

# GENÇ NÖTRON YILDIZI SİSTEMLERİNİN YAYILMA DİSKLERİYLE EVRİMİ

## YAZARLAR

Ünal Ertan<sup>1</sup>, Şirin ÇALIŞKAN<sup>1</sup>, M. Ali ALPAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Orhanlı, Tuzla, 34956, İstanbul  
eposta: unal@sabanciuniv.edu

**Özet:** Genç nötron yıldızı sistemleri, son yıllarda artan gözlemsel verilerle birlikte farklı sınıflar olarak ortaya çıkmıştır (anormal X-ışını kaynakları (AXP), gama ışını tekrarlayıcıları (SGR), sönmük termal X-ışını kaynakları (XDIN), merkezi yoğun cisimler (CCO), dönen radyo kaynakları (RRAT) ve genç radyo pulsarları). Birbirinden çok farklı ve aynı zamanda benzer özellikleri olan bu kaynakları farklı sınıflara ayırtan evrim süreçleri ilk koşullarla ilişkili olmalıdır. Yayılma disklerinin varlığı ve özellikleri ilk koşullara eklendiğinde bu sistemlerin özelliklerini açıklamak mümkün olabilir (Alpar 2001). Bu çalışmada, farklı iki sınıfa ait olan SGR 0418+5729 ve radyo pulsar PSR J1734-3333 kaynaklarının dönme ve X-ışını parlaklık özelliklerinin, daha önce AXP ve SGR'lerin genel özelliklerini açıkladığımız evrim modeliyle üretilebildiğini göstermekteyiz. Yayılma diskiyle evrim modelinde, bu kaynakların özelliklerini eş zamanlı olarak üretebilen manyetik dipol alan şiddetini yıldız yüzeyinde  $1 - 5 \times 10^{12}$  G aralığında bulmaktayız.

## 1. Giriş

Son yıllarda radyodan gama ışınlarına uzanan geniş elektromanyetik tayfta yapılan gözlemler sonucunda yeni genç nötron yıldızı sistemleri keşfedilmiştir. Bu sistemlerin X-ışını parlaklığı, dönme (periyot ve periyot türevleri) ve tayf özelliklerinde çarpıcı benzerlik ve farklılıklar görülmektedir. Bu kaynaklar gama ışını tekrarlayıcıları (SGR), anormal X-ışını kaynakları (AXP), Sönmük X-ışını kaynakları (XDIN), merkezi yoğun cisimler (CCO), dönen radyo kaynakları (RRAT) ve genç radyo pulsarlarıdır. Bazılarında süpernova bağlantısı olan bu izole genç nötron yıldızı sistemlerinin yaşlarının yaklaşık  $10^6$  yıldan daha küçük olduğu tahmin edilmektedir.

Bir taraftan bu sistemlerin ayrı ayrı fiziksel özelliklerini anlamaya çalışırken, diğer taraftan bütün bu sınıfların arasındaki evrim ilişkilerinin, bu yıldızları ayrı sınıflar olarak ortaya çıkartan temel özelliklerin tek bir resim içinde açıklanması esas amaçtır. Bu genç sistemler arasında en ilginç olanı ve günümüzde üzerinde en çok çalışılan AXP ve SGR'lerdir. Başlangıçta farklı olduğu düşünülen bu iki grup yıldızın, önceleri SGR özelliği olduğu zannedilen kısa süreli süper Eddington parlamalarının AXP'lerde de görülmesiyle, aynı sınıfa ait sistemler olduğu anlaşılmıştır. Sayıları yaklaşık 20 kadar olan bu kaynakların diğer önemli özellikleri dönme güçlerinin gözlenen X-ışını ışınma güçlerinin çok altında olması ve dönme periyotlarının 2-12 s aralığında kümelenmiş olmasıdır (AXP ve SGR'lerin özellikleri için bkz. Mereghetti 2008).

Çok kısa süreli ( $< 1$  s) ve Eddington seviyesi üzerinde ışınma şiddetleri nedeniyle, gama ışını parlamalarının kaynağının yüksek manyetik alanlar olması beklenir. Bu güçlü alanların yıldızın manyetik alanının hangi bileşeninde olduğu modellerin karşılaştırılması bakımından önemlidir. Magnetar modelinde (Duncan ve Thompson

1992) yıldızın boşlukta döndüğü ve dipol radyasyonu torqlarıyla yavaşladığı varsayılmaktadır. Bu varsayımla, kaynakların gözlenen periyot ( $P$ ) ve periyot türevlerinden ( $\dot{P}$ ) yıldız üzerindeki dipol alan şiddeti  $B \propto (P\dot{P})^{1/2}$  tahmin edilebilir. Bu kaynakların  $P$  ve  $\dot{P}$  değerleri yıldız yüzeyinde magnetar ( $>10^{14}$  G) dipol alanlar vermektedir. Nötron yıldızı, yayılma diski modelinde (Chatterjee ve ark. 2000, Alpar 2001) önerildiği gibi, bir yayılma diskiyle evrimleşiyorsa, dipol torqu varsayımıyla yapılan dipol alan tahmini yanıltıcıdır. Yayılma diski modelinde gözlemlerle tutarlı sonuçlar veren dipol alan büyüklüğü yıldız yüzeyinde  $10^{12} - 10^{13}$  G mertebesindedir. Bu modelde X-ışınının kaynağı diskten yıldız yüzeyine kütle aktarımıdır. Magnetar modeliyle açıklanamayan periyot kümelenmesi ise disk ile yıldızın dipol alanının uzun süreli etkileşmesinin doğal bir sonucu olarak açıklanmaktadır. Disk modelinde, magnetar alanların yıldız yüzeyine yakın küçük ölçekli çok kutuplu (kuadropol) alanlarda olduğu varsayılır. Yıldızın dönme evrimini belirleyen ise diskle etkileşen büyük ölçekli konvansiyonel ( $< 10^{13}$  G) dipol alandır.

Nötron yıldızlarının etrafındaki yayılma diski özellikleri, ilk periyot ve dipol alan şiddetine ek olarak ilk koşullara dahil edildiğinde, yalnız AXP/SGR değil, diğer genç nötron yıldızı sistemlerinin özelliklerinin de açıklanabileceği Alpar (2001) tarafından önerilmiştir. Bu fikri takip ederek, Ertan ve ark. (2009) yayılma diski modeliyle AXP/SGR'lerin genel X-ışını parlaklığı ve dönme özelliklerinin birlikte açıklanabileceğini gösterdi. Tipik SGR parlamaları gösteren SGR 0418+5729'un kısa zaman önce belirlenen  $\dot{P}$  üst limiti, bu kaynakta dipol alan şiddetinin yıldız yüzeyinde  $7.5 \times 10^{12}$  G üzerinde olamayacağını göstermektedir (Rea ve ark. 2010). Bu sonuç SGR parlamalarının magnetar dipol alanların varlığını gerektirmediği fikrini doğrulamıştır.

Periyot türevinin zamanla arttığı ve  $P - \dot{P}$  diyagramında AXP/SGR bölgesine ilerlediği tespit edilen radyo pulsar PSR J1734-3333 (Espinoza ve ark. 2011) genç nötron yıldızlarının evrim ilişkilerinin anlaşılmasında ve modellerin sınanmasında önemli rol oynayacak bir diğer kaynaktır. Magnetar modelinde, SGR 0418+5729 başlangıçta çok yüksek alanların hızlı bir şekilde bozunumunu gerektirirken PSR J1734-3333'ün evrimini ise tam tersine dipol alanın zaman içinde artmasıyla açıklamak gerekir.

Bu makalede, yayılma diski modeliyle SGR 0418+5729 ve PSR J1734-3333'ün gözlenen X-ışını parlaklığı ve dönme özelliklerini uzun süreli evrimlerinde eş zamanlı olarak elde etmeye yönelik çalışmaları özetlemekteyiz. Bölüm 2'de modelin kısa bir özetini sunduktan sonra, Bölüm 3 ve 4'de model kaynakların evrim eğrilerini vermekteyiz. Sonuçlarımız Bölüm 5'de özetlenmektedir.

## 2. Model

Modelimizde, başlangıçta nötron yıldızı etrafında yayılmış bir ince disk için difüzyon denklemini çözmekteyiz (ayrıntılar için: Ertan ve ark. 2009). İç disk bu evrimi sırasında nötron yıldızının manyetik dipol alanıyla etkileşerek yıldızın dönme evrimini belirler. İç disk yarıçapı olarak, manyetik ve disk madde basıncının eşitlendiği Alfven yarıçapını almaktayız. X-ışını kaynağı, iç diskin ışık silindiri içine sızabildiği dönemlerde yıldız üzerine diskten kütle aktarımı, bunun mümkün olmadığı zamanlarda ise yıldızın iç soğumasıdır (Page 2009). İlk  $10^4 - 10^5$  yıllık dönemlerde kütle aktarımı varsa bunun sonucunda oluşan X-ışını parlaklığı iç soğumaya göre genelde çok daha baskındır. Daha önceki çalışmalarımızdan, diskin 100 – 200 K civarında sıcaklıklarda

pasif hale geldiği sonucuna varmaktayız. Aktif diskin dış yarıçapı zaman içinde azalan X-ışını ısıtma şiddetiyle birlikte küçülür.

Modelde, iç diskin ışık silindiri içerisinde kaldığı dönemleri kütle aktarım fazı olarak adlandırmaktayız. İç diskte madde basıncı azalır, ışık silindirindeki manyetik basıncın altına düştükten sonra, iç diskin en dıştaki kapalı dipol alan çizgileriyle etkileşmeye devam ederek evrimleştiğini varsaymaktayız. Bazı model kaynaklar manyetik alan şiddetine, disk kütlesine ve ilk dönme periyoduna bağlı olarak evrimin hemen başlangıcında kütle aktarım fazına girmez. Böyle kaynaklar, bu dönemde ışık silindiri yarıçapının iç disk yarıçapından daha hızlı büyümesi sonucu, sonradan kütle aktarım fazına geçebilmektedir. Model kaynaklar için kütle aktarımın olmadığı bu başlangıç evresinin süresi, ilk koşullara bağlı olarak, birkaç günden birkaç  $10^4$  yıl arasında değişmektedir. Bazı ilk koşullar için, yıldız disk toraklarıyla yavaşladığı halde, kütle aktarım evresine hiç girmeden, ömrünü radyo pulsar olarak geçirebilir. Kütle aktarım olmadığından atmalı radyo ışımalarının mümkün olduğu bu dönemi radyo fazı olarak adlandırmaktayız.

Kütle aktarım fazında, zamanla diskteki kütle aktarım oranı düşer. Evrimin ileri safhalarında dış diski aktif tutan X-ışını ısıtma şiddetinin azalmasıyla iç diske madde akış oranı daha hızlı bir şekilde azalmaya başlar. Bunun sonucunda iç disk yarı çapı ışık silindiri yarı çapından daha hızlı büyümeye başlar ve sonunda ışık silindirini yakalar. Modelde, bu andan sonra, yıldız üzerine hiç kütle aktarımı olmadığını varsaymaktayız. Evrimin kütle aktarımının kesildiği geç döneminde radyo ışımalarının mümkün olup olmadığı yıldızın bu sırada sahip olduğu periyot ve dipol manyetik alan şiddetine bağlıdır.

Nötron yıldızlarının yayılma diskleriyle evrim modelinin ayrıntıları Ertan ve Erkut (2008), Ertan ve ark. (2009) ve Alpar ve ark. (2011) çalışmalarında verilmiştir. Bölüm 3’de literatürde “düşük manyetik alanlı magnetar” olarak adlandırılan SGR 0418+5729, Bölüm 4’te ise “yüksek manyetik alanlı radyo pulsar” olarak bilinen PSR J1734-3333 için model uygulamalarının sonuçlarını özetlemekteyiz.

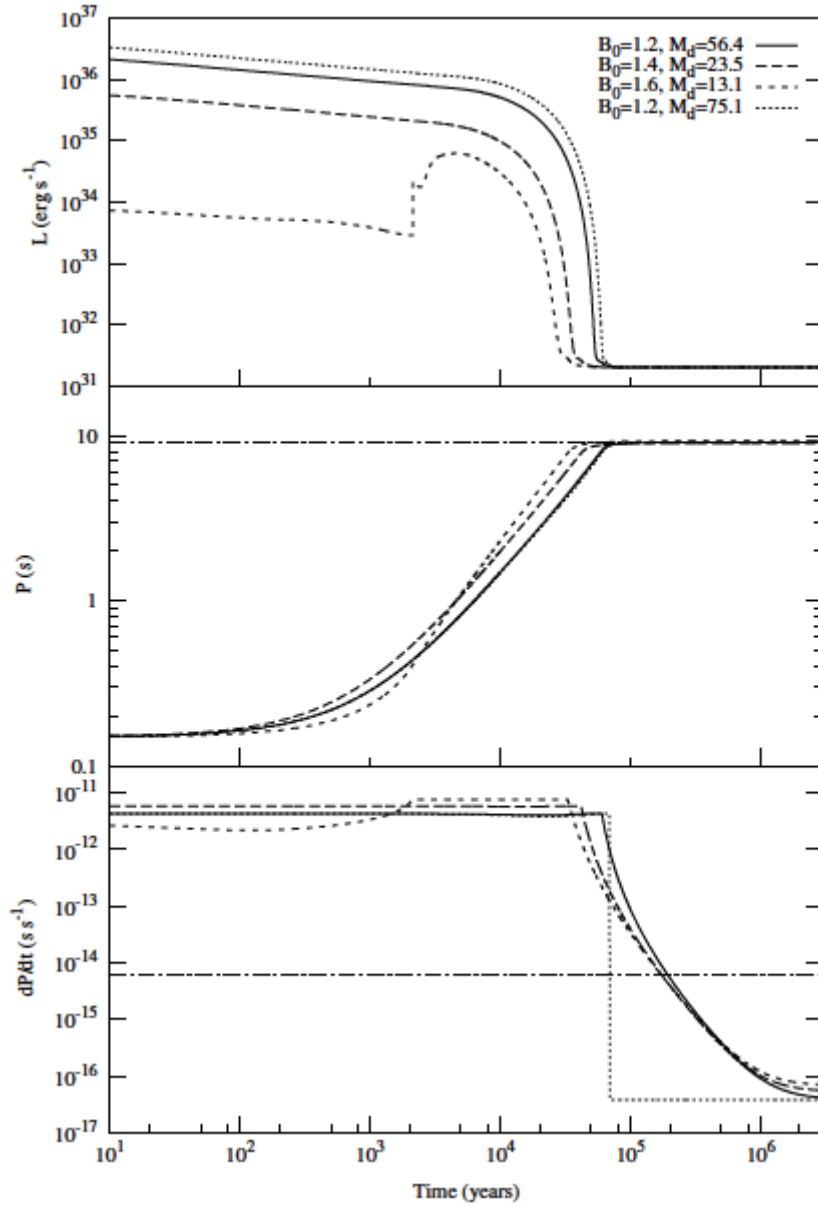
### 3. SGR 0418+5729

Bu tipik gama ışını parlama kaynağının periyot türevi için yakın zamanda belirlenen üst limit nötron yıldızının dipol alanının yıldız yüzeyinde  $7.5 \times 10^{12}$  G değerinin altında olması gerektiğini göstermektedir (Rea ve ark. 2010). Bu çalışmada, amacımız öncelikle model kaynakların SGR 0418+5729’un özelliklerini eş zamanlı olarak üretebildiğini görmektir. Daha sonra, simülasyonları model parametrelerimizi tarayarak tekrar edip, kaynak özelliklerini üretebilecek manyetik dipol alan değerlerini bulmaktır.

Şekil 1’de, farklı manyetik alan ve disk kütlesi için verilen örnek evrim çizgileri, model kaynakların SGR 0418+5729’un periyot, periyot türevi ve X-ışını parlaklığının eş zamanlı olarak ulaşabildiğini göstermektedir. Bu şekilde gözlemlerle tutarlı sonuçlar verebilen dipol alan büyüklüğü, bu kaynak için,  $1 - 2 \times 10^{12}$  G aralığındadır.

Model eğrilerinde, periyot türevinin sabit olduğu dönemler kütle aktarım evresine denk gelmektedir. İlk paneldeki, model ışık eğrilerinden en altta yer alan (kısa-kesikli) çizgi kütle aktarım fazına yaklaşık  $2 \times 10^3$  yılda giren bir kaynağı göstermektedir. Bu evrede kaynağın periyot türevinin arttığı görülmektedir. Böyle bir

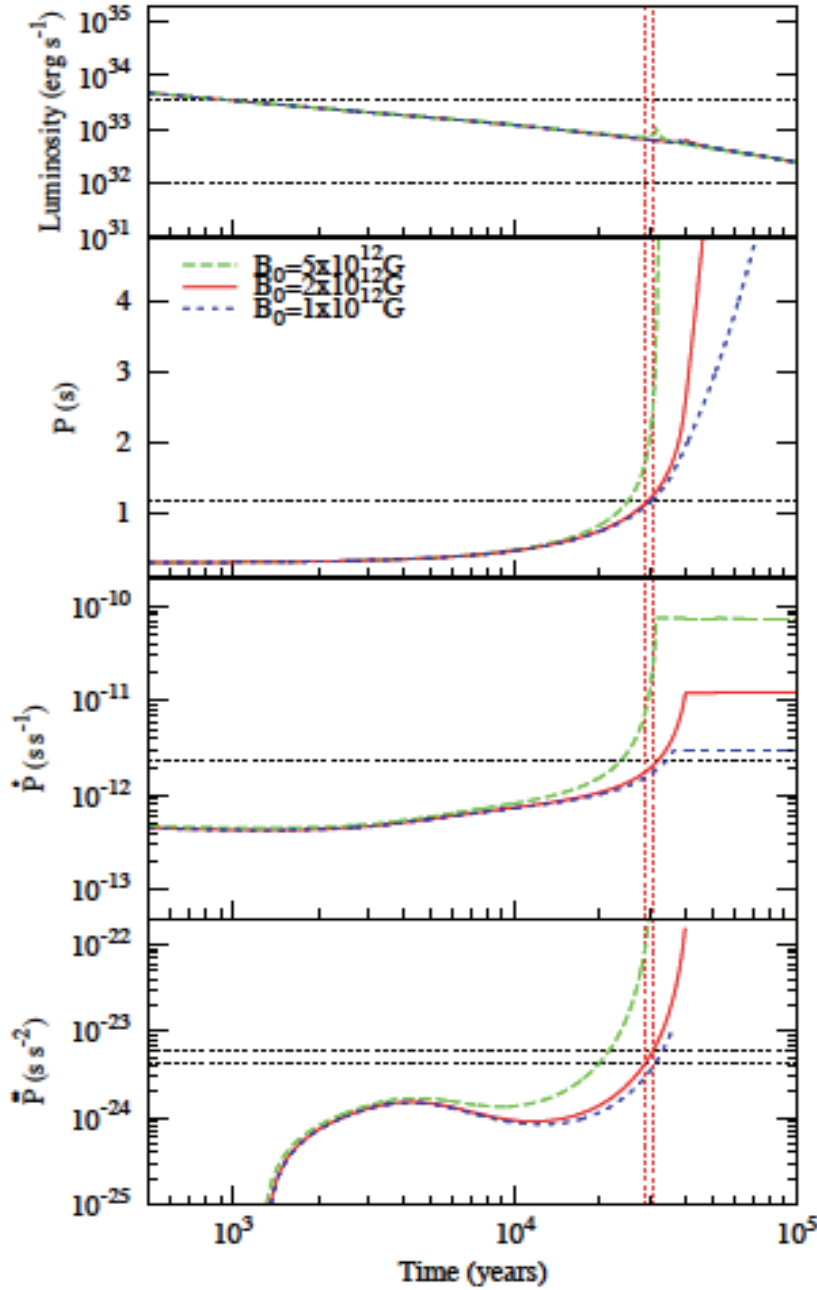
davranış, boşlukta manyetik dipol toraklarıyla dönen bir kaynaktan uzun dönemde beklenmez. Modelde, bu dönemin, bir sonraki çalışmada bir radyo pulsar olan PSR J1734-3333'ün özelliklerinin açıklanmasında önemli olduğunu göreceğiz.



**Şekil 1:** PSR J1734-3333 için model evrim eğrileri. 1. panelde X-ışını ışınma gücü, 2. panelde periyot ve 3. panelde periyot türevi evrimi görülmektedir. Kaynağın periyodu 9.1 saniyedir. 3. panelde görülen noktalı kesikli yatay çizgi kaynağın periyot türevi için elde edile üst limiti göstermektedir (Rea et al. 2010). Bu şekil, Alpar, Ertan ve Çalışkan (2011) çalışmasından alınmıştır.

#### 4. Radyo Pulsar PSR J1734-3333

Bu radyo pulsar kaynağının boşlukta manyetik dipol toraklarıyla döndüğü varsayılarak, gözlenen periyot ( $P = 1.17$  s) ve periyot türevinden ( $\dot{P} = 2.28 \times 10^{-12}$  s s<sup>-1</sup>), dipol manyetik alan büyüklüğü yıldız yüzeyinde yaklaşık  $5 \times 10^{13}$  G bulunur. Kaynağın yavaşlamasında etkin olan disk toraklarıysa bu dipol alan tahmininin doğru olmadığını belirtmiştik.



Şekil-1: PSR J1734-3333 için yayılma diski modeliyle üretilmiş farklı dipol manyetik alan değerleriyle (2. panelde gösterilmiştir) üretilmiş örnek evrim çizgileri. Son paneldeki yatay noktalı çizgiler periyodun ikinci türevini hata paylarını, dik noktalı çizgiler kesiksiz (kırmızı) eğrinin bu hata payları arasında kaldığı dönemi göstermektedir. İlk üç paneldeki yatay çizgiler gözlenen değerleri (1. panelde hata paylarını) göstermektedir (Çalışkan ve ark. 2012, hazırlanıyor)

Kısa zaman önce, bu yıldızın periyot türevinin zamanla arttığı, ( $\ddot{P} = 5.0(8) \times 10^{-24} \text{ s s}^{-2}$ ) ve kaynağın  $P - \dot{P}$  diyagramında AXP/SGR bölgesine doğru ilerlediği anlaşılmıştır (Espinoza ve ark. 2011). Bu kaynak dipol torkuyla yavaşlıyorsa, zamanla artan periyot türevi manyetik dipol alanında artmasını gerektirir. Diğer tarafta, bölüm 3’de anlatılan, SGR 0418+5729 kaynağının uzun evrimini magnetar modeliyle açıklayabilmek için, dipol alanın hızlı bir şekilde bozunumu gerekir (Turolla ve ark. 2011). Bu iki kaynağı birlikte magnetar modeli çerçevesinde tutarlı bir şekilde açıklanması zor görünmektedir.

Yayıma diski modeli bu kaynağın evrimini açıklayabilir mi? PSR J1734-3333 bir radyo pulsar olduğundan nötron yıldızının kütle aktarımı yapmıyor olmasını bekleriz. Bir diğer kısıt ise periyot türevinin zamanla artmasıdır. Modelde bu iki şartı sağlayan bir evre var mı? Şekil 1’de verilen, 3. panelde periyot türevi eğrisinin artış gösterdiği (en alttaki kısa kesikli eğri), kütle aktarımının henüz başlamadığı dönem bu şartları sağlamaktadır. Model kaynakların, radyo fazı olarak adlandırdığımız bu erken evrim döneminde, PSR J1734-3333 özelliklerine ulaşip ulaşamayacakları test edilebilir.

Manyetik alan ve disk kütlesi değerlerini tarayarak yaptığımız çalışmayla, çevresinde yayıma diskiyle evrimleşen bir nötron yıldızının PSR J1734-3333’ün gözlenen X-ışını parlaklığı, periyot, birinci ve ikinci periyot türevlerini eş zamanlı olarak yakalayabildiğini Şekil 2’de verilmiş olan örnek model eğrilerinden görmekteyiz (ayrıntılar için bkz. Çalışkan ve ark. 2012). Özellikle kırmızı (kesiksiz) eğriyle temsil edilen modelin kaynak özelliklerini çok iyi üretebildiği görülmektedir. Dikey kesikli çizgiler, bu model için, kaynağın ikinci periyot türevinin hata payları (yatay kesikli çizgiler) arasında olduğu dönemi göstermektedir.

## 5. Tartışma ve Sonuç

Yayıma diskleriyle evrimleşen genç nötron yıldızlarının, disk kütlesi, manyetik dipol alan şiddeti ve ilk periyoda bağlı olarak evrimlerinin değişik evrelerinde farklı nötron yıldızı sınıflarının özelliklerine sahip olabileceklerini gösterdik (Şekil 1 ve 2). Modelde, SGR 0418+5729 ve PSR J1734-3333’ün özelliklerini (X-ışını parlaklığı, periyot ve periyot türevleri) eş zamanlı olarak üretebildiğimiz dipol alan değerleri yıldız yüzeyinde  $1 - 5 \times 10^{12}$  G aralığındadır.

Model sonuçlarımıza göre, SGR 0418+5729’un kütle aktarım fazı sırasında yavaşlatılmış ve geçmişte bu fazdan çıkmış olduğunu göstermektedir. Kaynak kütle aktarımı yapmamakla birlikte gittikçe zayıflayan disk torqlarıyla yavaşlamaya devam etmektedir. model eğrilerinden, kaynağın yaşının yaklaşık  $10^5$  yıldan daha büyük olduğunu tahmin etmekteyiz. PSR J1734-3333 ise henüz kütle aktarım fazına girmemiş, ama bu faza doğru ilerlemektedir. Bu kaynağın, birkaç  $10^4$  yıl yaşında olduğunu ve yaklaşık  $10^4$  yıl daha radyo pulsar fazında kaldıktan sonra, kütle aktarım fazına gireceğini tahmin etmekteyiz. Detaylı evrim çizgileri Şekil 1 ve 2’de verilmiştir.

Bundan sonraki çalışmamız, bir diğer nötron yıldızı sınıfı olan sönük termal X-ışını kaynakları (XDIN) üzerine olacaktır. Periyotları AXP/SGR periyot aralığında olan bu kaynakların da yayılma diskleriyle evrimleştiğini düşünmekteyiz.

TÜBİTAK’a bu çalışmalarda sağladığı araştırma desteği (110T243) için teşekkür ederiz.

## 6. Kaynaklar

Alpar, M. A. 2001, ApJ, 554, 1245

Alpar, M. A., Ertan, Ü., Çalışkan, Ş., 2011, ApJ, 732, L4

Çalışkan, Ş., Ertan, Ü., Alpar, M.A. 2012 (hazırlanıyor)

Chatterjee, P., Hernquist, L. ve Narayan, R., 2000, ApJ, 534, 373

Duncan, R. C. ve Thompson, C., 1992, ApJ , 392, L9

Ertan, Ü., Ekşi, K. Y., Erkut, M. H. ve Alpar, M. A., 2009, ApJ, 702, 1309

Ertan, Ü. ve Erkut, M. H., 2008, ApJ, 673, 1062

Espinoza, C. M., Lyne, A. G., Kramer, M., Manchester, R. N. ve Kaspi, V. M., 2011, ApJ, 741, L13

Mereghetti, S., 2008, The Astronomy and Astrophysics Review, 15, 225

Page, D., 2009, "Neutron Stars and Pulsars", W. Becker, ed., Astrophysics and Space Science Library 357, 247

Rea, N., Esposito, P., Turolla, R., Israel, G. L., Zane, S., Stella, L., Mereghetti, S., Tiengo, A., Gotz, D., Gogus, E. Ve Kouveliotou, C., 2010, Science, 330, 944

Turolla, R., Zane, S., Pons, J. A. ve Rea, N., 2011, ApJ, 740, 105

