

James Webb Uzay Teleskobunun Gökada Devrimi

Ece Kilerci¹  

¹ Sabancı University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, 34956, İstanbul, Turkey

Accepted: March 4, 2025. Revised: March 4, 2025. Received: January 31, 2025.

Özet

James Webb Uzay Teleskobu (JWST) yakın ve orta kızılötesi dalga boylarındaki eşsiz hassasiyeti ve çözünürlüğü sayesinde evrenin yapı taşları olan gökadalara için yeni bir dönem başlatmıştır. Özellikle yakın kızılötesindeki fotometrik ve tayfsal gözlemler evrenimizin tarihine dair anlayışımızdaki en önemli boşluklardan biri olan kozmik şafak dönemindeki gökadalara, ve aktif süper kütleli kara delikleri ilk kez gözleme fırsatı sağlamıştır. Bu gözlemler Büyük Patlama'dan birkaç 100 milyon yıl sonra zaten var olan parlak, mavi gökadalara, yüksek kırmızıya kayma değerine sahip Aktif Gökada Çekirdekleri'nin beklenmedik popülasyonunu ve gökadalara önemli ölçüde aşırı olan yoğunluklarını ilk kez ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada JWST'nin ilk iki yılında yapılan gökadalara için bir devrimi ifade eden gözlemlerin şaşırtıcı araştırma sonuçları özetlenecektir. Ayrıca, 5 - 25 mikron dalga boyları arasındaki orta kızılötesi fotometrik Kozmik Evrim Erken Yayın Bilimi (CEERS) uzay taramasından kırmızıya kayma değeri beşten daha düşük olan farklı gökada sınıfları için elde edilen bulgular özetlenecektir.

Abstract

The James Webb Space Telescope (JWST) has started a new era for galaxies, which are the building blocks of the Universe, thanks to its unique sensitivity and resolution in the near and mid-infrared wavelengths. Photometric and spectral observations, especially in the near-infrared, have provided the opportunity for the first time to observe galaxies and active supermassive black holes during the cosmic dawn, one of the most important gaps in our understanding of the history of our universe. These observations reveal for the first time the bright, blue galaxies that already existed a few 100 million years after the Big Bang, the unexpected population of Active Galaxy Nuclei at high redshifts, and the significantly extreme densities of galaxies. In this study, the surprising research results of the observations completed in the first two years of JWST, which represented a revolution for galaxies, will be summarized. Additionally, findings from the mid-infrared photometric Cosmic Evolution Early Release Science (CEERS) space survey between wavelengths of 5 and 25 microns for different galaxy types with redshifts less than five will be briefly summarized.

Anahtar Kelimeler: galaxies: high-redshift, galaxies: active, galaxies: statistics

1 Giriş

NASA, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) ve Kanada Uzay Ajansı (CSA) arasındaki uluslararası bir işbirliği projesi olan James Webb Uzay Teleskobu (JWST, [Gardner ve diğ. 2023](#)) 25 Aralık 2021'de fırlatılmıştır. JWST 6.5 metrelik aynası ile bugüne kadar yapılmış en büyük uzay teleskobudur. JWST dört temel bilimsel hedefi gözlemlerle cevaplamak için tasarlanmıştır. Bu temel hedefler ([Gardner ve diğ. 2006](#)): (i) Evrenin karanlık çağlarının sonu, ilk ışık üreten yapıların ve yeniden iyonlaşma döneminin; (ii) Gökadaların oluşumu ve evriminin; (iii) Yıldızların ve öncül gezegen sistemlerinin doğuşu ve evriminin; (iv) Gezegen sistemleri ve yaşamın köklerinin, gözlemlerle araştırılmasıdır.

JWST'nin ilk iki yılında gerçekleştirdiği gözlemler arasında en uzak gökadalara bulmaya yönelik gözlemler genellikle geniş görüş alanına sahip derin uzay taramalarını içermektedir. Bu gözlemler sonucunda elde edilen bulgular gökadalara için bir devrim niteliğindedir. JWST daha önce gözlenememiş en uzak Evrene yeni bir pencere açmıştır. Bu çalışmada, devrim niteliğindeki bu çalışmaların bir özeti sunulacaktır. JWST'nin teknik özellikleri [§2](#)'de anlatılacaktır. JWST'nin gökada devrimini oluşturan çalışmalar [§3](#)'de verilecektir. JWST'nin yakın kızılötesi gözlemlerini kapsayan çalışmalar

[§3.1](#)'de, orta kızılötesi gözlemlerinden elde edilen sonuçlar [§3.2](#)'de aktarılacaktır. Sonuçlar [§4](#)'de özetlenmiştir.

2 James Webb Uzay Teleskobu'nun Teknik Özellikleri

JWST 0.6–28.5 mikron arasındaki kızılötesi (IR) gözlemler için tasarlanmıştır ([Menzel ve diğ. 2023](#)). 6.5 metrelik birincil ayna açıklığıyla JWST, bir önceki en önemli uzay teleskoplarıyla karşılaştırıldığında (Hubble Uzay Teleskobu, Spitzer, WISE gibi), özellikle yakın ve orta kızılötesinde üstün uzaysal çözünürlük ve hassasiyet sunmaktadır. Dünya'dan yaklaşık 1.5 milyon km uzaklıktaki ikinci Lagrange noktasına (L2) yerleştirilen JWST, termal olarak kararlı bir ortamda çalışarak derin uzay gözlemleri yapabilmektedir ([Rigby ve diğ. 2023](#)). JWST'nin hafif berilyumdan yapılmış ve altınla kaplanmış 18 altıgen parçadan oluşan birincil aynası kızılötesi dalga boylarında yansımayı artırmaktadır ([Gardner ve diğ. 2023](#)). JWST'nin bölümlü ayna sistemi, 2 mikrona yaklaşık 0.07 yay saniyelik açılabilir çözünürlük sunmaktadır ([Rigby ve diğ. 2023](#)), bu çözünürlük uzak gökadalara görüntülenmesini sağlamaktadır.

JWST'nin dört farklı gözlem aygıtı bulunmaktadır. Bunlar:

- Yakın Kızılötesi Kamera (NIRCam, [Rieke ve diğ. 2023](#)): 0.6–5 mikron arasındaki dalga boyları için birincil görüntüleme aracıdır. NIRCam 29 farklı filtre ile fotometrik ölçüm ve görüntüleme yapabilmektedir. JWST'nin en önemli

* ecekilerci@gmail.com

hedeflerinden biri olan yüksek kırmızıya kayma değerine sahip gökadalara bulunması için fotometrik kırmızıya kaymalar güçlü bir araçtır. Bu nedenle NIRCам'in, 0.6–5 mikron arasındaki tüm dalga boyu aralığını kapsayan bir filtre seti vardır. Bu filtreler hassasiyet ile dalga boyu ayrımı yapılabilecek farklı genişliklere sahiptir. F200W bandındaki nokta kaynak duyarlılık limiti 6.2 nJy dir. Bu 10.000 s'lik bir entegrasyon süresinde S/N=10 sinyal-gürültü oranında tespit edilebilen en sönük nokta kaynağının akı yoğunluğunu ifade etmektedir (Rieke ve diğ. 2023). 1,5 mikronunda NIRCам'in duyarlılık seviyesi Hubble'daki WFC3-IR bandının duyarlılığından 9 kat daha iyidir (Rigby ve diğ. 2023). 3,5 mkronda NIRCам'in duyarlılık seviyesi Spitzer'deki IRAC'tan 68 kat daha iyidir. Sahip olduğu bu yüksek hassasiyet nedeniyle JWST yakın kızılötesi dalga boylarında geliştirilmiş en hassas uzay teleskobudur.

- Yakın Kızılötesi Tayfölçer (NIRSpec, Jakobsen ve diğ. 2022; Böker ve diğ. 2023): NIRSpec, eşzamanlı olarak 100'e kadar kaynağın tayfini elde edebilen çok nesneli spektroskopi sağlamaktadır. NIRSpec, farklı teleskoplarla karşılaştırıldığında (VLT, Spitzer ve Keck gibi) spektroskopik hassasiyet ve spektral çözünürlükte çarpıcı bir gelişme sağlamaktadır (Rigby ve diğ. 2023).
- Orta Kızılötesi Aygıtı Görüntüleyicisi (MIRI): 5–28.5 mikron aralığında 9 farklı filtre ile aralıksız fotometrik gözlem sağlamaktadır. 2–3 mikron dalgaboylarında görüntüleme hassasiyetinde daha önceki teleskoplara göre 100 kat iyileşme sağlamıştır (Rigby ve diğ. 2023).
- İnce Kılavuz Sensör/Yakın Kızılötesi Görüntüleyici ve Yarıksız Spektrograf (FGS/NIRISS, Doyon ve diğ. 2023): Yüksek hassasiyetli astrometri ve spektroskopi için kullanılmaktadır.

JWST'nin sahip olduğu enstrümanlar, L2'deki konumuyla birleştğinde, kızılötesi astronomi için benzersiz yetenekler sunmaktadır. JWST, kozmik şafak ve yeniden iyonlaşma çağının izini sürmekten gezegen oluşumunu ve dış gezegen atmosferlerini incelemeye kadar evrene dair anlayışımızı değiştirmeye başlamıştır (Rigby ve diğ. 2023). JWST, fotometri ve spektroskopideki çok yönlülüğü ile, onu önümüzdeki on yıllar boyunca gözlemsel astronomiyi güncelleyecek en önemli teleskoptur.

3 James Webb Uzak Teleskobu'nun Gökada Devrimi

Astronomi biliminin en önemli amaçlarından biri, evrenin yapı taşları olan gökadalara nasıl oluştuklarını, büyüdüklerini ve evrimleştiklerini Büyük Patlama'dan günümüze kadar olan süreç boyunca anlamaktır. Büyük Patlama'dan sonraki ilk bir kaç yüz milyonluk dönem, ilk yıldızlar ve gökadalara oluşumundan önceki karanlık dönemdir. Büyük Patlama'dan 250-350 milyon yıl sonra ilk yıldızların, gökadalara ve süper kütleli karadeliklerin oluşumuyla kozmik şafak dönemi başlamaktadır. Kozmik şafak, karanlık dönem ile erken evrendeki yıldızlardan ve gökadalardan yayılan ultraviyole (UV) fotonların gökadalara arası ortamı (IGM) iyonlaştırdığı yeniden iyonlaşma dönemi arasındaki geçiş dönemidir. Kozmik şafak evrendeki yapı oluşumunu (örneğin, metal açısından fakir ortamlarda yıldız oluşumu, ilk karadeliklerin ortaya çıkışı) anlamamız açısından kritik bir öneme sahiptir (Bromm & Yoshida 2011). Kozmik şafak sırasında oluşan yıldızların, neredeyse tamamen hidrojen ve helyumdan oluşan ve ihmal edilebilir düzeyde metalik içeriğe sahip olan Popülasyon III'e ait olduğu düşünülmektedir (örn. Trenti & Stiavelli 2009).

Bu tür yıldızlar büyük kütleli ve kısa ömürlü oldukları için, yeniden iyonlaşmaya katkıda bulunan büyük miktarlarda UV radyasyonu üretmeleri beklenmektedir. Popülasyon III yıldızlarının doğrudan gözlemlenmesi, kısa ömürleri ve zayıf parlaklıkları nedeniyle JWST öncesinde imkansız iken (örn. Bromm & Yoshida 2011), JWST ile zayıf kızılötesi emisyonlarının tespit edilebilmesi mümkündür.

JWST, kozmik evrimin bu erken aşamasını gözlemlemek için benzersiz bir donanıma sahiptir. Yakın ve orta kızılötesindeki hassasiyeti, ilk yıldızlardan ve gökadalardan gelen kırmızıya kayan ışığın yakalanmasına olanak tanır. UV ve optik dalga boylarıyla sınırlı olan Hubble Uzak Teleskobu'ndan (HST) farklı olarak JWST, gerekli kırmızıya kaymalarda spektral çizgileri ve sürekli emisyonu araştırmak için optimize edilmiştir, böylece ilk yapıların oluşumunu ve evrimini gözlemleyebilir (Gardner ve diğ. 2023; Rigby ve diğ. 2023). Özellikle MIRI, erken gökadalardan gelen termal toz emisyonunu tespit ederek bu gözlemleri tamamlıyor. Bu, genç yıldızlardan gelen UV radyasyonunun toz tarafından emilip kızılötesinde yeniden yayılması nedeniyle yıldız oluşum hızı hakkında kritik bilgilere ulaşmak mümkündür. JWST, birden fazla cihazdan gelen verileri birleştirerek, kozmik şafak sırasında yıldız oluşum hızı yoğunluğunu ve metaliklik evrimini sınırlamak için benzeri görülmemiş bir fırsat sunmaktadır.

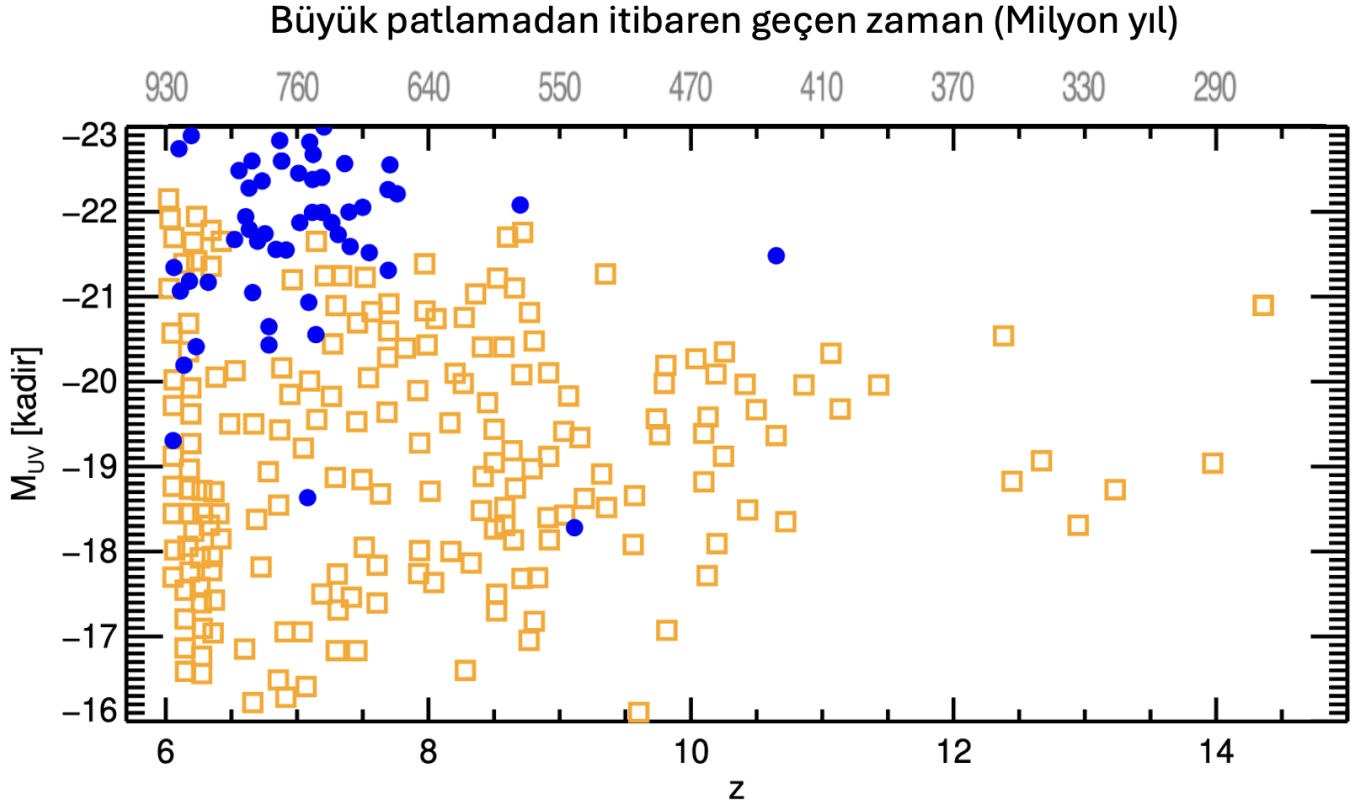
Kozmik şafağın incelenmesi, ilk yıldızların doğuşundan bugün gözlemlediğimiz büyük ölçekli yapıya kadar evrenin tarihinin eksiksiz bir anlatımını oluşturmak için gereklidir. JWST'nin gözlemleri dönüştürücü niteliktedir ve bu erken dönemin ilk ayrıntılı görünümünü sağlamaktadır. JWST, derin görüntüleme ve spektroskopi yoluyla kırmızıya kayması yüksek gökadalara tespitine olanak tanır, yeniden iyonlaşmanın zamanlamasını kısıtlar ve en eski yıldızların ve gökadalara özelliklerine ışık tutar. Bu bulgular teorik modellerin geliştirilmesine ve kozmik evrim anlayışımızı güncellenmesine katkı sağlamaktadır.

3.1 Yakın Kızılötesi Dalga Boylarındaki Gözlemlerle Elde Edilen Sonuçlar

3.1.1 Evrendeki en uzak gökada limitinin genişlemesi

James Webb'in en önemli bilimsel amaçlarından biri daha önce hiç gözlemlemediğimiz bir dönem olan kozmik şafaktaki ilk oluşumları gözlemleyebilmektir. Bu döneme ait her bir JWST gözlemi en eski astrofiziksel süreçlere dair kanıt sağladığı için büyük bir öneme sahiptir. Bu dönemi gözlemlemek kozmolojik kırmızıya kayma (z) nedeniyle kızılötesidalga boylarında sönük cisimleri tespit edebilecek güçlü bir teleskop gerektirdiği için JWST öncesinde erken evrene dair gözlemler oldukça sınırlıydı.

JWST'nin ilk devrimi gökadalara dair güncel (Ekim 2024 itibarı ile) kırmızıya kayma limitimizin 14.32 olmasıdır. Adamo ve diğ. (2024)'den alınan Şekil 1'de gösterildiği gibi (mavi noktalar JWST öncesi bilinen kaynakları göstermektedir) JWST'den önce kırmızıya kayma değeri 6'nın üzerinde olan sadece 60 gökada bilinmekteydi. Bunlar arasında z değeri 8 olan parlak gökadalara vardı, ancak $z=9$ 'un ötesinde bilinen kaynak sayısı çok azdı. Şekil 1'de gösterildiği gibi JWST ile birlikte artık $z=6$ 'nın ötesinde taysal olarak doğrulanmış bir çok gökada tespit edilmiştir ve Büyük Patlama'dan sadece ~300 milyon yıl sonraya ulaşan yeni uzaklık sınırimız başlı başına gökadalara için bir devrimdir. Şekil 1'in y eksenini, yüksek z değerine sahip bu kaynakların -16. mutlak kadire kadar



Şekil 1. Yüksek z değerine sahip gökadalara kırmızıya kayma ve ultraviyole mutlak parlaklık grafiği. Burada gösterilen veriler [Adamo ve diğ. \(2024\)](#)'den alınmıştır. Mavi noktalar JWST öncesi bilinen kaynakları, turuncu noktalar ise JWST ile gözlenmiş gökadalara göstermektedir. Büyük Patlama'dan sadece yaklaşık 300 milyon yıl sonraya dayanmış yeni z sınırı gökadalara için başlı başına bir devrimdir.

gözlenebildiğini göstermektedir, bu da yine gözlemsel astronomi açısından önemli bir gelişmedir.

Yüksek z değerine sahip gökadalara belirlenmesindeki genel strateji öncelikle fotometrik gözlemlerden fotometrik z değerinin elde edilerek adayların belirlenerek daha sonra tayfsal doğrulamasının yapılmasıdır. Yüksek z değerine sahip gökadalara genelde Lyman alfa çizgilerinden belirlenebilmektedir. Bu yöntemin başarısı bir çok çalışmada gösterilmiştir (örn. [Adams ve diğ. 2023](#); [Arrabal Haro ve diğ. 2023](#)). JWST ile $z=20$ değerindeki gökadalara tayfsal z tespiti bir kaç saatlik bir gözlem zamanıyla mümkündür. Teknik olarak JWST ile $z=20$ değerinde gökadalara da bulunabilir ve ilk iki yılda ulaşılan z limitinin önümüzdeki yıllarda elde edilecek gözlem sonuçlarıyla giderek genişlemesi beklenmektedir.

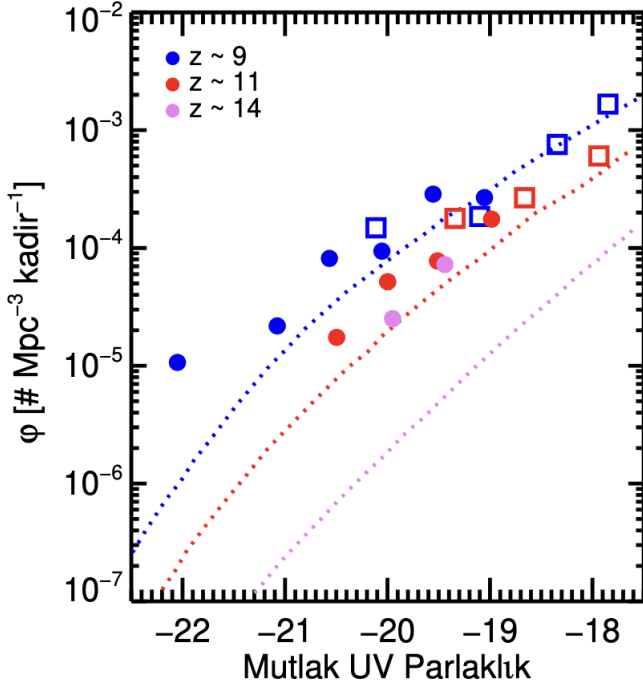
3.1.2 Gökadalara Fiziksel ve İstatistiksel Özelliklerdeki Sürprizler

JWST ile yüksek z değerine sahip gökadalara için ilk defa benzeri görülmemiş doğrulukta istatistiksel özelliklerin elde edilmesi başlı başına bir devrim niteliğindedir. Bu istatistiksel özelliklerden en önemlisi gökadalara UV deki parlaklık fonksiyonudur. Gökadalara parlaklık fonksiyonları genel olarak belirli bir limite kadar taranmış eşareketli bir hacimdeki belirli bir z ve parlaklık değerlerindeki gökada sayısını ifade etmektedir. Parlaklık fonksiyonu, gökadalara sayı yoğunluğunu, onların içsel parlaklıklarının ve kırmızıya kaymalarının bir fonksiyonu olarak ölçerek gökada oluşumunu izlemek için istatistiksel bir araç olarak kullanılır. NIRCam ile yapılan tarama

gözlemleri, ilk defa $z \sim 13-15$ 'de UV parlaklık fonksiyonlarının oluşturulmasını sağlamıştır (örn. [Harikane ve diğ. 2023a](#)).

Şekil 2'de $z=9, 11$ ve 14 de olan gökadalara UV parlaklık fonksiyonu gösterilmiştir. [Finkelstein ve diğ. \(2024\)](#)'den alınan bu şekilde önceki Hubble gözlemlerine dayanarak tahmin edilen parlaklık fonksiyonları gölgeli bölgeler ile gösterilmiştir. Bunlarla karşılaştırıldığında, özellikle $z=11$, ve 14 deki gözlemlenen gökada sayısı daha fazladır. Özellikle $z \sim 9$ 'da $M_{UV} \sim -22$ mutlak kadirdeki parlak gökadalara sayıları beklenen değerden çok daha fazladır. Farklı alan taramalarının sonuçları, yüksek z değerine sahip gökadalara için benzer sonuçlar göstermektedir (örn. [Harikane ve diğ. 2024](#)). JWST verileri, UV parlaklık fonksiyonlarının sönük parlaklık kısmındaki eğimin yüksek olduğuna işaret etmektedir; bu da, yeniden iyonlaşma dönemine önemli bir katkı sağlamış olabilecek düşük kütleli gökadalara oluşan büyük bir popülasyonu işaret etmektedir (örn. [Finkelstein ve diğ. 2023](#)).

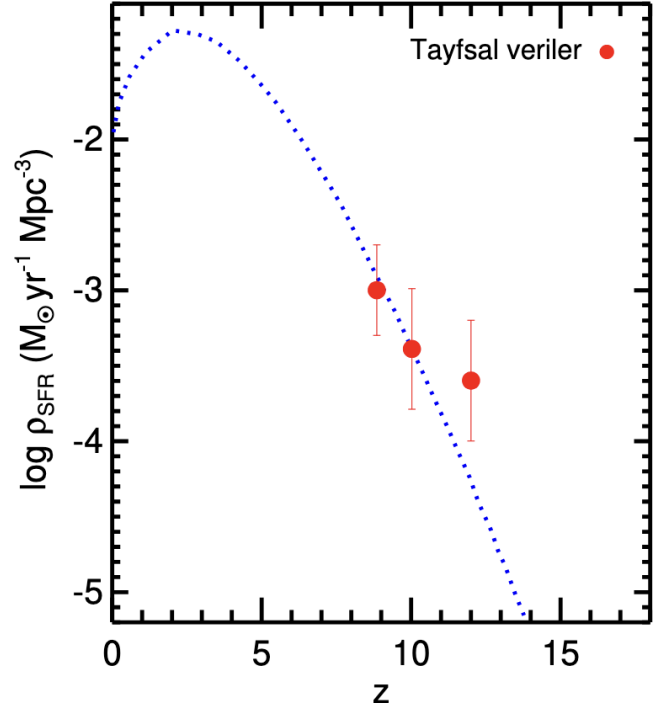
Çok yüksek z değerlerinde ($z > 10$) beklenmedik derecede parlak gökadalara varlığının, mevcut yapı oluşumu modellerinde anlaşılması güçtür. Bu gökadalara, Büyük Patlama'dan bu yana geçen nispeten kısa süre ile bağdaştırılması zor olan yıldız oluşum hızları ve yıldız kütleleri sergiliyor, bu da ya yüksek verimli yıldız oluşumunu ya da yıldız kütlelerinin birleşme yoluyla hızlı bir şekilde toplandığını işaret etmektedir ([Adams ve diğ. 2023](#)). Bu tür bulgular, gökada oluşumunun standart kozmolojik modellerin öngördüğünden daha erken başladığını ve daha hızlı ilerlediğini düşündürmektedir (örn. [Adams ve diğ. 2023](#)). Standart



Şekil 2. $z \sim 9, 11$ ve 14 'te ölçülen UV parlaklık fonksiyonlarını gösteren bu Şekildeki fonksiyonlar ve veriler [Finkelstein ve diğ. \(2024\)](#)'den alınmıştır. CEERS uzay taraması gözlemlerinden elde edilen ölçümler daireler ile gösterilmiştir. NGDEEP uzay taramasından ([Leung ve diğ. 2023](#)) elde edilen ölçümler ise karelerle gösterilmiştir. Noktalı çizgiler, [Finkelstein & Bagley \(2022\)](#)'den elde edilen ekstrapolasyonlu UV parlaklık fonksiyonlarını göstermektedir. Burada daha parlak gökadalara ($M_{UV} \leq -20$) ekstrapole edilen parlaklık fonksiyonlarının öngörebileceğinden daha yüksek sayı yoğunluklarına sahip olduğu görülmektedir. $z \sim 8.7$ 'deki en düşük z aralığındaki fonksiyonu etkileyebilecek bilinen bir aşırı yoğunluk ([Larson ve diğ. 2022](#); [Whitler ve diğ. 2024](#)) olsa da, daha yüksek z değerleri için böyle bir aşırı yoğunluğu gösteren hiçbir kanıt yoktur.

Lambda soğuk karanlık madde (Λ CDM) paradigmasında, gökadar gazın karanlık madde halelerine birikmesiyle oluşur (örn. [Somerville & Davé 2015](#)). Bununla birlikte, gazın yıldızlara dönüştürülmesi, genellikle 'geri besleme' olarak tanımlanan, gazı ısıtan ve dışarı atan işlemlerden dolayı verimsiz görünmektedir (örn. [Silk 1997](#)). Bazı güncel teorik çalışmalar UV parlaklık fonksiyonuna teorik bir üst limit bulmak amacıyla, yıldız oluşum verimliliğinin yüzde yüz olduğunu kabul ederek Λ CDM'de gazı yıldızlara dönüştürmekte ve gözlemlenen UV parlaklık fonksiyonunun Λ CDM ile tutarlı olabileceğini savunmaktadır (örn. [Mason ve diğ. 2023](#)).

Gökadalardan gelen UV süreklilik emisyonuna genç (~ 10 Milyon yıl yaşında olan), yüksek sıcaklıkta ve büyük kütleli yıldızlardan gelen ışık hakimdir. Bu yıldızların ömürlerinin kısa olması dolayısıyla varlıkları bir gökadaki yıldız oluşumunun bir göstergesidir ve bu nedenle UV emisyonu bir gökadanın yakın zamandaki yıldız oluşum geçmişi ifade eder (örn. [Stark ve diğ. 2009](#)). UV ışınlam miktarından, literatürdeki ilişkiler kullanılarak (örn. [Kennicutt & Evans 2012](#)) yıldız oluşum hızı (SFR) elde edilebilir. Bu sayede UV parlaklık fonksiyonundan her bir z değeri için yıldız oluşum hızı elde edilerek, kozmik yıldız oluşum yoğunluğunu elde edebilir. Şekil 3'de kozmik yıldız oluşum yoğunluğunun farklı kırmızıya kayma değerleri için değişimi



Şekil 3. Kozmik yıldız oluşum yoğunluğunun farklı kırmızıya kayma değerleri için değişimini gösteren bu Şekildeki veriler [Harikane ve diğ. \(2024\)](#)'den alınmıştır.

gösterilmektedir. Ölçümler $z=10$ 'a kadar, önceki gözlemlerden ve teorik çalışmalardan beklenen değerlerle uyumludur. Ancak $z=12$ 'de JWST ile ölçülen değer beklenenden daha yüksektir. Bu ölçümün doğruluğu, farklı gökyüzü taramalarında elde edilen benzer sonuçlarla teyit edilmiştir (örn. [Bouwens ve diğ. 2023](#)). JWST ile elde edilen bu beklenmeyen yıldız oluşum yoğunluğu literatürde tartışılan bir konudur. Bu verilerin erken dönemdeki gökadalarda yıldız oluşum verimliliklerinin kabul edilen değerlerden çok daha yüksek olabileceğine işaret ettiği düşünülmektedir ([Harikane ve diğ. 2024](#)). Diğer olasılardan biri de ölçülen UV parlaklıklarına Aktif Gökada Çekirdeği (AGN) ya da popIII yıldızlarının katkı sağlamış olabileceğidir ([Harikane ve diğ. 2024](#)). Bu gözlemlere daha düşük z değerlerine sahip gözlem doğrultusunda araya giren farklı gökadalardan de katkısının olmuş olması da olasılıklar arasındadır ([Harikane ve diğ. 2024](#)).

JWST'nin yüksek $z=12.5$ değerlerindeki gökadalardan tayflarında karbon ([CII] 158 mikron) gibi metal çizgilerini tespit edebilmesi ([D'Eugenio ve diğ. 2024](#)) yine bir devrim niteliğindedir. Metal çizgileri gökadalarda içindeki gazın sıcaklığını, yoğunluğunu ve içeriğini ölçmek için kullanılır. Yüksek z de bulunan gökadalardaki metal bolluğu, evrenin erken dönemlerinde yıldız oluşum süreçleri ve metalce zenginleşme sürecinin anlaşılması için oldukça önemlidir. Daha önce SDSS gibi uzay taramalarından elde edilen sonuçlar, yakın evrendeki gökadarlar için gökadalarda metal bollukları ve yıldız kütleleri arasında doğrusal bir ilişkinin varlığını göstermiştir (örn. [Maiolino & Mannucci 2019](#)). Bu ilişkide, gökadalarda gaz fazı metalikliği genellikle $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ olarak temsil edilen oksijen bolluğu kullanılmaktadır ve gökadanın daha fazla yıldız ürettiğince hem kütesinin hem de metal bolluğunun arttığını gösterir. JWST NIRSpec ile $z > 6$ de bulunan gökadalardan

ölçümleri, metal bolluğu kütle ilişkisinin z ile değişen bir evrimi olduğunu ortaya koymaktadır (örn. Curti ve diğ. 2024; Nakajima ve diğ. 2023; Chemerynska ve diğ. 2024). Yüksek kütleli gökadalardan, düşük kütleli gökadalara göre genellikle daha yüksek metal bolluğuna sahip olmasının gözlemlenmesi, daha büyük gökadalardan daha etkin gaz soğurması, yıldız oluşumu ve süpernova patlamaları yoluyla metal biriktirmesiyle açıklanmaktadır (örn. Curti ve diğ. 2024).

Gökada merkezlerindeki Süper Kütleli Kara Delikler (SKKD) aktif duruma geldiklerinde AGN olarak çok güçlü sürekli ışıınım kaynakları olurlar. AGN'ler yayınladıkları bu güçlü ışıınımla ev sahibi gökadanın evrimini etkilerler. AGN'lerin evrenin erken dönemlerinde tespit edilebilmesi, gökada evrimini anlamak açısından oldukça önemlidir. JWST'ten önce yüksek z değerine sahip AGN'ler $z=5-7$ arasında bulunan çok parlak kuazar popülasyonundan oluşuyordu. JWST gözlemleri ile ilk kez yüksek z değerlerinde daha düşük parlaklıktaki AGN popülasyonu da tespit edilmiştir (örn. Maiolino ve diğ. 2024). Evrenin bu dönemlerinde tespit edilen karadeliklerin kütleleri, karadelik oluşum teorilerini test etmek için kritik bir öneme sahiptir. JWST tarafından keşfedilen SKKD'lerin, süper Eddington'dan Eddington sınırının altındaki büyüklük sıralarına kadar geniş bir kütle aktarım aralığında olabileceği bulunmuştur (örn. Maiolino ve diğ. 2024). Genel olarak JWST ile elde edilen sonuçlar, ya büyük tohumlar (örn. Doğrudan Çöken Kara Delikler) ve/veya süper Eddington limitinde olan kara delikler gerektirdiği şeklinde yorumlanmıştır (örn. Volonteri ve diğ. 2023).

Daha düşük z değerine sahip AGN'ler ve ev sahibi gökadalariyle karşılaştırıldığında, keşfedilen AGN'lerin ev sahibi gökadanın yıldız kütlelerine göre aşırı kütleli olma eğiliminde oldukları tespit edilmiştir (örn. Harikane ve diğ. 2023b; Maiolino ve diğ. 2024), bu karadelik oluşumunun ve büyümesinin ev sahibi gökadamda yıldız oluşumunu geçtiğini göstermektedir. Erken evrende gözlemlenen AGN oranı ve yoğunluğu, AGN seçme kriterine ve yapılan uzay taramasının derinliğine bağlıdır. Harikane ve diğ. (2023b) NIRSpec tayflarıyla daha düşük bolometrik parlaklıklarda tip 1 AGN'lerin oranını $\sim 4-7$ 'de yüzde birkaç ila $\sim 10-15$ arasında değiştiğini tespit etmiştir. Maiolino ve diğ. (2024) tyafsal verileri kullanarak UV parlaklığı -18 ile -20 aralığında olan gökadalardan yaklaşık 10 'unun tip 1 AGN barındırdığını tespit etmiştir. Farklı çalışmalardaki benzer sonuçların ortaya koyduğu şey hesaplanan uzay yoğunluklarının, parlak kuasarların parlaklık fonksiyonlarından tahmin edilenden çok daha yüksek olduğudur (örn. Onoue ve diğ. 2023). Bu bulgular JWST'nin daha önce tespit edilmemiş yeni AGN popülasyonlarını ortaya çıkarmasıyla tutarlıdır.

3.2 Orta Kızılötesi Dalga Boylarındaki Çalışmalar

JWST'nin orta kızılötesindeki devrimi daha önce bu bölgede gözlem yapan uzay teleskoplarına (WISE, AKARI, Spitzer gibi) göre sağladığı çözünürlük ve duyarlılıktır (örn. Rigby ve diğ. 2023). Bu sayede JWST ile daha önce ayırt edilebilmesi zor veya imkansız olan kaynaklar ilk kez tespit edilebilmektedir. MIRI'nin orta kızılötesindeki devrimine bir örnek olarak Wu ve diğ. (2023, şekil A1)'de gösterilen mikro-Jy seviyesindeki gökadalardan MIRI'nin orta kızılötesindeki devriminin örneklerindendir.

3.2.1 CEERS uzay taraması

Fotometrik Kozmik Evrim Erken Yayın Bilimi (Cosmic Evolution Early Release Science Survey, CEERS) JWST'nin

erken bilim gözlemlerinden biridir (Finkelstein ve diğ. 2022). 100 yay dakika karelik geniş bir alanda yapılan NIRCcam, MIRI, ve NIRSpec taramaları içerir. CEERS, taraması fotometrik ve tayfsal verileri kullanarak erken evrende gökada oluşumunu, ve evrim süreçlerini incelemek için tasarlanmıştır. CEERS 1. dönem ve 2. dönem gözlemleri, 2022 yılında gerçekleştirilen toplam 10 farklı noktayı kapsayan NIRCcam mozaiklerini içerir. CANDELS (Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) taraması da JWST öncesinde bu alanda yapılmıştır. CANDELS Extended Groth Strip (EGS) taraması bu alanda yapılmış Hubble Uzay Teleskobu tarafından alınan $0.4-8$ mikron arasında çok dalga boyu verilerinin yanı sıra Spitzer ve Kanada-Fransa-Hawaii Teleskobu (CFHT) gibi diğer teleskoplardan alınan görüntüleri de kapsar. Bu veriler MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes) üzerinden erişime açıktır.

3.2.2 Orta kızılötesi parlaklık fonksiyonlarının sönük ucunun $z=5$ 'e kadar JWST CEERS taraması ile araştırılması

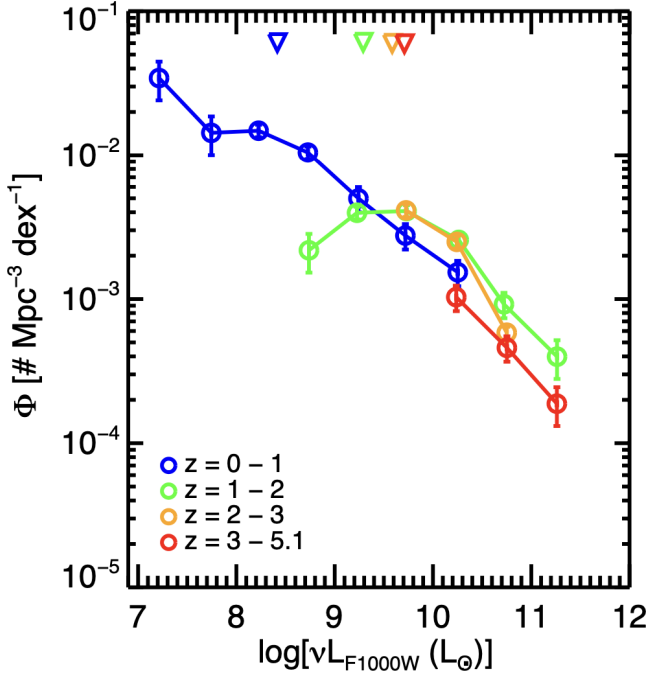
Evrendeki kozmik yıldız oluşum yoğunluğu orta kızılötesindeki ışıınımdan da ölçülebilir. Bunun temel nedeni genç ve büyük kütleli yıldızların oluştuklarında çevrelerinde olan gaz ve toz bulutlarındaki tozun UV ışıınımı soğurup kızılötesi dalga boylarında tekrar yayınlamasıdır. Özellikle toz ihtivası yüksek gökadalarda bu tozun içinde kalan yıldız oluşumunu ölçme imkanı verir. Kızılötesi parlaklık fonksiyonları evrende tozun altında kalmış yıldız oluşumunu ölçmenin pratik araçlarıdır. Bu nedenle bir z aralığı için farklı kızılötesi parlaklıklarda kaç tane gökadanın olduğunu ifade eden parlaklık fonksiyonlarını elde etmek önemlidir.

Bu çalışma için CEERS taramasından F770W, F1000W, F1280W, F1500W, F1800W, F2100W filtreleriyle elde edilmiş fotometrik ölçümlerin olduğu yaklaşık 8 yay dakikası kare olan bir alanı kullandık. Kendi ölçümlerimizi bu alanda JWST öncesinde edilmiş çoklu dalga boyu fotometrisi ile birleştirdik.

MIRI ölçümlerini güvenilir olan 543 gökada için Tayfsal Enerji Dağılımı (TED) yaparak fotometrik- z değerlerini elde ettik. Bu kaynakların MIRI bantlarındaki ışıınım güçlerini de fotometrik- z değerlerini kullanarak hesapladık. TED analizinden ayrıca $8-1000 \mu\text{m}$ arasındaki toplam kızılötesi ışıınım gücü, L_{IR} , değerini ve bu değere AGN katkısını da ölçtük. TED analizi sonucunda bu gökadalardan AGN baskın ya da yıldız oluşumu baskın bir kaynak olup olmadığını da belirledik. TED analiz sonuçlarından istatistiksel olarak kabul edilebilir olan gökadalardan verilerini kullandığımız bir örneklem oluşturarak bu gökadalardan ışıınım gücü fonksiyonlarını elde ettik (Ling ve diğ. 2024).

İşınım gücü fonksiyonları $0-1$, $1-2$, $2-3$, $3-5$ z aralıkları için elde edilmiştir (Ling ve diğ. 2024). Şekil 4'de elde edilen monokromatik ışıınım gücü fonksiyonlarından biri örnek olarak gösterilmiştir. Burada gösterilen 10 mikron ışıınım gücü fonksiyonu bu dalga boyu için ilk kez Ling ve diğ. (2024) tarafından gösterilmiştir. Ling ve diğ. (2024) tarafından elde edilen 7 mikron ışıınım gücü fonksiyonu z ile bir farklılaşma göstermektedir. Daha önceki bütün çalışmalardan farklı olarak, ilk kez JWST ile $10^7 L_{\odot}$ değerlerindeki sönük gökadalardan ışıınım gücü fonksiyonuna dahil edilebilmiştir. Yine JWST ile ilk kez $z=5$ de bulunan gökadalardan ışıınım gücü fonksiyonları elde edilmiştir. Ling ve diğ. (2024) tarafından bulunan fonksiyonlar daha önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur.

TED sonucunda elde edilen L_{IR} değerleri kullanılarak, benzer şekilde dört z aralığı için de toplam kızılötesi ışıınım



Şekil 4. MIRI'nin F1000W bandı için elde edilen ışınım gücü fonksiyonları. Bu Şekildeki fonksiyonlar ve veriler (Ling ve diğ. 2024)'den alınmıştır. Her bir z aralığının parlaklık sınırı üstteki renkli üçgen işaretleriyle gösterilmiştir.

gücü fonksiyonları da elde edilmiştir (Ling ve diğ. 2024). Daha önceki AKARI, *Spitzer* gibi teleskopların verileri ile elde edilen çalışmalara göre bizim ışınım gücü fonksiyonumuzun limiti 1 mertebe daha sönüktür. Bu da bize ilk kez daha sönük gökadalardan katkısını ölçme imkanı sağlamıştır. Elde edilen ışınım gücü fonksiyonları Schechter fonksiyonu ile fit edilmiştir (Ling ve diğ. 2024). Parametreleri elde edilen ışınım gücü fonksiyonları integre edilerek toplam kızılötesi parlaklık yoğunluğunu elde edilmiştir. Bu değer (Φ), belirli bir z aralığında tüm gökadalardan yayılan ortalama kızılötesi ışınım gücünü ifade etmektedir. Toplam kızılötesi ışınım gücü yıldız oluşum hızına çevrilerek yıldız oluşum hızı yoğunluğu da elde edilmiştir (Bknz. Ling ve diğ. 2024, şekil 17). Ling ve diğ. (2024) olasılıklar dahilinde literatürdeki farklı modellerle uyumlu (tepe noktası $z \sim 1.5$) bir yıldız oluşum hızı yoğunluğu değişimi elde etmiştir. Yıldız oluşum hızı yoğunluğunun $z=4$ ölçümü ilk kez Ling ve diğ. (2024) tarafından elde edilmiştir.

4 Sonuçlar

JWST gözlemsel astronomi alanında en uzak evrene dair yepyeni bir pencere açmıştır. Özellikle, JWST'nin ilk iki yılında yapılan büyük ölçekli tarama gözlemleri gökadalardan konusunda (örneğin, ERS programları gibi) farklı bir çok çalışmada gösterilen şaşırtıcı önemli sonuçlar sunmuştur. Bunlardan en önemlileri Büyük Patlama'dan birkaç yüz milyon yıl sonra var olan parlak, mavi gökadalardan; yüksek z değerine sahip beklenmedik AGN popülasyonu ve gökadalardan aşırı yoğunluklarının keşfidir. JWST'nin yeni bulguları erken evrende yıldız oluşumunun daha önce varsayılandan daha erken veya daha verimli bir süreçle gerçekleşmiş olabileceğini işaret etmektedir. Erken evrendeki gökadalardan JWST gözlemlerinden elde edilen istatistiksel özellikleri var olan kozmolojik modellerin

geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. JWST'nin yüksek z değerlerindeki gökadalardaki metal çizgilerini tespit edebilmesi, gökada kütlesi ile metal bolluğu arasındaki ilişkinin hem düşük hem de yüksek kütleli gökadalardan için z ile evrimleştiğini göstermektedir. JWST ile erken evrende keşfedilen SKKD'lerin popülasyonu gökada evrim modellerinin yeniden gözden geçirilmesini gerekli kılmıştır. JWST'nin MIRI ile yapılan gözlemleri ilk kez daha sönük gökadalardan tespitine olanak sağlamıştır. Bu daha sönük ve daha uzak gökadalardan dahil edildiği ışınım gücü fonksiyonları toz tarafından örtülmüş kozmik yıldız oluşum yoğunluğunun ilk kez $z=4$ 'e kadar ölçülebilmemizi sağlamıştır. Özetle, en uzak gökadalardan bazılarının şaşırtıcı özellikleri ve bu gözlemlerin fiziksel özelliklerin yorumlanmasında ortaya çıkardığı zorluklar modern astronominin yakın gelecekte tartışacağı önemli konulardır.

Kaynaklar

- Adamo A., Atek H., Bagley M. B., Bañados E., Barrow K. S. S., ve diğ., 2024, preprint, ([arXiv:2405.21054](https://arxiv.org/abs/2405.21054))
- Adams N. J., Conselice C. J., Ferreira L., Austin D., Trussler J. A. A., ve diğ., 2023, *MNRAS*, 518, 4755
- Arrabal Haro P., Dickinson M., Finkelstein S. L., Fujimoto S., Fernández V., Kartaltepe J. S., Jung I., ve diğ., 2023, *ApJ*, 951, L22
- Böker T., Beck T. L., Birkmann S. M., Giardino G., Keyes C., Kumari N., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 038001
- Bouwens R. J., ve diğ., 2023, *MNRAS*, 523, 1036
- Bromm V., Yoshida N., 2011, *ARA&A*, 49, 373
- Chemerynska I., Atek H., Dayal P., Furtak L. J., Feldmann R., Greene J. E., ve diğ., 2024, *ApJ*, 976, L15
- Curti M., Maiolino R., Curtis-Lake E., Chevallard J., Carniani S., D'Eugenio F., Looser T. J., ve diğ., 2024, *A&A*, 684, A75
- D'Eugenio F., ve diğ., 2024, *A&A*, 689, A152
- Doyon R., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 098001
- Finkelstein S. L., Bagley M. B., 2022, *ApJ*, 938, 25
- Finkelstein S. L., ve diğ., 2022, *ApJ*, 940, L55
- Finkelstein S. L., Bagley M. B., Ferguson H. C., Wilkins S. M., Kartaltepe J. S., Papovich C., Yung L. Y. A., ve diğ., 2023, *ApJ*, 946, L13
- Finkelstein S. L., ve diğ., 2024, *ApJ*, 969, L2
- Gardner J. P., Mather J. C., Clampin M., Doyon R., Greenhouse M. A., ve diğ., 2006, *Space Sci. Rev.*, 123, 485
- Gardner J. P., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 068001
- Harikane Y., Ouchi M., Oguri M., Ono Y., Nakajima K., Isobe Y., ve diğ., 2023a, *ApJS*, 265, 5
- Harikane Y., ve diğ., 2023b, *ApJ*, 959, 39
- Harikane Y., Nakajima K., Ouchi M., Umeda H., Isobe Y., ve diğ., 2024, *ApJ*, 960, 56
- Jakobsen P., ve diğ., 2022, *A&A*, 661, A80
- Kennicutt R. C., Evans N. J., 2012, *ARA&A*, 50, 531
- Larson R. L., Finkelstein S. L., Hutchison T. A., Papovich C., Bagley M., ve diğ., 2022, *ApJ*, 930, 104
- Leung G. C. K., Bagley M. B., Finkelstein S. L., Ferguson H. C., Koekemoer A. M., ve diğ., 2023, *ApJ*, 954, L46
- Ling C.-T., ve diğ., 2024, *MNRAS*, 528, 6025
- Maiolino R., Mannucci F., 2019, *A&ARv*, 27, 3
- Maiolino R., ve diğ., 2024, *A&A*, 691, A145
- Mason C. A., Trenti M., Treu T., 2023, *MNRAS*, 521, 497
- Menzel M., Davis M., Parrish K., Lawrence J., Stewart A., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 058002
- Nakajima K., Ouchi M., Isobe Y., Harikane Y., Zhang Y., Ono Y., Umeda H., Oguri M., 2023, *ApJS*, 269, 33
- Onoue M., ve diğ., 2023, *ApJ*, 942, L17
- Rieke M. J., Kelly D. M., Misselt K., Stansberry J., Boyer M., Beatty T., Egami E., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 028001
- Rigby J., ve diğ., 2023, *PASP*, 135, 048001

- Silk J., 1997, [ApJ](#), 481, 703
Somerville R. S., Davé R., 2015, [ARA&A](#), 53, 51
Stark D. P., Ellis R. S., Bunker A., Bundy K., Targett T., Benson A., Lacy M., 2009, [ApJ](#), 697, 1493
Trenti M., Stiavelli M., 2009, [ApJ](#), 694, 879
Volonteri M., Habouzit M., Colpi M., 2023, [MNRAS](#), 521, 241
Whitler L., Stark D. P., Endsley R., Chen Z., Mason C., Topping M. W., Charlot S., 2024, [MNRAS](#), 529, 855
Wu C. K. W., ve diğ., 2023, [MNRAS](#), 523, 5187

Access:

M25-0370: [Turkish J.A&A](#) — Vol.6, Issue 3.