TÜBİTAK

Yüksek Manyetik Alanlı Pulsarların Kalıntı Disklerle Evrimi

Program Kodu: 1002

Proje No: 116F336

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Ünal Ertan

Bursiyer:
Dr. Onur Benli

KASIM 2017
İSTANBUL

TÜBİTAK

ÖNSÖZ

Bu projemizde, tek nötron yıldızı sistemlerden yüksek manyetik alanlı radyo pulsarlar (HBRP) olarak bilinen kaynakların uzun süreli evrimleri, daha önce geliştirmiş olduğumuz kalıntı disk modeli çerçevesinde incelenmiştir. Daha önceki çalışmalarımızda, anormal X-ışını kaynaklarına, gama ışını tekrarlayıcılarına ve sönük izole nötron yıldızlarına uyguladığımız model HBRP kaynaklarının da dönme ve X ışını ışıma özelliklerini eşzamanlı olarak üretebilmektedir. Dönme periyodu, periyot türevi ve X-ışını ışıma şiddeti evrimlerini, ilk olarak, frenleme indisi bilinen üç HBRP kaynağı için çalıştık. Daha sonra, frenleme indisi bilinmeyen beş HBRP'nin evrimini de ayrı bir çalışmada ele aldık. Bu projede elde ettiğimiz sonuçlar, önceki çalışmalarımızdaki bulgularla birlikte, farklı genç nötron yıldızı sistemlerinin özelliklerinin tek bir model içinde açıklanabileceğini göstermesi açısından önemlidir. Bu sonuçlar, daha sonra gerçekleştireceğimiz, faklı nötron yıldızı sınıflarını ortaya çıkartan ilk koşullardaki sistematik farklılıkların anlaşılmasına yönelik çalışmalarımız için de motivasyon ve kuramsal destek sağlamaktadır. Projemizde, uluslararası hakemli dergilerde yayımlamak üzere iki bilimsel makale üretilmiştir. Bunlardan ilki yayınlanmış, ikincisi ise yayına kabul edilmiş, basım aşamasındadır. Proje yürütücüsü Dr. Ünal Ertan ve projede bursiyer olarak görev almış olan doktora sonrası araştırmacı Dr. Onur Benli olarak, projemizi destekleyen TÜBİTAK'a, sunduğu imkanlar için Sabancı Üniversitesi'ne ve teknik desteklerinden dolayı Sabancı Üniversitesi Proje Yönetim Ofisi çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i

TABLO VE ŞEKİLLER iii

ÖZET iv

ABSTRACT v

1. GİRİŞ 1

2. YÖNTEM 4

3. HBRP'LERİN GÖZLEMSEL ÖZELLİKLERİ 8

3.1 Frenleme İndeksi Bilinen HBRP kaynakları 8

3.2 Frenleme İndisi Bilinmeyen HBRP kaynakları 9

4. SONUÇLAR 10

4.1 Frenleme İndisi Bilinen HBRP'lerin Evrimleri 10

4.2 Frenleme İndisleri Bilinmeyen HBRP'lerin Evrimleri 13

PROJE ÇIKTILARI 17

ATIFLAR 17

TABLO VE ŞEKİLLER

Şekil 1. PSR J1119-6127'nin uzun evrimini gösterebilecek örnek model eğrisi. 11
Şekil 2. PSR J1734-3333 (solda) ve PSR B1509-58'in (sağda) evrimini gösterebilecek örnek model eğrileri. 12
Şekil 3. PSR B1845-19, PSR J1001-5939 ve PSR J1847- 013 için örnek evrim modelleri. .. 14
Şekil 4. PSR J1718–3718'in evrimini gösterebilecek iki tür evrim modeli. 15

Tablo 1. Kaynakların gözlenen özellikleri (L_x, P, $\dot{P}$ ve n) ve bu özelliklere karşılık gelen dönme enerjisi türevi ($\dot{E}$) ve dipol frenleme yaklaşımı ile elde edilen kutuptaki manyetik dipol alan şiddeti (B_p). 16

ÖZET

Genç nötron yıldızı popülasyonlarının bir üyesi olan yüksek manyetik alanlı radyo pulsarlarının (HBRP) uzun süreli X-ışını ışıma gücü ve dönme evrimlerini inceledik.
İlk olarak, frenleme indisi bilinen üç HBRP sitemini inceledik. Her bir kaynağın periyot, periyot türevi, frenleme indisi ve X ışını ışıma gücüne kalıntı disklerle evrimleşen nötron yıldızlarının eşzamanlı olarak ulaşabileceğini gösterdik. Modelde kaynak özelliklerine ulaşılan yaşlar, bu sistemlerin süpernova kalıntılarının tahmin edilen yaşları ile tutarlıdır. Model sonuçları, anormal X-ışını pulsarları (AXP), gama ışını tekrarlayıcıları (SGR) ve sönük izole nötron yıldızlarının (XDIN) aksine, HBRP'lerin manyetik dipol alan şiddetini sınırlandırmamaktadır. Model, HBRP'lerin özelliklerini, pervane fazında ve radyo pulsar ışıması için yeterli dipol manyetik alan şiddetleriyle üretebilmektedir. Simülasyonlar, gelecekteki evrim süreçlerinde, yaklaşık birkaç 10^4 yıldan sonraki yaşlarda, bazı model kaynakların HBRP özelliklerini kaybedeceklerini göstermektedir. Bunun nedeni, kaynakların düşen periyot türevleriyle birlikte, normal radyo pulsar olması veya kütle aktarım fazına girerek AXP ve SGR özelliklerine evrimleşmesidir. Bu sonuç HBRP ve diğer nötron yıldızı sistemleri arasında evrim ilişkisi olduğu fikrini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalıntı Diskler, Kütle Aktarım, Manyetik Alanlar, Nötron Yıldızları, Radyo Pulsarları

ABSTRACT

We have investigated the long-term X-ray luminosity and rotational evolution of high magnetic field radio pulsars (HBRP), a young neutron star population. First, we have studied the evolution of the three HBRPs with known braking indices. We have shown that the X-ray luminosity, period, period derivative and braking index of individual HBRPs can be acquired simultaneously by the neutron stars evolving with fallback disks. Our results are in agreement with estimated ages of the supernova remnants associated with the sources. Next, we have investigated the long-term evolution of the remaining HBRPs for which braking indices have not been measured yet. Unlike for anomalous X-ray pulsar/soft gamma repeaters (AXP/SGRs) and dim isolated neutron stars (XDINs), our results do not constrain the dipole field strengths of HBRPs. Consistently with the radio pulsar properties of the HBRPs, we have obtained the observed source properties in the propeller phase with dipole fields sufficiently strong to produce pulsed radio emission. Simulations indicate that some model sources will lose its current HBRP property in their future evolutionary phases, after ages of about a few 10^4 year. Because, with decreasing period derivatives, they either become normal radio pulsars or enter the accretion phase evolving into the properties of AXPs and SGRs. These results support the idea that there could be evolutionary links between HBRPs and other neutron star populations.

Keywords: Accretion, Fallback Disks, Magnetic Fields, Neutron Stars, Radio Pulsars

1. GİRİŞ

Nötron yıldızları, yüksek kütleli yıldızların evrimleri sonunda meydana gelen bazı süpernova patlamaları sırasında oluşması beklenen, kendi etrafında çok hızlı dönen, yüksek manyetik alanlı (~10^{12} G), yaklaşık bir Güneş kütleli ve ~10 km yarıçaplı çok yoğun ölü yıldızlardır. Bugün, tek ve çift yıldız sistemlerinde yüzerce nötron yıldızı radyodan gama ışınlarına faklı elektromanyetik dalga boylarında gözlenmektedir. Çift yıldız sistemlerindeki nötron yıldızları üzerine eş yıldızdan kütle aktarımıyla beslenen ışıma gücü en verimli çekirdek tepkimesi olan hidrojen füzyon tepkimelerinden 20 – 30 kat daha verimlidir (Frank vd. 2002). Süpernova patlamaları sonucunda oluşan nötron yıldızlarının etrafında kalması beklenen maddenin oluşturabileceği kalıntı diskler de yaklaşık bir milyon yıl kadar yıldıza kadar kütle aktarabilir, X ışını ışıma gücünün (L_x) kaynağı olabilir. Genç bir nötron yıldızı etrafında kalıntı disk oluşmamış veya diskten kütle aktarımı manyetik alan tarafından engelleniyorsa (pervane etkisi), L_x, yine yaklaşık bir milyon yıl yıldızın iç soğumasıyla üretilebilir.

Radyo pulsarlar periyodik olarak atmalı radyo ışıması gösteren nötron yıldızlarıdır. Standart modellere göre bu ışıma yıldızın kutbundan çıkan açık manyetik alan çizgileri boyunca, konik (hüzmeli) bir geometri ile üretilir. Işımanın ana kaynağı çok hızlı dönen bir mıknatısın ürettiği elektrik alanlardır. Bu elektrik alanda oluşturulan ve ivmelendirilen elektron-pozitron çiftleri ivmelendirildikleri yönde bu ışımayı oluşturur. Yıldızın manyetik ekseni dönme eksenine göre çoğunlukla eğimli olduğundan, iki kutuptan açılan konik ışıma uzayda belli bir katı açıyı tarayarak döner. Gözlemci bu taranan katı açı içinde kalıyorsa, yıldızın etrafında her bir dönüşü sırasında bir atma gözler (Ruderman ve Sutherland 1975). Bu manyetik dipol alan ışımasına kaybedilen enerji yıldızın dönme enerjisinden harcanır. Yıldızın dönmesi zamanla yavaşlar, dönme periyodu büyür. Manyetik alan şiddeti ve geometrisine bağlı olarak, kritik bir periyot üzerinde elektron-pozitron çiftleri üretilemez ve atmalı radyo ışıması sona erer (Ruderman ve Sutherland 1975). Birçok tek nötron yıldızının atmalı ışıması yalnızca radyo bandında değil, gama ışınlarına kadar geniş tayfta gözlenmektedir. Bununla birlikte, radyo bandında gözlenemeyen bazı nötron yıldızları, yüksek enerjilerde pulsar olarak gözlenebilmektedir. Fakat, kuramsal çalışmalara göre, yıldızda atmalı radyo ve yüksek enerji ışınımı üretim bölgeleri ve mekanizmaları farklıdır. Burada doğrudan konumuzla ilgili olmadığından bu mekanizmaların detaylarına girmeyeceğiz (gözlem ve modellerin genel bir özeti için Kaspi vd. 2006 görülebilir.)

Radyo pulsar üzerine, örneğin kalıntı diskten veya eş yıldızdan akan kütlenin beslediği diskten, madde akışı varsa radyo ışımasının kesilmesi beklenir. Bu durumda, dipol manyetik

alan yeterince kuvvetli ve alan çizgileri plazmayı manyetik kutuplara yönlendirebilirse, yıldız X-ışını pulsarı olarak gözlenebilir. Yakın zamanlarda gözlenen geçici milisaniye pulsarları böyle kaynaklardır (özet için bkz. Linares 2014). Bu sistemler radyo pulsarı ve X ışını pulsarı fazları arasında geçişler gösterir. Kütle akışı X-ışını atmaları üretirken radyo ışımasını engeller. Kütle akışı engellendiğinde, radyo atmaları gözlenmeye başlar ve X ışını atmaları kesilir. X ışını atmalarının nedeni kütle akışının sadece kutuplara yakın küçük bir bölgeyi ısıtıyor olmasıdır (Davidson ve Ostriker 1973, Lamb vd. 1973). Gözlemci, dönmenin belli bir fazında ve periyodik olarak, ısıtılan bölgeden daha çok ışıma alır ve bunu X ışını ışık eğrisinde atma olarak gözler. Bu projedeki çalışmalarımız ve genel olarak genç nötron yıldızı sınıflarının evriminin incelenmesinde kütle aktarım ve radyo pulsar özelliği arasındaki bu ilişki ve geçişler çok önemlidir. Bu sistemlerden bir kısmı X ışını pulsarı özelliği taşırken bazıları, örneğin HBRP'ler, radyo pulsarı olarak gözlenir. Bu çalışmada da göstereceğimiz gibi, tek bir nötron yıldızının da, uzun evrimi sırasında, bu fazlar arasında geçiş yapması mümkündür.

Tekli nötron yıldızı sistemleri, karakteristik farklılıkları ve benzerlikleriyle, farklı sınıflar olarak ortaya çıkmışlardır. Birbirlerine benzer özelliklerde (kütle, yarıçap, dipol manyetik alan şiddeti, dönme periyodu) doğması beklenen bu yıldızların nasıl böyle farklı popülasyonlar oluşturdukları, diğer taraftan aralarındaki benzerlikler, yüksek enerji astrofiziğinin en sıcak araştırma konularındandır. Bu nötron yıldızı popülasyonları anormal X-ışını kaynakları (AXP), gama ışını tekrarlayıcıları (SGR), sönük izole nötron yıldızları (XDIN), merkezi yoğun cisimler (CCO), dönen geçici radyo kaynakları (RRAT) ve bu projede çalışılan yüksek manyetik alanlı radyo pulsarlarıdır (HBRP). Şu ana kadar gözlenen AXP, SGR ve XDIN'lerin dönme periyotları dar bir aralıkta (2-12 s), kümelenmiştir. AXP/SGR'ler, ilk keşfedildikleri zamanlarda AXP'ler ve SGR'ler olarak iki ayrı sınıf olarak değerlendiriliyordu. Başlangıçta, SGR'lere özgü olduğu düşünülen, Eddington seviyesi üzerinde kısa süreli (< 1 s) parlamalar, daha sonra bazı AXP'lerden (Kaspi vd. 2003, Israel vd. 2007) ve HBRP'lerden de (Gavriil vd. 2008, Younes vd. 2016) gözlenmiştir. Farklı nötron yıldızı sınıflarının zaman içinde anlaşılmış olan bu ortak özellikleri birbirleri arasında evrimsel ilişkilerin olabileceği fikrini de güçlendirmiştir (Keane ve Kramer 2008, Kaspi 2010).

Bu sistemleri açıklamaya çalışan modellerde önerilen tork ve X-ışını ışıma mekanizması birbirinden çok farklıdır. Magnetar modelinde, kaynakların boşlukta dönen nötron yıldızları olduğu varsayılır. Bu durumda, yıldızın sadece manyetik dipol torkuyla yavaşlaması beklenir. Böyle bir yıldızın dipol alan şiddeti, gözlenen periyot ve periyot türevi kullanılarak, manyetik dipol torku formülünden tahmin edilebilir. Bir nötron yıldızı için, tipik eylemsizlik momenti ve yarıçap değerleriyle ($I = 10^{45}$ g cm^{-2} ve $R = 10^{6}$ cm), yıldız kutbundaki alan değeri

$B_d \simeq 6.4\times10^{19}\sqrt{P\,\dot{P}}$ G eşitliğinden tahmin edilebilir. Bu modelde, gözlenen düzenli X ışınları yüksek manyetik alanların bozunumunun yıldız kabuğunu ısıtmasıyla üretilir. Son zamanlarda gözlenen ekstrem kaynaklar, gama ışını parlamalarının üretilmesi için, ilk başta düşünüldüğünün aksine, magnetar alanlara gerek olmadığını göstermiştir. Daha önceki çalışmalarımızda önerdiğimiz gibi, yıldızın yüzeyine yakın, çok kutuplu alanlar bu parlamaları üretebilir.

Eğer, pulsar etrafında bir kalıntı disk varsa, yıldızın manyetik dipol alanı ve iç diskteki plazma etkileşerek birbirine tork uygular. Disk torku, yıldızın düşük periyotlarda olabileceği ilk evrim aşamaları hariç, genellikle dipol torkuna baskındır. Bunun için yıldızın gözlenen evrim fazına bağlı olarak dipol torku formülünden çıkartılan dipol alan, gerçek dipol alandan bir iki mertebe yüksek olabilir (Ertan vd. 2014, Benli ve Ertan 2016). Bu raporda, dipol tork varsayımıyla tahmin edilen, yıldızın kutbundaki dipol alan şiddetini B_d, gerçek alan şiddetini ise B_0 ile göstereceğiz. Disk olmadığı veya etkisinin zayıf olduğu durumda $B_0 = B_d$ olur. AXP/SGR ve HBRP'ler için B_d değeri genellikle 10^{14} G üzerinde bulunur. Bu nedenle, literatürde çoğu kez AXP/SGR'ler "magnetar", bu projede incelediğimiz radyo pulsarları ise "yüksek manyetik alanlı radyo pulsarlar" (HBRP'ler) olarak adlandırılırlar.

Daha önceki çalışmalarımızda, kalıntı disk modelinin (Chatterjee vd. 2000, Alpar 2001) temel prensiplerini kullanarak, diskin kritik bir sıcaklığın altında pasifleşmesinin, yıldızın soğuma ışımasının ve X ışını ısıtmasının diskin evrimine etkisini hesaba katarak, detaylı bir uzun dönemli evrim modeli geliştirmiştik (Ertan vd. 2009). Bu modeli, iki "düşük manyetik alanlı" AXP/SGR kaynağı (Alpar vd. 2011, Benli vd. 2013) dahil, AXP/SGR'lere (Benli ve Ertan 2016), XDIN'lere (Ertan vd. 2014) ve bir HBRP (PSR J1734-3333) kaynağına uyguladık (Çalışkan vd. 2013). Bu çalışmalarda, her bir kaynağın X ışını ışıma gücü, periyot ve periyot türevinin benzer temel disk parametreleriyle aynı model içinde üretilebileceğini gösterdik.

Bu projemizin ana hedefi, yukarıda bahsedilen, daha önce AXP/SGR ve XDIN kaynaklarına uygulanan modeli HBRP kaynaklarının özellikleriyle de test etmek, bu sistemler model içinde açıklanabiliyorsa, evrim aşamalarını ve fiziksel özelliklerini araştırmaktı. Bunlar içinde özellikle üç kaynak, frenleme indisleri de ölçülmüş olduğundan, daha zorlu bir çalışmayı gerektirdi. Modeller için önemli sınırlamalar koyan bu kaynaklar için periyot, periyot türevi ve X ışını ışıma gücü model içinde üretilebiliyorsa, bunların gözlenen frenleme indisiyle de tutarlı olması gerekir. Diğer bir değişle, bir HBRP için dört farklı fiziksel özelliğin eşzamanlı olarak evrim modelinde üretilmesi, ayrıca bir de süpernova kalıntısı ve yaş tahmini varsa, bununla da uyumlu olması gerekir. Kalıntı diskle evrim modeli Bölüm 2 de özetlenmiştir. Daha detaylı

bilgi bu çalışmanın sonuçlarının yayımlanmış olduğu Benli ve Ertan (2017)'de görülebilir. Çalıştığımız HBRP sistemlerinin literatürü inceleyerek derlediğimiz ve hesaplamalarımızın sonuçları ile karşılaştırdığımız özellikleri Bölüm 3'de anlatılmıştır. Sonuçlarımızı Bölüm 4' de özetlemekteyiz.

2. YÖNTEM

Projemizde kullandığımız yöntem analitik ve sayısal hesaplamalardan ve sonuçların gözlemlerle kıyaslanmasından oluşmaktadır. Nötron yıldızının dönme özelliklerinin ve X-ışını ışımasının evrimini, kütle ve açısal momentumun korunumuyla elde edilen geometrik olarak ince disk için difüzyon denklemini,

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial x} = \frac{3}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^{1/2}\,\frac{\partial}{\partial r}\,(\nu\,\Sigma\,r^{1/2})\right], \qquad (1)$$

çözerek incelenebilir. Başlangıç koşulu olarak, durgun ince diskler için elde edilmiş olan yüzey yoğunluğu profilini ($\sum(r) \sim \Sigma_0 (r/r_{in})^{-3/4}$) almaktayız. Burada r_{in} iç disk yarıçapı, Σ_0 iç diskteki yüzey yoğunluğu, $\sum(r)$ yıldızın merkezinden olan r uzaklığındaki yüzey yoğunluğudur. İç diskteki plazmanın yıldızın manyetik dipol alanı ile etkileşmesi yıldızın dönme evrimini belirlemektedir. Difüzyon denkleminde kinematik viskozite için standart $\nu = \alpha\, c_s h$ viskozitesini kullanmaktayız (Shakura ve Sunyaev 1973). Bu eşitlikte, α kinematik viskozite parametresi, c_s lokal ses hızı ve h diskin basınç ölçeği yüksekliğidir (yarı kalınlık).

Her zaman adımında r_{in} ve r_{out} dinamik olarak hesaplanmaktadır. Aktif disk için, r_{out} sıcaklığın kritik bir değerin (T_p) altına düştüğü ve diskin pasif olduğu yarıçaptır. Daha önceki çalışmalarımızdan, $T_p \simeq 50 - 150$ K ve $\alpha = 0.045$ değerleri gözlemlerle uyumlu sonuçlar vermektedir (Çalışkan ve Ertan 2012, Ertan vd. 2014, Benli ve Ertan 2016). Bu temel disk parametrelerinin farklı kalıntı diskler için benzer olması beklenir. Diskin pasifleştiği kritik sıcaklık (T_p) iyi bilinmemektedir. Bizim tahmin ettiğimiz değerler daha önce AXP ve SGR sistemlerinin evrimleri üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarına dayanmaktadır. Ancak 100 K civarında T_p değerleriyle bu kaynakların özelliklerini tutarlı olarak üretmek mümkün olmuştur. Modelin tutarlı kalabilmesi için, diğer nötron yıldızı çalışmalarında da kaynak özelliklerinin benzer T_p değerleriyle üretilmesi beklenir. Gerçekten de, AXP ve SGR grubundan sonra çalıştığımız XDIN kaynakları ve bu çalışmamızda HBRP'ler için elde ettiğimiz sonuçlar benzer T_p değerleriyle elde edilebilmiştir. Bu konuda yapılan bir kuramsal araştırmada, Inutsuka ve

Sano (2005) diskte manyetik dönme kararsızlıklarının (Balbus ve Hawley 1991), diğer bir deyişle aktif kütle akışı mekanizmasının, sonlanacağı sıcaklıkların 300 K'den küçük olması gerektiği sonucuna varmıştır. Bu sonuç bizim tahminlerimizle tutarlıdır. Kalıntı diskin uzun evriminde, iç diske madde akış oranı temel olarak soğuk dış diskin yapısıyla belirlenir. Viskozite parametresinin (α), düşük kütleli X-ışını sistemlerindeki disklerin soğuk fazı için tahmin edilen $\alpha = 0.01 - 0.5$ aralığında olması beklenir. Daha önce, AXP/SGR kaynaklarının kısa süreli X-ışını parlama eğrilerini açıklamak için yaptığımız, uzun evrimden bağımsız, çalışmada $\alpha = 0.045$ değerinin farklı kaynaklar için gözlemlerle tutarlı sonuçlar ürettiğini gördük (Çalışkan ve Ertan 2012). Bu çalışmadan sonraki, kaynak bazında yapılan tüm simülasyonlarda ve bu proje çalışmamızda aynı $(\alpha = 0.045)$ değerini kullandık.

Nötron yıldızının iç soğumasıyla üretilen ışıma gücünün (soğuma gücü) toplama ışıma gücüne katkısını, Page vd. (2006) çalışmasında elde edilmiş olan kuramsal soğuma ışıma eğrisini,

$$L_{cool} = 10^{35} t_{yr}^{-1/2}\, exp\left(-9{\times}10^{-10} t_{yr}^{1.7}\right)\ \mathrm{erg\,s^{-1}}, \quad (2)$$

kullanılarak hesaplamaktayız. Burada t_{yr} yıl cinsinden zamandır. Pervane fazında X ışını ışımasında soğuma katkısı baskındır. Sistem kütle aktarım fazındayken kütle aktarım ışıması

$$L_{acc} = \frac{GM\dot{M}}{R} \quad (3)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada, G, kütle çekim sabiti, M yıldızının kütlesi ve R yıldızın yarıçapı ve $\dot{M}$ yıldız yüzeyine kütle akış oranıdır. Yıldızın toplam X ışını ışıma gücü $L_X = L_{acc} + L_{cool}$ şeklinde yazılabilir. İncelediğimiz nötron yıldızı sistemlerin kütle aktarım rejiminde, çoğu durumda, $L_{acc} \gg L_{cool}$ bulunur. Dolayısıyla kütle aktarım fazında baskın X-ışını kaynağı çoğunlukla yıldıza kütle aktarımıdır. Bununla birlikte, modelde, kütle aktarımının devam ettiği halde soğuma gücünün baskın olduğu dönemler de ortaya çıkmaktadır.

Diskin iki temel ısıtma kaynağı bulunmaktadır: viskoz enerji yitimi ve yıldızda üretilen X ışınlarının ısıtma etkisi. X ışını ısıtma akısı

$$F_{irr} = 1.2\ C\ \frac{L_X}{\pi\, r^2} \quad (4)$$

eşitliğiyle ile tahmin edilebilir. Burada C ısıtma verimliliği parametresi, c ışık hızıdır. Verilen bir yarıçapta birim alana düşen viskoz ısıtma oranı en iç diske çok yakın olmayan bölgeler için,

$$D(r) = \frac{3\,G\,M\,\dot{M}}{8\,\pi\,r^3} \qquad (5)$$

şeklinde yazılabilir (ince diskler için 3, 4 ve 5. denklemlerin çıkarılışı için bakınız Frank vd. 2002). Durgun (steady) diskler için, $\dot{M}$ disk boyunca değişmez. Zaman içinde yavaş evrimleşen kalıntı disklerin de verilen bir zamanda durgun disklerin yapısına benzemesi beklenir. Optik olarak ince bir diskin lokal etkin yüzey sıcaklığı,

$$T_{eff} = \left(\frac{F_{irr} + D}{\sigma}\right)^{1/4} \qquad (6)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada, σ Stefan-Boltzmann sabitidir. İnce diskin dipol alanla etkileşmeye başladığı yarı yarıçapı Alfven yarıçapına

$$r_A = (GM)^{-1/7}\ \dot{M}^{-2/7}\ \mu^{4/7} \qquad (7)$$

eşit almaktayız (Lamb vd. 1973, Davidson ve Ostriker 1973). Burada, μ yıldızın manyetik dipol momentidir. Yakın zamanda elde edilen gözlemsel bulgular nötron yıldızlarının yavaşlama (spin-down) fazında ve düşük L_x rejiminde kütle aktarımı yapabileceğini göstermiştir (Archibald vd. 2015, Papitto vd. 2015). Kütle aktarım fazının hangi hızlılık parametresinin (fastness parameter), $\omega_* = \Omega/\Omega_K(r_A)$, üzerinde kesildiği tam olarak bilinmemektedir. Burada Ω yıldızın açısal dönme frekansı, $\Omega_K(r_A)$ Alfven yarıçapında diskin Kepler açısal hızıdır. Kütle aktarım fazında yıldıza etkiyen toplam torku, r_A ve eş dönme yarıçapı, $r_C = (G\,M/\Omega^2)^{1/3}$, arasında manyetik torkların integralini alarak hesaplamaktayız. Eş dönme yarıçapına kadar yayılan bir iç disk veya disk–manyetik alan etkileşim bölgesi varsaymaktayız. Yıldıza etki eden yavaşlama torku

$$N = I\dot{\Omega} = \dot{M}_{in}(GMr_{in})^{(1/2)}(1 - \omega_*^2) \qquad (8)$$

şeklinde yazılabilir (Ertan ve Erkut 2008). Burada $\dot{M}_{in}$ iç diske gelen madde aktarım oranıdır. Tork hesaplamasında, kütle aktarım fazında $r_{in} = r_A$, Alfven yarıçapının ışık silindiri yarıçapından, $r_{LC} = c/\Omega$, büyük bulunduğu durumda (pervane fazı), $r_{in} = r_{LC}$ almaktayız. Pervane fazında, yıldıza kütle aktarımına izin verilmediğinden, $L_{acc} = 0$ olur. Yıldızın frenleme indisi periyot ve periyot zaman türevleri cinsinden $n = 2 - P\,\dot{P}\,/\,\ddot{P}^2$ şeklinde yazılabilir.

Yıldıza etki eden toplam tork, yıldızın dönme evrimini belirlediği gibi, verilen bir zamanda, $P, \dot{P}$ ve $\ddot{P}$ değerlerini, ve böylece frenleme indisini de belirler.

Bir model kaynağın başlangıç koşulları, manyetik dipol alan şiddeti (B_0,), başlangıç disk kütlesi (M_d) ve başlangıç periyodu (P_0) ile belirlenmektedir. Daha önce vurguladığımız gibi, temel disk parametrelerinin (α, T_p, ve C), model basitleştirmelerinin izin verdiği ölçüde, farklı nötron yıldızı sitemlerinin kalıntı diskleri için benzer olması beklenir.

Radyo pulsar popülasyonu için, Monte Carlo simülasyonlarıyla, ilk periyotların yaklaşık 150 ms genişlikte, merkezi 300 ms civarında olan bir Gauss dağılımına uyduğu gösterilmiştir (Faucher-Giguere ve Kaspi 2006). Biz de tüm analizlerimize, P_0= 300 ms alarak başlamaktayız. Kaynakların çoğunda uzun evrim sonunda ulaşılan özelliklerin ilk periyotlara duyarlı olmadığını görmekteyiz. Nadir olarak, ilk periyodun kaynak özelliklerinde etkili olabildiği çok genç kaynaklar için P_0 değerlerini tarayarak izin verilen aralıkları tespit etmekteyiz.

Bir kaynak gözlem sırasında kütle aktarım fazında ise kütle aktarım oranı doğrudan 3. denklemden tahmin edilebilir. Bu durumda başlangıç disk kütlesi (M_d) gözlenen X-ışını ışıma şiddetini üretecek şekilde kısıtlanabilir. Ancak, gözlenen kaynak pervane fazında ise gözlenen X-ışını ışımasıyla kütle aktarımının bir ilişkisi yoktur. Bu durumda yıldızın iç soğuması X-ışınlarını üretir. Pervane fazındaki bir kaynağın özellikleri disk kütlesine önemli bir kısıt koymaz, geniş aralıkta M_d değerleriyle kaynak özellikleri üretilebilir. Bütün bu durumların önceden tahmin edilmesi mümkün olmadığından, kaynağın kütle aktarım ve pervane fazında olabileceği farklı durumlar için ilk koşullar taranarak çözüm olup olmadığı araştırılır. Kaynakların ışıma gücü ve dönme özelliklerine ek olarak atmalı radyo ışıması yapıp yapmadığı da önemlidir. Örneğin, böyle bir radyo ışıması yaptığı gözlene bir yıldızın özelliklerini kütle aktarım fazında yakalamak tutarsız bir sonuçtur. Atmalı radyo ışıması yapan bir kaynak, eğer diskle evrimleşiyorsa, pervane fazında olması beklenir.

Belki de en önemli ilk koşul, manyetik dipol alanın yıldız kutbundaki değeridir (B_0). Manyetik alanın yıldıza yakın değeri siklotron emilim çizgilerinden tahmin edilebilir. Ancak bu analizlerde çok büyük belirsizlikler vardır. Eğer bu çizgiler gerçekten siklotron çizgisi ise (bu dahi şüphelidir) çizgi frekansı kendisini üreten yüklü parçacığın kütlesi ile doğru orantılıdır. Gözlenen çizgileri protonların veya elektronların üretmesi mümkündür. İlginçtir ki, proton varsayımı magnetar alanları, elektron varsayımı ise konvansiyonel alanları vermektedir. Ayrıca, yıldız yüzeyindeki manyetik alan şiddeti çok kutuplu ve küçük ölçekli güçlü alanların etkisiyle (bu alanlar kısa süreli ve yüksek ışıma gücünde gözlenen gama ışını parlamalarını

açıklamak için gereklidir) dipol alan değerinden sapabilir. Bizim modelimizde, yıldız yüzeyine yakın güçlü alanların varlığı sonuçlarımızı etkilemez veya modelle bir tutarsızlık oluşturmaz. Yıldızın diskle etkileşimi, manyetik alanın büyük ölçekli dipol bileşeni ile belirlenir. Özetle, hemen bütün izole nötron yıldızları için, dipol alan şiddetinin doğrudan gözlemlerle güvenilir bir şekilde belirlenmesi şu aşamada mümkün görünmemektedir. Eğer yıldıza etki eden bir disk torku yoksa, gözlenen periyot ve periyot türevi kullanılarak dipol tork denklemiyle dipol alan tahmini yapılabilir. Fakat, çalışmalarımızda iddia ettiğimiz gibi yıldızla etkileşen bir disk varsa, dipol tork denklemiyle elde edilen tahminler gerçek alanın bir iki mertebe üzerinde değerler verir. Bu konu Bölüm 1 ve 2'de de tartışılmıştır.

3. HBRP'LERİN GÖZLEMSEL ÖZELLİKLERİ

3.1 Frenleme İndeksi Bilinen HBRP kaynakları

PSR J1119-6127, *Parkes Multibeam Pulsar Survey*'de keşfedilmiş olan kaynağın periyodu $P = 0.408$ s ve periyot türevi $\dot{P}$ = 4.02 x 10^{-12} s s^{-1} ölçülmüştür. Bunlara karşılık gelen dönme gücü $\dot{E} = I\,\Omega\,\dot{\Omega} = 2.3{\times}10^{36}$ erg s^{-1} olarak bulunur . 1.2 yıl süren gözlemlerden elde edilen veriler kullanılarak, kaynağın frenleme indisi $n = 2.91 \pm 0.05$ olarak ölçülmüştür (Camilo vd. 2000). 12 yıl'dan daha uzun sürede elde edilen başka bir veriden $n = 2.684 \pm 0.002$ bulunmuştur (Weltevrede vd. 2011). 16 yılı kapsayan daha güncel bir çalışmada, sıçrama (glitch) etkilerinden temizlenen sonuçlardan $n \simeq 2.7$ elde edilmiştir (Antonopoulou vd. 2015, Akbal vd. 2015). Pulsar ile ilintili olduğu düşünülen süpernova kalıntısı (SNR) G292.2-0.5'in uzaklığı $d = 8.4$ kpc, yaşı ise 10^4 yıl olarak tahmin edilmektedir (Caswell vd. 2004). Kaynağın X ışını tayfının modellenmesinden, d = 8.4 kpc için, bolometrik X-ışını ışıma gücü $L_X = (1.1 - 3.8) \times 10^{33}$ erg s^{-1} olarak tahmin edilmiştir (Ng vd. 2012).

PSR J1734-3333'ün periyodu $P = 1.17$ s, periyot türevi $\dot{P}$ = 4.02 x 10^{-12} s s^{-1} ve periyodunun ikinci türevi $\ddot{P} = 2.28{\times}10^{-24}$ s s^{-2} (Espinoza vd. 2011). Bu değerlerin verdiği $n = 0.9 \pm 0.2$, genç radyo pulsarları arasında ölçülen en küçük frenleme indisidir. Uzaklık hesaplamasındaki %25 belirsizlik bolometrik X-ışını ışıma gücünü $7.3 \times 10^{31} - 6.6 \times 10^{32}$ erg s^{-1} aralığında vermektedir (Olasusen vd. 2013). İlintili SNR için tahmin edilen yaş 1300 yıldan büyüktür (Ho ve Anderson 2012).

PSR B1509-58, *Einstein Gözlem Uydusu'yla* X-ışınlarında keşfedilmiştir (Seward ve Harnden 1982). Kısa bir süre sonra radyo bandında da gözlenmiştir. Pulsar'ın periyodu $P = 0.15$ s, periyot türevi $\dot{P} \simeq 1.5 \times 10^{-12}$ s s^{-1}, karakteristik yaşı $\tau = 1570$ yıl'dır. Buradan $\dot{E} = 1.7\times10^{37}$ erg s^{-1} bulunur. SNR yaşının, Gaensler vd. (1999) tarafından 1700 yıldan küçük olduğu tahmin edilmiştir. Son dönemde gerçekleştirilen, X-ışını spektrumu analizinden, $d = 5.2$ kpc için, $L_X = 10^{33} - 2\times10^{34}$ erg s^{-1} aralığında tahmin edilmektedir (Hu vd. 2017). Zamanlama analizlerinden, frenleme indisi $n \simeq 2.84$ ölçülmüştür (Kaspi vd. 1994).

3.2 Frenleme İndisi Bilinmeyen HBRP kaynakları

PSR B1845-19, $P = 4.31$ s ve $\dot{P}$ = 4.02 x 10^{-12} s s^{-1} değerleri ile *Molonglo Pulsar Survey*'de keşfedilmiştir. Buradan $\dot{E} = 1.1\times10^{31}$ erg s^{-1} ve $\tau = P/2\dot{P} \simeq 2.9\times10^{4}$ yıl bulunur. Olausen vd. (2013) tarafından tahmin edilen X-ışını ışımasının 3σ üst sınırı, $d = 0.75$ kpc için, $L_X < 1.1\times10^{31}$ erg s^{-1} 'dir.

PSR J1001-5939, *Parkes Multibeam Pulsar Survey*'de keşfedilmiştir. Kaynağın periyodu $P = 7.73$ s ve periyot türevi $\dot{P}$ = 5.99 x 10^{-14} s s^{-1}dir (Lorimer vd. 2006). Bu değerler için $\dot{E} = 5.1\times10^{30}$ erg s^{-1} ve $\tau \simeq 2.1\times10^{4}$ yıl bulunur. *XMM-Newton* ve *Chandra* gözlemlerinden saptanan X-ışını ışımasının 3σ üst sınırı, $d = 2.7$ kpc için, $L_X < 1.26\times10^{31}$ erg s^{-1} 'dir (Olausen vd. 2013).

PSR J1847-0130, *Parkes Multibeam Pulsar Survey*'de keşfedilmiştir. Pulsar'ın dönme özellikleri $P = 6.7$ s ve $\dot{P}$ = 1.3 x 10^{-12} s s^{-1}dir (Hobbs vd. 2004, McLaughlin vd. 2003). Bu değerlere karşılık gelen dönme gücü $\dot{E} = 1.7\times10^{32}$ erg s^{-1}. Kaynağın tahmin edilen X-ışını ışıma gücü, $d = 8.4$ kpc için, 0.5-10 keV enerji bandında, $L_X < 3.4\times10^{34}$ erg s^{-1}'dir (McLaughlin vd. 2003, Ng ve Kaspi 2011).

PSR J1718–371 için $P = 3.38$ s ve $\dot{P}$ = 1.5 x 10^{-12} s s^{-1}dir (Hobbs vd. 2004, Zhu vd. 2011). Bu değerler $\dot{E} = 1.7\times10^{33}$ erg s^{-1} ve $\tau \simeq 3.4\times10^{4}$ yıl vermektedir. Son dönemlerde yapılan *Chandra* gözlemlerinden, kaynağın radyo atma periyodu ile aynı periyoda sahip atmalı X-

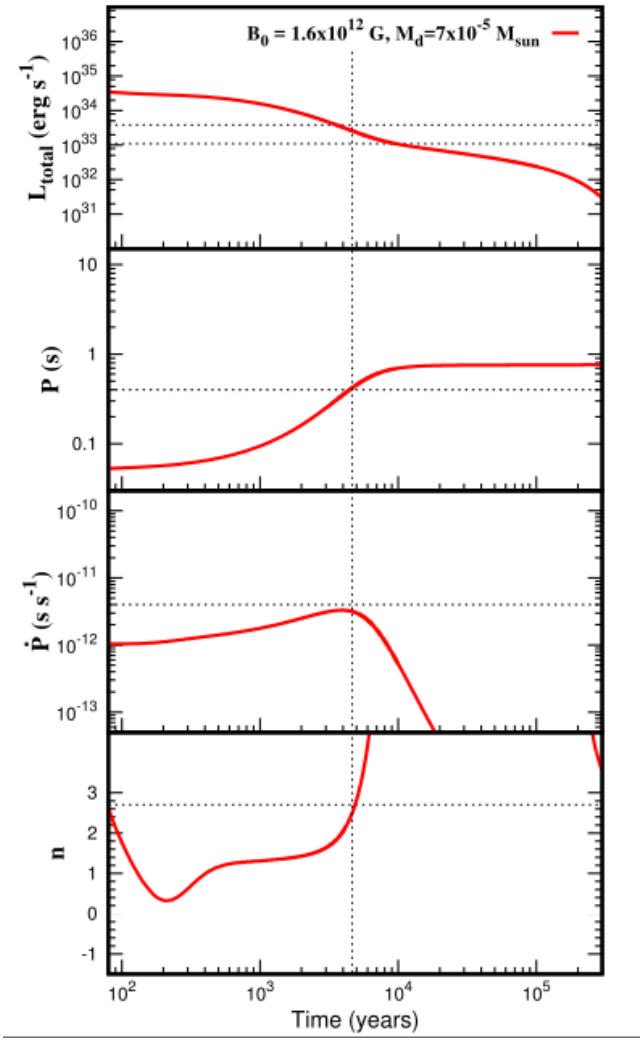
ışınları yaydığı tespit edilmiştir. 0.5-10 keV bandında tahmin edilen X-ışını ışıması, $d = 4.5$ kpc için, $L_X = (0.14 - 2.60) \times 10^{33}$ erg s^{-1}'dir (McLaughlin 2005).

PSR B1916+14, $P = 1.18$ s ve $\dot{P}$ = 2.1 x 10^{-13} s s^{-1} değerleri ile keşfedilmiştir (Hulse ve Taylor 1974). Bu değerler için $\dot{E} = 5.1\times10^{33}$ erg s^{-1} ve $\tau \simeq 8.8\times10^{4}$ yıldır. Kaynağın uzaklığı, dağılma ölçüsü tekniği kullanılarak, $d = 2.1 \pm 0.3$ kpc olarak tahmin edilmiştir (Ng ve Kaspi 2011). Uzaklık değerindeki hata payları dikkate alınarak, Zhu vd. (2009) tarafından analiz edilen X-ışını verilerinden, L_X ~ (2 – 3) x 10^{31} erg s^{-1} olarak tahmin edilmiştir. Fakat kaynağın sıcaklık ölçümlerinde sonuçları önemli derecede etkileyebilecek belirsizlikler mevcuttur. Bu kaynağın model eğrilerini incelerken L_X ~ 10^{31} - 10^{32} erg s^{-1}, aralığında olabileceğini varsaydık.

4. SONUÇLAR

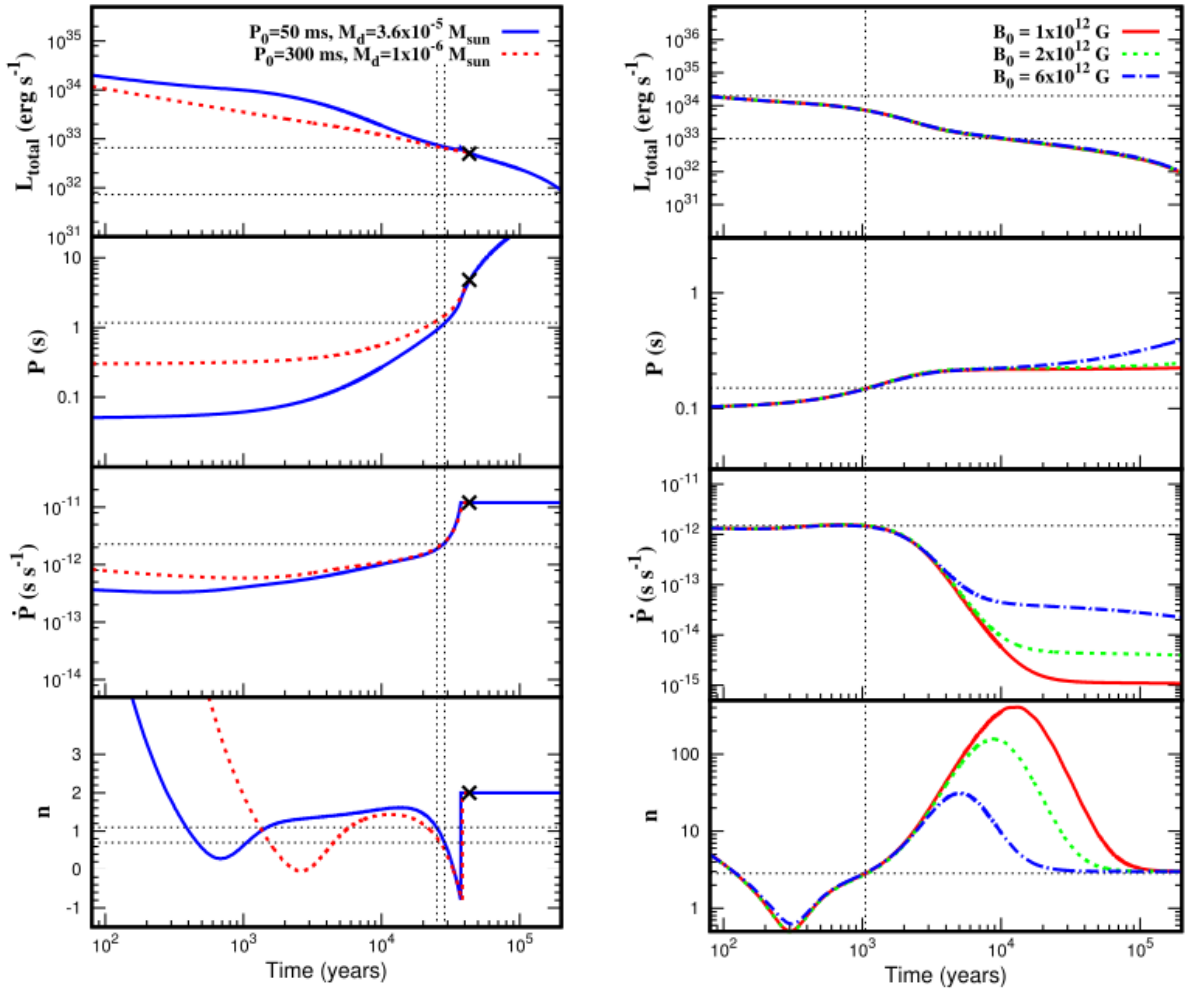
4.1 Frenleme İndisi Bilinen HBRP'lerin Evrimleri

Başlangıç koşullarını (B_0, M_d ve P_0) tarayarak, uzun dönemli evrim modelimizi frenleme indisi bilinen üç HBRP kaynağının gözlenen özellikleriyle test ettik. Simülasyonlarda, daha önce AXP/SGR ve XDIN'lere uyguladığımız modelde kullanılan temel disk parametreleri kullanılmıştır ($\alpha = 0.045$, $T_p = 100$ K ve $C = (1-7)\times10^{-4}$).



Şekil 1. PSR J1119-6127'nin uzun evrimini gösterebilecek örnek model eğrisi.
Yukarıdan aşağıya paneller sırasıyla X-ışını ışıma gücü (L_X), periyot (P), periyot türevi ($\dot{P}$) ve frenleme indeksi (n) evrimlerini göstermektedir. Pulsarın gözlenen özellikleri yatay çizgiler ile belirtilmiştir. L_X evrimini gösteren paneldeki iki paralel yatay çizgi gözlemsel hata payını göstermektedir. Bu eğri için kullandığımız parametre değerleri $P_0 = 50$ ms, $C = 1{\times}10^{-4}$ ve $T_p = 100$ K 'dir. Başlangıç disk kütlesi (M_d) ve dipol alan şiddeti (B_0) değerleri en üst panelde görülmektedir.

Şekil 1 ve 2'de verilen örnek model eğrilerinden PSR J1119-6127, PSR J1734-3333 ve PSR B1509-58'in gözlenen L_x, P, $\dot{P}$ ve n değerlerinin her bir kaynak için eş zamanlı olarak modelimiz içinde üretilebileceğini göstermektedir. Kaynakların modelde tahmin edilen yaşları (sırasıyla $5{\times}10^3$, $(2.5-3){\times}10^4$ ve $1{\times}10^3$ yıl), süpernova kalıntılarının tahmin edilen yaşlarıyla da tutarlıdır.



Şekil 2. PSR J1734-3333 (solda) ve PSR B1509-58 (sağda) için evrimleri için örnek model eğrileri. Soldaki şekildeki evrim çizgileri $B_0 = 2\times10^{12}$ G, $C = 7\times10^{-4}$ ve $T_p = 100$ K parametreleri ve en üst panelde verilen P_0 ve M_d değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Solda en alt panelde, çarpı işareti kaynağın pulsar ölüm çizgisinin (death-line) altına düştüğü zamanı göstermektedir. Sağdaki şekilde, 3 farklı evrim çizgisi $M_d \sim 2\times10^{-5} M_\odot$, $P_0 = 100$ ms, $C = 1\times10^{-4}$ ve $T_p = 100$ K ile üretilmiştir. Her bir eğri için kullanılan B_0 değeri en üst panelde gösterilmektedir.

Modelimiz, kaynakların manyetik dipol alanları için bir sınırlama getirmemektedir. Bu üç sistem için de, $B_0 \sim 10^{12} - 10^{13}$ G aralığında kaynak özellikleri üretilebilmektedir. Daha önceki sonuçlarımızda XDIN'ler için dipol alan şiddetini bu aralıktan daha küçük (10^{11} G $\lesssim B_0 \lesssim 10^{12}$ G), AXP/SGR'ler için ise 10^{12} G'dan büyük bulmuştuk. Bu sonuçlar, HBRP'lerin, AXP/SGR dlpoe alanlarına benzer ve hatta daha yüksek manyetik alanlara sahip olabileceğine işaret etmektedir. PSR J1119-6127 ve PSR B1509-58'in özelliklerini üretebilen P_0 ve M_d değerinin dar bir aralıkta sınırlı olduğu görülürken, PSR J1734-3333'ün özelliklerini açıklayabilecek evrim modelleri $P_0 \sim 50 - 300$ ms ve $M_d \sim 10^{-5} - 10^{-5} M_\odot$ aralıklarında elde edilebilmektedir

Şekil 1 ve 2'de, model kaynakların, yaklaşık 10^4 yıldan büyük yaşlarda, dipol tork varsayımıyla, gözlenen P ve $\dot{P}$ değerlerine göre tanımlanan "HBRP" özelliklerini kaybettikleri görülmektedir. PSR J1119-6127 ve PSR B1509-58, zamanla azalan $\dot{P}$ değerlerinden dolayı normal radyo

pulsarı özelliğine evrimleşirken, PSR J1734-3333 ise ileriki zamanlarda gireceği kütle aktarım fazında radyo pulsar özelliğini yitirip, AXP/SGR özellikleri kazanmaktadır.

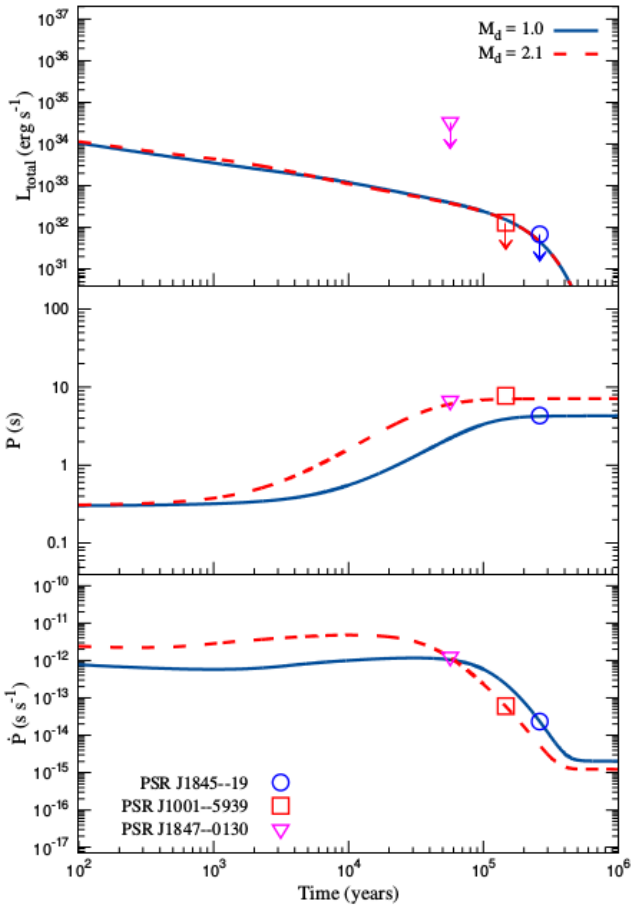
Frenleme indisleri ölçülmüş bu üç HBRP kaynağının uzun dönemli evrimleri üzerine yatığımız bu çalışma MNRAS dergisinde yayınlanmıştır (Benli ve Ertan 2017).

4.2 Frenleme İndisleri Bilinmeyen HBRP'lerin Evrimleri

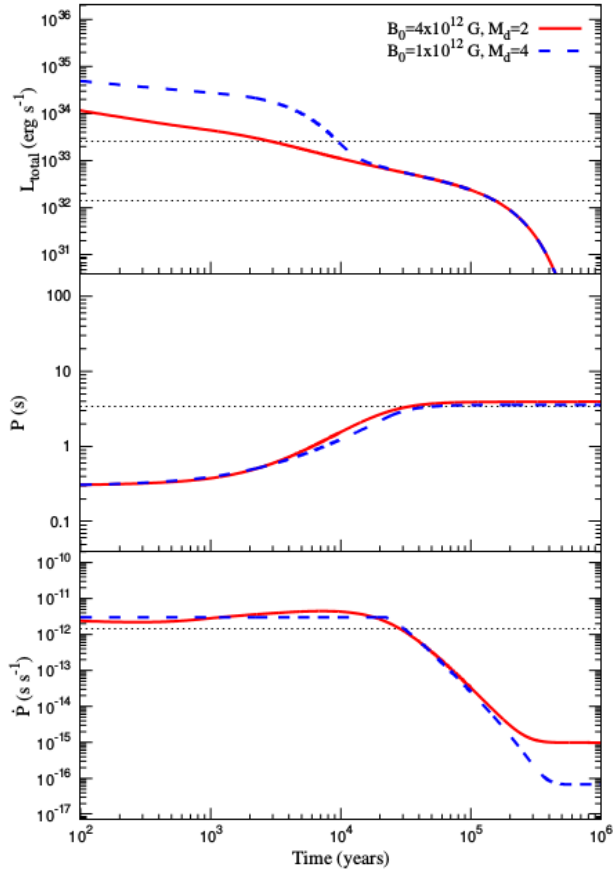
Bölüm 4.1'de anlatılan çalışmamızın devamında, modelimizi frenleme indisi henüz ölçülmemiş beş HBRP kaynağına uyguladık. Gözlenen kaynak özelliklerini (L_x, P, $\dot{P}$) üretebilen başlangıç disk koşullarını kalıntı disk modeli çerçevesinde belirlemeye çalıştık. Periyot ve periyot türevlerinin 2 kaynak için X-ışını ışıması, 3 kaynak için X-ışını ışımasının üst limiti ile tutarlı bir şekilde üretilebildiği Şekil 3, 4 ve 5'te görülmektedir. Bu kaynaklar için de, Bölüm 4.1'de anlatılan çalışmadakiyle aynı temel disk parametreleri kullanılmıştır ($\propto = 0.045$, $T_p = 100$ K, $C = (1-7)\times 10^{-4}$). Bu kaynakların ölçülmüş periyot ve periyot türevleriyle tahmin edilen L_x aralıkları veya üst limitleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Şekil 3'te PSR B1845-19, PSR J1001-5939 ve PSR J1847-0130 için, Şekil 4 ve 5'te sırasıyla PSR J1718-3718 ve PSR B1916+14 için örnek model eğrileri görülmektedir. Bölüm 4.1'de bahsettiğimiz kaynaklar gibi, bu HBRP kaynaklarının özellikleri de, sistemler pervane fazındayken üretilebilmektedir. Bu kaynaklar için de, modelimiz dipol alanların şiddeti, başlangıç disk kütlesi ve başlangıç periyodu için belirgin bir sınırlama getirmemektedir.

Şekil 3'te sunulan, üç yıldızın model eğrileri, bu sistemlerin tüm evrimleri boyunca pervane fazında kalmış olabileceklerini göstermektedir. Bu kaynaklar birbirine benzer şekillerde evrimleşmektedirler. Örnek model eğriler $B_0 = 6\times10^{12}$ G değeriyle üretilmiştir. $B_0 \sim 10^{12}$ G mertebesinde alan değerleriyle de bu kaynakların özelliklerini açıklayabilen başlangıç koşulları mevcuttur, fakat bu görece zayıf alanlar kaynakların radyo pulsar özellikleriyle tutarlı değildir. PSR J1718-3718'in evrimi için (Şekil. 4) iki farklı evrim senaryosu mümkündür. $B_0 = 4\times10^{12}$ G ile elde edilen örnek modelde sistem bütün ömrü boyunca pervane fazında kalmaktadır. $B_0 = 1\times10^{12}$ G için ise, kütle aktarım fazında başlayan evrim, $t \sim 2\times10^4$ yıldan sonra pervane fazına geçiş yapmaktadır. Her iki senaryo için de, gerekli olan dipol alan şiddeti gözlenen radyo ışıması için yeterlidir. Başlangıçta kütle aktarım fazında olmasını beklediğimiz bir diğer pulsar PSR B1916+14'tür. Şekil 5'te sunduğumuz evrim modeli için, $t \sim 2\times10^4$ yılda kütle aktarım fazı sona ermekte ve kaynak pervane fazına girmektedir .



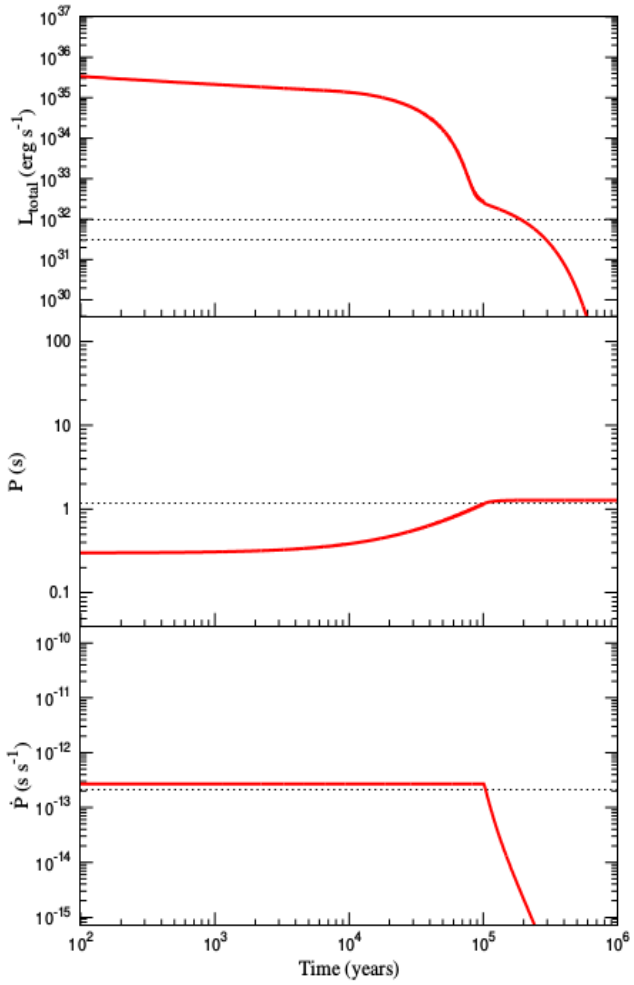
Şekil 3. PSR B1845-19, PSR J1001-5939 ve PSR J1847- 013 için örnek evrim modelleri.
Üst paneldeki aşağı yönde ok işareti ile birlikte çizilmiş veri noktaları gözlenen L_X üst limitlerini, orta ve alt panellerdeki veri noktaları kaynağın gözlenen P ve $\dot{P}$ değerlerini göstermektedir. Her iki model eğrisi de $B_0 = 6{\times}10^{12}$ G ile elde edilmiştir. M_d değerleri güneş kütlesi cinsinden en üst panelde verilmiştir.



Şekil 4. PSR J1718–3718 için örnek model eğrileri.
Çizgili (mavi) eğriyle gösterilen evrim için, kaynak evriminin ilk aşamasında kütle aktarım fazında ($\dot{P}$'nın yaklaşık sabit kaldığı evre) olup, $t \simeq 2{\times}10^4$ yıl civarında pervane fazına geçiş yapmaktadır. Düz (kırmızı) çizgiyle gösterilen modelde, kaynak tüm evrimi boyunca pervane fazında kalmaktadır. B_0 ve M_d (güneş kütlesi cinsinden) değerleri üst panelde gösterilmiştir.

Özetle, bu çalışmamızda HBRP popülasyonunun özelliklerine kalıntı disklerle evrimleşen nötron yıldızlarının ulaşabileceğini gösterdik. Süpernova kalıntı yaşları (gözlenen kaynaklar için) model sonuçlarımızla iyi bir uyum göstermektedir. Üç kaynağın ölçülmüş olan frenleme indisleri de diğer dönme özellikleri ve X ışını güçleriyle birlikte üretilebilmektedir. SGR, AXP ve XDIN'ler üzerine önceki çalışmalarımızla birlikte değerlendirildiğinde, bu çok farklı nötron yıldızı popülasyonlarının aynı kalıntı disk modeli içinde, ilk koşullarındaki farlılıklarla ortaya çıkabileceği sonucuna varmaktayız.

Projede, Dr. Onur Benli doktora sonrası araştırmacı olarak görev almış. Bölüm 4.1'de anlatılan çalışma MNRAS dergisinde yayınlanmış, bunun devamında, Bölüm 4.2'de anlatılan çalışma New Astronomy dergisi tarafından kabul edilmiş, basım aşmasındadır. Bu makaleler rapor ekinde sunulmuştur.



Şekil 5. PSR B1916+14'ün özelliklerini üretebilen örnek evrim model eğrileri.
Bu modelde $B_0 = 3{\times}10^{11}$ G ve $M_d \simeq 10^{-5}\ M_\odot$ alınmıştır. Kaynak özellikleri, kütle aktarım fazının bitiminden kısa bir süre sonra, $t \simeq 2{\times}10^4$ yılda, elde edilmiştir.

	P (s)	$\dot{P}$ (s s^{-1})	n	L_x (erg s^{-1})	$\dot{E}$ (erg s^{-1})	B_0 (10^{13} G)
PSR J1734-3333	1.17	2.28×10^{-12}	0.9 ± 0.2	$7.3 - 66 \times 10^{31}$	5.6×10^{34}	10.44
PSR B1845–19	4.31	2.33×10^{-14}	–	$< 6.8 \times 10^{31}$	1.1×10^{31}	2.02
PSR J1001–5939	7.73	5.99×10^{-14}	–	$< 1.3 \times 10^{32}$	5.1×10^{30}	4.36
PSR J1847–0130	6.71	1.28×10^{-12}	–	$< 3.4 \times 10^{34}$	1.7×10^{32}	18.72
PSR J1718–3718	3.38	1.61×10^{-12}	–	$0.14 - 2.6 \times 10^{33}$	1.7×10^{33}	14.94
PSR B1916+14	1.18	2.12×10^{-13}	–	$1.1 - 2.3 \times 10^{31}$	5.1×10^{33}	3.20
PSR J1119–6127	0.41	4.02×10^{-12}	2.7	$1.1 - 3.8 \times 10^{33}$	2.3×10^{36}	8.20
PSR B1509–58	0.15	1.53×10^{-12}	2.84	$1 - 20 \times 10^{33}$	1.7×10^{37}	3.08

Tablo 1. Kaynakların gözlenen özellikleri (L_x, P, $\dot{P}$ ve n) ve bu özelliklere karşılık gelen dönme enerjisi türevi ($\dot{E}$) ve dipol frenleme yaklaşımı ile elde edilen kutuptaki manyetik dipol alan şiddeti.

PROJE ÇIKTILARI

Makaleler

Benli, O and Ertan, Ü, 2017, On the evolution of high-B radio pulsars with measured braking indices, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 471, 2553 - 2557

Benli, O and Ertan, Ü, 2018, “Rotational and X-ray luminosity evolution of high-B radio pulsars”, accepted for publication in New Astronomy , https://doi.org/10.1016/j.newast.2017.12.005

Bildiriler

Temmuz 14-22, 2018 tarihleri arasında, Pasadena, California’da düzenlenecek COSPAR Konferansında “*fallback disks and isolated disks in neutron star evolution* ” başlıklı konuşma için davet almış bulunmaktayım. Konuşmada, bu projedeki çalışmamızı da anlatma fırsatımız olacaktır.
(30 minute solicited review on *fallback disks and isolated disks in neutron star evolution* in the COSPAR 2018 Event E 1.10 "Structure Dynamics and Evolution of Neutron Stars")

ATIFLAR

Akbal, O., Gügercinoğlu, E., Şaşmaz Muş, S., Alpar, M. A. 2015. “Peculiar glitch of PSR J1119-6127 and extension of the vortex creep model”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449, 933-941.

Alpar, M. A. 2001. “On Young Neutron Stars as Propellers and Accretors with Conventional Magnetic Fields”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 554, 1245-1254.

Alpar, M. A., Ertan, Ü., Çalışkan, Ş. 2011. “SGR 0418+5729 - How does a Young Neutron Star Spin Down to a 9 s Period with a Dipole Field Less Than 10^{13} G?”, The Astrophysical Journal, 732, L4- L8.

Antonopoulou, D., Weltevrede, P., Espinoza, C. M., Watts, A. L., Johnston, S., Shannon, R. M., Kerr, M. 2015. “The unusual glitch recoveries of the high-magnetic-field pulsar J1119-6127”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 447(4), 3924-3935.

Archibald A. M. et al. 2015. “Accretion-powered Pulsations in an Apparently Quiescent Neutron Star Binary”, The Astrophysical Journal, 807, 62-70

Balbus S. A. ve Hawley J. F. 1991. “A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution”, The Astrophysical Journal, 376, 214-233

Benli, O., Ertan, Ü. 2017. “On the evolution of high-B radio pulsars with measured braking indices”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 471(3), 2553-2557.

Benli, O, Çalışkan, Ş. Ertan, Ü., Alpar, M. A., Trümper, J. E., Kylafis, N. D. 2013. “X-Ray Enhancement and Long-term Evolution of Swift J1822.3-1606”, The Astrophysical Journal, 778, 119-126.

Benli, O., Ertan, Ü. 2016. “Long-term evolution of anomalous X-ray pulsars and soft gamma repeaters”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 4114-4122.

Çalışkan, Ş., Ertan, Ü., Alpar, M. A., Trümper, J. E., Kylafis, N. D. 2013. “On the evolution of the radio pulsar PSR J1734-3333”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 431(2), 1136-1141.

Çalışkan, Ş., Ertan, Ü. 2012. “On the X-Ray Outbursts of Transient Anomalous X-Ray Pulsars and Soft Gamma-Ray Repeaters”, The Astrophysical Journal, 759, 98-109.

Camilo, F., Kaspi, V. M., Lyne, A. G., Manchester, R. N., Bell, J. F., D’Amico, N., McKay, N. P. F., Crawford, F. 2000, “Discovery of Two High Magnetic Field Radio Pulsars”, The Astrophysical Journal, 541, 367-373.

Caswell, J. L., McClure-Griffiths, N. M., Cheung, M. C. M. 2004. “Supernova remnant G292.2-0.5, its pulsar, and the Galactic magnetic field”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 352(4), 1405-1412.

Chatterjee, P., Hernquist, L., Narayan, R. 2000. “An Accretion Model for Anomalous X-Ray Pulsars”, The Astrophysical Journal, 534, 373-379.

Davidson, K. ve Ostriker, J. P. 1973. “Neutron-Star Accretion in a Stellar Wind: Model for a Pulsed X-Ray Source”, The Astrophysical Journal, 179, 585-598.

Ertan, Ü. 2017. “The inner disc radius in the propeller phase and accretion-propeller transition of neutron stars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 466, 175-180.

Ertan, Ü., Çalışkan, Ş., Benli, O., Alpar, M. A. 2014. “Long-term evolution of dim isolated neutron stars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 444(2), 1559-1565.

Ertan, Ü., Ekşi, K. Y., Erkut, M. H., Alpar M. A. 2009. “On the Evolution of Anomalous X-ray Pulsars and Soft Gamma-ray Repeaters with Fall Back Disks”, The Astrophysical Journal, 702(2), 1309-1320.

Ertan, Ü., Erkut, M. H. 2008. “On the X-Ray Light Curve, Pulsed-Radio Emission, and Spin Frequency Evolution of the Transient Anomalous X-Ray Pulsar XTE J1810-197 during Its X-Ray Outburst”, The Astrophysical Journal, 673(2), 1062-1066.

Espinoza, C. M., Lyne, A. G., Kramer, M., Manchester, R. N., Kaspi, V. M. 2011. “The Braking Index of PSR J1734-3333 and the Magnetar Population”, The Astrophysical Journal Letters, 741, L13-L19.

Faucher-Giguere C. A. ve Kaspi V. M. 2006. “Birth and Evolution of Isolated Radio Pulsars”, The Astrophysical Journal, 643, 332-355.

Frank, J., King, A., Raine, D. 2002. “Accretion Power in Astrophysics”, Cambridge University Press

Gaensler, B. M., Brazier, K. T. S., Manchester, R. N., Johnston, S., Green, A. J. 1999. “SNR G320.4-01.2 and PSR B1509-58: new radio observations of a complex interacting system”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 305(3), 724-736.

Gavriil, F. P., Gonzalez, M. E., Gotthelf, E. V., Kaspi, V. M., Livingstone, M. A., Woods, P. M. 2008. “Magnetar-Like Emission from the Young Pulsar in Kes 75”, Science, 319, 1802-1805.

Inutsuka S. i. ve Sano T. 2005. “Self-sustained Ionization and Vanishing Dead Zones in Protoplanetary Disks”, The Astrophysical Journal Letters, 628(2), L155-L158

Ho, Wynn C. G., Andersson, N. 2012. “Rotational evolution of young pulsars due to superfluid decoupling”, Nature Physics, 8(11), 787-789.

Hobbs, G., Faulkner, A., Stairs, I. H., Camilo, F., Manchester, R. N., Lyne, A. G., Kramer, M., D’Amico, N., Kaspi, V. M., Possenti, A., McLaughlin, M. A., Lorimer, D. R., Burgay, M., Joshi, B. C., Crawford, F. 2004. “The Parkes multibeam pulsar survey - IV. Discovery of 180 pulsars and parameters for 281 previously known pulsars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 352, 1439-1472.

Hu, Chin-Ping, Ng, C.-Y., Takata, J., Shannon, R. M., Johnston, S. 2017. “Chandra Phase-resolved Spectroscopy of the High Magnetic Field Pulsar B1509-58”, The Astrophysical Journal, 838(2), 156-166.

Hulse, R. A., Taylor, J. H. 1974. “A High-Sensitivity Pulsar Survey”, The Astrophysical Journal, 191, L59-L61.

Israel, G. L., Campana, S., Dall’Osso, S., Muno, M. P., Cummings, J., Perna, R., Stella, L. 2007. “The Post-Burst Awakening of the Anomalous XRay Pulsar in Westerlund 1”, The Astrophysical Journal, 664, 448-457.

Kaspi, V. M. 2010. “Grand unification of neutron stars”, Proceedings of the National Academy of Science, 107, 7147-7152.

Kaspi, V.M., Roberts, M.S.E., Harding, A.K., 2006, “Compact stellar X-ray Sources”, p:279-339, Editörler: Walter H. G. Lewin ve Michiel van der Klis

Kaspi, V. M., Gavriil, F. P., Woods, P. M., Jensen, J. B., Roberts, M. S. E., Chakrabarty, D. 2003. “A Major Soft Gamma Repeater-like Outburst and Rotation Glitch in the No-longer-so-anomalous X-Ray Pulsar 1E 2259+586”, The Astrophysical Journal, 588, L93-L96.

Kaspi, V. M., Manchester, R. N., Siegman, B., Johnston, S., Lyne, A. G. 1994. “On the spin-down of PSR B1509-58”, Astrophysical Journal, 422(2), L83-L86.

Kaspi, V. M., McLaughlin, M. A. 2005. “Chandra X-Ray Detection of the High Magnetic Field Radio Pulsar PSR J1718-3718”, The Astrophysical Journal, 618, L41-L44.

Keane, E. F., Kramer, M. 2008. “On the birthrates of Galactic neutron stars”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 391, 2009-2016.

Lamb, F. K., Pethick, C. J. ve Pines, D. 1973. “A Model for Compact X-Ray Sources: Accretion by Rotating Magnetic Stars”, The Astrophysical Journal, 184, 271-290.

Linares M., 2014, “X-Ray States of Redback Millisecond Pulsars”, The Astrophysical Journal, 795, 72-81

Lorimer, D. R., Faulkner, A. J., Lyne, A. G., Manchester, R. N., Kramer, M., McLaughlin, M. A., Hobbs, G., Possenti, A., Stairs, I. H., Camilo, F., Burgay, M., D’Amico, N., Corongiu, A., Crawford, F. 2006. “The Parkes Multibeam Pulsar Survey - VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 372, 777-800.

McLaughlin, M. A., Stairs, I. H., Kaspi, V. M., Lorimer, D. R., Kramer, M., Lyne, A. G., Manchester, R. N., Camilo, F., Hobbs, G., Possenti, A., D’Amico, N., Faulkner, A. J. 2003. “PSR J1847-0130: A Radio Pulsar with Magnetar Spin Characteristics”, The Astrophysical Journal, 591, L135–L138.

Ng, C.-Y., Kaspi, V. M., 2011. “High Magnetic Field Rotation-powered Pulsars”, American Institute of Physics Conference Series, Vol. 1379, 60-69.

Ng, C.-Y., Kaspi, V. M., Ho, W. C. G., Weltevrede, P., Bogdanov, S., Shannon, R., Gonzalez, M. E. 2012. “Deep X-Ray Observations of the Young High-magnetic-field Radio Pulsar J1119-6127 and Supernova Remnant G292.2-0.5”, The Astrophysical Journal, 761, 65-75.

Olausen, S. A., Zhu, W. W., Vogel, J. K., Kaspi, V. M., Lyne, A. G., Espinoza, C. M., Stappers, B. W., Manchester, R. N., McLaughlin, M. A. 2013. “X-Ray Observations of High-B Radio Pulsars”, The Astrophysical Journal, 764, 1-7.

Page, D., Geppert, U., Weber, F. 2006. “The cooling of compact stars”, Nuclear Physics A, 777, 497-530.

Papitto, A., de Martino, D., Belloni, T. M., Burgay, M., Pelliz-zoni, A., Possenti, A., Torres, D. F. 2015. “X-ray coherent pulsations during a sub-luminous accretion disc state of the transitional millisecond pulsar XSS J12270-4859”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449, L26

Ruderman, M. A., Sutherland, P. G. 1975. “Theory of pulsars - Polar caps, sparks, and coherent microwave radiation”, The Astrophysical Journal, 196, 51-72.

Seward, F. D., Harnden, F. R., Jr. 1982. “A new, fast X-ray pulsar in the supernova remnant MSH 15-52”, The Astrophysical Journal, 256, L45-L47.

Shakura, N. I., Sunyaev, R. A. 1973. “Black holes in binary systems. Observational appearance”, Astronomy and Astrophysics, 24, 337-355.

Weltevrede, P., Johnston, S., Espinoza, C. M. 2011. “The glitch-induced identity changes of PSR J1119-6127”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 411(3),1917-1934.

Younes, G., Kouveliotou, C., Roberts, O. 2016. “GBM observation of SGRlike burst from the direction of PSR 1119-6127”, GRB Coordinates Network, Circular Service, 19736, 1.

Zhu, W. W., Kaspi, V. M., McLaughlin, M. A., Pavlov, G. G., Ng, C.-Y., Manchester, R. N., Gaensler, B. M., Woods, P. M. 2011. “Chandra Observations of the High-magnetic-field Radio Pulsar J1718-3718”, The Astrophysical Journal, 734, 44-52.

Zhu, W., Kaspi, V. M., Gonzalez, M. E., Lyne, A. G. 2009. “XmmNewton X-Ray Detection of the High-Magnetic-Field Radio Pulsar PSR B1916+14”, The Astrophysical Journal, 704, 1321-1326.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ÜNAL ERTAN
Proje No:	116F336
Proje Başlığı:	Yüksek Manyetik Alanlı Pulsarların Kalıntı Disklerle Evrimi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	8
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SABANCI Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2017 - 15/11/2017
Onaylanan Bütçe:	26350.0
Harcanan Bütçe:	22084.0
Öz:	Genç nötron yıldızı popülasyonlarının bir üyesi olan yüksek manyetik alanlı radyo pulsarlarının (HBRP) uzun süreli X-ışını ışıma gücü ve dönme evrimlerini inceledik. İlk olarak, frenleme indisi bilinen üç HBRP sitemini inceledik. Her bir kaynağın periyot, periyot türevi, frenleme indisi ve X ışını ışıma gücüne kalıntı disklerle evrimleşen nötron yıldızlarının eşzamanlı olarak ulaşabileceğini gösterdik. Modelde kaynak özelliklerine ulaşılan yaşlar, bu sistemlerin süpernova kalıntılarının tahmin edilen yaşları ile tutarlıdır. Model sonuçları, anormal X-ışını pulsarları (AXP), gama ışını tekrarlayıcıları (SGR) ve sönük izole nötron yıldızlarının (XDIN) aksine, HBRP?lerin manyetik dipol alan şiddetini sınırlandırmamaktadır. Model, HBRP?lerin özelliklerini, pervane fazında ve radyo pulsar ışıması için yeterli dipol manyetik alan şiddetleriyle üretebilmektedir. Simülasyonlar, gelecekteki evrim süreçlerinde, yaklaşık birkaç 104 yıldan sonraki yaşlarda, bazı model kaynakların HBRP özelliklerini kaybedeceklerini göstermektedir. Bunun nedeni, kaynakların düşen periyot türevleriyle birlikte, normal radyo pulsar olması veya kütle aktarım fazına girerek AXP ve SGR özelliklerine evrimleşmesidir. Bu sonuç HBRP ve diğer nötron yıldızı sistemleri arasında evrim ilişkisi olduğu fikrini desteklemektedir.
Anahtar Kelimeler:	Yıldızlar: Nötron yıldızları - radyo pulsarlar - kütle aktarım diskleri - X-ışınları
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK