

Manyetik Katakliksmik Değişen WX Leonis Minoris: Optik Bölgede Tayf Uçlaşma Ölçümü

Demet Tutar Özdarcan^{1, 2*}, Paul S. Smith², Varol Keskin¹

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir, Türkiye.

² Department of Astronomy and Steward Observatory, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.

Özet: Bu çalışmada manyetik katakliksmik değişen WX Leonis Minoris sisteminin zaman serisinde tayf uçlaşma ölçüm gözlemleri sunulmuştur. Sistemin manyetik alan özellikleri, dikine hızları ve görsel bölge çembersel uçlaşması belirlenmiştir. Maksimum çembersel uçlaşma takibi yapılarak beyaz cüce bileşenin dönme dönemi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: tayf uçlaşma ölçüm, çembersel uçlaşma, cyclotron, manyetik alan, manyetik katakliksmik değişen, WX LMi

Abstract: In the scope of this study, time-series spectropolarimetric observations of magnetic cataclysmic variable WX Leonis Minoris are presented. Magnetic field properties, radial velocities and optical circular polarization of WX LMi are determined. Monitoring the maximum circular polarization, the spin period of the white dwarf component is obtained.

Key Words: spectropolarimetry, circular polarization, cyclotron, magnetic field, magnetic cataclysmic variables, WX LMi

1. Giriş

Manyetik katakliksmik değişen (mCV) sistemler baş yıldızı bir beyaz cüce, yoldaş yıldızı ise Roche lobunu doldurmuş genellikle bir kırmızı cüceden oluşan çift yıldız sistemleridir (Warner 1995). Baş yıldızın yüksek manyetik alan şiddetine sahip olduğu bu sistemler, manyetik alanların çift yıldız sistemleri üzerindeki etkilerini araştırmak için uygun birer laboratuvarıdır. Bu sistemlerde ise baş yıldızın manyetik alan yoğunluğu yaklaşık 1-250 MG aralığındadır (Cropper 1990).

Yeğin manyetik alana sahip mCV sistemlerinin özellikle görsel bölge tayflarının sürekliliğinde birbirini takip eden akı artışları gözlenir. Bu artışlar tipiktir ve manyetik alan varlığında madde hareketi ile gerçekleşen cyclotron ışıınının varlığına işaret etmektedir. Tayf sürekliliğinde gözlenen bu akı artışları cyclotron harmonikleri olarak adlandırılırlar (Warner 1995). Cyclotron ışıını manyetik alan ve maddenin etkileşerek yüklü parçacıkları relativistik olmayan hızlarla ivmelendirmesi ile gerçekleşmektedir. Toplanma bölgesindeki iyonize olmuş akışta bulunan serbest elektronlar manyetik alan çizgileri boyunca relativistik olmayan hızlarda hareket ederken, manyetik alana dik yönde Lorentz kuvveti algırlarlar. Bu kuvvet nedeniyle elektronlar manyetik alan çizgileri boyunca sarmal yörüngelerde ivmeli hareket ederler (Jackson 1975; Warner 1995). Bu nedenle şok bölgesinin hemen üstünden cyclotron ışıını salarlar (Silva et al. 2011). Bu ışıınının uçlaşmış olduğu Ingham et al. (1976), Cropper (1990) ve Warner (1995) çalışmalarında da gösterilmektedir.

Manyetik katakliksmik sistemlerin optik bölge tayf uçlaşma ölçümü çalışılması, sistemlerin manyetik alan yoğunluklarının doğrudan belirlenmesini sağlar. Uçlaşma ve eş zamanlı optik bölge tayfı birlikte değerlendirilerek cyclotron ışıını kaynağı harmonikler çözülür ve manyetik alan yapıları belirlenir. Zamana göre gözlenen maksimum uçlaşma miktarları ile uçlaşmış ışık kaynağının hareketi ve dolayısıyla mCV sistemlerindeki baş yıldız olan beyaz cüce dönme dönemi doğrudan hesaplanabilir. Ayrıca tayfta gözlenen salma çizgileri ile dikine hızlar çalışılabilir ve elde edilen dikine hız eğrisi ile yörünge parametreleri çözümlenebilir.

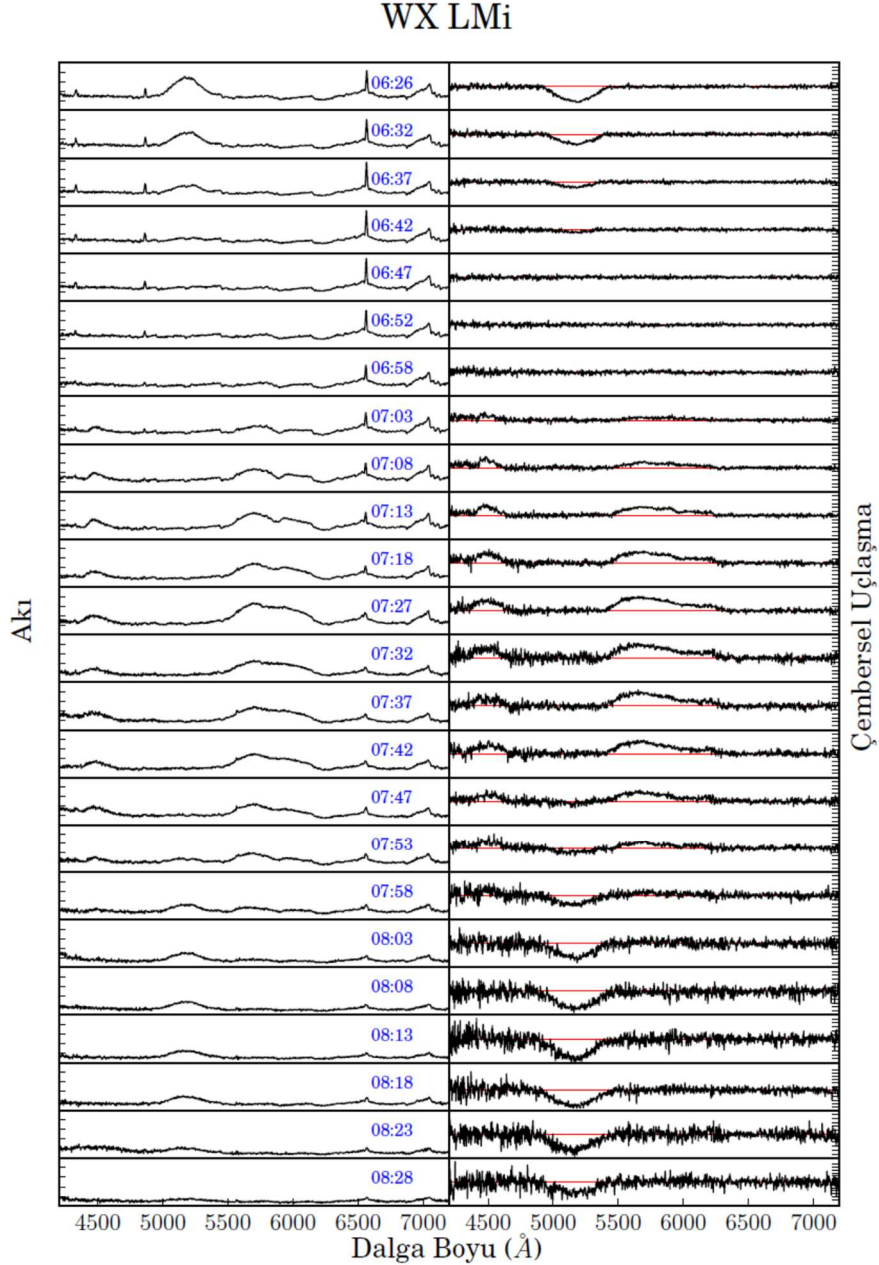
WX LMi Sistemi, Reimers et al. (1999) tarafından bir manyetik katakliksmik değişen olarak duyurulmuştur. Reimers et al. (1999), WX LMi sisteminin yörünge dönemini, ışıkölçüm ve tayfölçüm verilerini kullanarak 2,79312 saat olarak bulmuştur. Vogel et al. (2007) ise sistemin yörünge dönemini 2,78216736 saat olarak fotometri ile hesaplamış ve ayrıca sistemin beyaz cüce dönme dönemini uzun dönem ışıkölçüm verileri ve tayf analizinden belirleyerek sistemde eşdönme görüldüğünü de belirtmiştir. Vogel et al. (2007) tayftan elde ettiği dönemleri hidrojen salma çizgileri ve yoldaş yıldızda ait sodyum soğurma çizgileri ile belirlemiştir.

Bu çalışmada sunulan WX LMi sisteminin optik bölge tayf uçlaşma ölçüm verileri ise 28 Nisan 2015 tarihinde, Smithsonian Enstitüsü ve Arizona Üniversitesi ortak tesisi olan Multiple Mirror Telescope Observatory (MMTO)'de Multiple Mirror Telescope (MMT) ile elde edildi. MMT, 6,5 m çapa sahip tek parça aynalı bir teleskoptur. Gözlemler, teleskop odak düzlemine SPOL (Schmidt et al. 1992) monte edilmiş olarak gerçekleştirildi. Bir CCD görüntüleme/tayfuçlaşmaölçer olan SPOL, uçlaşma ve iletim optiği birlikteliğinden oluşan ve görsel bölgede etkin olan bir tayfölçerdir. Sistem kendi kendine yetebilen, taşınabilen ve yüksek verimli olma özelliklerine sahiptir. 1990-1991 yıllarında Gary Schmidt ve H. S. Stockman tarafından dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Polarimetre bölümü çift ışın özelliğine sahip olarak tasarlanmıştır. Sisteme dönen renksemez (akromatik) dalga plakaları ve Wollaston prizması da dahildir. Alıcı olarak kuantum etkinliği ~6500Å civarında %90 olan 1200×800 piksellik bir CCD kullanılmaktadır. Kullanılan kırınım ağı ile tayfsal çözünürlük 3800 Å ile 9000 Å arasında 4-15 Å olacak şekildedir.

*Sorumlu Yazar E-Posta: demettutar@gmail.com

2. WX LMi Tayf Uçlaşma Ölçümü

WX LMi sisteminin ilk tayf uçlaşma ölçüm gözlemleri bu çalışma ile dalga plakası başına 60 saniye poz süresi verilerek tek gecede ardışık 24 eş zamanlı görsel bölge ve uçlaşma tayfı olarak elde edildi. Elde edilmiş tüm ardışık tayflar kesintisiz olarak Şekil 1 ile gösterilmektedir.

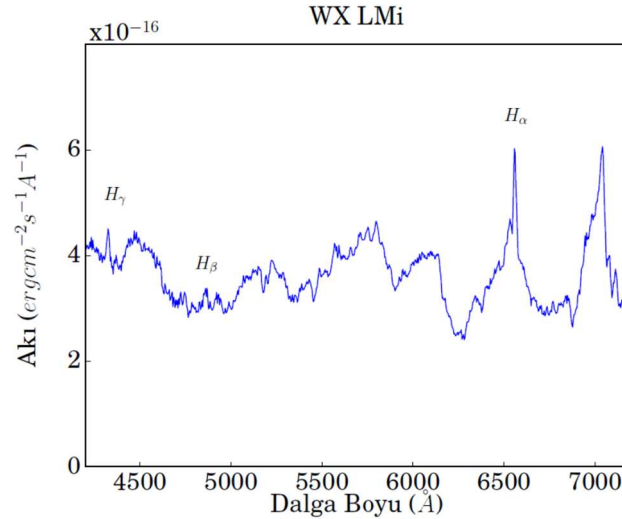


Şekil 1: Şekilde WX LMi sisteminin bir yörünge dönemi boyunca ardışık alınmış görsel bölge tayfı (sol kolon) ve eş zamanlı çembersel uçlaşma tayfı (sağ kolon) gösterilmektedir. Akı değerleri her bir panel için 0 ile $15 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Å}^{-1}$ arasında olup $3 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Å}^{-1}$ değerine eşit aralıklarla verilmektedir. Çembersel uçlaşma değeri ise kırmızı yatay düz çizgi sıfır düzeyini belirtmekle birlikte $- \%60$ ve $+ \%60$ aralığındaki uçlaşma yüzdesini göstermektedir. Tayflar, şekilde yer alan her bir panel üzerine eklenmiş UT sıralamasında gösterilmiştir.

Şekil 1’de WX LMi sisteminin görsel bölge tayflarında dikkat çeken yapılar öncelikle yegün fakat yörünge döneminin yarısında ayırt edilebilir olan hidrojen Balmer salma çizgileri, tayfın soğuk tarafında baskın olan yoldaş yıldızda ait görsel bölge

tayfi ve zamanla değişen süreklilikteki yüksek akı artışlarıdır. Çembersel uçuşma tayflarında da oldukça yüksek uçuşma değerleri göze çarpmaktadır. Çembersel uçuşma verilerinde iki uçuşma bölgesine ait olan birbirinden farklı yapılar göze çarpmaktadır. Bu yapılardan ilki zamanla azalarak kaybolmakta ve yerini bir diğer uçuşma bölgesinden kaynaklı olan yapıya bırakmaktadır. Uçuşma verilerindeki bu yapılar görsel bölge tayflarında gözlenen süreklilik akı artışları ile eş zamanlı ve uyumludur. Çembersel uçuşmaların negatif veya pozitif olması yalnızca uçuşmanın yönünü belirtmektedir ve her iki farklı işaretli uçuşma miktarı da görsel bölge tayflarında süreklilik artışına yol açmaktadır. Negatif uçuşma da olsa uçuşma sürekliliğinin oluşturduğu tepe görüntüsü tayf üzerinde akı artışı olarak gözlenmektedir. Bir diğer dikkat çekici özellik ise eş zamanlı her iki tayfta da (görsel bölge tayfi ve uçuşma tayfi) süreklilik değişiminin yarattığı tepenin şeklinin birbiriyle aynı olmasıdır. Bu durum cyclotron ışımasının görsel bölgede ve uçuşmuş ışık sergilediğinin kanıtıdır. Cyclotron ışıması kaynaklı bu tepeler asimimetrik ve pozitif uçuşma gösteren yapının çift tepeli olması dikkat çekicidir. Sistemde gözlenen maksimum negatif çembersel uçuşma değeri ise $\sim 50\%$ ve maksimum pozitif çembersel uçuşma değeri ise $\sim 33\%$ olarak belirlenmektedir. Bu yüksek uçuşma miktarları ile sistem tüm diğer polar sistemlerden farklı davranış sergiler.

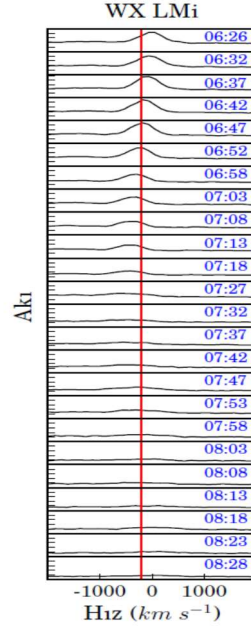
Görsel bölge tayflarının medyan değerleri Şekil 2 ile gösterilmektedir. Şekilde oldukça yeğin bir $H\alpha$ ve daha az yeğin olmakla birlikte $H\beta$ ve $H\gamma$ salma çizgileri görülmektedir. Yoldaş yıldızla ait herhangi bir soğurma çizgisi de gözlenmemiştir. 6500 Å değerinden daha uzun dalga boyu tarafında yoldaş yıldızla ait tayf etkileri baskındır. Bu etkiler tüm yörünge dönemi boyunca her görüntüde ortaya çıkmaktadır. Tayfin bu bölgesinde ayrıca metalik molekül bantları (TiO) da gözlenmektedir. Tüm diğer süreklilik artışları tek bir yörünge dönemi boyunca medyanı alınan cyclotron ışıması kaynaklı artışlardır.



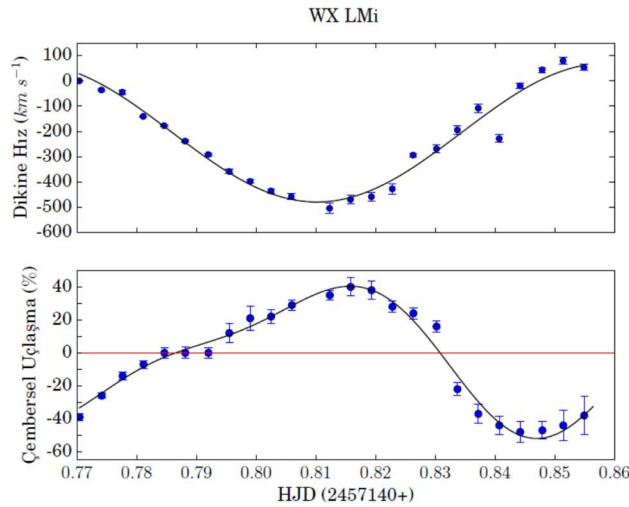
Şekil 2: WX LMi sisteminin bir yörünge dönemi gözlenen tüm tayflarının medyan ortalaması. En yeğin gözlenen salma çizgileri şekil üzerinde işaretlenmiştir. Tayfin uzun dalga boyu bölgesinde metalik bantlar dikkat çekmektedir.

Görsel bölge tayflarında herhangi bir soğurma çizgisi gözlenmediği için dikine hız incelemeleri en baskın çizgi olan $H\alpha$ salma çizgisi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3 ile $H\alpha$ salma çizgileri zaman sıralamasında verilmektedir. Salma çizgisi yörünge döneminin yarı zamanında süreklilik düzeyine inmektedir. Bu durum hesaplanan dikine hızların hatalarında artışa neden olmaktadır. Artan hatalara rağmen $H\alpha$ salma çizgisinin yörünge hareketi ile sistemik hız etrafında yaptığı değişim net olarak farkedilmektedir. Çünkü sistemin dikine hız genliği çok büyüktür.

Hesaplanan dikine hızlar ile Şekil 4 üzerinde üst panelde zaman sıralamasında yerleştirilerek sistemin bir yörünge dönemi boyunca elde edilen dikine hız eğrisine ulaşılmış olur. Şekil üzerinde dikine hız eğrisini en iyi temsil eden çember yörünge varsayımıyla hesaplanmış teorik yörünge sürekli çizgi ile gösterilmektedir. Şekil 4 üst panelde yer alan sürekli çizgi, tayfsal yörünge çözümü ile elde edilen ve dönemi $2,328 \pm 0,168$ saat olan çember yörünge temsilini belirtmektedir. Dikine hız hatalarının arttığı bölgede teorik eğriden sapmanın da fazla olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4 alt panel ise WX LMi için bir yörünge dönemi boyunca gözlenen maksimum çembersel uçuşmanın zamanla değişimini gösterilmektedir. Bu değişime uygulanan Fourier analizi ile iki baskın dönem elde edilir. Bu dönemler $1,920 \pm 0,072$ saat ile beyaz cüce dönme dönemini ve $1,056 \pm 0,048$ saat ile beyaz cüce üzerinde madde toplayarak cyclotron ışıması salan ikinci kutbu varlığını işaret eden dönemdir. Şekil 4 alt panelde her bir çembersel uçuşmuş tayf görüntüsünde gözlenen tepelere Gauss temsili geçirilerek belirlenen maksimum uçuşma değerleri ve Fourier temsili ile elde edilen teorik eğri gösterilmektedir. Burada teorik eğriden sapma miktarının fazlalığı dikkat çekicidir. Ayrıca maksimum uçuşmada negatif değerleri veren görüntüler üzerinde uçuşmaların hataları da artmaktadır. Bunun sistem kaynaklı olmayan bir nedeni de, verilerin sinyal/gürültü oranının azalması olabilir. Bu azalma, anlık gözlem koşullarında astronomik görüş değerinin gözlem sonuna doğru kötüleşmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4'de verilen dikine hız eğrisi ve maksimum uçuşma değişiminin eş zamanlı incelenmesi ile, sistemin maksimum negatif dikine hızlara sahip olduğu anda maksimum pozitif çembersel uçuşma gösterdiği görülmektedir. Pozitif uçuşma kaynağı ile negatif uçuşma kaynağı arasındaki boyamsal fark $\sim 180^\circ$ 'den daha küçüktür. Negatif uçuşma kaynağının sistemin dikine hızının maksimum pozitif değere ulaşmadan hemen önce gözlemlendiği de belirtilmelidir.



Şekil 3: Şekil H_α salma çizgisinin hız alanında olan değişimini göstermektedir. Kırmızı dikey düz çizgi sistemik dikine hız değerini belirtmektedir. Her bir çizginin ait olduğu zaman UT olarak şekil üstünde belirtilmiştir.



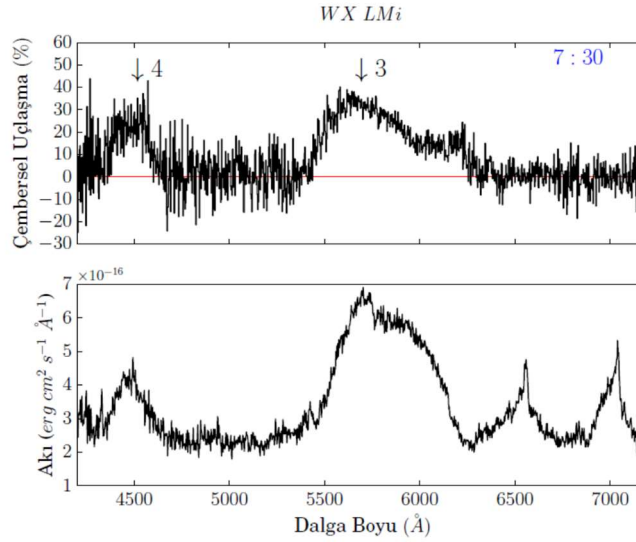
Şekil 4: WX LMi sisteminin eş zamanlı dikine hız eğrisi (üst panel) ve maksimum uçlaşma dağılımı (alt panel) gösterilmektedir. Hesaplanan dikine hızlar göreceli dikine hızlar olup hataları her bir nokta üzerinde hata barları ile gösterilmektedir. Maksimum uçlaşma değerinin elde edilmesi için uçlaşma sürekliliğine geçirilen Gauss temsili kullanılmıştır. Burada hesaplanan değerlerin hataları, uçlaşma değerlerinin hesaplandığı tepe noktalarının standart sapma değerleridir. Sürekli çizgiler teorik temsilleri ifade etmektedir. Alt panelde görülen kırmızı yatay düz çizgi çembersel uçlaşmanın sıfır düzeyini temsil etmektedir.

Şekil 5 ile WX LMi sisteminin maksimum pozitif çembersel uçlaşma gösteren görsel bölge tayfı ve çembersel uçlaşma tayfı birlikte verilmektedir. Burada tek çembersel uçlaşma tayfı üzerinde iki farklı harmonik bulunmaktadır. Bu harmoniklerin numaraları cyclotron frekansı formülü $\frac{|e|B}{2\pi m_e c^2} = \frac{1}{\lambda_{(n+1)}} - \frac{1}{\lambda_{(n)}}$ yardımıyla 3 ve 4 olarak hesaplanır. Harmonikler tepe

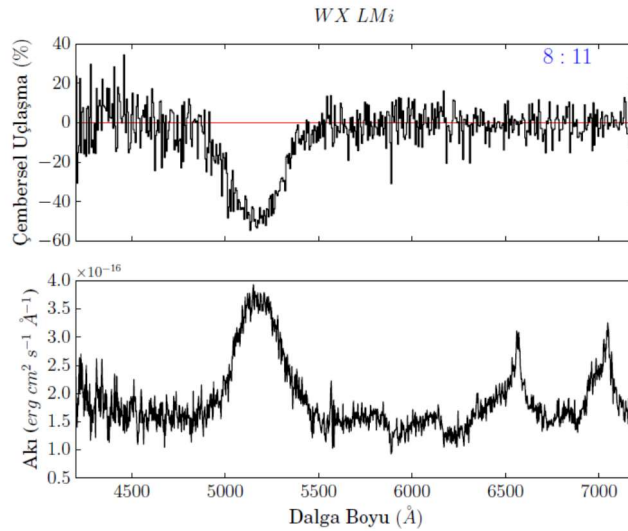
noktalarının bulunduğu dalga boyuna göre sırasıyla şekil üzerinde işaretlenmiştir. Uçlaşmalarda sinyal/gürültü oranı yükseldiği için uçlaşma miktarını belirlemede Gauss temsili kullanılmış ve maksimum pozitif değerli uçlaşma miktarı + %33 olarak belirlenmiştir. Uçlaşma tayfının sinyal/gürültü oranı tüm tayf boyunca aynı kalmayıp çembersel uçlaşma sinyalinin arttığı bölgelerde özellikle 3. harmonik için oldukça yükselmektedir. Sistemin eş zamanlı optik bölge tayfını gösteren alt panelde de çembersel uçlaşma değerindeki artış ile uyumlu görsel bölgedeki süreklilik akı artışı görülmektedir. Cyclotron

frekansını veren, $\omega_{ce(n)} = \frac{n|e|B}{2\pi m_e c}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ formülü yardımı ile sistemin manyetik alan yegınlığı, 4484 Å ve 5660 Å dalga

boyuna yerleşmiş sırasıyla 4. ve 3. cyclotron harmonikleri ile 49 MG olarak hesaplanmıştır. Cyclotron frekans formülünde kullanılan kısaltmalarda ω_{ce} elektron cyclotron ışınımı temel frekansını, n harmonik numarasını, e bir elektronun yükünü (elementary charge), m_e elektronun kütlesini, c ışığın boşluktaki hızını ve B de manyetik alan şiddetini temsil etmektedir. λ_n ise n . harmoniğin bulunduğu dalga boyu değeridir.



Şekil 5: WX LMi sisteminde maksimum pozitif çembersel uçlaşma gösteren uçlaşma (üst panel) ve görsel bölge tayfı (alt panel). Tayfın gözlem zamanı üst panel içinde UT olarak verilmiştir. Kırmızı düz çizgi uçlaşma için sıfır değerini belirtmektedir. Belirlenen harmonik numaraları yerleştikleri dalga boyunu işaret edecek şekilde üst paneldedir.



Şekil 6: WX LMi sisteminde maksimum negatif çembersel uçlaşma gösteren uçlaşma (üst panel) ve görsel bölge tayfı (alt panel). Tayfın gözlem zamanı üst panel içinde UT olarak verilmiştir. Kırmızı yatay düz çizgi uçlaşma için sıfır değerini belirtmektedir. Çembersel uçlaşma tayfında yalnızca tek harmonik gözlenmektedir. Gözlenen çembersel uçlaşma verisinin sinyal/gürültü oranı uçlaşmanın sinyalinin artmasıyla yükselmektedir. Burada gözlenen çembersel uçlaşmanın kaynağı olan cyclotron ışınımı esasen süreklilik uçlaşmasını arttırdığı için tek tek çizgi uçlaşmaları ile hesaplama yapılmamıştır. Maksimum çembersel uçlaşma miktarı - %50 olarak belirlenmiştir.

Şekil 6 ile WX LMi sisteminin maksimum negatif çembersel uçlaşma değerini gösteren çembersel uçlaşma tayfı ve görsel bölge tayfı birlikte verilmektedir. Burada tek çembersel uçlaşma tayfı üzerinde sadece bir harmonik bulunmaktadır. Gözlenen tek harmoniğin numarasının belirlenebilmesi için cyclotron frekans formülü kullanılır. Tepe noktası 5171 Å dalga boyuna yerleşmiş maksimum -%50 uçlaşma gösteren bu tek yapı cyclotron ışınımının temel harmoniği, ikinci harmoniği veya üçüncü harmoniği olabilir. Bu durumlarda sırasıyla manyetik alan yegınlıkları 207, 104 veya 69 MG olarak hesaplanmaktadır.

Tayf üzerinde birden fazla uçuşma harmoniği gözlenmediği için manyetik alan değerlerine ait yalnızca bir alt ve üst sınır hesaplanabilir. Buna göre bu miktarda uçuşma gösteren kaynağın manyetik alan yegınlığı maksimum 207 MG ve minimum 69 MG olmalıdır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bu iki sınır değerinden farklı olarak manyetik alan değeri alabileceği tek ara değeri ise 104 MG olduğudur.

3. Sonuçlar ve Tartışma

WX LMi sistemi için elde edilen bilgiler yörünge dönemi, beyaz cüce dönme dönemi, maksimum uçuşma miktarları ve manyetik alan yegınlıkları olarak özetlenebilir. Sistemin dikine hız eğrisinin tayfsal yörünge çözümünden elde edilen yörünge dönemi $2,328 \pm 0,168$ saat olarak bulunmuştur. Maksimum uçuşmanın değışiminden elde edilen en baskın dönem $1,920 \pm 0,072$ saat ve ikinci baskın dönemin ise $1,056 \pm 0,048$ saat olarak hesaplanmıştır. Bu dönemlere neden olan yapıların birbirinden boyamsal olarak $\sim 180^\circ$ değerinden daha az ayık olan iki ışıını yapan bölgeye ait olduğu düşünülmektedir. Sistemin cyclotron ışıını ile çembersel uçuşma sergilediği varsayımı altında manyetik alan değerinin maksimum %33 pozitif çembersel uçuşmış bölge için 49 MG ve maksimum %50 negatif çembersel uçuşmış diğer bölge için ise, 207, 104 veya 69 MG olabileceği sonucuna varılır. Sistem bugüne kadar en yüksek çembersel uçuşma gösteren sistemdir ve %50 uçuşma değeri synchrotron süreçleri ile elde edilebilecek uçuşma miktarlarına yaklaşmaktadır. Uçuşmanın bu denli yüksek olması, manyetik alan şiddetinin yüksek olması ve aktarılan maddenin tamamının cyclotron ışıınına katılmasının yanı sıra, sistemde uçuşmayı bozucu etkilerin de diğer polar sistemlere göre daha az olduğunun bir kanıtıdır.

Hesaplanan manyetik alan yegınlıklarının ve onların hesaplandığı yapıların işaretlerinin, konumlarının ve uçuşma miktarlarının ve işaretlerinin de farklı olması, bu yapıların farklı cyclotron ışıını yapan bölgelere ait olduğunu göstermektedir. Ayrıca dönem analizlerinde ortaya çıkan iki baskın dönem de bu durumu kanıtlamaktadır. Bir yörünge dönemi boyunca görsel bölge ve uçuşma tayflarında gözlenen bu değışimleri ortaya çıkarabilecek beyaz cüce manyetik alan yapısı, her iki kutuptan da madde toplayan çift kutuplu ve merkezi beyaz cüce merkezinden kaymış olarak yerleşmiş manyetik alan yapısıdır.

Literatürde beyaz cüce dönme dönemi ile yörünge döneminin eşit olduğu ve sistemin eşdöndüğü farklı çalışmalarca vurgulanan WX LMi için elde edilen evrelerin analizleri, sistemin eşdönmeden bir farklılık gösterdiği ve bu farklılığın gözlem hataları dışında olduğu da vurgulanmaktadır. Bu farklılık Schwarz et al. (2001) tarafından belirtildiği gibi manyetik alanlar kaynaklı olabileceği gibi, sisteme ait görsel bölge tayf uçuşma verilerinin birden fazla yörünge dönemini kapsamaması kaynaklı da olabilir.

WX LMi sisteminin takibinde, uzun dönemli değışimler ve önceden öngörülemeyen fakat yüksek manyetik alanlar nedeniyle beyaz cüce dönme döneminde meydana gelebilecek ani değışimler gözlenmesi sürpriz olmayacaktır.

Bu çalışma 2014 yılı 2214/A Doktora Sırası Yurtdışı Araştırma Burs Programı, BiDEB 1059B141400376 numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir ve Tutar Özdarcan et al. (2017) çalışması ile yayınlanmıştır.

6. Kaynaklar

- Cropper, M., Mason, K. O., Allington-Smith, J. R., & et al., 1989, MNRAS, 236, 29.
Ingham, W.H., Brecher, K. & Wasserman, I., 1976, ApJ, 207, 518
Jackson, J.D., 1975, Classical Electrodynamics, 92/12/31, New York: Wiley, 1975, 2nd ed.
Reimers, D., Hagen, H.-J. & Hopp, U., 1999, A&A, 343, 157
Schmidt, G.D., Stockman, H.S. & Smith, P.S., 1992a, ApJ, Part 2 – Letters, 398, 1, L57
Schwarz, R., Schwöpe, A.D. & Staude, A., 2001, A&A, 374, 189
Silva, K.M.G., Rodrigues, C.V. & Costa, J.E.R., 2011, arXiv:1101.5568
Tutar Özdarcan, D., Smith, P.S. & Keskin, V., 2017, MNRAS, 468, Issue 3, 2923
Vogel, J., Schwöpe, A.D. & Gänsicke, B.T., 2007, A&A, 464, 647
Warner, B., 1995, Cambridge Astrophysics Series, Vol. 28