NGC 4321'deki X-ışın Çiftleri

Serkan ÖNER[1,2] - Yasemin ALADAĞ[1,2] - Aysun AKYÜZ[1,2]

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

[2] Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 01330, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, NGC 4321'de belirlenen X-ışın çifti adaylarının olası optik ve kızılötesi karşılıkları araştırıldı. X-ışın kaynaklarının belirlenmesi için Chandra arşiv verileri, optik ve kızılötesi karşılıklar için HST/WFC3/UVIS ve JWST/NIRCam verileri kullanıldı. HST ve JWST görüntülerinde teleskopların görüş alanına düşen X-ışın çiftlerinin optik ve kızılötesi karşılıkları tespit edildi. Kaynakların X-ışın ışıtmalarının $L_x > 10^{37}$ erg s^{-1} olduğu belirlendi. Farklı tarihli gözlemlerden X-ışın çiftlerinin akı değişimleri incelendi ve maksimum 100 kat değişim hesaplandı.

Giriş

X-ışın çifti (XRB), bir donör yıldız ve ondan kütle aktaran sıkı bir cisim (bir kara delik veya nötron yıldızı) içeren yıldız sistemleridir. XRB'ler, donör yıldızlarının kütlesine (M_d) bağlı olarak Büyük Kütleli X-ışın Çifti (HMXB), Küçük Kütleli X-ışın Çifti (LMXB) ve Orta Kütleli X-ışın Çifti (IMXB) olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. XRB'lerin donör kütlesine göre sınıflandırılmasında kullanılan kütle limitleri, HMXB için $M_d \geq 8M_\odot$, IMXB için $M_d \approx 3M_\odot$ -$7M_\odot$, LMXB için $M_d \leq 3M_\odot$ olarak kabul edilmektedir (Chandar ve diğ. 2020; Binder ve diğ. 2024). Bu çalışmamızda, galaksi NGC 4321'de optik karşılıklarını belirleyebildiğimiz XRB'leri HMXB olarak sınıflandırdık.

NGC 4321 (M100), SABbc morfolojik yapısında 14.3 Mpc uzaklıkta, yıldız oluşum oranı SFR =2.04 $M_\odot$ yr^{-1} olan hızlı yıldız oluşumlu bir sarmal galaksidir. X-ışın, optik ve kızılötesi dalgaboylarında gözlenen galaksi, merkezinde bir AGN barındırmaktadır.

Gözlemler ve Veri Analizi

Bu çalışmada kullanılan Chandra verilerinin gözlem bilgileri Tablo.1' de, HST ve JWST verilerinin gözlem bilgileri Tablo.2' de verilmiştir.

ObsID	Poz Süresi (ks)	Enstrüman	Gözlem Tarihi
6727	40	ACIS-S	2006-02-18 17:27:17
9121	15	ACIS-S	2008-04-20 07:11:46
12696	15	ACIS-S	2011-02-24 12:51:30
14230	80	ACIS-S	2012-02-16 12:22:04
23140	10	ACIS-S	2020-02-15 01:08:25
23141	10	ACIS-S	2020-03-13 09:34:07

Tablo 1. Chandra gözlem bilgileri

Proposal ID	Enstrüman	Filtre	Poz Süresi(s)	Gözlem Tarihi
15654	HST/WFC3/UVIS	F814W	836	2020-03-15 12:00:52
15654	HST/WFC3/UVIS	F438W	1050	2020-03-15 12:07:56
15654	HST/WFC3/UVIS	F336W	1110	2020-03-15 12:16:23
15654	HST/WFC3/UVIS	F275W	2190	2020-03-15 12:25:20
15654	HST/WFC3/UVIS	F555W	670	2020-03-15 12:40:09
2107	JWST/NIRCam	F360M	429.472	2024-01-10 12:21:18
2107	JWST/NIRCam	F200W	1202.52	2024-01-10 12:21:18
2107	JWST/NIRCam	F300M	386.524	2024-01-10 12:46:54
2107	JWST/NIRCam	F335M	386.524	2024-01-10 13:02:49

Tablo 2. HST ve JWST gözlem bilgileri

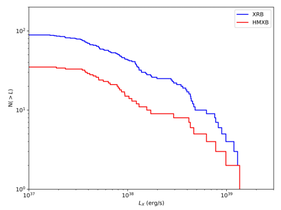
Chandra arşiv verilerinin analizi ve kalibrasyonu için CIAO v.4.15 ve CALDB 4.10.7 yazılımları, HST ve JWST analizleri için IRAF 2.17 yazılımının DAOPHOT paketi kullanıldı. NGC 4321'in Chandra, HST ve JWST gözlemlerine ait görüntüleri Şekil 1' de verilmiştir.

Bulgular

NGC 4321' de Tablo.1' deki 6 gözlemin CIAO analizleriyle tespit edilen ve D25 (7.′4 x 6.′3)alanı[1] içine düşen 90 kaynaktan (X-25 hariç) 89'u olası XRB olarak değerlendirilmiştir. Bunlardan 36'sı HST'nin görüş alanı içine düşmektedir ve hepsinde %90 (1.6 σ) güvenirlikte 0.35 yaysaniyesi hata yarıçapında optik karşılıklar tespit edilmiştir. Bunlardan X-25 dışındaki 35 kaynak HMXB olarak sınıflandırılmıştır. HST alanına düşen 36 kaynaktan, 16 tanesi için HST ve JWST görüntülerinde ortak karşılıklar bulunmuştur.

Kaynak	Chandra R.A.	Chandra Decl.	JWST R.A.	JWST Decl.	HST R.A.	HST Decl.	JWST	HST	Ortak
X-25	185.707645	15.809434	185.707583	15.809541	185.707596	15.809547	4	4	1
X-31	185.712712	15.830124	185.712650	15.830231	185.712663	15.830236	11	8	5
X-32	185.712803	15.816545	185.712741	15.816652	185.712754	15.816658	10	4	2
X-34	185.714935	15.827239	185.714874	15.827346	185.714886	15.827352	6	9	3
X-36	185.717629	15.816652	185.717567	15.816759	185.717580	15.816765	9	1	1
X-37	185.719419	15.809976	185.719358	15.810084	185.719370	15.810089	8	2	1
X-38	185.720905	15.810423	185.720843	15.810530	185.720946	15.810535	9	4	2
X-39	185.721703	15.837556	185.721641	15.837663	185.721654	15.837669	12	7	1
X-40	185.721845	15.808947	185.721784	15.809054	185.721796	15.809060	8	7	3
X-45	185.725542	15.820053	185.725480	15.820160	185.725493	15.820166	15	6	3
X-46	185.726059	15.829002	185.725997	15.829109	185.726010	15.829114	8	3	1
X-47	185.727029	15.837540	185.726968	15.837648	185.726980	15.837653	10	5	3
X-48	185.727105	15.817943	185.727043	15.818050	185.727056	15.818056	12	11	2
X-50	185.727831	15.834867	185.727769	15.834974	185.727782	15.834980	11	5	2
X-53	185.728701	15.833215	185.728639	15.833323	185.728652	15.833328	11	6	1
X-54	185.728766	15.838174	185.728704	15.838281	185.728716	15.838287	10	6	1

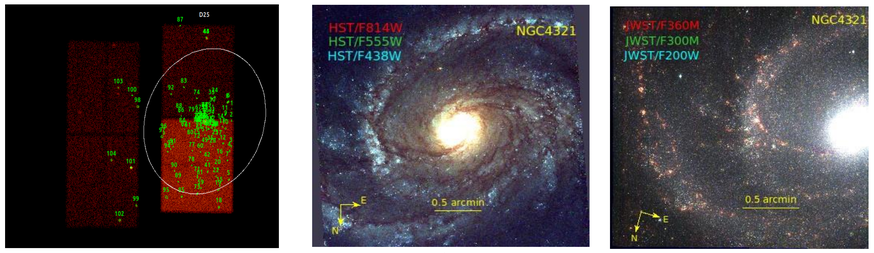
Tablo.3. XRB'lerin Chandra, HST ve JWST' deki pozisyonları ile optik ve kızılötesi aday sayıları



Şekil.2. XRB ve HMXB'lerin Kümülatif XLF grafiği

En uzun poz süreli Chandra gözleminde D25 alanı içerisindeki 89 XRB adayı için kümülatif X-ışın ışıtma fonksiyonu (XLF) Şekil. 2' de gösterilmiştir. HMXB adaylarının da kümülatif XLF grafiği Şekil. 2'de kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

[1](https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=ngc+4321&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1)



a b c

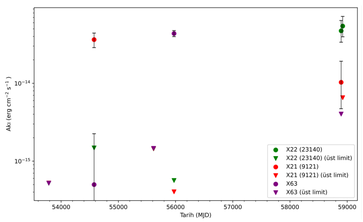
Şekil.1. NGC 4321 galaksisinin (a) En uzun poz süreli (ObsID:14230) Chandra görüntüsü (ve D25 alanı içerisine düşen kaynaklar), (b) HST ve (c) JWST üç renk (RGB) görüntüleri

Soria ve diğ. (2022) altı Chandra gözleminin en az birinde ışıtması $L_x > 10^{39}$ erg/s olan 13 kaynak belirlemiştir. Bu kaynakların *srcflux* komut dosyası (script) ile soğurulmamış (NH=0) akıları, 0.3-10 keV bandında, %90 güven aralığında hesaplandı ve akı değişkenlikleri incelendi. Bu kaynakların akı değerleri ile her bir kaynak için değişkenlik faktörleri (V_f=F_{maks}/F_{min}) Tablo.4' de gösterilmiştir

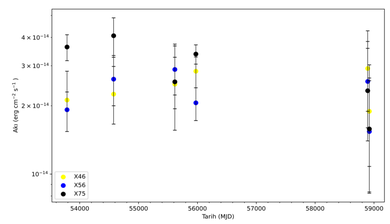
	F_X (0.3-10 keV)												
ObsID	X-13	X-14	X-33	X-21 (9121)	X-45	X-46	X-52	X-40 (6727)	X-56	X-63	X-22 (23140)	X-74	X75
6727	$1.56^{+0.33}_{-0.32}$	$0.60^{+0.23}_{-0.19}$	< 0.15	< 0.05	$4.55^{+0.54}_{-0.53}$	$2.12^{+0.72}_{-0.58}$	$7.6^{+0.71}_{-0.70}$	$1.19^{+0.33}_{-0.32}$	$1.92^{+0.38}_{-0.38}$	< 0.05	< 0.05	< 0.11	$3.63^{+0.48}_{-0.47}$
9121	$1.06^{+0.50}_{-0.39}$	$6.12^{+1.07}_{-1.07}$	< 0.23	$3.64^{+0.78}_{-0.77}$	$13.90^{+1.60}_{-1.50}$	$2.25^{+0.73}_{-0.59}$	$11^{+1.5}_{-1.38}$	< 0.72	$2.62^{+0.71}_{-0.62}$	$0.05^{+0.18}_{-0.05}$	< 0.15	< 0.18	$4.07^{+0.81}_{-0.80}$
12696	$3.14^{+0.84}_{-0.71}$	$0.80^{+0.72}_{-0.45}$	$0.59^{+0.49}_{-0.32}$	< 0.15	$4.27^{+0.87}_{-0.86}$	$2.49^{+1.25}_{-0.93}$	$4.15^{+0.9}_{-0.89}$	< 1.94	$2.89^{+0.78}_{-0.66}$	< 0.15	< 0.14	< 0.21	$2.55^{+0.72}_{-0.61}$
14230	$1.39^{+0.23}_{-0.23}$	$0.76^{+0.17}_{-0.17}$	$5.37^{+0.51}_{-0.51}$	< 0.04	$3.45^{+0.34}_{-0.34}$	$2.84^{+0.44}_{-0.44}$	$6.09^{+0.46}_{-0.46}$	< 1.1	$2.06^{+0.34}_{-0.34}$	$4.36^{+0.39}_{-0.38}$	< 0.06	$3.71^{+0.42}_{-0.42}$	$3.38^{+0.33}_{-0.33}$
23140	$3.08^{+1.43}_{-1.11}$	< 0.65	–	$1.03^{+0.89}_{-0.56}$	$7.59^{+2.06}_{-1.75}$	$2.92^{+1.36}_{-1.03}$	$6.43^{+1.95}_{-1.64}$	< 0.84	$2.56^{+1.28}_{-0.96}$	< 0.40	$4.72^{+1.68}_{-1.35}$	–	$2.33^{+1.25}_{-0.93}$
23141	$1.93^{+1.16}_{-0.83}$	< 0.41	–	< 0.65	$16.20^{+2.80}_{-2.80}$	$1.89^{+1.14}_{-0.81}$	$5.12^{+1.77}_{-1.46}$	< 0.58	$1.54^{+1.04}_{-0.72}$	–	$5.43^{+1.80}_{-1.47}$	< 0.43	$1.58^{+1.07}_{-0.75}$
$V_f(F_{maks}/F_{min})$	2.96	15.04	36.53	90.10	4.70	1.54	2.65	3.73	1.88	87.20	104.42	33.42	2.58

Tablo 4. 0.3-10 keV bandındaki akı değerleri ile her bir kaynak için değişkenlik faktörleri (isimlendirmeler 14230 gözleminde artan RA değerlerine göre yapıldı, X-21, X-40 ve X-22 sırasıyla 9121, 6727 ve 23140 gözlemlerine göre isimlendirildi)

13 XRB'nin 2006 ve 2020 yılları arasındaki akı değişimleri; V_f' si en büyük olan 3 kaynak X-22 (23140), X-21 (9121)) ve X-63 için Şekil.3' te, V_f' si en küçük olan 3 kaynak X-46, X-56 ve X-75 için Şekil.4' te gösterilmiştir.



Şekil.3. NGC 4321'deki XRB'lerden X-22 (23140), X-21 (9121)) ve X-63'ün ışık eğrileri



Şekil.4. NGC 4321'deki XRB'lerden X-46, X-56 ve X-75'in ışık eğrileri

Galaksi NGC 4321'de belirlenen XRB'lerin 15'i ve X-25 için HST ve JWST görüntülerinde optik karşılıkları incelendi. DAOPHOT analizlerinden elde edilen VegaMag değerleri kullanılarak aşağıdaki formülden akıları hesaplanmıştır.

$$f=f_{vega}*10^{(-0.4*Vmag)}$$

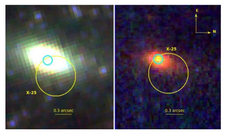
JWST zeropoint değerleri aşağıdaki bağıntıdan belirlenmiştir.

$$ZP_{Vega} = -2.5 * \log10(PHOTMJSR*PIXAR_SR / flux_{Vega}[MJy])$$

- HST için zeropoint değerleri Bellini ve diğ. (2017)[2] den
- JWST ve HST için f_{vega} değerleri filter profile service (SVO)[3,4] dan alınmıştır

Optik ve kızılötesi karşılıklar belirlenirken hata yarıçapı %90 güvenirlikte (1.6 σ) 0.35 yaysaniyesi alınmıştır. HST ve JWST' de ortak olan karşılık sayıları 1-5 arasında değişmektedir. Bunlardan 4 tanesini burada göstericeyiz. X-25, X-32, X-38 ve X-47 için optik karşılıklar sırasıyla Şekil.5, Şekil.6, Şekil.7 ve Şekil.8'de gösterilmiştir. Kadir (açıklık düzeltmesi yapılmıştır) ve akı değerleri de sırasıyla Tablo.5, Tablo.6, Tablo.7 ve Tablo.8'de gösterildiği gibidir. DAOPHOT analizlerinde HST ve JWST için açıklık (aperture) yarıçapı 3 piksel seçilmiştir.

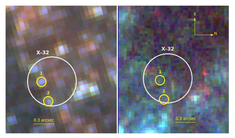
[2](https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aa7059/pdf)
[3](http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=HST&asttype=)
[4](http://svo2.cab.intacsic.es/svo/theory/fps/index.php?mode=browse&gname=JWST&asttype=)



Şekil.5. X-25'in HST ve JWST karşılıkları

X-25			
Instruments	Filter	Magnitude	F (10^{-14} erg s^{-1} cm^{-2})
JWST/NIRCam	F200W	18.094±0.002	6.612±0.021
JWST/NIRCam	F300M	17.700±0.003	3.083±0.016
JWST/NIRCam	F335M	17.883±0.007	1.872±0.023
JWST/NIRCam	F360M	17.744±0.005	1.720±0.015
HST/WFC3/UVIS	F275W	-	-
HST/WFC3/UVIS	F336W	-	-
HST/WFC3/UVIS	F438W	27.015±0.428	0.038±0.031
HST/WFC3/UVIS	F555W	24.325±0.022	0.388±0.016
HST/WFC3/UVIS	F814W	21.758±0.011	1.774±0.036

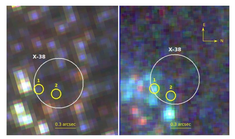
Tablo.5. X-25'in kadir (mag) ve akı değerleri



Şekil.6. X-32'nin HST ve JWST karşılıkları

		X-32 (1)		X-32 (2)	
Instruments	Filter	Magnitude	F (10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2})	Magnitude	F (10^{-13} erg $s^{-1}$$cm^{-2}$)
JWST/NIRCam	F200W	21.558±0.019	2.721±0.094	22.089±0.068	1.668±0.208
JWST/NIRCam	F300M	-	-	22.259±0.295	0.463±0.254
JWST/NIRCam	F335M	-	-	21.352±0.214	0.767±0.305
JWST/NIRCam	F360M	-	-	-	-
HST/WFC3/UVIS	F275W	-	-	25.513±0.147	2.363±0.641
HST/WFC3/UVIS	F336W	26.133±0.477	0.383±0.348	25.690±0.411	0.576±0.447
HST/WFC3/UVIS	F438W	-	-	26.691±0.147	0.512±0.284
HST/WFC3/UVIS	F555W	26.522±0.283	0.513±0.271	26.282±0.174	0.640±0.206
HST/WFC3/UVIS	F814W	-	-	25.294±0.240	0.683±0.305

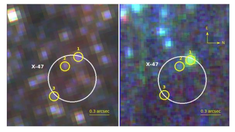
Tablo.6. X-32'nin kadir (mag) ve akı değerleri



Şekil.7. X-38'in HST ve JWST karşılıkları

		X-38 (1)		X-38 (2)	
Instruments	Filter	Magnitude	F (10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2})	Magnitude	F (10^{-13} erg $s^{-1}$$cm^{-2}$)
JWST/NIRCam	F200W	22.663±0.132	0.983±0.239	-	-
JWST/NIRCam	F300M	22.003±0.171	0.586±0.185	22.972±0.291	0.240±0.130
JWST/NIRCam	F335M	21.822±0.149	0.498±0.137	-	-
JWST/NIRCam	F360M	21.946±0.177	0.358±0.118	-	-
HST/WFC3/UVIS	F275W	24.361±0.204	1.853±0.699	24.097±0.147	2.363±0.641
HST/WFC3/UVIS	F336W	24.112±0.118	2.466±0.538	25.167±0.383	0.933±0.672
HST/WFC3/UVIS	F438W	25.572±0.281	1.434±0.750	-	-
HST/WFC3/UVIS	F555W	25.397±0.228	1.447±0.612	-	-
HST/WFC3/UVIS	F814W	24.434±0.041	1.509±0.114	-	-

Tablo.7. X-38'in kadir (mag) ve akı değerleri



Şekil.8. X-47'nin HST ve JWST karşılıkları

		X-47 (1)		X-47 (2)		X-47 (3)	
Instruments	Filter	Magnitude	F (10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2})	Magnitude	F (10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2})	Magnitude	F (10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2})
JWST/NIRCam	F200W	21.414±0.012	3.107±0.067	22.110±0.048	1.636±0.144	22.059±0.045	1.715±0.141
JWST/NIRCam	F300M	22.394±0.091	0.408±0.068	22.752±0.173	0.299±0.096	22.634±0.131	0.569±0.116
JWST/NIRCam	F335M	21.416±0.034	0.724±0.046	21.815±0.161	0.501±0.149	22.259±0.246	0.333±0.152
JWST/NIRCam	F360M	21.846±0.091	0.393±0.066	22.412±0.315	0.233±0.138	22.003±0.164	0.340±0.103
HST/WFC3/UVIS	F275W	26.606±0.971	0.216±0.439	24.059±0.139	2.488±0.632	-	-
HST/WFC3/UVIS	F336W	25.145±0.463	0.952±0.837	24.857±0.127	1.242±0.292	-	-
HST/WFC3/UVIS	F438W	25.968±0.222	0.996±0.410	26.719±0.475	0.499±0.450	-	-
HST/WFC3/UVIS	F555W	24.331±0.004	3.861±0.029	25.740±0.156	1.055±0.304	27.027±0.377	0.322±0.228
HST/WFC3/UVIS	F814W	23.857±0.034	2.567±0.161	25.102±0.133	0.816±0.200	25.478±0.180	0.577±0.192

Tablo.8. X-47'nin kadir (mag) ve akı değerleri

- Şekil 5'te verilen X-25'in optik ve JWST görüntülerinden belirlenen karşılığının morfolojisi ve renk bilgisinden yararlanılarak bir ardalan (background) galaksi olduğu tespit edilmiştir.
- Üç kaynağın (X-38(1), X-47(1) ve X-47(2)) HST ve JWST'nin tüm filtrelerinde belirlenmiş olması önemlidir. Bu kaynakların tayfsal enerji dağılımları incelenecektir.

Ön Sonuçlar

- Bu çalışmada tespit edilen 89 XRB adayından HST görüş alanına düşen 35 kaynağın (ve X-25'in) potansiyel optik ve yakın kızılötesi karşılıkları araştırıldı. Bunlardan 15 XRB (ve X-25) için HST ve JWST'de ortak aday karşılıkları belirlendi. HST' de optik karşılık bulunan 35 XRB, HMXB olarak sınıflandırıldı.
- Belirlenen XRB'lerin X-ışını, optik ve yakın kızılötesinde tespit edilen karşılıklarının akıları hesaplandı.
- HST ve JWST'de hata alanına düşen aday karşılıkların parlaklık değerleri sırasıyla > 24 mag. ve > 21 mag. olarak belirlendi.
- D25 alanı içerisine düşen X-ışın kaynaklarının ve aday HMXB'lerin kümülatif XLF'ler oluşturuldu ve HMXB'lerin XLF'lerinin tek bir güç yasası ile tanımlanamadığı belirlendi (Grimm ve diğ. 2003a; Mineo ve diğ. 2012; Chandar ve diğ. 2020).
- Soria ve diğ. (2022)'de belirtilen ve en az bir gözlemde yüksek ışıtmaya ($L_x > 10^{39}$ erg/s) sahip 13 kaynak için akı değişkenliği incelendi. Üç kaynak için ~90-100 kat akı değişimi belirlendi.

Teşekkür: Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124F004 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar;

1. R.Chandar ve diğ. 2020; A New Window into the Nature of X-Ray Binaries in M101 from Their Optical Emission, The Astrophysical Journal, 890:150 (21pp)
2. B.A.Binder ve diğ. 2024; A Panchromatic Study of the X-Ray Binary Population in NGC 300 on Subgalactic Scales, The Astrophysical Journal, 969:97 (17pp)
3. R.Soria ve diğ. 2022; A Chandra Virgo cluster survey of spiral galaxies – I. Introduction to the survey and a new ULX sample, MNRAS 512, 3284–3311
4. A.Bellini ve diğ. 2017; The State-of-the-art HST Astro-photometric Analysis of the Core of ω Centauri. I. The Catalog, The American Astronomical Society, 842:6 (22pp)
5. H.J.Grimm ve diğ. 2003a; X-ray binaries in the Milky Way and other galaxies, Chin. J. Astron. Astrophys. Vol. 3 (2003), Suppl., 257–269
6. S.Mineo ve diğ. 2012; X-ray emission from star-forming galaxies – I. High-mass X-ray binaries, Mon. Not. R. Astron. Soc. 419, 2095–2115