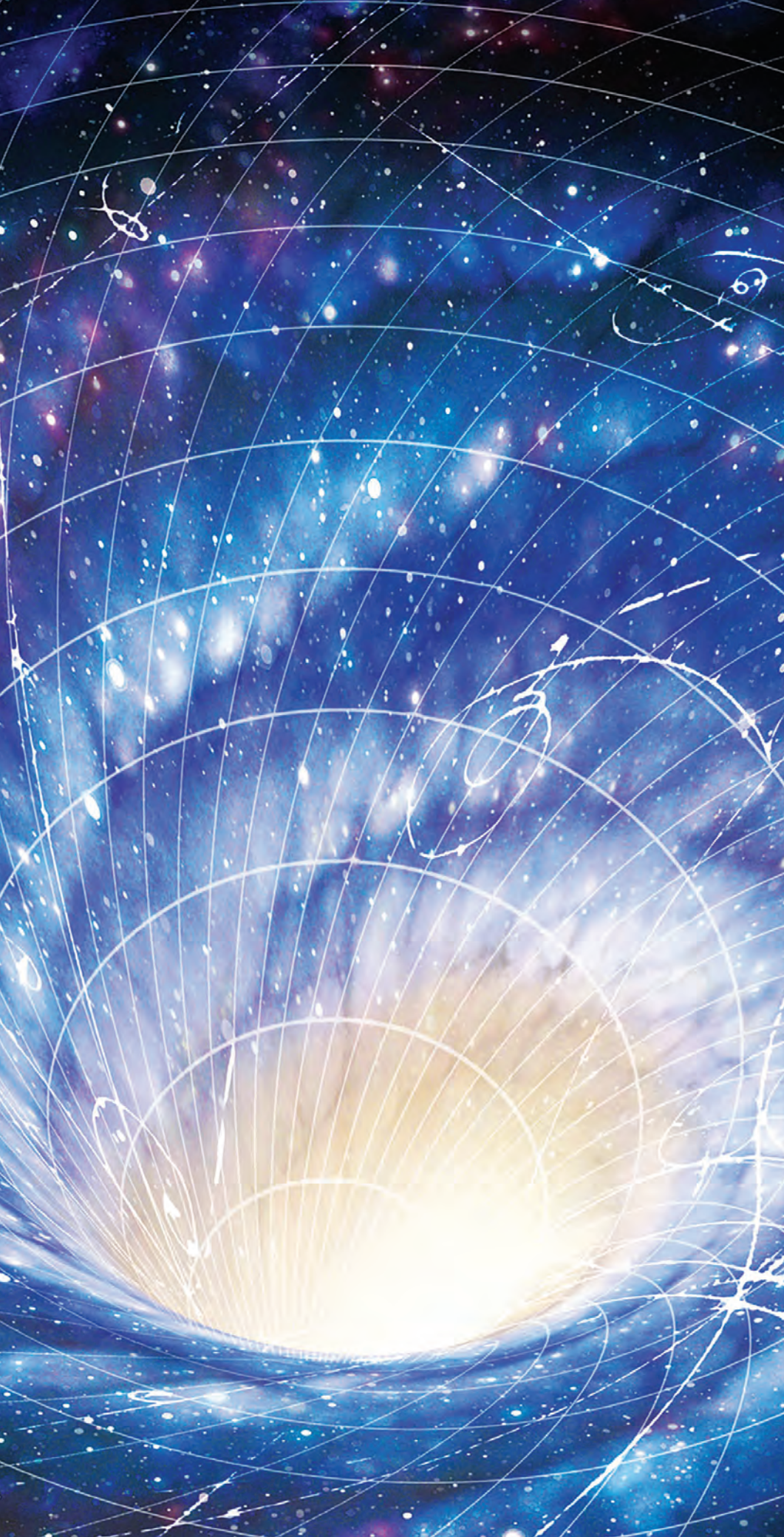


Genel Görecelik

Teorisinin Testleri



Dr. Selçuk TOPAL

[Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fizik Bölümü

Isaac Newton sayesinde kuvvet, ivme ve cisimlerin hareketinin doğasını daha iyi anlayabildik. Bu fizik ile günlük yaşantımızın içinde şekillendiği evreni makro ölçeklerde açıklayabiliyorduk. Newton kütleler arasındaki ilişkiyi fark ettikten sonra evrensel çekim yasasını ortaya koydu. Ünlü eseri Principia'da bu yasayı şöyle tanımlamıştı:

“Evrendeki her parçacık diğer parçacıklarla, kütleleriyle doğru ve aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak, etkileşim hâindedir.”

Kütleçekim kuvveti evreni makro ölçekte yöneten bir kuvvet olsa da Dünya yüzeyinde yürüyen bir karınca bile her adım atışında onu yenebilir.



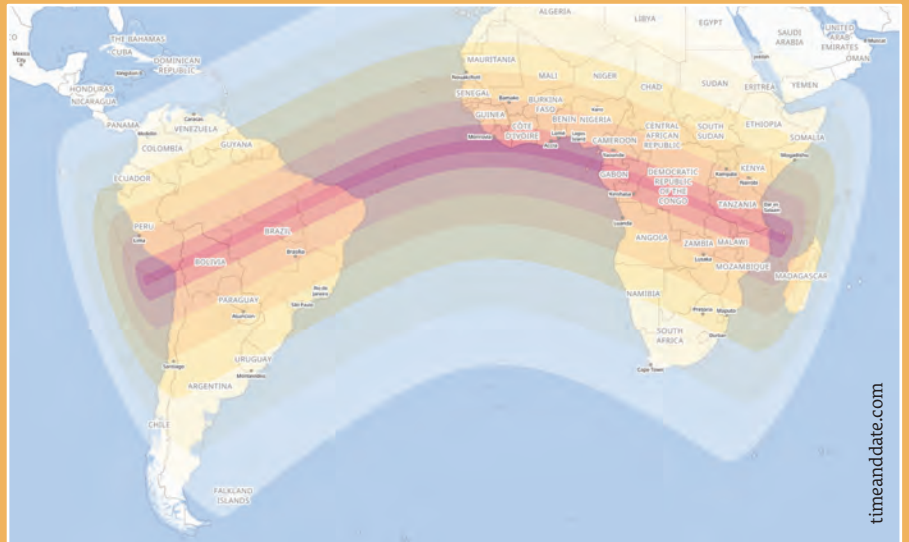
Kütleçekim kuvveti uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değiştiği için (uzaklık iki kat artarsa kütleçekim kuvveti dört kat azalır) bir cisim tarafından diğer bir cismin yüzeyine etki eden kütleçekim kuvveti cismin daha iç kısımlarına etki eden kuvvete kıyasla daha fazla olacaktır. Gelgit etkisi bu fark nedeniyle ortaya çıkar ancak kütleçekim kuvvetine kıyasla uzaklığa daha çok bağlıdır (uzaklığın küpüyle ters orantılı olarak değişir). Bu nedenle Ay'ın Dünya'ya uyguladığı gelgit etkisi Güneş'in Dünya'ya uyguladığı gelgit etkisinden iki kat daha fazladır. Ay ve Güneş'in Dünya üzerindeki gelgit etkisi nedeniyle gezegenimizdeki bü-

Bugün artık evreni dört ana kuvvetin yönettiğini biliyoruz. Farklı mesafelerde etkili olabilen bu kuvvetler en güçlüden en zayıfa doğru şu şekilde sıralanır: güçlü çekirdek kuvvetleri, elektromanyetik kuvvet, zayıf çekirdek kuvvetleri ve kütleçekim kuvveti. Diğer her kuvvet bu kuvvetlerin birer türevidir. Örneğin gelgit kuvveti kütleçekim kuvvetinin mesafeye göre türevidir. Galaksi kümelerinden yıldız oluşumuna birçok sürecin ana aktörü olan kütleçekim kuvveti kuvvetler içinde en zayıf olanıdır. Ancak güçlü ve zayıf çekirdek kuvvetlerinin etki alanı çekirdek boyutları iken elektromanyetik kuvvet ve kütleçekim kuvvetinin etki alanı sonsuzdur. Bir başka deyişle, evrenin öbür ucundaki bir galaksinin de üzerinizde etkisi söz konusudur. Ancak bu iki kuvvet de uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişir. Yani,

iki cisim arasındaki mesafe iki kat artarsa aralarındaki elektromanyetik kuvvet ve kütleçekim kuvveti dört kat azalır. Bu nedenle, evrenin diğer ucundaki bir galaksinin size etkisi tam olarak sıfır olmasa da şu an elinizde tuttuğunuz bu dergi ile aranızdaki kütleçekim kuvvetinden çok daha azdır. Newton'un keşfettiği işte buydu. İki cisim arasında

uzaklığın karesiyle ters, cisimlerin kütleleri ile doğru orantılı bir kuvvet olduğunu bulmuştu.

Ancak kütleçekimi dediğimiz şeyin, kütleler arasındaki görünmez ve anında (zamandan bağımsız) birbirine etki eden gizemli bir ilişki değil de kütlelerin uzay-zaman örtüsünde meydana getirdiği bü-



29 Mayıs 1919'da gerçekleşen tam Güneş tutulmasının tutulma hattı.



yük denizlerde ve okyanuslarda su seviyesi belli zamanlarda yükselir ve alçalır. Gelgit etkisinin önemli başka bir sonucu daha vardır. Ay her sene Dünya'dan birkaç santimetre uzaklaşır. Dolayısıyla yaklaşık 600 milyon yıl sonra Ay Güneş'i tamamen kapatacak kadar Dünya'dan uzaklaşmış olacak. O gün geldiğinde, hâlâ Dünya'da yaşayan insanlar olursa, hiç kimse tam Güneş tutulması göremeyecek. Bu nedenle, eğer bir gün tam Güneş tutulmasına denk gelirsiniz tutulmayı izlemenizi ve o anları doya doya yaşamınızı öneririz.

külme olduğunu anlamamızı sağlayan kişi Albert Einstein ve onun 1915 yılında ileri sürdüğü genel görelilik teorisi oldu. Buna göre, Güneş bir anda yok olursa bunu ancak aradaki mesafenin ışık hızına bölümüne eşit bir zamanda, yani yaklaşık sekiz dakika sonra hissederiz. Bu da bize kütleçekim kuvvetinin ışık hızında yayıldığını gösterir.

Genel görelilik teorisine baktığımızda ışığın da uzay-zaman örtüsü boyunca yol aldığını görüyoruz. Yani, kütle uzay-zaman örtüsünü bükmeyle kalmıyor, o örtü üzerinde hareket eden her şeye de etki ediyor. İnsanın tanımlamakta zorlandığı kavramlardan biri olan zaman da kütle'nin bu etkisinden payına düşeni alıyor. Nitekim, içinde her şeyin bulunduğu ortama artık sadece uzay demiyor, uzay-zaman örtüsünü dört boyutlu bir bütün

olarak ele alıyoruz. Kütle ne kadar büyükse uzay-zaman örtüsündeki bükülme de o derece büyük oluyor. Örtü kelimesi zihinde iki-boyutlu bir resim canlandırırsa da kütle'nin varlığı nedeniyle uzay-zamanda oluşan bu bükülmenin üç-boyutlu olduğunu unutmamak gerekir.

Newton'un kütleçekim teorisi ile genel görelilik arasındaki farkı tanımlarken şuna dikkat etmek gerekir. Newton teorisi genel görelilik teorisinin yaklaşık bir açıklamasıdır. Kütleçekiminin görece düşük olduğu durumlarda Newton'un kütleçekim teorisi sorunsuz çalışır ancak çok yüksek kütleçekim alanının söz konusu olduğu durumlarda (karadelikler gibi) Newton fiziği tam manasıyla çalışmaz. Bu yüzden yüksek kütleçekim alanlarının söz konusu olduğu işlemlerde genel görelilik teorisini göz önünde bulundurmak gerekir. Elbette bu

Newton'un kütleçekim teorisinin önemini azaltmaz. Nitekim onun sayesinde Ay'a gittik ve diğer gezegenlere uzay araçları gönderebiliyoruz. Ancak Einstein'ın çığır açan çalışmaları sonucunda da kütle'nin uzay-zaman örtüsüne etkisini daha doğru bir şekilde yorumlamaya başladık. Teorik fizikçi John Wheeler kütle ile uzay-zaman arasındaki ilişkiyi çok güzel bir şekilde ifade eder:

“Uzay-zaman kütleyle nasıl hareket etmesi gerektiğini söyler, kütle ise uzay-zamana nasıl bükülmesi gerektiğini.”

Evreni anlama çabamıza inanılmaz bir katkısı olan genel görelilik teorisi, ortaya atılmasından 100 yılı aşkın bir süre geçmesine rağmen hâlâ test ediliyor. Zaten bir teorisin doğasında da sürekli test edilmek vardır. Bu çalışmalardan bazılarını sizler için derledik.



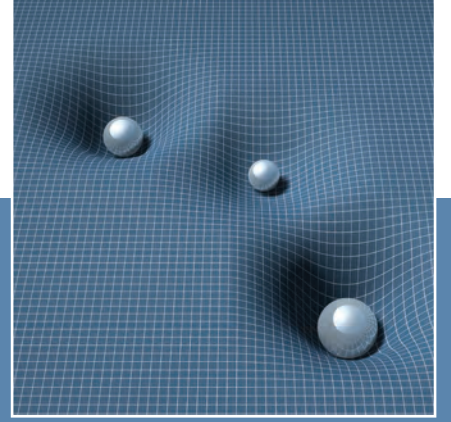
1

Güneş yüzeyine yakın geçen ışığın doğrultusundaki sapma

29 Mayıs 1919'da gerçekleşen tam Güneş tutulması genel görelilik teorisinin testi için mükemmel bir olanak sağladı. Genel görelilik teorisinin bu ilk testi Einstein'ı meşhur etti. Güney Amerika ve Afrika'dan gözlenebilen 1919'daki tutulmanın hattını 64. sayfada görebilirsiniz.

Sir Arthur Eddington Afrika'nın batı kıyısında yer alan Principe Adası'nı ve Brezilya'nın kuzeydoğusunda yer alan Sobral şehrini tam

tutulmayı gözlemek için iki kilit nokta olarak belirledi. Greenwich Kraliyet Gözlemevi ile Cambridge ve Oxford üniversiteleri gözlem için gerekli ekipmanları tedarik etti. Bildiğiniz üzere, tam Güneş tutulması esnasında Güneş'in görünen diski Ay tarafından kapatılır ve gündüz vakti birkaç dakika süreyle tam tutulmanın gözlenebildiği bölgelerde alaca karanlık olur. 1919 yılındaki tam tutulma esnasında yaşanan bu kısacık alaca karanlık sayesinde Güneş'e yakın doğrultuda bulunan bazı yıldızlar



deniyle ışığın sapması günümüzde gerçekleştirilebilen daha hassas ölçümler sayesinde genel göreliliğin önerdiği değere %1 yakınlıkla tespit edilebiliyor.

Devasa bir kütlenin yakınından geçen ışığın doğrultusunda meydana gelen bu sapmaya kütleçekimsel mercekleme (*gravitational lensing*) denir. Evrenin bu gerçeği, normal şartlarda direkt olarak görülemeyen (örneğin bakış doğrultusunda yer alan başka bir galaksi nedeniyle) galaksilerin görülebilmesine olanak tanır. Kolaylıkla görebildiğimiz bize nispeten yakın bir galaksi ile aynı doğrultuda ancak evrenin çok daha uzak bir köşesinde yer alan başka bir galaksinin ışığı, bize yakın olan o galaksinin yakınından geçerken bükülerek nihayetinde gözlem aracımıza ulaşacaktır. Genel görelilik teorisinin öne sürdüğü kütleçekimsel mercekleme sayesinde evrenin çok uzak köşelerinde doğrudan gözlemleyemediğimiz cisimleri görüyor, karanlık madde ve evrenin genişlemesini daha iyi anlamaya çalışıyoruz.

gözlenebildi ve gece gözlenen normal konumlarına kıyasla bir miktar sapma gösterdikleri kanıtlandı. Bunun nedeni o yıldızlardan gelen ışığın Güneş'in yanından geçerken bükülmesi sonucu yıldızın görünen konumunda meydana gelen sapmaydı.

Einstein 1915'te ortaya attığı genel görelilik teorisinde tam olarak bunu öneriyor ve yeterince büyük kütlelerin ışığı ölçülebilecek kadar saptıracağını söylüyordu. Genel görelilik teorisine göre

Güneş'in yüzeyine yakın geçen yıldız ışığı 1,75 yay saniyesi sapma göstermeliydi ve Einstein bunun gözlemsel kanıtı için tam Güneş tutulmasının iyi bir seçenek olacağını söylemişti. Gözlemsel test için tutulmadan altı ay önce konumları hassas bir şekilde ölçülebilen bazı yıldızlar seçildi. Tutulma günü ise aynı yıldızların konumlarında görelilik bir sapma olup olmadığı incelendi. Hesaplanan sapma, genel göreliliğin önerdiği sapma değeri olan 1,75 yay saniyesine %20 yakınlıkla bulundu. Kütleçekimi ne-

2

Kütleçekimi Nedeniyle Işığın Kırmızıya Kayması

Kırmızıya kayma veya maviye kayma kavramları aslında günlük yaşamdan aşına olduğumuz bazı olaylarla kolaylıkla açıklanabilir. Size doğru yaklaşan bir tren veya ambulansın sesinin şiddeti, araç size yaklaştıkça artarken araç sizden uzaklaştıkça azalır. Bu artış ve azalış olayını enerjideki artış veya azalış gibi düşünebiliriz. Uzay-zaman örtüsünde yol alan (veya hareketli bir cisimden saçılan) ışığın başına da aynı şey gelir.

Kütlenin uzay-zaman örtüsünde bir nevi çukur oluşturduğunu hatırlayalım. Bu çukura, literatürde de kullanılan adıyla, potansiyel çukuru diyelim. Genel görelilik, kütleçekim kuvvetinin yoğun olduğu (yani potansiyel çukurunun nispeten daha derin olduğu) bir yerden çıkan ışık demetinin (veya fotonların) dalga boyunun artacağını söyler. Yani, kütleçekimi nedeniyle oluşan potansiyel çukuruna giren ışık oradan çıkmak için enerji harcamalıdır. Gerekli enerji, ışığın hızındaki düşüş ile değil (nitekim ışığın boşluktaki hızı sabittir) ışığın frekansındaki düşüşle sağlanır. Frekans düştükçe enerji de düşecektir.

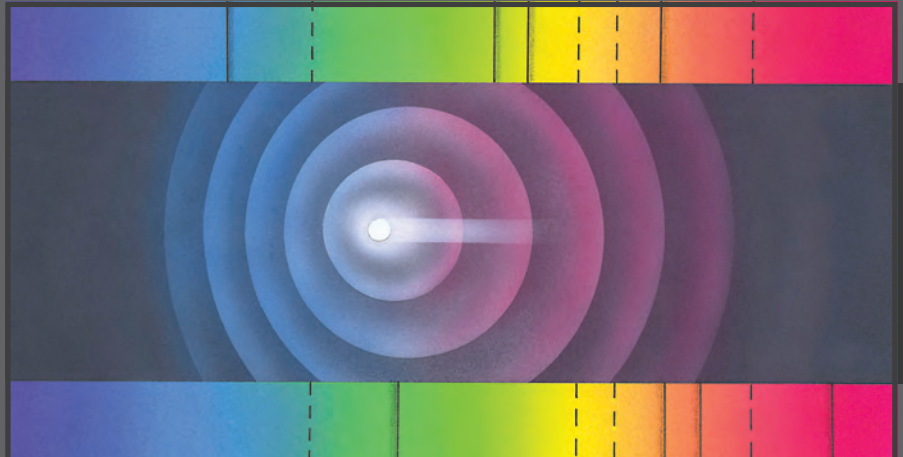
Enerji düştükçe dalga boyu artacaktır. Bir ışık demetinin dalga boyunun artması, ışığın renginin elektromanyetik tayfta kırmızıya doğru kayması demektir (uzaklaşan trenin sesinin şiddetinin giderek azalması gibi). Bu nedenle bu olaya kütleçekimi nedeniyle kırmızıya kayma (*gravitational redshift*) denir. Potansiyel çukuruna giren ışık demetini tekrar hatırlayalım. Işık demetini oluşturan fotonlar çukura girerken yokuş aşağı ineceği için enerji kazanır. Yani dalga boyunda bir azalma, bir başka deyişle frekansında yani enerjisinde bir artış olacaktır. Bu durumda maviye kayma dediğimiz olay meydana gelir.

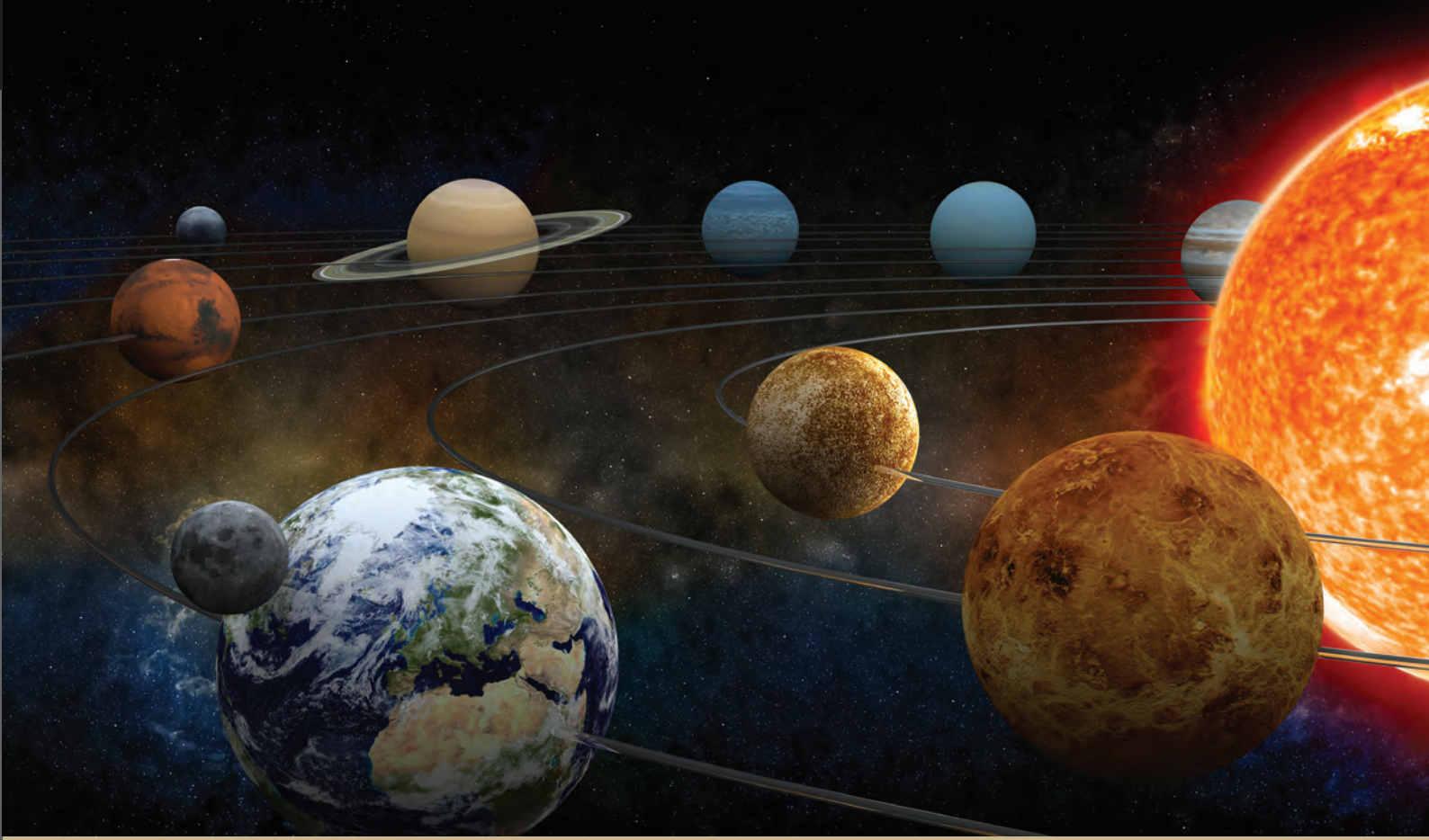
Elbette uzay-zaman örtüsü boyunca ilerleyen ışık demeti uzayın genişlemesi nedeniyle de kırmızıya kayabilir. Uzay-zaman örtüsünün genişlemesi nedeniyle ışıktaki meydana gelen bu değişim yakın evren için (kabaca 50 mega parsekten daha kısa mesafeler) pek önemli değildir ve bu etki ihmal edilebilir. Ancak evrende çok daha uzaklara baktıkça evrenin genişlemesini hesaba katmak gerekir.

Kütlenin varlığı nedeniyle oluşan kırmızıya veya maviye kayma etkilerini görebilmek için karadelikler gibi

çok güçlü kütleçekim alanına sahip cisimlere bakmak gerekir. Galaksimizin merkezindeki dört milyon Güneş kütlelerine sahip süper kütleli karadelik etrafında dolanan bir yıldız gözlemi sayesinde genel görelilik teorisinin doğruluğu bir kez daha kanıtlandı. Yıldız karadeliğe çok yakın olduğu için karadeliğin devasa çekim etkisi nedeniyle yıldızın ışığında kırmızıya kayma olması bekleniyordu. Yapılan çalışma bu kırmızıya kaymayı hassas ölçümlerle belirleyebildi.

Bu yöntemi kullanarak yapılan en eski testlerden biri Pound – Rebka testi olarak bilinir. Robert Pound ve onun yüksek lisans öğrencisi Glen A. Rebka, Jr. 1959 yılında Harvard Üniversitesine bağlı Jefferson Laboratuvarında isimleriyle anılan bu deneyi gerçekleştirdiler. Deneyde 22 metrelik bir kulenin tepesindeki bir kaynaktan zemindeki alıcıya gama ışınları gönderildi ve bu sayede Dünya'nın kütleçekim merkezine doğru yaklaştıkça gama ışınının enerjisinde bir değişim olup olmadığı test edildi. Einstein'ın genel görelilik teorisine göre foton (potansiyel çukuruna giren ışık demetini hatırlayın) enerji kazanmalıydı. Pound – Rebka deneyinde de tam olarak bu gözlemlendi.





3

Merkür'ün Tuhaf Yörüngesi

Merkür ile Güneş arasında ortalama 58 milyon km bulunur. Merkür Güneş'e en yakın gezegen olduğu için Güneş'in devasa kütesinin büktüğü uzay-zaman örtüsünden en çok o etkilenir. Benzer biçimde, okyanustaki bir hortumun merkezine en yakın teknenin hortumdan zarar görme ihtimali en yüksektir. Bu yüzden hortumun merkezine çekilip denizin dibini boylamamak için diğerlerinden daha hızlı bir şekilde hareket etmelidir. Einstein

Güneş'in uzay-zaman örtüsüne etkisinin Merkür'ün yörüngesinde ölçülebilir bir düzensizliğe neden olup olmadığını merak etmişti.

Merkür Güneş Sistemi'nde en basık yörüngeye sahip gezegendir. Bir başka deyişle, Güneş'e en yakın olduğu mesafe ile en uzak olduğu mesafe arasındaki fark diğer gezegenlere kıyasla en büyüktür. Güneş etrafında dolanan her bir gezegenin de bir diğerine etkisi söz konusudur. Diğer gezegenlerin toplam kütleçekim etkisi nedeniyle Merkür'ün enberi noktası (Güneş'e en yakın olduğu nokta) belli bir periyotla kayma gösterir. Newton'un kütleçekim yasasına göre, diğer gezegenlerin kütleçekim etkileri nedeniyle Merkür'ün Güneş etrafındaki yörüngesi, yaklaşık 20.000 yılda bir devinim (salınım) gösterir. Bunun sonucu olarak, enberi anlarında

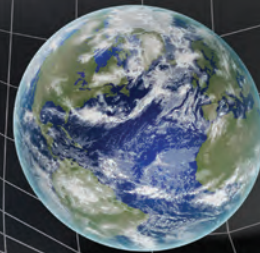
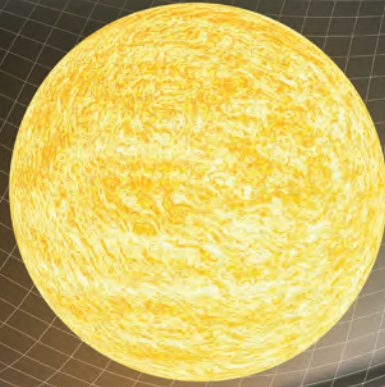
Güneş - Merkür doğrultusu uzayda her zaman aynı noktayı işaret etmez. Newton'un kütleçekim yasası ile bu kayma hesaplanabilir: Yüz yılda 531 yay saniyesi. Ancak genel görelilik teorisi ile Merkür'ün yörüngesinde gözlenen garipliğin nedeni daha net bir şekilde anlaşıldı. Aslında yapılan hesaplarda gezegenlerden kaynaklanması gereken enberi noktasının sapması ile hesaplanan enberi noktasının sapması arasında 43 yay saniyelik bir fark olduğu görülmüş, bu farka neden olan şeyin başka bir gezegenin varlığı olduğu düşünülmüştü. Hatta bu gezegene Vulcan ismi bile verilmişti! Sonradan bunun nedeninin Güneş'in devasa kütesi nedeniyle bükülen uzay-zaman örtüsü olduğu anlaşıldı. Merkür Güneş'e en yakın gezegen olduğu için bu bükülmeden en çok o etkileniyordu.

4

Yüksek Kütleçekim Alanında İlerleyen Işıktaki Gecikme

Astrofizikçi Irwin Ira Shapiro, genel göreliliğin dördüncü testi olarak bilinen bir başka test önerdi. Shapiro, 1964 yılındaki çalışmasında, gezegenlere gönderilip geri gelen radyo sinyallerinde görelî bir zaman gecikmesi olacağını tahmin etti. Buna Shapiro gecikmesi de denir. Örneğin, Dünya'dan bakış açınıza göre Güneş doğrultusunda ve Dünya'nun yörüngesindeki konumunun tam zıttı bir doğrultuda yer alan bir gezegeni ele alalım. O gezegene gönderdiğiniz radyo sinyali gezegenden yansıyıp alıcınıza gelmeden önce Güneş'in büktüğü uzay-zaman çukurundan, yani bükülmüş uzay-zaman örtüsünden geçmek zorunda kalacaktır. Bu nedenle, Dünya ile gözlenen cisim arasında Güneş'in olmadığı bir du-

ruma (yani iki cisim arasında uzay-zaman örtüsünü ciddi derecede bükken bir yıldızın olmadığı duruma) kıyasla radyo dalgası görece daha fazla yol almak zorunda kalacaktır. Bu da gelen sinyalde bir gecikmeye neden olacaktır. Bir başka deyişle, aralarında kuş uçuşu 100 km mesafe bulunan iki şehir arasında seyahat ederken düz bir yolu takip etmekle, engebeli ve inişli-çıkışlı bir yoldan gitmek arasında bir zaman farkı olacaktır. Bu şekilde yapılan deneylerle genel göreliliğin önerdiği gibi gelen sinyalde birkaç yüz mikro saniyelik bir gecikme olduğu saptandı. Benzer bir çalışma, Mars'a gönderilen Viking uyduları sayesinde de yapıldı ve %0,2 hassasiyetle genel göreliliğin öngördüğü zaman gecikmesi elde edildi.



5

Uzay-Zaman Dalgalanması

Einstein'ın yüz yıl önce varlığını ortaya attığı ve yıllardır belirlenmeye çalışılan uzay-zaman dalgaları ilk kez 14 Eylül 2015 tarihinde belirlendi. Eğer uzay-zaman bükülebilecek kadar esnek bir yapıya sahipse aynı zamanda dalgalanabilmeliydi de! El ele vermiş ve birbirini etrafında dönen iki kişi de uzay-zaman örtüsünde dalgalanmalar oluşturur ancak o dalgaları pratikte belirle-

mek neredeyse imkânsızdır. Diğer yandan, nötron yıldızı veya karadelikler gibi daha yoğun ve daha büyük kütleli cisimlerin etkileşmesi / birleşmesi / çarpışması söz konusu olduğunda onların oluşturduğu uzay-zaman dalgalanmasını belirlemek kolaylaşır.

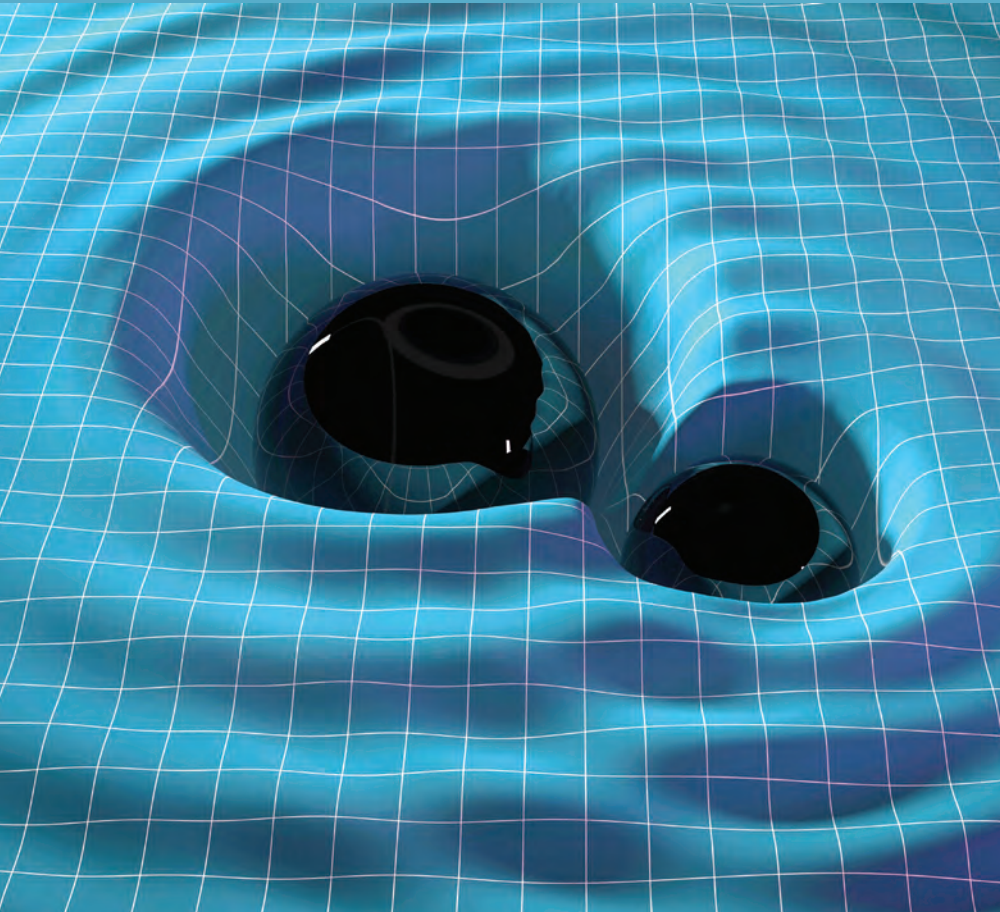
Bir su birikintisine taş attığınızı düşünün. Attığınız taşın büyüklüğüne ve suya çarpış şiddetine göre oluşan dalgaların şiddeti de değişim gösterecektir. Dalgalar su birikintisinin kenarına doğru ilerledikçe dalgaların şiddetinin azaldığını gözlersiniz. Uzay-zaman dalgalarının oluşmasına neden olan olay ve dalgaların yayılım şekli de buna benzetilebilir. Evrenin çok uzak bir noktasındaki bir olay nedeniyle ortaya

çıkan uzay-zaman dalgalanmasının milyarlarca ışık yılı yolculuktan sonra Dünya'daki alıcılarımız tarafından belirlenebilir düzeyde olması için uzay-zaman dalgalanmasına neden olan olayın yeterince şiddetli olması gerekir.

Einstein, eğer iki devasa kütle birbiri etrafında hızlı bir şekilde dönmüyorsa uzay-zaman dalgalanmasına neden olurlar ve birleşirlerse/ çarpışırlarsa uzay-zaman örtüsünde çok şiddetli bir dalgalanma oluşabilir, demişti. Böyle bir uzay-zaman dalgalanmasının kaynağı şunlar olabilir:

- Çarpışan/birleşen nötron yıldızları
- Birleşen iki karadelik
- Beyaz cüce çiftleri
- Süpernova patlamaları
- Büyük Patlama (Big Bang)
- Kompakt yıldızların (nötron yıldızı gibi) karadelikler tarafından yakalanması

Kütleçekim etkisiyle birbiri etrafında dolanan bu tarz cisimler helezon çizerek gittikçe birbirine yaklaşırken uzay-zaman örtüsünde oluşan dalgalanmaların genliği de artar. Bu cisimler şiddetli bir şekilde birleştiğinde ise ortaya öyle muazzam bir enerji çıkar ki milyarlarca ışık yılı büyüklüğünde bir mesafeyi katedebilecek dalgalar oluşturabilir. 14 Eylül 2015 tarihinde belirlenen uzay-zaman dalgalanmasını meydana getiren iki karadeliğin birleşmesi olayında ortaya çıkan ışınım gücü 3×10^{56} erg/s değerine eşitti. Bu değer,



GW170817

Nötron Yıldız Çifti Birleşmesi

LIGO / Virgo uzay-zaman dalgalanması tespiti ve ilişkili elektromanyetik olaylar 70'in üzerinde gözlemevi tarafından gözlemlendi.

15:41:04 TSI

Bir çift nötron yıldızının birleşmesi sonucu oluşan uzay-zaman dalgalanması tespit edildi.



Uzay-zaman dalgalanması sinyali

Her biri bir şehir boyutunda fakat en azından Güneş kütleğinde olan iki nötron yıldızı birbirleriyle çarpıştı.



GW170817 ilk kez uzay-zaman dalgalanmasını kullanarak evrenin genişleme hızını ölçmemizi sağladı.



Nötron yıldızlarının birleşmesi sonucu oluşan uzay-zaman dalgalanmasının belirlenmesi bu sıra dışı cisimlerin yapısı hakkında daha fazla bilgiye ulaşmamızı sağlar.



Bu olay nötron yıldızı çarpışmalarının kısa gama ışını patlamalarına neden olduğunu doğrular.



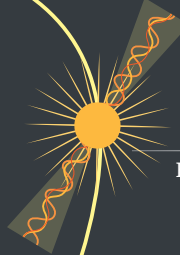
Bu kilonova olayının gözlenmesi evrende bulunan altın gibi ağır elementlerin çoğunluğunun nötron yıldızı birleşmesi sonucu oluşmuş olabileceğini gösterdi.



Hem elektromanyetik hem de uzay-zaman dalgalarının keşfedilmesi uzay-zaman dalgalarının da ışık hızında yayıldığını gösteren önemli bir kanıt sunar.

Gama ışın patlaması

Kısa gama ışın patlaması birleşmeden hemen sonra oluşan yoğun bir gama ışın radyasyonudur.

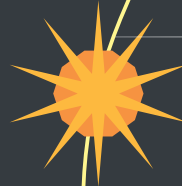


+2 saniye

Bir gama ışını patlaması belirlendi.

+10 saat 52 dakika

Suyıtları Takımyıldızı'nda NGC 4993 isimli bir galakside yeni parlak bir görsel ışık kaynağı keşfedildi.



Kilonova

Bozunmaya uğrayan nötronca zengin materyal, altın ve platinyum gibi ağır elementler üreten, parlak bir kilonova yaratır.

+11 saat 36 dakika

Kızılötesi ışınım gözlemlendi.

+15 saat

Parlak morötesi ışınım belirlendi.

+9 gün

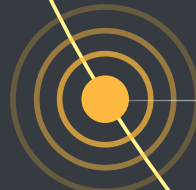
X ışını emisyonu belirlendi.

Radyo artık

Materyal birleşme bölgesinden uzaklaşırken yıldızlar arası ortamda (yıldızlar arasındaki incecek materyal) bir şok dalgası oluşturur. Bu yıllarca sürebilecek bir emisyon meydana getirir.

+16 gün

Radyo ışınım belirlendi.



Uzaklık: 130 milyon ışık yılı



Keşif Tarihi: 17 Ağustos 2017



Tip: Nötron yıldız birleşmesi

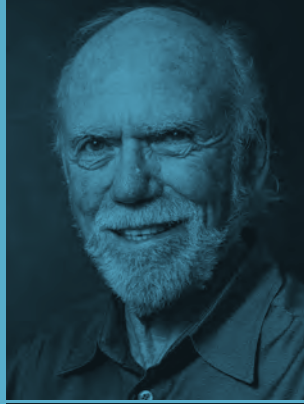
gözlenebilir evrendeki tüm yıldızların yüzeyinden saniyede uzaya salınan toplam ışınım gücünden daha fazladır! Büyük Patlama'dan sonra insanlığın tanımladığı en şiddetli olay bu gözlemlerle belirlenmiş oldu.

İlk uzay-zaman dalgalanması keşfini LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) adı verilen bir gözlemevi yaptı. LIGO'ya benzer gözlem araçlarının çalışma prensibi hakkında birkaç şey söyleyelim. LIGO birbirine dik iki tane kola sahip bir yapı. Eğer bu kollara bir uzay-zaman dalgalanması etki ederse kolların boyu uzayıp kısabilir. Ama inanılmaz derecede minik, atomik boyutlarda! İşte LIGO tam olarak bunu ölçtü. Uzay-zaman dalgalanması Dünya'ya yaklaşık bir atom çekirdeğinin boyutu kadar genişletip daralttı!

Evreni anlama çabamızda çığır açan bu keşfi olanaklı kılan Rainer Weiss, Barry C. Barish ve Kip S. Thorne 2017 yılı Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldüler. Bu keşifler sadece uzay-zaman dalgalanmasının varlığını ve dolayısıyla genel görelilik teorisinin geçerliliğini kanıtlamıyor. Aynı zamanda karadelikleri direkt olarak gözleyebilmemizi de sağlıyorlar. Bildiğiniz gibi karadeliklerden ışık bile kaçamadığı için onları doğrudan gözleyemeyiz. Ancak bir karadeliğin etrafında dolanan (veya içerisine düşen) bir gaz bulutu veya yıldız var ise karadeliğin varlığını dolaylı yoldan belirleyebiliriz. Örneğin içinde bulunduğumuz galaksi olan Samanyolu'nun mer-



Rainer Weiss



Barry C. Barish



Kip S. Thorne

kezindeki süper kütleli karadeliğin bu yolla keşfedildi. Ancak bu tarz keşifler için elektromanyetik tayfın belli bölgelerinde (görülebilir ışın, x ışını ve gama ışını gibi) ışınım almak gerekir. Uzay-zaman dalgalanması ise farklı olarak uzay-zaman örtüsündeki fiziksel dalgaların belirlenmesi prensibine dayanıyor. Artık evreni incelemenin yepyeni bir yoluna sahibiz!

6

Karadeliğin "Fotoğrafı"

Yirminci yüzyılın başlarında evreni ve onun içindeki yerimizi hiç olmadığı kadar iyi anlamaya başladık. O günden bugüne yapılan en önemli bilimsel çalışmalardan biri de hiç şüphe yok ki bir karadeliğin "fotoğrafının" elde edildiği çalışmadır. Bizden 55 milyon ışık yılı ötede yer alan (1 ışık yılı yaklaşık 9,5 trilyon kilometredir) M87 galaksisinin merkezindeki süper kütleli karadeliğin etrafında yüksek hızda dolanan karbon monoksit gazının görüntüsü elde edildi. Her ne kadar M87'nin merkezinde yer alan karadeliğin 6,5 milyar Güneş kütlelerine sahip olsa da bulunduğu mesafe dikkate alındığında açılacak alan çok küçük bir alan kaplıyor. O kadar küçük bir alan ki onu görmeye çalışmak âdeta bizden 4000 km ötedeki bir madeni paraya bakmakla eşdeğer. Bu derece yüksek bir çözünürlüğe erişmek sadece bir teleskop ile imkânsızdır. Dolayısıyla, bu proje için Dünya'nın birçok yerinde konuşlanmış milimetre dalga boyuna özgü teleskoplar kullanıldı. Bu teleskoplar âdeta bir teleskop dizisi gibi davranıyordu ve senkronize ölçümler aldı. Bu teleskop dizisine *Olay Ufku Teleskobu (EHT - Event Horizon Telescope)* adı verildi. Elde edilen görüntüler

interferometri denilen bir teknik ile birleştirilerek 10.000 km çapında tek bir teleskop ile gözlem yapılmış gibi veri elde edilebildi.

Teleskop dizileri, çapları nispeten küçük ancak sayıca fazla teleskoptan oluşan sistemlerdir. Teleskobun çapı büyüdükçe çözünürlüğü artar. Bu sayede daha uzaktaki cisimler daha detaylı bir şekilde gözlenebilir. Ancak çok büyük çaplı tek bir teleskop yapmak hem pahalıdır hem de mühendislik anlamında çok

zordur. Bu nedenle, bazen gözlemler için nispeten daha küçük çok sayıda anten dizileri kullanılır. Karadeliğin çevresinin en detaylı görüntüsü bu sayede elde edildi.

Elde edilen görüntü genel göreliliğin önerdiği bir resmi ortaya çıkardı. Genel görelilik teorisine göre, karadeliğin yakın çevresindeki uzay-

zaman örtüsünün yüksek derecede bükülmesi nedeniyle, karadeliğin etrafında parlak foton halkasıyla çevrelenmiş siyah bir gölge oluşmalı. *EHT* ile yapılan gözlemler sayesinde "karadeliğin gölgesi" belirlendi. Bu sayede karadeliklerin varlığının ve dolayısıyla genel göreliliğin doğruluğunun gözlemsel bir testi daha başarılı bir şekilde yapılmış oldu.



7

Kütleçekimi Nedeniyle Zamandaki Uzama (Gravitational Time Dilation)

Güçlü kütleçekimden kaynaklanan zamandaki uzama (veya genişleme) özel görelilikteki hız nedeniyle oluşan zamandaki uzamadan farklıdır. 1971 yılında J. C. Hafele ve R. E. Keating tarafından yapılan deney hem özel hem de genel görelilik teorisinin doğruluğunun bir testi niteliğini taşıyordu. Deney, iki uçağa yerleştirilen ikişer adet sezyum atomik saatinin doğu ve batı yönünde Dünya'nın etrafında tur atması ile gerçekleştirildi. Saatler Dünya etrafında tur attıktan sonra Washington'da bulunan referans saatler ile karşılaştırıldı. Görelilik teorisine göre uçak doğu yönünde giderken yaklaşık 40 nano saniye zaman kaybetmeliyken, batı yönünde hareket ederken 275 nano saniye zaman kazanmalıydı. Deney sonucu elde edilen değerler hata payları içinde teorinin öngördüğü değerler ile uyuyordu. Doğu yönünde hareket eden saat 59 ± 10 nano saniye zaman kaybederken, batı yönünde hareket eden saat 273 ± 7 nano saniye zaman kazanmıştı.

Doğu yönünde giden uçak Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönüşü yönünde (batıdan doğuya doğru), batı yönünde giden uçak ise Dünya'nın dönüşünün aksi istikamette gidiyordu. Washington'da bulunan referans saatler ise Dünya'nın dönme hızında hareket ediyordu. Bu nedenle doğuya doğru giden uçağın içindeki saatler Washington'da bulunan referans saatlere kıyasla daha hızlı, batı yönünde giden uçaktaki saatler ise referans saatlere kıyasla daha yavaş hareket ediyordu.

Uçaklar bu iki yönde ilerlerken oluşan zaman farklarının eşit olmasının nedeni, sadece Dünya'nın dönüş hızı değil, uçakların yer yüzeyinden yani Dünya'nın kütleçekim merkezinden olan uzaklığıdır. Washington'da bulunan saatler uçakla yolculuk yapan ve yerden

belli bir yükseklikte bulunan saatlere kıyasla yerin ağırlık merkezine daha yakındır. Yer yüzeyinde bekleyen saatler yer çekimi ivmesini hissederken ($1g$ yani $9,8 \text{ m/s}^2$), uçaktaki saatler minik de olsa daha az yer çekim ivmesine maruz kalır. Yani kütleçekim alanındaki yükseklik de zamanı etkiler.

Dolayısıyla, bu deneyde zamana etki eden iki faktör vardır: kinematik (hıza bağlı) ve kütleçekimsel (kütleyle bağlı) etki. Günümüzde, uçaklardan daha hızlı bir şekilde Dünya etrafında dolanan ve uçaklara kıyasla potansiyel çukurunda daha yüksekte bulunan (yer yüzeyinden ortalama 20.000 km yukarıda) GPS uyduları Hafele ve Keating deneyinin doğal ve daha duyarlı bir uygulaması hâline geldi.





8

Pulsar Zamanlama Yöntemi (Pulsar Timing)

Pulsarlar hızla dönen nötron yıldızlarıdır. Nötron yıldızları Güneş'ten çok daha büyük kütleli yıldızların şiddetli bir patlama sonrası bıraktıkları yıldız kalıntılarıdır. Nötron yıldızlarının çapı sadece bir kasaba büyüklüğünde olsa da kütlesi yıldızımız Güneş'ten daha büyüktür.

Pulsarlar çok hızlı döndükleri için çok güçlü manyetik alan oluştururlar. Bunun sonucunda kutuplarından güçlü elektromanyetik radyasyon yayarlar. Bir pulsar tarafından

üretilen radyo sinyalleri çok düzenli değişim gösterir. Bir atomik saatten bile daha hassas olabilirler. Pulsarlar ilk kez 1967 yılında Jocelyn Bell Burnell tarafından keşfedildi. Ancak o dönemde bir doktora öğrencisi olan Burnell değil, projeyi beraber yürüttüğü danışmanı Anthony Hewish bu keşif nedeniyle 1974 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldü.

Pulsarlar sahip oldukları yüksek kütleçekim alanı nedeniyle genel göreliliği birçok yönden test

etmeye olanak tanır. Kütleçekimsel kırmızıya kayma, uzay-zaman dalgalanması, kütleçekimi nedeniyle zamandaki genişleme ve Shapiro gecikmesi pulsarlar sayesinde test edilebilir.

1974 yılında PSR 1913+16 isimli ilk pulsar çifti o dönem doktora öğrencisi olan Russell Alan Hulse ve onun danışmanı Joseph H. Taylor tarafından keşfedildi. Hulse keşfettikleri pulsarın sinyalini daha duyarlı bir şekilde elde etmeye çalışırken veride bir gariplik olduğunu fark etti. Bu garipliği daha detaylı bir şekilde incelemeye devam edince, bu pulsarın aslında bir pulsar çiftinin üyesi olduğunu anladı. İlk kez keşfedilen bu pulsar çifti Hulse ve Taylor'a 1993 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü getirdi. Pulsar çiftleri birbirine ve buldukları uzay-zaman örtüsüne uyguladıkları şiddetli kütleçekim etkisi nedeniyle genel görelilik teorisinin işaret ettiği yukarıda açıklanan fenomenlerin daha kolay test edilmesine olanak tanır.

Pulsar zamanlama yönteminin amacı, zamana bağlı olarak pulsar için bir zonklama evresi modeli oluşturmaktır. Bu sayede ölçüm aletlerimize ulaşacak her pulsar sinyalinin varış zamanı iyi bir hassaslıkla tahmin edilebilir ve sinyalin yayılım doğrultusunda başka bir etki varsa belirlenebilir. Örneğin, eğer pulsar ile Dünya arasında bir uzay-zaman dalgalanması varsa, bu dalga pulsar sinyalinde kırmızıya veya maviye kaymaya

neden olabilir. Sadece bir pulsarın gözlemi ile böyle bir kaymanın varlığı direkt olarak uzay-zaman dalgalanmasına bağlanamayabilir. Bu nedenle bir dizi pulsarın gözlemi yapılırsa uzay-zaman dalgalanması her bir pulsarın sinyaline bir korelasyon ilişkisi ile etki edecektir. Bu sayede uzay-zaman dalgalanmasının varlığı, dolayısıyla genel görelilik teorisinin doğruluğu test edilebilir.

Yukarıda açıklanan ve Güneş'in kütleçekim etkisi nedeniyle Merkür'ün yörüngesinde meydana gelen değişime benzer bir değişim, daha belirgin bir biçimde PSR 1913+16 pulsar çiftinde de gözlemlendi. Nitekim, ağırlık merkezi etrafında dolanan iki cisimden biri diğerinin yörüngesini etkileyecektir. Pulsarları kullanarak yapılan bu ve buna benzer birçok test genel görelilik teorisinin doğruluğunu başarılı bir şekilde kanıtladı. ■

Bu yazıya konu olan testler dışında yukarıda açıklanan fenomenleri test eden birçok başka çalışma da yapıldı ve yapılan her test genel göreliliğin ya da bir başka ifadeyle kütle-nin uzay-zaman örtüsüne etkisinin doğruluğunu kanıtladı.

Teoriler sürekli test edilir. Hem teorik hem de teknolojik gelişmeler testlerin daha hassas yapılmasına ve söz konusu teorisinin daha iyi bir şekilde, yani daha küçük hata payı ile test edilmesine olanak tanır. Durmaksızın ilerleyen bilim ve teknoloji bize gösteriyor ki şu an testi mümkün olmayan birçok başka teori de gelecekte test edilebilecek.

Kaynaklar

- https://www.relativitycalculator.com/pdfs/einstein_1916_general_relativity_paper.pdf
- <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.3.439>
- <https://eclipse1919.org/index.php/the-expeditions>
- <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.13.789>
- <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1979ApJ...234L.219R>
- <https://science.sciencemag.org/content/365/6454/664>
- <https://science.sciencemag.org/content/177/4044/166>
- Isaac Newton, *Principia*, 1687