

2

Uzay ve Zaman

Cisimlerin hareketi konusunda bugünkü düşüncelerimizin tarihi Galileo ve Newton'a dek uzanır. Onlardan önce insanlar, bir cismin doğal halinin hareketsizlik olduğunu ve ancak bir kuvvet veya itki tarafından harekete geçilirse devineceğini söyleyen Aristoteles'e inanırlardı. Aynı şekilde ağır bir cisim hafif bir cisme oranla dünyaya daha fazla çekileceği için onun daha hızlı düşeceği kabul edilirdi.

Aristotelesci gelenekte evrende hüküm süren yasalara saf düşünce yoluyla ulaşılabileceğine de inanılırdı: Dolayısıyla gözlem yoluyla kontrol etmeye gerek yoktu. Anlayacağınız Galileo'ya dek kimse farklı ağırlıkta cisimlerin gerçekten de farklı hızlarda düşüp düşmediğini denetleme zahmetini göstermedi. Rivayete göre Galileo, Aristoteles'in inancının yanlışlığını yana yatık ünlü Pisa Kulesi'nden aşağıya ağırlıklar atarak göstermiş. Tabii bu hikâye büyük olasılıkla uydurma, ama Galileo'nun buna denk bir şey yaptığı da doğru: Farklı ağırlıklara sahip topları düz ve eğimli bir yüzeyde aşağıya doğru yuvar-

lamış. Buradaki durum dikey olarak aşağı düşen ağır cisimlerin durumuyla benzerdir, ancak hızlar daha küçük olduğu için gözlem yapmaya daha uygundur. Galileo'nun ölçüm sonuçları, ağırlıkları ne olursa olsun her cismin hızının aynı oranda arttığını gösterdi. Örneğin bir topun her on metrede bir metre alçalan bir eğimle gitmesini sağlarsanız, top bu açıda bir saniye sonra saniyede bir metre hızla hareket edecek, iki saniye sonra saniyede iki metre hızla devam edecek ve topun ağırlığı ne olursa olsun bu böyle sürecektir. Elbette kurşundan bir ağırlık tüyden olana göre daha hızlı düşecektir, ancak bunun tek nedeni tüyün düşerken hava direnci nedeniyle yavaşlamasıdır. Fazla hava direnciyle karşılaşmayan iki cisim atılırsa, örneğin iki farklı ağırlıkta kurşun cisim, ikisi de aynı hız oranında düşecektir. Havanın, dolayısıyla cisimleri düşerken yavaşlatacak herhangi bir şeyin olmadığı ay üzerinde astronot David R. Scott bu tüy ve kurşun ağırlık deneyini gerçekleştirmiş ve gerçekten her ikisinin de yere aynı zamanda ulaştıklarını tespit etmiştir.

Newton kendi hareket yasalarını temellendirirken Galileo'nun ölçümlerinden faydalandı. Galileo'nun deneylerinde cisim, eğimli yüzeyde yuvarlanırken cisme hep aynı kuvvet (cismin ağırlığı) etkiliyor ve bunun etkisi de hızının sabit oranlı artması oluyordu. Bu bir kuvvetin gerçek etkisinin her zaman cismin hızını artırmak olacağını, daha önce düşünüldüğü gibi sadece cismi harekete geçirmekle yetinmediğini gösteriyordu. Aynı zamanda bir cisim herhangi bir kuvvet tarafından harekete geçirilmediğinde, cismin düz bir çizgide aynı hızla ilerlemeye devam edeceği anlamına da geliyordu. Bu fikir açık bir şekilde ilk kez 1687'de Newton'un *Principia Mathematica*'sında ifade edildi ve bugün de Newton'un birinci yasası olarak bilinmektedir. Cisme başlangıçta bir kuvvet etkidiğinde ne olacağı da Newton'un ikinci yasasında anlatılır. Buna

göre cisim ivmelenir, başka bir ifadeyle hızı kuvvetle doğru orantılı olarak değişir. (Örneğin kuvvet iki kat artarsa, ivme de iki kat artar.) İvme, cismin kütlesi (ya da madde niceliği) ne kadar büyükse o kadar küçüktür. (Aynı kuvvet, kütlesi iki kat daha büyük bir cisme etkidiğinde, ivme yarı yarıya düşer.) Benzer bir örneği arabalarda görürüz: Motor ne kadar kuvvetliyse ivme o ölçüde büyüktür, ancak araba ne kadar ağırsa aynı motor koşullarında ivme o ölçüde küçük olur. Hareket yasalarına ek olarak Newton ayrıca kütleçekim kuvvetini ortaya koyan bir yasa keşfetmiştir. Buna göre her cisim bir diğer cismi her bir cismin kütlesiyle orantılı bir kuvvetle çeker. Bu yüzden cisimlerden birinin (diyelim ki A cismi) kütlesi ikiye katlandığında, iki cisim arasındaki kuvvet iki kat daha güçlü olacaktır. Bunun çok da şaşırtıcı olmadığını şöyle görebiliriz: Yeni A cisminin ilk kütleyle sahip iki cisimden oluştuğunu düşünelim. Her ikisi de B cismini ilk kuvvetle çekeceklerdir. Bu yüzden A ile B arasındaki toplam kuvvet de ilk kuvvetin iki katı olacaktır. Diyelim ki cisimlerden birinin kütlesi iki kat, diğerinin kütlesi üç kat arttı, bu durumda kuvvet altı kat daha fazla olacaktır. Artık tüm cisimlerin aynı hızda düşmesinin nedenini anlayabiliriz: Ağırlığı iki kat olan bir cisim, kendisini aşağıya çeken iki kat büyüklükte bir kütleçekim kuvvetine sahip olacaktır, ama aynı zamanda kütlesi de iki kat artmış olacaktır. Newton'un ikinci yasasına göre bu iki etki birbirini tam olarak yok edecek, dolayısıyla ivme her durumda aynı kalacaktır.

Newton'un kütleçekim yasası aynı zamanda bize cisimler birbirlerinden ne kadar uzaksa kütleçekim kuvvetinin de o kadar küçük olacağını söyler. Newton'un kütleçekim yasası uyarınca bir yıldızın kütleçekim kuvvetinin etkisi, yarı yarıya daha yakın benzer bir yıldızın kütleçekim kuvveti etkisinin dörtte birine eşittir. Bu yasa dünyanın, ayın ve gezegenlerin yörüngelerini oldukça bü-

yük bir kesinlikte öngörmektedir. Yasa bir yıldızın kütleçekim kuvveti etkisinin uzaklıkla orantısının daha hızlı düştüğü veya daha yavaş arttığı bir biçimde olsaydı, bu durumda gezegenlerin yörüngeleri elips şeklinde olmaz, ya güneşe doğru sarmal biçim alarak yaklaşır ya da güneşten uzaklaşırdı.

Aristoteles ile Galileo ve Newton'un fikirleri arasındaki farklılık, Aristoteles'in cisimlerin belli bir kuvvet veya itki tarafından hareket ettirilmedikçe eylemsizlik durumunda kalmayı tercih ettiklerine inanmasıydı. Bu bakışla dünyanın da hareketsiz olduğu düşüncesindeydi. Ancak Newton'un yasalarından çıkan sonuç, özel bir eylemsizlik standardının var olmamasıydı. Hem A cisminin hareketsiz, B cismininse A cismine göre sabit bir hızla hareket ettiğini söylemek hem de B cisminin hareketsiz, A cisminin hareketli olduğunu söylemek mümkündü. Örneğin bir an için dünyanın kendisinin ve güneşin etrafında dönmelerini bir kenara koyarsak, dünyanın hareketsiz ve onun üzerindeki bir tramvayın doğu yönünde saatte otuz mil hızla hareket ettiğini söylemek de, tramvayın hareketsiz ve dünyanın batı yönünde saatte otuz mil hızla hareket ettiğini söylemek de mümkündür. Tramvay üzerinde hareket eden cisimlerle ilgili deneyleri yaptığımızda Newton yasalarının tümü geçerli olur. Örneğin tramvay üzerinde masa tenisi oynarsak, pinpon topunun rayların yanındaki bir masada oynandığında tabii olduğu aynı Newton yasalarına uyumlu davrandığını görürüz. Dolayısıyla hareket edenin tramvay mı, yoksa dünya mı olduğunu söylemenin yolu yoktur.

Mutlak bir eylemsizlik standardının yokluğu, farklı zamanlarda gerçekleşen iki olayın uzayda aynı konumda gerçekleşip gerçekleşmediklerini tespit edememek anlamına gelir. Örneğin trenin üzerindeki pinpon topumuzun masada aynı yere birer saniye arayla iki kez çarparak

doğrudan yukarıya ve aşağıya sektiğini varsayalım. Kenedeki biri için iki sekme birbirinden on üç metre arayla olmuş gibi görünür, çünkü iki sekme arasında tramvay yerdeki kişiden uzağa doğru bu mesafeyi kat etmiş olacaktır.

Mutlak eylemsizliğin var olmayışı bir olaya bu yüzden Aristoteles'in inandığı üzere uzayda mutlak bir konum verilemeyeceği anlamına gelir. Olayların konumları ve olaylar arasındaki mesafeler tramvaydaki bir insan için farklı, yerdeki bir insan için farklı olacaktır ve bir insanın konumunu diğerine tercih etmenin gereği de yoktur.

Newton oldukça kaygılanır, çünkü bahsettiğimiz mutlak konumun veya yaygın tabirle mutlak uzayın yokluğu, mutlak Tanrı'nın varlığı fikriyle uyumlu değildir. Gerçekten de Newton kendi yasalarından çıkarılabilmesine karşın, mutlak uzayın yokluğunu kabul etmeyi reddetmiştir. Bu irrasyonel inancı yüzünden birçok kişi tarafından ağır eleştirilere uğrar. Eleştirenler içerisinde en dikkat çekenlerden biri, tüm maddi nesnelere, uzayın ve zamanın bir göz yanılmasından ibaret olduğuna inanan felsefeci piskopos Berkeley'dir. Ünlü Dr. Johnson'a Berkeley'in görüşüne ne dediği sorulduğunda, "Bunu böyle çürütebilirim!" diye bağırarak yerdeki büyük bir taşla tekmeyi basar.

Aristoteles de Newton da mutlak zamana inanmaktaydılar. Başka bir deyişle iki olay arasındaki zaman aralığının açık bir biçimde ölçülebileceğine ve bu zamanın iyi bir saat kullanma koşuluyla kim ölçerse ölçsün aynı olacağına inanmaktaydılar. Zaman uzaydan tamamen ayrı ve bağımsızdı. Çoğu insanın sağduyulu yaklaşımla benimsediği de bu olurdu. Ancak uzay ve zaman hakkındaki fikirlerimizi değiştirmek durumunda kaldık. Her ne kadar görünüm itibarıyla sağduyulu görüşlerimiz, bizler elmalarla veya görece yavaş hareket eden gezegenlerle uğraşırken gayet güzel iş görse de, ışık hızında veya ışık

hızına yakın hızlarda hareket eden şeylerde hiçbir işe yaramıyorlar.

Işığın sonlu ancak çok yüksek bir hızla hareket ettiği gerçeği ilk olarak 1676 yılında Danimarkalı astronom Ole Christensen Roemer tarafından keşfedildi. Roemer, Jüpiter'in uydularının sabit bir hızla dönmeleri beklentisiyle uyumlu olarak Jüpiter'in arkasından geçerek gölgede kalma sayılarının eşit aralıklı olmadığını gözlemledi. Dünya ve Jüpiter güneşin yörüngesinde hareket ettikçe aralarındaki uzaklık da değişmekteydi. Roemer Jüpiter'in uydu tutulmalarının biz Jüpiter'den ne kadar uzaksak o kadar geç görüldüğünü fark etti. Bunun nedeninin uyduların ışığının uzaktayken bize ulaşmasının daha uzun sürmesi olabileceğini ortaya attı. Ancak dünya ile Jüpiter arasındaki uzaklık değişimine ilişkin yaptığı ölçümlerin kesin olduğu söylenemezdi, dolayısıyla bugün saniyede yaklaşık 300.000 km değerini ölçmemize karşın, onun ışık hızı hesabı saniyede 225.000 kilometreydi. Her şeye karşın Roemer'in sadece ışığın sonlu bir hızla hareket ettiğini kanıtlamakla kalmayıp bu hızı yaklaşık bir hespla ölçmeyi de becerebilmesi olağanüstü bir başarıydı; hem de bunu Newton'un *Principia Mathematica'sı* basılmadan on bir yıl önce yaptığını göz önüne almalıyız.

Işığın yayılımına ilişkin bütünsel bir kuramın ortaya çıkması için 1865 yılında İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell'in o döneme dek elektrik ve manyetizma kuvvetlerini betimlemek için kullanılan kısmi kuramları birleştirmeyi başarmasına dek beklemek zorunda kaldık. Maxwell'in denklemleri birleşik elektromanyetik alanda dalgaya benzeyen sapsmaların olabileceğini ve bunların bir göldeki dalgalanmalar gibi sabit bir hızda hareket edebileceğini öngörüyordu. Bu dalgaların dalga boyu (bir dalganın tepe noktası ile diğerinin tepe noktası arasındaki uzaklık) bir metre veya daha fazlaysa, bunlara bu-

gün verdiğimiz isimle radyo dalgaları denir. Daha kısa dalga boyları ise mikrodalgalar (birkaç santimetre) veya kızılaltı (bir santimetrenin on binde birinden küçük) olarak bilinirler. Görünür ışık sadece bir santimetrenin kırk ila seksen milyonda biri arasında bir dalga boyuna sahiptir. Bundan da kısa dalga boyları olarak ise morötesi, X ışınları ve gama ışınlarının varlığı bilinmektedir.

Maxwell'in kuramı radyo veya ışık dalgalarının belirli bir sabit hızla hareket etmeleri gerektiğini öngörüyordu. Ancak Newton'un kuramı mutlak eylemsizlik fikrinden kurtulmayı sağladığına göre, eğer ışık sabit bir hızla hareket etmek zorundaysa bu durumda bu sabit hızın neye göre ölçüleceğinin sorulması mümkündür. Bu yüzden "eter" ya da "esir" denen bir maddenin her yerde, hatta "boş" uzayda bile bulunduğunu varsaymak gerekmiştir. Işık dalgalarının tıpkı ses dalgalarının hava içerisinde hareket etmesi gibi bu esirin içerisinde hareket etmesi ve bu sayede hızlarının da esire göre olması gerekmektedir. Böylece esire göreli hareket eden farklı gözlemciler ışığın kendi üzerlerine farklı hızlarda geldiğini görecektir, fakat ışığın esire göre hızı sabit kalabilecekti. Bu durumda dünya esir içerisinde kendi yörüngesini izleyerek güneşin etrafında dönerken, dünyanın esir içerisindeki hareketi yönünde (biz ışığın kaynağına doğru hareket ederken) ölçülen ışık hızının, bu hareketin dik açılarındaki (biz ışığın kaynağına doğru hareket etmiyorken) ölçülen ışık hızından daha büyük olması gerekir. 1887 yılında Albert Michelson (daha sonra Nobel fizik ödülüne layık görülen ilk Amerikalı olacaktır) ve Edward Morley, Cleveland'daki Case School of Applied Science'ta [Uygulamalı Bilimler Okulu] çok dikkatli bir deney gerçekleştirdiler. Dünyanın hareket yönündeki ışık hızı ile dünyanın hareketine dik açılardaki ışık hızını karşılaştırdılar. Büyük bir şaşkınlıkla her ikisinin de aynı olduğu sonucuna ulaştılar!

Michelson-Morley deneyinin sonucunu esirin içerisinde den geçerken nesnelere büzüşmesi ve saatlerin yavaşlaması yolundan giderek açıklamak için, 1887 ile 1905 arasında, içlerinden en dikkat çeken Danimarkalı fizikçi Hendrik Lorentz tarafından hayata geçirilen bir dizi girişimde bulunuldu. Ancak 1905 yılındaki ünlü makalesinde, o güne dek İsviçre patent bürosunda adı sanı duyulmadık bir memur olan Albert Einstein tüm bu esir fikrinin aslında mutlak zaman fikrini terk etmeyi göze aldığınızda tamamıyla gereksiz olduğunu söyledi. Benzer bir görüş ondan birkaç hafta sonra ünlü Fransız matematikçi Henri Poincaré'den geldi. Einstein'ın gerekçeleri sorunu matematiksel yönden ele alan Poincaré'ninkilere göre fiziğe daha yakındı. Yeni kuramın sahibi olma onuru genelde Einstein'a atfedilir, ancak Poincaré de bu kuramın önemli bir bölümüne adının eklenmesiyle anılır.

Görelilik kuramı olarak adlandırılan bu kuramın temel postülası, bilimin yasalarının serbest hareket eden tüm gözlemciler için hızları ne olursa olsun aynı olması gerektiğidir. Newton'un hareket yasalarında olan bu fikir şimdi Maxwell'in kuramını ve ışık hızını da kapsayacak şekilde genişletilmekteydi: Tüm gözlemciler ne hızla hareket ederlerse etsinler ışık hızını aynı ölçmelidirler. Bu basit fikrin çığır açıcı sonuçları vardır. Bunlardan muhtemelen en bilineni Einstein'ın ünlü denklemi $E=mc^2$ 'de özetlenen kütle ile enerjinin denkliği ve hiçbir şeyin ışık hızından daha hızlı hareket edemeyeceğidir. Enerji ile kütleliğin denkliği nedeniyle bir nesnenin hareketi sayesinde sahip olduğu enerji, külesine eklenecektir. Başka bir deyişle bu, hızını arttırmayı daha zor hale getirecektir. Aslına bakılırsa bu etki sadece ışık hızına yakın hızlarda hareket eden nesnelere için önem taşımaktadır. Örneğin ışık hızının yüzde 10'unda bir nesnenin kütlesi normalden sadece yüzde 0,5 oranında fazladır, ancak

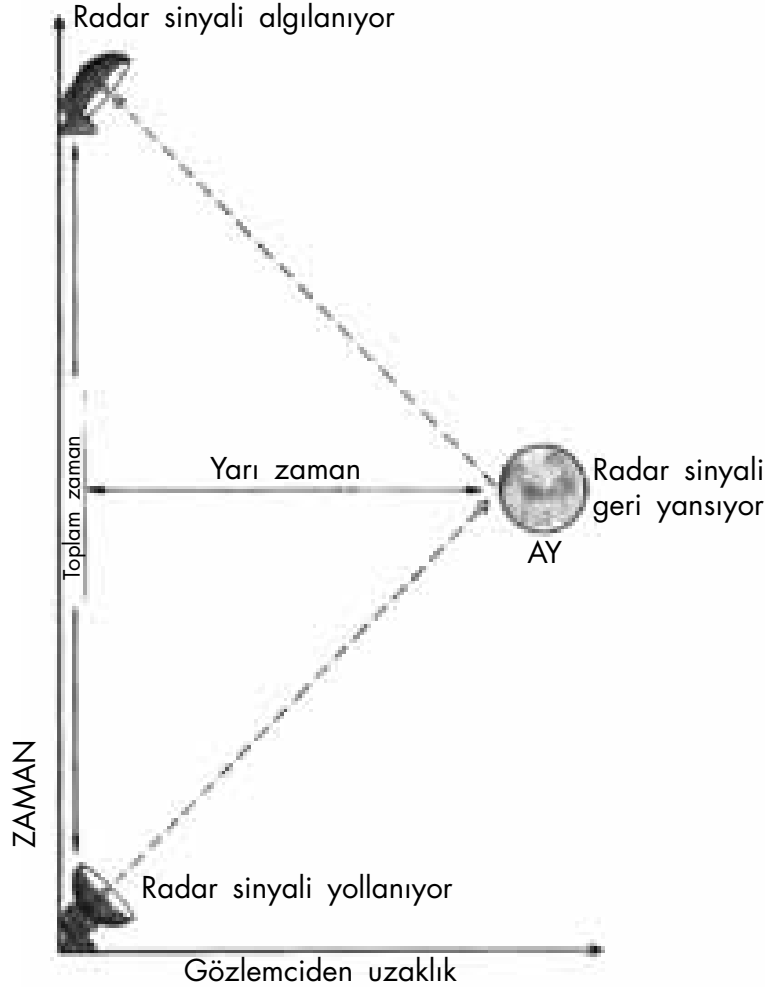
ışık hızının yüzde 90'ında aynı nesne normal kütlesinin iki katına ulaşır. Bir nesne ışık hızına yaklaştıkça kütlesi her zamankinden daha fazla artar, dolayısıyla daha fazla hızlanması için giderek daha fazla enerji gerekir. Nesne gerçekte asla ışık hızına ulaşamaz, çünkü ulaştığında kütlesinin de sonsuz olması gerekir ve kütle ile enerji denkliği gereği de bu noktaya ulaşması için sonsuz miktarda enerji gerekir. Bu nedenle normal nesnelere görelik tarafından ışık hızından daha yavaş hızlarda hareket etmeye mahkûm edilmişlerdir. Sadece ışık veya içsel kütlesi olmayan diğer dalgalar ışık hızında hareket edebilirler.

Göreliliğin bir diğer çarpıcı sonucu da bizim uzay ve zaman hakkındaki fikirlerimizi kökten değiştirmiş olmasıdır. Newton'un kuramında bir ışık sinyali bir yerden başka bir yere yollandığında, farklı gözlemciler bu seyahatin gerçekleştiği zaman konusunda hemfikir olmakta güçlük çekmezler (zaman mutlak olduğu için), ama ışığın ne kadar uzağa gittiği konusunda her zaman aynı fikirde olmazlar (uzay mutlak olmadığı için). Işığın hızı, aldığı mesafe bölü kullandığı süre olduğu için, farklı gözlemciler farklı ışık hızları ölçeceklerdir. Öte yandan görelikte tüm gözlemciler ışığın hangi hızda hareket ettiği konusunda hemfikir olmak *zorundadır*. Ancak halen ışığın katettiği mesafe konusunda aynı fikirde değildirler, dolayısıyla şimdi geçen süre konusunda da anlaşamamış olmaları gerekir. [Geçen süre (gözlemcilerin üzerinde anlayamadığı) ışığın katettiği mesafe bölü (gözlemcilerin anlaştığı) ışığın hızıdır.] Başka bir deyişle görelik kuramı mutlak zaman fikrine son vermektedir! Her gözlemcinin yanında taşıdığı bir saat tarafından kaydedilen kendi ışık ölçümüne sahip olmak zorunda olduğu ve farklı gözlemcilerin taşıdığı özdeş saatlerin aynı sonucu vermelerinin gerekmediği sonucu çıkmaktadır.

Gözlemcilerin her biri, bir ışık sinyali veya radyo dalgası gönderme yoluyla gerçekleşen bir olayın nerede ve ne zaman olduğunu söylemek için birer radar kullanabilir. Olay esnasında sinyalin bir bölümü geri yansır ve gözlemci yansımanın kendisine ulaştığı zamanı ölçer. Böylece olayın zamanının sinyalin gönderilme zamanı ile yansımanın gözlemciye ulaştığı zamanın arasındaki ortada olduğu söylenebilir: Olayın uzaklığı, git-gel dahil tüm yolculuğun tuttuğu zamanın yarısı çarpı ışık hızıdır. (Anlattığımız bu olay uzayda tek bir noktada ve zamanda belirli bir noktada gerçekleşmektedir.) Şekil 2.1'de gösterilen söz konusu fikir bir uzayzaman diyagramı örneğidir. Bu yolu izleyerek birbirlerine göreli hareket eden gözlemciler aynı olaya farklı zamanlar ve konumlar atfederler. İçlerinden özel bir gözlemcinin diğerlerine göre daha doğru ölçüm yaptığı söylenemez, ancak ölçümlerin hepsi birbiriyle bağlantılıdır. Gözlemcilerin her biri, diğer gözlemcinin görelî hızını bilmek şartıyla, bir başka gözlemcinin bir olaya hangi zaman ve konumu atfedeceğini tam olarak tespit edebilir.

Günümüzde uzaklıkları kesin olarak ölçmek için de bu yöntemi kullanıyoruz. Bunun nedeni zamanı uzunluğa göre daha kesin bir biçimde ölçebiliyor olmamız. Gerçekten de, bir metre bugün sezyum saatiyle ölçülen, ışığın 0,00000003335640952 saniyede katettiği uzaklık olarak tanımlanıyor. (Bu tuhaf sayının kullanılmasının nedeni Paris'te tutulan özel bir platin çubuğun üzerindeki iki çizgi arasındaki uzaklıkla ifade edilen metrenin tarihsel tanımına karşılık gelmesidir.) Bu anlamda yeni ve daha uygun bir uzunluk birimi olarak ışık saniyesini kullanmamız da mümkün. Işık saniyesi, ışığın bir saniyede katettiği uzaklık olarak tanımlanıyor. Görelilik kuramında bugün uzaklığı zaman ve ışık hızı cinsinden tanımlıyoruz, dolayısıyla bunun otomatik bir sonucu

olarak her gözlemci ışığı aynı hızda olacak şekilde ölçüyor (tanım gereği 0,000000003335640952 saniye başına bir metre). Michelson-Morley deneyinin gösterdiği üzere varlığı tespit edilemeyen bir esir fikrini devreye sokmanın gereği de kalmıyor. Ancak görelilik kuramı bizi uzay ve zaman hakkında sahip olduğumuz fikirleri temelden değiştirmemiz yönünde zorluyor. Zamanın uzaydan tamamıyla ayrı ve bağımsız olmadığını, onunla birleşerek uzayzaman denilen bir nesneyi biçimlendirdiğini kabul etmemiz gerekiyor.



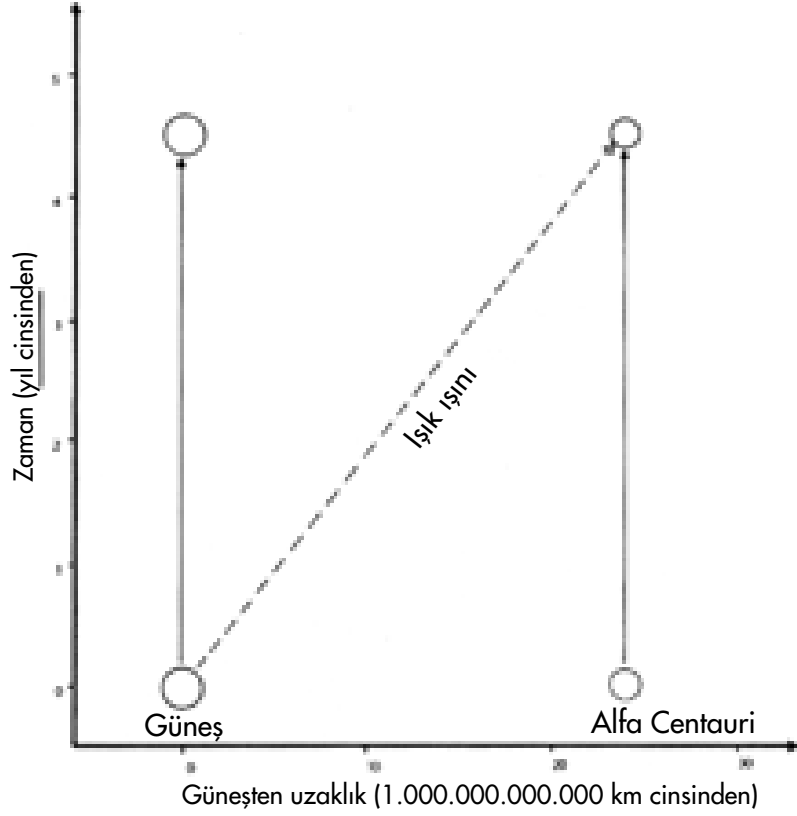
Şekil 2.1 Zaman dikey, gözlemciden uzaklık yatay olarak gösterilmiştir. Soldaki dikey çizgi gözlemcinin uzay ve zamanda geçtiği yoldur. Işık ışınlarının olaya gidiş ve olaydan geliş yolları köşegen çizgilerdir.

Çoğumuz uzayda bir noktanın konumunu üç sayı veya koordinat aracılığıyla tarif edebildiğimizi biliriz. Örneğin odanın içerisindeki bir noktanın odanın bir duvarından iki metre, diğer duvarından bir metre, koridordan da bir buçuk metre uzakta olduğunu söyleyebiliriz. Benzer biçimde bir noktanın belirli bir enlemde, belirli bir boylamda ve belirli bir rakımda olduğunu söyleriz. İsteyen istediği üç uygun koordinatı kullanmakta özgürdür, tabii geçerlilik aralıklarının sınırlı olduğunu unutmamak kaydıyla. Ayın konumunu Piccadilly Meydanının şu kadar mil kuzeyinde, şu kadar mil batısında ve deniz seviyesinin şu kadar metre üstünde diye tarif etmek uygun olmaz elbette. Bunun yerine güneşten uzaklığı, gezegenlerin yörüngelerinin oluşturduğu düzlemden uzaklığı ve ayı güneşe bağlayan doğru ile güneşi yakındaki bir yıldızla örneğin Alfa Centauri'ye bağlayan doğru arasındaki açı cinsinden tanımlayabiliriz. Galaksimizdeki güneşin konumunu veya yerel galaksi grubu içindeki galaksimizin konumunu tanımlama açısından bu koordinatlar bile fazla işimize yaramaz. Aslına bakarsanız bütün evreni birbirinin üzerine binen parçaların bir derlemesi cinsinden tarif etmemiz de mümkün. Her bir parçada bir noktanın konumunu belirtmek için farklı üçlü koordinat kümeleri kullanılabilir.

Bir olay, uzayda belirli bir noktada ve belirli bir zamanda gerçekleşen bir şeydir. Bir olayı dört sayı veya koordinatla belirtebiliriz. Koordinatların seçiminin isteğe bağlı olduğunu tekrar belirtelim; iyi tanımlanmış herhangi üç uzamsal koordinat ve herhangi bir zaman ölçütü kullanılabilir. Görelilikte uzay ve zaman koordinatları arasında gerçek bir ayrım söz konusu değildir; aynı şekilde iki uzay koordinatı arasında da herhangi bir fark yoktur. Yeni bir koordinat kümesi seçimi yapılabilir ve bu seçimde bu kez birinci uzay koordinatı daha önceki

ilk uzay koordinatı ile ikincisinin birleşimi olacak şekilde olabilir. Örneğin dünya üzerindeki bir noktanın konumunu Piccadilly'nin şu kadar km doğusunda ve şu kadar km batısında biçiminde ölçmek yerine, Piccadilly'nin şu kadar kuzeydoğusunda ve kuzeybatısında şeklinde ölçmemiz de mümkündür. Görelilikte benzer biçimde yeni bir zaman koordinatı da kullanabiliriz, bu da eski zaman (saniye cinsinden) ile Piccadilly'den kuzey yönünde uzaklığın (ışık saniye cinsinden) toplamı olabilir.

Bir olayın dört koordinatını, olayın konumunu uzay-zaman adını verdiğimiz dört boyutlu bir uzayda belirtiyormuş gibi ele almamız genellikle kolaylık sağlayacaktır. Dört boyutlu bir uzayı zihninizde canlandırmak olanaksızdır. Şahsen ben üç boyutlu uzayı bile gözümün önünde canlandırmakta zorlanıyorum! Öte yandan dünyanın yüzeyi gibi iki boyutlu diyagramları çizmekse kolaydır. (Dünyanın yüzeyi iki boyutludur, çünkü bir noktanın konumu iki koordinat, enlem ve boylam aracılığıyla belirtilebilir.) Genelde benim kullandığım diyagramlarda da zaman dikey olarak artarken uzamsal boyutlardan biri de yatay olarak gösteriliyor. Diğer iki uzamsal boyut ya göz ardı ediliyor ya da bazen birisine perspektif aracılığıyla işaret ediliyor. (Bunlara uzayzaman diyagramları adını veriyoruz; Şekil 2.1'de bir örneğini görüyorsunuz.) Örneğin Şekil 2.2'de zaman yıl cinsinden yukarıya doğru ölçülürken, güneşten Alfa Centauri'ye uzanan doğru boyunca olan uzaklık yatay olarak km cinsinden ölçülüyor. Güneşin ve Alfa Centauri'nin uzayzaman içerisinde izlediği yollar diyagramın solunda ve sağındaki dikey çizgilerle gösteriliyor. Güneşten gelen bir ışık ışını köşegen çizgiyi izliyor ve güneşten Alfa Centauri'ye ulaşması dört yıl alıyor.

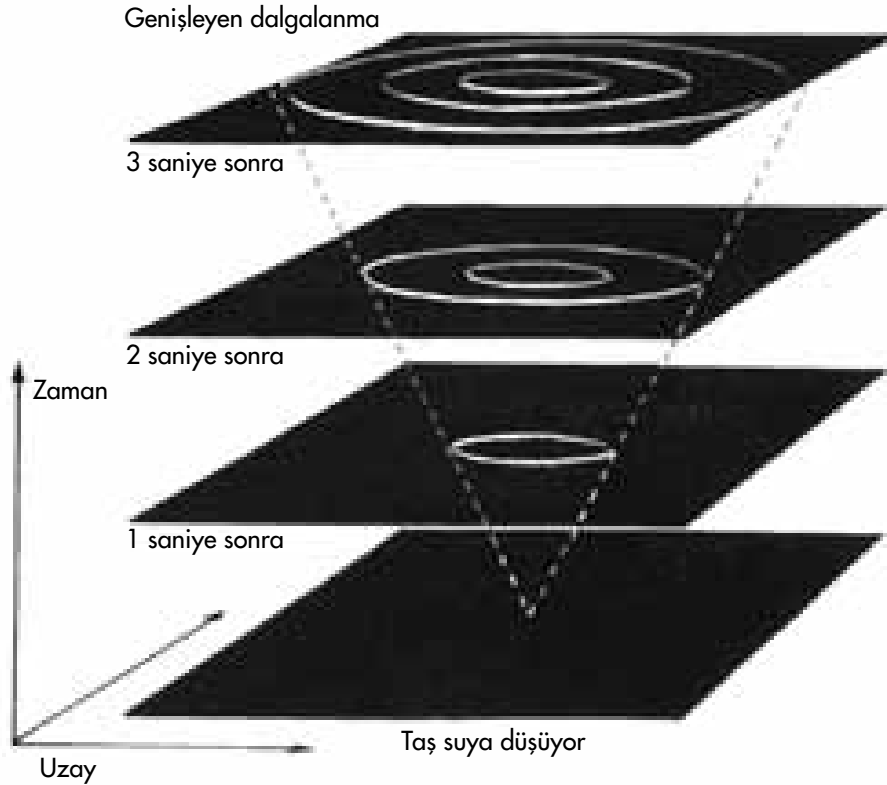


Şekil 2.2

Maxwell'in denklemlerinin, kaynağın hızı ne olursa olsun ışık hızının aynı olması gerektiğini öngördüğünü ve bunun kesin ölçümlerle doğrulandığını görmüştük. Dolayısıyla uzayda belirli bir noktada belirli bir zamanda bir ışık sinyali yayıldığında bu sinyal, zaman geçtikçe, boyutu ve konumu kaynağın hızından bağımsız olarak bir ışık küresi biçiminde açılacaktır. Bir saniyenin milyonda biri kadar bir süre sonra ışık 300 metre yarıçapında bir küre oluşturacak şekilde genişleyecek, bir saniyenin milyonda ikisi kadar süre sonra yarıçap 600 metreye ulaşacak ve bu böyle devam edecektir. Bunu içine bir taş atıldığında gölün yüzeyinde genişleyen bir dalgaya benzetebiliriz. Dalga zaman geçtikçe büyüyen bir çember şeklinde genişleyecektir. Dalgaların farklı zamanlardaki anlık durum görüntülerini biri diğerinin üzerine gelecek şekilde yığarsak, dalgaların genişleyen çemberi bize dip noktası taşın suya çarptığı za-

man ve yerde olan bir koni sonucunu verir (Şekil 2.3). Benzer biçimde bir olaydan etrafa genişleyerek yayılan ışık da (dört boyutlu) uzayzamanda (üç boyutlu) bir koni oluşturur. Bu koniye olayın gelecekteki ışık konisi adı verilir. Aynı yolla geçmişteki ışık konisi adını verdiğimiz bir koni de çizebiliriz; bu da bir ışık sinyalinin verili olaya ulaşmayı başardığı olayların kümesidir (Şekil 2.4).

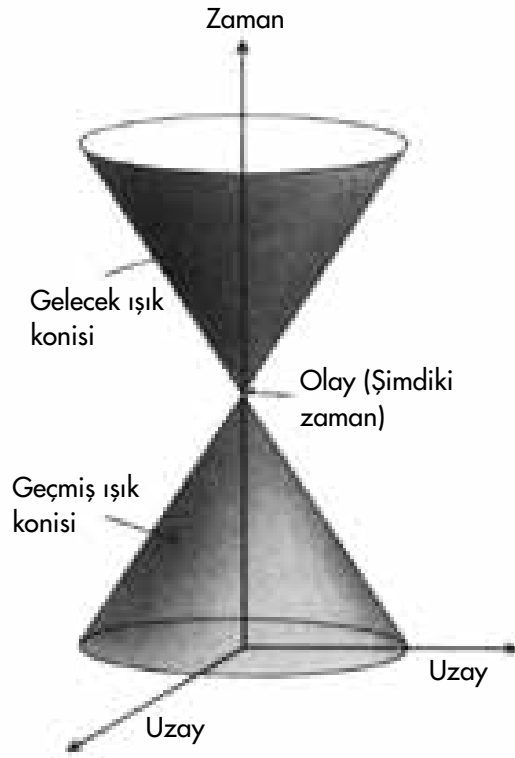
Bir P olayı veriliyse, evrendeki diğer olayları üç sınıfa ayırmamız mümkündür. Işık hızında veya ışık hızının altında bir hızla hareket eden bir parçacık veya dalga yoluyla P olayından elde edilebilen olaylar, P'nin geleceğinde yer alır. Bunlar P olayından yayılan ışığın genişleyen küresi içerisinde veya üzerinde yer alacaklardır. Bu yüzden uzayzaman diyagramında P konisinin gelecekteki ışık konisinin içerisinde veya üzerinde yer alırlar. P'de olanlardan sadece P'nin geleceğindeki olaylar etkilenebilir, çünkü hiçbir şey ışıktan daha hızlı hareket edemez.



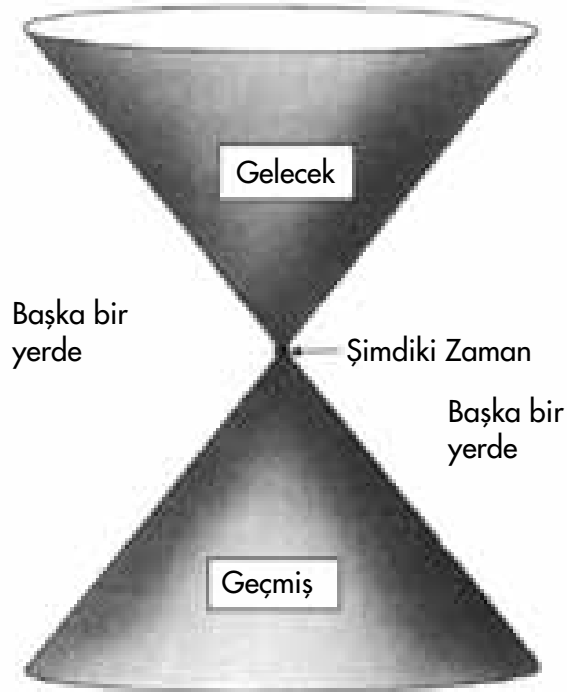
Şekil 2.3

Benzer biçimde P'nin geçmişi de, ışık hızında veya ışık hızının altında hareket ederek P olayına ulaşması mümkün olan tüm olayların kümesi olarak tanımlanabilir. Bu yüzden P'nin geçmişi, P'de olanları etkileyebilecek olayların kümesidir. P'nin geleceği veya geçmişinde yer almayan olaylara ise, P'nin dışında bir yerde yer alan olaylar denir (Şekil 2.5). Bu tür olaylarda olan biten şeyler, ne P'de olanları etkiler ne de P'de olanlardan etkilenir. Örneğin güneşin parlaması tam şu anda sona erseydi bu şimdiki zamanda dünyada olanları etkilemezdi, çünkü güneşin ışığı söndüğünde olayın dışında bir yerde olurlardı (Şekil 2.6). Bunun farkına varmamız, ışığın güneşten bize ulaşması için gereken sekiz dakika sonrasında olurdu. Dünyadaki olaylar ancak o zaman güneşin söndüğü olayın gelecek ışık konisinde yer alırdı. Benzer biçimde bizler şu anda evrenin derinliklerinde neler olduğunu bilmiyoruz: Gördüğümüz uzak galaksilerden gelen ışık bu galaksileri terk edeli milyonlarca yıl oldu; ışık şimdikiye dek görebildiğimiz en uzak cisimden bundan yaklaşık sekiz milyar yıl önce ayrıldı. Bu yüzden evrene baktığımızda onu geçmişteki haliyle görüyoruz.

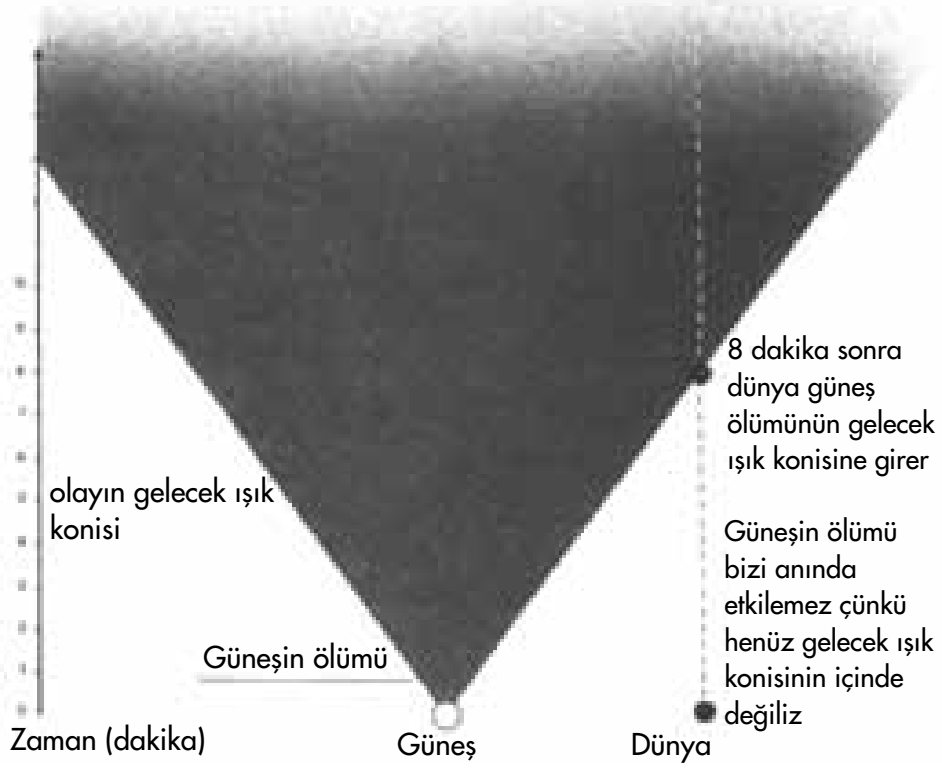
Einstein ve Poincaré'nin 1905'te yaptıkları gibi kütleçekim etkilerini göz ardı ettiğimizde özel görelilik kuramına ulaşırız. Buna göre, uzayzamandaki her olay için bir ışık konisi kurabiliriz (o olayda uzayzamanda yayılması olası tüm ışık yollarının kümesi): ışık hızı her olayda ve her yönde aynı olduğu için *tüm ışık konileri özdeş olacak ve hepsi aynı yönü gösterecektir*. Aynı zamanda kuram bize hiçbir şeyin ışıktan hızlı hareket edemeyeceğini söylemektedir. Bu herhangi bir cismin uzay ve zaman içerisindeki yolunun, onun üzerindeki her olayda ışık konisi içerisinde yer alan bir doğru ile temsil edilmek zorunda olduğu anlamına gelir (Şekil 2.7). Özel görelilik kuramı, (Michelson-Morley deneyinde kanıtlandığı üzere)



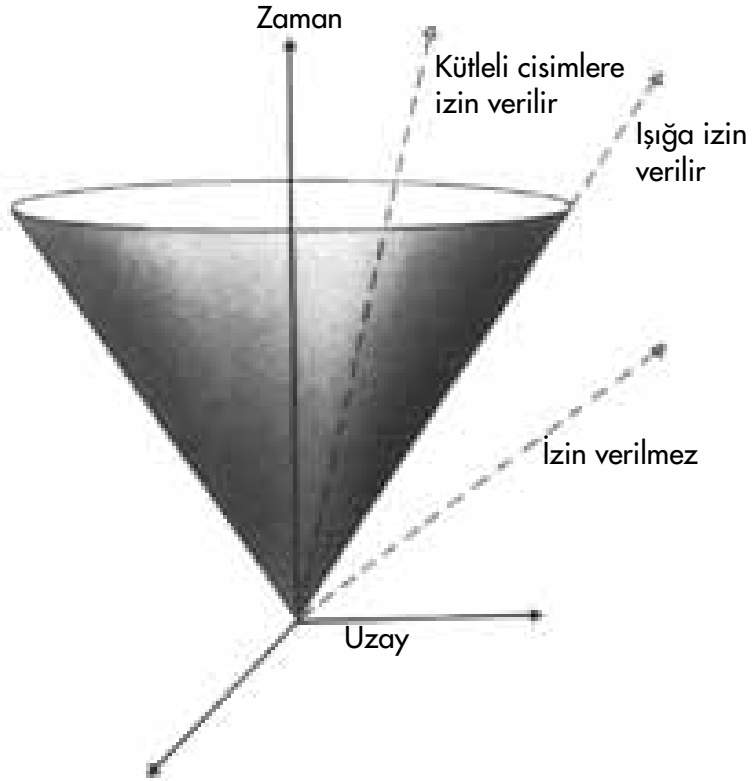
Şekil 2.4



Şekil 2.5



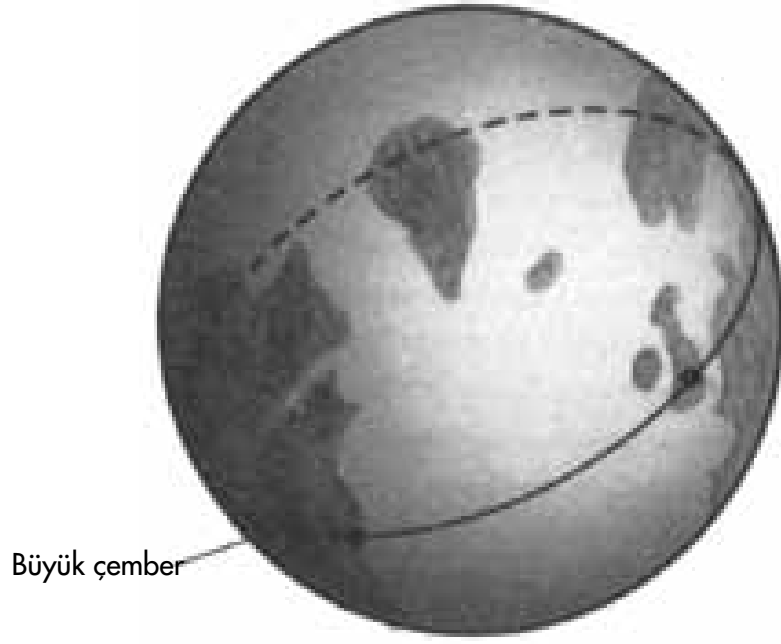
Şekil 2.6



Şekil 2.7

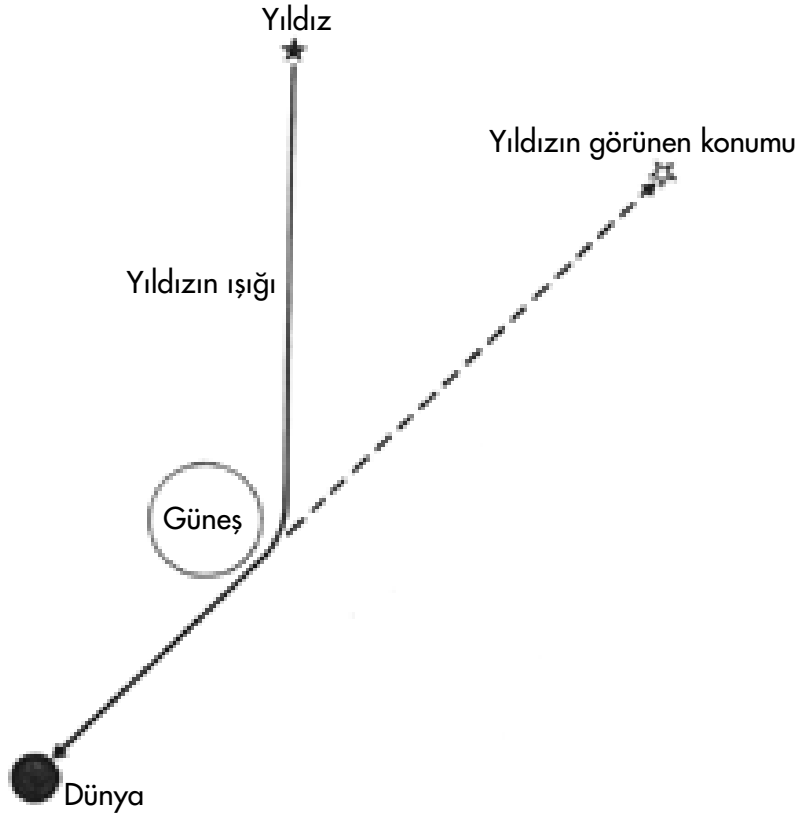
ışık hızının tüm gözlemcilere aynı görüldüğünü açıklaması ve nesnelere ışık hızına yakın hızlarda hareket ettiklerinde ne olacağını betimlemesi sayesinde çok büyük bir başarı elde etti. Ancak cisimlerin birbirlerine aralarındaki uzaklığa bağlı bir kuvvetle çekildiklerini söyleyen Newtoncu kütleçekim kuramıyla tutarlı değildi. Bu, cisimlerden biri hareket ettiğinde diğeri üzerindeki kuvvetin derhal değişeceği anlamına geliyordu. Başka bir biçimde ifade edersek, kütleçekim etkilerinin özel görelilik kuramının gerektirdiği gibi ışık hızında veya altında değil, sonsuz bir hızla hareket etmeleri gerekiyordu. Einstein 1908 ile 1914 arasında birkaç kez özel görelilikle tutarlı olacak bir kütleçekim kuramı oluşturma çabasına girişti, ancak başarısız oldu. Nihayet 1915 yılında bugün genel görelilik kuramı dediğimiz teorisini ortaya attı.

Einstein devrimci bir varsayımda bulunarak kütleçekimin diğerkuvvetler gibi bir kuvvet olmadığını, onun uzayzamanın önceden varsayıldığı gibi düz olmaması olgusunun bir sonucu olduğunu öne sürdü: Uzayzaman, içerisindeki kütle ve enerjinin dağılımı nedeniyle eğri veya "bükülmüş"tür. Dünya gibi cisimler kütleçekim denen bir kuvvet yüzünden eğri yörüngelerde hareket etmektedirler; bunun yerine eğri bir uzayda düz bir yola en yakın sayılabilecek şey olan, jeodezik adı verilen en kısa yolu izlemektedirler. Jeodezik birbirine yakın iki nokta arasındaki en kısa (veya en uzun) yoldur. Örneğin dünyanın yüzeyi iki boyutlu bir eğri uzaydır. Dünya üzerindeki jeodeziğe büyük çember denir ve iki nokta arasındaki en kısa yoldur (Şekil 2.8). Jeodezik iki havaalanı arasındaki en kısa yol olduğu için, bir havayolu seyir cihazının pilota tavsiye edeceği uçuş istikameti bu olur. Genel görelilikte cisimler dört boyutlu uzayda her zaman düz bir çizgiyi takip ederler, ama yine de bize bizim üç boyutlu uzayımızda eğri yollar izlemiş gibi görünürler. (Bu bir uçağı



Büyük çember

Şekil 2.8



Şekil 2.9

dağlar üzerinden uçarken izlemeye benzetilebilir. Uçak üç boyutlu uzayda düz bir doğru boyunca hareket etmesine karşın, uçağın gölgesi iki boyutlu yerde eğri bir yol izler.)

Güneşin kütlesi uzayzamanı öyle bir biçimde bükerek ki, dünya dört boyutlu uzayzamanda düz bir yol izlemesine karşın, bize üç boyutlu uzayda eğri bir yörünge izlemiş gibi görünür. Aslında genel göreliliğin gezegenlerin yörüngelerine ilişkin öngörülleri, Newtoncu kütleçekim kuramının öngörülerinden neredeyse farksızdır. Ancak güneşe en yakın gezegen olarak kütleçekim etkisine en çok maruz kalan ve görece uzamış bir yörüngeye sahip olan Merkür özelinde genel görelilik, elipsin uzun ekseninin güneşin etrafında yaklaşık on bin yılda bir derecelik bir oranda dönmesi gerektiğini öngörür. Bu etki küçük olmasına karşın 1915'ten önce tespit edilmiş olması Einstein'ın kuramının ilk doğrulamalarından biri olmuştur. Son yıllarda diğer gezegenlerin yörüngeleri radarla ölçülerek Newtoncu öngörülerden Merkür'dekinden de küçük değerdeki sapmalar tespit edildi ve elde edilen sonuçlar genel göreliliğin öngörülleriyle uyumlu çıktı.

Işık ışınları da uzayzamanda en kısa yolu izlemek zorundadır. Burada da uzayın eğri olması gerçeği, ışığın artık uzayda doğrusal bir çizgi izleyerek hareket etmeyecek biçimde görünmesi anlamına gelir. Dolayısıyla genel görelilik, ışığın kütleçekim alanları tarafından bükülüyor olması gerektiğini öngörür. Örneğin kuram güneşin kütlesi yüzünden güneşin yakınındaki noktaların ışık konilerinin hafif bir biçimde içe doğru büküleceğini öngörür. Bu uzak bir yıldızdan gelerek güneşin yanından geçen bir ışığın yolundan küçük bir açıyla sapacağı ve yıldızın dünyadaki bir gözlemciye olduğundan farklı bir konumda gözükceği anlamına gelir (Şekil 2.9). Elbette yıldızın ışığı her zaman güneşin yakınından geçmişse, ışığın sapıp saptığını veya yıldızın gördüğümüz yerde olup ol-

madığını söylememiz olanaklı olmaz. Öte yandan dünya güneşin etrafında dönerken farklı yıldızlar güneşin arkasından geçiyor ve ışıkları sapmaya uğruyor gibi görünür. Bu yüzden bu yıldızlar diğer yıldızlara göre görünen konumlarını değiştirmektedir.

Güneş ışığı gökyüzünde güneşin yakınında görünen yıldızları gözlemeyi olanaksız kıldığı için, normalde bu etkiyi gözlemek çok zordur. Bu ancak güneşin ışığının ay tarafından engellendiği güneş tutulmaları sırasında mümkün olur. Einstein'ın ışık sapması konusundaki tahminini I. Dünya Savaşı sürdüğü için hemen 1915 yılında sınamak mümkün olmadı. 1919 yılındaki tutulmayı Batı Afrika'dan izleyen İngiliz bir araştırma grubu, tıpkı kuramda öngörüldüğü üzere güneşin ışığı saptırdığını tespit etti. Almanya'dan bir kuramın İngiltere'deki bilimcilerce kanıtlanması, savaş sonrası iki ülke arasında gerçekleşen büyük bir barış eylemi olarak takdir topladı. Bu yüzden bu keşif esnasında çekilen fotoğrafların sonraki kontrollerinde açığa çıkan çekim hatalarının, ölçümü hedeflenen etki kadar büyük olması ironiktir. Bilimde yer yer karşımıza çıktığı üzere, yapılan ölçüm düpedüz şans eseri idi ve elde edilmek istenen sonucu bilmekten ileri geliyordu. Ancak sonrasında yapılan bir dizi gözlem ışık sapmasının varlığını kesin biçimde doğrulayacaktı.

Genel göreliliğin bir başka öngörüsü, zamanın dünya gibi kütleli bir cismin yakınında daha yavaş akıyor gibi görünmesi gerektiği idi. Bunun nedeni ışığın enerjisi ile frekansı (bir saniyedeki ışık dalgalarının sayısı) arasında bir ilişki olmasıdır: Enerji ne kadar büyükse, frekans o kadar yüksektir. Işık dünyanın kütleçekim alanının içinde ilerlemesini sürdürdükçe enerji kaybeder, dolayısıyla frekansı da düşer. (Bu bir dalganın tepe noktası ile diğer bir dalganın tepe noktası arasındaki zaman aralığının arttığı anlamına gelir.) Yukarıdaki bir insan için, aşağıdaki her

şeyin olması için eskisinden daha uzun zaman gerekiyor-
muş gibi görünür. Bu öngörünün doğruluğu 1962 yılında
bir su kulesinin üstüne ve altına monte edilen çok hassas
iki saat kullanılarak sınıandı. Dünyaya daha yakın olan
alttaki saatin genel görelilikle tam bir uyum içerisinde
daha yavaş çalıştığı tespit edildi. Dünya yüzeyinden de-
ğişik yüksekliklerdeki saatlerin hızlarındaki farklılık, uy-
dulardan gelen sinyaller temelinde işleyen çok hassas na-
vigasyon sistemlerinin gelişimiyle bugün çok büyük bir
pratik önem taşıyor. Olur da genel göreliliğin öngörülerini
göz ardı edilirse, hesap edilen konum birkaç kilometre
yanlış çıkacaktır!

Newton'un hareket yasaları uzayda mutlak konum fik-
rini sona erdirmişti. Görelilik kuramı da mutlak zaman-
dan kurtuldu. Örnek olarak ikiz kardeşleri düşünelim.
İkizlerden biri yaşamak için bir dağın tepesine gidiyor,
diğeri deniz seviyesinde kalıyor. Dağın tepesindeki di-
ğerdenden daha hızlı yaşlanacaktır. Bu yüzden tekrar bir
araya geldiklerinde biri diğerinden daha yaşlı olacak. Bu
durumda ikizlerin arasındaki yaşlanma farkı çok küçük
olacak, ama ikizlerden biri bir uzay gemisiyle ışık hızına
yakın bir hızla uzun bir yolculuk yaparsa fark çok daha
büyük olacaktır. Döndüğünde dünyada kalana göre çok
daha genç olacaktır. Buna ikizler paradoksu adı verilir,
ama bu ancak kafamızda halen mutlak zaman fikri bir yer
tutuyorsa bir paradoks sayılabilir. Görelilik kuramında
biricik bir mutlak zaman yoktur, bunun yerini her bireyin
nerede olduğuna ve nasıl hareket ettiğine bağlı olan ken-
di kişisel zaman ölçümü almıştır.

1915 yılı öncesinde uzay ve zamanın, içinde olayların
sahne aldığı, ancak içinde olan bitenlerden etkilenmeyen
sabit bir saha olduğu düşünülürdü. Bu yaklaşım özel gö-
relilikte bile geçerliydi. Cisimler hareket ediyor, kuvvetler
çekiyor ve itiyor, ama zaman ve uzay hiç etkilenmeksizin

sakince hüküm sürüyordu. Uzayın ve zamanın sonsuza dek böyle sürüp gittiğini düşünmek doğaldı.

Ancak genel görelilik kuramında durum oldukça farklıdır. Artık uzay ve zaman dinamik niceliklerdir: Bir cisim hareket ettiğinde veya bir kuvvet etkidiğinde bu, uzay ve zamanda bükülme etkisi yaratır; bunun karşılığında uzayzamanın yapısı da cisimlerin hareket biçimlerini ve kuvvetlerin etkime biçimlerini etkiler. Uzay ve zaman evrende olan her şeyi etkilemekle kalmaz, aynı zamanda her şeyden etkilenir de. Nasıl evrendeki olaylar hakkında uzay ve zaman mefhumu olmadan konuşamıyorsak, genel görelilikte de uzay ve zaman hakkında evrenin sınırları konu dışında tutularak konuşmak anlamsız hale gelmiştir.

Uzay ve zaman konusundaki bu yeni yaklaşım sonraki on yıllarda evren hakkındaki görüşümüzü temelden değişikliğe uğrattı. Esasen değişmeyen bir evrenin var olduğu ve var olabileceği yönündeki eski düşünce, yerini bir daha geri dönmemesine dinamik, genişleyen, sonlu bir zaman önce başlamış gibi görünen ve gelecekte de sonlu bir zamanda sona erebilecek bir evren düşüncesine bıraktı. Bu devrim sıradaki bölümün konusunu oluşturuyor. Yıllar sonra benim kuramsal fizikteki çalışmamın başlangıç noktası da bu olmuştur. Roger Penrose ve ben, Einstein'ın genel görelilik kuramının evrenin bir başlangıcı ve muhtemelen de bir sonu olmasının zorunluluğuna işaret ettiğini gösterdik.

3

Genişleyen Evren

Ayın ve bulutların olmadığı bir gecede gökyüzüne baktığımızda göreceğimiz en parlak nesnelere muhtemelen Venüs, Mars, Jüpiter ve Satürn gezegenleri olur. Güneşimize benzeyen, ancak bizden çok daha uzaktaki neredeyse sayısız yıldız da görürüz. Dünya güneşin etrafında döndükçe bu sabit yıldızların bazılarının aslında birbirlerine göreli konumlarında çok az da olsa bir değişim olduğu görülür: Aslına bakarsanız hiç de sabit değildirlere! Bu durum bu yıldızların bize diğerlerine göre yakın olmalarından kaynaklanır. Dünya güneşin etrafında hareket ettikçe biz bu yıldızları ardalandaki daha uzaktaki yıldızlara göre farklılaşan konumlarda görürüz. Bunu bir şans olarak değerlendirmeliyiz, çünkü bu sayede bu yıldızların bizden uzaklıklarını doğrudan ölçebiliriz: Bize ne kadar yakınlarsa, o kadar hareketli görünürler. Proxima Centauri adını verdiğimiz en yakın yıldızın bizden yaklaşık dört ışık yılı uzakta (bu yıldızın ışığının dünyaya ulaşmasının yaklaşık dört yıl aldığı anlamına gelir), diğer bir deyişle yaklaşık 40 trilyon kilometre uzağımızda olduğu tespit edilmiştir. Çıp-