



Applications of Coronagraph in Astronomy

Burak Batuhan Gürbulak^{*1}, İlham Nasıroğlu¹, Aykut Özdönmez¹, Hüseyin Er¹

¹Department of Astronomy and Astrophysics, Faculty of Sciences, Atatürk University, Erzurum, Turkey.

(Alınış / Received: 19.05.2021, Kabul / Accepted: 04.06.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 30.06.2021)

*Corresponding Author: burakerz@hotmail.com (B. B. Gürbulak)
(ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4120-0562>)

Keywords

Exoplanet,
Direct Imaging,
Coronagraph,
Adaptive Optics,
DAG

Abstract: In the last fifteen years, the discovery of the planets (exoplanets) of our Solar System on Earth has become relatively common. Nowadays, more than 4500 exoplanets have been discovered by indirect learning methods. Since such methods may not lead to real results, it is important to directly observe the residue produced or reflected by the exoplanets themselves with the method as "Direct Imaging Method". Direct imaging method can reveal single or multiple exoplanet systems and their dynamical evolution accordingly. In addition, it makes it possible to study many stellar systems and astrophysical mechanisms, i.e. active galaxies, mass transfer mechanisms, or protostar formation and evolution, or faint components (or stars) nearby a bright source. The importance of this method is gradually increased by the development of technology. Within this study, it is aimed to provide a basis for how the "Direct Imaging" method can be used with the "Coronagraph Device" on the 4-m class optical/infrared telescope which is planned to be completed soon within DAG (Eastern Anatolia Observatory).

Koronagrafin Astronomideki Uygulamaları

Anahtar Kelimeler

Ötegezegen,
Doğrudan Görüntüleme,
Koronagraf,
Adaptif Optik,
DAG

Özet: Son on beş yıl içinde, Güneş Sistemimizin dışındaki gezegenlerin (ötegezegen) keşfi nispeten yaygın bir olay haline gelmiştir. Günümüzde 4500'den fazla ötegezegenin çoğu dolaylı algılama yöntemleri ile keşfedilmiştir. Bu türden (dolaylı) yöntemler, ölçülen gerçek sonuçlara ulaştırılamayabileceğinden ötegezegenlerin kendi ürettikleri veya yansıttıkları ışığın "Doğrudan Görüntüleme Yöntemi" olarak adlandırılan yöntem ile doğrudan gözlenmesi oldukça önemlidir. Doğrudan görüntüleme yöntemi, tekli veya çoklu ötegezegen sistemlerini ve buna bağlı olarak bu sistemlerin dinamik evrimlerini ortaya koyabilir. Bunlara ek olarak aktif galaksi çekirdekleri, kütle aktarım mekanizmaları veya protostar oluşumu ve evrimi veya parlak bir bileşenin yanında yer alan daha sönük bileşenler gibi birçok sistem ve mekanizmanın çalışmasını mümkün kılar. Bu nedenle bu yöntemin önemi teknolojinin gelişmesi ile birlikte giderek artmaktadır. Bu çalışmamız kapsamında toplanan bilgiler ile yakın bir zamanda DAG (Doğu Anadolu Gözlemevi) bünyesinde tamamlanacak olan 4-m sınıfı optik/kızılötesi teleskopta kullanılması hedeflenen "Koronagraf Aygıtı" ile "Doğrudan Görüntüleme" yönteminin nasıl uygulanabileceğine dair bir temel oluşturulması hedeflenmektedir.

1. Giriş

Güneş sistemimiz dışındaki yıldızların etrafında dolanan ve Jüpiter kütlelerinin yaklaşık 13 katından daha küçük (büyük ise kahverengi cüce) olan gök

cisimler ötegezegen (exoplanet) olarak adlandırılır [1,2]. Ötegezegen keşifleri, radyal hız, geçiş, zamanlama, kütleçekimsel mikromerceklenme, konum ölçüm ve doğrudan görüntüleme gibi farklı yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. İlk ötegezegen keşif

çalışmalarına, 1938 yılında Sproul Gözlemevi'nde konum ölçüm yöntemi kullanılarak başlanmış ve ötegezegen keşiflerine öncü olan ilk keşif ise, 1992 yılında Wolszczan ve Frail [3] tarafından PSR 1257+12 milisaniye atarcasının etrafında dolanan gezegenin keşfi olmuştur. Bu keşiften kısa bir süre sonra, ilk kez Güneş benzeri bir anakol yıldızına oldukça yakın yörüngede dolanan Jüpiter benzeri bir gaz devi olan 51 Pegasi b ötegezegeni keşfedilmiş [4] ve bu keşif 2019 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür¹. Ötegezegen keşiflerinde kullanılan yöntemlerin neredeyse tamamı gezegenin etrafında dolandığı yıldızın ışığında veya konumunda meydana gelen değişimler incelenerek dolaylı bir şekilde ötegezegen araştırmaları yapılmaktadır. Doğrudan görüntüleme yönteminde ise yıldız ve gezegen sistemi doğrudan görüntülenebilmektedir. Bu nedenle bu yöntem, hem başlı başına ötegezegen keşifleri için kullanılan bir yöntem olup hem de diğer keşif yöntemlerinin bir nevi tamamlayıcısı ve doğrulayıcısı olmaktadır. Gezegen keşifleri, astronomide bir devrim başlatmış olup dünyanın birçok yerinde ötegezegen araştırmalarının yapıldığı uluslararası projelerin hızlı bir şekilde artmasına ve bu girişimler yeni yöntem ve teknolojilerin geliştirilmesine öncülük etmiştir [5]. Bu tür araştırmalar, Güneş benzeri yıldızların etrafındaki gezegenlerin ve bunlardan farklı olabilecek türden olan gezegenlerin oluşumunu-evrimini ve bağlı oldukları yıldız sistemlerinin yörünge evrimini daha iyi anlamamızı sağlayabilecek olması bakımından oldukça önemlidir [6,7].

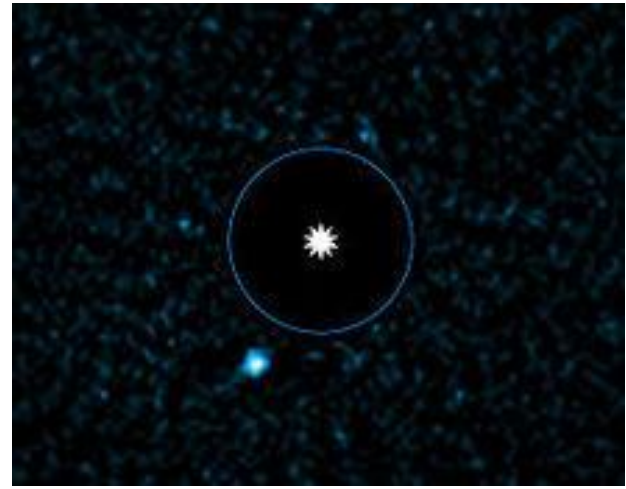
2. Doğrudan Görüntüleme Tekniği

“Doğrudan Görüntüleme” yöntemi, sistemdeki gezegenin yıldız üzerine uyguladığı etkilere bakılmaksızın doğrudan gezegenin kendisinin görüntülenmesine dayanan bir yöntemdir [8]. Gezegenler, yıldızlara kıyasla son derece zayıf ışık kaynakları (kendi ısılarından dolayı kızıl ötesinde yaptıkları ışımaya) olup bağlı oldukları yıldızlarının yüksek ışığı altında görüntülenmeleri oldukça zordur. Yıldızlarından yeterince uzak yörüngelerde dolanan gezegenler ev sahibi yıldızların ışığının çok küçük bir miktarını yansıttığı için bu tür gezegenlerin tespiti genellikle termal yayınının gözlenmesi ile daha kolay yapılabilmektedir. Çünkü böylesi bir gezegen görünür banda göre kızılötesi bantta çok daha parlak görülmektedir. Yine de gezegeni net bir şekilde görüntüleyebilmek için yıldızın parlak ışığını engellemek gerekmektedir. Koronagraflar, tam olarak bu işlemi yapabilmek için tasarlanmış olup gezegeni görünür bırakırken, yıldızdan gelen ışığın büyük bir bölümünü engellemektedir².

Doğrudan görüntüleme, yıldızın yaşı ve gezegenin sıcaklığıyla ilişkili olarak gezegenin kütlelerini yaklaşık olarak vermektedir. Yıldız oluştuktan birkaç milyon yıl sonra gezegenler oluşabileceğinden, kütle önemli ölçüde değişebilmektedir. Gezegen ne kadar soğuksa,

kütlesinin de o kadar az olması gerekir. Bazı durumlarda, bir gezegenin yarıçapına, sıcaklığına, görünen parlaklığına ve Dünya'dan uzaklığına bağlı olarak makul sınırlamalar getirmek mümkündür. Ayrıca gezegenlerden elde edilen tayfların yıldız tayfindan ayrıştırılması gerekmeyebileceğinden, bu durum gezegenlerin kimyasal bileşimini belirlemeyi kolaylaştırır.

Gemini Planet Imager (GPI) [9], VLT-SPHERE [10], Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCExAO), Palomar Project 1640 [11] gibi doğrudan görüntüleme özelliklerine sahip cihazlarla donatılmış bazı projeler bulunmaktadır. Bu projelerde yer alan cihazlar, yörüngedeki gezegenleri doğrudan gözlemleyebilmek için yakındaki yıldızın ışığını engellemek üzere tasarlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Ötegezegen HD 95086 b ESO VLT görüntüsü³.

NASA'nın Jet İtki Laboratuvarı'ndan (Jet Propulsion Laboratory) bir ekip, bir girdap koronagrafinin gezegenlerin doğrudan görüntülenmesini sağlayabileceğini bildirmiştir. Hale Teleskobunun (5,1 metre) sadece 1,5 metre genişliğindeki bir bölümü kullanılarak HR 8799 yıldızının önceden görüntülenmiş üç gezegeni yeniden görüntülenerek cihaz test edilmiştir. Böylece, koronagraf ile 5,1 metrelik bir teleskobun belirli bir bölümü kullanılarak neredeyse aynı çözünürlükte görüntü elde edilmiştir [12].

Doğrudan görüntüleme yöntemi, gezegenleri direkt görüntülenmenin yanı sıra gezegenin diğer fiziksel özelliklerinin belirlenmesine büyük miktarda katkı sağlamaktadır. Öncelikle radyal hız ve geçiş tekniğinin en hassas olduğu olası hedef gezegenler, küçük yörüngeli ve yörünge düzleminin bakış doğrultumuza paralel olduğu büyük gezegenlerdir. Doğrudan görüntüleme tekniği ise, büyük yörüngeli ve yörüngesi bakış doğrultumuzla mükemmel yakın hizada olması gerekmeyen büyük gezegenlere hassastır. Böylece bu yöntem, gezegenlerin oluşum ve evrimini incelemek için diğer yöntemlerin eksik olduğu parametre uzayının boşluğunu

doldurmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile gezegenin kendisi doğrudan görüntülenebildiğinden tayfı alınarak bu gezegenlerde yaşanabilirlik hakkında bilgilere ulaşmak için sıcaklık ve atmosferik bileşimi incelenebilir.

Bu yöntemin dezavantajları ise henüz tespit edilmeye uygun çok az sayıda gezegen olmasıdır. Bu da bir gezegenin tespit edilebilmesi için çok daha fazla yıldızın gözlenmesi gerektiği anlamına gelir⁴. Dahası mevcut teknolojinin sınırlamalarından kaynaklanan dezavantajlar ise Dünya'dan gözlemlendiğinde yıldız ve gezegenleri arasındaki yüksek kontrast farkı ve açısal ayrılıktır. Ev sahibi yıldızın ışığı gezegenin tüm ışığını kaplayacak kadar parlak olduğunda bu gezegenleri gözlemek son derece zordur. Ayrıca kullanılan bazı teleskopların açısal çözünürlükleri ($\theta \approx \lambda / D$, burada D birincil ayna çapı ve λ dalga boyu), yıldız ve bileşeni olan gezegen arasındaki minimum ayrımı (iki cisim arasındaki uzaklığı) çözümlenmek için yeterli olmayabilir [13].

3. Koronagraf ve Adaptif Optik

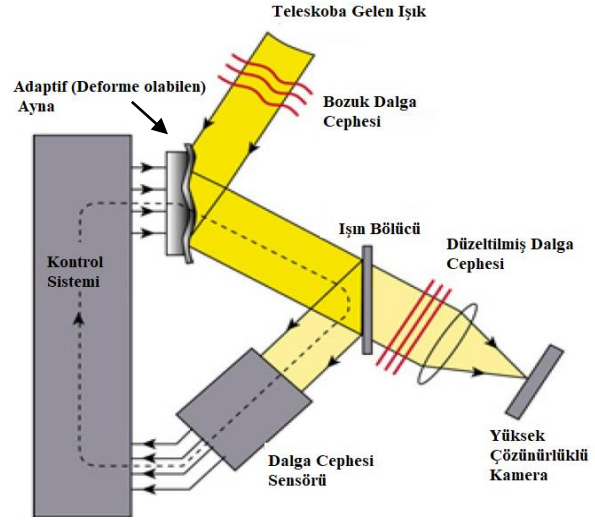
Koronagrafin ilk tasarımı ve kullanım amacı, güneş koronasını gözlemek için Güneş'in ışığını bloke edecek şekilde tasarlayan Bernard Lyot'a atfedilir. Klasik Lyot koroneri olarak adlandırılan bu tasarım, Güneş'in koronasını gözlemek için odak düzleminde katı bir okülter ve Lyot durağı olarak adlandırılan bir iris kullanılarak Güneş ışığının engellenmesi temeline dayanır⁵. O zamandan beri hem ilişkili foton gürültüsünü bastıran hem de detektörü doyuma ulaştırmadan daha uzun süreli pozlamalara izin veren koronagraf tasarımları geliştirilerek ötegezegenlerin keşiflerinde önemli bir yer almaya başlamıştır [14].

NASA'nın misyonlarından olan HST (Hubble Space Telescope) ve yakın gelecekte tamamlanması/yapılması planlanan JWST (James Webb Space Telescope, 2021), WFIRST (Wide Field Infrared Survey Telescope, 2025), HabEx (Habitable Exoplanet Observatory, 2035) ve LUVOIR (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor, 2039) gibi birçok uzay teleskop projelerinde koronagraf aletleri kullanılmakta ve kullanılması planlanmaktadır⁶.

Tek bir dalga boyundaki dairesel açıklıklar için düz bir dalga cephesi olduğunda tüm eksen üzerindeki yıldız ışığını ortadan kaldırmak için tasarlanmış koronagraflar olmasına rağmen, yer tabanlı teleskoplarda, atmosferik çalkantılar sonucunda ortaya çıkan dalga cephesi sapmalarının varlığı yine de ışığın sızmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle en yüksek hassasiyetlere ulaşmak için Adaptif Optik (AO, Uyarlanabilir Optik) gibi dalga cephesi kontrol teknikleri ile birlikte kullanılan koronagrafa ihtiyaç vardır.

Atmosferik dalga cephesi hatasının etkisini en aza indirmek için yer tabanlı teleskoplarda uygulanan AO, teleskobun giriş açıklığındaki (pupil) dalga

cephesi sapmalarını ölçen bir ön-dalga sensörü (WFS: Wavefront Sensor) ve bu sapmaları düzeltmek için deforme olabilen aynanın (DM: adaptive mirror) kullanıldığı bir tekniktir [15,16]. Şekil 2'de tipik bir AO kurulumunun şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2. Tipik bir AO sistemi ve yüksek çözünürlüklü kameranın şematik gösterimi [17].

Teleskobun giriş açıklığından gelen sapmaya uğramış bir dalga cephesi DM tarafından yansıtılarak ışın bölücü (beamsplitter) tarafından bölünür ve ışığın bir kısmı WFS'ye gider ve bu da kapalı döngü kontrol sistemi aracılığıyla DM'ye geri iletilerek dalga cephesindeki sapmalarının ölçümü sağlanır. Bu sapma miktarına göre DM kendisini yeniden şekillendirerek ışık üzerindeki atmosferik etki düzeltilmiş olur. Düzeltilen ışık odak düzlemi kamerasına veya alternatif olarak koronagraf gibi aletlere iletilmektedir.

3. Tartışma ve Sonuçlar

Doğrudan Görüntüleme yöntemi her ne kadar yer tabanlı teleskoplarda imkânsız gibi görünse de bu yöntem ile hedef nesnelerin incelenmeleri teknolojinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda ivme kazanmıştır. Bu yöntemin kullanıldığı ötegezegen araştırmalarının büyük bir çoğunluğu 8-10 m arası çaplara sahip yer tabanlı teleskoplar ile yapılmıştır.

Yakın bir zamanda faaliyete geçecek olan Doğu Anadolu Gözlemevi (Erzurum, Türkiye) projesi bünyesindeki 4 m'lik çapa sahip Türkiye'nin en büyük optik/kızılötesi teleskobu ötegezegen çalışmalarının yapılabilmesi için yeni bir zemin hazırlayacaktır. Özellikle DAG'ın odak düzleminde kullanılması hedeflenen uyarlanabilir optik (AO) sistemi ile 10-12 metrelik çapa sahip bir teleskop gibi gözlem yapabilmesi mümkün olacaktır. Bu sistem ile birlikte DAG bünyesine kazandırılacak "Koronagraf Aygıtı" kullanılarak ötegezegen araştırmalarının bir diğer yöntemi olan "Doğrudan Görüntüleme" yöntemi

ülkemizde ötegezegen çalışmalarına yeni bir bakış açısı getirecektir.

Ötegezegen keşiflerinde doğrudan görüntüleme yönteminin zamanla daha da büyük bir önem kazanması beklenmektedir. Bu nedenle, DAG teleskobu, Uyarlanabilir Optik, Koronagraf ve Doğrudan Görüntüleme Tekniğinin de içinde olduğu daha kapsamlı bir çalışma bir yüksek lisans tezi olarak hazırlanmaktadır.

¹The Nobel Prize.

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/press-release/>. (17.03.2021)

²<http://lyot.org/background/coronagraphy.html>. (08.01.2021)

³<https://www.eso.org/public/news/eso1324/> (17.01.2021)

⁴<https://www.universetoday.com/140341/what-is-direct-imaging/> (17.05.2021)

⁵<http://lyot.org/background/coronagraphy.html> (08.01.2021)

⁶<https://www.nasa.gov/missions> (17.05.2021)

Kaynaklar

- [1] Winn Joshua N, Fabrycky Daniel C. ARA&A. 2015; 53:409-447.
- [2] Winn Joshua N. arXiv preprint: 1801.08543, 2018.
- [3] Wolszczan A, Frail D A. Nature. 1992; 355:145-147.
- [4] Mayor M, Queloz D. Nature. 1995; 378 (6555): 355-359.
- [5] Wei J. A. arXiv: 1805.02771, 2018.
- [6] Hellier C. Springer-Praxis, 210s, UK; 2001.
- [7] Horner J, Hinse T. C, Wittenmyer R. A, Marshall J. P, Tinney C. G. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012; 427(4): 2812-2823.
- [8] Mayor M, Frei P.Y. New Worlds in the Cosmos The Discovery of Exoplanets. Cambridge University Press. 248s, UK; 2003.
- [9] Macintosh B, Graham J. R, Ingraham P, Konopacky Q, Marois C, Perrin M, et al. Proc. Natl. Acad. Sci. 2014; 111(35):12661-12666.
- [10] Beuzit J. L, Feldt M, Dohlen K, Mouillet D, Puget P, Wildi F. et al. Proc. SPIE. 2008; 7014(12):701418.
- [11] Dekany R, Roberts J, Burrus R, Bouchez A, Truong T, Baranex C. et al. ApJ. 2013; 776(2):130-143
- [12] Howard S. Article in Journal. Washington Academy of Sciences, Washington, D. C. January 2011, s. 815.
- [13] Zhao J. Robust Parametrisations of Spectral Line Profiles to Probe Planetary Signals in the Presence of Stellar Variability. Sydney: New South Wales Üniversitesi; 2019
- [14] Xin Y. Coronagraphic data post-processing using projections on instrumental modes. (Master Thesis) California: California Institute of Technology, 2018.
- [15] Rimmele T R, Marino J. Living Rev. Sol. Phys. 2011; 8(1):2-92
- [16] Platt B C, Shack R. J. Refract Surg. 2001; 17(5):573-577
- [17] Max C. [İnternet]. Lick Obsevatory; 2021 [18.05.2021'de alıntılanmıştır]. Erişim adresi: http://cfao.ucolick.org/EO/resources/History_AO_Max.pdf