

İzole Nötron Yıldızları ve Pulsarlar

Aşkın Ankaş*

Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü

Abstract

Bu yazıda farklı fiziksel özellikler gösteren değişik tip izole nötron yıldızlarının halen güncel olan bazı problemleri ortaya konulmakta ve kısaca tartışılmaktadır.

*askin.ankay@boun.edu.tr

1 Giriş

Ozellikle son 10-15 yılda radyo pulsarlardan çok farklı gözlemsel özelliklere sahip olduğu görülen yeni tip izole nötron yıldızlarının keşfedilmesi nötron yıldızları üzerine teorik ve gözlemsel çalışmaların ivmelenecek artmasına yol açtı. Günümüzde sadece bu yeni tip nötron yıldızlarının fizikini anlayabilmek amacıyla özellikle yüksek frekanslarda (X-isini ve gama isini) bu cisimlerin incelenmesine uzun gözlem süreleri ayrılmaktadır.

Yaklaşık 40 yıldır gözlemsel olarak bilinen tek basına (izole) nötron yıldızı sınıfları içinde hem teorik hem de deneysel olarak en iyi bilinen radyo pulsarlarıdır (ikinci bölümde net bir manyetik dipole sahip nötron yıldızlarının dönüşlerine bağlı olarak manyetik dipol isimi ürettiklerini kısaca ele alacağız). Nötron yıldızları büyük kütleli yıldızların ($M > 7-8 M_{\odot}$) demir grubu elementlere kadar füzyon reaksiyonlarını sürdürüp ömürleri sonunda kendi üzerlerine çökerek patlamaları (supernova) sonucu oluşurlar. Super dev yıldızların saniye mertebesinde gerçekleşen çöküş sırasında net manyetik momentlerini koruduğunu ve yıldızın kendi eksenini etrafındaki dönüş hızının nötron yıldızının oluşma sürecinde değişmediğini varsayarak yaklaşık 10 km kadar bir yarı çapı olan bir nötron yıldızının doğduğu sırada 10^{12-13} G manyetik alana sahip olması gerektiği basit bir hesaplama gösterilebilir. Bileşenlerinden biri nötron yıldızı olan ikili sistemlerdeki (X-isini çiftleri) sayklotron ölçümleri ve radyo pulsarların dolaylı olarak tahmin edilen manyetik alan değerleri bu basit hesabın sonucunu desteklemektedir.

Yeni tip izole nötron yıldızları içinde en ilgi çekici olanı, manyetik alanı tipik nötron yıldızı manyetik alanından 2-3 mertebe daha yüksek olduğu öngörülen, 'magnetarlar'dır'. Aşağıda ele alacağımız dönüş kinetik enerjisi manyetik dipol isiminin ve böylece pulsarların sinkrotron (ışın yayması) isiminin kaynağıdır fikri magnetarlar için geçerli değil gibi düşünülmektedir. Daha da önemlisi bu yeni tip izole nötron yıldızlarının milisaniye mertebelerinde ve X-isini ile özellikle gama isini frekanslarında çok şiddetli patlamalar yaptığı gözlenmiştir. İkili sistemlerdeki nötron yıldızlarından gözlenenlere kıyasla çok farklı patlamalar yapan ve fiziksel özelliklerinin hem ikili sistemlerdekilere hem de radyo pulsarlara kıyasla çok değişik olduğu gözlemlenen bu çok ilginç nötron yıldızı sınıfını aşağıda daha detaylı bir biçimde inceleyeceğiz.

Son yıllarda ortaya çıkan bir başka yeni nötron yıldızı tipi kısaca radyo-sessiz nötron yıldızları diyebileceğimiz X-isini sonuk termal nötron yıldızları ve X-isini sonuk radyo-sessiz nötron yıldızlarıdır. Başlangıçta bir sınıf altında toplanan bu nötron yıldızlarının gözlemsel verileri arttıkça birbirlerinden oldukça farklı fiziksel özellikler gösterdiklerinin ortaya çıkmasıyla bu nötron yıldızlarının sınıflara ayrılması ve isimlendirilmesi konusunda karışıklıklar çıkmakta. Bunlardan bazılarının supernova kalıntısıyla fiziksel bağlantılarının bulunması literatürde bazı yazarlar tarafından yanlış olarak bunlara 'kompakt merkezi cisimler' denmesine sebep oldu. Gözlemsel veriler arttıkça radyo-sessiz nötron yıldızlarının birbirlerinden farklı sınıflar oluşturduğu ortaya çıkacaktır. Aşağıda bu farkların neler olduğunu ve bu cisimlerin olası fiziksel evrimlerini hali hazırdaki gözlemsel veriler ışığında inceleyeceğiz.

2 Manyetik dipol isimasi ve P- \dot{P} figuru

Kuresel bir cisim icin net manyetik dipol momentin buyuklugu

$$m = \frac{B_p R^3}{2} \quad (1)$$

ifadesi ile gosterilir. Burada B_p manyetik dipol alanin manyetik kutuplardaki degeridir.

Cismen kendi eksenine etrafındaki donusune bagli olarak net dipol moment vektörü zaman icinde degisiyorsa (ivmelendiriliyorsa), uzaktan bakan bir gozlemciye gore uretilen manyetik dipol isimasi

$$L_{md} = -\frac{2}{3c^3} \left(\frac{d^2 \vec{m}}{dt^2} \right)^2 \quad (2)$$

olacaktır.

Manyetik dipol moment vektorunu donme eksenine paralel ve dik olan bileşenleri cinsinden yazarsak

$$\vec{m} = \frac{B_p R^3}{2} [\hat{e}_p \cos \alpha + \hat{e}_{d1} \sin \alpha \cos(\Omega t) + \hat{e}_{d2} \sin \alpha \sin(\Omega t)]. \quad (3)$$

Burada e_p dipol momentin donme eksenine paralel olan, e_{d1} ve e_{d2} ise dik olan bileşenleridir. Dipol moment vektorunu denklem (2)'deki yerine koyarsak manyetik dipol isimasi icin olculebilir fiziksel buyuklukler cinsinden su ifadeyi elde ederiz:

$$L_{md} = -\frac{B_p^2 R^6 \Omega^4 \sin^2 \alpha}{6c^3}. \quad (4)$$

Burada R kuresel cismin yarıçapı, Ω kendi eksenine etrafındaki donusunun acisal hizi ($\Omega=2\pi/P$, P donus periyodu), α ise manyetik dipol eksenine ile donme eksenine arasındaki acidir.

Kendi eksenine etrafında donen kati bir cisim icin donus kinetik enerjisi

$$E = \frac{1}{2} I \Omega^2. \quad (5)$$

Burada I eylemsizlik momentidir. Boylece donus kinetik enerjisinin zamana gore degisimi

$$\frac{dE}{dt} = I \Omega \frac{d\Omega}{dt}. \quad (6)$$

Uretilen manyetik dipol isimasinin kaynagi donus kinetik enerjisi ise cismin donus hizi ve buna bagli olarak donus kinetik enerjisi zamanla azalmalidir ($\frac{d\Omega}{dt} < 0$ ve $\frac{dE}{dt} < 0$).

Acisal hiz Ω 'nin zamana bagli olarak nasıl degistigi, bir baska deyişle donen cisim üzerindeki net torkun zamana gore degisimi, donus kinetik enerjisi kaybı ve manyetik dipol isimasi uretiminin zaman icindeki degismesini belirler. Ω 'nin zamana bagli olarak degisimini Ω 'nin buyuklugu cinsinden en basit şekilde bir us yasasi ile ifade edebiliriz:

$$\frac{d\Omega}{dt} = -k \Omega^n. \quad (7)$$

Burada k bir oranti terimidir ve genel olarak zamanin bir fonksiyonu olabilir. Bu basit yaklasimda n ile gosterilen us terimi cismin üzerindeki net torkun zaman

icindeki degisimine bagli olarak karmasik bir bicimde degisebilir. Eger cismin uzerindeki net tork sadece manyetik dipol isima uretiminden kaynaklaniyorsa, (4) ve (6) numarali denklemlere bakarak

$$\frac{dE}{dt} \propto \Omega^4 \propto L_{md} \quad (8)$$

ve (7) numarali denklemlerle ifade edilen basit varsayimi kullanarak $n = 3$ olmasi gerektigini goruruz.

Net bir manyetik momente ve buna bagli olarak bir manyetik dipol alanina sahip olan ve kendi ekseni etrafında donen bir notron yildizina (pulsar) bakalim. Pulsarlar icin oldukca hassas bir sekilde olculebilen en temel gozlemsel buyukluk kendi ekseni etrafındaki donusunun suresidir (P , donus periyodu). (7) numarali ifadeyi $\Omega=2\pi/P$ esitligini kullanarak olculebilen buyuklukler ($P, dP/dt$) cinsinden yazarsak

$$P^{n-2} \frac{dP}{dt} = k(2\pi)^{n-1}. \quad (9)$$

Boylece periyodun zamana gore degisiminin sabit olmasi durumunda ($\frac{dP}{dt} = \text{sabit}$) $n = 2$ olur. Son denklemlerde iki tarafın zamana gore turevini aldığımızda us yasasi n ('frenleme indeksi') icin olculebilir buyuklukler cinsinden ($P, dP/dt, d^2P/dt^2$) su ifadeyi elde ederiz:

$$n = 2 - \frac{P \frac{d^2P}{dt^2}}{(\frac{dP}{dt})^2}. \quad (10)$$

Gozlemsel acidan, pulsarin zamana bagli evrimi, uzerindeki net tork ve bunun degisimi ile ilgili dogrudan bilgi edinebilecegimiz frenleme indeksi degeri n 'nin olculmesi ancak P degeri kisa ve dP/dt degeri buyuk pulsarlar icin kisitli gozlem sureleri icinde mumkun olmaktadır. Kisaca, yaklasik kirk yildir gozlemlenen pulsarlar icinde sadece genc olan bazilari icin bu olcum yapilabilmistir. Olcum yapilan pulsarların sayisi az olmasına ragmen genc pulsarların frenleme indeksi olcumleri her durumda $n=3$ (sadece manyetik dipol radyasyonuna bagli tork) degerinden bazen ufak bir farkla da olsa daha az cikmaktadır (olcum degerleri $n = 2 - 3$ araliginda degismektedir). Bu da gostermektedir ki, en azından genc pulsarlar icin manyetik dipol isima uretimine bagli olusan tork disinda pulsarin donusunu yavaslatan ek torklar oldugu gorulmektedir (ornegin 'pulsar ruzgarinin' manyetik alanla etkilesmesine bagli olarak olusan ek tork).

Pulsarların gozlem verilerine dayali zamansal evrimi genel olarak bir P 'ye karsi dP/dt figurunde incelenmektedir. Hassas bir sekilde olculebilen P ve dP/dt degerleri cinsinden temel olarak 3 fiziksel buyuklugu boyle bir figur uzerinde gosterme mumkundur. Simdi sirayla bunlari ele alalim.

Donus kinetik enerjisinin zamana gore degisimini P ve dP/dt cinsinden yazarsak

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4\pi^2 I \frac{dP}{dt}}{P^3} \quad (11)$$

Bu denklem pulsarin donusu yavasladikca (P uzadikca) dE/dt buyuklugunun hizla azalacagini gostermektedir. Benzer sekilde yuzeydeki dipol manyetik alanin donme eksenine dik olan bilezeni de P ve dP/dt cinsinden yazilabilir

$$B = \left(\frac{3c^3 I P \frac{dP}{dt}}{8\pi^2 R^6} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Pulsarin uzerindeki net torkun sadece manyetik dipol isimasina ($n = 3$) bagli oldugu durumlarda (9) numarali denklemden gorulecegi gibi manyetik alanin dik bilezeni (B) sabit kalir ($P \frac{dP}{dt} = \text{sabit}$, burada k oranti teriminin sabit oldugunu varsayiyoruz). Gene P ve dP/dt degerlerine bagli olarak pulsarlarin yasini soyle ifade edebiliriz:

$$t = \frac{P}{(n-1) \frac{dP}{dt}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]. \quad (13)$$

Burada P_0 pulsarin dogdugu andaki donus periyodudur. Pulsar uzerindeki net torku sadece manyetik dipol isimasina bagli olarak alir ($n = 3$) ve baslangic periyodunun pulsarin gozlenen periyodundan cok daha kisa oldugunu ($P_0 \ll P$) varsayarsak pulsarlar icin bir 'karakteristik yas' tanimlayabiliriz:

$$\tau = \frac{P}{2 \frac{dP}{dt}} \quad (14)$$

3 Yeni tip izole notron yildizlari

Yukarida yazdigimiz P ve dP/dt gozlemsel degerlerine bagli bu 3 fiziksel buyukluk izole pulsar fizigini anlamamizda bize yardimci olur. Simdi bunlarin ve baska bazi fiziksel parametrelerin yardimiyla yeni tip izole notron yildizlarini nispeten daha anlasiilir olan ve daha iyi bilinen radyo pulsarlarla kiyaslayarak sirasiyla inceleyelim.

Pulsarlarin donus kinetik enerjilerinin periyodun artmasina bagli olarak hizla azalmasini dikkate aldigimizda (bkz. denklem 11) tum yasli izole pulsarlarin ($t > 10^5$ yil) ve bazi genc izole pulsarlarin etrafinda 'pulsar ruzgar nebulasinin' neden gozlenmedigi sorusunu basit bir sekilde yanitlayabiliriz. Guseinov vd. (2004a)'da gosterildigi gibi pulsar ruzgar nebulasinin olusumu dE/dt degerine guclu sekilde baglidir. Bu nedenle genc olmalarina ragmen magnetarlarin ve bazi radyo-sessiz notron yildizlarinin etraflarinda pulsar ruzgar nebulasinin bulunmamasini dE/dt degerlerinin dusuk olmasi ile aciklanabilir. Ruzgar nebulasinin ozellikle dusuk frekanslarda (radyo bandinda) isima yapmayi surdurebilmesi icin pulsardan atilan ultra-relativistik parcaciklarla beslenmesi gerektiği bilinmektedir (ornegin bkz. Fang ve Ruffini 1983). Pulsarin ultra-relativistik parcaciklari hemen etrafındaki ortama atma temposu ise Guseinov vd.'nin gosterdigi gibi esas olarak donus kinetik enerji kaybina baglidir. Disari atilan ultra-relativistik parcaciklarin hizlandirilmasinda pulsarin isimasinin etkili oldugu gene Guseinov vd. tarafından gosterilmistir. Elektrik yukune sahip parcaciklarin yuzeyden koparilmasinda gerekli olan pulsarlarin lokal elektrik alanlarinin ise gene gozlem verilerine dayanarak parcaciklarin hizlandirilmasinda etkili olmadigi, dolayisiyla pulsar ruzgar nebulasinin olusumunu surdurmesine dogrudan katkida bulunmadigi Guseinov vd. tarafından ortaya konulmustur.

Radyo pulsarlar disindaki izole notron yildizi siniflarinin kefedilmesinden once izole bir pulsarin isima enerjisinin kaynaginin yalnızca donus kinetik enerjisi oldugu dusunulmekteydi. 'Dagilma olcumlerinden' (dispersion measure) uzakligi olculebilen radyo pulsarlarin sinkrotron isima guclerinin hesaplanan donus kinetik enerjisi kaybindan (ayni zamanda uretilen manyetik dipol isima miktarından da) birkac mertebe daha dusuk olmasi bu durumun her izole pulsar icin gecerli olabilecegini gostermekteydi. Magnetarlarin kesfi ile bunun her durumda gecerli olamayacagi anlasildi. Magnetarlarin us yasarina bagli X-isini

isima guclerinin donus kinetik enerji kayiplarından 1-2 mertebe yuksek olusu bu cisimlerin isima enerjisi kaynaginin donus kinetik enerjisi olamayacagini gostermistir (bu sebeple ve ilginc patlamalar gosterdikleri de goz onune alinarak bu cisimlere 'siradisi notron yildizlari' da denmektedir). Uzun periyotlara ($P > 5$ saniye, dolayisiyla dusuk acisal hizlar) sahip bu siradisi notron yildizlarinin sinkrotron isimalarinin kaynagini anlamak icin manyetik dipol isima uretimini gosteren (4) numarali denkleme bir kez daha bakalim. Manyetik dipol isima uretimi pulsarin donusu (ve elbette elektrik potansiyel farklar icinde hizlandirilerek sinkrotron isimasini uretecek olan magnetosfer icindeki elektrik yuklu parcaciklar) disinda pulsarin yuzeyindeki manyetik alanin buyuklugune de baglidir. Yuzeydeki manyetik alan 10^{14} G mertebesinde ya da daha yuksek olan bir pulsar magnetarlarin surekli X-isima guclerindeki enerji miktarini saglayabildigi gibi bu cisimlerin patlamalari sirasinda (siddetli gama isimi patlamalari da dahil olmak uzere) aciga cikan enerjileri de sahip oldugu manyetik alan enerjisinden karsilayabilir. Bu cisimlerin gozlenen siradisi patlamalarini anlayabilmek icin ilk akla gelen manyetik alan icinde sakli bulunan enerjinin acik manyetik alan cizgilerinin birlesimi sonucu patlama enerjisi seklinde ortaya cikmasi fikridir. Bu konudaki ilk calismalar Thompson ve Duncan'a aittir (bkz. Duncan ve Thompson 1992; Thompson ve Duncan 1995,1996). Burada ilginc bir noktayi belirtmek gerekir; ilk gozlemleri 1970'lerin sonunda yapilan magnetarlarin kendilerine has bir notron yildizi sinifi olusturdugu ve radyo pulsarlardan cok farkli fiziksel ozelliklere sahip olduklari Duncan ve Thompson'in 1992'de yayinlanan bu konudaki ilk teorik calismalarindan birkac yil sonra gozlemsel olarak anlasilmistir. Bu tarihten sonra magnetarlarin isima enerjilerinin manyetik alanda sakli enerjiyle aciklanmasi cesitli yazarlar tarafından farkli modellerle ortaya konulmustur. Ote yandan, gozlemsel verilerin artmasiyla ozellikle son yillarda acikca ortaya cikan bir durum soz konusu; bu siradisi cisimlerin tum gozlemsel ozelliklerini sadece cok yuksek manyetik alan fikriyle aciklamak bazi sorunlari da beraberinde getirdi (ornegin patlamalar sonrasinda bu tip notron yildizlarinin yuzey sicakliginda artis gozlenmemesi).

Magnetarlarin fizigine anlayabilmek icin ortaya atilan bir diger fikir, X-isin ciftlerinde oldugu gibi, bu tip izole notron yildizlarinin etraflarinda bir disk bulunmasi ve diskten notron yildizi uzerine madde aktarilmasi uzerinedir. Bu fikir uzerine kurulan modellerin temel bir zorlugu, X-isin ciftlerinin aksine, notron yildizinin yaninda diski besleyecek ikinci bir bilezenin bulunmamasidir. Daha da onemlisi, yukarida bahsedildigi sekilde, magnetar patlamalarinin siddeti ile tayfsal ve zamansal ozelliklerinin ikili sistemlerdeki notron yildizlarinin patlamalarina kesinlikle benzememesidir. Siddetli magnetar patlamalarinda birkac milisaniyelik surelerde 10^{44-45} erg mertebelerinde enerji aciga cikmasini madde aktarimi fikriyle inandirici bir sekilde aciklayacak bir model kurmak mumkun gozukmuyor. Buna karsin uzun P ve yuksek dP/dt degerlerine sahip magnetarlarin P-P' figurundeki yerlerini aciklamak acisindan supernova patlamasindan notron yildizi etrafında arta kalan hipotetik bir disk fikri oldukca genis araliklarda degisebilen fiziksel parametrelere sahip olmasi sebebiyle halen bazi yazarlar tarafından incelenmeye devaedim edilmektedir. Gozlemsel olarak boyle bir diskin varligi bugune kadar sadece bir notron yildizi icin kizil otesi bantta gorulmustur. Bu tek ornekte de isima miktarindan diskin kutlesinin yaklasik 10 dunya kutlesi kadar dusuk bir degere sahip oldugu gorulmustur. Buradan diyebiliriz ki supernova patlamasi sirasinda atilan maddenin cok az bir kısmi notron yildizinin etrafında kalabilir ve notron yildizinin acisal momentumuna

bagli olarak bir disk olusturabilir, ancak bu disk notron yildizinin fizigine ve evrimine onemli bir etkide bulunmayacaktır. Unutulmamalidir ki, notron yildizi ruzgari ozellikle erken asamalarda cok guzludur. Atilan ultra-relativistik par-caciklar notron yildizinin etrafında az miktarda maddeden olusan bir disk varsa bile elektriksel etkilesme ile bu diski dagitacaktır. Uzun ve yogun gozlemlere ragmen izole notron yildizlari etrafında cismin fiziksel ozelliklerini etkileyebile-cek disklere rastlanmaması bunu acikca gostermektedir.

Yukarida bahsedilen her iki modelin de kendi baslarına gozlem verilerini aciklamakta bazi noktalarda yetersiz kaldiginin gorulmesi son birkac yilda iki modelin de guclu yanlarını alip birbirleriyle birlestirerek yeni modeller kurulması yolunu acti. Boyle modellerin bu cisimleri aciklamakta ne kadar basarili olacağı gozlem verileri arttikca ve farkli izole notron yildizi siniflarının farklılıklarının sebepleri daha iyi anlasildikca ortaya cikacaktır.

Ozellikle magnetar problemini anlama konusunda ileri surulen bir baska il-ginc dusunce dusuk kutleli ($M < 1 M_{\odot}$) notron yildizi fikridir (Guseinov, Ankaş, Tagieva 2005a,b). Yalnızca 30 kadar ikili sistemlerdeki notron yildizi için kutle olcumu yapılabilmiştir (ornegin bkz. Charles ve Coe 2003). Yakın ikili sistemlerdeki yildizların kutleleri Kepler'in 3. yasası kullanılarak olcudur, tek yildizlar içinse böyle bir dogrudan kutle olcumu imkanı ne yazık ki yok. Kutlesi olcülen notron yildizi sayısı az olmasına ragmen genelde olcülen kutle degerleri Chandrasekhar limiti civarında cikmaktadır ($M \sim 1.4 M_{\odot}$). Ozellikle iki bileşeni de notron yildizi olan yakın ikili sistemler için radyo frekanslarında yapılan cok hassas kutle olcumleri sadece birkac notron yildizi için de olsa kutle degerinin Chandrasekhar limitine cok yakin oldugunu acikca gosterdi. Buna karsin gozlemsel hata payları içinde kutlesi $M < 1 M_{\odot}$ olabilecek birkac notron yildizi olcumu de vardir. Burada onemli bir noktayı belirtmekte fayda var; kutle olcumleri ancak ikili sistemler için yapılabilidiginden bir yakın ikili sistemdeki notron yildizinin yanındaki yildizdan disk ya da yildiz ruzgari yoluyla uzerine madde aktararak kutlesini arttiracağı dusunulebilir. Tagieva vd. (2000)'de gosterildigi gibi yakın ikili notron yildizi - beyaz cuce ve notron yildizi - notron yildizi sistemleri incele-ndiginde böyle bir kutle fazlaliginin $0.1-0.2 M_{\odot}$ degerlerini asmadigi anlasılmıştır. Kutle olcumlerinin oldukca sinirli sayıda olmasını göz önüne alarak diyebiliriz ki notron yildizlarının büyük bir cogunlugunun kutleleri Chandrasekhar limitine yakın olmalıdır.

Literatürde verilen izole pulsarlar için P-/P figürlerinde her zaman pulsarların kutlesi ve yarı caplarının aynı oldugu kabul edilir (bunun için bkz. Lyne ve Graham-Smith 2006). Notron yildizlari için verilen tüm hal denklemlerinde (mezon yogunlaşmasını hesaba katan ya da katmayan tüm 'yumusak' ve 'sert' notron yildizi modellerinde) yarı cap pek degismemektedir (en fazla 1.5 kat kadar). Buna karsin kutle teorik olarak bir mertebelik bir aralıkta degisebilir. Baska bir deyişle $0.5 M_{\odot} < M < 1 M_{\odot}$ ve $2 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$ aralıklarında kutlelere sahip notron yildizlarının var olması prensipte mümkündür.

Simdi, tipik kutle ve yarı cap degerleri olarak cok yuksek baslangic manyetik alanları ongormek zorunda kalan magnetar modellerini ve supernovadan arta kalan hipotetik bir disk fikrini temel alan izole notron yildizi için kutle aktarımı modellerini bir kenara bırakarak dusuk kutleli ($M < 1 M_{\odot}$) bir notron yildizi pulsar olarak kendini P- \dot{P} figüründe nasıl gosterir bir bakalım. Tüm notron yildizlarının manyetik dipol isması uretecegi varsayımından yola cikarak diyebiliriz ki her notron yildizinin uzerinde donusunu yavaslatacak yonde bir manyetik dipol isma uretimi torqu olacaktır. Elbette pulsar uzerinde baska

torklar olabilir, burada vurgulanmak istenen manyetosferde hizlandırılacak parçacıklar olduğu surece ve elbette elektrik potansiyel farklar çok düşük olmadığı surece (pulsar manyetik alanının değerine de bağlı olarak pulsar çok yavaş dönmüyor ise) tüm pulsarlar üzerinde böyle bir tork etkili olacaktır.

Manyetik dipol isimasi üretiminin kütle ve yarı çapın tipik değerlerden farklı olması durumunda pulsarın P- \dot{P} figüründeki konumunu nasıl etkileyeceğini görmek için (4) ve (11) numaralı denklemleri birbirlerine eşitlersek ($n = 3$ durumu) şu ilişkiyi elde ederiz:

$$\dot{P} = \frac{B^2 R^4}{MP}. \quad (15)$$

Buradan açıkça görülüyor ki tipik değerlere sahip bir pulsara kıyasla daha düşük kütle ve buna uygun olarak biraz daha az bir yarı çapa sahip bir nötron yıldızının P- \dot{P} figüründeki konumları birbirinden çok farklı olabilir. Örnek olarak, aynı B ve P değerlerine sahip 1.5 ve 0.7 M_\odot kütleli iki nötron yıldızını birbiriyle kıyasladığımızda, yarı çapların oranını yaklaşık 1.2 olarak alarak, düşük kütleli olanın \dot{P} değerinin diğerinden yaklaşık 4 kat daha fazla olacağını yukarıdaki ilişkiden görebiliriz. Daha da düşük kütleli (örneğin 0.5 M_\odot) bir nötron yıldızı için bu kıyaslamayı yaptığımızda \dot{P} oranının bir merteye olacağı açıktır.

Düşük kütleli nötron yıldızı fikri magnetar problemini anlamakta çok yüksek manyetik alanlara gerek olmadığını da ortaya koymakta; 10^{14} G mertebesindeki manyetik alanlar bu cisimlerin hem P-PP figüründeki konumlarını hem de siradisi patlamalarını açıklamaya yeterlidir. Son yıllarda gözlemsel olarak keşfedilen yüksek B değerli (10^{14} G'a kadar) radyo pulsarlarını da göz önüne alırsak nötron yıldızı için düşük kütle fikrinin tüm izole pulsarlar için sürekli (boslüksüz) bir manyetik alan değerleri dağılımı verdiğini görebiliriz. Bunun yanında, düşük kütle ve büyük yarı çap fikri, özellikle magnetarların yüksek B değerlerine sahip olduklarını göz önüne alarak manyetik alan ile dönme eksenini arasındaki açının 90 derece civarında olduğunu varsayarsak, bu siradisi cisimlerin yaşlarına kıyasla neden çok yüksek yüzey sıcaklıklarına (X-isin tayflarından ölçülen kara cisim sıcaklıkları) sahip olduklarını anlamakta yardımcı olabilir (yukarıda belirtildiği üzere patlamalar sırasında ve sonrasında yüzey sıcaklıklarında bir artış gözlenmemesi bu cisimlerin patlamalardan bağımsız olarak yüksek sıcaklıklara sahip olduklarını göstermekte ve diğer nötron yıldızı sınıflarından çok farklı hal denklemlerine sahip olabilecekleri yönünde ipucu vermektedir). Ne yazık ki, hangi tip nötron yıldızının hangi hal denklemiyle ifade edilebileceği bilinmediğinden nötron yıldızı sığma modelleri (nötrino sığması) bu konuda henüz yardımcı olmamaktadır. (Magnetar ve supernovadan artakalan disk modelleri ile ilgili problemler ile düşük kütleli nötron yıldızı fikri üzerine detaylı inceleme ve tartışma için: bkz. Yazgan vd. 2005; Tagieva, Yazgan, Ankaç 2003).

Magnetarların P- \dot{P} figüründeki konumlarına nasıl ulaştıkları, hangi evrimsel çizgiyi takip ettikleri sorusuna, magnetar modellerindeki çok yüksek manyetik alan sorununu içermeyen, inandırıcı bir yanıt bu siradisi cisimlerle çok genç bir güçlü X-isin (radyo-sessiz) izole pulsarı arasında önemli fiziksel benzerlikler olduğunun anlaşılmasıyla geldi. Ankaç vd. (2005)'te ilk kez gösterildiği şekilde yasi magnetarlardan ortalama 10 kat daha düşük olan X-isin pulsarı J1846-0258, magnetarlarla aynı fiziksel özellikleri göstermektedir. O tarihe kadar J1846-0258'in henüz patlama yaptığı gözlenmediği için yüksek B değerine (5×10^{13} G), güçlü X-isini isimasına, radyo pulsarlara kıyasla çok yüksek L_X/\dot{E} değerine sahip olması (X-isini isima gücü) ve radyo-sessiz olma özelliği göstermesine rağmen

(tüm bu özellikler ve J1846-0258'in sahip olduğu başka bazı fiziksel özellikler de magnetarlarda bulunmaktadır) bu ilginç nötron yıldızı gözlemcilerin ilgisini çeken bir kaynak değildi. Çok kısa bir süre önce J1846-0258'in Ankaş vd.'nin öğordüğü gibi magnetarlara benzer sıradışı X-isini patlamaları yaptığı gözlemlendi (Gavriil vd. 2008; Kumar ve Safi-Harb 2008). Ne yazık ki, güçlü X-isini kaynakları olmalarına rağmen çok seyrek görülen bir nötron yıldızı sınıfına dahil oldukları için gözlenen magnetar ve 1846 benzeri nötron yıldızlarının sayısının ciddi bir şekilde artması ancak çok uzun bir süre sonra mümkün olabilir. Gene de bu tek örnek çok yüksek manyetik alanlara (10^{15} G ve üzeri) gerek olmadığı fikrini bir kez daha desteklemektedir.

Diğer bir nötron yıldızı sınıfı kısaca termal nötron yıldızlar diyebileceğimiz, sadece kara cisim isimasi (sinkrotron isimasi bu cisimlerden gözükmemektedir) yapıları ve çok düşük X-isini güçlerine sahip olmalarından dolayı güneşten yalnızca 300-400 pc uzaklıklara kadar gözlenebilen izole nötron yıldızlarını içerir. Düşük frekanslarda (radyo bandında) yoğun bir şekilde incelenmelerine rağmen radyo isimasi yapıları gözlenmemiştir. P- \dot{P} figüründeki konumları itibarıyla bu cisimlerin magnetarların sonraki aşamaları olabileceği fikri cesitli yazarlarca ortaya atılmasına rağmen bu fikrin doğruluğunu ciddi şekilde zedeleyen asılması zor bir problem var. Sinkrotron isimasi yapılarından dolayı gözlenen termal nötron yıldızı sayısı az olmasına rağmen gözlenenler güneşe oldukça yakın olduğundan bu tip nötron yıldızının supernova patlamaları sonucu oluşma oranı neredeyse radyo pulsarlarla kıyaslanabilir gibi gözüküyor (supernova patlamaları sonucu değişik tip nötron yıldızlarının oluşum oranı üzerine bkz. Guseinov, Ankaş, Tagieva 2005c). Buna karşın gözlenen magnetar sayısı gözlenen termal nötron yıldızı sayısı ile kıyaslanabilir olmasına rağmen magnetarların güneşten olan uzaklıkları oldukça fazla (en yakında olanının uzaklığına koyulan alt limit 3 kpc). Termal nötron yıldızları sadece kara cisim isimasi yapılarından yaşları nötrino süğuma süreleri ile kıyaslanabilir olmalı (hal denklemine bağlı olarak birkaç 10^5 - 10^6 yıl). Termal nötron yıldızlarından daha genç olması gereken magnetarların yaşları ise P- \dot{P} figüründe görülen karakteristik yaşlardan daha büyük olabilir; bugüne kadar gözlenen 10 kadar magnetar içinde yalnızca ikisinin supernova kalıntısıyla ilgili vardır, bu da bu cisimlerin genelde supernova kalıntılarının gözlemsel omurlerinden (birkaç 10^4 - 10^5 yıl) daha yaşlı olabileceklerini gösteriyor. Yas, uzaklık ve isimasi akisi değerleri göz önüne alındığında termal nötron yıldızlarının oluşma oranının magnetarlara kıyasla 5-10 kat fazla olabileceği görülmüyor (Guseinov, Ankaş, Tagieva 2005c). Manyetik alanda azalma sonucu P- \dot{P} figüründe magnetarların termal nötron yıldızlarının bulunduğu bölgeye gelmeleri prensipte normal kabul edilebilir gözükse de oluşum oranlarındaki büyük fark termal nötron yıldızlarının çoğunluğunun başka bir evrim çizgisi izlemesi gerektiğini göstermektedir. Magnetarların çoğunluğundan daha yaşlı olabilecekleri fikri isimasi akisi değerlerindeki azalma (dedektorun gelen isimayı kaydedebilme alt limitinin aşagısında olacak kadar) ve artmaların gözlenmesiyle daha güçlü bir hale gelmiştir.

Ele alacağımız son izole nötron yıldızı sınıfı giriş kısmında bahsedilen 'radyosessiz nötron yıldızlarını içermektedir. Aslında, giriş kısmında kısaca değinildiği gibi, bu başlık altında toplanılan cisimlerin bir çoğu henüz gözlemsel olarak radyo pulsarlara ve diğer izole nötron yıldızı sınıflarına kıyasla iyi incelenmediği için bu cisimlerin aynı başlık altında incelenmesi supheli gözükmektedir. Literatürde konuyla ilgili makalelerde bu cisimlerin bazılarının supernova kalıntısıyla ilgili olması sebebiyle 'kompakt merkezi cisimler' olarak adlandırılması

da bu karisikligin bir nevi ifadesidir.

Gozlem verileri nispeten az olmasina karsin hali hazirdaki verilerin isigi altinda yapilan dikkatli bir inceleme magnetar ve termal notron yildizi siniflari disinda kalan radyo-sessiz izole notron yildizlarinin bazilarinin ortak fiziksel ozellikler gosterdigine dair guclu ipuclari ortaya koymaktadır (Ankay 2007b, 2007c, 2008). Bu cisimler icinde en ilgi cekici olani ve en yogun sekilde inceleneni X-isin tayfinda sogrulma cizgileri gozlenen 1E 1207.4-5209 radyo-sessiz izole X-isini pulsaridir. Notron yildizi iceren yakin ikili sistemlerdeki notron yildizlarinin tayflarinda sogrulma cizgileri gorulmesi gozlemlerden gayet iyi bilinmektedir (notron yildizlarinin manyetik alanlarinin dogrudan olcumu de yukarida bahsedildigi gibi yakin ikili sistemlerdeki notron yildizlarinin X-isin tayflarinda sayklotron cizgilerinin kaydedilmesiyle yapilmaktadır). Yanindaki yildizdan uzerine plazma aktarmasi sonucu notron yildizi etrafında bir disk olusturabilir ve Boylece tayfinda sogrulma cizgilerinin gorulmesi gayet dogaldir. 1E 1207.4-5209 orneginde ise ilk kez izole bir notron yildizinin tayfinda cok net bir bicimde cizgiler goruldu. Notron yildizlari cok yogun cisimler olduklari icin (ortalama olarak nukleer yogunluklarda) atmosferleri varsa bile oldukca ince olmalidir. Bu nedenle, 1207 ornegi disinda, izole pulsarların tayflarında acik bir sekilde cizgiye rastlanmamistir.

Bu genis sogrulma cizgilerinin tayftaki yerleri de ilginctir: 0.7 keV, 1.4keV ve 2.1 keV (muhtemelen 2.8 keV'ta zayıf bir cizgi daha). Bu 3 (muhtemelen 4) genis sogrulma cizgilerinin konumlari itibariyle harmonik bir seri olusturdugu gorulmektedir, Boylece bu cizgilerin elektron ya da proton sayklotron cizgileri olmasi ihtimali akla gelmektedir. Eger bunlar sayklotron cizgileriye ilk kez bir izole notron yildizi icin yuzeydeki manyetik alanin degerinin dogrudan olculmesi mumkun olacaktir. Bu durumda 0.7 keV'taki cizgi temel frekansa ait ve digerleri de bunun harmonikleri ise, bunun bir elektron sayklotron cizgisi olmasi durumunda yuzeydeki manyetik alan yaklasik 10^{11} G, proton sayklotron cizgisi olmasi durumunda ise yaklasik 10^{14} G olmalidir. Bu X-isin pulsarinin $B=2.5 \times 10^{12}$ G degerine sahip oldugunu goz onune alarak diyebiliriz ki 0.7 keV'taki sogrulma cizgisi bir proton sayklotron cizgisidir. Bu genis sogrulma cizgilerinin harmonik bir seri olusturdugu fikrinin onundeki en buyuk engel temel frekans (0.7 keV) ile onun birinci harmoniginin (1.4 keV) yaklasik ayni sogrulma miktarina sahip olmalaridir.

Bu cizgileri atomik cizgilerin bir birlesimi olarak aciklama yoluna da gidildi. Cizgilerin oldukca genis olmalari bunlari cesitli atomik cizgilerin bir birlesimi seklinde aciklamayi olasi bir yol olarak gostermekte. Boyle bir yolu deneyen Sanwal vd. (2002) bu durumda da yuzeydeki manyetik alanin yaklasik 10^{14} G kadar olmasi gerektiği sonucuna vardi.

Bu ilginç notron yildizi ile ilgili gozlem verilerine dayanan bir baska problem, fiziksel olarak bagli oldugu supernova kalintisinin genislemesine dayanarak hesaplanan yasina kiyasla pulsarin karakteristik yasinin 2 mertebe dusuk olmasi. Ayni supernova patlamasi sonucu olusan bu iki cismin yaslari da ayni olmalidir; genislemekte olan kalintinin yasini pulsarin gercek yasi olarak alirsak frenleme indeksi (n) oldukca buyuk olmalidir (bkz. denklem (13)). Bu yas problemini bazi yazarlar pulsarin dogdugu zamanki periyodunun simdiki periyoduna yakin olmasi gerektiği varsayimiyla aciklamaya calistilar ki en basit gorunen yol da budur. Ne var ki, simdiki periyodu $P=424$ ms olan bu pulsarin baslangic periyodu en azından bir mertebe daha dusuk olmalidir; supernova sonucu notron yildizi olusmasi uzerine kurulan tum modellerde pulsarin dogus periyodununun 30

ms'den daha kısa olması gerektiği hesaplanmaktadır (Ardeljan vd. 2005; Moiseenko vd. 2006; Heger vd. 2004). Birkaç yüz milisaniyelik bir periyotla döğan pulsar fikri mümkün gözükmemekte.

Guseinov, Anka, Tagieva (2004b) makalesinde radyo pulsarların kinematik yaşlarının karakteristik yaşlarıyla kıyaslanması sonucu B değerlerinde azalma olması gerektiği açık bir şekilde gösterilmiştir. B değeri yüzeydeki dipol alanın kendisi değil döğme eksenine dik bileşeni olduğundan B 'nin azalması manyetik alanın bizzat kendisinin azalmasına ya da manyetik alan eksenıyla döğme eksenini arasındaki açının azalmasına bağlı olabilir. Düşük kütleli X-ışın çiftlerinde madde aktarımına bağlı olarak manyetik alandaki azalma eskiden beri bilinmektedir (örneğin bkz. Bisnovatyi-Kogan ve Komberg 1976, bu makale aynı zamanda yaşlı milisaniye pulsarlarını anlatan ve fizikini açıklayan ilk makaledir). İzole nötron yıldızları içinse manyetik alanının azalmasından ziyade iki eksen arasındaki açının azalması daha olası gözüküyor; radyo pulsarlar için yapılan dolaylı ölçümler göstermektedir ki çoğu durumda bu açı ufak değerlere sahiptir (Tauris ve Manchester 1998). Bu gözlemsel sonuca karşın radyo pulsarlarda manyetik alanın azalması üzerine teorik çalışmalar da vardır (örneğin bkz. Geppert ve Rheinhardt 2002). Radyo pulsarlarda evrimin ileri aşamalarında B değerinin azalması Guseinov, Anka, Tagieva (2004b)'te basit bir eksponansiyel düşme ile modellenmiş ve karakteristik düşme süresi yaklaşık 3 milyon yıl olarak hesaplanmıştır.

Radyo-sessiz X-ışın pulsarı 1E 1207.4-5209'un manyetik alan değerleri ($B_{\text{sayklotron}}$ ve B) ile yaş değerleri ($t_{\text{gerçek}}$ ve τ) arasındaki 2 mertebelik farklar benzer bir eksponansiyel düşme modeli ile açıklanabilir (Anka, Anka, Ercan 2007b). Burada dikkat edilmesi gereken husus 1207 için hesaplanan karakteristik düşme süresinin sadece birkaç bin yıl olmasıdır. B değerindeki boylesine hızlı bir düşüş elbette 1207 ve ona benzer nötron yıldızların X-ışın pulsarı olarak omurlerinin oldukça kısa sürmesi gerektiği sonucunu getirir ($t \sim$ birkaç 10^4 yıl). İki eksen arasındaki açının çok hızlı bir şekilde azalması 1207 ve ona benzer bazı nötron yıldızlarının, genç olmalarına rağmen, radyo pulsar olarak gözükmemelerini kısmen de olsa açıklamaktadır. Burada elbette radyo pulsar gözlenmesinde önemli engeller ('seçim etkileri') olan pulsarın belli bir kati açıyla sinkrotron isiması yapması ve çoğu izole pulsarın doğuştan çok düşük radyo isıma güçlerine sahip olmaları da dikkate alınmalıdır (nötron yıldızlarının radyo pulsar olarak gözlenmesini etkileyen 'seçim etkileri' ve arkaalan radyo isinimi ile ilgili bkz. Anka, Guseinov, Tagieva 2004; Guseinov vd. 2003a,b).

Radyo-sessiz X-ışın pulsarı 1E 1207.4-5209 ile benzer gözlemsel özellikler gösteren 3 izole nötron yıldızı (ve 2 aday) bu cisimlerin diğer sınıflardan farklı kendine has fiziksel özellikler gösteren yeni bir nötron yıldızı sınıfı oluşturduklarına dair önemli bir ipucu vermektedir. 1207'nin bazıları oldukça sıradışı olan gözlemsel özelliklerini şöyle sıralayabiliriz: 1) yaşı 10^4 yıl mertebesinde olan kabuk-tipi bir süpernova kalıntısına bağlı olması, b) oldukça genç bir pulsar olmasına karşın döğüş kinetik enerjisi kaybının 10^{35} erg/s değerinden düşük olması c) düşük kinetik enerji kaybı değeri sebebiyle genç olmasına karşın çevresinde radyo frekanslarında ya da X-ışın bandında pulsar rüzgarı nebulası gözlenmemesi, d) genç olmasına rağmen sinkrotron (us-yasası) isiması gözlenmemesi, e) X-ışın tayfinin bir değil iki karacisim modeli ile açıklanabilmesi, f) gerçek yaşının (süpernova kalıntısının yaşı) karakteristik yaştan oldukça az olması, g) sayklotron çizgisinden hesaplanan yüzey manyetik alanının P ve \dot{P} değerlerinden hesaplanan B değerine kıyasla oldukça yüksek olması, h) manyetik alan değerleri

arasındaki büyük fark nedeniyle donme eksenini ve dipol manyetik alan eksenini arasındaki acinin sifira yakin bir degerde bulunmasi, i) \dot{P} degerinde 'gurultu' ya da genc radyo pulsarlarda gorulen periyodun cok kısa sureler icinde kisalmasi (glitch) ile aciklanamayacak siradisi salinimler.

1E 1207.4-5209 benzeri notron yildizlarindan olusan yeni ve oldukca farkli bir notron yildizi tipi Ankay, Ankay, Ercan (2007b), Ankay(2007c) ve Ankay vd. (2008)'de detayli olarak tartisilmaktadir. 1E 1207.4-5209 oldukca iyi incelenmis, gozlemsel verileri bol bir notron yildizi olmasina karsin, bu ilginc X-isin kaynagiyla benzer ozellikler gosteren diger radyo-sonuk notron yildizlari ne yazik ki henuz yeteri kadar incelenmemistir. Bunun baslica sebebi boyle bir yeni notron yildizi sinifi fikrinin yeni ortaya konulmus olmasidir. Umuyoruz ki yakin bir gelecekte 1207 benzeri notron yildizlarinin gozlem verileri arttikca ve veriler daha hassas hale geldikce bu fikrin onemi daha acik bir sekilde ortaya cikacaktır.

Son olarak, hizli bir B dususune bagli kısa bir gozlemsel omre sahip olmasi gereken bu yeni tip notron yildizlarinin olusma orani, 1207 orneginde goruldugu sekilde bin yil mertebesinde bir karakteristik dusus suresine ragmen, sayilarinin nispeten dusuk olmasi ve gunesten ortalama mesafelerinin pek de az olmamasi sebebiyle radyo pulsarlara ve termal notron yildizlarina kiyasla daha az olmalidir (tipki 'siradisi' olma ozelligini en az 1207 benzeri notron yildizlari kadar hak eden magnetarlarin durumunda oldugu gibi).

4 Referanslar

Ardeljan, N.V., Bisnovatyi-Kogan, G.S., Moiseenko, S.G. (2005). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 359, 333.

Ankay, A.M., Hudaverdi, M., Ercan, E.N., Ankay, A. (2008). Hazirlik asamasinda.

Ankay, A., Tagieva, S.O., Guseinov, O.H. (2007a). 'Connections Between Supernova Remnants, Neutron Stars and Supernovae', Neutron Stars, Supernovae and Supernova Remnants isimli kitaptan, edi. Oktay H. Guseinov, Efe Yazgan ve Askin Ankay, Nova Science Publishers, New York (ISBN 978-1-60021-548-3).

Ankay, A., Ankay, A.M., Ercan, E.N. (2007b). International Journal of Modern Physics D 16, 619.

Ankay, A.M. (2007c). 'XMM-Newton Data Analysis of Isolated Radio-Quiet Neutron Stars 1E 1207.4-5209, RX J0002+6246, RX J0822-4300, CXOU J185238.6+004020', Yuksek Lisans Tezi, Bogazici Universitesi Fizik Bolumu.

Ankay, A., Sahin, S., Karanfil, G., Yazgan, E. (2005). International Journal of Modern Physics D 14, 1075.

Ankay, A., Guseinov, O.H., Tagieva, S.O. (2004). Astronomical and Astrophysical Transactions 23, 503.

ATNF Pulsar Catalogue (2008). (<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>).

- Bisnovatyi-Kogan, G.S. ve Komberg, B.V. (1976). *Soviet Astronomy Letters* 2, 130.
- Charles ve Coe (2006). 'Optical, ultraviolet and infrared observations of X-ray binaries', *Compact Stellar X-ray Sources* isimli kitaptan, edi. Walter Lewin ve Michiel van der Klis, Cambridge Astrophysics Series, Cambridge University Press, s. 215 (astro-ph/0308020).
- Duncan, R.C. ve Thompson, C. (1992). *Astrophysical Journal* 392, L9.
- Fang, L.Z. ve Ruffini, R. (1983). 'Basic Concepts in Relativistic Astrophysics', World Scientific Publishing, Singapore (ISBN 9971-950-66-9).
- Gavriil, F.P., Gonzalez, M.E., Gothelf, E.V., Kaspi, V.M., Livingstone, M.A., Woods, P.M. (2008). *Science* 319, 1802.
- Guseinov, O.H., Yazgan, E., Ozkan, S., Sezer, A., Tagieva, S (2003a). *Astronomical and Astrophysical Transactions* 22, 301.
- Guseinov, O.H., Yazgan, E., Tagieva, S. O., Ozkan, S. (2003b). *Revista Mexicana Atronomia e Astrofisica* 39, 267.
- Guseinov, O.H., Ankay, A., Tagieva, S.O., Taskin, M.O. (2004a). *International Journal of Modern Physics D* 13, 197.
- Guseinov, O.H., Ankay, A., Tagieva, S.O. (2004b). *International Journal of Modern Physics D* 13, 1805.
- Guseinov, O.H., Ankay, A., Tagieva, S.O. (2005a). *Astrophysics and Space Science* 298, 553.
- Guseinov, O.H., Ankay, A., Tagieva, S.O. (2005b). *International Journal of Modern Physics D* 14, 1465.
- Guseinov, O.H., Ankay, A., Tagieva, S.O. (2005c). *International Journal of Modern Physics D* 14, 643.
- Heger, A., Woosley, S.E., Langer, N., Spruit, H.C. (2004). 'Stellar Rotation', proceedings of IAU Symposium No.215, edi. Andre Maeder ve Philippe Eenens, s.591 (2004).
- Kumar, H.S. ve Safi-Harb, S. (2008). *Astrophysical Journal* 678, L43.
- Lipunov, V.M. (1992). 'Astrophysics of Neutron Stars', Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (ISBN 3-540-53568-3).
- Lyne, A.G. ve Graham-Smith, F. (2006). 'Pulsar astronomy', 3. basim, Cambridge Astrophysics Series, Cambridge University Press (ISBN 0521839548).
- Manchester, R. N., Hobbs, G. B., Teoh, A., Hobbs, M. (2005). *Astronomi-*

cal Journal 129, 1993.

Moiseenko, S.G., Bisnovatyi-Kogan, G.S., Ardeljan, N.V. (2006). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 370, 501.

Sanwal, D., Pavlov, G.G., Zavlin, V.E., Teter, M.A. (2002). Astrophysical Journal 574, L61.

Sedrakian, D.M. ve Blaschke, D. (2002). Astrophysics 45, 166 (2002).

Sedrakian, D.M. and Shahabasyan, K.M. (2007). 'The Magnetic Field of Pulsars' Neutron Stars, Supernovae and Supernova Remnants isimli kitapta, edi. Oktay H. Guseinov, Efe Yazgan ve Askin Ankey, Nova Science Publishers, New York.

Shapiro, S.L. ve Teukolsky, S.A. (1983). 'Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects', Wiley-Interscience, New York.

Tagieva, S.O., Ankey, A., Guseinov, O.H. (2000). Astronomical and Astrophysical Transactions 19, 123.

Tagieva, S.O., Yazgan, E., Ankey, A. (2003). International Journal of Modern Physics D 12, 825.

Tagieva, S.O., Ankey, A., Guseinov, O.H. (2007). 'Neutron Stars', Neutron Stars, Supernovae and Supernova Remnants isimli kitaptan, edi. Oktay H. Guseinov, Efe Yazgan ve Askin Ankey, Nova Science Publishers, New York (ISBN 978-1-60021-548-3).

Tauris, T.M. ve Manchester, R.N. (1998). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 298, 625.

Thompson, C. ve Duncan, R.C. (1995). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 275, 255.

Thompson, C. ve Duncan, R.C. (1996). Astrophysical Journal 273, 322.

Yazgan, E., Guseinov, O.H., Ankey, A., Taskin, M.O., Tagieva, S.O. (2005). 'Analysis of Fall-Back Disk and Magnetar Models of Anomalous X-Ray Pulsars and Soft Gamma Repeaters', Progress in Neutron Star Research isimli kitaptan, edi. Andrew P. Wass., Nova Science Publishers, New York, s.119 (ISBN 1-59454-351-8).

Figur Basligi

Değişik tip izole nötron yıldızları için P- \dot{P} figürü. 'Carpi' işaretiyle magnetarlar, 'yıldız' sembolüyle X-isini sonuk termal nötron yıldızları ve noktalarla da radyo pulsarlar gösterilmektedir. 'Kare' ile gösterilen sıradışı X-isin pulsarı 1E 1207.4-5209'un olası evrim çizgileri de $B=2 \times 10^{13}$ G ve $B=4 \times 10^{13}$ G başlangıç değerleri ile 2.5 kyil ve 5 kyil karakteristik düşüş zamanları için figürde gösterilmiştir.