

Galaksi M51’de Bulunan APX X-4’ün Çoklu Dalgaboyu Analizleri

Aysun Akyüz^{1,2}*, Şenay Avdan^{1,2}, Nazım Aksaker^{2,3}, Sinan Allak⁴,
İnci Akkaya Oralhan⁵

¹ Çukurova Üniversitesi, Fizik Bölümü, Adana

² Çukurova Üniversitesi, Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), Adana

³ Çukurova Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Adana

⁴ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fizik Bölümü, Çanakkale

⁵ Erciyes Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kayseri

Özet

Bu çalışmada, M51 galaksisinde bulunan APX-4’ün optik karşılığı araştırılmıştır. Aşırı parlak X-ışın kaynakları (Ultraluminous X-ray sources, ULXs), $10 M_{\odot}$ ’lik bir kara delik için Eddington sınırının üzerinde izotropik ışıtmaya ($L_X > 10^{40}$ erg s^{-1}) sahip değişken, galaksi merkezinde olmayan nokta benzeri X-ışını kaynaklarıdır. APX-4’ün HST gözlemlerinden F438W (B), F555W (V) ve F814W (I) bandlarındaki verileri kullanılmıştır. 0.2 açısanıyesi hata yarıçapında iki optik karşılığı aday tanımlanmış ve bunların V parlaklığı yaklaşık olarak 23 kadir bulunmuştur. APX-4’ün olası optik karşılıkları, yüksek kütleli X-ışın çifti içeren B tipi superdev yıldız sınıfında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: X-rays: binaries, Sıkı Nesnelere

1 Giriş

Aşırı-parlak X-ışın kaynakları (APX, Ultraluminous X-ray Sources), bilinen Galaktik X-ışın çiftlerinden daha yüksek ışıma değerine sahip ancak aktif galaktik çekirdeklere göre daha düşük ışıma değerine sahip ekstragalatik X-ışın kaynaklarıdır. APX’lerin doğası hala belirsizdir. Yüksek ışıma değerlerini açıklamak için birkaç model vardır. Yaygın olanlar; yıldız kütleli karadeliğe üzerine Süper Eddington yığılma oranının olduğu model (Poutanen ve ark. 2013) ya da orta kütleli karadeliğin standart disk modeli örnek verilebilir (Colbert ve Richard 1999) (Feng ve Soria 2011). Öte yandan pulsasyon yapan M82 APX-2 (Bachetti ve ark. 2014), NGC 7793 P13 (Israel ve ark. 2016) ve NGC 300 APX-1 (Carpano ve ark. 2018) gibi kaynakların nötron yıldızı içeren sistemler olduğu keşfedildi. Bu keşifler, bazı APX’lerin kara delik yerine nötron yıldızların olabileceği fikrini ortaya çıkarmıştır.

APX’lerin çoklu dalgaboylu gözlemleri; bileşen yıldızların optik ışımaya mekanizmaları (donör yıldız veya/ve biriktirme diskinden kaynaklanabilen), kütle ve tayf tipleri ve çevreleri hakkında önemli bilgiler sunar. Özellikle, APX’lerin optik karşılıkları ve geniş bant fotometrelerinin tanımlanması, bileşen yıldızın kütle ve spektral tipini sınırlamamıza olanak sağlar. Bugüne kadar, birçok APX’in optik karşılığı, yakın galaksilerde, yer tabanlı teleskoplar ve Hubble Uzay Teleskopu (HST) kullanılarak bulunmuştur. Çalışmalar, bazılarının bulunduğu galaksilerde yıldız oluşum bölgeleri veya yıldız kümeleri/grupları ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Soria ve ark. 2005; Abolmasov ve ark. 2007; Grise ve ark. 2011; Avdan ve ark. 2016).

M51 (NGC 5194), uzaklığı 8.4 Mpc olan (Feldmeier ve ark. 2016) ve komşu cüce galaksi NGC 5195 ile etkileşen bir sarmaal galaksidir. Chandra gözlemleri (Terashima ve Wilson

2004) kullanılarak dokuz APX (M51 galaksisinde yedi, NGC 5195 galaksisinde iki) olduğu bulunmuştur. Bu dokuz APX’in ışıma değerleri $L_X = (1-4) \times 10^{39}$ erg s^{-1} arasında olduğu bulunmuştur. M51 galaksisindeki APX’lerin optik karşılıkları HST verileri kullanılarak tanımlanmıştır. Dört APX’in (APX-1, 2, 8 ve 9) bir veya iki aday karşılığı ve iki APX’in (APX-4 ve 7) hata çevrelerinde çok sayıda yıldızları olduğunu bulunmuştur (Terashima ve ark. 2006). Kalan üçünün (APX-3, 5 ve 6) hiçbir karşılığı bulunamamıştır. Ayrıca, APX’lerin beşinin herhangi bir kümeyle hiçbir ilişkisi olmadığını, diğer dördünün (APX-2, 4, 7 ve 9) yıldız kümeleriyle ilişkili olduğunu bulunmuştur. Son zamanlarda yapılan çalışmada, M51’deki APX-1 ve 2 ile mekansal olarak ilişkili iki iyonize bulutsunun, yeni ve arşiv çoklu dalgaboyu verileri kullanılarak sunulduğu ve her iki APX’in bileşenleri X-ışını tutulma özelliği gösterdiği bulunmuştur (Urquhart ve ark. 2018).

Bu çalışmada, M51 galaksisindeki APX-4’ün optik karşılıkları, HST/ACS/WFC arşiv görüntüleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu galaksinin, APX-4’ün yaklaşık konumları olan üç renkli SDSS (Sloan Digital Sky Survey) görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir. APX-4 bir yıldız kümesinin yanında bulunur ve Chandra koordinatı RA= 13 29 53 31, DEC = + 47 10 42 46’dır. Bu kaynak daha önce 0.3–10 keV enerji bandında $L_X = 2.2 \times 10^{39}$ erg s^{-1} değerinde bir ışıtmaya sahip olduğu bulunmuştur (Swartz ve ark. 2018).

2 Gözlemler ve Analizler

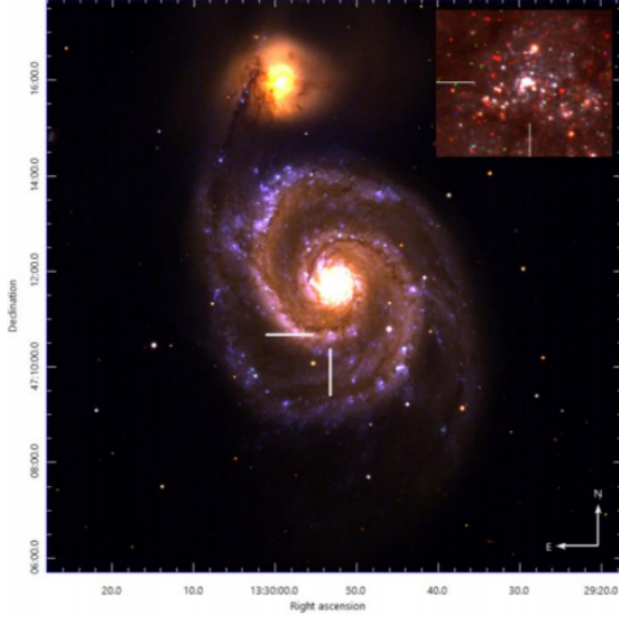
2.1 X-ışın Gözlemleri

M51 APX-4, 17 yıl boyunca XMM-Newton ve Chandra ile birçok kez gözlenmiştir. Altı XMM-Newton, 14 Chandra gözleminin hepsi yeniden analiz edilmiştir. XMM-Newton veri analizleri, SAS (Science Analysis Software versiyon 17.0) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Her gözlem için EPIC pn ve MOS olay

* aakyuz2013@gmail.com

Çizelge 1. APX-4'ün HST/ACS/WFC Gözlemleri

Filtre	Gözlem No.	Gözlem Zamanı	Poz süresi (s)
ACS/WFC/F435W	J97C54V9Q	2005-01-21	680
ACS/WFC/F555W	J97C54VAQ	2005-01-21	340
ACS/WFC/F658W	J97C54VEQ	2005-01-21	680
ACS/WFC/F814W	J97C54VCQ	2005-01-21	340



Şekil 1. M51'in üç renk (R:SDSS I, G: SDSS R, B:SDSS U) görüntüsü ile APX'in konumunu (beyaz çizgi)

(event) dosyalarını elde etmek için *epchain* ve *emchain* taskları kullanılmıştır.

Chandra veri analizleri, *CIAO* (*Chandra Interactive Observations Analysis version 4.10*) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kaynak, *ACIS-S3* çipinde bulunmaktadır. Level 2 olay dosyaları *chandra_repro* kullanarak elde edilmiştir. Tayf ve ışık eğrisi dosyaları oluşturmak için *specextract* ve *dmextract* taskı kullanılmıştır. Arkaplan parlamları, her iki analiz için kaynağın yakınında kaynaklı bölgeler seçilerek çıkarılmıştır.

Her ne kadar APX-4'ün çok sayıda gözlemi arşivde mevcut olsa da, verilerin istatistiksel kalitesi bir Chandra gözlemi dışında (Obs ID 15553) tayfsal analiz yapmak için yeterli olmadığı görülmüştür. Chandra verileri için, APX-4'ün tayfı en iyi model absorbed PL (Power Law) ile foton indeksi (Γ) 2.05 ve $L_X = 1.22 \times 10^{39}$ erg s $^{-1}$ ısıtma değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Kalan veri setleri için akı değerleri PL modeli varsayılarak 0.3-10 keV enerji bandı aralığında sayım oranından (counts) türetilmiştir ($\Gamma = 2.05$, $N_H = 0.04 \times 10^{22}$ cm $^{-2}$).

2.2 HST Gözlemleri

APX-4'ün optik karşılığını bulmak için, HST/ACS/WFC arşiv verileri kullanılmıştır. Gözlemlerin detayları Çizelge 1'de verilmiştir. HST görüntülerinde APX X-4'ün karşılıkları bir kümede olduğu görülmektedir (Şekil 2). Bu bölge, TUG'da (*TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi*) RTT-150 (*Rus-Türk Teleskopu, 150 cm*) ile

Çizelge 2. APX-4'ün HST/ACS/WFC gözlemleriyle elde edilen optik karşılıkların parlaklık değerleri

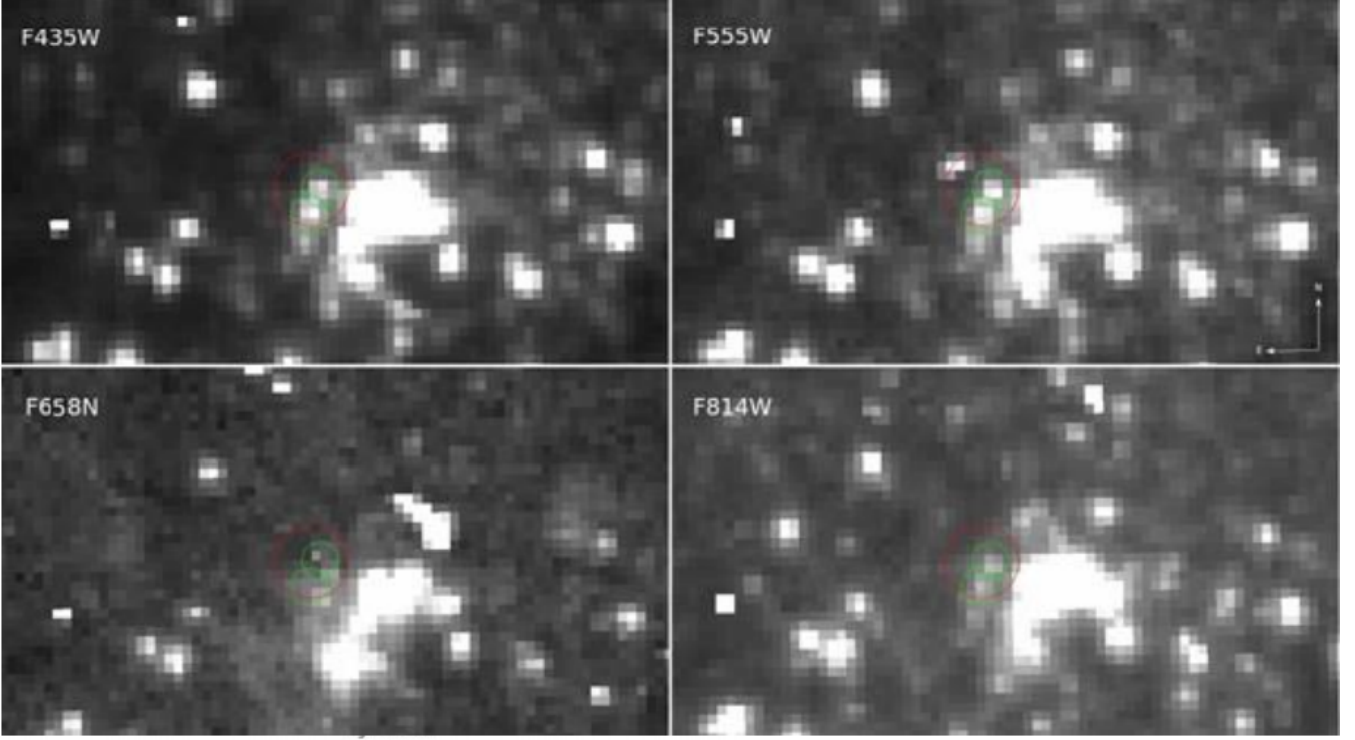
Filtre	A1	A2
ACS/F435W	22.88±0.02	22.95±0.02
ACS/F555W	22.99±0.03	23.11±0.03
ACS/F658W	22.05±0.10	22.26±0.09
ACS/F814W	22.76±0.76	23.06±0.04
M_V	-6.53	-6.41

gözlenmiştir. Yıldız kümesinin kırmızıya kayma oranını hesaplamak ve gözlenen Balmer düşmesine karşılık gelen görsel sönme Av değerini belirlemek için gözlemler yapılmıştır. Hesaplanan kırmızıya kayma, tayfata H_α çizgisi kullanılarak Z yaklaşık olarak 0.0017 olarak belirlenmiştir. Bu değer M51'in kırmızıya kayması ile tutarlıdır ($Z_g = 0.002$). Bu nedenle, M51 galaksisi bir yıldız kümesinin elemanıdır. Küme bölgesinde H_α ve H_β akıları, gözlenen Balmer düşmesini (H_α/H_β) belirlemek için hesaplanmıştır. Daha sonra kızarıklık E(B-V) hesaplamak için; standart (H_α/H_β) = 2.87, yıldız oluşum galaksileri ile ilişkili olan elektron yoğunluğu $n_e = 10^2$ cm $^{-3}$ ve B tipi yıldız olması durumunda sıcaklığı T = 10 4 K olarak belirlenmiştir (Osterbrock ve Donald 2006). Daha sonra sönümleme ile ilişkili olan A_V M51 için hesaplanmıştır.

Karşılıkların konumunu belirlemek için HST, Chandra ve 2MASS görüntüleri arasında astrometrik düzeltmeler yapılmıştır. Astrometrik düzeltmeden sonra, iki olası aday (A1 ve A2) 0.2 açısıyarısı yarıçapında tanımlanmıştır (Şekil 2). Karşılıkların parlaklığını hesaplamak için, Nokta Yayınım Fonksiyonu (*Point Source Function, PSF*) fotometrisi yapan *Dolphhot v2.0* (Dolphin 2006) yazılımı kullanılmıştır. Her iki aday için elde edilen parlaklıklar Çizelge 2'de listelenmiştir. Bu parlaklıklar E(B-V) = 0.15 sönümleme değeri ile düzeltilmiştir. Bu değer, M51'deki E(B-V) = 0.03 Galaktik sönümlemeye daha büyük olduğu bulunmuştur (Schlafly ve Finkbeiner 2011).

3 Tartışma ve Sonuç

M51 galaksisindeki APX-4'ün optik özellikleri, HST/ACS arşiv verileri kullanılarak incelenmiştir. Astrometrik düzeltmeden sonra optik karşılığı için iki aday tespit edilmiştir. Optik adayların hesaplanan parlaklıkları, diğer APX karşılıklarına (Tao ve ark. 2011) benzer şekilde sönük kaynaklar (m_V yaklaşık 22 kadir) olduğu bulunmuştur. Adaylar F658N filtresinde de tanımlanmıştır, ancak diğer filtrelere kıyasla parlaklıkların hata değerleri oldukça büyük olduğu bulunmuştur. X-ışını kaynağının karşılıkları bir yıldız kümesine ait olduğu söylenebilir. APX-4'ün optik karşılıkların yaşını tahmin etmek için F555W'e karşı F435W - F555W ve F814W'e karşı F555W - F814W olan iki renk diyagramları (CMD) (Bressan ve ark. 2011) elde edilmiştir (Şekil 3). PARSEC izokronları CMD'lerde kullanılmıştır. CMD'leri elde etmek için M51'in metaliklik ve uzaklık modülü (Urquhart ve ark. 2018) sırasıyla Z = 0.015 ve 29.67 olarak kullanılmıştır. 5 açısıyarısında seçilen yıldızlar, neredeyse aynı kızarıklık değerlerine sahiptir. Bu sonuç, aynı yıldız kümesinde olabileceğini gösteren önemli bir parametredir. Karşılıkların olası yaşı, A1 ve A2 için sırasıyla (8-13) ve (6-9) milyon yıl aralığında hesaplanmıştır. Sistemdeki donör yıldızların tayfsal tipleri, renk indeksleri ve mutlak parlaklık değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir (A1 için B-V = -0.15, $M_V = -7$ ve A2 için B-V = -0.27, $M_V = -6.9$). Optik ışıma, X-ışını fotoiyonizasyonu veya her ikisinin kombinasyonu ile donör



Şekil 2. APX-4'ün HST/ACS gözlemleri. APX-4'ün, düzeltilmiş pozisyonunu (kırmızı) 0.2 açısaneye yarıçapında ve optik karşılıkları 0.1 açısaneye yarıçapı (yeşil) içinde temsil edilmiştir

yıldızdan veya biriktirme diskinden kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir. Eğer donör yıldızda optik ışımaya baskın ise ve gerçek renklerin *Schmidt-Kaler* (Aller ve ark. 1982) tablosunu dikkate aldığında, A1 ve A2'in tayfsal tipli sırasıyla B3 - B8 ve B0 - B2 süperdevler olarak tahmin edilmiştir.

X-ışın-optik akı oranı, APX karşılıkların Aktif Galaktik Çekirdeklerden (AGN) ayırt etmek için kullanılabilir. Bu hesaplama $\log(F_X/F_{optik})$ (Aird ve ark. 2010) kullanılarak yapılır, burada F_X 2 - 10 keV'de hesaplanan X-ışını akısıdır, F_{optik} optik akıdır (Aird ve ark. 2010). A1 ve A2 için bu oranlar sırasıyla 66 ve 73 olarak hesaplanmıştır. AGN oranları 0.1 - 10 keV aralığında olsa da, tahmin edilen değerler diğer APX'ler için uyumludur (Avdan ve ark. 2016). Ayrıca arşivlerde bulunan Chandra ve XMM-Newton gözlemlerini kullanarak APX-4'ün X-ışını tayfsal özelliklerini de incelenmiştir. Chandra akıları $\Gamma = 2.05$ ve $N_H = 0.04 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ PL modeli ile 0.3-10 keV aralığında sayım oranlarından türetilmiştir. Kaynağın ışıması $L_X = (0.05 - 12.2) \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ aralığına denk geldiği bulunmuştur.

APX-4'ün, yüksek ısıtma değeri ($> L_X = 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) on altı gözlemden sadece birinde (Obs ID 15553) tespit edilmiştir. Düşük poz süresi nedeniyle ObsID 414 dikkate alınmamıştır. Öte yandan, XMM-Newton gözlemleri için enerji dönüşüm faktörü kullanarak akı oranlarını sayım oranlarından hesaplanmıştır. Kaynağın APX'lerin sahip olduğu ısıtma değerini veren sadece iki gözlem (ObsID 303420101 ve 677980701) bulunmaktadır. Sonuçlarımızı, önceki çalışmalar ile karşılaştığımızda bu kaynağın geçici kaynak özelliği gösterdiği bulunmuştur (Terashima ve Wilson 2004). Ayrıca, son çalışmalara (Earnshaw ark. 2016) bakıldığında APX-4'ün bimodal akı dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç,

kompakt yıldızın pulsasyon özelliğine bakılmaksızın, bir nötron yıldızı olup olmadığını tanımlamak için bir yöntem olabilir.

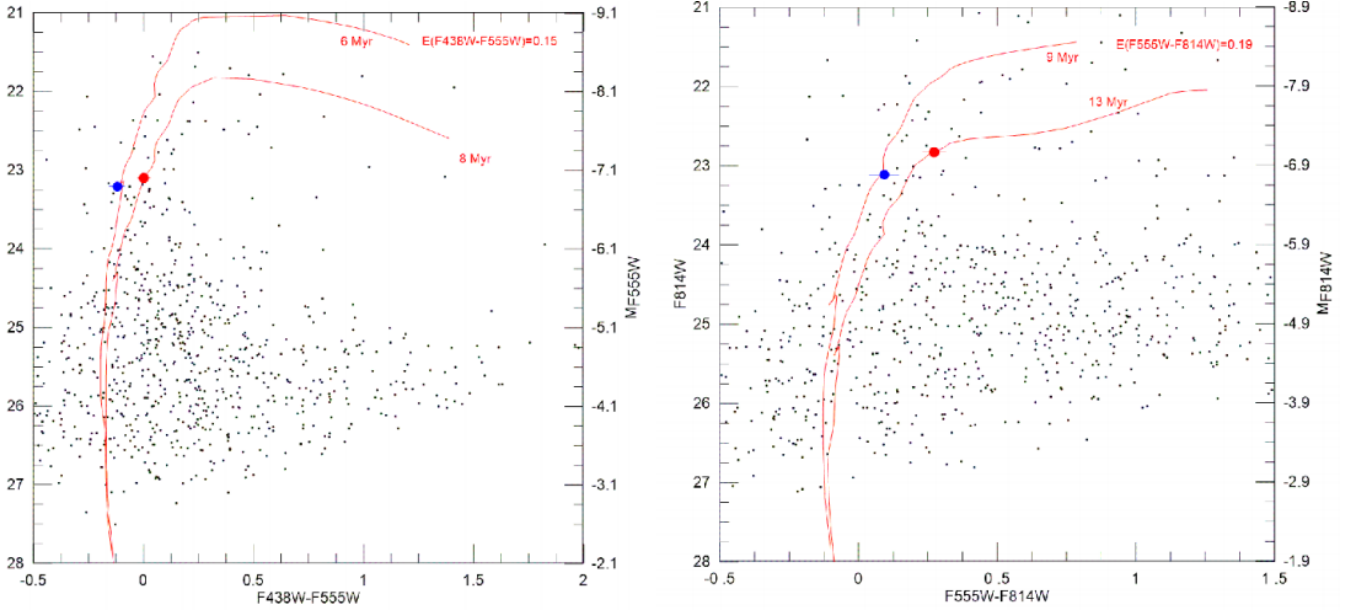
Özet olarak; HST/ACS gözlemleri sonucu, M51 galaksisindeki APX-4'ün optik karşılıkları bir yıldız kümesi içinde yer almaktadır. APX-4'ün optik ışımada bileşen yıldızın baskın olduğunu varsayarsak, karşılıkların tayfsal tipleri B tipi süperdev olan yüksek kütleli X-ışını çiftleri olduğu sonucuna varılabilir. Öte yandan, optik ışımada biriktirme disk baskın ise, optik ışımada önemli değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, söz konusu değişkenliği bulmak için aynı filtre ile ardışık gözlemler gerekir. APX-4'ün doğasını anlamamızı geliştirmek için daha hassas fotometrik ve tayfsal gözlemler yapılmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 117F115 no'lu proje ile desteklenmektedir. Tayfsal gözlemler 18BRTT150-1367 proje numarasıyla TÜBİTAK RTT-150 teleskobu (Rusya-türkiye 1.5 m, Antalya) ile alınmıştır.

Kaynaklar

- Abolmasov, Pavel K.; Swartz, Douglas A.; Fabrika, S.; Ghosh, Kajal K.; Sholukhova, O.; Tennant, Allyn F., 2007, AJ, 668, 124-129.
 Aird, J.; Nandra, K.; Laird, E. S.; Georgakakis, A.; Ashby, M. L. N.; Barmby, P.; Coil, A. L.; Huang, J.-S.; Koekemoer, A. M.; Steidel, C. C.; Willmer, C. N. A., 2010, MNRAS, 401, 2531-2551.
 Aller, L. H.; Appenzeller, I.; Baschek, B.; Duerbeck, H. W.; Herczeg, T.; Lamla, E.; Meyer-Hofmeister, E.; Schmidt-Kaler, T.; Scholz, M.; Seggewiss, W.; Seitter, W. C.; Weidemann, V.: Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series " Gruppe/Group 6 Astronomy and Astrophysics " Volume 2 Schaifers/Voigt: Astronomy



Şekil 3. APX-4'ün karşılıkların ve kümedeki yıldızların CMD'si. Kırmızı A1 ve mavi A2'nin karşılıklarını göstermektedir. İzokronlar $A_V = 0.47$ ve A_I değerleriyle düzeltilmiştir.

and Astrophysics / Astronomie und Astrophysik " Stars and Star Clusters / Sterne und Sternhaufen.

Avdan, S.; Vinokurov, A.; Fabrika, S.; Atapın, K.; Avdan, H.; Akyüz, A.; Sholukhova, O.; Aksaker, N.; Valeev, A., 2016, MNRAS, 455, L91-L95.

Bachetti, M.; Harrison, F. A.; Walton, D. J.; Grefenstette, B. W.; Chakrabarty, D.; Fürst, F.; Barret, D.; Beloborodov, A.; Boggs, S. E.; Christensen, F. E.; Craig, W. W.; Fabian, A. C.; Hailey, C. J.; Hornschemeier, A.; Kaspi, V.; Kulkarni, S. R.; Maccarone, T.; Miller, J. M.; Rana, V.; Stern, D.; Tendulkar, S. P.; Tomsick, J.; Webb, N. A.; Zhang, W. W., 2014, Nature, 514, 202-204.

Bressan, Alessandro; Marigo, Paola; Girardi, Léo.; Salasnich, Bernardo; Dal Cero, Claudia; Rubele, Stefano; Nanni, Ambra, 2011, MNRAS, 427, 127-145.

Carpano, S.; Haberl, F.; Maitra, C.; Vasilopoulos, G., 2018, MNRAS-Letters, 476, L45-L49.

Colbert, Edward J. M.; Mushotzky, Richard F., 1999, AJ, 519, 89-107.

Dolphin, Andrew E., 2006, PASP, 112, 1383-1396.

Earnshaw, H. P.; Roberts, T. P.; Sathyaprakash, R., 2016, MNRAS, 476, 4272-4277.

Feng, Hua; Soria, Roberto, 2011, New Astronomy Reviews, 55, 166-183.

Feldmeier, A.; Puls, J.; Pauldrach, A. W. A., 2016, *â*, 322, 878-895.

Grisé, F.; Kaaret, P.; Pakull, M. W.; Motch, C., 2011, AJ, 734, 14.

Osterbrock, Donald E.; Ferland, Gary J.: Book Review: Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei (2ND Edition) / University Science Books, 2005. Mercury, vol. 35, no. 1, p. 40

Israel, G. L.; Esposito, P.; Rea, N.; Coti Zelati, F.; Tiengo, A.; Campana, S.; Mereghetti, S.; Rodriguez Castillo, G. A.; Götz, D.; Burgay, M.; Possenti, A.; Zane, S.; Turolla, R.; Perna, R.; Cannizzaro, G.; Pons, J., 2016, MNRAS, 457, 3448-3456.

Poutanen, Juri; Lipunova, Galina; Fabrika, Sergei; Butkevich, Alexey G.; Abolmasov, Pavel, 2013, MNRAS, 377, 1187-1194.

Schlafly, Eddie; Finkbeiner, D. P., 2011, AAS Meeting 217, BAAS, 43.

Soria, Roberto; Cropper, Mark; Pakull, Manfred; Mushotzky, Richard; Wu, Kinwah, 2005, MNRAS, 356, 12-28.

Swartz, Douglas A.; Soria, Roberto; Tennant, Allyn F.; Yukita, Mi-

hoko., 2018, AJ, 741, 10.

Tao, Lian; Feng, Hua; Grisé, Fabien; Kaaret, Philip, 2011, AJ, 737, 14.

Terashima, Yuichi; Wilson, Andrew S., 2004, AJ, 601, 735-758.

Terashima, Yuichi; Inoue, Hirohiko; Wilson, Andrew S., 2006, AJ, 645, 264-270.

Urquhart, R.; Soria, R.; Johnston, H. M.; Pakull, M. W.; Motch, C.; Schwöpe, A.; Miller-Jones, J. C. A.; Anderson, G. E., 2018, MNRAS, 475, 3561-3576.

Erişim:
031-0900: **UAK-2018 Program — UAK Bildiri — Turkish J.A&A.**