

SÜPERNOVA KALINTISI DİSKLER ÜZERİNE KISITLAMALAR

K. Yavuz EKŞİ¹, Aslıhan ÜNSAL²

Özet

Süpernova patlamasından geriye kalan madde yeni doğan nötron yıldızının etrafında bir disk oluşturarak nötron yıldızının evrimi üzerinde etkili olabilir. Genç bir nötron yıldızı olan 4U 0142+61 etrafında bir disk keşfedilmiş olması bu senaryoyu güçlendirmiştir. Çok küçük başlangıç kütesine sahip bir disk derhal manyetosferin dışına itileceğinden nötron yıldızının yaşamını etkilemeyecektir. Yıldızın yaşamını etkileyebilecek kadar büyük başlangıç kütesine sahip bir disk ise evriminin ilk aşamalarında yüksek ışımaya gücüne sahip olacaktır. Diskin başlangıçtaki ışımaya gücünün yüksek oluşu SN 87A ve Cas A gibi çok genç sistemlerde kalıntı bir diskin varlığı ve parametreleri üzerine kısıtlamalar getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nötron yıldızı, Kütle aktarım diskleri, Süpernova, Cas A, SN 87A

Abstract

Following a supernova explosion some of the ejected matter may fall back, forming a disk around the new born neutron star and may effect its evolution. This scenario is supported by the detection of a disk around a young neutron star, 4U 0142+61. A disk with a very small initial mass would be pushed out of the magnetosphere and would not be able to play role in the life of the neutron star. A disk massive enough to play a role, on the other hand, would be very luminous at the initial stages. This high luminosity is used to put constraints on the presence and parameters of a fallback disk in young systems like SN 87A and Cas A.

Keywords: Neutron stars, Accretion disks, Supernovae, Cas A, SN 87A

1.Giriş

Süpernova patlamasıyla uzay boşluğuna fırlatılan maddenin bir kısmı patlama sırasında oluşan nötron yıldızının kütesel çekiminden kurtulamayıp geri düşebilir [1]. Patlayan ata yıldız açısız momentum taşıdığından geriye düşen madde de bir miktar açısız momentuma sahip olacaktır. Geri düşen maddenin açısız momentumu yeni doğan nötron yıldızının etrafında bir disk oluşturmaya yetebilir. Kalıntı disklerin genç nötron yıldızının evriminde rol oynayabileceği önerilmiştir [2]. Buna göre diskin başlangıç kütesi nötron yıldızının manyetik alanı ve başlangıç periyodu ile birlikte nötron yıldızının evrimini belirleyen üçüncü bir parametre olacaktır [3].

Yakın zamanda kalıntı diskler, magnetar modeline [4] alternatif olarak, anormal X-ışını pulsarları (AXP) gibi radyo pulsarı olarak davranmayan genç nötron yıldızlarının varlığını ve özelliklerini açıklamak üzere öne sürülmüştür [3,5]. AXP'lerde magnetarlara özgü patlamalar gözlemlenmesi [6] üzerine kalıntı disklerin magnetar modeline tamamlayıcı

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul, eksi@itu.edu.tr.

² Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü, 06800, Bilkent, Ankara, munsal@physics.bilkent.edu.tr.

olarak da düşünülebileceği önerilmiştir [7,8]. Böylesi bir model AXP'lerden alınan kızılötesi ışınım ve periyotların dar bir aralığa toplaşması gibi salt magnetar ile açıklanamayan özellikleri açıklayabilir. Ayrıca genç radyo pulsarlarının yalnızca manyetik dipol ışınması ile yavaşladıkları varsayımıyla açıklanamayan kimi özellikleri de kalıntı bir diskin magnetik dipol ışınmasından gelen yavaşlatıcı torka katkıda bulunduğu öne sürülerek açıklanmaya çalışılmıştır [9,10].

Önceden AXP olarak sınıflandırılmış genç bir nötron yıldızı olan 4U 0142+61 etrafında bir disk keşfedilmesi [11] kalıntı disk modeli için gözlemsel destek oldu. Keşfi yapanlar söz konusu diskin, iyonize olacak kadar sıcak olmayan bölgeleri olması dolayısıyla aktif olmadığını öne sürmekteydi. Aynı gözlemlerin daha önceki gözlemler ile birleştirildiğinde aktif bir diskin varlığına işaret ettiği [12], dahası AXP'lerin tümünden elde edilen kızılötesi ışınımın kalıntı bir diskin varlığı ile tutarlı olduğu gösterildi [13].

AXP'lerin kalıntı disk modeline göre "nötron yıldızı-kalıntı disk sistemi" doğduktan kısa bir süre sonra pervane aşamasına [14] girmekte, nötron yıldızının hızlı dönüşünden dolayı bu aşamada diskteki madde nötron yıldızının üzerine düşmemekte, nötron yıldızının magnetosferi ile etkileşerek uzağa fırlatılmaktadır. Nötron yıldızı bu etkileşim sonucu yavaşlamakta ve yeterince yavaşlayınca da diskten gelen madde nötron yıldızı üzerine düşebilmektedir. Kalıntı disk modeline göre AXP'lerin X-ışınlarının kaynağını nötron yıldızının üzerine düşen maddenin kaybettiği gravitasyonel potansiyel enerji oluşturmaktadır. Kalıntı disk modeli ilk ortaya atıldığında pervane aşamasında nötron yıldızının hızla yavaşlaması sonucu kaybedeceği dönme kinetik enerjisinin diskin ışınma gücüne yapacağı katkı gözönüne alınmadı. Pervane aşamasındaki nötron yıldızı diskle etkileşerek yavaşlarken kaybettiği dönme kinetik enerjisinin bir kısmının bile diske aktarılması diski çok ısıtabilir ve kimi durumlarda aktarılan güç Eddington limitini aşıp diski parçalayabilir [15].

Bu çalışmada pervane aşamasındaki "nötron yıldızı-kalıntı disk" sistemlerinin çok yüksek ışınma gücüne sahip olabileceğini gösteriyoruz. Eğer bugün süpernova kalıntıları içinde tespit edilen tüm genç nötron yıldızları ışık silindirinden (2. ayıt) içeri girmeye yetecek kadar büyük kütleli kalıntı disklere sahip olsalardı tüm bu sistemler çok büyük ışınma gücüne sahip olurlardı. Bu ışınmanın bir miktarı diskin Kepler hızında dönen parçasından optik ve kızılötesinde, kalanı ise diskteki maddenin açılal dönme hızının yıldızın dönme hızına uyum sağladığı dar geçiş bölgesinden (sınır katmanı) morötesi ve X-ışınında olacaktır. İkinci ayıtta diskin sınır katman ışınma gücünü hesaplıyoruz. Üçüncü ayıtta modelin Cas A, SN 87A gibi bilinen genç sistemlerde kalıntı disk ve nötron yıldızı parametreleri üzerine getirdiği kısıtlamaları inceliyoruz. Son bölümde sonuçlarımızın genç nötron yıldızlarının kalıntı disk kuramı bakımından değerlendirmesini yapıyoruz.

2. Pervane Aşamasındaki Bir Diskin Işınma Gücü

Kütlesi M_* olan bir nötron yıldızı ile etkileşmekte olan bir diskin büyük bir bölümünde madde Kepler açılal hızıyla

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{r^3}} \quad (1)$$

dönecek, iç kısımlara gelindiğinde ise sınır katman denilen dar bir bölgede yıldızın açılal hızına, $\Omega_* = 2\pi/P_*$, uyum sağlayacaktır. Kepler açılal hızıyla dönmekte olan kısımdan gelecek olan ışınma gücü, \dot{M} diskteki kütle aktarım hızı ve R_{in} diskin iç yarıçapı olmak üzere,

$$L_K = \frac{GM_*\dot{M}}{2R_{in}} \quad (2)$$

olacaktır [16]. Diskin iç yarıçapı, R_{in} , ışık-silindiri yarıçapı

$$R_L = \frac{c}{\Omega_*} \quad (3)$$

ile eş dönme yarıçapı

$$R_c = \left(\frac{GM_*}{\Omega_*^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

arasında iken sistem pervane fazındadır. Pervane fazında nötron yıldızı disk tarafından uygulanan tork ile yavaşlar ve bu aşamada nötron yıldızının kaybettiği dönme kinetik enerjisi diske aktarılır. Bu enerjinin bir kısmı gelen maddeyi fırlatmakta kullanılırken kalan kısmı diskin ısınmasına yol açacaktır. Tüm bu katkı ve kayıpları göz önüne alındığında [15] diskin toplam ışımaya gücü

$$L_{disk} = \frac{GM_*\dot{M}}{2R_{in}} [1 + (\omega_* - 1)^2] \quad (5)$$

olur. Burada

$$\omega_* = \frac{\Omega_*}{\Omega(R_{in})} \quad (6)$$

yıldızın dönme hızının boyutsuz bir parametresidir. Buna göre, diskten gelen bu toplam ışımadan diskin Kepler hızıyla dönmekte olan kısımlarına ait ışımaya çıkarılırsa sınır katmandan gelecek olan ışımaya

$$L_{sk} = \frac{GM_*\dot{M}}{2R_{in}} (\omega_* - 1)^2 \quad (7)$$

olarak bulunur. Bu sınır katmanın kalınlığı $b \sim 10^{-2} R_{in}$ olup [16] buna göre sınır katmanın sıcaklığı $2\pi R_{in} b \sigma T^4 = L_{sk}$ bağıntısı ile

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\pi\dot{M}}{\sigma} \right)^{1/4} P_*^{-1/2} \left(\frac{b}{R_{in}} \right)^{-1/4} \left(\frac{\omega_* - 1}{\omega_*} \right)^{1/2} \\ &\approx 5 \times 10^6 K \left(\frac{\dot{M}}{10^{18}} \right)^{1/4} \left(\frac{P_*}{100ms} \right)^{-1/2} \left(\frac{b/R_{in}}{10^{-2}} \right)^{-1/4} \left(\frac{\omega_* - 1}{\omega_*} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

olacaktır. Bu sonuca göre sınır katman ışımalarının önemli bir bölümünü X-ışınlarında yapacaktır.

Etrafındaki kalıntı bir disk ile etkileşmekte olan bir nötron yıldızının X-ışınlarında yapacağı ışımaların başka bileşenleri de vardır. Nötron yıldızının kendi sıcaklığından dolayı yüzeyinden gelecek ısıl ışımaya ve diskin etkileyeceği tork dolayısıyla nötron yıldızının içinde oluşacak disipatif süreçlerin yaratacağı ısınma sınır katmanda ışımaya dönüşen güç yanında önemsizdir. Dolayısıyla uygulamada en önemli kısıt sınır katmandan gelen ışımaya gücü kullanılarak elde edilecektir. Denklem (7)'ye göre X-ışını ışımaya gücü L_{obs} olan bir kaynağın dönme hızı parametresi

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{L_{obs}}{L_K}} + 1 \quad (9)$$

olmak üzere $1 < \omega_* < \omega_{max}$ arasında değişecektir. Eğer L_{obs} çok küçükse veya L_K çok büyükse kök içindeki ifade küçük olacağından hız parametresi için verilen aralık dar olacaktır. Bir sonraki bölümde belirli kaynaklar için bu sonucu \dot{M} ve P_* cinsinden grafiksel olarak ifade edeceğiz. Bunu yaparken diskin iç yarıçapını, μ nötron yıldızının magnetik dipol momenti olmak üzere, Alfvén yarıçapı

$$R_A = \left(\frac{\mu^2}{\sqrt{2GM_*\dot{M}}} \right)^{2/7} \quad (10)$$

olarak alacağız.

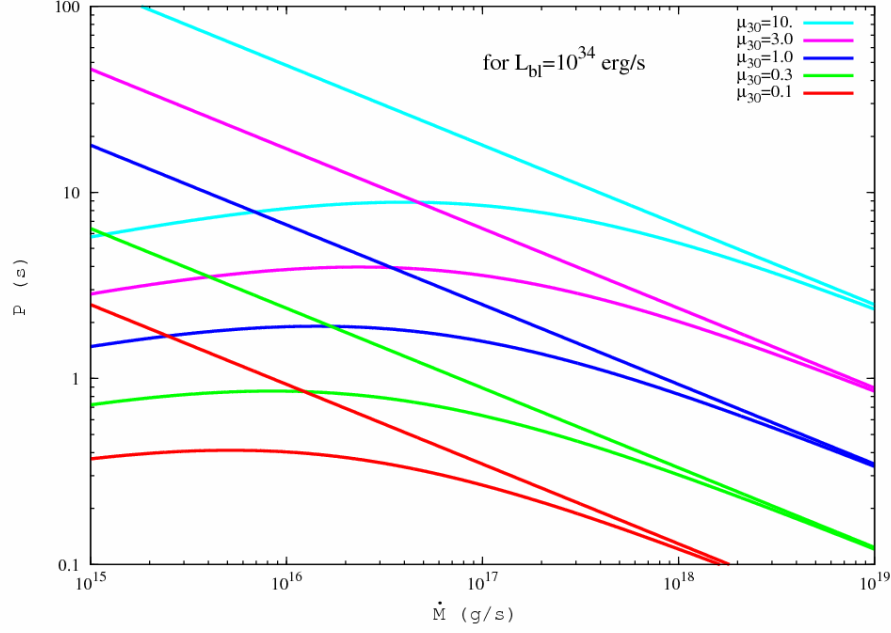
3.Uygulama

Kalıntı diskler ikili yıldız sistemlerindeki diskler gibi sürekli olarak madde aktarımı ile desteklenmedikleri için ömürlerinin kısa ($<10^5$ yıl) olması beklenmektedir. Bu nedenle genç süpernovalar kalıntı diskleri aramak için en uygun hedeflerdir. Bize yakın en genç sistemler yaklaşık 20 yaşındaki SN87A ve yaklaşık 320 yaşındaki Cassiopeia A'dır.

Süpernova 87A modern zamanlarda gözlemlenen en yakın süpernova patlaması olması dolayısıyla çok önemlidir. Bu kalıntı içinde henüz bir nötron yıldızı belirlenememiştir. Bunun nedeni süpernova patlaması sonrasında geri düşen maddenin nötron yıldızının magnetosferine girerek radyo pulsarı mekanizmasını bozması olabilir. Süpernova 87a'nın 2-10 keV aralığındaki ışınma gücü için üst limit 1.5×10^{34} erg s^{-1} olarak belirlenmiştir [17].

Cassiopeia A 1680 yılında Flamsteed tarafından görülmüş ve tabii o çağda bir süpernova patlaması olarak yorumlanmamıştır. Chandra X-ışını gözlem aygıtı ile 1999 yılında yapılan ilk gözlemler Cas A'nın merkezindeki tıkHz nesnenin süpernova kalıntısından ayrıştırılabilmesini sağlamıştır. Cas A'nın merkezindeki tıkHz nesnenin X-ışını bandındaki ışınma gücü $1-5 \times 10^{33}$ erg s^{-1} olarak ölçülmüştür [18]. Derin optik görüntüleme yöntemleri ile $L_X/L_{opt} \geq 800$ olarak elde edilmiş [19]. İkili yıldız sistemlerinde üzerine kütle aktarılan kara delikler için bu değer 0.02-0.1 arasında değişirken, nötron yıldızları için bu değer yaklaşık 1 değerine sahiptir. Ancak yukarıda anlattığımız gibi pervane aşamasındaki bir diskin sınır katmanından gelen X-ışınma gücü diskin geri kalanından gelen ışınma gücünün çok üzerine çıkabilir. Bu da Cas A'nın kalıntı diske sahip bir pervane sistemi olup olmadığı sorusunu gündeme getirir. Birazdan göreceğimiz gibi bir önceki bölümde elde edilen sonuçlar bu öneriye ciddi kısıtlamalar getirmektedir.

İlk bölümdeki denklemler belli kütle aktarım hızı aralığında periyodun belli aralıklar içinde kalması gerektiğini göstermektedir. Şekil (1)'de görüldüğü üzere bu sistemlerde eğer en sık rastlanan değerler aralığında magnetik alana sahip nötron yıldızları varsa bunların yavaş başlangıç periyoduna sahip olmaları gereklidir. Aksi takdirde ışınma güçleri gözlemlenen değeri veya belirlenen üst sınırı aşacaktır.



Şekil 1: Belirli bir sınır katman ışıma gücü üst limit olduğunda çeşitli kütle aktarım miktarları için periyoda getirilen kısıtlama. Bir kalıntı diskte kütle aktarım miktarı 10^{19} g/s değerinin çok üzerinde değerlerden başlayıp daha küçük değerlere doğru bir kuvvet yasası ile azalacaktır. Burada verilen sınır katman değeri Cas A ve SN87A sistemleri için gözlenen X-ışını lüminozitesi mertebesindedir.

4.Sonuç

AXP evrimiyle sonuçlanabilecek kütlede bir disk ile çevrili bir nötron yıldızının pervane aşamasında kaybedeceği dönme enerjisi çok yüksek değerler alacaktır. Böyle sistemler gözlemlenmiyor. Bu, AXP olarak evrilen sistemlerin yavaş ($P_* > 100$ ms) doğan nötron yıldızları içeriyor olmaları anlamına gelebilir. Bu bakış açısıyla, hızlı doğan nötron yıldızları başlangıçta bir diske sahip olsalar dahi bunu kısa sürede parçalayacak, dolayısıyla yalnızca en büyük kütleli disklerle çevrili yavaş nötron yıldızları AXP aşamasına gelebileceklerdir. Cas A’de belirlenen nötron yıldızı ve SN87A’daki olası bir tıkHz nesne bir pervane sistemi iseler oldukça yavaş dönüyor olmalıdırlar. Bu da daha önce öngörülen evrim modellerinin değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Colgate, S.A., 1971, Neutron-Star Formation, Thermonuclear Supernovae, and Heavy-Element Reimplosion, *Astrophysical Journal*, 163, 221-230.
- [2] Michel, F.C., Dessler, A.J., 1981, Pulsar disk systems, *Astrophysical Journal*, 251, 654-664.
- [3] Alpar, M.A., 2001, On Young Neutron Stars as Propellers and Accretors with Conventional Magnetic Fields, *Astrophysical Journal*, 554, 1245-1254.
- [4] Duncan, R.C. ve Thompson, C., 1992, Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts, *Astrophysical Journal Letters*, 392, 9-13.
- [5] Chatterjee, P., Hernquist, L. ve Narayan, R., 2000, An Accretion Model for Anomalous X-Ray Pulsars, *Astrophysical Journal*, 534, 373-379.
- [6] Gavriil, F.P., Kaspi, V., ve Woods, P.M., 2002, Magnetar-like X-ray bursts from an anomalous X-ray pulsar, *Nature*, Volume 419, Issue 6903, pp. 142-144
- [7] Ekşi K.Y. ve Alpar, M.A., 2003, Can Thin Disks Produce Anomalous X-Ray Pulsars?, *Astrophysical Journal*, 599, 450-456.
- [8] Ertan, Ü. ve Alpar, M.A., 2003, On the Enhanced X-Ray Emission from SGR 1900+14 after the August 27 Giant Flare, *Astrophysical Journal Letters*, 593, 93-96.

- [9] Menou, K., Perna, R. ve Hernquist, L., 2001, Disk-assisted Spin-down of Young Radio Pulsars, *Astrophysical Journal Letters*, 554, 63-66.
- [10] Alpar, M.A., Ankay, A. ve Yazgan, E., 2001, Pulsar Spin-down by a Fallback Disk and the P-Pdot Diagram, *Astrophysical Journal Letters*, 557, 61-65.
- [11] Wang, Z., Chakrabarty, D., Kaplan, D.L., 2006, A debris disk around an isolated young neutron star, *Nature*, Volume 440, Issue 7085, pp. 772-775.
- [12] Ertan, Ü., Erkut, M.H., Ekşi K.Y. ve Alpar, M.A., 2006, A Fallback Disk Around a Neutron Star Spinning Down While Accreting, eprint arXiv:astro-ph/0606259.
- [13] Ertan, Ü. ve Çalışkan, Ş., 2006, Optical and Infrared Emission from the AXPs and SGRs, eprint arXiv:astro-ph/0608288.
- [14] Illarionov, A.F., Sunyaev, R.A., 1975, Why the Number of Galactic X-ray Stars Is so Small?, *Astronomy and Astrophysics*, 39, 185-195.
- [15] Ekşi, K.Y., Hernquist, L. ve Narayan, R., 2005, Where Are All the Fallback Disks? Constraints on Propeller Systems, *Astrophysical Journal Letters*, 623, 41-44.
- [16] Frank, J., King A., ve Raine, D., 2002, *Accretion Power in Astrophysics*, Cambridge.
- [17] Park, S., Zhekov, S.A., Burrows, D.N. ve ark., 2004, A Chandra View of the Morphological and Spectral Evolution of Supernova Remnant 1987A, *Astrophysical Journal*, 610, 275-284.
- [18] Chakrabarty, D., Pivovarov, M.J., Hernquist, L., Heyl, J., Narayan, R., 2000, The Central X-Ray Point Source in Cassiopeia A, *Astrophysical Journal*, 548, 800-810.
- [19] Ryan, E., Wagner, R.M., Starrfield, S.G., 2001, New Optical Constraints on the Presence of a Compact Central Object in Cassiopeia A, *Astrophysical Journal*, 548, 811-813