

## Hassas Dikine Hız Ölçümü İle Güneş Sistemi Dışı Gezegen Araştırmaları

Mesut YILMAZ\* ve Selim O. SELAM

Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü;  
06100 Tandoğan-Ankara

**Özet** Bu çalışmada, ülkemizde yeni bir araştırma alanı olarak, uluslararası bir işbirliği çerçevesinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) başlattığımız güneş sistemi dışı gezegen arama çalışmalarımızın kaydettiği aşamalar ve özel bir donanım ve analiz yöntemi gerektiren hassas dikine hız ölçüm tekniğinin uygulanmasında ulaştığımız noktalar özetlendi. Uluslararası işbirliğimiz kapsamında TUG'un RTT150 teleskobunun Coude Eşel Tayfçekerine entegre ettiğimiz iyodin ( $I_2$ ) hücresi ile elde edilen tayflardan hassas dikine hız ölçümü yapabilmek amacıyla özgün bir yazılım geliştirildi. Bu yazılımda Valenti vd. (1995) ve Butler vd. (1996a)'nın iyodin hücresi ile eş zamanlı alınmış yıldız tayflarından hassas dikine hız ölçüm tekniği model olarak kullanıldı. TUG'da RTT150 teleskobu ve  $I_2$  hücresi eklentisi ile elde ettiğimiz dikine hız standardı ve gezegeni var olduğu bilinen yıldızların tayfları analiz edilerek mevcut donanımın hassas dikine hız ölçümlerindeki karakteristikleri ve limitleri belirlendi.

### 1 Giriş

Güneş Sistemi dışı gezegen araştırmaları, modern astronominin daima en ilgi çekici bilimsel araştırma konularından biri olmuştur. Bunun altında yatan temel neden ise, akıl almaz büyüklükteki kainatta bizlerden başka akıllı canlı varlıkların olup olmadığı sorusudur. Acaba gezegenleri olan tek yıldız Güneş mi? Yakın tarihe kadar başka yıldızların etrafında gezegenlerin var olduklarını tahmin edebiliyorduk ancak nerede ve ne kadar yaygın olduklarını bilmiyorduk. 1990'lı yıllardan itibaren yeni tekniklerin gelişmesiyle birlikte diğer yıldızların etrafındaki gezegenler hızla keşfedilmeye başlandı. Bu ilk keşiflerden bu yana (Ağustos 2010 tarihine kadar) 450'nin (bkz. <http://exoplanet.eu>) üzerinde Güneş Sistemi dışı gezegen keşfedildi. Bunlar çoğunlukla Jüpiter benzeri büyük kütleli dev gezegenlerdir. Henüz doğrulanmamış yeni saptamalar daha küçük Dünya benzeri gezegenlerin yakın bir tarihe kadar keşfedilebileceği sinyallerini vermektedir. Bu keşifler bize Güneş Sisteminin ve dolayısıyla gezegen oluşum senaryolarını test etme ve anlama imkanı vermektedir.

Bu mevcut bulgular ışığında G türü dev yıldızların çevresinde gezegen arama araştırmalarını hızlandırmak için Türkiye, Japonya ve Rusya'nın uluslararası

\* mesuty@science.ankara.edu.tr

işbirliği ile TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde (TUG) gezegen araştırma programı başlatıldı. Bu programın amacı, seçilmiş bazı G türü dev yıldızların TUG'da RTT150 teleskobu ve Coude Eşel Tayfçekeri (CET) kullanarak hassas dikine hızlarını elde etmek ve olası gezegen bileşenlerini ortaya çıkarmaktır. Bu amaca ulaşabilmek öncelikle RTT150 teleskobu ve  $I_2$  hücresi eklentisi yaptığımız CET'i için dikine hız ölçüm hassasiyetini belirlemek gerekmektedir.

### 1.1 Doppler Tekniği

Güneş sistemi dışı gezegen arama çalışmalarında kullanılacak en mantıklı yöntemlerin, gezegenlerin yıldızları üzerinde yarattıkları tedirginlik etkilerini algılamaya yönelik teknikler olması gerektiği net olarak ortaya çıkarıldı (bkz. Mayor ve Queloz (1995), Marcy ve Butler (1996), Butler ve Marcy (1996b) ). Bu anlamda, akla ilk gelen teknikler yıldızların tayf çizgilerindeki önemli Doppler kaymalarını veya gökküresi üzerindeki konumlarında oluşacak önemli yer değiştirmelerini algılamaya yönelik olanlardı. Bir yıldızın etrafında bulunun bir gezegen çekimsel bir tedirginlik yaratarak yıldızın salınımlarına neden olur. Yıldızın dikine hızındaki zamana göre bu değişimi ölçerek ve yıldızın kütle merkezi etrafındaki yörüngesi çıkartılarak gezegenin yörünge parametrelerini elde edebiliriz.

Güneş sistemimizde bütün gezegenleri göz önüne aldığımızda Jüpiter, Güneş'in dikine hızında  $\sim 12$  m/sn genlikli periyodik bir değişim yaratırken, Satürn ise  $\sim 2.7$  m/s yöresinde periyodik bir değişim yaratır. Dünya ise Güneş'te sadece 0.1 m/sn lik ince bir değişim yaratır. Bu nedenle Doppler tekniği ile gezegen keşfedebilmek için yüksek hassasiyetli dikine hız ölçümlerinin yapılabilir olması gerekir.

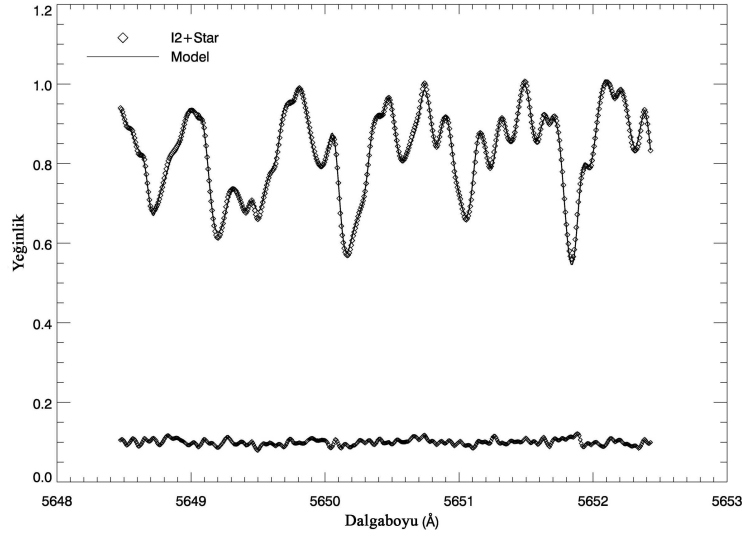
### 1.2 $I_2$ (İyodin) Soğurma Hücresi

Alışılmış dikine hız ölçümündeki duyarlılık limitleri (birkaç km/sn), aslında ilgili tayfsal verinin alınış şekline kaynaklanmaktadır. Asıl olarak ilgilenilen nesnenin tayfının, kalibrasyon amaçlı alınan tayflarla (hız standardı nesnelere ve lamba tayfları) farklı zamanlarda ve hatta farklı optik yollar üzerinden (lamba tayfları) alınmaması dikine hız ölçüm hassasiyetine aşılabilir bir limit getirmektedir. Griffin ve Griffin (1973), dikine hız ölçümleri sırasında eğer yıldız tayfı ile birlikte eş zamanlı olarak referans tayfın da gözlenmesi halinde sistematik hataların önemli ölçüde azalacağını belirtmişlerdir.

Bu basit temel fikirle Marcy ve Butler (1992) yıldız ve referans tayfı eş zamanlı elde etmek için iyodin ( $I_2$ ) soğurma hücresi tekniğinin kullanılabilirliğini gösterdiler. Bu teknikte  $I_2$  soğurma hücresi tayfçekerin giriş yarığında önce monte edilir, yıldız ışığı bu hücrenin içinden geçtikten sonra tayfçekere ulaşır ve bu sayede referans tayf asıl gözlenmek istenen nesne ile birlikte eş zamanlı elde edilmiş olur. Böylece birçok aletsel hata elimine edilerek hassas dikine hızların ölçülmesi sağlanmış olur.

$I_2$  soğurma hücresi, içerisinde moleküler iyodin gazı ihtiva eden bir cam hücredir. Normal oda sıcaklığında cam hücre içerisindeki iyodin moleküllü katı

kristaller halindedir. Ancak hücrenin sıcaklığı  $50-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ulaştığında, iyodin molekülü katı halden gaz duruma geçer. Bu durumda iyodin molekülü elektronik titreşim-dönme hareketleriyle  $5000 - 6000\text{ \AA}$  dalgaboyu aralığında binlerce dar tayfsal çizgi meydana getirir. Bu çizgiler ise tayfsal çalışmalarda referans bir dalgaboyu ölçeği sunar. RTT150 teleskobu için gerekli  $I_2$  hücresi, Japon ortaklarımız tarafından Okayama Astrofizik Gözlemevi'nin (OAG) optik laboratuvarında üretildi ve TUG'a bağışlandı.  $I_2$  hücresi, ekibimiz ve TUG teknik elemanlarımızın teknik çalışmasıyla Ekim 2007 sonunda TUG'un CET'ine başarıyla entegre edildi (bkz. Selam vd. 2008).



Şekil 1. RTT150 teleskobunun CET'i ve  $I_2$  hücresi eklentisi ile 51 Peg yıldızı için elde edilen örnek bir modelleme.

## 2 Hassas Dikine Hız Analizi

$I_2$  soğurma hücresi ile gözlenen bir yıldızın öz  $S(\lambda)$  tayfı, kullandığımız tayfçekerin alıcı çıkışında, yıldız +  $I_2$  hücresinin bütünlük tayfı  $I(\lambda)$  olarak elde edilene kadar bir takım etkiler altında değişikliğe uğrar. Bunlar:

1. Yıldızın dikine hız değişiminden dolayı "dalgaboyu kayması"  $\Delta\lambda$ ,
2. İyodin moleküllerinin oluşturduğu ve yıldız tayfı üzerine binen soğurma çizgili tayfı betimleyen " $I_2$  hücresi geçirgenlik fonksiyonu"  $A(\lambda)$ ,
3. "Aletsel profil" i betimleyen ve tayfçekerin nokta dağılım fonksiyonu (PSF) tarafından üretilen aletsel bulanıklık.

Eşzamanlı elde edilen yıldız +  $I_2$  bütünleşik tayfın modelleme tekniği, eşel verilerin küçük (2–10 Å) parçalara bölünerek her bir parça için dikine hız değerlerin ölçülmesine dayanan bir tekniktir (bkz. Marcy ve Butler 1992, Butler vd. 1996a, Sato vd. 2002). Her bir küçük parça için  $\Delta\lambda$  Doppler kayması;

$$I(\lambda) = k[S(\lambda + \Delta\lambda).A(\lambda)] * AP \quad (1)$$

bağıntısını ile modellenir (bkz. Şekil 1). Burada  $k$  normalizasyon faktörü,  $\Delta\lambda$  yıldız tayfındaki Doppler kayma miktarını,  $A(\lambda)$  iyodin geçiş fonksiyonunu,  $S(\lambda)$  öz yıldız tayfını,  $*$  işareti konvolüsyon işlevini ve  $AP$  tayfçekerin aletsel profilini göstermektedir. Bu bağıntı kullanılarak yapılacak bir modelleme  $S(\lambda)$  ve  $A(\lambda)$ 'nın girdi verisi olarak önceden bilinmesini gerektirir.  $I_2$  geçirgenlik fonksiyonu  $A(\lambda)$ 'nın belirlenmesi için, Kitt Peak Ulusal Gözlemevi'nde (KPNO) "Fourier Dönüşüm Tayfçekeri" (FDT) ile elde edilmiş  $R \sim 400,000$  çözünürlüklü ve  $S/N = 700$  olan saf  $I_2$  hücresi tayfı dünya çapında tüm araştırmacılar tarafından karşılaştırma şablonu olarak kullanılmaktadır.

$I_2$  geçirgenlik fonksiyonu  $A(\lambda)$ , FDT'nin ölçeklendirilmesi ile elde edilir. Bu ölçeklendirme işlemi Menzel-Minnaert-Unsöld aradeger bulma formülü (bkz. Pagan 1997, denklem 3.47) ile yapılır. İlgili ara değer bulma formülü, çizgi derinliği ( $R$ ) ile çizgi/süreklilik optik derinlikler oranı  $\eta = l/\kappa$  arasında bir ilişki olup, optik derinlikler oranı işlemlere  $\alpha = \eta/\eta_0$  şeklinde tanımlanan bir parametre ile dahil edilir. Burada  $\eta_0$  FDT şablonunu,  $\eta$  ise ölçeklendirilecek tayfçekerin optik derinlik oranını temsil etmektedir. Bu ilişkiden hareketle analiz sırasında  $\alpha$  parametresi serbest bırakılarak TUG'daki ve Kitt Peak Ulusal Gözlemevi'ndeki  $I_2$  hücrelerinin optik derinlik oranları farkı da analizde dikkate alınmaktadır.

Yıldız+ $I_2$  tayfının tam olarak modellenebilmesi için yüksek çözünürlüklü öz yıldız tayfına ihtiyaç vardır. Bu tayf aynı zamanda tayfçekerin aletsel etkilerini de içermemiş olmalıdır. Böyle bir tayfı elde etmenin yollarından biri, hedef cismin tayfını,  $I_2$  soğurma hücresi ile yapılan gözlemden önce veya sonra  $I_2$  soğurma hücresi kullanmadan birkaç kez gözlemektir. Bu tayflar daha sonra birleştirilerek yüksek  $S/N$  sahip tek bir tayfa dönüştürülür. Ardından bu tayf tayfçekerin aletsel profili ile birlikte dekonvolüsyon edilir. Bu yolla hedef cismin yüksek çözünürlüklü öz yıldız tayfı elde edilmiş olur. Tayfçekerin aletsel profili ise yukarıda denklem (1)'de verilen bağıntı yardımıyla  $I_2$  soğurma hücresi ile eşzamanlı aynı gece gözlenmiş hızlı dönen bir B yıldızın tayfının modellenmesi ile elde edilir. B türü yıldızların tayfı çok az çizgi içermektedir ve az sayıdaki bu çizgiler de hızlı dönmeden dolayı aşırı genişlemiş ve sürekliliğe karışmış olmaları nedeniyle  $S(\lambda) = 1.0$  olduğu varsayılır. Böylelikle eşel verinin her bir parçası için en iyi fit modeli elde edilmesinin yanı sıra CCD algılayıcısı üzerinde her bir konuma bağlı olarak tayfçekerin aletsel profili de yüksek bir hassasiyetle elde edilmiş olur. Öz yıldız tayfı elde etmenin bir başka yolu ise, yıldız atmosfer modelleriyle üretilmiş teorik bir sentetik tayf kullanmaktır.

İyodin geçiş fonksiyonu ve öz yıldız tayfının elde edilmesinden sonra yukarıda ki denklem (1) yardımıyla her bir küçük parça için  $\Delta\lambda$  Doppler kayması en küçük kareler yöntemiyle elde edilir. Analiz sonucunda toplam 18 parametreden oluşan denklem takımı da çözülmüş olur. Çok parametrelili optimizasyon algoritması

adı verilen bu modelleme tekniğinde kullanılan parametreler; lineer süreklilik parametreleri ( $k_0 + k_1 * \lambda$ ), optik derinlik oranlarını dikkate alan parametresi ( $\alpha$ ), dalgaboyu ölçeğini tanımlayan parametreler (2 derece polinom katsayıları),  $\Delta\lambda$  Doppler kaymasını ifade eden parametere ve aletsel profili (AP) tanımlayan parametrelerdir (AP, çoklu Gauss profilleri ile tanımlanmakta ve bunu belirleyen parametreler, merkezi Gauss profilinin genişliğini ifade eden 1 katsayı ve uydu Gauss profillerinin yüksekliklerini ifade eden 10 adet katsayıdır)(bkz. Valenti vd. 1995). Böylece, her tayf gözlemi için bu yolla, her bölge için Doppler kayması değerleri ölçülür ve ortalaması alınarak tek bir dikine hız değeri elde edilmiş olur. Son olarak elde edilen dikine hızlar Güneş Sisteminin kütle merkezine, Hobbs vd.'nin (2006) hassas tekniği ile indirgenir.

### 3 RTT150 ve CET'in Dikine Hız Ölçümleri

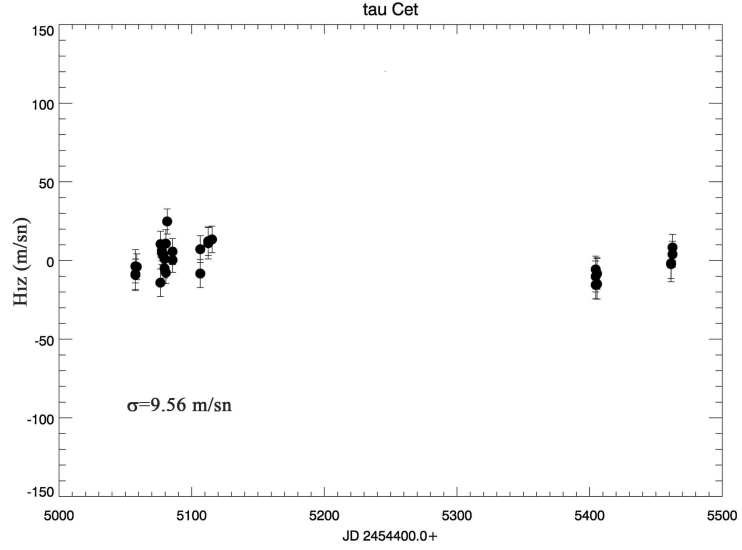
Bu çalışmanın amacı, bazı G-türü dev yıldızların TUG'da RTT150 teleskobu ve CET'ine yapılan  $I_2$  hücresi eklentisini kullanarak hassas dikine hızlarını ölçmek ve bu yolla düşük kütleli yıldız-altı bileşenlerinin (gezegen ve/veya kahverengi cüce) varlığını ortaya koyabildiğimizi göstermektir. Bu amaçla 2007-2010 gözlem dönemleri için TUG'a gözlem projeleri önerildi ve bu projeler kapsamında bazı dikine hız standardı yıldızlar, gezegenlere sahip bazı yıldızlar, çevresinde gezegen aramak için seçilmiş bazı hedef yıldızlar ve  $I_2$  referans tayfı için gerekli bazı hızlı dönen yıldızların yüksek çözünürlüklü ( $R \sim 40000 - 55000$ ) tayfları elde edildi. Ayrıca dikine hız ölçümlerinin elde edilmesi için IDL<sup>1</sup> yazılım paketinin kendine özgü dili kullanılarak bir yazılım geliştirildi. Buna göre denklem 1'de verilen  $\Delta\lambda$  Doppler kayması, k normalizasyon faktörü ve AP tayfçekerin aletsel profilin çoklu parametreleri en küçük kareler yöntemiyle bu yazılım ile elde edilmektedir.

Şekil 2 ve 3'te TUG'da  $I_2$  soğurma hücresi ile gözlenen 51 Peg ve tau Cet yıldızlarının kendi özgün analiz kodumuz ile elde edilen hassas dikine hız sonuçları verildi. Şekil 4 ve 5'te ise B +  $I_2$  soğurma hücresi ile eşzamanlı olarak elde edilen tayfların analizinden RTT150 ve CET için belirlenen aletsel profiller (AP) verildi.

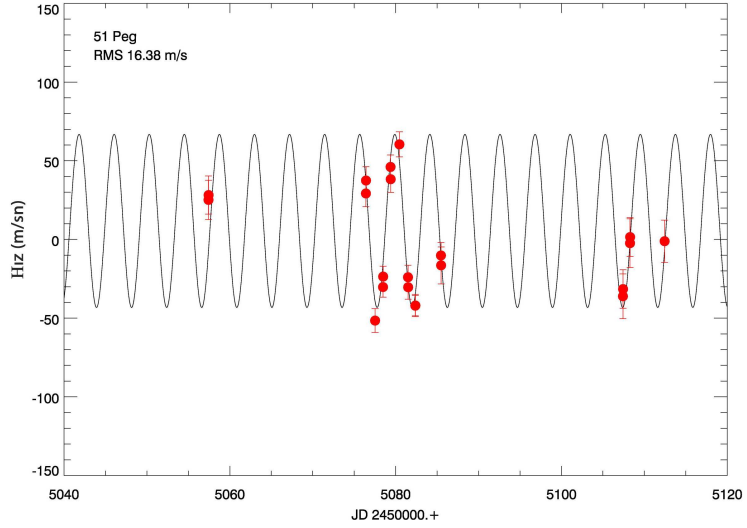
### 4 Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, ülkemizde yeni bir araştırma alanı olarak ve Japonya, Rusya ve Türkiye'nin yer aldığı uluslararası bir işbirliği çerçevesinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin (TUG) RTT150 teleskobuna bağlı CET'i ile ilk kez "hassas dikine hız ölçüm tekniği" ile gezegen arama çalışmaları başlatılmıştır. Birkaç m/s mertebesindeki hassas dikine hız ölçümlerine imkan tanıyacak  $I_2$  soğurma hücresi proje ekibimiz tarafından üretilmiş ve RTT150 CET'ine entegre edilmiştir. Bu amaca yönelik olarak tayfçekerin alıcı çıkışında elde edilen yıldız +  $I_2$  hücresinin bütünlük tayfları için IDL yazılım paketinin kendine özgü dili kullanılarak bir yazılım geliştirilmiş ve modellenmiştir.

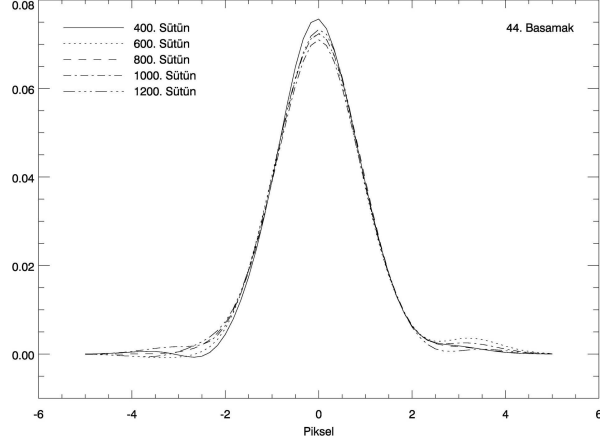
<sup>1</sup> <http://www.itvis.com/ProductServices/IDL.aspx>



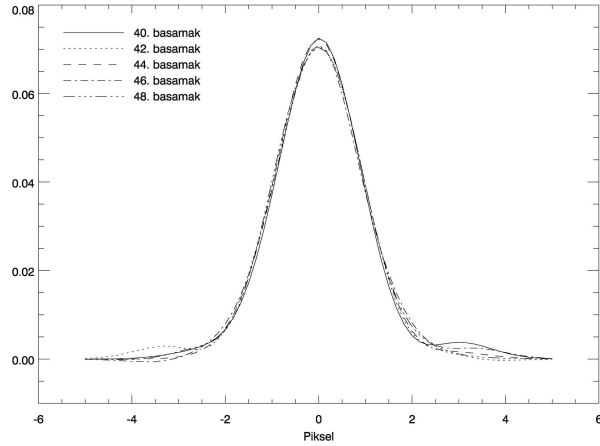
Şekil 2. Dikine hız standardı tau Cet için elde edilen dikine hız ölçümleri.



Şekil 3. Çevresinde bir gezegene sahip olduğu bilinen 51 Peg için elde edilen dikine hız ölçümleri. Sürekli eğri, Marcy vd. (1997) tarafından belirlenen yörünge çözüm parametreleri ile oluşturulan teorik dikine hız eğrisini göstermektedir.



Şekil 4. CET'i için elde edilen AP. Aynı eşel basamak için (44. basamak, merkezi dalgaboyu 5392.27 Å) AP'ler, dalgaboyuna yönünde kademeli olarak değişmektedir.



Şekil 5. CET'in farklı eşel basamakları için elde edilen AP'ler. AP'ler, benzer şekilde CCD üzerindeki konuma göre kademeli olarak değişmektedir.

Dikine hız standardı yıldızlar ve gezegene sahip yıldızların gözlemlerinden 10-20 m/sn dikine hız ölçüm hassasiyetine ulaşılmıştır. Bu limit hassasiyet yalnızca Güneş Sistemi dışı gezegen araştırmalarında değil aynı zamanda asterosismoloji alanında zayıf yıldız salınımlarının takibi ve yıldız atmosferlerindeki düşük genlikli hız alanlarının gözlemsel olarak algılanmasına da imkan verecektir.

Hızlı dönen B yıldızlarının  $I_2$  soğurma hücresi ile eşzamanlı olarak elde edilen tayfların analizinden, RTT150 teleskobu ve Coude Eşel Tayfçeker'i için ilk kez aletsel profil değişimleri elde edilmiştir. Elde edilen AP'lerin biçimi tipik bir Gauss profili şeklindedir. AP'lerin yarı yükseklikteki tam genişlikleri (FWHM) CCD algılayıcısı üzerindeki konumuna bağlı olarak 2.0-2.8 piksel aralığında değiştiği anlaşılmıştır. Bu değişimin nedeni ise CCD algılayıcısı üzerine gelen ışığın yeğinlik dağılımındaki değişimlerinden kaynaklanmaktadır.

Projemiz, gezegen barındırması olası seçilmiş bazı G-türü dev yıldızların gözlemleri ile devam etmektedir. Projeden beklentimiz, birkaç başarılı gezegen keşfi ile çalışmamızın sonuçlanmasıdır.

## Kaynaklar

- Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., McCarthy, C., Dosanjh, P., Vogt, S. S.: Attaining Doppler Precision of 3 ms-1. *PASP.* **108** (1996) 500
- Butler, R. P., Marcy, G. W.: A Planet Orbiting 47 Ursae Majoris. *ApJ.* **464** (1996) 153
- Griffin, R.F., Griffin, R.E.: On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km/s. *MNRAS.* **162** (1973) 243-253
- Hobbs, G. B., Edwards, R. T., Manchester, R. N.: TEMPO2, a new pulsar-timing package - I. *MNRAS.* **369** (2006) 655-672
- Marcy, G. W., Butler, R. P.: Precision radial velocities with an iodine absorption cell. *PASP.* **104** (1992) 270-277
- Marcy, G. W., Butler, R. P.: Planetary Companion to 70 Virginis. *ApJ.* **464** (1996) 147
- Marcy, G. W., Butler, R. P., Williams, E., Bildsten, L., Graham, J. R., Ghez, A. M., Jernigan, J. G.: The Planet around 51 Pegasi. *AJ.* **481** (1997) 926
- Mayor, M., Queloz, D.: A Jupiter-mass companion to a Solar-type star. *Nature.* **378** (1995) 355-359
- Pagel, B.E.J.: *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies.* Cambridge: Cambridge Univ. Press
- S.O. Selam, M. Yılmaz, H. Izumiura, I. Bikmaev, V. Keskin, B. Sato, E. Kambe, K. Yakut: Güneş Sistemi Dışı Gezegen Araştırmaları ve Bu Alanda TUG'da İlk Adımlar. XVI. Ulusal Astronomi Kongresi Bildiri Kitabı, Ç.O.M.Ü. yayımları, no: **37**, (2008) 208
- Sato, B., Kambe, E., Takeda, Y., Izumiura, H., Ando, H.: Development of Iodine Cells for the Subaru HDS and the Okayama HIDES: II. New Software for Precise Radial Velocity Measurements. *PASJ.* **54** (2002) 873-882
- Valenti, J. A., Butler, R. P., Marcy, G. W.: Determining Spectrometer Instrumental Profiles Using FTS Reference Spectra. *PASP.* **107** (1995) 966