

# Galaksi Kümelerinin Kırmızıya Kaymalarının Chandra X-Işın Teleskobu ile Belirlenmesi

Merve AYDIN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye

ORCID: M.A. 0000-0002-8043-6378

## ÖZ

Galaksi kümelerinin X-ışın bölgesinde incelenmesi, evrenin büyük ölçekli yapısını araştırmaya, kozmolojik parametreleri tespit etmeye ve üye galaksiler ile küme içi ortam gazı arasındaki etkileşimi incelemeye izin verir. Bu çalışmada Abell 426 (Perseus), Abell 496, Abell 1991, Abell 2319 ve Abell 754 parlak galaksi kümelerinin kırmızıya kaymalarını ve küme içi gazlarının asimetrisini sunuyoruz. Belirlenen galaksi kümelerinin *Chandra* X-ışın Teleskobu ile alınan verileri analiz edilip yüksek çözünürlüklü tayfları elde edilerek tayflarında süreklilik üzerine binmiş Fe elementine ait baskın salma çizgileri gözlemlendi. Çalıştığımız kümelerin kırmızıya kaymaları, uzaklıkları ve Fe salmasına ait merkezi dalga boyları hataları ile birlikte küme içi ortamdan gelen X-ışın salması modellenerek belirlendi. Ayrıca, küme içindeki asimetrisinin belirlenebilmesi için kümeler belli bölgelere ayrılarak her bölge için belirlenen kırmızıya kaymalar ile radar grafikleri oluşturuldu.

## 1. Giriş

Galaksi kümeleri, evrende kütleçekimsel olarak birbirine bağlı olan en büyük kütleli ve çoğu dinamik olarak dengeye ulaşmış sistemlerdir. Toplam kütleleri  $10^{14-15} M_{\odot}$  dir. Tipik olarak 2-10 Mpc arasında bir çapa sahiptirler. X-ışını ışınım güçleri  $L_x \approx 10^{43-45}$  erg/sn'dir (Sarazin, 1988; 2009). Galaksi kümeleri, barındırdıkları üç temel bileşenden dolayı önemlidirler; kütlece yaklaşık %80 karanlık madde, %15-17 X-ışını yayan küme içi sıcak gaz ve %3-5 oranında da galaksi ve yıldızlardan oluşurlar (Tozzi, 2007; Feretti ve diğ., 2012).

Bu çalışmada Abell 426 (Perseus), Abell 496, Abell 1991, Abell 2319 ve Abell 754 parlak galaksi kümelerinin *Chandra* X-ışın Teleskobu'ndan alınan veriler ile analizi, gerekli yazılımlar ve indirgeme aşamaları, tayflarının elde edilip uygun modeller kullanılarak kırmızıya kaymalarının belirlenmesi, küme içi gazın davranışı ve bulunan sonuçların ilgili önemli parametrelerin bulunmasındaki etkisinden söz edilmektedir.

Submitted/Başvuru: 27.09.2019 Accepted/Kabul: 31.01.2020

Corresponding author/Sorumlu yazar: Merve Aydın, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye. E-mail: merve.aydin8ss@gmail.com

Citation/Atıf: Aydın, M. 2021, in: Galaksi Kümelerinin Kırmızıya Kaymalarının Chandra X-Işın Teleskobu ile Belirlenmesi, eds. S. Ak & S. Bilir, *Galactic Astronomy Workshop Proceedings Book*, 161. <https://doi.org/10.26650/PB/PS01.2021.001.018>

## 2. Kırmızıya Kayma ve X-ışın Tayfı

Hubble yasası (Hubble, 1929) bir galaksinin kırmızıya kaymasının onun uzaklığı ile orantılı olarak nasıl arttığını tanımlar. Kırmızıya kayma, kaynaktan gelen ışığın salınmasından bu yana evrenin ne kadar genişlediğinin bir ölçütüdür. Evren genişlediği için kırmızıya kaymanın zamandan bağımsız olarak sadece Doppler kayması etkisinden kaynaklandığını söylemek hatalı olur (Athay ve Bessey, 1964; Ding ve diğ., 1994; Schmieder ve diğ., 2017). Bir  $t$  zamanında bir galaksiden salınan ışık diğer bir galaksiden evrenin genişleme çarpanı kadar daha uzun bir dalgaboyunda gözlenecektir. Evrenin genişlemesinden kaynaklanan kırmızıya kaymalar bir Doppler kayması değildir ve kozmolojik kırmızıya kaymalar olarak adlandırılır (Soneira, 1979; Pössel, 2017). Galaksi kümesi ne kadar uzaktaysa ışığın bize ulaşma süresi artar, dolayısıyla kırmızıya kayma miktarı da o kadar fazla olur (de Vaucouleurs ve Bollinger, 1979; Sandage, 1986).

Tayfsal X-ışını gözlemleri, kümelerdeki yaygın gazın metal içeriğini araştırmak için önemli bir araçtır. Fe çizgisinin tespitine dayanan bolluk ölçümleri Fe çizgisinin konumunu ve böylece kümenin kırmızıya kaymasını ölçmek için önemli bir yol sağlar (Yu ve diğ., 2011). İlk olarak Mitchell ve diğ. (1976) tarafından X-ışınlarında kümelerden gözlenen en yüksek kırmızıya kayma değeri olan  $z = 1.41$ , 6.7-6.9 keV’da bulunan Fe (Demir) elementinin K-kabuğu çizgi kompleksinden tespit edilmiştir. (Rosati ve diğ., 2004; Stanford ve diğ., 2005). Galaksi kümelerinin X-ışını tayflarında gözlenen süreklilik üzerine binmiş salma çizgisini “Karakteristik X-ışını/Fluoresans Işınımı/İkincil Işınım” temsil eder (Stewart ve diğ., 1984). Chandra X-ışın Teleskobu’nun yüksek ayırma gücüyle özellikle kümelerin hem iç hem de dış bölgelerinde yüksek oranda iyonize olmuş metallerin salma çizgilerini tespit etmesiyle, ICM’nin (Intra-Cluster Medium) kimyasal özelliklerinin araştırılmasında çok etkili olduğu kanıtlanmıştır (Yu ve diğ., 2011).

X-ışın bölgesi, galaksi kümelerini tanımlamak ve sıcak yaygın küme içi ortamını (ICM) incelemek için en uygun gözlem penceresidir. Küme içi ortam gazının sıcaklığı, birkaç keV üzerindeyse, neredeyse tamamı serbest elektronların pozitif iyonlar tarafından saptırılmasıyla üretilen “Isısal Frenleme Işınımı (Thermal Bremsstrahlung)” ile temsil edilir (Gunn ve Got III, 1972; Donahue ve diğ., 2002; Tozzi, 2007; Feretti ve diğ., 2012). Birkaç salma mekanizması önerilmiş olmasına rağmen, kümelerin X-ışını tayfları en çok sıcak gazdan gelen ısısal frenleme mekanizması ile tutarlıdır. Bu yorum kümelerdeki galaksiler arasındaki boşluğun çok sıcak ( $10^{7-8}$  K), düşük yoğunluklu ( $10^{-3}$  atom/cm<sup>3</sup>) ve X-ışınlarının baskın kaynağı olan küme içi ortam gazı ile doldurulmuş olması gerektiğini belirtir (Sarazin ve Bahcall, 1977; Mulchaey, 2000; Seward ve Charles, 2010). Hem X-ışını hem de optik ölçümlerle belirlenen, kümedeki galaksileri ve galaksiler arasını dolduran sıcak gazı bağlayan küme kütle çekimi potansiyeli, büyük bir gizli kütle varlığını gerektirir. Bu kayıp kütle, karanlık maddenin varlığıyla açıklanabilir (Fabian, 1985; Tozzi, 2007; Seward ve Charles, 2010).

## 3. Analiz ve İndirgeme

Analiz edilmek istenen verileri indirmek için halka açık ve ücretsiz olan HEASARC<sup>1</sup> veri arşivinden yararlanıldı. Analizler için Linux (Ubuntu 16.04) işletim sistemine, CIAO<sup>2</sup> (Chandra

1 <https://heasarc.nasa.gov/db-perl/W3Browse/w3browse.pl>

2 <http://xc.c.harvard.edu/ciao/index.html>

Interactive Analysis of Observations), HEASoft<sup>3</sup> (High Energy Astrophysics Software) ve alt paketi olan XSPEC<sup>4</sup> (An X-Ray Spectral Fitting Package) yazılımları kuruldu. Oluşturulan bir görüntüyü grafik kullanıcı ara yüzünde incelemek için bu çalışmada DS9 kodu kullanıldı. Ham veri dosyası, kullanılan dedektörün enerji aralığına göre filtrelendi (bu çalışmada kullanılan *Chandra* X-ışın Teleskobu'nun ACIS dedektörü ile alınan veriler için enerji aralığı 0.3 ila 10.0 keV) ve küme içi sıcak gazdan gelen salma ışınımı içine nokta kaynaktan katkı gelmemesi için nokta kaynaklar belirlenip ham veriden çıkarıldı.

Etkilerden büyük ölçüde arındırılmış nihai bir görüntü elde edildikten sonra verilerden tayf elde etmek için son görüntü DS9 ara yüzü ile açılarak ilgilenilen kaynak bölgesi ve tayflardan arındırmak için bir arka plan bölgesi seçilerek kaydedildi.

Dedektör alanını, kuantum etkinliğini, dedektör çözünürlüğü ve gözlenen sayımların dağılımını içeren hem kaynak hem de arka plan için uygun Yanıt Matris Dosyaları (RMF) ve Yardımcı Yanıt Dosyaları (ARF) oluşturuldu. X-ışın tayflarının analizi ve modellenmesi için XSPEC 12.9.1p yazılımı ile tayf verisinin eksenlerde hangi parametreye göre çizileceğini ve çizimlerin hangi ölçütlere göre gerçekleştirileceği belirtildi (enerji, dalgaboyu, logaritmik ölçek gibi).

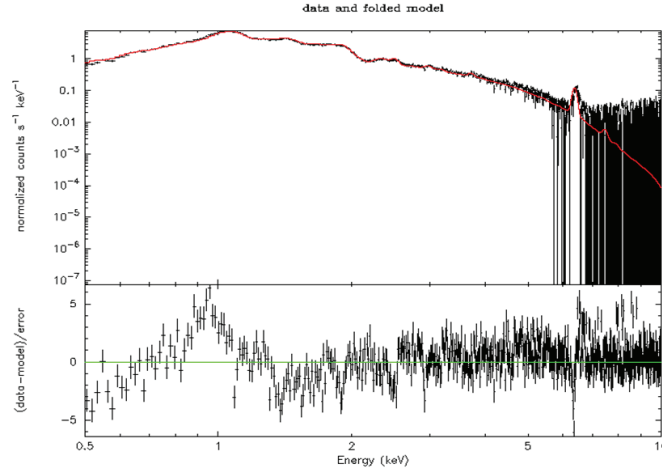
XSPEC paketi içinde çok sıcaklıklı ısısal plazma salma modelleri `mekal` ve `apec` kodları bulunur. Bu modellerden `apec` yüksek çözünürlüklü tayfları, `mekal` ise daha düşük çözünürlüklü olan tayfları iyi temsil etmektedir. Bu modeller ile plazma enerjisi ( $kT$ ), Güneş bolluğu cinsinden ağır element bollukları, kırmızıya kayma ( $z$ ) ve kolon yoğunluğu ( $n_H$ ) parametreleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, kırmızıya kayma değerlerinin belirlenebilmesi için, tayf üzerine `apec` modeli uygulandı. Bu model optik ince, sıcak, yaygın iyonize gazdan gelen *Chandra* X-ışın Teleskobu'nun yüksek çözünürlüklü salma tayflarını iyi temsil ettiği için (Smith ve diğ., 2001) tercih edildi. Belirlenen kümelerin tayflarının modellenmesi için fotoelektrik soğurmanın katkısı da göz önünde bulundurularak `tbabs` modeli de uygulandı. `Tbabs-apec` modelleri uygulandıktan sonra ilgilenilen kümenin kırmızıya kayması hatasıyla birlikte belirlenmiş oldu.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışılan beş parlak galaksi kümesinin tayflarında süreklilik üzerine binmiş 6.4 keV civarındaki Fe elementine ait baskın  $K\alpha_1$  salma çizgisi gözlemlendi (Şekil 1). Fe salma çizgisinin merkezi dalgaboyunu (lineE) belirlemek için ise var olan model üzerine `gaussian` model de eklendi. Kırmızıya kayma değerleri ve Fe çizgisinin merkezi dalgaboyları `tbabs-apec-gaussian` modelleri kullanılarak hatalarıyla birlikte belirlenmiş oldu (Tablo 1).

3 <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/>

4 <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>



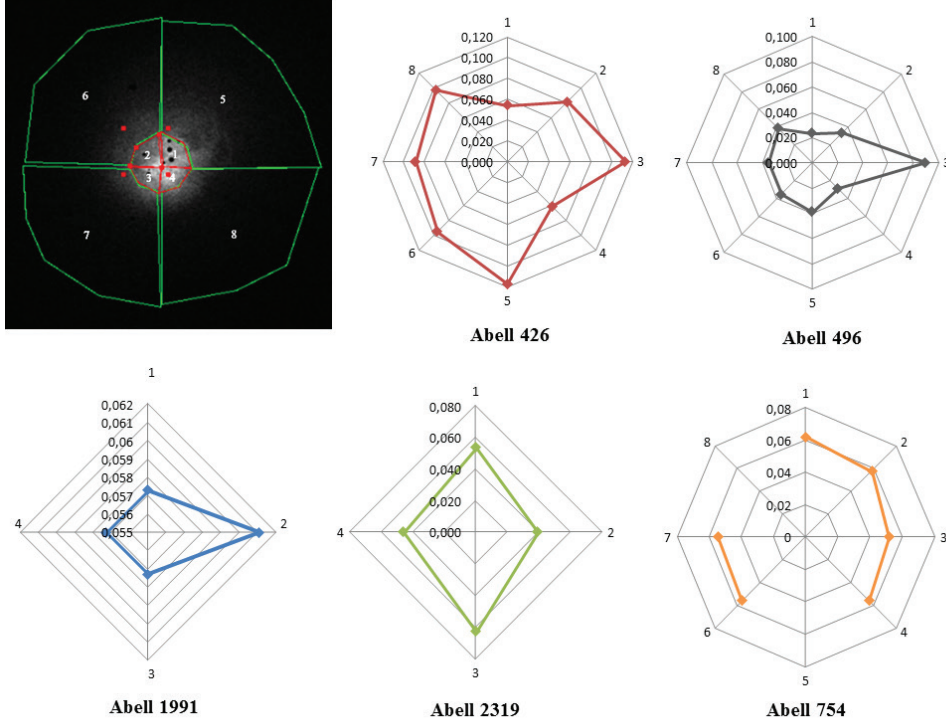
**Şekil 1.** Abell 426 kümesinin tayfında görülen süreklilik üzerine binmiş 6.42645 keV'daki Fe elementinin K-kabuğu salma çizgisi ve tbabs-apec-gaussian modellerin tayf üzerine uygulanması (kırmızı çizgi).

Daha sonra Abell 496 Galaksi Kümesi'nin tüm küme bölgesinden gelen  $z$  değeri kullanılarak Hubble yasası formülünden uzaklığı hesaplandı. *Hubble* Uzay Teleskobu (Hubble Space Telescope, HST) ile elde edilen Hubble sabiti  $H_0 = 72 \pm 8$  km/sn/Mpc (Freedman ve diğ., 2001) ile yapılan hesaplamada Abell 496 kümesinin  $d$  uzaklığı 138 Mpc, Planck verisi ile (Planck işbirliği, 2015) elde edilen  $H_0 = 67.3 \pm 1.2$  km/sn/Mpc ile yapılan hesaplamada ise  $d$  uzaklığı; 148 Mpc bulundu. Bulunan bu değerler  $H_0 = 70$  km/sn/Mpc kullanılarak hesaplanan literatürdeki 148 Mpc'lik (Dale ve diğ., 1999) uzaklıkla oldukça uyumludur. Abell 426 dışındaki diğer kümeler için hesaplanan uzaklık değerlerinin de literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

Küme içindeki sıcak gazın belirli bölümleri bize yaklaşırken diğer bölümleri bizden uzaklaşabilir ya da bazı bölgelerdeki gaz daha hızlı hareket ediyor olabilir. Küme içindeki bu asimetrilerin (varsa) belirlenebilmesi amacıyla her küme yeterli foton gelecek şekilde, kendi içinde yaklaşık eşit bölgelere ayrıldı. Küme içinde bölgelere ayrılmış alanların da tayfsal modelleri uygulanıp kırmızıya kaymaları ve Fe salma çizgisinin merkezi dalga boyları hatalarıyla birlikte hesaplandı. Her bir bölge için hesaplanan kırmızıya kayma değerleri kullanılarak kümeler için radar grafikleri oluşturuldu (Şekil 2). Abell 426 kümesinde iç bölgede daha çok güneybatı, dış bölge de ise daha çok doğu yönüne doğru daha yüksek kırmızıya kaymalar nedeniyle gazın daha hızlı hareket ettiği görüldü. Abell 496 kümesinde iç bölgede güneybatı, Abell 1991 kümesinde ise kuzeybatı bölgelerinde belli bir asimetri gözlemlendi. Abell 2319 kümesinde güneydoğu bölgesinde çok hafif bir asimetri gözlenirken Abell 754 kümesinde ise belli bir asimetri gözlenmedi. Asimetrilerin belirlenip incelenmesi, küme içi gazın termodinamik yapısı, galaksi kümelerinin morfolojileri ve küme sınıflandırılması hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgiler de kümenin evrim aşaması, ICM'deki yapı (kaviterler, şok cepheleri, soğuk cepheler, jetler, türbülans hareketleri gibi) ve gerçekleşen fiziksel süreçlere ışık tutmaktadır.

**Tablo 1.** Abell 426, Abell 496, Abell 1991, Abell 2319 ve Abell 754 galaksi kümelerine ve bu kümelerin farklı bölgelerinin Fe elementine ait  $K\alpha_1$  salma çizgilerinin merkezi dalgaboyları (lineE), kırmızıya kaymaları ( $z$ ) ve hataları.

Abell426		tbabs*apec*gaussian			Abell1991		tbabs*apec*gaussian		
Bölgeler	lineE (keV)	Belirsizlik	$z$	Belirsizlik	Bölgeler	lineE (keV)	Belirsizlik	$z$	Belirsizlik
İç-kuzeydoğu	6.40017	$\pm 0.03801$	0.0540	$\pm 0.0039$	Tüm küme	6.31462	$\pm 0.0173$	0.0561	$\pm 0.0018$
İç-kuzeybatı	6.47024	$\pm 0.04307$	0.0814	$\pm 0.0046$	Kuzeydoğu	6.30802	$\pm 0.0156$	0.0573	$\pm 0.0015$
İç-güneybatı	6.41635	$\pm 0.00869$	0.1135	$\pm 0.0037$	Kuzeybatı	6.30247	$\pm 0.2593$	0.0611	$\pm 0.0035$
İç-güneydoğu	6.44992	$\pm 0.04488$	0.0609	$\pm 0.0029$	Güneydoğu	6.30531	$\pm 0.0156$	0.0573	$\pm 0.0015$
Dış-kuzeydoğu	6.42987	$\pm 0.01122$	0.1172	$\pm 0.0135$	Güneybatı	6.30531	$\pm 0.0156$	0.0573	$\pm 0.0015$
Dış-kuzeybatı	6.44877	$\pm 0.01156$	0.0953	$\pm 0.0083$	<b>Abell2319</b>				
Dış-güneybatı	6.49172	$\pm 0.02789$	0.0887	$\pm 0.0162$	Kuzeydoğu	6.398960	$\pm 0.528300$	0.053880	$\pm 0.004861$
Dış-güneydoğu	6.47995	$\pm 0.09292$	0.0972	$\pm 0.0153$	Kuzeybatı	6.445290	$\pm 0.178950$	0.039160	$\pm 0.002134$
<b>Abell496</b>					Güneydoğu	6.589970	$\pm 0.058765$	0.063010	$\pm 0.003686$
Tüm küme	6.4604	$\pm 0.0420$	0.0333	$\pm 0.0027$	Güneybatı	6.545910	$\pm 0.042689$	0.045750	$\pm 0.002356$
İç-kuzeydoğu	6.4767	$\pm 0.0219$	0.0235	$\pm 0.0019$	<b>Abell754</b>				
İç-kuzeybatı	6.4534	$\pm 0.0147$	0.0336	$\pm 0.0028$	İç-kuzeydoğu	6.27079	$\pm 0.0569$	0.06219	$\pm 0.00437$
İç-güneybatı	6.4827	$\pm 0.0126$	0.0900	$\pm 0.0075$	İç-kuzeybatı	6.30682	$\pm 0.0979$	0.05779	$\pm 0.00507$
İç-güneydoğu	6.4056	$\pm 0.0126$	0.0289	$\pm 0.0039$	İç-güneybatı	6.32714	$\pm 0.0177$	0.05162	$\pm 0.00245$
Dış-kuzeydoğu	6.4571	$\pm 0.0381$	0.0388	$\pm 0.0022$	İç-güneydoğu	6.31994	$\pm 0.02521$	0.05532	$\pm 0.00231$
Dış-kuzeybatı	6.4675	$\pm 0.0367$	0.0354	$\pm 0.0013$	Dış-kuzeydoğu	Yeterli sayıda foton almadığı için hesaplanamadı.			
Dış-güneybatı	6.4600	$\pm 0.0767$	0.0352	$\pm 0.0012$	Dış-kuzeybatı	6.28946	$\pm 0.2984$	0.0559	$\pm 0.00403$
Dış-güneydoğu	6.4291	$\pm 0.0253$	0.0388	$\pm 0.0020$	Dış-güneybatı	6.32579	$\pm 0.0247$	0.0544	$\pm 0.00585$
					Dış-güneydoğu	Yeterli sayıda foton almadığı için hesaplanamadı.			



**Şekil 2.** Galaksi kümeleri içinde ayrılan bölgelerin örnek gösterimi ve her küme için asimetrikliklerin anlaşılması için oluşturulan radar grafikleri.

**Teşekkür:** Çalışmamı yönlendiren Prof. Dr. Sacit Özdemir'e, her aşamada bilgisini ve önerilerini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Tolgahan Kılıçoğlu'na ve bildirim bu duruma gelmesi için verdiği emeklerden dolayı her daim yanımda olan Muhammed Ali Üzümcü'ye en derin teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynaklar

- Athay, R.G., Bessey, R.J., 1964, ApJ, 140, 1174  
Dale, D.A., Giovanelli, R., Haynes, M.P., Campusano, L.E., Hardy, E., 1999, AJ, 118, 1489  
de Vaucouleurs, G., Bollinger, G., 1979, ApJ, 233, 433  
Ding, M.D., Fang, C., Okamoto, T., 1994, SoPh, 149, 143  
Donahue, M., Scharf, C.A., Mack, J., Lee, Y.P., Postman, M., Rosati, P., Dickinson, M., Voit, G.M., Stocke, J.T., 2002, ApJ, 569, 689  
Fabian, A.C., 1985, SSRv, 40, 653  
Feretti, L., Giovannini, G., Govoni, F., Murgia, M., 2012, A&A, 20, 54  
Freedman, W.L., 2001, ASP Conference Series Vol. 245. Astronomical Society of the Pacific, 542.  
Gunn, J.E., Gott III, J.R., 1972, ApJ, 176, 1  
Hubble, E., 1929, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Volume 15, Issue 3, 168  
Mitchell, R.J., 1976, Ph.D. thesis, University of London, 158 pages  
Mulchaey, J.S., 2000, ARA&A, 38, 289  
Planck işbirliği, Ade, P.A.R., Aghanim, N., Arnaud, M. ve diğ., 2015, A&A, 580, 22  
Pössel, M., 2017, The expanding universe: an introduction. eprint arXiv:1712.10315.  
Rosati, P., Tozzi, P., Ettori, S. ve diğ., 2004, AJ, 127, 230  
Sandage, A., 1986, ApJ, 307, 1  
Sarazin, C.L., Bahcall, J.N., 1977, ApJS, 34, 451  
Sarazin, C.L., 1988, Cambridge Astrophysics Series, Cambridge Uni. Press.  
Sarazin, C.L., 2009, X-Ray Emission from Clusters of Galaxies, by Craig L. Sarazin, Cambridge, UK: Cambridge University Press.  
Schmieder, B., Mein, P., Mein, N., Levens, P.J., Labrosse, N., Ofman, L., 2017, A&A, 597, id.A109, 9  
Seward, F.D., Charles, P.A., 2010, Exploring the X-ray Universe. Cambridge University Press, ISBN: 9780521884839.  
Smith, R.K., Brickhouse, N.S., Liedahl, D.A., Raymond, J.C., 2001, ApJ, 556, L91  
Soneira, R.M., 1979, ApJ, 230, L63  
Stanford, S.A., Eisenhardt, P.R., Brodwin, M. ve diğ., 2005, ApJ, 634, L129  
Stewart, G.C., Cañizares, C.R., Fabian, A.C., Nulsen, P.E.J., 1984, ApJ, 278, 536  
Tozzi, P., 2007, Memorie della Società Astronomica Italiana, 78, 729  
Yu, H., Tozzi, P., Borgani, S., Rosati, P., Zhu, Z.-H., 2011, A&A, 529, id.A65, 13