

VELA BENZERİ PULSARLAR İÇİN BİR SIÇRAMA İSTATİSTİĞİ

Erbil GÜGERCİNOĞLU¹, M.Türker ÖZKAN²

¹ İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Beyazıt, 34452, İstanbul, Türkiye

(eposta: egugercinoglu@gmail.com)

² İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Beyazıt, 34452, İstanbul, Türkiye

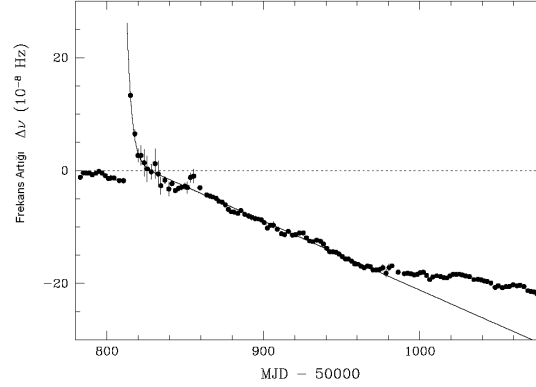
(eposta: ozkant@istanbul.edu.tr)

Özet: Pulsarların dönmeleri fazlasıyla düzenlidir. Buna rağmen pulsarlar iki tür zamanlama düzensizliği göstermektedirler: zamanlama gürültüsü ve sıçramalar. Zamanlama gürültüsü dönme parametrelerinde modellenememiş periyodik benzeri davranış olarak görülür. Sıçramalar ise, pulsarın dönme hızının sonrasında sönüm gösterecek şekilde ani olarak artması olayıdır. Kesirsel büyüklüğü ($\Delta\Omega/\Omega$) 10^{-9} - 10^{-6} aralığında değişen sıçramalar nötron yıldızlarının iç yapısını araştırmada önemli bir araçtır. Daha çok genç pulsarlarda olmak üzere 129 pulsarda 400 tane sıçrama görülmüştür. Kaydedilmiş sıçramaların sayısının artması bu konuda istatistik çalışmaların yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmamızda en çok sıçrama yapması beklenen Vela benzeri, yani 10^4 - 10^5 yıl yaş aralığındaki pulsarlar için yaptıkları sıçramalar arasındaki birtakım ortak özellikler belirlenmiş, sıçrama modelleri ile uyumluluğu tartışılmış ve literatürdeki diğer istatistik çalışmalarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır.

1. Giriş

Pulsarlar çok hızlı dönen nötron yıldızlarıdır. Tüm pulsarların periyotları elektromanyetik dipol radyasyonu sebebiyle zamanla yavaşça ve düzenli olarak artmaktadır. Spin yavaşlamaları genellikle düzenli olmasına rağmen pulsarlarda iki tür dönme düzensizliği vardır. Bunlardan zamanlama gürültüsü, dönme parametrelerinde (dönme fazı, frekans ve frekans türevi) aylardan yıllara kadar değişen zaman ölçeklerinde rasgele adım olarak görülür (Cordes ve Helfand 1980). Diğer zamanlama düzensizliği ise sıçramalardır. Sıçrama, pulsarın dönme oranında meydana gelen beklenmedik ani artıştır. Farklı şiddette zamanlama gürültüsü pulsarların çoğunda gözlenmiştir. Hâlbuki sıçramalar pulsarların yalnızca küçük bir kesrinde görülmüştür. Bu iki tip dönme düzensizliğinin ortak bir özelliği, her ikisinin de daha çok genç pulsarlarda gözlenmiş olmasıdır. Sıçramalar genellikle açısal hızda kesirsel olarak $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-9}$ - 10^{-6} 'lık bir değişim olarak meydana gelir. Bu değer küçük görünse de etkisi büyüktür. Örneğin; Dünya'nın dönme oranında böyle değişim olsa, bu Richter ölçeğinde 17 şiddetinde bir depreme denk gelirdi ve Dünya'nın eksenini 50 adım (~ 15 m) kayardı (Pines 1999). Frekans artışını ($\Delta\nu/\nu$), yani sıçramayı spin yavaşlama oranında ($d\nu/dt$) ve dolayısıyla dönme hızı türevinde genellikle $\Delta\dot{\Omega}/\dot{\Omega} \sim 10^{-3}$ - 10^{-2} 'lik kesirsel değişim takip eder. Ancak, gözlemler arasındaki uzun boşluklar sebebiyle spin yavaşlama oranındaki değişimler çok az ölçülebilmektedir, hatta bazı durumlarda hata oranı %20'leri aşabilmektedir (McKenna ve Lyne 1990). Bir sıçramadan sonra spin yavaşlama oranı tekrar denge değerine ulaşır. Sıçramanın eski haline gelmesi süreci aylar ve hatta yıllar alabilir. Sıçrama sonrası sönüm bir pulsardan diğerine ve ayrıca aynı pulsarda meydana gelen farklı sıçramalarda değişkenlik gösterebilir. Örneğin Vela pulsarında $d\nu/dt$ deki artışın yaklaşık yarısı birkaç gün içinde

bozunurken, bunu geri kalanın yavaş bir sönümü izler (Cordes ve diğ. 1988). Yengeç pulsarındaki sıçramalar ise frekans türevinde kalıcı ve biriken bir artışla karakterize edilir (Wong ve diğ. 2001). Bu, Yengeç pulsarının sıçramalar olmasa sahip olacağı değere göre daha yavaş bir oranda döndüğü anlamına gelir. Yengeç pulsarında meydana gelen bir sıçrama Şekil-1’de gösterilmiştir.



Şekil-1: Yengeç pulsarında meydana gelmiş bir sıçrama. Wong ve diğ. (2001)’den alınmıştır.

2. Sıçramaların Genel ve İstatistikî Özellikleri

İlk gözlemlendiği 1969 yılından bu yana pulsar sıçramaları büyük ilgi uyandırmış ve astronomlar dışında dünyada laboratuvarlarda erişilemeyecek şartlarda fiziksel ortamın sağlaması, özellikle de yoğun madde kuramlarının oluşturulması ve sınanması bakımından fizikçilerin de dikkatini çekmiştir. Örneğin; pulsar sıçramaları nötron yıldızlarında süperakışkan iç yapının varlığı için gözlemsel delil oluşturmaktadır (Baym ve diğ. 1969). Pulsar sıçramaları yoğun uğraşlara rağmen hâlâ tamamen açığa kavuşmamış güncel bir araştırma konusudur. Özellikle İngiltere’deki Jodrell Bank Gözlemevi, Güney Afrika’daki HartRAO (Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory), Avustralya’daki ATNF (Australia Telescope National Facility) gibi merkezlerde tahsis edilmiş radyo teleskopları ile birçok pulsar sıçraması gözlenmiştir ve meydana geldikten hemen sonra yakalayabilmek arzusuyla gözlemlerin yapılmasına devam edilmektedir. Gözlem tekniklerinin ve galaktik pulsar taramalarının sayısının artmasıyla, hem keşfedilmiş pulsar sayısında hem de kaydedilen pulsar sıçramalarında büyük artış olmuştur. Artan verilerin sonucu olarak pulsar sıçramaları hakkında istatistik çalışmaların yapılması olanağı doğmuştur. İstatistiğe geçmeden önce sıçramaların gözlenen özelliklere değinelim.

Sıçramaların genel ve istatistikî özellikleri şöyledir:

- 129 pulsarda toplam 400 sıçrama gözlenmiştir. Bunlar arasında 6 tane manyetar vardır ve toplamda 18 sıçraması gözlenmiştir.
- Kaydedilen en büyük sıçrama PSR J1718-3718 pulsarında olup kesirsel büyüklüğü $\Delta\Omega/\Omega = (33.25 \pm 0.01) \times 10^{-6}$ dır (Hobbs ve Manchester 2011).
- Kaydedilen en küçük sıçrama ise bir çift sistemde bileşen yıldızdan kütle aktaran milisaniye pulsarı PSR B1821-24’e ait olup kesirsel büyüklüğü $\Delta\Omega/\Omega = 0.0095 \times 10^{-9}$ dır (Cognard ve Backer 2004).
- Spin yavaşlama oranındaki en büyük artış PSR J2301+5852’de gözlenmiş olup kesirsel büyüklüğü $\Delta\dot{\Omega}/\dot{\Omega} = 1.11$ dir (Kaspi ve Gavriil 2003).

- Spin yavaşlama oranındaki en büyük azalış PSR B1825-0935’de gözlenmiş olup kesirsel büyüklüğü $\Delta\dot{\Omega}/\dot{\Omega} = -2.7 \times 10^{-3}$ dir (Shabanova 2007).
- En fazla sıçrama yapan pulsar PSR B1737–30 olup, bu pulsarın toplamda 33 sıçraması kaydedilmiştir.
- Sıçrama yapan en genç pulsar PSR J1119-6127 olup ~800 yıl yaşındadır.
- Sıçrama yapan en yaşlı pulsar PSR B1821-24 olup ~30000000 yıl yaşındadır.
- Sıçramalar için spin hızlanma zamanı en hassas şekilde Vela için kısıtlanmış olup ~40 saniyeden kısadır (Dodson ve diğ. 2002).
- Manyetarlar dışındaki pulsarlarda PSR J1119-6127 istisnası dışında sıçrama ile bağlantılı pulsar emisyon özelliklerinde değişim gözlenmemiştir (Weltevrede ve diğ. 2011).
- Pulsar sıçramaları en çok karakteristik yaşları $\tau_c \sim 10$ kyıl olan pulsarlarda görülürken (Wang ve diğ. 2000), artan yaşla azalır ve $\tau_c > 20$ Myıl olan pulsarlarda kaybolur. Aynı zamanda sıçrama aktivitesi $\tau_c < 1$ kyıl olan pulsarlarda (Yengeç pulsarı buna istisnai bir durum oluşturur) daha küçüktür (Shemar ve Lyne 1996).
- $|\dot{\nu}_{-15}| < 0.5 \text{ Hz s}^{-1}$ olan pulsarlarda sıçrama gözlenmemiştir (Espinoza ve diğ. 2011).
- Büyük frekans sıçramalarına ($\Delta\nu/\nu$) büyük frekans türevi sıçramaları ($\Delta\dot{\nu}/\dot{\nu}$) eşlik eder. Buna istisna büyük sıçrama yapmasına karşın $|\dot{\nu}|$ ’da değişiklik olmayan PSR B1758-23’dir (Yuan ve diğ. 2010).
- Bir pulsarda meydana gelen sıçramalar arasındaki zaman genelde sabit değildir. Dolayısıyla da bir sonraki sıçrama önceden tahmin edilemez. Buna iki istisna vardır. Vela pulsarı (PSR B0833-45) ve PSR J0537-6910, sıçramalarını yaklaşık olarak sırasıyla 1000 gün (Cordes ve diğ. 1988) ve 120 günlük (Middleditch ve diğ. 2006) aralıklarla yapmaktadırlar.
- $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-6}$ büyüklüğünde en fazla sıçrama yapan pulsar Vela (17 sıçramasının 14’ü)’dir. Bundan dolayı bu büyüklükteki sıçramalar Vela büyüklüğünde sıçramalar olarak adlandırılır.
- 45 pulsarda toplamda 85 tane Vela büyüklüğünde sıçrama meydana gelmiştir.
- Sıçramadan ötürü spin hızlanma oranı, $|\Delta\dot{\nu}| \sim 10^{-14} - 10^{-11} \text{ Hz s}^{-1}$ aralığında değişen pulsarlar için $|\dot{\nu}|$ ile orantılıdır (Lyne ve diğ. 2000).
- Karakteristik yaşı τ_c olan bir pulsar yıl başına en fazla $(6 \pm 2) \times \tau_c^{-0.48(4)}$ kez sıçrama yapar (Espinoza ve diğ. 2011).

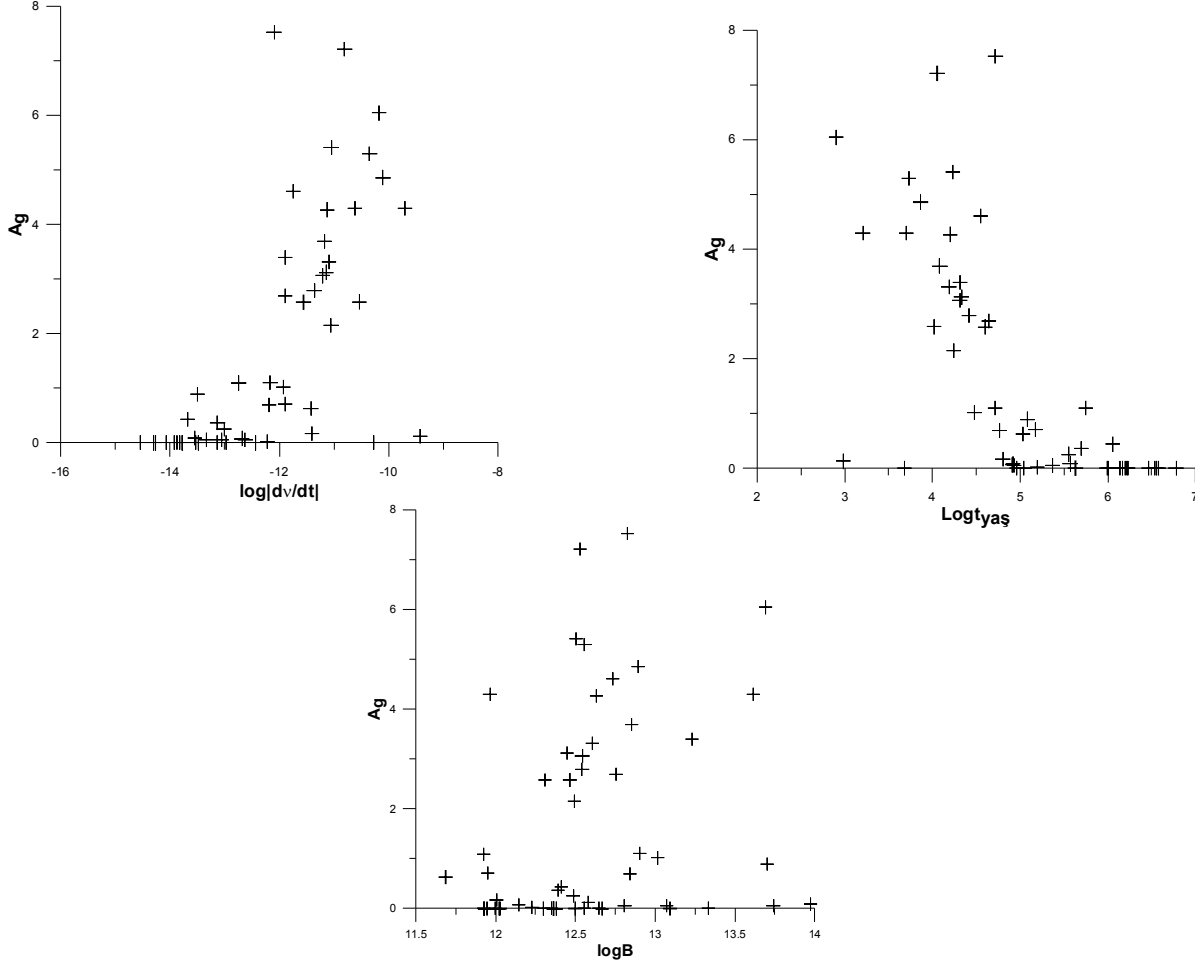
3. Sıçrama İstatistiği

McKenna ve Lyne (1990) PSR B1737–30 pulsarında meydana gelen sıçramaları inceledikleri çalışmalarında ellerindeki az sayıdaki veriye rağmen bir istatistik geliştirmişlerdir. Buna göre, bir pulsarın dönme periyodunda yıl başına sıçrama sebebiyle meydana gelen kesirsel değişikliği niteleyen ve sıçrama aktivitesi olarak adlandırılan A_g parametresini geliştirmişlerdir:

$$A_g = \frac{N}{t_{\text{göz}}} \frac{\Delta\Omega}{\Omega} \quad (1)$$

Burada $t_{\text{göz}}$ pulsarın toplam gözlendiği zaman, N toplam sıçrama sayısı ve $\Delta\Omega/\Omega$ ’da sıçramanın büyüklüğüdür. Bu parametre pulsarın yaptığı sıçramaların büyüklüğü ile sıklığını ifade etmede kullanışlıdır. McKenna ve Lyne (1990) yukarıda sıçramaların genel özelliklerinde de belirtildiği gibi spin yavaşlama oranı daha büyük olan pulsarlarda sıçrama

aktivitesinin daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Sıçrama aktivitesine dayanan bu istatistiği daha sonra Shemar ve Lyne (1996) ve Lyne ve diğ. (2000) artan sıçrama verisiyle birlikte tekrar ele almış ve yine benzer sonuçlar elde etmişlerdir. En az 2 tane sıçrama yapmış pulsarların (54 tane) sıçrama aktivitesinin spin yavaşlama oranı ($\dot{\nu}$), karakteristik yaş ($t_{\text{yaş}}$) ve manyetik alan (B) ile değişimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil-2: Sıçrama aktivitesinin spin yavaşlama oranı ($\dot{\nu}$), karakteristik yaş ($t_{\text{yaş}}$) ve manyetik alan (B) ile değişimi.

Urama ve Okeke (1999) o zamana değin meydana gelmiş pulsar sıçramalarını (30 pulsarda 71 adet) ele alarak Vela benzeri genç (10^4 - 10^5 yıl yaşlarındaki) ve büyük sıçrama yapan pulsarlarda A_g sıçrama aktivitesi ile spin yavaşlama oranı $\dot{\nu}$ arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bunun sonucunda 10^4 yıldan yaşlı tekrarlamış sıçrama yapmış pulsarlar (ki o zaman sayısı 10 idi) için sıçrama aktivitesi ile spin yavaşlama oranının logaritması arasında oldukça iyi (korelasyon katsayısı=0.89), $A_g \approx 41.4 + 3.22 \log |\dot{\nu}|$ şeklinde lineer bir ilişki bulmuşlardır. Bu çalışmamızda Urama ve Okeke’nin (1999) çalışması temel alınarak böyle bir ilişkinin geçen 12 yıl içinde hâlâ korunup korunmadığına bakılmıştır. Tüm pulsar sıçramaları göz önüne alındığında 10^4 - 10^5 yıl yaş aralığında olan 35 pulsarda sıçrama gözlenmiştir. Bu pulsarlar ve özellikleri Tablo-1’de verilmiştir.

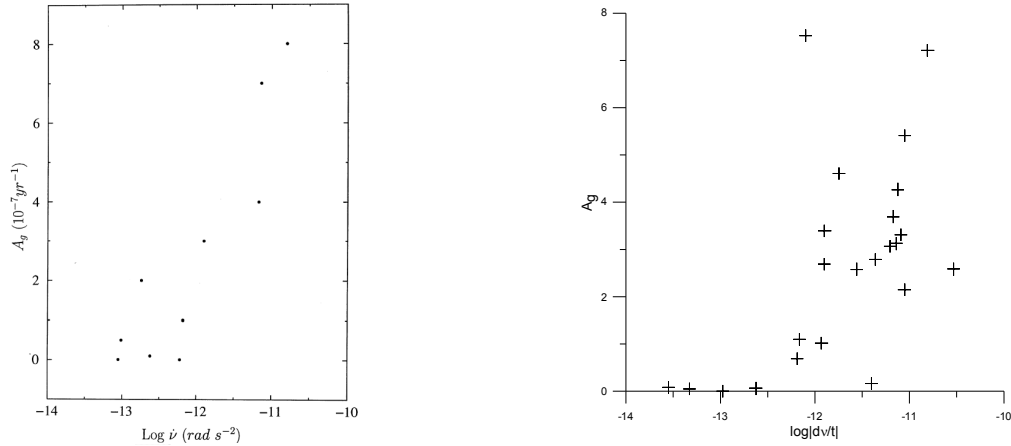
Tablo-1: 10^4 - 10^5 yıl yaş aralığındaki sıçrama yapan pulsarların listesi. Tabloda T pulsarın toplam sıçrama sayısını, N de Vela büyüklüğündeki ($\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-6}$) sıçramaların sayısını göstermektedir.

Pulsar	Yaş (10^3 yıl)	N	T	$\log \dot{\nu} $	A_g
J0007+7303	13.9	0	1	-11.4421	1,554969
J0631+1036	43.6	2	15	-11.898	2,689889
J0729-1448	35.2	1	5	-11.7474	4,610816
B0833-45	11.3	14	17	-10.8074	7,20899
B1046-58	20.4	2	4	-11.2025	3,062391
J1105-6107	63.3	0	3	-11,4025	0,17116
B1338-62	12.1	4	14	-11,1692	3,695179
J1410-6132	24.8	0	1	-10,8972	0,58476
J1413-6205	62.9	1	1	-11,6386	6,117488
J1420-6048	13.0	0	1	-10,749	0,690072
J1617-5055	80.8	0	1	-10,5482	0,418945
B1706-44	17.4	2	2	-11,0524	2,153904
J1718-3718	34	1	1	-12,8527	25,22235
B1727-33	26.0	2	2	-11,3604	2,793932
B1727-47	80.3	0	3	-12,6242	0,061266
B1737-30	20.6	3	33	-11,8974	3,392436
J1737-3137	51.4	1	3	-12,165	1,104204
B1757-24	15.4	4	5	-11,0874	3,311054
B1758-23	58.4	0	10	-12,1852	0,691811
B1800-21	15.8	4	5	-11,1242	4,270143
J1806-2125	65	1	1	-12,2964	10,88431
J1809-1917	51.3	1	1	-11,4284	1,132763
J1813-1246	43.4	1	1	-11,1192	3,260961
J1814-1744	85	0	7	-13,3278	0,056786
B1823-13	21.4	3	5	-11,1375	3,124662
J1838-0453	52.2	1	2	-12,0983	7,525972
J1841-0524	30.2	1	3	-11,9295	1,017862
J1847-0130	83.3	0	2	-13,5476	0,088404
B1853+01	20.3	1	1	-11,5356	4,919182
J1909+0912	98.7	0	1	-12,1425	0,003646
J1913+0446	91.8	0	2	-12,9715	0,007011
B1930+22	40	2	3	-11,5593	2,581444
J2021+3651	17	2	3	-11,0511	5,408734
J2229+6114	10.5	2	5	-10,5321	2,583947
B2334+61	41	1	1	-12,107	7,008509

Tabloya göz atıldığında bazı özellikler kendisini belli etmektedir:

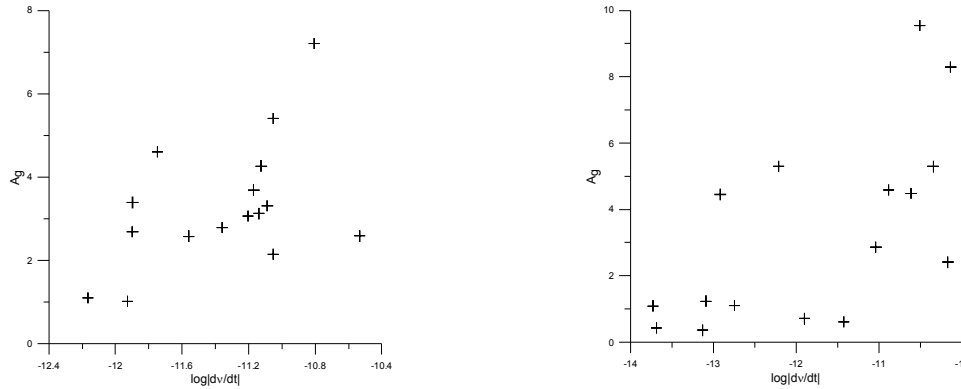
- Genç pulsarlarda 57 tanesi Vela büyüklüğünde olmak üzere toplam 165 sıçrama gözlenmiştir.
- Bu pulsarların 11 tanesinde Vela büyüklüğünde sıçrama görülmemiştir.
- Bu pulsarlardan 12 tanesi sadece bir kez sıçrama yapmıştır ve bunların 7'si Vela büyüklüğündedir.
- Yalnızca Vela büyüklüğündeki sıçramalara bakılırsa yaş aralığı 11–26 kyıl olan genç pulsarlarda birden fazla sıçrama gözlenmiştir.
- Vela büyüklüğünde sıçrama yapmış genç pulsarların spin yavaşlama oranlarına bakıldığında $\log |\dot{\nu}| \sim -11 \text{ Hzs}^{-1}$ civarında toplanmış oldukları gözükmektedir.
- Vela büyüklüğünde sıçramalara bakıldığında ~ 50 kyıl dan sonra bu büyüklükte sıçrama yapma oranı minimum olur.

Tablo-1’deki pulsarların spin yavaşlama oranlarının sıçrama aktivitelere karşı çizdirilmesinden Şekil-3’teki grafikler elde edilir.



Şekil-3: Vela benzeri pulsarlar için sıçrama aktiviteleri ile spin yavaşlama oranlarının logaritması arasındaki ilişki. Solda Urama ve Okeke (1999)’nin çalışması, Sağda Tablo-1’ den elde edilen sonuçlar verimiştir.

Grafik incelendiğinde Vela yaş aralığındaki pulsarlarda sıçrama aktivitesi ile spin yavaşlama oranının logaritması arasında Urama ve Okeke’nin (1999) bulduğu lineer ilişki bozulmuştur (korelasyon katsayısı 0.32) ve artık $A_g \approx 21.5 + 1.6 \log |\dot{v}|$ ifadesiyle verilmektedir. Karşılaştırma yapmak üzere Vela büyüklüğünde ve Vela yaş aralığında olmayıp, bu büyüklükte sıçrama yapmış pulsarlar için grafikler Şekil-4’de verilmiştir.



Şekil-4: Vela büyüklüğünde (solda) ve Vela yaş aralığında olmayıp bu büyüklükte sıçrama yapmış pulsarlar (sağda) için sıçrama aktivitesinin spin yavaşlama oranının logaritmasına göre değişimi.

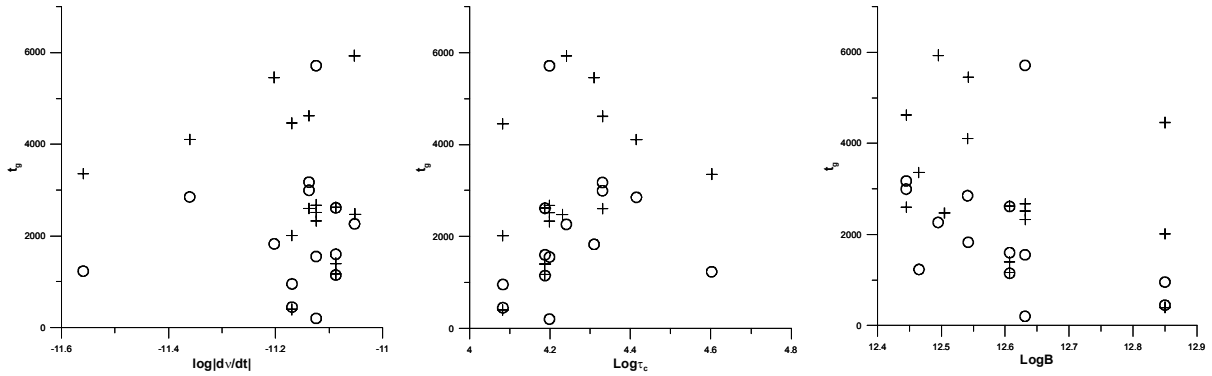
4. İstatistiğin Sıçrama Modelleriyle Karşılaştırılması

İstatistik çalışmamıza dahil ettiğimiz pulsarları sıçrama modellerinin öngörleriyle karşılaştırmak üzere en başarılı iki model seçilmiştir. Bunlar; vorteks tırmanması (Alpar ve diğ. 1984,1993) ve akı tüpü (Ruderman ve diğ. 1998) modelleridir. Vorteks tırmanması modeli nötron yıldızının kabuğunun süperakışkan yapısına dayanır. Bu modele göre süperakışkanın dönmesini ve açısal momentumun aktarılmasını sağlayan yapılar olan vorteks çizgileri nötron yıldızının kabuğundaki atom çekirdeklerine takılırlar. Böylece kabuk ile süperakışkan arasında bir (açısal) hız farkı oluşur. Bu hız farkı kritik bir değere ulaştığında vorteks çizgileri ($\sim 10^{14}$ tane) takıldıkları yerden kurtulurlar ve açısal momentumlarını kabuğa aktararak sıçrama meydana getirirler. Sıçrama sonrası sönüm ise vorteks tırmanmasının yeni bir denge durumuna gelmesi sürecidir. Bu modele göre sıçramalar arası zaman gözlenen büyüklükler ve model parametreleri cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$t_g = \frac{\delta\Omega_s}{|\dot{\Omega}|} = 2 \times 10^{-3} \left(\frac{I_B}{I_A} + \frac{1}{2} \right) \tau_c \left[\left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega} \right)_{-6} \left(\frac{\Delta\dot{\Omega}}{\dot{\Omega}} \right)_{-3} \right] \quad (2)$$

Burada $\delta\Omega_s$ süperakışkanın açısal hızındaki değişim, I yıldızın toplam eylemsizlik momentidir. I_A kabuk süperakışkanının içerisinden vorteks akımının geçtiği, böylece de hem $\Delta\Omega$ 'ya hem de $\Delta\dot{\Omega}$ 'ye katkı veren kısımlarının eylemsizlik momentidir. I_B ise kabuk süperakışkanı içerisinde sadece sıçrama anında vorteks çizgilerinin geçtiği, bu yüzden de sadece $\Delta\Omega$ 'ya katkı sağlayan bölgelerin eylemsizlik momentidir.

Tablo-1'deki pulsarlardan Vela büyüklüğünde tekrarlamış sıçrama yapmış olanlar için sıçramalar arası zamanın gözlenen değeri ile vorteks tırmanması modelinin verdiği sonuçlar Şekil-5'te verilmiştir.

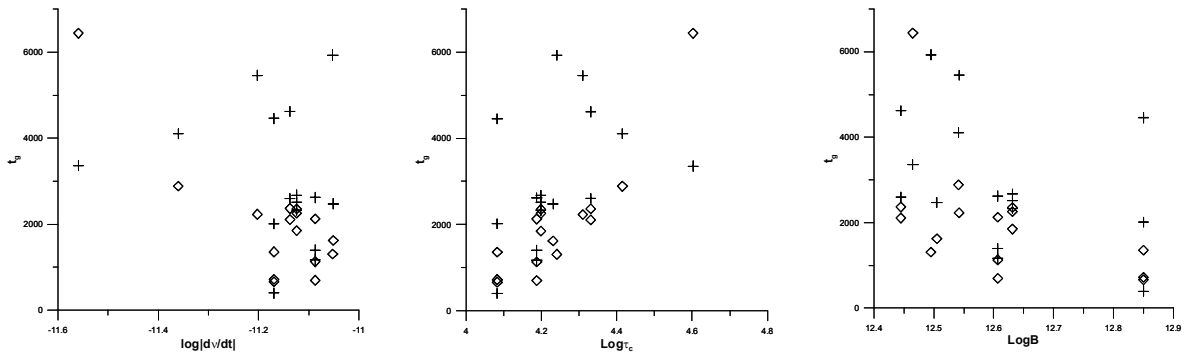


Şekil-5: Tekrarlamış Vela büyüklüğünde sıçrama yapmış Vela benzeri pulsarların sıçramaları arası zamanın gözlenen (+ sembolü) değerleri ile vorteks tırmanması modeli (o sembolü) tahmininin karşılaştırılması.

Akı tüpü modeli ise nötron yıldızının özek (kor) bölgesinin süperiletken-süperakışkan yapısına dayanır. Bir Tip II süperiletkeninde manyetik alan akı tüpleri içerisine hapsolmüştür. Vorteks çizgilerine takılan veya vortekslerle birlikte sürüklenen akı tüpleri kabuğun tabanına doğru açılırlar ve kabuğu gererek kırılmasına sebep olurlar. Bunun sonucunda da sıçrama meydana gelir. Bu modele göre sıçramalar arası zaman şu ifade ile verilir:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega} \times \frac{1}{t_g} \sim \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} \frac{I_n}{I} \sim \frac{10^{-5} \text{ yıl}^{-1}}{(\text{yaş}/10^3 \text{ yıl})} \quad (3)$$

Tablo-1'deki pulsarlardan Vela büyüklüğünde tekrarlamış sıçrama yapmış olanlar için sıçramalar arası zamanın gözlenen değeri ile akı tüpü modelinin verdiği sonuçlar Şekil-6'da verilmiştir.



Şekil-5: Vela büyüklüğünde tekrarlamış sıçrama yapmış Vela benzeri pulsarların sıçramaları arası zamanın gözlenen (+ sembolü) değerleri ile akı tüpü modeli (◇ sembolü) tahmininin karşılaştırılması.

5. Tartışma ve Sonuç

İstatistik çalışmamızda elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Çalışmamızda sıçrama aktivitesi (A_g) ile spin yavaşlama oranı ($\dot{\nu}$) ve karakteristik yaş ($t_{\text{yaş}}$) arasındaki ilişkiler için önceki çalışmalarla (Lyne ve diğ. 2000, Wang ve diğ. 2000, Yuan ve diğ. 2010, Espinoza ve diğ. 2011) paralel sonuçlar bulunmuştur.
- Sıçrama aktivitesi ile manyetik alan (B) arasında herhangi bir ilişki görülmemiştir.
- Urama ve Okeke'nin (1999) Vela yaş aralığında (10^4 - 10^5 yıl) tekrarlamış sıçrama yapmış pulsarlar ile ilgili istatistik çalışmasının geçen 12 yıl içerisinde, pulsar sayısının artması ile birlikte, geçerliliğini koruyup korumadığına bakılmıştır. Şekil-3'deki grafikten de görüleceği üzere sıçrama aktivitesi ile spin yavaşlama oranının logaritması arasındaki lineer ilişki bozulmuştur.
- Sıçrama istatistiği ile ilgili iki farklı duruma daha bakılmıştır. İlkinde Vela büyüklüğünde sıçrama yapmış ve Vela yaş aralığındaki 16 pulsar için sıçrama aktivitesi ile spin yavaşlama oranının logaritması arasındaki ilişki incelenmiştir. İkinci durumda ise yine Vela büyüklüğünde sıçrama yapmış fakat Vela yaş aralığında olmayan 16 pulsar için aynı ilişkiye bakılmıştır. Bu iki duruma karşılık gelen $A_g \approx 22.36 + 1.67 \log |\dot{\nu}|$, $A_g \approx 24.12 + 1.73 \log |\dot{\nu}|$ ifadeleri elde edilmiştir. Bu iki durum için sırasıyla 0.23 ve 0.39 olan korelasyon katsayılarından da anlaşılacağı üzere söz konusu ilişkilerin çok iyi olmadığı görülmektedir.
- Vela benzeri ve tekrarlamış Vela büyüklüğünde sıçrama yapmış pulsarlar için Alpar ve diğ. (1984,1993)'in vorteks tırmanması modeli ve Ruderman ve diğ. (1998)'in akı tüpü modeli sıçramalar arası zaman için iyi sonuçlar vermektedir.

6. Kaynaklar

- Alpar, M.A., Anderson, P.W., Pines, D. ve Shaham, J., 1984, ApJ, 276, 325
- Alpar, M.A., Chau, H.F., Cheng, K.S., ve Pines, D., 1993, ApJ, 409, 345
- Baym, G., Pethick, C.J. ve Pines, D., 1969, Nature, 224, 872
- Cognard, I. ve Backer, D.C., 2004, ApJ, 612, L25
- Cordes, J.M., Downs, G.S., ve Krause-Polstorff, J., 1988, ApJ, 330, 847
- Cordes, J.M. ve Helfand D.J., 1980, ApJ, 239, 640
- Dodson, R.G., McCulloch, P.M. ve Lewis, D.R., 2002, ApJ, 564, L85
- Espinoza, C.M., Lyne, A.G., Stappers, B.W. ve Kramer, M., 2011, MNRAS, 414, 1679
- Hobbs, G. ve Manchester, R.N., 2011, arXiv:astro-ph/1106.5192v1
- Kaspi, V.M. ve Gavriil, F.P., 2003, ApJ, 596, L71
- Lyne, A.G., Shemar, S.L. ve Smith, F.G., 2000, MNRAS, 315, 534
- McKenna, J. ve Lyne, A.G., 1990, Nature, 343, 349
- Middleditch, J., Marshall, F.E., Wang, Q.D., Gotthelf, E.V. ve Zhang, W., 2006, ApJ, 652, 1531
- Pines, D., 1999, ptgr.conf., 1999
- Ruderman, M.A., Zhu, T. ve Cken, K., 1998, ApJ, 492, 267
- Shabanova, T.V., Ap&SS, 308, 591
- Shemar, S.L. ve Lyne, A.G., 1996, MNRAS, 282, 677
- Urama, J.O. ve Okeke, P.N., 1999, MNRAS, 310,313
- Wang, N., Manchester, R.N., Pace, R.T., Bailes, M., Kaspi, V.M., Stappers, B.W. ve Lyne, A.G., MNRAS, 317, 843
- Weltevrede, P., Johnston, S. ve Espinoza, C.M., 2011, MNRAS, 411, 1917
- Wong, T., Backer, D.C. ve Lyne, A.G., 2001, ApJ, 548, 447
- Yuan, J.P., Wang, N., Manchester, R.N. ve Liu, Z.Y., 2010, MNRAS, 404, 289