



# EINSTEIN'IN MUCİZE YILI

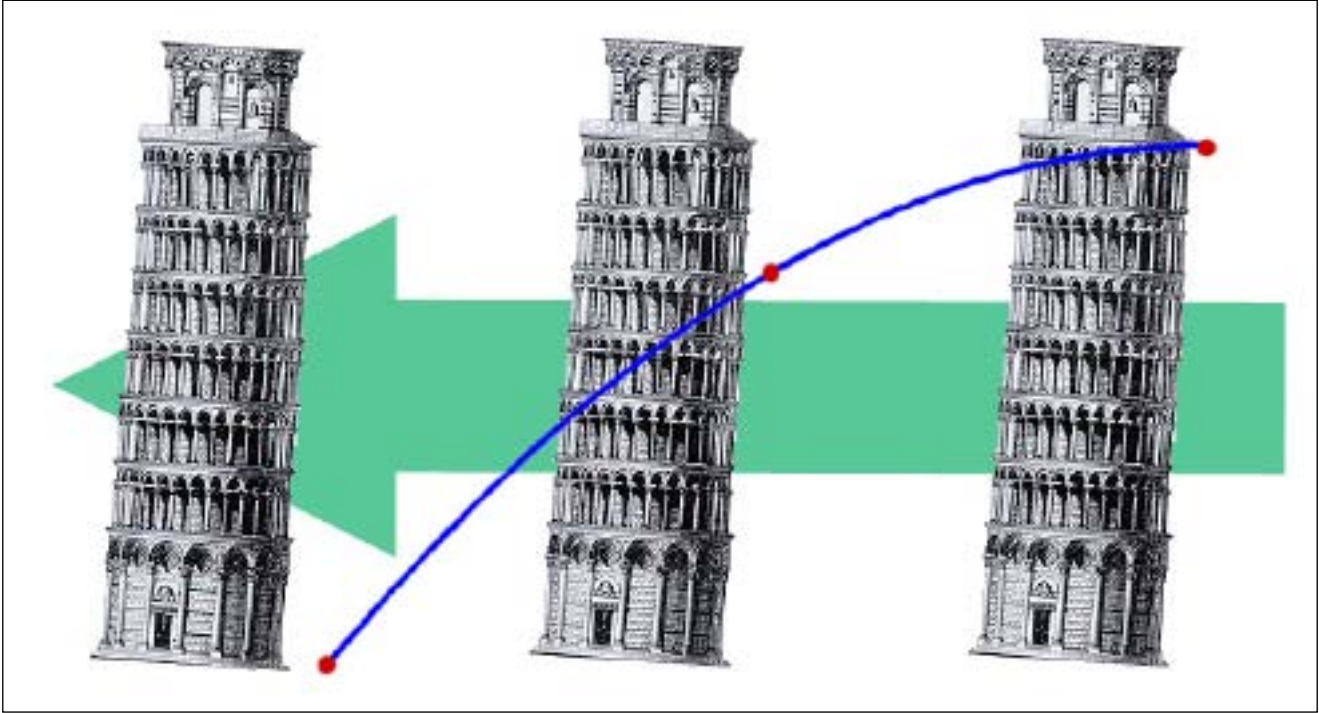
## ÖZEL GÖRELİLİK

Albert Einstein için 1905 çok verimli bir yıldır. Bu yıl yayımladığı çok sayıda bilimsel makalesinin içinde özellikle üç tanesi birçok biliminsanı tarafından devrimsel olarak nitelendiriliyor. Bir yıl içinde üç farklı devrim gerçekleştirmek herkesin harcı değil. Bu anlamda Einstein ancak Newton'la karşılaştırılabilir: Newton, 1665-6 yıllarındaki birkaç ay içinde ışığın farklı renklerde bileşenleri olduğunu bulmuş, temel matematik yöntemlerini geliştirmiş ve evrensel kütleçekim yasasını bulmuştu. Bu nedenle, Birleşmiş Milletler dahil birçok uluslararası fizik derneği, Einstein'ın eşine az rastlanır mucize yılının (Latince annus mi-

rabilis) yüzüncü yılı anısına 2005'in "Dünya Fizik Yılı" olarak kutlanması na karar verdi.

Einstein'ın bu yıl yayımladığı devrimsel nitelikteki makalelerinden biri "Brown hareketi" olarak adlandırılan, küçük mikroskobik cisimlerin hiç bitmeyen hareketini konu alıyor. Bu makalede atomların varlığının bu tip hareketlere neden olduğu kanıtlanarak, hem atom kuramı için sağlam bir kanıt öneriliyor, hem de fiziksel sistemlerde meydana gelen küçük rasgele oynamaların bu sistemlerin incelenmesinde kullanılabilceği gösteriliyordu. İkinci makalesindeyse, ışığın sürekli bir yapısının olmayıp, bölünemez ta-

necikler halinde olduğunu öne sürerek, beş yıl önce Max Planck'ın çekilerek öne sürdüğü hipotezi cesurca savunuyor ve kuantum fiziğinin temellerini sağlamlaştırıyordu. Bu makalede analiz edilen bir olay, "fotoelektrik etki" denilen, ışık kullanılarak bir cisimden elektronların koparılması olayı oldukça önemli. Çünkü Einstein'a 1921 yılında Nobel ödülü verildiğinde bunun "kuramsal fiziğe katkılarında, özellikle fotoelektrik olayını açıklamasından dolayı" olduğu belirtiliyor. Ama biz bugün burada üçüncü makalesinde yer alan "görelilik kuramı"yla ilgileneceğiz.



## Görelilik Makalesi

Albert Einstein'ın 1905 yılında yayımladığı devrimsel nitelikte üç makalesinden sonuncusu, Einstein'ın adıyla özdeşleşmiş olan görelilik kuramına aittir. Bu makaleyi yazmasının asıl amacı, o sıralar büyük bir problem haline gelen ışık hızının sabitliği sorunu çözmektir. Ama sonuçta, yer ve zaman kavramlarımızı baştan aşağı değiştiren ve doğanın işleyişine dair önemli ipuçları veren bir kuram çıkmıştır ortaya. Birkaç yıl sonra Einstein, geliştirdiği bu kuramın çok daha genel bir başka kuramın özel bir hali olduğunu fark eder. Bu nedenle 1905'te geliştirdiği kurama "özel görelilik" adı verilir. Ancak 1916 yılında tamamlayacağı diğer kuram da "genel görelilik" adıyla anılacaktır. Deneylerle desteklenen her iki kuram bugün, evrenbilim ve parçacık fiziği çalışmalarında vazgeçilmez araçlar olarak kullanılıyor.

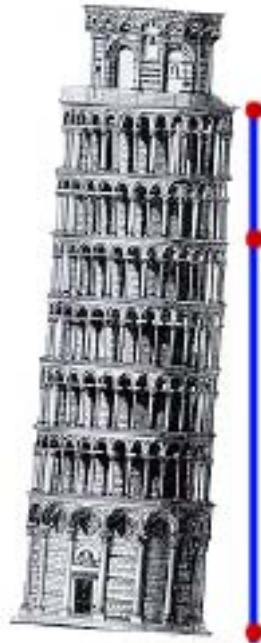
Her ne kadar bu kuramlar bilimsanları için vazgeçilmez bir öneme sahip olsa da, her gün tanık olduğumuz, yakın çevremizde cereyan eden olaylarda etkileri küçük olduğu için bunların günlük hayatımıza uygulanması pek bulunmamakta. Buna karşın söz konusu kuramların getirdiği yeni kavramlar doğayı algılayış biçimimizi tamamen değiştirecek nitelikte. Bu yazıda sadece özel görelilik kuramından ve bunun ortaya çıkardığı yeni kavramlardan bahsedeceğiz.

## Işık Hızının Sabitliği Sorunu

İşe önce, Einstein'ın çözmeye çalıştığı sorunu anlatmakla başlayalım. 20. yüzyılın başına kadar yapılan birçok deney, ışığın boşluktaki hızının değerinin bir sabit olduğunu gösteriyordu. Simgesi  $c$  olan bu hız kabaca saniyede 300,000 km kadar. Birçok bilimsan için bu değer her yön için aynı olması beklenmedik bir sonuçtu. Bunun nedeni, üzerinde yaşadığımız Dünya'nın hem kendi çevresinde, hem de Güneş çevresinde dönmesi, dolayısıyla süre-

li hareket halinde olması. Bu nedenle ışığın bazı yönlerde farklı hızla yayılması bekleniyordu.

Örneğin, eğer saatte 100 km hızla giden bir otomobili, saatte 90 km hızla takip edersek, otomobilin bize göre daha yavaş, saatte 10 km hızla gittiğini görürüz. Ne yazık ki aynı işlem ışık için uygulanamıyordu. Gerçi Dünya'nın hızı (Güneş çevresinde saniyede 30 km kadar) ışığın hızına göre oldukça düşük kalıyor ama; Dünya ne kadar yavaş olursa olsun, aynı yönde ilerleyen ışığın biraz daha yavaş yayıldığını görmemiz gerekirdi. Bu deneylerden en ünlüsü Michelson-Morley deneyi. Bu denli küçük hız değişimlerini ölçebilecek hassaslıkta olmasına karşın, bu deneyde en küçük bir fark bile ölçülemedi. Bir anlamda, bütün deneyler Dünya'nın hareket etmediğini, yerinde durduğunu söylüyordu (Dünya ve Güneş sistemi konusunda edindiğimiz sağlam bilgilerin tam tersini).



## Görelilik İlkesi

Bu son yorum, yani aslında hareket etmesine karşın Dünya'nın duruyormuş gibi görünmesi, bilimsanlarına pek yabancı değil. Birkaç yüzyıl önce Galileo'nun öne sürdüğü görelilik ilkesi, Dünya'nın hareketinin bizim yaşamımız üzerine neden etkisi olmadığını açıklıyor. Ama ilke bundan çok daha genel. Sabit hızla hareket eden bir



## Görelilik Canlı Yayında



Elektronların daha ağır bir türü olan müonlar, çok kısa ömürlü temel parçacıklardan. Ancak, dünyamızın atmosferini sürekli bombardıman eden kozmik ışınlardaki müonlar, kuramsal ömürlerinden çok daha uzun yaşıyorlar. Örneğin, bir dağ tepesinin hizasında belirlenen bir müonun, deniz seviyesine varamadan bozunması gerekir. Oysa, bu müonlardan pek çoğu denize varabiliyor. Neden? Çünkü hızları, ışık hızının %99,94'ü kadar ve parçacıkların bozunma "saati" göreliliğin zaman genişletici etkisi nedeniyle daha yavaş çalışıyor.

araçta bulunduğunuzu ve araç içinde birtakım karmaşık hareket deneyleri yaptığınızı düşünün. Doğal olarak araç içindeki cisimlerin yerlerini ve hızlarını belirlemek için aracı referans alırsınız. Yani araçta sabit bir nokta seçerek cisimlerin buradan uzaklığını bulur, uzaklıkların birim zamanda ne kadar değiştiğine bakarak da hızlarını belirlersiniz. Araç referans alınarak elde edilen bu değerlerin "araca göre" olduğunu söylüyoruz. Görelilik ilkesi, araca göre belirlenen bütün değerlerin evrensel hareket yasalarını sağladığını söylüyor. Bir başka deyişle aracın hızı hiçbir şekilde işin içine girmiyor. Araç hangi hızla gidiyor olursa olsun, yasalar aynı biçimde uygulanabiliyor.

Örnek olarak, Galileo'nun yaptığı söylenen bir deneyi, Piza kulesinden bir taşın serbest bırakılması deneyini düşünelim. Birçok kişi bu deneyi analiz ederken, Dünya'nın hareket ettiğini göz önüne almaz. Dolayısıyla taş, bırakıldığı noktanın tam altına düşecektir.

Eğer deney, Dünya'nın hareketi hesaba katılarak analiz edilirse bu defa karşımıza bambaşka bir görüntü çıkar. Piza kulesi ve yer büyük bir hızla hareket etmektedir. Eğer sadece Dünya'nın Güneş çevresindeki hızını dikkate alırsak bu hız, saniyede 30 km kadar ve ses hızından 100 kat daha büyük, bugünkü standartlarımızın bile çok üstünde. Bununla beraber, kuledeki Galileo ve henüz elinde tuttuğu taş

da aynı hızla aynı yönde hareket etmektedir. Galileo elini açıp taşı serbest bıraktığı anda taşın hızı değişmeyeceği için bu, taşın kulenin gittiği yöne doğru saniyede 30 km hızla fırladığı anlamına geliyor. Doğal olarak taş, ilk bıraktığı yerden çok daha uzakta bir yere düşecektir. Buna karşın, aynı süre içinde kule de bir miktar hareket etmiştir. Eğer taşın hareketini inceler ve kuleye göre nereye düşeceğini saptarsak, ilginç bir şekilde yukarıdakiyle aynı sonucu buluruz: Kuleye göre bıraktığı noktanın tam altı.

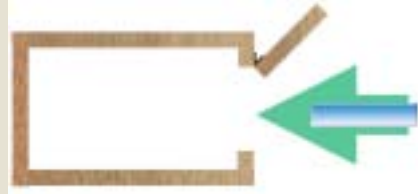
Bu örnekte, aynı olayı iki farklı bakış açısıyla inceleyebiliriz. Birincisinde taşın hareketi yer referans alınarak inceleniyor. İkincisinde de Güneş referans alınarak. Her iki bakış açısında taşın hareketi çok farklı görünüyor. Birinde taş doğrudan aşağıya düşüyor, diğerinde de çok hızlı bir şekilde fırlatılıyor. Seçtiğiniz referans noktasına göre değişen hız, konum gibi büyüklüklere "görelilik büyüklük" diyoruz. Bu kadar büyük farka rağmen, her iki bakış açısının taşın nereye düştüğü konusunda aynı sonucu vermesi bize, bu iki farklı bakış açısının eşit şekilde geçerli olduğunu söylüyor. Fiziksel olarak birini diğerine tercih etmemiz için hiçbir neden yok.

## Kutuya Çubuk Sığdırma Paradoksu

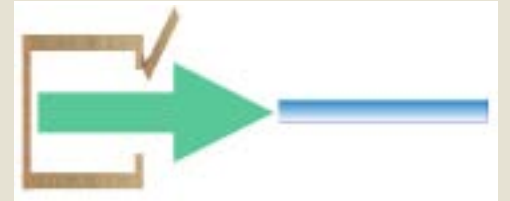
Lorentz-Fitzgerald büzülmesi olayı ilk bakışta çelişkili gibi duruyor. Bu etki hareket eden bütün cisimlerin boyunun daha kısa olduğunu söylüyordu. Çelişki şurada: Duran cisimler de, hareketli olanlara göre bir harekete sahip. Öyleyse, hareket edenlere göre de duranların kısalması gerekir. Örneğin, iki özdeş roketten birinin hızla fırlatıldığını, diğerininse yerde durağan kaldığını düşünelim. Bu durumda, her iki roketteki astronot diğer roketin daha kısa olduğunu iddia edecek. Öyleyse gerçekte hangisi daha kısa? Böyle bir soru aslında anlamsız. Soruyu anca "şu gözlemciye göre hangisi daha kısa" diye sorarsak doğru bir şekilde cevaplandırabiliriz ve cevap da gözlemciden gözlemciye değişecektir.

Burada gerçekten bir çelişki olup olmadığını anlamak için, olayı bir deney bağlamında düşünmek gerekiyor. Kutuya çubuk sığdırma paradoksu, işte bu konuya açıklık kazandırmak için geliş-

tirilmiş. Boyu bir metre olan bir çubuk ve içinde bir metre boşluk olan bir kutu düşünün. Bu uzunluklar, cisimlerin durağan oldukları haldeki normal uzunlukları. Her iki cisim de duruyorsa, o zaman çubuğu kutuya yerleştirip, kutunun kapağını kapatmak mümkün.



Şimdi, çubuğun kutuya usulca itilmediğini, aksine hızla fırlatıldığını düşünelim. Sorunu daha açık bir şekilde görmek için biraz abartalım ve çubuğun hızının ışık hızına yakın olduğunu varsayalım. Böylece, Lorentz-Fitzgerald kısalması etkisi daha belirgin olacaktır. Soru şu: Çubuğu kutuya yerleştirip, kutunun kapağını kapatabilir miyiz? Soruyu "kapağı kapatabilir miyiz" diye sordumuz için, deneyi izleyen bütün gözlemcilerin aynı cevabı vermesini bekleriz. Buna karşın ilk bakışta, deney kutuya göre ve çubuğa göre analiz edildiğinde farklı sonuçlar elde ediliyor.



Kutuya göre, kutu sabit çubuk hareketli olduğu için, kutunun içinde bir metre boşluk vardır; ama çubuk daha kısadır. Bu nedenle, çubuğun hepsi kutuya girebilir. Çubuğun en arkası kapak hizasını geçtikten herhangi bir süre sonra kapak rahatlıkla kapatılabilir. Bunun için çubuğun ön ucunun, kutunun arka duvarına çarpması da beklenemez. Burada kutunun çok sağlam olduğunu, çarpışma nedeniyle zarar görmediğini varsayacağız. Çarpışma çubuğa büyük zarar verebilir; ama biz çarpışma sonrası ne olabileceğiyle ilgilenmeyeceğiz.

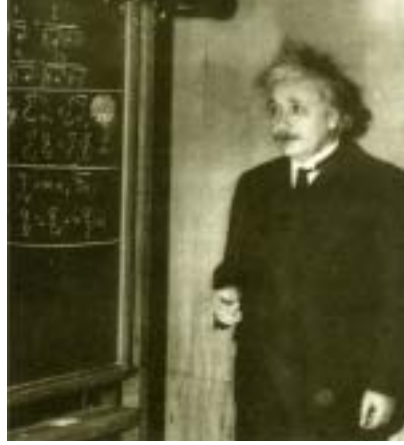
Çubuğa göreyse, çubuk yerinde durmaktadır ve kutu çubuğa doğru hareket etmektedir. Dolayısıyla çubuğun boyu bir metredir ve kutu bundan daha kısadır. O halde, kutunun arka duvarı çubuğa çarpsa bile, hiçbir şekilde çubuğu tamamen kutunun içine almak mümkün değildir. O halde kapak kapatılamaz!



Galileo ve Einstein bu ilkeyi daha farklı ve ilginç bir şekilde ifade ediyorlar: “Sabit hızla hareket eden bir araçtaki gözlemci, pencereden dışarıya bakmadan, yalnızca aracın içindeki olayları inceleyerek aracın hızını belirleyemez.” Eğer bu gözlemci, olayları aracın hızını kullanmadan ifade ediyorsa, o halde bu olayların üreteceği bütün olası sonuçlar bu hızdan bağımsız olacaktır.

Biz de Dünya'nın bir hızı olduğunu ancak Dünya'dan dışarıya baktığımızda anlayabiliyoruz. Güneş'i gördüğümüz için Dünya'nın Güneş'e göre saniyede 30 km hızla gittiğini söyleyebiliriz. Benzer şekilde Samanyolu'na baktığımız zaman da Güneş'in Dünya ve diğer gezegenlerle beraber bu gökadanın merkezi çevresinde kabaca saniyede 250 km hızla yol aldığını söyleyebiliriz. Ama bu kadar uzağa bakmaz, sadece Dünya üzerindeki olaylarla ilgilenirsek o zaman bu hızların ne olduğunun veya ne kadar büyük olduğunun hiçbir önemi yok!

Bu açıdan bakıldığında, yapılan bütün deneylerde ışığın, ilerlediği yönden bağımsız olarak aynı c hızıyla yayılıyor olması görelilik ilkesiyle oldukça uyumlu. Çünkü bu deneylerde Dünya'dan dışarıya bakma diye bir şey yok;



her şey Dünya üzerinde ve Dünya'ya göre ölçülüyor.

Fakat ortada hala bir sorun var: Örnek olarak bir aracın yere göre 0,9c hızıyla (yani ışık hızının %90'ı) hareket ettiğini düşünelim. Bu aracın hareket doğrultusuyla aynı yönde, yine yere göre c hızıyla ilerleyen bir ışık ışını gönderelim. Bu durumda ışığın araca göre 0,1c hızıyla ilerlemesi beklenir. Buna karşın, yapılan bütün deneyler beklentimizin yanlış olduğunu, ışığın hızının yere göre de, araca göre de aynı c değerine sahip olduğunu söylüyor. Bu oldukça garip bir şey: Işığın peşinden ne kadar hızlı giderseniz gidin, o hala sizden aynı hızla uzaklaşıyor.

## Einstein'ın Makalesi

Bu problemin Einstein'ı uzun süre meşgul ettiğini ve İsviçre Patent Ofisinde çalıştığı sıralarda yakın arkadaşı Michele Besso ile tartıştığını biliyoruz. Çözümü 1905 yılı ilkbaharında buldu. Eğer aracın içindeki saatler daha yavaş işliyorsa, o zaman ışığın araca göre hızının hala c değerine eşit olması mümkündür. Fakat, görelilik ilkesini ihlal etmemek için, araçtaki gözlemcinin saatlerin gerçekten yavaş işlediğini fark etmemesi gerekir. Bu da ancak çalışma ilkesi ne olursa olsun bütün saatlerin aynı oranda yavaşlamasıyla mümkün olabilir. Örneğin, mekanik veya atomik bütün fiziksel saatlerle beraber, bütün kimyasal saatler (eğer bir mum bir saatte yanıp bitiyorsa, araç içinde de oradaki saatlere göre bir saatte yanıp bitmeli) ve bütün biyolojik saatler aynı oranda yavaşlamalı (hücre bölünmesi için veya gözlemcinin sıkıntıdan patlaması için bir saat gerekiyorsa, araç içinde de bunlar oradaki saatlere göre bir saatte olmalı). Kısacası bütün fiziksel olaylar aynı oranda yavaşlamalı. Ancak bu koşul altında araçtaki gözlemci, saatlerinin yavaşladığını fark edemez ve dolayısıyla aracın hızıyla ilişkilendiremez; yani görelilik ilkesi güvendedir.

## Paradoksun Çözümü

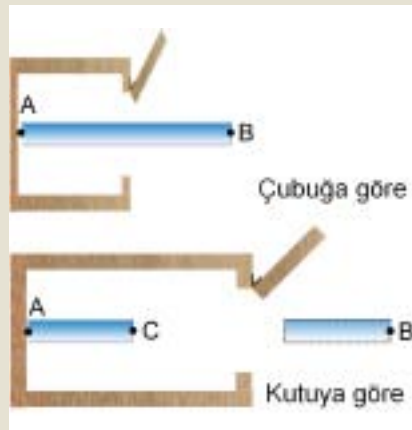
“Kapak kapatılabilir mi” sorusuna bütün gözlemcilerin aynı cevabı vermesi gerektiği için, yukarıdaki analizlerden bir tanesi yanlış. Yani, ya kutuya göre ya da çubuğa göre düşünen gözlemcilerden bir tanesi bu deneyi yanlış yorumluyor. Cevabı hemen verelim. Kutuya göre düşünen gözlemci, olayı doğru yorumluyor. Bu analize baktığımızda yanlış olabilecek herhangi bir şey göremiyoruz. Kapak gerçekten kapatılabilir.

Çubuğa göre düşünen gözlemcinin nerede yanlış yaptığını görmek önemli. Kapağı kapatılma koşulunun, çubuğun arka ucunun kapak hizasını geçmesi olduğuna dikkat ediniz. Çubuğa göre, bu uç kapak hizasını geçmeden çok daha önce, ön uç kutuya çarpıyor. Dolayısıyla, eğer kapak kapanırsa bu, çarpışmadan daha sonra olmalı. Daha önce tren paradoksunda gördüğümüz “eşzamanlılığın göreliliği” ilkesi, burada da önemli. Yani kapağın kapatılması ve çarpışma olaylarından hangisinin daha önce olduğu gözlemciye göre değişiyor. Kapak, kutuya göre çarpışmadan önce kapatılıyor (belki de çarpışmayla aynı anda) ama çubuğa göre çarpışmadan sonra.

Çubuğa göre olayları özetlersek: Önce çubuğun ön ucu kutuya çarpıyor. Bu sırada arka uç kutunun dışında. Çarpışma, çubuğun ön ucunun

parçalanmasına neden olacak. Bu parçalanmada oluşan kırılma, hızla çubuk boyunca arkaya doğru ilerlemeye başlayacak. Ne kadar hızlı olursa olsun, kırılma ışık hızından daha hızlı ilerleyemez. Kısacası, çarpışmanın çubuk üzerinde meydana getirdiği etkiler, çarpışma anından çok daha sonra arka uca ulaşacak. Bu süreç içinde arka uç, sanki hiçbir şey olmamış gibi olağan sabit hızlı hareketine devam edecek. Böylece belli bir aşamada kapak hizasını geçecek. Dolayısıyla da kapak kapatılabilir.

Başta belirttiğimiz çelişkinin gerçekte var olmadığını daha iyi anlayabilmek için deneye bir



de başka bir açıdan bakalım. Çubuğun ön ucunun kutuya çarptığı olaya A olayı diyelim. Çubuğa göre çarpışmayla aynı anda arka uca bir flaş patlasın. Buna da B olayı diyelim. Bu flaşın, çarpışmayı saptayıp flaşa akım gönderen bir düzenekle patlatılmayacağını belirtelim. Ama, arkadaki bir elektronik düzeneğe, çarpışmanın ne zaman olacağını çok daha önceden belirleyerek, tam o anda flaşı patlatacak şekilde zamanlanabilir. Dolayısıyla, A ve B olayları çubuğa göre aynı anda oluyor. Doğal olarak A olayı kutunun içinde, B ise dışında meydana geliyor. Tren paradoksunda gördüğümüz gibi, farklı yerlerde oldukları için bu iki olay kutuya göre farklı zamanlarda meydana gelecek. B olayı, çubuk kutuya tamamen girmeden, dışarıda oluşacak. Bundan çok daha sonra, A olayı meydana gelecek. Dolayısıyla, her iki gözlemci de bu iki olayı nerede oluştuğu konusundan görüş birliği içinde.

Bir gözlemciye göre bir cismin boyu, o cismin belli bir anda kapladığı yerle belirlenir. Dikkat ederseniz burada gözlemciye göre “aynı anda” fakat farklı yerlerde olan olaylardan bahsediyoruz. Fakat bir başka gözlemcinin “aynı anda”sı daha farklı olaylara karşılık geliyor. Dolayısıyla kutuya göre ve çubuğa göre bir diğerinin daha kısa olması, buradaki gözlemcilerin değişik “aynı an” kavramlarına sahip olmasından kaynaklanıyor ve ortada aslında bir çelişki yok.

Doğal olarak, bu tip devrimsel iddiaları ortaya atmadan önce bunları sağlam temellere oturtmaya ihtiyaç var. Einstein, bulduğu sonuçları yayımladığı makalede, bütün iddiaların sadece iki temel varsayımdan hareket edilerek elde edilebileceğini gösteriyor. Bunlar: (1) Görelilik ilkesi sabit hızla hareket eden bütün gözlemciler için geçerlidir ve (2) ışığın hızı bütün gözlemcilere göre  $c$ 'dir. Tüm kuramın böylesine basit iki iddiaya dayandırılması kuramın artılarının biri. Bu nedenle eğer bu iddialara itirazınız yoksa, o zaman özel görelilik kuramına da olamaz.

Einstein, birbirlerine göre sabit hızla hareket eden iki gözlemci düşünüyor. Bu gözlemcilerden birisi, belli bir olayın nerede ve ne zaman

olduğunu saptamış olsun. Bu durumda bir matematiksel dönüşümle aynı olayın diğer gözlemciye göre yer ve zamanı bunlar cinsinden elde ediliyor. Bu dönüşümün en önemli özelliği zamanın göreliliği olması. Örneğin iki olay arasında geçen zamanı her iki gözlemci daha farklı buluyor. Bu, Newton'un öne sürdüğü "mutlak zaman" kavramının yıkılması demek. Yani her yerde aynı işleyen, herkes için aynı bir zamandan söz edemiyoruz. Zamandan bahsederken, bunun hangi gözlemcinin saati-ne göre olduğunu söylemek zorundayız.

Mutlak zaman diye bir şeyin olması dışında görelilik kuramı, zamanın olayların gerçekleştiği yerlere de bağlı olduğunu söylüyor. Örneğin,

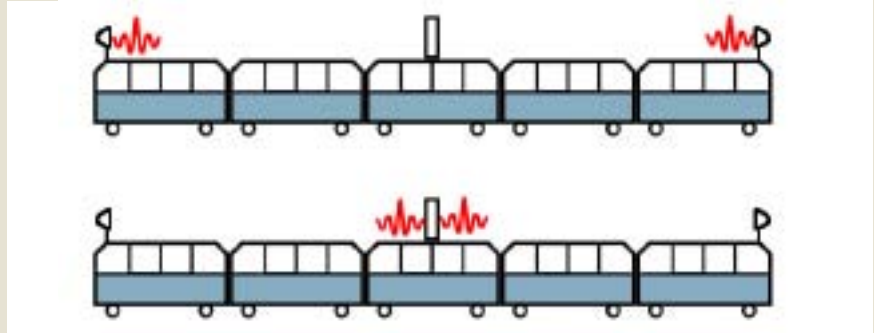
masanızda duran bir mumu belli bir anda yaktınız (A olayı). Bundan tam bir saniye sonra mumun söndüğünü varsayalım (B olayı). Mumun söndüğü anda masadan 10 metre ötede bir saksı kırılсын (C olayı). Size göre A ve B olayları arasındaki süre ile A ve C arasında geçen süre aynıdır (1 saniye). Fakat size göre hareket eden bir başka gözlemci A-B süresi ile A-C süresinin farklı olduğunu görecektir. Kısacası zaman, göreliliğin dışında, ayrılmaz biçimde olayların konumlarına bağlı. Birçok kişinin u-zay ve zamandan beraber bahsetmesinin temel nedeni bu. Ne yazık ki bu ayrıca, görelilik dönüşümü formüllerini kullanmayı bilmeyen birinin bu kuramı anlamakta zorluklarla karşılaşacağı anlamına da geliyor.

## Tren Paradoksu veya Eşzamanlılığın Göreliliği

Görelilik kuramının söyledikleri, alıştığımız şeylerden o kadar farklı ki, birçok durumda bizde kuramın çelişkisi olduğu izlenimi oluşuyor. Yaşamımız boyunca çevremizde gördüğümüz olayları izleyerek kazandığımız "klasik" dünya görüşü, doğal olarak, bunda büyük rol oynamakta. Fakat, görelilik kuramı, doğru olduğunu düşündüğümüz, ama sorgulamayı aklımızın ucundan bile geçirmediklerimiz bazı varsayımların yanlış olabileceğini gösteriyor. Doğal olarak, görelilik kuramını ilk öğrenmeye başlayan birinin karşılaştığı en önemli güçlük, bu varsayımlardan hangisinin yanlış olduğunu öğrenmek.

Bu ihtiyacı karşılamak için, bir çelişki içeriyor gibi görünen çeşitli düşünce deneyleri kullanılıyor. Adı üstünde, sadece düşüncede tasarlanan, gerçekte hiçbir zaman yapılmayan bu deneylerde, elde edilecek sonuçlar iki farklı yöntemle bulunmaya çalışılır. Ama her iki yöntem, birbiriyle çelişen farklı sonuçlar öngörür. Öğrencinin çelişkiyi görmesi sağlandıktan sonra, bu yöntemlerden birinin yanlış uygulandığı, yapılmaması gereken bir varsayımı kullandığı gösterilir. Bu tip düşünce deneylerine biliminsanları "paradoks" adını veriyor. Bu sözcüğü kullanırken dikkat edilmesi gereken nokta, bir çelişki varmış gibi görünmesine karşın, aslında bir çelişkinin olmaması. Örneğin, bir çoğunuz matematiksel işlemlerle " $0=1$ " eşitliğinin elde edildiği paradokslar görmüşsünüzdür. Bu bize, bu eşitliği elde etmekte kullanılan işlemlerden birinde bir hata yapıldığını söyler ve hatanın hangi aşamada yapıldığını daha iyi görmemizi sağlar.

Görelilik kuramında da birçok paradoks var. Tren paradoksu bunlardan biri. Bu düşünce deneyinde bir trenin ön ve arka vagonlarının ucuna iki flaş yerleştirilir. Trenin ortasında, flaşlardan eşit uzaklıkta bir algılayıcı bulunur. Algılayıcının her iki yüzü de ışığa karşı hassastır ve üzerine bir ışık düşüp düşmediğini saptar. Dene-



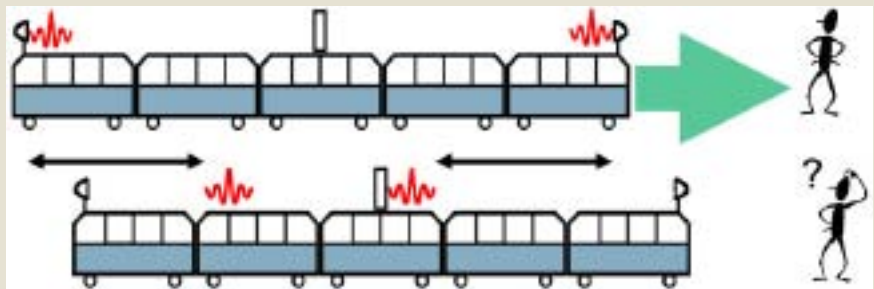
yi daha dramatik bir hale getirmek için, algılayıcının bir devreyle birtakım patlayıcılara bağlandığını düşünelim. Eğer algılayıcının sadece bir yüzüne ışık düşerse, düzenek yardımıyla patlayıcılar ateşleniyor ve tren havaya uçuyor. Ama eğer her iki yüzüne aynı anda ışık düşerse, bu defa herhangi bir şey olmuyor; tren sağ salım yoluna devam ediyor. Zifiri karanlıkta her iki flaş aynı anda patlatıyoruz. Soru şu: Tren havaya uçar mı, uçmaz mı?

Eğer tren sabit bir hızla hareket ediyorsa, bu soruya trendeki bir gözlemci ile dışarıda, yerde sabit duran bir gözlemci farklı cevaplar verir. Önce trendeki gözlemciye göre düşünelim. Buna göre tren yerinde durmaktadır (asıl hareket eden yer ve üzerindeki her şeydir). Flaşlar algılayıcıdan eşit uzaklıkta olduğundan, bilinen sabit hız-

la hareket eden ışık da eşit mesafeleri eşit sürede kat edecektir. Bu nedenle, flaşlardan aynı anda ortaya çıkan her iki ışık, algılayıcıya aynı anda ulaşır. Patlayıcı ateşlenmez. Tren güvendedir.

Şimdi de olaya, yerde sabit duran bir gözlemcinin bakış açısıyla bakalım. Tren hareket etmektedir ve bu nedenle boyu bir miktar kısalmıştır. Trenin boyunun ne kadar kısalmış olduğundan bağımsız olarak, algılayıcının her iki flaşa uzaklığı eşittir (trenin ön yarısıyla arka yarısı aynı oranda kısaldığı için). Flaşlar patlatıldığında, her iki ışık aynı  $c$  hızıyla öne ve arkaya doğru hareket etmeye başlar. Bu süreç içinde tren de bir miktar önde doğru gittiği için, önden gelen ışık algılayıcıya daha önce ulaşır. Patlayıcı ateşlenir ve tren havaya uçar!

İki sonuç arasında bir çelişki olduğu açık.





## Görelilik Kuramının Garip Sonuçları

Şimdi kısaca görelilik kuramının bize oldukça garip gelen birkaç öngörüsünden bahsedelim. Bunlardan birincisi yukarıda da bahsettiğimiz “zamanın genişmesi”. Bize göre sabit hızla ilerleyen bir aracın içindeki bütün saatler bizimkilerden daha yavaş işler. Bu ancak aracın hızı ışık hızına çok yakınsa belirgin hale gelen bir etki. Örneğin, ses hızının iki kat üstünde uçan bir jet uçağındaki saatler, uçak böylece bir yıl uçtuktan sonra bile ancak saniyenin on binde biri kadar geri kalıyor. Fakat eğer bu uçak 0,9c hızına erişebilseydi, o zaman uçaktaki saatler yaklaşık iki kat daha yavaş çalışacaktı.



Zaman genişmesinin parçacık fiziğinde önemli bir uygulama alanı var. Nötron veya muon gibi kararsız parçacıklar bir süre sonra kendiliğinden bozunarak başka parçacıklara dönüşürler. Bir bakıma parçacığın içinde bulu-

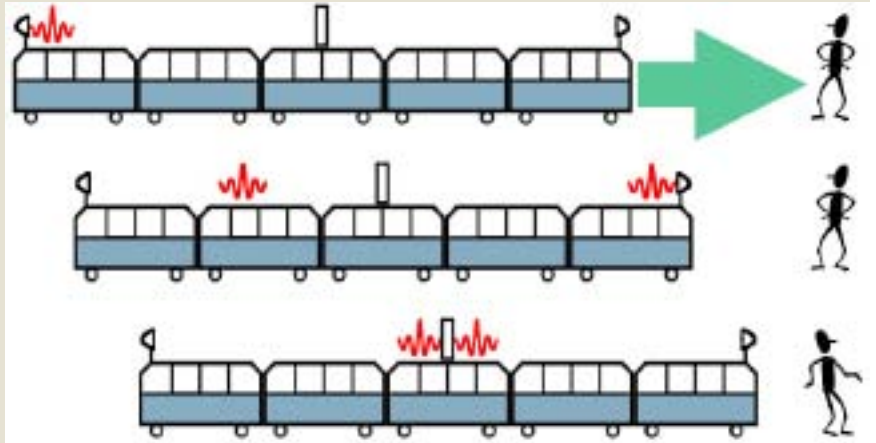
nan bir doğal “saat”, parçacığın ortalama ne kadar süre içinde bölünmesi gerektiğini belirler. Eğer parçacık bir şekilde hızlandırılır ve hızı ışık hızına çok yaklaştırılırsa bu “iç saatin” bizim saatimize göre daha yavaş çalışmasını

Her ne kadar “her şey görelidir” desek de, bazı şeylerin olamayacağı açık. Bazı gözlemlere göre trenin yok olması, ama başkalarına göre sapa-sağlam yoluna devam etmesi diye bir şey olamaz. Bütün gözlemlere göre trenin akıbeti aynı olmalı. Ya hepsine göre havaya uçmalı, ya da hepsine göre sağlam kalmalı. O halde, bu gözlemlerden biri olayı yanlış yorumluyor. Ama hangisi?

Birçok kişi bu paradoksla ilk defa karşılaştıklarında görelilik kuramının temel iddialarını sorgulamaya yöneliyor. Örneğin, trendeki gözlemcinin (trenin gerçekten hareket ediyor olmasından dolayı) önden gelen ışığın daha hızlı, arkadan geleninse daha yavaş gittiğini görmesi gerektiği söylenir. Ama bu doğru değil. Görelilik kuramının temel iddialarında herhangi bir sorun yok. Gerçekten de her iki gözlemci ışığın, hangi yöne olursa olsun, aynı hızla yayıldığını görürler (bu kuramın temel varsayımlarından birincisidir). Buna ek olarak, her ne kadar dünya görüşümüz, yeri sabit alıp treni hareket ediyor gibi düşünmemizi zorlasa da, kuramın ikinci varsayımı da geçerli. Yani trendeki gözlemci, trenin yerinde durduğunu, aksine aslında Dünya'nın hareketli olduğunu söylerken bir hata yapmıyor. Buradan yola çıkarak yapacağı fiziksel yorumların da kesin doğru olması gerekir. Dikkat ederseniz burada, görelilik kuramının dayandığı iki temel varsayımın arasındaki görünür çelişki daha açık bir şekilde göz önüne seriliyor. Peki sorun nerede?

### Paradoksun Çözümü

Çelişkinin ortaya çıkmasına neden olan, flaşların patlama zamanını belirtmek için kullandığımız “aynı anda” ifadesi. Einstein'ın elde ettiği konum-zaman dönüşümleri incelendiğinde, bir gözlemciye göre aynı anda olan iki olayın, başka bir gözlemciye göre farklı zamanlarda gerçekleştiği görülebiliyor. Nasıl iki olay arasındaki zaman süresi göreliyse (farklı gözlemciler farklı buluyor), aynı anda olmak da görelidir. Buna “eşzamanlılığın göreliliği” diyoruz. Farklı bir örnek:



Bir gözlemciye göre “aynı yerde” ama farklı zamanlarda olan iki olay düşünün. Hareket eden bir gözlemcinin bunları değişik yerlerde göreceği şüphesiz. Dolayısıyla “aynı yer” kavramının göreliliğini rahatça, sıkıntı çekmeden anlayabiliyoruz. Görelilik kuramındaki bir gözlemciden diğerine yapılan dönüşümlerde yer ve zaman birbirine bağımlı olduğu için, “aynı zaman” kavramının da göreliliği oldukça doğal.

Sözü uzatmadan düşüncemizde deneyinde gelişen olaylara bir bakalım. Flaşların aynı anda patlatıldığını söylerken, bunların hangi gözlemciye göre aynı anda olduğunu belirtmemiz gerekir. Burada bunların trendeki gözlemciye göre aynı anda oluştuğunu düşünüp, analizi ona göre yapacağız. Bu nedenle, trendeki gözlemcinin analizinde bir kusur yok. Tren havaya uçmaz.

Yerdeki gözlemciye göre ise ilk önce arkadaki flaş patlar, biraz sonra da öndeki. Her iki ışığın hareket etmekte olan algılayıcıya aynı anda ulaşması için bu olayların zaman sıralamasının bu şekilde olması gerektiğini rahatlıkla görebilirsiniz ama aynı sonuç görelilik kuramındaki yer-zaman dönüşümleri kullanılarak da elde edilebilir. Öndeki flaş patladığı anda, hem arkadan gelen ışık hem de tren bir miktar yol almıştır. Doğal olarak, bu anda arkadan gelen ışık algılayıcı-

ya öndekinden daha yakın. Bir süre daha geçtikten sonra, trenin hareketi de göz önüne alındığında her iki ışığın algılayıcıya aynı anda çarptığı görülür. Patlayıcı ateşlenmez. Tren güvende! Dikkat edilirse, arkadan gelen ışık daha uzun bir yol kat etmesine karşın daha önce belirlediği için, her ikisinin de aynı anda algılayıcıya ulaşması gerçekleşir.

Burada, ışıkların algılayıcıya “aynı anda” vardığını söylerken görelilikle ilgili bir sorun doğmaz, çünkü bu iki olay “aynı yerde” meydana gelir. Bir gözlemciye göre hem aynı yerde, hem de aynı zamanda meydana gelen olaylar bütün gözlemlere göre de böyledir. Eşzamanlılığın göreliliği yalnızca, farklı yerlerde oluşan olaylar için söz konusu.

Bir gözlemciye göre farklı yerlerde meydana gelen eşzamanlı iki olay için, diğer gözlemler hangisinin daha önce olduğu konusunda da görüş birliği içinde olmayabilirler. Örneğin, trenle aynı yönde, ama ondan daha hızlı hareket eden bir jet uçağındaki gözlemci, öndeki flaşın daha önce patladığını belirleyecektir. Yani olayların oluş sırası da görelidir. İlk bakışta çelişkili görünse de, böyle iki olay neden-sonuç ilişkisiyle bağlı olamayacağı için nedensellik ilkesi açısından bir sorun doğmaz.

dan dolayı parçacıkların çok daha geç bozdukları görülür.

Zaman genişlemesine benzeyen bir başka etki de, hareket eden cisimlerin hareket doğrultusundaki boylarının kısalması. Böyle bir etkinin varlığı, aslında Einstein'dan birkaç yıl önce, Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz ve ondan bağımsız çalışan İrlandalı fizikçi George Fitzgerald tarafından ortaya atılmıştı. Bu nedenle bu etkiye "Lorentz-Fitzgerald büzülmesi" adı veriliyor. Hareket eden bir aracın boyunun kısalması da tıpkı zaman genişmesi gibi göreliliğin bir etki. Hareketli araçtaki gözlemciler böyle bir kısalmayı fark edemiyorlar çünkü o yöndeki her şey, metre çubukları dahil, kısalmış durumda.

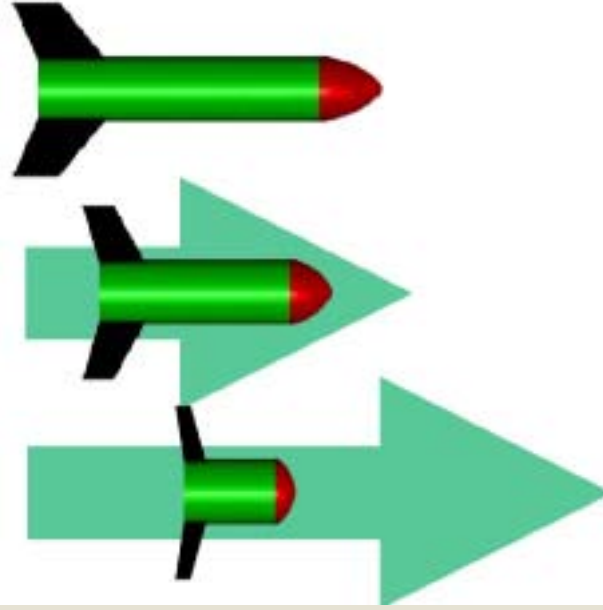
Lorentz-Fitzgerald büzülmesinde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta bu etkinin görüntüde değil gerçekten olması. Dolayısıyla bir göz yanılması bahsetmiyoruz burada. Işık sonlu bir hızla yayıldığı için, hareket eden bir cisme baktığımızda veya fotoğrafını çektiğimizde, cismin boyunu gerçekte olduğundan çok farklı görürüz. Göz yanılgıları, cismin bize yaklaşıyor veya bizden uzaklaşıyor olmasına bağlı olarak değişir. Örneğin, bizden uzaklaşan bir cismin fotoğrafı çekildiğinde büzülmuş boyundan bile daha kısa olduğu görülür. Buna karşın bize yaklaşan bir cismin fotoğrafı çekildiğindeyse, normal boyundan bile daha uzun olduğu görülür. Gözlemcinin bu tip göz yanılgılarının farkında olduğunu, ışığın kendisine ulaşma süresini hesaba katıp cisimlerin gerçek boyunu hesaplayabildiğini düşünüyoruz. İşte cismin bu gerçek boyu, durağan halinde sahip olduğu normal boyundan daha kısadır.

$$E=mc^2$$

Einstein en ünlü denklemini o yılın eylül ayında yayımladığı bir başka makalede ortaya atıyor. Burada, bir cismin ışık yayınlarken enerji kay-

## Lorentz-Fitzgerald Büzülmesi

Hareket eden cisimlerin boyu kısalır. Cisim ne kadar uzunsu boyu da o kadar fazla kısalır. Harekete dik yöndeki uzunluklarsa değişmez.



bediği bir düşünce deneyi üzerinde yoğunlaşıyor. Daha sonra da, görelilik kuramının tutarlı olması için cismin kütesinin bir miktar azalması gerektiğini gösteriyor. Kütle ve enerjinin eşdeğerliliği ilkesi bu şekilde doğuyor.

Etki, görelilik kuramının öngördüğü diğer etkiler gibi gündelik hayatımızda karşılaştığımız şeylere göre oldukça küçük. Örneğin, bir ton suyu sıfır dereceden kaynama noktasına kadar ısıttığımızı düşünelim. Isıtma sırasında suya büyük miktarda enerji aktarıyoruz. Dolayısıyla verdiğimiz enerjinin kütle karşılığı suyun kütesine eklenir. Böyle bir durumda suyun kütesinin bir tondan gramın milyonda 4'ü kadar daha fazla olduğunu bulursunuz. Bu kadar küçük bir farkı doğal olarak hissetmemiz olanaksız.

Denklemin en önemli uygulama alanı şüphesiz, çekirdek ve parçacık fiziği. Çekirdek dönüşümlerinde ortaya yüksek enerjili fotonlar çıkarak çekirdekten ayrılır. Bu da geride kalan çekirdeğin kütesinin ayrılan enerjinin eşdeğeri kadar küçülmesi demek. Aradaki kütle farkı, toplam kütleyle oranla pek küçük olmadığı için, bu tip dönüşümlerde ortaya çıkan enerji olağanüstü derecede büyüktür.

## Işık hızının Aşılabilirliği

Görelilik kuramının en önemli sonuçlarından birisi de ışığın boşluktaki hızının hiçbir şekilde aşılamayacağını söylemesi. Bu nedenle, en yakın yıldızları bir gün ziyaret etme planlarımız büyük engellerle karşılaşılıyor. Çünkü bu yıldızlardan bize en yakını 4 ışık yılı uzaklıkta, yani ışığın 4 yılda alabileceği mesafe kadar. Dolayısıyla, bunlara ulaşmak için bugün yola çıksak, 4 yıldan önce amacımıza ulaşamayacağımız kesin. En az bir 4 yıl daha dönüş yolculuğunu eklerseniz, kaşiflerin neler bulduğunu öğrenmemiz için en az 8 yıl geçmesi gerekir. Bu en iyimser tahmin, çünkü bir uzay gemisini ışık hızına yakın hızlara ulaştırmak bile

çok zor, bugünkü teknolojinin ötesinde bir şey.

İnsanoğlu kendisinin sınırlanmasından pek hoşlanmadığı için, birçok kişi aslında böyle bir sınırın olmadığını, dolayısıyla bir gün aşılabileceğini düşünüyor. Üstelik, bugüne kadar bir şeylerin ışıktan daha hızlı gittiği birçok fiziksel olay öne sürülmüş ve bunların çoğu deneysel olarak da saptanmış. Ama hepsinde de, detaylı bir analiz sonunda görelilik kuramına aykırı herhangi bir şey bulunamamış. Burada amacımız bu deneyleri inceleyerek, hangi anlamda kurama aykırı olmadığını anlatmak değil. Amacımız sadece, kuramın bu ünlü sonucunun nasıl elde edildiğini açıklamak.

Mantık yürütmelerden bir tanesi şöyle: Durağan bir cisim iterek hızlandırmak ve böylece ışık hızını geçmek istediğimizi düşünelim. Cisim iterken ona bir miktar enerji aktarıyoruz. Sadece hareketinden dolayı cismin sahip olduğu bu enerjiye biz "kinetik enerji" diyoruz. Einstein'ın ünlü enerjinin kütleyle özdeşliği bağlantısı ( $E=mc^2$ ) uyarınca bu kinetik enerji aynı zamanda kütle işlevi görecektir. Yani cisim iterek, toplam kütesinin artmasına neden oluyoruz. Bu gerçek bir etki. Eğer tartabilseydik, cismin daha ağır olduğunu gö-

rebilirdik. Fakat, kütle artması etkisini cisimi iten kişi hisseder. Daha kütleli olduğu için, cisim artık daha zor hızlanacaktır. Böylece hızını aynı miktar arttırmak için cisme daha fazla enerji aktarmamız gerekir. Bu da kütlelerinin daha da fazla artmasına neden olacaktır. Bu şekilde devam ettiğimizde, cisim ışık hızına yakın hızlara yaklaştığında kütlesi inanılmaz boyutlara ulaşır. Özellikle cisim, tam olarak ışık hızına erişirse sonsuz kütlesi yani sonsuz enerjisi olması gerekir. Görebildiğimiz evrende bile ancak sonlu miktarda enerji olduğu için, cisme bu enerjiyi verebilmek dolayısıyla ışık hızına erişmek imkansızdır. Dolayısıyla bütün cisimler ışıktan yavaş hareket etmeli. Cisimlerin ışık hızında veya daha hızlı gitme olasılıkları yok.

Bu mantık yürütme Einstein'ın 1905 makalesinde de yer alıyor. Ama ne yazık ki bu, olası bütün senaryoları saf dışı bırakmıyor. Örneğin yukarıda cismin aşamalı olarak hızlandırıldığını varsaydık. Böylece ışık hızının üstüne çıkabilmek için öncelikle ışık hızına erişmek gerekiyor. Ama belki ileride geliştirilecek bir yöntemle bir cisme, ara hızlar vermeden, doğrudan ışık üstü hızlar vermek mümkün olabilir. Veya, değişik fizik kuramlarında sıklıkla karşılaşılan (ama henüz deneysel olarak gözlemlenmemiş) takyonlar gibi, bazı parçacıklar sadece ışık hızı üstü hızlarla yol alıyor olabilirler. Bu tip diğer olası senaryoları da saf dışı bırakmak için Einstein başka bir mantık yürütme kullanıyor: Nedensellik ilkesi.

## Nedensellik İlkesi

Biri diğerinin olmasına yol açan iki olay düşünelim. Bunlardan “neden” olarak adlandırdığımız bir tanesinin oluşması, kaçınılmaz olarak “sonuç” olarak adlandırdığımız diğerinin de gerçekleşmesine yol açıyor. Eğer neden gerçekleşmezse, sonuç da gerçekleşmiyor. Bu tip olayların birbirine “neden-sonuç ilişkisiyle bağlı” olduğunu söylüyoruz. Nedensellik ilkesinin söylediği oldukça basit: Zaman açısından neden, sonuçtan önce meydana gelir. (Bu ilkenin, felsefede kullanılan nedensellik ilkesinden daha farklı bir anlamı olduğunu belirtelim. Aynı ad, farklı ilkeler.)

Nedensellik ilkesi, aslında kültürümüzün bir parçası. Suç ve ceza, çalış-

ma ve başarı, etki ve tepki gibi, insanın çevresiyle etkileşmesinde önemli yeri olan kavramlarda bu kuralı tartışmasız kabul ediyoruz. Birisinin daha sonra işleyeceği bir suç yüzünden hapse atıldığını duymayız. Veya daha sonra başaracağı bir şey için ödüllendirildiğini. Gol olduktan sonra şut çeken futbolcu da görülmemiştir, dersi geçtikten sonra çalışan öğrenci de!.. Nedensellik ilkesi, geçmiş ve geleceğe bakışımızdaki farklılıkla yakından ilgili. Geçmiş iyi biliriz ama geleceği asla. Gelecek için planlar yaparız fakat geçmişini değiştiremeyiz. Bu nedenle bugün yapacağımız bir şeyin, sadece gelecekte bir şeyleri değiştireceği, geçmişini kesinlikle değiştiremeyeceği düşüncesi hepimizde doğal olarak var.

Nedensellik ilkesine aykırı bir neden-sonuç ilişkisi çok sayıda çelişkili duruma yol açabiliyor. Örneğin, bugün gerçekleştirilen bir N olayının, bir önceki gün bir S olayının oluşmasına neden olduğunu düşünelim. Eğer ben dün S olayının gerçekleştiğini biliyorsam, bugün N'nin gerçekleşmesini engellemeyi seçebilirim. O halde S de gerçekleşmez. Ama S gerçekleşmişti. Bazı biliminsanları (ve birçok bilim kurgu yazarı) nedensellik ilkesinin doğru olmayabileceğini, bu tip çelişkilerin de bir şekilde engellendiği doğal mekanizmalar olduğunu düşünse de tahmin edebileceğiniz gibi henüz ortada somut bir şey yok (birkaç ilginç film dışında).

Nedensellik ilkesi gördüğümüz gibi oldukça basit. Ama zamanın gözlemciden gözlemciye değiştiğini söyleyen görelilik kuramıyla beraber kullanıldığında büyük bir önem kazanıyor. Nedensellik ilkesi, değil ışıktan hızlı yolculuk etmek, bundan daha zayıf bir eylemin, “ışıktan hızlı mesaj göndermenin” bile imkansız olduğunu söylüyor.

Bir arkadaşınıza bir mesaj gönderdiğinizizi varsayalım. Bu durumda “mesajı gönderme” olayını neden ve “mesajı alma” eylemini de sonuç olarak düşünebiliriz (eğer göndermezsek, mesaj da alınmaz). Veya, isterseniz mesajınızda arkadaşınızdan ne yapmasını istediğinizi belirtebilirsiniz. Bu durumda arkadaşınızın yaptığı eylem sonuç olacaktır. Görelilik kuramındaki yer-zaman dönüşümleri bize şunu söylüyor: Eğer mesajınızı gerçekten ışıktan hızlı gönderiyorsanız, o zaman size göre ha-

reket eden bazı gözlemciler sonucun nedenden önce oluştuğunu görürler. Yani bunlara göre önce arkadaşınız mesajı almış, sonra da siz aynı mesajı göndermişsiniz.

Böyle bir şey nedensellik ilkesine aykırı, çünkü bütün gözlemcilere göre neden sonuçtan önce oluşmalı. Ama gerçek bir çelişki yaratmak için biraz daha uğraşmak gerekiyor. Eğer arkadaşınız, yukarıda bahsedilen hareket eden araçtaysa bu defa ilginç bir şey olur. Size göre arkadaşınız mesajı daha sonra almıştır ama arkadaşınıza göre mesaj eline siz daha göndermeden ulaşmıştır. Bu durumda arkadaşınız aynı ışıktan hızlı posta servisini kullanarak mesajı size geri gönderebilir. Eğer biraz daha hızlı bir servis kullanırsa, bu defa mesaj elinize siz onu göndermeden önce ulaşacaktır! Kısacası bu geçmişe mesaj göndermek demek, dolayısıyla da nedensellik ilkesinin ihlali.

Dolayısıyla, eğer nedensellik ilkesi geçerliyse, ışıktan hızlı mesaj göndermek olanaksız. Bu aynı zamanda ışıktan hızlı uzay gemileri yapmamızı da engelliyor (gemiye bir postacı binebilir).

Buradan çıkaracağımız bir başka sonuç da birbirinden yeterince uzak iki farklı yerde kısa bir zaman aralığıyla oluşan iki olayın arasında neden-sonuç ilişkisinin olmaması. Örneğin, belli bir anda Güneş'te bir patlama olduğunu düşünelim. Normalde bu patlamadan kaynaklanan ışık bize 8,3 dakika sonra ulaşır, dolayısıyla ancak bu süre sonunda patlamanın gerçekleştiğini anlayabiliriz. Patlama olduktan bir dakika sonra birden başımızın ağrımaya başladığını varsayalım. Baş ağrımızın nedeni Güneş'teki patlama olabilir mi? Cevap hayır. Güneş ve Dünya'ya göre oldukça yüksek hızlarda ve uygun bir yönde seyahat eden bir gözlemci, başımızın patlamadan önce ağrımaya başladığını söyleyecektir. Bütün olası gözlemcilerin göz önüne alınması, bu tipten olayların neden-sonuç ilişkisiyle bağlı olmayacağını söylüyor bize. Eğer Güneş patlaması baş ağrısına yol açıyorsa bu, patlamadan 8.3 dakikadan sonraki bir zamanda olacaktır.

Dolayısıyla komşu yıldızlarla telepati kurmak bile yasak. Kursak bile telepatik cevabı en erken 8 yıl sonra alabiliriz.

Sadi Turgut  
ODTÜ Fizi Bölümü