

GÜNEŞ SİSTEMİ DIŞI GEZEĞEN ARAŞTIRMALARI VE BU ALANDA TUG'DA İLK ADIMLAR

**Selim O. SELAM¹, Mesut YILMAZ¹, Hideyuki IZUMIURA²,
Ilfan BIKMAEV³,
Varol KESKİN⁴, Bun'ei SATO⁵, Eiji KAMBE², Kadri YAKUT⁴**

¹*Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100
Tandoğan-Ankara*

²*Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ, Kamogata, Okayama 719-0232 Japan*

³*Kazan State University and Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan, Russia*

⁴*Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100
Bornova-İzmir*

⁵*Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550
Japan*

Özet

Deneysel yollarla yıldızların etrafında gezegen arama çalışmaları 90'lı yılların sonundan itibaren astronominin en dikkat çekici konularından biri haline gelmiştir. Son yirmi yılda ortaya konan gözlemsel teknikler ve cihazlar uzak yıldızların etrafındaki gezegen bileşenlerinin keşfedilmesini mümkün kılmıştır. Farklı yeteneklere sahip bu gözlemsel teknikler, çevresinde yörünge hareketi yapan bir gezegenin kütleçekim etkisi nedeniyle yıldızının dikine hızında ya da konumunda oluşan zayıf salınımları veya uzayda uygun açı ile yönlenmiş gezegen-yıldız sistemlerindeki gezegen geçişlerini (transitlerini) algılamaya yöneliktir. Bu gelişmiş teçizat ve tekniklerle şu ana kadar 300'den fazla güneş sistemi dışı gezegen keşfedilmiştir (bkz. <http://exoplanet.eu>) ve sayıları hızla artmaya devam etmektedir. Güneş sistemimiz dışında yer alan bu gezegenler, fiziksel ve yörüngesel özellikler bakımından şaşırtıcı düzeyde çeşitlilik göstermiş ve gezegen sistemleri ile onların oluşum kuramları hakkındaki alışıla gelmiş bilgilerimizi ciddi ölçüde değiştirmiştir. Bu derlemede, güneş sistemi dışı gezegen araştırmalarının yakın geçmişi ve bulgularının özetinin yanı sıra, ülkemizde yeni bir araştırma alanı olarak, uluslararası bir işbirliği çerçevesinde TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde başlattığımız güneş sistemi dışı

gezegen arama projemizin gelişimine ve ulaştığı noktalara değinilecektir.

Anahtar Kelimeler: Güneş sistemi dışı gezegenler, hassas dikine hızlar, iodin hücresi

Abstract

The search for planets around the stars with empirical methods turn out to be as one of the most remarkable astronomical topics since late 90's. New observational techniques and instrumentations which are introduced in last two decades made possible the discoveries of planetary companions around the distant stars. These various techniques with different capabilities are aiming to detect the tiny wobble of the parent star in radial velocity and/or in position due to the gravitational effect of an orbiting planet or photometric transits (eclipse effects) in the correctly lined-up planet-star systems. With the aid of these sophisticated instrumentation and techniques more than 300 extrasolar planets have been discovered so far (see <http://exoplanet.eu>) and their numbers are still increasing. These planets that are out of our solar system show a surprising diversity in their physical and orbital properties and have dramatically changed our traditional view of planetary systems and their formation theories. In this review, besides the summary of near past and findings of exoplanet searches, a short report on progress and current status of our exoplanet search project started at TÜBİTAK National Observatory in the framework of an international collaboration will be given.

Keywords: Exoplanets, precise radial velocities, iodine cell

1. Giriş

Günümüz teknolojisi ile gözlenebilir durumdaki evrende yaklaşık 100 milyar galaksi ve bunların her birinde yine yaklaşık 100 milyar yıldız olduğu tahmin edilmektedir. Bu milyarlarca yıldız arasında Güneş’imiz sadece sıradan bir yıldızdır ve çevresinde yaşam barındıran bir gezegene sahiptir. Burada akla hemen birkaç soru gelir: Acaba gezegeni olan tek yıldız bizim Güneş’imiz midir? Evrendeki 10^{22} tane yıldızın kaçının etrafında gezegen vardır? Diğer yıldızların etrafındaki olası gezegenlerin kaç tanesinde Dünya benzeri yaşam koşulları mevcuttur? Yakın zamana kadar bu sorular ve bunlara verilen yanıtlar, gözlemsel yetersizliklerden dolayı sadece spekülasyonlara neden olmaktaydı.

Yakın bir tarihe kadar, bilimsel temellere dayalı olarak, Güneş sistemimiz dışındaki yıldızların çevresindeki gezegenlerin varlığına ilişkin deneysel araştırmalar hiç yapılamıyordu ve sadece kuramsal düzeyde birşeyler söylenebilmekteydi. Ancak son 10-15 yıl içerisinde yeni tekniklerin gelişmesiyle diğer yıldızların etrafında gezegen araştırmaları ciddi bir ivme kazandı (bkz. [1][2][3][4]). Güneş sistemimiz dışında ilk gezegen 1992 yılında bir milisaniye atarcasının etrafında Wolszczan ve Frail tarafından keşfedildi [5]. Bu keşifin hemen ardından Mayor ve Queloz, 1995 yılında 51 Peg’in çevresinde bir gezegen daha buldu [1]. Bu, Güneş’imize çok benzer bir yıldızın etrafında keşfedilen, Jüpiter kütleğinde, ancak 4 gün civarında yörünge dönemine sahip bir dev gezegendi. Bu şaşırtıcı keşiften sonra Dünya’nın birçok yerinde gezegen arama programları başlatıldı. İlk keşiflerden bu yana gezegen arama programları ile F’den M tayf türüne kadar yıldızların çevresinde 300’den fazla gezegen keşfedildi (bkz. [6]). Şu anda 2000’den fazla F, G ve K yıldızı, 1 m’den 10 m’ye kadar açıklığı olan teleskoplarla, gezegen bileşenlerinin varlığını ortaya koymak amacıyla sistematik olarak izlenmektedir. Son on yılda ortaya konan, farklı yeteneklere sahip gözlemsel teknikler ve cihazlar uzak yıldızların etrafındaki bu gezegen bileşenlerinin keşfedilmesini mümkün kılmaktadır. Bunlardan “dolaylı metodlar” olarak adlandırılan teknikler, çevresinde yörünge hareketi yapan bir gezegenin kütleçekim etkisi nedeniyle yıldızının dikine hızında (tayfsal belirleme) ya da konumunda (astrometrik belirleme) oluşan zayıf salınımları algılamaya yöneliktir. “doğrudan metodlar” ise,

adından da anlaşılacağı gibi, çekilen gökyüzü görüntüleri üzerinde gezegenlerin yıldızlarından direkt olarak ayırt edilmesini hedefleyen ve temelde çok yüksek ayırma güçlü görüntüleme tekniklerine dayalı metodlardır. Ayrıca, uzayda uygun açı ile yönlenmiş gezegen-yıldız sistemlerindeki gezegen geçişlerinin (transitlerinin) fotometrik (ışıkölçüm) gözlemleriyle elde edilen sonuçlar, tayfsal gözlem sonuçlarıyla birleştirilmesi halinde, keşfedilen gezegenlerin mutlak kütle ve geometrik parametrelerinin de hesaplanmasına izin vermektedir.

Güneş sistemimiz dışında yer alan bu gezegenler, fiziksel ve yörüngesel özellikler bakımından şaşırtıcı düzeyde çeşitlilik göstermiş ve gezegen sistemleri ile onların oluşum kuramları hakkındaki alışla gelmiş bilgilerimizi ciddi ölçüde değiştirmiştir. İlk keşiflerden olan 51 Peg b'nin yukarıda açıklanan özellikleri hayret vericiydi. Bunun yanında Gl 581c gibi Dünya benzeri yaşam koşullarına sahip olduğuna dair delliler sunan (bkz. [7]) ilginç karasal gezegenler ise, doğal olarak, hem bilim dünyasında hem de popüler anlamda toplumun çok farklı kesimlerinde ciddi ilgi uyandırmaktadır. Bu türden karasal gezegenlerin keşfi, “dünya dışı zeki yaşam araştırmalarının” ilgi odağı haline gelmiştir. Bu gelişmelere bağlı olarak üretilen yeni gezegen oluşum kuramlarının denetlenebilmesi ve yeni istatistiksel çıkarımların/genellemelerin yapılabilmesi, yeterince gözlenmiş ve parametreleri iyi belirlenmiş güneş sistemi dışı gezegen sayısının artmasını gerektirmektedir [8].

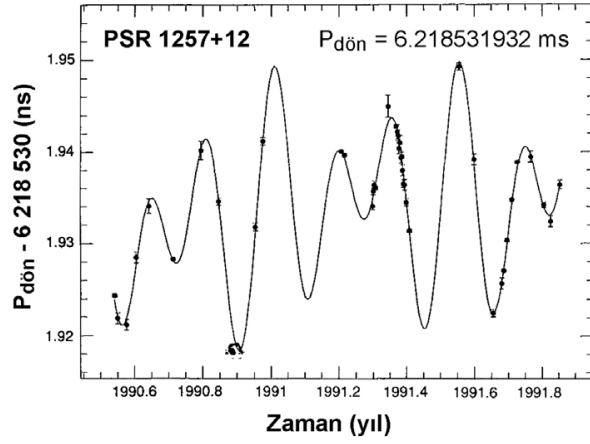
Bu derlemede, güneş sistemi dışı gezegen keşfi konusundaki yakın geçmişe, hızla gelişen gözlem ve veri indirgeme tekniklerine, şu ana kadar keşfedilen 300’ü aşkın gezegenin ortaya koydukları ilginç çeşitliliğe ve gezegen oluşum kuramlarına getirilen yeniliklere yer verilecektir. Ayrıca, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi’nde (TUG) başlattığımız güneş sistemi dışı gezegen arama projemizin gelişimine ve ulaştığı noktalara da değinilecektir.

1.1 Güneş Sistemi Dışı Gezegen Araştırmalarının Yakın Tarihi

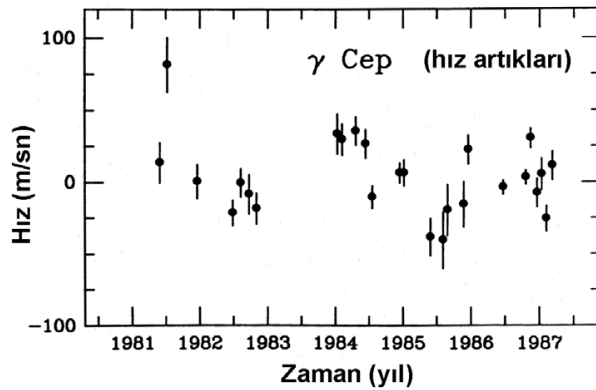
Güneş sistemi dışı gezegenlerin varlığına ilişkin tartışmaların tarihi yaklaşık 2400 yıllık bir geçmişe sahiptir. 20. yüzyıl başına kadar bu tartışmalarda ileri sürülen savlar, teorik öngörüler veya spekülasyonların ötesine geçmemiştir. Bu anlamda konunun uzak

geçmişine ilişkin kapsamlı bir derleme Dick tarafından 1996 yılında yayınlanmıştır [9]. 20. yüzyılın ilk çeyreğinden itibaren modern astrofiziğin düşünce yapısı ve metodlarıyla sistemimiz dışında yer alması olası gezegenlerin varlığı ve oluşum senaryoları üzerine ilk kayda değer teorik çalışmalar yapılmaya başlandı (örn. bkz. [10][11][12][13][14][15][16]).

Wolszczan ve Frail'in [5], PSR 1257+12 milisaniye atarcası etrafında, kütleleri ($M \sin i$) $3.4M_{\oplus}$ ve $2.8M_{\oplus}$ olarak tahmin edilen iki gezegenin varlığına ilişkin delilleri ortaya koymaları ile güneş sistemi dışı gezegen araştırmalarında önemli bir dönüm noktasına gelindi. Bu çalışma bir anlamda ilgili alanın deneysel metodlarla çalışılmaya başlandığı ilk tarih olarak dikkate alınır. Wolszczan ve Frail, atarcanın atım erişim zamanlarında izlenen dalgalanmaların, atarcayla ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan iki gezegenin yarattıkları ışık-zaman etkisinden kaynaklandığını öne sürdüler (bkz. Şekil 1.1). Bu öneriye başlangıçta ihtiyatla yaklaşıldı. Çünkü süpernova patlaması gibi dramatik bir süreç geçiren ölü yıldızların etrafında gezegen varlığı mevcut güneş sistemi



Şekil 1.1 PSR 1257+12 atarcasının atım erişim zamanlarından tespit edilen dönem değişimi. Sürekli eğri, yörünge dönemleri 66.6 ve 98.2 gün olan iki gezegenin atarca döneminde yarattığı birleşik ışık-zaman etkisini temsil etmektedir (Wolszczan ve Frail [5]'den alınmıştır).

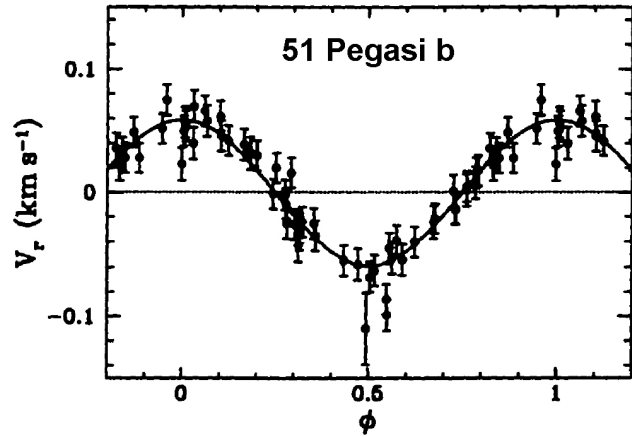


Şekil 1.2 γ Cephei'nin dikine hız artıklarında izlenen 25 m/sn yarı-genlikli ve 2.7 yıl dönemli çevrimsel yapı $1.7 M_{\text{jüp}}$ kütleli bir gezegenin varlığını gerektirmiştir (Campbell ve diğ. [25]'den alınmıştır).

oluşum kuramlarına aykırıydı. Bu fikirden hareketle Gil ve Jessner [17] PSR 1257+12'in atım zamanlarında izlenen dalgalanmalara alternatif bir açıklama getirmeye çalıştılar ve bu etkinin, atarcanın dönme ekseninin gösterdiği presesyon/nütasyon hareketinden ve manyetik ekseninin dönme eksenine civarında göç etmesinden kaynaklanabileceğini önerdiler. Ancak kısa zamanda, Wolszczan ve Frail'in bulgularını destekler nitelikte çok sayıda bağımsız çalışmanın yayınlanmasıyla ([18][19][20] [21][22][23][24]) Gil ve Jessner de dahil olmak üzere, PSR 1257+12'nin atım erişim zamanı dalgalanmalarına çevresindeki gezegenlerin neden olduğu konusunda fikir birliğine varıldı. Üstelik bu çalışmaların bazılarında gezegen sayısının 2 değil 3 tane olabileceği de vurgulandı.

Aslında literatürde ilk gözlemsel bulgulara dayanan keşif duyurusu 1988'de Campbell ve ekibi tarafından, γ Cephei'nin dikine hız ölçümlerine dayanılarak yapılmıştı [25].

γ Cephei'nin dikine hız artıklarında izlenen 25 m/s yarı-genlikli ve 2.7 yıl dönemli bu çevrimsel yapı (bkz. Şekil 1.2) $M \sin i = 1.7 M_{\text{jüp}}$ kütleli bir yıldız-altı bileşenin varlığını işaret ediyordu. Ancak sözü edilen hız yarı-genliğinin, kullandıkları gözlem aracının belirleme limitleri civarında olması nedeniyle bu keşif uzunca bir süre tam anlamıyla doğrulanamadı. Benzer şekilde, Latham ve ekibinin [26] 1989'da, HD 114762 yıldızının dikine hız ölçümlerindeki çevrimsel değişimlerden hareketle varlığını belirledikleri ilave cismin $M \sin i = 11 M_{\text{jüp}}$ civarındaki kütlesi, yörünge eğimindeki belirsizlikten dolayı bir dev gezegen yerine bir kahverengi cüce olarak algılanmasına yol açtı ve ancak 1996'da Marcy tarafından bir gezegen olduğu doğrulanabildi.



Şekil 1.3 51 Pegasi'nin etrafında keşfedilen 4.231 gün yörünge dönemli gezegenin, yıldızın Nisan 1994 - Aralık 1995 arasında ölçülen dikine hızlarında yarattığı 59 m/sn genlikli çevrimsel değişim (Mayor ve Queloz [27]'dan alınmıştır).

Öncü niteliğindeki bu çalışmalar, güneş sistemi dışı gezegen arama çalışmalarında kullanılabilecek en mantıklı yöntemlerin, gezegenlerin yıldızları üzerinde yarattıkları tedirginlik etkilerini algılamaya yönelik teknikler olması gerektiğini net olarak ortaya çıkardı. Bu anlamda, akla ilk gelen teknikler yıldızların tayf çizgilerindeki dönemli doppler kaymalarını veya gökküresi üzerindeki konumlarında oluşacak dönemli yerdeğiştirmelerini algılamaya yönelik olanlardı. Mayor ve Queloz 1995’de, güneş benzeri bir yıldız olan 51 Peg’in dikine hız değişimlerinden hareketle (bkz. Şekil 1.3), kütlesi $0.47M_{\text{jüp}}$, yörünge yarıçapı 0.05 AB ve yörünge dönemi sadece 4.231 gün olan ilginç bir gezegen keşfi ile ön plana çıktılar [1][27]. Bunu takiben 1996 yılında, Butler ve Marcy’nin 47 UMa’da [28] ve hemen ardından Marcy ve Butler’ın 70 Vir’deki [29] gezegen bileşenlerini ortaya çıkarmaları ile güneş sistemi dışı gezegen keşfetmeye yönelik araştırmalar bir anda emekleme döneminden olgunluk dönemine geçti.

Doğal olarak bu ilgi çekici konuda, kısa süre içinde, çok sayıda farklı algılama kapasitesine sahip gözlem araçları ve bunların gözlem verisini indirgeyen yöntemler geliştirildi. Günümüzde yaygın olarak diğer yıldızların etrafında gezegen aramada kullanılan teknikleri şu şekilde sıralayabiliriz (bkz. [2][30][31]):

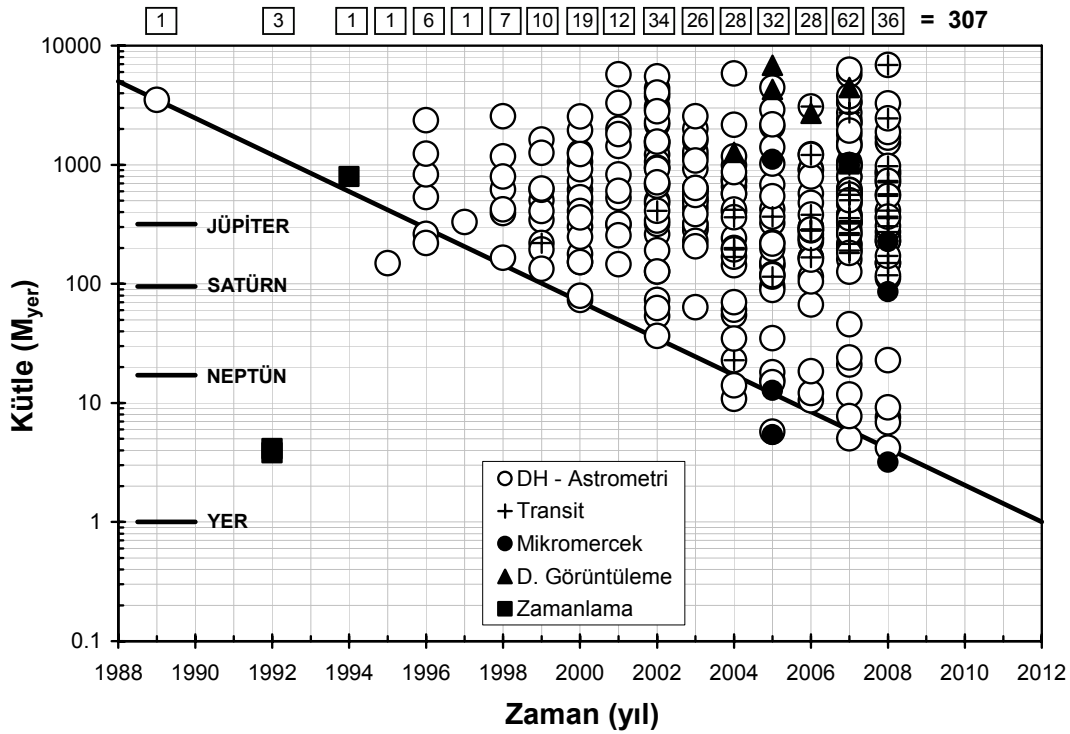
- a) *Doppler Tekniği (hassas dikine hız ölçümü)*: Gezegeni ile ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan yıldızın m/s mertebesindeki dikine hız değişimlerini algılamaya yönelik tayfsal bir yöntemdir.
- b) *Konumölçüm (astrometri)*: Gezegeni ile ortak kütle merkezi etrafında yörünge hareketi yapan yıldızın gökyüzü düzlemindeki miliyayın mertebesinde daha düşük yer değiştirmelerini algılamaya yönelik ve genellikle girişimölçerlerle yapılan konumölçümsel bir yöntemdir.
- c) *Gezegen Geçişleri (transitleri)*: Uzayda uygun açı ile yönlenmiş gezegen-yıldız sistemlerinde, gezegenlerin yıldızları önünden geçişleri (transitleri) sırasında oluşan milikadir mertebesindeki ışık kayıplarını algılamaya yönelik ışıkölçümsel bir yöntemdir.
- d) *Kütleçekimsel Mikromercek*: Yer’e göreli olarak yakın bir yıldızın kütleçekim alanı, aynı hizada görülen uzaktaki bir

ardalan yıldızının ışığı üzerinde merceklemeye etkisi yaratır. Eğer yakın yıldızın bir gezegeni varsa, bu gezegenin kütle çekim alanı da kendine özgü bir merceklemeye ile ayırt edilebilir bir ilave etki oluşturur. Bu yöntem de hassas parlaklık ve zaman ölçümüne dayalıdır.

- e) *Doğrudan Görüntüleme*: Yıldızına göre yeterince büyük, sıcak (parlak) ve ayrık duran gezegenlerin çekilen kızılöte gökyüzü görüntülerinde doğrudan tespit edilmesine yönelik bir yöntemdir. Yüksek ayırma güçlü kızılöte görüntüleme gerektirmektedir.
- f) *Zamanlama*: Atarcaların atım erişim zamanları veya periyodik değişen yıldızların ışık değişimlerine ilişkin extremum zamanlarından türetilen dönem değişimlerinin takibi ile gezegenlerin yıldızları üzerinde yarattığı ışık-zaman etkisini algılamaya yönelik bir yöntemdir.
- g) *Polarimetri*: Yıldız ışığı bir gezegen atmosferinin molekülleri ile etkileştiğinde kutuplanmaya uğrar ve bu olay bir polarimetre ile algılanabilir. Bu yöntemle çalışılmış henüz sadece bir örnek vardır.

Bu teknikler arasında hassas dikine hız ölçümü gerektiren “Doppler Tekniği” uygulamada sağladığı kolaylıkları ve mevcut gözlem araçlarında çok ciddi değişiklikler yapılmaksızın kullanılabildiğinden hızla ön plana çıkmıştır. Şu ana kadar (Ağustos 2008 itibarıyla) sayıları 307’i bulan güneş sistemi dışı gezegenin 290’ı bu teknik ve konumölçüm yöntemiyle keşfedilmiştir. Geri kalanların 7’si mikromercek gözlemleriyle, 5’i doğrudan görüntüleme teknikleriyle ve 5 tanesi ise atarcaların atım erişim zamanı veya değişen yıldızların extremum zamanlarıyla ortaya konan dönem değişimleri ile ortaya çıkarılmıştır (sıkça güncellenen sayılar için bkz. [6]). Geçiş (transit) yöntemi ile varlıkları ortaya konan 52 gezegen ise çoğunlukla doppler tekniği ile keşfedilenler arasında uygun yörünge eğim açısı gösteren sistemlerde gezegen varlığının bir çeşit doğrulaması olarak çalışılmıştır. Dolayısıyla geçiş yöntemi ile varlıkları tespit edilen gezegenlerin sayısı (52 adet), doppler tekniği ve konumölçüm ile belirlenenlerin ortak sayısı (290) içinde dikkate alınmaktadır [6]. Şekil 1.4’de Schneider’in [6] sıkça güncellenen güneş sistemi dışı gezegenler listesindeki veriler kullanılarak, keşif

yıllarına göre gezegenlerin kütle dağılımı, keşif yöntemlerine göre tasnif edilerek verilmiştir. Bu diyagramın üstündeki karelerde, her yıla karşılık gelen keşif sayıları da yer almaktadır. Yıllar geçtikçe keşfedilen gezegen sayısının belirli bir oranda artış gösterdiği görülmektedir. Bu diyagramda en dikkat çeken yapı ise, zaman ilerledikçe keşfedilen en düşük kütle değerinin belirgin bir düşüş gösterdiğidir. Diyagramda, her keşif yılına ait en düşük kütleli gezegen(ler) dikkate alınarak oluşturulan diyagonal doğru, iyimser bir öngörü için kullanılacak olursa 2012 yılı civarında $1 M_{\text{yer}}$ kütleindeki gezegenlerin keşfedilebilir hale gelineceğini söyleyebiliriz.



Şekil 1.4 Ağustos 2008'e kadar farklı yöntemlerle keşfedilmiş tüm güneş sistemi dışı gezegenlerin kütlelerinin keşif yıllarına göre dağılımı. Her keşif yılının en düşük kütleli örnekleri kullanılarak yapılan iyimser bir öngörüyle (diyagonal doğru) 2012 yılı civarında $1 M_{\text{yer}}$ kütleli gezegenlerin keşfedilebilir olacağını söyleyebiliriz. (diyagram verileri Schneider'in [6] düzenli olarak güncellenen listesinden alınmıştır).

Kısa süre içinde keşif sayısının hızla artmasıyla çok farklı kütle ve yörüngesel özelliklere sahip sıradışı gezegenlerin de var olduğu görüldü (bkz. [32][33][8]). Bu çeşitlilik alışla gelmiş gezegen sistemi oluşumuna ve dinamiğine ilişkin kuramların ciddi değişiklikler geçirmesine neden oldu. Bu bağlamda, gezegen barındıran yıldızların fiziksel özelliklerinin incelendiği çalışmalar büyük önem kazandı. İstatistiksel olarak G-K türü yıldızların etrafında gezegen bulunma olasılığının daha yüksek olduğu sonucu bu çalışmalarla ortaya kondu (örneğin bkz. [34] ve içindeki kaynaklar). Yeni gezegen oluşum kuramları literatürde görünmeye ve test edilmeye başlandı (bkz. [30] ve içindeki kaynaklar, [35][36][8]). Bu gelişmelere bağlı olarak üretilen yeni gezegen oluşum kuramlarının denetlenebilmesi ve yeni istatistiksel çıkarımların/genellemelerin yapılabilmesi, yeterince gözlenmiş ve parametreleri iyi belirlenmiş güneş sistemi dışı gezegen sayısının artmasını gerektirmektedir [37]. Dolayısıyla yapılan her keşif şu an için literatüre çok ciddi bir katkıda bulunmaktadır.

2. Güneş Sistemi Dışı Gezegen Arama Yöntemleri

Başlangıçta, yıldız-gezegen ikilisinden beklenen etkilerin ölçülmesi, mevcut gözlem araçlarının kapasitesi ve alışla gelmiş teknikler açısından neredeyse imkansızdı. Örneğin, o tarihlerde alışılmış astronomi gözlem araçları ile ulaşılabilen en hassas dikine hız ölçüm kapasitesi 1 km/s mertebesindeydi. Halbuki en basit örnekle, Jüpiter'in Güneş'imiz üzerinde oluşturduğu çekimsel etki ile ortaya çıkan dikine hız 12.4 m/s, Satürn'ünkiyle ise 2.7 m/s yöresindedir. Bodenheimer ve Lin'in [30] genellemesine dayanarak, gezegenlerin yıldızlarından ortalama 100 kez daha düşük kütle ve $10^{-6} - 10^{-10} L_{\odot}$ aralığında ışıyım gücüne sahip olduklarını söyleyebiliriz. Bize en yakın yıldızların bilinen gezegenlerinin yıldızlarından olan en büyük açısal ayrıklıkları ise 1 yaysn değerinin çok altındadır. Dolayısıyla, başka yıldızların etrafındaki gezegenlerin varlığı araştırılacaksa, mevcut tayfçekerlerin dikine hız ölçüm hassasiyetini, konumölçüm gözlemlerinin algılayabildiği en küçük açısal ayrıklık değerini ve/veya ışıkölçerlerin tespit edebileceği en düşük parlaklık değişimi değerlerini iyileştirecek teknik atılımlar yapılmalıydı.

Bugüne kadar keşfedilen güneş sistemi dışı gezegenlerin yaklaşık %90'ından fazlasının Doppler Tekniği kullanılarak ortaya çıkarılması ve bizim ekibimizin de TUG'da sürdürdüğü uluslararası işbirliğine dayalı gezegen arama çalışmasında bu tekniğin kullanmasından dolayı bu bölümde sadece hassas dikine hız ölçümüne dayalı “Doppler Tekniği” hakkında detaylı bilgi verilecektir.

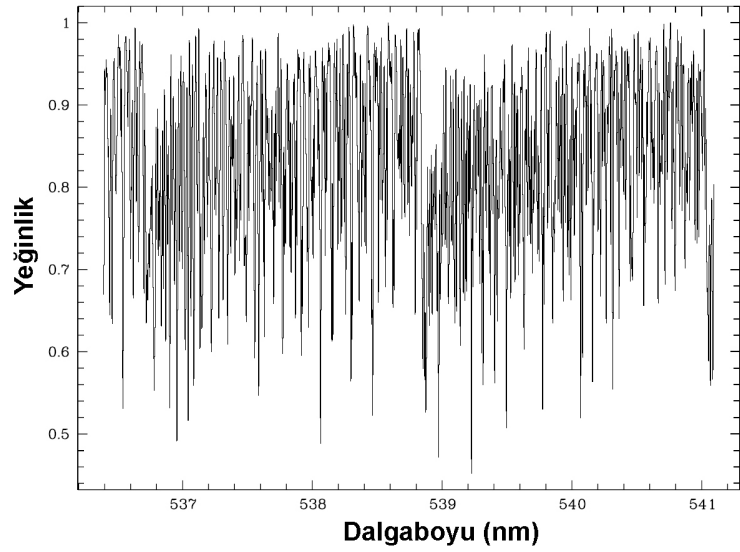
2.1 Doppler Tekniği

Gezegen arama çalışmaları açısından dikine hız ölçümündeki duyarlılık limitleri, aslında ilgili tayfsal verinin alınış şekline kaynaklanıyordu. Asıl olarak ilgilenilen nesnenin tayfinin, kalibrasyon amaçlı alınan tayflarla (hız standardı nesneler ve lamba tayfları) farklı zamanlarda ve hatta farklı optik yollar üzerinden (lamba tayfları) alınıyor olması dikine hız ölçüm hassasiyetine aşılamaz bir limit koyuyordu. Aslında Griffin ve Griffin 1973 yılında bu sorunun aşılmasına yönelik ilk ipuçlarını vermişti [38][39]. Dalgaboyu kalibrasyonunu sağlayacak referans tayflarının gözlenecek nesnelerin tayfi ile eş-zamanlı olarak aynı kayıt ortamı üzerine alınmasıyla dikine hız ölçümündeki sistematik hataların ciddi oranda azaltılabileceğini duyurdular. Önerdikleri yöntem aslında son derece basitti: Çekilen yıldız tayflarındaki Yer atmosferi kaynaklı tellürik çizgilerin son derece kararlı yapılar olduğunu ve uygun metodlarla ele alındığında dalgaboyu kalibrasyonunda kullanılabileceklerini ifade ettiler. Bu yolla mevcut tayfçekerlerde hiç bir değişiklik yapmadan dikine hız ölçümünde 0.01 km/s mertebesinde bir ölçüm hassasiyetine ulaşılabileceğini gösterdiler.

Campbell ve Walker [40] ise tellürik çizgilerin dalgaboylarında atmosferik çalkantı hareketlerinden gelen belirsizliğin ilginç bir yöntemle aşılabileceğini ve daha da hassas ölçümlere ulaşılabileceğini gösterdiler. Onlar bir hidrojen florid gaz soğurma hücresinin tayfçekerin giriş yarığı önüne konulması ile tayflara eklenen özel çizgilerin dalgaboyu referansı olarak kullanılması halinde Griffin ve Griffin'in önerisinden daha hassas dikine hızlara ulaşılabileceğini gösterdiler. Bu teknikle ilk gezegen keşiflerini ise 1988'de duyurdular [25]. Gözlemsel metod açısından doğru yol bulunmuştu, ancak mevcut indirgeme tekniklerinde dikkate alınmayan ve tayfçekerlerin optik ve mekanik tasarımlarından kaynaklanan bazı

olumsuz etkiler hala beklenen hassasiyet sınırlarına ulaşılmasına izin vermiyordu. Mevcut bilgisayar teknolojisi de bu anlamda olumsuz bir faktör olarak ortaya çıktı. Sadece bu nedenle Campbell ve ekibinin keşfi çok sayıda karşı görüşle camiada ilgi görmedi. Bu aşamadan sonra dikine hız ölçümlerinde hassasiyet arttırmaya yönelik çok sayıda çalışma yapıldı ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerle indirgeme tekniklerinde de ciddi aşamalar kaydedildi (örneğin bkz. [41][42][43][44][45]).

Tayfçekerlere eklenen gaz soğurma hücrelerinde iyodin (I_2) gazını kullanan alternatif çalışmalar da yapıldı [46][47][48]. İyodin gazı kimyasal olarak oldukça kararlıdır ve $\lambda\lambda$ 5000-6000 Å dalgaboyu aralığında çok güçlü soğurma çizgileri üretir (bkz. Şekil 2.1). Bu dalgaboyu aralığı, aynı zamanda, geç tayf türünden yıldızların dikine hız ölçümlerinin yapıldığı çizgilerin yoğunlaştığı bir bölgedir [49]. Geç tayf türünden yıldızlar ise güneş sistemi dışı gezegen araştırmalarında hedef nesnelerdir. Butler ve ekibinin çalışması [48] I_2 gaz soğurma hücreleri ile elde edilen gözlemlerden beklenen ölçüm sınırlarına ulaşılmasını sağladı ve dikine hız ölçümünde 3 m/s gibi önemli bir hassasiyet değerine ulaşıldı. Bu çalışmanın önerdiği I_2 gaz soğurma hücresi eklentisi ve indirgeme/hesap teknikleri hızla dünya çapında yaygınlaştı. Önerdikleri gaz soğurma hücresi neredeyse tüm orta-büyük çaplı teleskopların Coudé Échelle tayfçekerlerinin standart eklentisi haline



Şekil 2.1 La Silla Coudé Échelle tayfçekeri ve düzalan lambası ile çekilen I_2 buharı soğurma tayfı. $R=100,000$ çözünürlükte, merkezi dalgaboyu 538.9 nm ve dalgaboyu aralığı 4.85 nm olan kesimi görülmektedir (Endl ve diğ. [53]'den alınmıştır).

geldi (bkz. [50][51][52][53]) ve gezegen keşiflerinin sayısında son 10 yılda ciddi bir artış yaşandı.

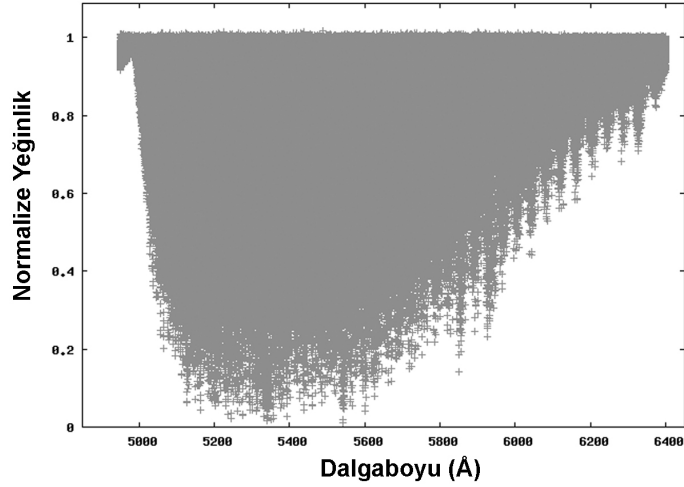
Bu teknik ile gözlenen bir yıldızın öz $K(\lambda)$ tayfı, kullandığımız tayfçelerin alıcı çıkışında, yıldız+ I_2 hücresinin bütünleşik tayfı $I(\lambda)$ olarak elde edilene kadar bir takım etkiler altında değişikliğe uğrar. Bunlar:

- Yıldızın dikine hız değişiminde n dolayı “*dalgaboyu kayması*” $\Delta\lambda (= \lambda v/c)$,
- İyodin moleküllerinin oluşturduğu ve yıldız tayfı üzerine binen soğurma çizgili tayfı betimleyen “ *I_2 hücresi geçirgenlik fonksiyonu*” $G(\lambda)$,
- “*Aletsel profil*”i betimleyen ve tayfçelerin nokta dağılım fonksiyonu NDF tarafından üretilen aletsel bulanıklık.

Bu etkilere göre, giriş yarığının önünde I_2 hücresi bulunan bir tayfçelerle elde edilen bir yıldız tayfı

$$I(\lambda) = k[G(\lambda)K(\lambda + \Delta\lambda)] \circ NDF \quad (1)$$

bağıntısının, tayfçelerde kullanılan CCD alıcısının hücrelerine (piksellerine) göre örneklenmiş (binned) hali ile modellenenabilir [48][51]. Buradaki k katsayısı bir normalizasyon faktörü olup, “ $\circ$ ” işareti ise fourier dönüşümleri ile gerçekleştirilen konvolüsyon işlevini ifade etmektedir. Bu bağıntı kullanılarak yapılacak bir modelleme $G(\lambda)$ ve $K(\lambda)$ ’nın girdi verisi olarak önceden bilinmesini gerektirir. Bu



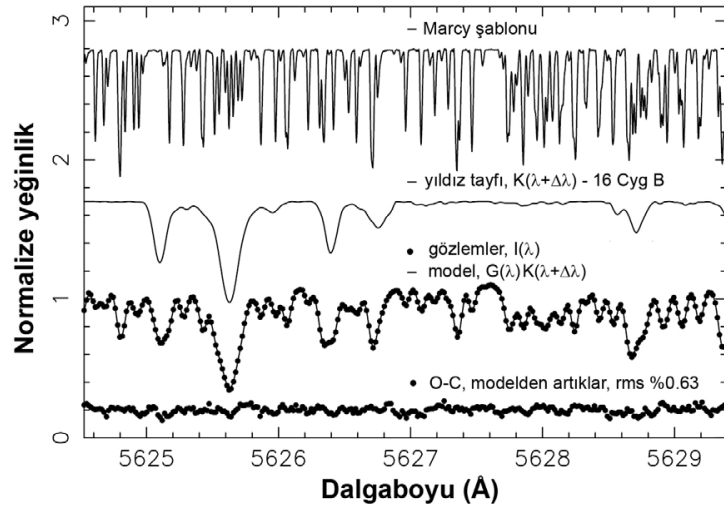
Şekil 2.2 Marcy’nin KPNO’deki “*Fourier Dönüşüm Tayfçekeri*” ile aldığı $R \sim 400,000$ çözünürlüklü ve $S/N=700$ olan saf I_2 hücresi tayfı [54]. Bu tayf dünya çapında I_2 hücresi kullanan tüm araştırmacılar tarafından karşılaştırma şablonu olarak kullanılmaktadır.

ise tayfçekerin NDF 'nin (yani aletsel profilin) mevcut verilerden tespit edilmesini öngörür.

I_2 hücresi geçirgenlik fonksiyonu $G(\lambda)$ 'nın belirlenmesi için, Marcy'nin Kitt Peak Ulusal Gözlemevi'nde (KPNO) "*Fourier Dönüşüm Tayfçekeri*" ile aldığı $R \sim 400,000$ çözünürlüklü ve $S/N=700$ olan saf I_2 hücresi tayfı (bkz. Şekil 2.2) dünya çapında I_2 hücresi kullanan tüm araştırmacılar tarafından karşılaştırma şablonu olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir tayfçeker ile I_2 hücresi kullanılarak çekilen bir düzalan görüntüsü, ilgili tayfçekerin ölçek sisteminde saf I_2 tayfı oluşturacaktır. Ancak bu verinin $G(\lambda)$ olarak kullanılabilmesi ve hassas dalgaboyu referansı verebilmesi için, Marcy'nin şablonu ile ayarlanması (ölçeklendirilmesi) gerekir. Bu özel düzalan görüntüsü, bir düzalan lambasından, tekdüze aydınlatılmış bir kubbe ekranından veya hızlı dönen bir B türü yıldızdan alınabilir. B türü yıldızların tayfı çok az çizgi içermektedir ve az sayıdaki çizgiler de hızlı dönmeden dolayı aşırı genişlemiş ve sürekliliğe karışmışlardır. Ayrıca hızlı dönen B türü yıldızların tayflarında, I_2 çizgilerinin baskın olduğu $\lambda\lambda$ 5000-6000 Å dalgaboyu aralığında neredeyse hiç çizgi yoktur. Dolayısıyla saf I_2 tayfı üretmek için ideal cisimlerdir. Bu şekilde elde edilen saf I_2 tayfı, Takeda ve diğ. [55] veya Sato ve diğ. [51]'nin önerdiği Menzel-Minnaert-Unsöld aradeğer bulma formülü (örn. bkz. Pagel'in [56] 3.47 nolu formülü) ve hesap tekniği kullanılarak, Marcy'nin I_2 şablonu ile karşılaştırmalı olarak ölçeklendirilir (kalibre edilir) ve tayf çekerin kendi ölçek sistemindeki I_2 hücresi geçirgenlik fonksiyonu $G(\lambda)$ elde edilir. İlgili ara değer bulma formülü, çizgi derinliği (D) ile çizgi/süreklilik optik derinlikler oranı $\eta = I / \kappa$ arasında bir ilişki olup, optik derinlikler oranı işlemlere $\alpha = \eta / \eta_0$ şeklinde tanımlanan bir parametre ile dahil edilir. Burada η_0 Marcy şablonunun, η ise ölçeklendirilecek tayfçekerin optik derinlik oranını temsil etmektedir. Böylece ölçeklendirme işlevi, α 'nın yanı sıra serbest parametre olarak tanımlanan bir $\Delta\lambda'$ parametresi (Marcy şablonu ile tayfçeker saf I_2 tayfı arasındaki dalgaboyu ölçeği farklılıklarını dikkate alacak parametre) ve tayfçekerin aletsel profilini tanımlamak üzere ele alınan bir Gauss profilini belirleyecek FWHM değeri kullanılarak, en küçük kareler yöntemi ile yapılır. Bu şekilde elde edilen $G(\lambda)$ aynı zamanda ilgili tayfçekerin tayfsal çözünürlük (R) değerinin de FWHM'dan hassas olarak tespit ve takip edilmesine

olarak tanır. Bu ölçeklendirmeye örnek olarak Şekil 2.3’de Okayama Astrofizik Gözlemevi’nin (OAO) HIDES ve C10 tayfçekerleri için, yukarıda tarif edilen yöntemle, Takeda ve diğ. [55] tarafından elde edilen $G(\lambda)$ I_2 hücresi geçirgenlik fonksiyonlarının $\lambda\lambda 5260-5265$ Å aralığındaki dağılımları görülmektedir.

Çok yüksek çözünürlük ve S/N oranının yanı sıra sistematik herhangi bir hatayı içermeme beklentisi altında bir yıldızın öz $K(\lambda)$ tayfını doğrudan gözlemlerden elde etmek oldukça zordur. Bu işlev, yıldız+ I_2 bileşik tayfindan, uygun metodlar kullanılarak, tayfçekerin NDF ’nin yarattığı bulanıklık etkisini arındırmayı gerektirir. Dolayısıyla, öncelikle tayfçekerin NDF ’nin hassas bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu ise, asıl gözlemlerin hemen öncesi veya sonrasında alınmış bir hızlı dönen B yıldızı+ I_2 bileşik tayfı ile yukarıda açıklanan şekliyle elde edilen $G(\lambda)$ ’nın, Valenti ve diğ.’nin [57] önerdiği yöntemle (birden fazla Gauss profilinin bileşkesinin fit algoritması) işleminden geçirilmesiyle elde edilir. Böylece denklem (1)’de, bilinen $G(\lambda)$ kullanılarak ve elde edilen NDF ’nin Jansson tekniği ile dekonvolüsyonu (bkz. [58]) sonucu, $I(\lambda)$ gözlemlerinden yıldızın öz tayfı, dikine hız değişimlerini içeren $K(\lambda+\Delta\lambda)$ biçimiyle çıkartılmış olur. Bu tayfın dalgaboyu eksenini, Marcy’nin şablonu ile ölçeklendirilmiş $G(\lambda)$ ’dan belirlendiğinden ve tayfçekerin NDF ’nin bulanıklaştırma etkisinden arındırıldığından, son derece hassas dikine



Şekil 2.4 Subaru teleskobu için üretilen HDS tayfçekeri ve I_2 hücresi eklentisi ile 16 Cyg B yıldızı için elde edilen yıldız+ I_2 tayfının modellenmesi. En üstte Marcy şablonu yer almaktadır. Yukarıdan üçüncü sırada noktalar gözlemleri, sürekli eğri ise modelleme sonucu yapılan fiti göstermektedir. Üstten ikinci sırada ise model tayftan ayıklanan yıldızın öz tayfı ve en altta ise modelden olan artıklar görülmektedir (Sato ve diğ.’den [51] alınmıştır).

hız ölçümüne izin verecektir. Böylece, her tayf gözlemi için bu yolla (bkz. Şekil 2.4) elde edilen $K(\lambda+\Delta\lambda)$ öz tayfları, 2-5 Å'luk ardışık dar bölgelere ayrılarak, her bölge için doppler kayması değerleri ölçülür ve ortalaması alınarak dikine hızı elde edilmiş olur (detayları için bkz. [51]). Son olarak elde edilen dikine hızlar güneş sisteminin kütle merkezine, Hobbs ve diğ.'nin [59] hassas tekniği ile indirgenir.

Gezegen barındıran bir yıldız için bu şekilde ölçülen dikine hızlardan oluşturulan dikine hız eğrisi, alışıla gelmiş yöntemlerle analiz edilerek (örneğin bkz. [60], K dikine hız eğrisi yarı-genliği, P yörünge dönemi ve e yörünge dışmerkezliği belirlenir ve yıldızın M_* kütlelerinin bilinmesi halinde

$$M \sin i = K \sqrt{1-e^2} \left[\frac{P(M_* + M \sin i)^2}{2\pi G} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

bağıntısından gezegen kütlesi için bir alt limit değeri ve

$$a^3 = (M_* + M \sin i) P^2 \quad (3)$$

bağıntısından da görelî yörünge'nin yarı-büyük eksen uzunluğu tespit edilebilir.

2.2 Diğer Yöntemler

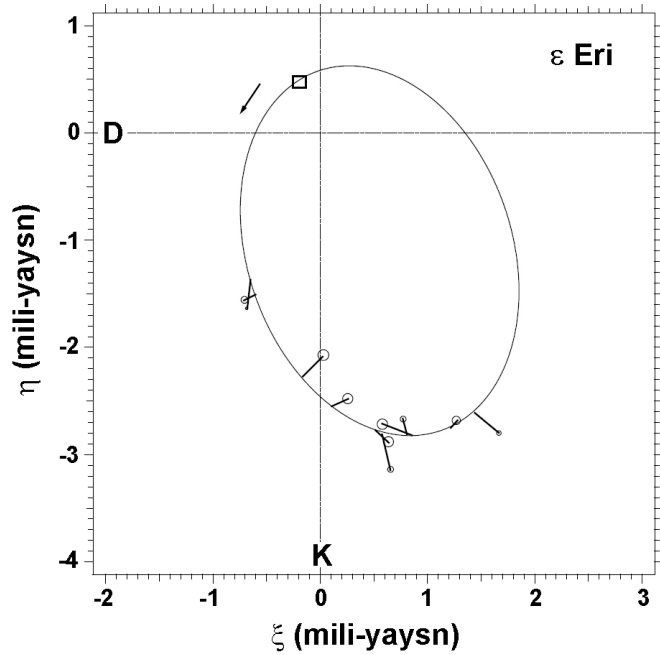
Doyle'un [61] yakın tarihli geniş derlemesi, tüm güneş sistemi dışı gezegen arama yöntemlerinin, hem uygulanan değişik tekniklerini hem de ulaşabildikleri belirleme limitlerini çok iyi özetlemektedir ve şu an için bu konudaki en iyi kaynak olarak gösterilebilir.

Konumölçüm (astrometri) tekniği gezegen aramada kullanılan en eski yöntem (20. yüzyılın ortalarından beri) olarak dikkate alınabilir. Aslında daha çok ayırık çift yıldızların bileşenlerinin ve yörüngelerinin özelliklerini belirlemede kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemle gezegen barındıran bir yıldız için elde edilen gökyüzü düzlemi üzerindeki konum ölçümlerinden, o yıldızın yıllık paralaks nedeniyle olan görünür hareketi ve öz hareketinin gökyüzü düzlemine izdüşüm bileşeni çıkarılırsa geriye, yıldızın gezegeniyle oluşturduğu ortak kütle merkezi etrafındaki görelî yörüngesi kalır. Elips biçimindeki bu yörünge'nin yaysn cinsinden yarıbüyük eksen uzunluğu

$$\alpha = \frac{M}{M_*} \frac{a_p}{d} \quad (4)$$

bağıntısı ile verilir [61]. Burada a_p AB cinsinden gezegenin kütle merkezine uzaklığı, d pc cinsinden yıldızın bize uzaklığı, M ve M_* ise sırasıyla yıldızın ve gezegenin kütleleridir. Bu teknik ile, sistemin yörünge döneminin uzunca bir kesri boyunca elde edilen yüksek ayırma güçlü gökyüzü görüntüleri üzerinden, yıldızın ışık-merkezinin (photometric centroid) hareketi ölçülür. Güneş'imiz ve ona 5 AB uzaklığındaki Jüpiter'in 10 pc uzaklıktan bakıldığında V bandı parlaklıkları 5 ve 27 kadir olacaktır ve birbirlerinden en ayırık görüldükleri anda aralarındaki açısal ayırıklık sadece 0.5 yaysn olacaktır. Üstelik bu ayırıklığa rağmen aralarındaki parlaklık farkı nedeniyle Jüpiter görülemeyeceğinden, konumölçüm gözlemlerinde sadece Güneş'in ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi algılanacaktır. Güneş-Jüpiter ikilisinin kütle merkezinin kabaca Güneş yüzeyinde olduğundan hareketle, Güneş'in 10 pc'den izlenecek yerdeğiştirmesinin en büyük değerinin sadece 1 mili-yaysn olduğunu söyleyebiliriz. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, konumölçüm yöntemiyle

yıldızların gezegen bileşenlerinin varlığını ortaya çıkarmak için ne kadar yüksek uzaysal ayırma gücü gerektiği daha rahat anlaşılabilir. Dolayısıyla bu yöntem için genellikle girişim-ölçüm tekniklerine dayalı çok yüksek uzaysal ayırma gücü sağlayabilen yüksek teknolojili gözlem araçları kullanılmaktadır. Yer atmosferinin bu anlamda ortaya koyduğu belirleme limiti, atmosferik görüş



Şekil 2.5 Benedict ve diğ.nin [65] ϵ Eri'ye ait konumölçüm gözlemleri ve bu gözlemlerden belirledikleri göreceli yörüngesi.

etkisinden kaynaklanmaktadır ve bu sorunu doğrudan aşmak amacıyla çeşitli projelerle atmosfer dışı uydu gözlemeleri tasarlanmaktadır (Örnekleri için bkz. NASA-SIM [62], ESA-DARWIN [63], NASA-TPF [64]). Şekil 2.5’de Benedict ve diğ.’nin [65] ϵ Eri yıldızının konumölçüm gözlemlerinden çözümlediği göreceli yörüngesi görülmektedir. Bu ölçümlerin dikine hız ölçüm sonuçlarıyla birleştirilmesi sonucunda ϵ Eri’nin etrafında yörünge dönemi 6.85 yıl, kütlesi $1.55 M_{\text{jüp}}$ ve yıldızına uzaklığı yaklaşık 3.5 AB olan dev bir gezegenin varlığı ortaya çıkarıldı.

Gezegenlerin yıldızlarının önünden geçişleri sırasında oluşacak zayıf ışık kayıplarını algılamaya yönelik geçiş yöntemi, yüksek ışıkölçüm duyarlılığına sahip alıcılarla yapılmaktadır. Bir geçiş anında yıldızdan algılanan ışınım gücünde beklenen kayıp, pratik olarak

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R}{R_*} \right)^2 \quad (5)$$

biçiminde, gezegen ve yıldızın yüzey alanları oranı mertebesinde olacaktır [66]. Güneş-Jüpiter ikilisi için $R/R_* = 0.1$ olduğundan, Jüpiter geçişi ile Güneş’in parlaklığında oluşacak ışıkölçümsel değişim %1 civarında olacaktır. Neptün veya Yer benzeri bir gezegen için bu değerin çok daha küçük olacağı ve geçişlerinin kaydedilebilmesi için oldukça hassas ışıkölçerler gerektiği açıktır. Bir gezegenin yıldızının önünden geçiş olasılığı, Güneş yarıçapı cinsinden yıldızın R_* ile gezegenin R yarıçaplarına, AB cinsinden yörüngenin a yarıbüyük eksen uzunluğuna ve yörüngenin e dışmerkezliğine,

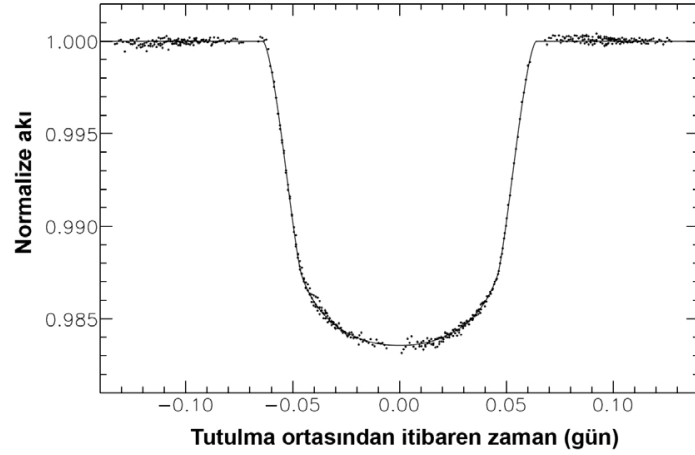
$$P = 0.0045 \frac{R_* + R}{a} \left[\frac{1 + e \cos(\omega/2)}{1 - e^2} \right] \quad (6)$$

şeklinde bağlıdır [67]. Burada ω yörüngenin enberi noktasının boylamıdır. Yer için bu olasılığın değeri % 0.5 dir. Eğer Yer’in Güneş’e olan uzaklığı 0.05 AB olsaydı bu olasılık % 10 olurdu. Buradan, yörünge dönemi daha kısa ve yıldızına daha yakın gezegenlerin, geçiş yöntemi ile farkına varılmalarının daha olası olduğunu söyleyebiliriz. Çember yörünge ve tam ekvatoryal bir geçiş için geçiş süresi ise

$$t = 13R_* \left(\frac{a}{M_*} \right)^{1/2} \quad (7)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir [66]. Burada R_* ve M_* Güneş birimlerinde, a ise AB cinsindendir. Kısa yörünge dönemli gezegenler için bu süre birkaç saat mertebesinde. Bir geçişe ilişkin ışıkölçüm gözlemlerindeki tutulma profilinin (örnek için bkz. Şekil 2.6) uygun analiz yöntemleri (örneğin bkz. [69]) ile analizi sonucunda gezegene ilişkin parametre olarak sadece R / R_* yarıçaplar oranını elde edebilmek mümkündür. Bu hali ile geçiş yönteminin, güneş sistemi dışı gezegenlerin sadece varlığını belirlemekten öte bir işe yaramadığı düşünülebilir. Ancak geçişin oluşabilmesi için yıldız-gezegen ikilisinin yörünge eğim açısı i 'nin 90° 'ye çok yakın olması gerektiği fikrinden hareketle, ilgili yıldızın dikine hız eğrisi çözümleriyle geçiş gözlemleri sonuçları birleştirilirse gezegenin tüm fiziksel parametreleri (R , M ,

ortalama yoğunluk ρ vd.) elde edilir [66]. Geçiş gözlemleri ile yıldızların etrafında gezegen varlığı araştırması, yukarıda açıklandığı gibi olasılığı çok düşük bir iştir. Dolayısıyla bu yöntemle ortaya çıkarılan kısıtlı sayıdaki keşiflerin büyük ölçüde ışıkölçümsel tarama gözlemlerinden ortaya

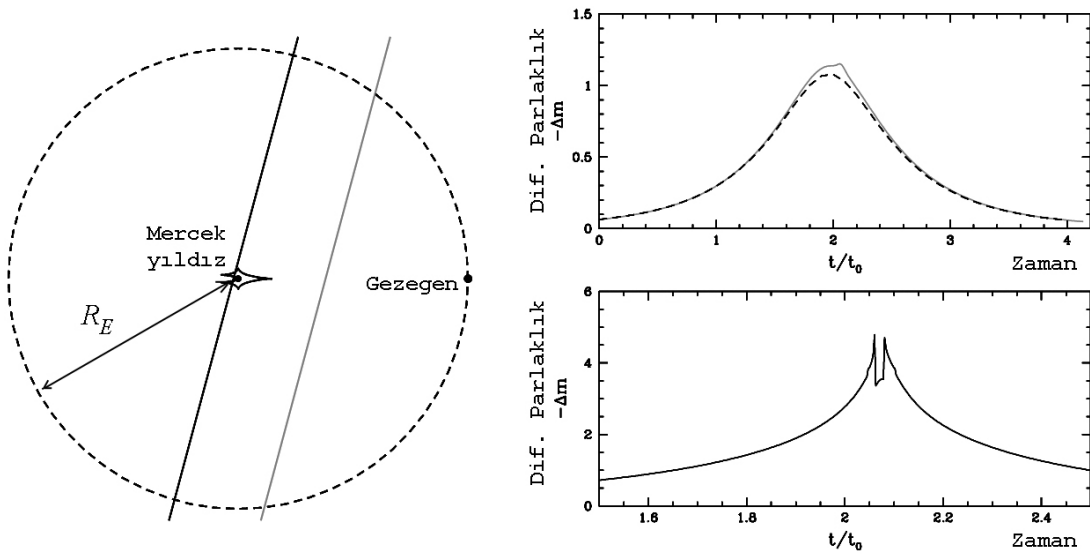


Şekil 2.6 HD209458b gezegeninin geçiş profili. Noktalar gözlemleri, sürekli eğri ise model ışık eğrisini temsil etmektedir. (Brown ve diğ.'nden [68] alınmıştır).

çıkması olduklarını tahmin etmek çok da zor değildir. Bu olasılık, OGLE projesi [70][71] gibi gökada merkezi doğrultusunda yapılan taramalarda daha da yüksek olasılığa sahiptir ve meyvelerini 7 başarılı keşifle vermiştir (örn. bkz. [72]). TrES [73], XO [74], HAT [75] ve WASP [76] gibi projelerin ışıkölçümsel tarama gözlemleri, gezegen geçiş adayları için büyük potansiyele sahip veriler üretmektedir. Ayrıca 2006 yılında fırlatılan FSA/ESA-CoRoT ve yakın tarihte

fırlatılması planlanan NASA-KEPLER gibi uydu gözlemvleriyle, geçiş gözlemlerinde yer atmosferinin yarattığı bozucu etkilerin doğrudan aşılması amaçlanmaktadır.

Bize görelili olarak yakın bir yıldız uzay hareketi boyunca, bizden çok daha uzaktaki bir yıldızla gökyüzü düzleminde aynı hizaya gelebilir ve uzay-zamanın bükülmesindeki genel görelilik etkisi altında, arka plandaki yıldızın ışığını bükerek etrafında bir serap görüntü oluşturur. Bu geçici etki sırasında arka plandaki yıldızın ışığı kuvvetlendirilir (büyütülür) ve dolayısıyla iki yıldızın zamana karşı ölçülen birleşik ışık şiddetinde bir artma ve bunu takip eden bir azalma görülür (bkz. şekil 2.7 sağ üst paneldeki kesikli eğri). “*Kütleçekimsel Mercek Etkisi*” olarak adlandırılan bu olayın farkına öncelikle gökadalarda varılmıştır. İdeal bir hizalanmada (öndeki yıldızın arkadaki ile tam olarak aynı hizaya gelmesi) oluşan serap görüntü, mercek etkisi yaratan öndeki yıldızın etrafında “*Einstein halkası*” olarak adlandırılan son derece simetrik, halka biçimli bir yapıya sahip olacaktır (bkz. şekil 2.7). Einstein halkasının yarıçapı



Şekil 2.7 Gezegenine sahip bir mercek yıldızın kütleçekimsel mikromercek etkisiyle oluşturacağı ışık eğrisi. Solda Einstein halkasının geometrik yapısı ve kaynak yıldız için iki farklı geçiş yolu gösterilmiştir. Sağ üst panelde kesikli eğri, gezegen olmaması halinde oluşacak simetrik ışık eğrisini, gri renkli eğri ise soldaki gri renkli geçiş yolu ile oluşacak ışık eğrisini göstermektedir. Alt panelde ise kusursuz bir hizalanma (solda siyah renkli geçiş yolu) için ışık eğrisinin alacağı biçimi göstermektedir (Mao ve diğ.’nden [77] alınmıştır).

R_E (Einstein yarıçapı), arka plandaki kaynak yıldızın bize olan D_k ve mercek etkisi yaratan ön plandaki yıldızın (mercek yıldız) bize olan D_m uzaklıklarına bağlı olarak

$$R_E = \left[\frac{4GM_{*m}}{c^2} \frac{(D_k - D_m)D_m}{D_k} \right]^{1/2} \quad (8)$$

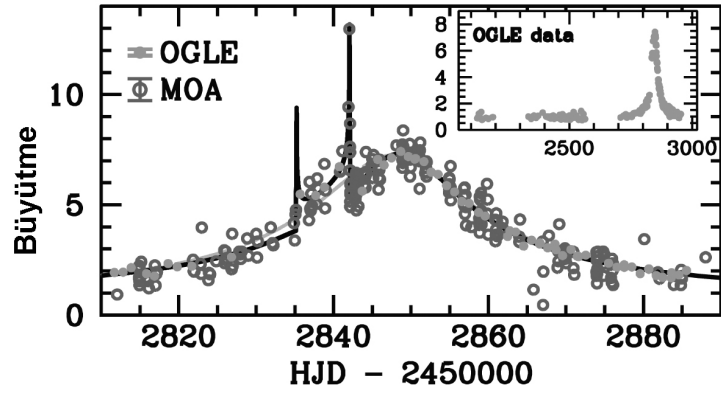
ifadesi ile verilir [61][78]. Burada G evrensel çekim sabiti, M_{*m} mercek yıldızın kütlesi ve c ise ışık hızıdır. Bu durumda Einstein yarıçapını Yer'den gören açı (Einstein açısı) ise $\theta_E = R_E / D_m$ dir. Zamanla değişim gösteren mikromercek büyütmesi (büyütme faktörü) ise

$$Q(t) = \frac{u^2(t) + 2}{u(t)[u^2(t) + 4]^{1/2}} \quad (9)$$

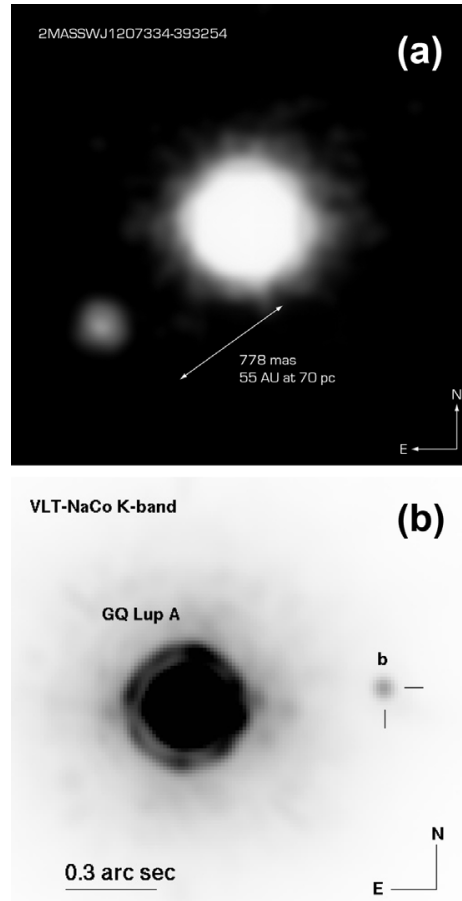
eşitliği ile ifade edilir [61][78]. Burada $u(t)$, Einstein yarıçapı biriminde mercek yıldız ile kaynak yıldız arası izdüşüm uzaklıktır. Kusursuz bir hizalanma için büyütmenin sonsuz büyüklükte olacağını, (9) bağıntısı yardımıyla kuramsal olarak söyleyebiliriz. Eğer mercek yıldızın etrafında şekil 2.7'de gösterildiği gibi bir gezegen varsa, kaynak yıldızın geçiş yoluna bağlı olarak, (9) bağıntısı ile verilen simetrik yapılyı büyütme faktöründen bazı sapmalar oluşacaktır. Çünkü gezegenin de var olan çekim alanı kendine özgü bir mercek etkisi yaratacaktır. Şekil 2.7'de bu durum kaynak yıldızın iki farklı geçiş yoluna bağlı olarak sağ üst ve alt paneldeki ışık eğrilerinde, kendilerine özgü renkli eğrilerle gösterilmiştir. Burada kusursuz hizalanma durumunda sağ alt panelde verilen ışık eğrisindeki çift tepeli yapı dikkat çekicidir ve gezegenin mercek etkisinin en fazla hissedildiği durumu temsil etmektedir. Gezegenin mercek etkisinin görüldüğü ve ışık eğrisini simetriden saptıran (tepeler) hörgüçler için (8) eşitliğindeki mercek yıldızın kütlesi M_{*m} 'in yerini gezegenin M kütlesi alacaktır. Bu durumda gezegenden kaynaklanan mikromercek etkisinin süresi,

$$t_E = \sqrt{\frac{4GMVd}{c^2}} \quad (10)$$

olacaktır [61]. Burada d , pc biriminde mercekle yıldızın uzaklığı, V yörünge hızı, c ışık hızı ve G evrensel çekim sabitidir. İki yıldızın bu şekilde hizalanma olasılığı, yıldız yoğunluğunun fazla olduğu galaktik merkez doğrultusunda bile milyonda birdir. Ancak bu hizalanma bir kez gerçekleşirse, bize 5 kpc uzaklıktaki bir mercek yıldızla 0.05 AB uzaklıktaki $3 M_{\text{jüp}}$ kütleli bir gezegenin yaratacağı parlama yaklaşık 4 kadir olacak ve 5 gün civarında sürecektir [61]. Bu değerler Jüpiter ve Yer için sırasıyla 3 kadir/3 gün ve 1 kadir/4 saat olacaktır. Görüldüğü gibi bu olay kaydedilebilirlik açısından bugünkü teknoloji için bir sorun çıkarmamaktadır. Sorun, bu tür olayların gerçekleşme sıklığının düşük olması ve kısa zaman içinde çok fazla sayıda yıldızın gözlenmesindeki zorluklardan



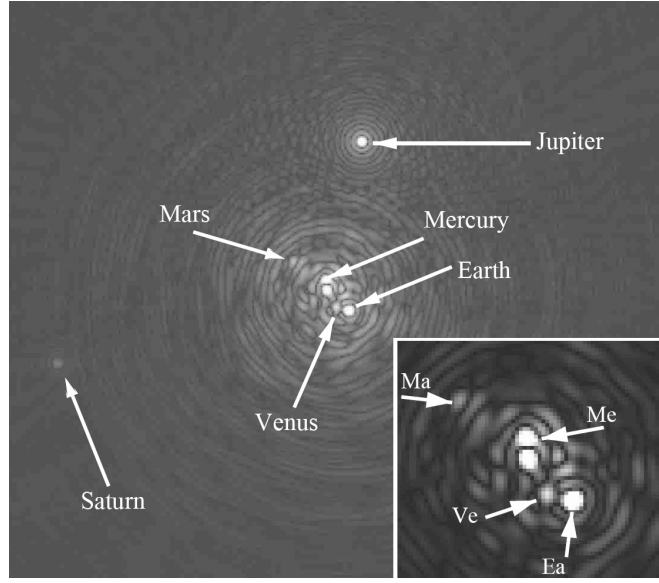
Şekil 2.8 OGLE 2003-BLG-235 yıldızı için oluşan mikromercek etkisine ilişkin ışık eğrisi ve gezegenden kaynaklanan hörgüç yapısı. Noktalar gözlemleri, sürekli eğri ise modeli temsil etmektedir (Bond ve diğ.'nden [82] alınmıştır).



Şekil 2.9 VLT/NACO kullanılarak doğrudan görüntüleme ile (a) 2M1207 ([85]'den alınmıştır) ve (b) GQ Lup ([86]'dan alınmıştır) etrafında tespit edilen gezegen bileşenleri.

kaynaklanmaktadır. Bunu, şu andaki toplam keşfedilen 307 güneş sistemi gezegen içinde sadece 7 tanesinin mikromercek yöntemi ile ortaya çıkarılabilmiş olmasından anlayabiliriz. Bu yöntemin belkide en önemli avantajı, diğer yöntemler için ortaya çıkan ve olumsuz bir etki yaratan gezegenli yıldızın uzaklık limiti probleminden büyük ölçüde etkilenmemesidir. Doğal olarak ana gözlemsel verinin, yine geniş gökyüzü alanlarının görüntülediği tarama gözlemlerinden geleceği açıktır. Mikromercek ışık eğrilerinin çözüm yöntemleri ve gezegene ilişkin elde edilebilir parametreler için Bennett ve Rhie [79], Mao ve Loeb [80] veya Rattenbury ve diğ.'nin [81] çalışmalarına bakılabilir. Yakın tarihli bir mikromercek keşfine örnek olarak Şekil 2.8'de ışık eğrisi görülen OGLE 2003-BLG-235 verilebilir [82].

Doğrudan görüntüleme yöntemlerinin, adında da anlaşılabileceği gibi yıldızına göre yeterince büyük, sıcak (parlak) ve ayırık duran gezegenlerin çekilen gökyüzü görüntülerinde doğrudan tespit edilmesine yönelik teknikler kullandığı hemen anlaşılabılır. Yer tabanlı büyük teleskoplarda kullanılan aktif ve adaptif optik düzeneklerle (prensipleri için bkz. [83][84]) sağlanan yüksek uzaysal ayırma gücü ve gezegenin yıldızına göre ışınım kontrastının algılanabilir olduğu kızılöte dalga boylarında yapılan görüntüleme ile yıldız altı cisimlerin varlığı ortaya konabilmektedir. Bunlara örnek olarak VLT/NACO ile, 2M1207 kahverengi cüce yıldızının gezegen bileşeninin doğrudan görüntülediği Chauvin ve diğ.'nin [85] çalışmasını ve Neuhäuser ve diğ.'nin [86] bir T Tauri yıldızı olan GQ Lup'un gezegen bileşenini belirledikleri çalışmaları gösterilebilir (bkz. Şekil 2.9). Ancak bu ve bunlara benzer doğrudan görüntüleme keşiflerindeki yıldız-altı cisimlerin halen birer gezegen olup olmadığı



Şekil 2.10 10 pc uzaklıktan bakıldığında Güneş sistemimizin gezegenlerinin “yoketme” tekniği ile ayırıldığı bir simülasyon görüntüsü (Guyon ve Rodier'den [87] alınmıştır).

tartışması sürmektedir. Son yıllarda görüntüleme yöntemleri arasına, özel girişimölçer tekniklerinin kullanıldığı yeni bir yöntem dahil olmuştur. “*Yoketme (Nulling)*” adı ile anılan bu yöntemde amaç, gezegen barındırması olası bir yıldızdan gelen ışık dalgalarının, özel girişimölçüm teknikleri ile birbirini yok etmesi sonucu baskın olan ışığını azaltmak ve gezegenin düşük ışıyımına ilişkin delilleri girişim desenli görüntüde tespit etmektir (detayları için bkz. [87]). Yoketme tekniği daha önceden yıldızların etrafındaki sönük yıldız veya disk bileşenlerinin görüntülenmesinde kullanılan bir tekniktir. Son çalışmalarla bu tekniğin güneş sistemi dışı gezegen araştırmalarında da kullanılabilir hale getirilmesine uğraşılmaktadır [88] (bkz. Şekil 2.10).

Zamanlama yöntemi, atarcaların atım erişim zamanları veya periyodik değişen yıldızların ışık değişimlerine ilişkin extremum zamanlarından türetilen dönem değişimlerinin uzun zaman aralıkları içinde izlenmesiyle, gezegenlerin yıldızları üzerinde yarattığı ışık-zaman etkisini algılamaya yönelik veri analizi teknikleri içermektedir. Yıldızların gezegenleri ile ortak kütle merkezi etrafındaki hareketleri sonucu oluşan ışık-zaman etkisinin genlikleri çok küçüktür. Dolayısıyla zamanlama yönteminde kullanılacak gözlemsel veriye ilişkin zaman hassasiyetinin yüksek olması gerekmektedir. Uzun zamandan beri kullanılan bu tekniğin gezegen araştırmalarındaki uyarlamaları için bkz. [61]. Güzel bir örnek olarak, Deeg ve diğ.’nin [89] CM Dra örten çift yıldızının tutulma zamanlarından hareketle keşfettikleri $1.5-3 M_{\text{jüp}}$ arasında kütle değerine sahip olması gereken gezegen gösterilebilir.

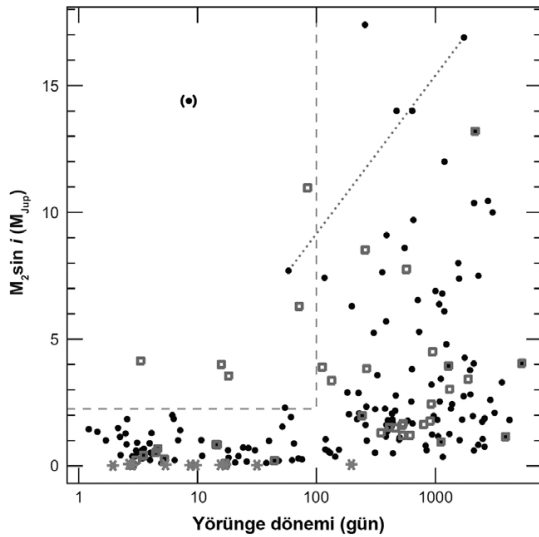
Yıldızların ışığı genelde kutuplanmamıştır. Yani onlardan bize gelen ışık dalgalarının titreşim doğrultusu rasgele dağılmaktadır. Ancak bu ışık bir gezegenin atmosferini katedip yüzeyinden geri yansıtıldığında, gezegen atmosferinin molekülleri ile etkileşmeler sonucu kutuplanır. Polarimetreler, kutuplanmamış ışığı filtreleyip yok ederken sadece kutuplanmış ışığı geçiren gözlem araçları olduğundan, bu gözlemsel tekniğin yıldızlar etrafında gezegen araştırmalarında kullanılabileceği önerildi (örneğin bkz. [90]). Bu amaçla geliştirilen polarimetreler ve veri indirgeme teknikleri için bkz. [91][92]. Ancak bu yöntemle keşfedilmiş bir güneş sistemi dışı gezegen henüz yoktur.

3. Güneş Sistemi Dışı Gezegen Araştırmalarında Ulaşılan Sonuçlar

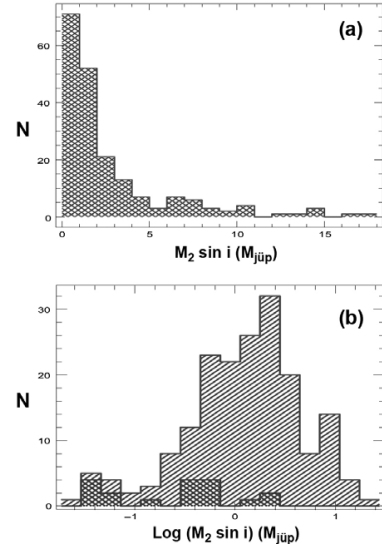
1995 yılı öncesine kadar gezegen ve güneş sistemi oluşumuna dair tüm bilgilerimiz kendi güneş sistemimize ilişkin çalışmalara dayanmaktaydı. Ancak şu ana kadar sayıları 300'ü aşan güneş sistemimiz dışı gezegenlerin büyük çoğunluğu için bu bilgilerimizin pek de geçerli olmadığını ve yeni kuramların ışığı altında ele alınmaları gerektiğini gördük [66]. Bu anlamda ayağı yere basan genellemeler/kuramlar üretebilmek için fiziksel parametreleri güvenilir yöntemlerle belirlenmiş sistemimiz dışı gezegen sayısında ciddi bir artış olması gerekmektedir. Bu da mevcut örnekler üzerinden yapılacak dikkatli (anlamalı) istatistik çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilerin ışığında ileriye dönük olarak gözlenecek hedef cisimlerin daha bilinçli bir şekilde seçilmesiyle olacaktır.

Şu ana kadar keşfedilen gezegenlerin %10'u, yörünge dönemleri 5 günden kısa dev gezegenlerdir (ilk örnek 51 Peg b'dir [1]). Bu tuhaf durum hiç de beklenen bir sonuç değildi. Beklentilerimize göre Jüpiter ve Satürn gibi dev gezegenler ancak yıldızlarından çok uzaklarda oluşabilirdi. Süpernova patlaması gibi dramatik bir süreç geçirmiş yıldızların kalıntısı olan pulsarların etrafında, üstelik birden fazla gezegen varlığı ise çok şaşırtıcıydı [5]. Keşiflerdeki çeşitlilik de gerçekten şaşırtıcıydı: Yörünge dönemi 1.2 günden [72] 10 yıla kadar [93] dev gezegenler, daha çok sistemimizdeki kuyruklu yıldızlarda görmeye alışık olduğumuz büyük dışmerkezli yörüngelere sahip gezegenler [94], birden fazla gezegeni olan sistemler [95][96], kütleleri neredeyse Yer kütlelerinde olanlardan [97][94][98][7] Jüpiter kütlelerinin 15-20 katı olanlara [99] kadar geniş bir kütle dağılımı. Bu çeşitliliğin ve mevcut sayının ışığında yapılan en son istatistik çalışmalar ve gezegen oluşum kuramlarında ortaya konan sonuçların özetlendiği, Udry ve Santos [8] ve Santos'un [66] derlemeleri başvuru kaynakları olarak gösterilebilir. Bu çalışmalara göre dev gezegen oluşumu için şu anda geçerli olan iki farklı kuram vardır. Bunlardan biri bizim sistemimizdeki dev gezegenlerin de oluşumunu açıklayan “Çekirdek Yığılma Modeli (Core-Accretion Model)”dir. Bu modele göre öncelikle gezegenimsilerin üstüste yığılması ile bir katı çekirdek oluşmaktadır. Bu katı çekirdek limit değerinde bir kütleye ulaşıncaya ($10-15 M_{\text{yer}}$), çevresindeki bulutsunun

hafif gazlarını üzerine çekerek derin bir gaz zarf oluşturur. Katı çekirdek ile gaz zarfın bu birbirini takip eden ve dengeleyen evrim süreci Pollack ve diğ. [36] tarafından detaylı olarak çalışılmış ve Alibert ve diğ. [100] tarafından tekrar gözden geçirilmiştir. “*Disk Kararsızlık Modeli (Disk Instability Model)*” ise yıldız-gezegen sisteminin kökenini oluşturan bulutsuda, erken evrelerde oluşan çekimsel kararsızlıklarla meydana gelen yerel yoğunlaşmalardan (hem gaz hem de katılarla) dev gezegenlerin doğrudan oluşmasını ve zaman içerisinde kimyasal farklılaşma sürecinden geçerek bugünkü hallerine ulaşmalarını öngörmektedir (ayrıntıları için bkz. [101][102][103]). Her iki modelin önerileri ile gezegen oluşumu olası görünse de, her sistemin kendine özgü bir dinamik evrim geçirmesi gerektiği de mevcut çeşitlilikten ortaya çıkmaktadır. Örneğin “*Sıcak Jüpiterler (Hot Jupiters)*” olarak adlandırılan ve yıldızlarına çok yakın yörüngelerde dolanan ($P_{\text{yör}} \sim$ birkaç gün) dev gezegenlerin, öncelikle yıldızlarından çok uzaklarda oluşup, daha sonra yıldız etrafında gezegen oluşturan disk (proto-planetary disk) ve diğer ön-gezegenlerle girdikleri çekimsel etkileşmeler sonucunda sistemin daha iç bölgelerine doğru göç etmiş olmaları gerekmektedir [104][105].



Şekil 3.1 Cüce yıldızlar etrafında bilinen gezegenlerin kütlelerinin yörünge dönemlerine göre dağılımı (Udry ve Santos’dan [8] alınmıştır).



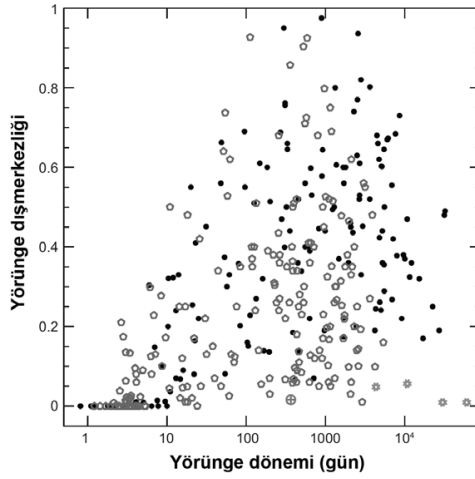
Şekil 3.2 Bilinen gezegenlerin kütlelerinin (a) doğrusal ölçekte, (b) logaritmik ölçekte sayıca dağılımı (Udry ve Santos’dan [8] alınmıştır).

Şekil 3.1’de cüce yıldızlar etrafında keşfedilmiş güneş sistemi dışı gezegenlerin olası en düşük kütle değerlerinin yörünge dönemlerine göre dağılımı görülmektedir [8]. Kesikli çizgiler 2.25

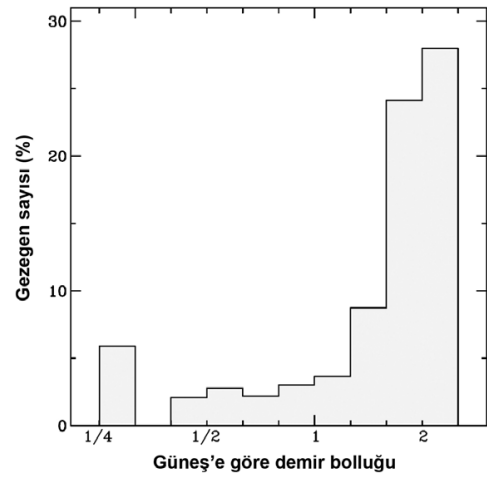
$M_{\text{jüp}}$ ve 100 gün limitlerini belirlemektedir. İçi dolu semboller tek yıldızların, boş olanlar ise çift yıldızların etrafındaki gezegenleri göstermektedir. Yıldız sembolü ise karasal gezegenler için kullanılmıştır. Bu diyagramda ilk göze çarpan özellik, kısa yörünge dönemine sahip dev gezegenler için belirli bir limitin olduğudur. Eğer çift yıldızların etrafındakiler dikkate alınmazsa, kütlesi $\sim 2 M_{\text{jüp}}$ 'den büyük ve 100 günden kısa yörünge dönemi olan gezegen olmadığını görürüz. Bu bir seçim etkisi değildir, çünkü çok sayıda gezegen keşif yöntemi bu kütle aralığındaki adayları bulmada kuvvetli yeteneklere sahiptir. Dolayısıyla bu durum, yıldız-gezegen sistemlerinin dinamik evriminde öngörülen dev gezegenlerin iç bölgelere göç etmesi olgusunda dikkate alınması gereken bir özelliktir. Bu durumda kuramların öngördüğü, kütlece çok büyük olup iç bölgelere göç eden dev gezegenler varsa ya kütesinin bir kısmını yıldızına aktararak şu anda şekil 3.1'deki dağılımda izlenen $\sim 2 M_{\text{jüp}}$ limitine ulaşmakta [106] yada yıldızı tarafından tamamen yutulup yok olmaktadır [107]. Bu diyagramın daha detaylı yorumları için bkz. [8] ve [66]. Şekil 3.2'de ise bilinen güneş sistemi dışı gezegenlerin alt limit kütlelerinin sayıca dağılımları görülmektedir [8]. Üstteki panelde kütle eşeli doğrusal, alttakinde ise logaritmik olarak verilmiştir. Şekil 3.2 (a)'daki dağılımda göze çarpan ilk özellik, keşifler için bir seçim etkisi olarak ortaya çıkan “*belirlenebilir en küçük kütle değeri*” limitine rağmen sayıca artışın daha küçük kütle değerlerine doğru olduğudur. Dağılım, $10\text{-}20 M_{\text{jüp}}$ kütle aralığı için neredeyse sıfır değerine düşmektedir. Bu diyagramda görülmeyen $20\text{-}60 M_{\text{jüp}}$ kütle aralığında düşük sayıda da olsa yıldız altı cisimler mevcuttur ve bu nesnelerin gezegenlik statüsü halen tartışılmaktadır. Aradaki bu boşluk literatürde “*kahverengi cüce çölü (brown-dwarf desert)*” olarak bilinmektedir [108] ve yıldızların düşük kütleli gezegen bileşenleri ile daha yüksek kütleli yıldız-altı bileşenlerini (kahverengi cüceleri) birbirinden ayıran sınır olarak yorumlanmaktadır (detayları için bkz. [66] ve [8]). Şekil 3.2 (b)'de, dağılımın düşük kütleli tarafında ise, yaklaşık Satürn kütesinden daha düşük kütle değerlerine doğru gidildikçe gözlemsel seçim etkisinden kaynaklanan ciddi bir yanlılığın (bias) varlığından bahsedilebilir [8].

Şekil 3.3'de bilinen güneş sistemi dışı gezegenlerin yörünge dışı merkezliklerinin dönemlerine göre dağılımı görülmektedir [8]. Bu diyagramda, içi boş semboller gezegenleri, dolu olanlar ise çift

yıldızları temsil etmektedir. Yer'in konumu $\oplus$ sembolü ile gösterilirken, sistemimizin dev gezegenleri için yıldız sembolü kullanılmıştır. Bu dağılımda ilginç bir durum dikkat çekmektedir. Yörünge dönemi 6 günden büyük gezegenlerin neredeyse tamamının yörünge dışmerkezliği, güneş sistemimizdeki dev gezegenlerinkinden çok daha büyük değerlere sahiptir. Median değeri 0.29 civarında olan bu dağılım daha çok ayırık çift yıldız sistemlerinin yörünge dışmerkezliği dağılımına benzemektedir [8]. Farklı fiziksel süreçlerle oluşan bu iki grubun nesnelerinin, şekil 3.3'deki gibi benzer bir dağılım göstermesi başlangıçta içinden çıkılması çok zor bir problem olarak görüldü.



Şekil 3.3 Bilinen güneş sistemi dışı gezegenlerin yörünge dışmerkezliklerinin dönemlerine göre dağılımı (Udry ve Santos'dan [8] alınmıştır).



Şekil 3.4 Gezegene sahip yıldızların metal bolluklarının sayıca dağılımı (Santos'dan [66] alınmıştır).

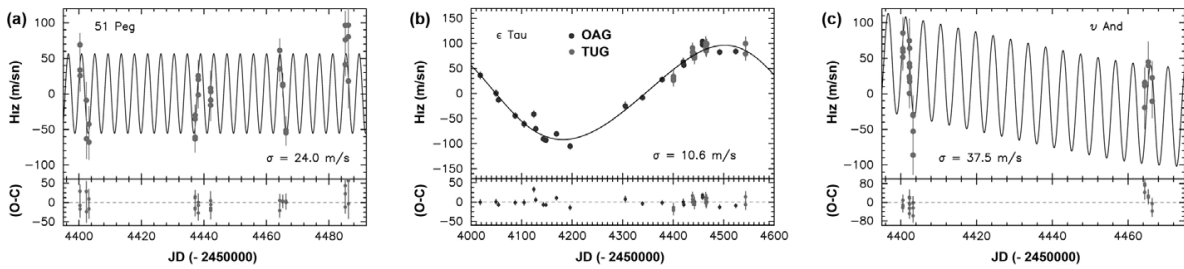
Çünkü bu durum farklı varyasyonlara sahip gezegen oluşum kuramları tarafından öngörülen bir sonuç değildi. Ancak gezegen oluşum kuramlarında, gezegen oluşturan diskin kendi içindeki etkileşmeler [109], çoklu sistemlerin dev gezegenleri arası etkileşmeler [110] ve/veya oluşumun erken evrelerinde gezegenimsilerle dev gezegenlerin çekimsel etkileşmeleri [111] dikkate alınmaya başlanınca bu problem de büyük ölçüde çözümsüzlükten kurtuldu [8]. Bu dağılımdan çıkarılan diğer sonuçlar için bkz. [30],[8] ve [66]. Şekil 3.4'de ise gezegene sahip yıldızların metal bolluklarının sayıca dağılımı verilmiştir [66]. Bu dağılım açıkça gösteriyor ki metal bolluğu Güneş'imizden daha yüksek olan

yıldızların etrafında daha fazla dev gezegen vardır. Ancak bu genellemeye henüz ihtiyatlı yaklaşılması gerekmektedir. Çünkü eldeki örnek sayısı henüz çok düşüktür ve bu dağılımın düşük metal bolluklu tarafındaki yapısı, gözlemsel amaçla seçilen adaylardaki bazı tercihler nedeniyle belirsizdir. Bunun en güzel belirteci, Neptün benzeri kütleye sahip gezegenleri barındıran yıldızlar için metal bolluğu dağılımının oldukça düz olmasıdır [112].

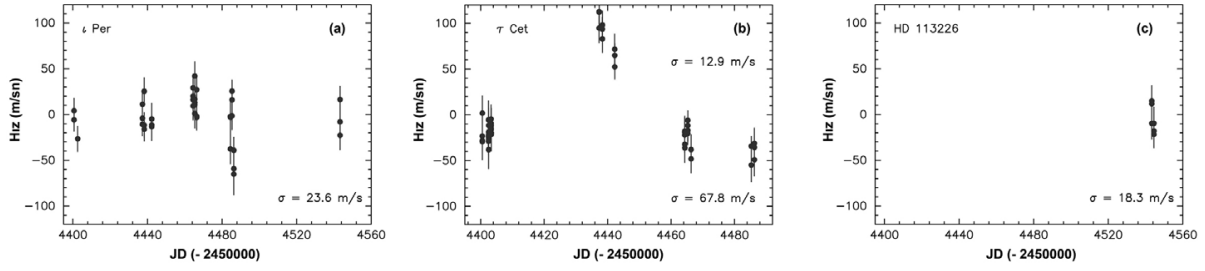
4. Güneş Sistemi Dışı Gezegen Araştırmalarında TUG’da Atılan İlk Adımlar

Ülkemizde yeni bir araştırma alanı olarak, güneş sistemi dışı gezegen arama çalışmalarını başlatmak üzere 2007 yılı ortalarında, Japon ve Rus meslektaşlarımızın da yer aldığı bir uluslararası işbirliği grubu oluşturduk. Ekibimiz, bu amaç doğrultusunda, I2-hücresiyle “hassas dikine hız ölçüm” tekniğini kullanmayı hedeflemiş ve bu hedefe hizmet edecek olan tayfsal verisini TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi’nin (TUG) RTT150 teleskobuna bağlı Coudé Échelle Tayfçeker’inden (CET) almayı planlamıştır. Gerekli I2-hücresi, bu işbirliği çerçevesinde Japon ortaklarımız tarafından Okayama Astrofizik Gözlemevi’nin (OAG) optik laboratuvarında üretildi ve TUG’a bağışlandı. I2-hücresi, ekibimiz ve TUG teknik elemanlarının teknik çalışmasıyla Ekim 2007 sonunda TUG’un CET’ine (R~40,000 kamera ile) başarıyla entegre edildi. İlgili teçhizatı bir bütün olarak, ilk kez 26-29 Ekim 2007 gözlem zamanımızda (TUG gözlem projesi no: TUG_RTT150.07.47) test ettik ve planladığımız çalışmayı gerektiği şekilde yürütmemize izin verecek olan 15 m/s düzeyinde bir ön dikine hız ölçüm hassasiyetine eriştik. Bu yeni cihaz için uzun dönemli tekrarlanabilirlik ve durağanlık testlerimiz için TUG’da 2008-I döneminde TUG-RTT150.08.11 nolu proje ile tahsis edilen zamanlarda gözlemlere devam ettik ve 2008-II gözlem döneminde tahsis edilen zamanlarda (TUG gözlem projesi no: TUG_RTT150.08.47) ise hem test gözlemlerine hem de gezegen barındırma olasılığı yüksek adayların gözlemlerine devam etmekteyiz. Şu ana kadar elde ettiğimiz test deneyimlerimize dayanarak RTT150 teleskobu ve CET+I2-hücresi kombinasyonu ile $V=3$ kadir yıldızlar

için ~ 15 dk. poz süresinde $S/N=200$ sinyal gürültü oranı ve yaklaşık 10-15 m/s dikine hız hassasiyetine, $V=6.5$ kadir yıldızlar içinse ~ 30 dk. poz süresinde $S/N=100$ sinyal gürültü oranı ve yaklaşık 25-30 m/s dikine hız hassasiyetine erişebildiğimizi söyleyebiliriz. Şekil 4.1'de dikine hız standardı ι Per ($V=4.05$, G0V), τ Cet ($V=3.50$, G8V) ve HD113226 ($V=2.83$, G8III) yıldızları için bugüne kadar elde edilen test gözlemleri ve ulaşılan hız duyarlılıkları verilmiştir. Şekil 4.2'de ise daha önceden gezegen varlığı belirlenmiş 51 Peg ($V=5.49$, G2IV), ε Tau ($V=3.54$, K0III) ve ν And ($V=4.09$, F8V) yıldızlarına ilişkin tekrarlanabilirlik gözlemlerimiz, daha önceden bu yıldızlar için önerilen modellerle birlikte verilmiştir. Ayrıca bu grafiklerde modellerle olan uyumun denetlenebilmesi açısından her panelin altında modelden olan farklar da gösterilmiştir. Bu koşullar altında araştırmamız için en uygun hedef cisimlerin G-türü dev yıldızlar olduğu ortaya çıkmıştır. G-türü devler görelî olarak parlaktır ve yavaş döndükleri için tayflarında kolay dikine hız ölçümü sağlayacak keskin ve güçlü çizgilere sahiptirler. Bu bağlamda hedef cisimlerimiz, gezegen barındırma olasılığı yüksek, daha önce yapılmış dikine hız taramalarında $RMS > 25$ m/s mertebesinde dikine hız değişimi göstermiş ancak uzun vadeli gözlenmemiş G tayf türü dev yıldızlar arasından seçilmiştir.



Şekil 4.2 Etrafında gezegen varlığı belirlenmiş (a) 51 Peg ($V=5.49$, G2IV), (b) ε Tau ($V=3.54$, K0III) ve (c) ν And ($V=4.09$, F8V) yıldızlarına ilişkin tekrarlanabilirlik gözlemlerimiz, bu yıldızlar için literatürde önerilen modellerle birlikte verilmiştir. Her panelin altında modelden olan (O-C) artıkları görülmektedir.



Şekil 4.1 Dikine hız standardı (a) ι Per ($V=4.05$, G0V), (b) τ Cet ($V=3.50$, G8V) ve (c) HD113226 ($V=2.83$, G8III) yıldızları için bugüne kadar elde edilen test gözlemleri ve ulaşılan dikine hız duyarlılıkları.

TUG RTT150 teleskobuna birkaç m/s mertebesinde hassas radyal hız ölçüm olanağı sağlayacak bir odak düzlemi aleti, bu bilimsel işbirliğimiz kanalıyla TUG'a kazandırılmıştır. Araştırma grubumuzun sürdürmekte olduğu test gözlemlerinin sonuçlandırılması ve I2-hücresiyle RTT150 Coudé Échelle Tayfçekeri'nin teknik performansının tam olarak ortaya konmasından sonra bu cihaz TUG'un ortak odak düzlemi aletlerinin bir parçası olacaktır. I2-hücresi teknikleri yalnızca güneş sistemi dışı gezegen araştırmalarında değil asterosismoloji alanında yıldız salınımlarının takibi ve yıldız atmosferlerindeki türbülant hareketlerin izlenmesi gibi düşük genlikli hız alanlarının gözlemsel olarak algılanmasında da kullanılmaktadır. Böylece ülkemiz için yeni sayılabilecek çalışma başlıklarında gözlemsel veri elde edebilmenin yolunu açmış olmakla hem TUG hem de genel olarak ülkemiz bilimsel çalışmalarında “çeşitlilik” bağlamında önemli bir katkı sağlamış olduğumuzu düşünüyoruz.

Kaynaklar

- [1] Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355
- [2] Marcy G.W., Butler R.P., 1998, *ARA&A*, 36, 57
- [3] Marcy G.W., Cochran, W.D., Mayor M., 2000, in *Protostars and Planets IV.*, (eds. V. Mannings, A.P. Boss, S.S. Russell), Tucson: University of Arizona Press, p.1285
- [4] Butler R.P., Marcy G.W., Fischer D.A., Vogt S.S., Tinney C.G., Jones H.R.A., Penny A.J., Apps K., 2004, in *Planetary Systems in the Universe*, IAU Symp No.202, (ed. A. Penny), p.3
- [5] Wolszczan A., Frail D.A., 1992, *Nature*, 355, 145

- [6] Schneider J., 2008, *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://exoplanet.eu>
- [7] Udry S., Bonfils X., Delfosse X., Forveille T., Mayor M., Perrier C., Bouchy F., Lovis C., Pepe F., Queloz D., Bertaux J.-L., 2007, *A&A*, 469, L43
- [8] Udry S., Santos N.C., 2007, *ARA&A*, 45, 397
- [9] Dick S.J., 1996, *The Biological Universe*, Cambridge:Cambridge Univ. Press, pp.10-58
- [10] Eddington A., 1928, *The Nature of the Physical World*, NewYork: McMillan
- [11] Russell H.N., 1935, *The Solar System and Its Origin*, NewYork: McMillan
- [12] Aitken R.G., 1938, *Is the Solar System Unique?*, ASP-Leaflet No. 112, June 1938, pp.98-106
- [13] Spitzer L., 1939, *ApJ*, 90, 675
- [14] Jeans J., 1942, *Science*, 95, 589
- [15] Russell H.N., 1943, *Scientific American*, 19, 18
- [16] Struve O., 1952, *Observatory*, 72, 199
- [17] Gil J.A., Jessner A., 1993, in *Planets Around Pulsars*, (eds. J.A. Phillips, J.E. Thorsett, S.R. Kulkarni), ASP-CS, Vol.36, p.71
- [18] Backer D., Sallmen S., Foster R., 1992, *Nature*, 358, 24
- [19] Chakrabarti S.K., Swamy K.S., 1992, *A&A*, 263, L1
- [20] Bisnovaty-Kogan G.S., 1993, *A&A*, 275, 161
- [21] Peale S.J., 1993, *AJ*, 105, 1562
- [22] Peale S.J., 1994, *Ap&SS*, 212, 77
- [23] Wolszczan A., 1994, *Science*, 264, 538
- [24] Wolszczan A., 1995, in *Millisecond Pulsars. A Decade of Surprise*, (eds. A.S. Fruchter, M. Tavani, D.C. Backer), ASP-CS, Vol.72, p.377
- [25] Campbell B., Walker G.A.H., Yang S., 1988, *ApJ*, 331, 902
- [26] Latham D.W., Stefanik R.P., Mazeh T., Mayor M., Burki G., 1989, *Nature*, 339, 38
- [27] Mayor M., Queloz D., 1996, in *Cool Stars; Stellar Systems; and the Sun: 9*, (eds. R. Pallavicini, A.K. Dupree), ASP-CS, Vol.109, p.35
- [28] Butler R.P., Marcy G.W., 1996, *ApJ*, 464, L153
- [29] Marcy G.W., Butler R.P., 1996, *ApJ*, 464, L147
- [30] Bodenheimer P., Lin D.N.C., 2002, *Ann. Rev. Earth & Planet. Sci.*, 30, 113
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Methods_of_detecting_extrasolar_planets
- [32] Marcy G.W., Butler R.P., Fischer D.A., Vogt S.S., 2003, in *Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets*, (eds. D. Deming, S. Seager), ASP-CS, Vol.294, p.1
- [33] Udry S., Mayor M., Queloz D., 2003, in *Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets*, (eds. D. Deming, S. Seager), ASP-CS, Vol.294, p.17
- [34] Sato B., Kambe E., Takeda Y., Izumiura H., Masuda S., Ando H., 2005, *PASJ*, 57, 97

- [35] Boss A.P., 1998, ApJ, 503, 923
- [36] Pollack, J.B., Hubickyj O., Bodenheimer P., Lissauer J.J., Podolak M., Greenzweig Y., 1996, Icarus, 124, 62
- [37] Dvorak R. (ed.), 2007, in *Extrasolar Planets: Formation, Detection and Dynamics*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA
- [38] Griffin R., Griffin R., 1973, MNRAS, 162, 243
- [39] Griffin R., Griffin R., 1973, MNRAS, 162, 255
- [40] Campbell B., Walker G.A.H., 1979, PASP, 91, 540
- [41] Marcy G.W., Butler R.P., 1992, PASP, 104, 270
- [42] McMillan R.S., Moore T.L., Perry M.L., Smith P.H., 1994, in *Planetary Systems: Formation Evolution and Detection*, (ed. B.F. Burke), Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., p.271
- [43] Cochran W.D., Hatzes A.P., 1994, in *Planetary Systems: Formation Evolution and Detection*, (ed. B.F. Burke), Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., p.281
- [44] Brown T.M., Noyes R.W., Nisenson P., Korzennik S.G., Horner S., 1995, PASP, 106, 1285
- [45] Walker G.A.H., Walker A.R., Irwin A.W., Larson A.M., Yang S.L.S., Richardson D.C., 1995, Icarus, 116, 359
- [46] Vogt S.S., 1987, PASP, 99, 1214
- [47] Libbrecht K.G., Peri M.L., 1995, PASP, 107, 62
- [48] Butler R.P., Marcy G.W., Williams E., McCarthy C., Dosanjh P., Vogt S.S., 1996, PASP, 108, 500
- [49] Merline W.J., 1985, in *Stellar Radial Velocities*, (eds. A.G.D. Philip, D.W. Latham), IAU-Colloq. No.88, p.87
- [50] Kambe E., Sato B., Takeda Y., Ando H., Noguchi K., Aoki W., Izumiura H., Wada S., Masuda S., Okada N., Shimizu Y., Watanabe E., Yoshida M., Honda S., Kawanomoto S., 2002, PASJ, 54, 865
- [51] Sato B., Kambe E., Takeda Y., Izumiura H., Ando H., 2002, PASJ, 54, 873
- [52] Butler R.P., Wright J.T., Marcy G.W., Fischer D.A., Vogt S.S., Tinney C.G., Jones H.R.A., Carter B.D., Johnson J.A., McCarthy C., Penny A.J., 2006, ApJ, 646, 505
- [53] Endl M., Kürster M., Els S., 2000, A&A, 362, 585
- [54] Marcy G.W., 2008, (kişisel görüşme)
- [55] Takeda Y., Sato B., Kambe E., Watanabe E., Miyazaki H., Wada S., Ando H., Masuda S., Izumiura H., Koyano H., Maehara H., Norimoto Y., Okuda T., Shimizu Y., Uraguchi F., Yanagisawa K., Yoshida M., Okuda N., Kawanomoto S., Miyama S.M., 2002, PASJ, 54, 113
- [56] Pagel B.E.J., 1997, in *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies*, Cambridge: Cambridge Univ. Press
- [57] Valenti J.A., Butler R.P., Marcy G.W., 1995, PASP, 107, 966
- [58] Gillilan R.L., Morris S.L., Weymann R.J., Ebbets D.C., 1992, PASP, 104, 367

- [59] Hobbs G.B., Edwards R.T., Manchester R.N., 2006, MNRAS, 369, 655
- [60] Hilditch R.W., 2001, *An Introduction to Close Binaries*, Cambridge:Cambridge Univ. Press, p.95
- [61] Doyle L.R., 2008, in *Extrasolar Planets: XVI Canary Islands Winter School of Astrophysics*, (eds. H. Deeg, J.A. Belmonte, A. Aparicio), Cambridge: Cambridge Univ. Press, p.1
- [62] http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/simPQ_index.cfm
- [63] http://www.esa.int/esaSC/120382_index_0_m.html
- [64] http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm
- [65] Benedict G.F., McArthur B.E., Gatewood G., Nelan E., Cochran W.D., Hatzes A., Endl M., Wittenmyer R., Baliunas S.L., Walker G.A.H., Yang S., Kürster M., Els S., Paulson D.B., AJ, 132, 2206
- [66] Santos N.C., 2008, NewARev, 52, 154
- [67] Carpano S., Fridlund M., 2008, A&A, 485, 607
- [68] Brown T.M., Charbonneau D., Gilliland R.L., Noyes R.W., Burrows A., 2001, ApJ, 552, 699
- [69] Mandel K., Agol E., 2002, ApJ, 580, L171
- [70] Udalski A., Paczynski B., Zebrun K., Szymaski M., Kubiak M., Soszynski I., Szewczyk O., Wyrzykowski L., Pietrzynski G., 2002, AcA, 52, 1
- [71] Udalski A., Szewczyk O., Zebrun K., Pietrzynski G., Szymanski M., Kubiak M., Soszynski I., Wyrzykowski L., 2002, AcA, 52, 317
- [72] Konacki M., Torres G., Jha S., Sasselov D., 2003, Nature, 421, 507
- [73] Alonso R., Brown T.M., Torres G., Latham D.W., Sozzetti A., Mandushev G., Belmonte J.A., Charbonneau D., Deeg H.J., Dunham E.W., O'Donovan F.T., Stefanik R.P., 2004, ApJ, 613, L153
- [74] McCullough P.R., Stys J.E., Valenti J.A., Johns-Krull C.M., Janes K.A., Heasley J.N., Bye B.A., Dodd C., Fleming S.W., Pinnick A., Bissinger R., Gary B.L., Howell P.J., Vanmunster T., 2006, ApJ, 648, 1228
- [75] Bakos G.Á., Noyes R.W., Kovács G., Latham D.W., Sasselov D.D., Torres G., Fischer D.A., Stefanik R.P., Sato B., Johnson J.A., Pál A., Marcy G.W., Butler R.P., Esquerdo G.A., Stanek K.Z., Lázár J., Papp I., Sári P., Sipöcz B., 2007, ApJ, 656, 552
- [76] Cameron A.C., Bouchy F., Hébrard G., Maxted P., Pollacco D., Pont F., Skillen I., Smalley B., Street R.A., West R.G., Wilson D.M., Aigrain S., Christian D.J., Clarkson W.I., Enoch B., Evans A., Fitzsimmons A., Fleenor M., Gillon M., Haswell C.A., Hebb L., Hellier C., Hodgkin S.T., Horne K., Irwin J., Kane S.R., Keenan F.P., Loeillet B., Lister T.A., Mayor M., Moutou C., Norton A.J., Osborne J., Parley N., Queloz D., Ryans R., Triaud A.H.M.J., Udry S., Wheatley P.J., 2007, MNRAS, 375, 951
- [77] Mao S., Kerins E., Rattenbury N.J., 2008, in *Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics*, (eds. Y.-S. Sun, S. Ferraz-Mello, J.-L. Zhou), IAU Symp. No.249, Cambridge: Cambridge Univ. Press, p.25
- [78] http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_microensing

- [79] Bennett D.P., Rhie S.H., 1996, ApJ, 472, 660
- [80] Mao S., Leob A., 2001, ApJ, 574, L97
- [81] Rattenbury N.J., Bond I.A., Skuljan J., Yock P.C.M., 2002, MNRAS, 335, 159
- [82] Bond I.A., Udalski A., Jaroszyński M., Rattenbury N.J., Paczyński B., Soszyński I., Wyrzykowski L., Szymański M.K., Kubiak M., Szewczyk O., Żebruń K., Pietrzyński G., Abe F., Bennett D.P., Eguchi S., Furuta Y., Hearnshaw J.B., Kamiya K., Kilmartin P.M., Kurata Y., Masuda K., Matsubara Y., Muraki Y., Noda S., Okajima K., Sako T., Sekiguchi T., Sullivan D.J., Sumi T., Tristram P.J., Yanagisawa T., Yock P.C.M., 2004, ApJ, 606, L155
- [83] <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html>
- [84] <http://www.eso.org/projects/aot/introduction.html>
- [85] Chauvin G., Lagrange A.-M., Dumas C., Zuckerman B., Mouillet D., Song I., Beuzit J.-L., Lowrance P., 2004, A&A, 425, L29
- [86] Neuhauser R., Guenther E.W., Wuchterl G., Mugrauer M., Bedalov A., Hauschildt P.H., 2005, A&A, 435, L13
- [87] Guyon O., Roddier F., 2002, A&A, 391, 379
- [88] Langlois M., Burrows A., Hinz P., 2006, A&A, 445, 1143
- [89] Deeg H.J., Doyle L.R., Kozhevnikov V.P., Blue J.E., Martín E.L., Schneider J., 2000, A&A, 358, L5
- [90] Schmid H.M., Beuzit J.-L., Feldt M., Gisler D., Gratton R., Henning Th., Joos F., Kasper M., Lenzen R., Mouillet D., Moutou C., Quirrenbach A., Stam D.M., Thalmann C., Tinbergen J., Verinaud C., Waters R., Wolstencroft R., 2006 in *Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques*, (eds. C. Aime, F. Vakili), IAU Coll. No.200, Cambridge: Cambridge Univ. Press, p.165
- [91] Schmid H.M., Gisler D., Joos F., Povel H.P., Stenflo J.O., Feldt M., Lenzen R., Brandner W., Tinbergen J., Quirrenbach A., Stuik R., Gratton R., Turatto M., Neuhauser R., 2004, in *Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions*, (eds. A. Adamson, C. Aspin, C.J. Davis, T. Fujiyoshi), ASP-CS, Vol.343, p.89
- [92] Hough J.H., Lucas P.W., Bailey J.A., Tamura M., Hirst E., Harrison D., Bartholomew-Biggs M., 2006, PASP, 118, 1302
- [93] Marcy G.W., Butler R.P., Fischer D.A., Laughlin G., Vogt S.S., Henry G.W., Pourbaix D., 2002, ApJ 581, 1375
- [94] Naef D., Latham D.W., Mayor M., Mazeh T., Beuzit J.L., Drukier G.A., Perrier-Bellet C., Queloz D., Sivan J.P., Torres G., Udry S., Zucker S., 2001, A&A, 375, L27
- [95] Butler R.P., Marcy G.W., Fischer D.A., Brown T.M., Contos A.R., Korzennik S.G., Nisenson P., Noyes R.W., 1999, ApJ, 526, 916
- [96] McArthur B.E., Endl M., Cochran W.D., Benedict G.F., Fischer D.A., Marcy G.W., Butler R.P., Naef D., Mayor M., Queloz D., Udry S., Harrison T.E., 2004, ApJ, 614, L81

- [97] Santos N.C., Bouchy F., Mayor M., Pepe F., Queloz D., Udry S., Lovis C., Bazot M., Benz W., Bertaux J.-L., Lo Curto G., Delfosse X., Mordasini C., Naef D., Sivan J.-P., Vauclair S., 2004, A&A, 426, L19
- [98] Lovis C., Mayor M., Pepe F., Alibert Y., Benz W., Bouchy F., Correia A.C.M., Laskar J., Mordasini C., Queloz D., Santos N.C., Udry S., Bertaux J.-L., Sivan J.-P., 2006, Nature, 441, 305
- [99] Udry S., Mayor M., Naef D., Pepe F., Queloz D., Santos N.C., Burnet M., 2002, A&A, 390, 267
- [100] Alibert Y., Mordasini C., Benz W., 2004, A&A, 417, L25
- [101] Boss A.P., 1997, Science, 276, 1836
- [102] Boss A.P., 2002, ApJ, 567, L149
- [103] Mayer L., Quinn T., Wadsley J., Stadel J., 2002, Science, 298, 1756
- [104] Papaloizou J.C.B., Terquem C., 2006, Rep. Prog. Phys., 69, 119
- [105] Terquem C., Papaloizou J.C.B., 2007, ApJ, 654, 1110
- [106] Trilling D.E., Benz W., Guillot T., Lunine J.I., Hubbard W.B., Burrows A., 1998, ApJ, 500, 428
- [107] Pätzold M., Rauer H., 2002, ApJ, 568, L117
- [108] Halbwachs J.L., Arenou F., Mayor M., Udry S., Queloz D., 2000, A&A, 355, 581
- [109] Goldreich P., Sari R., 2003, ApJ, 585, 1024
- [110] Chiang E.I., Murray N., 2002, ApJ, 576, 473
- [111] Murray N., Hansen B., Holman M., Tremaine S., 1998, Science, 279, 69
- [112] Udry S., Mayor M., Benz W., Bertaux J.-L., Bouchy F., Lovis C., Mordasini C., Pepe F., Queloz D., Sivan J.-P., 2006, A&A, 447, 361