

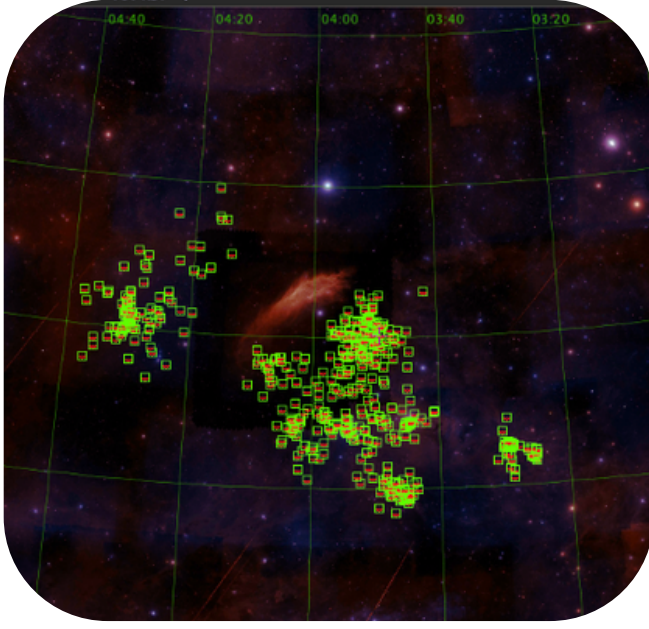


Özet

Genç yıldız kümeleri doğdukları moleküler bulutun dağılmasıyla büyük ölçüde çözüldüğünden (Lada & Lada 2003), erken evrelerindeki alt yapılarının Gaia astrometrisiyle ortaya çıkarılması galaktik disk yıldız oluşum tarihçesi açısından önem taşımaktadır (Zari ve diğ. 2018; Cantat-Gaudin ve diğ. 2020). Bu çalışmada Per OB2 bölgesine astrometrik, kinematik ve fotometrik parametrelere HDBSCAN uygulanarak 8 alt-grup (190, 215, 216, 218, 219, 220, 226, 228) tanımlanmış; her birinin fiziksel parametreleri SED fitting ve izokron fitting gibi iki bağımsız yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bulgular, Per OB2'nin yaş (~2.2–4.6 Myr), uzaklık (~279–517 pc) ve metal bolluğu bakımından ayrıışan çok bileşenli bir yapı olduğunu, bu da OB oymaklarında ardışık/tetiklenmiş yıldız oluşumu senaryosunu (Blaauw 1964) desteklediğini göstermektedir.

Veri ve Yöntem

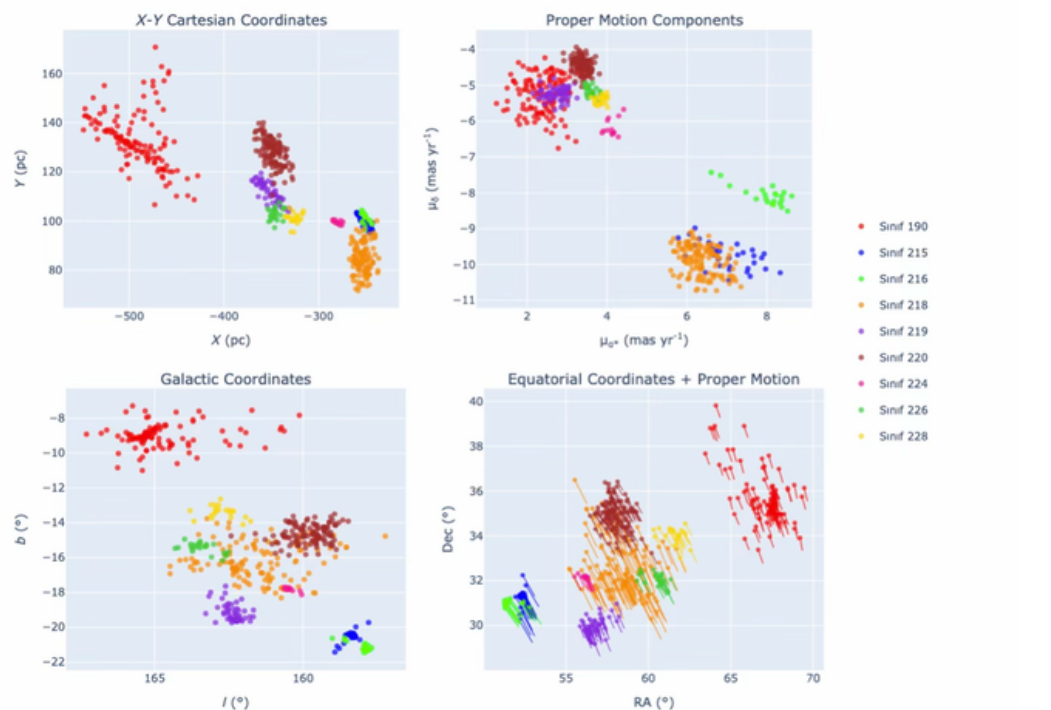
Bu çalışma, $l = [158^\circ, 163^\circ]$, $b = [-20^\circ, -16^\circ]$ aralığındaki ~20 deg²lik bir alandan Gaia DR3 verisi kullanılarak yapılmıştır. Verimizde, $RUWE < 1.4$, $parallax_over_error > 10$, $BP-RP < 2.5$ ve fotometrik akı hata oranı > 10 filtrelemesi yapılarak toplamda 18.717 yıldızlık örneklem elde edilmiştir. Üyelik, konum, özhareket ve paralaks uzayında alt-grupların yapısı, küme sayısı gibi ön ve yanlı bir bilgi gerektirmeyen ve değişken yoğunluktaki yapıları, alan yıldızından ayırt edebilen HDBSCAN algoritmasıyla belirlenmiştir. Adayların anlamlılığı bootstrap ve Monte Carlo testleriyle sınanmış ve doğrulanan alt-gruplar ayrıca konum, özhareket, galaktik hız ile galaktik/ekvatorial koordinat uzaylarında bağımsız olarak yeniden test edilmiştir. Şekil 1, Per OB2 oymağının HDBSCAN sonrası belirlenen alt grupları yeşil karelerle gösterilmektedir. Belirlenen fiziksel parametreler iki bağımsız yöntemle elde edilmiştir: çok bantlı fotometrik verilerin sentetik tayf grid'ine (model atmosferi kütüphanesine) χ^2 istatistiği temelinde en iyi uyumun belirlenmesiyle gerçekleştirilen SED fitting (Teff, log g, [M/H], yarıçap, Av, uzaklık; paralaks önsel bilgi olarak kullanılmıştır) ve alt-grup renk-parlaklık diyagramlarının PARSEC/MIST izokronlarına uydurulmasıyla gerçekleştirilen izokron fiti (yaş, uzaklık, Av, [M/H]; yaş yalnızca bu yöntemden elde edilmiştir). Ortak parametrelerdeki sonuçlar $\Delta = |SED - Iso|$ ile çapraz doğrulanmıştır.



Şekil 1: Per OB2 bölgesinin ($l=[158^\circ, 163^\circ]$, $b=[-20^\circ, -16^\circ]$) çok bantlı gökyüzü kompozit görüntüsü üzerinde, HDBSCAN algoritmasıyla konum, özhareket ve paralaks uzayında istatistiksel olarak anlamlı alt-grup üyesi olarak belirlenen yıldızlar yeşil kutucuklarla işaretlenmiştir.

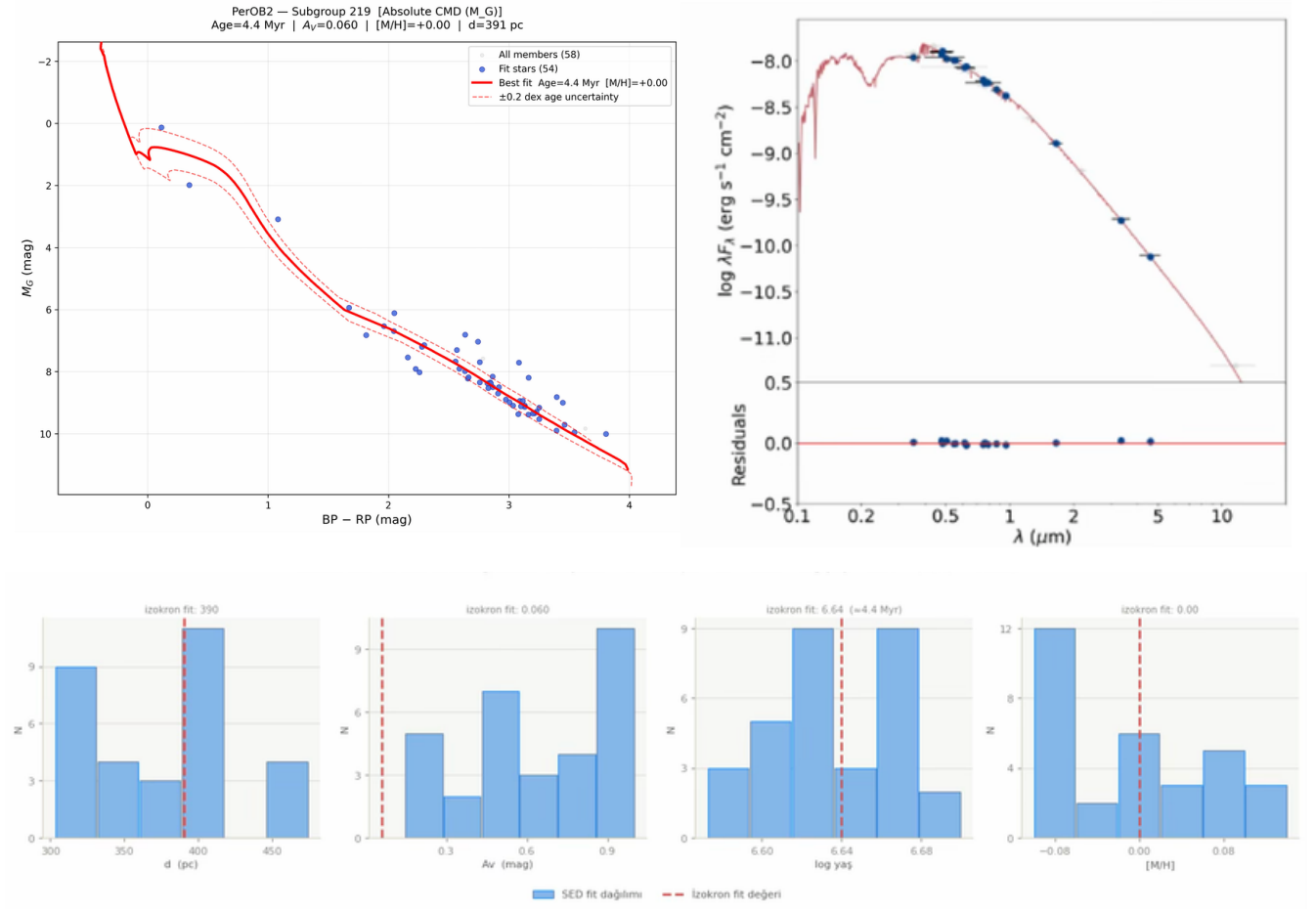
Bulgular

Alt-gruplar, konum, özhareket, galaktik ve ekvatorial koordinat uzaylarının her birinde tutarlı biçimde ayrılmaktadır. Şekil 2'e bakıldığında alt-gruplardan 190, dört uzayda da diğerlerinden kesin biçimde ayrık olduğu görülmektedir. Bu ayrım izokronlardan elde edilen ~517 pc'lik uzaklıkla örtüşerek onu bölgenin en uzak ve bağımsız bileşeni olarak doğrular. alt-gruplardan 216 ise özellikle özhareket uzayında tüm gruplardan tamamen ayrık bir dinamik yapı sergilerken, gökyüzü konumunda 215'e yakındır. Bu durum, iki grubun uzamsal olarak komşu fakat kinematik olarak kopuk olduğunu göstermektedir: alt-gruplardan 215 ve 218 ise hem özhareket hem galaktik hız uzayında örtüşerek ortak bir kinematik yapıya işaret etmektedir.



Şekil 2: Per OB2 alt-gruplarının (190, 215, 216, 218, 219, 220, 224, 226, 228) konum (X–Y), özhareket, galaktik ve ekvatorial koordinat uzaylarındaki dağılımı. Dört bağımsız uzayda tutarlı ayrışma, alt-grupların istatistiksel tesadüf değil gerçek kinematik yapıları olduğunu doğrulamakta; 190 tüm panellerde belirgin biçimde izole, 216 ise özhareket uzayında tamamen kopuk bir dinamik yapı sergilemektedir.

SED ve izokron sonuçları genel olarak yüksek uyum göstermektedir (ort. $\Delta Av \approx 0.02$ mag, $\Delta[M/H] \approx 0.03$ dex, $\Delta d \approx 3$ pc); alt-gruplardan 219, 226 ve 228 değerlerine göre daha büyük farklarla öne çıkmaktadır. Şekil 3'e bakıldığında 219'un renk-parlaklık diyagramı 4.4 Myr'lik izokronla anakol boyunca iyi uyum göstermekte, yalnızca birkaç sıcak üye fit bandının dışında kalmaktadır. Alt-grup 219 için verilen SED fite bakınca, sıcak üye yıldızın model ızgarasıyla düşük artılla temsil edildiğini göstermektedir. Özhareket uzayında en dikkat çekici bulgu, 216 numaralı alt-grubun diğer tüm gruplardan tamamen kopuk, bağımsız bir dinamik yapı sergilemesidir. Buna karşın 215 ve 218, hem özhareket hem galaktik hız (Vl, Vb) uzayında belirgin biçimde örtüşmekte; bu, iki grubun birbirine yakın uzaklıklarda (~279–292 pc) ve benzer söntülmelerde bulunmasıyla tutarlı olup, aynı büyük ölçekli kinematik yapının parçaları olabileceklerini düşündürmektedir.



Şekil 3: Sınıf 219 için mutlak renk-parlaklık diyagramı (üst panel) ve temsili SED uyumu (alt panel). Üst panelde 58 üyeden 54'ünün BP-RP–MG dağılımı, en iyi uyum sağlayan izokronla (Age=4.4 Myr, [M/H]=+0.00, d=391 pc, Av=0.060) ve ± 0.2 dex yaş belirsizliği bandıyla birlikte gösterilmiş, anakol boyunca yalnızca birkaç sıcak üye fit bandının dışında kalmıştır; alt panelde ise çok bantlı fotometriye dayanan SED fiti ve sifra yakın kalan artıklar verilmiş, bu da sınıf 219 üyelerinin sıcaklık ve söntüleme değerlerinin güvenilirliğini doğrulamaktadır.

Tartışma ve Sonuç

Yaptığımız bu çalışmada, dört bağımsız uzayda ayrıışan alt-grup90, Per OB2'nin geri kalanından farklı bir oluşum olayının ürünü olabilir. Alt-grup 215–216 çiftindeki uzamsal yakınlık/kinematik uzaklık bu grupların projeksiyonda çakışan ayrı yapılar olduğuna işaret ederken, 215–218'in konum ve kinematikte örtüşmesi ortak bir ön-grup kökenini desteklemektedir. SED–izokron uyumsuzluğunun 219, 226 ve 228'de yoğunlaşması, düşük üye sayısına bağlı istatistiksel belirsizlikle ilişkilendirilebilir. Bulgular bütünüyle, Per OB2'nin tek bir olay değil, farklı zaman ve kinematik özelliklere sahip, ardışık bir yıldız oluşum sürecinin ürünü olan çok bileşenli bir yapı olduğunu desteklemektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen parametreler Tablo1'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Elde edilen ~279–517 pc'lik uzaklık, Per OB2'yi asıl Perseus spiral kolundan ziyade Güneş'in de içinde bulunduğu Yerel Kol yapısına yerleştirmek; düzlemden uzaklığı ($z \approx 90$ –160 pc) ise bölgeyi Gould Kuşağı/Radcliffe Dalgası kompleksiyle ilişkilendirmektedir. Alt-grupların galaktik hız dağılımlarının Zari ve diğ. (2018) ve Cantat-Gaudin ve diğ. (2020)'deki yerel OB birlikleriyle karşılaştırılması bu konumu netleştirebilir. Bulunan yaş gradyanı (216: ~2.2 Myr – 218/220/228: ~4.6 Myr), spiral kol yoğunluk dalgası tetiklemesini yerel tetiklenmeden (Blaauw, 1964) ayırt etme potansiyeli taşısa da, bunu kesinleştirmek için gerçek Perseus Kolu'nu temsil eden daha uzak yapılarla karşılaştırmak gerekmektedir.

Alt-grup	A _v (mag)			[M/H] (dex)			Uzaklık (pc)			İzokron Yaşı (Myr)
	SED	ISO	Δ	SED	ISO	Δ	SED	ISO	Δ	
190	0.480	0.500	0.020	+0.09	+0.10	0.01	517.0	517.0	0.0	3.8
215	0.340	0.320	0.020	-0.21	-0.20	0.01	289.0	292.0	3.0	4.3
216	0.280	0.300	0.020	-0.18	-0.20	0.02	294.0	291.0	3.0	2.2
218	0.090	0.080	0.010	+0.11	+0.10	0.01	282.0	279.4	2.6	4.6
219	0.070	0.060	0.010	0.00	+0.10	0.10	387.0	390.5	3.5	4.4
220	0.110	0.120	0.010	+0.09	+0.10	0.01	380.0	383.6	3.6	4.6
226	0.030	0.020	0.010	+0.19	+0.20	0.01	378.0	374.0	4.0	3.8
228	0.030	0.080	0.050	+0.19	+0.10	0.09	347.0	350.7	3.7	4.6

Tablo1: Per OB2 alt-gruplarının SED ve izokron fitinden elde edilen söntüleme (A_v), metal bolluğu ([M/H]) ve uzaklık değerleri ile aradaki fark (Δ); son söntüm izokron çözümünden elde edilen yaşı vermektedir. İki bağımsız yöntemden elde edilen değerler sekiz alt-grubun büyük çoğunluğunda birbirine yüksek uyum içindedir (ort. $\Delta Av \approx 0.02$ mag, $\Delta[M/H] \approx 0.03$ dex, $\Delta d \approx 3$ pc); yalnızca 219, 226 ve 228'de görece daha büyük sapmalar öne çıkmaktadır.