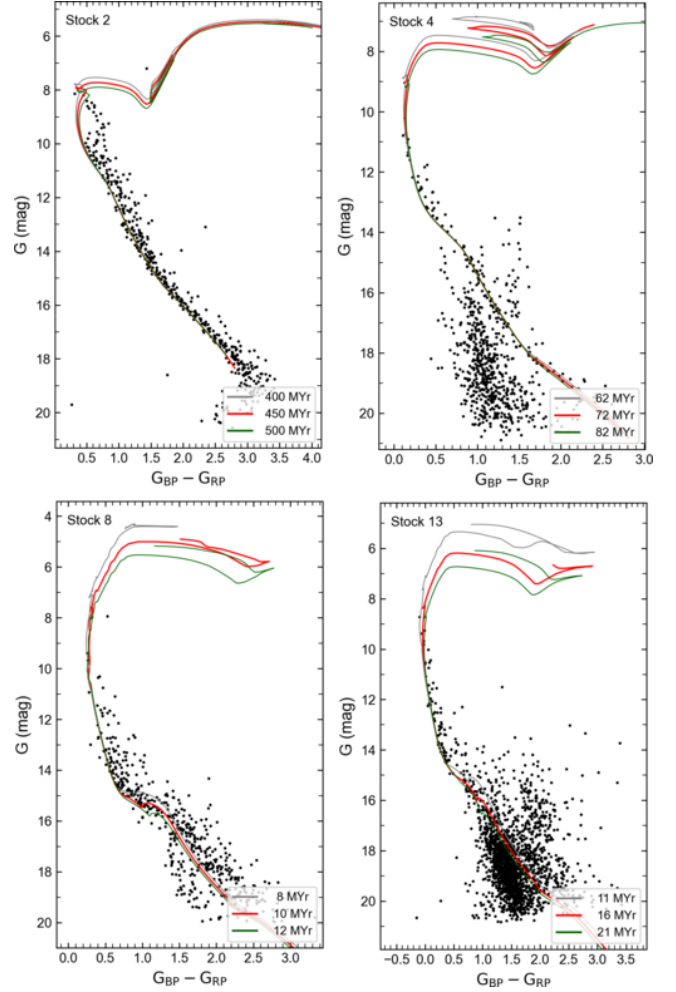
$$R_{\text{hm}} = 0.547 \times R_{\text{merkez}} \times \left(\frac{R_t}{R_{\text{merkez}}}\right)^{0.486} \quad (5)$$

ifadesi ile gösterilmektedir. Bu bağıntıda R_t gelgit yarıçapı olup

$$R_t = \left(\frac{M}{2M_G}\right)^{1/3} \times R_{GC} \quad (6)$$

bağıntısına göre hesaplanır (Kim ve diğ. 2000). Burada M ve R_{GC} değerleri, sırasıyla kümenin toplam kütlesi ve Galaksi merkezine olan uzaklığını göstermektedir. Bir kümenin Galaksi merkezine olan uzaklığı R_{GC} yarıçapı içinde kalan toplam Galaksi kütlesi M_G Genzel & Townes (1987) tarafından

$$M_G = 2 \times 10^8 M_{\odot} \left(\frac{R_{GC}}{30 \text{ pc}}\right)^{1.2} \quad (7)$$



Şekil 2. Örnek olarak seçilmiş birkaç Stock kümesinin *Gaia* renk-parlaklık grafikleri. Siyah noktalar üye yıldızları ve kırmızı çizgi ise en uygun eş-yaş eğrisini göstermektedir.

bağıntısıyla ifade edilebilmektedir.

Küme dinamik parametrelerinden dinamiksel gelişim parametresi $\tau = \text{yaş}/t_{\text{rlx}}$ bağıntısına göre elde edilmektedir. Diğer bir parametre küme çözülme zamanı t_{diss} ise

$$t_{\text{diss}} = 250 \text{ Myr} \left(\frac{M}{300 M_{\odot}}\right)^{1/2} \times \left(\frac{R_{\text{hm}}}{2 \text{ pc}}\right)^{-3/2} \quad (8)$$

bağıntısına göre elde edilmektedir (Binney & Tremaine 2008; Converse & Stahler 2011).

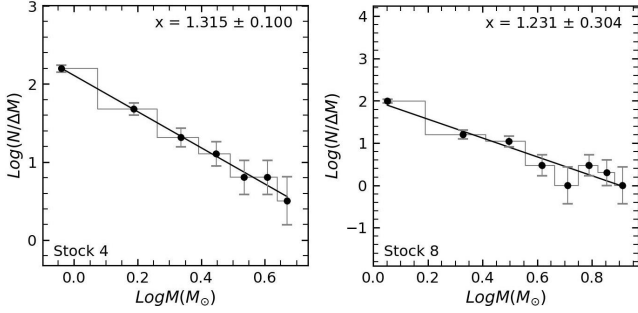
5 Analiz Sonuçları

Ş3'te ve Ş4.2'de verilen açıklamalar doğrultusunda UPMASK metodu kullanılarak küme üyelikleri belirlenmiş ve her bir kümenin *Gaia* CMD'leri için en uygun PARSEC eş-yaş eğrileri belirlenmiştir. Şekil 2'de birkaç Stock kümesinin CMD grafikleri gösterilmiştir. *Gaia* CMD'leriyle elde edilen küme yaşı, uzaklığı, ve metal bolluğu değerleri ve Ş4.1'de verilen bilgilere göre hesaplanan küme yapısal parametreleri Çizelge 2'de listelenmiştir.

Belirlenen PARSEC eş-yaş eğrileriyle *Gaia* CMD'lerinden elde edilen kütle fonksiyonlarına ait iki örnek Şekil

Çizelge 2. Stock kümelerinin hesaplanan astrofiziksel ve yapısal parametreleri. DM_0 kızarmadan arındırılmış uzaklık modülü, R^2 ise RDP için korelasyon katsayısıdır.

Küme	Astrofiziksel					Yapısal			
	Yaş (Myr)	d (pc)	DM_0	$E(G_{BP}-G_{RP})$	Z	($1'$) (pc)	R_{merkez} ($''$)	R_{lim} ($''$)	R^2
Stock 1	405 ± 50	404 ± 18	8.03 ± 0.09	0.14 ± 0.02	0.0210	0.117	0.29 ± 0.03	3.35 ± 0.27	0.994
Stock 2	450 ± 50	383 ± 15	7.92 ± 0.09	0.36 ± 0.02	0.0189	0.111	0.21 ± 0.08	1.39 ± 0.18	0.890
Stock 3	25 ± 05	2494 ± 286	11.99 ± 0.25	1.24 ± 0.02	0.0152	0.725	0.14 ± 0.04	1.14 ± 0.13	0.983
Stock 4	72 ± 10	1488 ± 78	10.86 ± 0.11	0.36 ± 0.02	0.0169	0.433	0.24 ± 0.03	2.33 ± 0.18	0.982
Stock 5	39 ± 05	964 ± 55	9.92 ± 0.13	0.67 ± 0.01	0.0189	0.280	0.20 ± 0.02	2.74 ± 0.25	0.982
Stock 6	700 ± 100	994 ± 43	9.99 ± 0.09	0.56 ± 0.05	0.0152	0.289	0.34 ± 0.03	3.66 ± 0.31	0.989
Stock 7	85 ± 10	682 ± 31	9.17 ± 0.10	0.69 ± 0.01	0.0210	0.198	0.22 ± 0.03	2.21 ± 0.25	0.979
Stock 8	10 ± 02	2251 ± 180	11.76 ± 0.17	0.75 ± 0.11	0.0169	0.614	0.75 ± 0.03	9.77 ± 0.43	0.995
Stock 10	130 ± 20	360 ± 20	7.78 ± 0.12	0.22 ± 0.02	0.0136	0.105	0.16 ± 0.01	2.69 ± 0.19	0.995
Stock 12	105 ± 20	450 ± 31	8.26 ± 0.15	0.20 ± 0.02	0.0152	0.131	0.18 ± 0.04	2.09 ± 0.23	0.976
Stock 13	16 ± 05	2665 ± 686	12.13 ± 0.56	0.34 ± 0.01	0.0169	0.775	3.94 ± 0.50	17.43 ± 0.89	0.951
Stock 14	16 ± 05	2422 ± 590	11.92 ± 0.53	0.34 ± 0.01	0.0210	0.704	0.74 ± 0.07	5.40 ± 0.29	0.985
Stock 16	09 ± 03	1691 ± 202	11.14 ± 0.26	0.80 ± 0.18	0.0109	0.492	2.12 ± 0.27	9.62 ± 0.38	0.956
Stock 17	70 ± 10	2475 ± 137	11.97 ± 0.12	0.86 ± 0.02	0.0189	0.720	0.48 ± 0.06	3.45 ± 0.29	0.965
Stock 18	40 ± 10	2481 ± 301	11.97 ± 0.26	0.86 ± 0.03	0.0136	0.721	0.18 ± 0.01	3.45 ± 0.28	0.999
Stock 20	15 ± 05	2540 ± 714	12.02 ± 0.61	0.63 ± 0.01	0.0122	0.739	0.52 ± 0.02	5.75 ± 0.31	0.995
Stock 21	520 ± 50	1834 ± 65	11.32 ± 0.08	0.54 ± 0.02	0.0136	0.533	0.31 ± 0.02	3.30 ± 0.26	0.994
Stock 23	65 ± 10	714 ± 44	9.27 ± 0.14	0.74 ± 0.02	0.0169	0.208	0.51 ± 0.04	3.44 ± 0.28	0.994
Stock 24	110 ± 20	2954 ± 198	12.35 ± 0.15	0.74 ± 0.02	0.0152	0.859	0.43 ± 0.04	3.33 ± 0.26	0.992



Şekil 3. Stock 4 ve Stock 8 için elde edilen kütle fonksiyon grafikleri.

3'te gösterilmiştir. Kütle fonksiyolarına göre bütün Stock kümelerinin hesaplanan toplam/ortalama kütle değerleri de Çizelge 3'te listelenmiştir.

GALPY paketi yardımıyla Stock kümelerinin yörünge parametreleri ve yörünge biçimine ait değerleri hesaplandıktan sonra yörünge grafikleri çizilmiştir. Stock 4 ve Stock 8'e ait yörünge grafikleri Şekil 4'de örnek olarak gösterilmiştir. Yörüngelere ait diğer hesaplanan kinematik değerler ise Çizelge 4'de listelenmiştir. §4.3'te verilen eşitliklere göre Stock kümelerinin hesaplanan dinamik parametreleri Çizelge 5'de listelenmiştir.

Kümelerin astrofizik ve yapısal parametreleri kinematik ve dinamik parametreleriyle karşılaştırılmış ve karşılıklı değişimleri incelenerek evrimsel gelişimleri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla oluşturulan grafiklerin birkaçı Şekil 5'de verilmiştir.

6 Tartışma ve Sonuç

Kümelerin kinematik ve dinamik parametrelerin birbirleriyle kıyaslanmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda verilen belirli parametrelere ait açıklamaların bilinmesi faydalı olacaktır. Böylece seçilen parametrelerin kümeler için neyi ifade ettiği

Çizelge 3. Stock kümelerinin toplam kütle, ortalama kütle, üye sayısı ve kütle fonksiyonu katsayı (χ) değerleri.

Küme	M_{top} ($M_{\odot}$)	M_{ort} ($M_{\odot}$)	N	χ
Stock 1	66 ± 09	1.10 ± 0.26	60 ± 12	0.063 ± 0.132
Stock 2	293 ± 27	1.19 ± 0.17	247 ± 27	0.868 ± 0.137
Stock 3	242 ± 79	3.84 ± 2.02	63 ± 26	1.999 ± 0.424
Stock 4	238 ± 83	1.45 ± 0.88	164 ± 81	1.315 ± 0.100
Stock 5	124 ± 51	1.18 ± 0.78	105 ± 54	1.645 ± 0.365
Stock 6	270 ± 37	1.08 ± 0.24	250 ± 44	0.742 ± 0.177
Stock 7	83 ± 47	1.33 ± 1.26	62 ± 47	1.474 ± 0.401
Stock 8	232 ± 101	1.90 ± 1.50	122 ± 80	1.231 ± 0.304
Stock 10	47 ± 28	0.93 ± 1.01	50 ± 45	1.062 ± 0.229
Stock 12	99 ± 31	1.15 ± 0.69	86 ± 44	0.608 ± 0.144
Stock 13	315 ± 55	5.07 ± 1.52	62 ± 15	0.904 ± 0.158
Stock 14	230 ± 118	2.35 ± 1.84	98 ± 58	2.988 ± 0.361
Stock 16	167 ± 85	1.39 ± 1.15	120 ± 78	1.793 ± 0.197
Stock 17	342 ± 24	2.85 ± 0.33	120 ± 11	1.250 ± 0.509
Stock 18	71 ± 11	1.86 ± 0.49	38 ± 08	1.718 ± 0.327
Stock 20	146 ± 34	1.98 ± 0.75	74 ± 22	2.134 ± 0.245
Stock 21	81 ± 06	1.35 ± 0.15	60 ± 05	1.770 ± 0.199
Stock 23	61 ± 09	1.85 ± 0.48	33 ± 07	1.414 ± 0.328
Stock 24	216 ± 29	1.30 ± 0.29	166 ± 29	1.848 ± 0.241

daha iyi anlaşılacaktır. (Bakınız; Heggie & Hut 2003; Piatti ve diğ. 2019; Angelo ve diğ. 2020, 2021).

R_{hm}/R_t , Galaksinin açık kümelerin dinamik evrimi üzerindeki gelgit etkisinin bir göstergesidir. Düşük R_{hm}/R_t oranları, Galaktik kütle çekim kuvvetlerinin neden olduğu gelgit sıyrılmasına / bozulmasına daha az maruz kalan daha kompakt bir kümeye işaret eder.

$R_{\text{merkez}}/R_{\text{hm}}$, bir kümenin iç bölgelerindeki kompaktlığının bir ölçüsüdür. Bir küçük yarı kütle yarıçapı bir kümenin genel boyutuna göre yoğun bir çekirdeğe sahip olduğuna işaret etmektedir. Düşük $R_{\text{merkez}}/R_{\text{hm}}$ oranlarına sahip kümelerin ise gelgit bozulmasına daha az maruz kaldığını göstermek-tedir.

R_{hm}/R_J oranı (R_J Jakobi gelgit yarıçapıdır; Portegies Zwart ve diğ. 2010), bir açık kümenin Galaksinin gelgit alanında

Çizelge 4. Hesaplanan kinematik parametreler. $R_{\max}$, $R_{\min}$ ve $R_{\text{doğ}}$ değerleri kpc olarak $z_{\max}$ değeri pc olarak verilmiştir.

Küme	V_R (km s ⁻¹)	U	V	W	V_ϕ	J_z	$R_{\max}$	$R_{\min}$	ecc	$z_{\max}$	T (Myr)	N_{Tur}	$R_{\text{doğ}}$
Stock 1	-19.70	-14.77	-13.82	-10.70	-237.03	-1897.95	8.29	7.57	0.05	0.056	204	2.0	8.22
Stock 2	8.36	-30.93	-18.39	-14.81	-232.07	-1965.06	9.04	7.54	0.09	0.104	219	2.1	9.01
Stock 3	-63.97	55.02	-39.48	-6.10	-220.85	-2176.29	10.15	8.43	0.09	0.017	280	0.1	10.15
Stock 4	-55.79	42.62	-36.57	4.65	-219.56	-2030.03	9.64	7.64	0.12	0.215	265	0.3	8.62
Stock 5	-25.97	17.25	-18.74	-11.84	-234.04	-2073.34	9.02	8.46	0.03	0.093	236	0.2	9.01
Stock 6	-9.40	-9.13	-20.45	-13.19	-230.18	-2049.84	9.19	8.12	0.06	0.114	232	3.0	8.33
Stock 7	-8.45	13.90	1.87	-2.75	-254.11	-2208.98	10.25	8.63	0.09	0.073	234	0.4	10.24
Stock 8	12.61	-15.02	-20.39	-13.34	-230.68	-2408.08	10.69	10.01	0.03	0.110	277	0.0	10.34
Stock 10	-12.36	12.22	0.37	-5.67	-251.75	-2153.84	10.06	8.32	0.09	0.054	235	0.6	8.80
Stock 12	-3.23	-13.39	-10.14	-8.59	-240.68	-2015.25	8.86	8.09	0.05	0.050	211	0.5	8.84
Stock 13	31.65	-64.30	-57.99	-4.45	-200.04	-1537.00	7.72	5.29	0.19	0.099	236	0.1	7.57
Stock 14	21.54	-56.89	-50.46	-11.33	-205.39	-1539.49	7.55	5.40	0.17	0.047	225	0.1	7.45
Stock 16	-26.27	-44.10	0.31	-10.64	-253.30	-1856.95	8.30	7.22	0.07	0.044	180	0.1	7.49
Stock 17	-70.80	71.28	-44.50	-7.31	-220.30	-2098.84	10.07	7.88	0.12	0.038	276	0.3	9.29
Stock 18	-45.08	49.14	-25.06	-3.24	-233.95	-2246.98	9.78	9.36	0.02	0.139	255	0.2	9.78
Stock 20	-82.16	75.70	-51.25	-10.01	-214.45	-2084.41	10.39	7.57	0.16	0.052	286	0.1	10.20
Stock 21	-35.72	35.51	-22.00	-11.86	-233.80	-2163.62	9.39	8.96	0.02	0.152	241	2.2	9.13
Stock 23	-8.45	13.08	3.09	-10.80	-255.24	-2235.74	10.45	8.70	0.09	0.078	229	0.3	10.30
Stock 24	-59.34	47.48	-40.46	1.11	-218.73	-2201.76	10.08	8.71	0.07	0.141	263	0.4	8.77

Çizelge 5. Stock kümelerinin hesaplanan dinamik parametreleri.

Küme	R_G (kpc)	M_G ($10^9 M_\odot$)	R_t (pc)	R_{hm} (pc)	t_{rlx} (Myr)	t_{dis} (Myr)	τ_{dyn}
Stock 1	8.16 ± 0.01	166.8 ± 0.2	4.75 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.44 ± 0.06	3.8 ± 0.4	915 ± 174
Stock 2	8.62 ± 0.01	178.2 ± 0.3	8.07 ± 0.01	0.22 ± 0.04	0.65 ± 0.20	8.9 ± 2.6	690 ± 223
Stock 3	10.00 ± 0.21	213.1 ± 5.3	8.28 ± 0.19	0.47 ± 0.06	0.83 ± 0.28	25.7 ± 6.6	30 ± 12
Stock 4	9.40 ± 0.06	197.7 ± 1.5	7.93 ± 0.05	0.47 ± 0.03	1.68 ± 0.57	25.4 ± 4.9	43 ± 16
Stock 5	9.01 ± 0.04	187.9 ± 1.0	6.23 ± 0.03	0.30 ± 0.02	0.85 ± 0.31	9.3 ± 2.1	46 ± 18
Stock 6	9.06 ± 0.03	189.1 ± 0.8	8.09 ± 0.03	0.46 ± 0.02	2.12 ± 0.29	26.2 ± 2.4	331 ± 65
Stock 7	8.84 ± 0.02	183.8 ± 0.6	5.37 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.54 ± 0.27	5.7 ± 1.8	158 ± 83
Stock 8	10.45 ± 0.41	224.6 ± 10.4	8.38 ± 0.35	1.03 ± 0.03	4.41 ± 1.88	81.1 ± 18.1	02 ± 01
Stock 10	8.71 ± 0.02	180.4 ± 0.5	4.40 ± 0.03	0.14 ± 0.01	0.25 ± 0.14	1.8 ± 0.5	515 ± 301
Stock 12	8.52 ± 0.01	175.9 ± 0.3	5.58 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.40 ± 0.14	4.0 ± 0.9	265 ± 107
Stock 13	7.83 ± 0.02	158.7 ± 0.6	7.80 ± 0.03	2.64 ± 0.17	9.54 ± 1.75	387.2 ± 50.6	02 ± 01
Stock 14	7.64 ± 0.09	154.2 ± 2.1	6.93 ± 0.09	1.00 ± 0.05	3.63 ± 1.52	77.9 ± 20.7	04 ± 02
Stock 16	7.48 ± 0.09	150.3 ± 2.1	6.15 ± 0.08	1.35 ± 0.09	7.73 ± 3.49	103.7 ± 28.1	01 ± 01
Stock 17	9.67 ± 0.09	204.7 ± 2.2	9.11 ± 0.09	0.92 ± 0.06	3.01 ± 0.33	82.8 ± 8.2	23 ± 04
Stock 18	9.75 ± 0.20	206.7 ± 5.0	5.41 ± 0.12	0.43 ± 0.01	0.96 ± 0.13	12.1 ± 1.0	42 ± 12
Stock 20	9.87 ± 0.49	209.6 ± 12.4	6.95 ± 0.37	0.86 ± 0.03	2.96 ± 0.61	49.4 ± 6.3	05 ± 02
Stock 21	9.40 ± 0.04	197.8 ± 1.0	5.54 ± 0.03	0.50 ± 0.01	1.52 ± 0.11	16.2 ± 0.9	342 ± 41
Stock 23	8.91 ± 0.04	185.5 ± 0.9	4.89 ± 0.02	0.37 ± 0.01	0.76 ± 0.11	9.1 ± 0.8	85 ± 18
Stock 24	10.21 ± 0.14	218.5 ± 3.6	8.08 ± 0.12	0.90 ± 0.04	4.70 ± 0.64	64.0 ± 6.1	23 ± 05

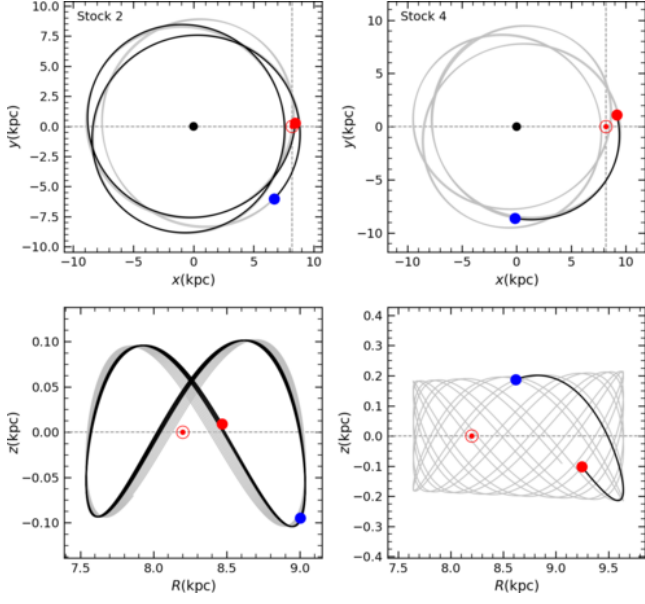
yaşadığı gelgit etkisinin derecesi için yararlı bir ölçüdür. Bir anlamda Roche hacim dolum faktörü olarak tanımlanır ve gelgit alanının etkisini karakterize eder. Daha düşük R_{hm}/R_J oranları daha zayıf bir gelgit alanı etkisini gösterir. Gelgit alanı gücünün kendisinin artan Galaktik merkezli mesafe ile zayıfladığını unutmamak gerekir.

Stock kümelerinin gözlemsel olarak elde edilen küçük küme boyutları (R_{merkez} , R_{lim}), bunların moleküler bulutlarından itibaren yaklaşık bu boyutlar ile oluştukları, genç ve orta yaşları dikkate alındığında bazılarının yumuşak ve ileri derecede dinamik evrim geçirdikleri ve bir miktar yıldızlarını alana kaybettikleri söylenebilir. Bunun olası nedeni, Galaksinin 1., 2. ve 4. çeyreğinde yer alan Dev Molekül Bulutları, yereldıkları sarmal dalgalar, Galaksinin merkezinin gelgit etkisi gibi dış

prosesler ve iç dinamikten kaynaklı kütle ayrışması gibi etkilerin olması muhtemeldir.

Şekil 5'de verilen kinematik ve dinamik parametrelerin kıyaslanması sonucunda kümelerin evrimsel gelişimleri üzerine şu yorumlar yapılabilir;

- Panel(a): Stock kümelerinin küme yarıçapı ile merkez yarıçapı arasında artan bir trend olmakla birlikte Stock 13 dışındaki kümeler küçük boyutlu kümelerdir. $R_{\text{merkez}} < 1.5$ pc, $R_{\text{lim}} < 7$ pc değerlerinde yer alırlar.
- Panel(b): Stock 13 hariç Stock kümeleri diagonal çizginin altında yer alırlar. Buna göre küçük merkez boyutları ile Stock kümeleri $\log \tau_{\text{dyn}} > 1$ yumuşak ve ileri dinamik evrim aşama-larında, $\log \tau_{\text{dyn}} < 1$ olanlar ise az miktarda bir dinamik evrimi gösteriyor
- Panel(c): 4 Stock kümesi dışında diğer Stock kümeleri kütle



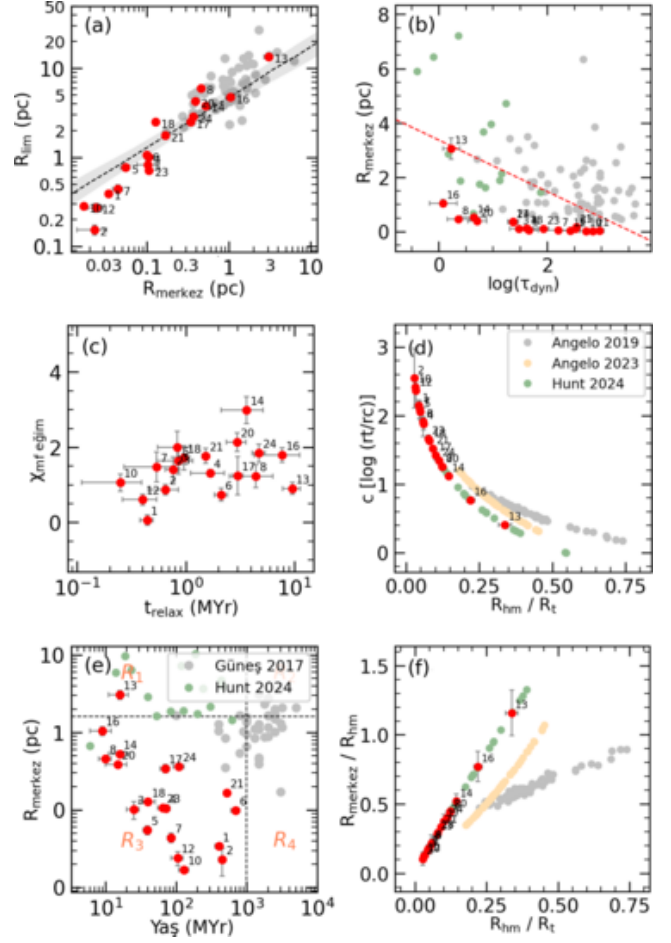
Şekil 4. GALPY yörünge fonksiyonu ile hesaplanan Stock 4 ve Stock 8'e ait yörünge grafikleri. Siyah çizgiler günümüze kadar olan yörünge durumunu, gri çizgiler ise geleceğe yönelik muhtemel yörünge durumunu göstermektedir.

fonksiyonu eğim değerleri $\chi > +1$ ile büyük ölçekte kütle ayrışması gösteriyorlar. Bir başka ifade ile küçük kütleli yıldızları kümelerin dış kısımlarına doğru hareket etmişler veya kümelerden alana yıldız kaybetmişlerdir. Gevşeme zamanlarının küçük oluşu bunu destekliyor.

- Panel(d): Stock kümelerinin $R_{hm}/R_t - c$ ilişkisi literatür verileri ile uyumludur. Dikkat edildiği gibi Angelo'nun örneği yüksek konsantrasyon c değerleri içermiyor. Stock kümelerinin R_{hm}/R_t oranları $0.05 < R_{hm}/R_t < 0.30$ arasında olup, boyutlarına göre büyük R_t gelgit yarıçaplarına sahipler ve daha şiddetli galaktik gelgit etkilere maruz kalmışlardır.
- Panel(e): $t=1$ Gyr'ın sağında R2 ve R4 bölgelerinde yani çatallaşmanın olduğu bölgelerde hiçbir Stock kümesi yer almıyor. Bu Stock kümelerinin genç ve orta yaşta olmasından kaynaklıdır. Bir başka ifade ile Stock kümeleri dinamik genişleme ve büzülme evrim aşamalarına henüz geçmemişlerdir.
- Panel(f): Düşük R_{merkez}/R_{hm} değerleri kümelerin kompakt oluşunun bir göstergesidir. Böyle kümelerin merkezi kısımları dinamik olarak evrimleşiyorlar, yani kütle ayrışması ve dinamik gevşemeden dolayı merkez genişlemektedir. Buna iç dinamik evrim adı verilir. R_{merkez}/R_{hm} değerlerinin derecesine göre bu iç dinamik evrimi yumuşak veya ileri düzeyde olabiliyor. Bu değerler bu kümelerin aynı zamanda dış dinamik prosesleri daha az hissettiğinin bir göstergesidir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 122F109 numaralı projeye desteklenmiştir. Küme analizlerinde yardımları olan Seval Taşdemir, Deniz Cennet Dursun, Seliz Koç ve Remziye Canbay'a teşekkürlerimi borç bilirim.



Şekil 5. Kümelere ait kinematik/dinamik değerlerin birbirlerine kıyaslanması. (a, e) panellerindeki gri noktalar **Güneş ve diğ.** (2017)'den, (b, d, f) grafiğindeki gri ve sarı noktalar **Angelo ve diğ.** (2019, 2023)'den yeşil noktalar ise **Hunt & Reffert (2024)**'den alınmıştır.

Kaynaklar

- Angelo M.S., Santos J.F.C., Corradi W.J.B., Maia F.F.S., 2019, A&A, 624, A8.
 Angelo M.S., Santos Jr J.F.C., Corradi W.J.B., 2020, MNRAS, 493, 3473
 Angelo, M.S., Corradi, W.J.B., Santos Jr, J.F.C., Maia, F.F.S., Ferreira, F.A., 2021, MNRAS, 500, 4338
 Angelo M.S., Santos J.F.C., Maia F.F.S., Corradi W.J.B., 2023, MNRAS, 522, 956.
 Binney, J., Tremaine, S., Galactic Dynamics, Princeton Univ Press Princeton, 2008 NJ
 Bovy, J., 2015, ApJS, 216, 29
 Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., ve diğ., 2012, MNRAS, 427, 127
 Bukowiecki, L., Maciejewski, G., Konorski, P., Strobel, A., 2011, Acta Astron., 61, 231
 Cantat-Gaudin, T., Anders, F., Castro-Ginard, ve diğ., 2020, A&A, 640, A1
 Converse, J.M., Stahler, S.W., 2011, MNRAS, 410, 2787
 Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A.G.A., Prusti, T., ve diğ., 2023, A&A, 674, A1
 Genzel, R., Townes, C.H., 1987, ARA&A, 25, 377.
 Gieles M., Athanassoula E., Portegies-Zwart S., 2007, MNRAS, 376,

809

- Gouliermis, D.A., 2018, PASP, 130, 072001
Gutermuth, R.A., Megeath, S.T., Myers, P.C., ve diğ., 2009, ApJS, 184, 18
Güneş, O., Karataş, Y., Bonatto C., 2017, Astron. Nachr, 338, 464
Heggie D. and Hut P., 2003, the gravitational million-body problem: A multidisciplinary approach to star cluster dynamics, Cambridge Univ. Press, chapter 33.
Hunt E.L., Reffert S., 2024, A&A, 686, A42.
King, I., 1962, AJ, 67, 471
Kim, S.S., Figger, D.F., Lee, H.M., Morris, M., 2000, ApJ, 545, 301.
Krone-Martins, A., Moitinho, A., 2014, A&A, 561, A57
Lamers H.J.G.L.M., Gieles M., 2006, A&A, 455, 17
Larsen, S.S., 2006, An ISHAPE Users Guide, 14
Mackie, Guy, 2001, Taking Stock, JRASC, 95, 194
Piatti A.E., Angelo M.S., Dias W., 2019, MNRAS, 488, 4648
Simon F. Portegies Zwart, S.F., McMillan, S.L.W., and Mark Gieles, M., 2010, ARA&A, 48, 431
Spitzer, L., Hart, M., 1971, AJ, 164, 399

Access:

M25-0313: [Turkish J.A&A](#) — Vol.6, Issue 3.