

Yüksek Enerji Gökbilimi Algılayıcıları

Emrah Kalemci^{1*}

Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Özet Gözlemsel yüksek enerji gökbiliminde altın çağı yaşanıyor. Fakat aynı zamanda büyük uzay ajanslarında yüksek enerji gökbilimini ileri götürecek uyduların yapımı ile ilgili bir belirsizlik de gözleniyor. Özellikle uzay alanında kendini kanıtlamaya çalışan ülkelerde ise (Hindistan, Brezilya ve Çin) uydu gözlemevi projelerinin devam ettiğini görüyoruz. Ulusal boyutta uzay çalışmalarına girmeye başlayan Türkiye’de de algılayıcı üretim çalışmaları başlıyor. Bu bildiride, önce yüksek enerji gökbiliminin popüler bir konusu olan karadelikleri etkin gözlemek için görüntüleme ve algılama sistemlerinin ne tip özelliklere sahip olması gerektiği tartışılacaktır. Daha sonra Sabancı Üniversitesi Yüksek Enerji Gökbilimi Laboratuvarı’nda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

1 Giriş

Gözlemsel gökbilim altın çağını yaşıyor. Yüksek enerji gökbiliminde çalışan gözlemevi sayısı 6 (*Chandra*, *XMM-Newton*, *INTEGRAL*, *Suzaku*, *RXTE*, *Swift*). Bu uydu gözlemevlerinin ürettiği çok büyük miktarda veri var. Ayrıca şu anda çalışmayan, ama yüksek enerji gökbiliminin gelişmesinde önemli yeri olan *ROSAT*, *BeppoSAX* gibi uyduların ürettikleri veriler de mevcut.

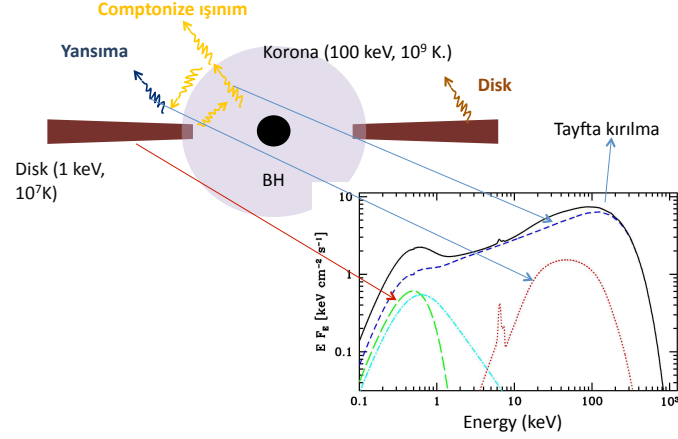
Geleceğe bakarsak, ekonomik krizlerin de etkisi ile *IXO* - International X-ray Observatory gibi büyük gözlemevlerinin yapımının ertelendiğini, hatta belki de hiç yapılmayacağını görüyoruz. Ama gerek uluslararası ölçüde (ESA’nın orta boy, M-class çağrısı), gerek ulusal ölçüde, özellikle uzay alanında kendini kanıtlamaya çalışan ülkelerde (Hindistan, Brezilya ve Çin), uydu gözlemevi projeleri devam ediyor.

Gökbilimin gideceği noktayı veriler belirler. Verilerin özelliklerini anlamadan, onların nasıl bir algılayıcı düzeneğinden geçip, nasıl işlendiğini bilmeden yorumlamak bizi yanlış sonuçlara ulaştırabilir. Dolayısıyla algılayıcıların çalışma prensiplerini anlamak bir yüksek enerji gökbilimcisi için gerekliliktir. Bu çalışmada önce yüksek enerji gökbiliminin popüler bir konusu olan karadelikler ele alınacaktır. Daha sonra onları etkin gözlemek için görüntüleme ve algılama sistemlerinin ne tip özelliklere sahip olması gerektiği tartışılacak ve Sabancı Üniversitesi Yüksek Enerji Gökbilimi Laboratuvarı’nda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

* ekalemci@sabanciuniv.edu

1.1 Yüksek enerji ışınım kaynağı olarak karadelikler

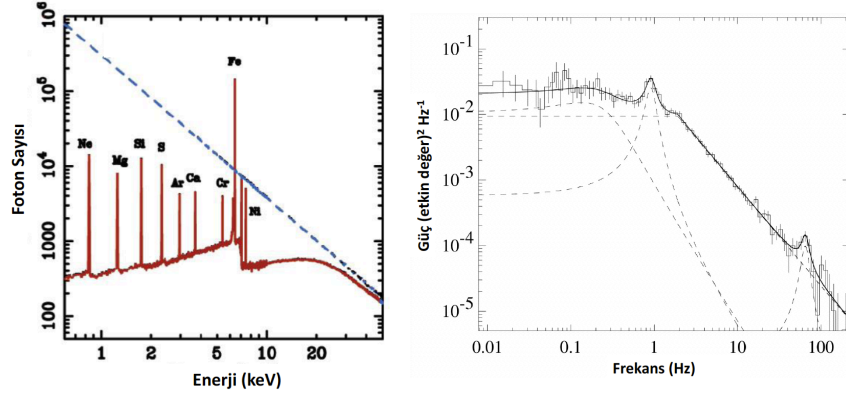
Karadelikler tanım olarak bir olay ufku içinde yer alan tekilliklerdir. Olay ufku madde ve ışığın dışarı kaçamadığı bir sınırı belirler, ve dönmeyen bir karadeliğin için Schwarzschild yarıçapı ile verilir ($R_s = 2GM/c^2$, G kütleçekim sabiti, M karadeliğin kütlesi ve c ışık hızı). Karadelikler temelde basit cisimler olup, tüm özelliklerini tanımlamaya 3 parametre yeter: kütle, açısal momentum (spin) ve yük. Evrende gökbilimsek olarak ayrıntısı ile inceleyebildiğimiz iki çeşit karadeliğin vardır, yıldız kütleli karadelikler (YKK) ve dev karadelikler. YKK'lar ağır yıldızların evrimlerinin sonunda çökmesi ile ortaya çıkarlar ve tipik kütleleri $10 M_\odot$, dolayısıyla tipik olay ufku ölçüğü 30 km 'dir. Dev karadelikler ise gökadalardan merkezlerinden bulunurlar ve kütleleri $10^6 - 10^9 M_\odot$ arasındadır. Burada sadece YKK'lar üzerinde durulacaktır.



Şekil 1. Karadeliklerin etrafındaki ışınım geometrisi ve prensipleri. Taç geometrisi temsili olarak gösterilmiştir, jetlerin yüksek enerjilere katkısı ihmal edilmiştir.

Karadeliklerden gelen yüksek enerji ışınımının tayfsal özellikleri Çift yıldız sistemlerindeki YKK'lara ikincil yıldızdan akan madde bir kütle aktarım diski oluşturur. Karadeliğin yüksek kütleçekim potansiyelinin ısıya dönüştüğü bu diskte sıcaklık keV seviyesine çıkar. Şekil 1'ta karadeliklerden beklenen ışınımın genel özellikleri gösterilmektedir. Disk geometrik olarak ince ama optik kalınlığı yüksektir, dolayısıyla disk-karacisim ışınması yapar. Karadeliğin tayfında, bu karacisim ışınmasına ek olarak yüksek enerjilere uzanan bir güç kanunu ışınması da vardır. Birkaç yüz keV civarında kırılma gösterebilen bu ışınımın milyarlarca derece sıcaklıktaki bir elektron taçı tarafından Compton ters saçılma mekanizması ile oluştuğu düşünülmektedir. Sıcak taç diskten gelen düşük enerjili fotonların enerjisini yükseltmektedir.

Taçtan çıkan yüksek enerjili fotonların bir kısmı diske çarpabilirler. Bu durumda fotonlar disk içinde etkileşime girerek atomları iyonize edebilirler, ya da Compton saçılmasına uğrayabilirler. İyonize olmuş atomlar bir dizi çizgi ışınması yaparlar (Şekil 2, sol). En belirgin ışınma 6.4 keV'deki Demir çizgisi ışınmasıdır. Bunun dışında 7.1 keV'de bir soğurma kıyısı ve 20 keV'de ise Compton saçılmasının özelliklerinden dolayı bir şişkinlik gözlenir (McClintock & Remillard 2003).



Şekil 2. Sol: Yansıma tayfı. Mavi çizgi disk üzerine düşen tayfı, kırmızı ise diskten yansıyan modellenmiş tayfı göstermektedir. **Sağ:** XTE J1550–564 kaynağı sert dönem güç tayfı. Lorentz fonksiyonları ile modellenmiştir. Kalemci ve ark. (2001)'den alınmıştır.

Karadeliklerden gelen yüksek enerji ışınımının zamansal özellikleri

Olay ufku civarında diskin tipik Kepler zaman ölçeği milisaniyeler seviyesindedir. YKK'lar tayfsal özelliklerine de bağıntı gösteren kuvvetli, kısa zaman ölçekli zamansal değişiklikler gösterirler. Bu değişiklikler Fourier teknikleri kullanılarak analiz edilebilir. Şekil 2, sağ'da Fourier teknikleri sonucu ortaya çıkarılan güç tayfı ve 65 Hz civarındaki yüksek frekanslı periyodiğe yakın salınım örnek olarak gösterilmektedir.

Günler ölçeğinde değişiklikler ise genel olarak karadeliklerin bir parlama dönemi boyunca evrimine karşılık gelir. Parlama dönemleri boyunca hem tayfsal hem de kısa ölçekli zamansal değişiklikler gözlenir (Kalemci ve ark. 2004).

1.2 Karadelikleri incelemek için gereken görüntüleme ve algılayıcı sistemleri

Karadeliklerin yukarıda anlatılan özelliklerini inceleyebilmek için ihtiyaç duyulan sistemleri özetlersek:

1. 0.1 keV - 1 MeV arasında geniş bantlı tayf ölçer (Şekil 1), 10 keV üzerinde geniş alana sahip olması gerekir.
2. 0.1 keV - 10 keV arasında çok iyi enerji çözünürlüğe sahip tayfölçer (Şekil 2, sol)
3. Kısa zaman ölçekli çalışmalar için milisaniyeler düzeyinde zamansal çözünürlük ve geniş algılayıcı alanı (Şekil 2, sağ).
4. Kalabalık bölgelerde kaynakları birbirinden ayırmak için yüksek ayırıştırma gücüne sahip görüntüleme sistemleri
5. Yeni parlamaları keşfetmek için çok geniş alana ya da kısa zaman içinde tüm uzayı tarayan sahip görüntüleme sistemleri
6. Birçok karadelik kaynağının günlük evrimi takip edebilmek için hızla yön değiştirebilen uydu sistemleri

Bu listeden de anlaşılacağı gibi karadeliklerin kapsamlı araştırması farklı görüntüleme, algılama ve uydu sistemlerinin değişik kombinasyonlarda birleştirilmesini gerektirir.

2 X ışını algılayıcı sistemleri

2.1 Atmosferi aşmanın yöntemleri ve uydu yörüngeleri

Her şeyden önce atmosfer x ışınlarında geçirgen olmadığı için yüksek enerjilerde çalışan algılayıcı sistemlerinin atmosfer üzerine çıkması gerekir. Atmosfer üzerine değişik araçlarla çıkılabilir.

Balonlar özellikle gama ışını gökbilimcilerinin kullandığı bir araçtır. Balonlar 42 km'ye kadar tırmanabilirler ve tonlarca yük kaldırabilirler. Bu da gama ışını algılamak için gerekli çok ağır algılayıcı sistemlerini kullanmak ve test etmek için uygun bir zemin oluşturur. Çok ince (0.002 cm) sentetik bir materyalden yapılan balonların çapı en şişkin halinde 170 m'ye ulaşabilir. Düzenli rüzgarların egemen olduğu Anktartik bölgesi balon uçuşlarının sıklıkla yapıldığı bir alandır.

Atmosferi aşmanın hızlı ve ucuz başka bir yöntemi ise roket kullanmaktır. Roketler 1400 km'ye kadar tırmanabilir ve atmosfer üzerinde yüzlerce saniye kalabilirler. Tarihte yüksek enerji gökbiliminin gelişmesine önemli katkıda bulunan roketler, günümüzde genelde uyduya konması düşünülen algılayıcıların uzay ortamında çalışmasını test etmek için kullanılmaktadır.

Daha kalıcı sistemler için iki yol vardır. Uluslararası Uzay İstasyonu (UAI) alçak irtifada x ışını algılayıcıları için bir platform sağlar. Japon MAXI algılayıcısı UAI üzerinde çalışan ve tüm uzayı tarayan bir algılayıcı sistemidir. UAI'nin önemli bir avantajı arızalanan algılayıcı sistemlerine astronotların müdahale şansı olmasıdır. Fakat UAI yüksek açısız çözünürlüklü teleskoplar için yeterince istikrarlı bir platform değildir ve yörüngesi genel olarak arkaalan ışımaya açıktır. Bu nedenle nadiren yüksek enerji gökbilimi için tercih edilir.

Uydular ise kalıcı ve istikrarlı platform oluşturur ve yüksek enerji gökbiliminde en çok kullanılan araçlardır. Uyduların üzerinde algılayıcı sistemlerinin yanı sıra enerji sağlayan güneş panelleri, yönlendirmeyi sağlayan sistemler ve



Şekil 3. Yüksek enerjilerde gökbilim yapmak için atmosferin üzerine çıkma yöntemleri.

yakıt, haberleşmeyi sağlayan antenler, uydunun yerini belirleyen yıldız takipçileri ve diğer elektronik kontrol sistemleri bulunur.

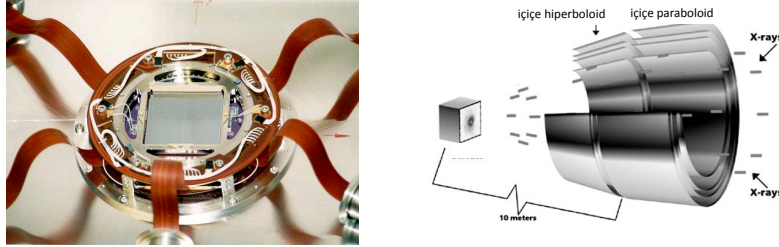
Gökbilimsel uydular genelde Dünya çevresinde iki tip yörüngede bulunurlar. Dünya'yı 3000 km ve 16000 km yükseklikte iki ışma kuşağı sarar. 1000 km'nin altında kalan yörüngelere alçak irtifa yörüngesi denir. Uydular bu yörüngede yaklaşık 90 dakikada bir Dünya'nın etrafında dönerler. Bu yörüngelerin önemli avantajları vardır. Işıma kuşaklarının altına kaldığından kuşakların içine hap-solmuş yüksek enerjili parçacıkların elektronik devrelere ve algılayıcı kristallere vereceği zarardan korunulur. Ayrıca yörüngeye oturtmak nispeten kolay ve ucuzdur ve veri alışverişi kolaydır. Fakat alçak irtifanın en büyük sorunu kaynakları gözleme süresinin nispeten kısa olmasıdır. Yörünge'nin büyük kısmında kaynak uyduya göre Dünya'nın arkasında kalabilir. Dolayısıyla uzun süreli gözlem yapmak isteyen sistemler genelde eksentrik yörüngeleri tercih ederler. Bu yörüngeler 3 güne yakın kesintisiz gözlem şansı sunarlar, ama ışma kuşaklarından geçişler risklidir, ve yörüngeye oturtmak pahalıdır.

2.2 Çalışma prensipleri

Bir uydu sistemi genelde iki parçadan oluşur. Önce fotonları toplamak ve gökyüzünde belli bir alanı algılayıcı yüzeyine indirecek bir görüntüleme sistemi gereklidir. Yüksek enerji gökbiliminde kullanılan foton toplama yöntem-

leri Wolter tipi x ışını teleskopları, kodlanmış maskeler ve sınırlayıcılar olarak özetlenebilirler. Sonra bu fotonların algılanması gerekir. Algılayıcılar da genel olarak ikiye ayrılabilirler, görüntü çözünürlüğü olan algılayıcılar (örnek CCD'ler) ve görüntü çözünürlüğü olmayan algılayıcılar (örnek: sintilatörler). Aşağıda düşük enerjilerden yüksek enerjilere çıkarak bu sistemlerin bir kısmı tanıtılacaktır.

Wolter tipi teleskop sistemleri (0.1 - 10 keV) X ışınlarının çeşitli materyallerde yansıma özelliklerine baktığımızda yaklaşık 1 derece üzeri açılarda soğurulduğunu, ancak daha düşük açılarda tam iç yansıma yaptığını görürüz (Aschenbach, 1985). Enerji yükseldikçe yansıma olabilecek en büyük açı da küçülür. Tam yansıma teleskoplarında özel kaplama teknikleri kullanılmadan 10 keV üzerine çıkılmaz. Kaynaktan gelen ışığı çok ince açı ile odaklama prensibine bağlı bu teleskoplarda makul odaklama uzaklığına ulaşmak için hiperboloid ve paraboloid yüzeylerin bir karışımı kullanılır. Birçok ayna içiçe geçirilerek yüzey alanı arttırılır (Şekil 4). Wolter tipi teleskopların en önemli özelliği ayırıştırma çözünürlüğünün çok iyi olmasıdır (*Chandra* uydusu < 1"). Bu aynı zamanda ızgara (grating) ile beraber kullanıldığında çok iyi bir enerji çözünürlüğünü beraberinde getirir.



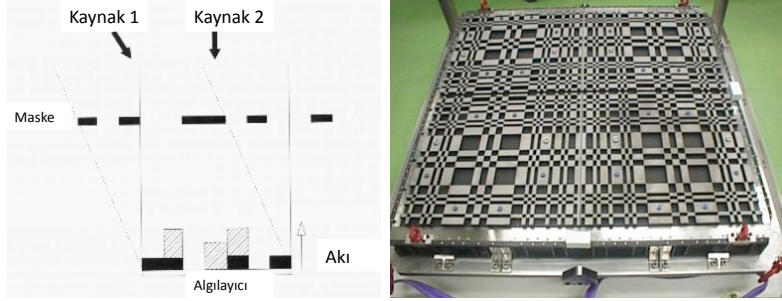
Şekil 4. Sol: *XMM-Newton* odağında bulunan EPIC PN CCD algılayıcısı **Sağ:** Çift kırılma ile çalışan Wolter tipi teleskopların çalışma prensibi.

Bu teleskopların odağında Si tabanlı piksellenmiş CCD algılayıcılar bulunur. Bu algılayıcılar ızgara kullanmadan bile 100 eV civarında enerji çözünürlüğüne sahiptir. Fotonlar yarıiletken materyalde fotoelektrik etkisi ile etkilesime girerler. Pikseller içinde fotonun enerjisine doğru orantılı elektron-deşik çiftleri yaratılır. Elektronlar okunana kadar piksellerde depolanır.

Aktif uydulardan *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift* (X-ray Telescope), *Suzaku*(X-ray imaging instrument) Wolter tipi teleskopları kullanır. *XMM-Newton* geniş alanı ile sönük cisimleri incelemek için, *Chandra* çok iyi enerji ve ayırıştırma çözünürlüğüne ihtiyaç duyulduğunda, *Swift* günlük gözlemler için, *Suzaku* ise geniş enerji bantlı gözlemler için kullanılır.

Sınırlayıcı kullanan sistemler Yüksek enerjilerde ışın yapan kaynak sayısı az olduğu için Gökada düzleminin belirli bölgeleri hariç 1 derece alan içinde birden fazla kaynak olma olasılığı çok düşüktür. Bu da algılayıcı sistemlerinde görüş alanını daraltan kısıtlayıcılar kullanılmasına olanak sağlar. Bunların avantajı pahalı görüntüleme sistemine ihtiyaç duyulmaması ve algılayıcı alanının geniş tutulabilmesidir. *RXTE* uydusu bu türün en başarılı örneğidir ve karadeliğin günlük evriminin takibinde ve zamansal özelliklerinin elde edilmesinde önemli rol oynamıştır.

Kodlanmış maske kullanan sistemler Wolter tipi teleskoplarla görüntüleme yapılamayan 10 keV ve üstü için kullanılan yöntem kodlanmış maske tekniğidir (Şekil 5). Bu teknikte metal bir maske piksellenmiş bir algılayıcının üzerine yerleştirilir. Değişik kaynaklardan değişik açı ve parlaklıklarla gelen ışın maske- den geçerek aşağıdaki algılayıcıda kompozit bir gölge deseni oluşturur. Çeşitli yöntemlerle bu desenden kaynakların yeri ve parlaklık bilgisi elde edilebilir (Skinner 2004). Bu sistemi en etkili kullanan uydu *INTEGRAL*'dir ve 3 keV'den 1MeV'e kadar görüntüleme yapabilir. Enerji arttıkça maske ve algılayıcı kalınlığını arttırmak gerekir. Mesela *INTEGRAL* üzerinde 20 keV'e kadar JEM-X, 20 keV-300 keV arası ISGRI ve daha üstü enerjiler için SPI algılayıcı sistemleri kullanılır. Bu sistemlerin bir diğer önemli özelliği geniş görüş açısına sahip olmaları ve yeni kaynakların keşfine olanak sağlamalarıdır.

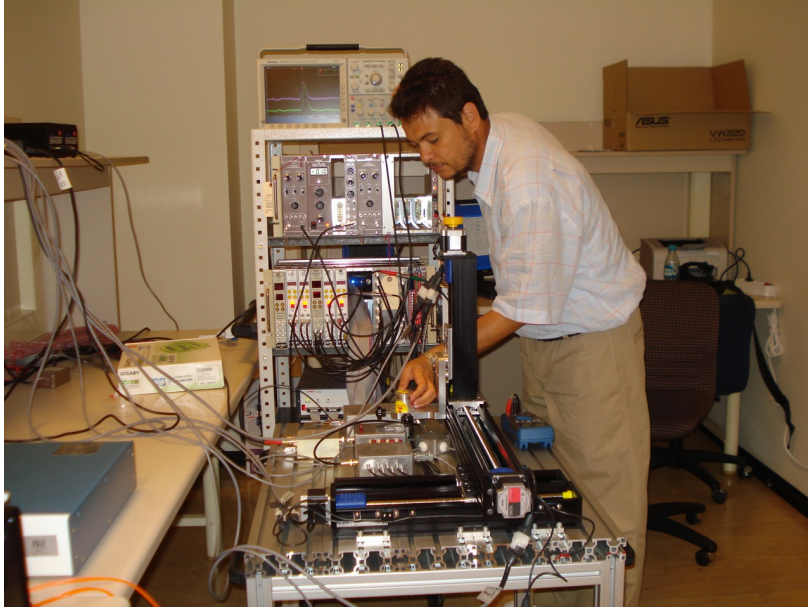


Şekil 5. Sol: Kodlanmış maske çalışma prensibi **Sağ:** *INTEGRAL* üzerindeki ISGRI kodlanmış maskesi.

3 Sabancı Üniversitesi'nde algılayıcılar üzerine yapılan çalışmalar

Türkiye'nin uydu çalışmaları başlatmasından sonra Sabancı Üniversitesi'nde oda sıcaklığı algılayıcıları üretmek için bir laboratuvar kuruldu (Şekil 6). Bu laboratuvarda şu anda CdZnTe yarıiletken algılayıcılar test edilmektedir. Laboratuvarda 16 kanallı NIM temelli elektronik okuma sistemi ve 36 kanallı entegre

devre okuma sistemi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Laboratuvarın iki amacı vardır. Birinci amaç kristallerin fiziksel özelliklerini ve modelleme sonuçlarını kullanarak uygun kristal boyutu ve elektrot tasarımını gerçekleştirmektir. İkincisi ve daha önemlisi bu kristalleri ve entegre okuma devrelerini kullanarak uzayda çalışabilecek tam bir algılayıcı sistemi üretmektir.



Şekil 6. Sabancı Üniversitesi Yüksek Enerji Gökbilimi Laboratuvarından bir görünüm.

Laboratuvar CdZnTe dışında oda sıcaklığında çalışan materyalleri de test edebilir. Si drift algılayıcılar düşük enerjilere inebilme özellikleri ile uzayda gelecek vadeden materyaldir. TÜBİTAK Uzay'ın ürettiği RASAT uydusu yakın zamanda yörüngeye yerleştirilecektir. Benzer uydu projelerinin devamı laboratuvarımızda üretilen algılayıcı sistemleri için gerekli platformu sağlayabilir.

Yüksek enerji gökbilimi amaçlı algılayıcı geliştirme üzerine Sabancı Üniversitesi'nde yapılan araştırmalar TÜBİTAK tarafından 108T595 nolu 1001 projesi ile, ve Avrupa Komisyonu 6. Çerçeve Bilgi Aktarım Projesi ASTRONS tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

Kalemci, E., Tomsick, J. A., Rothschild, R. E., Pottschmidt, K., & Kaaret, P., 2001, ApJ, 563, 239

- Kalemci, E., Tomsick, J. A., Rothschild, R. E., Pottschmidt, K., & Kaaret, P., 2004, ApJ, 603, 231
- McClintock, J. E., & Remillard, R. A., Black Hole Binaries, Compact Stellar X-ray Sources, eds. W. H. G. Lewin and M. van der Klis, Cambridge University Press
- Aschenbach, B. 1985, "X-ray Telescopes", Reports on Progress in Physics. vol. 48, number 5.
- Skinner, G., 2004, New Astronomy Reviews, 48, 205