

Ötegezegenler: Geçmiş, Günümüz ve Gelecek

Özet: Ekstra-güneş sistemi gezegenlerinin anlaşılması, son on yıldaki gözlemlerdeki ilerlemelerle büyük ölçüde yönlendirilmiştir. Yüksek hassasiyetli **spektrograf** sayesinde, **radyal** hız yöntemi ile yıldızlara görünmeyen eşlik eden gezegenleri ortaya çıkarabiliyoruz. Özellikle **Kepler misyonu** ile uzaydan yapılan yüksek hassasiyetli fotometri, gezegenlerin yıldızlarının önünden geçerken yıldız ışığını yüzde bir veya daha az bir oranda kararttığını tespit etmemizi sağlıyor. Güney yarımküredeki farklı yerlerden Galaktik merkezin ultra geniş alanlı, yüksek **kadanslı** ve sürekli izlenmesi, güneş komşuluğundan Samanyolu'nun merkezine kadar uzanan gezegen sistemleri tarafından meydana getirilen **mikrolensleme** etkilerini gözlemlenebilir fırsatı veriyor. Yerden büyük teleskoplarla yapılan yüksek çözünürlüklü **AO** görüntüleme, yüksek kontrastlı koronagraf ile birleştiğinde, diğer yıldızların etrafındaki gezegenler tarafından doğrudan yayılan fotonları yakaladı. Bu makalede, ekstra-güneş gezegen keşiflerine dair kısa bir inceleme sunuyorum, büyük gezegen tespit yöntemlerinin güçlü ve zayıf yönlerini tartışarak, çeşitli yöntemlerle elde edilen muazzam gözlemler göz önüne alındığında gezegen oluşumu ve evrimine dair mevcut anlayışımızın genel bir özeti sunuyorum, ayrıca devam eden ve planlanan gözlem çabalarını ekstra-güneş gezegen sistemlerinin net bir resmini sağlamak amacıyla ele alıyorum.

Anahtar Kelimeler: Gezegen sistemleri; gezegenler ve uydular: atmosfer; **protoplanet** diskleri; teknikler: radyal hızlar; teknikler: yüksek açısal çözünürlük; kütleçekimsel mercekleme: mikro

Kısa Tarihçe

Güneş Sistemi dışındaki gezegenleri arama ve karakterize etme, gözlemsel astronominin uzun süredir devam eden bir arayışıdır. İlginç bir şekilde, ilk ekstra-güneş gezegenleri (bundan sonra ötegezegenler olarak anılacaktır) ana dizideki bir yıldızın etrafında değil, bir nötron yıldızının etrafında, pulsar zamanlamasındaki değişim kullanılarak bulunmuştur [1]. Güneş benzeri yıldızların etrafındaki ilk ötegezegen olan **51 Pegasi b**, 1995 yılında Mayor ve Queloz tarafından **radyal hız** yöntemiyle bulunmuştur [2]. Fikir şudur ki, eğer yıldızın görünmeyen bir gezegen kütlesi eşlik edeni varsa, her ikisi de ortak kütle merkezi etrafında yörüngesel hareket sergileyecek ve Doppler etkisi nedeniyle yıldızın spektrumundaki **emiyon** ve/veya **absorpsiyon** çizgilerinde periyodik mavi ve kırmızıya kayma gözlenecektir. Sonuç geniş çapta eleştirilere maruz kalsa da, özellikle bu tür bir radyal hız sinyalinin yıldız lekeleri tarafından taklit edilebileceği spekülasyonları ile, radyal hız sinyalinin gerçekten bir gezegen kütlesi eşlik edeninden geldiği ortaya çıkmıştır. **Radyal hız yönteminin dezavantajı, gezegenin yörünge eğimini bilmediğimiz için, yorumlanan gezegen kütlesinin her zaman mümkün olan en düşük değer olduğu ve eğer gezegen sistemini neredeyse yüz yüze izliyorsak gerçek kütlenin çok daha ağır olabileceğidir.** Tahmin edilebileceği gibi, yıldızın radyal hızında gezegen eşlik edenin neden olduğu küçük **perturbasyonu** ortaya çıkarmak, ancak çok yüksek çözünürlüklü **spektrograf** ile mümkün olan çok hassas **radyal hız** ölçümlerini gerektirir. Gerçekten de, radyal hız yöntemiyle bulunan ötegezegenlerin büyük çoğunluğu, Mayor ve arkadaşları tarafından inşa edilen ve Şili'deki La Silla'da ESO 3.6m teleskopuna monte edilen Yüksek Hassasiyetli Radyal Hız Gezegen Arayıcısı (HARPS) adlı yüksek hassasiyetli echelle spektrografı ile mümkündür [3]. Benzer bir enstrüman olan HARPS-N, 2012 yılında İspanya'nın Kanarya Adaları'ndaki La Palma'daki 3.6m İtalyan Telescopio Nazionale Galileo'ya uygulanmış ve kurulmuştur [4], bu da astronomların her iki yarımküreden radyal hız yöntemiyle ötegezegenleri aramalarını sağlamıştır.

Ötegezegen gözlemlerindeki bir sonraki büyük adım 1999 yılında Charbonneau ve arkadaşlarının [5] HD 209458 gezegen sisteminde ilk transit sinyali - bir ötegezegenin ev sahibi yıldızının önünden geçişini - tespit etmesiyle geldi. **Transit yöntemi**, ötegezegen atmosferinin incelenmesinde büyük avantaj sağlar. Bu, transit sırasında, ev sahibi yıldızdan gelen ışığın ötegezegenin atmosferinden geçmesi ve bu sayede dış atmosferdeki moleküler absorpsiyon özelliklerini ortaya çıkarması nedeniyle olur. Ev sahibi yıldızın spektrumunu transit sırasında ve dışında karşılaştırarak, dış atmosferi yüksek sinyal/gürültü oranıyla inceleyebiliriz. Ayrıca, farklı transit döngüleri arasında dış atmosferik absorpsiyon özelliklerindeki değişiklikler, ötegezegenlerin hava durumu hakkında bilgi verebilir. İlk ötegezegen geçiş spektroskopisi, 2002 yılında Charbonneau ve arkadaşları tarafından [6] gerçekleştirilmiş ve sıcak Jüpiter HD 209458b'nin atmosferinde sodyum absorpsiyon özellikleri tespit edilmiştir. Sonraki çalışmalar, HD 209458b'de oksijen ve karbon molekülleri, örneğin 2004 yılında Vidal-Madjar ve arkadaşları [7], ve diğer transit ötegezegenlerde, örneğin 2008 yılında Swain ve arkadaşları tarafından HD 189733b'de [8] ve 2010 yılında Tinetti ve arkadaşları tarafından XO-1b'de [9], moleküller keşfetmiştir. Transit yönteminin tek dezavantajı, ötegezegenin ev sahibi yıldızla göre nispeten küçük olması nedeniyle, yıldızın kararmasının çok küçük olması ve bu yöntemi kullanarak ötegezegen tespit etmek için en az **%1 seviyesinde çok yüksek fotometrik doğruluk gerektirmesidir**. Bu tür bir fotometrik doğruluk, atmosferik türbülansın endişe kaynağı olduğu ve soluk yıldızlar için yüksek doğrulukta fotometriye ulaşmayı veya daha küçük ötegezegenleri aramayı engellediği yerden elde edilmesi zordur. **Bu nedenle, yer tabanlı teleskoplardan yapılan transit aramaları parlak yıldızlarla sınırlı kalmıştır**. Ancak, bu sınırlama, uzay tabanlı misyonlarda bir sorun teşkil etmez. Örneğin, Kepler uzay aracı, uzaydan yıldızların yüksek hassasiyetli, sürekli izlenmesini sağlamış ve transit yöntemiyle 2.000'den fazla ötegezegen tespit etmiştir. Kepler uzay aracı, 2013 yılının ortasında dört **jiroskoptan** ikisi hizmet dışı kaldığında bazı teknik sorunlarla karşılaşsa da, bilim insanları güneş basıncını ek "üçüncü" jiroskop olarak kullanma planını geliştirerek hala çalışan iki jiroskopta birlikte Kepler ikinci ışık gözlemlerine (K2 olarak adlandırılan) 2013 sonlarından itibaren başladılar ve şimdiye kadar yüksek kaliteli bilimsel veriler sunmaya devam ettiler. HD 209458b transit yöntemiyle gözlemlendiği sırada, ilk ötegezegen mikrolensleme olayı da gözlemlenmiştir [10]. Einstein'ın **genel görelilik teorisine** göre, ön plandaki büyük kütleli nesneler, arka plandaki kaynaklardan gelen ışığı bükerek ve yerçekimi ile odaklayarak güçlü bir uzay-zaman eğriliği oluşturur. Eğer ön plandaki nesneler galaksiler veya galaksi kümeleri kadar büyük kütleli ise, arka plan kaynakları birden çok görüntüye ayrılır ve bu, genellikle güçlü **lens**leme olarak adlandırılır. Eğer ön plandaki nesneler daha küçük kütlelere sahipse, örneğin yıldızlar veya gezegenler, bu durumda çoklu görüntüler yalnızca birkaç **mikro yay saniyesi** kadar ayrılır ve bu nedenle mikrolensleme adı verilir. Mikrolensleme rejiminde çoğaltılmış görüntüleri çözemezken, arka plan kaynaklarının parlaklık değişimini görebiliriz. Bohdan Paczynski, mikrolenslemeyi kullanarak görünmeyen, kompakt yıldız nesnelerini arama fikrini ilk kez ortaya atan kişidir [11]. Paczynski'nin orijinal önerisi MACHO'ları aramak olsa da, kendisi ve (o zamanki) doktora sonrası araştırmacısı Shude Mao, fikri genişletmiş ve mikrolenslemenin ikili yıldızları ve yıldızlara bağlı ötegezegenleri tespit edebileceğini göstermiştir [12]. Einstein, 1936 yılında yayımlanan Science makalesinde yıldızlardan mikrolensleme etkilerini gözlemlenmenin olası olmadığını öne sürmüştü olsa da [13], Paczynski yıldızlar tarafından mikrolenslemenin olasılığını hesaplamış ve bunun şansının (veya optik derinliğinin) milyonda bir olduğunu ortaya koymuştur. Bu, eğer bir milyon veya daha fazla yıldızın arka plan kaynakları olarak hizmet edeceği yoğun bir yıldız alanı bulabilirsek, mikrolensleme etkilerini gözlemleyebileceğimizi gösterir. Paczynski'nin seminer makalesinden ve **CCD**'lere dayalı modern kameraların gelişmesinden ilham alan birçok gözlem kampanyası, örneğin MACHO, EROS, OGLE, MOA gibi, **Galaktik çıkıntı** ve **Macellan Bulutları** gibi yoğun yıldız alanlarının

sürekli izlenmesine başlamıştır. MACHO'lar (veya yıldızlar) tarafından ilk mikrolensleme olayları, 1993 yılında MACHO [14], EROS [15] ve OGLE [16] işbirliği tarafından rapor edilmiş olsa da, ötegezegen mikrolensleme olayları Bond ve arkadaşları tarafından 2003 yılına kadar tespit edilmemiştir [10]. Bunun nedeni, yıldız nesneleri tarafından oluşturulan mikrolensleme sinyallerinin genellikle aylarca sürmesi, ötegezegenlerin mikrolensleme imzasının ise sadece birkaç gün sürmesi ve gerçekten diğer etkilerden, örneğin ikili yıldızlardan, paralakstan vb. ayırt edilip belirlenmesi için özel, çok yüksek kadanslı, çok konumlu takip gerektirmesidir.

Mikrolenslemenin tek dezavantajı, diğer yöntemlerin aksine ötegezegen sinyalinin tekrarlanmaması ve gezegenin doğasını mikrolensleme ışık eğrilerinden çıkarmak için yalnızca bir şansımızın olmasıdır. Buna rağmen, iyi örneklenmiş ışık eğrileri verildiğinde, temel gezegen parametrelerinin çoğunu, kütle ve yörünge mesafesi gibi, belirsizliğe yer bırakmadan çıkarabileceğimiz gösterilmiştir. Bu özellikle, yerden ve uzaydan (örneğin Spitzer) eşzamanlı gözlemlerimiz varsa, lensin paralaksını sağlayacak ve lens parametresini daha da kısıtlayacak gözlemler için geçerlidir [17]. Ayrıca, mikrolenslemenin faydası, sadece gezegenin kütleçekim sinyaline dayanması ve ev sahibi yıldızdan veya ötegezegenden gelen ışığı kullanmaması nedeniyle, çok düşük kütleli (örneğin Dünya benzeri) ötegezegenleri çok geniş yörüngelerde (kar çizgisinin ötesinde) tespit edebilmemizdir. Bu, radyal hız, transit veya doğrudan görüntüleme yöntemleriyle mümkün değildir. Dahası, ötegezegenler, diğer galaksilerde de mikrolensleme ve/veya piksel lensleme ile bulunabilir, örneğin Ingrosso ve arkadaşları tarafından M31'de [18] veya kuasar ışık eğrisini gezegen benzeri nesnelerin müdahalesi olarak açıklamaya yönelik yeni girişimler [19].

2008 yılında, astronomlar ilk kez ötegezegenlerden doğrudan yayılan fotonları tespit etmeyi başardılar. Bu, yalnızca o dönemde Keck ve Gemini teleskopları tarafından sağlanan yüksek kontrastlı görüntüleme yeteneği ile birleştirilen yer tabanlı adaptif optik (AO) enstrümanlarının olağanüstü mekansal çözünürlüğü sayesinde mümkün olmuştur. Bu son teknolojiyle, Marois ve arkadaşları [20], HR 8799 ile ilişkili 3 ötegezegeni görüntülemenin yanı sıra, yüksek mekansal çözünürlüklü görüntüleme ile 4 yıl boyunca yörüngesel hareketlerini de tespit edebilmişlerdir. Ötegezegenlerin doğrudan görüntülenmesinin güzelliği, AO tarafından sağlanan yüksek mekansal çözünürlükle, ötegezegenin fotonlarını ev sahibi yıldızdan yayılanlardan ayırabilir ve ötegezegenin ışığını spektrografta besleyerek ötegezegen atmosferlerini doğrudan inceleyebiliriz. Ancak, doğrudan görüntülemenin birkaç dezavantajı vardır. İlk olarak, ötegezegenleri yıldızlardan ayırmak için AO'ya ihtiyaç duyduğumuz için, AO'nun atmosferik türbülansları telafi etmek için düzgün çalışabileceği parlak (veya yakın) yıldızlarla sınırlıyız. Doğrudan görüntülemenin diğer bir dezavantajı, yıldızın ışığını engellemek ve yüksek kontrastlı görüntüleme elde etmek için koronağraf kullanılsak bile, ev sahibi yıldızın ışık katkısını düzgün bir şekilde kaldırayabileceğimiz daha büyük yörünge mesafelerindeki ötegezegenleri yalnızca inceleyebilmemizdir. Gerçekten de, doğrudan görüntüleme yöntemiyle keşfedilen ötegezegenlerin çoğu ev sahibi yıldızlarından çok uzaktadır (onlarca ila yüzlerce AU), bu da çekirdek birikimi veya disk kararsızlığı yoluyla in situ gezegen oluşum senaryolarına zorluklar getirmektedir. Şu anda bu kadar geniş ayrılmış ötegezegenler için iki önerilen oluşum mekanizması vardır. Birincisi, geniş ayrılmış gezegenler ve ev sahibi yıldızların, doğdukları ortamda bulut parçalanması yoluyla ikili veya çoklu yıldız sistemi gibi oluşmalarıdır [21]. Diğer bir olasılık ise, bu geniş ayrılmış ötegezegenlerin gezegen-gezegen saçılması ile oluşmalarıdır [22]; burada doğrudan gezegen oluşum diskinin içinde çekirdek birikimi yoluyla iki ötegezegen oluşmuş olabilir. Ancak, bu iki ötegezegenin yörüngeleri kararlı değildir ve dinamik etkileşimler yoluyla, bir ötegezegen çok uzak bir mesafeye saçılmışken, diğeri içeriye göç ederek çok yakın bir yörünge

oluşturmuştur. Ne yazık ki, geniş ayrılmış ötegezegenlerin gerçek oluşum mekanizması hala tartışılmaktadır. Çok yakın bir ötegezegen ve aynı ev sahibi yıldızın etrafında geniş ayrılmış bir ötegezegen içeren çoklu ötegezegen sistemlerinin tespiti, bu senaryoyu desteklemek için kesin bir kanıt sağlayacaktır.

Mevcut Durum

Çeşitli ötegezegen tespit yöntemlerinin başarılı ilerlemeleriyle, özellikle 3.000'den fazla ötegezegenin keşfiyle birlikte, gezegen oluşumu ve evrimi hakkında temel soruları yanıtlayabilmemizi sağlayacak büyük bir ötegezegen örneklemini topluyoruz. Bu soruları ele alabilmek için öncelikle ötegezegen parametrelerinin, özellikle kütleleri ve yarıçaplarının, kesin ve doğru ölçümlerine sahip olmamız gerekmektedir. Bunun için hem transit hem de radyal hız yöntemlerinin güçlerini birleştirmemiz gerekiyor. İlki, ev sahibi yıldızın yarıçapını bildiğimizi varsayarak, ötegezegenlerin yarıçapının iyi bir tahminini sağlar. Bu, transit ışık eğrisinden, transitin derinliği yoluyla ötegezegen ile ev sahibi yıldız arasındaki yarıçap oranını çıkarabileceğimiz için böyledir. Daha da önemlisi, transit ışık eğrilerinden, ötegezegen yörüngesinin eğimini belirleyebilir ve dolayısıyla radyal hız yönteminde mevcut olan bilinmeyen eğim açısı sorununu çözebiliriz. Kepler tarafından keşfedilen büyük transit ötegezegen örneğiyle, şimdi binlerce ötegezegen için yarıçap tahminine sahibiz. Ancak, gezegen oluşumu ve evrimi sorularını gerçekten ele almak için, yarıçap tahminlerindeki hataları iyi bir şekilde kontrol etmemiz gerekmektedir; bu hatalar genellikle ev sahibi yıldızın özelliklerindeki belirsizliklerden kaynaklanır. Bu bağlamda, Kaliforniya Kepler Araştırması, Keck teleskobuna monte edilmiş Yüksek Çözünürlüklü Echelle Spektrometresi (HIRES) aleti kullanılarak Kepler gezegen ev sahibi yıldızlarının özel yüksek spektral çözünürlüklü takipleri ile yaklaşık 1.000 Kepler ötegezegen ev sahibi yıldızının yüksek hassasiyetli tahminlerini sağlıyor [23] ve dolayısıyla yaklaşık 2.000 ötegezegenin yarıçapını kesin ve doğru bir şekilde tahmin ediyor [24]. Ötegezegen özelliklerinin yüksek hassasiyetle belirlendiği bu benzersiz örnekleme, Fulton ve arkadaşları [25] ötegezegenlerin yarıçap dağılımını detaylı bir şekilde inceleyebildiler ve 1.3 REarth'de zirve yapan süper Dünya'lar ve 2.4 REarth'de zirve yapan alt-Neptünler olmak üzere iki farklı ötegezegen popülasyonu olduğunu buldular. Ayrıca, 1.8 MEarth yarıçapına sahip ötegezegenlerin eksikliği, bu yarıçapta bir buharlaşma vadisine işaret ediyor.

Yüksek hassasiyetli radyal hız ile, ötegezegenlerin kütesini de belirleyebiliriz. Bu bağlamda, yüzlerce kesin ve doğru kütle tahmini vardır [26]. Kesin kütle tahminleri, yarıçap tahminleriyle birlikte, ötegezegenlerin kütle-yarıçap ilişkisine dair içgörüler sağlar. Chen & Kipping [26], bir grup ötegezegen ile kütle-yarıçap ilişkilerini detaylı bir şekilde incelediler ve karasal, Neptün ve Jüpiter kütleleri boyunca parça parça kütle-yarıçap ilişkilerinin olasılık tahminlerini ortaya koydular; burada yaklaşık 2 MEarth'de karasal kayaç gezegenleri Neptün ötegezegenlerinden, ve yaklaşık 0.41 MJüpiter'de Neptün ötegezegenlerini Jüpiter ötegezegenlerinden ayıran bir geçiş bulunur. Kütle-yarıçap ilişkisi bize ötegezegenlerin ortalama yoğunluğunu söyleyebilirken, ötegezegenin bileşiminde hala bir belirsizlik vardır, yani bu, küçük kayaç çekirdekli ve büyük su zengini bir zarfa sahip bir ötegezegen mi yoksa nispeten büyük kayaç çekirdekli ve daha ince bir Hidrojen/Helium zarfına sahip bir ötegezegen mi olduğu konusundaki belirsizliktir. Bu konuda, ötegezegenlerin atmosferik bileşimini doğrudan incelememiz gerekecek. Ötegezegenlerin yaydığı ışık çok zayıf olmasına rağmen, transit spektroskopisi ile atmosferlerini incelemek hala mümkündür. Transit sırasında, ötegezegenin atmosferi ev sahibi yıldız tarafından arka ışıklandırıldığında, ev sahibi yıldız spektrumunu transit sırasında ve dışında karşılaştırarak ötegezegenin atmosferik özelliklerini inceleyebiliriz. Ancak, transit spektroskopisi ile bile, ötegezegenin imzası çok

zayıftır, bu nedenle çoğu çalışma Jüpiter benzeri ötegezegenlerle yapılmaktadır. Ayrıca, transit spektroskopisi, yerden yapılırsa görüş değişikliklerine ve yarık kaybına çok duyarlı olabilir. Bu bağlamda, çoğu transit spektroskopisi ya Hubble Uzay Teleskobu veya Spitzer kullanılarak uzaydan ya da yerdeki teleskoplardan benzer spektral türe sahip karşılaştırma yıldızlarını kullanarak yapılır. Gerçekten de, Sing ve arkadaşları [27], Hubble Uzay Teleskobu ve Spitzer kullanarak, 0.3 ila 5 μm dalga boyunu kapsayan 10 sıcak Jüpiterin geçiş spektrumlarını elde etmişlerdir. Sonuçları, sıcak Jüpiterlerin bile atmosferlerinin farklı lezzetlerde olabileceğini, berraktan bulutlu/sisliye kadar değişebileceğini göstermektedir.

Ötegezegenlerin bir başka temel parametresi yörünge mesafeleridir. İlk keşfedilen birkaç ötegezegenin, kullanılan tekniklerin sınırlamaları nedeniyle ev sahibi yıldızlarına çok yakın olduğu (sözde sıcak Jüpiterler) doğrudur. Ancak, enstrümanlar daha yüksek hassasiyetle yükseltildikçe, giderek daha fazla ötegezegen daha büyük mesafelerde, sıvı su ve yaşanabilirlik için uygun sıcaklıklarda bulunmaya başladı [28,29]. Örneğin, Kepler yaşanabilir bölgede yaklaşık 30 ötegezegen bulmuştur. Ek olarak, yörünge mesafesi ve kütle dağılımından, onların oluşum süreçlerine dair bir fikir edinebiliriz. Protoplanetary disklerde oluşan gezegenler için iki önerilen in situ senaryo vardır. İlk olarak, küçük parçacıkları çarpıştırarak ve birikerek gezegen embriyolarına dönüşüp daha sonra çevrelerinden gaz toplayarak Jüpiter benzeri gezegenler oluşturdukları **çekirdek birikimi** [30]. Ancak, çekirdek birikimi yoluyla oluşan bu kadar geniş yörüngelerdeki bazı büyük ötegezegenler çekirdek birikimiyle açıklanamaz, çünkü birikim bu tür gezegenlerin oluşumu için yeterince verimli değildir. Bu bağlamda, ikinci gezegen oluşum mekanizması disk kararsızlığıdır [31], burada protoplanetary diskler soğudukça bazı bölgelerde yüksek yoğunluk oluşturan türbülanslar meydana gelir ve kendi kendine çekim yapan gaz yığınları oluşur. Bu yığınlar çevrelerinden hızla gaz toplayarak gaz gezegenleri oluşturur. Yukarıdaki gezegen oluşum senaryolarını test etmek için bir gözlemsel kanıt metalikliktir (bir yıldızın kütle oranının H veya He olmayan kısmı). Bunun nedeni, çekirdek birikiminin metal açısından zengin ortamda daha verimli olması, disk kararsızlığının ise metalikliğe bağımlı olmamasıdır. Bu bağlamda, ötegezegen ev sahibi yıldızların metaliklikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, Fisher & Valenti [32], gaz gezegenlerinin metal açısından zengin yıldızlar etrafında daha yaygın olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Thorngren ve arkadaşları [33], gaz devi ötegezegenlerin önemli miktarda ağır element içeren H/He zarflarına sahip olduğunu göstermiştir. Bu kanıtlar, ötegezegenlerin çoğunun çekirdek birikimi yoluyla oluştuğunu desteklemektedir.

Ötegezegenleri incelerken, ötegezegenlerin göç ettiklerini ve şu anki konumlarında oluşmamış olabileceklerini de unutmamalıyız. Bu, güneş sistemimizdeki gezegenlerin incelenmesinden de görülebilir [34,35]. Ayrıca, dolaylı kanıtlar ötegezegenlerden de gelmektedir; örneğin, doğrudan görüntüleme yöntemi, ev sahibi yıldızlarından onlarca ila yüzlerce **AU** uzaklıkta olan düzinelerce ötegezegen keşfetmiştir [36]. Bu geniş ayrılmış ötegezegenler, yukarıda belirtilen in situ oluşum süreçleriyle açıklanması zordur. Bir olasılık, gezegen saçılması yoluyla oluştuklarıdır [22]; burada **protoplanetary** disk içinde en az iki ötegezegen oluşur, ancak yörüngeleri kararlı değildir ve birbirini keser. Bu dinamik etkileşim nedeniyle, bir ötegezegen çok geniş bir yörüngeye fırlatılırken, diğeri çok yakın bir ötegezegene göç eder. Bir diğer alternatif teori, geniş ayrılmış ötegezegenin aslında ev sahibi yıldızı yörüngede değil, ikili/multipel yıldız oluşum sürecine benzer şekilde aynı moleküler bulutta oluşan düşük kütleli bir yoldaş olmasıdır; bu genellikle bulut parçalanma senaryosu olarak adlandırılır [21]. Gezegen saçılma ve bulut parçalanma senaryolarını ayırt etmenin birkaç yolu vardır [36]. Örneğin, gezegen-gezegen saçılma senaryosu, yüksek eksantrikliğe sahip ötegezegenler üretirken, bulut parçalanması yoluyla oluşan ötegezegenler, ikili yıldızlara benzer eksantriklik dağılımına sahip olacaktır. Bir sistemde birden fazla ötegezegen

varsa, bu ötegezegen sisteminin mimarisi de onların oluşum sürecine ışık tutabilir. Örneğin, gezegen-gezegen saçılma ile oluşan geniş ayrılmış ötegezegenler, protoplanetary/debris disk ile birlikte yörüngede olacaklardır. Bulut parçalanması ile oluşan geniş ayrılmış ötegezegenler ise protoplanetary/debris disk ile veya yıldızın dönme eksenini ile örtüşmeyecek şekilde yörüngede olacaklardır. Oluşum süreci için bir gösterge olarak oluşum zamanı (veya gezegen sisteminin yaşı) da kullanılabilir. Genel olarak, bulut parçalanması bir milyon yıl içinde gezegen kütleli nesneler üretecektir; gezegen-gezegen saçılma mekanizması ise bir ila on milyon yıl arasında gaz dev gezegenler oluşturacaktır. Bu yönlerde gelecekteki gözlemler, geniş ayrılmış ötegezegenlerin oluşum mekanizmasına dair içgörüler sağlayacaktır.

Geniş aralıklı ötegezegenlerin ötesinde, astronomlar serbest yüzen (veya bağlı olmayan) ötegezegenlerle de ilgilenmektedir. Bu, özellikle onların oluşum süreçlerini anlamak (örneğin, ötegezegenler kahverengi cüceler gibi izole bir şekilde oluşabilir mi?) ve çok düşük kütlelerdeki kütle fonksiyonunu karakterize etmek açısından önemlidir. Ancak, bu serbest yüzen ötegezegenleri yakalamak zordur, özellikle de en gelişmiş büyük yer teleskoplarıyla bile tespit edilemeyecek kadar soluk oldukları için. Bu bağlamda, mikromerceklemeye, bu ötegezegenleri tespit etmek için en iyi yolu sunar, çünkü mikromerceklemeye sadece gezegenlerin oluşturduğu kütle çekim alanına dayanır ve onların elektromanyetik yayılımlarına neredeyse hiç bağlı değildir. Mikromerceklemeye için tek engel, olay zaman ölçeğinin alttaki merceğin kütlesi ile orantılı olmasıdır ve mercek kütlesi Jüpiter benzeri gezegenler kadar hafif olduğunda, zaman ölçeği yalnızca 1 gün (veya daha az) mertebesinde ve gece boyunca kesintisiz izlemeyi gerektirir. Bu engeli aşmak için, MOA ekibi çok yüksek kadanslı (her 10 ila 50 dakikada bir) bir araştırma yürütmüş ve bir düzine serbest yüzen ötegezegen adayı keşfetmiştir [37]. Sonuçları ayrıca, ana dizi yıldızlarının iki katı kadar çok sayıda Jüpiter kütleli nesnenin Samanyolu'nda bulunduğunu öne sürmektedir. Bu, kahverengi cüce kütlelerinin altında kütle fonksiyonunda ani bir değişikliğe neden olur ve serbest yüzen ötegezegenlerin farklı bir şekilde oluştuğunu, yani öncelikle protoplanetary disklerde oluşup daha sonra bağlı olmayan veya çok uzak bir yörüngeye fırlatılmış olabileceğini düşündürür. Ancak, bu kadar çok sayıda Jüpiter kütleli nesnenin varlığı, fırlatma mekanizmasıyla açıklanması zordur [38]. Bu bağlamda, OGLE ekibi OGLE-IV'ten çok daha büyük bir örnek kullanarak aynı araştırmaları tekrarlamış ve bu kadar fazla sayıda Jüpiter kütleli nesne bulamamıştır [39]. Ancak, ultra-kısa süreli olay adayları (<0.5 gün) bulmuşlar, bu da serbest yüzen karasal veya süper Dünya kütleli ötegezegenlerin varlığını gösterir ve çekirdek birikimi ve gezegen-gezegen saçılma mekanizmalarından yapılan tahminlerle uyumludur.



Ötegezegenleri anlamamızın bir başka önemli yönü, ötegezegenlerin nasıl oluştuğu ve zamanla nasıl evrildiğidir. Bu bağlamda, doğrudan görüntüleme yöntemi, ötegezegenlerin protoplanetary disklerde doğuşundan, disk tamamen dağılıp sadece enkaz diski kalana kadar, en kapsamlı resmi sağlayabilir. Bu, sadece büyük optik teleskoplarda yakın kızılötesi koronagrafin AO ile birleştirilmesiyle elde edilen doğrudan görüntüleme gücü ve milimetre dizilerinin mükemmel uzaysal çözünürlüğünün birleştirilmesiyle mümkündür. Örneğin, HL Tau'nun, yaklaşık 1 milyon yıl yaşındaki bir T Tauri yıldızının ALMA gözlemleri, ötegezegenlerin doğmak üzere olduğu bir aşamada protoplanetary diskin ayrıntılı bir görünümünü sağlar [40]. Öte yandan, VLT/NACO gözlemi β Pic – yaklaşık 10 milyon yıl yaşındaki bir güneş kütleli yıldız – hem ötegezegenlerin hem de çevreleyen disklerin ilk görünümünü sunar [41]. Gelecekteki doğrudan görüntüleme gözlemleri, sadece ötegezegenlerin oluşumu ve evrimi hakkında değil, aynı zamanda protoplanetary disklerle birlikte evrimi hakkında da bize içgörüler sağlayacaktır.


Yeni Sınırlar

Ötegezegen çalışmalarındaki ilerlemeler, yeni enstrümanlar ve araştırmalarla el ele gider. Bu, özellikle radyal hız yöntemi için geçerlidir. Örneğin, Dünya, yalnızca yaklaşık 9 cm/s'lik bir radyal hız sinyali oluşturacaktır. Bu, en gelişmiş yüksek çözünürlüklü spektrografların (örneğin, HARPS) erişim alanının ötesindedir. Bu hedefe ulaşmak için, hem VLT'de hem de gelecek olan E-ELT'de yeni nesil enstrümanların yapımı sürmektedir. Örneğin, VLT'de yakın zamanda devreye alınan ESPRESSO [42], yaklaşık 10 cm/s hassasiyete ulaşabilecektir. E-ELT için planlanan CODEX enstrümanı ise yaklaşık 2 cm/s hassasiyeti hedeflemektedir [43]. Ancak, hassas radyal hız ölçümlerinin ana engeli enstrümantasyon değil, aslında yıldız varyasyonlarıdır (örneğin, yıldız lekeleri, manyetik aktiviteler), bu varyasyonlar birkaç m/s kadar radyal hız sinyalleri üretebilir ve ötegezegenlerden (özellikle karasal olanlardan) gelen radyal hız değişikliklerini gölgede bırakabilir. Bir örnek, HD 154345'tir; bu yıldız radyal hız değişiklikleri göstermiş ve ilk başta bir ötegezegen tarafından kaynaklandığı düşünülmüştür [44], ancak daha sonra bunun yerine yıldız aktivitesinden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır [45]. Bu bağlamda, yıldızları hem fotometrik hem de spektroskopik olarak izlememiz gerekmektedir, fotometrik gözlemler radyal hız ölçümlerindeki yıldız varyasyonlarının etkisini ayırt etmemize yardımcı olabilir [46].

Sürekli izleme ve Kepler uzay teleskobunun sağladığı yüksek hassasiyetli fotometri sayesinde transit ötegezegenlerin sayısında büyük bir artış olmuştur. Kepler, iki jiroskopun arızası nedeniyle başlangıçta planlanan alanı artık gözlemlemiyor olsa da, şimdi K2 misyonuna dönmüş ve seçilen alanlar dışında bile birçok yeni transit ötegezegen sunmaya devam etmektedir. Yakın gelecekte Transit Ötegezegen Araştırma Uydusu (TESS) misyonu ve uzun vadede de Gezegen Transiti ve Yıldız Salınımları (PLATO) misyonu planlanmaktadır; her ikisi de parlak yıldızları uzaydan izleyerek çok küçük transit sinyaller bulma umuduyla gözlem yapacaktır. Transit yönteminin güzelliği, yıldızların arka aydınlatmasıyla ötegezegen atmosferlerini araştırabilmesidir. Bu bağlamda, ESA yakın zamanda ARIEL misyonunu, yani Atmosferik Uzaktan Algılama Kızılötesi Ötegezegen Büyük Araştırma misyonunu 2028'de başlatılacak bir orta sınıf misyon olarak seçtiğini duyurdu. Transit aramalar, tercihen büyük bir görüş alanı sağlayarak tüm gökyüzünü hızlı bir şekilde taramak için daha küçük açıklıklarla yeryüzünden de gerçekleştirilebilir. Örneğin, Yeni Nesil Transit Araştırma (NGTS) [47], Kilodegree Extreme Little Telescope (KELT) araştırması [48], Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) araştırması [49], Transittteki Ötegezegenler ve Atmosferleri (ExTrA) araştırması [50] gibi projeler, tüm gökyüzünü taramakta veya dünyanın her yerinden inşa edilmektedir. Mevcut transit araştırmalarının bir sakıncası, büyük bir görüş alanı elde etmek için uzaysal çözünürlüğü feda etmeleridir; bu, karışma etkisini ayırt etmemiz gerektiği anlamına gelir. Bu, özellikle önemli çünkü eğer alakasız bir arka plan yıldızı (veya galaksi) CCD'nin aynı pikseline katkıda bulunursa, fotonların yalnızca tek bir (ev sahibi) yıldızdan geldiğini varsayarsak ötegezegenin boyutunu yanlış yorumlamamıza neden olabilir. Örneğin, karışık bir durumda ötegezeni karasal boyutta varsayabiliriz, ancak karışma çözüldüğünde aslında Jüpiter boyutunda olacaktır [51]. Bu bağlamda, karışma etkisini ev sahibi yıldızlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için yüksek uzaysal çözünürlüklü görüntülemeye sahip olmak önemlidir. Geleneksel AO gözlemi için zor ve verimsiz olabilse de, AO optimizasyonu birçok ek zaman alırken, Robo-AO ekibi, otomatik bir AO sistemiyle karışma sorununu çözmenin mümkün olduğunu ve birkaç yıl içinde binlerce ev sahibi yıldız örneği sunmanın mümkün olduğunu göstermiştir [52].



Transit yöntemine benzer şekilde, mikromercekleme yöntemi de gelecekteki uzay doğumlu misyon – WFIRST ile tespit edilen olayların sayısında bir patlama yaşayacaktır. WFIRST'in uzaydan Galaktik merkezi sürekli izlenmesi, özellikle geniş görüş alanı ve mükemmel uzaysal çözünürlüğü ile yüksek kadanslı, yüksek kaliteli ışık eğrileri sağlayarak binlerce ötegezegen keşfi yapması beklenmektedir ve hatta Jüpiter uyduları kadar düşük kütleli ötegezegenleri tespit etmemizi mümkün kılacaktır. Ayrıca, uzaydan ve yerden yapılan eşzamanlı gözlemler, mikromercekleme belirsizliğini kırmamıza ve lens sisteminin toplam kütlelerini (yani ev sahibi yıldız ve ötegezegenin kombinasyonu) belirlememize yardımcı olabilecek paralaks bilgilerini sağlayacaktır. Mikromercekleme ışık eğrisinden yalnızca ev sahibi yıldız ve ötegezegen arasındaki kütle oranını elde edebileceğimizi ve ev sahibi yıldızın kütlelerini sınırlamak için daha fazla bilgiye ihtiyacımız olduğunu unutmamalıyız. Bu bağlamda, mükemmel uzaysal çözünürlük, mikromercekleme olayının zirvesinden birkaç yıl sonra lens ışığını kaynaktan ayırmamıza da yardımcı olabilir; lensin fotometrisi, ev sahibi yıldızın ve ötegezegenin kütlelerini belirlemek için kullanılabilir [53]. Daha önce belirtildiği gibi, mikromerceklemeye belirsizliği kırmak için uzaydan ve yerden eşzamanlı gözlemler yapmak önemlidir. Bu bağlamda, OGLE6, MOA7, KMTNet8 gibi Galaktik merkezi çok yüksek kadanslı ve geniş görüş alanı ile izleyen özel araştırmalar zaten bulunmaktadır. Gelecekte, 1.8m teleskopta (SAAO) birinci odak noktasını kullanarak geniş görüş alanı sağlayacak ve özel bir kızılötesi kamera (FOV~1.56 deg², dünyanın en büyüğü) kullanarak PRime-focus Infrared Microlensing Experiment (PRIME) araştırması da yapılacaktır. Kızılötesine geçmenin faydası, özellikle Galaktik merkeze doğru şiddetli olan sönüm etkisine daha az duyarlı olmamızdır ve mikromercekleme olayları için Galaktik merkezi daha iyi geçebiliriz. Ayrıca, Büyük Sinoptik Araştırma Teleskobu (LSST9), optikte beş farklı filtreyle mükemmel ışık eğrileri sunarak tüm güney gökyüzünü yüksek kadanslı bir şekilde tarayacak ve mikromercekleme olaylarının tamamlayıcı renk bilgilerini sağlayacaktır.

Doğrudan görüntüleme yöntemi de yeni ekstrem AO sistemlerinin ve büyük araştırmaların gelişile dönüşmesi beklenmektedir. Örneğin, yakın zamanda devreye alınan Gemini Planet Imager (GPI) [54], A'dan M'ye kadar spektral türde 600 yıldız kapsayan kapsamlı bir ötegezegen araştırması (GPIS10) yürütmektedir, amacı sadece ötegezegenleri değil, enkaz disklerini de tespit etmek ve 5-50 AU'da gazlı ötegezegenlerin oluşumunu ve yapısını anlamaktır. Yeni teknikler, örneğin Phase Induced Amplitude Apodization (PIAA)  Coronagraph [55], Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (SCEAO) [56] üzerine yerleştirilmiş olan, çok küçük ayırmda çok yüksek kontrast yeteneği sunacaktır [57]. Planlanan yıldız gölgesi uzay aracı [58] – aynı zamanda dış örtücü olarak da bilinir – 10–10 kontrast seviyesini hedeflemektedir ve WFIRST'in yaşanabilir bölgelerde Dünya benzeri ötegezegenleri doğrudan görüntülemesine olanak tanıyacaktır.

Yukarıda belirtilen araştırmalar/teknolojilerle, sadece ötegezegenlerin oluşumunu ve evrimini incelemekle kalmayacağız, aynı zamanda Evren'de başka soluk mavi noktalar olup olmadığını da öğreneceğiz.