

X-IŞIN ASTRONOMİSİ *

E. Nihal Ercan

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi, İSTANBUL

ÖZET : X-ışın astronomisi, bugün astronominin en genç dallarından biri. Başlangıcı, 1962 yılına ve SCO X-1 isimli parlak bir X-ışın kaynağının keşfine rastlıyor. Bu keşfi ilk gerçekleştiren ünlü İtalyan astronomi Profesörü R. Giacconi, bugün X-ışın astronomisinin kurucusu olarak bilinir. Burada, oldukça genel bir anlamda X-ışın astronomisinin gözlemsel metotlarına, Galaktik ve Galaksimiz dışı X-ışın kaynaklarına ve X-ışınlarının yayılım mekanizmasına değineceğim.

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısında, 1940 yılından önce astronomların hayalini bile düşünemeyecekleri son derece aktif bir disiplin, astronomi ve astrofizik dünyasına girmeye başladı. İkinci Dünya Savaşı sırasında elde edilen teknolojik ilerlemeler, bu tür bir aktiviteyi arttıran başlıca etkenler. Elde edilmeye başlanan teknolojik ilerlemelerle elektromanyetik spektrumun bir insan gözüne duyarlı olan küçük bir aralığında daha geniş bir aralığa geçilmeye başlandı.

Bu konuşmada X-ışın astronomisi konusuna değineceğim. Astronominin bu dalı ilk olarak 1949 yılında Güneş'ten ilk kez gözlemlenen X-ışınları ile başladı. Diğer pek çok gök cisimlerinin de birer X-ışınları kaynağı olduğu 1962 yılında Scorpio takım yıldızı içindeki oldukça parlak bir kaynağın, yani Sco X-1'in keşfedilmesi ile doğrulandı. 1962 yılında kozmik X-ışın kaynaklarının keşfine yol açan gözlemler tamamen kazara yapılmıştır. A.B.D.'den Amerikan Bilim ve Mühendislik Grubu aynı yıl Ay'dan gelebilecek muhtemel X-radyasyonunu araştırmak üzere X-radyasyonuna duyarlı detektörlerle donatılmış bir roket fırlattılar. Beklenenin aksine araştırmacıların umduğu gibi X-radyasyonu gözlemlenemedi. Roket, gökyüzünde oldukça geniş bir bölgeyi taradığından Scorpio ve Sagittarius takım yıldızları yönünden X-radyasyonu geldiği gözlemlendi. Bu sonuç, 1962'de X-ışın astronomisinin kurucusu olarak kabul edilen Giacconi ve arkadaşları tarafından yayımlandı.

X-ışın kaynaklarının gök yüzündeki dağılımı, 1962'den sonraki yıllarda fırlatılan diğer roketlerle araştırıldı. Elde edilen sonuçlar, günümüzde daha da gelişmiş peyklerle yapılan gözlemlerden elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. En parlak X-ışını kaynakları Samanyolu'nda yer alırken, daha sönük kaynaklar (ki bunlar ilk araştırmalarında gözlemlenmemişlerdi) gökyüzünde daha bir biçimli olarak dağılmışlardır. Birinci guruptaki X-ışın kaynakları "Galaktik" olarak isimlendirilirken, ikinci guruptakiler "Galaksimiz dışı" kaynaklar olarak bilinirler.

* Çağrılı konuşma.

1.1. Galaktik X-ışın kaynakları :

Galaktik X-ışın kaynaklarının Galaktik koordinatlardaki dağılımı Şekil 1. de verilmiştir. Bu dağılımdan görüleceği gibi, kaynaklar Galaktik merkeze doğru yoğunlaşmakta ve yine daha az bir miktarda Cygnus bölgesinde de toplanmaktadır. Cygnus bölgesindeki bu toplanma Güneş'in üzerinde bulunduğu lokal spiral kolda bir kaynak konsantrasyonuna işaret etmektedir.

Bir X-ışın kaynağının ışınımı, gözlemlenen X-ışın akısından kaynağa olan uzaklık biliniyorsa bulunabilir. Bunu bir örnekle açıklayalım : Sagittarius bölgesindeki en parlak kaynaklardan yaklaşık 1 X-ışın fotonu /cm² s de gözlemlenmektedir. Her X-ışın fotonu 1 kev enerji aralığında (= 1.6 . 10⁻⁹ erg) bir enerjiye sahiptir. Örneğin, X-ışın fotonunun ortalama enerjisi 2.5 kev olarak alınırsa, Dünya atmosferinin tepesine düşen enerji akısı 4 . 10⁻⁹ erg olacaktır. Bu akıyı F ile gösterirsek, L de X-ışın kaynağının ışınımı olmak üzere,

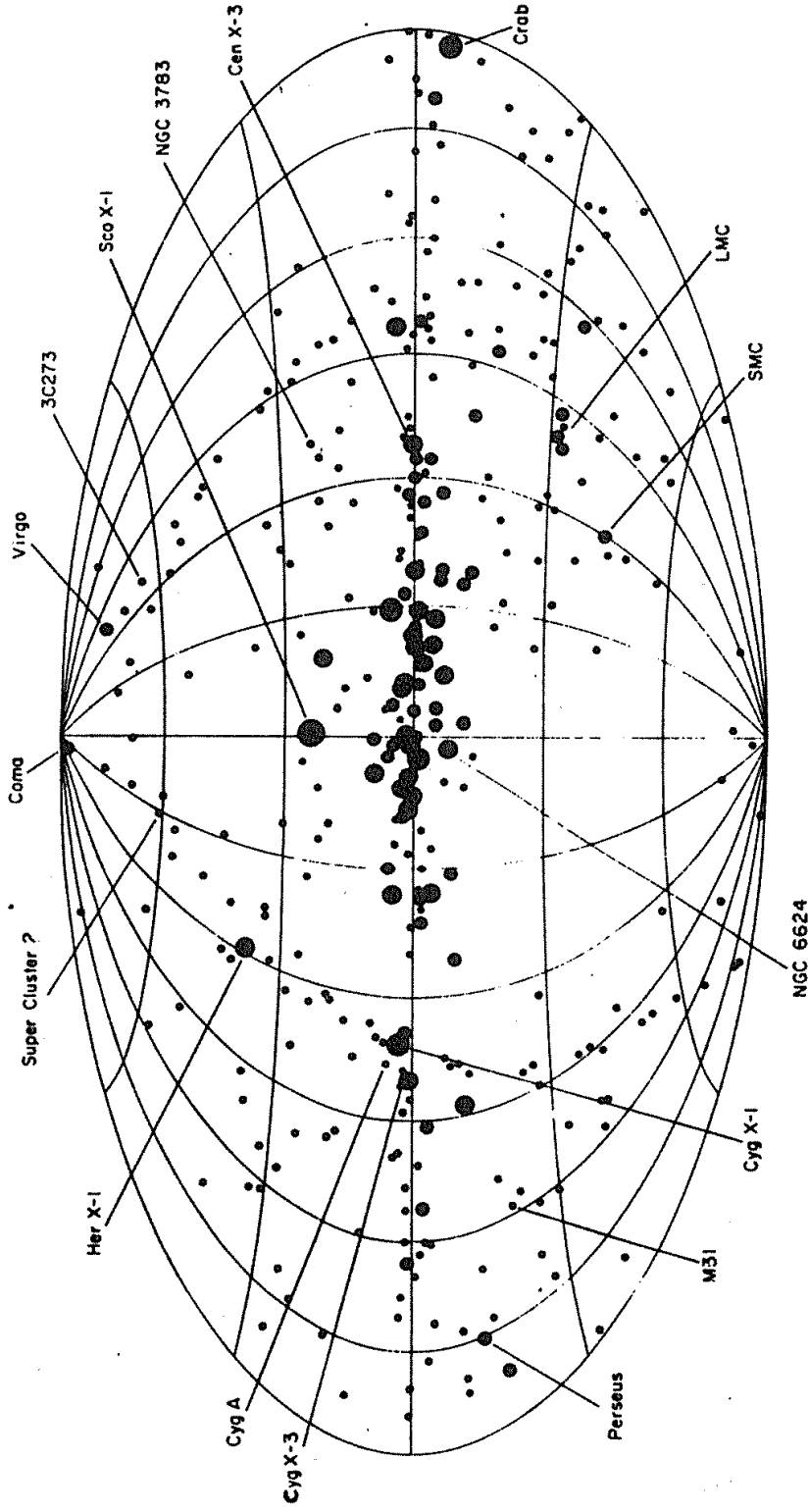
$$F = L / 4 \pi d^2 \quad (1)$$

Burada d kaynağa olan uzaklıktır. Galaktik merkezdeki bir kaynağın bize uzaklığı $d = 10 \text{ kpc} = 3 \cdot 10^{22} \text{ cm}$ alınarak, $4 \cdot 10^{-9} \text{ erg/cm}^2 \text{ s}$ lik bir akı, $5 \cdot 10^{37} \text{ erg/s}$ lik bir ışınımına denk olmaktadır. Böylece, tipik bir X-ışın kaynağı Güneş'in toplam olarak verdiği X-ışınlarından yaklaşık 10 000 kez daha fazla ışınımlıdır ($L_G = 3.8 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$). Şunu kabul etmek gerekirken galaktik boylamı, $l_{11} = 0$ 'a yakın olan X-ışın kaynakları, Galaksimizin en parlak X-ışınını veren kaynakları olmaktadır. Bunlar dışında her X-1 ve Sco X-1 gibi bize daha yakın olan kaynaklar bile $10^{35} - 10^{36} \text{ erg/s}$ lik X-ışınımları ile X-ışını dalga boylarında Güneş'ten çok daha parlaktırlar. Galaktik X-ışın kaynaklarını daha ayrıntılı bir şekilde anlatmadan önce bunların tüm Galaksimizde bir bütün olarak verdikleri toplam X-ışınımı miktarını bulalım. Bu sayıyı daha sonra görünür bölgede integre edilmiş Galaktik ışınım ile karşılaştıralım. Kabaca, Galaksimizin 200 kadar X-ışın kaynağını barındırdığını farzedebiliriz, öyleki bu 200 kaynaktan herbiri yaklaşık 10^{37} erg/s lik bir ortalama ışınımına sahip olmaktadır. 200 defa 10^{37} erg/s nin karşılığı olarak toplam $2 \cdot 10^{39} \text{ erg/s}$ lik bir X-ışınımı elde ederiz. Diğer taraftan, yine bilmekteyizki Galaksimiz 10^{11} tane optik ışınım veren kaynaktan oluşmuştur. Herbirinin optik ışınımı için de örneğin, 10^{33} erg/s değerini alırsak, toplam görünür bölge ışınımı için 10^{44} erg/s lik bir optik ışınım bulmaktayız. Böylece, şunu görüyoruz ki Galaksimizi bir bütün olarak ele aldığımızda onun X-ışını dalga boylarındaki ışınımı, toplam enerji yayınımının ancak $1/10^5$ 'i kadar küçük bir değerdedir.

X-ışını kaynaklarının pek çoğunun ömürleri bilinmemektedir ama bugün, bir kısmının bazı yıldızların yaşam süreçlerinde kısa ömürlü parlak fazları temsil ettikleri de bilinmektedir.

1.2. Galaksimiz-dışı X-ışını kaynakları :

Galaksi-dışı cisimler içersinde sadece Büyük ve Küçük Magellanic Bulut'lar ve



Şekil 1 : Galaktik X—ışın kaynaklarının Galaktik koordinatlardaki dağılımı ; kaynakların boyutları maksimumda sahip oldukları X—ışın yeginiyle orantılı olarak gösterilmiş ve 4. Uhuru kataloğunda bulunan 339 adet kaynak işaretlenmiştir.

Andromeda Nebulası (= M31) çıplak gözle görülebilmektedir. Diğer Galaksiler daha sönük olduklarından gözlemlenebilmeleri için teleskop gereklidir. M31'in ilk X-ışın peyki olan Uhuru ile yapılan X-ışını gözlemleri Galaksimizden yaklaşık iki kez daha fazla X-ışınımına sahip olduğunu göstermiştir. M31'in Samanyolu'ndan kütlece yaklaşık iki kat daha büyük olduğu kabul edildiğine göre bunun X-ışını özelliklerinin Galaksimize çok benzer olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, Centaurus A adlı bir başka galaksi ise bizden 4 Mpc ötede olup, M31 galaksisinden yaklaşık 6 kez daha ötede yer almaktadır. Şayet, Centaurus A' inde M31'e benzer bir X-ışın ışınımına sahip olduğu kabul edilirse, M31'den 6 kez daha uzak bir mesafede olduğuna göre ondan tam 36 defa daha sönük bir ışınımı olacaktı ki gözlenen M31'den 100 kez daha fazla ışınım değeri ile uyuşmamaktadır. Buradan, bazı Galaksimiz-dışı X-ışını kaynaklarının Galaksimizin sahip olduğu toplam X-radyasyonundan çok daha fazla ışınımlı oldukları sonucu ortaya çıkmaktadır. Bundan şu sonuca da varılabilir : Galaksimiz-dışı X-ışını kaynakları olarak tanımlanan bu tür yüksek ışınımlı kaynaklar, anormal aktivite gösteren galaksiler olabilecekleri gibi bu galaksileri oluşturan pek çok sayıdaki galaksi kümelerinin merkezlerini de oluşturabilirler. Centaurus A'daki muhtemel aktivite, bu galaksinin her iki kenarından gözlemlenen kuvvetli radyo yayını ile pozitif bir delil kazanmıştır. Diğer bir örnek olarak NGC 4151 verilebilir. Bu galakside bir X-ışını kaynağı bulunmuş ve bu kaynak aynı zamanda çekirdek bölgesinden görünür dalga boylarında genişlemiş—Doppler salma çizgileri yayınlamaktadır. Bu tür geniş salma çizgileri Seyfert galaksilerine özgü bir özelliktir ve galaksi çekirdeğinde şiddetli patlamaların varlığına işaret eder. Bir başka örnek olarak 3C 273 verilebilir. Bu da bir X-ışın kaynağı olup, bir kuasardır. Bu kaynak aynı zamanda görünür bölgede, kızıl-ötesi ve radyo bölgesinde de yayınım yapmaktadır. Görünür spektrumunda büyük ölçekli kızıla kayma göstermesinden ötürü, yaklaşık 1000 Mpc'lik bir uzaklıkta olduğu bilinmektedir. Diğer galaksimiz-dışı X-ışın kaynakları bol miktarda galaksi kümelerinin merkezlerinde gözlemlenmiştir. Coma Berenices kümesinin merkezinde genişlemiş bir X-ışın kaynağı mevcut olup, 0.5° genişliktedir. Aynı şekilde Virgo ve Perseus kümelerinde de genişlemiş X-ışın kaynakları gözlemlenmiştir. Bu iki galaksiden hem bir bütün olarak kuvvetli X-emisyonu gözlemlenmiş, hem de bu galaksilerin merkezlerinden X-ışın yayını olduğu bulunmuştur.

1.3. İzotropik X-ışın zemini :

X-ışını dalga boylarında tüm gökyüzü parlak bir görünümündedir. Bu ise görünür ışık ile tamamen ters bir durum oluşturur. Yaklaşık 2 KeV X-ışın enerjisinin ötesindeki değerlerde bu zemin radyasyonu bütün yönlerde aynı değerdedir. Zemin radyasyonu, aynı zamanda X-ışın bölgesinin ötesindeki gamma ışını bölgesine dahil olan bir spektruma da sahiptir. Galaksimiz-dışı orjinli olan bu zemin radyasyonu izotrop olmaktan uzaktır. Hangi astrofiziksel mekanizma kesin olarak bu zemin radyasyonunu oluşturmaktadır bu da günümüzde kesinlik kazanmamıştır. Milyonlarca sayıdaki uzak galaksilerden yayınlana-bilmiş olacağı gibi, galaksiler arası uzayda termal veya kozmik ışın işlemleriyle de oluşmuş olabilir.

Galaktik ve Galaksimiz-dışı X-ışın kaynaklarına ve izotropik X-ışın zemin radyasyonuna biraz daha ayrıntılı olarak değinmeden önce X-ışın astronomisinde kullanılan gözlemsel metotlara değinelim.

2. X-İŞİN ASTRONOMİSİNDE GÖZLEMSEL METOTLAR

X-ışın astronomisinde yapılan tüm gözlemler Dünya atmosferinin üstündeki platformlardan yapılmaktadır. Örneğin, 0.2–25 KeV enerji aralığında yapılması istenen gözlemler, yerden yükseklikleri yaklaşık 120 km olan yerlerden yapılmak zorunluğundadır. Bunun nedeni ise atmosferi oluşturan gazların bu yüksekliğin altındaki mesafelerde kuvvetli bir emici özelliğe sahip olmalarıdır. Bu tür bir gözlem, 120 km yükseklikte 4 veya 5 dakika kalabilen roketlerle yapılabileceği gibi peykler vasıtasıyla da yapılabilmektedir. Bu tür bir X-ışın gözlem peyki yerden 500 km yükseklikte birkaç yıl süreyle yerin etrafında yörünge- de kalabilecek şekilde yapılmıştır. Daha büyük yükseklikler, X-ışın astronomisi için ideal olmaktan uzaktır çünkü yaklaşık bu 500 km'nin ötesindeki mesafelerde Dünya'nın radyasyon kuşağı adı verilen takabalar devreye girip, bu kuşak içindeki elektrik yüklü atomik parçacıklar peykin üzerindeki X-ışını detektörlerinde zemin radyasyonunda bir artış gözlenmesine, dolayısıyla ölçülen X-ışın miktarında yalancı bir artış elde edilmesine neden olmaktadır.

En fazla kullanılan X-ışın detektörleri gaz ile doldurulmuş aletler olup, iyonizasyon odalarında olduğu gibi ya foton huzmesini doğrudan doğruya elektrik akımına ya da Geiger sayıcısında olduğu gibi sabit genlikli elektrik yükü pulslarına veya orantılı sayıcılarda olduğu gibi elektrik yükü pulslarının her bir foton huzmesinin enerjisi ile orantılı olarak çevrildiği aletlerdir. Tüm bu detektörler, X-ışın fotonlarını elektrik yüküne çevirmek suretiyle çalışırlar. İyonizasyon odaları ve Geiger sayıcıları Güneş'in eksi X-ışın çalışmalarında kullanıldığı halde bugün X-ışınlarının incelenmesinde çoğunlukla orantılı sayıcılardan yararlanılmaktadır.

2.1. Orantılı sayıcılar :

0.2 – 25 KeV enerji aralığındaki X-ışınlarına duyarlı detektörlerden en çok kullanılan orantılı sayıcılardır. Bu tür bir detektör, iletken bir kap ve bunun üst kısmını örten yani pencere ödevini gören ince ve hafif bir metalden ya da plastik bir tabakadan yapılmış bir pencereden oluşmuştur. Bu kabın içinde %90 oranında Xe, Ar veya Ne gibi asal gazlardan biri ile %10 oranında poliatomik metan veya karbon dioksit gibi söndürücü gaz, yaklaşık 1 atmosfer basınç altında bulunur. Yaklaşık 100 – 200 μm çapında bir anot teli kabın her iki yan duvarından izolatörlerle kaba tutturulmuştur. Bu anot ödevini gören tel, sürekli olarak + 2000 volt'luk bir potansiyelde tutulur. Bu anota bir de düşük gürültülü elektronik amplifikatör bağlanmıştır. Bu türden birkaç orantılı sayıcı toplam 1000 cm^2 ye varabilen duyarlı pencere alanı elde edilecek şekilde bir araya getirilebilir. Detektörü oluşturan bu kap, tamamen işlemler bitirilince sıkıca kapatılmalı ve içersindeki gaz karışımı uzayda uzun bir süre tutulabilecek biçimde kuvvetli ve sağlam bir şekilde mühürlenmelidir.

Orantılı sayıcılar, detektör üzerine düşen X-ışın fotonlarını ince bir metalik ya da plastik maddeden yapılmış pencereden detektör kabının içine geçirip bunları gaz içinde fotoelektrik olay yoluyla emerek ve açığa çıkan fotoelektronları da detekte edilebilir elektrik sinyallerine çevirerek çalışırlar. Tipik bir X-ışın astronomisi orantılı sayıcısı Şekil 2. de gösterilmiştir. Bir X-ışın demetinin ışınımı I_0 ise, kalınlığı x olan bir materyele çarptıktan sonraki ışınımı şöyle ifade edilir :

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

burada μ materyelin lineer emme katsayısı olup, x gr/cm² ile verilirse kütle emme katsayısı $\mu_m = \mu / \rho$ olur ve ρ ise burada materyelin yoğunluğunu gösterir. Formül 2 den hareket ile N_0 detektör yüzeyine gelen E enerjili bir X-ışın akısının birim cm² de ve birim saniye-deki foton sayısı olmak üzere, detektörde kayıt edilmiş X-ışın olaylarının sayısı olan N ise aşağıdaki formülle verilir :

$$N = N_0 (\exp(-\mu_w x_w)) (1 - \exp(-\mu_g x_g)) \quad (3)$$

burada μ_w ve μ_g , sırasıyla pencere materyelinin ve gazın emme katsayıları olup, x_w ve x_g de sırasıyla yine pencerenin ve gazın kalınlıklarıdır. N/N_0 miktarı ise, E enerjili X-ışın fotonlarının kuvantum etkinliği diye bilinen bir büyüklüğü tanımlar ve %80 veya daha büyük değerlere varabilir.

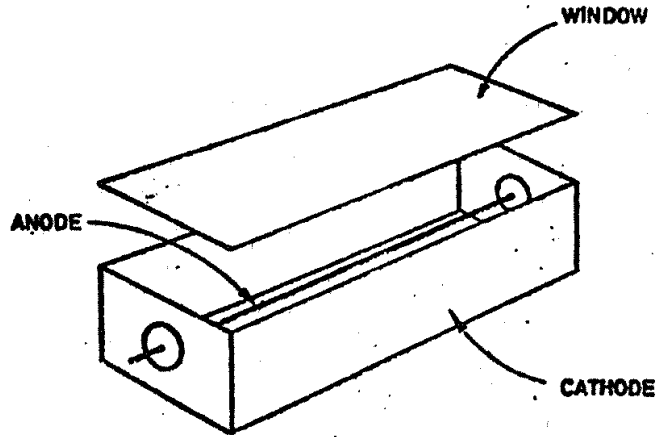
Bir X-ışın detektörü aynı zamanda kozmik ışın parçacıklarına ve gamma ışınlarına da duyarlıdır. Yüklü parçacıklardan dolayı zemin radyasyonu için sayım hızı tipik olarak 0.01 sayım /cm² . s . KeV dir ve bir detektörün toplam çeperinin alanına bağlıdır. Örneğin, 1500 cm² lik bir pencere alanına sahip bir sayıcının 1 ile 10 KeV enerji aralığındaki yüklü parçacıklardan dolayı sayım hızı yaklaşık saniyede 300 sayımdır.

İstenmeyen zemin sayımlarını şu tekniklerle minimuma indirmek mümkündür:

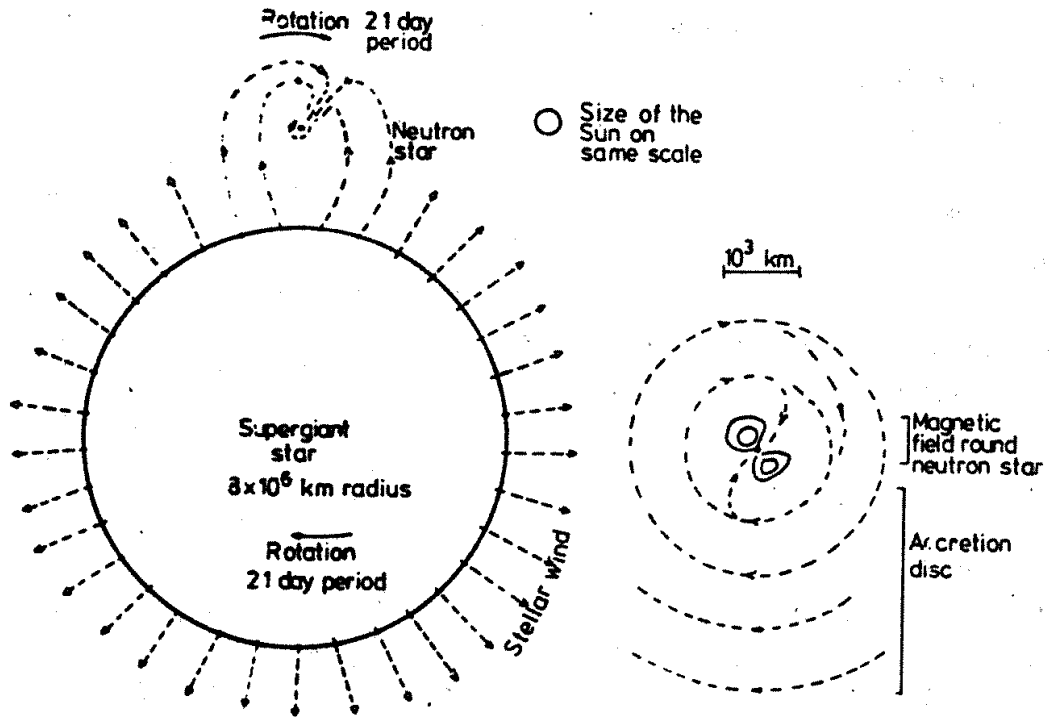
(i) Her bir detektörün işlerlik gösterdiği belli bir enerji aralığı vardır. Bu enerji aralığının altında ve üstündeki X-ışın enerjilerine karşılık gelen puls yükseklikleri, yer istasyonuna gönderilmeden önce elektronik olarak reddedilir.

(ii) Bekçi detektörler kullanılır. Bunlar bir orantılı sayıcının etrafına yerleştirilmiş ilave detektörlerdir. Detektöre nüfuz eden yüklü bir parçacık hem X-ışın detektöründe, hem de bir ya da daha fazla sayıdaki bekçi detektöründe kayıt edilir. Diğer taraftan, hiç bir X-ışın olayı bekçi detektörlerinde kayıt edilemez. Ayrıca, detektörlerdeki zıt-çakışık devreler, X-ışın detektörünce kayıt edilen bir sayımın aynı anda bir bekçi detektörünce kayıt edilmemesini sağlar.

(iii) Puls yükseliş süresi seçicisi kullanılır. Bir elektronik devre yardımı ile X-ışın orantılı sayıcısında kayıt edilen olayların yükseliş süreleri bilinmektedir. Gamma ışınlarından ya da kozmik ışınlardan gelen zemin sayımları X-ışınlarınınkine oranla daha uzun yükseliş süreli dirler ve devrenin yardımı ile uzun yükseliş süreli pulslar iptal edilir.



Şekil 2 : Bir orantılı sayıcının şematik şekli.



Şekil 3 : (solda) Cen X-3 ikili sistemi, (sağda) nötron yıldızı civarının büyütülmüş görüntüsü.

2.2. Bir X-ışın kaynağının tayfının hesaplanması :

Bir X-ışın kaynağı, bir orantılı sayıcı ile gözlemlendiğinde gelen her fotonun enerjisi detektör tarafından bir elektriksel puls yüksekliğine dönüştürülür. Böylece, bir X-ışın kaynağının tayfını ölçebilmek için bu puls yüksekliklerinin dağılımını incelemek gerekir. Bazı sistemlerde, bu pulsar uzay aracının üzerinde yükseklik kanallarına ayrılmak suretiyle analiz edilir ve elde edilen tayf, her bir kanalda biriken sayım olarak yer istasyonuna gönderilir. Diğer sistemlerde, her bir X-ışın pulsu tek tek yer istasyonuna gönderilir ve puls yüksekliği analizi yer istasyonunda yapılır.

Kaynaktan puls yüksekliği tayfı elde edildiğinde bunun zemin radyasyonundan arındırılması gerekir. Bu ise detektörün gökyüzünün belli bir bölgesinden detekte ettiği puls yüksekliği tayfının, gökyüzünün kaynak olmayan bir bölgesinden detekte edilen tayftan çıkartılmasıyla yapılır. Diğer taraftan, hasıl olan puls yüksekliği tayfının kaynağın X-ışın tayfına dönüştürülmesi gerekir. Bu ise kısaca şöyle yapılır : gözlemlenen bir kaynak için muhtemel bir X-ışın tayfı ele alınır. Sonra o gözlemlenilen detektör için puls yüksekliği tayfı hesaplanır ve hesaplanan bu tayf, gözlemlenen tayf ile karşılaştırılır. Bu işlem bilinen, birbirinden farklı pek çok X-ışın tayfları için hesaplanan ve gözlemlenen sonuçlar arasında en iyi bir uyum elde edilinceye kadar tekrarlanır. Bu karşılaştırma işleminde kullanılan kuramsal tayflar genellikle bremsstrahlung + salma çizgisi, kara cisim radyasyonu ve power-law gibi çok kullanılan devamlı tayflardır. Bir X-ışın kaynağının tayfındaki kesinlik, sinyal-gürültü faktörü olan $S/\sqrt{S+B}$ değerine kuvvetle bağlıdır. Tayfın hesaplanmasındaki hata kendini X-ışını tayfındaki sıcaklık faktöründe veya tayfsal indiste ya da düşük enerjilerdeki tayfsal kıvrılmalarda gösterir. Kısa süreli gözlemlerde bir kaynağın tek bir fiziksel modele uydurulması işlemi güçleşmektedir.

Burada, X-ışın astronomisinde en çok kullanılan normal X-ışınlarını detekte edebilen orantılı sayıcılara değindik. Sintilasyon sayıcıları 30 KeV nin üzerindeki enerjilerdeki X-ışınlarını detekte etmekte kullanılan detektörlerde orantılı sayıcılarda olduğu gibi gaz karışımları kullanılmayıp, bu yüksek enerjili X-ışınları fotonlarını detektör kabı içersinde yeteri kadar durdurabilecek güce sahip sodyum ya da sezyum iyodat kristalleri kullanılır. Kristallerde bir X-ışın fotonunun emilmesi ile açığa çıkan fotoelektronların enerjisi görünür ve mor-ötesi radyasyona dönüşür ve bu radyasyonun hasıl ettiği pulsların herbiri fotomultiplerle detekte edilip, orantılı sayıcılardakine benzer bir şekilde voltaj pulslarına çevrilir. Bu tür bir sayıcı ile enerjisi 1 Mev'a varabilen fotonları detekte etmek mümkün olduğu halde elde edilen enerji rezolüsyonu bir orantılı sayıcınınkinden yaklaşık üç kez daha kötüdür. Diğer bir yüksek enerjili X-ışınları için kullanılan detektör, katı hal detektörüdür, bunlarda da oldukça sınırlı enerji rezolüsyonu vardır.

3. X-İŞINLARININ YAYINIM MEKANİZMASI VE KAYNAK TAYFI

Çeşitli astronomik cisimlerden yayımlanan X-ışınları için çeşitli mekanizmalar ortaya atılmış olup, başlıca üç grupta toplanabilir. Sıcaklıkları birkaç milyon derece

Kelvin'e varan cisimlerden yayımlanan termal radyasyon, bir manyetik alan içinde hareket eden yüksek enerjili kozmik ışın elektronlarının oluşturduğu sinkrotron radyasyonu ve mikro dalga fotonlarıyla çarpışan kozmik ışın fotonlarının oluşturduğu ters Compton saçılması belli başlı mekanizmalardır. Termal radyasyon, ya optiksel olarak ince bir gazdan yayımlanan bremsstrahlung radyasyonu ya da optiksel kalın bir cisimden yayımlanan kara cisim radyasyonu olabilir. Gözlemlenen tayflar genelde şu özellikleri gösterirler:

- (i) Düşük enerji aralıklarına doğru keskin bir kıvrılma,
- (ii) Ya power-law modeline uygun olarak ya da eksponansiyel olarak, artan enerji ile azalan bir devamlı tayf.

Bunlardan, düşük enerjilerdeki keskin kıvrılma, görüş doğrultusunda mevcut olan soğuk materyelce bir emilmeye işaret eder. Artan X-ışın enerjisi ile power-law modeline göre sürekli tayfındaki düşme, genellikle bir power-law tayfına sahip elektronlarca hasıl edilmiş sinkrotron veya ters Compton mekanizmasının varlığını gösterir. Artan X-ışın enerjisi ile eksponansiyel olarak düşme gösteren bir sürekli tayf ise X-ışınlarının bir termal işlemle üretildiğine işaret eder. Tayf, düşük enerjilerde bir yataylık gösterirse bremsstrahlung radyasyonunun varlığını temsil eder. Yalnız, tayflar hakkında böylesine kesin sonuçlar beklemek sakıncalıdır, çünkü :

- (i) Bir dizi farklı sıcaklıklar söz konusu olduğunda görünürde power-law modeli uygunluk gösterse bile bir bremsstrahlung modeli inşa etmek de mümkündür.
- (ii) Power-law modeli kullanmadan da eksponansiyel bir X-ışın tayfı ile sinkrotron veya ters Compton modeli inşa edilebilir.
- (iii) Ayrıca bir bremsstrahlung modeli ile kara cisim modelini birbirinden ayırmak çoğu kez oldukça güçtür. Bu durumda bremsstrahlung mekanizması olup, olmadığı ancak tayfta ayırd edilebilen salma çizgilerinin varlığı ile anlaşılabilir.

Şimdi yukarda kısaca değindiğimiz mekanizmalara daha ayrıntılı olarak eğilelim.

3.1. Termal Bremsstrahlung Radyasyonu :

10^7 °K nin üzerindeki sıcaklıktaki gazlar, optiksel ince gazlar ise bremsstrahlung radyasyonu yayımlarlar. Optik incelikte gazın kendi radyasyonunu emebilmesi için yetersiz derecede kalın ve yoğun olduğu kastedilmektedir. Yani gözlemlenen X-ışın tayfı, X-ışınlarının olduğu anti tayf ile aynı şeydir. Sıcak bir gaz başlıca üç işlemle yayımlanabilir: bremsstrahlung, bağlı-bağlı yayınım ve serbest-bağlı yayınım. Son iki işlemde, elektronlarının bir kısmı bir çekirdek etrafındaki yörüngede bağlı kalan atomlar söz konusudur. 10^7 K derecesinin üzerindeki sıcaklıklarda normal astrofiziksel elementler bolluğundaki gazlı plazmalar hemen hemen tamamen iyonize olmuş plazmalardır. Bundan dolayı da düşünülmesi gereken başlıca yayınım bremsstrahlung radyasyonu olmaktadır. Bremsstrahlung radyasyonu serbest-serbest bir radyasyon olup, bir plazmadaki pozitif çekici Coulomb alanından geçen elektronlarca yayımlanır. Birim hacimdeki bir gazdan yayımlanan tayf ve ışınım şöyle verilir :

$$B_{\nu} = 6.2 \cdot 10^{-39} \text{ g exp}(-h\nu/kT) (1/\sqrt{T}) n_e^2 \quad (4)$$

burada B_ν , $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ cinsinden ışınım, g Gaunt faktörü olarak bilinen ve frekansın yavaşça değişen bir fonksiyonu olup, birim değere yakın bir sayı, h CGS sisteminde Planck sabiti, k yine aynı sistemde Boltzmann sabiti, T gaz sıcaklığının Kelvin cinsinden değeri ve n_e de cm^{-3} cinsinden gazın elektron yoğunluğudur. Şayet radyasyon V hacimli bir bölgeden geliyorsa, yayımlanan toplam enerji şöyle olur :

$$L_\nu = 4 \pi \cdot 6.2 \cdot 10^{-39} \text{ g exp}(-h\nu/kT) (1/\sqrt{T}) \int n_e^2 dV \quad (5)$$

burada L_ν nin birimi $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ dir. $\int n_e^2 dV$ ise yayının ölçüsü olarak bilinen bir büyüklüktür. Yayımlanan tayf üzerinden integre edilerek toplam ışınım için şu değer elde edilir:

$$L = 1.64 \cdot 10^{-27} \text{ g} \sqrt{T} \int n_e^2 dV \quad (6)$$

burada L nin birimi $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ dir. Termal bremsstrahlung, foton enerjileri $h\nu$ nün kT den daha büyük olduğu değerler için eksponensiyel olarak azalan bir tayf, fakat $h\nu$ nün kT den çok daha küçük olduğu değerler için hemen, hemen sabit kalan bir tayf hasil eder. Bir kara cisim tayfı da yüksek enerjilerde benzer biçimde davranır fakat kT den küçük enerjilerde ν^2 kanununa göre kıvrım gösterir.

3.2. Kara cisim Radyasyonu :

Optiksel olarak kalın olan sıcak bir cisim bir kara cisim radyasyonu yayınlar. Çünkü optik kalın bir cisim için tayf, salmadan olduğu gibi emilmeden de etkilenir. Burada şunu söylemek mümkün : kendi radyasyonunu emecek kadar optik kalın olan bir bremsstrahlung kaynağından kara cisim tayfı gözlemlemek söz konusu olmaktadır. Sıcak bir nötron yıldızı böylece bir kara cisim tayfına da sahip olabilecektir. Kara cisim radyasyonunun tayfsal formu, yayınlayıcının T sıcaklığına bağlıdır sadece. Planck kanununa göre tayf,

$$\pi B_\nu = 2\pi h \nu^3 / c^2 (\exp(h\nu/kT) - 1) \quad (7)$$

burada πB_ν birim frekans genişliğinde, birim zamanda ve birim alandaki enerji, ν yayımlanan fotonun frekansı ve c de ışık hızıdır. Birim zamanda, birim alan başına yayımlanan toplam enerji ise,

$$\pi B = \sigma T^4 \quad (8)$$

olup, σ ile Stefan sabiti gösterilmiştir. Maksimum yayınının olduğu noktadaki foton frekansı ise şu formülle verilir :

$$\nu \cong 10^{11} T \quad (9)$$

3.3. Sinkrotron Radyasyonu :

Bu tür bir radyasyon, relativistik elektronların bir manyetik alan içinde ivmelenmeleri sonucunda oluşur. Sinkrotron radyasyonu normal olarak başlıca iki gözlemsel özelliklerle tanımlanır :

(i) Radyasyon lineer olarak polarize olmuştur.

(ii) Radyasyon tayfı $I(\nu) = K \nu^{-\alpha}$ biçimindeki power-law ile belirlenir.

Radyasyon polarize olmuştur çünkü elektronlar sadece manyetik alanla doğru açı yaptıklarında ivmelenirler ve dolayısıyla da polarize olmuş radyasyonun elektrik vektörü elektronun ivmelenme yönündedir. Tayfın power-law biçiminde oluşu ise kozmik ışınların enerji tayfının yine power-law tabiatlı olmasından dolayıdır. Bunu şöyle açıklamak mümkündür : Enerjileri E ile E+dE arasında olan elektron sayısı N(E)dE olsun. Bunun power-law'a bağlılığı

$$N(E) = N_0 E^{-m} \quad (10)$$

biçimindedir. Burada m bir sabiti göstermektedir. E enerjisindeki elektronlar γ ile tanımlanan bir Lorentz faktörüne sahiptirler ve bu ise E enerjilerine şu ifade ile bağlıdır :

$$E \cong \gamma m_0 c^2 \quad (11)$$

Yine E enerjili bir elektronun sinkrotron radyasyonununun dolaylı kaybedeceği enerji, zamana bağlı olarak,

$$-dE / dt = b E^2 \cdot B_{\perp}^2 \quad (12)$$

burada b bir sabittir.

ν ile $\nu + d\nu$ aralığında frekansa sahip olan fotonlar, enerjileri E ile E + dE olan elektronlarca hasıl olacak ve ışınimleri da şöyle olacaktır :

$$I(\nu) d\nu = (-dE/dt) \cdot N(E) dE \quad (13)$$

burada

$$\nu = a B_{\perp} E^2 \quad (14)$$

hasıl olan fotonların frekansıdır.

(10) ve (12) yi (13) de yerine koyarsak,

$$I(\nu) d\nu = K_1 E^2 B_{\perp}^2 E^{-m} dE \quad (15)$$

$$(14) \text{den, } d\nu = 2a B_{\perp} E dE \quad (16)$$

$$I(\nu) d\nu = K_2 E B_{\perp} E^{-m} d\nu \quad (17)$$

ve yine (14) den E'yi ν cinsinden ifade ederek,

$$I(\nu) d\nu = K_3 B (\nu / B_{\perp})^{(1-m)/2} d\nu \quad (18)$$

veya,

$$I(\nu) d\nu = K_3 B_{\perp}^{(m+1)/2} \nu^{(1-m)/2} d\nu \quad (19)$$

Buradan,

$$I(\nu) \propto \nu^{-\alpha} \quad (20)$$

olduğu görülmektedir. Burada

$$\alpha = (m-1) / 2 \text{ ile verilen tayfsal indistir.}$$

3.4. X-ışınlarının Ters Compton İşlemi ile Üretimi :

Ters Compton radyasyonu, bir relativistik elektronun bir düşük enerji fotonu ile çarpışması sonucunda oluşur. Düşük enerji fotonunun frekansı ν_{\perp} ve hasıl olan fotonun frekansı ν_2 ise bu iki büyüklük birbirine şöyle bağlıdır :

$$\nu_2 \cong \gamma^2 \nu_{\perp} \quad (21)$$

Burada γ , yüksek mertebeden relativistik bir elektron için

$$\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} \quad (22)$$

(21) denklemini farklı açılarda çarpışma olduğu düşünülerek elde edilmiş ortalama bir sonuçtur.

Elektron enerjisinin yüksek enerjili foton enerjisine dönüşme hızı ise düşük enerji fotonlarının enerji yoğunluğu olan ω 'ya bağlı olup, şöyle ifade edilir :

$$-dE / dt \propto \gamma^2 \cdot \omega \quad (23)$$

X-ışınlarının üretimi söz konusu olduğunda başlıca iki düşük enerji foton kaynağı düşünülebilir. Frekansı $\nu = 6 \times 10^{14}$ Hz olan starlight fotonlarının $\gamma = 35(1.5 \times 10^7 \text{ ev})$ luk elektronlarla etkileşmesi sonucunda 4 keV 'lik ya da başka bir deyişle 10^{18} Hzlik X-ışınları üretilir. Frekansı 5×10^{10} Hz olan mikrodalga zemin fotonlarının $\gamma = 5000$ ($E = 2.5 \times 10^9 \text{ ev}$) luk elektronlarla etkileşmesi de aynı değerde (yani 4 keV'lik) x-ışınları üretir.

Ters Compton işleminden beklenen X-ışın tayfı power-law olup, tayfsal indisi elektron enerji tayfının tayfsal indisine bağlıdır.

3.5. Tayfsal Düşük Enerji Kıvrımı :

Pek çok X-ışın kaynağının tayfında düşük enerjilerde bir kıvrılma gözlenmiştir. Bunun nedeni ise kaynağı bakılan doğrultuda mevcut olan materyel tarafından X-ışınlarının fotoelektrik olayla emilmesidir. Bu materyel, hem X-ışın kaynağını çevreleyen bir

materyel olabileceği gibi hem de galakside difüz olarak dağılmış olan yıldızlararası gaz da olabilir.

İyonize olmamış materyelce emilen X-ışınlarının fotoelektrik emilme değeri düşük enerjilerde hızla artar. Hidrojen gazı için bu artış, enerji ile orantılı olarak basit bir şekilde değişir. Ne var ki, yıldızlararası ortam sadece hidrojenden ibaret olmayıp, pek çok sayıda atomdan oluşmuştur. Kabaca, %89 hidrojen, %11 helyum ve % 0.1 oranında da karbon, azot ve oksijen gibi ağır atomlardan meydana gelmiştir. Ağır elementler, X-ışınlarını daha çabuk emdikleri için yıldızlararası ortamın emme özelliklerinin incelenmesinde dikkate alınmak zorundadır. Emilme tesir kesiti olarak bilinen σ şöyle tanımlanır :

$$I = I_0 \exp(-\sigma N_H) \quad (24)$$

Burada, I_0 gelen radyasyonun şiddeti, N_H emici materyelin kolon yoğunluğu ve I ise bu kolon yoğunluğu içindeki radyasyon şiddetidir.

Bir X-ışın kaynağının tayfindan gözlenen bir düşük enerji kırırımı, galaksimiz içinde olmak koşulu ile o kaynağa olan uzaklığın belirlenmesinde bir üst limit olarak kullanılabilir. Galaksi'deki ortalama hidrojen yoğunluğu 0.5 atom/cm^3 tür. Yüksek galaktik enlemlerdeki galaksimiz-dışı X-ışın kaynakları, galaksimizdeki emici materyelden belirgin bir ölçüde etkilenmezler ve bunların tayflarında gözlemlenen herhangi bir düşük enerji kırırımı gözlemlenen galaksimiz-dışı kaynağın kendisine aittir.

4. YILDIZIMSİ X-IŞIN KAYNAKLARI

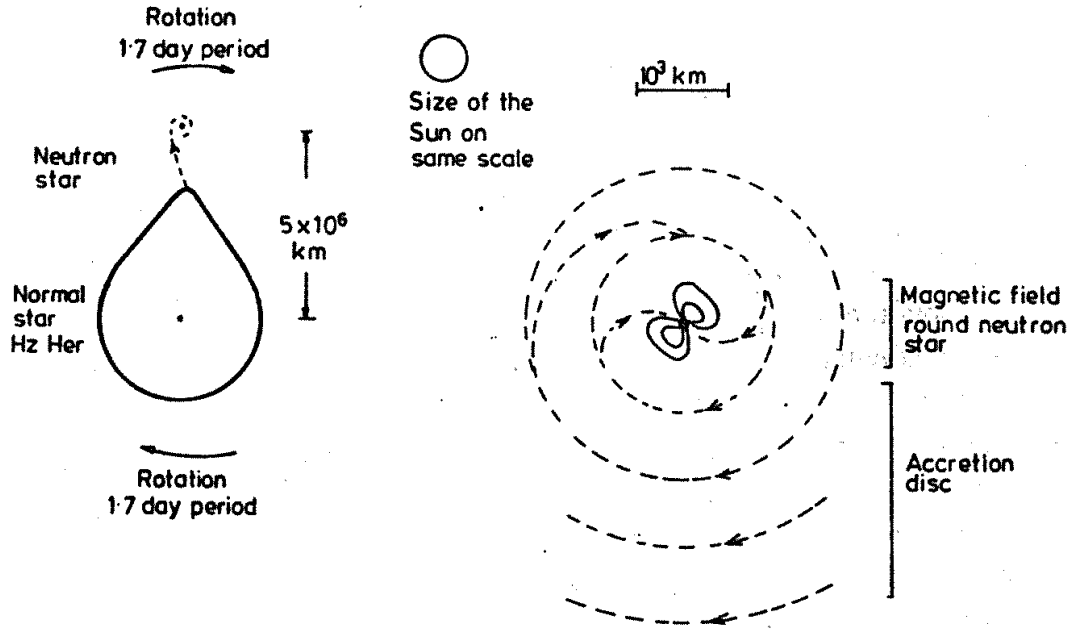
Galaksimizde bulunan parlak X-ışın kaynaklarının büyük çoğunluğu yıldızımsıdır. X-ışık eğrilerinde gösterdikleri değişimlerden bu tür kaynakların yarıçaplarının yıldız ölçeklerinde oldukları saptanmış ve bir kısmından da periyodik X-ışın sinyalleri gözlenmiştir. Bu periyodik değişimler, X-ışın kaynaklarının büyük çoğunluğunun bileşenlerden birinin tıkHz-yıldız olduğu yakın ikili sistemlerde olduklarını göstermektedir. X-ışın kaynakları için, bir normal yıldız ve bir tıkHz yıldızdan oluşmuş yakın ikili sistem konfigürasyonu, gözlemlenen büyük X-ışınım miktarını açıklamaktadır. Gerçekten de bu ışınım, tipik olarak Güneş'in X-ışınımından bin kez ile yüzbin kez daha fazla değerdedir. Bu yüksek değerli X-ışınım, normal bileşenden tıkHz yıldızın kuvvetli genel çekim alanına düşen materyelin açığa çıkardığı enerji olarak açıklanabilmektedir. 4.1. ve 4.2. de kuvvetli iki özelliği gösteren, iyi bilinen X-ışın kaynaklarını, 4.3. ve 4.4. de sırasıyla X-ışın transientlerini ve galaktik göbek X-ışın kaynaklarını tanımlayacağım. 4.5. de ise ikili sistem olmaları gerekli olmayan düşük X-ışınım kaynaklarına değineceğim.

4.1. Tutulmalı ikili X-ışın yıldızları :

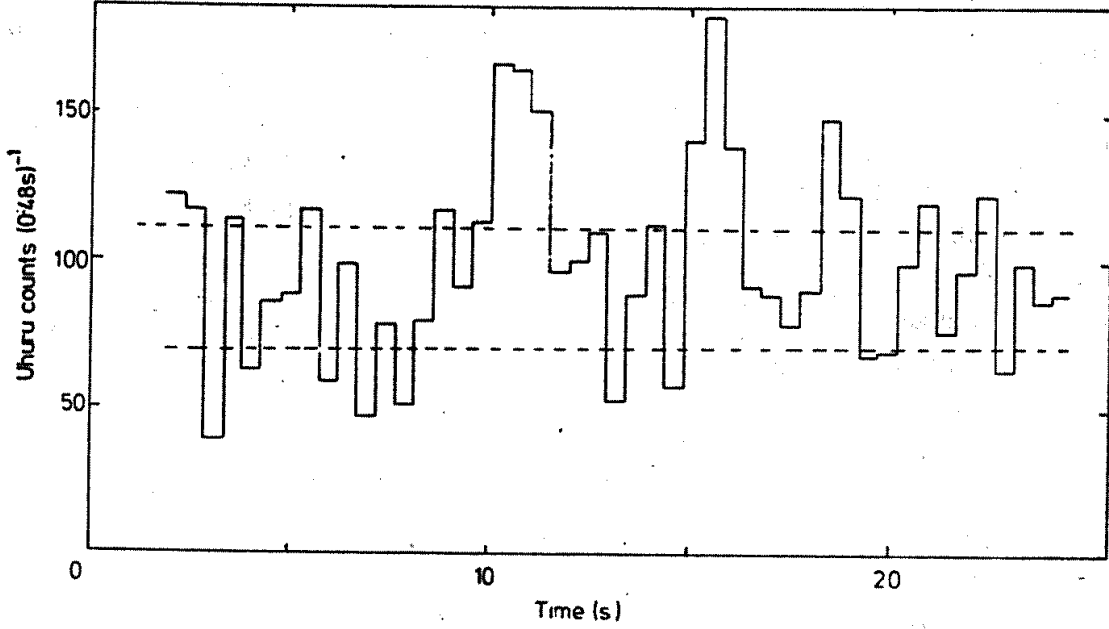
4.1.1. Centaurus X-3 :

Bu X-ışın kaynağının puls gösterme davranışı, peyksenel X-ışın astronomisi çağının

en dikkate değer buluşlarından birisidir. Uhuru peykinden elde edilen sonuçlar ile Cen X-3'ün 4.8 saniyelik periyodik yeğinlik değişimleri gösterdiği bulundu. Daha sonraki çalışmalar, bir ikili sistemde X-ışınları yayınlayan bir pulsarın varlığını doğruladı. Radyo pulsarları iki önemli özellik sergiler : bunların puls frekansları sabittir fakat gözlemlenecek küçük bir değişim pulsarın yavaşladıklarına işaret eder. Bu nedenle, Cen X-3'ün frekansının sabitliğini ve normal bir radyo yayınından bu X-ışınlarının nasıl bir farklılık göstereceğini incelemek gerekliydi. Sonuçta, Cen X-3'ün puls gösterme davranışının normal bir pulsarinkinden bir hayli farklı olduğu görüldü. Frekans, bir gün ya da daha fazla sürede 10 000 de birkaç kez değişim gösterdi. Bu kaynağın X-ışın yeğİnliği ise normal seviyeden yaklaşık %10 oranında düşme gösterdi. Uhuru gözlemcilerinin yaptıkları ana buluş, X-ışın yeğİnliğinin rastgele düşmeler göstermesiydi ki, bunun ikili bir sistemden ibaret olduğuna karar verildi. 2.087 günlük periyodik modülasyonda kaynağın 1.5 gün için yüksek durumda (high state) olduğu ve arasıra gözlemlenen genişlemiş düşük (extended low) davranışı ile kaynak birkaç hafta süre ile yüksek durumunda gözlemlenemedi. Periyodik davranıştaki bu özellik, X-ışın yayınlayan kaynağın başka bir kaynağa gravitasyonel olarak bağlı olduğu ve bu bileşenin arkasına düştükçe bakış doğrultusunda periyodik bir tutulma gözlemlendiği biçiminde yorumlandı. Genişlemiş düşük davranış ise sistemin etrafında X-ışınlarını emici yoğun bir gaz bulutunun arasıra var olduğu gibi bir açıklama gerektirir. Cen X-3'ün X-ışın tayfı, kaynağın ikili bir sistemde olduğu bulgusundan önce ölçülmüş ve 3 ile 6 keV arasında tayfın düzgün bir maksimumu olduğu görülmüştü. Bu maksimum yüksek ve 3 keV den daha alçak enerjilere gidildikçe hızla düşme göstermekteydi. Bu tür bir tayf, sıcaklığı 15×10^6 K olan bir kara cisim modeline uyduğu kadar düşük enerji kıvrımı 3 veya 4 keV'ye denk olan bir termal bremsstrahlung modeline de uygunluk göstermektedir. Böylesine yüksek değerli düşük enerji kıvrımı, sadece yıldızlararası ortamın emici özelliğinden olmayıp, kaynaktaki veya kaynak civarındaki emici bir ortamın varlığına işaret eder. Ariel-5 gözlemleri, Cen X-3 X-ışın yeğİnliğinde 2.087 günlük periyodik davranışının tutulma görülmeyen bölümünün tam ortasında, düşmeler olduğunu gösterdi. Bu, tam kaynağın bir genişlemiş düşük durumdan çıktığı anda gözlemlendi ve bu yeğİnlik düşmelerinin gözlemcinin bakış doğrultusunda hareket eden yoğun bir gaz bulutundan kaynaklandığı biçiminde açıklandı. Bu gaz, muhtemelen normal bileşenden kopan materyel olabilir. Burada ayrıca belirtmek gerekir ki, Cen X-3'ün düzenli puls davranışı ve tutulma göstermesine karşı diğer hemen, hemen tüm X-ışın kaynakları gibi X-ışın yeğİnliğinde rastgele değişimler de sergilemektedir. Kaynak tutulma göstermediği durumlarda X-ışın yeğİnliğinin birkaç saat içinde iki misli artış gösterdiği pek çok kez gözlemlenmiştir. 4.8 saniyelik pulsarın gözlenmiş olması X-ışın yayınlayan bölgenin 4.8 ışık saniyesi ya da 1.5×10^6 km. den daha küçük olması gerektiğine işaret eder. Gözlenen pulsarın sabit bir biçimde oluşu da dönen bir cismin bu mekanizmayı doğurduğunu gösterir. Şekil 4. de Cen X-3 ikili sisteminin bir şeması gösterilmiştir. Doppler kayması gözlemleri ile sistem parametreleri şöyle bulunmuştur :



Şekil 4 : (solda) Her X—1 ikilli sistemi, (sağda) nötron yıldızı civarının büyütülmüş şekli.



Şekil 5 : Cyg X—1 in X—ışık eğrisindeki hızlı değişimler.

X-ışın kaynağının yörüngesel hızı v :

$$415 \text{ km/s} < v < 588 \text{ km/s}$$

X-ışın kaynağının yörüngesel yarıçapı r :

$$1.19 \times 10^7 \text{ km} < r < 1.69 \times 10^7 \text{ km.}$$

Kütle fonksiyonu :

$$3.07 \times 10^{34} \text{ gr.} < M^3 / (M+m)^2 < 8.81 \times 10^{34} \text{ gr.}$$

Burada m tıkız yıldızın, M ise X-ışın kaynağı olmayan bileşenin kütleleridir.

Cen X-3'ün optik bileşeninin tanımlanması 1974'de yapılmış ve BOIb tayf tipinde 13 görsel kadirde olduğu bulunmuştur. Sisteme olan uzaklık 10 kpc civarında olarak elde edilmiş ve görünür bölgede herhangi bir puls davranışı gözlemlenememiştir. Mavi süper devin kütlesi 16-22 Güneş kütlesi olarak bulunmuş, buna karşılık tıkız X-ışın kaynağının kütlesinin de 0.6 ile 1.1 Güneş kütlesi civarında olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu da tıkız bileşenin bir nötron yıldızı olduğunu göstermektedir.

Böylece, Cen X-3 gözlemlerinden sistemin kendi ekseni etrafında 4.8 saniyede bir kez dönen bir nötron yıldızı ile bir mavi süper devden ibaret olduğu ve mavi devin transfer ettiği kütlelerin nötron yıldızına bir ilave disk ile aktarıldığı bulunmuştur. Bu ilave diskin iç kısımları X-emisyonuna katkıda bulunabilecek şekilde oldukça sıcaktır. Bu diskin dış kısımlarından da görünür dalga boyunda radyasyon yayımlanacak fakat bu, mavi devin şiddetli ışığı karşısında oldukça sönük kalacaktır.

4.1.2. Hercules X-1 :

Her X-1, Cen X-3 den sonra ikinci bir puls gösteren X-ışın kaynağı olarak keşfedilmiştir. Uhuru gözlemleri, 1.24 saniyelik puls periyodu ve 1.7 günlük yörünge periyodu ile sistemin bir tutulmalı ikili sistem olduğunu göstermiştir. Her X-1, yüksek galaktik enlemde yer alan bir kaynak olduğundan optik dalga boyundaki gözlemler için de elverişli bir yerde bulunmaktadır. Her X-1, görünür bölgede de hafifçe puls özelliği göstermektedir. Toplam görünür radyasyonunun yaklaşık %0.2 kadarı puls vermektedir. Ne var ki bu pulsler devamlı gözlenmemektedir. Bu kaynağın tutulma gösteren ikili sistem davranışı Cen X-3 ile pek çok benzerlikler göstermektedir, yalnız normal bileşeninin kütlesi Cen X-3 sistemininkinden çok daha küçüktür, Şekil 5. Her X-1 ikili sisteminin şematik bir gösterilişini vermektedir. Her X-1 için sistem parametreleri şöyledir :

X-ışın kaynağının yörüngesel izdüşürülmüş hızı v :

$$v \sin i = 169.2 \text{ km/s}$$

X-ışın kaynağının yörüngesel izdüşürülmüş yarıçapı r :

$$r \sin i = 3.9 \times 10^6 \text{ km}$$

Kütle fonksiyonu : $M^3 \sin^3 i / (M+m)^2 = 1.69 \times 10^{33} \text{ gr.}$

Her X-1'in X-ışın tayfı oldukça sert bir tayftır yani, yüksek enerji değerlerine gidildikçe daha yavaş bir düşüş gösterir. Uhuru gözlemlerinden en iyi uyan tayfsal modelin 0.0 değerlikli tayf indisli power-law modeli ya da $150 \times 10^6 \text{ K}$ den daha büyük sıcaklık ile termal bremsstrahlung olduğu bulunmuştur. Her X-1, yeğinliğinde tutulma öncesi düşmeler de

dev barındırır. Vela X-1, puls gösteren özelliği ile gerek Cen X-3 den, gerekse Her X-1 den çok daha büyük değerde bir peryoda sahiptir (282 saniye) ve "yaş dönücü" olarak bilinir.

4.2. Diğer Bilinen X-ışın İkili Sistemleri :

4.2.1. Scorpio X-1 :

Bu kaynağın X-ışın tayfı uzun yıllardan beri incelenmiştir. 2-10 keV enerji aralığındaki tayfa en iyi uyan model, termal bremsstrahlung olup şu formdadır :
 $I(E) = \text{sabit} \times E^{-0.3} \exp(-E/kT)$, burada karakteristik sıcaklık olan T, 4×10^7 ile 1×10^8 K arasında değişim göstermektedir. Tayfsal değişimler gerçektir, yani, belli bir gözlem aralığında bir sıcaklık değeri ile, başka bir gözlem aralığında ise bir başka sıcaklık değeri ile temsil edilir. 2 keV den daha küçük enerji değerlerinde ise tayfta oldukça farkedilir değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişken düşük enerji absorpsiyonu, X-ışın kaynağına olan bakış doğrultusunda değişen miktarlarda emici materyelin varlığına işaret etmektedir. 15 keV'nin üzerindeki enerjilerde, ışınımında değişimler de gözlemlenmiştir. Ayrıca, enerji tayfında 6.5-7 keV civarında zayıf bir emisyon çizgisi de gözlemlenmiştir. Sco X-1 in bu ikili sistem durumunu olumlu yönde etkileyen verilerden biri de görünür bölgede yapılan fotometrik ve spektroskopik çalışmalar olmuştur. Optik bileşenin tayfında iyonize kalsiyumun H ve K emilme çizgileri gözlenmiştir. Sistem için, 0.787 günlük bir peryodite elde edilmiş olup, bu X-ışın dalga boylarında doğrulanmamıştır. Bunun dışında, sistemden gözlenen optik dalga boylarındaki değişimlerle X-ışın dalga boylarındaki değişimler arasında bir korelasyon olduğu bulunmuştur. Bunun sonucunda da sistemin birbirinden farklı iki durumu olduğu bulunmuştur. Bu durumlardan birinde, optik ve X-ışın dalga boylarındaki ışınımı kararlı durumda olup, bir günlük bir zaman sürecinde en çok %20 kadar bir değişim gösterir. İkinci durumda ise, hem optik hem de X-ışın dalga boyu yeğlilikleri oldukça farkedilir değişim gösterir, öyle ki bu değişim bir saatlik bir sürede yaklaşık iki faktörü oranında bile olabilmektedir. Her iki dalga boyunda da yeğlilik birinci duruma oranla çok daha fazla olurken, X-ışın tayfı da daha yüksek değerde bir sıcaklık ile karakterize edilmektedir. Gözlemler, görünür radyasyonun X-ışın kaynağına yakın bir bölgeden geldiğini fakat onunla çakışık olmadığını göstermektedir. Sco X-1 için bugüne kadar yapılmış kuramsal modeller, ikili sistemde düşük ışınımlı bir normal bileşen ile nötron yıldızının varlığını ele alarak yapılmış ve nötron yıldızının etrafındaki ilave diskin de gözlemlenen X ve optik dalga boylarındaki radyasyondan sorumlu olduğunu kabul etmiştir. X-ışın dalga boylarında tutulma gözlemlenmemiş ve bunun da sistemin eğiminden kaynaklandığı görüşünde birleşilmiştir.

4.2.2. Cyg X-1 :

Gözlemlenen ilk kaynaklardan biri olarak Cyg X-1, 1-10 keV enerji aralığında en parlak kaynaklardan birisi ve 100 keV de de en parlak olan bir kaynaktır. X-ışın eğrisinde sürekli değişim gözlemlenmiş ilk kaynaktır. Cyg X-1'in X-ışın tayfında başlıca şu dört nokta açıklanmaya değer : ilk olarak, tayfın 2-10 keV'lik kısmı eğimde dikkati çeken

sergiler. Öyle ki X-ışın yeglinliği X-ışın dalga boylarında tutulma olmadan hemen önce düşer ve tekrar yükselir. Böyle durumlarda tayfında normal değerde beklenen düşük enerji kırımından daha büyük değerlerde absorpsiyon gözlenir. Bunun da ikili sistemde mevcut olan bir emici gaz akımından dolayı olması çok muhtemeldir. Her X-1 in uzun süreli X-radyasyonu için yapılan çalışmalar, kaynağın 35 günün, 11 günü görüldüğü, genişlemiş düşük davranış gösterdiğini vurgulamaktadır. Zayıf bir X-emisyonu bazen kaynağın görünmediği (off) zamanlarda da detekte edilmiştir. Her X-1 in görünmediği süre düzenli olarak her 35 günde vuku bulmaktadır. 35 günlük bu tür bir peryodun nedeni açık değildir ancak mümkün bir açıklama olarak ikili sistemin tıkHz bileşeni olan nötron yıldızının dönme eksenini 35 günlük bir peryotla prezisyon hareketi yapmakta olduğu ileri sürülmektedir. Böyle ise X-radyasyonu konisi Dünya'nın görüş doğrultusundan kaçır. Diğer bir açıklama da normal yıldızdan transfer edilen materyelin tıkHz bileşene aktarılması, 35 günlük fıskırmalar (burst) sonucunda olmaktadır biçimindedir. Ayrıca, nötron yıldızının etrafındaki ilave diskin de peryodu 35 gün olan bir prezisyon hareketi yaptığı da ileri sürülen açıklamalar arasındadır. Her X-1 in enerji tayfında iki salma çizgisi gözlemlenmiştir. 6.5 keV civarında bir zayıf Fe çizgisi ile 58 keV de dar bir salma çizgisidir. Bunlardan birincisi Her X-1 ni çevreleyen gazlarda normal bollukta demir olduğuna işaret eder. İkincisi ise, relativistik olmayan elektronların kuvvetli bir manyetik alanda hareket etmeleri sonucunda oluşan siklotron radyasyonunun varlığını gösterir. 58 keV de böyle bir radyasyonun salma çizgisi göstermesi için gerekli olan manyetik alan şiddeti yaklaşık 5×10^{12} Gauss'tur. HZ Her (Her X-1 in optik bileşeni)in optik fotometri ölçümleri, X-ışın tutulması ile aynı fazda derin bir minimum gösteren bir ışık eğrisi oluşturmuştur. HZ Her in spektroskopik gözlemleri de bunun minimum ışıktaki F5 tayf tipinde, maksimumda ise çok daha sıcak B-tipi bir yıldız olduğunu göstermektedir. Bu ise şöyle açıklanmaktadır : normal bileşen F5 tayf tipinde ve buna uygun kütleli bir yıldız olup, B-tipi tayf, X-ışınlarının atmosferi ısıtması sonunda elde edilmektedir. Tayfsal Doppler kayma eğrisi, bir F-tipi yıldızdan beklendiğini göstermektedir. Işınımınla değişen salma çizgileri de gözlemlenmiştir. Normal bileşenin kütlesi, 2.5 Güneş kütlesi olarak bulunmuştur. Buradan tıkHz bileşenin kütlesinin 1.3 Güneş kütlesi olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu ikili sistemin normal bileşenin kütlesi Cen X-3 durumundakinden çok daha az kütleli ve çok daha az ışımsıdır. Ayrıca iki bileşen arasındaki uzaklık Cen X-3 sisteminden çok daha azdır. Buradan, normal bileşenin yıldız rüzgarlarına sahip olmadığı sonucu çıkmaktadır. Normal bileşenden tıkHz bileşene kütle, Roche-lobe akışı ile akmaktadır, aktarılmaktadır. Bu, diğer ikili X-ışın sistemleri için de doğrudur ve bu kütle aktarımının bir sonucu olarak tıkHz bileşenin etrafında hem X-ışınları hem de optik dalga boyundaki ışığın yayımlandığı bir ilave disk oluşur.

Bu iki iyi bilinen sistemin dışında yine böyle tutulma gösteren ikili sistemler bilinmektedir. Çoğu, Galaksimiz'in spiral kollarında bulunur. Bunlardan biri, SMC X-1 istisna olup, Küçük Magellanic Bulutu'nda yer almaktadır. Bunların bir bölümü puls davranışı gösterirken, diğer bir bölümü de Cen X-3 sisteminde olduğu gibi, bileşenlerinde birer süper

değişimler göstermektedir. İkinci olarak, 1 keV kadar küçük enerjilerde tayfta ihmal edilebilecek kadar az düşük enerji kıvrımı mevcuttur. Üçüncü olarak, 30 keV'nin üstündeki enerjilerde kaynak gökyüzünde son derece parlak görünmekte ve bu aralıklarda Crab Nebula'dan bile daha dik bir tayfa sahip olmaktadır. Dördüncü olarak, 1–100 keV arasındaki tayfın tek bir termal bremsstrahlung ya da tek bir power-law eğrisine yakınsaması mümkün değildir. Uhuru gözlemleri sonucunda, kaynağın 2–10 keV enerji tayfı, eğimleri sırasıyla 4.1 ve 0.45 olan iki power-law eğrisine ancak yakınsayabilmiş ve tatmin edici bir uyum sağlanabilmiştir. Tayf, 2–6 keV aralığında daha dik bir eğime sahip iken X-ışınını tam 4 kez artmış, eğim daha düzleştikçe 10–20 keV aralığındaki ışınımın 2–10 keV aralığındaki ışınım miktarından tam 2 kez daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bir durumdan, diğer bir duruma geçiş birkaç hafta sürmüştür. Cyg X-1'in yüksek enerji radyasyonu üzerine yapılan araştırmalar ile 100 keV'ye kadar kaynağın X-ışın tayfı elde edilmiş ve bu tayfların çoğunluğunun 0.9 veya 1 değerindeki tayfsal indisli olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda Cyg X-1 in 30–100 keV aralığındaki yeğinliğinde, tayf eğimi oldukça sabit bir değerde kalırken, değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Cyg X-1 in optik bileşeninin özellikleri ilk kez 1971 de araştırılmış ve bunun bizden 2 kpc uzaklıkta normal bir B Oİb tipi süper dev olduğu bulunmuştur. Sistem parametreleri aşağıdaki gibi verilmiştir :

Görünür bileşenin yörüngesel hızının iz düşümü :

$$v \sin i = 64 \text{ km/s}$$

Görünür bileşenin yörüngesel yarıçapının iz düşümü :

$$R \sin i = 4.6 \times 10^6 \text{ km.}$$

Kütle fonksiyonu :

$$m^3 \sin^3 i / (m+M)^2 = 0.12 \text{ Güneş kütlesi}$$

Burada m, tıkız-bileşenin, M ise optik bileşenin kütleleridir. Şayet süperdev yıldızın optik gözlemlerle elde edilen tayf sınıfına göre kütlesi 23 Güneş kütlesi değerinde ise X-ışınlarının etrafında olduğu tıkız-bileşenin kütlesi, 2 Güneş kütlesinden oldukça büyük bir değerde olacaktır ki bu da bir nötron yıldızı ya da bir beyaz cüceden oldukça farklı bileşene yani bir karadeliğe karşılık gelen kütlelerdir, Şekil 5. Cyg X-1'in X-ışık eğrisindeki hızlı değişimleri göstermektedir. Yatay çizgiler, kararlı bir kaynaktan beklenen maksimum sapmaları göstermektedir.

4.2.3. Cygnus X-3 :

Bu kaynak ilk kez 1966 da fırlatılan bir roket tarafından gözlemlenmiştir. Bu ilk verilerden kaynağın tayfında oldukça belirgin miktarda bir düşük enerji kıvrımı gözlemlenmiş ve bu da uzak bir galaktik kaynağa yıldızlararası ortamdaki emici özellik biçiminde yorumlanmıştı. Daha sonraki verilerle bu özellik doğrulanmıştır. 1972 yılındaki çalışmalardan kaynağın yeğinliğinde 4.8 saatlik bir modülasyon olduğu gözlemlenmiş ve bunun Cen X-3 ve Her X-1 de gözlemlenenden farklı olduğu bulunmuştur. Cyg X-3 de, minimum X-ışın yeğinliği maksimumdakinden hemen hemen %50 oranında farklıdır. 17.75 günlük bir periyodik davranış da keza bu kaynaktan gözlemlenmiştir. Bunlardan hangisinin

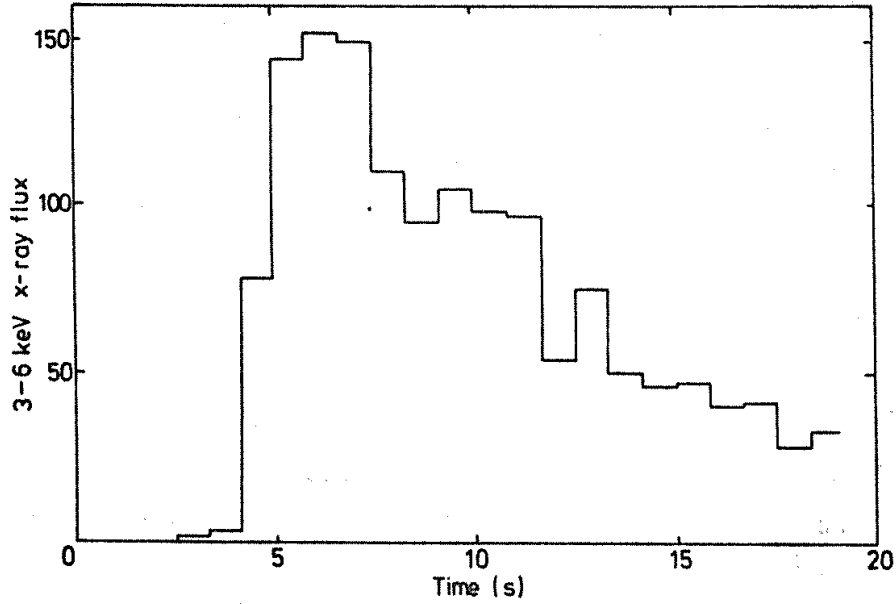
ikili sistemin periyodu olduğu açık değildir. Enerjileri 35 MeV den daha büyük olan gamma ışınları da Cyg X-3'den gözlemlenmiştir. Her ne kadar gamma ışınları ölçümlerinde pozisyonu kesinlikle tayin etmek oldukça güç olsa da 4.8 saatlik bir modülasyon, bu gözlemlerle elde edilmiştir. Cyg X-3, görünür bölgede gözlemlenmemiş fakat 1.6 ve 2.2 μm dalga boylarında sönük bir kırmızı-ötesi kaynak olarak gözlemlenmiştir. Yıldızın yeğirliği, bu dalga boylarında 11 veya 12 kadirdeki bir görünür kaynağın yeğirliğine denktir. Bu değer de bir yeğirlik, bizden 10 kpc uzaklıkta olan bir mavi süperdevden beklenen yeğirliktir. Bu uzaklık değeri de 21 cm hidrojen çizgisi çalışmalarından hesaplanan radyo verileri ile uyum içindedir.

4.2.4. X-ışın Transientleri :

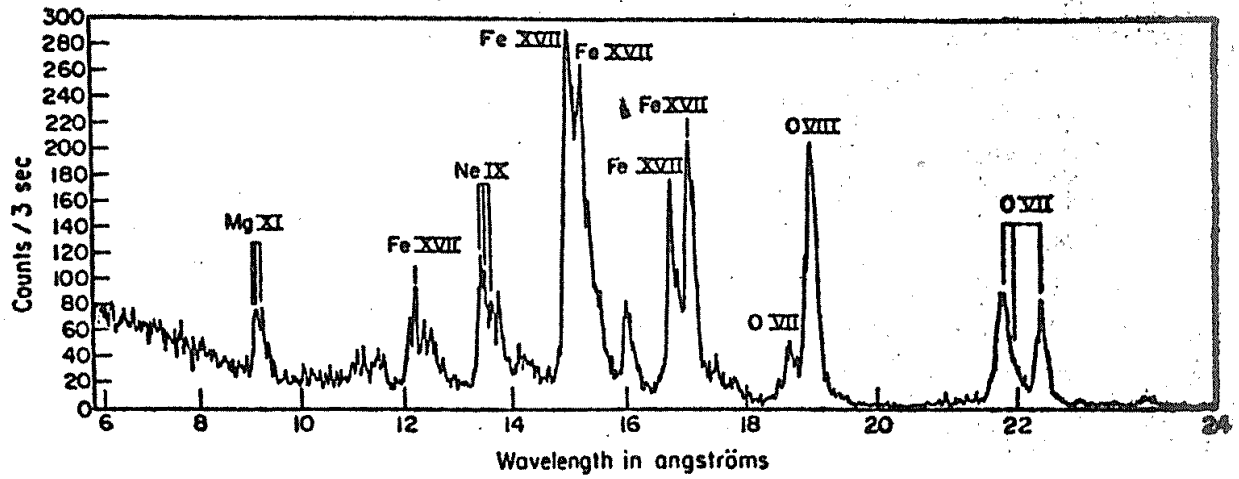
X-ışın transientleri, diğer bir deyişle X-ışın novaları, yeğirliklerinde bir önceki düşük bir değerden birdenbire yüksek bir değere tırmanma gösteren yıldızlardır. Bu yükselme genellikle birkaç gün veya daha az bir zaman sürecinde olurken, düşme haftalar hatta aylar almaktadır. Bu tür bir davranış görünür bölgede gözlemlenen normal nova davranışı ile oldukça benzerdir, ne var ki, görünür bölgede gözlemlenen novaların tümü X-ışın dalga boylarında gözlemlenmeyebilir. Bu tür transientler içinde en iyi bilinen kaynaklar, Cen X-2, A0620-00 ve A0535+26 dir. Bunlardan başka A1524-61, A1724-28 ve A118-61 de bu guruptan kaynaklar arasında yer almaktadırlar.

4.2.5. Galaktik Merkeze Yakın X-ışın Kaynakları :

Galaktik merkez ile 25° lik açı içersinde kalan X-ışın kaynakları bu guruba girmektedir ve üç gurupta toplanabilirler. Bunlar, parlak Galaktik göbek kaynakları, küresel küme kaynakları ve X-ışın burster'leridir. Bunların, Galaktik sistemdeki son derece sınırlı bir bölgede dağılmış bulunmaları nedeniyle yapılan gözlemlerden Galaktik merkezin 4 veya 5 kpc yarıçaplı bir bölgesi içinde buldukları bilinmektedir. Şimdi sırasıyla bu üç gurubu oluşturan kaynaklara değinelim : Parlak Galaktik göbek kaynakları X-ışın yeğirliklerinde düzensiz değişimler gösterirken, tutulma göstermezler. Tayflarında gözlemlenen düşük enerji kıvrımından bunların bizden 10 kpc uzaklıkta oldukları saptanmıştır. X-ışınları oldukça yüksek olup, 10^{38} erg/s değerinden bazı hallerde büyük bile olmaktadır. Küresel küme kaynakları ise bugün 9 adet olarak tanımlanmış olup, bunlarda da ne tutulma ne de periyodik bir davranış gözlemlenmiştir. X-ışın burster'leri ise birbirlerini saat veya gün mertebesinde takip eden burstler gösterirler. Bunlarda da herhangi bir periyodik davranış gözlemlenmemiştir. Bursterlerin pek çoğu aynı zamanda kararlı birer X-ışın kaynağıdır. Bunların maksimum burst ışınları parlak Galaktik göbek kaynakları kadar yani 10^{38} erg/s değerine ulaşmaktadır. Bu üç gurupta toplanan kaynakların sayısı yaklaşık 50 civarındadır. Şekil 6., X-ışın bursterlerinden birisi olan X1728-34'ün burst profilini göstermektedir.



Şekil 6 : X1728-34 X-ışın bursterinin tipik bir burst profili.



Şekil 7 : OSO-5 uydusundan Güneş'in aktif olmayan periyodu için kollimatörsüz bir spektrometreyle elde edilmiş X-ışın tayfı.

4.2.6. Düşük Işınımlı X-ışın Kaynakları :

Birkaç X-ışın kaynağının bugün bizim oldukça yakınımda oldukları bilinmektedir. AM Her, tutulma gösteren bir ikili sistemde olup, 3.1 saatlik periyodu olduğu bilinmekte ve değişken bir yıldızla birlikte tanımlanmıştır. Sistemde tıkHz-yıldız olarak bir beyaz cüce bulunmaktadır. SS Cyg ve UGem de cüce novalar olup, X-ışın dalga boylarında gözlemlenmişlerdir. Bunlar da bileşenlerinin birisi beyaz cüce olan düşük ışınımlı sistemlerdir. Bunların dışında, Capella, Sirius ve Algol gibi bizim oldukça yakınımda olan yıldızlardan da son derece düşük değerde olan X-ışınımı gözlenmiştir. Bu yıldızlar muhtemelen Güneş'ten daha şiddetli X-ışınları yayımlayan birer koronaya sahiptirler.

4.3. X-ışın Süpernova Kalıntıları :

4.3.1. Cassiopeia A :

Cas A, ilk kez 1967'de bir X-ışın kaynağı olarak gözlemlenmiş, ancak o zamanın gözlemleriyle X-ışın kaynağının yeri kesinlikle saptanamamış ve ancak 1972'de kesin ölçümler yapılabilmıştır. 1-10 keV enerji aralığındaki X-ışını yeğingliği Crab Nebula'nın %10 u değerindedir. Son çalışmalar, Cas A için termal bir X-ışın üretim mekanizmasının varlığına işaret etmektedir. Ariel-5 gözlemleri, kaynak tayfının iki bileşenli termal bremsstrahlung eğrisi ile en iyi biçimde ifade edilebildiğini ve bu bileşenlere de 12×10^6 K ve 60×10^6 K değerlikli sıcaklıkların eşdeğer olduğu bölgelerden kaynaklandığını göstermektedir. Copernicus peyki ile yapılmış çalışmalardan, X-ışın yayımlayan bölgenin radyo dalgalarının yayımlandığı bölge ile aynı boyutta olduğunu öğreniyoruz. Cas A'nin yaklaşık 300 yıl önce patlayan bir süpernovanın kalıntısı olduğu bilindiğine göre merkezinde bir pulsar olma ihtimali oldukça yüksek olmasına rağmen bugüne kadar radyo, optik ve X-ışın dalga boylarında yapılan tüm araştırmalar hiç bir sonuç vermemiştir.

4.3.2. Puppis A, Vela X ve Cygnus Loop :

Bu üç süpernova kalıntısı, Cas A, Tycho ve Crab'dan daha büyük olup, onlardan çok daha yaşlı olduklarına inanılmaktadır. Bunlardan Puppis A ve Vela X, gökyüzünde birbirine yakın bulunmaktadır. Bu nedenle ilk gözlemler bu iki kaynağı Vela X-2 adlı bir tek kaynakta toplamıştı. Puppis A bir düşük enerjili X-ışın kaynağıdır. 0.2-18 keV enerji aralığında elde edilen tayfsal verilerden X-ışın astronomisinde en çok kullanılan her üç kuramsal modelin bu verilere uymadığını görmekteyiz. Ne varki, sıcaklığı 10^7 K nin altında olan termal plazmalar tayfta kuvvetli salma çizgileri göstermek suretiyle eksponensiyel biçimden bir sapma gösterirler. Gerçekten de bu veriler, 0.65 keV de bir maksimum göstermek suretiyle 4×10^6 K lik bir termal modele uygunluk göstermiştir. Bu sonuçlar daha sonraki çalışmalarda 0.66 keV de oksijen salma çizgisinin gözlemlenmesiyle X-ışınlarının termal orjinli oldukları bulgusunu kuvvetlendirmiştir. Puppis A gibi Vela X de kuvvetli bir düşük enerjili X-ışın kaynağıdır. 1 keV de Vela X, Güneş'ten sonra gökyüzünde en kuvvetli bir X-ışın kaynağıdır. Bu kaynağın tayfı da 4×10^6 K sıcaklığındaki bir sıcak gazın tayfı ile uyum içindedir. Son çalışmalar, kalıntının kuzey-batı köşesinin diğer

bölgelerine oranla çok daha parlak olduğunu ve tabaka biçimli bir yapı gösterdiğini vurgulamaktadır. Vela X, Crab Nebula'dan sonra bir merkezi pulsarın gözleendiği tek süpernova kalıntısıdır. PSR 0833-45 pulsarı radyo dalga boylarında gözlemlenmiş olup, 87 ms lik peryoda sahiptir. Ayrıca optik ve gamma ışını dalga boylarında da oldukça zayıf olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, X-ışın dalga boylarında bu pulsardan puls gözlemlenmemiştir.

Cygnus Loop ise düşük enerjili X-ışınları gönderen, oldukça genişlemiş bir başka süpernova kalıntısıdır. Optik astronomlarca Veil Nebula adıyla bilinir.

4.3.3. Crab Nebula :

Bugün, bu nebula şu isimlerle bilinir : M1 (Messier numarası), NGC 1952 (Yeni Genel Katolog), Taurus A (Radyo astronomide), 3C144 (radyo kaynaklarının üçüncü Cambridge katoloğu), Tau X-1 (X-ışın astronomisinde) ve SN 1054. Crab'in X-ışın tayfı, 1-20 keV enerji aralığında roket ve peyklerle ve 20-500 keV aralığında da genellikle balonlarla oldukça geniş ve ayrıntılı bir biçimde çalışılmıştır. Tayf, bir bütün olarak tek bir power-law modeline uygunluk göstermektedir. 2-60 keV aralığında ki tayf, $I(E) = 9.5 E^{-1.08 \pm 0.05} \text{ keV/cm}^2 \text{ s keV}$ biçimindeki bir power-law modeline uymaktadır. Crab'in tayfı öylesine iyi hesaplanabilmiştir ki X-ışın astronomları bunu kalibrasyon kaynağı olarak sık sık kullanmaktadırlar. Crab, aynı zamanda rastgele değişim göstermeyen kuvvetli bir X-ışın kaynağıdır. Power-law modeline gösterdiği mükemmel uygunluktan dolayı X-ışınlarının, daha önce sözünü ettiğimiz sinkrotron mekanizması ile oluştuğu ve X-ışın tayfının da realistik elektron tayfının power-law tabiatını yansıttığı düşüncesi hakim olmaktadır. Crab'in X-ışın ışınımı 0.5-10 keV enerji bandında yaklaşık birkaç kez 10^{37} erg/s mertebesinde dir. Sönük bir X-ışın radyasyonu, Crab'daki asıl sinkrotron kaynağının dışındaki bir bölgeden gözlemlenmiştir.

5. X-IŞIN KAYNAĞI OLARAK GÜNEŞ

İlk bakışta, G2 tipinden, 5700°K yüzey sıcaklıklı bir yıldızın X-ışınları göndermesi şaşırtıcı gelebilir. 1938 yılında Hulbert, Güneş'in X-ışınlarının Dünya atmosferindeki E-bölgesinin oluşmasından sorumlu tutulacağını ileri sürmüştü. 1942'de, Edlen'in Güneş'in koronasından yayınlandığını öne sürdüğü koronal emisyon çizgi tayfının yüksek mertebeden iyonize olmuş ağır atomların yasak geçiş çizgileri olduğunun saptanmasıyla koronal yapı fikri ilk kez ortaya atılmış oldu. Güneş'in X-ışınlarının ilk kez gözlemi 1949 yılında Burnight tarafından rapor edilmiştir. Bu gözlem, yerden 110 km yükseklikte kısa bir süre için uçurulmuş bir V-2 türü roketten elde edilmiştir. Bu ilk roket gözlemlerinden sonra 1960 yılına dek Naval Research Laboratory (NRL) tarafından sürekli bir program çerçevesinde bir dizi roket gözlemleri ile Güneş'in X-ışınları gözlemlenmeye devam edilmiş ve 1-60 Å aralığında duyarlı iyon odaları ve Geiger sayıcıları kullanmak suretiyle NRL gurubu Güneş'in X-ışın emisyonu için birçok özelliklerin bulunmasını sağlamıştır. Yalnız,

bu gözlemler, 1958 yılına kadar tüm güneş diskten gelen radyasyona duyarlı detektörlerce yapılmıştı. 1958 de ise NRL gurubu, X-ışın emisyonunun dağılımı hakkında ilk bilgiyi elde etti. Bu ilk bilgiler, bir Güneş tutulması esnasında Güney Pasifikteki bir gemiden bir dizi roketin fırlatılması sonucunda bu roketlerden alınan bilgilerdir. Bu çalışmalardan iki önemli sonuç elde edildi. X-ışın emisyonunun, Güneş'in aktif bölgelerinin dışında yoğunlaşmış olduğu fakat 44–60 Å aralığında toplam akımın %12 sinin hala mevcut olmasından da bu tür bir radyasyon için koronal bir orijine işaret edildi. Bu gözlemler, Blake ve arkadaşları tarafından 1963 de basit bir pinhole fotoğraf makinası ile alınan güneş imajı ile de doğrulandı. 1950 li ve 1960 lı yıllarda Güneş'in X-ışın gözlemleri devam ederken Elwert, 0.5×10^6 K ve 100×10^6 K bandındaki çizgi emisyonunun ve sürekli emisyonun özelliklerini inceledi. O zamana kadar kullanılan zayıf dalga boyu rezolüsyonlu detektörlerce yapılan gözlemlerle çizgi emisyonunun önemi bu çalışma ile belli olduktan sonra kuramsal sonuçların karşılaştırılması işlemi ancak zorlukla yapılabiliyordu. 1964 yılında daha ileri teknik olanaklarla Bragg kristal spektrometresi kullanılarak yapılan koronal çizgi emisyonu gözlemleri ile 25 Å un altındaki dalga boylarında birkaç kuvvetli emisyon çizgisi keşfedildi. Bu çizgiler, O VII, O VIII, FE XVII ve Ne IX iyonları arasındaki geçişlerden ileri gelmekteydi. Bu gözlem, Elwert'in kuramsal hesaplarını doğrulayarak güneş X-ışın çalışmalarında kristal spektrometrelerin kullanımının artmasına neden oldu. 1968 de Evans ve Pounds, O VII deki $1 s^2 - 1 s2p$ geçişinin gözlemlenmesi ile koronal sıcaklığın 1.5×10^6 K olduğunu ve emisyon integrali değerinin de (yani, $\int N_e^2 dV$, burada N_e plazmadaki elektron yoğunluğudur) $1.5 \times 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ olduğunu buldular. Acton ve arkadaşları 1972 de O VII ve Ne IX emisyon çizgilerini bir kolimatörlü Bragg spektrometresi kullanarak koronal sıcaklık için $1.3 - 1.7 \times 10^6$ K değerlerini elde ettiler. Korona çalışmalarında karşılaşılan ana güçlük, o yıllara kadarki geliştirilen detektörlerle en iyi spektral ve pozisyon rezolüsyonunun aynı anda bir tek alet ile mükemmel bir biçimde elde edilememesiydi. Blake ile 1963 yılında başlayan Bragg spektrometresi kullanımı, roket ve daha sonraları da uydularda aynı spektrometrelerin kullanımı ile güneş fllerinin yokluğunda tüm koronanın X-ışın tayfının elde edilmesini sağlamıştır, Şekil 7. Böyle bir tayfı göstermektedir. Veri, OSO-5 uydusuna yerleştirilen kolimatörsüz bir Bragg spektrometresinden alınmıştır. Tablo 1. de ise güneş koronasında gözlemlenen önemli emisyon çizgileri verilmiştir. Tüm korona tayfı elde edildikten sonra bu tayf, her bir aktif bölgenin ayrı ayrı incelenmesi için de kullanılabilir. Bir koronal çizgi tayfının ilk kuantitatif analizi Evans ve Pounds tarafından yapılmıştır. Gözlenen emisyon, bu kişilerce aktif bölge ve genel koronal bileşenlerine ayrılabilmiş buradan da ölçülen çizgi şiddetlerinin kuramsal sonuçlarla karşılaştırılması sonucunda aktif bölge materyeli için sıcaklık değerinin $2.5 - 4 \times 10^6$ K değerleri arasında olduğu bulunmuştur. Ne var ki, bu gözlemsel verilerin karşılaştırıldığı modelde izotermal bölgelerde bulunan farklı iyonların yaklaşık bir sıcaklık değerinde bulunduğu kabul edilmişti oysa bu pratikte hiç de doğru bir sonuç vermeyebilir. Daha sonra fırlatılan bir roketten alınan veriler ile, Batstone ve arkadaşları birbirinden farklı aktif üç bölge için sıcaklığın bir fonksiyonu olan diferensiyel emisyon ölçümünün elde edilmesini,

ÇİZELGE I
Seçilmiş güneş emisyon çizgileri.

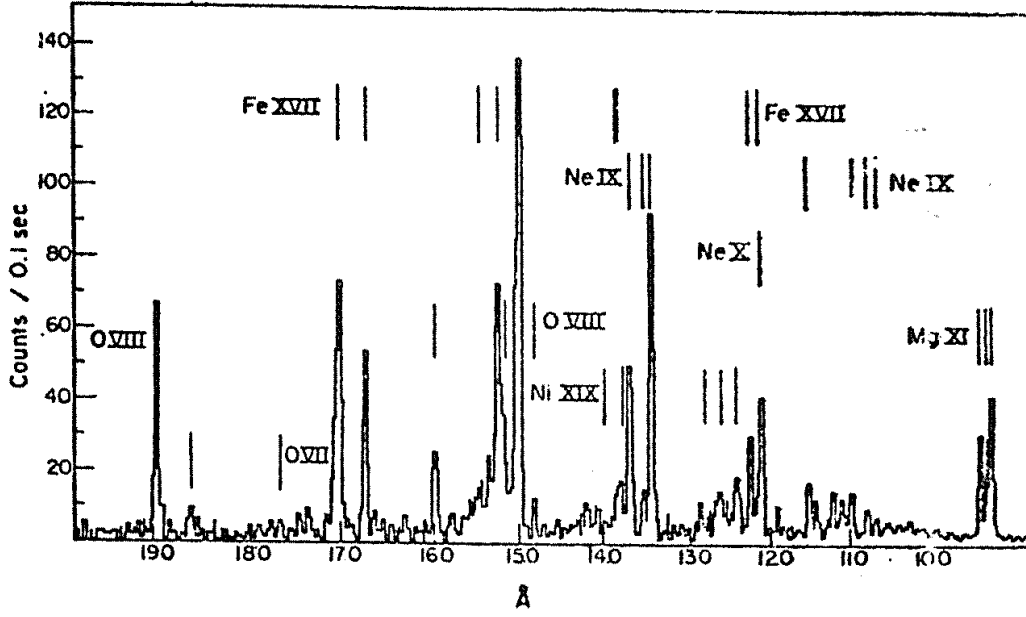
İyon	Geçiş	Dalgaboyu
OVII	$1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^1P_1$	21.60
	$-1s2p\ ^3P$	12.80
	$-1s2p\ ^3S_1$	22.10
	$-1s3p\ ^1P_1$	18.62
OVIII	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{1/2,3/2}$	18.97
	$-3p^2P_{1/2,3/2}$	16.01
FeXVII	$1s^22s^22p^6\ ^1S_0$	
	$-1s^22s^22p^53s^3P_1$	17.05
	$-1s^22s^22p^53s^1P_1$	16.77
	$-1s^22s^22p^53d^3P_1$	15.45
	$-1s^22s^22p^53d^3D_1$	15.26
	$-1s^22s^22p^53d^1P_1$	15.01
FeXVIII	$1s^22s^22p^5P^0$	
	$-1s^42s^22p^43d^2P$	15.88
	$-1s^22s^22p^43s^2D$	15.62
	$-1s^22s^22p^43d^2P$	14.68
	$-1s^22s^22p^43d^2P$	14.54
NiXIX	$1s^22s^22p^6\ ^1S_0$	
	$-1s^22s^22p^53d^3P_1$	12.85
	$-1s^22s^22p^53d^3D_1$	12.64
	$-1s^22s^22p^53d^1P_1$	12.42
NeIX	$1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^1P_1$	13.45
	$-1s2p\ ^3P$	13.55
	$-1s2p\ ^3S_1$	13.70
	$-1s3p\ ^1P_1$	11.56
NeX	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{1/2,3/2}$	12.13
MgXI	$1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^1P_1$	9.17
	$-1s2p\ ^3P$	9.23
	$-1s2s^3S_1$	9.31
MgXII	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{1/2,3/2}$	8.42
SiXIII	$1s^2\ ^1S_0-1s2p\ ^1P_1$	6.65
	$-1s2p\ ^3P$	6.69
	$-1s2p\ ^3S_1$	6.74
SiXIV	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{1/2,3/2}$	6.18
SXV	$1s^2\ ^1S-1s2p\ ^1P_1$	5.04
	$-1s2p\ ^3P$	5.07
	$-1s2s^3S_1$	5.1
CaXIX	$1s^2\ ^1S-1s2p\ ^1P_1$	3.17
	$-1s2p\ ^3P$	3.19
	$-1s2s^3S_1$	3.21
FeXXV	$1s^2-1s2p\ ^1P_1$	1.850
	$-1s2p\ ^3P$	1.856
	$-1s2s^3S_1$	1.862

gözlemlenen çizgi şiddetlerini kullanmak suretiyle başardılar. Bu üç bölgeden birinde, $7.5-9.5 \times 10^6$ K sıcaklıkları aralığındaki bir materyelin varlığına işaret eden bir delil bulunmuş oldular. Güneş fllerleri, enerjinin serbest bırakılmasına işaret eden olayla ilgili olduklarına göre, bunlara ait X-ışın emisyon süreleri 1 saniye ile birkaç dakika arasında değişen zaman süreçleri içinde X-ışın yeğliliklerinde hızlı değişimler gösterir. Şekil 8 de bir aktif bölgeden gözlemlenmiş bir tayf verilmiştir. Şekil 9 da ise bir güneş fleri esnasında farklı enerji aralıklarında yeğliliğin zamanla değişimi gösterilmiştir. Kısa zaman aralıklarında değişerek etkisini gösteren bu X-ışın emisyonunun, başlangıçta yüksek sıcaklıklı bir plazmada oluştuğu fikri yaygınken bugün bunun termal olmayan elektronların, iyon yoğunluğu $N_{ion} \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ olan alt Güneş atmosferi ile etkileşmesi sonucunda oluştuğu fikri hakimdir.

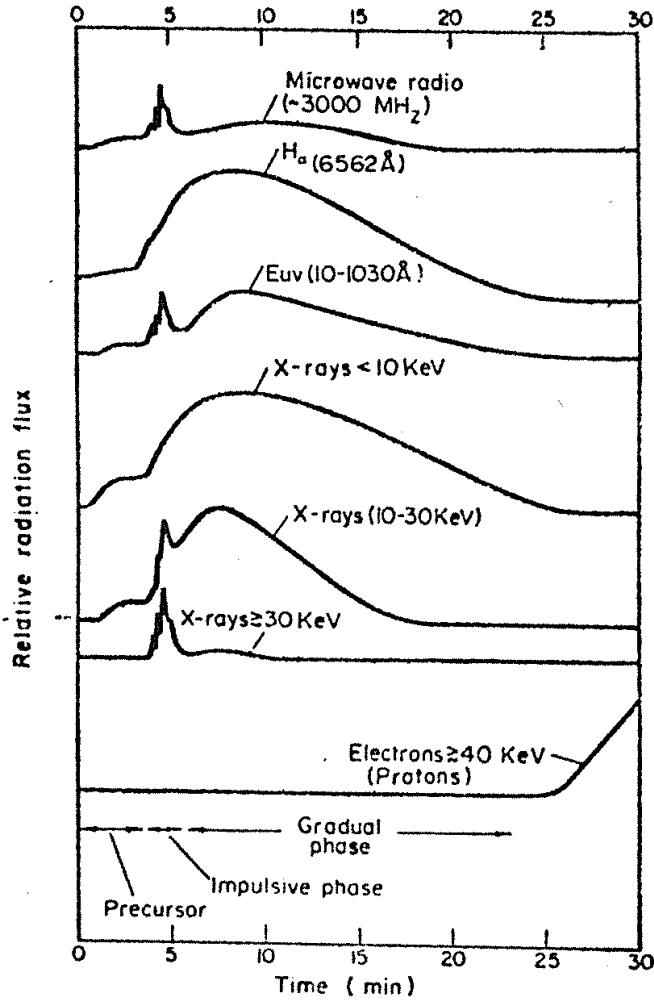
Aktif bölge çalışmalarında olduğu gibi, bir fler plazmanın tayfsal rezolüyonu da pozisyon rezolüyonu en iyi bir şekilde başarılmadan elde edilmektedir. Büyük yeğlilikli bir fler sinyali, emisyon çizgisinin ve sürekli tayfın, koronanın geri kalan kısmından yayımlanan emisyon tarafından özelliği ve şekli değiştirilmeksizin ölçülebilmesine izin vermektedir. Bu tür bir tayf, emisyon çizgileri açısından oldukça zengin bir tayftir. Yine aktif bölgelerde olduğu gibi, emisyon çizgilerinin gözlemlenmesi ile emisyon gönderen plazmanın tabiatı ve durumu hakkında en ayrıntılı bilgiyi elde etmek mümkün olmaktadır. İlk fler çizgi emisyonu gözlemleri, 1967 de Neupert ve arkadaşları tarafından OSO-3 uydusunda Bragg kristal spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Bunu, NRL gurubunun diğer OSO uyduları izlemiş ve daha sonraları da O VI-10 ve O VI-17 uyduları ile Interkosmos 4 uyduları ile gözlemler yapılmıştır. Günümüzde ise Güneş X-ışınları SMM uydusu ile gözlemlenmektedir. Fler plazmaların sıcaklığı, yoğunluğu ve emisyon ölçüsü gibi bilgileri prensip olarak elde etmek mümkündür. Ne var ki, X-ışın akısındaki hızlı değişimler bunu iki açıdan güçleştirmektedir : İlk olarak; X-ışın spektrumu, gözlemin yapıldığı süre içerisinde tayfın alındığı süre içinde dikkati çekecek ölçüde değişim gösterebilir. İkinci olarak da fler plazma, özellikle ışık eğrisinin yükselme gösteren kısmında iyonizasyon dengesinden hayli uzakta bulunabilir. Fler plazma sıcaklıkları, iyonizasyon denge şartı olduğu varsayılarak tahmin edilmiş olduğu halde iyonizasyon dengesinin zamana bağımlı olduğu şartlar gözönüne alınmalıdır. Bu tür çalışmalar, Kafatos ve Tucker ve de Doschek ve Meekins tarafından yapılmış ve sonuçta da 10^{10} cm^{-3} den büyük yoğunluklu plazmalar için durağan-durum varsayımının yeterli olduğu bulunmuştur. Güneş fllerlerinden gözlemlenen şiddetli X-ışın emisyonu ($E > 20 \text{ keV}$), yüksek enerji elektronlarından bremsstrahlung mekanizması ile oluşmaktadır. Bu tür şiddetli bir tayfın,

$$dN / dE = K E^{-n} \quad \text{foton / cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{keV} \quad (25)$$

biçiminde olduğu bulunmuştur. $20 < E < 100 \text{ keV}$ için buradaki n , $2.4 < n < 5.5$ olarak elde edilmiştir. Daha yüksek enerjilerde tayf, daha dik olmaktadır.



Şekil 8 : Güneş'in aktif bir bölgesinin tayfı.



Şekil 9 : Bir güneş patlaması sırasında farklı spektrel aralıklarda yoğunluğun zamanlı değişimi.

6. GALAKSİMİZ-DIŞI X-IŞIN KAYNAKLARI VE İZOTROPİK ZEMİN RADYASYONU

Yüksek Galaktik enlemde bulunan 100 ya da daha fazla kaynağın büyük bir bölümü Galaksimiz-dışı X-ışın kaynakları olarak tanımlanmıştır. Bu cisimler başlıca üç ana kategoride toplanabilir :

- (i) Kendi Galaksimizin yayınladığı X-radyasyonundan daha fazla X-ışını yayımlayan "Aktif Galaksiler",
- (ii) Galaksimize yakın miktarda X-ışın kaynakları barındıran "Yakın Galaksiler",
- (iii) Galaksi Kümeleri.

Galaksimiz-dışı X-ışın kaynaklarının incelenmesi Galaktik kaynaklara oranla daha az gelişmiş bir düzeyde kalmıştır. Bunun nedeni de Galaksimiz dışı bu kaynakların günümüz aletleri için oldukça sönük kalmış olmalarıdır. En kuvvetli bir Galaksimiz-dışı X-ışın kaynağı, Crab'den tam 25 kez daha sönüktür. Diğer pek çoğu da uydulara yerleştirilen aletler ile gözlemlenebilmeleri için çok uzun süreli gözlemler gerektirmektedir.

6.1. Normal Galaksiler :

Magellanic Bulutlar, Dünya'nın güney yarı-küresinde çıplak gözle görülebilen iki cüce galaksidir. Bizden yaklaşık 55 kpc uzaktadırlar. Küçük Magellanic Bulut'unda şimdiye kadar üç kaynak gözlemlenmiştir. Bunlardan SMC X-1, 3.89 günlük bir periyot ile tutulma gösteren bir ikili sistemdir. Sistemin optik bileşeni B O tipinden bir süper devdir. Her iki bulutta da (Büyük ve Küçük) gözlenen kaynaklar, Galaksimizdeki kuvvetli ışınım veren kaynaklara benzer ışınımlara sahiptir (yani 10^{38} erg/s). Her iki bulutta aynı zamanda zayıf ışınımlı kaynakların bulunduğu da bilinmektedir. M 31, spiral galaksiler içinde bize en yakın olanıdır ve kuzey yarı-küreden çıplak gözle görülebilir. Toplam X-ışınımı yaklaşık 2×10^{39} erg/s olup, oldukça sönük bir X-ışın kaynağıdır.

6.2. Aktif Galaksiler :

Optik bir teleskopla gözlenebilen galaksilerin küçük bir miktarı, çekirdeklerinde bir aktivite sürüp gitmekte olduğunu göstermektedir. Radyo galaksiler, aktif galaksi sınıfının en iyi bilinen elemanları olup, 10^{40} erg/s den daha büyük radyo ışınımlarına sahiptirler. Radyo dalga boylarındaki tayfsal verilerden, emisyon mekanizmasının bir manyetik alan içinde hareket eden relativistik elektronların oluşturduğu sinkrotron radyasyonu olduğu bilinmektedir. Centaurus A (NGC 5128), X-ışın dalga boylarında ayrıntılı olarak çalışılmış bir radyo galaksidir. Bu sınıf içerisinde 4 Mpc bir uzaklık ile bize en yakın olanıdır. Bu kaynaktan gelen X-ışınları, ilk kez 1970 yılında roket gözlemleri ile detekte edilmiştir. Elde edilen iki delil ile X-ışın kaynağının galaksinin çekirdeği ile ilgili olduğu saptanmıştır. Birincisi, tıkHz-radyo kaynağı gibi X-ışın yeğlinliği değişkendir. Öyle ki, üç ya da dört yıllık gözlemlerde X-ışın parlaklığı 3 ile 5 misli bir değişme göstermiştir. Ayrıca, X-ışın şiddetinde 6 günlük bir sürede %40 oranında artış da gözlenmiştir. İkincisi,

X-ışın tayfı $N_H = 1.35 \times 10^{23}$ atom/cm² değerine karşılık gelen bir düşük-enerji kırımı göstermektedir. Bu değerde bir kolon yoğunluğu, NGC 5128 galaksinin çekirdeğini çevreleyen materyel tarafından oluşmuş olabilir, başka türlü açıklanamaz. X-ışın tayfı 0.8 değerinde bir tayfsal indisli power-law'dur.

Cygnus A'da radyo galaksiler içinde en kuvvetli olanlarından biridir. Zayıf bir X-ışın kaynağı olarak bilinir. M87 (Virgo A, NGC 4486) ise Virgo kümesinin merkezinde bulunan oldukça ilginç bir radyo galaksidir. Görünür ışıktaki alınmış kısa pozlu fotoğrafından dev bir eliptik galaksinin çekirdeğinden fırlatılmış gibi görünen bir jete sahiptir. Crab Nebula gibi bu jet, görünür bölgede sinkrotron radyasyonu yayımlar.

Seyfert galaksiler ise parlak bir çekirdeği olan spiral galaksilerdir. Çekirdekleri, görünür dalga boylarında kuvvetli ve genişlemiş salma çizgileri gösterir. Böyle kuvvetli salma çizgileri galaksiler arasında yaygın değildir. Seyfertlerde gözlenen genişlemiş bu çizgilerin galaksi çekirdeğinden yüksek hızlarda atılan gaz vasıtası ile oluştuğu düşüncesi hakimdir. Seyfert tayfında hem yüksek yoğunluklu gazdan üretilen müsadeli çizgiler, hem de düşük yoğunluklu gazdan üretilen yasaklanmış çizgiler mevcuttur. Tip 2 Seyfertlerde her iki türden de çizgiler benzer genişliktedir. Tip 1 Seyfertlerde ise, müsadeli çizgiler yasaklanmış çizgilerden daha geniş olup, yoğun merkezi bölgelerde gazın daha enerjetik olarak atıldığını ileri sürmektedir. Her iki tipte de Seyfert galaksilerinin çekirdekleri kuvvetli bir kızıl-ötesi kaynağıdır. Zaman zaman gözlenen değişkenlik son derece tıkHz boyutlar gerektirir. Seyfertlere örnek olarak NGC 4151 (tip 1), NGC 1275 (tip 1 veya 2, belli değil) ve NGC 1068 verilebilir.

Yarı-yıldızsal cisimler (quasarlar), optik bir gözlemciye normal olarak yıldız benzer bir cisim olarak görünen fakat normal yıldızlardan hayli farklı bir tayf gösteren cisimlerdir. Gözlenen büyük değerlikli kızıla kaymalar, ışık hızına yakın hızlarda uzaklaştıklarını gösterir. 3C 273 bize en yakın ve en parlak bir yarı-yıldızsal cisimdir. 0.9 değerinde tayfsal indisli bir power-law tayfa sahip olan bu cisim, 7×10^{45} erg/s değerinde bir maksimum X-ışına ile Galaksimizden bir milyondan daha büyük değerde bir ışınımına sahiptir. X-ışınlarında değişkenlik gözlemlenmiş olup, bu Cen A'daki ve tip 1 Seyfertlerdeki tıkHz X-ışın kaynaklarını andırmaktadır.

Aktif galaksilerden gözlenen X-ışın yayınımını açıklayan farklı iki kuram mevcuttur. Birincisi, aktif bir galaksinin merkezinde bulunan 10^7 Güneş kütlelerinden büyük bir kütleyle sahip bir kara deliğin üzerine eklenmekte olan materyelden dolayı oluşan X-ışınlarını, ikincisi ise Compton-sinkrotron kuramı adı altında, galaksinin tıkHz göbeğinde radyo, kızıl-ötesi ve optik dalga boylarında üretilen radyasyonu açıklayan kuramlardır. İkincisinde relativistik elektronlarla fotonlar arasındaki ters Compton etkileşmesi sonucunda X-ışın emisyonu oluşur. Birincisinde 10^9 K veya daha büyük sıcaklıklara kadar salınan gravitasyonel enerji ile ısıtılan gaz, istenen yüksek değerdeki ışınımı ve sert tayfı göstermektedir. Değişimler ise eklenen materyelin eklenme hızındaki değişimlere karşılık gelmektedir.

6.3. Difüz X-ışın Zemin Radyasyonu :

Şimdiye kadar bahsettiğimiz türden kaynakları ihtiva eden gökyüzü, X-ışın dalga boylarında bir zemin yüzey parlaklığı sergiler. 2 keV den daha büyük enerjilerde bu zemin izotropiktir ve bu ise orijininde galaktik olmaktan çok galaksi-dışı bir özellik göstermektedir. Bunu şöyle açıklamak mümkündür : Galaksimiz, enerjileri 2 keV den daha büyük olan X-ışınlarına geçirgendir. Böylece bir difüz emisyon mekanizması galaksinin disk biçimli kısmındaki kaynaklarla aynı biçimde dağılım gösteriyorsa, difüz akı Samanyolunun düzleminde galaktik kutuplara oranla daha parlak görülecektir. Samanyolunda çok az bir ekstra difüz emisyon gözlemlenmiş olup, bu zemin radyasyonu için galaktik bir orijin olma olasılığını kesinlikle yok eder. 2 keV'nin altındaki enerjilerde gökyüzü hala X-ışınlarında parlak olup akı, galaktik kutuplarda Samanyolu düzlemine oranla daha kuvvetlidir. Difüz X-ışın zemini için sadece iki tip ölçüm yapılmıştır : Tayfının hesaplanması ve izotropik derecesinin bulunması. Difüz zeminin tayfı, artan X-ışın enerjisi ile monotonik olarak bir düşme gösterir ve X-ışın ile gamma ışın bölgelerinde gözlemlenebilir. Tayfın 10 keV nin altında kalan bölümü, bu değerin üstündeki bölüme oranla daha düzdür. 6.7 keV çizgisi tayfta kuvvetli bir biçimde gözlemlenmeyip, zemin radyasyonunu üreten mekanizma için hiçbir tayfsal ipucu bulunmamaktadır. İzotropi ölçümleri ise diskret kaynakların bulunmadığı bölgelerde yapılan ölçümlerde kayıt edilen akıların sistematik farklılığını araştırmak suretiyle yapılır. En duyarlı bu tür bir ölçüm, Uhuru uydusunun $5 \times 5^\circ$ görüş alanlı kolimatörünü kullanarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gökyüzünün boş alanlarından gelen X-ışın akısı bir $5 \times 5^\circ$ alanından diğerine %3 oranında değişim göstermektedir.

X-ışın zemininin orijini için başlıca iki çeşit düşünce tarzı mevcuttur :

- (i) zemin, uzayda aşağı yukarı bir biçim olarak üretildiğinden gerçekten difüzdür,
- (ii) zemin, büyük sayıdaki diskret kaynaklardan üretilmiştir. Bu sayı o kadar fazladır ki nasıl bir çıplak göze Samanyolu bir çok ayrı, ayrı yıldızlardan oluştuğu halde difüz gibi görünüyorsa, zemin de bu tür görünmektedir. İzotropi ölçümleri bu her iki düşünce tarzına da uyum göstermektedir.

1 keV'nin altındaki çok yumuşak X-ışın enerjilerinde gökyüzü parlak fakat artık izotropik değildir. Galaktik diskteki gazın bu tür ultra-yumuşak X-ışınlarını emmesi beklenir. Başlangıçta gözlemler, bu ultra-yumuşak X-ışın zemininin galaksi-dışı orijinli olduğu biçiminde yorumlanmış fakat daha sonra iki ana nedenle bu düşünceye ilgi azalmıştır. Birincisi, Galaksi düzlemindeki radyasyonun absorbe olmuş galaksi-dışı akıdan daha parlak olması ikincisi de, galaksi-dışı orijinli ultra-yumuşak X-radyasyonu Magellanic Bulutlar ve M31 tarafından absorbe edilecek ve geride de parlak bir X-ışın gökyüzünde koyu gölgeler bırakacaktır. Bu tür gölgeler SMC, LMC ve M31 de aranmış ama gözlenememiştir. Ultra-yumuşak zemin radyasyonunun büyük bir bölümünün yerel galaktik bir üretim olduğu düşüncesi genelde hakimdir. Galaktik kutuplara doğru gidildikçe bu radyasyon parlaklığının artması, galaktik diskteki kaynak bölgesinin galaktik enlemlerde absorbe edici gaz dağılımından daha büyük olması şartı ile açıklanabilir.