

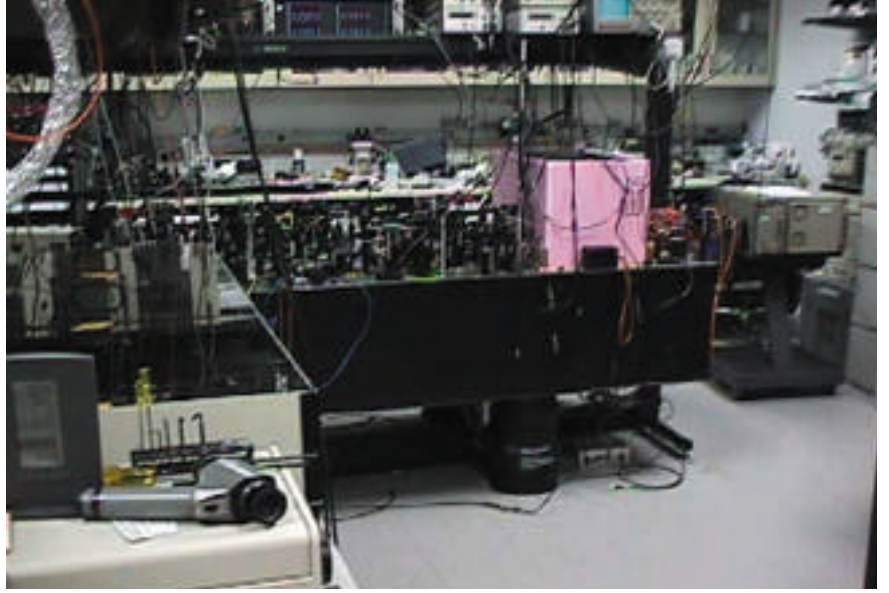
Işıktan Hızlı Nasıl Gidilir?

"Hiç bir mesaj ışığın boşluktaki hızından, yani saniyede yaklaşık 300,000 kilometreden daha hızlı iletilmez." Bu, geçtiğimiz yüzyılın başında Albert Einstein'ın geliştirdiği özel görelilik kuramının en ünlü sonuçlarından biri. Herhangi bir cisim ya da parçacık mesaj iletmek için kullanılabileceği için, kural cisimlerin hızlarını da sınırlıyor. Yasanın delinmesiye, "nedensellik ilkesi" olarak adlandırdığımız, nedenin sonuçtan önce olması gerektiğini söyleyen basit bir kuralı bozarak çok ciddi mantıksal çelişkilere yol açıyor. Bu nedenle, bu ünlü hız sınırının aşılamayacağı konusunda herkes görüş birliği içinde.

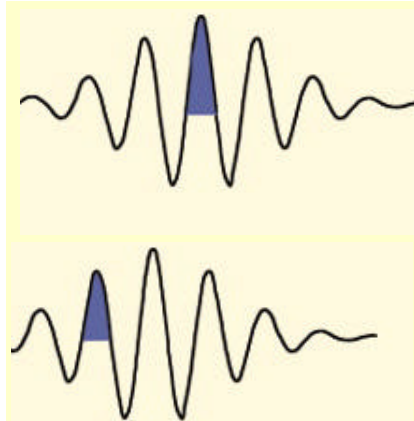
Görelilik kuramı genel kabul gördükten sonra, ışıktan hızlı hareketler bir çok defa gözlemlendi. Fakat her durumda, bu tip olayların ışıktan hızlı bir mesaj iletmek için kullanılamayacakları, dolayısıyla nedensellik ilkesine aykırı bir durum olmadığı ortaya çıkıyor. Son olarak Princeton'daki NEC Araştırma Enstitüsünden Wang ve arkadaşlarının lazerden çıkan bir ışık atımının sezum buharından oluşan bir ortamdan geçerken bu hız sınırını aşmasını sağlamaları buna bir örnek. Nedensellik ilkesinin hala geçerliliğini koruduğu deney sayesinde ışık atımında neyin mesaj taşıdığı konusunda bilgilerimiz netleşiyor.

Işıktan Hızlı Gidenler...

Belki de ışıktan hızlı gitmenin en kolay yolu ışığı yavaşlatmak. Işık herhangi bir malzemenin içine girdiğinde hızı çoğunlukla azalıyor. Bu



üzünden ortam içinde hareket eden ışığı geçmek zor olmadığı gibi, bu olay nedensellik ilkesine de aykırı değil. Işığın kendisinin görelilik kuramında özel bir yeri yok. Görelilik



Grup ve Faz Hızları: Tepecikler faz hızında, bütün tepe ve çukurların oluşturduğu grup ise grup hızında hareket eder. Şekilde faz hızı grup hızından fazla olan bir dalga gösteriliyor. Boyalı tepe yavaşça grubun önüne geçiyor ve orada kayboluyor. Yeriniyse arkadan gelen bir tepecik alıyor.

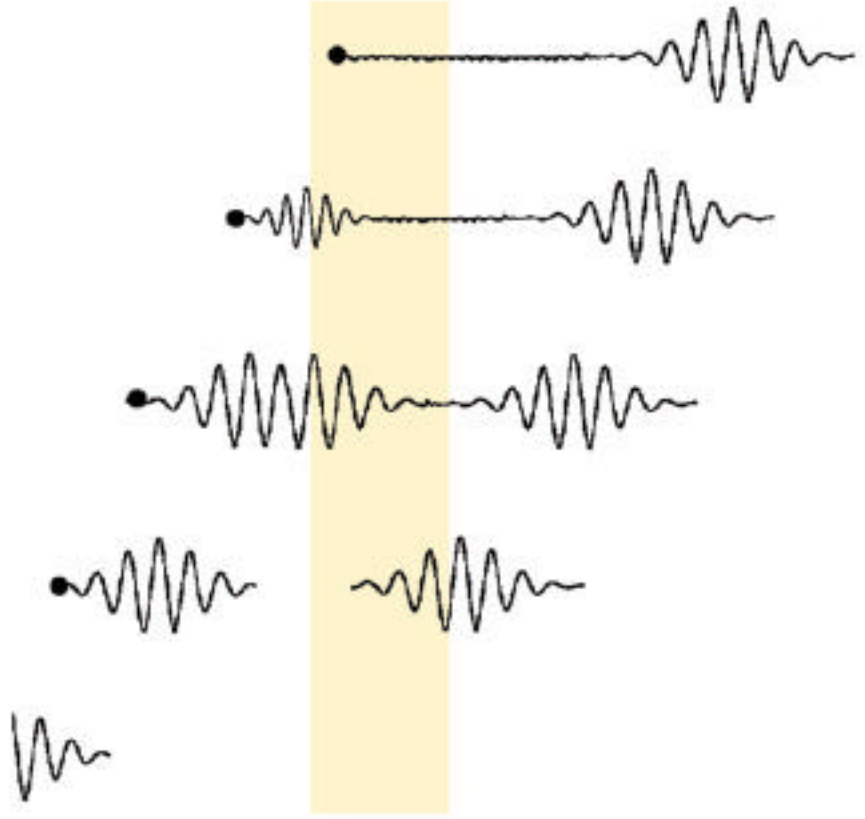
kuramı, evrensel olarak c ile gösterilen mutlak bir hız sınırı olduğunu, kütesiz bazı özel parçacıkların boşlukta hareket ederken doğanın izin verdiği bu en yüksek hızla hareket etmeleri gerektiğini söylüyor. Işığın parçacık biçimi olan fotonlar, büyük bir olasılıkla nötrinolar ve kütle çekimini ilettiği varsayılan ama henüz deneysel olarak varlığı gösterilememiş gravitonlar bu parçacıklar arasında. Bunlardan herhangi birisini yavaşlatmak mutlak hız sınırını aşağıya çekmek anlamına gelmiyor.

Bunun dışında, bir cismin hareket etmediği, fakat görünen bir şeyin hareketinin sözkonusu olduğu bazı durumlarda da bu hız sınırının aşılabildiği biliniyor. Örneğin, gökyüzündeki uçakları görebilmek için kullanılan dev fenerlerin bulutlar üzerindeki görüntüsü, bir gezegenin başka bir gezegen üzerine düşen gölgesi, Güneş'in yakınından geçen bazı kuyruklu yıldızların kuyruğunun ucu, ve son olarak da televizyon

ekranlarında yatay çizgilerin taranma hızı, ışık hızından hızlı olabiliyorlar. Bütün bu olaylar aslında birbirlerinin benzeri. Bu olayları analiz edebilmek için şöyle basit bir örnek vermek yeterli. İki arkadaşınıza ellerindeki lambaları gece saat tam 12:00:00'da yakmaları söylüyorsunuz ve birini Edirne'ye diğerini Kars'a gönderiyorsunuz. Kararlaştırılan vakt geldiğinde ve lambalar yakıldığında, her iki lambanın aynı anda yakıldığını, dolayısıyla iki nokta arasında bir mesajın sonsuz hızla yayıldığını iddia ediyorsunuz. Tabi ki herkes size gülüyor. Yukarıda saydığımız bütün olaylar bu basit örnekten farklıdır. Örneğin televizyon ekranında gördüğümüz çizgiler aslında televizyonun arkasındaki bir elektron tabancasından fırlatılan elektronların ekran üzerine çarparak parlak bir görüntü oluşturması sonucu oluşuyor. Kısa zaman aralıklarıyla çıkan elektronların cam ekran üzerinde birbirlerinden bir hayli uzakta bulunan noktalar üzerine düşmesi, ekran üzerinde parlak bir cismin hareket ettiği yanılması neden olur. Bu tip olaylar kullanılarak bir mesajın, hız sınırını aşacak şekilde gönderilmesi mümkün değil. Bütün bu örneklerde sadece ışık hızını aşmış gibi bir izlenim oluşuyor.

Kuantum Işınlaması...

Ama hız sınırının aşıldığı diğer bazı deneyler yukarıdaki olaylar gibi şakadan değil. Bunlardan en önemlisi Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen'in 1935'te ortaya attıkları ünlü EPR paradoksundaki dolaşık kuantum sistemlerini kullanmaya dayanıyor. Olay aslında yukarıda verdiğimiz basit örneğe benzer geliyor. İki arkadaşınızı yine birini Edirne'ye diğerini Kars'a olmak üzere yolcu ediyorsunuz. Bu defa ellerine içinde birbirleriyle dolaşık iki kuantum sistemi olan, özel şekilde hazırlanmış kutular veriyorsunuz ve arkadaşlarınızı kutuları saat tam 12:00:00'da açmaları için uyarıyorsunuz. Kutular açıldığında eşit olasılıkla, 0 ya da 1, yazı ya da tura, yukarı ya da aşağı diyebileceğimiz iki olası



a) Dalganın cephe noktası uyanılmış sezyum atomlarından oluşan ortama giriyor. Asıl grup geriden geliyor. b) Cephe ile beraber hala arkadan gelmekte olan asıl grubun bir kopyası sol duvardan dışarıya çıkıyor. Aynı zamanda ortam içinde bir grup ters yönde harekete başlıyor. c) Sol duvardan çıkan grup tamamlanmak üzere, ortamdaki grup arkadan gelen asıl grupla karşılaşmak üzere yoluna devam ediyor. d) Sol taraftan dışarıya çıkan grup yoluna devam ediyor. Bu arada ortamda ters yönde giden grup ile sağ taraftan ortama girmeye çalışan grup karşılaşıyor birbirlerini yok etmeye başlıyorlar. e) Arkadan gelen grup tamamen yok oldu. Lijun Wang ve ekibinin yaptığı deneyin kaba bir çizimi. Asıl deneyde gelen ışık atımının boyu 1 km, ortamın kalınlığı 6 cm. Ortam içinde ters yönde hareket eden grubun hızı ise ışık hızının yaklaşık 300'de biri. Boşlukta yayılan ışık 6 cm kalınlığındaki bölgeyi normalde 0.2 nanosaniyede katetmesi gerekirken, bu deneyde ortamın sol tarafından çıkan atım beklenenden 62 nanosaniye önce çıkıyor. Bir anlamda bu, 6 cm kalınlığındaki bir duvarı ışığın boşluktaki hızının 310 katı bir hızla geçmek demek!

sonuçtan biri gözlemleniyor. Kuantum dünyasının ilginçliklerinden biri burada ortaya çıkıyor. Edirne'deki kutu açıldığında kutudan o anda rastgele belirlenen bir sonuç çıkıyor. Bu sonuç aynı anda Kars'taki kutuyu etkiliyor ve bu kutu da açıldığında aynı sonuç çıkıyor. Bu sonsuz hızla bilgi taşımak değilse nedir? Kuantum dünyasının bu özelliği, ışıktan hızlı olarak bilgi taşıdığı gerekçesiyle Kuantum mekaniğine karşı güçlü bir koz olarak ileri sürülmüştü. Fakat deneylerle gözlemlenen bu olayı artık herkes kabulleniyor. İşin ilginç tarafı bu olayın nedensellik ilkesine zarar vermemesi. Kutulardan çıkan sonuçlar rastgele olduğu için, Edirne ve Kars'taki arkadaşlarınız birbirlerine kullanabilecekleri bir bilgi ulaştı-

ramıyorlar. Ama kutudan çıkan sonucun anında diğer tarafa iletildiği doğru. Kuantum ışınlaması diye adlandırılan bu olay, bilinen en güvenli şifreleme sisteminin oluşmasına imkan sağlıyor. (Detaylar için Bilim ve Teknik, Ağustos 2000 sayısındaki "Kuantum İnterneti" yazısına bakabilirsiniz.)

Dalgalar İçin Sınır Hız...

Parçacıkların hareketi söz konusu olduğundaysa kuantum mekaniği bunların tek bir noktada bulunmadıklarını, parçacığın bir dalga olarak algılanması gerektiğini söyler. Genellikle de Broglie dalgası olarak adlan-

dırılan bu dalgalar parçacığın uzayın değişik noktalarında bulunma olasılığını verir. Dalganın genliğinin yüksek olduğu yerlerde parçacığın bulunma olasılığı daha yüksektir. Işık da benzer bir biçimde bir elektromanyetik dalgadır. Dalgaların hareketi için sorun, uzaya yayılmış olduğundan dalganın değişik kısımlarının değişik hızlarla hareket ediyor olması. Bu nedenle bir parçacığın ya da ışığın doğanın en yüksek hız sınırını aşması gibi bir durum söz konusu olduğunda dalganın hangi parçasının bunu yaptığı sorusu çok önemli. Dalgayı sonlu sayıda dalga tepeciğinin oluşturduğu bir grup olarak düşünersek, her bir dalga tepeciği "faz hızı" olarak adlandırdığımız hızda, bütün grupsa "grup hızı" olarak adlandırdığımız hızda hareket eder. Kuantum mekaniğinde dalganın oluşturduğu grup, parçacığın bulunabileceği yer-



Deneyde kullanılan sezyum hücresi

leri belirttiği için, fiziksel hızın grup hızı olduğu fizik ders kitaplarında sürekli tekrarlanır. Öte yandan faz hızının deneysel olarak ölçülemediği düşünülüyor olduğundan fiziksel bir önemi yoktur. İlginç bir rastlantıyla, de Broglie dalgaları için faz hızının her zaman ışıktan hızlı olduğu biliniyor. Deneysel olarak bu hızı ölçme imkanı olmadığından, daha da önemlisi herhangi bir dalga tepeciği grubun dışına çıkamayacağından bu olay da nedensellik ilkesine aykırı değil.

Grup hızının da ışık hızını aşabileceği bu yüzyılın ortalarında kuramsal hesaplamalarda açığa çıktı. Ama deneysel verilerin yokluğunda, özellikle grup hızının fiziksel hız olduğu yorumu, dolayısıyla böyle bir olasılık, fizikçiler arasında rağbet görmedi. İlk kez 1991 yılında AT&T Bell Laboratuvarlarından Steven Chu ve Stephen Wong, ışık atımlarının bir ortamdan geçerken hız sınırını aştığını gözlemlədiler. Kısa bir süre sonra da, ışığın ve mikrodalgaların tünelleme yaparken hız sınırını aştığı deneyler yapıldı. Hız sınırının aşıldığı ilk deneylerden birini yapan Berkeley'den Raymond Chiao ışığın yayılabildiği bütün ortamlarda, grup hızının c'yi geçtiği bir frekans bulunduğunu söylüyordu. Özellikle bir malzeme belli bir frekanstaki ışığı en yüksek oranda soğuruyorsa, bu frekansa sahip bir ışık

Nedensellik İlkesi

Bu ilke, neden-sonuç ilişkisiyle bağlı iki olaydan nedenin sonuçtan daha önce olacağını söyler. İlkenin yüzlerce örneğini günlük yaşamımızda bulmak mümkün. Biz biraz dramatik bir örnek verelim: Bir katil silahını kurbanına doğrultarak ateşliyor, sonra da kurbanı ölüyor. Birinci olay, yani katilin tabancasını kullanması, neden; kurbanın ölmesi ise sonuç olaylar. Doğal olarak önce kurbanın öldüğü, sonra da katilin silahını ateşlediği bir cinayet çok saçma olurdu. Bir görgü tanığının bu tip bir olayı mahkemede anlattığını düşünemiyor musunuz? "Zavallı adam öldükten sonra, bu katil silahını ateşledi hakim bey!"

Özel görellik kuramına göre, eğer ışıktan hızlı giden bir cisim varsa, ya da ışıktan hızlı mesaj gönderebiliyorsak, yukarıdaki senaryo gerçek olabilir. Einstein'ın geliştirdiği kuram, mutlak zaman ve mutlak uzay olmadığını söyler. Birbirlerine göre sabit hızla hareket eden iki aracın içindeki gözlemciler, dışındaki olaylar hakkında farklı gözlemler yaparlar: Cisimler arası uzaklıklar, olaylar arasındaki zaman farkları değişik gözlemlenebilir. Fakat bütün gözlemciler, olayların gözlemledikleri biçimde fizik yasalarına uyduklarını görürler. Kuramın en ilginç sonuçlarından biri de, iki olayın zaman sıralamasının değişik gözlemlendiği durumların olabilmesi. Farklı yer ve zamanlarda olan iki olayı A ve B diye adlandırsak, gözlemcilerden biri A'nın B'den önce olduğunu, diğeri ise B'nin A'dan önce olduğunu saptayabilir. Üstelik her ikisi de olayların fizik yasalarına uyduğunu, herşeyin normal olduğunu söyleyecektir. Nedensellik ilkesiyle bu tip durumların bağdaştırılması, bize bu iki olay arasında neden ve sonuç ilişkisi olmayacağını söyler. Bir başka deyişle A ya da B olayı, diğer olayın meydana gelmesine neden olmamıştır. Görellik kuramı, hangi olayla-

rın bu tip bir özelliğe sahip olduğunu da söylüyor. Eğer iki olay arasındaki zaman farkı süresince ışığın uzayda alabileceği yol, bu iki olay arasındaki uzaklıktan küçükse, bu olaylar değişik zaman sıralamasında gözlemlenebilirler. Bir başka deyişle, birinci olayın meydana geldiği an oradan hareket eden bir ışık demeti, ikinci olayın olduğu yere zamanında yetişemiyorsa iki olay arasında neden-sonuç ilişkisi olamaz.

Bir örnek vermek gerekirse, belli bir anda Güneş'te bir patlama olduğunu varsayalım. Bu olaydan bir dakika sonraysa Dünyada bir radyo yayını bozulmuş olsun. Bu iki olay arasında bir neden-sonuç ilişkisi olabilir mi? Basitçe baktığımızda, Güneş'teki patlama yayının bozulmasında önce olduğu için böyle bir ilişkinin olduğunu söylemek isteyebilirsiniz. Ama görellik kuramı bunun tersini söylüyor. Işık Güneş'ten Dünya'ya yaklaşık 8 dakikada ulaşır. Dolayısıyla, yukarıda belirttiğimiz kriter sağlanmış olur. Yani, Dünya'ya göre sabit (ama yüksek) hızla hareket eden öyle bir gemi bulunabilir ki, bu gemiden olayların gelişimini izleyen uzaylılar olayların akışını tam tersi şekilde göreceklerdir: Önce Dünya'daki yayın bozuluyor, bundan bir süre sonra da Güneş'te bir patlama meydana geliyor. Nedensellik ilkesine göre, neden sonuç'tan sonra oluşamayacağı için, Güneş'teki patlama kendinden önce meydana gelen bir olayı tetiklemiş olamayacaktır.

Işıktan hızlı bir yolla bir mesaj gönderebilirseniz, yukarıdaki örnekte olduğu gibi nedensellik ilkesine aykırı bir durum yaratabilirsiniz. Örneğin elinizde ışıktan hızlı sinyal gönderen bir kumanda varsa ve bunu uzaktaki bir bombayı patlatmakta kullanırsanız, size göre kumandanın düğmesine basmanız bombanın patlamasında önce olacak ama size göre sabit hızla hareket eden bazı gözlemcilerse olayın tam tersi sırada gerçekleştiğini görecekler. Burada başka bir gözlemcinin var

olmasına da gerek yok. Sadece olayın ters sırada gözlemlenebilir olması önemli. Işıktan hızlı kurşunlarınız varsa, mükemmel cinayeti nasıl işleyeceğinizi de anlatalım: Önce kurbanınızı özel bir hızda giden bir araca bindiriyorsunuz. Burada silahınızı ateşliyor ve kurbanınızı öldürüyorsunuz. Bu sırada geminin dışında bir yere kasten çağırduğunuz Komiser Kolombo olayı gözlemliyor. Fakat Kolombo, tam tasarladığınız gibi önce kurbanınızın öldüğünü, sonra kurbanın vücudundan bir merminin çıkıp silahınızın içine girdiğini, bu anda da sizin silahınızı ateşlediğini görecektir. Kısaca mükemmel bir cinayeti Komiser Kolombo'nun gözü önünde işleyebilirsiniz. Ondan sonra Komiser Kolombo istediği kadar mahkemede tanıklık yapсын!

Yukarıdaki senaryoya benzer bir biçimde ışıktan hızlı cisimler geçmişe mesaj göndermek için kullanılabilir. Eğer öldürmek istediğiniz biri yoksa, böyle bir fırsatı sayısal loto sonuçlarını bir gün önceden öğrenmek için kullanmak isteyebilirsiniz? Ama geçmişe mesaj göndermenin en çarpıcı yönü, bir takım çözümleri zor mantıksal problemi ortaya çıkarması. Olmuş bir olayın olmasını engellemeye çalışmak en büyük mantıksal problemi yaratıyor. Örneğin birisi annesi ona hamileyken, kürtaj yapması için onu ikna ederse ne olur? Bir insan kendi oluşumunu ortadan kaldırılabir mi? Böyle bir olasılık o kadar problemlidir ki, pek çok kişi ışıktan hızlı hareketin olamayacağı konusunda görüş birliği içinde.

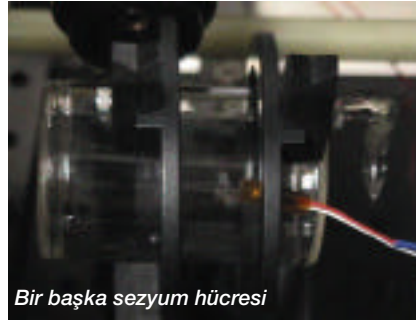
Buna karşın, ışıktan hızlı hareketin gözlemlendiği bir çok deney var. Fakat her bir deneyde, ışık hızını geçiş gerçek olsun ya da olmasın, mutlak hız sınırından hızlı bir şekilde bir mesaj gönderme mümkün görünmüyor. Sonuçta, en azından şimdilik, ne mükemmel cinayeti işleyebilirsiniz, ne de size hamile annenizi kürtaj yapma konusunda ikna edebilirsiniz.

atımının o malzeme içindeki grup hızı mutlak hız sınırını aşıyordu. Deneyler açıkça grup hızının mesaj iletmek için önemli olan hız olmadığını gösteriyordu. Fakat nedensellik ilkesine aykırı bir durum oluşmuş muydu? Eğer nedensellik ilkesi hala geçerliliğini koruyorsa, mesajların iletilme hızı neydi? Lijun Wang ve takımının yaptığı son deney, bu soruya açıklık getiriyor ve cephe diye adlandırdığımız dalganın en önünde bulunan kısmın hız sınırlanmasına uymak zorunda olduğunu, dalganın geri kalan kısmının böyle bir sınırlanmaya uyması gerektiğini söylüyor. Deneyde bir ışık atımı, uyarılmış sezyum atomlarından oluşan bir buharın içinden geçiriliyor. Ortam, bizim bildiğimiz malzemelerden değil. Lazerlerin yapımında kullanılan bu tip ortamlarda, dışarıdan gelen uygun frekansta bir ışık atımı atomların ışınım yapmasına neden olur. Böylece ortama giren ışık, zayıflamanın aksine daha da güçlenmiş olarak dışarıya çıkar. Deneyde özel bir şekilde hazırlanmış ortamda ışığın grup hızının negatif olması, yani grubun tepciklerle ters yönde gitmesi sağlanıyor. Bu olay ilginç bir şekilde, ortama doğru yönelmiş bir ışık atımının esas grup daha ortama girmeden, ortamın öbür tarafından dışarıya çıkmasına neden oluyor.

Cephe Nedir?

Işık atımları uzayda yayılırken, dalganın asıl grubun önünde giden zayıf bir kısmı bulunur. Matematiksel olarak elektromanyetik alanların başladığı dalganın en önündeki noktaya biz cephe diyoruz. Işık boşlukta hareket ederken, grup ve faz hızlarıyla, cephenin hareket ettiği hız birbirlerinin aynıdır. Ama ışık bir ortama girdiğinde olaylar değişir. Kuramsal hesaplamalar, cephenin hızının yüksek frekanslardaki faz hızına eşit olması gerektiğini söylüyor. Işık için cephenin hızı, hangi malzeme içinde hareket ediyorsa etsin, ışığın boşluktaki hızı c ile aynı. Wang'ın deneyinde cephe noktası ışık grubunun çok önünde bulunur. Işık sezyum buharının oluşturduğu ortama yaklaştığında ortama ilk önce cephe girer. Ortam özellikle uya-

rılmış atomlardan oluştuğu için, içeriye giren cephenin çok küçük etkisi, atomların ışınım yapmalarına neden olur. Böylece cephe ortam içinde ilerlerken gittikçe güçlenir. Cephe dışarıya çıktığındaysa cephe o kadar güçlenmiştir ki, dışarıya hâlâ arkadan gelmekte olan grubun bir kopyası çıkmaya başlar. Böylece, asıl grup daha ortama girmeden, ortamın öbür tarafından atımın bir kopyası çıkmaya başlamıştır bile. Peki, deneysel düzenek asıl grubu daha henüz görmeden kopyasını nasıl çıkarıyor? Bu sorunun yanıtı aslında cephedeki elektromanyetik alanlarda gizli. Cephe bir şekilde arkadan gelen grubun bütün bilgisini taşıyor. Böylece ortam, arkadan gelen grup henüz ulaşmadan sadece cephe bölgesinin taşıdığı bilgiyle grubun tama yakın bir kopyasını oluşturabiliyor.



Bir başka sezyum hücresi

Bunu bir benzetmeyle açıklamak gerekirse, önüne çıkan bütün orduları yenerek ilerlemesini sürdüren Cengiz Han'ın ordusunun belirli bir hedefe doğru hareket ettiğini düşünelim. Bu ordunun çok daha önündeki özel ulaklar, arkadan gelen ordu hakkında tüm detaylı bilgileri mümkün olan en hızlı şekilde ileriye iletmeye çalışır. Ordunun yolu üstünde bulunan bir kaledeki kişiler, ulaktan gelen ordu hakkında bütün gerekli bilgiyi alabilirler. Bu örnekte cepheyi olası en yüksek hızda hareket eden özel ulaklar oluşturuyor. Kaledekiler, sadece ulaklardan ve biraz daha ayrıntılı biçimde ulakların arkasından gelen mültecilerden kendilerinin başına gelecekleri önceden öğrenebilirler. Ordu gelmeden, gerçekleştirecekleri yıkım önceden tahmin edilebilir. Benzetmeyi biraz daha derinleştirmek için, bu defa kale kumandanının Cengiz Han'ın ordusuna katıl-

mak istediğini varsayalım. Böyle bir durumda, ilk ulaklar ulaşır ulaşmaz kumandan kendi askerlerini Cengiz Han'ın son hedefine doğru yollasın. Daha ilerdeki kaleler için bir kaç ay sonra gelmesi beklenen ordu vaktinden çok daha erken gelmiş, sanki Cengiz Han'ın ordusu büyük bir mesafeyi kısa zamanda katetmeyi başarmış gibi görünecektir.

Wang'ın deneyinde olan buna çok benziyor. Grubun hızı kesinlikle ışık hızını aşıyor ama bunu nedensellik ilkesine ters düşecek bir biçimde yapamıyor. Cephe hızı, her zaman ışık hızında hareket ediyor. Doğal olarak burada sorulması gereken bir çok soru var. Eğer bu açıklama doğruysa, bu şekilde hızlandırılmış bir ışık atımı ikinci bir defa daha aynı ortamdan geçirildiğinde ne olur? Dalga aynı şekilde hız rekorunu kırar mı, yoksa yukarıdaki açıklama-



Deneyin yapıldığı laboratuvar

manın söylediği gibi, grup cepheye daha yakın olduğundan bu defa aynı şeyi yapamaz mı? Ayrıca deneyin aynı, içinde binlerce foton barındıran güçlü ışık atımlarıyla değil de tek fotonlarla yapılırsa ne olur? Sanırsanız yakında bu soruların da yanıtları verilecektir.

Bu olayın elektronikte ilginç uygulamaları olabilir. Devrelerde binlerce değişik ortamdan geçen elektronik sinyaller her ortamda değişik oranlarda yavaşlamaya uğrar. Bu sinyallerin cepheleleri, kesinlikle kendilerinden çok daha hızlı hareket ediyorlar. Benzer bir düzenek kullanarak bu sinyallerin kaybettikleri zamanı telafi etmek mümkün olabilir.

Sadi Turgut

Kaynaklar:

Wang, L.J., et al. "Gain-assisted Superluminal Light Propagation" Nature, 20 Temmuz 2000, sayfa 277
 Brillouin, L., "Wave Propagation and Group Velocity" (Academic, New York, 1960)
<http://www.physics.berkeley.edu/research/chiao/superlum.html>
<http://www.neci.nj.nec.com/homepages/lwan/gas.htm>