

# Kara Delik, Geçici, Düşük Enerjili X-Işını Kaynaklarının Parlama Işık Eğrileri Üzerine

Ünal Ertan

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Fizik Bölümü  
Ankara

## ÖZ

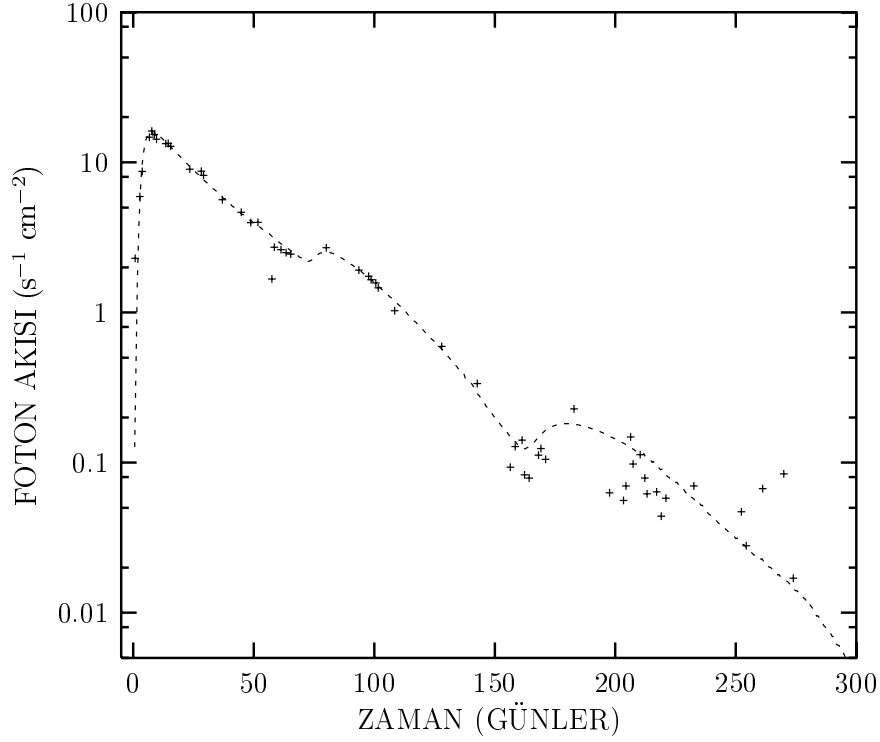
Kara delik, geçici, düşük enerjili X-ışını kaynaklarının parlama ışık eğrilerini, iniş fazlarında görülen, karakteristik ikinci ve üçüncü maksimumlarla birlikte açıklayan yeni bir senaryo öneriyoruz. Açıklamalarımız, X-ışını ısıtmasının da göz önüne alındığı disk dengesizliği modelleri üzerine kuruludur. Hem ana parlama, hem de sonraki maksimumlarda gözlenen X-ışınlarının optik ışığa göre gecikmesi ile tutarlı olan bu senaryoyu, disk difüzyon denklemini nümerik yolla çözerek test ediyoruz. Makul disk parametreleriyle elde ettiğimiz model eğrisi, dört benzer kaynaktan örneklemek için seçtiğimiz GS/GRS 1124-68' in gözlenmiş X-ışını parlama ışık eğrisine iyi bir uyum vermektedir.

## 1. Giriş

Geçici, düşük enerjili X-ışını kaynakları (GDXX) düşük kütleli X-ışını çift yıldız sistemlerinin bir alt grubudur. Bu kaynaklar yaşamlarının büyük bölümünde durgun fazlarında olmakla beraber tekrarlayan parlamalar gösterirler. Parlama tekrarlama aralıkları, kaynaktan kaynağa, birkaç aydan 50 yıl ve üzerine kadar değişimler gösterir. Bu kaynaklardan yoğun yıldız kara delik olanlarının bir kısmının (A0620-00, GRO J0422+32, GS/GRS 1124-68, GS 2000+25) ışık eğrileri birbirlerine çok benzemektedir. Bu sistemlerin tekrarlama zaman aralıkları uzun (~10 yıl - >50 yıl), parlama çıkış fazları kısa (birkaç gün), iniş fazları uzun (~250 gün) ve parlama ışık eğrilerinin davranışları birbirine çok benzemektedir. Bu dört kaynaktan hepsi, iniş fazlarında, ana parlamadan yaklaşık iki ay sonra ikinci bir maksimum gösterir. İkinci maksimumdan sonra ışık eğrisinin inişi logaritmik grafikte bu maksimumdan önceki inişin uzantısına paralel olarak şekilde devam eder. GRO J0422+32 haricinde diğer üç kaynak iniş fazının sonunda hörgüç şeklinde bir üçüncü maksimum gösterir. Parlama ışık eğrileri bu üçüncü maksimumdan sonra dikleşerek yeniden durgun faza döner. X-ışınlarındaki öz parlaklıkları parlama fazının tepe noktasında  $10^{38}$ - $10^{39}$  erg/s seviyesine ulaşırken, durgun fazlarında  $\leq 10^{31}$  erg/s dir (Tanaka ve Shibazaki 1996).

Cüce novaların ışık eğrilerinin genel özelliklerini açıklayabilen disk dengesizliği modelleri (DDM) (Osaki 1974, Hoshi 1979, Meyer ve Meyer-Hofmeister 1981), geçici, düşük enerjili X-ışını kaynaklarının ışık eğrilerini açıklamak için de önerildi (Cannizzo ve ark. 1985, Huang ve Wheeler 1989, Mineshige ve Wheeler 1989). Disk dengesizliği modellerine göre, diskin merkezinden olan bir radyal uzaklık R için, kütle aktarım oranı – yüzey yoğunluğu düzleminde denge çözümleri “ S ” şeklinde bir eğri vermektedir. Bu eğrinin üst kolu sıcak ve dengeli, alt kolu soğuk ve dengeli, kısmi hidrojen iyonlaşmasına denk gelen orta kol ise dengesizdir. Durgun fazda soğuk dengeli rejimde olan diskte düşük viskoziteler nedeniyle yüzey yoğunlukları artar. Herhangi bir R de kritik maksimum yüzey yoğunluğu aşıldığında, bir yoğunluk dalgası iç ve dış diske doğru ilerler. Eğer diskin büyük bir kısmı ya da tamamı bu yoğunluk dalgasıyla sıcak-dengeli rejime geçerse diskte artan kütle aktarımı ışık eğrisinde bir parlamaya neden olur.

Standart disk dengesizliği modellerinin, geçici, düşük enerjili X-ışını kaynaklarının cüce novalara göre çok daha uzun süren durgun fazlarını ve parlamalardaki iniş fazlarını açıklamada bazı zorlukları vardır. Bu zorluklar standart modellere iki temel mekanizmanın dahil edilmesiyle aşılabilmektedir. Bunlardan birisi disk yüzeyindeki termal dengesizliklerin neden olduğu disk buharlaşmasıdır. Bunun sonucu olarak önerilen, durgun fazlardaki iç disk kesilmesi uzun tekrarlama zaman aralıklarını (on yıllar ve daha fazla) açıklayabilmektedir (Meyer-Hofmeister ve Meyer 1999,



**Şekil 1.** GINGA ASM (1-20 keV) datası ve model foton akısı eğrisi (kesikli çizgi)

Dubus ve ark. 2001). İkinci önemli etki, kaynağı iç disk olan X-ışını fotonlarının dış diski ısıtmasıdır. X-ışını ısıtması, dış diskin kritik minimum yüzey yoğunluklarını düşürerek, parlama fazının uzun sürmesine neden olabilir (King ve Ritter 1998, Dubus et al 2001). Daha önceki çalışmamızda (Ertan ve Alpar 1998) diskin viskozite ile evrimi modelinin, ikinci maksimuma kadar olan gözlenen ana parlama fazına çok iyi uyum veren bir model ışık eğrisi üretebildiğini göstermiştik. Bu çalışma da, diskin uzun süre viskozitelerle evrimini sağlayabilecek mekanizma olan X-ışını ısıtmalı bir disk yapısını desteklemektedir.

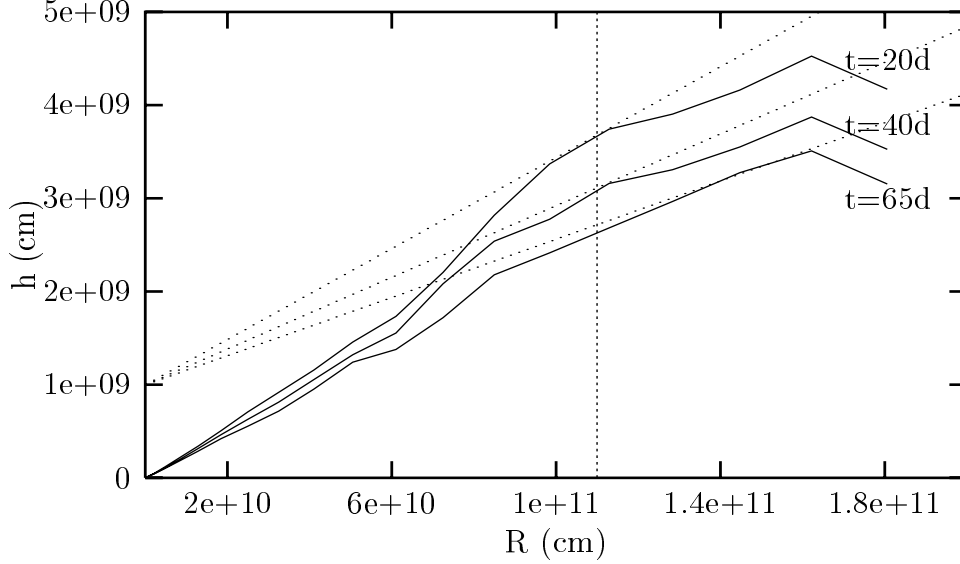
X-ışını ısıtmalı disk modelleri göstermektedir ki, dış diskin merkezi X-ışınlarıyla doğrudan ısıtılması orta diskin dış diski gölgelemesi nedeniyle mümkün değildir (Dubus ve ark. 1999). Diğer taraftan, optik ve X-ışını gözlemleri, gözlenen optik ışığın baskın kaynağının X-ışını ısıtması olduğunu göstermektedir. Öyleyse ya X-ışını ısıtması dolaylı yollardan olmalı ya da dış disk eğrilmiş bir yapıda olmalıdır. İç diskin üzerinde termal dengesizliklerle beslenen bir sıcak taç bulunabilir (Shaviv ve Wehrse 1986). İç diskin fotosferinde üretilen düşük enerjili X-ışını fotonları ters Compton saçılması etkisiyle bu sıcak tacı dengede tutabilir (King 1989). Açıklamalarımızda, iç disk etrafında bulunabilecek böyle bir sıcak tacın dolaylı X-ışını ısıtmasının nedeni olarak kabul ediyoruz.

X-ışını ısıtmalı bir dış diskte, içsel enerji üretiminde meydana gelebilecek değişikliklerin, gözlenen ikinci ve üçüncü maksimumların nedeni olması çok zor görünmektedir. Modeller üzerindeki bir diğer gözlemsel kısıtlama da optik ışığa göre X-ışınlarının gecikmesidir. Bu gecikme ana parlama ve ikinci maksimum için 4-6 gün, üçüncü maksimum için ise yaklaşık iki haftadır (Kuulkers 1998, Ebisawa ve ark. 1994, Orosz ve ark. 1997).

## 2. Parlama Fazının Tamamı için yeni bir senaryo

Özetlenen gözlemsel kısıtlamaları da göz önüne alarak, GDXK parlama ışık eğrilerini ikinci ve üçüncü maksimumlarıyla birlikte açıklayan yeni bir senaryo öneriyoruz. Bu senaryo özetle şu şekilde çalışmaktadır: Parlama fazının başlangıcında dış diskte birikmiş olan madde bir disk dengesizliği ile dış ve

iç diske yayılır. Etkili X-ışını ısıtması ancak iç diskteki kütle aktarım oranının yeterince artmasıyla başlayabilir. X-ışını ısıtması başlamadan önce diskin en dıştaki bir bölümü



**Şekil 2.** Yukarıdan aşağıya 20.gün, 40.gün ve 65. günde Sekil (1) deki disk evrimine denk gelen disk kalınlığı profilleri (kesiksiz çizgiler). Dikey noktalı çizgi 68. güne kadar sabit kalan sıcak disk yarıçapını göstermektedir. Diskin başlangıçtaki gölgelenmeyi kaldırmaya doğru evrimleştiği açıkça görülmektedir.

( $R > R_h$ ) gölgeli kalır. Sıcak rejimde viskoziteler yüksek olduğundan  $R = R_h$  in sıcak tarafında disk yüzey yoğunluğu ve disk kalınlığı daha hızlı düşer. Bunun sonucunda, bir süre sonra (yaklaşık iki ay) dış diskin gölgelenmesi kalkar ve diskin  $R > R_h$  bölgesinde ikinci maksimuma neden olacak yeni bir disk dengesizliği tetiklenir. Bu açıklamaya göre X-ışınlarındaki parlamanın optik ışıktaki parlamaya göre, disk boyunca bir viskozite zaman ölçeği kadar geç başlaması beklenir. Diskin bundan sonraki evriminde, yüzey yoğunlukları bütün diskte düşmeye devam ederken, soğutma yüzeyi X-ışını ısıtmasıyla kontrol edilerek iç diske doğru ilerler. İç diskteki kütle aktarım oranı buharlaşma oranına yaklaştığında, iç disk fotosferinde üretilen düşük enerjili X-ışını fotonları artık çevredeki sıcak maddeyi yeterince soğutamaz ve sıcak taç daha da ısınır genişlemeye başlar. Bu daha verimli bir X-ışını ısıtmasına neden olacağından bir süre sonra o anda soğuk faza girmiş dış diskin ( $R > R_h$ ) bir bölümü yeni bir disk dengesizliği ile sıcak rejime girer. Bu da önce optik ışıklarda daha sonra da, dış diskte artan kütle aktarımı iç diske ulaştığında, X-ışınlarında bir parlamaya neden olur (üçüncü maksimum). Bu kez X-ışınlarındaki gecikmenin artan viskozite zaman ölçeği nedeniyle ikinci maksimumdaki gecikmeye göre daha uzun olması beklenir.

### 3. Nümerik Model

Kara delik, geçici düşük enerjili X-ışını kaynaklarının parlama ışık eğrilerini açıklamak için önerdiğimiz senaryoyu disk difüzyon denklemini nümerik olarak çözüp test ediyoruz (ayrıntılar ve diğer referanslar için: Ertan ve Alpar 2002). Çözümlerde standart  $\alpha$  - viskozitelerini (Shakura ve Sunyaev 1973) kullanılmaktadır. Sıcak ve soğuk fazlar için, küce nova ışık eğrileri çalışmalarının bulgularıyla uyumlu, farklı iki  $\alpha$  parametresi kullanıyoruz. Kritik yüzey yoğunluklarının hesaplanmasında daha önce Dubus ve ark. (2001) tarafından, düzgün kütle aktarımı olmayan ve X-ışını ısıtmalı diskler için nümerik yöntemlerle elde edilmiş kritik yüzey yoğunluğu formüllerini kullanıyoruz. Başlangıç için seçtiğimiz Gauss kütle dağılımının, tepe noktasındaki yüzey yoğunluğu, soğuk dengeli fazda seçilen diğer parametreler için, maksimum kritik yüzey yoğunluğuna eşit alınmıştır. Modelimizde ikinci maksimumda gölgelenmenin kalkması ve üçüncü maksimumda X-ışını ısıtmasının artırılması serbest parametreler olarak seçilen zamanlarda yapılmaktadır. Dalgasal kuvvetleri ihmal ederek seçtiğimiz, disk yarıçapı için en iyi uyumdan bulunan değer dış disk kesilme yarıçapına (Frank ve ark. 1992) yakındır. Bu yarıçap dışına taşan kütlelerin sistemin kaybı olduğu varsayılmıştır. Örnek olarak seçtiğimiz GS/GRS 1124-68` in X-ışını ışık eğrisi ve ona en iyi uyumu veren model eğrimiz Şekil (1) `de görülmektedir. Üçüncü maksimumda gözlenen kısa

sürelî inme ve çıkmlar muhtemelen iç disk yarıçapında buharlaşma nedeniyle oluşan kısa sürelî boşalmalar ve takip eden yeniden dolmalardan kaynaklanmaktadır. Biz modelimizde iç disk yarıçapını bütün parlama fazı boyunca sabit almaktayız. Bir boyutlu disk modelimizde, disk orta yüzeyi sıcaklık dağılımına göre değişik zamanlar için hesapladığımız disk kalınlık profillerinin ana parlama fazındaki (ikinci maksimumdan önce) evriminin, gerçekten de başlangıçta var olan gölgelendirmeyi kaldırmaya yönelik olduğu Şekil (2) de görülmektedir. Modelimizde ana parlamanın tepe noktasına 7 günde ulaşılmaktadır. Optik ışığa göre X-ışını gecikmeleri, ikinci maksimum için 5 gün, üçüncü maksimum için 10 gündür ve bu gecikmeler gözlenen X-ışını gecikmeleriyle iyi bir uyum içindedir.

#### 4. Sonuç

Nümerik bir modelle, makul disk parametreleri kullanarak, kara delik, geçici, düşük enerjili X-ışını kaynaklarının ikinci ve üçüncü maksimumları da kapsayan parlama ışık eğrilerinin, diskin viskozitelerle evrimi, X-ışını ısıtması ve soğuk-sıcak faz geçişlerinin etkileşmesiyle belirlenen basit bir disk evrimi ile üretildiğini gösterdik. Modelimizden elde ettiğimiz ışık eğrisi GINGA ASM X-ışını datusına iyi bir uyum verirken (Şekil 1), ana parlama ve iniş fazındaki maksimumlarda elde ettiğimiz optik ışığa göre X-ışını gecikmeleri gözlemlere iyi bir uyum vermektedir.

#### Referanslar

- Cannizzo , J.K., Wheeler, J.C. ve Gosh, P.1985 in Proc. Cambridge Workshop on Cataclysmic Variables and Low Mass X-ray Binaries, ed. D.Q. Lamb, J.Patterson  
Dubus, G. ve ark. 1999, MNRAS, 303, 139  
Dubus, G., Hameury, J.-M. ve Lasotea, J.-P. 2001, A&A, 373, 251  
Ebisawa, K. ve ark. 1994, PASJ, 46, 375  
Ertan, Ü. ve Alpar, M.A.. 1998, A&A, 336, 220  
Frank, J., King, A.R. ve Raine, D. 1992, Accretion Power in Astrophysics (Cambridge, Cambridge University Pres)  
Hoshi, R. 1979 Prog. Theor. Phys., 61, 1307  
Huang, M. ve Wheeler , J.C. 1989, ApJ, 343, 229  
King, A.R. 1989, MNRAS, 241, 365  
King, A.R. ve Ritter, H. 1998, MNRAS, 293, L42  
Kuulkers, E., 1998, New Astron.Rew., 42, 1  
Meyer, F. ve Meyer-Hofmeister, E 1981, A&A, 104, L10  
Meyer-Hofmeister, E. ve Meyer, F. 1999, A&A, 348, 154  
Mineshige, S. ve Wheeler, J.C. 1989, ApJ, 1989, 343, 241  
Orosz, J.A. ve ark. 1997, ApJ., 478, L830  
Osaki, Y. 1974, PASJ, 26, 420  
Shakura, N.I., ve Sunyaev, R.A. 1973, A&A, 24, 337  
Shaviv, G. ve Wehrse, R. 1986, A&A, 159, L5  
Tanaka, Y. ve Shibazaki, N. 1996, ARA&A, 34