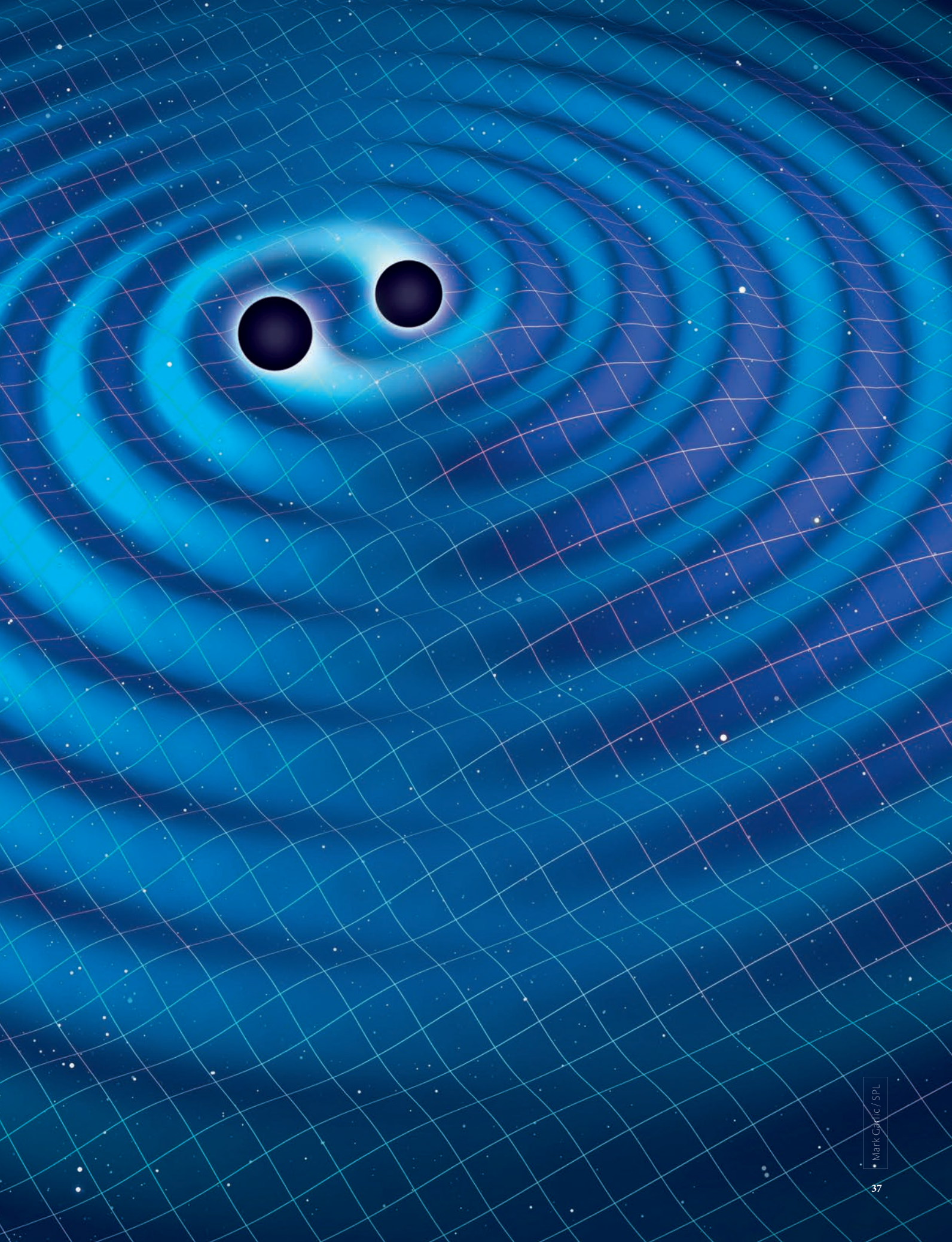


# Kütleçekimsel Dalga Araştırmalarında Uzay Çağına Doğru

Dr. Mahir E. Ocak [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi ]

Kütleçekimsel dalgaların 2015'te gözlemlenmeye başlamasıyla astronomide yeni bir çağ başladı. Ancak bugün var olan detektörler her tür fiziksel süreç sırasında yayılan kütleçekimsel dalgaları tespit edemiyor. Bugün kütleçekimsel dalgalarla gözlemlenemeyen süreçleri daha iyi anlamaya çalışan araştırmacılar, uzayda kütleçekimsel dalga detektörleri kurma planları yapıyor.



# Kütleçekimsel Dalgalar

İvmelenen kütlelerin uzay zamanın dokusunu değiştiren kütleçekimsel dalgalar yayacağı genel görelilik kuramının tahminleri arasında bulunur. Uzayda ışık hızıyla yol alan bu dalgalar, iki cismin arasından geçtiğinde cisimlerin arasındaki mesafenin değişmesine yol açar.

Karadelikler ya da nötron yıldızları gibi büyük kütleli cisimlerin yüksek ivmelerle hareket ettiği sistemler,

güçlü kütleçekimsel dalgalar yayar.

Ancak bu dalgalar uzaya yayıldıkça zayıflar. Örneğin, uzak bir gökadamdaki iki karadeliğin birleşmesi sırasında yayılan dalgalar Güneş sistemine ulaştığında Dünya ile Güneş arasındaki mesafenin atom boyutları ölçeğinde değişmesine neden olur. Bu kadar ufak değişimleri ölçerek kütleçekimsel dalgaları

tespit edebilecek kadar hassas cihazlar geliştirmekse kolay değildir.

Birbirinin etrafında dönen karadelikler gibi, devasa kütlelerin büyük ivmelerle hareket ettiği sistemler, güçlü kütleçekimsel dalgalar yayar. Işık hızıyla yol alan bu dalgalar, iki cismin arasından geçtiğinde cisimlerin arasındaki mesafenin değişmesine yol açar.

Kütleçekimsel dalgaların doğrudan ilk kez gözlemlenmesi ancak genel göreliliğin geliştirilmesinden tam yüz yıl sonra, 2015'te oldu. ABD'deki LIGO detektörlerinde çalışan araştırmacılar, henüz detektör test aşamasındayken kütleçekimsel dalgaları tespit etmeyi başardı. Tespit edilen dalgalar, her birinin kütlesi yaklaşık olarak Güneş'ininkinin 30 katı kadar olan iki karadeliğin 1,3 milyar yıl önce kaynaşması sırasında yayılmıştı.

Kütleçekimsel dalgaların doğrudan gözlemlenmeye

başlanmasıyla astronomide yeni bir çağ başladı. Daha önceleri evren sadece ışıkla (elektromanyetik dalgalarla) gözlemlenebiliyordu. Kütleçekimsel dalgalar sayesinde, evrene ikinci bir gözle bakılmaya başlandı.



ABD'nin Louisiana eyaletinde yer alan LIGO detektörü. LIGO ikiz detektörlerinin diğeri ise Washington eyaletinde yer alıyor. İkiz detektörlerdeki girişim ölçerlerin her bir kolu dört kilometre uzunluğunda.

Kütleçekimsel dalgaların ışık karşısındaki bir avantajı, madde içinden hiç etkilenmeksizin geçebilmeleridir. Işığa duyarlı teleskopların yaptığı gözlemler, çoğu zaman madde parçaları tarafından engellenir. Herhangi bir kaynaktan Dünya'ya doğru yayılan ışığın teleskoplara ulaşabilmesi için yolunun üzerindeki madde parçaları tarafından soğurulmaması ya da saçılmaması gerekir. Kütleçekimsel dalgalar içinse böyle bir engel yoktur.

# Kütleçekimsel Dalga Detektörleri

Günümüzde kütleçekimsel dalgaları tespit edebilen dört detektör var: LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ikiz detektörleri, VIRGO ve KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector). Kısaca LIGO olarak adlandırılan ikiz detektörler ABD’de yer alıyor. Detektörlerin biri Louisiana eyaletinin Livingston kentinde, diğeri ise Washington eyaletinin Hanford kentinde bulunuyor. İtalyan ve Fransız araştırma enstitülerinin ortak çabasıyla kurulan VIRGO detektörü, İtalya’nın Pisa kenti yakınlarında yer alıyor. Kısaca KAGRA olarak adlandırılan detektör ise Japonya’nın Hida kenti yakınlarında, yer altında inşa edildi.



İtalya’nın Pisa kenti yakınlarındaki VIRGO detektörü

LIGO, VIRGO ve KAGRA detektörlerinin tamamı, Michelson girişimölçerlerinin örneklerinden. Bu detektörlerde, ilk olarak tek bir kaynaktan yayılan ışık ışını iki kola bölünüyor ve ışıklardan birinin fazı terse çevriliyor. Işıklar kolların sonunda yer alan aynalardan yansdıktan sonra tekrar bir araya gelerek girişim yapıyor. Kollar eşit uzunlukta olduğu için sıradan koşullar altında herhangi bir sinyal gözlenmiyor. Ancak ışık ışınlarının yol aldığı kolların içinden geçen kütleçekimsel dalgalar ışık ışınlarının katettiği mesafelerin farklılaşmasına yol açtığından girişim desenleri ortaya çıkıyor. Böylece ortamdan geçen kütleçekimsel dalgaların varlığı tespit edilebiliyor.

Elektromanyetik dalgalara duyarlı teleskopların aksine kütleçekimsel dalgalara duyarlı teleskoplar uzayda belirli bir yöne bakmaz. Herhangi bir yönden gelen dalgalar, etraftaki maddelerin içinden geçerek detektörlere ulaşabilir. Dolayısıyla kütleçekimsel dalga detektörlerine ulaşan dalgaların hangi yönden geldiği kolayca anlaşılabilir. Benzer biçimde detektörlere ulaşan dalgaların kaynağının hangi gök olayları olduğunu tespit etmek de zordur. Bu detektörler ışığa duyarlı teleskoplar gibi size bir görüntü sunmaz. Kütleçekimsel dalga detektörlerinde tespit edilen



## NORMAL ÇALIŞMA



## KÜTLEÇEKİMSSEL DALGA ETKİSİ



dalgaların kaynağının hangi yönde olduğunu belirlemek için farklı detektörlerin topladığı veriler bir araya getirilir. Dalgaların detektörlere ulaşma zamanları arasındaki farklar, dalgaların hangi yönden geldiği hakkında bilgi verir. Dalgaların kaynağının hangi gök olayları olduğunu belirlemek içinse

kuramsal tahminlerden yararlanır. Hangi tür gök olaylarının detektörlerde hangi tür sinyaller ortaya çıkmasına yol açacağı genel görelilik kuramından yararlanarak önceden hesaplanmıştır.

Kütleçekimsel dalgaları tespit etmek için kullanılan bir başka yöntemdeyse pulsarlardan Dünya'ya ulaşan sinyaller gözlemleniyor. Pulsarlar, kendi etrafında hızlı dönen nötron yıldızlarıdır. Bu gök cisimleri manyetik kutuplarından elektromanyetik radyasyon yayar. Pulsarın uzaydaki yönelimine bağlı olarak, bu radyasyon periyodik aralıklarla Dünya'ya doğru yönelebilir. Pulsarla Dünya'nın arasından geçen kütleçekimsel dalgalarsa periyodik sinyallerde kaymalara neden olur.

Kütleçekimsel dalgaları tespit etmeye çalışan araştırmacılar, Pulsar Zamanlama Dizileri (PTA) olarak adlandırılan bir grup pulsarı düzenli olarak gözlemler ve toplanan verileri analiz ederek kütleçekimsel dalgaların varlığı hakkında çıkarım yapmaya çalışır. Haziran 2023'te yayımlanan bir araştırmada bir grup araştırmacı, 68 pulsarın 15 yıl boyunca gözlemlenmesiyle elde edilmiş verileri analiz ederek evreni dolduran bir kütleçekimsel dalga artalanının varlığını doğrulayan sonuçlara ulaştıklarını açıkladı.

LIGO, VIRGO ve KAGRA detektörleri, frekansı  $10^{-10}$  Hz aralığında olan kütleçekimsel dalgaları tespit edebiliyor. PTA gözlemlerinin duyarlı olduğu frekans aralığı ise  $10^{-9}$ - $10^{-6}$  Hz. Bu frekans aralıkları arasında çok büyük bir boşluk var. Ancak şu an için bu boşluğu dolduracak bir cihaz yok. Üstelik bu frekans aralığında kütleçekimsel dalgalar yayan gök olayları da var. Örneğin birbirinin etrafında dönen karadelliklerden oluşan sistemleri ele alalım. Eğer karadelliklerin kütlesi Güneş'inin onlarca katı büyüklükteyse, sistemin yayacağı kütleçekimsel dalgalar LIGO detektörleri ile tespit edilebilir. Karadelliklerin kütlesi Güneş'inin 1-10 milyar katı olması durumundaysa PTA'nın duyarlı olduğu frekans aralığında kütleçekimsel dalgalar yayılacaktır. Kütlesi Güneş'inin binlerce ya da milyonlarca katı olan karadelliklerden oluşan sistemlerin yayacağı kütleçekimsel dalgaları tespit edebilecek bir teknoloji ise yok.

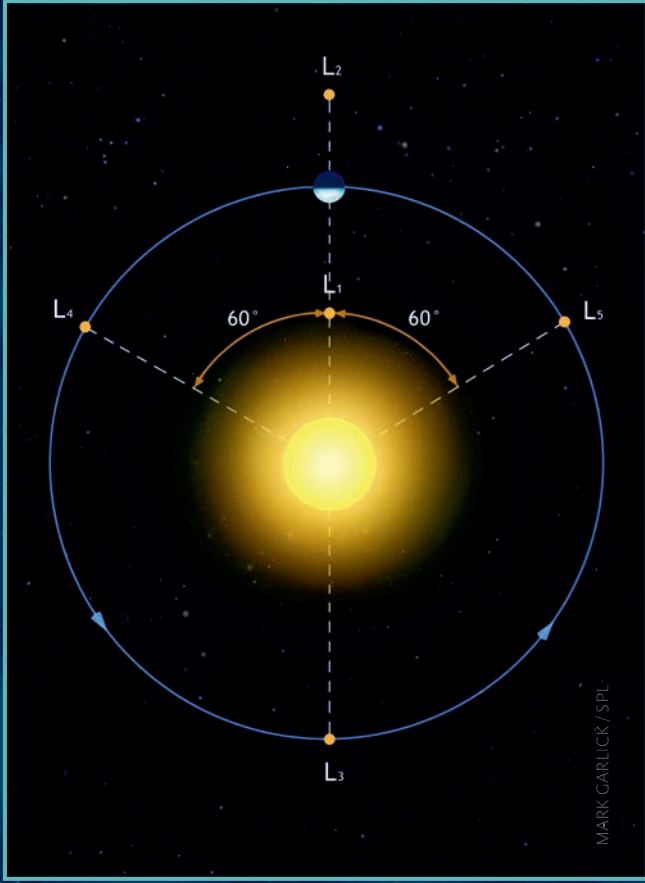
Kütleçekimsel dalgalarla daha kapsamlı gözlemler yapmanın bir yolu daha büyük Michelson girişimölçerleri üretmek olabilir. Ancak bu detektörler zaten çok büyük: LIGO detektörlerindeki kollar dörder kilometre, VIRGO ve KAGRA detektörlerindeki kollarsa üçer kilometre uzunluğunda. LIGO'nun tespit edebildiğinden binlerce kat düşük frekanslı kütleçekimsel dalgaları tespit edebilmek için birbirlerine milyonlarca kilometre uzaklıkta konumlandırılmış nesnelere arasındaki mesafede yaşanacak çok ufak değişimleri belirleyebilmek lazım. Böyle bir detektörse ancak uzayda kurulabilir.

Uzayda kurulacak bir detektörün, farklı frekans aralığında gözlemler yapmanın dışında yeryüzündeki detektörler karşısında çeşitli avantajları olacaktır. Yeryüzündeki detektörlerde sadece kütleçekimsel dalgalar uzaklık değişimlerine yol açmaz. Sismik hareketler ve termal salınımlar gibi etkenler de detektörlerin sinyal üretmesine neden olabilir. Dolayısıyla sinyallerdeki gürültüyü ayıklayıp, elde edilen sonuçların gerçekten de kütleçekimsel dalgalardan kaynaklandığından emin olmak gerekir. Uzayda kurulacak bir kütleçekimsel dalga detektöründe tespit edilen sinyallerde ise çok daha az gürültü olacaktır.

## LISA

Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Güneş'in etrafındaki yörüngesi sırasında Dünya'yı uzaklardan takip edecek bir kütleçekimsel dalga detektörü kurmaya hazırlanıyor. Lazer Girişimölçer Uzay Anteni (LISA) adı verilen bir projenin 2030'larda hayata geçirilmesi amacıyla çalışmalar devam ediyor.

Uzayda bir kütleçekimsel dalga detektörü kurmanın çeşitli zorlukları var. İlk olarak, kütleçekimsel dalgaların sebep olduğu çok ufak mesafe değişimlerini ölçebilmek için aralarında çok büyük mesafeler bulunan aynaların birbirlerine göre hareketsiz kalmalarını sağlamak lazım. İkinci olarak, tüm sistemin Güneş rüzgârı, kozmik ışınlar gibi dış etkenlerden korunması gerekli. ESA, uzayda kurulacak bir kütleçekimsel dalga



Lagrange noktalarından birinde bulunan bir cisim, hiç manevra yapmaksızın çok uzun süre Güneş etrafındaki yörüngesi sırasında sabit bir mesafeden Dünya'yı takip edebilir.

detektörünün başarılı bir biçimde çalışıp çalışmayacağı hakkında fikir edinmek için çalışmalar yaptı. LISA Pathfinder adı verilen bir uydu 3 Aralık 2015'te uzaya fırlatıldı. Yaklaşık 2 ton ağırlığındaki uydu, Dünya'ya yaklaşık 1,5 milyon kilometre uzaklıktaki L1 noktasına gönderildi. L1 noktası, 5 Lagrange noktasından biridir. Bu noktalardan birinde bulunan bir uzay aracı, hiç manevra yapmaksızın, Dünya'ya göre hareketsiz kalarak çok uzun bir süre Güneş etrafındaki yörüngesi sırasında Dünya'yı takip

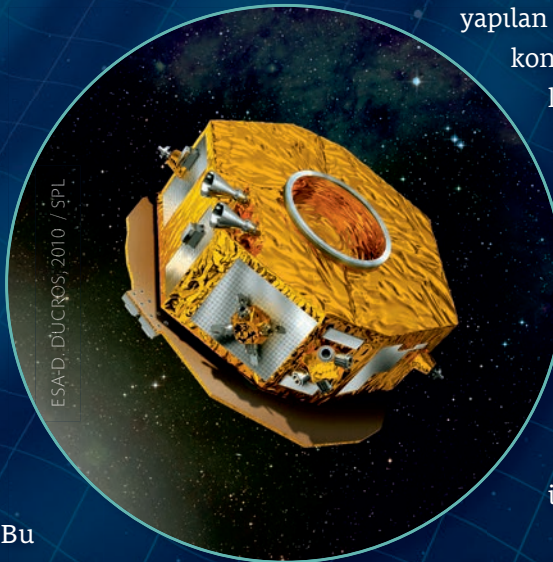
edebilir.

LISA Pathfinder'daki sistemin gelecekte kurulması planlanan detektörün tek bir kolunun minyatür bir versiyonu olduğu söylenebilir. Uzay aracının içinde her biri yaklaşık 2 kilogram kütleli, altın ve platinden imal edilmiş küpler ve küpler arasındaki mesafeyi ölçen bir sistem bulunuyordu. Uzay aracının temel işlevi ise sistemi dış etkenlerden korumaktı.

LISA Pathfinder'da yapılan deneyler sırasında küpler uzay aracının içindeki boşlukta birbirine yaklaşık 40 cm mesafede asılı kaldı. Deneylerin amacı küpler arasındaki mesafenin sabit kalmasının sağlanıp sağlanamayacağını test edilmesi ve küpler arasındaki mesafenin yeteri kadar hassas bir biçimde ölçülüp ölçülemeyeceğinin belirlenmesiydi. Sonuçta uzay aracının kütleleri, birbirlerine göre konumlarının değişmesine neden olacak dış etkenlerden başarılı bir biçimde koruduğu görüldü. Araştırmacılar, kütlelerin birbirine göre ivmesini yeryüzündeki kütleçekim ivmesinin  $10^{-15}$ 'te birinden bile daha küçük tutmayı başardı. Ayrıca kütlelerin çok az da olsa birbirlerine göre hareket etmesine sebep olan kuvvetler tespit edilebildi. Lazer girişimölçer tekniği kullanılarak yapılan ölçümlerde kütlelerin birbirine göre

konumları 0,01 nanometreden daha küçük bir hassasiyetle belirlenebildi.

Elde edilen bu sonuçlar, uzayda kurulacak bir kütleçekimsel dalga detektörünün başarılı bir biçimde çalışabileceğini gösterdi. LISA Pathfinder'ın başarısından sonra ESA, LISA projesini hayata geçirmeye karar verdi. Çalışmalar NASA ve uluslararası bir grup araştırmacıyla (LISA konsorsiyumu) işbirliği içerisinde devam ediyor.



LISA Pathfinder uzay aracı

Kurulacak LISA detektörünün üç kolu olması planlanıyor. Bu kollar bir eşkenar üçgenin kenarlarını oluşturacak. Bu üçgen yapı, tespit edilecek kütleçekimsel dalgaların kaynağının



LISA detektörünün üç kolunun olması planlanıyor.

belirlenmesine yardımcı olacak. Üçgenin kenar uzunluğunun 2,5 milyon kilometre olması planlanıyor. Ortaya çıkacak yapı Dünya'yı Güneş etrafındaki yolculuğu sırasında 20 derece geriden takip edecek. Üçgen yapının köşelerinde bulunacak uzay araçlarının yörünge düzlemleriyle ekliptik (Dünya'nın yörünge düzlemi) arasında 0,33 derecelik bir açı bulunacak. Bu da detektörün içinde bulunduğu düzlemlerle ekliptik arasında 60 derece olacağı anlamına geliyor. Her şey planlandığı gibi giderse LISA 2035 yılı civarında veri toplamaya başlayacak.

LISA yeryüzündeki kütleçekimsel dalga detektörlerine kıyasla çok daha geniş bir spektrumda gözlemler yapabilecek. Bu sayede daha önceleri gözlemlenemeyen çeşitli fiziksel süreçler de gözlemlenebilecek. Örneğin, gökadalardan merkezlerindeki aşırı yüksek kütleli karadeliğin kaynaşması sırasında yayılan düşük frekanslı kütleçekimsel dalgalar yeryüzündeki detektörlerin duyarlı olduğu aralığın dışında kalıyor. LISA bu kütleçekimsel dalgaları da tespit edebilecek.

Karadeliğin nötron yıldızlarını yutması ya da beyaz cücelerin birbirinin etrafında dolanması da kütleçekimsel dalgalarla ilk kez gözlemlenebilecek olayların diğer örneklerinden.

LISA çok çeşitli konularla ilgili bilimsel veri sağlayacak. Bu konulardan bazıları şunlar: kütleçekiminin doğası; evrenin genişleme hızı; Büyük Patlama'dan bugüne evrenin gelişimi; karadeliğin oluşum, büyüme ve kaynaşma süreçleri; aşırı büyük kütleli karadeliğin civarındaki uzay zamanının

incelenmesi yoluyla genel göreliliğin test edilmesi; Samanyolu'ndaki ikili yıldız sistemlerinin oluşum ve gelişiminin incelenmesi, Büyük Patlama'dan sonraki ilk yüz milyon yıllık dönemde evrenin yapısının haritalanması; kütleçekimsel dalga artalanının incelenmesi...

LISA'nın, kurulumu tamamlandıktan sonra en az dört yıl veri toplaması planlanıyor. Bu süre içinde gözlemevi durmaksızın tüm gökyüzünden gelen

kütleçekimsel dalgaları tespit

etmeye çalışacak. LISA,

kütleçekimsel

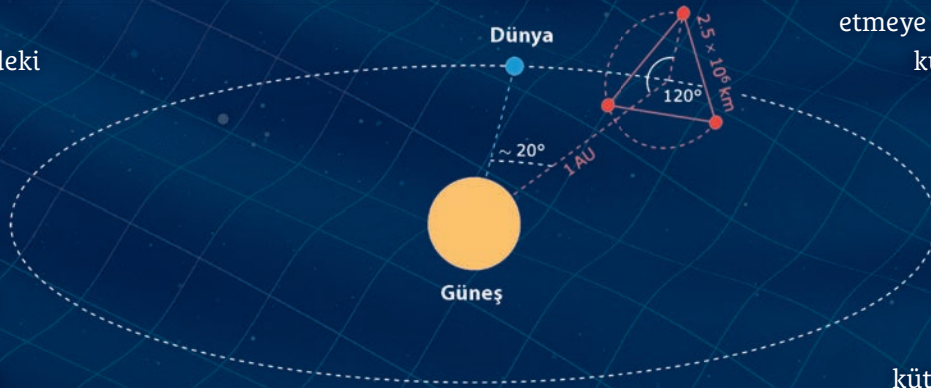
dalgalarla

evrenin tüm

geçmişine

göz atan ilk

proje olacak.



LISA detektörünün takip etmesi planlanan yörünge. LISA Güneş'in etrafında dönerken üçgenin köşelerinde bulunan detektörler de üçgenin kütle merkezi etrafında dönecek.

LISA tarafından kütleçekimsel

dalgalarla ilk kez gözlem-

lenecek aşırı büyük kütleli

karadeliğin kaynaşması

gibi süreçler milyonlarca yıl sürüyor. Bu sistemlerin detektörler tarafından tespit edilebilecek kütleçekimsel dalgalar yayması ise kaynaşmadan hemen önceki kısa dönemlerde meydana geliyor. Dolayısıyla her ne kadar evrende çok sayıda kaynaşan aşırı büyük kütleli karadeliğin olsa da LISA'nın ömrü

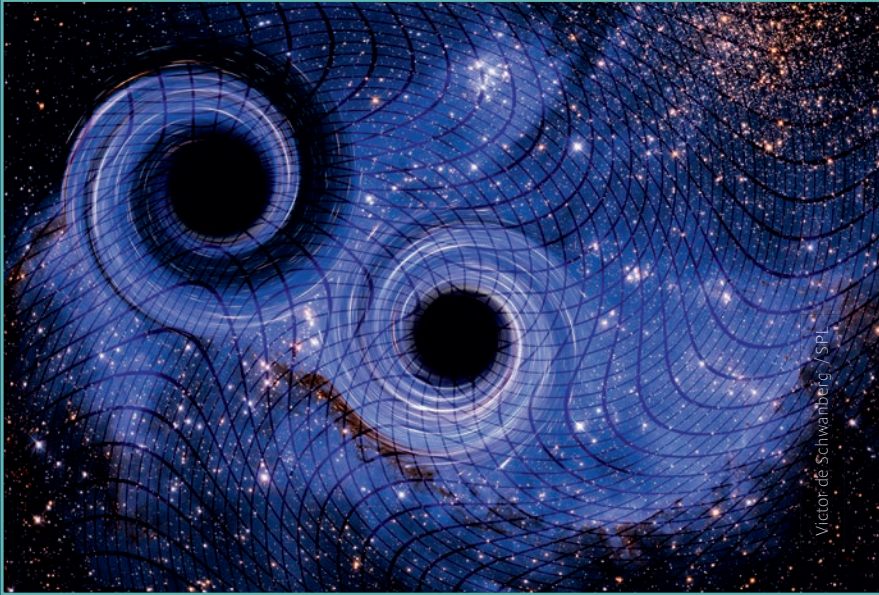
boyunca gözlemleyebileceği olayların sayısı sınırlı. Her yıl ortalama birkaç kaynaşma olayının LISA tarafından tespit edilebileceği tahmin edilebiliyor.

LISA'nın çeşitli konularda zaten var olan bilgi birikimini de artırması bekleniyor. Örneğin, bugün birbirinin etrafında dolanarak tespit edilebilecek miktarda kütleçekimsel dalga yaydığı bilinen beyaz cüce ya da nötron yıldızı sistemlerinin sayısı onlarla ifade ediliyor. LISA'nın bu sayıyı binlere çıkarması bekleniyor.

## Diğer Projeler

LISA'nın haricinde de Dünya dışında kütleçekimsel dalga araştırmaları yapma planları var. Örneğin Çin, Taiji adı verilen, LISA benzeri bir detektör kurmaya hazırlanıyor. Bu amaçla Çin ilk olarak Taiji-1 adını verdiği bir uyduyu uzaya göndererek lazer girişimölçer deneyleri

gerçekleştirdi. Önümüzdeki birkaç yıl içinde kurulması planlanan detektörde kullanılacak teknolojilerin test edilmesi amacıyla, Taiji-2 adı verilen bir uydunun daha uzaya gönderilmesi için çalışmalar devam ediyor. LISA Pathfinder benzeri bu projenin de başarılı olması halinde, Taiji projesinin 2030'larda hayata geçirilmesi planlanıyor. Taiji, LISA gibi üçgensel yapıda ve kolları da LISA'nunkiler gibi 3'er kilometre uzunluğunda olacak. Detektör, Dünya'nın yörüngesinin üzerinde, Dünya'nın 20 derece önünde Güneş'in etrafında tur atacaktır. LISA ve Taiji'nin görev yapacağı dönemler arasında en az bir yıllık örtüşme olması, iki detektörün bilimsel çalışmalarda işbirliği yapması düşünülüyor.



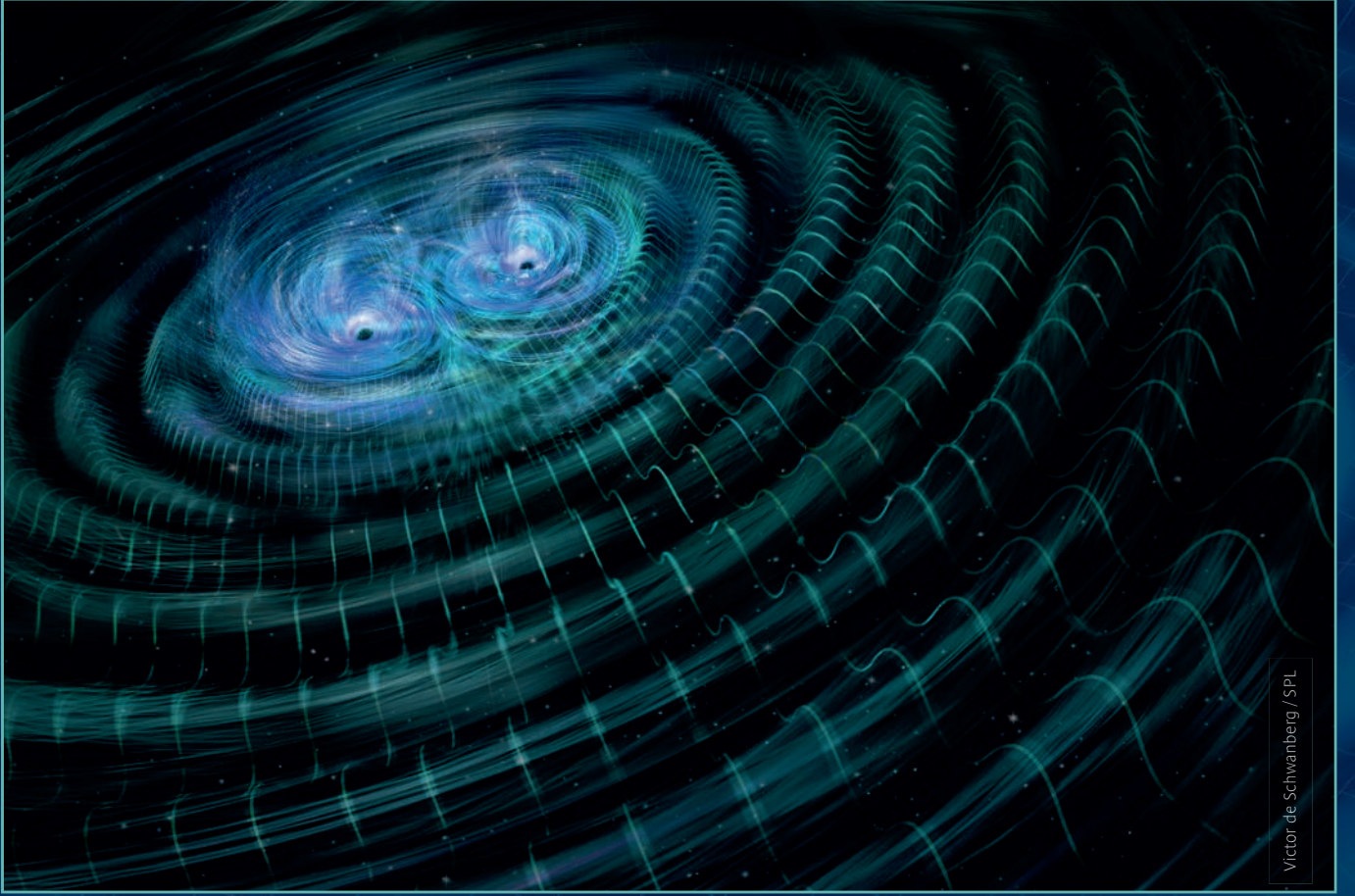
Ay'da kütleçekimsel dalga detektörü kurma planları da var. Ay'daki sismik etkinlikler Dünya'dakine kıyasla çok düşük. Kütleçekimsel dağların Ay'da sebep olduğu salınımların hassas sismometrelerle tespit edilebileceği düşünülüyor.

ESA'nın LISA'dan sonra bir süper-LISA detektörü kurma planı da var. Büyük Patlama Gözlemcisi adı verilen detektör, LISA benzeri üç detektörün bir eşkenar üçgenin köşelerinde yer aldığı dört parçadan oluşacak. Üçgenlerden ikisinin aynı bölgede konumlanarak bir hegzagon oluşturması, diğer iki üçgeninse bu hegzagonal yapının 120 derece önünde

ve arkasında yer alması planlanıyor. Üçgenler LISA'ya kıyasla çok daha küçük olsa da sistemdeki lazerler LISA'dakilerle kıyasla çok daha güçlü olacak. Bu sayede Büyük Patlama Gözlemcisi'nin kapasitesinin LISA'ninkinin de

ötesine geçmesi planlanıyor. Yeni kütleçekimsel dalga detektörü kurma planları esasen sadece uzayla sınırlı değil. Yeryüzünde de yeni detektörler inşa edilmesi düşünülüyor. Bu projelerden biri, Einstein Teleskobu olarak adlandırılıyor. Detektörün, Japonya'daki KAGRA gibi yer altına kurulması düşünülüyor. Bu sayede teleskobun LIGO ve VIRGO detektörlerine kıyasla sismik ve termal salınımlardan daha az etkilenmesi planlanıyor. Detektörün kollarının uzunluğununsa 10 kilometre civarında olması düşünülüyor. Böyle bir detektörün inşa edilebileceği bir bölge tespit edilmesi amacıyla çalışmalar yapılıyor. Projenin hayata geçmesi halinde Einstein Teleskobu'nun 2036 civarında bilimsel çalışmalara başlayabileceği öngörülüyor.





Victor de Schwanberg / SPL

## Özet

Bugün var olan kütleçekimsel dalga detektörlerinin kapasitesi sınırlı. Ancak belirli frekans aralığındaki kütleçekimsel dalgaları gözlemleyebiliyorlar. Yeryüzündeki teleskopların gözlemleyemediği fiziksel süreçler üzerine araştırmalar yapmak isteyen araştırmacılar ise uzaya yönelmeye başladı.

Uzayda kurulması planlanan kütleçekimsel dalga detektörlerinden biri LISA. ESA, detektörde kullanılacak teknolojilerin tüm testlerini başarıyla tamamladı. Teleskobun kurulumu için çalışmalar başladı. NASA ve bir grup araştırmacının işbirliğiyle yürütülen çalışmaların 2030'ların ortalarında sonuçlanması ve bilimsel çalışmaların başlaması planlanıyor.

Çin de uzayda kütleçekimsel dalga detektörü kurmayı planlıyor. Tiaji adı verilen detektörün kurulumunun

LISA ile aynı dönemlerde tamamlanması ve LISA ile ortak araştırmalar yürütmesi düşünülüyor. Önümüzdeki yıllarda detektörde kullanılacak teknolojilerin uzayda test edilmesi için çalışmalar devam ediyor.

Ay'da kütleçekimsel dalga gözlemleri yapmak ve LISA ile Tiaji'den daha büyük, kapasitesi daha yüksek detektörler kurmak da şu an üzerinde düşünülen projelerden bazıları. ■

## Kaynaklar

Branchesi, M., ve ark., "Lunar Gravitational-Wave Detection", *Space Science Reviews*, Cilt 219, Makale No: 67, 2023.  
O'Callaghan, J., "Space Lasers will Seek a New Kind of Gravitational Waves", *Scientific American*, <https://www.scientificamerican.com/article/space-lasers-will-see-a-new-kind-of-gravitational-waves/>, Şubat 2024.  
<https://lisa.nasa.gov>  
<https://www.esa.int/>