







# Abell 3112 Galaksi Kümesinin XMM-Newton ile Kimyasal Zenginleşme Çalışması

İsmet Anıl Baloğlu<sup>1</sup> , Gökhan Şen<sup>1</sup> , Binnur Sökmen Şevik<sup>1</sup> ,  
Elif Naz Toktaş<sup>1</sup> , Sinancan Kara<sup>1</sup> , E. Nihal Ercan<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü, İstanbul, Türkiye

Accepted: January 10, 2023. Revised: December 20, 2022. Received: November 6, 2022.

## Özet

Galaksi kümeleri, evrendeki kütle çekimsel olarak bağlı en büyük yapılardır. Her biri milyonlarca yıldızla sahip olan yüzlerce galaksi içeriyor olsalar da, galaksi kümelerini oluşturan baryonik maddenin büyük kısmı kümeye yayılmış olan sıcak, iyonize gaz halindedir (genel olarak "intracluster medium" veya basitçe "ICM" şeklinde bahsedilir). Sıcaklığı milyon kelvin mertebesine ulaşan ICM gazı X-ışını ışıması yapar. ICM gazının X-ışın tayfı, bize gazın kimyasal özellikleri ve ICM'de dağılımını bulmamızı sağlayan metal emisyon çizgileri de barındırır. Bu çalışmada, XMM-Newton European Photon Imaging Camera (EPIC) verilerini kullanarak zengin bir galaksi kümesi olan A3112 ( $z=0.07525$ )'nin kimyasal yapısını inceliyoruz. Modelimiz, çekirdekte yüksek metal bolluğu ve düşük sıcaklık değeri göstermekte, bu da A3112'nin rahatlamış ve soğuk çekirdekli bir küme olduğuna işaret etmektedir.

## Abstract

Galaxy clusters are the largest gravitationally bound structures in the universe. Although they contain hundreds of galaxies each with millions of stars of their own, the majority of the baryonic mass of galaxy clusters is in the form of hot ionized gas pervading the cluster (generally referred to as "intracluster medium" or simply "ICM"). The ICM gas which has temperatures in the order of megakelvins emits X-ray radiation. X-ray spectra of the ICM gas also shows emission lines from metals, which allows us to determine the chemical composition and its distribution throughout the ICM. In this study, we examine the chemical composition of the rich galaxy cluster A3112 ( $z=0.07525$ ) using XMM-Newton European Photon Imaging Camera (EPIC) data. Our model shows higher metal abundance and a lower temperature value in the core, implying that A3112 is a relaxed galaxy cluster with a cool core.

**Anahtar Kelimeler:** Galaxy – Cluster – X-ray

## 1 Giriş

Evrendeki kütle çekimsel olarak birbirine bağlı en büyük yapılardan biri galaksi kümeleridir. Galaksi kümeleri, büyük miktarda sıradan (baryonik) ve karanlık madde içerirler. Kümeyi oluşturan baryonik maddenin çoğunluğu, yıldızların aksine, kümeye yayılmış olan sıcak, iyonize gaz halinde bulunur. Bu gaz, küme içi ortam ("intracluster medium", "ICM") olarak da adlandırılır.

Uhuru uydusunun galaksi dışı astronominin en büyük keşiflerinden birisi olan, X-ışını yayan galaktik plazma keşfi (Gursky ve diğ. (1972)) bu gazın dağılımını ve gazdaki element çizgilerinin keşfedilmesine büyük katkı sağlamıştır. Bu keşif sonrasında, demir ışıma çizgileri gözlemlenmiş ve incelenmeye başlanmıştır (Mitchell ve diğ. (1976)). Günümüze kadar da başta EINSTEIN, ROSAT olmak üzere ve yakın tarihli XMM-Newton ve Chandra uyduları ile gözlemlenmiş ve incelenmiştir.

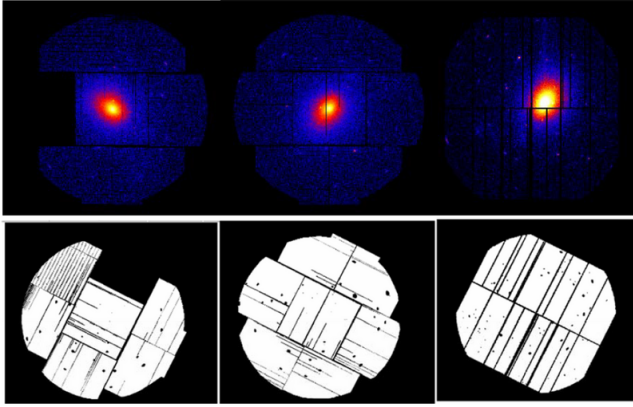
20. yüzyılın ortalarından beri yıldız nükleosentezi teorileri, ağır metallerin yıldız evrimine bağlı çeşitli termonükleer mekanizmaların bir sonucu olarak üretildiklerini açıklamaktadır. Dahası, farklı proton sayısına sahip elementler, kendilerini üreten farklı işlemlere dayandırılabilir. Karbon (C), Azot (N) ve Sodyum (Na) gibi hafif elementler çoğunlukla asimptotik dev kol (AGB) yıldızları tarafından üretilir. Çekirdek çökmesi Süpernovaları (SNcc) ağırlıklı olarak "alfa elementleri"ni üretirler: Oksijen (O), Neon (Ne), Magnezyum (Mg), Silisyum

(Si) ve Kükürt (S), diğer yandan Ia tipi Süpernovalar (SNIa) Argon (Ar), Kalsiyum (Ca), Demir (Fe) and Nikel (Ni) gibi "Demir-tepesi" elementlerini üretirler. Bu elementlerin nispi bolluk oranlarına bakarak, ICM'in zenginleşmesine katkıda bulunan farklı süpernova tiplerinin nispi katkısı hakkında bir fikir sahibi olunabilir.

Bir galaksinin, zenginleşmiş atmosferini küme içi ortama kaybetmesine yol açacak çeşitli mekanizmalar vardır: bunlardan ilki, süpernova patlamalarıdır, bir diğeri küme içi ortamda hareket eden galaksinin, ICM ile galaktik atmosferinin etkileşimi sonucu materyal kaybetmesidir. Buna çarpma basıncı sıyırılması (ram pressure stripping) denir.

Tipik bir ICM plazmasının X-ışın tayfı, belirli dalga boylarında tepe noktaları olan, sürekli bir eğri olarak görünür. Tayf eğrisinin sürekli kısmı, 1 keV üzerindeki sıcaklıklardaki plazmalarda baskın olan termal bremsstrahlung radyasyonuna atfedilir. Yerel tepe noktaları, metalik ışıma çizgileridir. Temel olarak, tamamen iyonize olmamış metaller yaptıkları K ve L kabuğu ışımaları sonucu gözlemlenebilirler. Eğer plazma aşırı ısınmış (30 keV üzeri) ve metallerin neredeyse tamamını iyonize edecek durumda ise, keskin ışıma çizgileri gözlemlenmez.

Düşük yoğunlukta ve çarpışma iyonizasyon dengesinde (collisional ionisation equilibrium, CIE) olduğu kabul edilen tipik bir ICM plazmasında, bir elementin bolluk miktarı CIE ışıma eğrisi ile ışıma çizgisi tepe noktaları arasındaki ilişkiye



**Şekil 1.** A3112 kümesinin DS9 da oluşturulan, sırasıyla (üstte) MOS1, MOS2 ve pn dedektör görüntüleri ve (altta) bu görüntülerdeki nokta kaynakları görüntüden çıkarılmak için kullanılan "cheese" maskeleri gösterilmektedir.

bakılarak çıkarılabilir. Yani, bir X-ışını tayfindan elementlerin bolluk miktarlarını, verilerimizi CIE ışıması yapan plazma modelleriyle uyarlayarak hesaplayabiliriz.

## 2 Veri Analizi

XMM-Newton uydusunun Abell 3112 galaksi kümesine ait 119 ks'lik 21 Temmuz 2009 tarihli gözlemi (Obs.ID: 0603050101), ESA Science Archive'dan indirilmiş ve veri olarak kullanılmıştır. Veri indirgenmesi için HEASoft (6.30.1) ve Science Analysis System (SAS) (20.0) programları kullanılmıştır. Analiz ve modelleme işlemleri için XSPEC (12.12.1) kullanılmıştır.

### 2.1 Verilerin İndirgenmesi

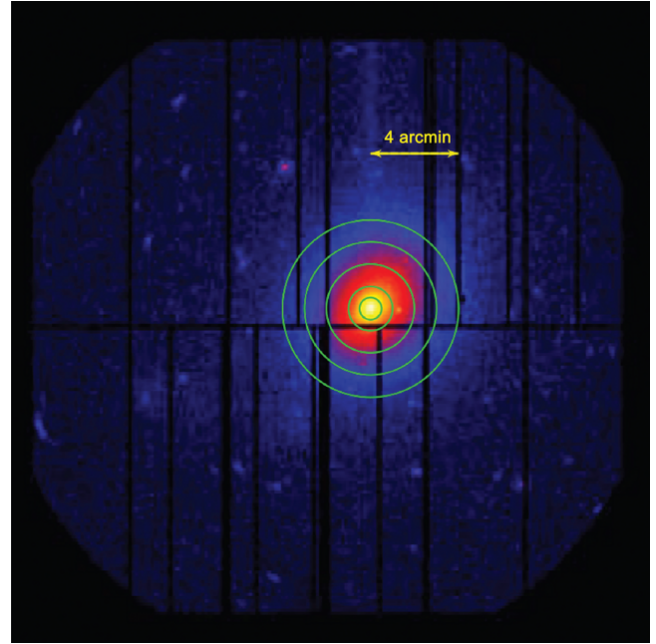
Verilerin indirgenmesi için Kuntz & Snowden (2008) tarafından önerilen metotlar izlenmiştir. Temel filtreleme işlemleri için epochain, emchain, pn-filter ve mos-filter komutları kullanılmıştır. Nokta kaynaklar, 0.4-12.0 keV enerji aralığı için cheese komutu kullanılarak çıkartılmıştır (Şekil 1). MOS ve pn dedektörleri için tayf ve arka plan dosyaları pn-spectra ile mos-spectra, ve pn-back ile mos-back komutları ile 0.4-12.0 keV bandında oluşturulmuştur.

Verilerin indirgenmesinin ardından küme, SAS kullanılarak, koordinatlarına DS9 yardımı ile karar verilmiş eşmerkezli dairesel bölgelere ayrılmıştır (Şekil 2). Tüm beş bölge için de pn-spectra ve mos-spectra komutları yarıçapları 30 (çekirdek bölgesi için), 60, 120, 180 ve 240 yay saniyesi olacak şekilde tekrar çalıştırılmış, ve her bir bölge için tayf dosyaları ile tepki dosyaları (arf ve rmf) oluşturulmuştur. Daha sonra, bu dosyalar XSPEC ile her bölgenin tayfsal analizi için kullanılmıştır.

### 2.2 Tayfsal Analiz ve Model Uyarlama

Aşağıdaki model XSPEC'te, her bölge için, üç dedektörün verileri birleştirilerek kullanılmıştır:

$$\text{Constant} * [(phabs * vapec)_{ICM} + phabs * (apec_{MWH} + powerlaw_{unresolved}) + apec_{LHB} + gaussian_1 + gaussian_2 + \dots + gaussian_9]$$

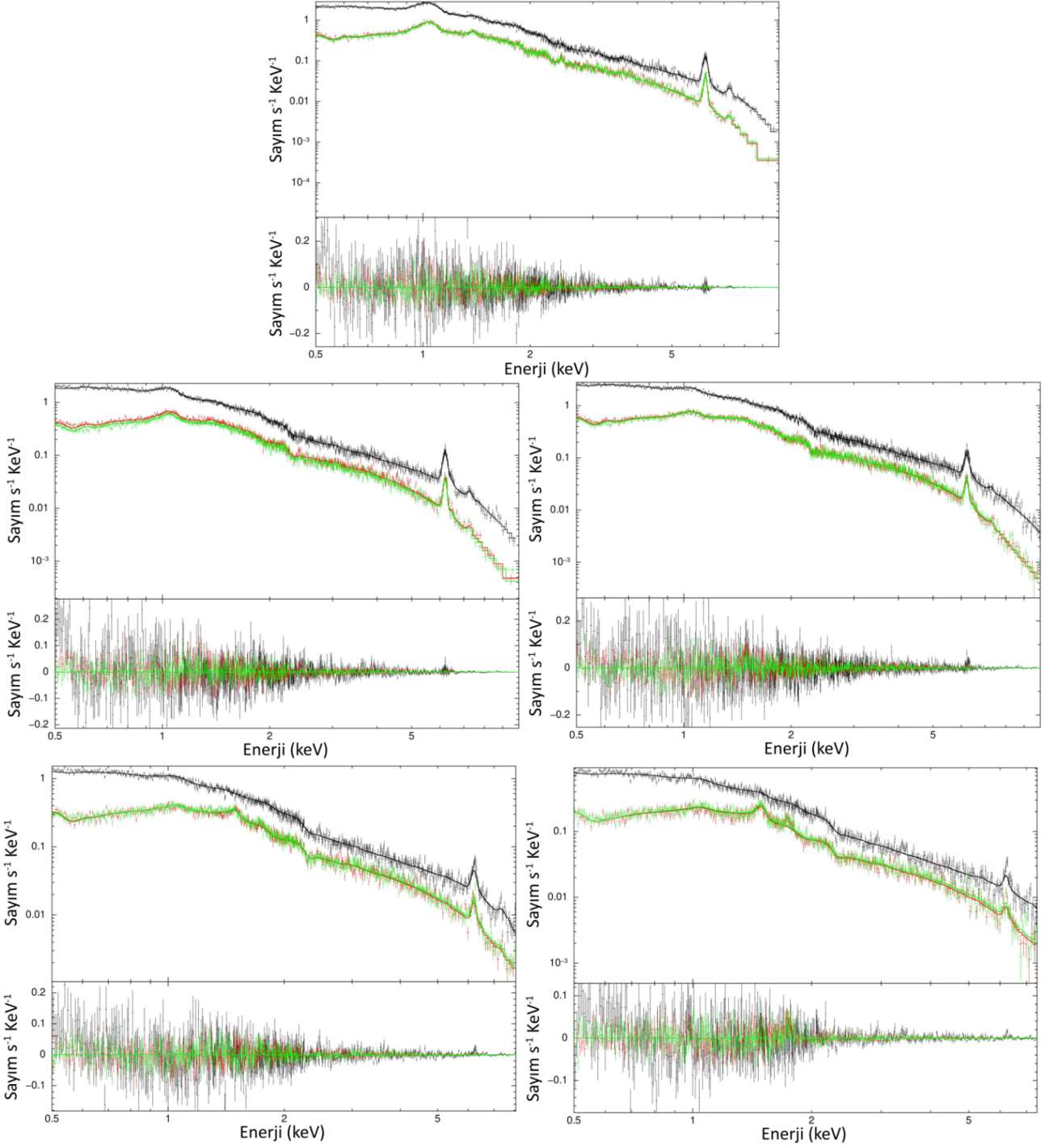


**Şekil 2.** A3112 kümesinin pn dedektörü görüntüsünün, DS9 yardımıyla oluşturulmuş görseli üzerinden çekirdek etrafında seçilmiş beş bölge gösterilmiştir. Bölgeler sırasıyla; Çekirdek, Bölge 2, Bölge 3, Bölge 4 ve Bölge 5 olarak isimlendirilmiştir.

Bu modelde  $phabs \times vapec)_{ICM}$  terimi ICM'i, tek sıcaklıklı, CIE plazması şeklinde modellemektedir. Modelin ikinci kısmı, dedektörlere düşen Samanyolu Halesi, Yerel Kabarcık (Local Hot Bubble) ve diğer çözülmemiş X-ışın kaynaklarından gelen fotonları modellemektedir. Enstrümantal arka planlar da Breuer et al. (hazırlık aşamasında)'dan alınmış olan çeşitli ampirik enerji değerlerindeki 9 adet  $gaussian_n$  ile modellenmiştir.

Yerel Kabarcık'tan yumuşak X-ışını fotonları beklediğimiz için  $apec_{LHB}$ 'a kT değeri olarak 0.1 keV verilmiştir. Benzer şekilde,  $apec_{MWH}$  için belirlenen sıcaklık değeri 0.7 keV'dir. İkisi için de bolluk değeri 1 (Solar)'da sabitlenmiştir. Çözülmemiş X-ışını kaynakları için, powerlaw içindeki  $\Gamma$  parametresine 1.41 değeri verilmiş ve sabitlenmiştir (Mernier, F. ve diğ. 2015). Soğurulmayı temsil eden phabs modelindeki Hidrojen yoğunluğu parametresi ( $n_H$ ) ICM için  $0.017 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  ve galaksi dışı ortam için  $0.0133 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  de sabitlenmiştir.

Aynı model kullanılarak her bölgeye ait tayf (Şekil 3), ayrı ayrı analiz edilmiştir. İlk olarak, üç dedektöre ait veri XSPEC'e yüklenmiş, pn'e ait olan Constant parametresi 1'e sabitlenirken, MOS1 ve MOS2 için serbest bırakılmıştır. MOS1 ve MOS2'nin  $vapec_{icm}$  parametreleri pn'inkilere bağlanmıştır. Dahası, başlangıçta her bir elemente ait bolluk değerleri Fe parametresine bağlanmıştır. C-statistics kullanılarak, model uyarlama aşamasına geçilmiş, rastgele bir bolluk parametresi serbest bırakılıp model uyarlaması tekrar edilerek devam edilmiştir. Eğer model anlamsız bir şekilde büyük bir belirsizlik değeri veya neredeyse sonsuz küçüklükte bir bolluk değeri verdiyse, o parametre demirinkine bağlanıp modellemeye tekrar devam edilmiştir. Sonuç olarak, her bölgede Kükürt (S), Silisyum (Si) ve Demir (Fe) için anlamlı kT ve bolluk değerleri bulunabilmiştir.



**Şekil 3.** A3112 kümesinin Şekil 2’de seçilen beş bölgesine ait, XSPEC ile oluşturulmuş X-ışın tayfları yukarıda gösterilmiştir. Üst panel: Çekirdek Bölgesi; Orta panel: (sol, sağ) Bölge 2, 3; Alt panel: (sol, sağ) Bölge 4, 5. Siyah, kırmızı ve yeşil renkli çizgiler sırasıyla pn, MOS1 ve MOS2 dedektörlerine ait verileri temsil etmektedir. Üç dedektöre ait bu veriler modellenirken Ş2.2’de açıklanan adımlar uygulanmış ve her bir bölge için X-ışın tayfları modellenmiştir.

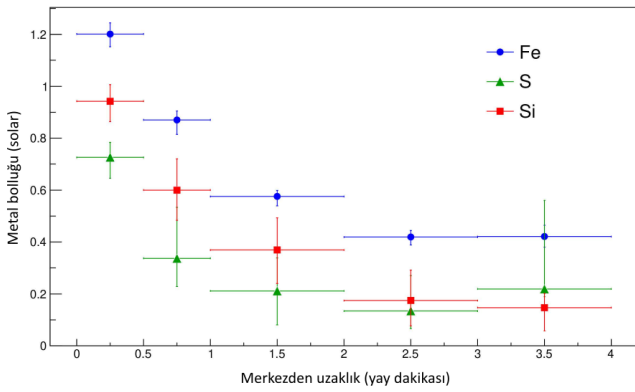
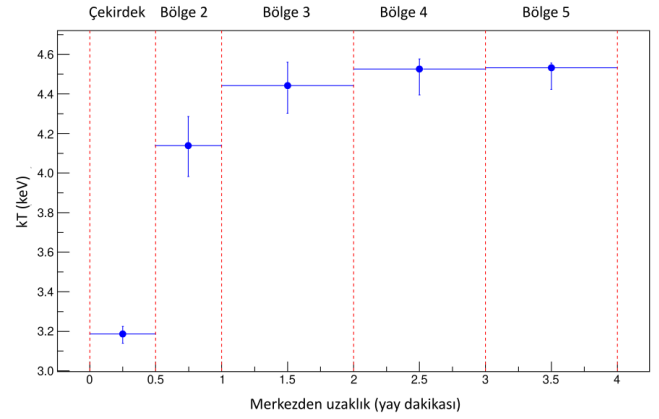
### 3 Tartışma

Çekirdekten uzaklaştıkça azalan metal bolluğu ve yükselen plazma sıcaklığı, A3112’nin soğuk çekirdekli bir küme olduğunu göstermektedir. Şekil 4’e bakarak Alfa (S, Si) ve Demir-tepesi (Fe) elementlerinin uyumlu bir şekilde değişim gösterdikleri de söylenebilir. Bu uyum, sıcak atmosferlerin kümeleşme öncesi

zenginleşip karıştığını ve dolayısıyla küme içi ortam gazında daha düzgün bir metal dağılımı gözlenmesi gerektiğini söyleyen “Erken Zenginleşme Senaryosu”nu desteklemektedir. Daha geç sentezlenmesi beklenen Demir miktarındaki fazlalık da küme içi ortam gazının erken zenginleşmiş olabileceğine dair işaretlerden bir diğeridir.

**Çizelge 1.** A3112 kümesinin Şekil 2'de seçilen beş bölgesine ait, sıcaklık (kT), Kükürt (S), Silisyum (Si) ve Demir (Fe) bolluk değerleri.

	Çekirdek	Bölge 2	Bölge 3	Bölge 4	Bölge 5
kT	3.19 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.04</sub>	4.14 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.16</sub>	4.44 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.14</sub>	4.52 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.13</sub>	4.53 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.11</sub>
Si	0.94 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.08</sub>	0.60 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.12</sub>	0.37 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.13</sub>	0.17 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.10</sub>	0.15 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.09</sub>
S	0.73 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.08</sub>	0.34 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.11</sub>	0.21 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.13</sub>	0.13 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.07</sub>	0.22 <sup>+0.34</sup> <sub>-0.03</sub>
Fe	1.20 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.05</sub>	0.87 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.06</sub>	0.57 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.04</sub>	0.42 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.03</sub>	0.42 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.04</sub>
$\chi^2$ (dof)	2064.79 (1869)	2023.21 (1958)	2444.26 (2274)	1870.80 (1732)	1554.09 (1421)

**Şekil 4.** Çizelge 1'de metal bolluklarının merkezden uzaklaştıkça değişimi seçilen beş bölge için gösterilmiştir.**Şekil 5.** Çizelge 1'de gösterilen sıcaklık (kT) değerlerinin merkezden uzaklaştıkça değişimi seçilen beş bölge için gösterilmiştir.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, A3112 kümesinin X-ışını emisyonu derin *XMM-Newton EPIC* gözlemi 119ks süreli veriyle analiz edilmiştir. *EPIC* veri indirgenmesi, tayfsal analiz ve model uygulaması için en güncel modeller kullanılmış ve §2.1 ve §2.2'de de açıklanan adımlar uygulanmıştır.

Seçilen beş bölge için kimyasal zenginleşme sonucu olarak Şekil 5'de görüldüğü üzere, plazma sıcaklığının çekirdekte daha düşük olduğu (3 keV), 30 yay saniyelik yarıçaptan itibaren 4 keV'ye çıktığı, 60 yay saniye ötesinde 4.5 keV civarında sabitlendiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, metal bolluklarının çekirdekte zirve yaparken eteklere doğru azaldıkları gözlemlenmiştir (Şekil 4). Tüm bölgelere ait sıcaklık ile Silisyum, Kükürt ve Demir değerleri Çizelge 1'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. *EPIC* kamerasından elde edilen veriler ile A3112'nin merkez bölgeleri için hesapladığımız sıcaklık (kT) ve metal bolluk değerleri Takizawa ve diğ. (2003) (*Chandra*), Bulbul ve diğ. (2012) (*XMM-Newton*) ve Ezer ve diğ. (2017) (*Suzaku*) tarafından hesaplanmış değerler ile tutarlıdır.

#### Teşekkür

Bu çalışmada E. Nihal Ercan, mali destek için Boğaziçi Üniversitesi BAP'a (Proje no:13760) teşekkür eder.

#### Kaynaklar

Bulbul G. E., Smith R. K., Foster A., Cottam J., Loewenstein M., Mushotzky R., Shafer R., 2012, *The Astrophysical Journal*, 747, 32  
Ezer C., Bulbul E., Ercan E. N., Smith R. K., Bautz M. W.,

Loewenstein M., McDonald M., Miller E. D., 2017, *The Astrophysical Journal*, 836, 110  
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  
Mernier, F. de Plaa, J. Lovisari, L. Pinto, C. Zhang, Y.-Y. Kaastra, J. S. Werner, N. Simionescu, A. 2015, *A&A*, 575, A37  
Mitchell R. J., Culhane J. L., Davison P. J. N., Ives J. C., 1976, *MNRAS*, 175, 29P  
Takizawa M., Sarazin C. L., Blanton E. L., Taylor G. B., 2003, *The Astrophysical Journal*, 595, 142

#### Access:

M23-0329: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.