

S. Öner^{1,2}, Y. Aladağ^{1,2}, A. Akyüz^{1,2}, Allak³, İ. Akkaya Oralhan⁴, N. Aksaker^{1,5}

¹Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Türkiye

²Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, 01330, Adana, Türkiye

³Institut für Astronomie und Astrophysik, Sand 1, 72076 Tübingen, Germany

⁴Astromoni ve Uzay Bilimleri, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye

⁵Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Çukurova Üniversitesi, 01410, Adana, Türkiye

Giriş

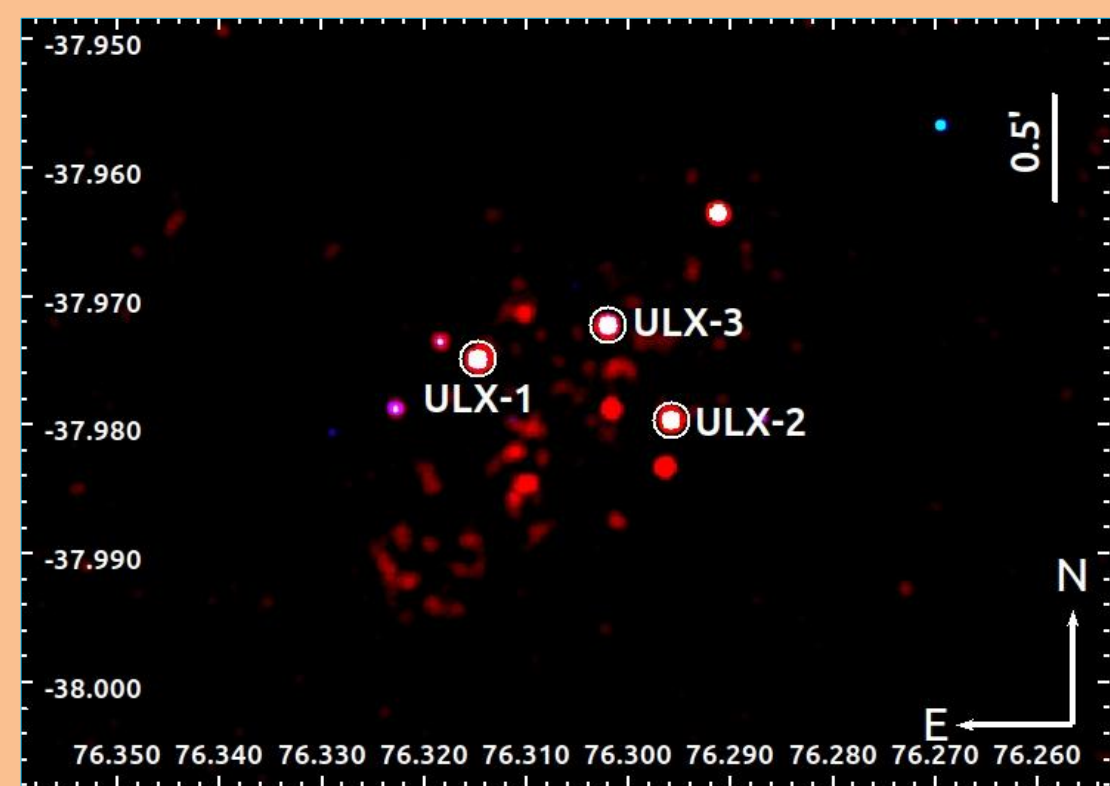
Aşırı Parlak X-ışını Kaynakları (ULX'ler); tipik yıldız kütleli bir kara delik (~10 M_⊙) için Eddington limitini aşan ısıtılmalarıyla, L_x ≥ 10³⁹ erg/s, Galaksi dışı parlak X-ışını nokta kaynaklardır.

Birçok ULX'in, yıldız kütleli karadelik veya nötron yıldızı üzerine gerçekleşen süper-Eddington madde yığılmasıyla beslendiği düşünülmekte ve bu kaynaklar, süper-Eddington yığılma fiziğinin incelenmesi açısından önemli laboratuvarlar olarak değerlendirilmektedir (Fabrika ve ark. 2021; King ve ark. 2023). HST ve JWST ile yapılan çalışmalar, birçok ULX bileşeninin genç yıldız popülasyonları ile kırmızı ve sarı süperdevler gibi evrimleşmiş büyük kütleli yıldızlarla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Heida ve ark. 2014, 2016; Martin & Humphreys 2023; Humphreys 2025).

Bu çalışmada, Chandra, HST ve JWST gözlemlerinin çoklu dalgaboyu analizleriyle NGC 1792'teki ULX'lerin X-ışını ve olası donör yıldız özellikleri incelenmiştir. NGC 1792, 11.08 Mpc uzaklıkta yıldız oluşumlu bir sarmal galaksidir (Liu ve ark. 2005; Bernadich ve ark. 2022).

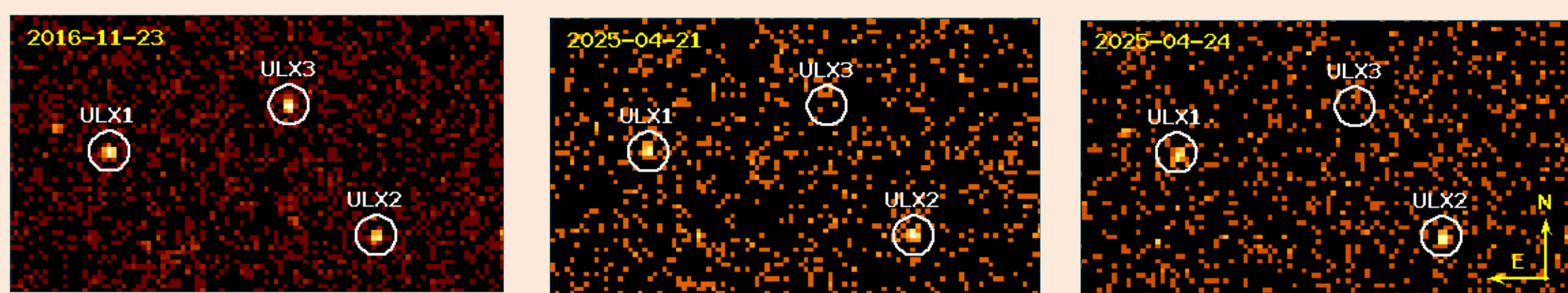
Tablo 1. NGC 1792'nin Chandra, HST ve JWST gözlem bilgileri

Start Date	Instrument	Obs. ID	Label	Exp. (ks)
2016-11-23	Chandra/ACIS-S	19524	C1	19.79
2025-04-21	Chandra/ACIS-S	29642	C2	17.34
2025-04-24	Chandra/ACIS-S	30910	C3	17.34
2019-05-25	HST/WFC3/UVIS	15654	F275W	2.19
2019-05-25	HST/WFC3/UVIS	15654	F336W	1.11
2019-05-25	HST/WFC3/UVIS	15654	F438W	1.05
2019-05-25	HST/WFC3/UVIS	15654	F555W	0.67
2019-05-25	HST/WFC3/UVIS	15654	F814W	0.83
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F150W	0.86
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F200W	0.86
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F277W	0.86
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F335M	1.63
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F60M	1.63
2024-09-29	JWST/NIRCam	4793	F444W	0.86



Şekil 1. NGC 1792 için Chandra X-ışını RGB görüntüsü. Renkler sırasıyla yumuşak (0.5–1.2 keV), orta (1.2–2.0 keV) ve sert (2.0–8.0 keV) olarak alındı.

Chandra Analizleri



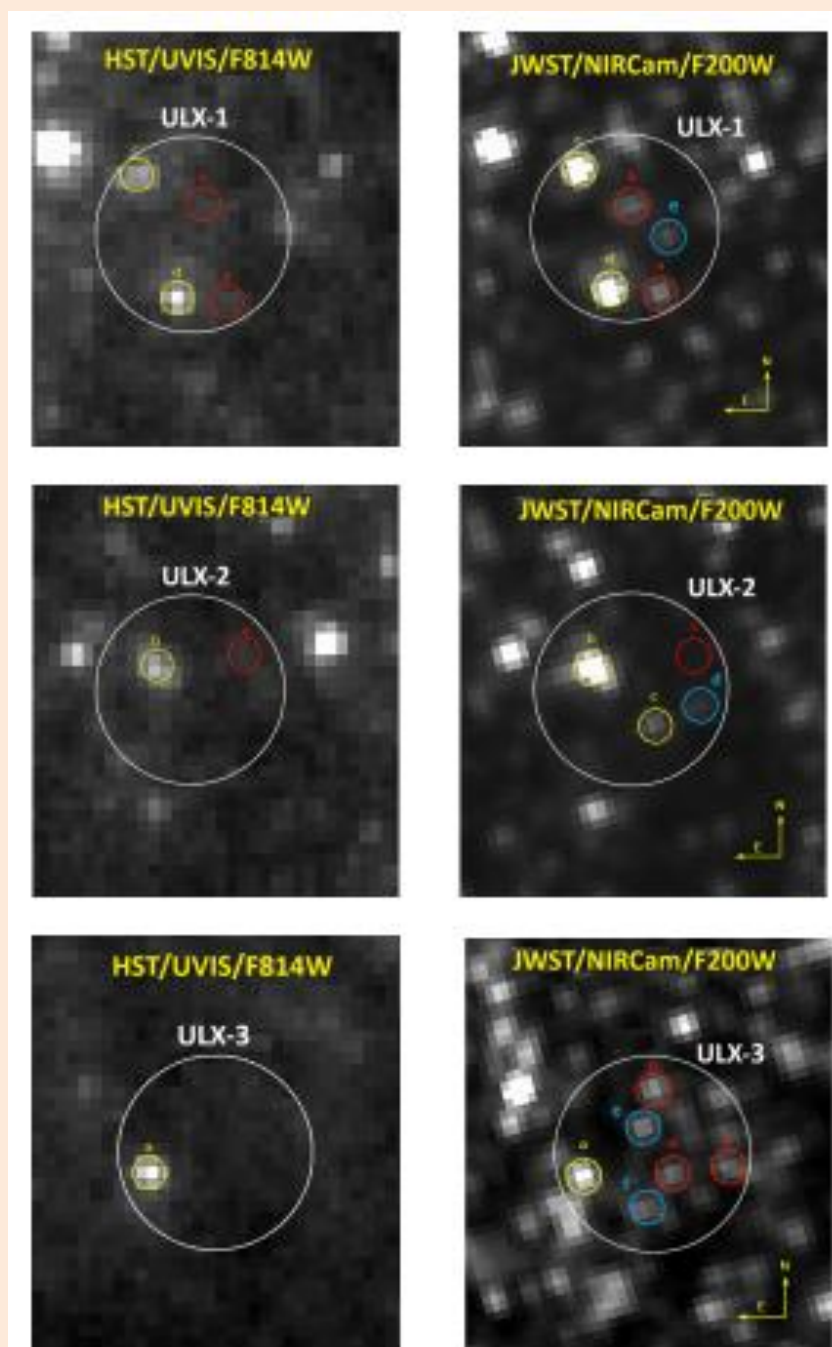
Şekil 2. NGC 1792'nin üç farklı dönemde elde edilen Chandra X-ışını görüntüleri. ULX'lerin konumları, her biri 4 açısıniyesi yarıçapındaki beyaz çemberlerle gösterilmektedir.

Veriler Calibration Database (CALDB) 4.12 sürümünden alınan kalibrasyon dosyaları ile birlikte CIAO yazılımını kullanarak analiz edildi. Üç parlak (L_x ≥ 10³⁹ erg/s) kaynak tespit edildi:

- ULX-1 ile ULX-2, gözlemlerin hepsinde mevcut ve bilinen kaynaklardır.
- ULX-3 ise 2016 gözleminde ilk kez tespit edildi geçici (transient) kaynak belirlendi.
- NGC 1792'nin üç renkli X-ışını görüntüsü Şekil 1'de; ULX-3'ün geçici davranışını ortaya koyan Chandra gözlemleri ise Şekil 2'de verilmektedir.

Tablo 2. ULX'ler için en iyi uyum veren tayfsal parametreler

Source	Data label	Net Rate (10 ⁻⁵ counts/s)	N _H (10 ²² cm ⁻²)	1/T _{in} (keV)	χ ² /dof	F ₁ (10 ⁻¹⁴ erg cm ⁻² s ⁻¹)	L _x (10 ³⁹ erg s ⁻¹)
ULX-1	C1	17.79±0.97	0.13 ^{+0.28} _{-0.08}	1.61 ^{+0.46} _{-0.16}	11.651(30.90)	2.52 ^{+0.24} _{-0.12}	4.35 ^{+0.47} _{-0.24}
	C2+C3	2.74±0.31	0.019 ^{+0.01} _{-0.01}	2.37 ^{+0.26} _{-0.10}	15.95(161.0)	0.76 ^{+0.12} _{-0.05}	1.22 ^{+0.21} _{-0.10}
ULX-2	C1	6.37±0.61	0.06 ^{+0.08} _{-0.03}	2.36 ^{+0.29} _{-0.10}	20.772(10.99)	0.76 ^{+0.13} _{-0.05}	1.37 ^{+0.27} _{-0.12}
	C2+C3	4.30±0.37	0.06 ^{+0.08} _{-0.03}	2.71 ^{+0.26} _{-0.10}	21.05(230.92)	0.93 ^{+0.12} _{-0.05}	1.97 ^{+0.21} _{-0.10}
ULX-3	C1	22.89±1.10	0.37 ^{+0.32} _{-0.27}	1.53 ^{+0.35} _{-0.12}	17.82(180.99)	3.63 ^{+0.29} _{-0.12}	6.93 ^{+0.64} _{-0.31}
ULX-1	C1	17.79±0.97	0.019 ^{+0.01} _{-0.01}	1.46 ^{+0.46} _{-0.16}	12.361(30.95)	1.96 ^{+0.19} _{-0.08}	2.94 ^{+0.31} _{-0.14}
	C2+C3	2.74±0.31	0.019 ^{+0.01} _{-0.01}	0.91 ^{+0.26} _{-0.10}	20.49(161.28)	0.43 ^{+0.02} _{-0.01}	0.67 ^{+0.11} _{-0.05}
ULX-2	C1	6.37±0.61	0.019 ^{+0.01} _{-0.01}	0.71 ^{+0.02} _{-0.01}	25.722(1.22)	0.53 ^{+0.09} _{-0.04}	0.81 ^{+0.16} _{-0.08}
	C2+C3	4.30±0.37	0.019 ^{+0.01} _{-0.01}	0.72 ^{+0.02} _{-0.01}	22.49(230.98)	0.65 ^{+0.09} _{-0.04}	1.01 ^{+0.16} _{-0.08}
ULX-3	C1	22.89±1.10	0.23 ^{+0.29} _{-0.19}	1.66 ^{+0.36} _{-0.12}	17.04(180.95)	2.83 ^{+0.25} _{-0.12}	4.85 ^{+0.65} _{-0.31}
	C2+C3	< 0.30	< 0.06	1.24 ^{+0.36} _{-0.12}	17.04(180.95)	< 0.06	< 0.10



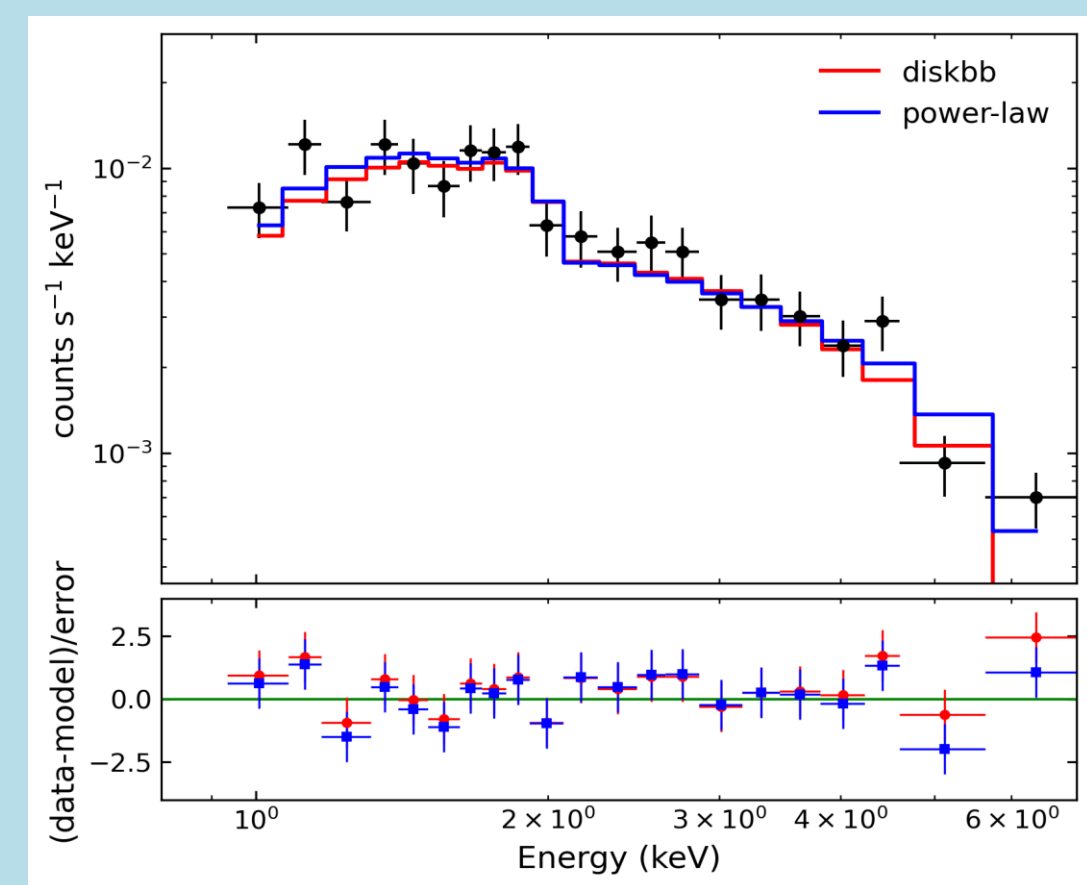
Şekil 3. ULX'lerin 0.34" astrometrik hata yarıçapındaki aday karşılıkları. Sarı çemberler bu çalışmada incelenen donör adaylarını, kırmızı ve mavi çemberler sırasıyla tamlik limitinden sönük ve en fazla iki filtrede tespit edilen (incelenmeyen) kaynakları gösterir.

X-ışın değişkenliği

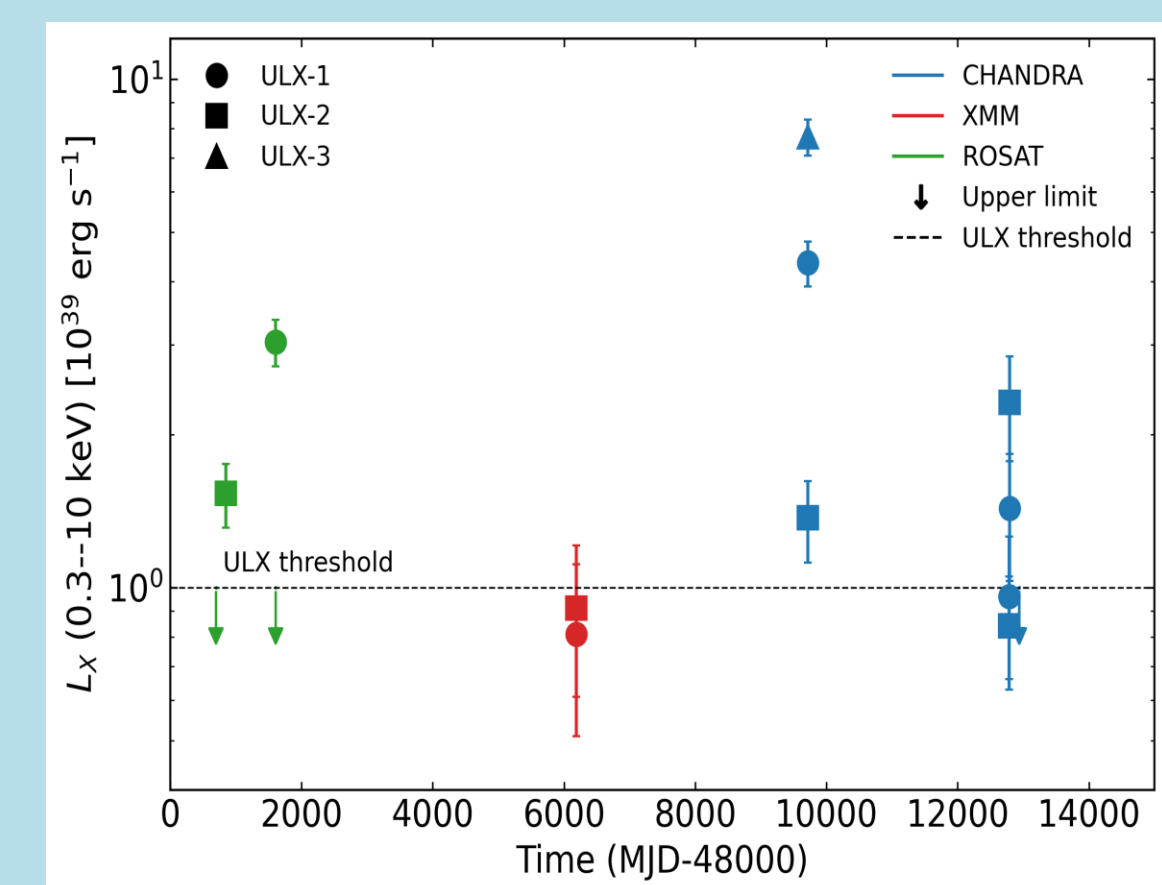
Tablo 3. ULX'lerin ROSAT, XMM-Newton ve Chandra gözlemlerinden elde edilen X-ışını ısıtılmaları.

Obs-time	L _x (ULX-1)	L _x (ULX-2)	L _x (ULX-3)
Liu and Bregman, 2005 (ROSAT)	< 0.66 × 10 ³⁹	1.53 × 10 ³⁹	< 0.09 × 10 ³⁹
13.09.1992	3.04 × 10 ³⁹	< 1.48 × 10 ³⁸	
12.09.1994			
Bernadich et al., 2022 (XMM-Newton)	8.06 × 10 ³⁸	9.08 × 10 ³⁸	
29.03.2007			
This work, 2026 (CHANDRA)	4.35 × 10 ³⁹	1.37 × 10 ³⁹	6.93 × 10 ³⁹
23.11.2016	0.96 × 10 ³⁹	0.84 × 10 ³⁹	< 0.09 × 10 ³⁹
21.04.2025	1.43 × 10 ³⁹	2.31 × 10 ³⁹	< 0.09 × 10 ³⁹
24.04.2025			

Not: Işıtımlar, 0.3–10 keV enerji bandında ergs⁻¹ birimindedir. Bu çalışmada uzaklık 11.08 Mpc alındı.



Şekil 4. ULX-3'ün X-ışını tayfı. Soğurulmalı diskbb (kırmızı) ve güç yasası (mavi) modelleri ile uyumlama yapıldı.



Şekil 5. ULX'lerin ROSAT, XMM-Newton ve Chandra verilerinden uzun dönem ışık eğrileri.

Sertlik Oranı

ULX'lerin tayfsal davranışını gösteren sertlik oranına (HR) dayalı sertlik–

şiddet diyagramına (bkz. Şekil 6) göre

ULX-1, güçlü akı değişkenliğine

rağmen sert (hard) durumunu

korumaktadır. ULX-2, daha sonraki

gözlemlerde daha sert spektrumlara

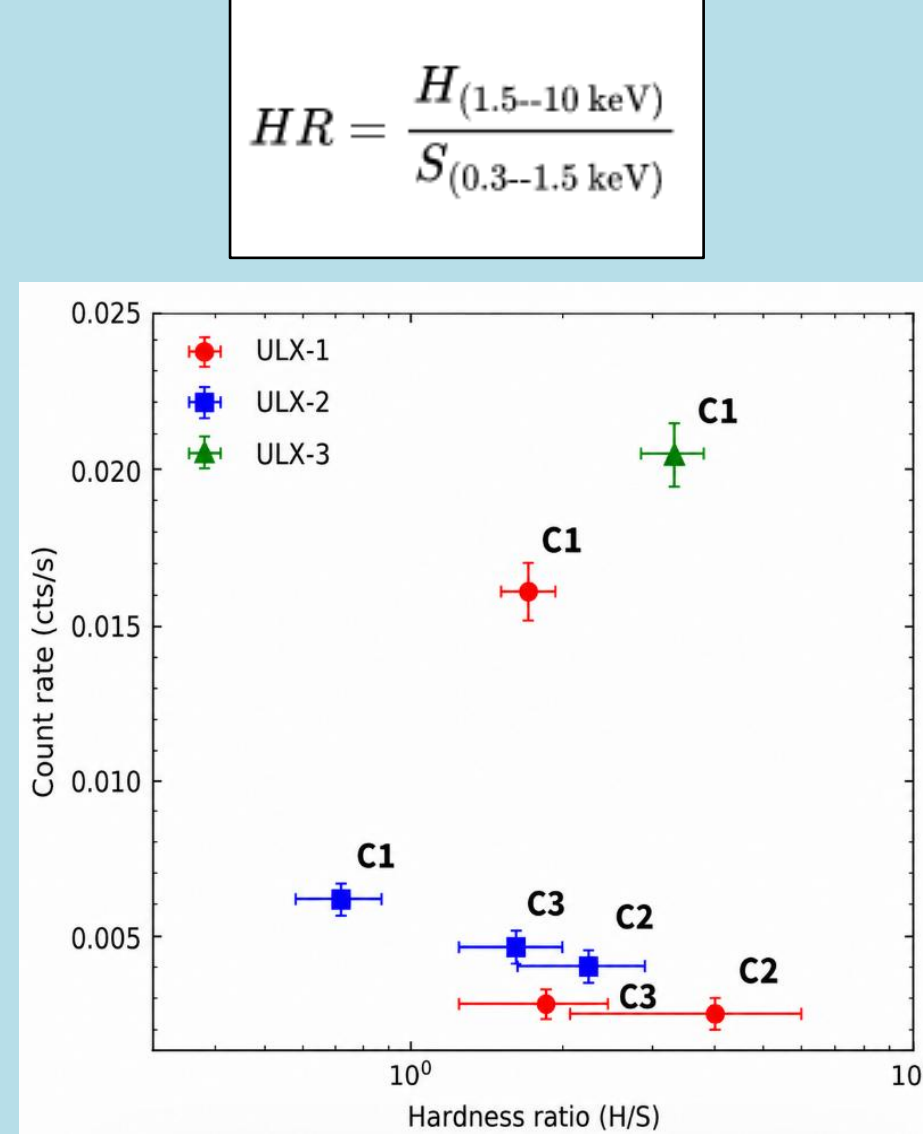
doğru bir eğilim göstermektedir. ULX-

3 ise yalnızca yüksek ısıtımali bir sert

durum evresi sırasında tespit edilmiş

olup bu durum kaynağın geçici

yapısıyla uyumludur.



Şekil 6. Üç ULX'in sertlik-şiddet diyagramı. Hatalar 1σ ile verildi.

HST ve JWST Analizleri

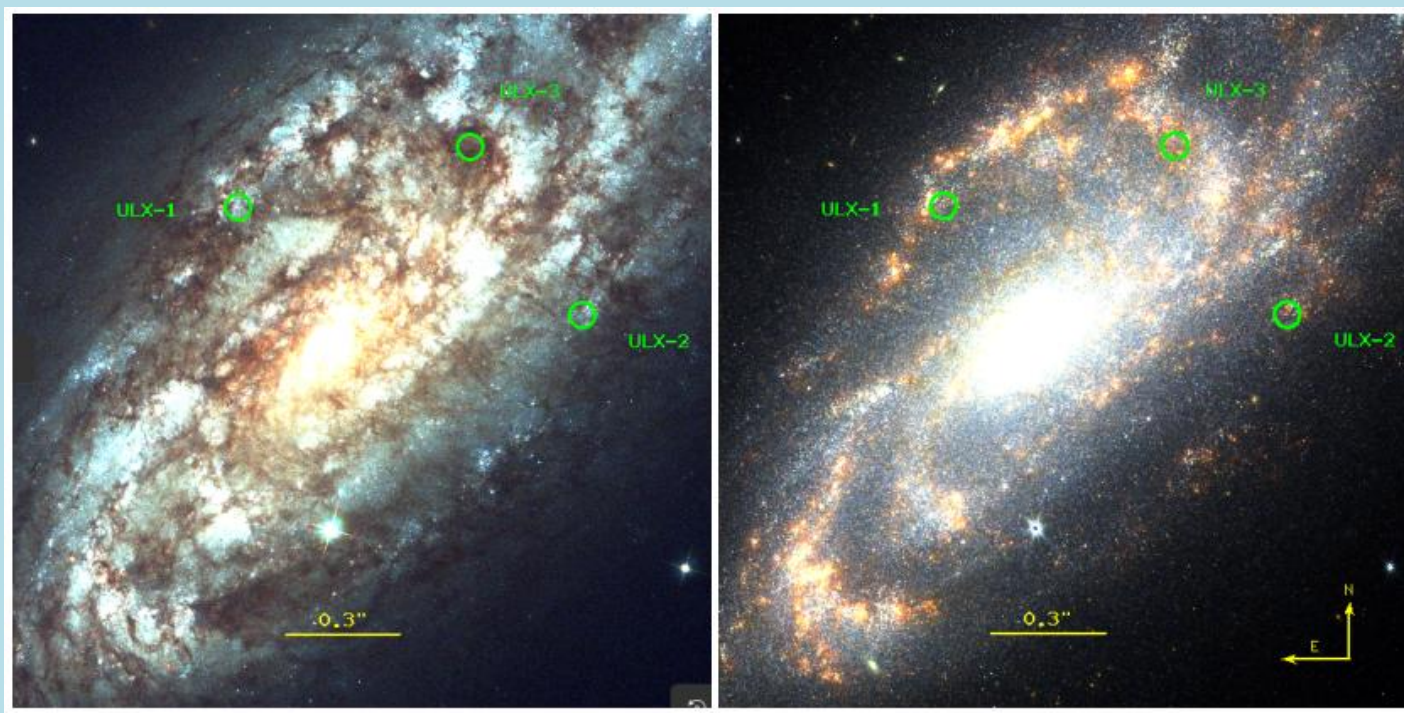
HST/WFC3 ve JWST/NIRCam arşiv gözlem verileri kullanılarak optik ve kızılötesi

fotometri gerçekleştirildi. Şekil 7, HST ve JWST görüntülerindeki ULX'leri

göstermektedir. HST verileri için fotometri, IRAF (v 2.17.1) DAOPHOT paketi

kullanılarak yapıldı. ULX'ler için optik/kızılötesi aday karşılıklar belirlendi

(bkz. Şekil 3).

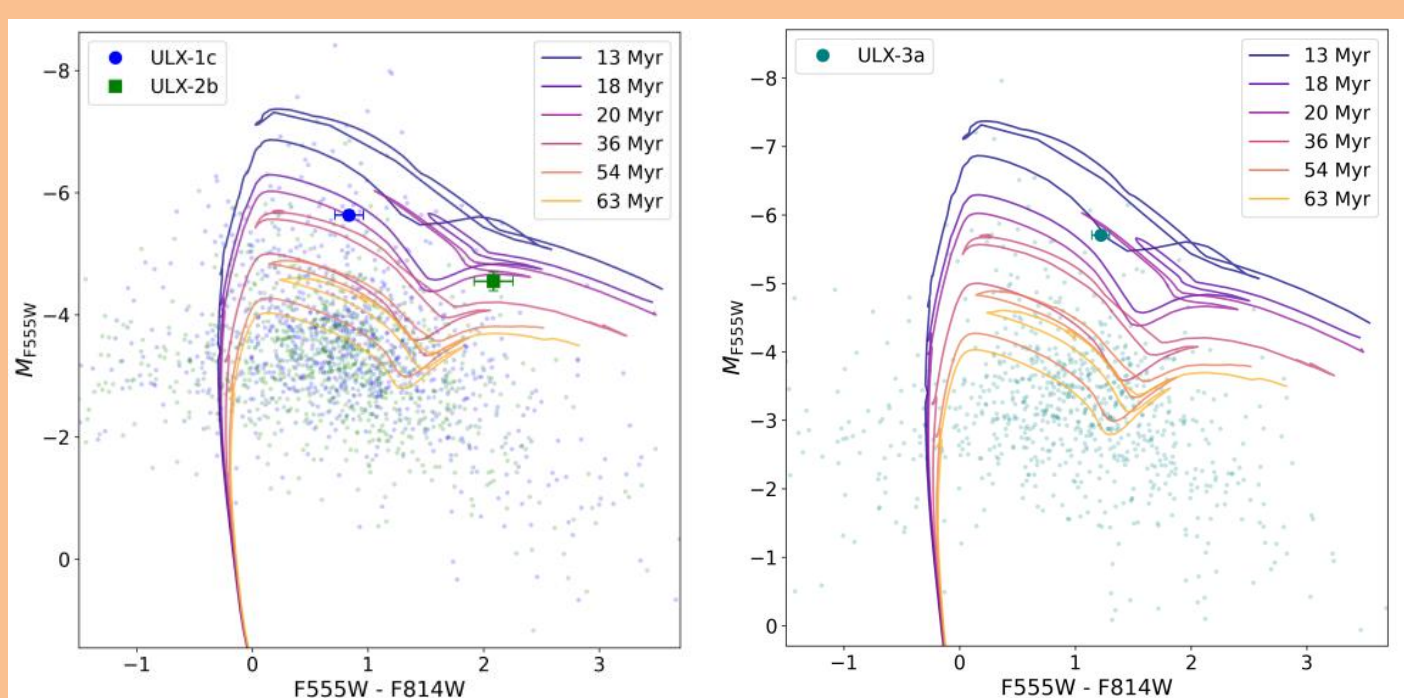


Şekil 7. NGC 1792'nin solda, F438W (mavi), F555W (yeşil) ve F814W (kırmızı) HST/WFC3 görüntüsü. Sağda, F200W (mavi), F277W (yeşil) ve F444W (kırmızı) JWST/NIRCam görüntüsü. ULX'lerin konumları yeşil çemberlerle gösterilmektedir.

CMD ve SED Analizleri

Fotometri sonuçlarından (bkz. Tablo 5, 6, 7) ULX'lerin olası karşılıklarının fiziksel özelliklerini sınırlandırmak için CMD'ler (Vegamag) ve SED'ler (AB) oluşturuldu.

CMD ve SED analizinden elde edilen fiziksel parametreler Tablo 4'te verildi.



Şekil 8. ULX'lerin aday optik karşılıkları için HST/WFC3 CMD'leri.

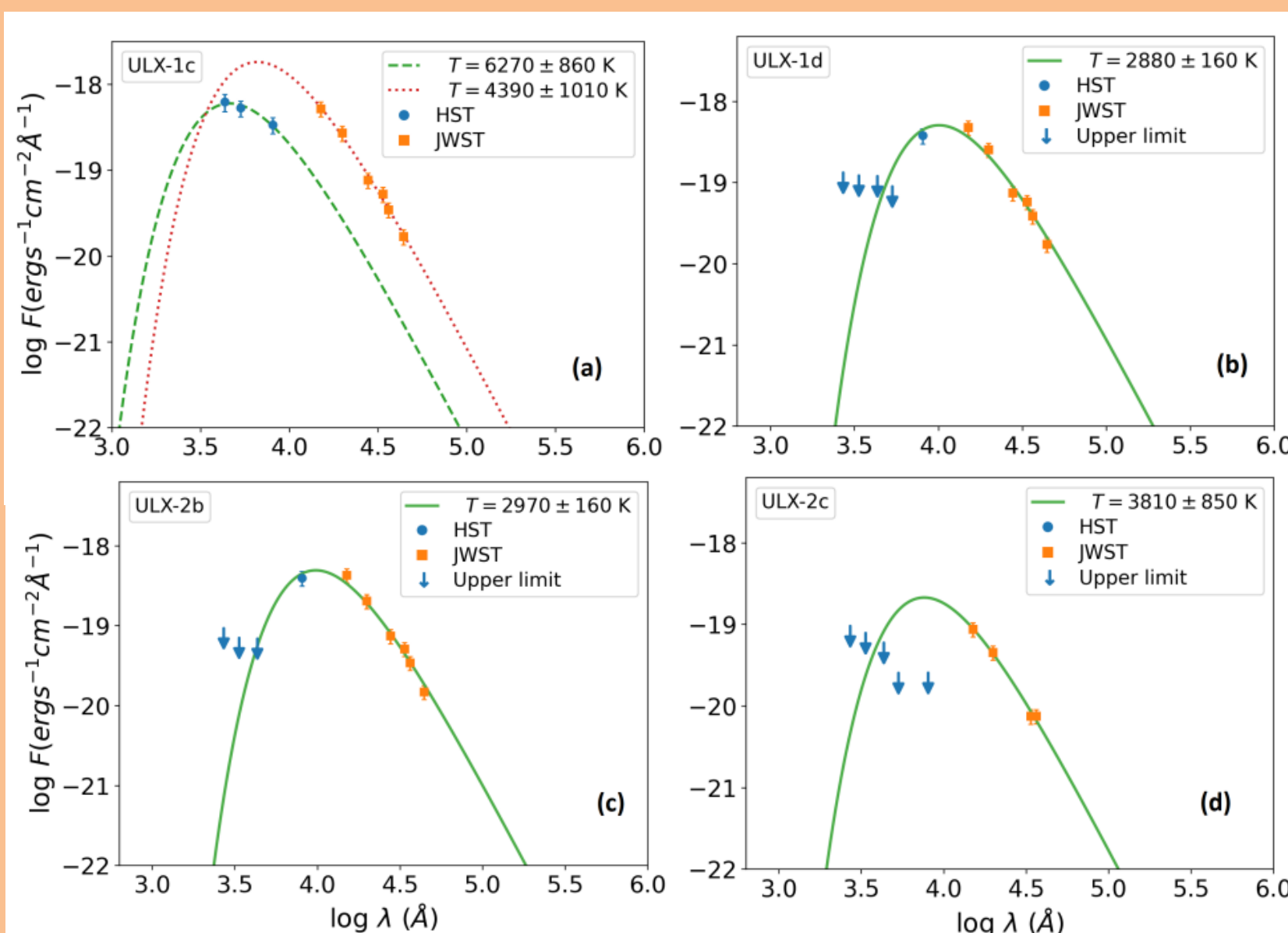
CMD'ler üzerine teorik Padova yıldız evrim eğrileri (PARSEC; Bressan et al. 2012)

oluşturuldu (bkz. Şekil 8).

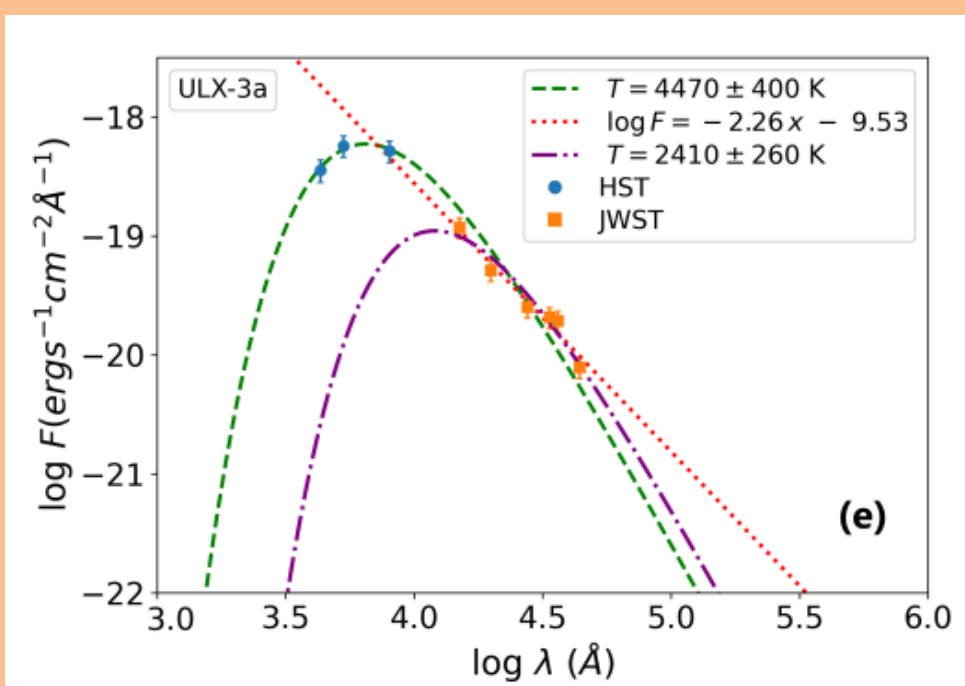
SED'ler; optik ve kızılötesi bölgede ısıma mekanizmalarını araştırmak amacıyla,

güç yasası (power-law - PL) ve karacısım (blackbody - BB) ile modellendi (bkz.

Şekil 9).



Şekil 9a. ULX-1 ve ULX-2 aday karşılıkların SED'leri. HST ve JWST fotometrik değerleri, en iyi uyum sağlayan modellerle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 9b. ULX-3a'nın HST ve JWST verileri ile oluşturulan SED'ler.

Tablo 4. Aday karşılıklar için CMD ve SED sonuçları

Method	Age (Myr)	Mass (M _⊙)	log(L _x)	log(T _{eff}) (K)
CMD	20 ± 5	11 ± 0.9	4.20 ± 0.02	3.75 ± 0.02
	SED	-	-	3.80 ± 0.06
SED	-	-	-	3.46 ± 0.05
	-	-	-	3.47 ± 0.01
CMD	32 ± 4	±0.6	4.39 ± 0.04	3.56 ± 0.01
	SED	-	-	3.58 ± 0.09
CMD	14 ± 3	4 ± 1.1	4.37 ± 0.03	3.68 ± 0.02
	SED	-	-	3.65 ± 0.04

Tablo 5. ULX-1'in optik/kızılötesi karşılıklarının Vegamag ve akıları.

NGC 1792	Filter	m _{Vega}	F _{λ,Vega}	m _{Vega}	F _{λ,Vega}	m _{Vega}	F _{λ,Vega}	Limiting mag.
HST/WFC3/UVIS	F275W	25.97±0.47	15.44 ^{+0.44} _{-0.44}	24.97±0.15	38.81 ^{+0.48} _{-0.48}	24.98±0.23	38.74 ^{+0.12} _{-0.12}	—
HST/WFC3/UVIS	F336W	24.82±0.12	20.24 ^{+0.12} _{-0.12}	23.19±0.18	27.73 ^{+0.18} _{-0.18}	24.79±0.18	50.01 ^{+0.11} _{-0.11}	24.35
HST/WFC3/UVIS	F438W	26.55±0.40	16.20 ^{+0.22} _{-0.22}	25.42±0.13	46.16 ^{+0.23} _{-0.23}	25.07±0.12	64.66 ^{+0.12} _{-0.12}	25.81
HST/WFC3/UVIS	F555W	25.91±0.24	17.12 ^{+0.24} _{-0.24}	26.34±0.25	12.68 ^{+0.25} _{-0.25}	24.66±0.08	54.28 ^{+0.12} _{-0.12}	26.01
HST/WFC3/UVIS	F814W	25.96±0.27	8.72 ^{+0.27} _{-0.27}	—	—	23.80±0.19	34.41 ^{+0.21} _{-0.21}	24.91
JWST/NIRCam	F150W	22.42±0.02	16.75 ^{+0.02} _{-0.02}	22.04±0.02	23.50 ^{+0.02} _{-0.02}	20.23±0.01	128.38 ^{+0.16} _{-0.16}	24.23
JWST/NIRCam	F200W	22.57±0.04	3.80 ^{+0.04} _{-0.04}	21.82±0.02	10.79 ^{+0.02} _{-0.02}	20.02±0.01	56.29 ^{+0.14} _{-0.14}	23.77
JWST/NIRCam	F277W	—	—	20.05±0.24	0.06 ^{+0.24} _{-0.06}	21.79±0.01	3.24 ^{+0.01} _{-0.01}	21.46
JWST/NIRCam	F335M	23.93±0.13	0.21 ^{+0.03} _{-0.03}	—	—	20.61±0.01	4.00 ^{+0.01} _{-0.01}	23.17
JWST/NIRCam	F60M	—	—	—	—	20.72±0.01	3.06 ^{+0.01} _{-0.01}	22.93
JWST/NIRCam	F444W	23.88±0.07	0.08 ^{+0.01} _{-0.01}	—	—	21.64±0.01	0.63 ^{+0.01} _{-0.01}	22.85

Tablo 6. ULX-2'nin optik/kızılötesi karşılıklarının Vegamag ve akıları.

NGC 1792		ULX-2a		ULX-2b		ULX-2c	
Instruments	Filter	<i>m</i> _{Vega}	<i>F</i> _{λ,Vega}	<i>m</i> _{Vega}	<i>F</i> _{λ,Vega}	<i>m</i> _{Vega}	<i>F</i> _{λ,Vega}
HST/WFC3/UVIS	F275W	25.10±0.12	34.56 ^{+0.47} _{-0.47}	—	—	—	—
HST/WFC3/UVIS	F336W	25.19±0.19	27.73 ^{+0.18} _{-0.18}	—	—	—	—
HST/WFC3/UVIS	F438W	25.84±0.14	31.18 ^{+0.13} _{-0.13}	—	—	—	—
HST/WFC3/UVIS	F555W	25.30±0.07	30.10 ^{+0.11} _{-0.11}	25.94 ± 0.14	16.68 ^{+2.30} _{-2.30}	—	—
HST/WFC3/UVIS	F814W	25.54±0.25	6.93 ^{+0.25} _{-0.25}	23.63±0.07	40.17 ^{+2.30} _{-2.30}		
JWST/NIRCam	F150W	—	—	20.42±0.01	106.44 ^{+0.01} _{-0.01}	22.15±0.02	0.52±0.04
JWST/NIRCam	F200W	—	—	20.43±0.01	42.96 ^{+0.01} _{-0.01}	21.06±0.02	9.41 ^{+0.02} _{-0.02}
JWST/NIRCam	F277W	—	—	21.83±0.01	3.15 ^{+0.01} _{-0.01}	23.71±0.03	0.25±0.05
JWST/NIRCam	F335M	24.34±0.16	0.15 ^{+0.02} _{-0.02}	20.65±0.01	5.03 ^{+0.01} _{-0.01}	22.73±0.04	0.69 ^{+0.02} _{-0.02}
JWST/NIRCam	F444W	—	—	20.77±0.01	5.56 ^{+0.01} _{-0.01}	22.94±0.04	0.14 ^{+0.02} _{-0.02}