

A2384 Galaksi Kümesinin ve Galaksi Kümeleri Arasındaki Köprünün Tayfsal Araştırması

Elif Naz Toktaş¹  , Stefano Etti² , Enise Nihal Ercan¹ ,

¹ Boğaziçi Üniversitesi, Fizik Bölümü, İstanbul, Türkiye

² INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Bologna, İtalya

Accepted: February 20, 2025. Revised: February 20, 2025. Received: November 28, 2024.

Özet

Bu çalışmada, birleşme sonrası galaksi kümesi olarak bilinen, Abell 2384 ($z \approx 0.0943$) incelenmektedir. A2384(G) ve A2384(K) kümeleri ve bu kümeler arasında uzanan köprünün XMM-Newton/EPIC ve Chandra/ACIS-I gözlemleri analiz edilmiş olup sıcaklık ve metal bolluğu profilleri sunulmaktadır. Yapılan modellemeler, Köprü 1 ve Köprü 2 bölgelerinin, A2384(K) ve A2384(G) bölgelerine kıyasla daha sıcak, daha aktif ve metal bolluğu açısından daha zengin olduğunu göstermektedir. Chandra ve XMM-Newton gözlemleriyle elde edilen verilere dayanan modellemeler, A2384(G) bölgesine yaklaştıkça metal bolluğunun arttığını, ancak bu artışın A2384(G) bölgesine doğru azalmaya başladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, Parekh ve diğ. (2019) çalışmalarında da belirtilen radyo kaynağının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Abstract

In this study, the post-merger galaxy cluster known as Abell 2384 ($z \approx 0.0943$) is examined. The XMM-Newton/EPIC and Chandra/ACIS-I observations of the A2384(S) and A2384(N) clusters, along with the bridge connecting these clusters, have been analyzed, and the temperature and metallicity profiles are presented. The model results indicate that the Bridge 1 and Bridge 2 regions are hotter, more active, and richer in metals compared to the A2384(N) and A2384(S) regions. Based on the data from Chandra and XMM-Newton, the models show that the metal abundance increases towards the A2384(S) region, but this increase diminishes in the lower regions. This finding suggests that the radio source mentioned in Parekh et al. (2019) studies requires more detailed investigation.

Anahtar Kelimeler: Galaxy Cluster – X-ray Spectroscopy – Intracluster Medium

1 Giriş

Evrende kütle çekimsel olarak birbirine bağlı en büyük yapılar galaksi kümeleridir. Yüzlerce, hatta binlerce galaksiden oluşan bu devasa sistemler, hem sıradan (baryonik) hem de karanlık madde açısından son derece zengin yapılardır. Galaksi kümesine üye galaksiler karanlık madde ve kümeyi çevreleyen sıcak gazla birlikte büyük bir kütle çekimsel potansiyel altında bir arada tutulur. Barındırdığı galaksiler tarafından milyarlarca yıl boyunca kimyasal olarak zenginleştirilen galaksi kümelerinin kimyasal zenginleşmesinin başlıca kaynağı çekirdek çökmesi süpernovaları (SNcc) ve Ia tipi süpernovalar (SNIa) olarak bilinen süpernova patlamalarıdır.

En az 8-10 Güneş kütlesine sahip yıldızların çekirdeklerinin çökmesi sonucu meydana gelen SNcc patlamaları sırasında kümeiçi ortama yüksek miktarda alfa elementleri olarak bilinen Fe, O, Ne, Mg, S ve Si atılır (Werner ve diğ. 2008). Bunun yanı sıra düşük kütleli beyaz cüce yıldızların patlamasıyla meydana gelen Ia tipi Süpernova (SNIa) patlaması sırasında Fe, Ni ve Co gibi demir-tepesi elementleri üretilir (Mitchell ve diğ. 1976). Bu patlamalar sırasında oluşan şok dalgaları kümeiçi ortamı ısıtır ve X-ışını gözlemlerinde baskın olan termal bremsstrahlung (frenleme) radyasyonunu güçlendirir (Werner ve diğ. 2008), üye galaksilerin içerisinde barındırdığı süpernovaların patlamaları sonucu galaksilerden atılan ağır

elementler sayesinde metaller kümeiçi ortamı ("Intracluster Medium", ICM) zenginleştirmektedir. Galaksi kümelerinin baryonik maddesinin büyük bir kısmı, yıldızların aksine, sıcak ve iyonize gaz halinde, kümelerin iç ortamında bulunur.

Galaksi kümelerinin barındırdığı bu sıcak gaz, kümenin kütle çekim potansiyeli sayesinde milyonlarca dereceye kadar ısıtılmaktadır (Mernier, F. ve diğ. 2015), ve bu sayede ısınan gaz X-ışını yaymaktadır. X-ışını gözlemleri, galaksi kümeleri üzerinde çalışırken önemli bir role sahiptir, çünkü bu gözlemler aracılığıyla kümeiçi ortamın sıcaklık, metallik, entropi, ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinebiliriz.

İlk olarak Uhuru uydusu ile keşfedilen X-ışını yayan plazma (Gursky ve diğ. 1972), galaksi kümelerindeki baryonik maddenin büyük bir kısmını oluşturan sıcak gazın doğasını anlamamıza katkı sağlamıştır. Bu keşiflerden sonra, Einstein, ROSAT, XMM-Newton ve Chandra gibi X-ışını teleskoplarıyla yapılan gözlemler, galaksi kümeleri üzerindeki incelemeleri derinleştirmiştir. X-ışını gözlemleri, kümeiçi ortamın termal yapısını ve bu gazın nasıl zenginleştiğini anlamamız için en güçlü araçlardan biridir.

Bu çalışmada kırmızıya kayma değeri $z \approx 0.0943$ olan ve birleşme sonrası özellikler sergileyen Abell 2384 (A2384) galaksi kümesini ele alacağız. Bu küme, A2384(K) ve A2384(G) olarak adlandırılan iki alt kümeden oluştuğu ve bu alt kümelerin, yaklaşık 700 kpc uzunluğunda, sıcak, X-ışını yayan bir gaz köprüsüyle birbirine bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Birleşme sonrası sistemler, kütle çekimsel olarak hala aktif

* elif.toktas@std.bogazici.edu.tr

Çizelge 1. A2384 Galaksi kümesinin XMM-Newton ve Chandra uydularından alınan gözlem verileri listelenmiştir.

Uydu	ID	Tarihi	Pozlama Süresi (ks)
XMM-Newton	0201902701	2004-10-28	26 (19.4)
Chandra	4202	2002-11-18	31.4 (31.2)

bir evrim geçirmekte olan kümelerdir. Galaksi kümeleri bu kümelerin çarpışması sırasında açığa çıkan enerji, büyük şok dalgaları ve türbülans etkisiyle kısmen düzensiz hale gelirler. Bu şok dalgaları, küme içindeki gazın sıkışarak ısınmasına ve türbülansın artmasına neden olur, bu da kümeiçi ortamın metal bolluğu profillerini etkilemektedir (Markevitch & Vikhlinin 2007).

Birleşme olayları birkaç evreden oluşur. İlk aşamada galaksi kümeleri arasındaki kütle çekim etkisi ile hızlanan kümeler, kümeiçi ortamda sıkışma ve şok dalgaları etkisiyle yapılar oluşturur. Bu tür yapılar, birleşmenin ilk aşamalarında yüksek sıcaklıklara ve düzensiz yoğunluk profillerine yol açar (Ferrari ve diğ. 2006). Birleşmenin ileri aşamalarında, şok dalgaları ve türbülans etkisiyle kümeiçi ortamda gaz düzensiz bir yapı kazanarak sıcaklık ve metal dağılımında büyük ölçekli değişiklikler gösterir (Mazzotta ve diğ. 2001). Galaksi kümelerinde oluşan şok dalgalarının soğuk cephele (cold fronts) ile etkileşimini inceleyerek, bu süreçlerin kümeiçi ortamda gaz dağılımına olan katkısını ayrıntılı olarak açıklamaktadır (Markevitch & Vikhlinin 2007).

Kütle çekimsel etki ile tekrar düzenli hale gelmeye çalışan galaksi kümesinin kümeiçi ortamı, sıcaklık, yoğunluk ve metal bolluğu açısından farklılaşmaya başlar. Çekirdek çökmesi süpernovaları (SNcc) ve Tip Ia süpernovaların (SNIa) etkileriyle bu yoğun gaz zenginleşmiş olur ve galaksi kümelerinin kimyasal tarihçesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Mernier, F. ve diğ. 2017).

Maurogordato ve diğ. (2011) çalışmasında, bu iki alt kümenin birleşmesinin kümeiçindeki sıcak gazın dinamik dağılımını nasıl etkilediği vurgulanmıştır. Biz de bu makalede birleşme sürecinin kümeiçi ortamda yarattığı değişikliklerin yanı sıra, birleşme sırasında ortaya çıkan şok dalgaları ve türbülanslar sonucu olarak metalik ve tekil element profilleri XMM-Newton ve Chandra uydularını kullanarak gözlemlemekte ve analiz etmekteyiz.

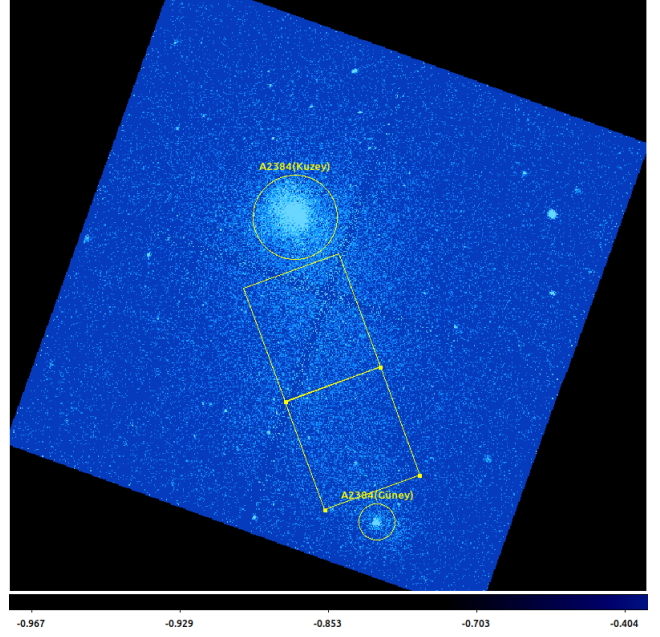
2 Gözlemsel Veriler ve İndirgeme

2.1 Gözlem

Abell 2384 galaksi kümesinin tayfsal analizinde XMM-Newton ve Chandra uydularının verileri kullanılmıştır (Çizelge 2).

XMM-Newton analizi için gözlem verisi ESA Science Archive'dan indirilmiş ve kullanılmış olup 0.5-10 keV enerji bandındaki tayfsal analiz incelemesi yapılmıştır. XMM-Newton EPIC verileri HEASoft (v6.31.1) ve Science Analysis System (SAS, v21.0) yazılımı ile analiz edilmiştir.

Chandra X-ışını Gözlemevi'nden elde edilen, ACIS-I dedektörü ile gözlemlenmiş gözlem verisi Chandra Data Archive'dan indirilmiştir. Veri indirgeme sürecinde, CIAO (v4.16) (Chandra Interactive Analysis of Observations) yazılımı ve CALDB (v4.11.2) (Chandra Calibration Database) kalibrasyon dosyaları kullanılmıştır.



Şekil 1. A2384 galaksi kümesinin DS9 yardımıyla oluşturulmuş Chandra görseli üzerinden seçilen bölgeler (sırasıyla A2384(K), Köprü 1, Köprü 2, A2384(G)) gösterilmektedir.

2.2 Verilerin İndirgenmesi

A2384 galaksi kümesinin XMM-Newton verilerinin indirgenme işlemi için Kuntz & Snowden (2008) tarafından önerilen metotlar izlenmiştir. Verinin indirgenme işlemleri için epochain, emchain, pnspectra ve mosspectra komutları kullanılmıştır. Noktasal kaynaklar, CIAO (v4.16)'da bulunan wavdetect paketi ile XMM-Newton verilerinden çıkarılmıştır. MOS ve pn dedektörleri için 0.4-7.2 keV bandında tayf ve arka plan dosyaları pnspectra ile mosspectra, ve pnback ile mosback komutları uygulanmıştır.

Chandra Verileri CIAO (v4.16) yardımı ile chandra_repro komutu ve güncel kalibrasyon dosyaları CALDB (v4.11.2) ile indirgenme işlemi uygulanmıştır. Noktasal kaynakların çıkarılması ve tayfsal analizdeki diğer işlemler için wavdetect ve dmfilth gibi komutlar kullanılarak galaksi kümesi içinde ve köprü bölgelerinde nokta kaynaklarının temizlenmesi sağlanmıştır. İşlenen Chandra gözlem verisi, 0.5-7.0 keV enerji bandında oluşturulmuştur.

Verilerin indirgenmesinin ardından, DS9 görüntüleme programı kullanılarak seçilecek bölgeler belirlenmiş olup Şekil 1'de gösterilen A2384(K) ve A2384(G) bölgeleri için iki eşmerkezli dairesel bölge ve Köprü 1 ile Köprü 2 bölgesi için iki dikdörtgen bölgeye ayrılmıştır. Seçilen bölgeler için pnspectra and mosspectra komutları bu bölgelerin koordinatları ile tekrar çalıştırılmış olup her bir bölge için tayf (arf) ve tepkisel (rmf) matris dosyaları oluşturulmuştur. Her bir bölge için elde edilen veriler, XSPEC programı ile phabs, apec ve vpec modelleri kullanılarak A2384 galaksi kümesinin tayfsal analizi yapılmıştır.

2.3 Tayfsal Analiz ve Model Uyarlama

Chandra ve XMM-Newton gözlemlerine dayalı olarak gerçekleştirilen A2384 galaksi kümesinin kimyasal ve termal

Çizelge 2. XMM-Newton analizi için en iyi tayfsal model üzerinden elde edilen sonuçlar

Bölge	Sıcaklık (keV)	Metal Bolluğu ($Z_{\odot}$)	χ^2 (dof)
A2384 (K)	$2.87^{+0.15}_{-0.14}$	$0.35^{+0.08}_{-0.07}$	2228 (2599)
Köprü 1	$3.32^{+0.25}_{-0.23}$	$0.11^{+0.08}_{-0.08}$	2091 (2610)
Köprü 2	$4.35^{+0.74}_{-0.60}$	$0.22^{+0.12}_{-0.12}$	2742 (2601)
A2384 (G)	$1.67^{+0.12}_{-0.11}$	$0.18^{+0.17}_{-0.10}$	31601 (2769)

Çizelge 3. XMM-Newton analizi için seçilen bölgeler için uygulanan en iyi tayfsal model üzerinden elde edilen element bollukları

Element	A2384 (K)	Köprü 1	Köprü 2	A2384 (G)
Fe	$0.30^{+0.10}_{-0.12}$	$0.15^{+0.15}_{-0.13}$	$0.23^{+0.15}_{-0.13}$	$0.20^{+0.25}_{-0.10}$
Ne	$0.63^{+0.54}_{-0.63}$	$0.14^{+1.3}_{-0.14}$	-	-
Mg	$0.17^{+0.36}_{-0.17}$	$0.78^{+0.76}_{-0.62}$	$0.34^{+0.59}_{-0.34}$	-
Si	$0.31^{+0.40}_{-0.31}$	$0.51^{+0.57}_{-0.51}$	-	$0.31^{+0.29}_{-0.25}$
S	$0.68^{+0.61}_{-0.59}$	-	$0.65^{+0.51}_{-0.46}$	$0.24^{+0.47}_{-0.24}$

yapısını anlamak amacıyla yapılan tayfsal analizde, kümeiçi ortamdaki plazmanın sıcaklık ve metal zenginliğini incelemek için her bölgeye *phabs* * *vapec* modeli uygulanmış, sonuçlar ise Çizelge 2, 3, 4 ve 5'de sunulmuştur. Bu model, X-ışını tayflarında gözlemlenen emisyon çizgilerini fiziksel parametrelerle ilişkilendirerek, plazmanın temel özelliklerini (sıcaklık, metal bolluğu, yoğunluk, iyonlaşma dengesi) ortaya koymaktadır.

Modelde kullanılan *phabs* (photoelectric absorption) bileşeni, X-ışınlarının galaksilerarası ortamdan geçerken maruz kaldığı soğurma etkisini modellemek için kullanılmaktadır. Öte yandan, *vapec* (Variable Abundance APEC - Astrophysical Plasma Emission Code) bileşeni, kümeiçi ortamdaki plazmanın termal ve kimyasal özelliklerini anlamak için kullanılmakta olup plazmanın sıcaklığı ve element bolluklarını ortaya koymaktadır (Simionescu ve diğ. 2017).

Yapılan modelleme sonucunda, A2384 galaksi kümesinde gözlemlenen X-ışını emisyonlarının modellenmesi ve özellikle Fe, O, Ne, Mg ve Si gibi ağır elementlerin tayfta gözlemlenen emisyon çizgileri, kümeiçi ortamın kimyasal zenginleşmesi hakkında bilgi vermektedir.

3 Sonuçlar

Bu çalışmada, birleşme sonrası galaksi kümesi olarak bilinen Abell 2384 ($z \approx 0.0943$) incelenmiş olup, yapılan tayfsal analiz ve modelleme, A2384 galaksi kümesinin birleşme sonrası dinamiklerinin ICM üzerindeki etkilerini anlamamızda kritik rol oynamaktadır. *phabs*×*vapec* ve *phabs*×*apec* modelleri ile yapılan detaylı analiz sonucunda, A2384(K) ve A2384(G) alt kümeleri ve bu kümeler arasında uzanan köprünün XMM-Newton/EPIC ve Chandra/ACIS gözlemleri analiz edilmiş, sıcaklık ve metal bolluğu profillerinin analizi sunulmuş ve galaksi kümesinin farklı bölgelerinden elde edilen sıcaklık ve metal bolluğu değerleri karşılaştırılmıştır.

XMM-Newton analiz sonuçları, A2384(K) bölgesinde sıcaklık değerinin 2.87 keV iken, Köprü bölgelerinde sırasıyla 3.32 ve 4.35 keV olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık farkının birleşme sonrası köprü bölgelerinde oluşan şok dalgalarıyla ile kümeiçi ortamın ısındığı açıkça görülmektedir. Yapılan

Çizelge 4. Chandra veri analizi için en iyi tayfsal model üzerinden elde edilen sonuçlar.

Bölge	Sıcaklık (keV)	Metal Bolluğu ($Z_{\odot}$)	χ^2 (dof)
A2384 (K)	$3.74^{+0.15}_{-0.14}$	$0.31^{+0.07}_{-0.06}$	549 (368)
Köprü 1	$4.64^{+0.38}_{-0.34}$	$0.27^{+0.13}_{-0.11}$	428 (437)
Köprü 2	$4.28^{+0.55}_{-0.51}$	$0.19^{+0.18}_{-0.15}$	559 (437)
A2384 (G)	$1.67^{+0.27}_{-0.21}$	$0.26^{+0.19}_{-0.12}$	1364 (403)

Çizelge 5. Chandra veri analizi için en iyi tayfsal model üzerinden elde edilen sonuçlar

Element	A2384 (K)	Köprü 1	Köprü 2	A2384 (G)
Fe	$0.23^{+0.05}_{-0.06}$	$0.21^{+0.11}_{-0.09}$	$0.15^{+0.16}_{-0.11}$	-
Ne	$0.76^{+0.76}_{-0.68}$	$0.16^{+1.3}_{-0.16}$	$0.33^{+1.3}_{-0.33}$	-
Mg	$0.53^{+0.57}_{-0.51}$	$0.25^{+0.92}_{-0.25}$	$0.38^{+1.2}_{-0.38}$	-
Si	-	-	-	$0.26^{+0.33}_{-0.24}$
S	$0.40^{+0.41}_{-0.39}$	$0.16^{+0.80}_{-0.16}$	-	$0.77^{+0.70}_{-0.52}$

modellemeler sonucunda seçilen bölgelerin metallikleri sırasıyla $0.35 Z_{\odot}$, $0.11 Z_{\odot}$, 0.22 , ve $0.18 Z_{\odot}$ olarak ölçülmüştür.

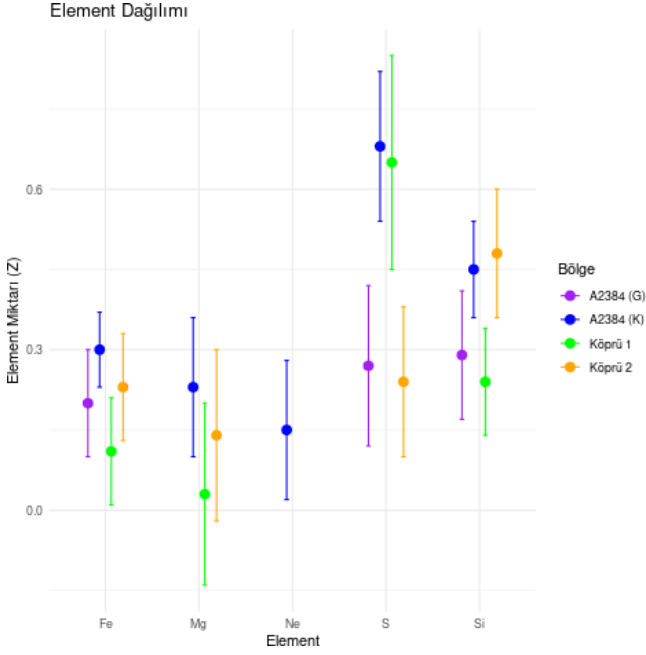
Chandra analiz sonuçlarına göre, A2384(K) bölgesinde sıcaklık değeri 3.74 keV iken, Köprü 1 ve Köprü 2 bölgelerinde bu değer sırasıyla 4.64 keV ve 4.28 keV'a kadar yükselmektedir. A2384(G) bölgesinde ise sıcaklığın 1.67 keV değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Metallik değerleri, A2384(N) bölgesi için $0.31 Z_{\odot}$, Köprü 1 için $0.27 Z_{\odot}$ iken Köprü 2 için $0.19 Z_{\odot}$ 'a düşmekte ve A2384(G) bölgesinde ise $0.26 Z_{\odot}$ 'ya yükselmektedir. Bu durum, A2384(K) ve A2384(G) bölgelerinin, Köprü 1 ve Köprü 2 bölgelerine kıyasla metal bolluğu açısından daha zengin olduğunu göstermektedir.

İki uydusu ile yapılan gözlem ve analiz sonucunda gözlemlenen sıcaklık farkı, birleşme sonrası köprü bölgelerinde oluşan şok dalgalarının kümeiçi ortamı ısıttığını açıkça ortaya koymaktadır. Yapılan modellemeler ile A2384(K), Köprü 1, Köprü 2 ve A2384(G) bölgelerinin tekil element bollukları ölçülmüş ve Çizelge 3 ve 5'de verilmekte ve Şekil 2'de gösterilmektedir.

Her bölge için belirlenen kümeiçi gazın sıcaklık ve metal bolluk profilleri, metal zenginliğinin galaksilerdeki süpernova patlamaları ile nasıl arttığına dair önemli bilgiler sunmaktadır. Demir ve diğer ağır elementlerin bolluk oranları, birleşme sonrası süpernova katkılarıyla şekillenen kimyasal zenginleşmenin etkilerini yansıtmaktadır. Özellikle, köprü bölgelerinde gözlemlenen artan metal bolluğu, galaksi kümeleri arasındaki gaz akışı ve şok dalgalarının, kümeiçi ortamın kimyasal zenginleşmesine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir. Köprü bölgelerinde gözlemlenen bu farklı metal bollukları, galaksi kümelerinin birleşme süreçlerinde meydana gelen gaz hareketlerinin ve şok etkilerinin kümeiçi ortamın kimyasal yapısını nasıl etkilediğine dair önemli ipuçları sunmaktadır (Mernier, F. ve diğ. 2017).

XMM-Newton gözlemlerine dayanan modellemeler, A2384 (G) bölgesine yaklaştıkça metal bolluğunun arttığını, ancak bu artışın daha uzak alt bölgelerde azalmaya başladığını göstermektedir. Bu durum, Parekh ve diğ. (2019) çalışmasında da vurgulandığı gibi, bu alanda tespit edilen radyo kaynağının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerektiğini işaret



Şekil 2. Çizelge 2, 3, 4 ve 5'de gösterilen tekil elementlerin değerleri ve değişimi seçilen dört bölge için gösterilmektedir.

etmektedir. Bu bulgular, A2384 galaksi kümesinin birleşme sonrası evrimsel sürecinin, kümeiçi gazın kimyasal ve termal yapısını nasıl etkilediğine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

Teşekkür

Bu araştırma fırsatını ve beraberindeki fonu sağladığı için AHEAD (TNA) programına ve TÜBİTAK'a 122F305 kodlu projemiz için verdiği maddi destek için teşekkür ederiz. Ayrıca E.N.E. Boğaziçi Üniversitesi BAP 13760 nolu proje desteği için teşekkür eder.

Kaynaklar

- Ferrari C., Benoist C., Maurogordato S., Cappi A., Soucail G., 2006, *Space Sci. Rev.*, 134, 93
- Gursky H., Solinger A., Kellogg E. M., Murray S., Tananbaum H., Giacconi R., Cavaliere A., 1972, *ApJ*, 173, L99
- Kuntz K. D., Snowden S. L., 2008, *A&A*, 478, 575
- Markevitch M., Vikhlinin A., 2007, *Phys. Rep.*, 443, 1
- Maurogordato S., Cappi A., Ferrari C., Benoist C., Soucail G., Arnaud M., 2011, *A&A*, 525, A79
- Mazzotta P., Markevitch M., Vikhlinin A., Forman W. R., David L. P., VanSpeybroeck L., 2001, *AJ*, 555, 205
- Mernier, F. de Plaa, J. Lovisari, L. Pinto, C. Zhang, Y.-Y. Kaastra, J. S. Werner, N. Simionescu, A. 2015, *A&A*, 575, A37
- Mernier, F. ve diğ., 2017, *A&A*, 603, A80
- Mitchell R. J., Culhane J. L., Davison P. J. N., Ives J. C., 1976, *MNRAS*, 175, 29P
- Parekh V., Lagana T. F., Thorat K., van der Heyden K., Iqbal A., Durret F., 2019, *MNRAS*, , *ADS*
- Simionescu A., Werner N., Urban O., 2017, *MNRAS*, 469, 1476
- Werner N., Finoguenov A., Kaastra J. S., Simionescu A., Dietrich J. P., Vink J., Böhringer H., 2008, *A&A*, 482, L29

Access:

M25-0317: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.