

Galaksi Grubu NGC 4325'in *Suzaku* Verileri ile X-ışınlarında İncelenmesi

Ebru Aktekin Çalışkan¹  

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, Isparta 32000, Türkiye

Accepted: November 13, 2024. Revised: November 13, 2024. Received: September 29, 2024.

Özet

Galaksi kümeleri ve grupları evrendeki en büyük yapılardır ve galaksiler arası ortamın detaylı bir şekilde incelenmesi için ideal laboratuvarlardır. Bu çalışmada, soğuk merkezi bölgesi bir galaksi grubu olan NGC 4325'in *Suzaku* X-ışın analizleri ilk kez yapılmıştır. İçten dışa doğru seçilen her bir halkasal bölge için sıcaklık (kT) ve Mg, Si, S ve Fe elementlerinin bolluk değerleri bulunmuştur. Merkezi bölgeden uzaklaştıkça plazma sıcaklığının arttığı, element bolluğunun ise azaldığı tespit edilmiş olup bu sonuç NGC 4325'in soğuk merkezi bölgesi yapıda olduğu görüşünü desteklemektedir. Ayrıca NGC 4325'in merkezi bölgeden dışa doğru elektron yoğunluğu (n_e), entropi (K) ve basınç (P) değişimi incelenmiştir. Merkezi bölgeden dışa doğru azalan elektron yoğunluğu ve artan bir entropi profili elde edilmiştir. Bu sonuçlar soğuk merkezi bölgesi galaksi gruplarının genel özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Abstract

Galaxy clusters and groups are the largest structures in the Universe and are ideal laboratories for the detailed study of the intergalactic medium. In this study, the *Suzaku* X-ray analysis of the cool-core galaxy group NGC 4325 has been performed for the first time. Temperature (kT) and the abundance values of Mg, Si, S, and Fe elements have been determined for each annulus selected from the center outward. It has been found that while the plasma temperature increases, the element abundance decreases as the distance from the core region increases, supporting the view that NGC 4325 has a cool-core structure. Additionally, the variations of electron density (n_e), entropy (K), and pressure (P) from the center outward have been examined. A decreasing electron density profile from the core to the outer region and an increasing entropy profile have been obtained. These results have been compared with the general properties of cool core galaxy groups.

Anahtar Kelimeler: X-rays: galaxies: clusters – X-rays: ISM – X-rays: individual: NGC 4325

1 Giriş

Galaksiler evrende, kümeler veya gruplar halinde bulunurlar ve bu sistemler aynı zamanda sıcak iyonize gaz ve karanlık madde de içerirler. Galaksi kümeleri ile galaksi grupları ayrımı toplam kütle ve küme içi ortamdaki (intracluster medium, ICM) gaz sıcaklığı ile belirlenmektedir (gruplarda kütle $<10^{14} M_{\odot}$ ve ICM sıcaklıkları <2 keV: [Stott ve diğ. 2012](#)). Grup içi ortamdaki (Intra-Group Medium) ve ICM'deki sıcak gaz X-ışın dalgaboylarında gözlemlenebilir ve bu yapıların astrofiziksel süreçlerinin incelenmesini sağlar.

X-ışını gözlemleri, temelde iki tür galaksi grubu ve kümesi olduğunu göstermektedir: düşük sıcaklık, düşük entropi, yüksek yoğunluk ve kısa soğuma süresi olan gazdan oluşan "soğuk merkezli" (CC) olanlar ve "soğuk merkezli olmayanlar" (NCC) (ör. [Hudson ve diğ. 2010](#)). Merkez bölgenin soğuma nedeni için bir kaç soğuma akışı (CF) modeli önerilmesine rağmen bu konu henüz tam olarak anlaşılabilmiştir. Bu mekanizmaların grup içi ortam ve ICM'ye olan etkisinin iyi anlaşılması için galaksilerin ve kümelerin termodinamik özelliklerinin (ör. elektron yoğunluğu, sıcaklık ve entropi) detaylı olarak araştırılması gerekmektedir.

NGC 4325 ($z=0.026$) radyo sessiz CC galaksi grubu olarak bilinmektedir ve genel özellikleri [Çizelge 1](#)'de özetlenmiştir.

[Russell ve diğ. \(2007\)](#) *Chandra* ve *ROSAT* verilerini kullanarak NGC 4325'in X-ışın analizlerini yapmıştır. Tayfsal

Çizelge 1. Galaksi grubu NGC 4325'nin genel özellikleri.

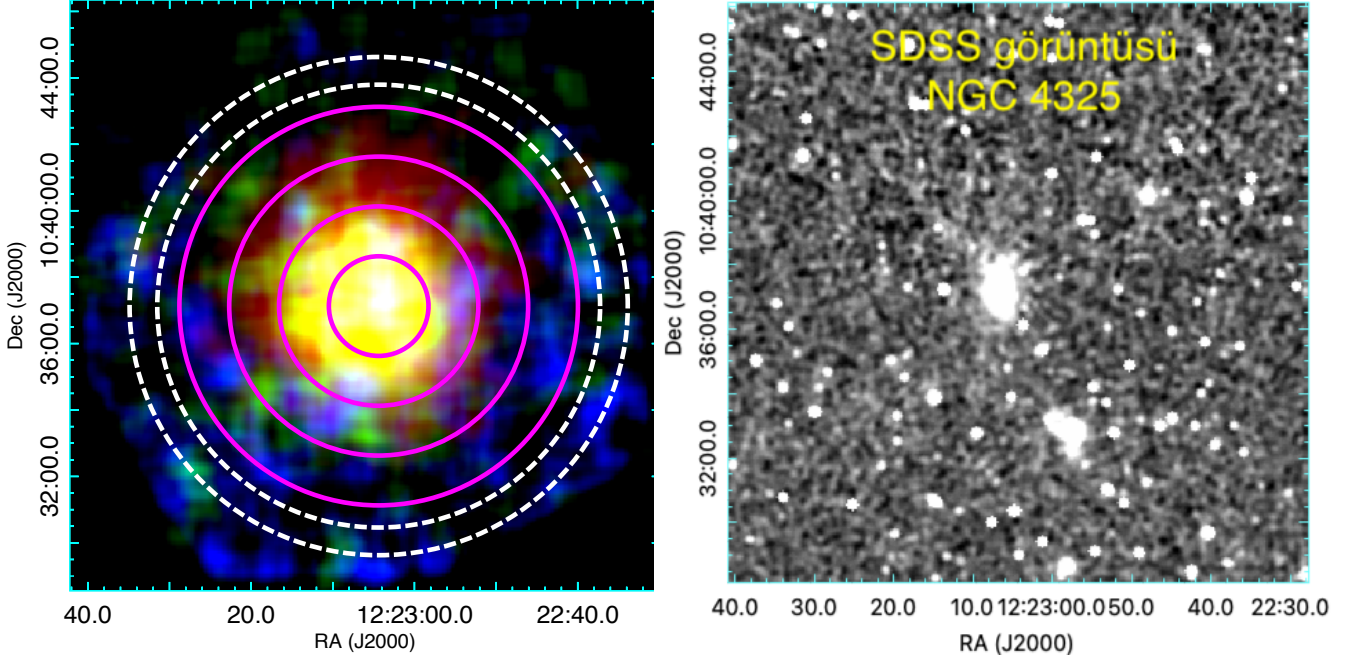
Özellik	Değer	Kaynak
R.A (J2000)	12 ^h 23 ^m 06 ^s .7	Alam ve diğ. (2015)
Dec. (J2000)	+10°37'16".4	Alam ve diğ. (2015)
z	0.026	Alam ve diğ. (2015)
Açısal Boyut	0.670×0.456'	Skrutskie ve diğ. (2006)
Morfolojik tür	E-E/S0 C	Voyer ve diğ. (2014)

haritalama analizleri, grup merkezinden 10 kpc uzaklığa kadar yer değiştirmiş soğuk gazın varlığını ortaya koymuştur. Yazarlar, soğuk gazın grup merkezinden yer değiştirmesine neden olabilecek olası mekanizmaları araştırmışlar ve bir AGN patlaması olasılığını tartışmışlardır. NGC 4325 için buldukları dik entropi profilinin aktif bir AGN patlamasının yakında gerçekleşebileceğine işaret ettiğini bildirmişlerdir.

[Laganá ve diğ. \(2015\)](#) *XMM-Newton* ve *Chandra* verilerini kullanarak NGC 4325 grubunun metal bolluğunu incelemişlerdir. Metal bolluğunun uzaysal dağılımı, grubun merkez bölgesinde filament benzeri bir yapıyı ve bu yapının merkez galaksi ile uzaysal olarak ilişkili olduğunu işaret etmiştir. Yazarlar, X-ışın analizlerine ek olarak optikte DR10-SDSS verisini de incelemişlerdir. Merkez galaksinin optik tayf analizi, son zamanlarda gerçekleşen bir AGN aktivitesine dair herhangi bir bulgu olmadığını göstermiştir.

Bu çalışmada, *Suzaku* X-ışın verisi kullanılarak NGC

* ebrucaliskan@sdu.edu.tr



Şekil 1. Sol panel: Galaksi grubu NGC 4325'in 0.3-5.0 keV enerji aralığında *Suzaku* XIS üç renk görüntüsü. 0.3-0.7 keV enerji aralığı kırmızı renkte, 0.7-1.2 keV enerji aralığı yeşil renkte ve 1.2-5.0 keV enerji aralığı mavi renkte verilmiştir. Pembe renkli halkalar tayf analizi için seçilen bölgeleri göstermektedir. Merkez bölgeden dışa doğru her bir bölgenin açısal ve lineer uzunlukları 0-1.5' (0-47.4 kpc), 1.5-3.0' (47.4-94.7 kpc), 3.0-4.5' (94.7-142.1 kpc) ve 4.5-6.0' (142.1-189.5 kpc) olarak belirlenmiştir. Kesikli beyaz halka ile gösterilen en dıştaki bölge ise arka plan (background) için seçilen bölgeyi temsil etmektedir. Sağ panel: Galaksi grubu NGC 4325'in SDSS optik görüntüsü. Bu görüntü X-ışın görüntüsü ile aynı açısal büyüklükte ($\sim 18 \times 18'$) verilmiştir.

4325'de küme içi plazma sıcaklığı ve element bollukları incelenmiştir. Ayrıca, NGC 4325'in merkez bölgesinden itibaren dışa doğru elektron yoğunluğu, entropi ve basınç değişimleri araştırılmıştır. §2'de *Suzaku* gözlemi ve veri indirgeme yöntemleri açıklanmıştır. §3'te analizler ve elde edilen bulgular sunulmuştur. §4'te ise sonuçlar tartışılmıştır.

2 Gözlem ve Veri İndirgeme

NGC 4325, *Suzaku* tarafından 2015 yılında yaklaşık 18 ks poz süresi ile gözlenmiştir (Gözlem no: 809110010). Gözlemlerde XIS (X-ray Imaging Spectrometer, *Koyama ve diğ. 2007*) üzerinde bulunan üç CCD (XIS0, 1 ve 3) kullanılmıştır.

NASA'nın HEASARC sayfasından indirilen verinin analizleri HEASoft (v.6.32.1) yazılımı ile yapılmıştır. Her bir event uzantılı dosyanın X-ışın görüntüsü xselect (v.2.5b) ile oluşturulmuştur. Elde edilen tayfin modellenmesi ise xspec (v.12.9.0) (*Arnaud 1996*) programı ile yapılmıştır. Element bollukları için *Wilms ve diğ. (2000)* tarafından verilen tablo temel alınmış, atomik veri tabanı için AtomDB (v.3.0.9) (*Smith ve diğ. 2001; Foster ve diğ. 2012*) ve görüntü ayarları için DS9 programı kullanılmıştır.

3 Analiz ve Bulgular

3.1 Görüntü Analizleri

Şekil 1'in sağ panelinde karşılaştırma yapmak amacıyla NGC 4325'in *Suzaku* XIS görüş alanı ($\sim 18 \times 18'$) ile aynı görüş alanına sahip bir büyüklükte SDSS optik görüntüsü sunulmuştur.

3.2 Tayf Analizi

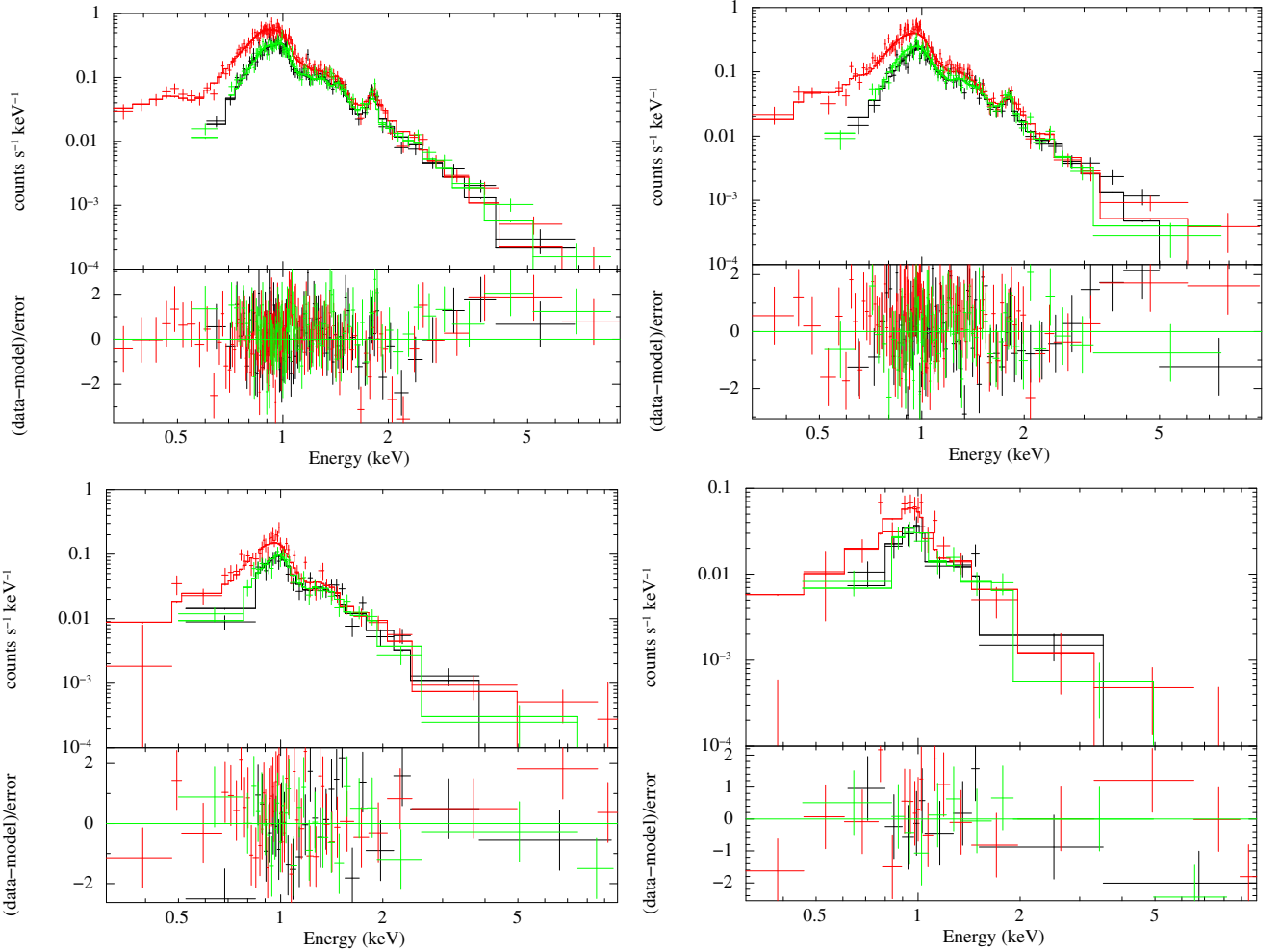
Tayf analizleri için öncelikle 1.5' yarıçaplı ve merkez koordinatları RA (J2000) = $12^{\text{h}}23^{\text{m}}04^{\text{s}}38$ ve Dec (J2000) = $+10^{\circ}37'07''.82$ olan merkezi bölge belirlenmiştir (Şekil 1, sol panel). Bu bölgeyi merkez alan 3 halka daha seçilerek toplam 4 bölgenin tayf analizi yapılmıştır.

Arka plan için Şekil 1'de beyaz kesikli halka ile gösterilen en dıştaki bölge seçilmiştir. Öncelikle aletsel arka planın etkisi çıkarılmıştır. X-ışın arka planı için Samanyolu halesi ve kozmik X-ışın arka planın etkisi gözönüne alınmıştır. Arka plana bir diğer etki de süpernova patlamaları ile oluştuğu düşünülen ve yerel sıcak kabarcık olarak tanımlanan yaklaşık 10^6 K sıcaklıkta gazın ürettiği X-ışın arka plan etkisidir. Bu etki de arka plan analizlerine dahil edilmiştir.

Her bir halka içerisindeki grup içi ortam yayılımını modellemek amacıyla xspec içindeki ısısal bir plazma modeli olan vpec (*Smith ve diğ. 2001*) denenmiştir. Galaktik soğurma için bu modele TBabs modeli (*Wilms ve diğ. 2000*) eklenmiştir. Fit işleminde öncelikle *Russell ve diğ. (2007)* ve *Laganá ve diğ. (2015)* çalışmalarına benzer olarak N_{H} parametresi $2.32 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ değerine sabitlenmiştir. Ancak, bu durumda istatistiksel olarak iyi olmayan bir sonuç çıkmıştır (merkez bölge için $\chi^2_{\nu}/\text{dof}=1.41/287$, diğer bölgeler için >1.50) Bu nedenle N_{H} parametresinin bir değere sabitlenmesinden vazgeçilmiş ve bu parametre serbest bırakılmıştır. vpec modelinin parametrelerinden olan sıcaklık kT , normalizasyon, Mg, Si, S ve Fe elementlerinin bolluk parametreleri serbest bırakılmıştır. Elde edilen χ^2_{ν} değeri bu modelin (TBabs * vpec) *Suzaku* verisini iyi bir biçimde tanımladığını göstermiştir. Her bir halka

Çizelge 2. XIS tayfına en iyi uyan modelin (TBabs * vapec) verdiği parametreler ve hata değerleri. Mg, Si, S ve Fe elementlerinin bolluk değerleri Güneş bolluk değeri cinsinden verilmiştir. Norm parametresinin birimi Denklem (1)'deki gibi verilmektedir. Burada D_A kaynağın açılacak uzaklığı, n_e ve n_H sırasıyla elektron ve hidrojen yoğunlukları, V ise X-ışın yayan bölgenin hacmidir.

Model	Parametre (Birim)	Seçilen Bölgeler			
		0-1.5'	1.5-3.0'	3.0-4.5'	4.5-6.0'
TBabs	N_H (10^{22} cm^{-2})	$6.93^{+1.68}_{-1.53}$	$8.06^{+2.54}_{-2.48}$	$5.84^{+4.50}_{-4.41}$	$0.38^{+0.25}_{-0.22}$
vapec	kT (keV)	$0.91^{+0.02}_{-0.02}$	$0.96^{+0.02}_{-0.02}$	$0.99^{+0.04}_{-0.05}$	$0.99^{+0.08}_{-0.09}$
	Mg	$1.42^{+0.20}_{-0.20}$	$0.44^{+0.22}_{-0.18}$	$0.71^{+0.53}_{-0.42}$	-
	Si	$0.75^{+0.16}_{-0.14}$	$0.39^{+0.12}_{-0.10}$	$0.38^{+0.32}_{-0.28}$	-
	S	$0.78^{+0.24}_{-0.23}$	$0.47^{+0.25}_{-0.20}$	-	-
	Fe	$0.45^{+0.05}_{-0.04}$	$0.30^{+0.05}_{-0.04}$	$0.35^{+0.12}_{-0.09}$	$0.28^{+0.16}_{-0.10}$
	norm (10^{-2} cm^{-5})	$24.49^{+2.45}_{-2.44}$	$9.60^{+1.09}_{-1.07}$	$1.93^{+0.42}_{-0.40}$	$0.62^{+0.14}_{-0.08}$
	χ^2_ν (dof)	1.08 (290)	1.10 (250)	1.07 (141)	1.02 (108)



Şekil 2. Galaksi grubu NGC 4325'in seçilen halkasal bölgeleri (sırasıyla; 0-1.5', 1.5-3.0', 3.0-4.5' ve 4.5-6.0') için 0.3-10.0 keV enerji aralığında XIS0 (siyah renkte), XIS1 (kırmızı renkte) ve XIS3 (yeşil renkte) tayfları.

için 0.3-10 keV enerji aralığında elde edilen XIS tayfı Şekil 2'de verilmiştir.

Her bölge için XIS tayf analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de sunulmuştur.

4 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, *Suzaku* X-ışın verisi kullanılarak galaksi grubu NGC 4325'in grup içi ortam sıcaklığı ve element bollukları incelenmiştir. Ayrıca basınç, entropi ve elektron yoğunluğu dahil

Çizelge 3. NGC 4325 grubunun her bir bölgesi için hesaplanan yoğunluk, basınç ve entropi değerleri.

Parametre (Birim)	0-1.5'	1.5-3.0'	3.0-4.5'	4.5-6.0'
n_e (cm ⁻³)	$(5.83 \pm 0.28) \times 10^{-2}$	$(1.91 \pm 0.21) \times 10^{-4}$	$(1.41 \pm 0.29) \times 10^{-5}$	$(2.33 \pm 0.30) \times 10^{-6}$
K (keV cm ²)	6.05 ± 0.32	298.94 ± 25.76	1695.33 ± 268.50	5636.32 ± 893.52
P (keV cm ⁻³)	$(5.31 \pm 0.36) \times 10^{-2}$	$(1.83 \pm 0.24) \times 10^{-4}$	$(1.40 \pm 0.34) \times 10^{-5}$	$(2.30 \pm 0.48) \times 10^{-6}$

olmak üzere, seçilen örnek CC sisteminde grup içi ortamın termodinamik özelliklerinin radyal profilleri hakkında ayrıntılı bir çalışma yapılmıştır.

Plazma sıcaklığının NGC 4325'in merkezi bölgesinde (0-1.5') daha düşük olduğu (~0.91 keV), 1.5-3.0' yarıçaptan itibaren ~0.99 keV'ye çıkarak küçük değişimler gösterdiği tespit edilmiştir. CC kümelerde yarıçap arttıkça yükselen, dış bölgelerde ise genellikle düzleşen bir merkezi sıcaklık profili belirgin bir özelliktir (Ör. NGC 1550: Sun ve diğ. 2003, NGC 741: Schellenberger ve diğ. 2017). Benzer bir çalışma, Kim ve diğ. (2020) tarafından *Chandra* Galaxy Atlas (Kim ve diğ. 2019) X-ışın verisi kullanılarak 60 tane erken tip galaksi için yapılmıştır. Radyal sıcaklık profillerinin araştırıldığı bu çalışmada; NGC 4325 için belli bir uzaklık aralığında ($R_{\min}=6.8$ kpc, $R_{\max}=51.2$ kpc) sıcaklık profilleri ($T_{\min}=0.83$ keV, $T_{\max}=1.08$ keV) belirlenmiştir.

Diğer taraftan Mg, Si, S ve Fe gibi element bolluklarının merkezi bölgede daha fazla olup merkezi bölgeden uzaklaştıkça genel olarak azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Laganá ve diğ. (2015) *Chandra* verisini kullanarak NGC 4325'in metal profillerini incelemiş ve Fe element bolluğunun merkezi bölgede baskın olduğunu ve bunun Tip Ia SN kaynaklı olabileceğini bildirmişlerdir.

Sonuç olarak, taysal analizlerde elde ettiğimiz, merkezi bölgeden uzaklaştıkça artan plazma sıcaklığı ve azalan element bolluğu, NGC 4325'in CC yapısına uygundur.

Yapılan taysal fitlerde en iyi uyumu sağlayan vaped modelinin normalizasyon (norm) değeri kullanılarak merkezden dışa doğru her bir halka için elektron yoğunluğu (n_e), entropi (K) ve basınç (P) değişimleri incelenmiştir. Bu hesaplamalarda sırasıyla aşağıda sunulan denklemler kullanılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

$$\text{norm} = \frac{10^{-14}}{4\pi [D_A(1+z)]^2} \int n_e n_H dV \quad (1)$$

$$K = k_B T n_e^{-2/3} \quad (2)$$

$$P = k_B T n_e \quad (3)$$

Çizelge 3'de, merkezi bölgedeki elektron yoğunluğunun merkezden dışa doğru azaldığı görülmektedir. Bu durum CC gruplarda beklenen bir sonuçtur. NGC 4325 için en yüksek basınç değeri ($\sim 5.31 \times 10^{-2}$ keV cm⁻³) merkezi bölgede elde edilmiştir. Merkezi bölgeden dış bölgeye doğru basınç değerinde hızlı bir azalma söz konusudur. Entropide ise, NCC kümelerde daha yatay radyal profiller beklenirken, CC kümelerde dik bir şekilde artan radyal profiller beklenmektedir. Çizelge 3'den görüldüğü gibi, NGC 4325 grubunda merkezi bölgeden dış bölgelere doğru dik bir şekilde artan entropi profili ortaya çıkmıştır. Bu sonuç Russell ve diğ. (2007) tarafından elde edilen sonuç ile uyumludur.

Gelecekte, *XRISM* ve *Athena* gibi yüksek taysal çözünürlüğe sahip uydularla yapılacak gözlemler NGC 4325 grubunun daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Alam S., ve diğ., 2015, *ApJS*, 219, 12
 Arnaud K. A., 1996, in Jacoby G. H., Barnes J., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. p. 17
 Foster A. R., Ji L., Smith R. K., Brickhouse N. S., 2012, *ApJ*, 756, 128
 Hudson D. S., Mittal R., Reiprich T. H., Nulsen P. E. J., Andernach H., Sarazin C. L., 2010, *A&A*, 513, A37
 Kim D.-W., ve diğ., 2019, *ApJS*, 241, 36
 Kim D.-W., ve diğ., 2020, *MNRAS*, 492, 2095
 Koyama K., ve diğ., 2007, *PASJ*, 59, 23
 Laganá T. F., Lovisari L., Martins L., Lanfranchi G. A., Capelato H. V., Schellenberger G., 2015, *A&A*, 573, A66
 Russell P. A., Ponman T. J., Sanderson A. J. R., 2007, *MNRAS*, 378, 1217
 Schellenberger G., Vrtilek J. M., David L., O'Sullivan E., Giacintucci S., Johnston-Hollitt M., Duchesne S. W., Raychaudhury S., 2017, *ApJ*, 845, 84
 Skrutskie M. F., ve diğ., 2006, *AJ*, 131, 1163
 Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C., 2001, *ApJ*, 556, L91
 Stott J. P., ve diğ., 2012, *MNRAS*, 422, 2213
 Sun M., Forman W., Vikhlinin A., Hornstrup A., Jones C., Murray S. S., 2003, *ApJ*, 598, 250
 Voyer E. N., ve diğ., 2014, *A&A*, 569, A124
 Wilms J., Allen A., McCray R., 2000, *ApJ*, 542, 914

Access:

M24-0204: *Turkish J.A&A* — Vol.5, Issue 2.