TÜBİTAK

Karanlık Maddenin Aydınlık Yüzü: X-Işın Salınım Çizgilerinde Karanlık-Madde İzlerinin Araştırılması

Program Kodu: 1001

Proje No: 115F030

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Murat HÜDAVERDİ

Araştırmacı(lar):
Prof. Dr. Şölen BALMAN
Doç. Dr. Tolga GÜVER

Bursiyer(ler):
Turgay ÇAĞLAR
Duygu DURMUŞ
Ndiogou Niang

EYLÜL 2017
İSTANBUL

Önsöz

"*Karanlık Maddenin Aydınlık Yüzü: X-Işın Salınım Çizgilerinde Karanlık-Madde İzlerinin Araştırılması*" başlıklı **115F030** nolu projemiz, bir önceki 113F117 nolu projemiz neticesinde oluşmuştur. Galaksi kümelerindeki karanlık madde oransal miktarının çalışıldığı projenin devamı sırası ilk olarak galaksi kümelerinden 3.5 keV civarlarında bilinmez bir sinyal alınmıştır. Diğer gök cisimlerinde de (Andromeda, Samanyolu, Cüce spiral galaksiler, Kozmik arka alan gibi) bu gizemli çizgi salınımı çalışılmış; kimi araştırmacılar ışımanın güvenilir bir şekilde olduğunu, kimileri de kesinlikle olamayacağını göstermiştir. Biz de bu proje çalışmamızda, yakın uzayımızda yer alan ve iyi karanlık madde rezervuarları sayılan eliptik galaksilerde 3.5 keV ışımasının izlerini aradık.

Yine bu süre içerisinde Japonya araştırmacılarla Astro-H uydusu verileri kullanılarak yapılacak olan ikili işbirliği programına başvuruldu, ancak uydunun Şubat 2016'da talihsiz bir şekilde kontrol dışına çıkmasına paralel olarak projemiz de reddedildi. Japon araştırmacılarla oluşturulan ikili iletişimlerimiz hala devam etmekte ve genç araştırmacılarımızın Japonya'ya yüksek lisans ve doktora programlarına gitmeleri için çalışmalarımız devam etmektedir. Ayrıca proje yürütücüsü Yrd.Doç.Dr. Murat HÜDAVERDİ 115F030 projesi vesilesiyle, COST Action CA15117 kodlu "*Cosmology and Astrophysics Network for Theoretical Advances and Training Actions (CANTATA)*" başlıklı COST aksiyonu yönetim komitesine dahil olmuştur.

Ulusal bilimsel araştırmaların en büyük ve öncü destekçisi TÜBİTAK temel bilimlere verdiği destek ile kritik araştırma konularında genç araştırmacıların yetişmesine imken sunmakta, teknolojik olarak gelişme ve kalkınmamıza imkan sunmaktadır. 115F030 nolu projemize inanarak desteğini esirgemeyen TÜBİTAK'a proje ekibimiz olarak teşekkürü bir borç biliriz.

TÜBİTAK

İçindekiler

Önsöz ii

1 GİRİŞ 1

2 KOZMOLOJİDE KARANLIK MADDE 2

2.1 Giriş 2

2.2 Kozmolojik Sınırlamalar 2

2.3 Karanlık Madde Gözlemsel Kanıtları 5

2. 3. 1 Spiral Galaksilerin Dönme Eğrileri 5

2. 3. 2 Galaksi Kümelerinde Karanlık Madde 6

2. 3. 3 Çekimsel Lens 8

2. 3. 4 Lyman Alfa Ormanı 8

2.4 X-Ray Gözlemleri 9

2. 4. 1 X-ray Sinyalleri 10

2. 4. 2 3.5 keV Işınımı 11

2. 4. 3 Belirsiz Diğer Çizgi Salınımları 13

3 ELİPTİK GALAKSİLERİN SEÇİMİ ve ANALİZLER 15

3.1 Giriş 15

3.2 Nokta Kaynakların Tespiti 15

3.3 Nokta Kaynakların Küresel Kümelerle İlişkileri 22

4 PLAZMA TAYF ANALİZLERİ 25

4.1 Giriş 25

4.2 Yöntem ve Analiz 25

4. 2. 1 Yöntem Doğrulama: Arka Alan Testi 26

4. 2. 2 Tayfsal Modelleme 29

4. 2. 3 NGC 4472 34

4. 2. 4 NGC 4450 35

5 SONUÇ ve TARTIŞMA 36

5.1 Bulgular 36

5.2 NGC4472 Eliptik Galaksisi 3.5 keV ışıması 36

5.3 Eliptik Galaksilerde Kütle ve Karışım Açısı ($\sin^2(2\theta)$ vs m_s) 38

TÜBİTAK

Şekiller

Şekil 1: Kozmik genişleme ve tanecik hızları neticesi yapısal oluşum gösterimi.....3
Şekil 2: NGC 6503 spiral galaksisine ait dönme eğrisi (G. Jungman 1996).....6
Şekil 3: Uzak Quazar'dan gelen fotonların farklı uzaklıklardaki gaz bulutlarında soğurulması 8
Şekil 4: Yakın ve uzak kuazar için tayfta gözlemlenen Lyman Alfa ormanı.....9
Şekil 5: Steril nötrino külesi ve karışım açısı sınırlaması var olan durum.....10
Şekil 6: 3.5 keV çizgi eklenmeden ve eklendikten sonra tayfsal modellemede ki iyileşme görülüyor. (Cappelluti vd. 2107).....12
Şekil 7: Perseus kümesi 3.5 keV çizgi ışıması.....13
Şekil 8: Wilman-I galaksisi 2.5 keV X-ray çizgisi (sol), ve ışımanın güvenilirsizliği (sağ).....14
Şekil 9. Kaynak tespitinde kullanılan Meksika şapkası metodu gösterimi.....18
Şekil 10: Eliptik galaksilerin tayf seçim alanları ve nokta kaynakların yerleri.....19
Şekil 11: Her bir galaksiye ait nokta kaynaklardan birinin tbabs*tbabs*pow modeliyle fit edilmiş örnek spektrumları.....20
Şekil 12: NGC3379, NGC4472, NGC4552 ve NGC4649 Renk diyagramları.....22
Şekil 13: NGC 4452 Galaksisindeki X-ışın kaynaklarıyla eşleşen küresel kümelerin X-ışın kaynaklarından olan uzaklığı gösterilmektedir. (b) NGC 4552 metalce zengin ve metalce fakir ayrımı gösterilmiştir. (c) NGC 4552 metal bolluğu dağılımı gösterilmiştir.....23
Şekil 14**:** 3-4 keV arasındaki element çizgi salınımları ve 3.5 keV ışımasının bütündeki yeri 25
Şekil 15**:** MOS1 epicspeccombine yöntemi 3-4 keV enerji aralığı tayfı.....28
Şekil 16**:** M87, NGC4472, NGC4278, NGC5044 görüntüleri.....31
Şekil 17: Tayf modellemeleri (M87, NGC4472, NGC4278, NGC5044). Sürekli ışınım modeline, gauss çizgisel salınım modeli eklenerek fit gerçekleştirildi.....32
Şekil 18**:** Elipik galaksilerde 3-4 keV arası, veri ile uygulanan modellemeler arası sapmalar. Kırmızı sütün 3.5 keV bölgesini göstermektedir.....34
Şekil 19**:** NGC4472 galaksisi 3-4 keV arası tayfsal modellemesi ve eklenen gauss çizgisel salınım modelleri. 3.55 keV eklenmeden önce ve eklendikten sonra belirtilmiştir.....35
Şekil 20**:** NG4450 veri setlerine ait, 3-4 keV aralığındaki birleştirilmiş spektrum.....35
Şekil 21: NGC4472 tayf analizi ve 3.5 keV çizgisinin eklenmesi ile modelin iyileşmesi.....36
Şekil 22: ROSAT verileri, NGC4472 gaz kütlesi ve karanlık madde kütlesi profili.....37
Şekil 23: Kütle ve karışım açısı var olan sınırlamalar. Bu çalışmada hesaplanan NGC4472 değeri yıldız ile belirtilmiştir. Yeşil alan bu çalışmada tanımlanan sınırlamayı göstermektedir.....38

Tablolar

Tablo 1: Kritik yarıçapları gaz kütlesi, toplam kütle ve kütle oranları (fgas).....7
Tablo 2: X-ray çalışmaların bir özeti.....13
Tablo 3**:** XMM-Newton eliptik galaksi arşiv listesi.....15
Tablo 4: Chandra eliptik galaksi arşiv listesi.....16
Tablo 5: Eliptik galaksi nokta kaynak sayıları.....17
Tablo 6: Galaksilerin R-B parlaklık değerleri.....24
Tablo 7**:** Boyarsky 2014'de kullanılan Andromeda gözlem verileri listesi.....26
Tablo 8: Farklı analiz yöntemlerinden elde edilen ~3.50 keV'lik ışıma çizgileri.....29
Tablo 9**:** Analizlerde kullanılan 4 eliptik galaksi arşiv verileri.....30
Tablo 10**:** Bilinen ışıma çizgileri ve aletsel floresan ışınımları.....32
Tablo 11**:** Her bir kaynak için eklenen çizgisel salınım modelleri ve chi-kare değerleri.....33

BOŞ SAYFA

Özet

Günümüz astrofiziği, evrendeki malzemenin büyük bir kısmının Karanlık Madde denilen, yapısı ve bileşeni hakkında çok sınırlı bilgiye sahip olduğumuz gizemli bir formda olduğuna işaret etmektedir. (i) Kozmik arka alan ışıması dalgalanmaları, (ii) galaksi dönme eğrileri, (iii) çekimsel lens ve (iv) galaksi kümeleri X-ray çalışmaları karanlık maddeye dair birbirini destekleyici ve tamamlayıcı kanıtlar sunmaktadır. Karanlık madde bolluğunun yaklaşık %23 olması gibi miktarı ile ilgili bazı veriler, galaksi merkezleri gibi evrende maddenin yoğun olduğu alanlarda haleler şeklinde yığıştığını bilmemiz dışında; muhteviyatı ve esasını teşkil eden parçacıklar bilinmezliğini korumaktadır.

Son zamanlarda birçok gök cismi tayfı E~3.5 keV enerjisinde, fiziksel kaynağı bilinmeyen bir çizgi salınımı tespit edildi. Bu kayaklardan öne çıkanlar; 73 farklı galaksi kümesinden aldığı istiflenmiş 17 günlük poz süresine denk Chandra X-ray verisi, Perseus galaksi kümesi, Andromeda, yakın cüce spiral galaksileri, kozmik arka alan ışıması, samanyolu galaksimiz sıralanabilir. Yapılan X-ray tayf analizlerinde 3.5 keV civarında çok zayıf da olsa tanımsız bir ışınım gözlemlendi. Bu salınımın, bozunan karanlık madde parçacıklarından kaynaklandığı öne sürüldü. Sonuçlar, hem astrofizik ve hem de parçacık fiziği camiasından büyük ilgi gördü. Tespit edilen çizgi ışıması çok zayıf olduğundan, bu gizemli sinyalin kaynağı üzerine uzun bir tartışma başladı. Bunlardan en kabul göreni, 7.1 keV kütleye sahip “steril nötrino”nun radyoaktif bozunumu sonucu monokromatik 3.5 keV ışıması üretmesi ve bu salınan fotonların X-ışını enerji aralıklarında gözlemleniyor olmasıdır.

Biz de 115F030 projemizde, astrofizik dünyası için çok sıcak bir başlık, modern fizik camiasında da ses getirecek kadar yaygın bir etkiye sahip olan bir araştırma konusunda, x-ray salınım çizgilerinde karanlık maddenin aydınlık yüzünü araştırdık. Böyle bir çalışma için en uygun uzay alanı elbette ki karanlık maddenin yoğun olarak bulunduğu galaksi kümeleri ve galaksi haleleri olacaktı. Ancak belirtilen bu kaynaklar üzerine arşivde kafi miktarda çalışma bulunmaktadır. Biz de projemizde, yakın uzayımızda yer alan bir diğer karanlık madde rezervuarı eliptik galaksilere odaklandık.

Bu rapor, yakın eliptik galaksilerden elde edilen analiz sonuçlarını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Eliptik galaksiler, Galaksi, karanlık-madde, X-ray, Steril Nötrino

Abstract

Today's astrophysics community is sure that majority of the Universe is in mysterious, unknown dark form and thus so called "dark matter". After the measurement of the orbital velocities of galaxies within clusters, many other evidences point to the existence of a form of matter, which is not coupled to the electromagnetic or to the strong interactions. Among these it is possible to list: (i) the accurate measurements of the cosmic microwave background (CMBR); (ii) the galaxies rotation velocities; (iii) the gravitational lensing; (iv) the abundances of light elements; and the large-scale structures. Although based on the observations we can numerically estimate the fraction of DM to the whole universe, and it is location at dense regions of the universe, our knowledge about DM ingredient itself is very limited.

An increasing number of researchers report a new lien emission at E~3.5 keV without any known emission origin. Leading results are coming from 17 days of worth data from 73 different clusters, Perseus clusters, Andromeda, dwarf spheroidal galaxies, cosmic microwave background and the Milky way. They detected a very weak unidentified emission line at 3.5 keV. The line has neither known astrophysical origin nor an artifact. Among the various plausible dark matter candidates, one that has motivated our present work is the hypothetical sterile neutrino that is included in some extensions to the standard model of particle physics.

With 115F030 project, we are planning to study X-ray emission lines from elliptical galaxies, which are nearby objects and good dark matter reservoirs. The project has a great potential to find possible answers to explain building stones of dark matter. The results would have a great impact on not only high-energy astrophysicists but also among the particle physicists. We name our project "the bright side of the dark matter" for the sake of its potential impact. The best feasible objects would be clusters of galaxies and galaxy halos, where the matter is DM dominated. However the teams are studied in very detail and nothing is much left to do with the cluster analysis. The best sources for our analysis are nearby elliptical galaxies. They are not extend x-ray emission dominated sources, therefore are not contaminated like clusters, which make spectral analysis much easier.

This document is a report on the analysis results of the elliptical galaxies.

Key Words: Elliptical galaxies, galaxy, dark matter, X-ray, steril neutrino

1 GİRİŞ

Bu proje çalışmasında, steril nötrino karanlık maddenin, bozunum yaparak X-ray dalga boyunda yaydığı düşünülen 3.5 keV ışıma çizgisini eliptik galaksilerin uzun poz süreli arşiv verilerinde yakalamaya çalıştık. Bu kaynağı belirsiz gizemli salınım çizgisinin izini sürmedeki hedeflerimiz;

(1) Tespit edilmesi durumunda Steril nötrino karanlık maddenin ($E_\gamma = M_{KM}/2$ bağlantısı ile) kütlesi ve karışım açısını hesaplayabilmek, diğer sonuçlarla olan uyumları test etmek.
(2) Foton sayımlarını yeterli olmasına rağmen, 3.5 keV ışımasının tespit edilmemesi durumunda galaksi verileri yardımıyla karanlık madde kütlesine (kütle M_{KM} ve karışma açısı $sin^2(2\theta)$ bağıntısı kanalıyla) kısıtlamalar getirmek
(3) Salınım çizgisinin var olduğunu ve olmadığı gösteren farklı çalışların metodolojilerini irdelemek, benzer ve ayrışan aşamaların getirebileceği kısıtlamaları tanımlayabilmek.
(4) Yerel grupta yer alan galaksilerin X-ray veri analizleri ile morfolojilerini anlamak ve tanımlamak olmuştur.

Projemizden elde edilen çıktıları özetleyecek olursak;
Kısım-2, kozmolojide karanlık madde ve 3.5 çizgi salınımı keynağı hakkında bir değerlendirmenin yapıldığı bölüm olmuştur. Bu kısımda yazılanlar özet makalesi olarak Turkish Journal of Physics dergisine gönderilmiştir. Kısım çıktıları ayrıca, 6-7 Mayıs 2017'de YTÜ'de düzenlenen Yüksek Enerji Fiziği Çalıştayı - YEFİST[1] 'de sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Steril nötrino karanlık madde konusu, (YTÜ-lisans) bursiyer araştırmacılarımızdan Ndiogou Niang tarafından bitirme tezi olarak çalışılmış ve sunulmuştur. Niang YTÜ fizik bölümünü 3.96 ortalama ile birinci olarak bitirmiş, ve Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü yüksek lisans programına eğitimine devam etmektedir.

Kısım-3, eliptik galaksilerin temizlenmesi, filtrelenmesi, nokta kaynakların tespiti ve morfoloji çalışmalarını içermektedir. Araştırmanın bu bölümü, büyük ölçüde İstanbul Üniversitesi'nde bursiyer araştırmacımız Duygu Durmuş Y.L. Tez çalışması olarak gerçekleştirildi. Analiz çıktıları; "XMM-Newton: The next decade 2016 - Madrid" konferansında poster bildiri olarak sunuldu. Öğrencimizin Haziran 2018'e bitmesi planlanan tez çalışmaları devam etmektedir.

1 http://www.yefist.org/pdfyayin/Ozet2017.pdf

Kısım-4, eliptik galaksilerde tayf analiz yönteminin anlatıldığı kısımdır. Yöntem doğrulaması, arka alan modellemesi ve çizgi salınım modellemeleri detaylı olarak anlatılmıştır. **Kısım 4.2.1,** yöntem doğrulaması bursiyer araştırmacımız Hakan SERT (YTÜ) tarafından detaylı olarak çalışılmış ve sonuçlar "2nd Cosmology Summer School 2015" Polonya'da sunulmuştur. Öğrencimiz, H. Sert Hollanda Enerji Arastırma Merkezi (ECN) araştırmacı öğrenci olarak yer aldı. Ardından numerik analizler üzerine araştırma yapmak üzere Belçika Von Karman Enstitüsü'nde gitti ve halen orada yer almaktadır. **Kısım 4.2.2 ve 4.2.3**, eliptik galaksilerde 3.5 keV ışıması ve NGC4472 durumu, "Türk Fizik Derneği 33. Uluslararası Fizik Kongresi'nde (6-10 Eylül 2017 / Bodrum) sözlü bildiri olarak sunuldu.

Projemizin son toplantısı 23 Eylül 2017'de Projenin yürütüldüğü kurum olan YTÜ-TTO toplantı odasında Proje araştırmacı, bursiyerleri ve misafir katılımcılar ile gerçekleştirildi. Toplantıya ayrıca steril nötrino karanlık madde alanında yüksek enerji fizikçisi **Dr. Man Ho CHAN'**da (Honk Kong Univ) katılım gösterdi. **Kısım 5**, karanlık madde karışım açışı ve kütlesi hesaplamaları büyük ölçüde bu toplantıda tartışıldı ve şekillendi. Kısım 5 çıktıları hakemli uluslararası dergide yayınlamak üzere derlenmeye başlanmıştır.

Ayrıca projemiz çıktılarından 2 poster ve 1 sözlü bildiri İstanbul'da düzenlenmesi planlanan ancak 2 hafta kala iptal edilen 41th COSPAR 2016'da sunulmak üzere kabul edilmişti. Proje bursiyer araştırmacıların tez çalışmaları ve makale yazım aşamaları halen devam etmektedir.

2 KOZMOLOJİDE KARANLIK MADDE

2.1 Giriş

1937'de, Fritz Zwicky Coma kümesi için galaksilerin hız dağılımını, yarıçapın bir fonksiyonu olarak inceledi. Çalışmasında galaksilerin hızlarında bir tuhaflık sezinledi. Galaksiler, yaklaşık 1000 km/saniye gibi çok büyük hızla ilerliyorlardı, öyle ki savrulup dağılmaları bekleniyordu. Hesaplanan kütle, Coma sistemini çekimsel olarak bir arada tutacak yeterli potansiyele sahip değildi. Zwicky görünmeyen bir malzemenin yapıyı bir arada tuttuğunu düşünerek; ışıma yapmayan, bir tür **karanlık madde**nin varlığını öneren ilk astronom oldu. O yıllarda bilim dünyası için karanlık madde kavram ve tanımı gereken önemi görmedi ve fazla ilgi çekmedi.

Yaklaşık 30 yıl sonra Vera Rubin (1970), Andromeda galaksisi çalışmalarında dış yıldızların daha yakın yıldızlarla aynı hızda hareket ettiğini keşfetti. Bu durum, evrensel çekim kanunlarına ters ve uyumsuzdu. Devam eden çalışmalar, Andromeda'nın da içinde bulunduğu diğer 60 galaksinin de, bilinen fizik kurallarını ihlal ettiğini gösterdi. Ya karanlık bir işler dönüyordu, ya da bildiğimiz çekimsel kanunlar doğru değildi. Bir grup araştırmacı, yepyeni gizemli bir maddeyi tanımlamak yerine, evrensel çekim yasasında küçük ayarlamalar yaptılar. Önerilen Modifiye Newton Dinamiği (MOND) teorisine göre ivme hesaplarında, var olan gözlemleri açıklayabilecek küçük değişiklikler yapıldı (Dodelson ve Widrow, 2006). Ancak MOND teorisi küçük ölçüde kısmen başarılı olsa da, karanlık madde olmadan farklı kozmolojik ölçeklerde başarılı olamadı.

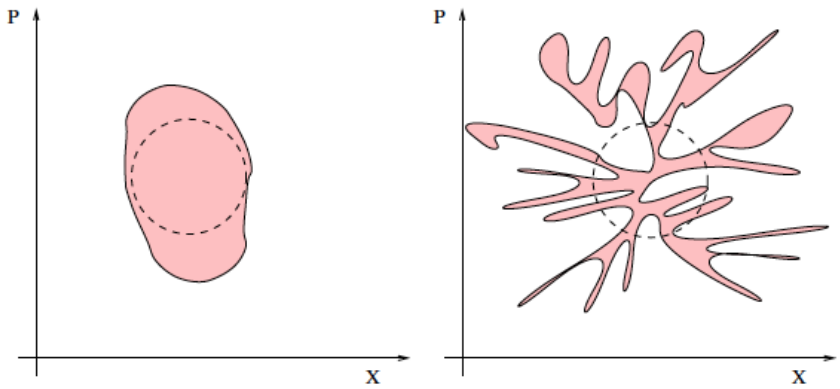
2.2 Kozmolojik Sınırlamalar

Karanlık maddenin parçacıklarla açıklanması çabası standart modelin sınırlarını zorlayan alandır. Karanlık madde için ilk önerilen uygun adaylardan biri devasa astrofizik kompakt hale nesneler, yani kısaca (massive astrophysical compact halo objects) "MACHO"lardır. Griest (1991) ve Yoo vd. (2004) gibi ekiplerin yaptığı çalışmalar çekimsel lens mekanizmaları ile bu MACHO'ların gözlemlenebildiğini iddia etti. Bu cisimler, kara delikli, nötron yıldızları veya kahverengi cücelerdir ve madde ağır elementlerin yığın parçaları halinde bulunur. Bununla birlikte, şimdi, MACHO'nun yeterli miktarda karanlık maddenin yığılmasını mümkün kılmadığını ve açıklamadaki yetersizliğini biliyoruz (Primack vd. 1988). Aslında, elektro zayıf ölçeğinin üstünde, (Weakly Interacting Massive Particles) WIMPs adlı ağır parçacıklar, çok başarılı bir karanlık madde adaylarıdır (Gunn ve Gott 1972). WIMP'ler, soğuk (CDM), ılık (WDM) ve (HDM) sıcak karanlık madde olmak üzere üç alt gruba ayrılmıştır. Burada tanımlar, taneciğin sıcaklığından ziyade hareketliliğine atıfta bulunmaktadır. Parçacığın hızı,

birim zamanda alabileceği yola karar verir. Taneciğin bireysel hızı ve kozmik genişleme hızı oranları evrende yapısal oluşumun kurallarını belirler. Bir taneciğin, kozmik genişleme tarafından yavaşlatılmadan önce, ilerleyebildiği mesafe serbest akış mesafesi (free streaming length) FSL olarak tanımlanır. Kozmozun şimdiki resmini izah edecek farklı taneciklerin olası hızları, teorik ve deneysel olarak halen test edilmektedir. Çeşitli karanlık madde parçacık önerileri vardır, ancak hangisinin daha doğru, daha tercih edilebilir olduğunu gösteren açık bir kanıt mevcut değildir. WIMP'ler üzerine bir çok araştırma devam etmekle beraber, WIMP'ler için kesin bir kanıt henüz rapor edilmemiştir.

WIMP taneciklerini soğuk (yavaş) karanlık madde (CDM) ve çarpışmaz olarak kabul edersek, FSL galaksi ölçeğinden çok daha küçük olacaktır. Böyle bir senaryoda, parçacıklar o kadar yavaş hareket eder ki, cüce galaksiler gibi küçük ölçekli yapılar taneciklerin hareketleriyle eritilemediği için, günümüz evreninde çok fazla sayıda cüce galaksi gözlenmesi beklenir. Bu nedenle, CDM, daha küçük nesnelerin ilk önce oluştuğunu ve daha sonra, çekimsel birleşmelerle büyük yapılara dönüştüklerini öngörmektedir (ör. Peebles 1980, Zel'dovich 1970). CDM kozmolojisi çözülememiş bazı sorunlar içermektedir. Gelişmiş simülasyonlar, tamamen CDM senaryoları ile küçük ölçeklerdeki gözlemler (~10 kpc) arasında bazı uyuşmazlıklar ortaya koymaktadır (Ostriker vd.1974). CDM parçacıkları çok yavaş olduğu ve küçük oluşumları eritemediği için cüce galaksilerin sayısının bu kozmolojide çok yüksek olması beklenir. Bu durum astronomide "kayıp galaksi" problemi olarak adlandırılır (Springel vd 2005).

Benzer bir problem galaksilerin yoğunluk profillerinde de ortaya çıkar. Simülasyonlar, $r \leq 10$ kpc'de dik, sivri bir profil tahmin eder (Klypin vd 1999). Pek kabul görmese de, Süpernova ve AGN geri beslemesi gibi çeşitli fiziksel çözümler önerilmiştir (Navarro vd 1997, Weinberg 2002). Galaksilerin sadece küçük oranda bir bileşeni olması nedeniyle, bu türden Baryonik madde içerikli çözümler şüpheli bulunmuştur.



Şekil 1: Kozmik genişleme ve tanecik hızları neticesi yapısal oluşum gösterimi.

Büyük hız dağılımına sahip Karanlık Madde parçalarına sıcak karanlık madde (HDM) adı verilir. Bu kozmolojide parçacıklar daha uzun mesafeler kat ederler ve FSL'leri bir galaksi ölçeğinden daha büyük olur. HDM parçacıkları çok enerjik ve hızlıdır, dolayısıyla galaksi ölçeğindeki tüm kozmik dalgalanmaların soğurulması beklenmektedir (Şekil 1). Bu kozmolojide proto-galaksiler gibi küçük ölçekli yapıların varlığı açıklanamaz. HDM senaryosu, kümeler gibi daha büyük yapıların oluştuktan sonra daha küçük gökadalara dönüştüğünü ileri sürer (Macc'io vd 2012).

Parçacıkların hızı, gözlemlenen evreni daha iyi açıklanabilmesi için ne CDM tanecikleri kadar soğuk ve yavaş ne de HDM tanecikleri kadar sıcak ve hızlı olmayacak şekilde ayarlayacak olursak, ortaya ılık diyebileceğimiz parçacıklar çıkar. Bu parçacıklara ılık karanlık madde (WDM) adı verilir ve tanecikler galaksi ölçeğinde bir FSL'ye sahiptir (Ostriker vd 1974). WDM kozmolojisinde cüce galaksilerin sayısı ve galaksi merkezlerinde bulunan karanlık maddenin miktarının CDM'den daha az olması beklenir. Büyük ölçeklerde, her iki kozmoloji de benzer sonuçları öngörür. Simülasyonlar ve gözlemler arasındaki bariz bir uyumsuzluk vardır ve WDM büyük ölçüde sorulara cevap verebilmektedir. Ancak karanlık madde kökenleri henüz netlik kazanmış değildir. Veya karanlık madde sadece soğuk, ılık veya sıcak tek tip değil, daha karmaşık bir farklı modelde hepsinin bir harmanı da olabilir (Boyarsky vd 2009).

Karanlık madde kısıtları yapılan deneyler, teori ve gözlemlere dayanarak, parçacık fiziği, kozmoloji ve astrofizik gibi tüm disiplinler ve perspektiflerden gelmektedir. Astrofizikte birkaç gök cisminden elde edilen gözlemsel kanıtlar, bilim camiasında büyük ilgi görmüştür. Araştırmacılar, çeşitli nesnelerin X-ışını spektrumlarında E ~ 3.5 keV'de tanımlanamayan bir emisyon çizgisinin işaretlerini buldular. Sinyal, istiflenmiş galaksi kümelerinde (Bulbul vd 2014), Perseus kümesi merkezi (Urban vd 2015) ve dış bölgelerinde (Boyarsky vd 2014), Andromeda (Boyarsky vd 2014) ve Samanyolu'nda tespit edildi (Boyarsky vd 2015, Jeltema ve Profumo 2015). Ölçümler, enstrümantal hataları belirgin biçimde dışlayan farklı detektörleri (Chandra, XMM - Newton ve Suzaku) kullanarak gerçekleştirildi. Az da olsa, bazı çalışmalar bu sinyalin varlığını reddetme eğilimindedir ve onu komşu çizgi salınımlarının birleşimi ile açıklamaya çalışmaktadır (ör. Iaubovskyi 2015).

Bununla birlikte, $E_\gamma = m_s/2$ enerji X-ışını fotonuna ve aktif bir nötrinoya dönüşen 7.1 keV kütle steril nötrino yaygın şekilde kabul görür. KeV kütle aralığındaki karanlık madde adayı, WDM kozmolojisi için de uygulanabilir gibi gözükmektedir (Dodelson vd. 1994).

2.3 Karanlık Madde Gözlemsel Kanıtları

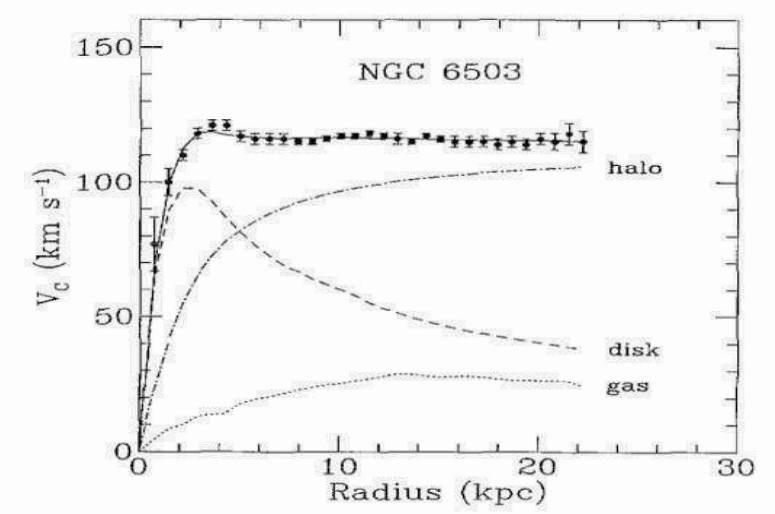
Karanlık maddenin kanıtı büyük oranda kütle çekimseldir. Işıma yapan kütle ile çekimsel kütle arası tutarsızlık, evrende büyük bir görünmeyen kütlenin varlığının göstergesidir. Bir galaksinin veya galaksinin çekimsel kütlesini tahmin edebilmek için, nesnenin hareketi incelenir ve bu sistemi bir arada tutması gereken kuvvetlerin dengesinden kütle hesabı yapılır. Aynı şekilde Güneş ve Dünya kütleleri ve bağıl hızları, Dünyanın Güneş etrafındaki hareketini dengeler. Bir galaksi için ölçülecek hareket, yıldızlarının hareketidir. Yıldızların yörüngesi kabaca dairesel olsa da, etraftaki kütlelerin etkisi ile yalpalama gösterir. Spiral koldaki bir yıldız gözlemciye göre radyal yönde ileri ve geri hareket ederek, tayfsal çalışmalar ile nesnenin ışığında gözlemlenen maviye veya kırmızıya kayma durumunu meydana gelir. Bu durum, Doppler etkisinin fotonda gözlemlenen halidir. Tüm bunlara rağmen, spiral galakside yıldız yörüngesi yaklaşık daireseldir ve kütlesel dengeler bu yörünge hesaplarına göre yapılır. Bugün açıklayamadığımız bazı gözlemsel ve fiziksel durumlarda ekstra kütleye ihtiyaç duyulmaktadır. Kütlenin görünen veya algılanan miktarı bu olayların izah edilmesinde yeterli olamamaktadır. Bu deliller, karanlık maddenin varlığına işaret etmektedir.

2.3.1 Spiral Galaksilerin Dönme Eğrileri

Galaksinin merkezinden farklı mesafelerdeki yıldızların dairesel hızları grafiği, galaksinin dönme eğrisini verir. Yani dönme eğrisi, yarıçap uzaklığı ve yörünge hız fonksiyonudur. Böyle bir sistem için galaktik merkezden r mesafede dairesel olarak hareket eden cismin hızı v(r), merkezcil kuvveti dengeleyen yerçekimi kuvveti ile ifade edilebilir;

$$mv¿¿ ,$$

Burada $M_{<r}$ ifadesi r yapı çaplı alan içindeki toplam kütleyi ifade etmektedir. Eğer söz konusu yıldız, galaksi merkezi şişkinliğinin (bulge) içinde ise, $M_{¿r}=\frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ ile ifade edilir. Burada ρ merkezi şişkinliğin ortalama yoğunluğudur. Şişkinliğin dışındaki bir yıldızın hızı, şişkinliğin dışına çıkınca toplan kütle çok fazla değişmeyip sabit gibi alınabileceği için $v(r) \sim \frac{1}{r^{1/2}}$ ile orantılı olacaktır. Yani Kepler yasasına göre r büyüdükçe hız $1/\sqrt{r}$ ile orantılı olarak azalır. Ancak yapılan gözlemler, eteklerdeki yıldızların hızlarının azalmaları yerine, yaklaşık olarak sabit kaldığını göstermektedir. Şekil 2, NGC6503'de görüldüğü gibi spiral galaksilerin dönme eğrileri görünmeyen bir kütlenin varlığına işaret etmektedir (G. Jungman 1996).



Şekil 2: NGC 6503 spiral galaksisine ait dönme eğrisi (G. Jungman 1996)

2.3.2 Galaksi Kümelerinde Karanlık Madde

Galaksi kümeleri galaksilerin yığışması ile oluşan, ortak bir çekimsel potansiyel alana sahip sistemlerdir. Galaksiler, aralarını dolduran sıcak X-ray plazmasına gömülüdürler. Böyle bir sistemde kütle iki farklı yolla hesaplanabilir; (i) küme içini dolduran geniş alanda X-ray yayan ışınımlı gaz kütlesi (M_{gas}¿ ve (ii) çekimsel etkilerle bir arada duran kütle (M_{tot}¿. Bu iki yöntemle elde edilen kütleler birbirine denk gelmemekte, arada ciddi bir fark bulunmaktadır. Bu fark, karanlık maddenin çekimsel dengelerdeki etkisi ile izah edilmektedir. Bir önceki TÜBİTAK 1001 projemiz 113F117, galaksi kümelerindeki çekimsel etkilerden karanlık madde miktarının nispi oranı hesaplanması konusu ile ilgiliydi. Detaylı bir açıklama ilgili proje kapanış raporunda sunulmuştur.

Gaz kütlesi, elektron yoğunluğunun (n_e), elektron ortalama moleküler ağırlığıyla (μ_e) çarpımının hacimsel integralinin alınmasıyla elde edilmektedir;

$$M_{gas} = 4\pi \mu_e m_p \int n_e(r) r^2 dr$$

burada m_p proton kütlesidir ve n_e(r) için elektron yoğunluk profil tahminlerinden elde edilen değerler kullanılarak kütle hesaplamaları yapılmaktadır.

Toplam kütle, toplam madde yoğunluğunun (ρ_{tot}) hacimsel integralidir;

$$M_{tot} = \frac{4\pi \rho_i r_s^3}{(\beta-2)} \left(\frac{1/(1-\beta) - r/r_s}{(1+r/r_s)^{\beta-1}} \right) \tau_{cool}(r)$$

Navorro vd (1996)'ya göre toplam yoğunluk ifadesi $\rho_{tot}(r) = \rho_i / [(r/r_s) (1 + r/r_s)^{\beta}]$ şeklindedir. Bu formülde ρ_i normalize katsayısıdır ve $\rho_i=[T_0 k(n+1)(\beta-1)]/(4\pi G \mu m_p r s^2)$ şeklinde ifade edilir. Formülde k Boltzman sabiti, G evrensel kütle çekim sabitidir. Bu karmaşık formüllerin detaylı açıklamaları ve aşamalı geçişleri birçok makalede bulunabilir (örn. Navarro vd. (1996), Suto vd. (1998), Bulbul (2010)).

Tablo 1: Kritik yarıçapları (yaysaniye ve kpc) gaz kütlesi, toplam kütle ve kütle oranları (fgas)

Cluster	r_{500} (arcsec)	r_{500} (kpc)	M_{gas} $(10^{13} M_\odot)$	M_{tot} $(10^{14} M_\odot)$	f_{gas}
A0133	1.74 ± 0.10	3.88 ± 1.10	3.91	2.64 ± 1.42	0.148 ± 0.06
A0262	1.69 ± 0.09	2.84 ± 1.14	1.76	1.01 ± 0.31	0.174 ± 0.50
A0520	1.76 ± 0.05	5.75 ± 0.93	4.05	3.33 ± 1.62	0.122 ± 0.09
A0562	1.51 ± 0.10	3.99 ± 0.17	1.72	1.21 ± 0.89	0.142 ± 0.02
A0754	1.46 ± 0.23	5.82 ± 0.10	4.01	3.36 ± 2.30	0.119 ± 0.05
A1644	2.00 ± 0.17	3.42 ± 1.09	2.54	1.80 ± 0.91	0.141 ± 0.06
A1689	1.84 ± 0.07	4.76 ± 0.92	2.96	2.30 ± 1.12	0.129 ± 0.07
A1800	2.17 ± 0.05	2.29 ± 0.46	1.36	0.64 ± 0.29	0.214 ± 0.32
A1831	1.85 ± 0.03	3.02 ± 0.33	2.67	1.60 ± 0.82	0.168 ± 0.02
A1835	1.95 ± 0.46	4.08 ± 0.47	5.29	4.11 ± 2.96	0.129 ± 0.08
A1836	1.47 ± 0.03	3.35 ± 1.35	1.22	0.76 ± 0.30	0.161 ± 0.04
A1995	1.62 ± 0.02	5.97 ± 1.00	3.47	2.95 ± 1.82	0.118 ± 0.03
A2052	1.35 ± 0.10	5.09 ± 0.45	3.42	2.74 ± 2.20	0.125 ± 0.04
A2146	1.64 ± 0.07	5.76 ± 1.74	3.32	2.75 ± 1.67	0.121 ± 0.07
A2204	1.35 ± 0.06	7.01 ± 0.64	5.37	5.13 ± 4.29	0.105 ± 0.03
A2589	1.50 ± 0.02	4.21 ± 1.10	2.59	1.97 ± 1.12	0.132 ± 0.06
A2597	1.43 ± 0.05	5.64 ± 0.26	4.83	4.07 ± 3.60	0.119 ± 0.06
A3667	2.04 ± 0.12	3.93 ± 0.62	2.84	2.01 ± 1.27	0.141 ± 0.04
A4059	1.64 ± 0.08	3.89 ± 0.26	2.62	1.94 ± 1.14	0.135 ± 0.07

WMAP 7 yıllık operasyon sonucu çok önemli kozmolojik değerleri gözlemsel olarak hesaplamıştır. Gözlemler, evrenin baryonik madde oranının $\Omega_b = 0.0449 \pm 0.0028$ ve kara-madde oranının $\Omega_M=0.222\pm0.026$ olduğunu göstermiştir (Komatsu vd (2011)). Yine aynı çalışmada, baryonik kütlenin toplam kütleye oranı olarak tanımlanan gaz kesri, $f_{gas}(\Omega_b/\Omega_M)=0.167$ olarak verilmiştir.

Baryonik kütle çalışmasında 19 galaksi kümesi için fiziksel parametreler hesaplandı. Radyal yoğunluk ve sıcaklık profilleri çıkarıldı. Yapılan kütlesel hesaplamaları kullanarak $f_{gas}= M_{gas} / M_{tot} \approx \Omega_b / \Omega_M$ oranları hata aralıklarıyla birlikte elde edildi. 113F117 projesinde yaptığımız analiz ve hesaplarda, f_{gas} değerleri %90 hata aralıkları hesaba katıldığında Komatsu et al. (2011)'un WMAP ile tahmin ettiği kozmik baryon oranıyla uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

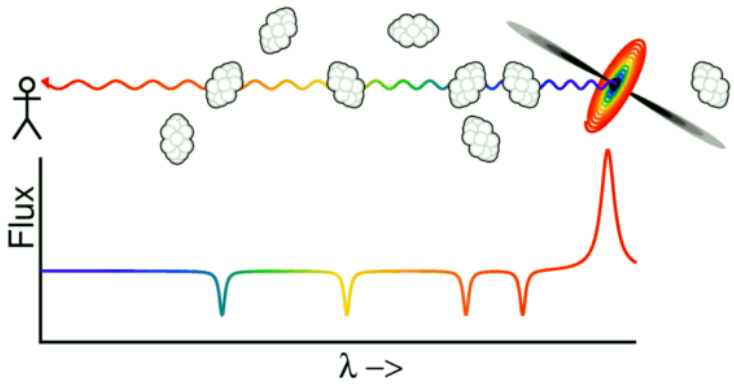
Galaksi kümelerinde bulunan karanlık madde oranları, kendi yaptığımız analizlerle de gösterilmiştir. Konu ile ilgili detaylı hesaplamaların yer aldığı doktora çalışması Onur ÜNVER (YTÜ) tarafından yürütülmekte ve devam etmektedir.

2.3.3 Çekimsel Lens

Işık, kütle çekimi bölgelerinden geçerken yolunu değiştirerek, bükülür. Bu olay, çekimsel mercek etkisi olarak adlandırılır. Ayrıca bu fiziksel olay, yer çekiminin dikta ettiği bir uzay-zaman dokusunda Einstein genel göreliliğinin bir tezahürüdür. Başka bir deyişle; ışık, kütle çekimi ile bükülmüş kavisli uzay dokusu üzerinde yol almaktadır, fotonun kendisi bükülmemektedir. Büyük bir kütlenin sebep olacağı bu ışık oyunu neticesinde, uzak bir nesnenin deforme olmuş veya çoklu görüntüleri oluşabilir. Öndeki kütle, arkadaki nesne için lens etkisi görür. Görünür bir nesne olmaksızın gerçekleşen bu gibi lens gözlemleri, görünmeyen karanlık bir maddenin güçlü bir kanıtı olarak değerlendirilmektedir.

2.3.4 Lyman Alfa Ormanı

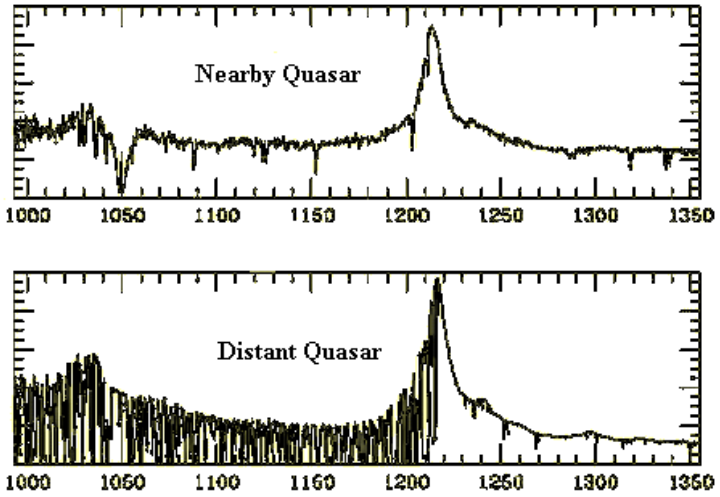
Lyman alfa çizgileri, hidrojen atomundaki elektronun yüksek bir yörüngeden taban durumuna geçiş yaparken yaydığı çizgi ışınımıdır. Tersine olarak da, temel seviyedeki nötr bir hidrojen atomu, yeterli enerjiyi bir elektromanyetik dalga tarafından alabilirse, temel enerji düzeyindeki elektronu yüksek yörüngelere uyarıp tetikleyecektir. Böyle bir durumda, o enerjiye karşılık gelen dalga boyu, temel seviyedeki hidrojen atomu tarafından soğurulacaktır. Bu durum gözlemlerde karşımıza soğurma çizgisi olarak çıkar. Bu tür soğurma çizgileri serisi, galaksiler arası ortamda bulunan temel enerji seviyesindeki hidrojen atomlarını tetiklemek için harcanacak enerjilerin serisini temsil edecektir. Buna literatürde **Lyman alfa ormanı** denir.



Şekil 3: Uzak Quazar'dan gelen fotonların farklı uzaklıklardaki gaz bulutlarında soğurulması

Ancak evrenin kozmik genişlemesi sebebiyle, hidrojenin bu soğurma ışıması daha yüksek dalga boylarına kayar. Aynı enerji aralığında olması gereken bu soğurulma çizgisi, soğurulma olayının olduğu bulutsunun mesafesine göre, tayfta kayma gösterir. Şekil 3 çizimi

fiziksel mekanızmayı çok basitçe özetlemektedir. Hidrojenin soğurma ışıması, gözlemciye ulaşana kadar geçtiği uzay-zaman dokusu ve dolayısıyla galaksiler ve yıldızlar arası ortamdaki kütle hakkında ipuçlarını beraberinde getirmektedir. Uzak kuazarlar, yakın kuazarlara göre çok daha fazla bulutsudan geçerler. Uzak kuazar tayfı bu yüzden çok fazla emisyon çizgisi içerir. Şekil 4'de bu durum farklı mesafedeki kuasar tayfları ile gösterilmiştir. Yıldızlar arası gaz da, haliyle toplam çekimsel kütlenin (baryonik ve karanlık madde) etkisi ile şekillenir. Bu sebeple, Lyman Alfa Ormanı verileri kullanarak da, karanlık madde çalışmalarını yapmak mümkündür (M. Rauch 2006).



Şekil 4: Yakın ve uzak kuazar için tayfta gözlemlenen Lyman Alfa ormanı.

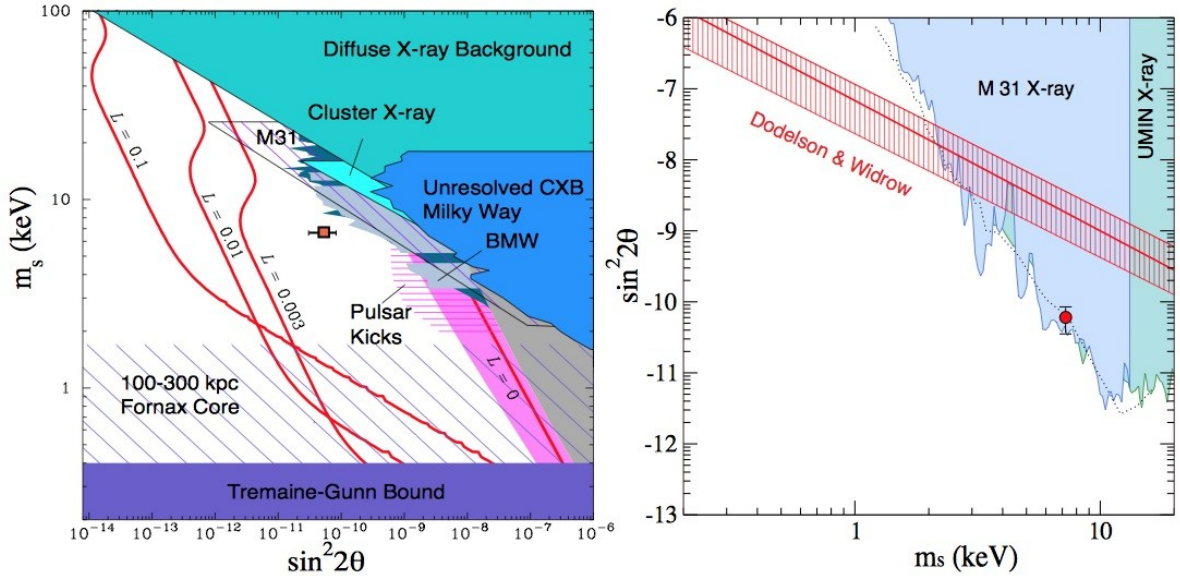
2.4 X-Ray Gözlemleri

Yapılan bazı kozmoloji hesapları ve gözlemler, karanlık madde aday taneciği steril nötrinonun olası kütlesini keV aralıklarında olması gerektiğini göstermektedir. Gözlemlenen cüce galaksi yoğunluk popülasyonu üzerine yapılan hesaplamalar olası kütlenin $m_s \geq 0.4$ keV'den büyük olmasını öngörür. Tremaine-Gunn limiti olarak bilinen bu değer, kütleye güçlü bir alt sınır getirmektedir. Yine bir diğer net sınır, Lyman Alfa Ormanı alanında yapılan çalışmalardan gelir [ör. Ruchayskiy 2007, Boyarsky vd 2009]. Gözlemler, $m_s > 2.5$ keV'den daha büyük bir kütleye işaret etmektedir.

Steril nötrinolar, aktif nötrinolar ile karışabilir ve evrenin yaşından daha uzun zaman dilimlerinde bozunabilirler [Jeltema 2015]. Olası kütleye bir üst sınır, parçacık ömrünün karıştırma açısından gelir [Asaka vd 2005] (Bkz. Şekil-2 sağ panel). Bir döngü radyasyon bozunumu için karışım açısı;

$$\theta^2 < 1.1 \times 10^{-7} \left(\frac{50\,keV}{m_s} \right),$$

formülü ile verilir [Adhikari vd 2016]. Steril nötrino aktif nötrinoların karışımıyla oluşuyorsa, kütle m_s< 50 keV'den daha az olmalıdır [Boyarsky vd 2012]. Bu nedenle, çok basit bir yaklaşımla olası karanlık madde steril nötrinolarının kütlesi 2.5 < m_s< 50 keV aralığında olmalıdır. Şekil 5 (Bulbul vd 2014), çeşitli çalışmalardan edinilen alt ve üst sınırlamaları renkli olarak göstermektedir. En altta yer alan mor şerit Tremaine-Gunn alt limitidir. Beyaz alanlar izin verilmiş değerlerin alanlardır. Şayet steril nötrino karanlık maddeden bir foton salınımıyla gerçekleşiyorsa, bu ışınım ve keV kütle aralığında X-ray detektörlerinin algılayacağı bir fotondan gelmelidir. Ve bu foton beyaz alanlarda olmalıdır.



Şekil 5: Steril nötrino kütlesi ve karışım açısı sınırlaması var olan durum.

2.4.1 X-ray Sinyalleri

Karanlık madde adayı, Steril nötrino şeklindeyse ve bu tanecik radyoaktif bozunum yaparsa, X-ray dalga boylarında algılanabilecek bir foton yayabilir [Asaka vd 2005]. Bununla birlikte, steril nötrino karanlık maddesi çok kararlı değildir. Monokromatik X-ışını çizgisini üreten bir nötrinoya ve N → ν + γ fotonuna dönüşür [Laine vd 2008]. Kütlesi m_s olan karanlık madde parçacıkları etkin bir nötrinoya dönüşür ve $E_\gamma = m_s/2$ enerjisinde foton yayar. Bu ışınımın akısı;

$$F = \frac{\Gamma M_{DM}^{fov}}{4\pi d^2 m_s}$$

formülü ile ifade edilir. Burada M_{DM}^{fov} görüş alanındaki toplam karanlık madde kütlesidir. Bozunum oranı Γ, karışım açısı $\sin^2(2\theta)$ve steril nötrino m_s kütlesine bağlı olarak;

$$\Gamma = \frac{9\alpha G_F^2}{256.4\pi^4}\sin^2(2\theta)m_s^5 = 1.38\times10^{-22}\sin^2(2\theta)\left[\frac{m_s}{1\,keV}\right]^5 s^{-1}$$

Formülü ile ifade edilir [Abazajian vd 2001, Boyarsky vd 2006]. Burada $\alpha = 1/137.0$ ve $G_F = 1.2\times10^{-5} GeV^{-2}$ değerlerine sahiptir. Literatürde θ açısından daha ziyade, $\sin^2(2\theta)$ ifadesi "*karışım açısı*" olarak adlandırılır. Radyoaktif bozunum neticesinde salınım varsa şayet, bunun ilk olarak evrendeki ilk ışığın çıktığı X-ışın kozmik arka alandan (XRB) gelmesi beklenir (Mateo 1998, Asaka vd 2005). Akı denklemini arka alana (XRB) uyarlarsak;

$$F_{XRB} \cong \frac{\Gamma_{N\to\gamma\nu_\alpha}\rho^0_{DM}}{2\pi H_0} \approx 8\times10^{-11}\left[\frac{\theta^2}{10^{-11}}\right]\left[\frac{m_s}{7\,keV}\right]^5 \frac{erg}{cm^2.s.sr},$$

denklemini elde ederiz (Prokhorov ve Silk 2010). Bu formüldeki ρ^0_{DM} ve H_0, karanlık maddenin yoğunluğu ve Hubble sabitidir. X-ray arka alanından sinyal alınamaması karışım açısı $\sin^2(2\theta)$ ve kütle **(**m_s**)** ilişkisinde;

$$XRB\,sınır: \Omega_s \sin^2(2\theta) \le 3\times10^{-5}\left[\frac{1\,keV}{m_s}\right]^5,$$

formülü kullanılır (Prokhorov ve Silk 2010). Formüldeki Ω_s steril nötrino günümüz kozmolojisindeki yoğunluğudur.

Karanlık madde sinyalinin aynı zamanda galaksi kümeleri gibi büyük kütle konsantrasyonları yönünde güçlü olması beklenir. Bir galaksi kümesinden gelen karanlık madde bozunumunun bir tahmini [41]

$$F_{küme} \cong \frac{\Gamma_{N\to\gamma\nu_\alpha} M_{DM}}{2\pi H_0} \approx 1.4\times10^{-7}\left[\frac{\theta^2}{10^{-11}}\right]\left[\frac{m_s}{7\,keV}\right]^4\left[\frac{D_L}{100\,Mpc}\right]^{-2}\left[\frac{M_{DM}}{10^{13}M_\odot}\right]^{-2}\frac{ph}{cm^2.s}$$

formülü ile verilir (Mateo 1998). Burada M_{DM} görüş alanı içindeki karanlık madde miktarı, D_L ise parlaklık mesafesidir. Yakın uzayımızda yer alan bir diğer karanlık madde rezervuarları cüce spiral galaksilerdir (cSpr). Bozunum akısı kümelere göre daha küçüktür ve;

$$F_{cSpr} \cong 1.4\times10^{-7}\left[\frac{\theta^2}{10^{-11}}\right]\left[\frac{m_s}{7\,keV}\right]^4\left[\frac{D_L}{100\,Mpc}\right]^{-2}\left[\frac{M_{DM}}{10^{7}M_\odot}\right]^{-2}\frac{ph}{cm^2.s}$$

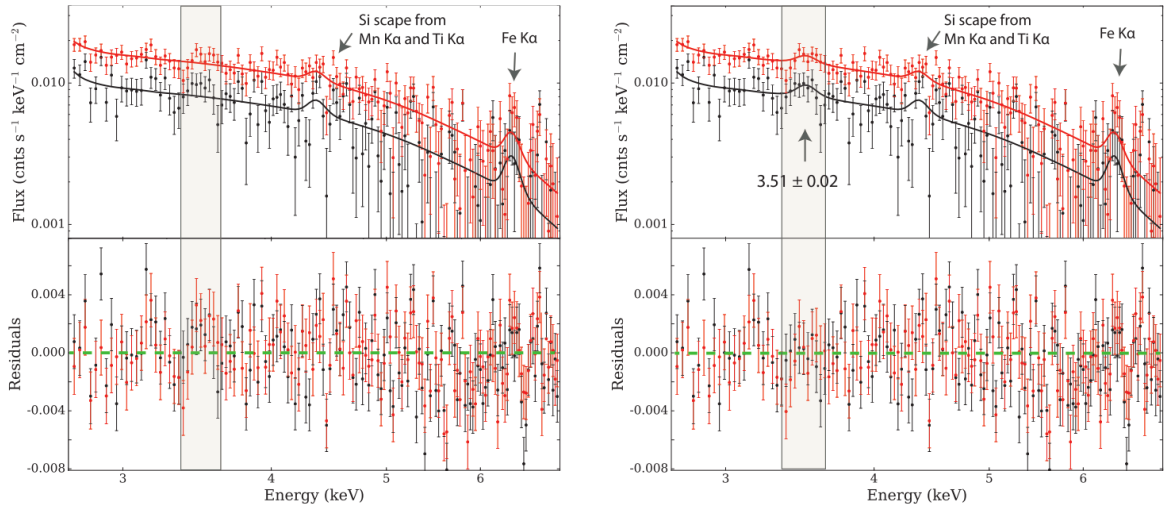
formülü ile hesaplanır (Prokhorov ve Silk 2010).

X ışınlarındaki karanlık madde bozulmasını tespit etme girişimlerinin çoğu, çizgi ışımasını bulmada başarısız olmaktadır. Kütlenin bir fonksiyonu olarak karanlık madde steril nötrino karışma açısındaki üst sınırı zorlarken, tespit edilmemiş çalışmalar da değerlidir. Bu sınırlardan bazıları Şekil 5'de (renkli bölgeler) gösterilmektedir.

2.4.2 3.5 keV Işınımı

Steril nötrinonun nasıl sentezlendiği henüz net larak bilinmemektedir. Ancak, steril nötrino tanecikleri büyük ölçüde büyük patlama sırasında üretildiği düşünülmektedir. Bu sebeple, arka alan ışımasından önemli ölçüde karanlık madde emisyonu gelmesi beklenmektedir. Daha önceden yapılan çalışmalar arka alan ışımasından net bir çizgi salınımını yakalayamamış, ancak olası steril nötrino kütlesine sınırlamalar getirmiştir. Boyarsky vd. (2006), XMM-Newton verileri ile geniş arka alan verileri ile bir çalışma yapmış ve olası taneciğin fiziksel özelliklerine üst limit belirleyebilmiştir.

Chandra derin kozmik arka alan 10MS poz süresine sahip verilerine dayanarak yapılan analizlerin ilk sonuçları arxiv'da ocak 2017'de online olarak ilan edildi (Cappeluti vd 2017). Analiz sonuçlara göre 3 sigma güvenliğinde 3.51±0.02 keV enerjisinde kaynağı belirsiz ışıma belirlendi. Şekil 6 derin arka alan ışıması tayf modellemelerini göstermektedir. Gölgeli alan 3.5 keV alanıdır. Solda gauss çizgi ışınım modeli 3.5 keV enerji aralığına eklenmeden önce (sol-panel) ve eklendikten sonra (sağ-panel) kıyaslamalı olarak verilmiştir. Modellemedeki iyileşme görsel olarak da çok net görünmektedir (Cappeluti vd 2017).

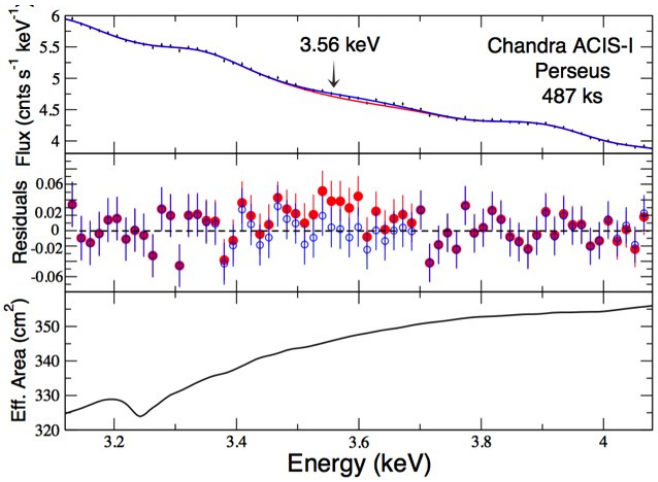


Şekil 6: 3.5 keV çizgi eklenmeden ve eklendikten sonra tayfsal modellemede ki iyileşme görülüyor. (Cappelluti vd. 2107)

Harvard Üniversitesi Astrofizik Ekibi sistematik bir analizle bireysel olarak Perseus kümesi ve ayrıca istifledikleri 73 galaksi kümesi X-ray arşiv verileri spektral analizlerinde E~3.5 keV çizgi ışıması tespit ettiler (Bulbul vd., 2014). Şekil 7, Perseus kümesinden gelen steril nötrino bozulmasıyla salınan fotonlardan kaynaklı 3.5 keV monokromatik çizgi ışımasını göstermektedir. Chandra ve XMM her bir detektörü de, ayrı ayrı yapılan analizlerde aynı sonucu vermiştir. Bilinen hiçbir atomik element ışımasına denk gelmeyen 3.5 keV çizgisi, aletsel bir hatadan da kaynaklanmadığının test edilmesi sonrasında çok kabul gördü ve bilim dünyasında yankı uyandırdı. Sonuçların heyecanı henüz yatışmamışken, bir hafta geçmeden Leiden Üniversitesi A. Boyarsky liderliğindeki araştırma grubu da Andromeda galaksisi XMM-Newton verileri ile aynı (E~3.5 keV) salınım çizgisinin varlığını gösterdi (Boyarsky vd., 2014). Bu çalışmalar ayrıca karışım açılarını Perseus için $\sin^2(2\theta) \approx 7 \times 10^{-11}$, Andromeda-M31 galaksisi için $\sin^2(2\theta) \approx 2.2 \times 10^{-11}$ olarak vermektedir. Her iki değer de, daha önceki çalışmalarla tanımlanan üst limitin altında yer almaktadır. Uzun ömürlü steril nötrino, çok uygun bir karanlık madde tanecik adayıdır.

Tablo 2: 3.5 keV görülen X-ray çalışmaların bir özeti

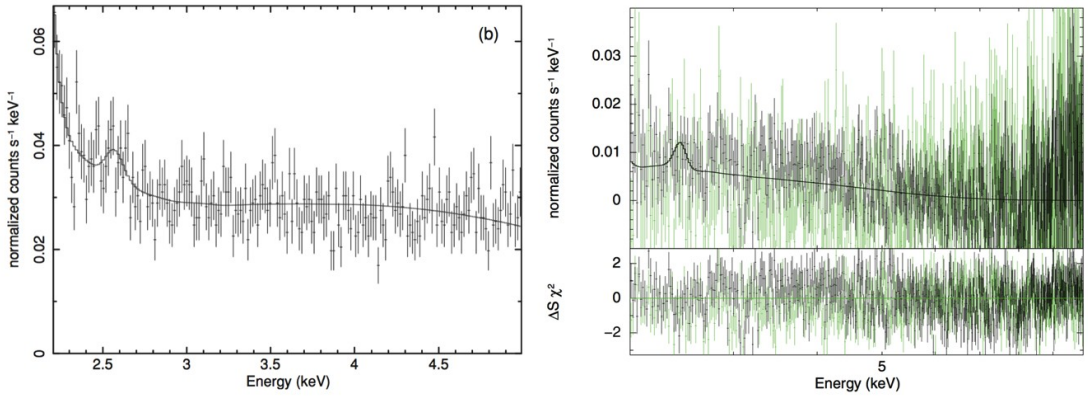
Nesne	Teleskop	Poz Süresi (ks)	Referans
M33	XMM-Newton / EPIC	20-30	Borriello vd. 2012
Galaksi kümeleri	XMM ve Chandra	6000-1370	Bulbul vd 2014
M31, Perseus, Milkyway	XMM-Newton / EPIC	1226, 264, 7850	Boyarsky vd 2015
Milkyway	Suzaku / XIS	31500	Sekiya et al. 2015
Draco	XMM-Newton / EPIC	2100	Jeltema vd 2016
X-ray arka alan	XMM-Newton / EPIC	1450	Boyarsky vd 2006
X-ray arka alan	Chandra	1000	Capelluti vd 2017



Şekil 7: Perseus kümesi 3.5 keV çizgi ışıması

2.4.3 Belirsiz Diğer Çizgi Salınımları

Tanımlanamayan bir X-ray salınım çizgisi ilk defa Willman-I galaksi verilerinden elde edildi (Loewenstein ve Kusenko, 2010). Ekip, Chandra verileri 0.4-7 keV spektrum analizlerinde, 2.51±0.07 keV enerjisinde çizgi salınımı buldu (Şekil 8 sol) ve steril nötrino bozunumundan yayılan fotonlardan kaynaklandığını iddia ettiler. Çok geçmeden, bu 2.5 keV ışımasının güvenilir olmadığına (Şekil 8 sağ), ve yapılan analizin eksiklilerine odaklanan bir çalışma yayınlandı (Boyarsky, 2010). Söz hakkı doğan Wilman-I ekibi, analiz yöntemlerinin doğruluğunu gösteren yeni bir çalışma yaptı (Kusenko ve Loewenstein 2010). Şekil 8 her iki araştırma ekibinin 2.5 keV ışıması hakkında elde ettikleri tayf modellemeleri gösterilmiştir.



Şekil 8: Wilman-I galaksiden elde edilen 2.5 keV X-ray çizgisi (sol), ve ışımanın güvenilirsizliği (sağ)

Prokhorov vd. (2010)'a göre, Samanyolu merkezinin [Koyama vd. 2007] Suzaku XIS spektrumunda gözlenen 8.7 keV Fe XXVI $L_{y-\gamma}$ çizgi ışıması, standart iyonizasyon ve rekombinasyon süreçleri ile açıklanamaz. Bu 8.7 keV çizgisi de, karanlık madde bozunması neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. Olası steril nötrino kütlesi olarak da $m_s = 17.4\,keV$ önerilmektedir.

Yine aynı şekilde galaksi şişkinlik bölgesinin Suzaku / XIS tayf analizinde 9.4 ve 10.1 keV'de iki zayıf çizgi benzeri ışınım tespit edilmiştir (Koyama vd 2016).. Bu aşırılıkların pozisyonları, herhangi bir parlak astrofizik veya enstrümantal çizgi ile çakışmaz ve yoğunlukları, bozunan karanlık madde kaynaklı senaryolarla açıklanabilir.

Bütün bu gözlemlere istinaden, karanlık maddenin belki de tek tip steril nötron bozunumu olmayabileceği ihtimallerini de değerlendiren araştırmacılar oldu. Örneğin, teorik astrofizikçi Man Ho Chan (2016), karanlık maddenin %80'inin 7.1 keV steril nötron, %20'sinin 17.4 keV steril nötron olması gerektiğini önermektedir.

3 ELİPTİK GALAKSİLERİN SEÇİMİ ve ANALİZLER

3.1 Giriş

Projemizde, karanlık maddenin bozunması ile X-ray enerji aralığında tespit edilen yaklaşık 3.5 keV salınım çizgisi, yerel grupta yer alan eliptik galaksilerin X-ray arşiv verilerinde aranacaktır. Eliptik galaksiler, galaksi kümeleri kadar yüksek olmasa da, iyi karanlık madde rezervuarlarıdır. Yüksek kütle-ışınım oranları (mass-to-light ratio) bunun en büyük delilidir. Örneğin bu değer Wilmann-1 galaksisi için $700\,M_{\odot}/L_{v,\odot}$ olarak verilmiştir. Bunun yanında galaksilerde, kümelerde olduğu gibi geniş alan x-ray ışınımı kirliliği görülmez. Dolayısıyla tayf analizleri, özellikle de çizgi ışımasının cımbızlanması daha kolaydır. Ayrıca karanlık madde bozunum ışıması homojendir, yani uzaklaştıkça zayıflar. Bu sebeple, yakın kaynaklardan daha fazla ışınım sinyali toplanabilir. Bu saydığımız sebeplerden ötürü cüce galaksiler çalışmamız için en uygun kaynaklardır.

Standart teori eliptikler galaksilerin, disk biçimli yapıların birleşmesi sonucunda oluştuğunu (Fall, 1979) ve dolayısıyla karanlık madde halelerini barındırması gerektiğini öngörür. Karanlık maddenin dev eliptiklerde olduğuna dair kanıtlar X-ışın analizleriyle (Mathews ve Brighenti, 2003) ve çekimsel lens etkileriyle (Keeton, 2001) gösterilmiştir. Ancak günümüze kadar 3.5 keV ışıması eliptik galaksilerde tespit edilmiş değildir ve bu konuda da bir çalışma yapılmamıştır.

3.2 Nokta Kaynakların Tespiti

Analizlerde X-ray arşiv verileri kullanılacaktır. Her biri neredeyse 10 yıldır yörüngede olan Chandra, XMM-Newton ve Suzaku uyduları yeteri kadar arşiv verisine sahiptir. Arşiv içerisinde en fazla X-ray sayımı verecek galaksiler seçilecektir. Chandra ve XMM-Newton verilerinde yapılan hızlı taramada elde ettiğimiz kaynak listesi Hata: Başvuru kaynağı bulunamadı ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3**:** XMM-Newton eliptik galaksi arşiv listesi.

obs ID	Instr	exp.ID	duration	target	ra	dec	status
405320501	XMM-Newton	S001	21913	M31	00 42 41.80	+40 51 52.00	Public data
200130101	XMM-Newton	U002	94477	NGC 4472	12 29 46.90	+08 00 13.00	Public data
551870601	XMM-Newton	S001	21023	M87-6	12 29 27.63	+12d 26' 04.6"	Public data
112550701	XMM-Newton	S001	11175	NGC 4477	12 30 14.20	+07 50 00.20	Public data
21540201	XMM-Newton	S001	51344	NGC 4649	12 43 40.30	+11 32 58.00	Public data
114120101	XMM-Newton	U002	39554	NGC 4486	12 30 49.40	+12 23 28.00	Public data
141570101	XMM-Newton	S001	42778	NGC 4552	12 35 39.80	+12 33 23.00	Public data
93650201	XMM-Newton	S002	23059	NGC 5128	13 25 27.61	-43 01 08.90	Public data

Tablo 4: Chandra eliptik galaksi arşiv listesi.

Row	Seq Num	Obs ID	Instr.	Expos.	Target	RA	Dec	Status	Avg Cnt	Evt Cnt
1	600151	2017	ACIS-S	45.87	M32	00 42 41.80	+40 51 52.00	archived	11.44	524756
2	600151	2494	ACIS-S	15.95	M32	00 42 41.80	+40 51 52.00	archived	11.85	189117
3	701113	5690	ACIS-S	113.02	M32	00 42 41.80	+40 51 54.60	archived	1.87	211574
4	600081	321	ACIS-S	39.59	NGC 4472	12 29 46.90	+08 00 13.00	archived	14.43	571313
5	600082	322	ACIS-I	10.36	NGC 4472	12 29 46.90	+08 00 13.00	archived	9.62	99730
6	600793	11274	ACIS-S	39.67	NGC 4472	12 29 46.80	+07 59 59.90	archived	15.78	626044
7	801026	12888	ACIS-S	159.31	NGC 4472	12 29 46.70	+08 00 02.00	archived	14.03	2235617
8	801026	12889	ACIS-S	135.59	NGC 4472	12 29 46.70	+08 00 02.00	archived	14.6	1979824
9	401553	15756	ACIS-I	32.07	NGC 4472	12 29 04.40	+07 49 24.10	observed	5.11	163977
10	401554	15757	ACIS-I	29.68	NGC 4472	12 28 45.00	+08 03 48.00	observed	6.12	181564
11	401555	15758	ACIS-I	29.67	NGC 4472	12 29 43.20	+08 15 12.30	observed	5.3	157273
12	401556	15759	ACIS-I	29.68	NGC 4472	12 30 43.80	+08 05 21.60	observed	4.75	140953
13	401557	15760	ACIS-I	29.38	NGC 4472	12 30 14.20	+07 50 00.20	observed	4.84	142113
14	600202	2068	ACIS-S	24.84	NGC 4621	12 42 02.40	+11 38 45.10	archived	10.78	267730
15	600088	785	ACIS-S	38.11	NGC 4649	12 43 40.30	+11 32 58.00	archived	13.85	527938
16	600619	8182	ACIS-S	52.37	NGC 4649	12 43 39.60	+11 33 09.40	archived	12.68	663958
17	600619	8507	ACIS-S	17.52	NGC 4649	12 43 39.60	+11 33 09.40	archived	12.23	214268
18	600943	12975	ACIS-S	84.93	NGC 4649	12 43 40.20	+11 33 08.90	archived	6.64	563699
19	600943	14328	ACIS-S	13.97	NGC 4649	12 43 40.20	+11 33 08.90	archived	6.68	93378
20	600944	12976	ACIS-S	101.04	NGC 4649	12 43 40.20	+11 33 08.90	archived	7.33	740339
21	400187	2707	ACIS-S	98.66	NGC 4486	12 30 49.40	+12 23 28.00	archived	64.7	6383631
22	400187	3717	ACIS-S	20.56	NGC 4486	12 30 49.40	+12 23 28.00	archived	67.26	1383058
23	600001	241	ACIS-S	38.04	NGC 4486	12 30 49.30	+12 23 28.00	archived	24.97	949939
24	700686	4007	ACIS-S	36.18	NGC 4486	12 30 31.80	+12 29 26.00	archived	6.97	252208
25	900918	11783	ACIS-S	28.68	NGC 4486	12 30 57.70	+12 16 13.30	archived	40.75	1168704
26	600206	2072	ACIS-S	54.42	NGC 4552	12 35 39.80	+12 33 23.00	archived	6.66	362538
27	801165	13985	ACIS-S	49.41	NGC 4552	12 35 39.80	+12 33 23.00	archived	10.46	516945
28	801165	14358	ACIS-S	49.41	NGC 4552	12 35 39.12	+12 32 11.04	archived	9.18	453497
29	801165	14359	ACIS-S	48.14	NGC 4552	12 35 37.25	+12 32 36.75	archived	10.34	497949
30	600144	1587	ACIS-S	31.52	NGC 3379	10 47 50.00	+12 34 57.00	archived	9.54	300545
31	600511	7073	ACIS-S	84.1	NGC 3379	10 47 49.70	+12 34 54.60	archived	13.61	1144264
32	600512	7074	ACIS-S	69.07	NGC 3379	10 47 49.70	+12 34 54.60	archived	9.53	658159
33	600513	7075	ACIS-S	83.11	NGC 3379	10 47 49.70	+12 34 54.60	archived	10.11	840509
34	600514	7076	ACIS-S	69.25	NGC 3379	10 47 49.70	+12 34 54.60	archived	10.2	706565
35	800422	4977	ACIS-S	77.9	IC 1101	15 10 56.10	+05 44 38.00	archived	23.97	1867118
36	701042	5619	ACIS-S	55.04	Maffei 1	02 36 35.40	+59 39 19.00	archived	12.27	675629
37	600076	316	ACIS-I	35.72	NGC 5128	13 25 27.61	-43 01 08.90	archived	6.92	247153
38	600112	962	ACIS-I	36.5	NGC 5128	13 25 27.61	-43 01 08.90	archived	9.66	352811

Proje kapsamında seçilmiş olan M32, Maffei 1, NGC4472, NGC4552, NGC4649, IC1101, M87, NGC3379, NGC4477, NGC4621, NGC5128 galaksilerinin Chandra X-ışın uydusu ile gözlenmiş 242 adet erişime açık gözlem verisi bulunmaktadır. Bu gözlemlerin ön indirgeme işlemleri CIAO v.4.8 CALDB v.4.7.0 yazılımı ve chandra_repro komutu ile yapılmıştır. Ön indirgeme işlemi sırasında HRC (High Resolution Camera) algılayıcısı ile alınmış gözlemler, bu verilerde enerji çözünürlüğü olmadığı için elenmiştir. Bu şekilde elenen gözlem sayısı 23'tür. Ön indirgeme sonucunda spektrum elde edilebilecek gözlem sayısı 221 olmuştur. Her bir galaksi için uygulanan işlemlerin sonucu son nokta kaynak sayıları Tablo 5 ile gösterilmiştir.

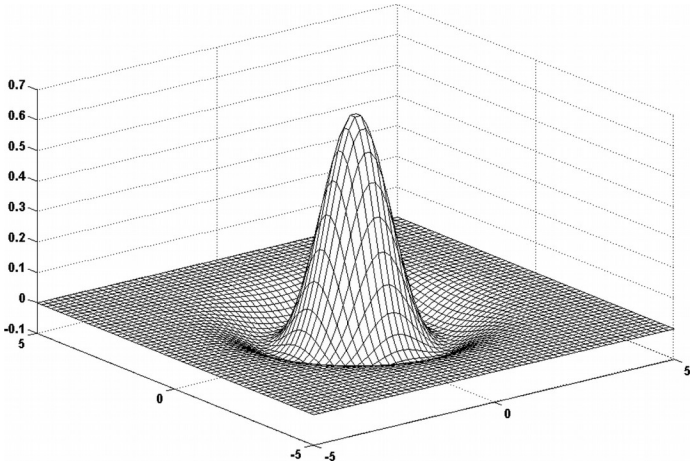
Tablo 5: Eliptik galaksi nokta kaynak sayıları

Galaksiler	Wavdetect	Çoklu gözlem	spektrum	Aday kaynak	Eleme Sebebi
M32	994	519	136	40	M31'e yakın olduğu için
IC 1101	199	155	13	4	Sayı Az
M87	4931	2241	96	96	AGN, kuvvetli jet
Maffei 1	174	-	-	-	Tek Gözlem
NGC 3379	760	321	57	24	--
NGC 4472	2165	763	73	64	--
NGC 4477	234	179	12	0	Kaynak Sayısı Az
NGC 4552	791	355	56	32	--
NGC 4621	170	168	5	1	Kaynak Sayısı Az
NGC 4649	1289	476	48	40	--
NGC 5128	5087	1235	525	525	AGN, kuvvetli jet
TOPLAM	**16794**	**6412**	**1019**	**826**	

Nokta kaynak tespiti, baktığımız objeden gelen noktasal ışımaların tespit edilmesi sürecini ifade etmektedir. Kaynak taramalarında maksimum olasılık algoritmalarını içeren analiz komutları kullanılmıştır. Bütün nokta kaynak tespit algoritmaları, bakılan nesnenin görüntüsündeki her bir pikseli, komşu piksellerin sayım değerleriyle karşılaştırarak seçilen parametrelere göre bir liste oluşturur. Her bir sayım dalgalanması ise nokta kaynak olmayabilir. Bu sebeple noktasal kaynaklar belirlenirken, aşağıdaki bazı parametreler kullanılarak, kaynak tespit hassasiyetini belirleriz. Doğru kaynak tespiti yapmak analizin güvenirliği açısından büyük önem taşır.

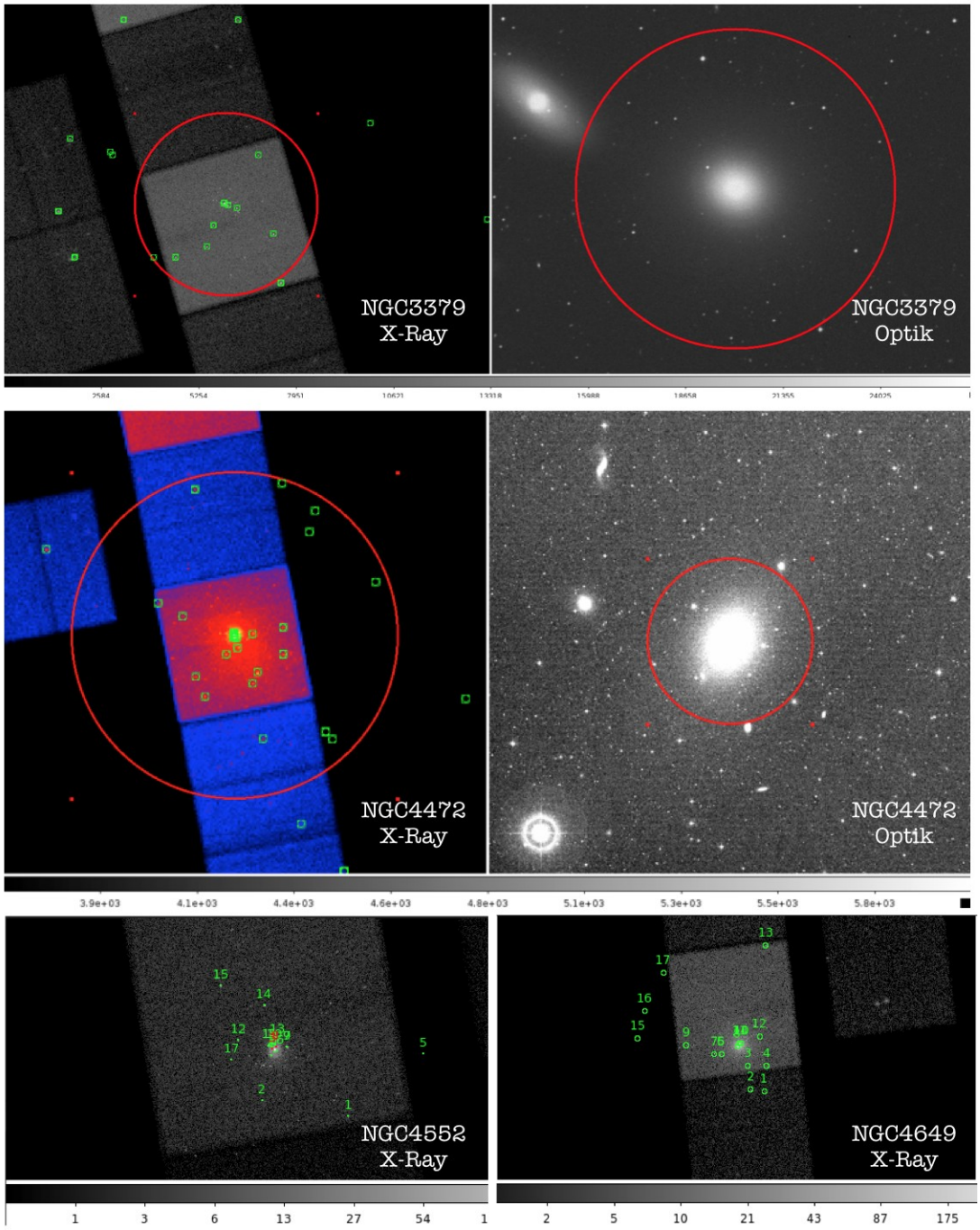
Çalışmamızda en güncel SAS nokta kaynak algoritması 'edetect_chain' komutu kullanılarak, kaynak tespiti yapıldı. Edetect_chain komutu, sırasıyla poz haritası, detektör maskesi, lokal ve harita modunda olmak üzere nokta kaynak tespiti, arka alan haritası, olasılığa bağlı nokta kaynak tespiti ve hassasiyet haritası oluşturur ve son olarak nokta kaynak listesi oluşturulur.

Poz haritası vigneting bilgisi, durum dosyası ve foton event dosyasındaki bozuk piksel uzantıları dikkate alınarak ve ‘eexpmap’ komutu kullanılarak oluşturulur. Yapılacak tespiti, alanlara göre sınırlandırmak için maske dosyası, 0 ve 1 değerleri yardımıyla kullanır ve bu dosya emask komutu yardımıyla oluşturulur. Lokal mod nokta kaynak haritası oluşturulurken, 5x5 piksellik kutular kullanır. Bu kutuları +2 piksel saran alanı ise arka alan kabul ederek, yerel nokta kaynak tespiti yapılır. Yerel nokta kaynak haritası eboxdetect komutu yardımıyla oluşturulur. Arka Alan haritası, yerel nokta kaynak haritası yardımıyla bulunan kaynakları, görüntü dosyasından çıkararak, 2 boyutlu arka alan haritası oluşturur. Harita modu nokta kaynak listesi, 5x5 piksel kutular için, arka alan haritası kullanılarak eboxdetect komutuyla oluşturulur. Olasılığa bağlı nokta kaynak tespiti, harita moduyla oluşturulan nokta kaynakları belirlenen olasılığa göre indirgeyerek nihai nokta kaynak listesini oluşturur. Hassasiyet haritası olasılık kullanılarak, esensmap komutu yardımıyla oluşturulur. Bu komutların altındaki parametrelerde taranacak pikselin civarındaki kaç komşu piksellerle kıyaslanacağı, veya elde edilen piksel tepeciğinin ne kadar yüksek olması halinde asil kaynak listesine ekleneceğine karar vermektedir. Bu tıpkı bir Meksika şapkası tanımlamak gibidir. Şapkanın yüksekliği genişliğini tanımlamak kullanıcıya kalmıştır. Yandaki şekil, piksel değerlerine göre izohips çizimini göstermektedir. Kaynak olan pikseller komşu piksellere kıyasla daha fazla foton sayımına sahip oldukları için, küçük ve sivri bir tepecik oluştururlar. Likelihood sınırı (L) ve gaussian olasılık (P) arasında $L=-\ln P$ ilişkisi vardır. Analizlerimizde Minimum likelihood değeri ML=10 ve gaussian 4σ sinyal gürültü oranı seçilerek, her iki algoritma için de aynı ihtimal değeri $P\approx 3.2\times 10^{-5}$ seçerek, kıyaslanabilir bir parametre ortamı oluşturuldu. Ayrıca bu yöntemler vignetting ve PSF etkilerini de hesaba katarak chip uçlarındaki yanlış tespitleri kısmen azaltmaktadır. 25 yay dakikası içerisinde yer alan kaynak listeleri, her bir chip için ayrı ayrı elde edildi. En son asıl liste SRCMATCH komutu ile bütün elde edilen listelerin tek bir listede birleştirilmesi yöntemiyle oluşturuldu. Şekil 9 meksika şapkası yöntemi piksel görselini sunmaktadır. Beş farklı enerji aralığında beş farklı görüntü kullanılarak ve maksimum olasılık ml=10 (yaklaşık olarak 4σ) seçilerek nokta kaynak tespitinin hassasiyeti arttırıldı. Nokta kaynak belirleme için seçilen görüntüler sırasıyla süper yumuşak (0.2-0.5 keV), yumuşak (0.5-1.0 keV), orta sert (1.0-2.0 keV), sert (2.0-4.5 keV) ve süper sert (4.5-12.0 keV) olarak seçildi. Bütün gözlem hakkında bilgileri içeren durum dosyası ‘atthkgen’ komutu kullanılarak oluşturuldu. Ham nokta kaynak değerleri enerji dönüşüm faktörü (ecf) yardımıyla X-ray akılarına dönüştürüldü. Enerji dönüşüm faktörü oluşturulurken, hidrojen sütun yoğunluğu, kamera filtre tipi ve seçilen enerji aralıkları dikkate alındı ve foton indeks (Γ) 1.7 değerine sabitlendi. Kaynak tespiti, MOS ve pn kameralarına uygulandı ve elde edilen bütün kaynaklar ‘SRCMATCH’ komutu yardımıyla birleştirildi. Yöntem bütün galaksiler için uygulanmıştır.



Şekil 9. Kaynak tespitinde kullanılan Meksika şapkası metodu gösterimi

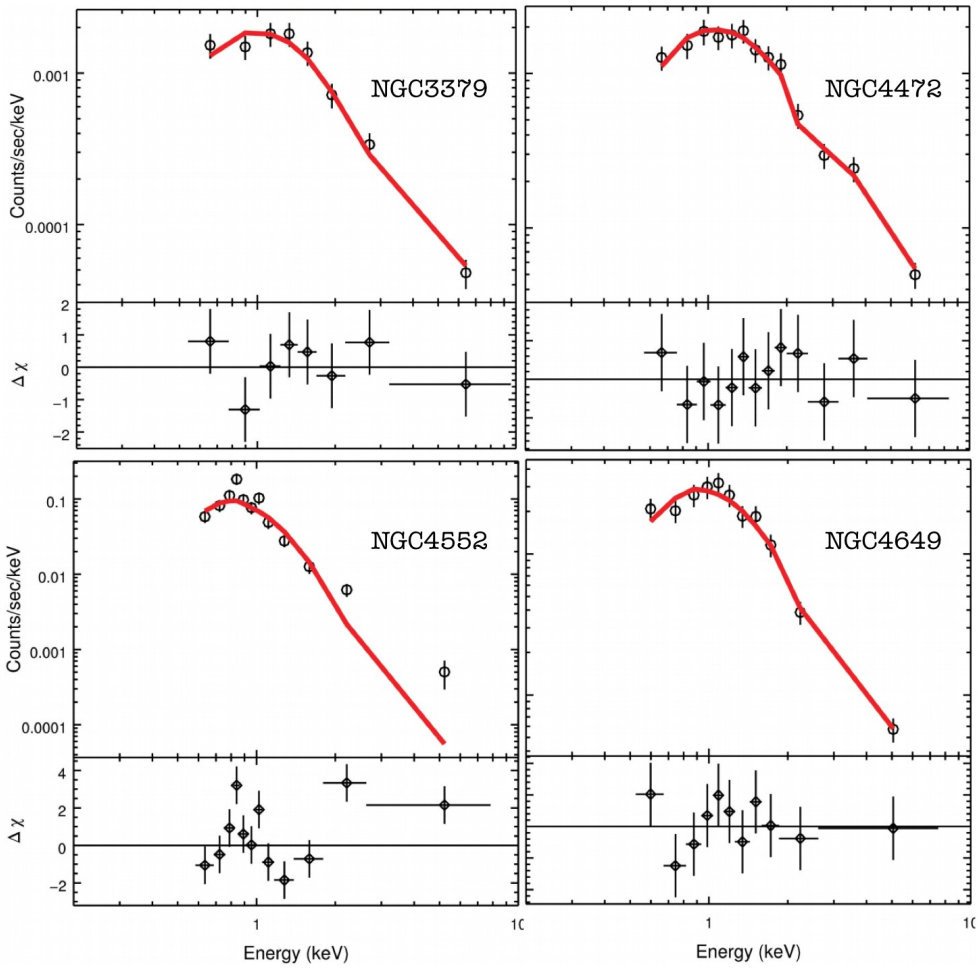
Ayrıca, CIAO yazılımı içinde bulunan wavdetect komutu yardımıyla her bir galaksinin her gözlemi için 16,794 tane olası nokta kaynak tespit edilmiştir. Her bir gözlemde oluşturulan kaynak katalogları, tespit edilen cisimlerin RA ve DEC bilgileri kullanılarak eşleştirilmiştir ve birden fazla gözlemde tespit edilmiş kaynaklarla çalışılmaya devam edilmiştir. Şekil 10, NGC3379, NGC4472, NGC4552 ve NGC4649 için nokta kaynak taraması sonucunu göstermektedir.



Şekil 10: Eliptik galaksilerin tayf seçim alanları ve nokta kaynakların yerleri.

Eşleşme sonucunda toplam 6412 kaynak birden fazla gözlemde tespit edilmiş ve nokta kaynak adayı olarak belirlenmiştir. Her bir kaynağın spektrumunun elde edilebilmesi için kullanılan her gözlemin açık olan ccd'lerinin her biri için boş bölgeler belirlenmiş ve buradan itibaren aday background bölgeleri seçilmiştir. Bu işlem sonucu belirlenen background bölgelerinin, wavdetect ile tespit edilen her bir kaynaktan wavdetect ile belirlenmiş yarıçapının iki katı kadar uzakta olması ve 70 piksel büyüklüğünde olması kriterleri uygulanmıştır. Background tespitinin ardından CIAO yazılımının içinde bulunan specextract

komutu yardımıyla belirlenen 6412 olası nokta kaynak için spektrum elde edilmeye çalışılmıştır. Bu işlem sırasında yeterli sinyal gürültü oranına sahip spektrumlar elde etmek için kaynakların toplam count sayılarının en az 150 count olması sınırı getirilmiş ve wavdetect'in tespit ettiği kaynakların içinden yarıçapları negatif olanlar (muhtemelen chip boşlukları ve benzeri anormal bölgelerde programın hatalı tesbitleri) atılmıştır. Bu sınırlamalar sonucunda çalıştırılan specextract sonucunda elde edilen spektrumlar sherpa programı ile 'tbabs*tbabs*power-law' modeli uygulanarak modellenmiştir.



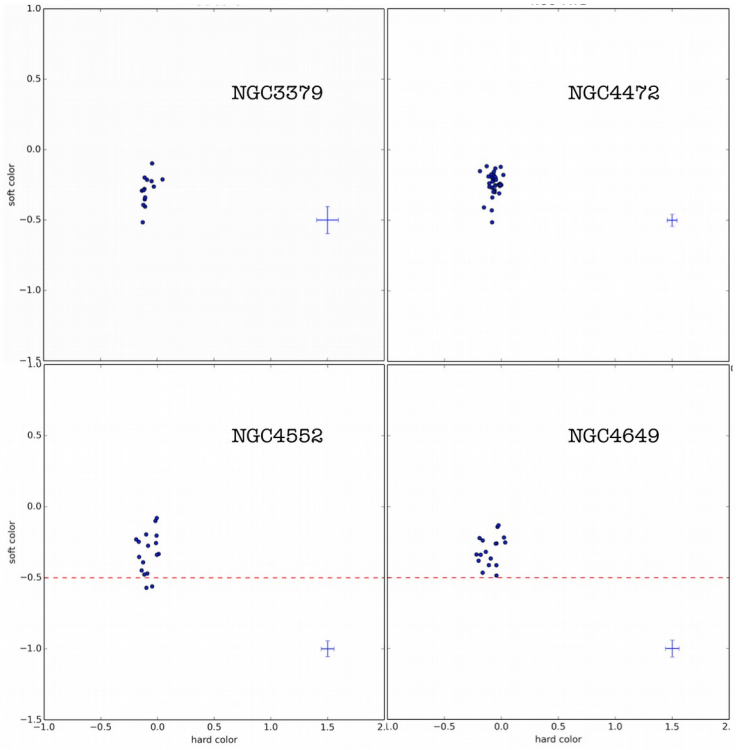
Şekil 11: Her bir galaksiye ait nokta kaynaklardan birinin tbabs*tbabs*pow modeliyle fit edilmiş örnek spektrumları.

Örnek bir modelleme işlemi Şekil 1'de verilmiştir. Bu uygulamada, galaksi doğrultusundaki Samanyolu'na ait kızarma değeri Kalberla ve diğ. (2005) haritalarından bölge ağırlıklı ortalaması olarak alınmıştır. 1019 tane kaynağın spektrumları bu şekilde modellenerek her bir kaynağın kendi bulunduğu galaksideki Hidrojen kolon yoğunluğu, soğurulmadan arındırılmamış akı, foton indeksi, ve bu parametrelerin hataları ile ilgili istatistik bilgiler (chi2, dof) elde edilmiştir.

Elde edilen 1019 tane kaynağın gözlenen galaksilere ait olup olmadığını tespit edilmek için galaksilerin optik bölge gözlemlerinden itibaren bulunmuş büyük eksen uzunlukları literatürden (NED veri tabanından $2xR_{25}$ alındı) elde edildi. İşleme ait örnek görsel Şekil 2 ile verilmiştir. Elde edilen büyük eksen uzunları ve galaksilerin merkezi koordinatları kullanılarak her bir galaksinin gökyüzünde kapladığı bölge tespit edildi ve bu bölgenin içine düşen 826 tane kaynak galaksilerinin aday üyesi olarak belirlendi. Bu seçim sonucunda çalışacağımız galaksiler aday kaynak sayısına göre belirlendi. Bunun yanı sıra optik görüntülerine bakılarak yakınlarında başka galaksiler bulunan bazı galaksiler elendi. Çalışacağımız galaksiler sırasıyla; NGC 4472, NGC 5128, NGC 4649, NGC 3379 ve NGC 4552 olarak belirlenmiştir.

Belirlenen Galaksiler ve Galaksilere ait aday nokta kaynakların gerçek birer kaynak olup olmadığı anlaşılması için, her bir kaynağın CIAO programı içinde bulunan "*srcflux*" betiği yardımıyla kaynağa ait x-ışınlarında *soft (0.5-1.2 keV)-medium (1.2-2.0 keV)-hard (2.0-7.0 keV)* bantlarında soğrulmamış akı değerleri hesaplanmıştır. Bu akı değerleri yardımıyla Prestwich ve diğ. (2003) tarafından soft color=(m-s)/(h+m+s) ve hard color=(h-m)/(h+m+s) şeklinde tanımlanan x-ışını hard ve soft renkleri hesaplanmıştır. Hesaplanan renklere göre kaynaklar renk-renk (Prestwich ve diğ., 2003) diyagramına konularak Galaksi içindeki popülasyonları tayin edilmiştir. Şekil 12, NGC3379, NGC4472, NGC4552 ve NGC4649 galaksilerindeki nokta kaynaklar için oluşturulan renk-renk diyagramlarını göstermektedir.

Bu popülasyon tayininin anlatıldığı çalışma, 9-11 Mayıs 2016 tarihleri arasından İspanya, Madrid'te XMM-NEWTON: THE NEXT DECADE çalıştayında bursiyer araştırmacımızın Duygu DURMUŞ (İst.Üniv) tarafından poster olarak sunulmuş ve hakemsiz çalışma olarak NASA ADS veri tabanında indekslenmiştir.

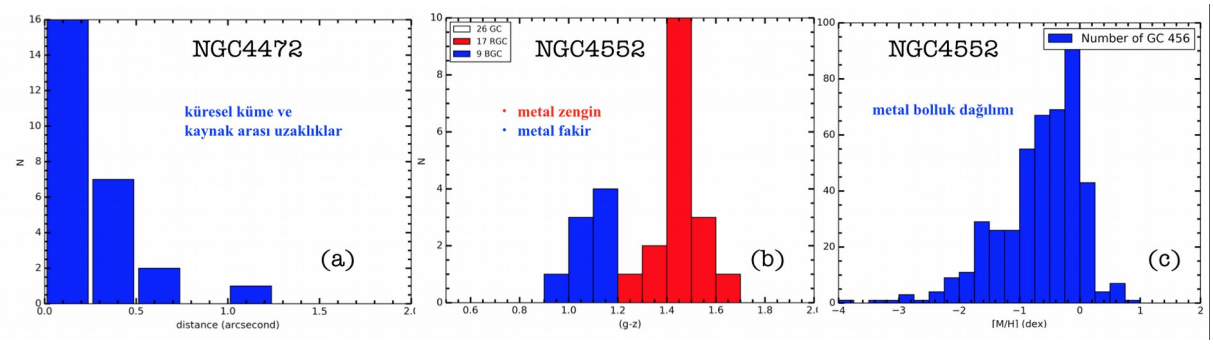


Şekil 12: NGC3379, NGC4472, NGC4552 ve NGC4649 Renk diyagramları.

3.3 Nokta Kaynakların Küresel Kümelerle İlişkileri

Galaksilerin X-ışın popülasyonu araştırıldıktan sonra bu popülasyona dahil olan LMXB'lerin (düşük kütleli X-ışın çiftleri) Virgo Galaksi Kümesindeki 7 galaksideki küresel kümeler ile ilişkisi incelenmiştir. Bu 7 galaksinin 3'ü projenin başlangıcında önerilen galaksiler olup diğerleri daha sonra yapılan çalışmalar ile verisinin kullanılmasına karar verilmiş galaksilerdir.

Bu çalışma için, 7 galaksinin Chandra uydusundaki en uzun poz süreli gözlemleri kullanılmıştır. Her bir galaksiye ait X-ışın kaynakları yukarıda değinilen yöntemler ile tespit edilmiştir. Bu galaksiler için Hubble Uzay Teleskobu kullanılarak yapılan ACS Survey (Jordan, 2009) kataloğunda belirlenmiş küresel kümeler ile tespit edilen X-ışın kaynakları eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme için Chandra uydusu ile elde edilen gözlemlerin astrometrilerinin kontrolü ve mümkünse geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Chandra uydusunun kılavuzlarında bulunan programlar (**wcs_match**), Hubble uydusu verileri referans olarak alınarak kullanılmış ve Chandra görüntüleri Hubble uydusu verilerine göre astrometrik olarak kalibre edilmiştir. Bu çalışma sonucu eşleşen X-ışın kaynakları ile optik kaynaklar arasındaki uzaysal açıklığın histogramı örnek galaksilerden olan NGC 4552 için Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 13: NGC 4452 Galaksisindeki X-ışın kaynaklarıyla eşleşen küresel kümelerin X-ışın kaynaklarından olan uzaklığı gösterilmektedir. (b) NGC 4552 galaksisinin X-ışın kaynakları ile eşleşen küresel kümelerin metalce zengin ve metalce fakir olmak üzere ayrımı gösterilmiştir. (c) NGC 4552 galaksinin optik kataloğunda bulunan küresel kümelerin metal bolluğu dağılımı gösterilmiştir.

Görülebileceği üzere, en fazla eşleşme 0.0-0.2 yay saniyesi mesafede olmakta ise de daha büyük mesafelerde de eşleşen kaynaklar bulunmaktadır. Bu eşleşmelerin ne kadarının tesadüfi olduğunu anlamak amacıyla farklı bir test daha geliştirilmiştir. Toplamda 100 kez olmak üzere, optik bölgede tespit edilmiş küresel kümelerin koordinatları rastgele adımlar ile (2-8 yay saniyesi aralığında Gaussian bir dağılım izleyerek) değiştirilmiş ve her bir durumdaki eşleşmeler kontrol edilmiştir. Koordinatların baştan rastgele şekilde değiştiği durumdaki eşleşmeler hep tesadüfi olacağından, bu farklı durumlardaki eşleşmelerin ortalamaları bize oluşan eşleşmelerin ne kadarının şans eseri olacağını göstermektedir. Çıkan sonuç küresel kümeler ile X-ışın kaynaklarının eşleşmesinde rastlantısal eşlemenin miktarını göstermektedir. Bu durum Şekil 13-a'da örnek galaksi NGC 4552 için gösterilmiştir.

Sonuçta eşleştirilen kaynaklar ile küresel kümeler arasındaki ilişki, küresel kümelerin metal bolluğu ile X-ışın kaynaklarının sayısının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Bu analiz düşük kütleli x-ışın çiftlerinin metalce zengin (kırmızı) veya metalce fakir küresel kümelerdeki sayılarının belirlenmesi ve X-ışın çiftlerinin oluşum ortamları ve evrimsel süreçleri hakkında yorum yapılabilmesi için gereklidir. Ayrıca ileriki aşamalarda, seçili örnek içindeki galaksiler farklı Hubble morfolojik sınıflamasından olduğundan, X-ışın kaynaklarının metalce zengin veya metalce fakir küresel kümelerde farklı sayılarda bulunması durumu galaksilerin morfolojik sınıflarına da bağlı olarak incelenecektir.

Küresel kümelerin metal bolluğu Hubble verilerinde bulunan u, g, r, i, z bantlarından metal bolluğuna aşağıdaki bağıntı ile dönüştürülmüştür (Peng ve diğ. 2006).

$$[Fe/H] = -6.21 + (5.14 \pm 0.67)(g_{475} - z_{850}),\ eğer\ 0.70 < (g_{475} - z_{850}) \leq 1.05,$$
$$[Fe/H] = -2.75 + (1.83 \pm 0.23)(g_{475} - z_{850}),\ eğer\ 1.05 < (g_{475} - z_{850}) < 1.05,$$

Metalce zengin olan küresel kümelerin geneli kırmızı küresel küme ve metalce fakir olan küresel kümelerin geneli ise mavi küresel küme olarak adlandırılır. Şekil 13-b'de NGC 4552 galaksisinin küresel kümeler ile eşleşen X-ışın kaynaklarının kümenin rengine bağlı ayrımı gösterilmiştir. Şekil 13-c'de ise NGC 4552 galaksisinin küresel küme metal bollukları gösterilmiştir.

Galaksilerdeki kümeler ile eşleşen X-ışın kaynaklarında galaksiler arasında morfolojik olarak bir trend olup olmadığını anlamak için bir orana ihtiyaç vardır. Bu orana R denmektedir. R oranı, galakside optikte tespit edilen kırmızı küresel kümelerin sayısı ile kırmızı küresel kümelerde tespit edilen X-ışın kaynaklarının oranı ve aynı hesabın mavi küresel kümeler için yapılması sonucu elde edilen değerin oranıdır. Denklem formunda,

$$R = \frac{(K_{kk}/K_X)}{(M_{kk}/M_X)},$$ (Kim et al, 2013)

Proje bursiyeri Duygu Durmuş'un 2018 Haziran ayında tamamlanması düşünülen yüksek lisans tez çalışması burada sunulan çalışmaların daha geniş bir halini içerecektir.

Tablo 6: Galaksilerin R-B parlaklık değerleri

Galaksi Adı	Galaksi Tipi	R oranı	R hata	Eşleşen kaynak sayısı	Yanlış eşleşme ihtimali	Optikde R küresel küme sayısı	Optikde B küresel küme sayısı	R KK	B KK
NGC 4486	E0	2.48	1.21	29	10.04	891	702	22	7
NGC 4472	E2/S0(2)	3.96	0.88	57	8.51	436.0	324.0	48	9
NGC 4365	E3	2.95	0.58	36	4.60	453.0	446.0	27	9
NGC 4621	E4	5.21	0.98	13	1.35	151.0	143.0	11	2
NGC 4473	E5	2.63	1.09	5	1.38	90	137	4	1
NGC 4552	S0(0)	2.06	0.30	26	2.11	237	217	17	9

NGC 4649	S0(2)	4.02	0.72	29	3.17	445	335	47	9

4 PLAZMA TAYF ANALİZLERİ

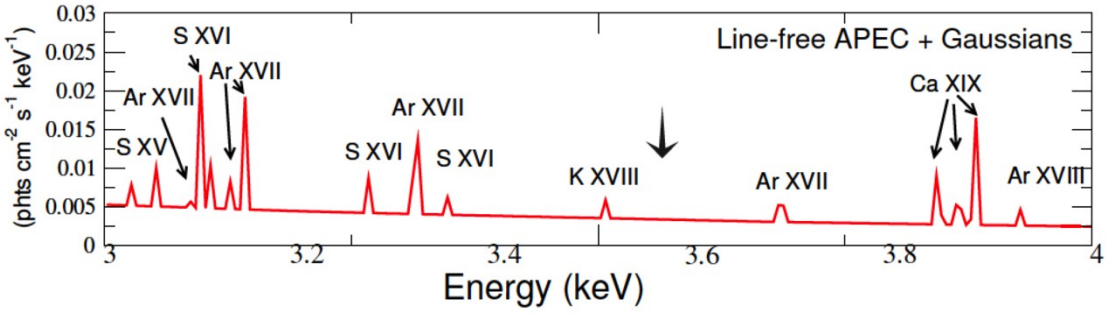
4.1 Giriş

XMM-Newton verileri için SAS, Chandra verileri için ciao, ve SUZAKU verileri için Xanadu, ftools analiz paketleri kuruldu. Veri temizlemede rutin işlemler yapıldı. Öncelikle ışık eğrileri alınarak, solar parlama veya piksek patlaması sonucu oluşan hatalı sinyaller temizlendi. İyi zaman aralığındaki (GTI) veriler alınarak temizlenmiş event dosyaları elde edildi. Bu sayılan işlemler, bütün X-ray verilerine uygulanan ve proje ekibimizin de tecrübeli olduğu, daha önceki 113F117 proje raporunda da detaylı olarak anlatılan sıradan işlemlerdir. Bu yüzden detaylı olarak uzun uzadıya anlatılmadı.

4.2 Yöntem ve Analiz

X-ray verileri ilk olarak tek tek, ikinci olarak da istiflenmiş olarak spektral analiz edilmesi planlandı. Tayf modellemelerinde arka alan ışıması, aynı gözlemden (hatta aynı chip) değil, özel olarak hazırlanmış arka alan ışıması event dosyalarından alınacaktır. Ancak arka alan analizi yöntemi Andromeda verileri üzerinden tekrarlanarak Boyarsky vd (2014) sonuçları ile kıyaslanacaktır.

Verilerin tek tek tayf modellemesinde bir karışıklık olmayıp, rutin işlemleri içermektedir. Ancak veri istiflerken dikkatli olmak gerekir. Özellikle 0.3-8 keV enerji aralığı birçok atomik çizgi ışımasının yer aldığı bölgedir. CCD detektörlerin yakalayabildiği bu çizgi ışımalarının başlıcaları; Al xiii (2.05 keV), Si xiv (2.01 keV and 2.51 keV), Si xii (2.18 keV, 2.29 keV, and 2.34 keV), S xiv (2.62 keV), S xv (2.45 keV, 2.88 keV), Ar xvii (üçlü 3.12 keV, 3.62 keV, 3.68 keV), K xviii (3.47 keV and 3.51 keV), K xix (3.71 keV), Ca xix (3.86 keV, 3.90 keV, 4.58 keV), Ar xviii (3.31 keV, 3.93 keV), Ca xx (4.10 keV), Cr xxiii (5.69 keV), Fe xxiv (6.62 keV), Fe xxv (6.70 keV, 8.29 keV, 7.81 keV, 7.88 keV), Fe xxvi (6.95 keV, 8.3 keV, and 8.70 keV), ve Ni xxvii (7.79 keV). Şekil 14 salınım çizgilerinin tayf modelindeki yerlerini ve 3.5 keV çizgisinin bu bütündeki yerini göstermektedir.



Şekil 14**:** 3-4 keV arasındaki element çizgi salınımları ve 3.5 keV ışımasının bütündeki yeri

Spektral analizde enerj aralığına bir alt enerji sınırı getirilebilir, çünkü 2 keV altında bolca salınım çizgisi vardır ve bu alan hidrojen sütun soğurulmasına maruzdur. 2 keV altında görülen kuvvetli çizgiler Ne x (1.21 keV), Fe xxiv (1.55 keV), Mg xii (1.74 keV), and Si xii (1.86 keV)dir. Chandra'da hiç bir sorun olmamakla beraber, XMM-Newton enerji çözünürlüğü yaklaşık 100eV'dir ve bu aralıkta olabilecek sıra dışı bir ışımayı çözmeye yeterli değildir. Veriler istiflerken, farklı (kırmızıya-kayma) uzaklıktaki kaynaklardan gelen en bariz salımım çizgisi –örneğin Fe- referans alınarak z=0 kırmızıya kayma değerine taşınır. Aynı uzaklığa taşınan X-ray sayımları, FTOOL *mathpha* yardımı ile toplanır. Bu taşıma ve istifleme yöntemi ile, zayıf olan bir ışıma güçlendirilir ve kombine edilmiş tayfta tespit edilmesi kolaylaşır. İstifleme yönteminin detayları Bulbul vd. (2014)de anlatılmıştır. Şekil 5, Perseus kümesi XMM-Newton tayfı üzerinde belli başlı çizgi salınımlarının yerlerini göstermektedir. Sağ tarafta ise, gözlenen sayımlardan, devamlı ve aralıksız bir termal ışınım modeli çıkarıldıktan sonra geriye kalan sayımları göstermektedir (Werner vd. 2006). Gaussian çizgi salınımları çok net olarak ayırt edilmektedir.

4.2.1 Yöntem Doğrulama: Arka Alan Testi

Geniş plazma tayf modellemeleri aşamasına girmeden önce, yöntemin doğrulamasını yapmak istedik. Bu amaçla 3.5 keV ışımasının tespit edildiği Boyarksky et. al. (2014) makalesinde detaylı olarak anlatılan Andromeda verilerini tekrar analiz ettik. Makalede nokta kaynakların ayıklanıp ayıklanmadığı, yada arka alanın etkilerinin ne şekilde değerlendirildiği ve modelleme çok detaylı şekilde anlatılmamaktadır. Bu sebeple farklı kombinasyonlarla 3.5 keV ışıması yakalanmaya çalışıldı.

Obs ID	Offset(arcmin)	Exposure time(s)
0405320501	0.02	21913
0405320701	0.02	15918
0405320801	0.02	13913
0405320901	0.02	16914
0505720201	0.02	27541
0505720301	0.02	27219
0505720401	0.02	22817
0505720501	0.02	21818
0505720601	0.02	21915
0551690201	0.02	21916
0551690301	0.02	21918
0551690501	0.02	21912
0600660201	0.02	18820
0600660301	0.02	17316
0600660401	0.02	17216
0600660501	0.02	19715
0600660601	0.02	17317
0650560201	0.02	26921
0650560301	0.02	33415
0650560401	0.02	24316
0650560501	0.02	23917
0650560601	0.02	23918
0674210201	0.02	20917
0674210301	0.02	17317
0674210401	0.02	17317

Tablo 7**:** Boyarsky 2014'de kullanılan Andromeda gözlem verileri listesi

Analiz aşamalarından en kritiği ve sonuçlara etkisi en yüksek olanı arka alan ışımasıdır. Bu tayfsal analizlerin önemli bileşenlerinden biridir ve geleneksel olarak üç şekilde yapılmaktadır; (1) arka alanın modellenmesi, (2) lokal arka alan ve (3) boş uzay alanlarından belirlenen arka alan ışımalarıdır.

Bunlardan ilki, gelen ışımayı herhangi bir süzgeçten geçirmeyip doğrudan tayf üzerinden background tahmini yapıp modellemektir. Elde edilen sayımlar kaynaktan gelen ve arka alandan gelen ışımaları içerdiği için plazma modellemesine arka alandan beklenen plazma ışımalarına eklenerek tahmin edilmesi yöntemidir. İkincisi, araştırılmak istenilen kaynak civarında uzaysal bir alan belirleyip bunun spektrumunu toplam spektrumdan çıkarmaktır. Bu genellikle aynı gözlem verisi içerisinde, kaynak seçilen alan dışından arka alanı temsil edecek halka (annulus) seçilmesidir. Kaynak ışımasından, arka alan ışıması sayımları çıkartılıp geriye kalan ışıma kaynak ışıması olarak modellenir. Üçüncü yöntem ise boş alan (blank-sky) gözlemleri adı verilen veri setleriyle kaynağa yakın bölgelerdeki görece boş alanlardaki verileri kullanmak ve ikinci yöntemdeki gibi toplam spektrumdan çıkarmaktır.

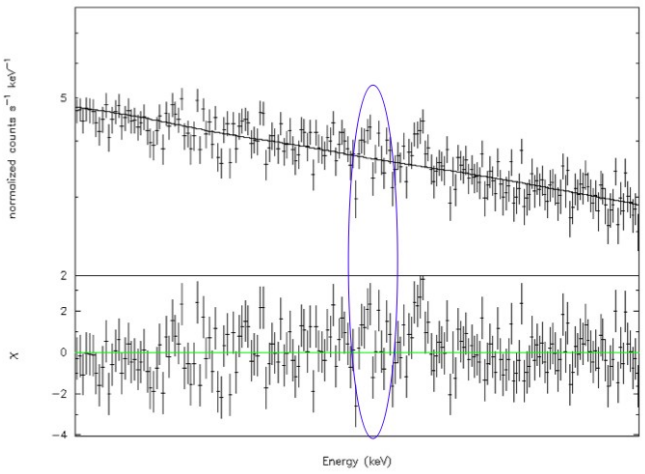
Öte yandan, analiz işlemleri, farklı gözlemlerden elde edilen foton sayımlarının eklenmesi işlemi teorik hesaplamaların kodlanmış hallerinden başka bir şey değildir. Her ne kadar kullanılan teoriler aynı ve/veya benzer olsa da istatistiksel yaklaşım farklılıkları, programlama yöntemleri, sabit seçimleri vb. birçok parametrelerin farklı kullanıldığı fakat en temelde aynı işlemi yapan analiz yöntemleri mevcuttur.

Boyarsky et. al. (2014), XMM-Newton uydusunun farklı gözlemlerinden gelen spektrumları birleştirmek için **addspec** yöntemini kullanmış, arka plan ışımasını ise tayf üzerinden doğrudan modellemiştir. Bu aşamada, aynı veri setlerini ve ön analiz işlemleri tekrarlandıktan sonra, yöntemlerin sonuca etkisini belirlemek amacıyla Boyarsky'nin kullanmadığı arka plan seçimleri ve tayf birleştirme yöntemlerinin kombinasyonları yapılarak, benzer ışımanın gözlenip gözlenmediğini test çalışmasında tartışıldı.

Blank sky arka planı ve temizlenmiş event dosyalarından elde edilen görüntülerden seçilen arka plan olmak üzere analizlerde iki farklı arka plan kullanıldı. Arka plan parlama kirlilik kriterini geçen pn kamera gözlemlerinin yalnızca 8 tane olmasından dolayı analizlerinde pn gözlemlerinin kullanmayan Boyarsky, sadece MOS1 ve MOS2 kameralarındaki gözlemleri kullanmıştır. Çalışmanın aynen tekrarlanması ve yöntemlerin doğru sonuçlandırılması

amacıyla bu çalışmada sadece Boyarksky'nin kullandığı gözlemler kullanılmıştır. Tablo-2'de analizi yapılan gözlem verileri gösterilmiştir.

Spektrumları birleştirmek için ise, tayf dosyalarını birleştiren ***epicspeccombine*** (tek tek elde edilmiş tayf dosyalarını tek bir spektrumda birleştiren yöntem) ile doğrudan event dosyalarının birleştirip tek bir birleştirilmiş event dosyasından tayf oluşturmamıza olanak tanıyan ***merge*** komutları kullanıldı. Bu yöntemlerin farkı event dosyalarının önceden birleştirilmesi ve sonradan tek bir tayf dosyası setinin (pi, arf, rmf) oluşturulması yada ayrı event dosyalarından oluşturulan tayf setlerinin tek bir dosyada birleştirilmesi şeklinde özetlenebilir.



Şekil 15**:** MOS1 epicspeccombine yöntemi 3-4 keV enerji aralığı tayfı.

Yöntemler ve arka planlar birbiriyle karıştırılıp elde edilen tayflardaki ışıma çizgilerine bakıldığında Tablo 3'deki sonuçlar elde edildi. Bu çalışmaya göre Boyarsky 2014 çalışmasına en yakın sonuçları vermesi nedeniyle, en sağlıklı yöntemin epicspeccomine metodu ile x-ışını görüntüsünden seçilmiş bir arka plan alanı olduğu anlaşıldı. Hemen ardından ise event dosyalarının birleştirilmesiyle oluşturulan spektrum ve blanksky arka planının kullanıldığı yöntem gelmektedir. Sonuçlardan çıkan önemli iki nokta vardır: Bunlardan birincisi, yöntemlerde önerilen seçimlerin dışına çıkmak verimi düşürmektedir. İkincisi ise event dosyalarının birleştirilip bir spektrum oluşturulması yerine, tek tek event dosyalarından elde edilen spektrumların birleştirilmesi daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Buradaki gözlemler aynı alana baktığından farklı sonuçlar vermesi normal sayılabilir fakat uzayın farklı alanlarından gelecek response dosyaları (rmf, arf) farklı sonuçlar vereceğinden event dosyalarını birleştirmek yanlış sonuçlar doğurabilir.

Method	modelled spectrum	line(keV)	χ^2/dof
epicspeccombine	M1	3.55 ± 0.02	1153/1075
	M2	3.72 ± 0.23	1129/1094
	M1+M2	3.48 ± 0.23	1439/1193
	M1+M2 (simultaneously)	3.54 ± 0.02	2359/2175
epicspeccombine (blank sky background) -	M1	-	-
	M2	-	-
	M1+M2	-	-
	M1+M2 (simultaneously)	-	-
event merge (annulus background)	M1	3.53 ± 0.02	1176/1112
	M2	3.76 ± 0.07	1245/1122
	M1+M2	3.60 ± 0.04	1436/1193
	M1+M2 (simultaneously)	3.71 ± 0.07	2670/2240
event merge (blank sky background)	M1	3.54 ± 0.02	1727/1079
	M2	3.46 ± 0.20	1528/1149
	M1+M2	3.65 ± 0.05	1408/1193
	M1+M2 (simultaneously)	3.55 ± 0.15	2359/2176
event merge (epicspeccombine background)	M1	3.51 ± 0.20	1236/1079
	M2	3.62 ± 0.34	1228/1122
	M1+M2	3.52 ± 0.03	1434/1193
	M1+M2 (simultaneously)	3.57 ± 0.10	3014/2240

Tablo 8: Farklı analiz yöntemlerinden elde edilen ~3.50 keV'lik ışıma çizgileri

4.2.2 Tayfsal Modelleme

M31 (Andromeda) verileri ile yapılan yöntem doğrulaması çalışmasında Boyarsky vd. (2014) sonuçları ile kıyaslama yapıldı. 3.55 keV ışımasının yakalandığı en yakın sonuçlar, X-ışın görüntüsü içinden seçilen arka alan ışıması ile elde edildi. Ayrıca, bir kaynağa ait çoklu gözlemlere ait her bir 'event' dosyasının eklenerek çalışılması yöntemi değil, her gözlem için ayrı ayrı oluşturulan tayf dosyalarının (spec, rmf, arf, bgd) epicspeccombine komutu ile birleştirerek nihai olarak tek veri setinde toplanması yolu takip edildi. Bu yöntemle M31 verileri Boyarsky vd (2014) çalışmasında olduğu gibi 3.55 keV ışıması tespit edilmiş oldu.

Bu motivasyondan yola çıkarak başladığımız projemizin bu araştırma döneminde 4 eliptik galaksinin (M87 [NGC4486], NGC4472, NGC4278 ve NGC5044) uzun poz süreli gözlemlerine odaklandık.

kaynaklara ait gözlem log listelerini göstermektedir.

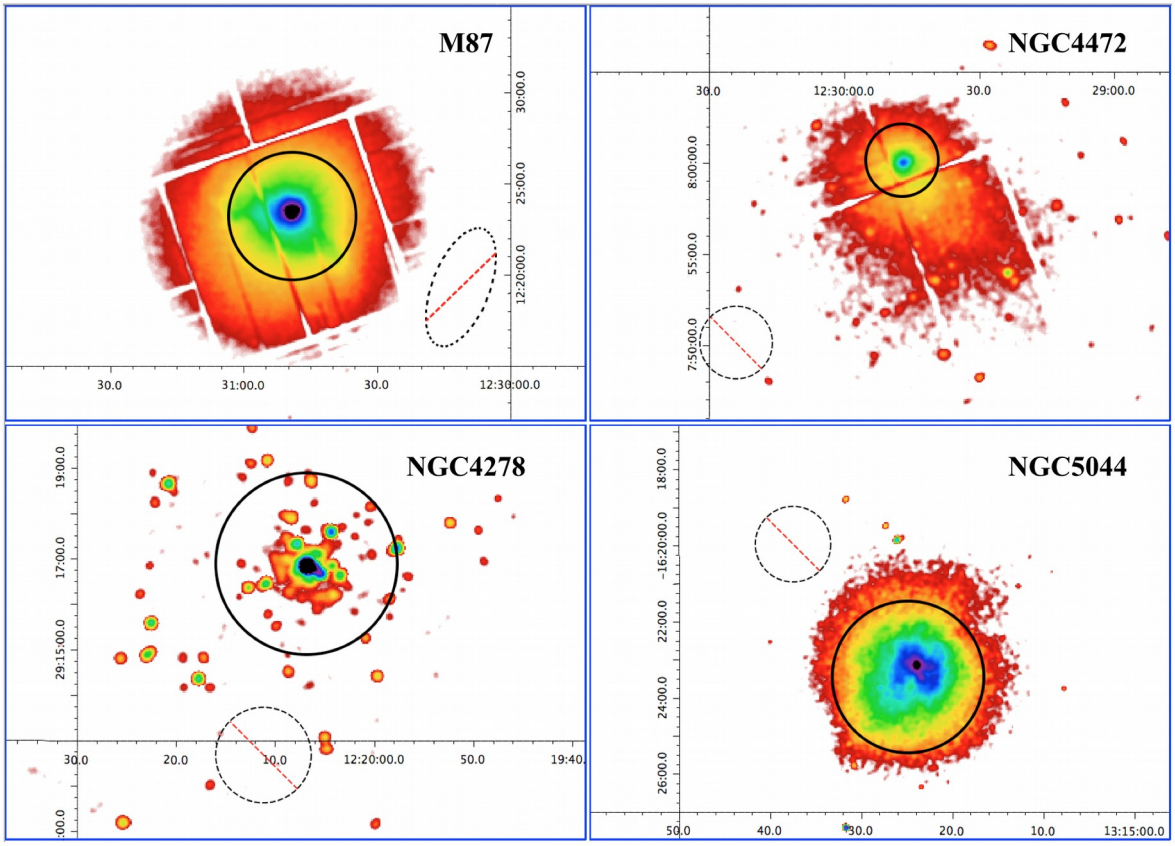
Tablo 9**:** Analizlerde kullanılan 4 eliptik galaksi arşiv verileri.

Object Name	Obs Id	Obs. Date	Exposure ks
M87	0200920101	2005-01-10	110
NGC 4472	0761630101	2016-01-05	118
NGC 4472	321	2000-06-12	40
NGC 4472	322	2000-03-19	10
NGC 4472	11274	2010-02-27	40
NGC 4472	12888	2011-02-21	160
NGC 4472	12889	2011-02-14	140
NGC 4472	15757	2014-04-18	30
NGC 4472	16260	2014-08-04	25
NGC 4472	16261	2015-02-24	23
NGC 4472	16262	2016-04-30	25
NGC 4278	4741	2005-02-03	37
NGC 4278	7077	2006-03-16	110
NGC 4278	7078	2006-07-25	51
NGC 4278	7079	2006-10-24	105
NGC 4278	7080	2007-04-20	56
NGC 4278	7081	2007-02-20	111
NGC 4278	11269	2010-03-15	82
NGC 4278	12124	2010-03-20	26
NGC 5054	798	2000-03-19	20
NGC 5054	3225	2002-06-07	83
NGC 5054	3664	2002-06-06	61
NGC 5054	9399	2008-03-07	83
NGC 5054	17195	2015-06-06	78
NGC 5054	17196	2015-05-11	89
NGC 5054	17653	2015-05-07	36
NGC 5054	17654	2015-05-10	26
NGC 5054	17656	2015-05-16	22

Verilere ilk rapor döneminde belirtilen dosya temizleme ve filtreleme rutinleri uygulandı. Galaksi içi plazma gazına odaklanmak amacıyla, alanda yer alan nokta kaynaklar temizlendi. Dönem içerisinde bazı yazılım programlarında sürüm güncellemeleri yapıldı. En son durumu özetleyecek olursak; kalibrasyon dosyaları için cifbuild-4.8observation data file, odfingest-3.30event production kullanıldı. Event dosyaları epchain-8.75.0 ve emchain-11.19ile oluşturuldu. Kaynak taramaları edetect chain-3.14.1ile yapıldıktan sonra srcmatch-3.18.1ile nihai listeler oluşturuldu. Tayfsal alan hesaplamaları evselect-3.62, backscale-1.4.2. Response dosyaları rmfgen-2.2.1ve arfgen-1.92.0,dosya birleştirmeleri epicspeccombine-0.1.3 sürümleri ile yapıldı.

Tayf çalışmalarında aynı gözlem içerisinden lokal arka alan ışımaları seçildi. Şekil-4 çalışan eliptik galaksilerin merkezi foton ve arka alan fotonlarının toplandığı bölgeler belirtilmiştir. Merkez bölgeleri

2.5-3 yay dakika değerlerindedir. Bunu belirlerken şekil-1'de bahsedilen merkezi karanlık-madde düzleşme profilinin seçtiğimiz alanın içinde kalmasına özen gösterdik.



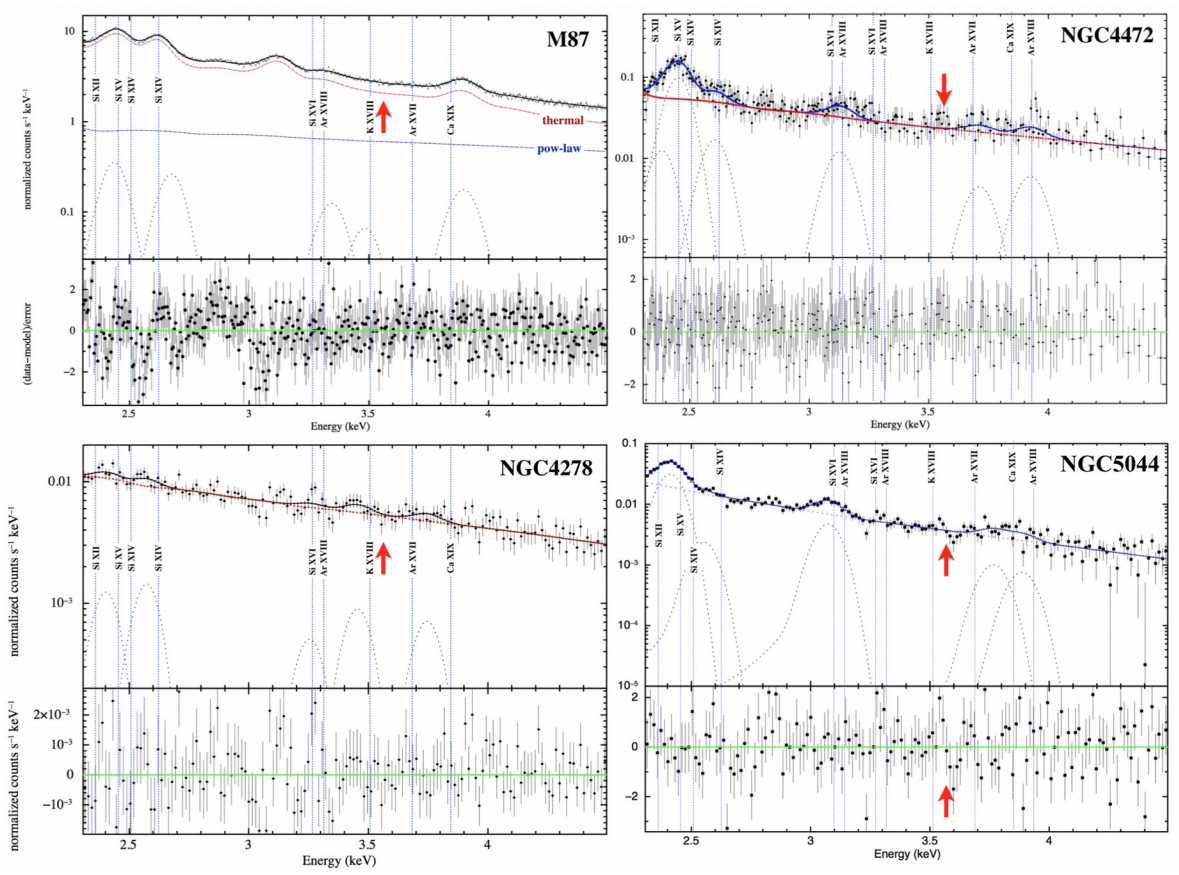
Şekil 16**:** M87, NGC4472, NGC4278, NGC5044 görüntüleri.

Her bir eliptik galaksi, 2.3-4.5 keV arasında (thermal, power law veya iki model aynı anda) sürekli-ışınım (continuum) model uygulandı. Birincil önceliğimiz bu enerji aralığında sürekli ışıma modelinden sapmalara odaklanmak, ve gauss çizgi salınım modeli ekleyerek veri ile uygulanan plazma modelinin kabul edilebilirliğini artırmak, dolayısıyla chi-kare değerini iyileştirmek. Chi-kare değeri kötüleşmeye bağladığı yerde, yani eklenen yeni gauss çizgisinin modellemeyi iyileştirmediği noktada duruldu.

X-ray ışınım aralığında bir çok element çizgisel salınımı ve aletsel floresan ışınımları bulunur. Bu aralıkta yer alan plazma ışımaları Tablo 10'de listelenmiştir. Salınım çizgileri ayrıca Hudaverdi 2017 (TJP)'de anlatılmıştır. Yapılması gereken, her aşamada modele eklenen gauss çizgisel salınımını var olan element ışınımları ile kıyaslayarak ilerleme olmalıdır.

Emission lines						Instrumental lines	
Energy [keV]	Line	Energy [keV]	Line	Energy [keV]	Line	Energy [keV]	Line
2.01	Si XIV	3.47[bc]	K XVIII	6.39[bc]	Fe K-α	1.49	Al K-α
2.05	Al XIII	3.51[bc]	K XVIII	6.70	Fe XXV	1.74	Si K-α
2.18[b]	Si XII	3.62[bc]	Ar XVII	6.62[b]	Fe XXIV	2.15[bc]	Au M-$\alpha\beta$
2.29[b]	Si XII	3.68[bc]	Ar XVII	6.95[b]	Fe XXIV	7.46	Ni K-α
2.34[b]	Si XII	3.71[bc]	K XIX	7.29[b]	Fe XXV	9.71[bc]	Au L-α
2.45[b]	Si XV	3.86[bc]	Ca XIX	7.79[b]	Ni XXVII		
2.51[b]	Si XIV	3.90[bc]	Ca XIX	7.81[b]	Fe XXV		
2.62[b]	Si XIV	3.93[bc]	Ar XVIII	7.88[b]	Fe XXV		
2.88[b]	Si XV	4.10[bc]	Ca XX	8.29[b]	Fe XXV		
3.12[bc]	Ar XVII	4.58[bc]	Ca XIX	8.30[b]	Fe XXVI		
3.31[bc]	Ar XVIII	5.69[bc]	Cr XXIII	8.70[b]	Fe XXVI		

Tablo 10**:** Bilinen ışıma çizgileri ve aletsel floresan ışınımları. Geniş[b] ve dar[c] aralık bütün çizgi salınımları eklenmiştir.



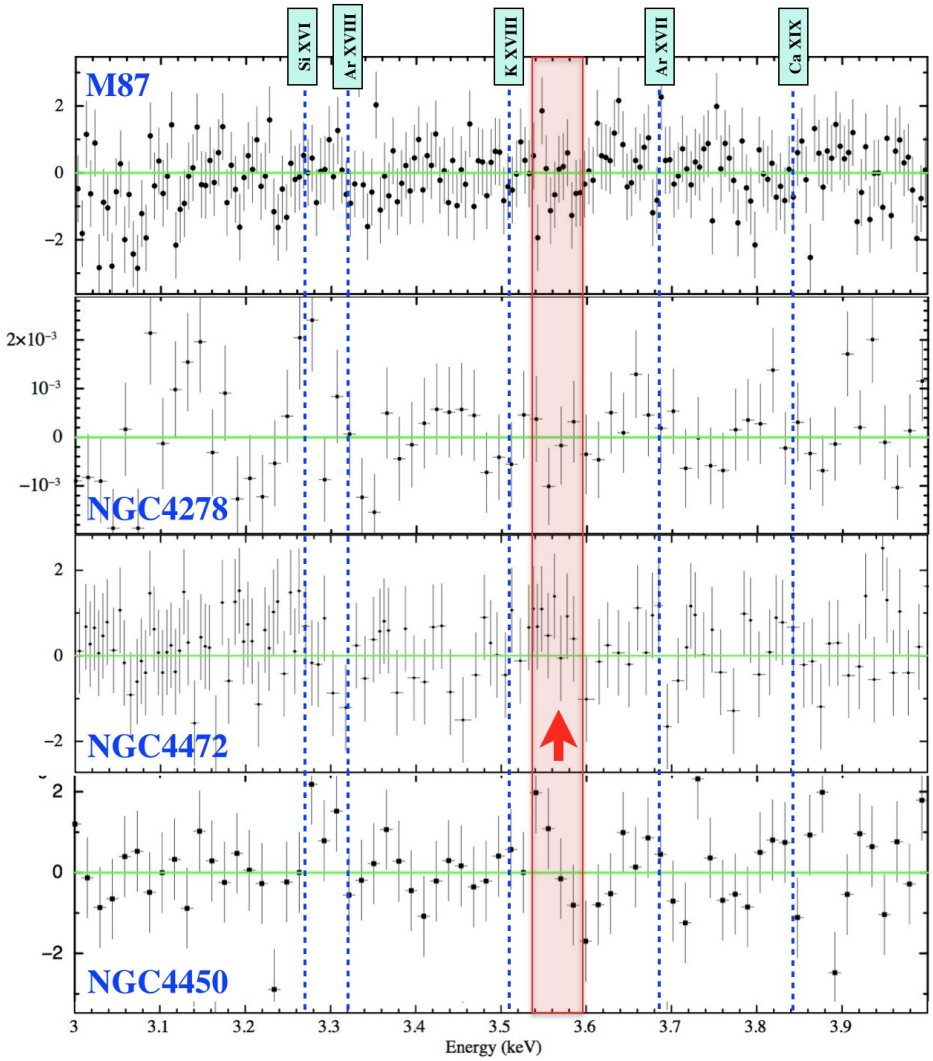
Şekil 17: Tayf modellemeleri (M87, NGC4472, NGC4278, NGC5044). Sürekli ışınım modeline, gauss çizgisel salınım modeli eklenerek fit gerçekleştirildi. Kırmızı ok 3.55 keV yerini belirtmektedir.

Tayfsal modellemeler 2.3-4.5 keV enerji aralığında gerçekleştirildi. Öncelikle sürekli-ışınım modeli fit edildi. Bundan sonra bir gauss çizgisel salınım modeli eklenerek, tayfsal modeldeki iyileşme (chi-kare) takip edildi. Eklenen gauss modeli, tayfsal fiti geliştirmediği, bir kötüleşmeye yol açtığı, eklenen gauss çizgisinin enerji hata aralıklarının genişlemeye başladığı noktada yeni bir model eklenmedi. Benzer türden bir yaklaşım Jeltema ve Profumo (2015) gökadamızın merkezinden gelen olası 3.5 keV ışıması taranmasında uygulanmıştır. Şekil-5 tayf modellemelerini eklenen gauss modelleri ile birlikte göstermektedir. Aynı şekilde bilinen element çizgisel salınımlarının yerleri ve 3.55 keV enerjisi kırmızı ok ile belirtilmiştir. Modellemelere ait önemli parametreler; eklenen çizgilerin enerjileri, hata aralıkları ve modellemenin chi-kare (dof) değerleri liste halinde Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11**:** Her bir kaynak için eklenen çizgisel salınım model enerjileri ve chi-kare değerleri.

Source	Line (keV)	Line (keV)	Line (keV)	Line (keV)	Line (keV)	Line (keV)	Line (keV)	χ^2/dof = Reduced χ^2
M87	...	$2.44^{+0.01}_{-0.01}$	$2.67^{+0.04}_{-0.03}$	$3.35^{+0.04}_{-0.04}$	$3.48^{+0.19}_{-0.06}$	...	$3.89^{+0.02}_{-0.02}$	482.47 / 425 = 1.13
NGC4278	...	$2.41^{+0.56}_{-2.41}$	$2.57^{+0.05}_{-0.05}$	$3.26^{+0}_{-3.26}$	$3.46^{+0.05}_{-0.05}$	$3.75^{+0.11}_{-0.11}$	...	137.41 / 139 = 0.99
NGC4472	$2.38^{+0}_{-2.38}$	$2.45^{+0.14}_{-0.01}$	$2.61^{+5.39}_{-0.04}$	$3.13^{+0.03}_{-0.03}$	...	$3.71^{+0.10}_{-0.12}$	$3.92^{+0.04}_{-0.05}$	335.08 / 363 = 0.92
	$2.38^{+0}_{-2.38}$	$2.45^{+0.14}_{-0.01}$	$2.61^{+5.39}_{-0.04}$	$3.13^{+0.03}_{-0.03}$	$3.56^{+0}_{-3.56}$	$3.71^{+0.10}_{-0.12}$	$3.92^{+0.04}_{-0.05}$	334.07 / 360 = 0.93
NGC5044	...	$2.41^{+0.002}_{-0.002}$	$2.55^{+0.03}_{-0.03}$	$3.07^{+0.02}_{-0.01}$	...	$3.76^{+0.06}_{-0.05}$	$3.88^{+0.08}_{-0.07}$	153.44 / 138 = 1.11

Modelleme sırasında gauss çizgisel salınım modeli eklendiğinde, enerji aralığı serbest parametre olarak 3.55 keV girilmiştir. Ancak bu işlem 5~6 kere tekrarlanarak gauss eklenmiş olsa da, eklenen modeller Şekil 17'de görülen ve Tablo 11'de listelenen enerjilere gittiler.

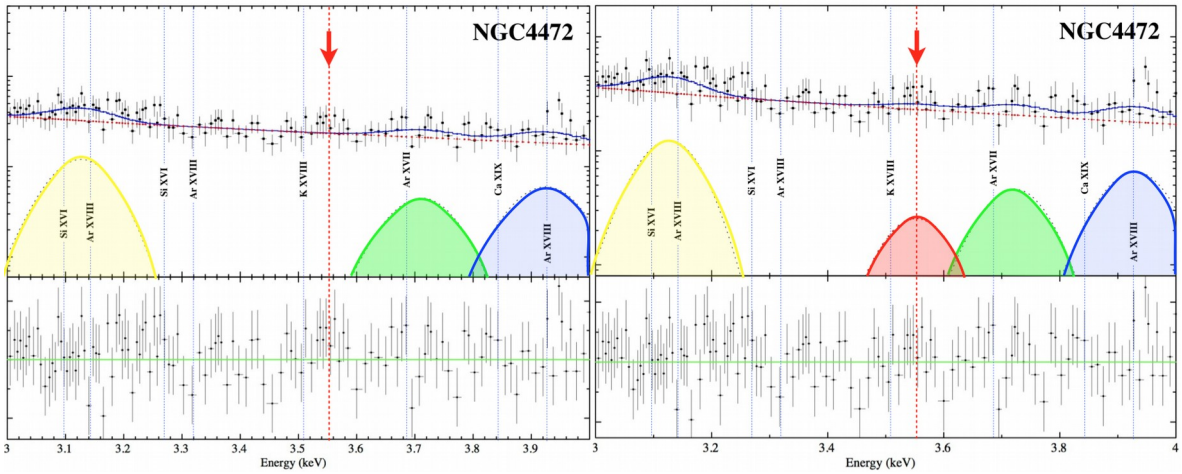


Şekil 18**:** Elipik galaksilerde 3-4 keV arası, veri ile uygulanan modellemeler arası sapmalar. Kırmızı sütün 3.5 keV bölgesini göstermektedir.

Bütün eklenen gauss modellerinden sonra, 3-4 keV aralığında modelden olan sapmalara baktık. Şekil 18 her kaynak için model ve veri arasında oluşan farkı göstermektedir. Kırmızı ile belirtilen alan, asıl ilgilendiğimiz 3.5 keV bölgesidir. M87 ve NGC4278'de görsel olarak bir sapma yoktur. Ancak özellikle NGC4472'de ve kısmen de olsa NGC5044'de 3.5 keV civarı veri ile model arasında sapmalar mevcuttur.

4.2.3 NGC 4472

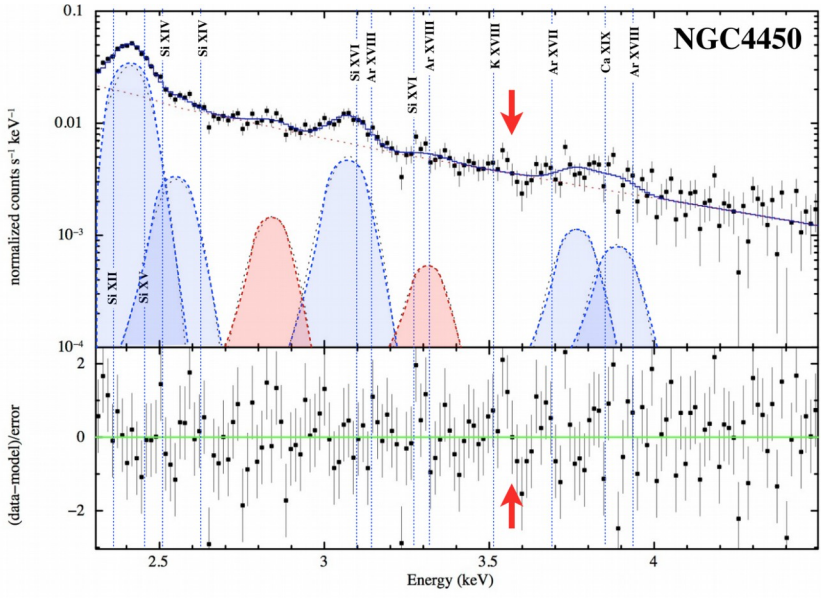
Kaynağın tayfsal analiz çalışmasında, 3-4 keV enerji aralığında 3 gauss çizgisel salınım modeli eklenmiştir. Bu gauss çizgileri Şekil 19'da, 3.13 keV (sarı), 3.71 keV (yeşil) ve 3.92 keV (mavi) enerjilerinde gösterilmiştir. Sol ve sağ panel arasındaki fark 3.55 keV enerjisine eklenen (kırmızı) gauss modelidir.



Şekil 19**:** NGC4472 galaksisi 3-4 keV arası tayfsal modellemesi ve eklenen gauss çizgisel salınım modelleri. 3.55 keV eklenmeden önce (sol-panel) ve eklendikten sonra (sağ-panel kırmızı alan) belirtilmiştir.

4.2.4 NGC 4450

NGC4450 merkezinde aktif çekirdek bulunmadığı için tek termal (continous) model olarak yeterli olmuş, ayrıca power-law eklenmeye gerek kalmamıştır. Bunun dışında sırasıyla ekleyerek ilerlediğimiz gauss çizgi ışımalarının hiç birisi 3.5 keV'ye uymamıştır. Görsel olarak 3.5 keV civarında modelden hafif bir sapma olsa da, yapılan tayf modellemesi çalışmamız, 3.5 keV eklenecek olan bir çizgi salınımının modellemeyi iyileştirmediğini göstermiştir. Şekil 20, NGC4450'de yapılan tayf modellemesini, eklenen gauss çizgi salınımlarını ve 3.5 keV değerinin yerini (kırmızı ok ile) göstermektedir.



Şekil 20**:** NG4450 veri setlerine ait, 3-4 keV aralığındaki birleştirilmiş spektrum

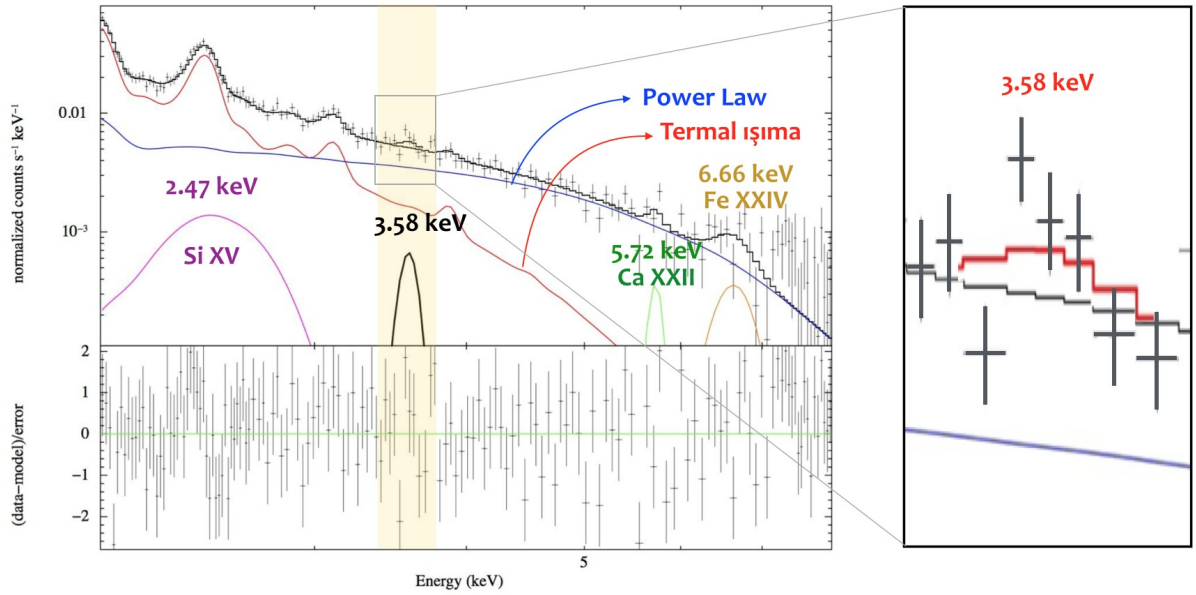
5 SONUÇ ve TARTIŞMA

5.1 Bulgular

Proje çalışmamızda pek çok eliptik galaksi incelendi ve gözlem süresi uygun olan M87, NGC4278, NGC5044 ve NGC4472 galaksilerinin geniş alan plazmasından gelen fotonları ile tayf modellemesi yapıldı. Yapılan çalışmada NGC4472 dışında bariz bir 3.5 keV ışıması tespit edilemedi.

5.2 NGC4472 Eliptik Galaksisi 3.5 keV ışıması

NGC4472'de bulunan kaynağı belirsiz steril nötrino karanlık madde ışıması 3.58±0.05 keV'de bulundu. İteratif olarak yapılan tayf modellemesi sonucunda tesit edilen gauss çizgileri şekilde gösterilmiştir. Şekil 21, galaksinin tayf modellemesinin 2-8 keV aralığını göstermektedir.



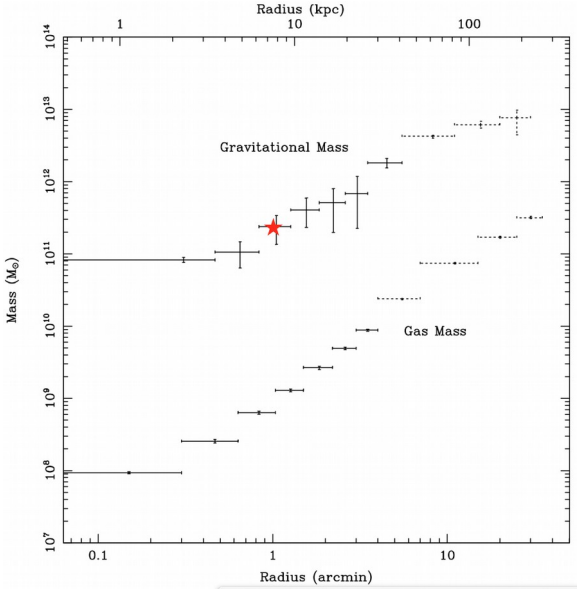
Şekil 21: NGC4472 tayf analizi ve 3.5 keV çizgisinin eklenmesi ile modelin iyileşmesi

Bu tayf çalışması eliptik galaksi merkezinden $r \leq 1\, yay\, dakikası$ içerisindeki foton sayımından elde edilmiştir. NGC4472 mesafesi için 1 yay dakikalık alan $r = 5.23\, kpc$ 'e karşılık gelmektedir. Şekil 21'de tayf çalışmasında uygulanan model, kırmızı termal model, mavi power-law ve diğer eklenen gauss çizgi salınımları enerjileri ile belirtilmiştir. Uygulanan model 2.47 keV Si XV, 5.72 keV Ca XXII ve 6.66 keV Fe XXIV gibi bilinen salınımlara ek olarak 3.58 ± 0.05 keV bilinmeyen bir salınım içermektedir. Bu çizginin eklenmesi modeli bariz bir şekilde iyileştirmektedir. Yine Şekil 21 sağ panelde, 3.5 keV çizgisi olmadan (siyah) ve çizgi eklendikten sonra (kırmızı) modelde olan iyileşmeyi göstermektedir.

NGC4472 tayf modellemelerinden yapılan tahminlerde 3.58±0.05 keV gauss çizgi ışıması hesaplanmıştır. Bu enerjideki akının üst limiti $1.70 \times 10^{-6}\, ph/cm^2/s$ olarak (Xspec tayf modelleme programıyla) hesaplanmıştır. Gözlemlenen bu ışıma $m_s = 7.1 keV$ steril nötrino parçacığından geliyorsa beklenen akı miktarı, kısım 2.4.1'de de anlatıldığı üzere formülden tahmin edilebilir;

$$F = \frac{\Gamma . M_{DM}^{fov}}{4 \pi d^2 . m_s}$$

Burada d kaynağın bize olan uzaklığıdır. NGC4472 eliptik galaksisi $d = 17.14\, Mpc$ mesafesinde yer alır. Yine formülde yer alan, M_{DM}^{fov}, görüş alanında bulunan toplam karanlık madde kütlesini ifade etmektedir.



Şekil 22: ROSAT verileri, NGC4472 gaz kütlesi $M_{gas}(r)$ ve karanlık madde kütlesi $M_{DM}(r)$ profili.

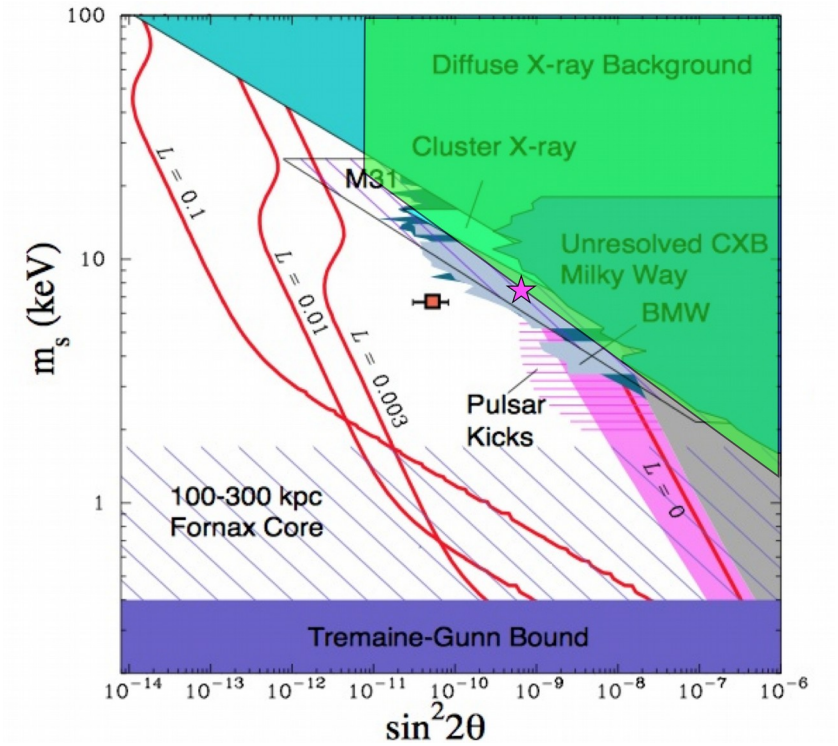
Yaptığımız çalışmada NGC4472 1 yay dakikalık alan içindeki fotonlar üzerinden çalışılmıştır. Bu alan içerisinde yer alan toplam karanlık madde kütlesi M_{DM}^{fov} daha önce küme üzerinde yapılmış optik (Cote vd 2004) ve X-ray ROSAT verileri (Irwin ve Sarazin, 1996) sonuçlarına göre tahmin edilebilir. Cote vd (2004) NGC4472'de yer alan 196 nokta kaynak ile yaptıkları çalışma sonucunda karanlık madde kütlesini yarıçapın fonksiyonu olarak tahmin etmişlerdir. Cote vd (2004 – 7. denklem) çalışmalarında bu fonksiyonu;

$$M_{DM}(r)=1.06\times10^{14}M_{\odot}\left[\ln\left(1+\frac{r}{196\,kpc}\right)-\frac{(r/196\,kpc)}{(1+r/196\,kpc)}\right]$$

şeklinde ifade etmektedir. Ayrıca Irwin ve Sarazin (1996) yaptıkları çalışmada gaz kütlesi $(M¿¿gas(r))¿$ ve karanlık madde kütlesi ($M_{DM}(r)$) tahmin edilmiştir. Oluşturulan grafik Şekil 22'de verilmiştir (Bkz Irwin ve Sarazin, 1996 makalesi Figure-7). Bu tespitlerden yola çıkarak, bu proje çalışmamızda NGC4472 eliptik galaksisi, 1 yay dakikalık ($r=5.23\,kpc$) görüş alanında bulunan toplam karanlık madde kütlesini $M_{DM}=2\times10^{11}M_{\odot}$ olarak hesapladık. Bu değer, Şekil 22 üzerinde kırmızı yıldız ile belirtilmiştir.

5.3 Eliptik Galaksilerde Kütle ve Karışım Açısı ($\sin^2(2\theta)$ vs m_s)

Yukarıdaki akı formülüne$\left(F=\Gamma.M_{DM}^{fov}/4\pi d^2.m_s\right)$ geri dönecek olursak, ve hesaplanan değerleri (flux $F=1.70\times10^{-6}\,ph/cm^2/s$, görüş alanımızdaki toplam karanlık madde kütlesini $M_{DM}=2\times10^{11}M_{\odot}$, NGC4472 mesafesi $d=17.14\,Mpc$ ve $m_s=7.1keV$) formülde yerlerine koyacak olursak, bozunum oranını $\Gamma=1.91\times10^{-27}s^{-1}$ olarak hesaplarız.



Şekil 23: Kütle ve karışım açısı var olan sınırlamalar (Bulbul vd 2014). Bu çalışmada hesaplanan NGC4472 değeri yıldız ile belirtilmiştir. Yeşil alan bu çalışmada tanımlanan sınırlamayı göstermektedir.

Yine kütleye bağlı olarak bozunum oranı formülünü göz önüne alacak olursak;

$$\Gamma = 1.38 \times 10^{-22} \sin^2(2\theta) \left[\frac{m_s}{1keV} \right]^5 s^{-1}$$

Değerler yerine konulduğunda, bu çalışmamızdan karışım açısı $\sin^2 2\theta = 7.67 \times 10^{-10}$ olarak elde edilir.

Sterile nötrino oluşum mekanizması olarak non-rezonans ve rezonans olmak üzere iki sentez önerilmektedir. Bunlardan basit olanı Dudelson ve Widrow tarafından (1994) ilgili çalışmalarında detaylı olarak anlatılmıştır. Karanlık madde kozmoloji yoğunluğuna, steril nötrino kütlesi ve karışım açısının bir fonksiyonu Kusenko vd (2009) tarafından tarafından tanımlanmıştır.

$$\Omega_s \sim 0.2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{3 \times 10^{-9}} \right) \left(\frac{m_s}{3keV} \right)^{1.8}$$

Yine aynı çalışma, şayet bütün karanlık maddeyi steril nötron olarak kabul edersek, karışım açısının $\sin^2 2\theta = 2.9 \times 10^{-9}$ olması gerektiğini tahmin eder. Bu proje çalışmamızda elde edilen $\sin^2 2\theta = 7.67 \times 10^{-10}$ buna göre çok küçüktür ve bütün karanlık madde miktarını açıklamada yetersizdir. Şekil 23, diğer çalışmalarla birlikte bu çalışmada hesaplanan kütle ve karışım açısı değerini (yıldız) ve NGC4472 ile getirilen sınırlamayı (yeşil alan) göstermektedir.

Sonuç olarak; Proje kapsamında çalışılan eliptik galaksilerde NGC4472'de görülen 3.5 keV ışıması dışında bariz bir salınım tespit edilememiştir. NGC4472de tespit edilen gauss salınımı akısı üzerinden yapılan hesaplamalarda; şayet bu salınım steril nötrino karanlık maddesi bozunumdan kaynaklanıyor olsa bile, beklenen karanlık madde karışım oranına göre 3.5 faktör kadar düşüktür ve açıklayamaz. Çalışmamız Şekil 23'te yeşil-alan ile gösterildiği gibi M31 ve Milkyway gibi diğer galaksilerden tespit edilen kısıtlamalarla kesişim gösteren bir sınırlama getirmektedir.

Hesaplamalarımızın doğrulamaları hala devam etmektedir. Sonuçların hakemli bilimsel makalede yayınlanması için derleme çalışmalarımız başlamıştır.

TÜBİTAK

Kaynaklar

Abazajian, K., Fuller, G.M.: Tucker, W.H. 2001. “Direct Detection of Warm Dark Matter in the X-Ray”, ApJ, 562:593-604.

Adhikari, R., Agostini, M., Anh Ky, N., Araki, T., vd. 2016. “A White Paper on keV sterile neutrino Dark Matter”, Cosmol. Astropart. P.

Asaka T., Blanchet S., Shaposhnikov M. 2005. “The νMSM, dark matter and neutrino masses”, Phys. Lett. B 2005, 631:151-156.

Barger,V., Phillips, R. J. N. ve Sarkar, 1995. “Remarks on the KARMEN anomaly”, S. Phys. Lett. B, 352:365-371.

Borriello, E., Paolillo, M., Miele, G., Longo, G., Owen, R. 2012. “Constraints on sterile neutrino dark matter from XMM-Newton observations of M33”, MNRAS, 425(3): 1628-1632.

Boyarsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskyi, D. J. 2009. “New evidence for dark matter”, Cosmol. Astropart. P. 2009, 3, 5-26.

Boyarsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskyi, D., Franse, J. 2014. “Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster”, Phys. Rev. Lett. 2014, 113(25).

Boyarsky, A., Franse, J., Iakubovskyi, D., & Ruchayskiy, O. 2015. “Checking the Dark Matter Origin of a 3.53 keV Line with the Milky Way Center”, Phys. Rev. Lett., 115.

Boyarsky, A., Lesgourgues, J., Ruchayskiy, O., Viel, M. 2009. “Realistic Sterile Neutrino Dark Matter with KeV Mass does not Contradict Cosmological Bounds”, Phys. Rev. Lett. 102(20).

Boyarsky A., Iakubovskyi D., Ruchayskiy O. 2012. “Next decade of sterile neutrino studies”, Phys. Dark Universe, 1:136-154.

Boyarsky, A., Ruchayskiy, O., Shaposhnikov. M. 2009. “The Role of Sterile Neutrinos in Cosmology and Astrophysics”, M. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 59:191-214.

Boyarsky, A., Neronov, A., Ruchayskiy, O., Shaposhnikov, M. 2006. “Constraints on sterile neutrinos as dark matter candidates from the diffuse X-ray background”, MNRAS, 370:213-218.

Boyarsky, A., Ruchayskiy, O., Iakubovskyi, D., Walker, M. G., vd. 2010. “Searching for dark matter in X-rays: how to check the dark matter origin of a spectral feature”, MNRAS, 407(2):1188-1202.

Bulbul, E., Hasler, N., Bonamente, M., Joy, M. 2010. “An Analytic Model of the Physical Properties of Galaxy Clusters”, ApJ, 720(2):1038-1044.

Bulbul, E., Markevitch, M., Foster, A., Smith R. K., Loewenstein M., Randall S. W. 2014. “Detection of an Unidentified Emission Line in the Stacked X-Ray Spectrum of Galaxy Clusters”, ApJ, 789:13.

Cappelluti, N., Bulbul, E., Foster, A., Natarajan, P., vd. 2017. “Searching for the 3.5 keV Line in the Deep Fields with Chandra: the 10 Ms observations.”, ArXiv e-prints, arXiv:1701.07932.

Chan, Man Ho. 2016. “Can decaying sterile neutrinos account for all dark matter?”, Astrophysics and Space Science, Volume 361.

Côté, Patrick; McLaughlin, Dean E.; Cohen, Judith G.; Blakeslee, John P. 2003 “Dynamics of the Globular Cluster System Associated with M49 (NGC 4472): Cluster Orbital Properties and the Distribution of Dark Matter” The Astrophysical Journal, Volume 591, Issue 2, pp. 850-877

Dodelson S. ve Widrow L. M. 1994. “Sterile neutrinos as dark matter”, Phys. Rev. Lett., 72:17-20.

Dodelson, S. ve Liguori, M. 2006. “Can Cosmic Structure Form without Dark Matter?”, Phys. Rev. Lett., 97(23).

Fall, S. M. 1979. “Dissipation, merging and the rotation of galaxies”, Nature, 281(5728): 200-202.

Griest, K. 1991. “Galactic microlensing as a method of detecting massive compact halo objects”, ApJ, 366:412-421.

Gunn J. E. and Gott J. R. 1972. “On the Infall of Matter into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution”, ApJ, 176:1-19.

Iakubovskyi, D. 2015. “Checking the potassium origin of the new emission line at 3.5 keV using the K XIX line complex at 3.7 keV”, MNRAS 2015, 453, 4097-4101.

Irwin A. J. ve C. Sarazin, 1996 “X-Ray Evidence For The Interaction Of The Giant Elliptical Galaxy Ngc 4472 With Its Virgo Cluster Environment”, ApJ, 471, 683E-693

Jeltema T. E., Profumo S. 2015. “Discovery of a 3.5 keV line in the Galactic Centre and a critical look at the origin of the line across astronomical targets”, MNRAS, 450:2143-2152.

Jordan, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Cote, P., vd. 2009. “The ACS Virgo Cluster Survey XVI. Selection Procedure and Catalogs of Globular Cluster Candidates”, The Astrophysical Journal Supplement, 180(1):54-66.

Jungman, G., Kamionkowski, M., Griest, K. 1996. “Supersymmetric dark matter”. Physics Reports, 267:195-373.

Kalberla, P. M. W., Burton, W. B., Hartmann, Dap, Arnal, E. M., Bajaja, E., vd. 2005. “The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI. Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections”, A&A, 440(2):775-782.

Klypin, A.A., Kravtsov, A.V., Valenzuela, O., Prada, F. 1999. “Where Are the Missing Galactic Satellites?”, ApJ, 522(1):82-92.

Komatsu, E., Smith, K. M., Dunkley, J., Bennett, C. L., vd. 2011. “Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation”, The Astrophysical Journal Supplement, 192(2).

Koyama, K., Hyodo, Y., Inui, T. 2007. “Iron and Nickel Line Diagnostics for the Galactic Center Diffuse Emission”, PASJ, 59(SP1):245-255.

Kusenko, A. 2009. "Sterile neutrinos: The dark side of the light fermions", Physics Reports,

481(1):1-28

Laine, M., Shaposhnikov, M. J. 2008. “Sterile neutrino dark matter as a consequence of νMSM-induced lepton asymmetry”, Cosmol. Astropart. P., 31.

Loewenstein, Michael ve Kusenko, Alexander. 2010. “Dark Matter Search Using Chandra Observations of Willman 1 and a Spectral Feature Consistent with a Decay Line of a 5 keV Sterile Neutrino”, ApJ, 714(1):652-662.

Macc’io A. V., Stinson G., Brook C. B., Wadsley J., Couch-man H. M. P., Shen S., Gibson B. K., Quinn T. 2012. “Halo Expansion in Cosmological Hydro Simulations: Toward a Baryonic Solution of the Cusp/Core Problem in Massive Spirals”, ApJ, 744:L9.

Mateo, M. 1998. “Dwarf Galaxies of the Local Group”, Annu. Rev. Astron. Astr., 36:435-506.

Mathews, William G., Brighenti, Fabrizio. 2003. “Hot Gas in and around Elliptical Galaxies”,Annual Review of Astronomy &Astrophysics, 41:191-239.

Navarro, Julio F., Frenk, Carlos S., White, Simon D. M. 1996. “The Structure of Cold Dark Matter Halos”, ApJ, 462:563.

Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D.M. 1997. “A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering”, ApJ, 490(2):493-508.

Ostriker, J. P., Peebles, P. J. E., Yahil, A. 1974, “The size and mass of galaxies, and the mass of the universe”, ApJ, 193:L1-L4.

Peebles P. J. E. 1980. The Large-Scale Structure of the Universe. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press.

Peng, Eric W., Jordán, Andrés, Côté, Patrick, vd. 2006. “The ACS Virgo Cluster Survey. IX. The Color Distributions of Globular Cluster Systems in Early-Type Galaxies”, ApJ, Volume 639(1):95-119.

Primack J. R., Seckel D., Sadoulet B. 1988. “Detection of Cosmic Dark Matter”, Annu. Rev. Nucl. Part. S. B., 38:751-807.

Prokhorov, D.A. ve Silk, J., 2010. “Can the excess in the Fe XXVI Ly- line from the galactic center provide evidence for 17 keV sterile neutrinos?”, ApJ,, 725:L131.

Rauch, M. 2006. Lyman Alpha Forest. İngiltere: Nature Publishing Group.

Rubin, V. C. ve Ford, W. K., ApJ,1970. “Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions”, 159:379-404.

Ruchayskiy O., 2006. “Restrictions on Sterile Neutrino Parameters from Astrophysical Observations”, 11th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Berlin, Germany, preprint (arXiv:0704.3215).

Sekiya, N., Yamasaki, N.Y., Mitsuda, K. 2015. “A search for a keV signature of radiatively decaying dark matter with Suzaku XIS observations of the X-ray diffuse background”, PASJ, 68(SP1).

Springel, V., White, S.D.M., Jenkins, A., C. S. vd. 2005. “The subhalo populations of ΛCDM dark haloes”, Nature, 435:629-636.

Suto, Yasushi, Sasaki, Shin, Makino, Nobuyoshi. 1998. “Gas Density and X-Ray Surface Brightness Profiles of Clusters of Galaxies from Dark Matter Halo Potentials: Beyond the Isothermal β-Model”, ApJ,, 509(2):544-550.

Tremaine S. ve Gunn J. E. 1979. “Dynamical role of light neutral leptons in cosmology”, Phys. Rev. Lett., 42:407-410.

Urban, O., Werner, N., Allen, S. W., Simionescu, A., Kaastra, J. S., Strigari, L. E. 2015. “A Suzaku search for dark matter emission lines in the X-ray brightest galaxy clusters”, MNRAS, 451:2447-2461.

Weinberg M. D., Katz N. 2002. “Bar-driven Dark Halo Evolution: A Resolution of the Cusp-Core Controversy”, ApJ, 580(2):627-633.

Werner, N., de Plaa, J., Kaastra, J. S. 2006. “XMM-Newton spectroscopy of the cluster of galaxies 2A 0335+096”, A&A, (449)2:475-491.

Yoo, Y., Chaname J., Gould, A., 2004, “The End of the MACHO Era: Limits on Halo Dark Matter from Stellar Halo Wide Binaries”, ApJ, 601(1):311-318.

Zel’dovich Ya. B. 1970. “Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations”, A&A, 5:84-89.

Zwicky, F. 1937, “On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae”, ApJ, 86:217-246.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. MURAT HÜDAVERDİ
Proje No:	115F030
Proje Başlığı:	Karanlık Maddenin Aydınlık Yüzü: X-Işın Salınım Çizgilerinde Karanlık-Madde İzlerinin Araştırılması
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	TOLGA GÜVER, ŞÖLEN BALMAN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	YILDIZ TEKNİK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2015 - 01/10/2017
Onaylanan Bütçe:	228600.0
Harcanan Bütçe:	159600.57
Öz:	Günümüz astrofiziği, evrendeki malzemenin büyük bir kısmının Karanlık Madde denilen, yapısı ve bileşeni hakkında çok sınırlı bilgiye sahip olduğumuz gizemli bir formda olduğuna işaret etmektedir. (i) Kozmik arka alan ışıması dalgalanmaları, (ii) galaksi dönme eğrileri, (iii) çekimsel lens ve (iv) galaksi kümeleri X-ray çalışmaları karanlık maddeye dair birbirini destekleyici ve tamamlayıcı kanıtlar sunmaktadır. Karanlık madde bolluğunun yaklaşık %23 olması gibi miktarı ile ilgili bazı veriler, galaksi merkezleri gibi evrende maddenin yoğun olduğu alanlarda haleler şeklinde yığıştığını bilmemiz dışında; muhteviyatı ve esasını teşkil eden parçacıklar bilinmezliğini korumaktadır. Son zamanlarda birçok gök cismi tayfı E~3.5 keV enerjisinde, fiziksel kaynağı bilinmeyen bir çizgi salınımı tespit edildi. Bu kayaklardan öne çıkanlar; 73 farklı galaksi kümesinden aldığı istiflenmiş 17 günlük poz süresine denk Chandra X-ray verisi, Perseus galaksi kümesi, Andromeda, yakın cüce spiral galaksileri, kozmik arka alan ışıması, samanyolu galaksimiz sıralanabilir. Yapılan X-ray tayf analizlerinde 3.5 keV civarında çok zayıf da olsa tanımsız bir ışınım gözlemlendi. Bu salınımın, bozunan karanlık madde parçacıklarından kaynaklandığı öne sürüldü. Sonuçlar, hem astrofizik ve hem de parçacık fiziği camiasından büyük ilgi gördü. Tespit edilen çizgi ışıması çok zayıf olduğundan, bu gizemli sinyalin kaynağı üzerine uzun bir tartışma başladı. Bunlardan en kabul göreni, 7.1 keV kütleye sahip ?steril nötrino?nun radyoaktif bozunumu sonucu monokromatik 3.5 keV ışıması üretmesi ve bu salınan fotonların X-ışını enerji aralıklarında gözlemleniyor olmasıdır. Biz de 115F030 projemizde, astrofizik dünyası için çok sıcak bir başlık, modern fizik camiasında da ses getirecek kadar yaygın bir etkiye sahip olan bir araştırma konusunda, x-ray salınım çizgilerinde karanlık maddenin aydınlık yüzünü araştırdık. Böyle bir çalışma için en uygun uzay alanı elbette ki karanlık maddenin yoğun olarak bulunduğu galaksi kümeleri ve galaksi haleleri olacaktı. Ancak belirtilen bu kaynaklar üzerine arşivde kafi miktarda çalışma bulunmaktadır. Biz de projemizde, yakın uzayımızda yer alan bir diğer karanlık madde rezervuarı eliptik galaksilere odaklandık. Bu rapor, yakın eliptik galaksilerden elde edilen analiz sonuçlarını içermektedir.
Anahtar Kelimeler:	Eliptik galaksiler, Galaksi, karanlık-madde, X-ray, Steril Nötrino
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK