



**KORONAGRAFİN ASTRONOMİDEKİ
UYGULAMALARI**

Burak Batuhan GÜRBULAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU
Yüksek Lisans Tezi
Astronomi ve Astrofizik Ana Bilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ASTRONOMİ ve ASTROFİZİK ANA BİLİM DALI

KORONAGRAFİN ASTRONOMİDEKİ UYGULAMALARI
(Applications of Coronagraph in Astronomy)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Batuhan GÜRBULAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU

Erzurum
Aralık, 2021



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

KORONAGRAFİN ASTRONOMİDEKİ UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU danışmanlığında, Burak Batuhan GÜRBULAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 27/12/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı Astronomi ve Astrofizik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Cahit YEŞİLYAPRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Songül DUMAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksekisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU danışmanlığında sunulan “Koronagrafin Astronomideki Uygulamaları” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	16	35
Bulgular	5	20
Tartışma	5	20
Tezin Geneli	13	25

Not: Yedi kelmeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Burak Batuhan GÜRBULAK	Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU
27.12.2021	27.12.2021
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince her tűrlű yardım ve űnerilerini esirgemeyen, bilgi ve tecrűbelerinden yararlanma fırsatı saęlayan ve sıkıntı yaőadıęım anda her konuda bana destek olan tez danıőmanım Dr. Őęr. Ŭyesi İlham NASIROęLU sonsuz teőekkűr ve saygılarımı sunarım. Tez alıőması sırasında űnerileri ve yardımları için Atatűrk Ŭniversitesi Astrofizik Araőtırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM) műdűrű Prof. Dr. Cahit YEŐİLYAPRAK'a ve ATASAM'a, Dr. Őęr. Ŭyesi Aykut ŐZDŐNMEZ'e, Arő. Gűr. Hűseyin ER, Arő. Gűr. Ahmet POLATOęLU ve araőtırmalarımındaki katkılardan dolayı Doęu Anadolu Gűzlemevi (DAG) proje ekibine teőekkűr ederim.

Őęrencilik sűreci boyunca sabrı ve gayreti için sevgili anneme, çabası ve desteği için canım babama manevi destekleri için çok teőekkűr ederim. Ayrıca bu tez çalıőmam sırasında manevi desteklerini esirgemeyen adımı yazamadığım dostlarım ve arkadaőlarıma varlıklarından dolayı minnettarım.

Burak Batuhan GŬRBULAK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ KORONAGRAFİN ASTRONOMİDEKİ UYGULAMALARI

Burak Batuhan GÜRBULAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlham NASIROĞLU

Amaç: Doğrudan görüntüleme yönteminde kullanılan koronagraf cihazının ötegezegen alanındaki uygulamaları, yer ve uzay tabanlı teleskoplarla yapılan doğrudan görüntüleme gözlemleri ve bu gözlemler ile tespit edilen ötegezegenlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın diğer bir amacı ise yakında tamamlanması planlanan Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) bünyesindeki koronagrafin doğrudan görüntüleme yöntemi ile ötegezegen araştırmalarında kullanımına zemin hazırlamaktır.

Yöntem: Elektromanyetik tayfin kızılötesi bölgesindeki ötegezegen araştırmaları incelendi. Koronagrafa sahip yer tabanlı teleskopların özellikleri ve bu teleskoplar ile 2004-2021 yılları arasında doğrudan görüntüleme yöntemi ile tespit edilen gezegenlerin fiziksel özellikleri belirlendi.

Bulgular: Bu tez kapsamında incelenen gözlemsel cihazların teknik özelliklerinden yola çıkarak doğrudan görüntüleme yöntemi ile tespit edilen ötegezegenlerin özellikleri DAG teleskobunun gözlemsel limitleri ile karşılaştırılmış olup bu teleskop ve yöntem kullanılarak gözlenebilecek adayların listesi çıkarılmıştır.

Sonuç: Yakın bir zamanda DAG bünyesindeki 4-m sınıfı optik/kızılötesi teleskop ile yapılması planlanan ötegezegen araştırmaları kapsamında kullanılması hedeflenen ‘Koronagraf Aygıtı’ ile ‘Doğrudan Görüntüleme’ yönteminin nasıl uygulanabileceğine dair bir temel oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ötegezegen, Doğrudan Görüntüleme Yöntemi, Koronagraf, Adaptif optik, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG)

Aralık 2021, 70 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

APPLICATIONS OF CORONAGRAPH IN ASTRONOMY

Burak Batuhan GÜRBULAK

Supervisor: Assis. Prof. Dr. İlham NASIROĞLU

Purpose: The aim of this thesis is to examine the applications of the coronagraph device used in the Direct Imaging method in exoplanet exploration, direct imaging observations made with ground and space-based telescopes, and the exoplanets detected with these observations. Another aim of this study is to provide a basis for the use of the coronagraph in the Eastern Anatolian Observatory (DAG) for exoplanet research with direct imaging method.

Method: Exoplanet surveys in the infrared region of the electromagnetic spectrum were studied. The properties of ground-based telescopes with coronagraphs and the physical properties of planets detected by direct imaging method with these telescopes between 2004-2019 were determined.

Findings: Based on the technical features of the observational devices examined within the scope of this thesis, the properties of exoplanets with direct imaging method were compared with the observational limits of the DAG telescope, and a list of candidates that could be observed using this telescope and method was prepared.

Results: It is provided a basis for how to apply the 'Direct Imaging' method with the 'Coronagraph Device', which is aimed to be used within the scope of exoplanet research planned to be carried out with the 4-m class optical/infrared telescope within the DAG.

Keywords: Exoplanet, Direct Imaging Method, Coronagraph, Adaptive Optics, the Eastern Anatolian Observatory (DAG)

December 2021, 70 Pages

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	viii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Elektromanyetik Tayf (EMT)	4
Kızılötesi Dalgaboyu.....	4
Ötegezegenlerin Görünür ve Kızılötesi Parlaklıkları	6
Ötegezegenlerin Keşfi	9
Keşif Yöntemleri.....	10
Radyal Hız Yöntemi.....	10
Geçiş (Transit) Yöntemi.....	11
Kütleçekimsel Mikromerceklenme Yöntemi	12
Zamanlama Yöntemi	13
Astrometri (Konum ölçüm) Yöntemi.....	13
Doğrudan (Direk) Görüntüleme Yöntemi.....	13
MATERYAL ve YÖNTEM	15
Doğrudan Görüntüleme Yöntemi.....	15
Doğrudan Görüntüleme Araçları	17
Doğrudan Görüntüleme Avantaj ve Dezavantajları.....	17
Doğrudan Görüntülemenin Parametreleri	18
Koronagraf	20
Koronagraflara Örnekler	22
Pupil Maskeleme	22
Pupil Haritalandırma Apodizasyonu	22
Band-Sınır Maske Koronagrafi	23
Vektör Vortex Maske Koronagrafi	24
Adaptif Optik (AO).....	25

Açısal Diferansiyel Görüntüleme (ADI).....	26
DAG Teleskobu	27
Doğrudan Görüntüleme Yönteminin Kullanıldığı Teleskoplara Örnekler	29
ESO 3,6 Metrelik ve ESO VISTA Teleskobu.....	29
VLT (Very Large Telescope).....	32
Subaru Teleskobu.....	34
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMALAR	38
SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	56



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Işıma Bölgeleri ve Özellikleri	4
Tablo 2. Astronomide Kıızılötesi Bölgenin Tanımlanması	5
Tablo 3. Kıızılötesi Bantlar ve Özellikleri	6
Tablo 4. Albedo ve Sıcaklık	9
Tablo 5. DAG Teleskobunun Optik ve Mekanik Özellikleri	28
Tablo 6. PLACID'in genel özellikleri.....	29
Tablo 7. ESO 3,6 metrelik teleskobunun özellikleri	30
Tablo 8. ESO VISTA teleskobunun özellikleri	31
Tablo 9. VLT'nin özellikleri.....	33
Tablo 10. SPHERE cihazının özellikleri.....	34
Tablo 11. Subaru Teleskobunun özellikleri.....	35
Tablo 12. Doğrudan görüntüleme yöntemiyle gözlemlenen gezegenler ve özellikleri.....	38
Tablo 13. Doğrudan görüntüleme yöntemiyle gözlenen gezegen ve teleskopların özellikleri.....	40
Tablo 14. Tablo 6'daki nesnelerin DAG teleskobunun gözlenebilirlik limitlerine uygun olanları.	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kullanılan yöntemlere göre günümüze kadar ötegezegenlerin keşif sayısı.	3
Şekil 2. Elektromanyetik tayfın dalga boylarına göre gösterimi.	5
Şekil 3. Doppler etkisinin temsili gösterimi.	11
Şekil 4. Transit Geçiş yönteminin temsili gösterimi.	12
Şekil 5. Kütleçekimsel mercekle etkisinin temsili görüntüsü.	12
Şekil 6. Astrometri (konum ölçüm) yönteminin temsili görüntüsü.	13
Şekil 7. 2M1207 yıldızında doğrudan görüntüleme yöntemi ile tespit edilen bir gezegen	14
Şekil 8. Very Large Telescope (VLT).	15
Şekil 9. CVSO 30 ve CVSO 30c gösterimi.	16
Şekil 10. Ötegezegen HR 8799'un Hale teleskobu'nun 1,5 metrelik bölümünden alınan görüntüsü.	17
Şekil 11. IWA ve OWA gösterimi.	19
Şekil 12. Euler açılarının gösterimi.	19
Şekil 13. Bir Lyot koronagrafinin çalışma şeması.	21
Şekil 14. a) 6 açıklığa sahip bir optimize pupil maskesi, b) karşılık gelen görüntü düzlemi kırınım deseni (merkezi yıldızın ışığı maskelenmiş ve kuramsal kontrast değerinin (10^{-10}) altında kalan akıllara sahip karanlık alanları (sağda ve solda) göstermektedir.	22
Şekil 15. PIAA'nın şematik gösterimi.	23
Şekil 16. Bir koronagraf cihazının çalışma prensibinin şematik gösterimi.	24
Şekil 17. Vektör vortex koronagrafinin örnek görüntüsü.	24
Şekil 18. Standart bir AO sistemi ve yüksek çözünürlüklü kameranın şematik gösterimi.	26
Şekil 19. ADI sisteminin çalışma prensibi gösterimi.	27
Şekil 20. DAG yerleşkesi.	28
Şekil 21. ESO 3,6 metrelik teleskobu.	30
Şekil 22. ESO VISTA teleskobu.	31
Şekil 23. ESO Very Large Teleskobu.	32
Şekil 24. SPHERE optik tezgahının ayrıntılı görüntüsü.	34
Şekil 25. Subaru Teleskobu ve yerleşkesi.	35
Şekil 26. SCEXAO ve CHARIS cihazlarının görüntüsü	36
Şekil 27. HIP 65426A ve b'nin görüntüsü.	44

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

μeV	: Mikro Elektron Volt
AB	: Astronomik Birim (Dünya ile Güneş arasındaki mesafe: $1,5 \times 10^{11}$ m)
ACS	: Gelişmiş Araştırma Kamerası (Advanced Camera for Surveys)
ADI	: Açısal Diferansiyel Görüntüleme (Angular Differential Imaging)
AO	: Adaptif Optik Sistem (Adaptive Optic System)
aO	: Aktif Optik
C_{IR}	: Kızılötesi Kontrast
DAG	: Doğu Anadolu Gözlemevi, Erzurum
DR	: Hareketli Görüntüleri Çevirip Düzelten Derotator
EHZ	: Egzahertz
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
ESO	: European Southern Observatory
eV	: Elektron Volt
feV	: Femto Elektron Volt
FOV	: Görüş Alanı
F_v	: Akı Yoğunluğu
GeV	: Giga Elektron Volt
GHz	: Gigahertz
HabEx	: Yaşanabilir Ötegezegen Gözlemevi
HST	: Hubble Uzay Teleskobu
Hz	: Hertz
IWA	: Inner Working Angle (İç Çalışma Açısı)
JWST	: James Webb Uzay Teleskobu
keV	: Kilo Elektron Volt
LTT	: Light Travel Time Effect (Işık Zaman Etkisi)
LUVUOIR	: Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor
M	: Kütle
M^*	: Yıldız Kütleli
M_{\odot}	: Güneş Kütleli ($\sim 1,99 \times 10^{30}$ kg)
MeV	: Mega Elektron Volt
meV	: Mili Elektron Volt
MHz	: Megahertz

M_J	: Jüpiter Kütlesi ($\sim 1,90 \times 10^{27}$ kg)
Mpc	: Mega Parsek
NAOJ	: National Astronomical Observatory of Japan
OWA	: Outer Working Angle (Dış Çalışma Açısı)
p	: Geometrik Albedo
Parsek	: Parsek = $\sim 3,26$ ışık yılı = $\sim 3 \times 10^{16}$ m
PHz	: Pentahertz
PIAA	: Phase-Induced Amplitude Apodization (Faz Kaynaklı Genlik Apodizasyonu)
PSF	: Yıldız Noktası Yayılma Fonksiyonu (Point-Spread Function)
RC	: Ritchey – Chretien Düzeltmesi
SCExAO	: Subaru Coronagraphic Extreme Adaptif Optik Cihazı
SLM	: Spatial-Light Modulators (Uzaysal Işık Modülatörleri)
STIS	: Uzay Teleskobu Görüntüleme Spektrografı
T_{eff}	: Etkin Sıcaklık
THz	: Terahertz
TROIA	: Turkish Adaptive Optics System for Infrared Astronomy
VLT	: Very Large Telescope
WFIRST	: Geniş Alan Kızılötesi Tarama Teleskobu
α	: Faz Açısı

GİRİŞ

Koronagraf, herhangi bir yıldızın en dış katmanı olan koronasını gözlemlemek için yıldızdan gelen ışığın bloke edilmesinde kullanılan bir araçtır. Fransız gök bilimci Bernard Lyot 1930'lu yıllarda bu aracı Güneş'in koronasını görüntülemek amacıyla icat etmiştir.

Güneş'in korona katmanı, normal zamanda yalnızca Güneş tutulmaları sırasında gözlenebilmektedir. Ay, Güneş'in önüne geçtiğinde, parlak merkez katmanları engellenir ve Güneş'in daha az parlak olan korona katmanı görünür. Bu doğa olayına benzer bir çalışma prensibine sahip koronagraf, bir teleskobun içinde Güneş ışınlarını seçici olarak engelleyen bir maske görevi görür. Bu sistem, günümüzde sadece Güneş ışınlarını incelemek için değil aynı zamanda diğer yıldızları ve ötegezegenleri incelemek içinde kullanılmaktadır.

Koronagraf kullanılarak ötegezegen keşiflerinde uygulanan doğrudan görüntüleme yöntemi, geçiş (transit) ve dikine hız (radial velocity) yöntemlerinden sonra en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntem ile hem gezegen hem de gezegenin etrafında dolandığı (konak) yıldız doğrudan görüntülenebilmektedir. Konak yıldız ile bileşenleri (ötegezegen, kahverengi cüce vb.) arasında genellikle bir parlaklık farkı olmaktadır. Dolayısıyla bu yıldızın ışığını engellemeden bileşenlerini gözlemlemek neredeyse imkansızdır. Bu nedenle bu tür cisimleri teleskoplar ile görünür hale getirebilmek için koronagraf gibi cihazlara ihtiyaç duyulur. Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle geliştirilen yeni koronagraf çeşitleri ile bilim insanlarının uzaktaki ötegezegenlerden gelen ışınları direkt olarak görmeleri mümkün hale gelmiştir.

Özelleşmiş koronagraflar, merkezdeki yıldız için bir filtre görevi görüp ondan gelen ışınları maskelerken, gezegenden gelen küçük ışık parçalarının geçmesine izin verir. Yıldız ile gezegenin açısal çözünürlüğü küçük olmasından dolayı yıldız ile ötegezegenin ışığını birbirinden ayırmak zorlu bir süreçtir. Bu nedenle ışığı maskeleyen koronagraf ve şekil değiştirebilen bir ayna yardımıyla (adaptif optik), gezegenlerin bulanık görüntüleri düzeltilerek noktasal bir kaynak olarak daha net görünmeleri sağlanır.

Ötegezegenlerin direkt olarak görüntülenebilmesi sonucunda elde edilen ışık araştırmacılara bu cisimlerin yapısı ve kimyasal içeriği hakkında önemli bilgiler sunar. Bu sayede bir gezegende su, metan, oksijen veya karbondioksit gibi maddelerin bulunup bulunmadığı incelenerek gezegenin yaşanabilirliği konusunda fikir edinilebilir.

Koronagraf kullanımının yaygınlaşmasındaki en büyük nedenlerden biri bu cihazın

ötegezegen araştırmalarında da kullanılabilir olmasıdır. Bilindiği üzere ötegezegenlerin varlıkları genellikle konak yıldızlarının önünden geçerken örtülmeden dolayı (geçiş yöntemi) veya bu gezegenlerin konak yıldızları ile aralarındaki küle çekimi etkisi sonucunda sistemin kütle merkezinin yer değiştirmesinden dolayı (dikine hız, astrometri ve zamanlama yöntemi gibi) yıldızın gözlenen ışığındaki (astrometri yöntemi için yıldız konumunun) değişimin incelendiği yöntemler ile tespit edilmektedir. Ötegezegen keşiflerinde kullanılan bu gibi dolaylı yöntemlerde yıldız ile ilgili değişimler incelendiği için gezegenle ilgili kesin sonuçlara ulaşmak zor olabilmektedir. Doğrudan görüntüleme yöntemi ise incelenen nesneyi doğrudan görme fırsatı sağladığı için yanlış sonuç verme olasılığı en az seviyededir. Dolaylı yöntemlere nazaran bu yöntem ile elde edilen görüntü ötegezegenlerin varlığını göstermek için önemli bir kanıttır. Ancak bu yöntemin yer tabanlı teleskoplarda kullanımında bazı sorunlar da olabilmektedir. Bu sorunların en önemlileri gezegenlerin yakınında parlak yıldızların olması ve bu gezegenlerin bize gelen ışığının atmosferdeki türbülans nedeniyle titreşime uğramasıdır. Atmosferdeki türbülans kaynaklı bozulmaları en aza indirmek için kullanılan ilk adım teleskopları yüksek rakıma sahip ve nemin düşük olduğu bölgelere kurmaktır. Parlak yıldız sorununun çözümleri ise ya gezegen ışınımının yıldızın ışınımından daha baskın olduğu dalga boylarını incelemek ya da ışınım gücü düşük yıldızlar etrafında gezegenler araştırmaktır. Bu sorunlara ek çözümler ise yer tabanlı teleskoplarda hem adaptif optik sistemi (atmosferik türbülans için) hem de koronagraf (yıldızın yoğun ışığını maskelemek için) cihazı kullanılmasıdır. Adaptif optik sistemi, bir dalga cephesindeki bozulmaları ölçerek deforme olabilen (uyarlanabilen) bir ayna veya bir sıvı kristal dizisi gibi cihazlarla hataların telafi edildiği bir sistemdir. Koronagraf cihazı ise yakındaki parlak nesneyi maskeleyerek incelenmek istenen gök cisimlerinden daha net ışık alınmasını sağlayan bir sistemdir.

Bu çalışmada, doğrudan görüntülemede kullanılan koronagrafın astronomide kullanıldığı alanlar, koronagraf tipleri, beraberinde kullanılan yöntemler incelenecektir. Bununla birlikte günümüze kadar bu yöntem kullanılarak gözlemlenen cisimler ve bu cisimlerin gözleminde kullanılan teleskoplar hakkında ayrıntılı bilgi edinilecektir. Tez çalışması kapsamında elde edilen bilgiler ile DAG (Doğu Anadolu Gözlemevi) bünyesinde tamamlanması planlanan 4 metre sınıfı optik (Görünür)/infrared (IR) teleskopta “Koronagraf Aygıtı” kullanılarak ‘Doğrudan Görüntüleme’ yönteminin nasıl gerçekleşeceğine dair başlıca bir temel oluşturulması hedeflenmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Ötegezegen araştırmaları, şüphesiz astrofizikteki en genç ve en hızlı gelişen alanlardan biridir. Son 30 yıldır ötegezegen araştırmaları, teknolojinin gelişmesiyle birlikte uluslararası boyutta farklı disiplinlerdeki bilim insanlarını bir araya getirerek çağımızın en ilgili çekici ve çağır açacak nitelikteki araştırma alanlarından biri haline gelmiş ve günümüze kadar bu alanda geliştirilen farklı yöntemler yardımıyla binlerce ötegezegenin keşfedilmesinin yolunu açmıştır.

Ötegezegenlere dair ilk kanıtlar, 1992 yılında bir milisaniye pulsarı (PSR B1257+12) üzerinde zamanlama yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (Wolszczan and Frail 1992). Bu çalışmadan hemen üç yıl sonra hassas radyal hız ölçümü kullanılarak ilk defa Güneş benzeri bir anakol yıldızına nispeten yakın yörüngede dolanan Jüpiter benzeri bir gaz devi olan 51 Pegasi b ötegezegeni keşfedilmiş (Mayor ve Queloz, 1995) ve bu keşif 2019 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür (Anonim 2021a). Ötegezegen keşiflerinde farklı yöntemler kullanılarak şu ana kadar 4699 gezegen keşfedilmiştir. Bunların 3471'i tekli ve 771'i ise çoklu gezegen sistemleridir (Anonim 2021b). Bu yöntemler ile yapılan ötegezegen keşiflerinin, yöntem sınıflamasına göre çizilmiş histogram dağılımları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan yöntemlere göre günümüze kadar ötegezegenlerin keşif sayısı (Anonim 2021b).

Elektromanyetik Tayf (EMT)

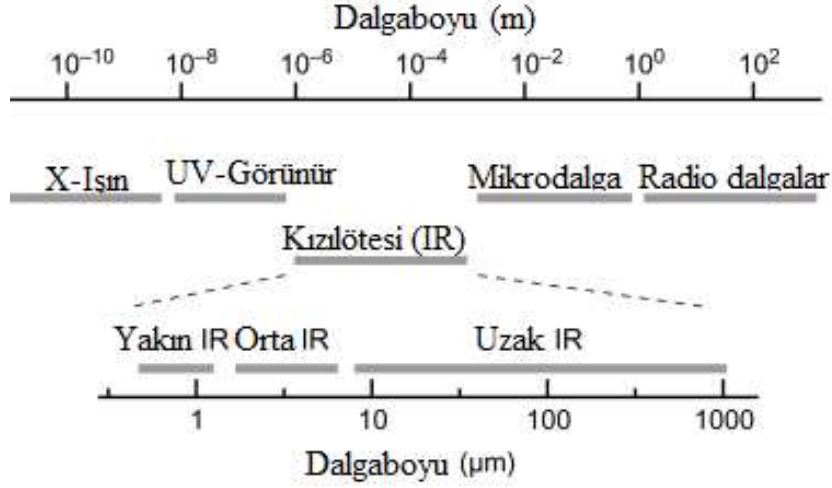
Radyo dalgalarından gama ışınlarına kadar, evrende bulunan tüm elektromanyetik dalgalar elektromanyetik tayf ile sınıflandırılır. Elektromanyetik tayf, dalgaboylarına göre atom altı değerlerden başlayıp binlerce kilometre uzunlukta olabilecek radyo dalgalarına kadar birçok farklı radyasyon tipini kapsar. Bu tip ışınların özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Koronagrafin kullanıldığı doğrudan görüntüleme yöntemi, gezegen ışığının yıldızın ışığından daha baskın olduğu kızılötesi bölgede en iyi sonucu vermektedir. Bu nedenle, bu tür araştırmaların gözlemleri genellikle bu ışımaya bölgesinde yapılmaktadır.

Tablo 1. Işıma Bölgeleri ve Özellikleri (Haynes 2011)

Bölgeler	Dalgaboyu	Frekans (Hz)	Foton enerjisi (eV)
Gama ışını	<0,01 nm	30 EHz'den fazla	124 keV'den fazla
Röntgen	0,01 nm - 10 nm	30 EHz - 30 PHz	124 keV - 124 eV
Ultraviyole	10 nm - 400 nm	30 PHz - 790 THz	124 eV - 3,3 eV
Görünür	400 nm - 700 nm	790 THz - 430 THz	3,3 eV - 1,7 eV
Kızılötesi	700 nm - 1 mm	430 THz - 300 GHz	1,7 eV - 1,24 meV
Mikrodalga	1 mm - 1 m	300 GHz - 300 MHz	1,24 meV - 1,24 µeV
Radyo	1 m - 10.000 km	300 MHz - 30 Hz	1,24 µeV - 124feV

Kızılötesi Dalgaboyu

Kızılötesi (kırmızı-öte, infrared veya IR) ışınım, dalgaboyu görünür ışıktan uzun (>700 nm), fakat mikrodalgalardan (<1 mm) daha kısa olan elektromanyetik ışınımdır. Bu dalgaboyu aralığı, yaklaşık 430 THz ile 300 GHz arasındaki bir frekans aralığına karşılık gelmektedir. Kızılötesi radyasyon, sıcaklığı olan herhangi bir nesne tarafından yayınlanır. Aslında tüm gök cisimleri kızılötesinde bir miktar ışımaya yapar. Bir nesnenin en yoğun şekilde ışımaya yaptığı dalga boyu sıcaklığına bağlı olup sıcaklığının azalmasıyla kızılötesindeki ışımaya daha belirgin bir şekilde ortaya çıkar ve bu nedenle bu dalga boyunda incelenmesi diğer dalgaboylarına göre daha uygun olmaktadır. Kızılötesi genellikle yakın, orta ve uzak kızılötesi olarak 3 tayfsal bölgeye ayrılır. Bu bölgeler hakkında genel bilgi Şekil 2 ve Tablo 2’de verilmiştir (Azazy 2018).



Şekil 2. Elektromanyetik tayfin dalga boylarına göre gösterimi (Zhang and Hoshino 2019).

Tablo 2. Astronomide Kızılötesi Bölgenin Tanımlanması (Anonim 2021c)

Tayf Bölgesi	Dalgaboyu Aralığı (μm)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$)	Gözlenecek Nesne
Yakın IR	(0,7-1,0) – 5,0	740 – (3000-5200)	Soğuk kırmızı yıldızlar; Kırmızı devler, Yüksek kızıla kaymalı patlamalar; Gökadalar, Evrenin ilk zamanları.
Orta IR	5,0 – (25-40)	(92,5-140) – 740	Gezegenler; kuyruklu yıldızlar, Küçük gezegenler; Öngezegensel (protoplanet) disk.
Uzak IR	(25-40)–(200-350)	(10,6-18,5) – (92,5-140)	Gökadaların merkez bölgeleri; Çok soğuk moleküler bulutlar.

Yakın-IR (0,7- 1,1 μm) gözlemleri, 1960'lardan beri yer tabanlı gözlemevlerinde görsel bölge gözlemleriyle hemen hemen aynı şekilde ısı veya termal radyasyona duyarlı detektörler ve filtreler (Tablo 3) kullanılarak yapılmaktadır. Orta ve uzak -IR gözlemleri ise bu dalga boyları atmosfer tarafından bloke edildiği için yalnızca uzaya konuşlu teleskoplar ile yapılabilmektedir. Bu gözlemler, elektrik direnci ısıya karşı çok hassas olan germanyum gibi kristaller içeren özel soğutmalı detektörlerin kullanılmasını gerektirir. Görünür ışıktan uzaklaşıp daha uzun dalga boylu ışığa doğru (yakın-IR bölgeye) gidildiğinde görünür ışıktaki belirgin bir şekilde gözlenebilen sıcak mavi yıldızlar kaybolurken daha soğuk olan kırmızı dev yıldızlar ve düşük kütleli kırmızı cüceler daha belirgin bir hale gelir. Bu bölge aynı zamanda

yıldızlararası tozun en az etkileştiği bölgedir (Rieke 2009).

Tablo 3. Kızılötesi Bantlar ve Özellikleri

Kızılötesi Bantlar	λ_c (μm)	Akı (Jy)	Geçirgenlik	Kaynak
J	1,1-1,4	1600	Yüksek	(Campins, H et. al. 1985)
H	1,5-1,8	1080	Yüksek	(Campins, H et. al. 1985)
K	2,0-2,4	670	Yüksek	(Campins, H et. al. 1985)

Tayfın orta-IR bölgesine gidildiğinde ise gezegenler, kuyruklu yıldızlar ve asteroitler gibi daha soğuk nesnelere görünmeye başlar. Gezegenler ev sahibi yıldızlarından gelen ışığı soğurarak ısınır ve bu ısıyı kızılötesi ışık olarak yeniden yayarlar. Güneş sistemindeki gezegenler ve asteroitler gibi cisimler sıcaklıkları $\sim 53\text{-}573$ K arasında olup ışımlarının çoğunu orta kızılötesi dalga boyunda yayımlarlar. Bu dalga boyu karanlık asteroitlerin yerini, bileşimini ve çapını tespit etmede kullanılan en uygun dalga boyudur. Madde fırlatan yıldızların etrafındaki toz da orta-IR bölgede ışıma yapar. Bu toz bazen o kadar kalındır ki yıldızlar neredeyse hiç parlamaz ve bu yıldızlar yalnızca kızılötesi ile tespit edilebilir. Yeni oluşan yıldızların etrafındaki maddeden oluşan ilkel-gezegen diskleri de orta-IR bölgede gözlenebilmektedir. Bu diskler muhtemelen yeni gezegenlerin oluşmakta olduğu yerlerdir (van Dishoeck 1999)

Uzak-IR bölgesinde gidildiğinde yıldızların görüntüsü kaybolarak yerine daha soğuk olan (sıcaklığı 140 K veya daha az) Samanyolu galaksisi veya yakın galaksilerdeki büyük gaz ve toz bulutları görüntülenebilir. Yıldız oluşum bölgelerinin yer aldığı bu bulutların bazılarında bu gözlemler sayesinde ilkel-yıldızların kütle çekim altında büzüşmeye uğramadan önce yaydıkları ısı algılanarak tespit edilebilir. Yoğun toz bulutlarına gömülü kalın yıldız konsantrasyonu nedeniyle Samanyolu galaksisinin merkezi de uzak-IR bölgede ışıma yapar. Bu yıldızların ışımları tozu ısıtarak kızılötesinde parlamasına neden olur (Robson 1979).

Ötegezegenlerin Görünür ve Kızılötesi Parlaklıkları

Bir gezegenden yansıyan yıldız ışığının genellikle, bir yüzeye herhangi bir yönden gelen ışığın her yöne eşit olarak yansıdığını belirten bir Lambert yasasına uyduğu varsayılır. Lambert yasası, bir yüzeyin bir kısmından ayrılan ışık miktarının yansıyan yönde yansıtılan alanla orantılı olmasını ifade eder. Yani bir gözlemci için, bir gezegenin aydınlatılmış yüzeyinin herhangi bir öngörülen alanının görünür parlaklığı, o görünen alan içinde yüzeye çarpan yıldız

ışığının miktarı ile orantılıdır.

Bir gezegenin faz açısı (α) yıldızdan gözlemciye gezegen merkezli açıdır. Örneğin, Ay bir Lambert yansıtıcı olsaydı, dolunay ($\alpha = 0$) evresinde herhangi bir kenar kararması olmayan tek tip parlak bir nesne gibi görülürdü, fakat ilk dördün evresinde Ay ($\alpha = \pi/2$) Güneşe bakan tarafta parlak bir kenar varmış gibi görünür ve o kenardan merkeze doğru yansıtılan alanla orantılı olarak sıfır yoğunluğa ulaşır. Pratikte, Mars, Dünya ve Ay gibi kayasal cisimler, Lambert yüzeyinden daha düzgün bir şekilde parlak olma eğilimindeyken Venüs ve Jüpiter gibi bulutlu gezegenler, Lambertian'a daha yakın olma eğilimindedir.

Albedo ya da yansıtılabilirlik, yüzeylerin yansıtma gücü veya bir yüzeyin üzerine düşen elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesidir. Bir gezegenin geometrik albedosu (p), $\alpha = 0$ 'da gezegen parlaklığının, gezegen ile aynı konuma ve görünür boyuta sahip mükemmel bir şekilde yayılan bir diskin parlaklığına oranı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle p , sıfır faz açısında bir gözlemciye yansıyan akının, gezegende meydana gelen yıldızdan gelen akıya oranıdır. Geometrik albedo genel olarak dalga boyuna bağlıdır. Görünür bant için p_V 'nin sayısal değerleri Tablo 4'te listelenmiştir. Bir gezegenin yansıyan ışık kontrastı şu şekilde yazılabilir (Traub and Oppenheimer 2010):

$$C_{vis} = p\phi(\alpha)\left(\frac{r_p}{a}\right)^2 \quad (1)$$

burada, $\phi(\alpha)$ faz yasasıdır (integral faz fonksiyonu), α faz açısı, r_p gezegen yarıçapı ve a ise gezegenden yıldıza olan mesafedir (yarı büyük eksen). Lambert küresi için faz yasası şöyledir:

$$\phi(\alpha) = [\sin(\alpha) + (\pi - \alpha)\cos(\alpha)]/\pi \quad (2)$$

Bu yasa, Venüs gibi yüksek albedolu gezegenler için iyi bir yaklaşımdır.

Kayalık, düşük albedolu olanlar gibi diğer tür gezegen yüzeyleri için uygun ifadeler yoktur, fakat bu tür nesnelere sıfır faz açısında nispeten daha güçlü yansımaya sahip olma eğiliminde olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bunun nedeni faz fonksiyonunun, sıfırdan uzak açılarda, Lambert yasasından daha küçük olma eğiliminde olmasıdır. Bununla birlikte, daha iyi bir versiyonun olmaması nedeniyle, Lambert yasası genellikle ötegezegenler için kullanılır.

Örneğin, Dünya/Güneş ve Jüpiter/Güneş sistemlerinin, Lambert küreleri olarak yansıtıkları varsayılarak maksimum uzamadaki görünür kontrastları, aşağıdaki gibidir.

$$C_{vis}(E) \simeq 2,1 \times 10^{-10} \quad (3)$$

$$C_{vis}(J) \simeq 1,4 \times 10^{-9}$$

Bir gezegenin Bond albedosu (A_{Bond}) yansıyan toplam ışığın gelen toplam ışığa oranı olarak tanımlanır. Burada "toplam" bolometrik, yani tüm dalga boylarında ve gezegenin tüm yüzeyi boyunca anlamına gelmektedir.

T etkin sıcaklığındaki bir siyah cismin yayılımı F, yüzeyinin birim alanından dışarıya doğru olan radyasyonun toplam akısıdır ve şu şekilde verilir:

$$F = \int B_v dv \cos(\vartheta) d\Omega = \int \pi B_v dv = \sigma T^4 \quad \text{erg / (scm}^2) \quad (4)$$

Burada, ϑ normalden yüzeye olan açı, $d\Omega = \sin(\vartheta) d\vartheta d\phi$, ϕ normalin etrafındaki azimut ve σ ise Stefan-Boltzmann sabitidir. Bir yıldız için L ışımaya gücü,

$$L = 4\pi r_s^2 \sigma T^4 \quad (5)$$

ile ifade edilir. Bu kısımda r_s yıldızın yarıçapı ve T etkin sıcaklıktır (Thompson 2009).

Bir yıldızdan gelen akı, a mesafesindeki bir gezegene ulaştığında a^{-2} oranında seyrelir. Bunun bir bölümü ($1 - A_{bond}$) gezegen tarafından emilir. Ortaya çıkan ışınımsal denge sıcaklığı (*radiative equilibrium temperature*) T_{equil} , yıldız ışınımından gelen ısının, toplam yüzey alanının bir bölümüne (f-fraksiyonu) eşit olarak dağıldığını ve bir bütün olarak yayıldığı varsayılarak gelen akının yayılan akıya eşit olduğu kabul edilerek belirlenir.

$$T_{equil} = \left(\frac{1 - A_{Bond}}{4f} \right)^{1/4} \left(\frac{r_s}{a} \right)^{1/2} T_s \quad (6)$$

Burada hızlı dönen bir gezegen için $f = 1$ ve sıcaktan soğuga ısı transferi olmadan kütleçekimsel olarak kilitlenmiş veya yavaş dönen bir gezegen için $f = 0,5$ 'dir. T_{equil} değeri, ısının yayıldığı alanın f-fraksiyonunu ifade eder; bu formülasyon, gelen ısının hiçbirinin kalan alanın $(1 - f)$ 'ye dağılmadığını, dolayısıyla çok soğuk olacağını varsayar.

Bir gezegenin etkin sıcaklığı T_{eff} , deneysel olarak ölçülen kızılötesi yayılım tayfına bir kara cisim eğrisi uydurularak (fit ederek) belirlenir. Bir gezegenin dahili bir ısı kaynağı varsa, $T_{equil} < T_{eff}$; aksi takdirde bu değerler eşittir. Tablo 4'te, Güneş Sistemindeki gezegenler için A_{Bond} , T_{equil} ve T_{eff} değerleri listelenmiştir. Karasal gezegenlerin ihmal edilebilir iç ısı kaynaklarına sahiptir. Bu nedenle $T_{eff} = T_{equil}$ kabul edilir ancak dev gezegenlerin (Uranüs hariç) termal kızılötesinde ölçüldüğü gibi önemli bir iç ısıya sahiptir. Örneğin, Jüpiter, yalnızca albedo'dan $T_{equil} = 110$ K'ne sahipken; iç ısı, gözlemlenen etkin sıcaklığı 124 K'ye kadar yükseltir.

Tablo 4. Albedo ve Sıcaklık (de Pater I. and Lissauer J. J. 2001; 2010)

Gezegen	a (AB)	p (görünür geom. alb.)	A _{bond} (Bond alb.)	T _{equil} * (K)	T _{eff} † (K)
Merkür	0,387	0,14	0,12	433	433
Venüs	0,723	0,84	0,75	231	231
Dünya	1,000	0,37	0,31	254	254
Ay	1,000	0,11	0,12	269	269
Mars	1,524	0,15	0,25	210	210
Jüpiter	5,203	0,52	0,34	110	124
Satürn	9,543	0,47	0,34	81	95
Uranüs	19,19	0,51	0,29	58	59
Neptün	30,07	0,41	0,31	46	59

* T_{equil} A_{Bond}'dan hesaplanır.

† T_{eff}, karasal gezegenler için T_{equil}'e eşit olarak kabul edilir, ancak etkin sıcaklık gaz devleri için ölçülür.

Bir gezegen-yıldız sisteminin kızılötesi kontrast C_{IR} değeri, her iki cismin de eşit şekilde parlak kara cisimler olduğu varsayılarak tahmin edilir. Bu durumda, kontrast, gezegen fazına değil, yalnızca etkin sıcaklıklara ve yarıçaplara bağlıdır ve bir güneş sistemi ikizi için bu kontrast değerlerini $\lambda = 10 \mu\text{m}$ referans dalga boyunda bulunur.

$$C_{IR}(\lambda) = \frac{B_{\lambda}(T_p)r_p^2}{B_{\lambda}(T_s)r_s^2} \quad (7)$$

Kızılötesinde maksimum uzamadaki görünür kontrastları;

$$\begin{aligned} C_{IR}(E) &\simeq 8,2 \times 10^{-8} \\ C_{vis}(J) &\simeq 2,8 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (8)$$

şeklindedir.

Ötegezegenlerin Keşfi

Güneş sistemi dışındaki yıldızların yörüngesinde dolanan ve Jüpiter kütlelerinin aşağı-yukarı 13 katından daha küçük kütleyle sahip gezegenler, ötegezegen olarak isimlendirilirler (Boss et al. 2007; Winn 2018). Bu ötegezegenler, radyal hız, geçiş, mikromerceklenme, zamanlama, konum ölçüm gibi yöntemler ile keşfedilerek gezegene ait bazı astrofiziksel parametreler (çap, kütle, periyot, gibi) elde edilir. İlk ötegezegen keşif araştırmalarına 1938 yılında Sproul Gözlemevi'nde konum ölçüm metodu uygulanmaya başlanmıştır (van de Kamp 1943). Campbell et al. 1988 tarafından 1988 yılında radyal hız tekniği ile ötegezegen keşfi çalışmaları yapılmış olup gezegene ait minimum kütle (yörüngesel eğimin sinüsü ile kütle çarpımı) ve periyot hesaplanmıştır. Ötegezegen keşiflerine ön ayak olan ilk keşif, 1992 yılında

Wolszczan and Frail (1992) tarafından PSR 1257+12 milisaniye atarcasının çevresinde dolanan gezegenin keşfi olmuştur. Bu gezegen keşfinden hemen sonra, 51 Pegasi yıldızının radyal hız değişimleri incelenerek etrafında dolanan bir gezegenin ($0,41 M_{jup}$) olduğu tespit edilmiştir (Mayor and Queloz 1995). Bu ötegezegen Güneş tipi bir yıldız etrafında keşfedilen ilk ötegezegen olması nedeniyle oldukça önemlidir. Daha sonra bu keşif Marcy ve Butler (1995) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda da doğrulanmıştır. 1998 yılında dikine hız tekniği kullanılarak M tayf türünden bir yıldız etrafında dolanan dev bir gezegen ($2,1 M_{jup}$) olan “Gliese 876 b” keşfedilmiştir (Marcy et al. 1998). Kısa bir süre sonra dikine hız yöntemi kullanılarak “HD 209458 b” ötegezegeni keşfedilmiştir (Mazeh et al. 2000). Ayrıca bu ötegezegen geçiş yöntemi kullanılarak gözlenmiş ve ışık eğrisi elde edilmiştir (Brown et al. 2001).

NASA'nın Kepler Misyonu (Batalha 2014) gibi geçiş araştırmaları, tespit edilen bir gezegenin yarıçapı ve periyodu hakkında bilgi verir. Doğrudan görüntüleme metodunda ise, yıldız ve gezegen sistemleri direk olarak görüntülenebilmektedir. Bu metod, bir yönden ötegezegen keşifleri için uygulanan bir metod olup diğer yönden bilinen diğer keşif metodlarının bir tür bütünlücüsü ve doğrulayıcısı olmaktadır. Gezegen keşifleri, astronomide yeni bir dönemi başlatmıştır. Dünyanın çeşitli bölgelerindeki astronomlar tarafından ötegezegen çalışmalarının yapıldığı uluslararası bilimsel projelerin ivmeli bir biçimde artmasına sebep olmuştur. Bu gelişmeler yeni metodların ve teknolojilerin doğmasına ön ayak olmuştur (Wei 2018). Ötegezegenler ile ilgili çalışmalar, Güneş benzeri yıldızların çevresindeki gezegenlerin ve bu gezegenlerden farklı özellikleri olan gezegenlerin oluşumunu-evrimini ve ilişik olduğu yıldız sistemlerinin yörünge evrimini çok daha iyi kavranmasını sağlayabileceğinden dolayı oldukça önemlidir (Hellier, 2001; Horner et. al. 2012).

Keşif Yöntemleri

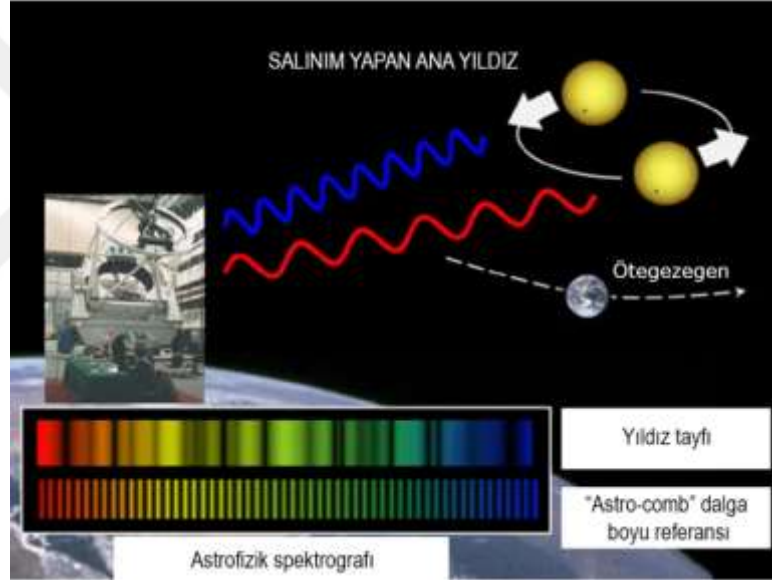
Radyal Hız Yöntemi

Kepler döneminden önce en yaygın kullanılan radyal hız tekniği en başarılı gezegen keşif yöntemlerinden biri olmaya devam etmektedir. Gezegeni olan bir yıldız sisteminde kütle çekim etkisi nedeniyle iki cisim (yıldız-gezegen) sistemin ortak kütle merkezi etrafında dönmeye zorlanır. Konak yıldızın bu hareketi gözlemciye bakış doğrultusu boyunca periyodik bir salınım (ileri-geri hareket) olarak görünür. Bu salınım, yüksek çözünürlüklü bir tayfçeker ile kaydedilebilen yıldız tayfında Doppler kayması olarak gözlenir (Şekil 3). Ötegezegen varlığına işaret eden dikine hızlardaki bu değişim, yüksek tayfsal çözünürlük, yüksek aletsel kararlılık ve doğru dalga boyu kalibrasyonu gerektirir (Perryman 2011).

Yörünge periyodu P ve yörünge düzlemi i'nin eğimi ile M_* kütesine sahip ana yıldızın yörüngesinde dönen M_p kütleli bir gezegen için, yıldız radyal hız yarı genliği,

$$K = 28,4ms^{-1} \left(\frac{P}{1 yr} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{M_p \sin i}{M_j} \right) \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (9)$$

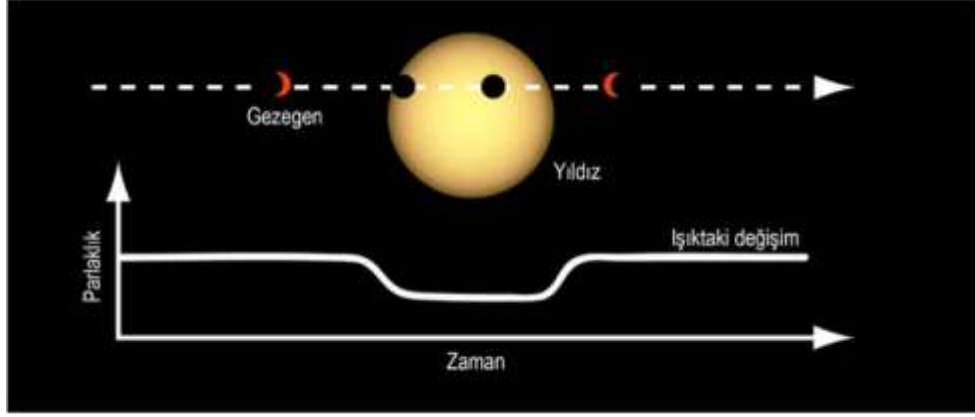
(Jüpiter için $K_J = 12,5 ms^{-1}$) şekilde ifade edilebilir (Perryman 2011). Radyal hız yöntemi, düşük kütleli yıldızların (M_*) etrafındaki büyük kütleli (M_p) ve kısa yörünge dönemli (P) gezegenlerin tespitinde daha hassastır. Bu yöntemde kullanılan en başarılı projelerden biri olan HARPS (the High Accuracy Radial velocity Planetary Search Project) ile süper Dünyalar (Wright et al. 2016 Tarafından Wolf 1061) ve hatta dünya boyutundaki gezegenler de tespit edilebilmiştir. Aynı zamanda yedi gezegene sahip sistemlerinden biri olan HD 10180 gibi çoklu gezegen sistemlerini tespit etme yeteneğine de sahiptir (Lovis et al. 2011) .



Şekil 3. Doppler etkisinin temsili gösterimi (Anonim 2020a).

Geçiş (Transit) Yöntemi

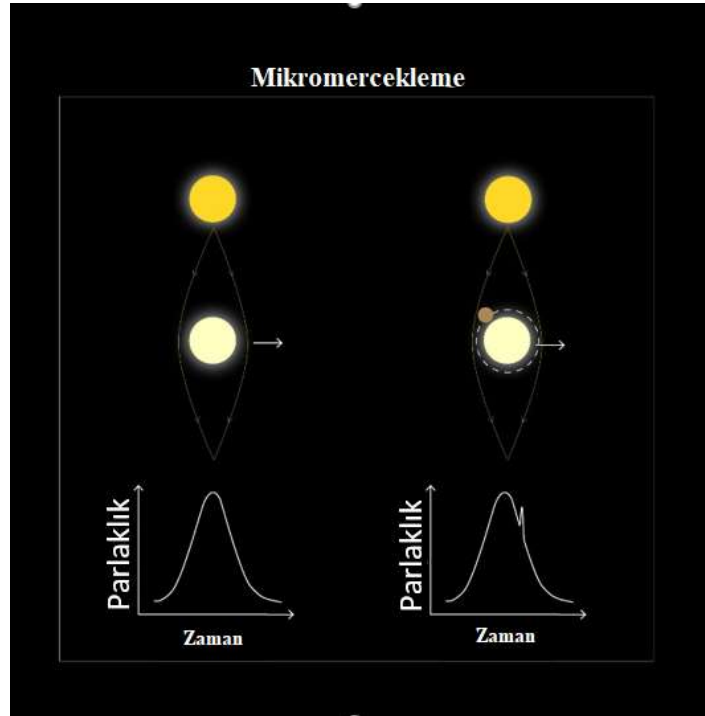
Bir ötegezegen, bağlı yıldızının önünden geçtiğinde, yıldız ışığının bir bölümünü engeller. Bu geçiş, ışık eğrisinde bir düşüş olarak algılanabilir. Gezegen yıldızın arkasından geçtiğinde ikincil bir tutulma veya örtülme de meydana gelebilir (Şekil 4). Bu da sistemin tüm akısında daha küçük bir düşüşe neden olur. Geçişler, geçiş yapan gezegenin yarıçapları hakkında bilgi verir. Kütle hakkında bilgi sağlayan radyal hız gözlemleriyle birleştirildiğinde, iki teknik birlikte gezegenin yoğunluğunu verir. Bu, ötegezegenlerin doğasını belirlemede çok önemlidir (Mayor and Frei 2003).



Şekil 4. Transit Geçiş yönteminin temsili gösterimi (Anonim 2020b).

Kütleçekimsel Mikromercekleme Yöntemi

Kütleçekimsel mikromercekleme, bir arka plan ışık kaynağı (genellikle Galaktik şişkinlik bölgesinde bir yıldız), bir ön plan merceği (örneğin bir yıldız-gezegen sistemi) ve bir gözlemcinin tesadüfen aynı doğrultuda hizalanmasına dayanır. Kaynaktan gözlemciye gelen ışık, mercek görevi gören ana yıldız tarafından bükülür ve güçlendirilir (Şekil 5). Eğer yıldız etrafında bir gezegen var ise gezegenin yerçekimi ışığı ayrıca bükerek ışık eğrisi üzerinde ani bir artışa (pike) neden olur. Böyle bir mikromercekleme ışık eğrisi, bir gezegen sisteminin bileşenlerinin kütle ve yörünge yarıçapı tahminlerini sağlayabilir (Wright and Gaudi 2012).



Şekil 5. Kütleçekimsel mercek etkisinin temsili görüntüsü (Anonim 2020c).

Zamanlama Yöntemi

Pulsarlar ve örten çift yıldızlar gibi sistemler ışıklarında periyodik bir değişim gösterirler. Bu tür sistemlerde gezegenlerin olması durumunda gezegenin kütle çekimi etkisi sistemin uzayda yalpalamasına ve sistemdeki yıldızların birbirlerini örtmesi sırasında (veya pulsarlardaki atım sırasında) sistemin bizden uzaklaşıp örtülme ışığının (veya pulsar atımlarının) bize biraz daha geç veya bize yaklaşmış ışığının bize biraz daha erken gelmesine neden olur. Işık-zaman etkisi (LTT effect: Light-Travel Time effect) olgusu olarak yorumlanan bu yöntem bu tür sistemlerde gezegensel kütleli bileşenlerin varlığını araştırmak için kullanılabilir (Horner et al. 2012, 2013; Marsh et al. 2014). İlk ötegezegen PSR B1257+12B bu yöntem kullanılarak keşfedilmiştir (Wolszczan ve Frail 1992).

Astrometri (Konum ölçüm) Yöntemi

Astrometri, gök cisimlerinin gökyüzü düzleminde konumlarının ve hareketlerinin ölçülmesidir. Gezegenler, yörüngesinde dolandıkları yıldız/ lar ile birbirine kütleçekimsel olarak bağlı olup (gezegenin kütleğine bağlı olarak) yıldızın üzerinde bir tedirginlik oluştururlar ve yıldızın yalpalamasına (konum değiştirmesine) neden olurlar (Şekil 6). Bu yöntem kapsamında yıldızın gökyüzü düzlemindeki hareketi incelenerek yörüngede gezegen olup olmadığına bakılabilir. Radyal hız ve geçiş gözlemleri için tamamlayıcı bir tekniktir ve en çok geniş ölçüde ayrılmış gezegenlere duyarlıdır (Wright and Gaudi 2012; Perryman et al. 2014).

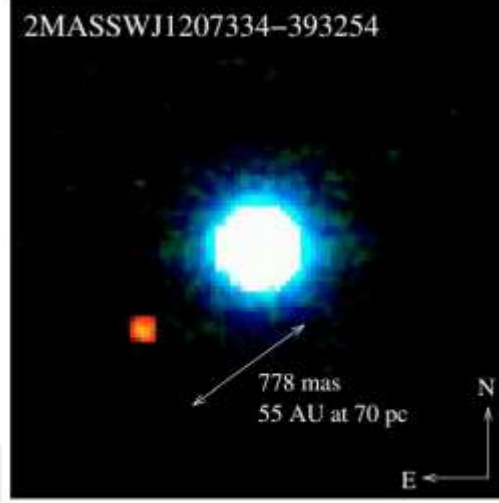


Şekil 6. Astrometri (konum ölçüm) yönteminin temsili görüntüsü (Anonim 2020d).

Doğrudan (Direk) Görüntüleme Yöntemi

Ötegezegen keşiflerinin büyük çoğunluğu, gezegenin etrafında dolandığı yıldızının parlak ışığı altında doğrudan gözlenmesi zor olduğu için bu yıldızların ışık eğrilerindeki değişimleri ve/veya kütleçekimsel etkileri temel alan dolaylı yöntemler (geçiş, radyal hız, zamanlama vb.) aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Doğrudan görüntüleme yöntemi ise doğrudan ötegezegen keşfinin yapılabildiği tek yöntemdir. Bu yöntem sistemdeki gezegenin

yıldız üzerine uyguladığı etkileri gözetlemeksizin direk gezegenin (veya atmosferlerinin) görüntülenmesini temel alan bir methodtur (Şekil 7). Doğrudan görüntüleme, ötegezegenlerin ya konak yıldızlarından yansıyan ışığın ya da gezegenin kendi kızılötesi termal yayınının doğrudan tespitine dayanmaktadır (Mayor and Frei 2003).



Şekil 7. 2M1207 yıldızında doğrudan görüntüleme yöntemi ile tespit edilen bir gezegen (Chauvin et al. 2004).

MATERYAL ve YÖNTEM

Doğrudan Görüntüleme Yöntemi

Gezegenler, yıldızlara kıyasla son derece sönük ışık kaynakları olup konak yıldızlarının parlaklığında kaybolma eğilimindedir. Bu sebeple gezegenleri doğrudan yıldızlarından tespit etmek ve incelemek genellikle güçtür. Yıldızlarından oldukça uzak yörüngelerde dolanan gezegenler konak yıldız/ların ışığının az bir kısmını yansıttığı için bu tür gezegenlerin keşfedilmesi çoğunlukla termal yayınının gözlenmesi ile daha rahat gözlenebilmektedir. Bu yüzden böyle bir gezegen görünür banda göre infrared bantta çok daha parlak görülür (Brooks et al. 2015). Aslında genel olarak gezegeni net bir şekilde görüntüleyebilmek için yıldızın keskin ışığını maskelemek gerekmektedir. Koronagraf cihazları, engelleme işlemi gerçekleştirebilmesi için tasarlanmış olup gezegeni görünür kılarken, yıldızdan ulaşan ışığın büyük bir kısmını maskelemektedir (Anonim 2021d). Bu yöntemin kullanıldığı ötegezegen araştırmaları 8-10 metre arası çaplara sahip yer temelli teleskopları veya uzay teleskoplarını gerektirir (Şekil 8).



Şekil 8. Very Large Telescope (VLT) (Anonim 2021e).

Doğrudan görüntüleme, yıldızın yaşından ve gezegenin sıcaklığından kaynaklanan, gezegenin kütesinin yalnızca bir kısmını verebilir. Yıldız doğumundan birkaç milyon yıl sonra gezegenler doğabileceğinden, gezegenin kütesi önemli ölçüde değişebilir. Gezegen ne kadar soğuksa, küteside orantılı olarak daha küçük olması beklenir. Bazı hallerde, bir gezegenin sıcaklığına, görünen parlaklığına, yarıçapına ve Dünya ile gezegen arasındaki uzaklığına

bağımlı olarak belirli sınırlamalar getirmek mümkün olabilir. Diğer taraftan gezegenlerden elde edilen spektrumların yıldız spektrumlarından ayrıştırılmasına gerek, duyulmayabileceğinden bu hal gezegenlerin kimyasal bileşimini belirlemeyi kolay duruma getirir. Doğrudan görüntüleme, gezegenin yıldız etrafındaki yörüngesini doğru bir şekilde ölçmek için kullanılabilirdiği gibi (Şekil 9) bir yıldızla kütleçekimsel olarak bağlı olmayan gezegen kütleli nesnelere de doğrudan görüntüleme yöntemiyle bulunabilir.



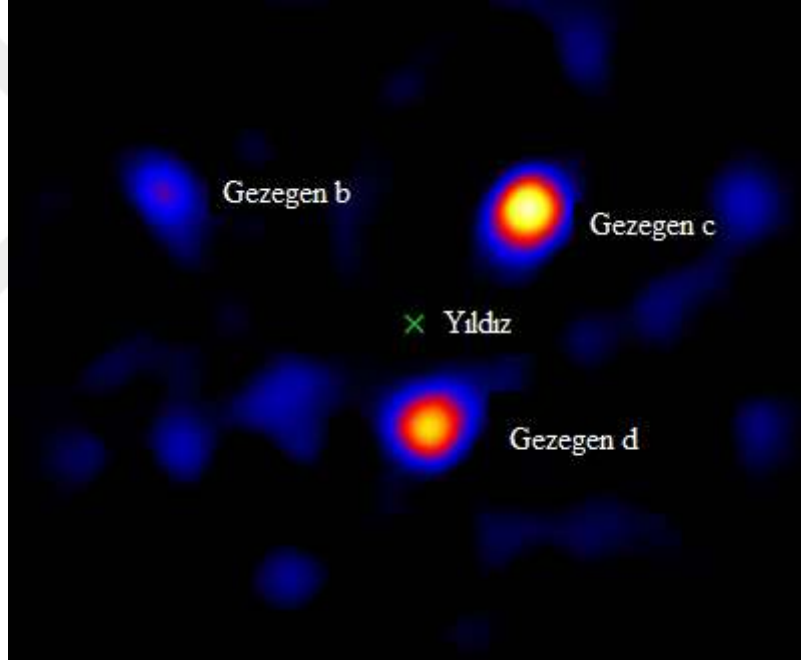
Şekil 9. CVSO 30 ve CVSO 30c gösterimi (Anonim 2021f).

Doğrudan Görüntüleme yöntemiyle şu ana kadar 147 ötegezegen keşfi yapılmıştır (Anonim 2021g). Bu yöntem ile ilk kez 2004 yılında Şili'deki Avrupa Güney Gözlemevi'ndeki VLT teleskopları kullanılarak kahverengi cüce 2M1207'nin etrafında dolanan 2M1207 b' (Şekil 7) doğrudan görüntüsü alındı (Chauvin et al. 2004). Sonraki bir yıl boyunca yine bu yöntem ile yapılan gözlemler sonucunda bu gezegenin kimliği ve özellikleri doğrulandı (Chauvin et al. 2005). Daha sonra diğer yöntemler kullanılarak da ayrıca bu gezegen varlığı teyit edildi (Ducourant et al. 2008). Eylül 2008'de, 1RXS J160929.1–210524 yıldızından 330 AB uzaklıkta bir nesne görüntülendi. Ancak 2010 yılına kadar bu nesnenin bir gezegen olduğu ve yıldızının etrafında dolandığı doğrulanabildi. Hem Keck Gözlemevi'nde hem de Gemini Gözlemevi'ndeki teleskoplar kullanılarak ilk kez doğrudan görüntüleme yöntemi ile HR8799 yıldızının etrafında birden çok gezegen tespiti yapıldı (MacIntosh et al. 2008). Benzer şekilde Hawaii'deki Subaru Teleskobu kullanılarak GJ 758 kahverengi cüce yıldızı etrafında 12,8 M_J kütleyle sahip bir "Süper Jüpiter" gezegeni görüntülendi (Thalmann et al. 2009). Yakın bir zamanda ise yine doğrudan görüntüleme yöntemi ile VLT (SPHERE cihazıyla) Teleskobu kullanılarak YSES 2 yıldızı etrafında gezegenin varlığına dair kanıtlar gözlemlendi (Bohn 2021).

Doğrudan Görüntüleme Araçları

Gemini Planet Imager (GPI) (Macintosh 2014), VLT-SPHERE (Beuzit et al. 2008), Palomar Project 1640 (Dekany et al. 2013), Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCEXAO) gibi doğrudan görüntüleme özelliklerine sahip sistemlerle zenginleştirilmiş birtakım projeler bulunmaktadır. Bu araçlar yıldızların yörüngesindeki gezegenleri gözlemek için bu yıldızların ışığını engellemek üzere tasarlanmıştır.

2010 yılında, NASA'nın Jet Tahrik Araştırma Laboratuvarı'ndan (NASA's Jet Propulsion Laboratory) bir ekip, bir girdap koronagrafinin gezegenleri doğrudan görüntülenmesinin mümkün olabileceğini göstermiştir. Şekil 10'da, Hale Teleskobunun sadece 1,5 metre genişliğindeki bir bölümünü kullanarak önceden görüntülenmiş HR 8799 gezegenlerini görüntülemeyi başarmışlardır (Howard 2011).



Şekil 10. Ötegezegen HR 8799'un Hale teleskobu'nun 1,5 metrelik bölümünden alınan görüntüsü (Howard 2011).

Doğrudan Görüntüleme Avantaj ve Dezavantajları

Doğrudan görüntüleme yöntemi, gezegenleri doğrudan görüntülemenin yanında gezegenin başka fiziksel özelliklerinin ortaya çıkmasına büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır. Öncelikle transit ve dikine hız yöntemlerinin en duyarlı olduğu olası hedef gezegenler, küçük yörüngeli ve yörünge düzleminin bakış doğrultusuyla aynı olduğu büyük gezegenlerdir. Doğrudan görüntüleme metodu ise, büyük yörüngeli ve yörüngesi bakış doğrultusuna mükemmel yakın hizada olmasını gerektirmeyen büyük gezegenlere hassastır. Böylece bu

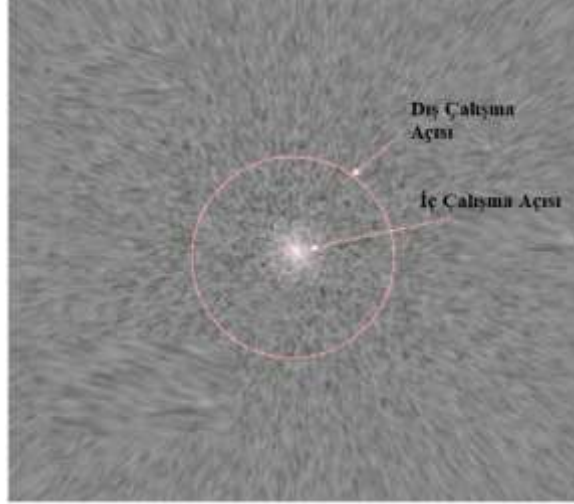
metod, gezegenlerin oluşum ve evrimini incelemek için diğer metodların noksan olduğu parametre uzayının kalan kısımlarını doldurmaktadır. Dahası bu metod ile gezegen doğrudan görüntülenebildiğinden tayf alınarak bu gezegenlerde yaşanabilirlik hakkında verilere ulaşmak için atmosferik bileşimi ve sıcaklık incelenebilir.

Bu metodun dezavantajları ise şu an için tespit edilmeye uygun olan oldukça az sayıda gezegen bulunmasıdır. Bu durum bir gezegenin tespit edilebilmesi için çok daha fazla yıldızın araştırılarak gözlenmesini gerektirir. Ek olarak şu anki teknolojinin kısıtlamalarının sebep olduğu dezavantajlar ise Dünya'dan gözleendiğinde yıldız ve gezegenleri arasındaki açısal ayrılık ve yüksek karışıklıktır. Konak yıldızın ışığı gezegenin tüm ışığını bastırarak kadar parlak olduğunda bu gezegenleri gözlemek oldukça zordur. Diğer taraftan kullanılan birtakım teleskopların açısal çözünürlükleri, yıldız ve bileşeni olan gezegenin arasındaki uzaklığı çözümlmek için yeterli olmayabilir (Zhao 2019). Bu zorlukların üstesinden gelmek için aşağıdaki tekniklerin bir kombinasyonu kullanılmıştır:

- ✓ Yıldızın teleskop odak düzlemindeki parlamasını bir koronagraf kullanarak bastırmak;
- ✓ Sıfırlayıcı interferometri ile yıldız ışığını ortadan kaldırmak;
- ✓ Uzaysal çözünürlüğü artırmak için geniş açıklıklı teleskopları kullanmak;
- ✓ Adaptif optik (Adaptive optics) kullanmak - kırınım sınırlı çözünürlük elde etmek için dalga cephesi düzeltmesi yapmak için parlak bir referans yıldızın dalga cephesini ölçmek.

Doğrudan Görüntülemenin Parametreleri

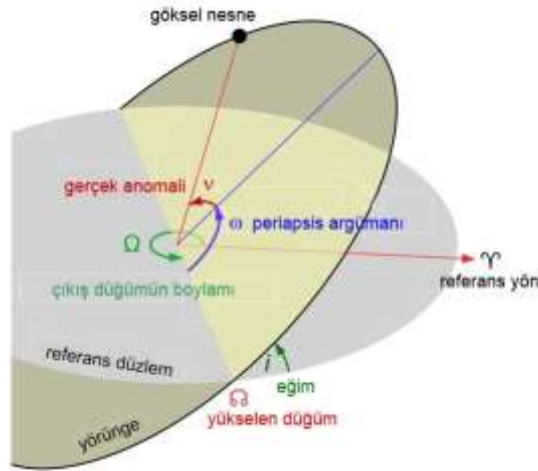
Doğrudan görüntüleme tekniğiyle bir ötegezegen, geometrik ve fotometrik koşulların cihaz tarafından karşılanabilmesiyle gözlenebilir. Geometrik koşul, gezegenin yıldızından açısal ayrımının cihazın iç çalışma açısı (IWA; Inner Working Angle) ve dış çalışma açısının (OWA; Outer Working Angle) (Garrett 2018) oluşturduğu dairesel bölgenin içinde olmasını gerektirir (Şekil 11). Fotometrik koşul ise, gezegenden yansıyan ışığın, yıldız ve gezegen (Δmag) arasındaki parlaklık farkının cihazın parlaklık limit değerinin (Δmag_0) altında olmasını gerektirir. Basit bir ifadeyle, bir gezegen cihazın görüş alanında bulunuyorsa ve görülebilecek kadar parlaksa tespit edilebilecektir. Bu gezegensel yörünge ve fiziksel parametreler aşağıdaki dört varsayımı takip eder (Savransky et al. 2011):



Şekil 11. IWA ve OWA gösterimi (Salter 2008).

- Negatif spesifik yörünge enerjisine sahip yakın Kepler yörüngeleri sıradan gezegen yörüngelerine benzerdir.
- Yörünge kutupları, gök küre üzerinde düzgün bir şekilde dağılmıştır.
- Rezonans yörüngeleri gibi gezegen-gezegen etkileşimlerine bağlı etkiler göz ardı edilir.
- Gözlemciden hedef yıldızın uzaklığı, hedef yıldızdan herhangi bir gezegene olan uzaklıktan çok daha büyüktür.

Bu varsayımlar, her bir yörüngenin “ $a, e, \psi, \pi, \theta, \varphi$ ” parametre setiyle tanımlanmasına izin verir. Burada a yarı büyük eksen, e eksantriklik ve ψ, θ, φ , gözlemcinin referans çerçevesindeki yörüngenin yönünü belirleyen Euler açılarıdır (kuzey düğüm noktasının sağ açıklığı, eğim, yerberi açıklığı (perigee argümanı)). Gerçek anomalik (true anomaly) v , gözlem anında gezegenin yörüngesindeki konumunu verir (Şekil 12).



Şekil 12. Euler açılarının gösterimi (Sickle 2015).

Görünen veya öngörülen gezegen-yıldız ayırımının (s) ve yıldız ile gezegen arasındaki parlaklık farkının (Δmag) algılama sınırlamalarını kıyaslamak için fonksiyonel bir açıklama gereklidir. Birinci ve üçüncü varsayımlardan, gezegen ile yıldız arasındaki bilinen Kepler mesafesi

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v} \quad (10)$$

Dördüncü varsayım ise gezegen-yıldız ayırımını veren yıldız-gezegen-gözlemci veya faz açısının bir yaklaşımıyla sonuçlanır.

$$s = r \sin \beta \quad (11)$$

Kahverengi gezegen ve yıldız arasındaki akıların oranını (Brown 2005);

$$F_R \triangleq \frac{F_P}{F_S} = p\Phi(\beta) \left(\frac{R_p}{r}\right)^2 \quad (12)$$

p gezegenin geometrik albedosu, R_p gezegenin yarıçapı ve Φ gezegenin faz fonksiyonudur. F_R 'nin daha büyük değerleri daha parlak gezegenleri, daha küçük değerler ise daha sönük gezegenleri temsil etmektedir. Gezegenlerin yansıyan ışıpta merkezdeki yıldızlarından daha parlak olması beklenmez, bu sebeple akı oranının maksimum değeri vardır. Akı oranı da parlaklık büyüklüğünün bir farkı olarak ifade edilebilir.

$$\Delta mag = -2,5 \log_{10} F_R \quad (13)$$

Belirli bir gezegen geometrik ve fotometrik kriterleri karşılırsa gezegen tespitinin gerçekleştiği varsayılır.

$$\begin{aligned} IWA \times d < s < OWA \times d \\ \Delta Mag < \Delta Mag_0 \end{aligned} \quad (14)$$

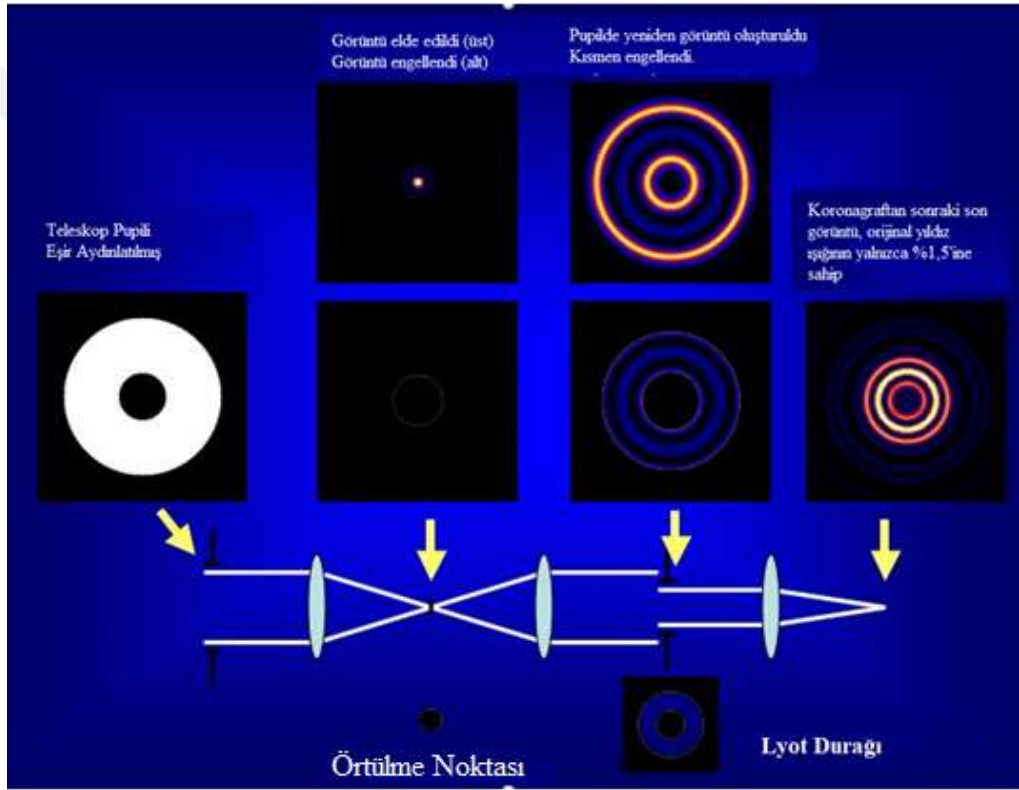
burada, IWA ve OWA'nın yay-saniyesi cinsinden, hedef yıldızın olan uzaklık d parsek cinsinden ve s ise astronomik birim (AB) cinsinden ölçülür.

Koronagraf

Bir koronagrafın ortaya çıkış amacı, Güneş'in korona tabakasını gözlemek için Güneş'in ışığını maskeleyecek şekilde tasarlayan bilim adamı Bernard Lyot'a dayandırılmaktadır. Klasik Lyot koroneri olarak isimlendirilen bu tasarım, Güneş'in koronasını gözlemek için odak düzleminde Lyot durağı ve katı bir okülter olarak isimlendirilen bir iris

kullanılarak Güneş ışığının maskelenmesi temeline dayanır (Anonim 2021d). O dönemden beri hem ilişkili foton gürültüsünü bastıran hem de detektörü satüre olmadan daha uzun poz sürelerine izin veren koronagraf (Şekil 13) tasarımlarının gelişmesiyle ötegezegenlerin keşiflerinde çok önemli bir yer almıştır (Xin 2018).

NASA'nın misyonlarından olan Hubble Uzay Teleskobu ve yakın gelecekte tamamlanması/yapılması planlanan James Webb Uzay Teleskobu (JWST, 2021), WFIRST (Wide Field Infrared Survey Telescope, 2025), HabEx (Habitable Exoplanet Observatory, 2035) ve LUVOIR (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor, 2039) gibi birtakım uzay teleskop projelerinde koronagraf aletleri kullanılması planlanmaktadır (Anonim 2021h).



Şekil 13. Bir Lyot koronagrafının çalışma şeması (Sivaramakrishnan et. al. 2001).

Tek bir dalga boyundaki dairesel açıklıklar için düz bir dalga cephesi olduğunda tüm eksen üzerindeki yıldız ışığını maskeleyip kaldırmak için tasarlanmış koronagraflar olmasına karşın, yer bazlı teleskoplarda, atmosferik çalkantılar neticesinde meydana gelen dalga cephesi sapmalarının varlığı yine de ışığın sızmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple en yüksek hassasiyete ulaşmak için uyarlanabilir optik sistem (AO, Adaptif Optik) gibi dalga cephesi kontrol metodlarıyla birlikte kullanılan koronagrafa ihtiyaç duyulur. Bu koronagraflar dört ana kategoriye ayrılabilir: optik ışının birden çok kopyasını engellemeye dayanan interferometrik koronagraflar, pupili (teleskop açıklığı) maskelemeye dayalı apodizasyon koronagrafları,

modifiye faz maskeli Lyot koronagraf tasarımları ve modifiye genlik maskeli Lyot koronagraf tasarımlarıdır (Traub and Oppenheimer 2010).

Koronagraflara Örnekler

Pupil Maskeleye

Pupil maskeleye yönteminde, pupil Şekil 14'te gösterildiği gibi içinden dalga cephesinin geçebileceği 6 adet konik kesiğe sahip opak bir tabaka ile kaplıdır. Bu kesikler, pupilin sol ve sağ kenarlarından daha az merkezinden ise daha çok ışık geçirmek için tasarlanmıştır. Gökyüzünde öngörülen bu sol ve sağ alanlardan odak düzleminde kırınım uğramış sönük ışık gözlenir ve bu nedenle bu alanlarda bir gezegen tespit edilebilir. Sola ve sağa dik olan keskin kenarlar bulunmayıp çok az kırınım görülür. Dik yönde (örneğin yukarı ve aşağı) çok sayıda dikey kenar olduğundan bu yönlerde çok fazla ışık kırılır. Bu nedenle gökyüzündeki tarama alanı, hedef eşiğin altındaki (örneğin 10^{-10}) bir kırınım ile öngörülen alanlarla sınırlıdır. Bu pupil maskeleye türleri laboratuvarında test edilmiş ve yaklaşık 10^{-7} kadar derin karanlık bölgelere ulaşmıştır (Kasdin et. al. 2003;2005).

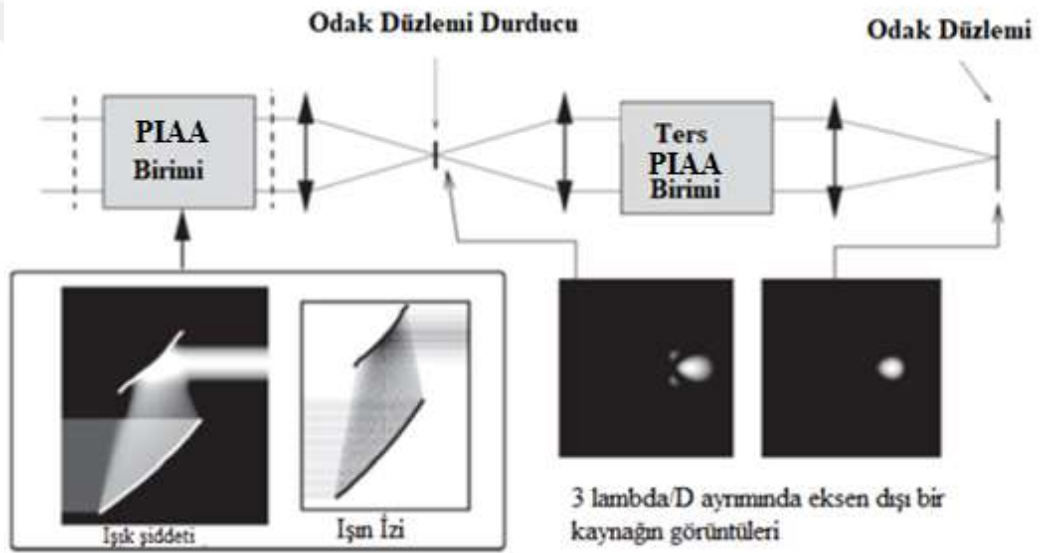


Şekil 14. a) 6 açıklığa sahip bir optimize pupil maskesi (Traub and Oppenheimer 2010), b) karşılık gelen görüntü düzlemi kırınım deseni (merkezi yıldızın ışığı maskelenmiş ve kuramsal kontrast değerinin (10^{-10}) altında kalan akılara sahip karanlık alanları (sağda ve solda) göstermektedir (Traub and Oppenheimer 2010).

Pupil Haritalandırma Apodizasyonu

Bir pupil ile Gauss benzeri bir genlik dağılımı elde etmenin bir başka yolu da pupili tekdüze bir şekilde doldurmayacak fakat merkeze yakın bir yerde toplayıp kenarlarda seyrekleşmiş şekilde gelen ışınları yeniden düzenlemektir. Bu, elektrik alanının genliğini merkezde daha güçlü ve kenarlarda daha zayıf hale getirecektir. Bu etki iki küresel olmayan mercek (veya ayna) ile oluşturulabilir. Sistemde ilk mercek, açıklığı (aperture) geçen dalga cephesini açıklık boyunca yakınsayacak şekilde biçimlendirilmiştir. Bu sayede ışınlar giriş yönüne paralel olarak devam eder. İkinci mercek, yakınsak ışınların odaklanmasından önce,

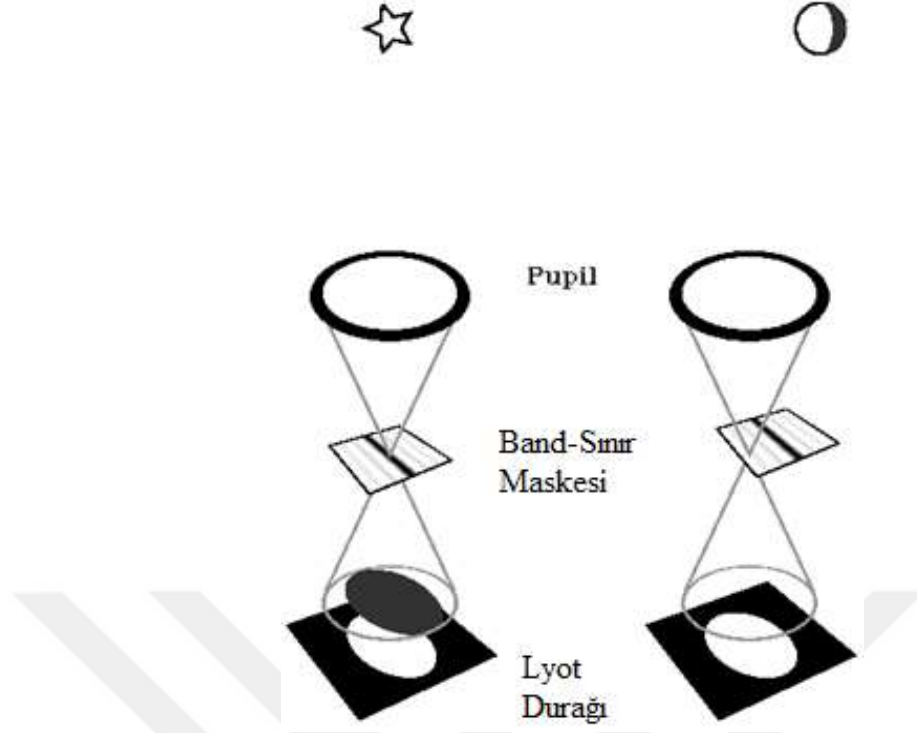
tüm bu ışınları yeniden paralel hale getirecek şekilde yerleştirilir. Çıkan (output) ışın demeti, gelen ışın demeti ile aynı çapa sahip olacak, ancak Gauss benzeri bir genlik dağılımı ile merkeze yakın yerde parlak ve kenara yakın yerde ise sönük olacaktır. Mercek çifti, bir çift eksen dışı ayna ile değiştirilebilir ve ikinci aynaya bir eksen dışı paraboloid dahil edilebilir, böylece ek bir optiğe ihtiyaç duyulmadan yıldız görüntüsü oluşturulur. Bu yöntem, teleskop tarafından toplanan tüm gelen enerjiyi (ışın demetini) kullandığından ve kuramsal çap limiti olan λ/D 'ye yakın bir yerde yıldız görüntüsü oluşturduğundan, teorik olarak optimum bir koronagraf türüdür. Pupil haritalama kavramı aynı zamanda faz kaynaklı genlik apodizasyonu (PIAA; Phase-Induced Amplitude Apodization, Şekil 15) olarak da adlandırılır (Guyon, 2003; Traub and Vanderbei, 2003).



Şekil 15. PIAA'nın şematik gösterimi (Traub and Oppenheimer 2010).

Band-Sınır Maske Koronagrafi

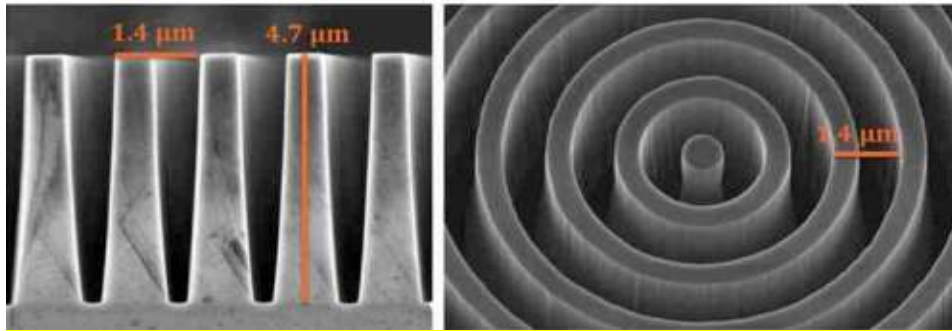
Şekil 16, bir band-sınır maske koronagrafinin nasıl çalıştığını şematik olarak gösterir: ışık pupilden geçer ve bir görüntü maskesi üzerinde birleşir, ardından pupil bir Lyot durağında görüntülenir. Görüntü maskesinin ortasına odaklanan yıldız ışığı, şeklin solunda gösterildiği gibi Lyot durağının onu engelleyebileceği pupil kenarlarına doğru kırılır. Bir gezegenden gelen ışık, şeklin sağında gösterildiği gibi, ikinci pupil düzleminin etrafından kırılır ve büyük ölçüde Lyot durağından geçer. Bu koronagrafta (Kuchner and Traub 2002), eksen üzerindeki bir kaynaktan gelen tüm ışık, pupilin kenarlarına yakın bir bölgeye kırılır, böylece bir Lyot durağı aynı şekilde hepsini engelleyebilir. Maske tarafından kırılan ışığın böyle bir görüntü maskesi tipik olarak bir dizi koyu renkli halka veya şeritten oluşur (Kuchner and Traub 2002; Trauger and Traub 2007)



Şekil 16. Bir koronagraf cihazının çalışma prensibinin şematik gösterimi (Traub and Oppenheimer 2010).

Vektör Vortex Maske Koronagrafi

Bir vektör vortex, modelin merkezine odaklanmış bir yıldız ekseninde sıfırlanacak şekilde, fotonun polarizasyonunun ortogonal bileşenleri üzerinde çalışan bir maskedir. Bu tasarımın bir versiyonu, oluk aralığı bir dalga boyundan daha küçük olan bir cam plaka içinde oyulmuş eş merkezli dairesel oluk setidir (Şekil 17). Olukların inceliği, kırılan ışığın yan sızılara girememesini, ancak orijinal yönünde yayılmaya devam etmesini sağlar.



Şekil 17. Vektör vortex koronagrafinin örnek görüntüsü (Delacroix C. et al. 2013).

Bununla birlikte, oluk derinliği, fotonun elektrik vektörünün lokal oluk yönüne paralel yansıtılan kısmı, dikey vektör bileşeninden farklı bir optik yol görecek şekilde tasarlanmıştır ve tasarımın daireselliği sayesinde, ortalanmış bir yıldız görüntüsü etkili bir şekilde olacaktır.

Genliğinin yarısı diğer yarısına göre yarım dalga boyu kadar geciktirilmiştir. Eksen üstü ışık böylece sıfırlanır, ancak enerji korunur. Işık, gelen ışına bir açıyla kırılır. Bu oluklar dairesel olmayan şekilde simetrik olabilir ve azimutta dönüş başına birden fazla tam dalga boyunda toplam gecikmeler oluşturur (Mawet et al. 2010).

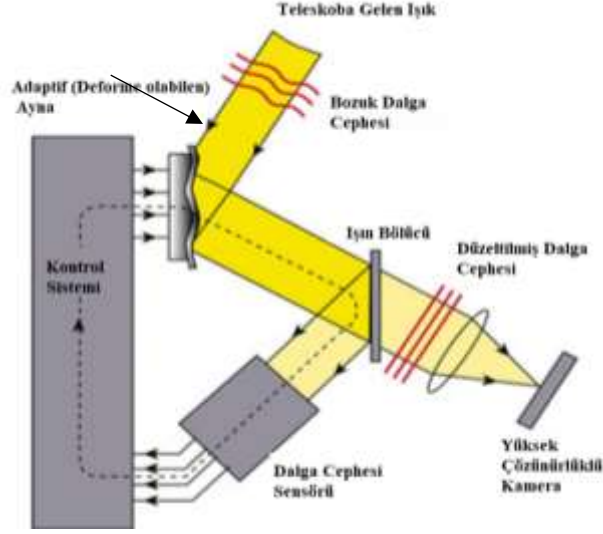
Adaptif Optik (AO)

Atmosferik dalga cephesi hatasının etkisini asgari düzeye indirmek için yer bazlı teleskoplarda kullanılan adaptif optik sistemi, teleskobun giriş açıklığındaki (pupil) dalga cephesi sapmalarını ölçen bir ön-dalga sensörü (WFS) ve bu sapmaları düzeltmek için deforme olabilen aynanın (DM) kullanıldığı bir uygulamadır (Rimmele and Marino 2011; Platt and Shack 2001). Şekil 18'de tipik bir adaptif optik sisteminin şematik şeklini gösterimi yer almaktadır.

Teleskobun pupilinden gelen sapsmaya uğramış bir dalga cephesi deforme olabilen ayna tarafından yansıtılarak ışın bölücü tarafından bölünür. Işığın bir kısmı ön-dalga sensörüne gider ve bu da kapalı döngü kontrol sistemi aracılığıyla deforme olabilen aynaya geri iletilerek dalga cephesindeki sapmalarının ölçümü sağlanır. Dalga cephesindeki sapma miktarına göre deforme olabilen ayna kendisini yeniden şekillendirerek ışık üzerindeki atmosferik etkiyi düzeltmiş olur. Düzeltilen ışık odak düzlemi kamerasına veya koronagraf gibi aletlere iletilmektedir.

Koronagrafik işlem sonrası dalga cephesinde hata kalıntılarının koronagrafik veriler üzerindeki etkisini azaltmak için birçok yaklaşım mevcuttur. En başarılı yöntemlerden biri, verilerden çıkarmak için sapmaların varlığında yıldız noktası yayılma fonksiyonunun (PSF) yapısını belirlemek için referans gözlemleri kullanmayı içerir. Bazı görüş alanlarında, AO için uygun bir kılavuz yıldız yoktur. Bu durumlarda, lazer kılavuz yıldızlar (LGS), ışığı mezosferden yansıtarak yapay yıldızlar oluşturmak için kullanılabilir. Atomik sodyum hattına (589 nm) ayarlanmış lazerler, 90 km yükseklikte sodyum katmanını harekete geçirmek için kullanılır. Sodyum tabakasının yüksekliği idealdir çünkü atmosferik türbülansın çoğu alt tabakalarda meydana gelir (Hickson, 2014).

Bu yöntem toplu olarak referans yıldız diferansiyel görüntüleme (RSDI) olarak bilinmekte ve hedef yıldızına benzer bir yıldız için verilere dayanmaktadır (Ruane et al. 2019). Bu yöntemler içinde, çıkarılacak olan PSF'yi yapılandırmak için, yalnızca referans PSF'in ölçeklendirilmesi, temel bileşen analizi (PCA) tabanlı yaklaşımlar ve negatif olmayan matris çarpanlara ayırma dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar vardır.



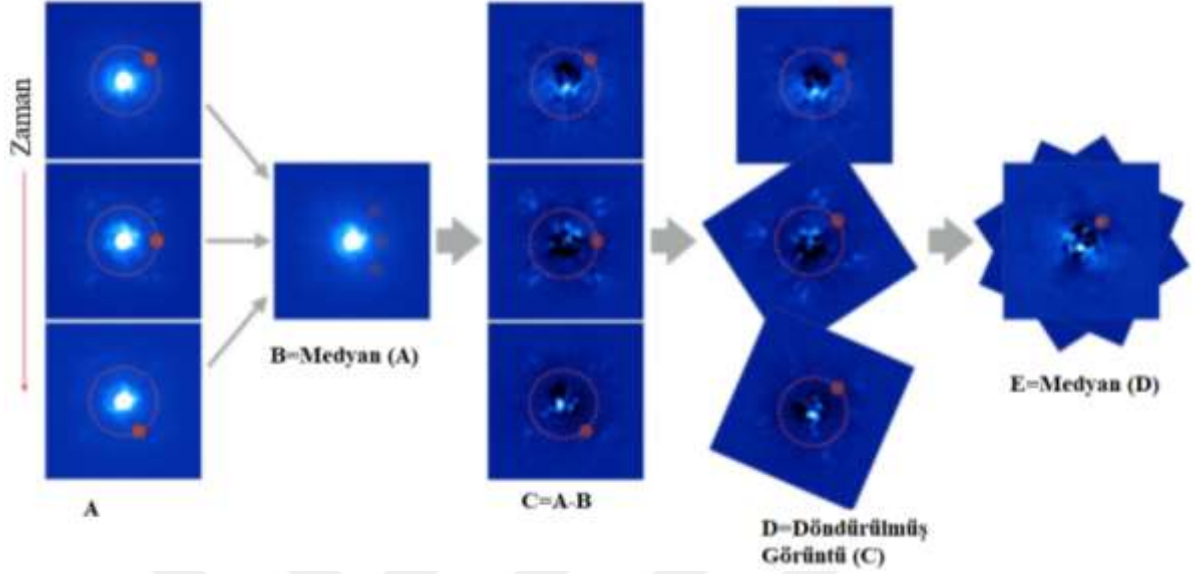
Şekil 18. Standart bir adaptif optik sisteminin şematik gösterimi (Max 2001).

Açısal Diferansiyel Görüntüleme (ADI)

Adaptif optikler aracılığıyla iyileştirilen kontrast, çeşitli işlem sonrası tekniklerle daha da geliştirilebilir. Adaptif optik düzeltilmiş görüntülerde, yıldız noktası yayılma fonksiyonundan (PSF) kaynaklanan gürültünün neden olduğu benekler, görüntüleme gezegen tespiti için en büyük engelleyicidir (Marois et al. 2003). Benekler, atmosferdeki hızlı (1-10 ms) dalgalanmalardan ve daha uzun zaman ölçeklerinde gelişen aletsel kusurlardan kaynaklanır. PSF'yi ortadan kaldırmak ve benekleri bastırmak için bir gezegen ve bir yıldız arasındaki tayfsal farklılıklara dayanan eşzamanlı tayfsal farklı görüntüleme (SSDI, Racine et al. 1999; Marois et al. 2000), benekleri gezegenlerden ayırmak için bir altitude/azimut teleskobunun görüş alanı dönüşünü kullanmaktadır. Polikromatik görüntüler ve açısal diferansiyel görüntüleme dahil olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

ADI tekniği, bir altitude/azimut teleskobunda alet döndürücüsünü devre dışı bırakarak çalışır, böylece görüş alanı (FoV) bir dizi görüntü sırasında yavaşça döner. Ön dalga sensörü tarafından kullanılan yıldız, hareketsiz bir kılavuz sağlamak için AO sistemi tarafından kilitlenir. Farklı açılarda elde edilen dizilerin diğer tüm görüntülerini birleştirerek hedef görüntü dizisinin her görüntüsü için bir referans PSF oluşturulur. Daha sonra referans PSF görüntülerinin tümü kuzeye doğru döndürülen ve medyan birleştirilen ayrı çerçevelerin her birinden çıkarılır. Herhangi bir O-eksenli nesnenin, referans PSF'den ortalaması alınmış olacak ve nesne işleminden etkilenmeden kalacaktır (Şekil 19). Referans PSF, dahili optiklerden herhangi bir gökyüzü görüntüsünü çıkarma avantajına sahiptir. Nesne yerel meridyenden geçerken görüntü dizilerinin alınması tercih edilir. Yeterli görüş alanı rotasyonu verildiğinde,

bu görüntüler bir referans PSF oluşturmak ve yarı statik benekleri bastırmak için birleştirilebilir (Lambein 2018).



Şekil 19. ADI sisteminin çalışma prensibi gösterimi (Marois et al. 2006).

DAG Teleskobu

DAG Projesi kapsamında; Türkiye'de en büyük (4 m çaplı aynası) ve ilk kez kızılötesi bölgede gözlem yapacak teleskobuna sahip, beraberinde kurulan alt yapılarıyla ileri düzeyde araştırmaların yapılacağı optik laboratuvar, kaplama sistemi gibi birimlerle birlikte uluslararası büyük bir gözlemevi oluşturulmaktadır. Anadolu'nun zirvesinden Dünya'ya açılan yeni bir pencere olan DAG, Erzurum'da Konaklı - Karakaya Tepeleri'nde, hem 2500 - 3170 m arasında değişen farklı rakımda yüksek zirvelere hem de atmosferik özellikleri nedeniyle astronomik potansiyele sahip özel bir yerleşkede (Şekil 20) kurulmaktadır. Bu özellikleriyle, DAG Yerleşkesi esasen büyük teleskoplar barındıran Dünya'daki gözlemevi yerleşkeleri arasında önemli bir konumda olmasının yanı sıra, astronomik gözlemlerin devamlılığı ve uzun süreli gözlemler için stratejik öneme de sahip bir enlem ve boylamda (39,78094; 41,22683) olup Dünya üzerinde büyük bir gözlemsel boşluğu da doldurmaktadır. Astronomik açıdan hem görsel (VIS: 0,35 – 0,75 m) hem de yakın Kırmızı-öte bölgede (NIR: 0,75 – 3,00 m) kaliteli gözleme izin veren bu özellikler; yeterli açık gece sayısı (yılda yaklaşık 250 gün), kararlı rüzgar yönü ve uygun rüzgar hızları (<12 m/s), tutarlı kar sezonu ve uygun kar seviyesi, NIR gözlemleri için olabildiğince soğuk hava sıcaklığı değerleri (-35⁰C), ölçülen düşük nem oranları, uygun atmosferik dönüşüm katmanı seviyesi (~2600 m) dışında, DAG yerleşkesinin şimdilik ışık, ısı, toz, duman ve elektromanyetik kirlilikten uzak olmasıdır. Bunun dışındaki

diğer önemli faktörler ise, kolay ve çabuk ulaşılması, gerekli altyapılara kolay sahip olunması, sağlam ve risksiz bazalt kaya üzerinde bulunmasıdır (Yeşilyaprak et al. 2016).



Şekil 20. DAG yerleşkesi (Anonim 2021i).

DAG Teleskobunun temel optik ve mekanik özellikleri Tablo 5’de verilmiştir. Bu tasarım özellikleriyle DAG Teleskobu, Dünya’daki 4 m sınıfı diğer teleskoplar arasında en özgün tasarıma ve yüksek teknolojiye sahip teleskop olarak bilinmektedir (Jolissaint et. al. 2016).

Tablo 5. DAG Teleskobunun Optik ve Mekanik Özellikleri (Yeşilyaprak et al. 2015)

Parametreler	Değerler (Birim)
Birincil Ayna Çapı	4 m
İkincil Ayna Çapı	0,71072 m
Odak Uzaklığı	56 m
Gözlem Aralığı	VIS+NIR (0,3-3,0 μm)
Optik Performans	AO+RC+DR *+aO
Yönlendirme Hızı	2°/s
Doğruluk (RMS)	Yönlendirme <185” -Takip <10”
Yönlendirme İnce Ayar	AL:13,8 s – AZ:3,2 s
Gözlem Tayf Yeteneği	VIS (Görüş Sınırlı) – NIR (AO sınırlı)
Plak Ölçeği	3,6833”/mm
Kırınım Sınırı (1 μm)	0,55”
Medyan	1”
Minimum Görüş (500 nm)	0,4”
Görüş Alanı (FoV)	VIS:24° – NIR:7°
Parlaklık Sınırları (~60 s)	V: ~23 H: ~19 K: ~18
VIS Magnitude	19 mag
Adaptif Optik	TROIA (Turkish Adaptive Optics System for Infrared Astronomy)

* DR: Hareketli görüntüleri çevirip düzelten Derotator RC: Ritchey – Chretien Düzeltmesi aO: aktif optik sistem.

DAG projesi, SLM (Spatial-Light Modulators: Uzaysal Işık Modülatörleri) teknolojisine dayanan bir "uyarlanabilir koronagraf (PLACID; Programmable Liquid-crystal

Active Coronagraphic Imager) " enstrümanı temin edilmesi için Kasım 2020'de ATASAM, Bern Üniversitesi ve HEIG-VD'den gibi kurumları arasında bir sözleşme yapmıştır. Bu cihazın ana özellikleri Tablo 6 'da özetlenmiştir. SLM'nin ötesinde, yalnızca çeşitli gözlem koşulları veya koronagrafik faz haritaları için optimize edilmiş çeşitli maskeleri monte edecek motorlu bir Lyot pupil çarkı ve rutin hizalamayı gerçekleştirmek için çalıştırılan optik ile aktif bileşenlerin sayısı minimum düzeyde tutulacaktır. PLACID ile ilk testlerin 2022'nin sonunda yapılması öngörülmektedir (Kühn et. al. 2021).

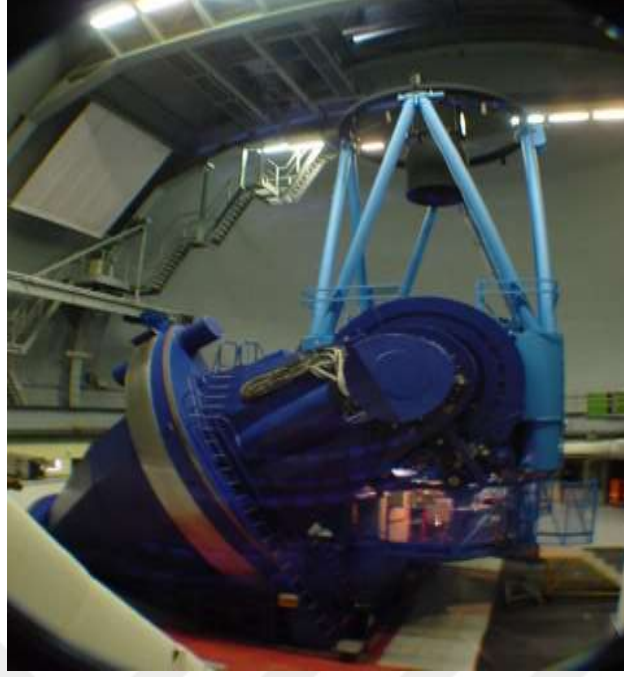
Tablo 6. PLACID'in genel özellikleri

Özellikler	Tasarım Değeri
Çalışma Dalga Boyu	H-bant $\lambda_0 = 1,6 \mu\text{m}$ (taban çizgisi) Ks-band $\lambda_0 = 2,15 \mu\text{m}$ (en iyi başarı)
Aktif Koronagrafi SLM	Özel NIR 1920x1152 SLM (Meadowlark) Yenileme hızı : 60 Hz; Piksel aralığı : 9,2 μm
Odak Oranı	$\sim F/60$ (λ/D başına 10 SLM piksel garanti etmek için)
Gökyüzünde FOV	$> 7 \times 7$ arcsec
Koronagrafik Boş Derinlik	dahili ışık kaynağı ile $< 10^{-1}$
İç Çalışma Açısı	dahili ışık kaynağı ile $< 2,5 \lambda/D$
Optik Aktarım Hızı	$> \%10$
Arayüz	HDMI (SLM) + USB (harekete geçen opto-mekanik)
Gelecekteki Yükseltme Seçenekleri	<ul style="list-style-type: none"> • NCPA WFS (Zernike WFS) • İkili/çoklu yıldız ADI görüntüleme • Zaman-etki alanı CDI gözlemleri

Doğrudan Görüntüleme Yönteminin Kullanıldığı Teleskoplara Örnekler

ESO 3,6 Metrelik ve ESO VISTA Teleskobu

ESO (European Southern Observatory) 3,6m Teleskobu (Şekil 21) 70,7345, 29,2584 coğrafi konumunda ve deniz seviyesinden 2400 metre yükseklikte bulunmaktadır. Teleskop 1977'de hizmete girmiş ve 1999'da yeniden o zamanki yeni teknolojiye uygun olarak güncellenmiştir. 2004'te ise yeni bir ikincil ayna hücresi üretilmiş olup teleskobun görüntü kalitesi önemli ölçüde iyileştirmiştir (Zenit'te 0,2 yay saniyesi). Teleskop, at nalı/çatal montajına ve ikincil aynanın F/8'den F/35 Cassegrain odağına değiştirilmesine izin veren değiştirilebilir bir üst üniteye sahiptir. İşaretleme hatası yaklaşık 5 yay saniyesi RMS (sapmanın ortalama karesi)'dir. İşaretleme 70 derece ile sınırlıdır. Teleskobun işletimi ve bakımı ESO'nun sorumluluğundadır. Nisan 2008'den bu yana, F/8 Cassegrain odağını kullanan HARPS 3,6 m'de mevcut olan tek enstrümandır (Anonim 2021j). Tablo 7'de ESO 3,6 metrelik teleskobunun özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 21. ESO 3,6 metrelik teleskobu (Anonim 2021k).

Tablo 7. ESO 3,6 metrelik teleskobunun özellikleri (Anonim 2021k)

İsim:	ESO 3,6 Metrelik Teleskobu
Site:	La Silla
Yükseklik (Rakım):	2375 m
Kubbe Tipi:	Klasik Kubbe
Tür:	Optik ve Yakın Kızılötesi Teleskop
Optik Tasarım:	Cassegrain
Birincil Ayna Çapı (M1):	3,57 m
Birincil Ayna Malzemesi (M1):	Kaynaşmış Silika
İkincil Ayna Çapı (M2):	1,20 m Kasım 1984'ten beri: 0,33 m
İkincil Ayna Malzemesi (M2):	Kaynaşmış Silika
Üçüncül Ayna Çapı (M3):	1,33 m
İlk Işık Alma Tarihi:	7 Kasım 1976
Adaptif Optik:	COME ON ADONIS (Adaptive Optics Near Infrared System)

ESO'nun bünyesindeki diğer bir teleskop olan ESO VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) ise ESO'nun Paranal Gözlemevi'nin bir parçasıdır. VISTA (Şekil 22), yakın kızılötesi dalga boylarında çalışır olan dünyanın en büyük tarama teleskobudur. Büyük aynası, geniş görüş alanı ve çok hassas detektörleri, güney gökyüzünün tamamen yeni bir görüntüsünü ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 22. ESO VISTA teleskobu (Anonim 2021).

Teleskop, ESO VLT'yi (Very Large Telescope) barındıran tepenin bitişiğinde yer alır. VISTA, 4,1 metre çapında bir ana aynaya sahiptir. Görüntüleme açısından, 13 000 mm f/3,25 ayna lensli 67 megapiksel dijital kamera olarak düşünülebilmektedir. Teleskobun bünyesinde, son teknoloji ürünü 16 kızılötesi duyarlı detektöre sahip üç tonluk devasa bir kamera bulunmaktadır. VISTA 1,65 derecelik görüş alanına sahip bir yakın kızılötesi kamera (VIRCAM) ile donatılmış, yaklaşık 67 milyon piksel boyutu, 0,339 arcsec açıklığı ve Z, Y, J, H, Ks'de mevcut geniş bant filtreleri ile 0,98, 0,99 ve 1,18 mikronda dar bant filtreleri içeren güney yarımküre için 4 m sınıfı özel geniş alan tarama teleskobudur (Anonim 2021m). Tablo 8'de ESO VISTA teleskobunun özellikleri özetlenmiştir.

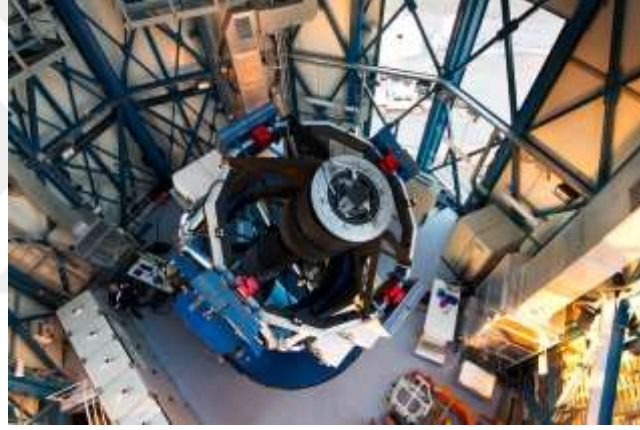
Tablo 8. ESO VISTA teleskobunun özellikleri (Anonim 2021n)

İsim:	ESO VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)
Site:	Cerro Paranal
Yükseklik (Rakım):	2518 m
Kubbe Tipi:	Kompakt, optimize edilmiş silindirik muhafaza
Tür:	Yakın Kızılötesi Teleskop
Optik Tasarım:	Kamerada düzeltici lenslere sahip Modifiye Ritchey-Chrétien Reflektör
Birincil Ayna Çapı (M1):	4,10 m
Birincil Ayna Malzemesi (M1):	ZeroDur
İkincil Ayna Çapı (M2):	1,24 m
İkincil Ayna Malzemesi (M2):	Astro-Sitall
Üçüncül Ayna Çapı (M3):	1,33 m
İlk Işık Alma Tarihi:	11 Aralık 2009
Aktif Optik:	Mevcut

ESO VISTA teleskobu ile yapılan gözlemede doğrudan görüntüleme yöntemi kullanılırken koronagraf cihazı kullanılmadan VHS J125601.92-125723.9 yıldızının etrafında genç gezegensel bir kütle keşfi yapılmıştır (Gauza et al. 2015).

VLT (Very Large Telescope)

Very Large Telescope dizisi (VLT) Avrupa yer tabanlı astronomi için amiral gemisi olan bir tesistir. Ana aynaları 8,2 m çapında olan dört adet Birim Teleskop (Antu , Kueyen , Melipal ve Yepun) ve 1,8 m çapında hareketli dört adet Yardımcı Teleskoptan oluşan dünyanın en gelişmiş optik aletidir (Şekil 23). Teleskoplar birlikte çalışarak dev bir interferometri oluştururlar. Bu sayede astronomların, bir teleskobu kullanarak yaptıkları araştırmaya göre 25 kata kadar daha iyi bir çözünürlük sağlamaktadır. Tablo 9'da VLT'ye ait özellikler listelenmiştir.



Şekil 23. ESO Very Large Teleskobu (Anonim 2021o).

8,2 m çapındaki Birim Teleskoplar ayrı ayrı da kullanılabilir. Böyle bir teleskopla, 30 kadir parlaklığındaki gök cisimlerinin görüntüleri bir saatlik bir pozlamayla elde edilebilir. Bu, çıplak gözle görülebilen dört milyar kat daha sönük olan nesnelere görmeye karşılık gelmektedir (Anonim 2021o). ESO VLT ile gerek koronagraf cihazı kullanılarak (örnek; VLT/ SPHERE kullanarak 51 Eridani b ötegezegeninin yörünge takibi; Maire et al. 2019) gerekse koronagraf cihazı kullanılmadan (örnek; genç yıldız PDS 70'in etrafında oluşan iki protoplanet gözlemi; Haffert et al. 2019) ötegezegenler konusunda birçok gözlem yapılmıştır. Astronominin en zorlu ve heyecan verici alanlarından biri olan ötegezegen arayışı ESO'nun Paranal Gözlemevi'nde devam eden bir araştırma konusudur. VLT (Çok Büyük Teleskop)'nin 3 numaralı teleskobuna yerleştirilen SPHERE (Spektro-Polarimetrik Yüksek Karşıtlıklı Ötegezegen Araştırma) aygıtı ötegezegen araştırmalarında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu aygıtın amacı, doğrudan görüntüleme olarak bilinen yöntemle yakındaki yıldızların yörüngesinde dönen yeni dev ötegezegenleri tespit etmek ve incelemektir.

Tablo 9. VLT'nin özellikleri (Anonim 2021e)

Ad:	VLT (Very Large Telescope)
Site:	Cerro Paranal
Yükseklik (Rakım):	2635 m
Kubbe Tipi:	Kompakt Optimize Silindirik Muhafaza
Tür:	İnterferometri İle Optik/Kızılötesi
Optik Tasarım:	Ritchey-Chrétien Reflektör
Birincil Ayna Çapı (M1):	8,20 m
Birincil Ayna Malzemesi (M1):	ZeroDur
İkincil Ayna Çapı (M2):	0,94 m
İkincil Ayna Malzemesi (M2):	Berilyum
Üçüncül Ayna Çapı (M3):	1,242 X 0,866 m (Eliptik Düz)
Adaptif Optik:	UT4: Lazer Kılavuz Yıldızı (Lgs) + Sınfonu UT1: NACO UT3: SPHERE

SPHERE, gezegenlerin oluşabileceği diğer yıldızların etrafındaki toz ve disklerinin görüntülerini de alabilmektedir. Her iki gözlem türünde de doğrudan görüntüleme yapmak son derece zordur. Uzaktaki bir ötegezegeni doğrudan görüntülemenin önündeki en büyük engellerden biri herhangi bir gezegenin konak yıldızının etrafından dolanırken bu yıldızın ışığı tarafından örtülmesidir. SPHERE, yıldız ışığının etkisini azaltmak için yıldızın merkezi bölgesini bloke etmektedir. SPHERE bu özelliğinden dolayı aynı zamanda bir koronagraf olarak da kullanılmaktadır (Şekil 24).

SPHERE, yıldız ışığı etkisini maskeleyerek için tasarlanmıştır. Yıldızların (Güneş dahil) doğal olarak yaydığı ışığın polarize olmadığı, yani elektromanyetik dalgaların rastgele farklı yönlerde salındığı ortaya çıkmıştır. Ancak ışık bir yüzey (bir gezegen veya tozlu bir disk gibi) tarafından yansıtıldığında, yansıyan dalgalar kısmen polarize olur.

Ancak SPHERE, polarize sinyali seçmeye çalışıp ve bunu özel filtreler kullanarak izole edebilmektedir. SPHERE cihazı 3 alt sistemle donatılmıştır: ZIMPOL, hem çok keskin görüntüler elde edebilen hem de görünür ışıktaki ve yakın kızılötesinde (600 ila 900 nanometre) polarizasyonu ölçebilen özel amaçlı bir kameradır. Görevi, ev sahibi yıldızlarına çok yakın yörüngede dönen gaz halindeki gezegenlerin yansıyan polarize ışığını tespit etmek ve genç yıldızların etrafındaki tozlu disklerden saçılan ışığı tespit etmektir. IRDIS, temel amacı, diferansiyel görüntüleme adı verilen bir tekniğe dayanan gelişmiş gözlem stratejileri sayesinde 900nm'den 2,3 mikrona kadar yakın kızılötesi dalga boylarında çalışan bir kameradır. IFS ise görüş alanının verilen her konumunda bir spektrum sağlamak için IRDIS ile aynı anda çalışabilen bir yakın kızılötesi entegre alan spektrografıdır. Bu sistem, gökbilimcilerin dev

gezegenlerin atmosferinin bileşimini karakterize etmelerini sağlamaktadır (Anonim 2021p). Tablo 10’da SPHERE cihazının özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 24. SPHERE optik tezgahının ayrıntılı görüntüsü (Anonim 2021p).

Tablo 10. SPHERE cihazının özellikleri (Anonim 2021p)

Alan:	Paranal
Teleskop:	VLT UT3
Odak:	Nasmit
Tip:	Ötegezegen sistemlerinin görüntüleme, düşük çözünürlüklü spektroskopik ve polarimetrik karakterizasyonu
Dalga boyu kapsamı:	0,5–2,32 μm
Mekansal çözünürlük:	xAO ile sınırlanan kırınım: dalga boyuna bağlı olarak 0,02 ila 0,08"
Spektral çözünürlük:	30 ila 350, moda bağlı olarak
İlk ışık tarihi:	4 Mayıs 2014

Subaru Teleskobu

Subaru Teleskobu, Hilo, Hawaii'deki temel tesis binasının tamamlanmasının ardından Nisan 1997'de resmen kuruldu. Subaru Teleskobu, Hawaii'nin Büyük Adası'ndaki aktif olmayan bir yanardağ olan Maunakea'nın zirvesinde yer almaktadır (Şekil 25). Maunakea zirvesi, dünyanın en iyi astronomik gözlem alanlarından biridir. Subaru'nun yanı sıra Maunakea'da 8-10 m sınıfında üç teleskop daha bulunmaktadır. Bunlar; Gemini Kuzey teleskobu ve iki Keck teleskobudur. Maunakea'nın zirvesi, Dünya'nın hava sistemlerinin çoğunun üzerinde çıkıntı yapan izole bir zirvedir. Maunakea'daki hava basıncı, deniz seviyesindeki sadece üçte ikisi kadardır. Hawaii, diğer kara parçalarından izole olduğu için, rüzgarlar adaların üzerinde

yumuşak bir şekilde esmekte ve karanlık gökyüzünü kirletecek çok az şehir ışığı bulunmaktadır. Tablo 11’de Subaru teleskobu hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 25. Subaru Teleskobu ve yerleşkesi (Anonim 2021r).

Subaru Teleskobu’nda 261 tane aktüatör bulunmaktadır. Subaru Teleskobu’nun devasa ve ince birincil aynasının kendi ağırlığı altında bükülmesini önlemek için bilgisayar kontrollü aktüatör kullanan aktif optik teknolojisi sürekli düzeltmeler uygular. Bu düzeltmeler sayesinde her zaman (ideal durumlarda) ideal gözlem yapabilmesini sağlamaktadır.

Tablo 11. Subaru Teleskobunun özellikleri (Anonim 2021r)

Ad:	Subaru Teleskobu
Site:	Maunakea
Yükseklik (Rakım):	4139 m
Kubbe Tipi:	Teleskop ile dönen silindirik muhafaza
Tür:	Optik/Kızılötesi
Optik Tasarım:	Ritchey-Chretien Sistemi
Birincil Ayna Çapı (M1):	8,20 m
Adaptif Optik:	AO188 High-Contrast Coronagraphic Imager for Adaptive Optics (HiCIAO) Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCEXAO)/ The Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph (CHARIS)

Subaru Teleskobunun odağına kalıcı olarak yerleştirilmiş olan SCEXAO detektörünün ana hedefi, yakındaki yıldızların etrafındaki ötegezegenleri ve diskleri görüntülemektir. Subaru Teleskobu tarafından toplanan ışık, atmosferik türbülansın neden olduğu optik sapmaların çoğunu ortadan kaldırmak için ilk olarak AO188 adaptif optik sistemi tarafından işlenmektedir. Optik ışın daha sonra ince dalga cephesi düzeltmesi (Extreme Adaptive Optics) gerçekleştiren ve ötegezegenlerin görüntülenebilmesi için parlak yıldız ışığını (koronagrafi) ortadan kaldıran SCEXAO tarafından işlenmektedir. Işın daha sonra görüntüleme, spektroskopi ve polarizasyon

ölçümleri için SCExAO'nun CHARIS ve VAMPIRES dahil modüllerine ve cihazlarına gönderilmektedir. SCExAO (Şekil 26), gökbilimcilerin ötegezegenleri görüntülemesi ve incelemesi ve yüksek açısal çözünürlük gerektiren diğer gözlemleri gerçekleştirmesi için halihazırda mevcut olan aktif bir bilimsel araçtır (Anonim 2021s).



Şekil 26. SCExAO ve CHARIS cihazlarının görüntüsü (Anonim 2021t)

Koronagrafik yüksek açısal çözünürlüklü görüntüleme spektrografi (CHARIS) Subaru teleskobunda SCExAO sisteminin ve AO188 adaptif optik sistemlerinin arkasında bulunmaktadır. CHARIS cihazı 1154 nm ile 2387 nm dalgaboyu aralığında gözlem yapabilmektedir. Cihaz J, H ve K bantlarında görüntü almasının yanı sıra Lyot, vAPP, PIAACMC ve Vorteks koronagraf modları ile daha kaliteli görüntü alınmasını sağlamaktadır (Anonim 2021u). Ayrıca Subaru Teleskobunun şu an hizmet dışı olan HiCIAO (High-Contrast Coronagraphic Imager for Adaptive Optics) sistemi ve koronagraf cihazı kullanılarak Genç B tipi κ And ve çevresinde süper Jüpiter keşfi yapılmıştır (Carson et al. 2013).

Sonuç olarak doğrudan görüntüleme yöntemi kullanılarak gözlem yapılmak isteniyorsa öncelikle yöntemin şartlarını sağlayan ekipmanlara sahip teleskoplar kullanılmalıdır. Bu yöntem için uygun olan popüler teleskoplardan bazıları gösterilmiştir. Uygun teleskop seçildikten sonra hedef kaynak, yıldız ışınımından daha baskın olduğu dalga boylarından seçmeli veya M cüceleri gibi ışınımı düşük olan yıldızlar etrafında gezegen araştırılmalıdır. Gözlem yapılacak hedef kaynak belirlendikten sonra gerekli koşulları (gözlenebilirlik, parlaklık vb.) sağlıyorsa gözleme başlanabilir. Gözlem yaparken atmosferdeki türbülansların etkisini azaltmak için adaptif optik sistem kullanılmalıdır. Gözlemlenen bölgede adaptif optik için

uygun kılavuz yıldız bulunmayabilir. Bu durumlarda, lazer kılavuz yıldızlar (LGS), ışığı mezosferden yansıtarak yapay yıldızlar oluşturmak için kullanılabilir. Atomik sodyum hattına (589 nm) ayarlanmış lazerler, 90 km yükseklikte sodyum katmanını harekete geçirmek için kullanılır. Sodyum tabakasının yüksekliği idealdir çünkü atmosferik türbülansın çoğu alt tabakalarda meydana gelir (Hickson, 2014). Hedef kaynağının parlaklığı yıldız ışığının parlaklığından ayırt edilebiliyorsa doğrudan görüntüleme yapılabilir. Ancak gözlemi yapılan kaynağın sönük bir cisimse yıldızının parlaklığını maskeleyerek için koronagraf cihazıyla birlikte gözlem yapılmalıdır. Yakın IR gözlemi yapılıyorsa görsel bölgede yapılan gözlemlere ek olarak termal radyasyona duyarlı detektörler ve filtrelerde kullanılmalıdır. Gözlem tamamlandıktan sonra görüntüler analiz yapılmak için hazırlanır. Görüntülerden bias, dark ve flat çıkarılırken bozuk piksel yapıları da temizlenir. Analize hazırlanmış görüntüler çoğunlukla Açısal Diferansiyel Görüntüleme (ADI) veya kullanılan aygıta ait veri işleme programları pipeline) kullanılarak analiz edilir. ADI işleminde görüntüler piksel incelenerek her görüntüden medyan elde edilir. Görüntülerde kaynak hareketli olduğu için medyana etki etmemektedir. Görüntülerden medyan çıkarıldığı zaman geriye sadece gezegenin görüntüsü kalır. Daha sonra gezegenin görüntüsü üst üste gelecek şekilde görüntüler döndürülür ve sonuçta olabildiğince yıldız ışığından arındırılmış gezegen görüntüsü elde edilir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMALAR

Bu tez kapsamında 2004 ve 2021 yılları arasında farklı teleskoplar üzerinde uygulanan doğrudan görüntüleme yöntemi kullanılarak gözlenen nesnelere listelenmiştir. Her ne kadar yer tabanlı teleskoplar ile bu yöntemin uygulanması zor gibi görünse de teknolojinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda bu tür çalışmalar büyük bir hız kazanmıştır. NASA Exoplanet Archive verilerine göre gezegenler ve özellikleri Tablo 12’de listelenmiştir. Tablo 12’deki veriler göz önüne alındığında gezegenlerin en çok K ve M tipi yıldızlara sahip olduğu görülmüştür. Gezegenlerin yıldızından uzaklıkları ortalama olarak 418 AU’tır.

K ve M tipi yıldızların özellikleri incelendiğinde K tipi bir yıldızın sıcaklığı 3500-5000 K (turuncu renk) arasında olup güçlü nötr ve tek iyonize metallere oluşurken H çizgileri soluklaşmaya başlar. M tipi yıldızlar ise <3500 K (kırmızı renk) sıcaklığında güçlü molekül bantlara ve nötr metallere sahipken H çizgileri çok soluktur (LeBlanc 2010).

Tablo 12. Doğrudan görüntüleme yöntemiyle gözlemlenen gezegenler ve özellikleri.

Gezegen İsmi	Yıldızın Tipi	Yıldız Gezegen ayrılık açısı (arcsec)	Yıldızından Uzaklığı (AU)	Dünyadan Uzaklığı (Işık Yılı)	Gezegen Kütlesi (M _J)	Yıldız Parlaklığı
1RXS J160929.1-210524 b	K	2,219±0,002	330	454	8	12,618
2MASS J01033563-5515561 AB b	-	1,784±0,003	84	154	13	15,788
2MASS J01225093-2439505 b	M	1,450±0,005	52±6	110	24,5	14,244
2MASS J02192210-3925225 b	M	3,960±0,02	156±10	131	13,9	15,0123
2MASS J04414489+2301513 b	M	0,105±0,004	15	393	7,5	18,9668
2MASS J12073346-3932539 b	M	0,778	55	210	5	20,15
2MASS J21402931+1625183 A b	M	0,108±0,001	2,7±10	108	20,95	17,3961
2MASS J22362452+4751425 b	K	3,696±0,003	230	227	12,5	12,368
51 Eridani b	F	0,449±0,007	13,2±0,2	97	2	5,21149
AB Pictoris b	K	5,45±0,014	260±1,8	163	13,5	9,13
Beta Pictoris b	A	0,407±0,008	9,1	64	11	3,85
CFBDSIR J145829+101343 b	T	0,108±0,006	2,6±0,3	75	10,5	-
CFHTWIR-Oph 98 b	M	-	200	-	7,8	-
CHXR 73 b	M	1,300±0,03	210	621	12,569	17,2934
CT Chamaleontis b	K	2,670±0,038	440	622	17	12,335

Tablo 12. (devamı)

Gezegen İsmi	Yıldız- nın Tipi	Yıldız-Gezegen ayrılık açısı (arcsec)	Yıldızından Uzaklığı (AU)	Dünyadan Uzaklığı (Işık Yılı)	Gezegen Kütlesi (Mj)	Yıldız Parlak- lığı
DH Tauri b	K	2,300	330	440	11	13,98
FU Tauri b	M	5,670±0,01	800,8±0,1	435	16	15,2412
GJ 504 b	G	2,499±0,026	43,53±0,08	57	4	5,18799
GQ Lupi b	K	0,7365±0,0057	100	493	20	11,593
GSC 06214-00210 b	K	2,204±0,002	320±30	354	13,5	12,416
GU Piscium b	K	41,970±0,03	2000±200	155	11,3	14,146
HD 100546 b	B	0,457±0,014	53±2	358	752	6,69
HD 106906 b	F	7,110±0,03	656,42±6	336	11	7,8
HD 203030 b	G	06239±0,0074	56,4±0,7	128	24,09	8,45
HD 95086 b	A	0,600±0,011	55,7±2,5	281	5	7,36
HIP 65426 b	A	0,830±0,003	92,5±3,8	355	9	7,01
HIP 78530 b	B	4,533±0,006	710±60	446	23	7,1691
HIP 79098 AB b	A	2,370±0,011	346,7±2,5	476	20,5	5,86
HN Pegasi b	G	43,200±0,4	795±15	59	21,9987	5,97707
HR 2562 b	F	0,619±0,003	20,3±0,3	111	30	6,11
HR 8799 b	F	1,730±0,005	68,16±1,0	135	7	5,98
HR 8799 c	F	0,964±0,005	38±1,0	135	10	5,98
HR 8799 d	F	0,63±0,005	24,82±1,0	135	10	5,98
HR 8799 e	F	0,369±0,027	14,5±1,0	135	10	5,98
Kappa Andromedae b	B	1,058±0,007	55±2	163	13,616	4,13791
LkCa 15 b	K	0,095±0,008	14,7±2,1	516	6	12,025
LkCa 15 c	K	0,068±0,043	18,6±2,7	517	6	12,025
Ophiuchi 11 b	M	1,943±0,022	242,875±25	444	14	18,912
PDS 70 b	K	0,195	22	369	3	12,032
PDS 70 c	K	0,254±0,01	39,7±4,5	369	2	12,032
Ross 458 c	M	102,000	1100	38	6	9,76
ROXs 12 b	M	1,781±0,002	210±20	446	16	14,763
ROXs 42 B b	M	1,169±0,005	150	468	9	14,661
SR 12 AB c	M	8,659±0,131	1100	366	13	13,355
TYC 8998-760-1 b	K	1,710±0,003	162	309	14	11,124
TYC 8998-760-1 c	K	-	320	309	6	11,124
USco CTIO 108 b	M	4,600±0,1	670	470	14	17,4229
USco1556A b	M	-	3500	459	15	15,36
USco1621A b	M	-	2880	450	16	15,543
VHS J125601.92- 125723.9 b	M	8,060±0,3	102±9	41	11,2	17,73
WD 0806-661 b	A	130,200	2500	63	7,5	13,855
WISEP J121756.91+162640.2 A b	T	0,757±0,0025	8±1,3	33	22	19
YSES 2 b	K	-	115	357	6,3	10,885

Tablo 13'te görüldüğü üzere bu tür araştırmalarda kullanılan teleskopların büyük çoğunluğu 8-10 m arası çaplara sahip yer tabanlı teleskoplardır. Yer tabanlı teleskopların gelişmesiyle uzaya teleskop sistemleri kurulmasına gerek kalmadan yeryüzünde konuşlandırılacak teleskoplar ile yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmektedir.

Tablo 13. Doğrudan görüntüleme yöntemiyle gözlenen gezegen ve teleskopların özellikleri.

Gezegen İsmi	Teleskop	Görüntüleme Cihazı	Yıldız-Gezegen ayrılık açısı (arcsec)
1RXS J160929.1-210524 b	8,19 m Gemini North Teleskobu	NIRI Camera	2,219±0,002
2MASS J01033563-5515561 AB b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	1,784±0,003
2MASS J01225093-2439505 b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	1,450±0,005
2MASS J02192210-3925225 b	1,5 m CTIO Teleskobu	SIMON Near-Infrared Spectroimager	3,960±0,02
2MASS J04414489+2301513 b	2,4 m Hubble Space Teleskobu	WFPC2 Camera	0,105±0,004
2MASS J12073346-3932539 b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	0,778
2MASS J21402931+1625183 A b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	0,108±0,001
2MASS J22362452+4751425 b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	3,696±0,003
51 Eridani b	8,19 m Gemini South Teleskobu	Gemini Planet Imager	0,449±0,007
AB Pictoris b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	5,45±0,014
Beta Pictoris b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	0,407±0,008
CFBDSIR J145829+101343 b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	0,108±0,006
CFHTWIR-Oph 98 b	2,4 m Hubble Space Teleskobu	WFC3 Camera	-
CHXR 73 b	2,4 m Hubble Space Teleskobu	ACS Camera	1,300±0,03
CT Chamaleontis b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	2,670±0,038
DH Tauri b	8,2 m Subaru Teleskobu	CIAO Camera	2,300
FU Tauri b	0,85 m Spitzer Space Teleskobu	IRAC Camera	5,670±0,01
GJ 504 b	8,2 m Subaru Teleskobu	HiCIAO Camera	2,499±0,026
GQ Lupi b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	0,7365±0,0057
GSC 06214-00210 b	5,1 m Hale Teleskobu	PHARO Camera	2,204±0,002
GU Piscium b	8,19 m Gemini South Teleskobu	GMOS Spectrograph	41,970±0,03
HD 100546 b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	0,457±0,014
HD 106906 b	6,5 m Magellan II Clay Teleskobu	Clio2 Camera	7,110±0,03
HD 203030 b	5,1 m Hale Teleskobu	PHARO Camera	06239±0,0074
HD 95086 b	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	NACO Camera	0,600±0,011

Tablo 13. (devamı)

Gezegen İsmi	Teleskop	Görüntüleme Cihazı	Yıldız-Gezegen ayrılık açısı (arcsec)
HIP 65426 b	8,2 m ESO VLT UT3 Melipal Teleskobu	Multiple Instruments	0,830±0,003
HIP 78530 b	Gemini:Gillett	NIRI	4,533±0,006
HIP 79098 AB b	ESO:3,6m	ADONIS	2,370±0,011
HN Pegasi b	0,85 m Spitzer Space Teleskobu	IRAC Camera	43,200±0,4
HR 2562 b	8,19 m Gemini South Teleskobu	Gemini Planet Imager	0,619±0,003
HR 8799 b	8,19 m Gemini North Teleskobu	NIRI Camera	1,730±0,005
HR 8799 c	8,19 m Gemini North Teleskobu	NIRI Camera	0,964±0,005
HR 8799 d	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	0,63±0,005
HR 8799 e	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	0,369±0,027
Kappa Andromedae b	8,2 m Subaru Teleskobu	HiCIAO Camera	1,058±0,007
LkCa 15 b	Large Binocular Teleskobu	LMIRCam	0,095±0,008
LkCa 15 c	Large Binocular Teleskobu	LMIRCam	0,068±0,043
Ophiuchi 11 b	8,19 m Gemini North Teleskobu	NIRI Camera	1,943±0,022
PDS 70 b	8,2 m ESO VLT UT3 Melipal Teleskobu	SPHERE	0,195
PDS 70 c	8,2 m ESO VLT UT4 Yepun Teleskobu	Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE)	0,254±0,01
Ross 458 c	6,5 m Magellan I Baade Teleskobu	FIRE Spectrograph	102,000±
ROXs 12 b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	1,781±0,002
ROXs 42 B b	Multiple Teleskopları	Multiple Instruments	1,169±0,005
SR 12 AB c	1,4 m IRSF Teleskobu	SIRIUS Camera	8,659±0,131
TYC 8998-760-1 b	8,2 m ESO VLT UT3 Melipal Teleskobu	SPHERE	1,710±0,003
TYC 8998-760-1 c	8,2 m ESO VLT UT3 Melipal Teleskobu	SPHERE	-
USco CTIO 108 b	CTIO:1,5m	SMARTS	4,600±0,1
USco1556 b	Multiple Teleskopları	Multiple Instruments	-
USco1621 b	Multiple Teleskopları	Multiple Instruments	-
VHS J125601.92-125723.9 b	4 m ESO Vista Teleskobu	VIRCAM CCD Array	8,060±0,3
WD 0806-661 b	0,85 m Spitzer Space Teleskobu	IRAC Infrared Array Camera	130,200±
WISEP J121756.91+162640.2 A b	10 m Keck II Teleskobu	NIRC2 Camera	0,757±0,0025
YSES 2 b	8,2 m ESO VLT UT3 Melipal Teleskobu	SPHERE	-

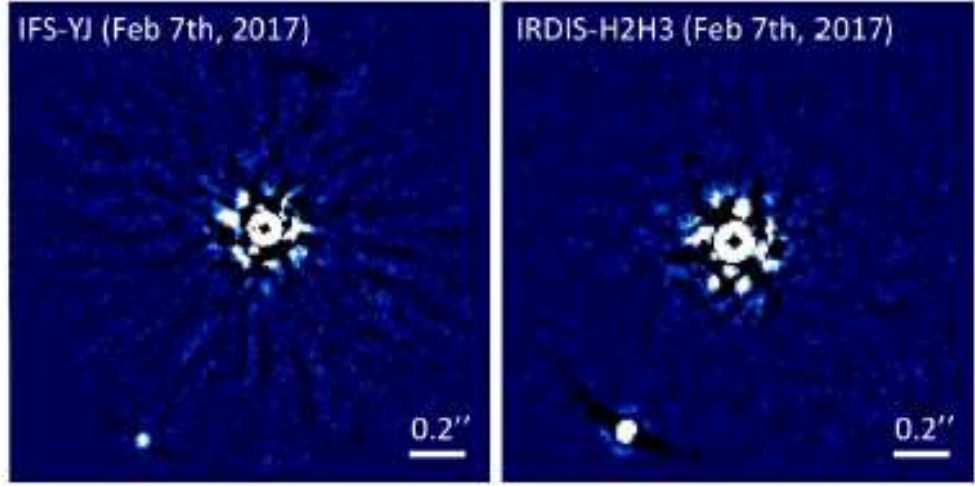
Bu çalışmada doğrudan görüntüleme yöntemi ile yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Bu yöntem ile gözlenen cisimlerin bir listesi oluşturularak DAG teleskobuna uygunluğu (gözlenebilirlik, parlaklık, ayırma gücü) incelenmiştir. Önümüzdeki yıllarda tamamlanması beklenen modüler ve adaptif optik sistemi ile HST'ye göre 3 kat daha fazla ışık toplama kabiliyetine sahip olacak DAG teleskobu, AO olmadığı takdirde HST'ye göre 2 kat daha az çözünürlüğe sahip olacak ve bulanık bir görüntü sağlayacaktır. Gerçek zamanlı düzeltme sağlayan AO sistemler DAG teleskobuna takıldığı durumda, atmosferik türbülansa bağlı etkilerin tümünü ortadan kaldırarak HST'ye göre 7 kat daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntü elde edilmesini sağlayacaktır (Anonim 2021v).

Gözlemlenebilecek objeler teleskopların konumuna, objelerin gözlemlenebilirlik limitine, açısal ayrılıklarına ve parlaklıklarına göre seçim yapılmaktadır. Bu sebeple nesnelere genel olarak K ve M tipi yıldızların olduğu bölgelerde daha yoğun incelenmiştir. Doğrudan görüntüleme yönteminin kullanımına örnek verecek olursak PDS 70 etrafındaki geçiş diskinin boşluğu içinde gezegensel kütleli bir yoldaşın makalesi incelenebilir keşif (Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70; M. Keppler et al. 2018). PDS 70 objesinin analizi aşağıda anlatılmıştır.

PDS 70 yıldızının gözlemi 3 ve 31 Mayıs 2015 gecelerinde SHINE (Sphere Infrared Survey for Exoplanets; Chauvin et al. 2017) programı kapsamında gözlenmiştir. Veriler, IRDIFS gözlem modunda (Vigan et al. 2010) dar bantlı filtre çifti ($H_2 = 1,593 \mu\text{m}$, $H_3 = 1,667 \mu\text{m}$) ve IRDIS gözlem modunda (Claudi et al. 2008) geniş bant filtrelerinde (Y ve J; $0,95-1,33 \mu\text{m}$), yüksek tayfsal çözünürlükte (IFS mod, $R \sim 50$) çalıştırılmıştır. Gözlemler sırasında Apodize Lyot Coronagraphic maske kullanılmıştır. Gözlemler, ADI'ye (Marois et al. 2006) uygun bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen görüntülere uygulanan indirgeme adımlarından sonra (düz alanlık, kötü piksel düzeltme, gökyüzü çıkarma, çerçeve kaydı, çerçeve çizelgesi, cihaz bozulmasının düzeltilmesi ve nötr yoğunluk filtre iletimi için akı kalibrasyonunun düzeltilmesi), yıldız benek desenini modellemek ve çıkarmak için birkaç farklı strateji kullanılmıştır. İlk önce klasik ADI (CADI) yöntemi uygulanmıştır (Marois et al. 2006). Daha sonra Absil et al. (2013) tarafından uyarlanmış bir sPCA (smart Principal Component Analysis) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma Soummer et al. (2012) KLIP (KL Image Projection) algoritmasına dayanmaktadır. Ayrıca nokta kaynakları aramak için istatistiksel bir yaklaşım uygulayan ANDROMEDA paketi (Cantalloube et al. 2015) kullanılmıştır. Ek olarak, PCA ve TLOCİ'yı (Template Locally Optimized Combination of Images; Marois et al. 2014) SpeCal yaklaşımını (Galicher et al. 2018) kullanılarak uygulanmıştır. Benzer şekilde PDS 70 objesi 14

Mayıs 2016 gecesinde SPHERE sistemi ile IRDIFS_EXT ve IRDIS modunda orta tayfsal çözünürlükte (IFS mod; $R \sim 30$) gözlenmiştir. Gözlemler sırasında hiçbir koronagraf kullanılmamış olup detektörün herhangi bir doygunluğunu önlemek için kısa poz süreleri (IRDIS: 0,837s, IFS: 4s) seçilmiştir.

Başka bir örnek olarak etrafında sıcak dev bir gezegen barından HIP 65426 yıldızı (Chauvin et al. 2017) verilebilir. HIP 65426 yıldızının gözlemleri SPHERE sistemi ile 26 Haziran 2016'da yapılmıştır. Veriler, H_2H_3 filtreleri ile çift bantlı görüntüleme modunda (Vigan et al. 2010) IRDIS (Dohlen et al. 2008) kullanılarak apodize-Lyot koronagraf (Carillet et al. 2011; Guerri et al. 2011) ile IRDIFS pupil izleme modunda ve aynı anda Y - J modunda IFS integral alan spektrografıyla (Claudi et al. 2008) elde edilmiştir. Koronagrafın arkasındaki yıldız pozisyonunun kaydı ve nokta yayılma fonksiyonu görüntüleme başında ve sonunda alınmıştır. Yoğun koronagrafik görüntülerde, HIP 65426'nın 7" içinde dört sönük aday tespit edilmiştir. Kaynak daha sonra 7 Şubat 2017'de yeniden gözlenmiş ve bu aday gezegenler yeniden görüntülenmiştir. Bu sonuçları test etmek için IRDIFS moduyla yeniden gözlemlenmiştir. 9 Şubat 2017'de IRDIFS-EXT modu, bu adayların fiziksel ve spektral özelliklerini daha da sınırlamak için K1K2 filtrelerinde IRDIS ve Y-H'de IFS ile birlikte kullanılmıştır. IRDIS ve IFS veri kümelerini indirgemek için 47 Tuc yıldızı gözlenmiştir. Veriler Maire et. al. (2016) tarafından açıklanan SHINE astrometrik kalibrasyonunun uzun vadeli analizinden elde edilebilmiştir. Tüm IRDIS ve IFS veri kümeleri, SPHERE Veri Merkezinde (DC) SPHERE Veri indirgeme ve İşleme (DRH) pipeline kullanılarak yapılmıştır (Pavlov et al. 2008). Bozuk pikseller için, temel indirgeme işlemleri uygulanmıştır. IFS için SPHERE-DC, DRH işlem hattını dalga boyu kalibrasyonunu ve hatalı piksel düzeltmesini iyileştiren ek adımlarla tamamlanmıştır (Mesa et al. 2015). Veriler daha sonra anamorfizm düzeltmesi ve akı normalizasyonu uygulayan SHINE Specal işlem hattında girdi olarak kullanılmış ve ardından farklı açısız ve spektral farklı görüntüleme algoritmaları kullanılmıştır (Galicher et al., hazırlık aşamasında). 7 Şubat 2017 dönemi için IFS ve IRDIS'ten elde edilen TLOCI görüntüleri Şekil 27'de gösterilmiştir. Soldaki görüntü HIP 65426A ve b'nin görüntüsü 7 Şubat 2017 tarihli IFS YJ-bant TLOCI görüntüsü iken sağdaki görüntü IRDIS H_2H_3 HIP 65426A ve b'nin aynı gece için birleştirilmiş TLOCI görüntüsüdür.



Şekil 27. HIP 65426A ve b'nin görüntüsü (Chauvin et al. 2017).

SONUÇ

Yakın-IR (0,7- 1,1 μ m) gözlemleri, 1960'lardan beri yer tabanlı gözlemevlerinde görsel bölge gözlemleriyle hemen hemen aynı şekilde ısı veya termal radyasyona duyarlı detektörler ve filtreler kullanılarak yapılmaktadır. Orta ve uzak -IR gözlemleri ise bu dalga boyları atmosfer tarafından bloke edildiği için yalnızca uzaya konuşlu teleskoplar ile yapılabilmektedir. Bu gözlemler, elektrik direnci ısıya karşı çok hassas olan germanyum gibi kristaller içeren özel soğutmalı detektörlerin kullanılmasını gerektirir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen bilgiler ile DAG (Doğu Anadolu Gözlemevi) bünyesinde tamamlanması planlanan 4 metre sınıfı optik (Görünür)/kızılötesi (IR) teleskopta "Koronagraf Aygıtı" kullanılarak 'Doğrudan Görüntüleme' yönteminin nasıl gerçekleşeceğine dair bir temel oluşturulması hedeflenmektedir. Özellikle DAG'ın odak düzleminde kullanılması hedeflenen aO sistemi, AO sistemi ve teleskop teknolojilerindeki ilerlemeler ile astronomi gözlemlerinden elde edilen görüntülerdeki bulanıklık, sintilasyon ve ışın yoğunluğunun azalması problemleri gibi dünyanın atmosferinde oluşan türbülansa bağlı etkilerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için opto-mekanik yapıya sahip, akıllı yapıdaki AO sistemlerin doğmasını ve gelişmesini sağlamıştır. Buradan hareketle AO sistemi sayesinde yer tabanlı teleskopları ile de uzay teleskoplarıyla elde edilen çözünürlük kadar yüksek çözünürlük elde edilmesi mümkün olabileceği düşünülmektedir.

DAG teleskobu hem aktif hem adaptif optik sistemleriyle özel yerli bir tasarımdan oluşmaktadır. Bu sistemler ilk kez birlikte bu çapta bir teleskopta denenmiş olacaktır. DAG birincil aynasında aktif optik sistemi, Nasmyth odaklarının birinde ise adaptif optik sistem bulunacaktır. DAG teknolojik ve optik sistemleri ile 4 metre teleskop sınıfında ön plana çıkacaktır. Ayrıca DAG'ın bir diğer önemli avantajı ise bulunduğu konumudur (39,78094 ; 41,22683). Bu enlem ve boylam yakınlarında bu boyutta bir başka teleskop bulunmamaktadır. Bu özelliğiyle DAG kuzey yarı küredeki boylam boşluğunu doldurmaktadır (Yeşilyaprak et al. 2016).

DAG teleskobunun özellikleri göz önüne alındığında Hubble Uzay Teleskobuna göre 3 kat daha fazla ışık toplama yeteneğine sahip olmasının yanı sıra Hubble Uzay Teleskobuna göre 7 kat daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntü elde edilmesi beklenmektedir (Anonim 2021v). Doğu Anadolu Gözlemevine adapte edilecek olan 'Koronagraf Aygıtı' kullanılarak ötegezegen bilimsel çalışmalarının farklı metodu olan 'Doğrudan Görüntüleme' metodu ülkemizde ötegezegen araştırmalarına farklı bir bakış anlayışı getirecektir.

Ötegezegen keşiflerinde doğrudan görüntüleme yönteminin yapılan çalışmalardan sonra ilerleme sağlanması beklenmektedir. Bu sebeple şimdiye kadar yapılan bu türden gözlemlerin DAG teleskobuyla da yapılabilmesi düşünülmektedir. DAG projesi bünyesinde temin edilecek koronograf ile Doğrudan Görüntüleme yönteminin test edilebilmesi için Tablo 12’de listelenen nesnelere DAG yerleşkesine göre gözlenebilirlikleri incelenmiş ve bunların arasından DAG teleskobunun gözlem limitlerine uygun olan gezegene sahip aday nesnelere listesi oluşturulmuştur (Tablo 14).

Tablo 14. Tablo 6’deki nesnelere DAG teleskobunun gözlenebilirlik limitlerine uygun olanları.

Gezegenlerin İsimleri	Gözlenebilirlik (DAG için)
1RXS J160929.1-210524 b	Gözlenebilir
2MASS J04414489+2301513 b	Gözlenebilir
2MASS J21402931+1625183 A b	Gözlenebilir
2MASS J22362452+4751425 b	Gözlenebilir
51 Eri b	Gözlenebilir
CFBDSIR J145829+101343 b	Gözlenebilir
DH Tau b	Gözlenebilir
FU Tau b	Gözlenebilir
GJ 504 b	Gözlenebilir
GQ Lup b	Gözlenebilir
GSC 06214-00210 b	Gözlenebilir
GU Psc b	Gözlenebilir
HD 203030 b	Gözlenebilir
HIP 78530 b	Gözlenebilir
HR 8799 b	Gözlenebilir
HR 8799 c	Gözlenebilir
HR 8799 d	Gözlenebilir
HR 8799 e	Gözlenebilir
kap And b	Gözlenebilir
LkCa 15 b	Gözlenebilir
Oph 11 b	Gözlenebilir
Ross 458 c	Gözlenebilir
USco CTIO 108 b	Gözlenebilir
VHS J125601.92-125723.9 b	Gözlenebilir
WISEP J121756.91+162640.2 A b	Gözlenebilir
HN Peg b	Gözlenebilir

KAYNAKLAR

- Absil, O., Milli, J., Mawet, D., Lagrange, A.-M., Girard, J., Chauvin, G., Boccaletti, A., Delacroix, C., Surdej, J., 2013. Searching for companions down to 2 AU from β Pictoris using the L'-band AGPM coronagraph on VLT/NACO. *Astronomy & Astrophysics* 559, L12.. doi:10.1051/0004-6361/201322748
- Anonim, 2020a. www.eso.org/public/turkey/images/eso0722e/. (21.12.2020)
- Anonim, 2020b. www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/transit-light-curve.html. (21.12.2020)
- Anonim, 2020c. http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/02/Detecting_exoplanets_with_microlensing (21.12.2020)
- Anonim, 2020d. <https://www.planetary.org/articles/wobbly-stars-the-astrometry-method> (21.12.2020)
- Anonim, 2021a. The Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/press-release/>. (17.03.2021)
- Anonim, 2021b. <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots>. (18.03.2021)
- Anonim, 2021c. <http://www.icc.dur.ac.uk/~tt/Lectures/Galaxies/Images/Infrared/Regions/irregions.html>. (18.03.2021)
- Anonim, 2021d. <http://lyot.org/background/coronagraphy.html>. (06.01.2021)
- Anonim, 2021e. <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>. (06.01.2021)
- Anonim, 2021f. <https://www.eso.org/public/images/potw1624a/>. (06.01.2021)
- Anonim, 2021g. <http://exoplanet.eu/catalog/>. (18.03.2021)
- Anonim, 2021h. <https://www.nasa.gov/missions>. (17.05.2021)
- Anonim, 2021i. https://atasam.atauni.edu.tr/bina_galeri/ (23.12.2021)
- Anonim, 2021j. <http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/telescopes/3p6.html>. (07.08.2021)
- Anonim, 2021k. <https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/36/>. (07.08.2021)
- Anonim, 2021l. https://www.eso.org/public/images/vista_hz_01/. (07.08.2021)
- Anonim, 2021m. <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vista.html>. (07.08.2021)
- Anonim, 2021n. <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/surveytelescopes/vista/>. (07.08.2021)
- Anonim, 2021o. https://www.eso.org/public/turkey/images/vst_lombardi_1/?lang. (10.08.2021)
- Anonim, 2021p. <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/sphere/>. (10.08.2021)
- Anonim, 2021r. <https://subarutelescope.org/en/about/>. (11.08.2021)
- Anonim, 2021s. <https://www.naoj.org/Projects/SCEXO/SCEXOWEB/000home.web/indexm.html>. (11.08.2021)
- Anonim, 2021t. <https://subarutelescope.org/en/results/2020/12/10/2918.html>. (11.08.2021)
- Anonim, 2021u. <https://www.naoj.org/Projects/SCEXO/SCEXOWEB/030openuse.web/030charis.web/indexm.html>. (11.08.2021)

- Anonim, 2021v. <https://atasam.atauni.edu.tr/20170805-idema/> (23.12.2021)
- Azazy, El-M., 2018. Infrared Spectroscopy - A Synopsis of the Fundamentals and Applications. DOI: 10.5772/intechopen.82210.
- Batalha, N. M., 2014. Exploring exoplanet populations with nasas kepler mission. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(35):12647– 12654.
- Bessell, M. S., 1979. UBVR photometry II: The Cousins VRI System, Its Temperature and Absolute Flux Calibration, And Relevance for Two-Dimensional Photometry. The Astronomical Society of The Pacific. Vol. 91, p. 589-607.
- Beuermann, K., Breitenstein, P., Debski, B., Diese, J. et al., 2012. The quest for companions to post-common envelope binaries II. NSVS 14256825 and HS0705+6700. *Astronomy & Astrophysics*, 540(A8), 5.
- Beuzit, J.-L., Feldt, M., Dohlen, K., Mouillet, D., Pugeta, P., Wildi, F., Abee, L., Antichif, J., et al. 2008. SPHERE: a planet finder instrument for the VLT. *Proc. SPIE*, 701418.
- Beuzit, J.-L., Mouillet, D., Langlois, M., Vigan, A., Zurlo, A., De Kok, R., Kasper, M., Keller, C., Ginski, C., Van Holstein, R., Snik, F., De Boer, J., Girard, J., Stam, D., 2017. Combining angular differential imaging and accurate polarimetry with SPHERE/IRDIS to characterize young giant exoplanets. doi:10.1117/12.2272554.
- Boss, A.P., Butler, R.P., Hubbard, W.B., Ianna, P.A., 2007. Working Group on Extrasolar Planets. *IAU Transactions Reports on Astronomy 2002–2005* Edited by Engyold, O., 26(A), 183–186.
- Brooks, T. Stahl, H. P. Arnold, William R., 2015. Advanced Mirror Technology Development (AMTD) thermal trade studies. In Kahan, Mark A; Levine-West, Marie B (eds.). *Optical Modeling and Performance Predictions VII. Optical Modeling and Performance Predictions VII.* 9577. p. 957703. doi:10.1117/12.2188371. hdl:2060/20150019495. S2CID 119544105.
- Brown, R. A., 2005. Single-visit photometric and obscurational completeness. *The Astrophysical Journal*, 624(2):1010.
- Brown, T.M., Charbonneau, D., Gilliland, R.L, Noyes, R.W., Burrows, Adam., 2001. Hubble Space Telescope Time-Series Photometry of the Transiting Planet of HD 209458.
- Campbell, B., Walker, G., and Yang, S., 1988. A search for substellar companions to solar-type stars. *The Astrophysical Journal*, 331:902–921.
- Campins, H., Rieke, G. H., Lebofsky, M. J., 1985. Absolute calibration of photometry at 1 through 5 μ -m. *Astronomical Journal*, Vol. 90, p. 896-899. DOI:10.1086/113799.
- Canovas, H., Montesinos, B., Schreiber, M.R., Cieza, L.A., Eiroa, C., Meeus, G., De Boer, J., Ménard, F., Wahhaj, Z., Riviere-Marichalar, P., Olofsson, J., Garufi, A., Rebollido, I., Van Holstein, R.G., Caceres, C., Hardy, A., Villaver, E., 2018. DZ Chamaeleontis: a bona fide photoevaporating disc. *Astronomy & Astrophysics* 610, A13.. doi:10.1051/0004-6361/201731640
- Canovas, H., Rodenhuis, M., Jeffers, S.V., Min, M., Keller, C.U., 2011. Data-reduction techniques for high-contrast imaging polarimetry. *Astronomy & Astrophysics* 531, A102.. doi:10.1051/0004-6361/201116918
- Cantalloube, F., Mouillet, D., Mugnier, L.M., Milli, J., Absil, O., Gomez Gonzalez, C.A., Chauvin, G., Beuzit, J.-L., Cornia, A., 2015. Direct exoplanet detection and characterization using the ANDROMEDA method: Performance on VLT/NaCo data.

- Carbillet, M., Bendjoya, P., Abe, L., Guerri, G., Boccaletti, A., Daban, J.-B., Dohlen, K., Ferrari, A., Robbe-Dubois, S., Douet, R., Vakili, F., 2011. Apodized Lyot coronagraph for SPHERE/VLT. *Experimental Astronomy* 30, 39–58.. doi:10.1007/s10686-011-9219-4
- Carson, J., Thalmann, C., Janson, M., Kozakis, T., Bonnefoy, M., Biller, B., Schlieder, J., Currie, T., Mcelwain, M., Goto, M., Henning, T., Brandner, W., Feldt, M., Kandori, R., Kuzuhara, M., Stevens, L., Wong, P., Gainey, K., Fukagawa, M., Kuwada, Y., Brandt, T., Kwon, J., Abe, L., Egner, S., Grady, C., Guyon, O., Hashimoto, J., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S., Hodapp, K., Ishii, M., Iye, M., Knapp, G., Kudo, T., Kusakabe, N., Matsuo, T., Miyama, S., Morino, J., Moro-Martin, A., Nishimura, T., Pyo, T., Serabyn, E., Suto, H., Suzuki, R., Takami, M., Takato, N., Terada, H., Tomono, D., Turner, E., Watanabe, M., Wisniewski, J., Yamada, T., Takami, H., Usuda, T., Tamura, M., 2013. DIRECT IMAGING DISCOVERY OF A “SUPER-JUPITER” AROUND THE LATE B-TYPE STAR κ And. *The Astrophysical Journal Letters* 763, L32.. doi:10.1088/2041-8205/763/2/L32
- Chauvin, G., Desidera, S., Lagrange, A.-M., et al. 2017, in SF2A-2017: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, ed. C. Reyle, P. Di Matteo, F. Herpin, E. Lagadec, A. Lanc on, 'Z. Meliani, & F. Royer, 331–335
- Chauvin, G., Lagrange, A.M., Dumas, C., Zuckerman, B. et al., 2004. A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing, *Astronomy and Astrophysics*, 425, 29–32.
- Chauvin, G., Lagrange, A.M., Dumas, C., Zuckerman, B. et al., 2005. Giant planet companion to 2MASSW J1207334-393254. *Astronomy and Astrophysics*, 438, 25–284
- Claudi, R.U., Turatto, M., Gratton, R.G., Antichi, J., Bonavita, M., Bruno, P., Cascone, E., De Caprio, V., Desidera, S., Giro, E., Mesa, D., Scuderi, S., Dohlen, K., Beuzit, J.L., Puget, P., 2008. SPHERE IFS: The spectro differential imager of the VLT for exoplanets search, Conference on Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. Spie-Int Soc Optical Engineering, Marseille, FRANCE.
- de Pater, I. and Lissauer J. J. (2001) *Planetary Sciences*. Cambridge Univ., Cambridge.
- de Pater, I. and Lissauer J. J. (2010) *Planetary Sciences*, 2nd edition. Cambridge Univ., Cambridge.
- Dekany, R., Roberts, J., Burruss, R., Antonin, T., Baranec, C., Guiwits, S., Hale, D., Angione, J., et al. 2013. Palm-3000: exoplanet adaptive optics for the 5 m hale telescope. *ApJ*, 776, 130 D.
- Delacroix, C., Absil, O., Forsberg, P., Mawet, D., Christiaens, V., Karlsson, M., Boccaletti, A., Baudoz, P., Kuitinen, M., Vartiainen, I. Surdej, J., Habraken, S. 2013. Laboratory demonstration of a mid-infrared AGPM vector vortex coronagraph *Astronomy & Astrophysics*, Volume 553, id.A98, 8 pp.10.1051/0004-6361/201321126.
- Dohlen, K., Langlois, M., Saisse, M., Hill, L., Origine, A., Jacquet, M., Fabron, C., Blanc, J.-C., Llored, M., Carle, M., Moutou, C., Vigan, A., Boccaletti, A., Carbillet, M., Mouillet, D., Beuzit, J.-L., 2008. The infra-red dual imaging and spectrograph for SPHERE: design and performance. SPIE.
- Ducourant, C., Teixeira, R., Chauvin, G., Daigne, G. *et al.*, 2008. An accurate distance to 2M1207Ab. *Astronomy and Astrophysics*, 477(1), 1–4
- Galicher, R., Boccaletti, A., Mesa, D., Delorme, P., Gratton, R., Langlois, M., Lagrange, A.-M.,

- Maire, A.-L., Le Coroller, H., Chauvin, G., Biller, B., Cantalloube, F., Janson, M., Lagadec, E., Meunier, N., Vigan, A., Hagelberg, J., Bonnefoy, M., Zurlo, A., Rocha, S., Maurel, D., Jaquet, M., Buey, T., Weber, L., 2018. Astrometric and photometric accuracies in high contrast imaging: The SPHERE speckle calibration tool (SpeCal). *Astronomy & Astrophysics* 615, A92.. doi:10.1051/0004-6361/201832973
- Gauza, B., Béjar, V.J.S., Pérez-Garrido, A., Osorio, M.R.Z., Lodieu, N., Rebolo, R., Pallé, E., Nowak, G., 2015. DISCOVERY OF A YOUNG PLANETARY MASS COMPANION TO THE NEARBY M DWARF VHS J125601.92-125723.9. *The Astrophysical Journal* 804, 96.. doi:10.1088/0004-637x/804/2/96.
- Guerri, G., Daban, J.-B., Robbe-Dubois, S., Douet, R., Abe, L., Baudrand, J., Carillet, M., Boccaletti, A., Bendjoya, P., Gouvret, C., Vakili, F., 2011. Apodized Lyot coronagraph for SPHERE/VLT: II. Laboratory tests and performance. *Experimental Astronomy* 30, 59–81.. doi:10.1007/s10686-011-9220-y
- Guyon, O., 2003. Phase-induced amplitude apodization of telescope pupils for extrasolar terrestrial planet imaging. *Astron. Astrophys.*, 404, 379–387.
- Haffert, S.Y., Bohn, A.J., De Boer, J., Snellen, I.A.G., Brinchmann, J., Girard, J.H., Keller, C.U., Bacon, R., 2019. Two accreting protoplanets around the young star PDS 70. *Nature Astronomy* 3, 749–754.. doi:10.1038/s41550-019-0780-5
- Haynes, W. M., 2011. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (92nd ed.). CRC Press. p. 10.233. ISBN 978-1-4398-5511-9.
- Hellier, C., 2001. *Cataclysmic Variable Stars*. Springer-Praxis, 210s, UK.
- Hickson, P. 2014. Atmospheric and adaptive optics. *Astronomy and Astrophysics Reviews*, 22, 76.
- Horner, J., et al., 2012. A dynamical analysis of the proposed circumbinary HW Virginis planetary system *MNRAS*, 427(4), 2812–2823.
- Horner, J., Wittenmyer, R. A., Hinse, T. C., Marshall, J. P., Mustill, A. J., Tinney, C. G., 2013. A detailed dynamical investigation of the proposed QS Virginis planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(3), 2033–2039.
- Howard, S., 2011, *Exoplanets*. Article in *Journal. Washington Academy of Sciences*, Washington, D. C.s. 815.
- Jolissaint, L., Keskin, O., Zago, L., Kaan Yerli, S., Yesilyaprak, C., Mudry, E., & Lousberg, G., 2016. The design of an adaptive optics telescope: the case of DAG. <https://doi.org/10.1117/12.2233297>.
- Kasdin, N. J., Belikov, R., Beall, J., Vanderbei, R. J., Littman, M. G., et al., 2005. Shaped pupil coronagraphs for planet finding: Optimization, manufacturing, and experimental results. In *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets II* (D. Coulter, ed.), pp. 128–136. SPIE Conf. Series 5905, Bellingham, Washington.
- Kasdin, N. J., Vanderbei, R. J., Spergel, D. N., and Litman, M. G., 2003. Extrasolar planet finding via optimal apodized-pupil and shaped-pupil coronagraphs. *Astrophys. J.*, 582, 1147–1161.
- Konacki, M. and Wolszczan, A., 2003. Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR B1257+12 System. *ApJ*, 591:L147–L150.
- Kuchner, M. J. and Traub, W. A., 2002. A coronagraph with a band-limited mask for finding terrestrial planets. *Astrophys. J.*, 570, 900–908.

- Kuhn, J.R., Potter, D., Parise, B., 2001. Imaging Polarimetric Observations of a New Circumstellar Disk System. *The Astrophysical Journal* 553, L189–L191.. doi:10.1086/320686
- Kühn, J., Jolissaint ,L., Bouxin A. And Patapis P. 2021. SLM-based active focal-plane coronagraphy: status and future on-sky prospects. SPIE.
- Lambein X., 2018. Matrix Completion for Exoplanet Detection in High Contrast Imaging. University College London.
- Langlois, M., Dohlen, K., Vigan, A., Zurlo, A., Moutou, C., Schmid, H.M., Milli, J., Beuzit, J.L., Boccaletti, A., Carle, M., Costille, A., Dorn, R., Gluck, L., Hubin, N., Feldt, M., Kasper, M., Lizon, L., Madec, F., Le Mignant, D., Mouillet, D., Puget, J.P., Sauvage, J.F., Wildi, F., 2014. High Contrast Polarimetry in the Infrared with SPHERE on the VLT, 5th Conference on Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy. Spie-Int Soc Optical Engineering, Montreal, CANADA.
- LeBlanc, F., 2010. An Introduction to Stellar Astrophysics. Wile-Blackwell yayınları, 338 s, Birleşik Krallık.
- Lovis, C., Ségransan, D., Mayor, M., Udry, S., Benz, W., Bertaux, J.-L., Bouchy, F., Correia, A. C. M., Laskar, J., Lo Curto, G., Mordasini, C., Pepe F., Queloz, D., and Santos, N. C., 2011. The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVIII. Up to seven planets orbiting HD 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems. *Astronomy and Astrophysics*, 528:A112.
- MacIntosh, B. Marois, Christian, 2008. "Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR8799". *Science*. 322 (5906):1348–52. arXiv:0811.2606. Bibcode:2008Sci...322.1348M. doi:10.1126/science.1166585. PMID 19008415. S2CID 206516630. (Preprint at exoplanet.eu Archived 17 December 2008 at the Wayback Machine)
- Macintosh, B., Graham, J.R., Ingraham, P., Konopacky, Q., Marois, C., Perrin, M., Poyneer, L., Bauman, B., Barman, T., Burrows, A.S., Cardwell, A., Chilcote, J., De Rosa, R.J., Dillon, D., Doyon, R., Dunn, J., Erikson, D., Fitzgerald, M.P., Gavel, D., Goodsell, S., Hartung, M., Hibon, P., Kalas, P., Larkin, J., Maire, J., Marchis, F., Marley, M.S., McBride, J., Millar-Blanchaer, M., Morzinski, K., Norton, A., Oppenheimer, B.R., Palmer, D., Patience, J., Pueyo, L., Rantakyro, F., Sadakuni, N., Saddlemyer, L., Savransky, D., Serio, A., Soummer, R., Sivaramakrishnan, A., Song, I., Thomas, S., Wallace, J.K., Wiktorowicz, S., Wolff, S., 2014. First light of the Gemini Planet Imager. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 12661–12666.. doi:10.1073/pnas.1304215111.
- Maire, A.-L., Langlois, M., Dohlen, K., Lagrange, A.-M., Gratton, R., Chauvin, G., Desidera, S., Girard, J., Milli, J., Vigan, A., Zins, G., Delorme, P., Beuzit, J.-L., Claudi, R., Feldt, M., Mouillet, D., Puget, P., Turatto, M., Wildi, F., 2016. SPHERE IRDIS and IFS astrometric strategy and calibration. SPIE.
- Maire, A.-L., Rodet, L., Cantalloube, F., Galicher, R., Brandner, W., Messina, S., Lazzoni, C., Mesa, D., Melnick, D., Carson, J., Samland, M., Biller, B.A., Boccaletti, A., Wahhaj, Z., Beust, H., Bonnefoy, M., Chauvin, G., Desidera, S., Langlois, M., Henning, T., Janson, M., Olofsson, J., Rouan, D., Ménard, F., Lagrange, A.-M., Gratton, R., Vigan, A., Meyer, M.R., Cheetham, A., Beuzit, J.-L., Dohlen, K., Avenhaus, H., Bonavita, M., Claudi, R., Cudel, M., Daemgen, S., D’Orazi, V., Fontanive, C., Hagelberg, J., Le Coroller, H., Perrot, C., Rickman, E., Schmidt, T., Sissa, E., Udry, S., Zurlo, A., Abe, L., Origné, A., Rigal, F., Rousset, G., Roux, A., Weber, L., 2019. Hint of curvature in the orbital motion

- of the exoplanet 51 Eridani b using 3 yr of VLT/SPHERE monitoring. *Astronomy & Astrophysics* 624, A118.. doi:10.1051/0004-6361/201935031.
- Marcy, G.W. and Butler, R.P. 1995. The Planet around 51 Pegasi. *American Astronomical Society(187th AAS Meeting)*, 27, 1379.
- Marcy, G.W., Butler, R.P., Vogt, S.S., Fischer, D. and Lissauer, J.J., 1998. A Planetary Companion to a Nearby M4 Dwarf, Gliese 876. *The Astrophysical Journal*, 505(2), 147–149.
- Marois, C., Correia, C., Véran, J.-P., & Currie, T. 2014, in *Exploring the Formation and Evolution of Planetary Systems*, eds. M. Booth, B. C. Matthews, & J. R. Graham, IAU Symp, 299, 48
- Marois, C., Doyon, R., Nadeau, D., Racine, R., Walker, G. A. H. 2003. *Astronomy with High Contrast Imaging*. EAS Publications Series, 8, 233 6.
- Marois, C., Doyon, R., Racine, R., & Nadeau, D. 2000. Efficient Speckle Noise Attenuation in Faint Companion Imaging. *PASP*, 112,91.
- Marois, C., Lafreniere, D., Doyon, R., Macintosh, B., Nadeau, D., 2006. Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique. *The Astrophysical Journal* 641, 556–564.. doi:10.1086/500401
- Marsh, T. R., Parsons, S. G., Bours, M. C. P., Littlefair, S. P., Copperwheat, C. M., Dhillon, V. S., Breedt, E., Caceres, C., Sreber, M. R., 2014. The planets around NN Serpentis: still there. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(1), 475–488.
- Martinez, P., Dorrer, C., Aller Carpentier, E., Kasper, M., Boccaletti, A., Dohlen, K., Yaitskova, N., 2009. Design, analysis, and testing of a microdot apodizer for the Apodized Pupil Lyot Coronagraph. *Astronomy & Astrophysics* 495, 363–370.. doi:10.1051/0004-6361:200810918
- Mawet D., Serabyn E., Liewer K., Burruss R., Hickey J., and Shemo D. (2010) The vector vortex coronagraph: Laboratory results and first light at Palomar Observatory. *Astrophys. J.*, 709, 53–57.
- Max, C., 2001. Lick Observatory. Introduction to adaptive optics and its history. http://cfao.ucolick.org/EO/resources/History_AO_Max.pdf.
- Mayor, M. and Frei, P.Y. 2003. *New Worlds in the Cosmos the Discovery of Exoplanets*. Cambridge University Press. 248s, UK.
- Mayor, M. and Queloz, D.,1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378:355–359.
- Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., Latham, D.W. et al., 2000. The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458. *The Astrophysical Journal*, 532(1), 55–58.
- Mesa, D., Gratton, R., Zurlo, A., Vigan, A., Claudi, R.U., Alberi, M., Antichi, J., Baruffolo, A., Beuzit, J.-L., Boccaletti, A., Bonnefoy, M., Costille, A., Desidera, S., Dohlen, K., Fantinel, D., Feldt, M., Fusco, T., Giro, E., Henning, T., Kasper, M., Langlois, M., Maire, A.-L., Martinez, P., Moeller-Nilsson, O., Mouillet, D., Moutou, C., Pavlov, A., Puget, P., Salasnich, B., Sauvage, J.-F., Sissa, E., Turatto, M., Udry, S., Vakili, F., Waters, R., Wildi, F., 2015. Performance of the VLT Planet Finder SPHERE. *Astronomy & Astrophysics* 576, A121.. doi:10.1051/0004-6361/201423910
- Murphy S. J., Bedding T. R., and Shibahashi H., 2016. A planet in an 840-day orbit around a

- kepler main-sequence a star found from phase modulation of its pulsations. *The Astrophysical Journal Letters*, 827(1):L17, URL <http://stacks.iop.org/2041-8205/827/i=1/a=L17>. 6.
- Neuhäuser, R., Guenther, E. W., Wuchterl, G., Mugrauer, M., Bedalov, A., Hauschildt, P. H., 2005. Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 435, Issue 1, pp.L13-L16.
- Pavlov, A., Möller-Nilsson, O., Feldt, M., Henning, T., Beuzit, J.-L., Mouillet, D., 2008. SPHERE data reduction and handling system: overview, project status, and development. SPIE.
- Perryman M., 2011. *The Exoplanet Handbook*. Cambridge University Press, 3, 4, 5, 30.
- Perryman M., Hartman J., Bakos G. A., and Lindegren L., 2014. Astrometric exoplanet detection with Gaia. *The Astrophysical Journal*, 797(1):14, URL <http://stacks.iop.org/0004-637X/797/i=1/a=14>. 7.
- Platt B. C., and Shack R., 2001. History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing, *J. Refract Surg.*; 17(5):573–577.
- Pohl, A., Sissa, E., Langlois, M., Müller, A., Ginski, C., Van Holstein, R.G., Vigan, A., Mesa, D., Maire, A.-L., Henning, T., Gratton, R., Olofsson, J., Van Boekel, R., Benisty, M., Biller, B., Boccaletti, A., Chauvin, G., Daemgen, S., De Boer, J., Desidera, S., Dominik, C., Garufi, A., Janson, M., Kral, Q., Ménard, F., Pinte, C., Stolker, T., Szulágyi, J., Zurlo, A., Bonnefoy, M., Cheetham, A., Cudel, M., Feldt, M., Kasper, M., Lagrange, A.-M., Perrot, C., Wildi, F., 2017. New constraints on the disk characteristics and companion candidates around T Chamaeleontis with VLT/SPHERE. *Astronomy & Astrophysics* 605, A34.. doi:10.1051/0004-6361/201630234
- Racine, R., Walker, G. A. H., Nadeau, D., Doyon, R., & Marois, C. 1999, *Publications of the ASP*, 111, 587.
- Rieke, G. H., (2009). "History of infrared telescopes and astronomy". *Experimental Astronomy*. 25 (1–3): 125-141. doi:10.1007/s10686-009-9148-7.
- Rimmele, T. R., and Marino, J., 2011. Solar Adaptive Optics. *Living Rev. Sol. Phys.* 8(1):2-92.
- Robson, E., 1979. Far infrared astronomy. *Science Progress (1933-)*, 66(262), 119-150. Retrieved June 2, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/43420486>.
- Ruane, G., Ngo, H., Mawet, D., Absil O., Choquet, É., Cook, T., Gomez, G. C., Huby, E., Matthews, K., Meshkat, T., Reggiani, M., Serabyn, E., Wallack, N., Xuan W. J., 2019. Reference star differential imaging of close-in companions and circumstellar disks with the NIRC2 vortex coronagraph at W.M. Keck Observatory.
- Savransky, D., Cady, E., and Kasdin, N. J., 2011. Parameter distributions of keplerian orbits. *The Astrophysical Journal*, 728(1):66.
- Schneider, D. P, Gunn, J. E., Hoessel, J. G., 1983. CCD photometry of Abell clusters. II. Surface photometry of 249 clusters galaxies. *Astrophysical Journal*. Vol. 268, p. 476-494.
- Sickle, J.V., 2015. *GPS for Land Surveyors*. CRC Press, 368 s, London.
- Sivaramakrishnan, A., Makidon, R. B., Lloyd, J. P., Oppenheimer, B. R., Graham, J.R., Kalas, P. G., Macintosh, B. A., Max, C. E., Baudoz, P., Kuhn, J., Potter, D., 2001. Limits of Lyot Coronagraphy with AEOS Adaptive Optics Telescope. *Bulletin of the AAS*, 33, 902.

- Soummer, R., Pueyo, L., & Larkin, J. 2012. Detection and Characterization of Exoplanets and Disks Using Projections on Karhunen-Loève Eigenimages. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 755, Issue 2, article id. L28.
- Thalmann, C., Carson, J., Janson, M., Goto, M., McElwain, M., Egner, S., Feldt, Hashimoto, J., Hayano, Y., Henning, T., Hodapp, K. W., Kandori, R., Klahr, H., Kudo, T., Kusakabe, N., Mordasini, C., Morino, J. -I., Suto, H., Suzuki, R., Tamura, M., 2009. "Discovery of the Coldest Imaged Companion of a Sun-Like Star". *The Astrophysical Journal*. 707 (2): L123-L127.
- Thompson, T., 2009. Introduction to Stars, Galaxies, and Cosmology. Astronomy 1144: Lecture 9. Winter Quarter Department of Astronomy the Ohio State University).
- Traub, W. A. and Vanderbei, R. J., 2003. Two-mirror apodization for high-contrast imaging. *Astrophys. J.*, 599, 695–701.
- Traub, W. A., Oppenheimer, B. R., 2010. Direct Imaging of Exoplanets. *Exoplanets*, edited by S. Seager. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2010, 526 pp. ISBN 978-0-8165-2945-2., p.111-156.
- Trauger, J. T. and Traub, W. A., 2007. A laboratory demonstration of the capability to image an Earth-like extrasolar planet. *Nature*, 446, 771–773.
- Van de Kamp, P., 1943. The Astrometric Study of Unseen Companions to Near-by Stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 55(327), 263.
- van Dishoeck, E. F., 1999. Mid-Infrared Astronomy with NGST. *Next Generation Space Telescope Science and Technology*, ASP Conference Series, Vol. 207. Proceedings of a conference held at Hyannis, MA, 13-16 September, 1999. ISBN: 1-58381-036-6 (2000)., p.85. Bibliographic Code: 2000ASPC...207...85V.
- Vigan, A., Gry, C., Salter, G., Mesa, D., Homeier, D., Moutou, C., Allard, F., 2015. High-contrast imaging of Sirius A with VLT/SPHERE: looking for giant planets down to one astronomical unit. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, 129–143.. doi:10.1093/mnras/stv1928
- Vigan, A., Moutou, C., Langlois, M., Allard, F., Boccaletti, A., Carillet, M., Mouillet, D., Smith, I., 2010. Photometric characterization of exoplanets using angular and spectral differential imaging. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 407, 71–82.. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.16916.x
- Vigan, A., N'Diaye, M., Dohlen, K., Beuzit, J.-L., Costille, A., Caillat, A., Baruffolo, A., Blanchard, P., Carle, M., Ferrari, M., Fusco, T., Gluck, L., Hugot, E., Jaquet, M., Langlois, M., Le Mignant, D., Llored, M., Madec, F., Mouillet, D., Origné, A., Puget, P., Salasnich, B., Sauvage, J.-F., 2016. Apodization in high-contrast long-slit spectroscopy. *Astronomy & Astrophysics* 586, A144.. doi:10.1051/0004-6361/201527584vista/. (07.08.2021)
- Wei, J., 2018. <https://arxiv.org/pdf/1805.02771.pdf> (06.01.2020).
- Winn, J. N., 2018. Planet occurrence: Doppler and transit surveys. *Handbook of Exoplanets*, ISBN 978-3-319-55332-0. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature.
- Wolszczan, A. and Frail, D. A., 1992. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355:145–147.
- Wright, D. J., Wittenmyer, R. A., Tinney, C. G., Bentley, J. S., and Zhao, J., 2016. Three Planets Orbiting Wolf 1061. *ApJL*, 817:L20.

- Wright, J. T. and Gaudi, B.S., 2012. Exoplanet Detection Methods, Part 2, Planets, Stars, and Stellar Systems, Ed: Oswalt, T., Springer, Netherlands, 1–60.
- Xin, Y., 2018. Coronagraphic data post-processing using projections on instrumental modes. California: California Institute of Technology.
- Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Keskin, O., 2016. IV Workshop on Robotic Autonomous Observatories (Eds. María Dolores Caballero-García, Shasi B. Pandey, David Hiriart & Alberto J. Castro-Tirado) Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias) Vol. 48, pp. 120-122.
- Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Keskin, O., 2015. Eastern Anatolia Observatory (Dag): Recent Developments and A Prospective Observing Site for Robotic Telescopes . 4th Workshop on Robotic Autonomous Observatories (Pp.120-122). Torremolinos, Spain.
- Zhang, J. and Hoshino, K., 2019. Mechanical transducers: Cantilevers, acoustic wave sensors, and thermal sensors in Molecular Sensors and Nanodevices (Second Edition)
- Zhao, J., 2019. Robust Parametrisations of Spectral Line Profiles to Probe Planetary Signals in the Presence of Stellar Variability. Sydney: New South Wales University.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Burak Batuhan GÜRBULAK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Tevfik İleri Anadolu Lisesi (Okul Birinciliği)
Lisans:	Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir, Türkiye. Makine Mühendisliği 2014–2019
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Erzurum, Türkiye Astronomi ve Astrofizik 2019–2021
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Intermediate (B2+)
Sertifikalar	
İş Güvenliği Uzmanı	
Introduction to Ansys Mechanical	