

REZONANT SİKLOTRON SAÇILMANIN MAGNETARLARIN YÜZEY IŞINIMLARI ÜZERİNE ETKİLERİ

Tolga GÜVER^{1,2}, Feryal ÖZEL², Maxim LYUTIKOV³

Özet

Bu çalışmada yüksek manyetik alanlı nötron yıldızlarında bulunması öngörülen yüklü parçacık yoğunluğu Goldreich-Julian yoğunluğundan fazla bir manyetosferin, böyle bir nötron yıldızının yüzey ışınımı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Nötron Yıldızları, X-ışınları:Spektrum

Abstract

In this paper, effects of a magnetosphere in which the charged particle number density exceeds Goldreich-Julian number density, on the surface emission of a highly magnetized neutron star is investigated.

Keywords : Neutron Stars, X-rays: Spectrum

1. Giriş

Anormal X-ışın pulsarları (AXP) ve Yumuşak Gama-ışın yineleyicileri (SGR), çok güçlü manyetik alanları tarafından güçlendirildiği düşünülen iki birbirine benzer nötron yıldız sınıfıdır [1]. Başlarda atımlı yumuşak X-ışın akıları [2] ve gama-ışın emisyonları [3] ile tespit edilen kaynaklar bugün için pekçok dalgaboyunda gözlenmiş ve pekçok ilginç özellikler gösterdikleri tespit edilmiştir [4]. Ancak sürekli, termal benzeri X-ışın spektrumları ($kT \sim 0.3 - 0.6$ keV) ve dönmeden kaynaklanan ışınım güçlerini çok aşan X-ışın ışınım güçleri ($L_X \sim 10^{34-36}$ ergs/s) bu kaynakların belirleyici özelliklerinden olmuşlardır.

AXP ve SGR'lerin gözlenen X-ışın spektrumlarının empirik modellemesi genel olarak bir karacisim modeline ek olarak foton indisi 2.0 – 4.5 arasında değişen bir güç kanunu modeli ya da ikinci bir karacisim modeli gerektirmektedir. Bu şekilde modelleme spektrumu tanımlayıcı açıdan yeterli gibi görünse de bazıları nötron yıldızlarının atmosferlerinin ya da manyetosferlerin etkilerini hesaba katan daha detaylı ve fiziksel altyapısı olan modeller yakın zamanda geliştirilmeye başlanmıştır.

Farklı fiziksel özelliklerin dikkate alındığı, yüksek manyetik alanlı nötron yıldızları atmosferleri için farklı yazarlarca pek çok radyatif denge modeli geliştirilmiştir. Saçılmanın tüm açı- ve polarizasyon bağımlılıklarını hesaba katan modeller [5] ve [6] tarafından geliştirilmiştir. Modların rezonant bağlaşımlarını da hesaba katan vakum polarizasyon rezonansının etkileri tam olarak [5] ve [6] tarafından ve bir olasılıklı mod dönüşümü yaklaşımı ile de kısmi olarak [7] tarafından hesaplanmıştır. İyon siklotron çizgileri ise [8], [9], [10] tarafından hesaba katılmıştır. Son olarak manyetik alanın iki boyutlu yapısı [6] tarafından

¹ İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü 34119 Beyazıt İstanbul

² Arizona Üniversitesi Fizik Bölümü 1118 E. 4th St., Tucson, AZ, 85721

³ British Columbia Üniversitesi, Fizik ve Astronomi Bölümü, 6224 Agricultural Road, Vancouver, BC, V6T 1Z1, Kanada

ve atmosferdeki maddenin kısmi iyonize olması hali [7] tarafından hesaplanmıştır. Modellerin büyük kısmı, özellikle sert X-ışınları bölgesinde (2-10 keV) Planck eğrisinden ciddi sapmalar fazlalık bir akının varlığını göstermektedir. Süreklilikteki bu farklılığa ek olarak iyon siklotron frekanslarındaki soğurma çizgileri de vakum polarizasyonunun etkileri ile akıları biraz azalsa da, görülmektedir.

Nötron yıldızı yüzeyinden çıkan ışınım onun manyetosferi tarafından da bazı etkilere maruz bırakılabilir. [11] nötron yıldızlarının manyetosferlerinde $n=7 \times 10^{-2} B_Z/P \text{ cm}^{-3}$ (B_Z Manyetik alan, P ise spin periyodu) ile verilen bir minimum plazma yoğunluğunun olması gerektiğini göstermiştir. Eğer manyetosferdeki plazma yoğunluğu bu minimum plazma yoğunluğuna eşit ise [12] bu yoğunluğun yüzey ışınımı üzerine etkisinin X-ışın bölgesinde etkili olmadığını göstermiştir. Ancak magnetarların durumunda, [13] bu kaynakların manyetosferlerinde akan yüksek miktardaki elektrik akımlarının, yüklü parçacık yoğunluğunu, rezonant siklotron saçılmanın etkili bir mekanizma olabileceği seviyelere çıkabileceğini göstermiştir. Bu etki AXP ve SGR X-ışın spektrumlarında gözlenen ve bir güç kanunu modeli ile açıklanan yüksek enerjili kuyruğun fiziksel sebebi olarak öne sürülmüştür. Bu fikirden yola çıkarak [14] kara cisim kaynağından çıkan ışınımın manyetosferde rezonant siklotron saçılması ve Comptonizasyona uğratılması sonucu etkileri hesaplamıştır. [14] ilk spektrumun yüksek enerjilere doğru kaydığını ve bunun da yüksek enerjilerde bir kuyruğa yol açabileceğini göstermiştir.

Magnetar bağlamında ise, hem atmosferin hem de manyetosferin bu etkilerinin birlikte gerçekleşmesi gerekmektedir ve bu iki etki henüz birbiriyle karşılaştırılmamıştır. Bu çalışma da hem tüm fiziksel etkiler hesaba katılarak yüksek manyetik alanlı bir nötron yıldızının atmosferinden çıkan ışınım, hem de bu ışınımın manyetosferin etkileri hesaba katılarak oluşan spektrum hesaplanmıştır. Saçılmanın hem spektrumun sürekliliğine, hem de proton siklotron çizgilerine etkileri gösterilmiştir.

2. Modeller

Radyatif dengedeki bir nötron yıldızı atmosferinden gelen emisyon ve bu ışınımın manyetosferde rezonant siklotron saçılmaya uğratılması hesaplarında [5], [10] ve [14] 'de açıklanan metotlar takip edilmiştir.

Nötron yıldızı atmosfer modelleri, tamamen iyonize Hidrojen plazmaları için, vakum polarizasyonun ve iyon siklotron çizgilerinin etkilerini hesaba katılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada ayrıca [15] takip edilerek iyon siklotron çizgilerinin harmonikleri de hesaba katılmıştır. Önceki çalışmalarda olduğu gibi radyatif denge çözümleri için Lucy-Unsöld algoritması kullanılmıştır. Yüzey emisyonu tamamen, atmosferin efektif sıcaklığı T_{eff} , yüzey manyetik alanı B ve yüzeydeki kütle çekim ivmesi $g = GM/R$ ile belirlenir. Bu çalışma boyunca $g = 1.921 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır.

[14]'deki yaklaşıma benzer olarak rezonant siklotron saçılmanın etkileri için Green fonksiyonları yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Manyetosferdeki manyetik alanın küresel simetrik olduğu ve $1/r^3$ bağımlılığı ile değiştiği varsayılmıştır. Radyatif transfer denklemi iki-akımlı Schwarzschild-Schuster yaklaşımı ile çözülmüştür. Oluşan spektrum iki parametreye bağlıdır : Saçılma optik derinliği

$$\tau = \frac{\pi^2 e^2 n r}{3 m c \omega_B}$$

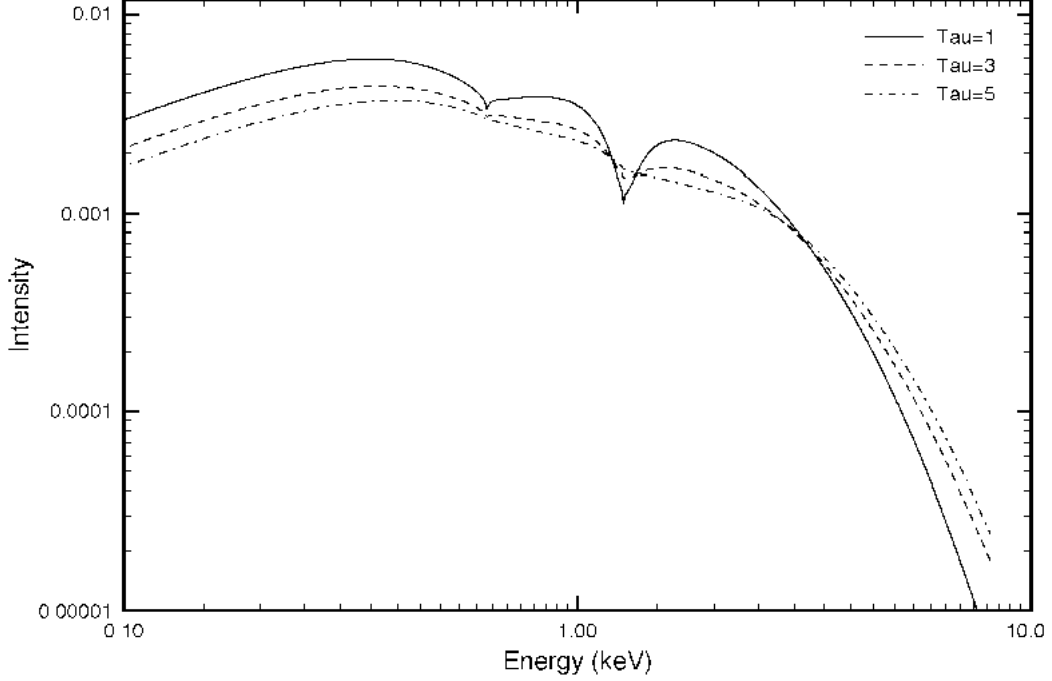
ve elektronların ışık hızı biriminde hızları β . Burada n plazma yoğunluğu, r siklotron saçılmanın oluşacağı bölgenin verilen bir foton enerjisine göre yarıçapı ve $\omega_B = eB/mc$ siklotron frekansı.

Hesaplamalarımızda, orijinal olarak [14] tarafından yazılan rezonant siklotron saçılma

kodu yüze ışınım kodu tarafından üretilen çıktıyı alabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Böylece sonuç X-ışın spektrumu hem yüksek manyetik alanlı bir nötron yıldızının yüze ışınımı hem de bu ışınımın manyetosferde maruz kalacağı rezonant siklotron saçılma hesaba katılmış olarak elde edilecektir.

3. Sonuçlar

Saçılmanın yüze ışınımı üzerine etkilerini inceleyebilmek için, 0.1, 0.3 ve 0.5 keV yüze sıcaklıkları ve $10^{13} - 10^{15}$ G. arasında çeşitli manyetik alan değerlerine sahip modeller hesaplanmıştır. Oluşturulan bu spektrumlar daha sonra 1-10 arası optik derinlik ve 0.1 – 0.5 elektron hızı değer aralığını kapsayacak şekilde saçılmaya uğratılmıştır.

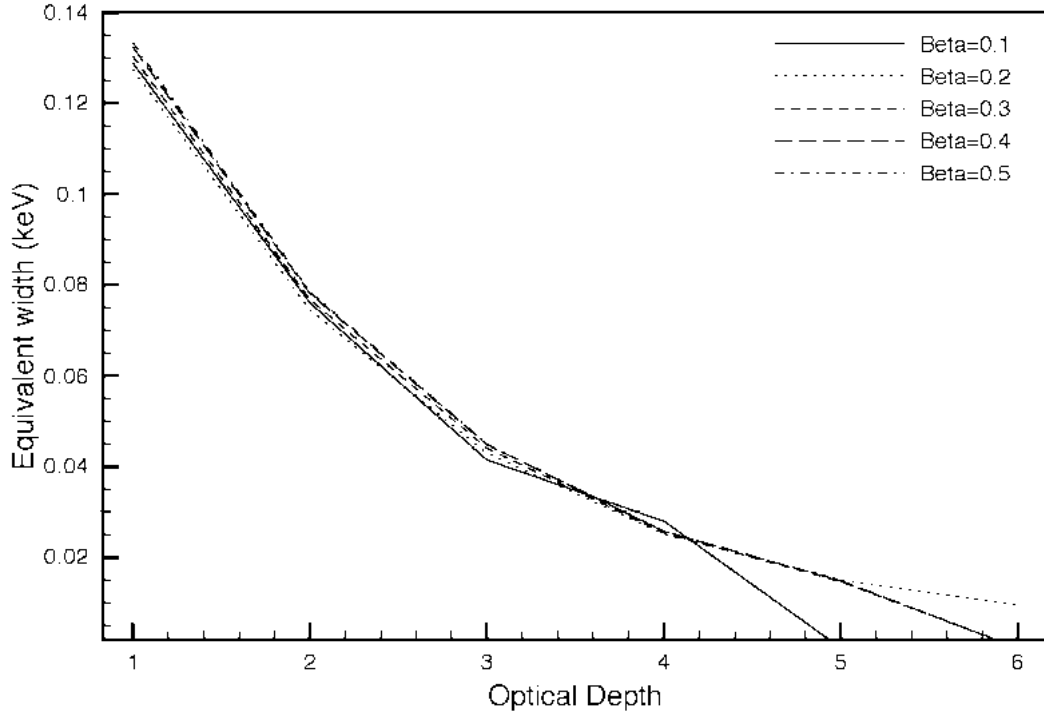


Şekil 1 Soğurma çizgilerinin ve sürekliliğin artan optik derinlik ile değişimi bu şekilde görünebilir.

Rezonant siklotron saçılmanın hem süreklilik hem de proton siklotron çizgileri üzerindeki etkilerini göstermek üzere Şekil 1'de 0.3 keV yüze sıcaklığı, 10^{14} G yüze manyetik alan şiddeti ve manyetosferdeki farklı optik derinlik değerleri için oluşan X-ışın spektrumları çizilmiştir. Rezonant siklotron saçılmanın etkisiyle [14] tarafından da belirtildiği gibi optik derinlik arttıkça proton siklotron çizgilerinin eşdeğer genişlikleri azalmaktadır. Bu ayrıca vakum polarizasyonunun da çizgi akılarını azaltmasına ek bir etkidir [10].

Spektrumun tepe noktasından sonraki foton enerjilerinde, zaten Plank eğrisinden sapmış şekilde görülen kuyruk daha da sert enerjilere doğru kaymaktadır. Bunun sebebi fotonların elektron tarafından her bir rezonant saçılmada enerjilerinin artmasıdır.

Şekil 2 ve Tablo 1'de, manyetosferik saçılma dolayısıyla proton siklotron çizgilerinin eşdeğer genişliklerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 2'deki model hesaplaması 4×10^{14} G yüze manyetik alan şiddetli ve yüze sıcaklığı 0.5 keV olan bir nötron yıldızı için yapılmıştır. Farklı manyetik alan şiddetleri için sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2'de de görülebileceği gibi eşdeğer genişliğin değişimi elektron hızı β 'ya çok bağlı olmamakta fakat optik derinlik τ ile hızla değişmektedir. Birim değerli bir optik derinlik bile eşdeğer genişliği yarı yarıya azaltmaya yetmektedir. Burada kullanılan model parametreleri $\sim 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ gibi bir parçacık yoğunluğuna denk gelmektedir. Bu değer 6s spin periyodu ve 10^{15} Gauss'luk bir nötron yıldızı için Goldreich-Julian yoğunluğunun ~ 2600 katıdır.



Şekil 2 Proton siklotron çizgilerinin eşdeğer genişliklerinin değişimi.

Tablo 1. $\beta = 3$ için artan optik derinlik ile proton siklotron absorpsiyon çizgilerinin eş değer genişliklerinin değişimi. Bazı optik derinlik değerleri için çizgilerin eşdeğer genişliği verilmemiştir, bu çizginin o optik derinlik değeri için süreklilikten ayırt edilemediğini gösterir.

Manyetik Alan	Çizgi Enerjisi (keV)	Eşdeğer genişlik (keV)			
		Saçılmasız	$\tau = 1$	$\tau = 3$	$\tau = 5$
10^{14} Gauss					
0.1	0.063	0.0013	0.00087	0.00044	-
0.1	0.126	0.0012	0.00080	0.00041	-
1	0.635	0.0405	0.02796	0.01464	0.0067
1	1.263	0.0302	0.01978	0.00954	0.0039
4	2.529	0.0639	0.03505	0.01202	-
4	5.051	0.2065	0.13029	0.04407	0.0146
8	5.050	0.3058	0.12968	0.02756	-
10	6.295	0.2753	0.12277	-	-

Hem vakum polarizasyonu hem de rezonan siklotron saçılmanın bir magnetarın X-ışın spektrumundaki etkileri benzerdir. Bu etkiler, eş değer genişlikteki azalmalar ve spektrumun yüksek enerjili kısmındaki Planck benzeri olmayan bir sürekliliktir. Bu ikinci bileşen genel olarak ikinci bir karacisim eğrisi ya da bir güç kanunu modelini termal bileşene ekleyerek modellenir. Tablo 2’de modeller tarafından üretilen spektrumların iki bileşenli karacisim modeli ile fit edildiğinde bulunan sonuçlar gösterilmiştir. Genel olarak yumuşak karacisim bileşeni nötron yıldızının yüzey sıcaklığını yansıtmakta fakat ikinci karacisim modeli yüksek enerjili kuyruğu modellemek için gerekmektedir.

Tablo 2. Farklı yüzeysel sıcaklıkları ve manyetik alan şiddetleri için süreklilik modellemesi sonuçları. $B=10^{15}$ G ve $T = 0.5$ keV için optik derinlik değeri 3'e kadar ikinci bir bileşene ihtiyaç olmamıştır.

Manyetik Alan	Yüzeysel Sıcaklığı	Saçılmadan		$\tau = 1$		$\tau = 3$		T = 5	
		kT_1	kT_2	kT_1	kT_2	kT_1	kT_2	kT_1	kT_2
10^{14} G									
0.1	0.1	0.12	0.25	0.12	0.25	0.12	0.27	0.13	0.29
1	0.1	0.12	0.38	0.12	0.41	0.13	0.53	0.11	0.47
10	0.1	0.09	0.19	0.09	0.20	0.09	0.22	0.10	0.24
0.1	0.3	0.25	0.57	0.25	0.59	0.27	0.68	0.29	0.74
1	0.3	0.23	0.58	0.22	0.62	0.24	0.75	0.26	0.83
10	0.3	0.22	0.41	0.22	0.44	0.24	0.51	0.26	0.56
0.1	0.5	0.41	0.85	0.41	0.88	0.43	1.00	0.46	1.10
1	0.5	0.24	0.73	0.26	0.75	0.31	0.87	0.34	0.96
10	0.5	0.55	-	0.55	--	0.57	0.89	0.43	0.72

4. Tartışmalar

Bu çalışmada, [5], [10] ve [14]'deki metodlar kullanılarak, manyetosferik rezonant siklotron saçılmanın yüksek manyetik alanlı bir nötron yıldızının yüzeysel ışınımı üzerine etkileri incelenmiştir. Birim miktardaki bir optik derinliğin bile proton siklotron absorpsiyon çizgilerini süreklilik spektrumundan ayıramayacak hale getirebildiği gösterilmiştir.

Hem SGR'ler hem de AXP'lerin yüksek manyetik alanlı nötron yıldızları, magnetarlar, oldukları düşünülmektedir. Eğer bu böyleyse bu yıldızların yüksek manyetik alanları X-ışın spektrumlarında gözlenebilecek proton siklotron soğurma çizgilerinin oluşmasına yol açmaları beklenir. Ancak SGR 0526-66'ya ait RXTE spektrumlarından bazılarında gözlenen bir soğurma çizgisi benzeri yapı hariç hiçbir AXP ya da SGR'da proton siklotron çizgisi gözlenmemiştir. Rezonant siklotron saçılma bu durumu açıklamaya yardımcı olabilir.

Çalışmamızın devamında, bu modeller daha da geliştirilerek ve model spektrumlarına genel rölativistik düzeltmelerde eklenerek, gözlemler ile karşılaştırılabilecek bir model oluşturulacak ve bu model XSPEC programına adapte edilecektir. AXP, SGR ve X-ışınlarında sönük izole nötron yıldızlarının (XDINS) Chandra ve XMM-Newton uydusu gözlemleri indirgenerek elde edilen model kullanılarak bu yıldızların gerçek fiziksel özellikleri tespit edilmeye çalışılacaktır.

Kaynaklar

- [1] Duncan C. D., Thompson C., (1992), "Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts", *ApJ*, 392, L9-L13
- [2] Fahlman G. G., Gregory P. C., (1981), "An X-ray pulsar in SNR G109.1-1.0", *Nature*, 293, 202-204
- [3] Mazets E. P., Golenetskii S. V., (1981), "Recent results from the gamma-ray burst studies in the KONUS experiment", *Ap&SS*, 75, 47-81
- [4] Woods P. M., Thompson C., (2004), "Soft Gamma Repeaters and Anomalous X-ray Pulsars: Magnetar Candidates", *preprint(astro-ph/0406133)*
- [5] Özel F., (2001), *ApJ*, "Surface Emission Properties of Strongly Magnetic Neutron Stars", 563, 276-288

- [6] Lloyd A. D., (2003), “Model atmospheres and thermal spectra of magnetized neutron stars”, *preprint(astro-ph/0303561)*
- [7] Ho W. C. G., Lai D., Potekhin A. Y., Chabrier G., (2003), “Atmospheres and Spectra of Strongly Magnetized Neutron Stars. III. Partially Ionized Hydrogen Models”, *ApJ*, 599, 1293-1301
- [8] Zane S., Turolla R., Stella L., Treves A., (2001), “Proton Cyclotron Features in Thermal Spectra of Ultramagnetized Neutron Stars”, *ApJ*, 560, 384-389
- [9] Ho W. C. G., Lai D., “Atmospheres and spectra of strongly magnetized neutron stars”, (2001), *MNRAS*, 327, 1081-1096
- [10] Özel F., (2003), “The Effect of Vacuum Polarization and Proton Cyclotron Resonances on Photon Propagation in Strongly Magnetized Plasmas”, *ApJ*, 583, 402-409
- [11] Goldreich P., Julian W. H., (1969), “Pulsar Electrodynamics”, *ApJ*, 157, 869
- [12] Mikhailovskii A. B., Onishcenko O. G., Suramlishvili G. I., Sharapov S. E., (1982), *SvA*, 8, L369
- [13] Thompson C., Lyutikov M., Kulkarni S. R., (2002), “Electrodynamics of Magnetars: Implications for the Persistent X-Ray Emission and Spin-down of the Soft Gamma Repeaters and Anomalous X-Ray Pulsars”, *ApJ*, 574, 332-355
- [14] Lyutikov M., Gavriil F. P., (2006), “Resonant cyclotron scattering and Comptonization in neutron star magnetospheres”, *MNRAS*, 368, 690L-706L
- [15] Güver T., Özel F., (2006) (Hazırlanmakta)