



Soğuk Yıldızların Üst Atmosferleri için Moleküler Band Analizi

Hakan Volkan Şenavcı^{1*}

¹Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, E-Blok 2. Kat, Tandoğan ANKARA.

Özet: Aktif yıldız tayflarındaki bazı moleküler çizgilerin şiddet değişimleri, başka tekniklerle tespit edilemeyen leke bölgelerinin belirlenebilmesi ve özellikle leke sıcaklıklarının oldukça duyarlı olarak elde edilmesine olanak sağlayan bilgiler içermektedir. Bu çalışmada Titanyum Oksit (TiO) moleküler bandları kullanılarak soğuk yıldızların üst atmosferlerine ilişkin yüzey parlaklık dağılımları, bir başka ifadeyle, leke sıcaklıkları ve leke bölgelerinin kapladıkları alanların belirlenmesine yönelik kullanılan teknik, analizler ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: soğuk yıldızlar, yıldız tayfi, manyetik aktivite, moleküler band analizi

Abstract: Intensity variations of some molecular lines that are visible in the spectra of active stars, carry information about the presence of spot features that can not be resolved by other existing techniques and particularly provide a more sensitive way especially on the determination of spot temperatures. In this study, the technique based on the application of Titanium Oxide (TiO) bands for the determination of spot temperatures and spot filling factors for cool stars is described and some results from the analysis are presented.

Key Words: cool stars, stellar spectra, magnetic activity, molecular band analysis

1. Giriş

Güneş'in aktivitesi, dış konvektif bölgede oluşan dönme kaynaklı türbülans hareketleriyle üretilen manyetik alanlarla ilişkilendirilmektedir. Bu manyetik alanlar Güneş atmosferini etkileyerek karanlık lekeler, plaj bölgeleri, kromosferik ağ vb. yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Bu yapılar dış atmosferlerde kendilerini dinamik koronal ilmekler olarak göstermektedir (Berdyugina 2005). Dolayısıyla Güneş aktivitesinin detaylı incelenmesi aktiviteye neden olan manyetik alanların yapısını ve Babcock (1961) modelini temel alan Dinamo Teorisi ile açıklanan oluşumlarını anlamak açısından oldukça önemlidir. Benzer olgular, dış konvektif katmanlara sahip soğuk yıldızlarda da izlenmektedir. Bu da, soğuk yıldızlarda, Güneş'te izlenen manyetik aktivitenin oluşmasına neden olan benzer bir mekanizmanın varlığını işaret etmektedir. Dolayısıyla, Güneş'in yanı sıra bu tür olguların gözlemlendiği soğuk yıldızlara ilişkin yapılacak detaylı araştırmalar da dinamo teoreminin doğruluğu ve/veya manyetik aktivitenin temelini oluşturan mekanizmanın anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak bu araştırmaların Güneş Sistemi dışındaki diğer gezegenlere ev sahipliği yapan yıldızların doğalarının anlaşılması açılarından da büyük önem taşıdığı aşikardır.

Son 20 yılı aşkın bir süredir gelişen gözlemsel araçlar ve tanıya ilişkin teknikler, yıldızların manyetik aktivite doğalarına ilişkin süreçlerin anlaşılmasında oldukça hatırı sayılır bir yol almamızı sağlamıştır. Örneğin, uzun zaman aralığına yayılmış fotometrik gözlemler sayesinde aktif bölgelerin evrimi (örn. lekelerin enlemsel / boylamsal göçü, büyüklük ve sıcaklık faktörünün değişimi) ve aktivite çevrimine ilişkin önemli bulgular elde edilmektedir. Başka bir teknik olan Doppler görüntüleme, bu tür sistemlerdeki aktif bölgelerin yapısal olarak anlaşılmasına (yüzey parlaklık dağılımındaki anormalliklerin haritalanması) ve diferansiyel dönme parametresinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Vogt ve ark., 1987; Piskunov ve ark., 1990; Collier Cameron, 1992; Berdyugina, 1998; Rice & Strassmeier, 2000). Spektropolarimetri ve Zeeman – Doppler Görüntüleme Tekniği (Donati ve ark., 1997) yardımıyla yıldızların manyetik alanlarına ilişkin dağılımlar elde edilebilmektedir. Buna ek olarak interferometri, mikromercek ve asterosismoloji gibi alanlarda kullanılan tekniklere ilişkin kaydedilen gelişmeler, yıldızların manyetik aktivite doğasının anlaşılmasında önemli katkılar sunmaktadır. Titanyum Oksit (TiO) gibi moleküler çizgilerin şiddetlerinin incelenmesi, mevcut tekniklerle boyutsal olarak ayırt edilemeyen leke bölgelerinin elde edilmesine (Berdyugina, 2002) ve leke sıcaklıklarının daha duyarlı bir şekilde belirlenmesine (O'Neal ve ark., 1996) imkan tanımaktadır. Bu çalışmada, soğuk yıldızların manyetik aktivite kaynaklı yüzey parlaklık dağılımı anormalliklerinin belirlenmesinde kullanılan bazı teknikler özetlenerek moleküler band analizlerinin mevcut diğer tekniklere nazaran soğuk yıldızlarda görülen lekelerin bazı parametrelerine ilişkin ortaya koyduğu farklılıklar ile birlikte özellikle Titanyum Oksit (TiO) moleküler bandları kullanılarak leke sıcaklıkları ve leke bölgelerinin kapladıkları alanların belirlenmesine ilişkin kullanılan teknik, analizler ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

2. Kullanılan Gözlem ve Analiz Teknikleri:

Gelişen teknolojiyle birlikte gözlem araçlarının da kayda değer gelişimi, astrofiziğin tüm alanlarında olduğu gibi yıldızların manyetik aktivite doğalarının anlaşılmasında da önemli bir yol kat etmemizi sağlamıştır. Bu bağlamda, gerek yer tabanlı gerekse atmosfer dışı gözlemlerle elde edilen yüksek kaliteli veriler sayesinde, elektromanyetik spektrumun büyük bir bölümünden yararlanılarak fotometrik, tayfsal, polarimetrik, interferometrik ve mikromerceklemeye gibi teknikler yardımıyla aktif yıldızların yüzey parlaklık dağılımı anormalliklerinin altında yatan fiziksel süreçlere ilişkin oldukça önemli bulgular elde edilebilmiştir. Bu gözlem / analiz tekniklerinden bazılarının ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

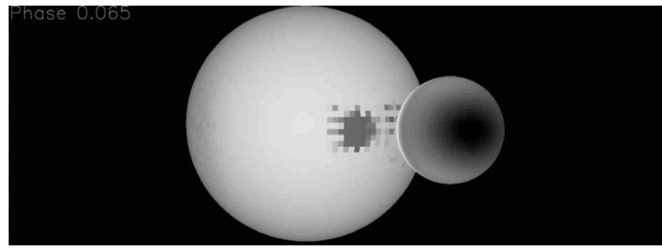
2.1 Işık Eğrisi Analizi

Fotometrik gözlemler ve dolayısıyla ışık eğrisi analizi, yıldız aktivitesi çalışmalarında en yoğun kullanılan tekniklerden

birisidir. Özellikle son yıllarda Kepler Uzay Teleskobu tarafından elde edilen oldukça yüksek kaliteli veriler, fotometrik analizlerin yıldız aktivitesi açısından önemini bir adım daha öne çıkarmıştır.

Işık eğrisinde görülen leke kaynaklı salınımların genliği lekenin büyüklük ve kontrastının birleşik etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu etkiyi birbirinden ayırabilmek ve lekenin davranışını anlayabilmek için ışık eğrisinin birden fazla filtrede elde edilmiş zaman serisi şeklinde çok sayıda gözlemi gerekmektedir. Literatürde ışık eğrilerindeki leke kaynaklı modülasyonların modellenilebildiği “doğrudan” (direct) ve “tersinden” (inversion) olmak üzere iki tür yaklaşımı temel alan ışık eğrisi analiz teknikleri mevcuttur. Doğrudan ışık eğrisi analiz teknikleri, “deneme – yanılma” yöntemiyle dairesel şekilli leke yaklaşımı modeline dayanmaktadır (Vogt 1981). Bu tekniğin en büyük dezavantajı oldukça fazla sayıda serbest parametreye sahip olması ve lekelerin geometrisi ile birlikte dağılımlarının belirli kabuller ve kısıtlamalar altında yapılmasıdır. Öte yandan LCI (Light Curve Inversion) yöntemi, fotosfer ve leke sıcaklığı olmak üzere iki sıcaklık modeline dayanan ve her bir pikseldeki akının bu iki sıcaklığa ek olarak lekelerin kapladığı alan parametresi ile birlikte ağırlıklandırıldığı bir analitik ifadeye dayanmaktadır. Herhangi bir anda yıldızın gözlenen akısı ilgili evrede görülen yüzey elemanlarının (piksellerin) şiddet katkısının toplamıdır. Sonuçta elde edilen yüzey haritası, lekelerin kapladığı alanların yıldız yüzeyi üzerindeki dağılımı olarak elde edilir (Berdugina ve ark. 2002). Işık eğrileri tek boyutlu zaman serileri olmaları nedeniyle analiz sonuçlarında elde edilen yüzey haritaları sadece boylamsal leke dağılımlarıyla ilgili bilgiler vermektedir.

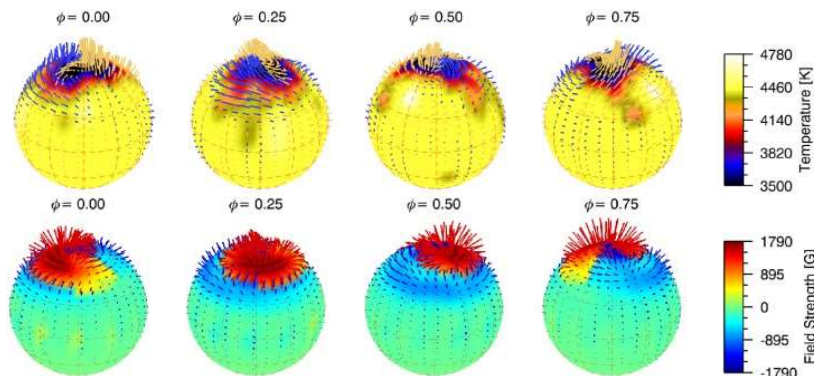
Işık eğrileri kullanılarak lekelerle ilişkin daha detaylı bilgi, çift yıldızlar için özel bir koşul altında elde edilebilir. Eğer bileşenlerden birinin diğer bileşene bakan yüzeyinde soğuk bir leke varsa, tutulma esnasında diğer bileşen bir “tarayıcı” gibi davranarak bu lekeyi örterken, tutulma profilinde bir asimetriye neden olur. Lekelerin ışık eğrisinde yarattığı bu etki “Tutulma Haritalaması” (Eclipse Mapping) tekniği ile modellenilebilmektedir. Collier Cameron (1997) tarafından geliştirilen ve Maksimum Entropi yöntemine dayalı DoTS kodu, literatürde bu türden Tutulma Haritalaması analizi gerçekleştirmek için kullanılan kodlardan bir tanesidir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1: KIC 11560447 örten çift yıldızının Eclipse Mapping yöntemiyle elde edilen yüzey parlaklık dağılımı

2.2 Zeeman Doppler Görüntüleme

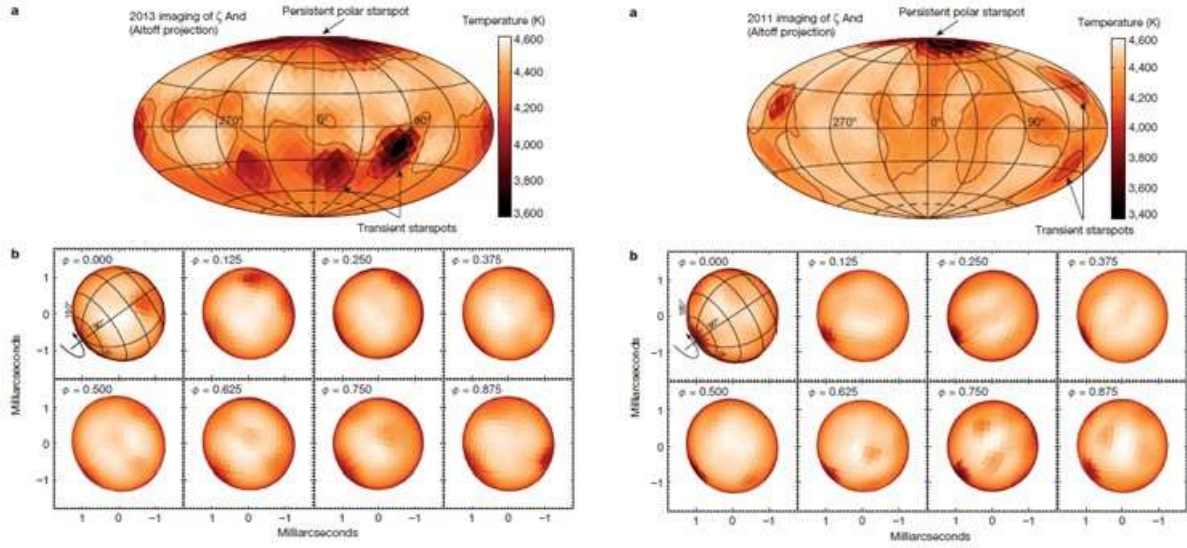
Zeeman Doppler Görüntüleme (ZDI) tekniği ilk kez Semel (1989) tarafından ortaya atılmış ve Donati ve ark. (1989), Semel ve ark. (1993), Brown ve ark. (1991), ve Donati & Brown (1997) tarafından geliştirilmiştir. Teknik, yüksek çözünürlüklü spektropolarimetrik veriler kullanılarak farklı Doppler kaymasına sahip Zeeman yarılmasına uğramış çizgi profillerinin analiziyle yıldız yüzeyindeki manyetik alan dağılımının belirlenmesi temeline dayanır. Atomik çizgilerde leke kaynaklı Zeeman yarılması oldukça düşük olup algılamak zordur. Bu bağlamda, sinyal / gürültü oranını arttırmak amacıyla, Donati ve ark. (1997) tarafından geliştirilen ve birden çok atomik çizgi kullanılarak en küçük kareler dekonvolüsyonu (LSD) tekniği ile oluşturulan hız profilleri kullanılarak yüksek duyarlıklı manyetik alan haritaları elde etmek mümkündür (bkz. Şekil2).



Şekil 2: V410 Tau yıldızının sıcaklık yüzey manyetik alan haritası (Carroll ve ark. 2012)

2.3 İnterferometri

İnterferometri tekniği kullanılarak yıldız yüzeyi parlaklık dağılımının belirlenmesine ilişkin oldukça güncel ve ses getiren bir çalışma Roettenbacher ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada, yaklaşık 181 ışık yılı uzaklığındaki K1 tayf türünden RS Cvn türü ζ And'm Mount Wilson'da bulunan CHARA dizisini kullanarak 1.5 – 1.8 μ m dalgaboyu aralığında ve 0.5 mili yay saniyesi açısız çözünürlükle yapılan interferometrik gözlemleriyle yüzey parlaklık dağılımı haritası elde edildi (bkz. Şekil 3).

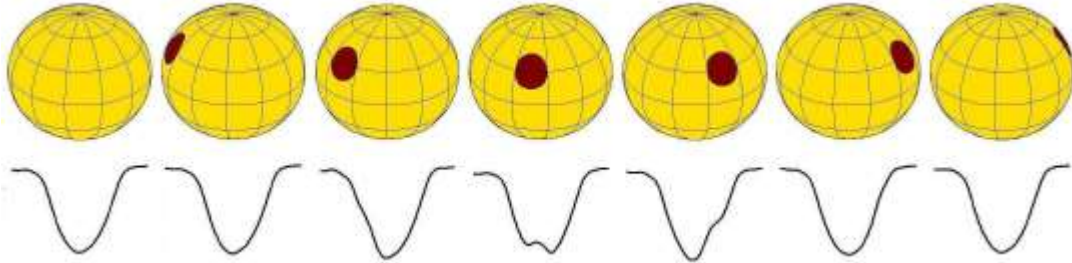


Şekil 3: ζ And'ın interferometri yöntemi kullanılarak elde edilen 2011 (sol panel) ve 2013 (sağ panel) yılları yüzey parlaklık dağılımı haritası (Roettenbacher ve ark. 2016).

İlgili çalışmada yazarlar, yıldıza ilişkin 2011 ve 2013 yıllarında elde ettikleri haritalarda “kalıcı” bir kutup lekесinin varlığından bahsetmiş ve baskın lekelerin Güneş'tekinden farklı olarak sırasıyla kuzey ve güney yarı kürede görüldüklerini belirterek ζ And'ın dinamo mekanizmasının Güneş örneğinden çok daha karmaşık olduğunu ifade etmişlerdir.

2.4 Doppler Görüntüleme

Doppler Görüntüleme Tekniği, tayfsal çizgi profillerindeki zamana bağlı şekilsel (geometrik) değişimlerin modellenmesiyle yıldızların yüzey parlaklık dağılımına ilişkin haritalarının elde edilmesine olanak vermektedir. Teknik ilk olarak Deutsch (1958) tarafından önerilmiş ve ilk Doppler görüntüsü RS Cvn türü HR1099 yıldızı için Vogt ve Penrod (1983) tarafından elde edilmiştir. Doppler Görüntüleme Tekniği, pekçok araştırmacı tarafından (örn. Collier-Cameron, 1992; Vogt ve ark., 1999; Hatzes & Kürster, 1999; Strassmeier, 2002; Berdyugina, 2005; Strassmeier, 2009 ve içerisindeki referanslar) aktif yıldızların yüzey parlaklık dağılımındaki anormallikleri belirlemek ve haritalamak amacıyla kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisi, yıldız yüzeylerinin doğrudan görüntülenmesinde yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla Doppler Görüntüleme Tekniği'nde lekelerin yüzey üzerindeki dağılımı “tersinden” (inversion) bir yöntem yardımıyla elde edilebilmektedir. Bu da, yukarıdaki tanımda da verildiği gibi, zamana bağlı değişim gösteren çizgi profillerinin modellenmesine dayanmaktadır. Yüzeydeki bir soğuk leke, çizgi profili üzerinde varlığını salma çizgisine benzer bir “hörgüç” yapı olarak gösterir. Özetle bu yapı, ilgili dalgaboyundaki soğurma için, lekenin varlığı nedeniyle bulunduğu hız diliminde sürekliliğe katkıda bulunan fotonların soğurulmasında meydana gelen azalmanın bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu hörgüç yapı, yıldızın dönmesi sonucu lekenin yıldız diski üzerinde hareket etmesiyle, çizgi profili boyunca mavi kanattan kırmızı kanada doğru hareket eder (bkz Şekil 4).



Şekil 4: Lekenin yıldız diski üzerinde hareketine bağlı olarak hörgüç yapısının profil üzerindeki hareketi (Kovari 2004).

Hörgüç yapısının profil merkezini kestiği andaki evre, lekenin boylamı hakkında bilgi verir. Doppler Görüntüleme Tekniği aynı zamanda leke enleminin belirlenmesine de olanak sağlamaktadır. Ekvatora yakın leke bölgelerinin oluşturduğu hörgüç yapıların, çizgi profilleri üzerinde kapsadığı dalgaboyu aralığı daha geniş iken ekvatoral uzak lekelerin oluşturduğu hörgüç yapıları için bu aralık daha düşüktür. Kutup bölgelerine yakın lekelerin oluşturduğu hörgüç yapıları, profil merkezine yakın bölgelerde belirir ve yine yakın bölgelerde kaybolur. Düşük enlemlile lekelerin neden olduğu hörgüç yapıları neredeyse yarım-yörünge dönemi boyunca görülebilir, yani, profilin mavi kanadının en ucundan kırmızı kanadının en ucuna kadar varlıkları izlenebilmektedir. Yıldızın yörünge dönemi boyunca görünür olan kutup bölgesi üzerindeki bir soğuk lekenin oluşturduğu hörgüç yapısı ise tüm yörünge evresi boyunca profil merkezinde sabit kalır. Eğer bir yıldızda birden fazla, farklı enlemlere dağılmış

lekeler var ise bu lekelerin ayrı ayrı, disk boyunca hareketleri modellenebilir. Bu da yıldızın dönmesinin, enlemin bir fonksiyonu olarak elde edilmesine, bir başka deyişle diferansiyel dönmenin hesaplanmasına olanak sağlar

2.5 Moleküler Band Analizleri

Moleküler çizgiler, aktif yıldızların yüzeyindeki soğuk lekelerin varlığına ilişkin doğrudan kanıt olarak gösterilmektedir. Eğer yıldız fotosferinin etkin sıcaklığı yeterince yüksekse, tayfta görülen moleküler çizgiler sadece ve sadece soğuk lekelerin varlığının bir sonucudur. Leke kaynaklı moleküler bandların oluşumuna ilişkin ilk çalışma Vogt (1979) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada K2 tayf türü HD 224085 tayfında görülen TiO ve VO bandlarının eşdeğer genişlik ve göreceli şiddet ölçümlerinden lekenin varlığı ve sıcaklığının M6 tayf türünden olduğu tespit edilmiştir. TiO bandlarının evreye bağlı şiddet değişimiyle birlikte fotometrik minimumda şiddetinin en yüksek olması ve dolayısıyla ışık eğrisindeki genlik değişiminin leke kaynaklı olduğunun kanıtı Huenemoerder ve ark. (1989) tarafından RS CVn türü II Peg yıldızına ilişkin gerçekleştirilen analizler sonucu ortaya konmuştur. Huenemoerder & Ramsey (1987), TiO moleküler bandlarını kullanarak lekelerin yüzeyde kapladığı alanları belirleyebilecekleri bir teknik önerdiler. Teknik esasen aktif yıldızın 8860 Å'daki TiO bandını "sakin" fotosferi aktif olmadığı bilinen bir yıldızın tayfı, "lekeli" fotosferi ise örneğin M tayf türünden bir yıldızın tayfı ile sentezlenerek modellenmesine dayanmaktadır. Neff ve ark. (1995) ve O'Neal ve ark. (1996) tarafından teknik, 8860 Å'daki TiO bandına ek olarak 7055 Å dalgaboyundaki TiO moleküler bandını da kullanarak lekelerin kapladığı alan (fs) ve sıcaklık faktörlerine (Ts) ilişkin daha detaylı sonuçlar elde edilecek şekilde geliştirildi. Geliştirilen modelin bir öncekine nazaran en büyük avantajı, her iki dalgaboyundaki TiO bandı kullanılarak farklı Ts değerleri için elde edilen fs değerlerinin kesiştiği (veya çakıştığı) parametre setinin ilgili yıldız yüzeyindeki leke parametreleri için en iyi çözüm olarak belirlenebilmesidir.

1.5 µm'deki OH molekülü soğurmasının aktivite duyarlılığı O'Neal & Neff (1997) ve O'Neal ve ark. (2001) tarafından belirlendi. OH molekülünün aktivite araştırmalarında TiO molekülüne göre en büyük avantajı, TiO molekülünün 4000 K ve daha düşük sıcaklıklarda gözlenebilmesiyle OH molekülünün 5000 K ve daha düşük sıcaklıklarda gözlenebilmesidir. Dolayısıyla OH molekülü, leke sıcaklığı daha yüksek olan aktif yıldızların leke özelliklerinin moleküler band analizleri yardımıyla araştırılmasını olanaklı kılmaktadır.

Berdyugina ve ark. (2000) Güneş'in spektropolarimetrik gözlemlerinden 5200 Å'daki MgH molekülünün manyetik aktiviteye oldukça duyarlı olduğunu gösterdi. Valenti ve ark. (2001) FeH molekülünün aktif M yıldızı GJ725B'de görüldüğünü ve manyetik aktivite belirteci bir molekül olarak kullanılabilceğini belirtti. Berdyugina (2002), 7055 Å'daki TiO çizgilerinin spektropolarimetrik gözlemlerinden, diğer tekniklerle ayırt edilemeyen lekelerin manyetik alan şiddetlerinin ölçülebileceğini göstermiştir. Berdyugina ve ark. (2006) yine Güneş'in spektropolarimetrik gözlemlerini kullanarak CaH molekülünün de manyetik aktiviteye duyarlı bir molekül olduğunu belirledi. Afram (2015), G-K-M küce yıldızları lekenin kapladığı alan parametresinin %10 olduğu farklı leke sıcaklık ve alan parametreleri kullanarak ürettikleri sentetik profillerle, TiO, MgH, CaH ve FeH moleküllerinin aktivite duyarlılığını test eden detaylı bir çalışma gerçekleştirdiler. İlgili çalışmada, yukarıda bahsi geçen 4 molekülün farklı sıcaklıklarda farklı duyarlılıklara sahip olduğu belirlenmiştir.

3. Titanyum Oksit (TiO) Bandı Analizi

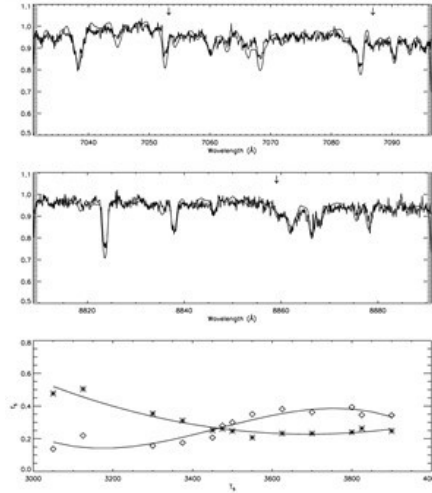
Huenemoerder & Ramsey (1987) tarafından ortaya atılan ve daha sonra Neff ve ark. (1995) ile O'Neal ve ark. (1996) tarafından geliştirilen teknik, 7055 Å ve 8860 Å bölgelerindeki TiO moleküler bandlarının derinliğinin eş zamanlı olarak modellenmesiyle lekelerin kapladığı alan (fs) ve leke sıcaklığı (Ts) parametrelerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Lekelerin yıldız yüzeyinde kapladığı toplam alan (fs) ve leke sıcaklıklarının (Ts) TiO bandları kullanılarak hassas bir şekilde belirlenebildiği teknikte; aktif olmadığı bilinen G ve K türü yıldızların gözlemsel tayfını aktif yıldızın lekesiz fotosferini, M türü yıldız tayflarını ise lekeyi modellemek için kullanmaktadır. Bu bağlamda O'Neal ve çalışma grubu (O'Neal ve ark. 2004 ve içerisindeki referanslar) çoğunlukla McDonald Gözlemevi'ndeki 2.1 m'lik Otto Struve Teleskobu ve ona bağlı Sandiford Eşel tayfçelerini kullanarak birçok aktif ve aktif olmayan yıldızın 6500 Å – 9000 Å dalgaboyu aralığında yüksek çözünürlüklü (R~50000) tayflarını elde ederek modellediler. Strassmeier (1999), RS CVn türü HD12545 yıldızına ilişkin gerçekleştirdiği Doppler analizi sonucu yıldızın %11'ini kapsayan ve sıcaklığı fotosfer sıcaklığından ($T_Q = 4750$ K) 1300 ± 120 K daha düşük olan büyük boyutlu bir kutup lekesinin varlığını belirledi. O'Neal ve ark. (2004), aynı yıldızla ilişkin 2001 verilerini kullanarak gerçekleştirdikleri TiO bandı analizinde ise 3425 ± 120 K sıcaklığında ve yıldızın %31 ~ 35 ± 5 'ini kapsayan bir leke/lekelerin varlığını belirlediler. Kimble ve ark. (1981) başka bir RS CVn türü DM UMa'nın fotometrik gözlemlerinden, yörünge eğimine bağlı olarak yıldızın %16 ~ %33'ünün lekelerle kaplı olduğunu belirlediler. Hatzes (1995), yine aynı yıldız için Doppler analizinden leke sıcaklığını 3300 K olarak elde etti. O'Neal ve ark. (2004) tarafından gerçekleştirilen TiO bandı analizleri, DM UMa'nın leke alanının %28 ~ %42 arasında ve leke sıcaklığının 3400 K ~ 3475 K aralığında olduğunu gösterdi. Strassmeier (1994), Doppler tekniği kullanarak RS CVn türü HU Vir'in yüzeyinde, yıldızın ~%10'unu kaplayan ve 3500 K ~ 4000 K sıcaklığa sahip bir kutup lekesinin varlığını belirledi. Aynı yıldız için O'Neal ve ark. (1998) gerçekleştirdikleri TiO bandı analizinde leke/lekelerin 3440 ± 100 K sıcaklığında ve yıldız yüzeyinin %44 ± 6'sını kapladığını belirlediler. Modelleme esnasında kullanılan standart yıldızlar, yüzey çekiminin de (logg) modellenmesi açısından dev ve küce yıldızları içermektedir. Farklı sıcaklıklarda her iki dalgaboyundaki TiO bandlarının göreceli soğurma şiddeti Ts parametresine ilişkin bilgiler verirken, yine her iki dalgaboyundaki bandların derinlikleri ise fs parametresinin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. 7055 Å dalgaboyundaki TiO bandı K2 tayf türünden bir küce yıldızın tayfında görülmeye başlarken 8860 Å dalgaboyundaki TiO bandı M2 tayf türünden sonra görülebilmektedir. Sırasıyla Ts (leke sıcaklığı) ve T_Q (lekesiz fotosfer sıcaklığı) sıcaklıklarındaki F_s ve F_Q normalize standart yıldız tayfları aşağıdaki analitik ifade yardımıyla sentezlenerek yarı – sentetik tayflar (F_{tot}) elde edilmektedir.

$$F_{\text{tot}} = \frac{f_s R_\lambda F_s + (1 - f_s) F_Q}{f_s R_\lambda + (1 - f_s)}$$

Burada R_λ parametresi sırasıyla hedef yıldızın lekeli ve lekesiz fotosferini modellemek için kullanılan F_s ve F_Q standart yıldız tayflarının süreklilik akıları oranıdır ve model atmosferler yardımıyla hesaplanmaktadır.

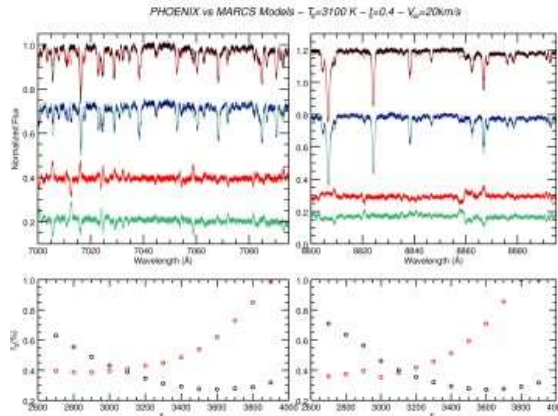
Aktif yıldızın tayfi, fiziksel özellikleri (Teff ve logg) doğrultusunda belirlenen standart yıldızlar (lekeli ve lekesiz fotosferi modellemek üzere) kullanılarak her iki dalgaboyundaki TiO bandları için modellenmektedir. Bu bağlamda hedef yıldızın lekeli ve lekesiz fotosferini temsil etmek üzere kullanılan her olası standart yıldız çifti için (dolayısıyla farklı TS değerlerinde) en küçük kareler yöntemi yardımıyla gözlemsel tayfa en iyi uyum gösteren yarı – sentetik modelin f_s değeri elde edilir. Bu aşama hem 7055 Å hem de 8860 Å bölgerleri için gerçekleştirilerek her bir T_s değerine karşılık en küçük kareler yöntemiyle hesaplanan f_s değerleri her iki dalgaboyundaki TiO bandları için grafiğe aktarılır. Çizilen grafikte, farklı iki dalgaboyundaki TiO bandları için farklı TS değerlerine karşılık gelen f_s değerlerinin kesişimine yapılan üçüncü dereceden polinom fiti sonucu elde edilen değer hedef yıldız için en uygun T_s ve f_s değerini verir. İlgili yönteme ilişkin hatalar her iki dalgaboyundaki TiO bandına ilişkin farklı TS değerlerine göre elde edilen f_s değerlerine yapılan polinom fitiyle noktalar arasındaki artıkların varyansından ($\sigma(f_s)$) hesaplanmaktadır. O'Neal ve ark. (2004) tarafından yukarıda detayları verilen teknik kullanılarak DM UMa yıldızına ilişkin gerçekleştirilen TiO band analiz sonuçları Şekil 5'de verilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi mevcut TiO analiz tekniği aktif yıldızların lekesiz bölgelerinden gelen katkıyı modelleyebilmek için literatürde aktif olmadığı bilinen G ve K türü dev ve cüce, lekeyi modellemek için ise M türü dev ve cüce yıldızların gözlemsel verilerini model olarak kullanılmaktadır. Bu varsayım altında bu zamana kadar gerçekleştirilmiş analizler oldukça başarılı sonuçlar vermiş olsa da yöntemin daha da etkin çalışabilmesi için aktif yıldızların lekesiz ve lekeli bölgelerinden gelen katkı gözlemsel veriler yerine model atmosfer yaklaşımı kullanılarak modellendi. Bu bağlamda, Dr. Douglas O'Neal ile birlikte uluslararası ortaklık kapsamında, RS Cvn türü aktif yıldız II Peg'e ilişkin gerçekleştirdiğimiz analizlerinde (Şenavcı ve ark. 2015) sistemin McDonald Gözlemevi'nde elde edilmiş yüksek çözünürlüklü tayfları DoTS kodu kullanılarak Doppler görüntüleme ve ATLAS9 atmosfer modeli kullanılarak TiO bandı teknikleriyle analiz edilmiştir.



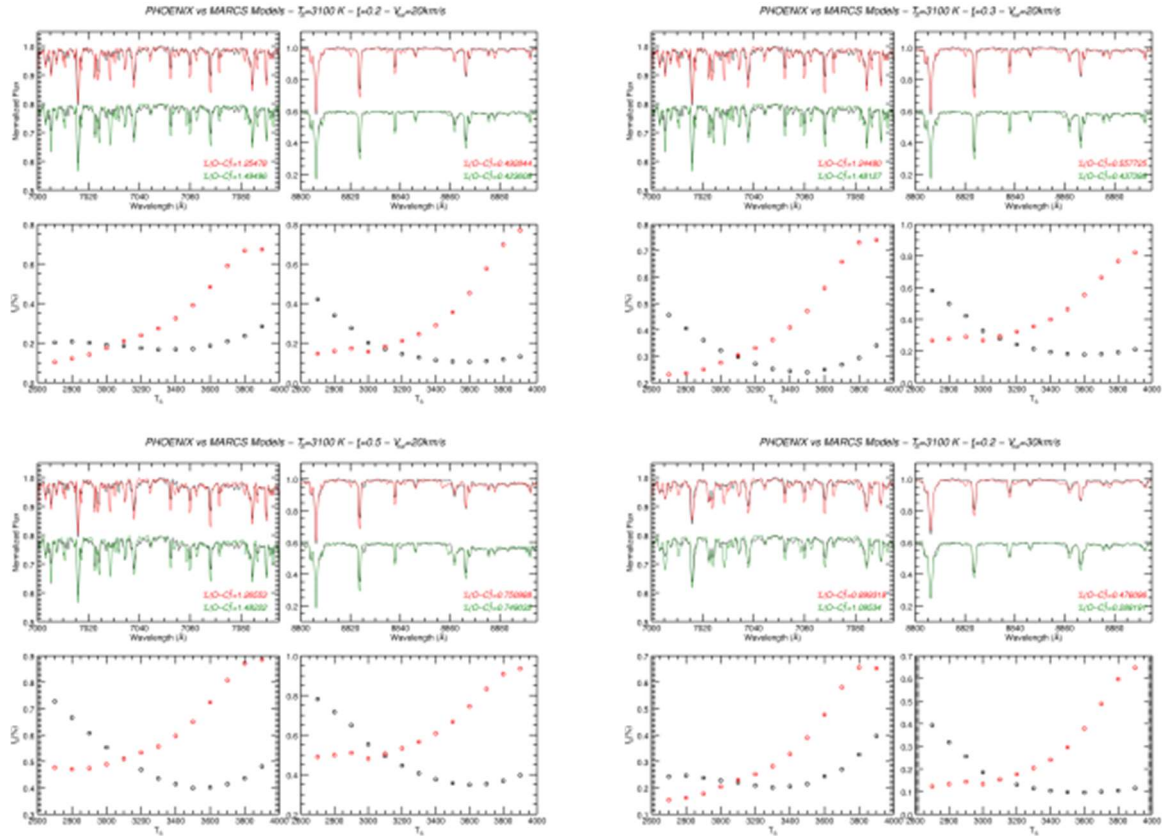
Şekil 5: İlk iki panel: DM UMa yıldızının 7055 Å ve 8860 Å bölgeleri için gözlemsel ve kuramsal TiO molekül bölge tayfları. Üçüncü panel: Sistemin TiO bandı analizi sonucu 7055 Å (yıldız) ve 8860 Å (baklava) TiO molekül bölgesi için ilgili T_s değerlerine karşılık elde edilen en iyi f_s değerleri (O'Neal ve ark., 2004).

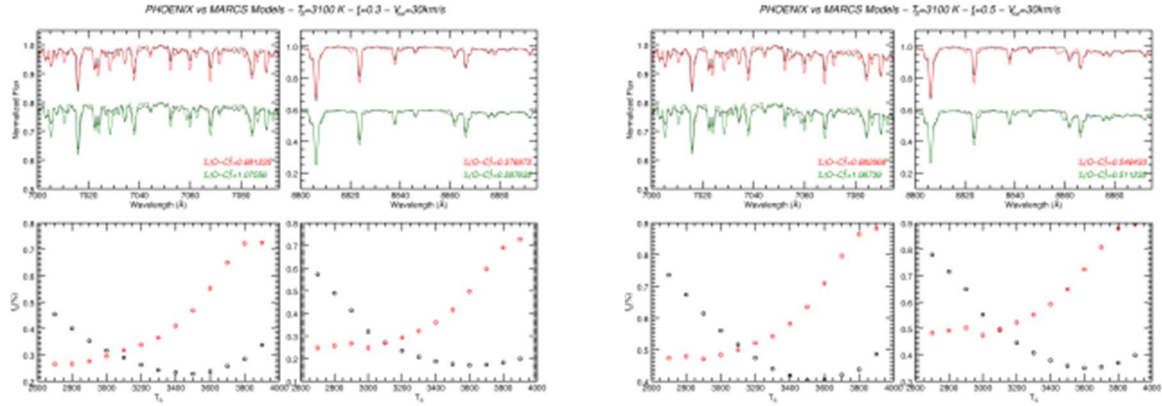
Elde edilen sonuçlara göre Doppler görüntüleme tekniğinden yüzeyin (lekelerin kapladığı alan – f_s) %6.2'sinin lekelerle kaplı olduğu bulunurken bu değer TiO bandı analizlerinden yaklaşık %50 olarak elde edilmiştir. Her ne kadar ATLAS9 modeli kullanılarak II Peg'in TiO band analizi için 3000 K – 4000 K aralığında çözüme yakınsayan alt-dev modelleri elde edebilmiş olsa da cüce yıldızlar için bu tür sıcaklıklarda ATLAS9 ile çözüme yakınsayan modeller elde edilemedi. Bunun üzerine amaçlarımız doğrultusunda düşük sıcaklıklarda sentetik tayf elde edebilmek için MARCS (Gustafsson ve ark. 2008) ve PHOENIX (Allard ve ark. 2012a & 2012b) atmosfer modelleri test edildi. Bu bağlamda her iki atmosfer modeliyle leke ve fotosfer sıcaklıkları için sırasıyla $2700 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 3900 \text{ K}$ ve $4000 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$ arasında sentetik tayflar üretildi. Her iki atmosfer modeli için detaylı TiO bandı çizgi listesi Plez (1998)'den alındı. Uluslararası ortaklık kapsamında Dr. Douglas O'Neal ile birlikte geliştirilen ve TiO band analiz tekniğini temel alan IDL kodu ile MARCS / PHOENIX atmosfer modelleriyle tekniğin uyumunu içeren detaylı bir çalışma Şenavcı ve ark. (2016) tarafından gerçekleştirildi. İlgili çalışmada gerçekleştirilen ilk test kapsamında PHOENIX atmosfer modeli kullanılarak $T_Q = 5000$, $T_S = 3100$ ve $f_s = 0.4$ parametreleriyle sentetik tayf oluşturuldu ve bu tayfa $\sigma = \pm 0.015$ mertebesinde gürültü eklendi. Bu aşamadan sonra üretilen bu “gürültülü” tayf, MARCS model atmosferleri kullanılarak üretilen sentetik tayflar yardımıyla modellendi. Ek olarak, yukarıda belirtilen parametreler kullanılarak, bu defa MARCS atmosfer modeliyle başka bir gürültülü tayf üretilerek PHOENIX modelleri yardımıyla üretilen sentetik tayflar kullanılarak modellendi. İlgili tayflara yapılan fitler ve artıkları Şekil 6'da verildi.



Şekil 6: MARCS ve PHOENIX modellerinin karşılaştırılması. Sol üst panel: MARCS (siyah çizgi) ve PHOENIX (mavi çizgi) modelleri kullanılarak $T_Q = 5000$, $T_S = 3100$ ve $f_s = 0.4$ parametreleriyle 7055 \AA bölgesi için üretilen gürültülü sentetik tayf ve PHOENIX (kırmızı tayf) ve MARCS (yeşil tayf) modelleriyle ilgili sentetik tayflara yapılan fitler ve artıkları. Sağ üst panel: 8860 \AA bölgesi için üretilen sentetik tayf, fitler ve artıkları. Alt panel: 7055 \AA (kırmızı daire) ve 8860 \AA (siyah daire) bölgeleri için her T_S sıcaklığına karşılık elde edilen en iyi f_s değerleri.

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi her iki atmosfer modeli kullanılarak üretilen gürültülü sentetik tayflara, yine her iki model yardımıyla yapılan fitler oldukça uyumlu olup 7055 \AA ve 8860 \AA fitlerinin kesişimi gerçekten de $T_S = 3100$ ve $f_s = 0.4$ sonucunu vermektedir. Bu çalışma kapsamındaki diğer test HD100623 ($K0V - T_{\text{eff}} = 5300 \text{ K}$) ve HD34055 ($M6V - T_{\text{eff}} = 3100 \text{ K}$) yüksek çözünürlüklü UVES tayfları (Bagnulo ve ark. 2003) kullanılarak gerçekleştirildi. Bu bağlamda, her iki yıldızın tayfı kullanılarak (HD100623 fotosfer, HD34055 leke için) farklı f_s değerleri ($f_s = 0.2, 0.3, 0.5$) ve dönme hızlarında ($V_{\text{rot}} = 20 \text{ km/sn}, 30 \text{ km/sn}$) yarı – sentetik tayflar üretilerek her iki atmosfer modeli yardımıyla elde edilen sentetik tayflar ile modellenmiştir. Sonuçlar, Şekil 7'de verildi.





Şekil 7: Farklı f_s ve dönme hızı değerlerinde UVES verisi kullanılarak oluşturulan yarı – sentetik tayflara yapılan MARCS ve PHOENIX modelleri. Üst panel: 7055 Å ve 8860 Å bölgelerine yapılan PHOENIX (kırmızı tayf) ve MARCS (yeşil tayf) fitleri. Alt panel: 7055 Å (kırmızı daire) ve 8860 Å (siyah daire) bölgeleri için her T_s sıcaklığına karşılık elde edilen en iyi f_s değerleri.

Şekil 7'den de görüldüğü gibi farklı f_s ve dönme hızı kullanılarak elde edilen yarı – sentetik tayflara yapılan MARCS ve PHOENIX fitleri oldukça uyumlu olup beklenen f_s ve T_s değerlerinde sonuç vermiştir. Bu da ilgili çalışma kapsamında geliştirilen kodun ve kullanılan model atmosferlerin TiO moleküler band analizleri açısından oldukça kullanışlı olduğunun bir göstergesidir.

4. Tartışma ve Sonuç

-Soğuk yıldızların üst atmosferlerinde manyetik aktivite kaynaklı yüzey parlaklık dağılımı anormalliklerinin araştırılması pek çok farklı teknik ve ekromanyetik spektrumun farklı bölgeleri kullanılarak yapılabilmektedir. Her ne kadar son yıllarda elde edilen veriler oldukça yüksek kaliteli olsa da bu çalışmada özetlenen tekniklerin tek başına kullanılması yıldızların manyetik aktivite doğaları hakkında çok da tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Örneğin Yapılan birçok test, Doppler Görüntüleme Tekniği ile elde edilen haritalar kullanılarak belirlenen ekvator civarındaki lekelerin kapladığı alan parametresinin olması gerektiği gerçek değerinden daha düşük ve daha az kontrasta sahip olduklarını göstermiştir. Bununla birlikte, ekvatorun altında (güney yarıkürede) bulunan lekelerin modellenmesi, her iki yarıküredeki Doppler kaymasının ekvatora göre simetrik olmasından dolayı, oldukça zordur (Rice, 2002). Doppler Görüntüleme Tekniği sadece büyük boyutlu lekeleri tespit edebilmektedir. Bununla birlikte Güneş'te, oldukça farklı boyutlarda dağılım gösteren lekelerin varlığı bilinmektedir. Bu dağılım, daha aktif ve dolayısıyla daha çok leke içeren yıldızlarda bile Doppler Görüntüleme Tekniği ile ayırt edilemeyen küçük lekelerin varlığını gerektirmektedir (Solanki & Unruh, 2004). Bu durum hem fotometrik analiz hem de Doppler Görüntüleme Tekniği uygulanan yıldızlarda, fotometrik analiz sonucu elde edilen lekelerin toplam kapladığı alan parametresinin Doppler Görüntüleme Tekniği kullanılarak elde edilene nazaran daima daha büyük çıkması ile desteklenmektedir (Unruh, Collier-Cameron & Cutispoto, 1995). Bu bağlamda moleküler band analizleri yavaş dönen yıldızlarda bile leke parametrelerinin daha duyarlı belirlene bilmesi bakımından bir adım öne çıkmaktadır. Dolayısıyla manyetik aktivite çalışmalarında eş zamanlı gerçekleştirilecek Doppler görüntüleme, ışık eğrisi ve moleküler band analizleri sayesinde soğuk yıldızlarda manyetik aktivite doğasına ilişkin daha detaylı bulgular elde edilebilir. Bu da özellikle Güneş'ten daha aktif yıldızlarda süregelen “manyetik dinamo” doğasının temelindeki süreçleri tanımlamamız bakımından önemli ipuçları elde etmemize olanak sağlar.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1001-115F033 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- Afram, N., Berdyugina, S. V. 2015, A&A, 576A, 34A
Allard, F., Homeier, D., Freytag, B. 2012a, RSPTA, 370, 2765
Allard, F., Homeier, D., Freytag, B., Sharp, C. M. 2012b, EAS, 57, 3
Babcock, H. W. 1961, ApJ, 133, 572
Bagnulo, S., Jehin, E., Ledoux, C., Cabanac, R., Melo, C., ve ark. 2003, The Messenger, 114, 10.
Berdyugina, S. V. 1998, A&A, 338, 97
Berdyugina, S. V. 2002, AN, 323, 192
Berdyugina, S. V. 2005, LRSP, 2, 8
Berdyugina, S. V., Fluri, D. M., Ramelli, R., Bianda, M., Gisler, D., Stenflo, J. O. 2006, ApJ, 649, 49
Berdyugina, S. V., Frutiger, C., Solanki, S. K., Livingstone, W. 2000, A&A, 346L, 101
Berdyugina, S. V., Pelt, J., Tuominen, I. 2002, A&A, 394, 505
Brown, S. F., Donati, J.-F., Rees, D. E., Semel, M. 1991, A&A, 250, 463
Carroll, T. A., Strassmeier, K. G., Rice, J. B., Künstler, A. 2012, A&A, 548, 95



- Collier-Cameron, A. 1992, LNP, 397, 33
Collier-Cameron, A. 1997, MNRAS, 287, 556
Deutsch, A. J. 1958, IAUS, 6, 209
Donati, J.-F., Brown, S. F. 1997, A&A, 326, 1135
Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B. D., Rees, D. E., Collier Cameron, A. 1997, MNRAS, 291, 658
Donati, J.-F., Semel, M., Praderie, F. 1989, A&A, 225, 467
Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., Jørgensen, U. G., Nordlund, Å., Plez, B. 2008, A&A, 486, 951
Hatzes, A. P., Kürster, M. 1999, A&A, 346, 432
Hatzes, A.P. 1995, AJ, 109, 350
Huenemoerder, D. P., Ramsey, L. W. 1987, ApJ, 319, 392
Huenemoerder, D. P., Ramsey, L. W., Buzasi, D. L. 1989, AJ, 98, 2264
Kimble, R. A., Kahn, S. M., Bowyer, S. 1981, ApJ, 251, 585
Kovari, Z., Weber, M. 2004, PADEU, 14, 221
Neff, J. E., O'Neal, D., Saar, S. H. 1995, ApJ, 452, 879
O'Neal, D., Neff, J. E. 1997, AJ, 113, 1129
O'Neal, D., Neff, J. E., Saar, S. H. 1998, ApJ, 507, 919
O'Neal, D., Neff, J. E., Saar, S. H., Cuntz, M. 2004, AJ, 128, 1802
O'Neal, D., Neff, J. E., Saar, S. H., Mines, J. K. 2001, AJ, 122, 1954
O'Neal, D., Saar, S. H. ve Neff, J. E. 1996, ApJ, 463, 766
Piskunov, N. E., Tuominen, I., Vilhu, O. 1990, A&A, 230, 363
Plez, B. 1998, A&A, 337, 495
Rice, J. B., Strassmeier, K. G. 2000, A&AS, 147, 151
Rice, J.B. 2002, AN, 323, 220
Roettenbacher, R. M., Monnier, J. D., Korhonen, H. ve ark. 2016, Nature, 533, 217
Semel, M. 1989, A&A, 225, 456
Semel, M., Donati, J.-F., Rees, D. E. 1993, A&A, 278, 231
Solanki, S. K., Unruh, Y. C. 2004, MNRAS, 348, 307
Strassmeier, K. G. 1994, ASPC, 55, 205
Strassmeier, K. G. 1999, A&A, 347, 225
Strassmeier, K. G. 2002, AN, 323, 309
Strassmeier, K. G. 2009, A&APR, 17, 251
Şenavcı, H. V., O'Neal, D., Hussain, G. A. J., Barnes, J. R. 2015, csss, 18, 665
Şenavcı, H. V., O'Neal, D., Montes, D., Plez, B., Allard, F., Bahar, E. 2016, csss, 113
Unruh, Y. C., Collier Cameron, A., Cutispoto, G. 1995, MNRAS, 277, 1145
Valenti, J. A., Johns-Krull, C. M., Piskunov, N. E. 2001, ASPC, 223, 1579
Vogt, S. S. 1979, PASP, 91, 616
Vogt, S. S. 1981, ApJ, 250, 327
Vogt, S. S., Hatzes, A. P., Misch, A. A., Kürster, M. 1999, ApJS, 121, 547
Vogt, S. S., Penrod, G. D. 1983, PASP, 95, 565
Vogt, S. S., Penrod, G. D., Hatzes, A. P. 1987, ApJ, 321, 496