

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

# BİLİM ve TEKNİK



TÜBİTAK

# YENİ UFUKLAR FİZİK PARADOKSLARI

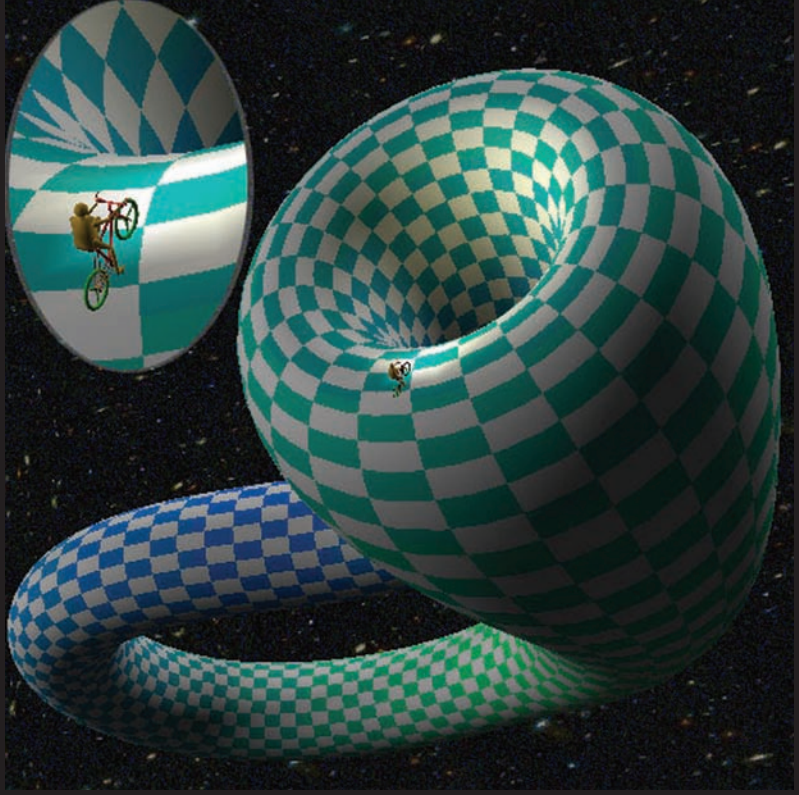
NİSAN 2008 SAYISININ PARASIZ EKİDİR

Hazırlayan: Prof. Dr. Vural Altın

# FİZİK PARA

'Karşı konulamaz bir kuvvet', 'kımıldatılamaz bir kütle' ile karşı karşıya geldiğinde ne olur?... Bu bir paradoks. Çünkü kuvvet galip gelirse, o 'karşı konulamazlığı' korurken, kütle kımıldatılamaz olmaktan çıkar. Aksi halde, kütle kımıldatılamazlığını korurken, kuvvet karşı konulamaz niteliğini yitirir. Aslında böyle birer kuvvet ve kütle var olması, kuramsal olarak mümkündür. Ancak, ayrı dünya veya evrenlerde bulunmak zorundadırlar. Her biri kendi dünyasına hükümler olabilir, ancak bu dünyaların çakışmaması gerekir. Çünkü, karşılaşmaları halinde bir tezatlık doğar.

Bu, sözkonusu paradoksun mantıksal açıklaması. Fiziksel açıklaması ise şöyle olabilir: 'Karşı konulamaz', yani sınırsız büyüklükte bir kuvvetin hareketi, sınırsız enerjiye karşılık gelir. Enerji kütleyle dönüşebildiğinden, sınırsız enerji sınırsız kütleyle yol açar ve bu kütle kendi üzerine çökerek, bir karadelik oluşturur. 'Kımıldatılamaz kütle', yine öyle. Sonuç iki karadeliktir ve bunlar karşılaştıklarında, birleşip tek bir karadelik oluştururlar.



Çince 'paradoks' sözcüğü, 'mızrak' sözcüğünü simgeleyen 'pin' karakteriyle, 'kalkan' sözcüğünü simgeleyen 'yin' karakterinin yan yana getirilmesiyle yazılır: 'pin-yin.' Bunun nedeni, MÖ.3. Yüzyıl felsefe yazıtlarından 'Han Feizi'de anlatılan bir öyküye dayanmakta. Öyküde bir adam, mızrağıyla kalkanını satmaya çalışmaktadır. Etrafında toplanan kalabalıktan birisi öne çıkıp mızrağın ne kadar iyi olduğunu sorar. Adam, mızrağının 'dünyadaki herhangi bir kalkanı delebilecek kadar güçlü' olduğunu söyler.



Bir başkası kalkanı merak edip, "peki ya kalkan nasıl?" diye sorar. Adam kalkanın da, "dünyadaki herhangi bir mızrağın darbesine karşı koyabilecek kadar dayanıklı" olduğunu söyler. Bir üçüncüsü aykırılığı sezmiş: "Peki, birisi o mızrağı alıp kalkanına saldırırsa sonuç ne olur?" diye soar ve satıcı bu soruya cevap veremez. Bu durum o günden beridir, "kendi içinde çelişkili" deyimine yol açmıştır. Bir önceki örnekteki gibi; satıcının iddiaları ayrı ayrı doğru olabilir, fakat aynı anda ve aynı yerde doğru olamazlar. Çünkü; mızrak kalkanı delemek olsa,



# DOKSLARI

iddialardan biri, aksi halde diğeri geçerliliğini yitirir.

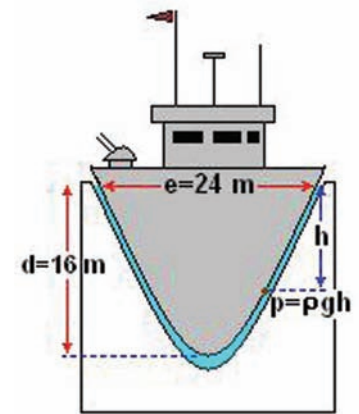
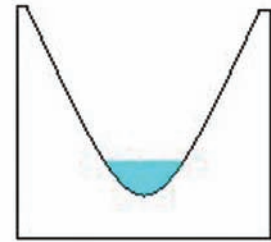
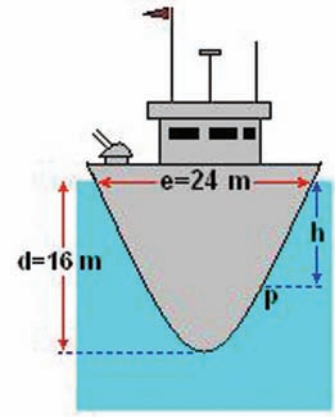
Paradoks genelde, her biri ayrı ayrı doğru görünen, fakat görünürde çelişkiyle sonuçlanan bir veya birkaç önermeden oluşur. Bu genel tanım içerisinde farklı biçimleri var. Örneğin, önermeler doğru olup, gerçekten de varılan sonucu ima etmekle birlikte; sonuç aslında bir çelişki olmayıp, önseziyi zorlayan bir durum oluşturmaktadır. Ya da sonuç gerçekten bir çelişki oluşturmakta, fakat doğru olan önermeler aslında bu sonucu ima etmemektedir. Bir üçüncü olasılık, önermelerden bazılarının doğru olmaması veya bir arada doğru olmalarının imkansız olmasıdır. Paradoks sözcüğü bu nedenlerle, çoğu zaman 'çelişki' sözcüğüyle eşanlamli olarak kullanılır. Fakat barındırdığı aykırılık, bir çelişkideki kadar açık ve basit değildir.

Fizikte ise, bilimin tümünde olduğu gibi, çelişki veya paradoksların bir düşünce hatası veya kuramsal eksiklikten kaynaklandığı varsayılır. Çünkü, gerçeğin tümüyle tutarlı olduğu varsayılmaktadır. Gerçi bu da bir felsefe varsayımdır. Birinci türden, yani doğru önermelerin gerçekten de ima ettiği çelişkili görünen fakat aslında öyle olmayan durumlar, bazen kasten üretilirler ve mevcut kuramın daha iyi anlaşılmasına yardımcı olurlar. (Bknz. Mızrak paradoksu.) Üçüncü tür, yanlış önermelerden hareketle varılan çelişkili durumlar, genellikle kuramın eksikliğinden kaynaklanır. Böyle paradokslar üzerinde yapılan çalışmalar, mevcut kuramın gelişmesini, yeni alanlara uygulanmasını zorlar ve bazen, sürpriz niteliğindeki yeni teknolojilerin doğmasına yol açar. (Bknz. Denny paradoksu.) Çelişki bazen, o zamana kadar bilinenleri açıklamış olan kuramın, karşılaşılan yeni verileri açıklayamaz duruma düşmesiyle doğar. Bu durumda kuramın gözden geçirilmesine çalışılır, ya da felsefesine yeni boyutlar katılır. (Bknz. Bell'in uzay gemileri.) Bu yapılamıyor ve açıklanamayan veriler birikiyorsa eğer, kuram gerekirse tü-

müyle terkedilir ve yerini, eski verileri de açıklayabilen bir yenisine bırakır. Örneğin 20. Yüzyıl başlarında karşılaşılmış olan paradoksların klasik mekaniği sarsmasında ve morötesi çöküşün yokluğu, atomun kararlılığı, çekirdeğin kararsızlığı gibi olguların kuantum mekaniğine, ışık hızının sabit olmasının da özel görelilik kuramına yol açmasında olduğu gibi... Gerçeklik hakkındaki 'klasik' varsayımlarımızın çökmesi halinde, bu varsayımlar ve dolayısıyla da gerçeklik hakkındaki anlayışımız, yeni kanıtların varlığında tutarlı olabilecek şekilde değiştirilir. Bazı örnekler...

## Bir Bardak Suda Yüzen Gemi

Soru şu: 20 bin tonluk bir savaş gemisi, bir bardak suda yüzdürülebilir mi? Konuyla ilgili Arşimed ilkesinin sıkça dile getirilen biçimi; "suda yüzen cisimler, taşıdıkları suyun ağırlığı kadar ağırlıklarından kaybeder" şeklindedir. Bu ifadeye bakıldığında, geminin yüzebilmesi için 20 bin ton su taşırması gerekir gibi görünüyör; yani 20 bin metreküp. Örneğin yandaki çizimdekine benzer, denizde yüzen bir savaş gemisini ele alalım. Geminin uzunluğu 100,



suya batma derinliği 16, su seviyesindeki eni 24 metre olsun. O halde, taşıdığı suyun hacmi;  $12 \times 16 \times 100 = 19.200 \text{ m}^3$  olur. Ağırlığı da bir o kadar ton. Geminin yüzmesini sağlayan 'kaldırma kuvveti' aslında, batma nedeniyle suyla kaplanmış olan yan yüzeylerine etkiyen su basıncının dikey bileşenlerinin, atmosfer basıncından daha büyük olmasıdır. Örneğin sağ yan yüzeyde görülen p noktasındaki basınç, derinlik h olduğuna göre; suyun yoğunluğu  $\rho$  ile gösterilirse;  $p = \rho gh$  kadardır. Bildiğimiz şeyler...

Şimdi geminin, dış yüzeyine tamı tamına uyan bir kalıbını yaptığımızı düşünelim. Kalıba önce bir miktar su koyup, sonra da içine gemiyi yerleştirmeye başlayalım. Gemi kalıba oturduğukça, su yan yüzeylerinden yukarı doğru taşar ve giderek inceler. Su omurgadan 24 m yüksekliğe kadar tırmandığında, gemi yüzer hale gelir. Çünkü, daha önce gelişi güzel olarak seçtiğimiz p noktasındaki basınç; bu noktadan yüzeye kadar zikzaklı bir patika izlenerek görüleceği üzere; tıpkı geminin denizde yüzmesi sırasında olduğu gibi,  $p = \rho gh$  kadardır. Diyelim, gemi yüzer hale geldiğinde suyun inceliği 1 mm'yi buldu. Suya batmış olan yüzeyin oluşturduğu ikizkenar üçgenin yan kenarı;  $y = (12^2 + 16^2)^{1/2} = 20$  metredir. O halde, alanı  $A = 2 \times 20 \times 100 = 4000 \text{ m}^2$  olur. Suyun kalınlığı 1 mm olduğuna göre de; gemiyi yüzdüren suyun hacmi  $4 \text{ m}^3$ 'ten ibarettir. Gemiye çok daha az miktarda suda yüzdürmek de mümkün. Örneğin 100 molekül kalınlığında... Suyun molekülleri arasındaki ortalama uzaklığı hesaplamak kolay. 1 litre su, yak-

laşık 1 kg. Suyun molekül ağırlığı 18. Yani;  $1000 \text{ cm}^3$  suda  $1000/18 = 55,5$  mol  $\text{H}_2\text{O}$  var. Ya da, moldeki unsur sayısı (Avogadro sayısı)  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  olduğuna göre;  $55,5 N_A = 3,3 \times 10^{25}$  molekül. Litreyi, kenarı 10 cm olan bir küp şeklinde alalım ve içindeki moleküllerin eşit aralıklarla dağılmış olduğunu varsayalım. Kenarlardan biri üzerindeki molekül sayısı da N ise eğer, aralarındaki uzaklık  $u = 10/N$  cm olur. Toplam molekül sayısı  $N^3 = 3,3 \times 10^{25}$  olduğuna göre, N değerinin  $(3,3 \times 10^{25})^{1/3} = 3,2 \times 10^8$  olması gerekir. Moleküller arası uzaklık;  $u = 10/3,2 \times 10^8 = 3,1 \times 10^{-8}$  cm veya  $3,1 \times 10^{-10}$  metredir. Şimdi de tersinden gidecek olursak; geminin suya batmış olan yüzeyini kaplayan 100 molekül kalınlığındaki suyun hacmini;  $u \times A = 4000 \times 3,1 \times 10^{-10} = 1,24 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  olarak buluruz. Yani litrenin binde biri kadar, sadece 1 gram...

Burada suyun sıkıştırılmaz olduğunu varsaydık. 'Yüzey gerilimi' ve 'kılcal etki'ler, sonucu fazla değiştirmez. 100 tane molekül omuz omuza vermiş, geminin ağırlığını kalıbın yüze-

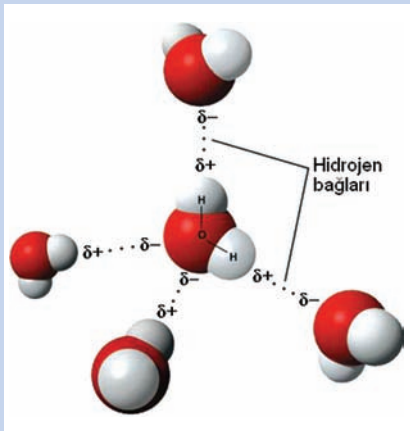
yine aktarmaktadır. "Moleküller bu basınca dayanabilir mi" sorusunun yanıtı, kuşkusuz "evet"tir. Çünkü gemi denizde yüzerken de, bu moleküllerin komşu moleküllere aktardıkları basınç, aynı,  $p = \rho gh$  düzeyindedir zaten. Moleküllerin bunca dayanıklılığı; atomlarının dış yörüngelerindeki elektronların, "Pauli'nin dışlama ilkesi" gereği aynı kuantum durumunda olmayı reddetmelerinden kaynaklanan 'degenerasyon basıncı' nedeniyle, birbirlerinden uzak durmalarından kaynaklanmaktadır. Elektronların bu direnişi ancak iri kıyım yıldızların merkezinde, kütle yoğunluğunun  $\text{cm}^3$  başına yarım trilyon tonu aşması halinde kırılır; nötron yıldızları oluşurken...

Bir sorun var tabii. Geminin dış yüzeyi ile kalıbın iç yüzeyi arasında bu kadar ince bir su katmanı oluşturabilmek için; her iki yüzeyin de ideal düzeyde düzgün veya çıkıntılarıyla girintilerinin birbirlerinin içine tam oturacak şekilde karşılıklı uygun olması gerekmektedir. Bu nasıl başarılır?...

Gemi Antarktika sahillerinde demirlemişken, deniz suyunun, gövdeyi kırmaksı-

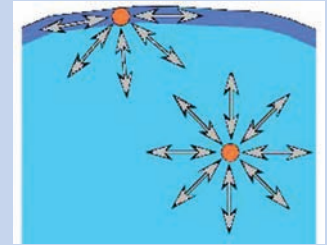
## Yüzey gerilimi

Su, bildiğimiz gibi basit bir molekül; iki hidrojen, bir oksijen. V harfine benzeyen bir geometriye sahip ve hidrojenlerin oksijenle yaptığı 'eşdeğerlilik' ('kovalent') bağları arasında  $104,5^\circ$ lik açı var. Molekül toplamda nötr olmakla birlikte, oksijenin elektrona ilgisi fazla olduğundan, hidrojenlerin elektronları çoğu zaman oksijene daha yakın konumlarda. Dolayısıyla, molekül; oksijen civarında yerel eksi, hidrojenler civarında da yerel artı yüklere sahip. Zıt işaretli yüklerin böyle, bir üçgenin köşelerinde odaklanmış olması, moleküllerin sonuç olarak sanki doğrusalmış-



lar gibi, etkin birer 'çift kutuplu' ('dipole') yük momentine sahip olmalarını sağlıyor. Farklı moleküllerin dipolleri arasındaki etkileşimler, net çekim kuvvetlerine ve bu da, moleküllerin arasında 'kutuplanma' ('polar') türü bağların oluşmasına yol açıyor. Moleküller birbirine ayrıca, artı yük kalıntısına sahip olan hidrojenlerinin; komşu moleküllerin eksi yerel yüke sahip olan oksijenleriyle kurduğu 'hidrojen bağları' aracılığıyla da tutunmakta. Bu bağların bolluğu, su moleküllerinin 'hemcinslerine karşı çekim kuvveti'nin ('kohezyon') hayli güçlü olmasını sağlar ve bir su kütlesi, moleküllerinin arasındaki bu çekim kuvvetleri sayesinde bir arada durur, oda koşullarında sıvı bir kütle oluşturur. Su bu yüzden; yüksek buharlaşma ısısına ve bilinen bileşikler arasında, amonyaktan sonra ikinci en yüksek ısı kapasitesine sahip olan malzeme. Öte yandan, V'nin uçlarındaki küçük hidrojen atomları bir cımbızın ince uçları gibi; suyun içindeki yabancı atom veya moleküllerin arasına girip onları birbirinden ayırmakta bayağı usta ve su bu yüzden, harika bir çözücü, vb.

Su kütlesinin içindeki bir molekül, komşularıyla kurabileceği tüm hidrojen bağlarını kurmuş olup, her tarafından çekim kuvvetlerine tabidir. Dolayısıyla, üzerindeki net kuvvet sıfır olur. Halbuki, farklı bir ortamla karşı karşıya bulunan bir yü-



zey molekülü, sadece yüzeydeki ve yüzeyin iç tarafındaki komşu hemcinslerine bağlıdır. Dış çevreye karşı sınırda bulunduğu, kurabileceği bağlardan bazıları açıkta kalır. Bu haliyle, bir yandan yüzeydeki komşularına tutunurken, diğer yandan içteki komşuları tarafından içe doğru çekilmektedir. Suyun yüzeyi bu yüzden, gergin bir çarşaf gibidir; üzerindeki herhangi bir kırışıklık, içe doğru çekim kuvvetleri tarafından düzeltilir. Kuvvet yerine enerji açısından bakıldığında; yüzey molekülleri, kurabilecekleri bağların hepsini kuramamış olduklarından, içteki moleküllere oranla daha yüksek bir potansiyel enerji düzeyindedirler. Halbuki mekanik sistemler, toplam potansiyel enerjilerini en aza indirmeye eğilimindedir. Bir su kütlesi bu eğilim nedeniyle, yüzeyini olabildiğince küçültmeye çalışır. Birim kütle başına en az yüzey alanı, küresel geometriyle sağlanır. Dolayısıyla, bir yağmur veya musluktan düşen su damlasının şekli, kü-

zın donduğunu varsayalım; geminin dibinden de daha derine kadar. Geminin içindeki, diyelim havayı homojen olarak, 0 °C'nin biraz üzerine doğru ısıtmaya başlarsak; geminin dış yüzey sacının ideal homojen malzeme yapısına sahip olduğu varsayımıyla; hemen dışındaki buz molekülleri, sacdan dışarıya doğru erimeye başlar. Yaklaşık ilk 100 molekül kalınlığındaki kısmı eridiğinde; ideal kalıp ve içindeki 1 gram suyla birlikte, yukarıda bahsedilen durumu elde etmiş oluruz.

Kıssadan hisse, Arşimed ilkesini; “cisimler, hacimlerinin batma nedeniyle suyla kaplanmış olan kısmını doldurabilecek kadar suyun ağırlığı kadar ağırlıklarından kaybederler” şeklinde ifade etmek daha doğru.

## Denny'nin Paradoksu

Durgun su yüzeyleri geniş alanlar oluşturuyor, dümdüz araziler gibi. Bomboş görünmelerine karşın, besin kaynakları açısından oldukça zenginler. Rüzgarın savurup getirdiği ve ıslanan vücudu suya yapışınca kurtulup uçamayan böcekler gibi... Sonra, yap-



Üstte minik bir cins su sineği, büyük cinse yem olmak üzere. Altta, yüzeyin altına tutunmuş sırtüstü ilerleyen bir tatlı su salyangozu. Minik sinek büyüğe: “Gözlerini bana dikip ağzını şapırdatacağına, şu alttan geçene bak: mmmmh!”

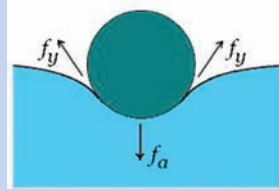
raklar ve tohumlar... Nitekim, geçimini temin için, rekabetin pek de yoğun olmadığı bu düzlüklere yönelmiş çok sayıda canlı türü var; örümcekler, sinekler, su salyangozları vb. Hepsisi de, yüzey geriliminden yararlanarak, suyun üstünde gezinebiliyor. Hatta, tatlı su salyangozları (*Physidae*); karada yüzüstü hareket ederken, suyun içinde sırtüstü halde, gergin yüzeyin hemen altına tutunarak ilerliyor. ‘Su gezginleri’ familyasını (*gerridae*) oluşturan su

sineklerini ise; göl kenarları, yavaş akan dereler, su birikintileri ve bataklıkların durgun yüzeylerinde seri bir şekilde hareket ederken hepimiz görmüştüzdür. Ergin dişileri, su altında yumurtlıyor. Fakat yumurtadan çıkan yavrular, yüzeye tırmanıyor. Tehdit altında kaldıklarında karaya sığınmakla birlikte, yaşamlarının büyük bir kısmını su yüzeyinde geçiriyorlar. Familyada yüzlerce tür var. Türler genelde milimetre boyutunda ve hepsi 6 bacaklı. Sinek suya konduğunda, ayaklarının altında yarımküre şeklinde bombeler oluşuyor; yani ‘gergin çarşaf’ta hafif göçmeler. Büyüklük arttıkça suda yürüyebilmeleri için, bacak uzunluğunun vücuda oranının artması gerekmektedir. 20 cm uzunluğundaki dev ‘Vietnam su gezgini’, suda yürüyebilen bu sineklerin bilinen en büyük örneği. Bizim kahramanımız, 1 cm civarındaki yetiştiren boyuyla *gerris remigis*...

Önceleri, *gerridae*'nin su yüzeyinde, ayaklarıyla oluşturdukları kılcak dalgaları geriye doğru itekleyip, öne doğru kazandıkları momentumla hareket ettikleri sanılmaktaydı. Fakat kılcak

resele yakın olup, yerçekiminin etkisiyle biraz bozulur. Cisimlerin yüzeylerinin, bünyelerine göre daha yüksek potansiyel enerjiye sahip olması; katı hal fiziği için genel bir doğru. Öyle olmasaydı, yani tam tersine, eğer cisimlerin yüzeyi, potansiyel enerjiyi en aza indirgeme açısından daha cazip olsaydı, cisimler fırsatını buldukça yüzey alanlarını arttırmaya çalışırdı. Bu ise, etrafımızdaki cisimlerin uzun vadede, tek bir atom veya molekül inceliğinde yüzeyel yapılara dönüşmesine yol açardı. Öte yandan, yüzeylerin daha yüksek potansiyel enerji düzeyinde olması nedeniyle de ki; örneğin katı bir cismi kesip dış yüzey alanını artırırken, enerji harcıyoruz. Kesme ‘iş’ini, ısı üretimine yol açmaksızın, ‘tersinir’ bir süreçle yaptığımızı düşünürsek; harcadığımız enerjinin tümü, yüzey alanının arttırılmasına gider. Gerçi katılar sıvılardan farklı olarak; atomları birbirine çok daha güçlü bir şekilde bağlı olduğundan; en azından kısa sürede, yüzey alanlarını değiştirip, küresel şekle yönelemezler. Fakat sıvılar, molekülleri birbirinin üzerinden kolaylıkla kayabildiğinden, bunu çabucak yapabilmekte.

Sıvının yüzeyini gergin tutan net kuvvete, ‘yüzey gerilimi’ deniyor. Gergin olan yüzeyin içeriye doğru daha fazla çökeme nedeni, içteki moleküllerin daha fazla sıkışmaya karşı koyması, yani basıncı. Öte



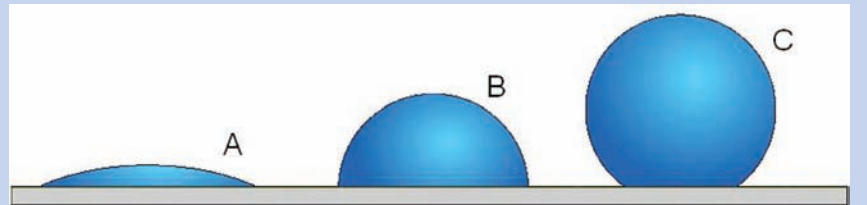
yandan, yüzey molekülleri yabancı bir cisimle karşılaştıklarında, kuramamış oldukları bağlarını kurmaya çalışırlar. Dolayısıyla çoğu zaman, yabancı cisimi oluşturan malzemeye yapışırlar (‘adhesion’). Ancak, cismin ağırlığı ( $f_a$ ) yüzeyde bir çöküntüye yol açar. Çöküntü, yüzey geriliminin ( $f_y$ ), yukarıya doğru dikey bir bileşen kazanmasıyla sonuçlanır. Eğer bu dikey bileşen cismin ağırlığından büyükse, cisim yerçekimine karşı kaldırılır ve cisim suya batmayıp, yüzeyde kalır.

Kısacası, örneğin bir yaprağın üzerindeki su damlalarını ele alacak olursak; su moleküllerinin ‘hemsinlerine karşı çekim kuvveti’ damlayı bir arada tutarken; yüzey gerilimi damlaya küresel şeklini verir ve yaprakla temasta olan moleküllerin eksik



bağlarını yaprağın malzemesiyle tamamlaması da, damlayı yaprağın üzerinde tutar. Örneğin bir jilet veya toplu iğne gibi kütle yoğunluğu sudan daha yüksek olan cisimler dahi, yüzey gerilimi sayesinde suda yüzülebilir ve cisim ancak, yüzeyleri yeterince ıslanınca batar. Islanma, ıslatma?...

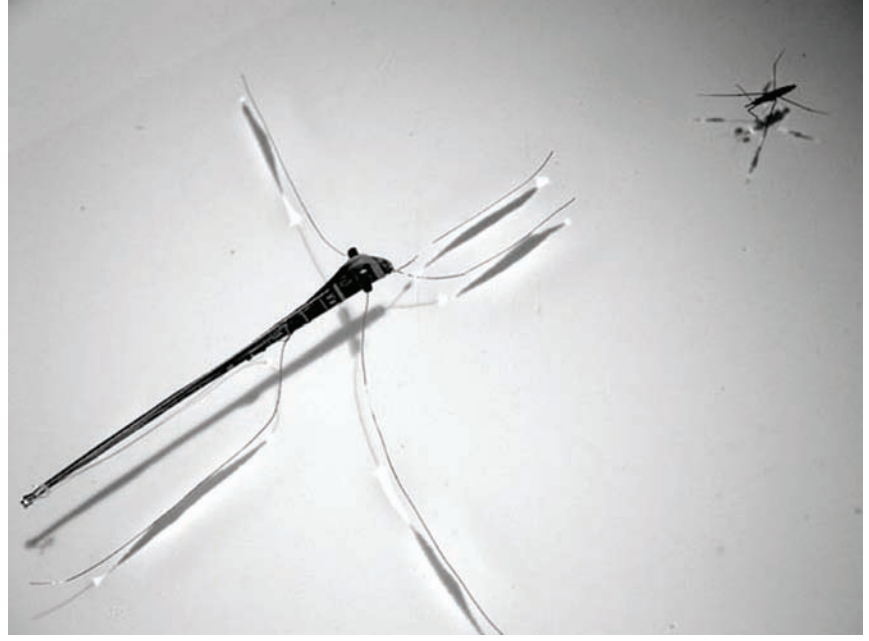
Bir su damlası yabancı bir katı malzemenin üzerine konduğunda, şekil değiştirebiliyor. Her ne kadar aşağıdaki değerlendirmeler herhangi bir sıvı damlasının farklı bir sıvı ya da katı malzeme üzerine konması ve etrafta hava yerine başka bir gazın bulunması şeklindeki genel hal için geçer-





dalgaların faz hızı; yani, örneğin tepe noktalarının seyahat hızı; yüzey gerilimi ( $\sigma$ ), suyun yoğunluğu ( $\rho$ ) ve yerçekimi ivmesine ( $g$ ) bağlı olup, normal koşullar altında 0,23 m/s kadar ( $v_m=(4g\sigma/\rho)^{1/4}$ ). Gerçi kılcal dalgaların hareketi sırasında, su molekülleri yatayda hareket etmiyor; buldukları konum civarında yükselip alçalmakla kalıyorlar. Fakat, biyofizikçi Mark Denny 1993 yılında, bu yöntemle momentum kazanabilmesi için, dalgaları üreten cismin en az  $v_m=0,23$  m/s hızla hareket etmesi gerektiğini gösterdi. Ancak, yavrular bacaklarını bu kadar hızlı oynatamıyor. Bu durumda, belli bir yaşa ulaşana kadar hareketsiz kalmaları gerekmekte. Halbuki, 1,5 m/s hızla hareket edebildikleri biliniyor. Denny'nin paradoksu bu... Yüzey gerilimiyle ilgili... (Bknz. Yüzey gerilimi).

Bunun üzerine MIT'den matematikçi J.W.M. Bush ve iki doktora öğrencisi, sineklerin; orta iki bacağı kürek çeker gibi arkaya doğru oynatarak, ayak uçlarındaki göçük yüzeyin altında zıt yönlü yarım küresel anaförler oluşturup geriye göndermek suretiyle hare-



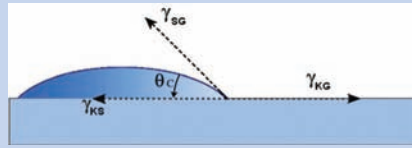
Gerçek bir su gezgini, robotla karşılaştırmış incelyor: "Bu ne bu böyle ya, tayyare gibi..."

ket ediyor olabileceklerini gösterdi. Bu durumda, zıt yönlü anaförler birbirinin dönme momentumlarını iptal eder ve geride sadece ileri yönde doğrusal momentum kalır. Ekibin yaptığı benzetişim deneyleri, bu öngörüğü doğruladı.<sup>1</sup>

2003 yılında, *gerris remigis* türü üzerinde doğrudan incelemeler yapıldı. Sineklerin iki tür yürüyüşleri var; her bacak darbesinde ya boyları kadar süzülüyor, ya da zıplayıp havada boylarının misliyle yol alabiliyorlar. Suyu indikle-

li ise de, biz katı bir yüzey üzerine konan bir su damlasına odaklanalım. Damla katı malzemenin yüzeyine konduğunda; yerçekiminin etkisiyle biraz yayvanlaşarak, yaklaşık kesik bir küre şeklini alır; yani bombelenir. Sonuç olarak; suyun havayla, suyun katı malzemeyle ve katı malzemenin hava ile olmak üzere, üç farklı arayüzey oluşmuştur. Bu arayüzeylerde, ilgili malzemeler arasında atom veya molekül alışverişleri yer alır. Örneğin suyun yüzeyindeki moleküllerden bazıları, ısı salınımlarının sağladığı itkiyle, komşularından kopup havaya karışırken, havadaki bazıları da, suyla temasa gelip yüzeye yapışır. Yani, bir yandan su buharlaşırken, diğer yandan havadaki buhar yoğunlaşmaktadır. Hakim olan sıcaklık ve basıncın belirlediği termodinamik dengeye ulaşıldığında, iki süreç birbirini dengeler ve molekül alışverişlerinin bir miktar zamandaki net sayısı ortalama olarak yaklaşık sifira iner. Bu durumda, civardaki hava su buharına 'doymuş' olur. Benzeri bir süreç, katı hava arayüzeyinde de yer almaktadır. Fakat tabii, birbirine çok daha sıkı şekilde bağlı olan katı atomlarının havadaki buhar basıncı çok daha düşük, sifira yakındır. Nihayet, katı-sıvı arayüzeyinde ise; su molekülleri açıkta kalan bağlarını tamamlayıp, daha düşük bir potansiyel enerji düzeyine inmeye çalışırlar. Bunun mümkün olabilmesi için, malzemenin yü-

zeyinde, su moleküllerinin açıkta kalan bağlarına uygun geometriye sahip, artı ve eksi yerel yüklerin bulunması gerekir. Yüzeyi bu özelliğe sahip olan malzemelerin 'suya ilgi'sinin olduğu söylenir. Bu durumda, damlanın altındaki moleküller, temasa geldikleri yabancı atomlarla kurabildikleri bağları kurup, katı malzemenin yüzeyini 'ıslatır'. Islak yüzeyin çeperi; katı, sıvı ve hava arasında bir üçlü buluşma hattı oluşturmaktadır. En ilginç olaylar, bu çeper civarında yer alır...



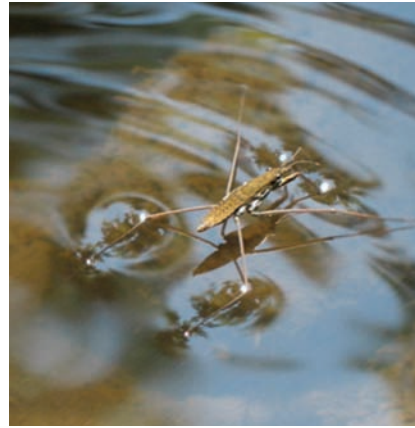
Çeperin hemen üzerindeki su molekülleri, katı malzemeyle bağ kurup, potansiyel enerjilerini azaltmakta ve çeper büyüdükçe, damla yayılarak yayvanlaşmaktadır. Bu, damlanın kütle merkezine aşağıya çekilerek, yerçekimi potansiyel enerjisinin de azaltılması anlamına gelir. Ancak, yayvanlaşma aynı zamanda damlanın havaya karşı yüzeyini arttırdığından; yüzey gerilimi çeperin ilerlemesine karşı koymaktadır. Damla yayvanlaştıkça, yüzey geriliminin karşı koyuşu artar ve kurulan bağlardan bazılarının kırılıp, kuran moleküllerin geri çekilmesine başlanır. Bu aşamada damlanın yayvanlaşması yavaşlar-

ken; toplam potansiyel enerjinin üç bileşeninden ikisi el ele vermiş olup, üçüncüsüyle yarış halindedir: Yerçekimi potansiyel enerjisi, kütle merkezinin alçalmasıyla birlikte azalmakta, yüzey enerjisi ise; damlanın havaya karşı yüzeyinin büyümesiyle artarken, ıslak zeminin büyümesiyle de azalmaktadır. Artış ve azalmalar birbirini dengelediğinde, yayvanlaşma durur. Denge durumunda dahi; ıslak yüzeyin çeperindeki bağlar, kah kurulup kah kırılmakta, damlanın şekli mikro ölçekte, kah yayvanlaşıp kah dikelmektedir. Yani sözkonusu denge, ortalama değerler civarındaki dinamik bir dengedir. Denge durumuna kuvvetler açısından bakıldığında ise, çeperin herhangi bir noktasında; sıvı-gaz ( $\gamma_{sg}$ ), katı-sıvı ( $\gamma_{ks}$ ), katı-gaz ( $\gamma_{kg}$ ) haller arasındaki yüzey gerilimi kuvvetlerinin vektör toplamının sıfır olması gerekir (Young eşitliği). Bu eşitlik bize, bombe yüzeyinin zeminle buluştuğu noktadaki teğetinin zeminle yaptığı açının 'kritik değeri'ni verir ( $\theta_c$ ). Bu açığı 'temas açısı' deniyor. Temas açısı, katı yüzeyin suya olan ilgisinin ölçüsünü oluşturmaktadır. Örneğin, 0-90° arasında açı değerleri veren malzemelerin 'susever' ('hydrophilic') olduğu söylenir. Bazılarında suya ilgi yoğunudur. 'Süper susever' olarak nitelendirilen bu tür malzemelerde, su damlası katı yüzeyin üzerine ince bir katman halinde yayıldığından, temas açısı 0

rinde fren yapmak için, tersine bacak darbeleri uygulamak zorundalar. Bu mekanizmayı taklit etmek ve hem de toplu iğne suda yüzdüğüne göre, sineklerin mekanik bir örneğini yapmak mümkündür. Nitekim, doktora öğrencileri, matematikçi David Hu ve makina mühendisi Brian Chan; gövdesi hafif alüminyum, bacakları ince paslanmaz çelik telden, 'robostrider' adını verdikleri bir su gezgini robot yaptılar. Robotun bacaklarından ortadaki çift, gövde içindeki minik bir makaraya sarılı esnek bir bant tarafından hareket ettirilmekte. Robot, yüzey gerilimini yırtamayacak kadar hafif olmakla birlikte, gerçek sineklerinden çok daha uzun bir boya sahip. Her bacak darbesinde, boyunun yarısı kadar yol alabiliyor. Ancak bu sefer de başka bir soru doğdu...

Tatlı su birikintileri kıyıda genellikle susever bir malzemeyle buluşur ve su, kılcal etki nedeniyle, malzeme yüzeyinde tırmanır. Tırmanma eğimi hayli yüksektir ve bu yüksek eğimde, yüzeyaltı anaförleri oluşturmak mümkün değildir. Sinek hareket etmeye çalışacak olsa, patinaj yaparcasına geriye ka-

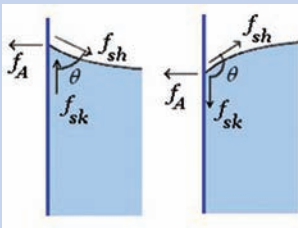
yar. Fakat buna rağmen, su gezginleri, gerektiğinde bu engeli aşarak karaya çıkabiliyor. Hem de bunu, görünürde hiç zahmetsiz bir şekilde; vücutlarını sadece kasıp, bacaklarını hiç oynatmaksızın yapıyorlar. Chang ve Hu, 'menisküs tırmanma' denilen bu olayın sırrını da çözdüler. Vardıkları sonuca göre; sinek kıyıya yaklaştığında, ön ve arka bacaklarını suya daldırıp ıslatarak, kendine doğru çeker. Yani, su yüzeyinin oluşturduğu gergin çarşafı delip, deliklerden tutup çekerek, katlamaya çalışır. Orta bacak çifti suyun yü-



zeyindedir, uçlarının etrafı çukur. Suyun yüzeyi, sineğin altında bir büküm yapılmıştır; kısa bir ondülin dilimine benzeyen. Sinek sonra, adeta kaskatı kesilir ve saniyede boyunun 30 misline varan bir hızla, kıyıya doğru yükselir; jet bir asansör gibi. Çünkü, sinek menisküsün eteğini altına katlamakla, karaya kadarki kısmının eğimini arttırmış ve eğim artınca da, yüzey geriliminin dikey bileşeni, sineği altındaki bükümle birlikte sırtlayıp karaya fırlatacak kadar büyümüş olur; tıpkı mançlık gibi... Ama hala bir sorun vardı...

Sinekler suyun üzerinde hareketsiz durabiliyor. Bunu da yüzey gerilimi sayesinde yapabiliyorlar. Ancak, bacaklarının ıslanmaması gerekmektedir. Islanmayı önleyen, bacakların mum benzeri bir 'susevmez' malzemeyle kaplı olması. Bu durumda, kaplama malzemesinin suyla temas açısına ve ayağın geometrisine bakarak, sineğin tek bir bacağının yüzey gerilimi aracılığıyla sağlayabileceği kuvveti hesaplamak mümkün. Malzemenin tabii, büyük bir temas açısı değerine sahip olması gerekiyor. Pekin'den biyofizikçi Xuafeng Ga-

o'ye kadar inebilir. Bazı malzemeler ise, su moleküllerini iter veya en azından çekmez. 'Susevmez' ('hydrophobic') olduğu söylenen böyle bir malzemenin üzerinde, su damlası dikeler ve temas açısı 90 °'yi aşar. Hatta, 'süper susevmez' malzemelerde 180°'ye ulaşabilir. Bu durumda, su damlası malzeme üzerinde bir boncuk tanesine dönmüş, adeta askıda durmaktadır. Yüzey geriliminin yol açtığı bir de 'kılcal olgu' var...



Susever bir malzemeden yapılmış bir kaba konan su, kabın kenarında yükselir ve üst yüzeyi içbükey bir hal alır. Buna 'kılcal' ('capillary') olgu deniyor; ince kaplarda çok daha belirgin, bitkilerin terlemesinde önemli. Böylelikle, yüzeyin düz olması haline göre; kütle merkezi biraz yukarı kalkarken, hava ile arayüzeyin alanı artmış olur. Birinci nedenle, potansiyel enerjinin yerçekimi bileşeni, ikinci nedenle de yüzey gerilimi bileşeni artar. Ancak bu iki artışın toplamı, kabın yüzeyiyle ilgili bağlar kurarak kenardan yukarı tırma-

nan su moleküllerinin potansiyel enerjilerindeki azalmayla dengelenir. Kuvvetler açısından bakıldığında ise, kap malzemesinin suseverliği; suyun gergin yüzeyini çeperinden tutup, bir yandan yukarıya doğru kaldırmaya ( $f_{sk}$ ), diğer yandan da kabın yüzeyine yapışık tutmaya ( $f_A$ ) çalışan bir kuvvete yol açar. Bu kuvvet, çeper boyunca ters yönde etkiyen yüzey gerilimi kuvveti ( $f_{sh}$ ) tarafından dengelenmektedir. Temas açısı  $\theta$  ne kadar büyükse, kaldıran kuvvet bileşeni  $f_{sk}$  de o kadar büyük olur. Yüzey gerilim kuvvetinin çeperin birim uzunluğu başına etkiyen miktarına, yalnızca 'yüzey gerilimi' de deniyor ( $\sigma$ ).

Kap eğer susevmez bir malzemeden yapılmışsa, su bu sefer, kabın kenarında alçalır ve üst yüzeyi dışbükey bir hal alır. Bu durumda, su molekülleri kap malzemesiyle bağ kuramadığından, böyle bir potansiyel enerji katkısı yok. Dolayısıyla, suyun kapla temas eden yüzeyi de, yüzey geriliminin hakim olduğu 'dış yüzey'miş gibi davranır ve su üst yüzeyini bombeleştirir, toplam yüzey enerjisini azaltmış olur. Çünkü suyun kapladığı hacim; üst yüzey düz olsaydı bir silindir olacak iken, dışbükeyleşme sonucunda, üstü bombeli bir silindire dönüşür ve bu ikincisinin, birim hacim başına yüzey alanı daha azdır. Kütle merkezi ise, yüzeyin düz olması haline göre, yine biraz yukarı kaymış ve po-

tansiyel enerjinin yerçekimi bileşeni artmış olur. Ancak, yüzey enerjisindeki azalma, bu artışı dengeler. Kuvvetler açısından bakıldığında ise, kap malzemesinin susevmezliği; suyun gergin yüzeyini çeperinden tutup, bir yandan aşağıya doğru indirmeye ( $f_{sk}$ ), diğer yandan da kabın yüzeyine yapışık tutmaya ( $f_A$ ) çalışan bir kuvvete yol açar. Bu kuvvet yine, yüzey gerilimi ( $f_{sh}$ ) tarafından dengelenmektedir.

İç ya da dış bükey, katı malzemeyle buluşan suyun yüzeyinde oluşan eğimli kısma 'menisküs' deniyor. Fakat yüzey gerilimi, göl veya deniz gibi geniş su gövdelerinin yüzeyini, normalde gergin ve düzgün tutar. Hafif bir rüzgar estiğinde, yüzey kırışır, 'kırırtı'lar oluşur. Ancak, yüzey gerilimi kuvvetleri, bu kırışıkları düzeltmeye çalışmaktadır. Nitekim, rüzgar kesilir gibi olduğunda, 'kırırtıklar' kaybolur. Rüzgarın büyütme, yüzey geriliminin de düzeltmeye çalıştığı, boyu 1 cm civarında olan bu minik dalgalara 'kılcal dalgalar' da deniyor. Bu dalgalara vücut veren bozucu ve ortadan kaldırmaya çalışan düzeltici iki etkinin bilek güreşinde, yerçekiminin rolü gözardı edilebilecek kadar küçüktür. Fakat dalgaların yüksekliği yerçekimi kuvvetinin etkisini başat hale getirecek kadar büyürse, dalgalar o zaman 'yerçekimi dalgaları'na dönüşür. Nihayet dönem paradoksumuza...



“Dur şimdi bak, şaka yapmanın sırası değil.”

o ile Lei Jiang 2004 yılında, düz bir kuartz lifi, ince bir susevmez ‘heptadecafluorodecyltrimethoxysilan’ (FAS-17) katmanıyla kaplayıp, sineğin bacağına benzer bir şekle koydular ve bu yapay bacağın, sadece 0,19 mili-Newton’luk bir kuvvet sağlayabildiğini gösterdiler.<sup>2</sup> Yani altı bacak için, toplam 1,14 miliNewton. Bu ise, durağan haldeki sineğin ağırlığını suyun üzerinde tutmaya ancak yetecek, fakat seri bir şekilde hareketine imkan vermeyecek kadar küçük bir kuvvet. Kaldı ki bu sinekler çiftleşirken bacaklarını üst üste getirdiklerinden, üç çift bacağın ikisinin de ağırlığını kaldırması gerekir. 109°’lik temas açısıyla bilinen en güçlü susevmez malzemelerden biri olmasına karşın, FAS-17’inin bu kaldırma kuvvetini sağlaması mümkün değildi. Gao ile Jiang, bu kuvvetin sağlanabilmesi için, sineklerin bacaklarının suyla temas açısının 109°’den önemli miktarda, 150°’den bile daha büyük olması gerektiğini hesapladılar. Nitekim, sineklerin bacaklarıyla yaptıkları temas açısı ölçümlerinde buldukları değer  $167.6 \pm 4.4^\circ$  idi. Bu temas açısıyla sineğin her bir bacağının 1,52 miliNewton, yani toplam vücut ağırlığının 15 katı kadar kaldırma kuvveti sağlayabileceğini hesapladılar. Altı bacakta toplam, vücut ağırlığının 90 katı kadar. Nitekim, dişi sinekler yumurtlamak için suyun altına inerler ve vücutlarının ıslanması halinde, tekrar yüzeyin üstüne tır-

manabilmek için, bacaklarıyla ağırlıklarının 30 misli kadar kuvvet uygulamaları gerekir. Kısacası, su gezginlerinin; suyun üzerinde yürür veya altına inip üstüne çıkarken, sudan korkmalarına hiç gerek yoktur. Fakat bacakların yüzeyi; susevmez bir mum salgısıyla kaplı olmakla beraber, yine de bu kadar; bilinen en güçlü susevmez malzemeden çok daha ‘su itici’ nasıl olurdu? Şimdi de bu sorun doğmuştu. Gao ile Jiang, bacakların mikro yapısını elektron tarama mikroskopu altında inceleyerek, sorunun yanıtını buldu.

Bacakların yüzeyi, yarıçapı 3  $\mu\text{m}$  (mikrometre, milyonda bir metre) ile birkaç yüz nm (nanometre, milyarda bir metre) arasında değişen, çok sayıda, iğne şeklinde ve yüzeyle 20°’lik açı yapacak kadar yatık, eşyönlü minik tüylerle (*microsetae*) kaplı. Tüylerin çoğu 50  $\mu\text{m}$  uzunluğunda ve üzerlerinde ayrıca, nano ölçekte girintiler var. Bacakların bu denli su itici olmasını sağlayan, üzerlerindeki mum salgısından çok, tüylerin arasında ve nano girintilerde kalan hava. Su ile arada bir yastık oluşturan hava katmanı, bacakların ıslanmasını önlediği gibi; minik can simitleri misali, ek bir miktar kaldırma kuvveti de sağlamakta. Sonuç?...

Canlıların sıvılardaki ‘biyo-hareket’i genelde; gerilen kaslarda depolanan enerjiyi taşıyıcı sıvının kinetik enerjisine dönüştürmek ve oluşan tep-

kilerle bir kısmını geri alıp, vücuda kinetik enerji kazandırmak veya yerçekimi potansiyel enerjisini korumak ya da değiştirmek şeklinde. Menisküs tırmanma ise; sineğin yarı-durağan bir halde, uzuvlarını oynatmaksızın hareket edebildiği farklı bir yöntem. Sinek bu yöntemde; yüzeyin şeklini değiştirerek, kas geriliminin potansiyel enerjisini yüzey enerjisine dönüştürüyor ve tırmanışı için gereken gücü daha sonra, bu yüzey enerjisinden alıyor.

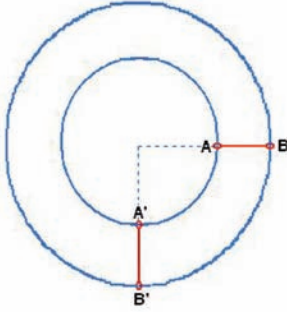
Benzer yüzeylere sahip malzemelerin yapımı, ‘biyo taklitçiliğin’ konusu. Nanoteknoloji alanında; daima kuru kalan ve kendi kendini temizleyebilen boyaların, kumaş, çatı kaplamaları, kiremit veya diğer yüzeylerin imalatına çalışılıyor. Böyle bir yüzey, orijinal malzemenin yüzeyini florlama veya silikonlama işlemine tabi tutarak elde edilebilmekte. Benzeri etkileri, glikoz veya sukroz ile ‘polietilen glikol’ karışımları da sağlıyor. Su itici kumaşlar ve bu yüzey özelliğine sahip bulunan, seraların veya limonlukların çatılarında kullanılmak üzere imal edilmiş cam paneller halen piyasada var.

Yüzeyi ilgi çeken canlılardan birisi de; genellikle bulanık ve kirli sularda yaşamakla birlikte, kendisini hep temiz tutabilen nilüfer çiçeği. Bu çiçeğin yapraklarının yüzeyi, sineğin bacağından farklı olarak, nano ölçekte girinti yerine çıkıntılarla dolu. Çıkıntıların arasında kalan hava, yüzeyi su itici kıldığından, yapraklar hiç ıslanmıyor ve üzerlerine düşen su damlaları, cıva gibi yuvarlanarak, bu sırada önlerine gelen katı kir parçacıklarını, yüzey gerilimiyle yakalayıp, içlerine alıp götürüyor. Buna, ‘nilüfer etkisi’ denmekte. ‘Süper susevmez’ olan yüzey, bala karşı dahi itici. Taklitlerinin yapımına yönelik yöntemlerden birisi, alüminyum bir plakanın; birkaç saat süreyle sodyum hidroksite batırılarak yüzeyi çıkıntılılandırıldıktan sonra, su iticiliğini arttırmak amacıyla üzerine sıvı ‘perflononan’ dökülüp, yüksek hızlarda döndürülerek, sıvının hem dışı doğru yayılıp incelirken, hem de buharlaşması sonucunda, 2 nm kalınlığa kadar kaplanmasına dayalı. Böylelikle, alüminyumun 67° olan temas açısı, 168°’ye çıkartılabiliyor. Elektron mikroskopu incelemeleri, girintilerinde hava kalmış gözenekli bir mikro yapıya sahip olan yüzeyin, nilüfer yaprağının-



kine benzediğini göstermekte. 'Nilüfer etkisi'ni taklit etmeye çalışan boyalar da var; dikey zeminlerde kullanıldıklarında, üzerlerinden yuvarlanan su damlalarıyla, kendi kendilerini temizliyor. Bu etkinin tam tersini kullanan, 'süper susever' boyalarla kaplı dikey yüzeylerde ise; su damlaları yayılıp birleşerek ince bir su katmanı oluşturur ve aktıkça yüzeyi temizler. Beyaz boya pigmenti olarak öteden beri yaygın şekilde kullanılan 'titanyum dioksit'in de bu özelliğe sahip olduğu, ancak 1995 yılında keşfedildi ve aynı zamanda fotokatalist bir malzeme olan bu pigmentle kaplanan camların güneşin ultraviyole ışınlarına karşı tutulmasıyla, 'kendi kendini temizleyen cam' paneller üretilmiştir. Asıl ilginç keşifler yolda...

## Carroll Paradoksu



Bu, Michael M. Carroll'un 1984 yılında yayınladığı basit bir fizik paradoksu.<sup>3</sup> Eşmerkezli iki çember alalım ( $r_1 < r_2$ ), bir de, uzunluğu bu çemberlerin yarıçaplarının farkı kadar olan ( $r_2 - r_1$ ), iki ucu kancalı bir tel. Kancaları çemberlere takıp, teli şekilde görüldüğü gibi, saat 3 konumunda ve durağan halde tutuyor olalım (A-B). Telin kütle yoğunluğu homojen olsun. Kancalarla çemberler arasındaki yüzeylerin sürtünmesiz olduğunu varsayalım. Gerçi uygulamada böyle yüzeyler elde etmek mümkün değil. Ama kuramsal olarak öyle olduğunu düşünelim. Bu durumda, temas yüzeyleri arasındaki kuvvetler, sürtünmesizlik nedeniyle, ancak bu yüzeylere dik olabilirler. Dolayısıyla, çemberler tarafından tel üzerinde uygulanan kuvvetlerin daima; telin eksenine, yani başlangıçta merkezden B noktasına uzanan yarıçap doğrultusunda olması gerekir. Şimdi teli bırakalım, yerçekiminin etkisiyle çemberler üzerinde kayabilsin. Uzunluğu yarıçapların farkına eşit olduğundan, tel

hareket sırasında hep bir yarıçap doğrultusunda olmak zorundadır. Saat 6 konumuna geldiğinde (A'-B'), başlangıçta durağan halde iken sahip olduğu yerçekimi potansiyel enerjisini, kinetik enerjiye dönüştürmüş olması gerekir. Ancak öyle ise, burada bir sorun var: Tel çemberlerin merkezi etrafında, bir saatin akrebi gibi dönüyor. Saat yönünde bir açısal momentuma sahip. Halbuki başlangıçta, açısal momentumu yoktu. Çemberlerin kancalara uyguladığı kuvvetlerin, telin eksenine doğrultusunda olmaları nedeniyle, tele herhangi bir dönme momenti uygulamış olması imkansız. O halde, korunması gereken bu fiziksel nicelik nereden çıktı? Nasıl oluştu, kim tarafından sağlandı?...

Belki de ilk akla gelen, yerçekimi kuvveti. Tel yerçekimi kuvvetinin etkisiyle harekete geçeceğine göre, bu sistemi yalıtılmış gibi almayı, dünyayı da resmin içine katmak lazım. Tel saat yönünde açısal momentum kazanırken, dünya da ters yönde açısal ivmelenmiş ve toplam açısal momentum korunmuş olabilir. Ancak, yerçekiminin başlangıçtaki dağılımı; kütle dağılımının homojen olması nedeniyle; telin merkezi etrafında simetrik. Bu simetrik dağılımın da dönme momenti uygulaması mümkün değil. Tel dönemezse, harekete de geçemez: Ne olacak şimdi?...

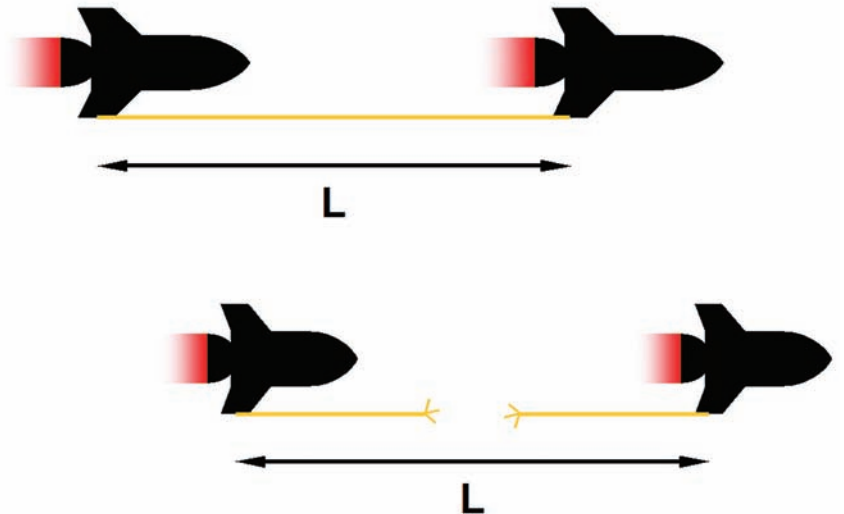
Yanıt yine, çemberlerin kancalara temas ettikleri yüzeylere, tel eksenine dik yönde uyguladıkları, yani bu yüzeylere paralel olan kuvvetlerde. Halbuki sürtünmesiz bir yüzeyde böyle paralel bileşenlerin olabilmesi için, dikey bileşenlerin sonsuz olması gereki-

yor. Dolayısıyla, problemin kısıtları tutarsız. Carroll bu çözümü; probleme, problemin kısıtları tutarlı olan benzerlerinin çözümünden hareketle yakınsayarak bulmuş.

## Bell'in Uzay Gemileri

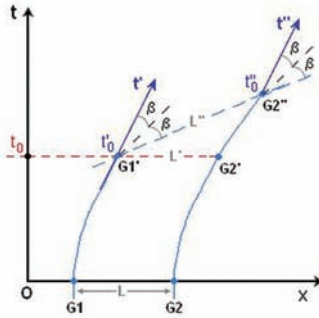
Pistte iki uzay gemisi var diyelim, arka arkaya; aralarındaki uzaklık L, birbirine gergin bir ip ile bağlanmışlar, uygun bir şekilde. Yani ip, L uzunluğunda. Saat sıfıra beş kala pilotlar hazır; her ikisine, bizimkiyle ayarlı birer saat ile, uçuş reçetesi veriyoruz. Reçeteye göre, kalkıştan sonra hep aynı yönde, sabit bir ivme uygulayacaklar; örneğin g. Saatlerimiz tam 0'ı gösterirken havalandılar. Hep aynı ivmeyi uyguladıklarından; yerde duran bize göre hızları; sürekli değişiyor olmakla beraber, her an için birbirine eşittir. Bizim durağan koordinat sistemimizde katettikleri mesafeler de öyle. Dolayısıyla, aralarındaki uzaklık bize göre değişmez. Bir süre sonra  $v = (\sqrt{3}/2)c$  hızına ulaşmış olsunlar. Aralarındaki uzaklık hala L'dir. Halbuki ipin uzunluğunun, yarı yarıya Lorentz kısalması olması gerekir; yani kopması. Koparmı kopmaz mı?

Burada, anlatımda bir hata aramak açısından ilk akla gelen soru, gemilerin hep aynı ve eşit g ivmesini nasıl uygulayacağı sorusu. Çünkü, bizim gözlemlediğimiz ivme, gemilerin bizim durağan koordinat sistemimizde izledikleri patikaların şekliyle, ikinci türeviyle ilgili 'koordinat ivmeleri'. Bu ivmeler zahiri olabilir; tıpkı biz kendi etrafımızda dönerken, yerde sabit olan cisimle-



rin bize göre, yani bizim dönmekte olan koordinat sistemimizde dönüyor ve de ivmeleniyor olmasında olduğu gibi. Dolayısıyla, 'asıl (proper) ivme'ler, uzay gemilerinden her birisinin, kendisiyle birlikte hareket etmekte olan 'eşhareketli koordinat sistemi'ndeki ivmeler. Çünkü, 'asıl ivme'yi kuvvet sağlıyor ve bu durumda kuvvet, gemide sabit olan motorun itkisiyle sağlanmakta. Dolayısıyla, iki geminin birbirinden bağımsız olarak, verdiğimiz reçeteye uygun şekilde, sabit  $g$  ivmesini uygulayabilmeleri lazım. Bu mümkün. Bunun için pilotların; başlangıçta,  $t=t'=t''=0$  anında koordinat sistemlerimiz çakıştığına göre; kalkış anında  $g$  ivmesini uygulamaları ve bundan sonrası için de, uygulanan ivmeyi sabit tutmaları yeterli. Nasıl? İvme ölçmek kolay: Hareket yönündeki bir yaya bağlı standart bir kütle, sürütümsüz bir zemin üzerinde. Gemi ivmelendikçe, kütlelenin ataleti yayı germekte; yayın diğer ucunda bir ibre var; ivme ne kadar yüksekse, yay o kadar gergin ve ibreyi o kadar fazla döndürüyor. İbre de, jet motorunu yönetmekte; ivme düşeyazınca daha fazla, istenen

değeri aşınca daha az itki üretmesini tetikliyor. Dolayısıyla, pilotlardan her biri kendi gemisini, kendi 'eşhareketli koordinat sistemi'nde  $g$  'asıl ivme'yiyle hareket ettirebilir; başlangıç koşulları aynı olduğundan, aynı kumanda reçetesini uygulayarak. E, her iki gemi de kendi içinde baştan sona aynı şeyleri yaşıyorsa, bizim koordinat sistemimizde, birbirinin tıpatıp aynı şekilde hareket ederler. Yolda ip kopar, nedeni şöyle...

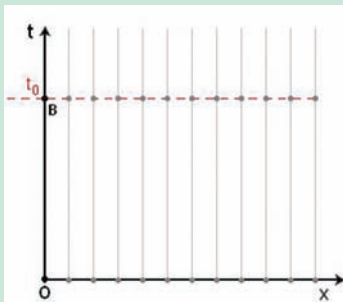


Sabit ivmeyle hareket, özel görelilikte 'hiperbol hareketi'yle sonuçlanır. Birinci gemi bizim koordinat sistemimizde, G1 noktasından başlayarak böyle bir hiperbol patikayı izliyor ol-

sun. Bu eğriyi L kadar sağa kaydırırsak, ikinci geminin patikasını elde ederiz. Saatimiz  $t_0$  anını gösterdiğinde gemilere bakacak olursak, bizim (kesikli kırmızı) eşzamanlılık çizgimizin üzerinde, G1' ve G2' konumlarında olduklarını görürüz. Aralarındaki mesafe  $L$ , başlangıçtaki  $L$  değeriyle aynıdır. Fakat ip artık, G1'-G2' arasında değildir; G1' konumundan başlamakla birlikte, G2' konumunda son bulmamaktadır. İp; gemilerin bize bulunur göründükleri konumları değil, gemileri birbirine bağlamak zorundadır. İpin G1' konumundan nereye kadar uzanması gerektiğini görmek için, gemilerin eşhareketli koordinat sistemleri arasında kıyaslama yapabilmek ihtiyacı var. İvme hareketinde gözlem çerçevelerinin kıyaslanması, genel görelilik gerektirir. Dolayısıyla, problemi görece basit tutup, özel görelilik kapsamında ele alabilmek için, gemilerin  $t=t_0$  anımızdan hemen önce motorlarını durdurmuş olduklarını varsayalım;  $t=t_0$  anımızda doğrusal hareket halinde olsunlar. Şekilde, birinci geminin pilotunun, gemi G1' noktasında ikenki 'dünya çizgisi';  $t'$  doğrusu. Geminin artık sabitlenmiş

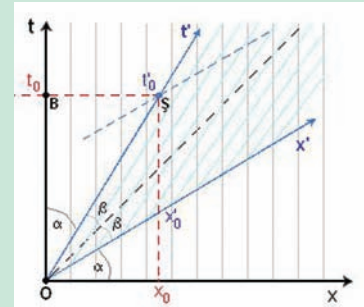
## Dünya çizgileri

Biz, yola bakan bir bankta oturuyoruz diyelim, O noktasında ve önümüzde parketmiş bir araba var. Yol sağa doğru, şekildedeki  $x$  eksenine gibi, dümdüz uzanmakta. Saatimiz  $t=0$ 'ı gösteriyor olsun. Yol üzerindeki noktalar, bizim gibi sabit. Hepsini birlikte  $x$  eksenini, yani bizim  $t=0$  anındaki 'eşzamanlı' uzay noktalarımızı oluştururlar. Biz hep banktayız, oturuyoruz,  $x$  konumumuz değişmez; sadece saatimiz ilerler. Örneğin, saatimiz  $t=t_0$  anının gösterdiğinde; hala  $x=0$  konumunda, yani  $t$  eksenindeki B noktasındayızdır. Bu arada hep, OB doğrusu boyunca yol almışızdır. Bu doğru, yani  $t$  eksenini, bizim 'dünya çizgimiz'i oluşturur. Yol üzerindeki noktaların da, sabit olduklarından, bizim-



ki gibi, OB'ye paralel birer 'dünya çizgisi' vardır. Mesela,  $x$  eksenindeki gri noktalar, yol boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiş, başka banklar olsun. Ama bu banklar boş; üzerlerinde sadece birer saat var, bizimkiyle aynı ilk ayara sahip. Zaman geçtikçe, biz  $t$  eksenini boyunca ilerlerken, onlar da bizimle birlikte, gri çizgiler boyunca süzülerek ilerler. Taradıkları ( $t,x$ ) düzlemi, bizim gözlem çerçevemizi veya 'başvuru sistemi'mizi oluşturur: 'durağan'. Bizim saatimiz  $t=t_0$  anını gösterdiğinde, onlarınki de  $t=t_0$  anını gösterir. Fakat biz B noktasında iken, onlar; kesikli kırmızı çizgi boyunca, eşit aralıklı başka konumlardadırlar ve o andaki, en son, 'eş zamanlı uzay noktalarımızı' oluştururlar. Kısacası,  $t$  eksenindeki herhangi bir  $t=t_0$  noktasından,  $x$  eksenine paralel olarak çizilen kırmızı kesikli çizgi, bizim  $t=t_0$  anındaki 'eşzamanlılık çizgimizi' oluşturur. Tabii, burada uzayı tek boyutlu  $x$  olarak aldığımız için, 'eşzamanlılık çizgisi'. Eğer uzayı  $x-y$  düzlemi olarak ele alsaydık, 'eşzamanlılık düzlemi'nden bahsediyor olurduk. Ki aslında, her birimiz üç boyutlu birer 'eşzamanlılık uzayı'na sahibiz.

Başlangıçta dönüp, önümüzdeki arabayı hatırlayacak olursak;  $t=0$  anında sahibi gelip aracına binerek, sabit bir  $v$  hızıyla yola koyulmuş olsun. Binerken saatine



baktı, biz de gördük; bizimkiyle aynı,  $t'=0$ . Durağan olan gözlem çerçevemizde, hareketli bir cisim belirmiş oldu. Ama bu bizi ilgilendirmiyor, biz bankta sabitiz, çerçevemiz hep durağan. Duruma bir de, şöförün açısından bakalım...

Onun da bir gözlem çerçevesi var, bizimki gibi durağan: Biz bankta oturuyoruz, şöför arabada; bizimki bankta sabit, onunki arabada;  $t=t'=0$  anında orijinde çakıştıktılar, sonradan ayrıştılar. Gerçi bize göre araba hareketli, ama bu şöförü ilgilendirmiyor; o hep aynı koltukta sabit, etrafındaki cisimler hareketli; nasıl ki bize göre araba hareket ediyorsa, ona göre de biz... Halbuki, araba önümüzden kalktıktan sonra, Erzurum'dan geçip, Kars'a varmış olabilir. Ama şöförü ilgilendirdiği kadarıyla, kendisi yerinden kıpırdamadı; yalnızca saati ilerledi. Araba  $t=t_0$  anında,

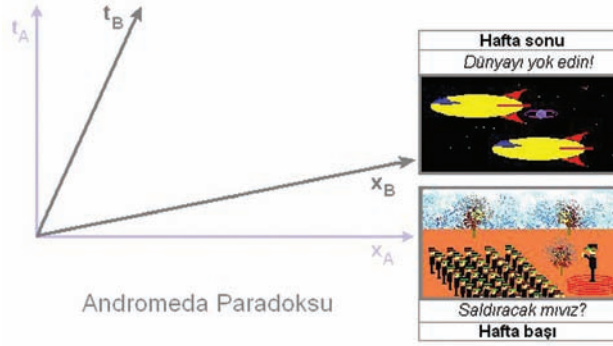


olan hızından hareketle,  $t'$  ekseninin  $45^\circ$ 'lik foton çizgisine yaptığı  $\beta$  açısı hesaplanabilir ve foton çizgisinin  $\beta$  kadar altından, geminin pilotunun (kesikli mavi) eşzamanlık doğrusu çizilebilir. Bu doğru ikinci geminin patikasını  $G2''$  noktasında kestiğinden, ipin bu noktaya kadar uzanması gerekiyor; yani uzunluğunun  $L''$  olması... İp bu yüzden kopar.

Çünkü, birinci geminin kaptanına göre kendi saati  $t_0'$  anını gösterdiğinde gemisi  $G1'$  noktasında iken, diğer gemi; saatinin  $t_0$  anına ilerlemiş olmasından dolayı, patikanın daha sonraki bir  $G2''$  noktasına varmıştır. İpin kopma nedeni; iki geminin patikaları ve saatlerinin ilerleme reçeteleri aynı iken, ikinci geminin saatinin biraz daha fazla ilerlemiş olması...

## Andromeda Paradoksu

Dümdüz bir sahilde akşam koşuyoruz diyelim,  $v=2$  m/s hızla. İleride bir adam gördük; arkası bize dönük, ayakta duran ve ellerini gözyuvaları-



nın etrafında halkalamış, gökyüzündeki bir noktaya bakan. Kolunda saati görünüyor, bizimkiyse durmuş, yaklaşırken bakıp, saatimizi ayarladık; ikisi de aynı,  $t_B=t_A=0$ . Yanından geçip, aynı hızla yolumuza devam ediyoruz. Bir yandan da ilğimizi çekti tabii, "bu adam nereye bakıyor merakla" diye; başımızı kaldırıp gökyüzüne baktık, adamın baktığı yöne. Tam karşımızda Andromeda: Aynı halini mi görürüz?...

Andromeda bizden  $x_C=2,6$  milyon ışık yılı uzaklıkta. Güneşe doğru  $V=300$  km/s hızla yol alıyor. Dünyanın dönme ve yörünge hareketlerinden kaynaklanan hızlar, biz ve adam için aynı. Gerekirse hesaba katılabilir.

$x_0=v \cdot t_0$  konumuna varır; gözlem çerçevesimizin  $\mathcal{S}$  noktasına. Burası önemli: Bizim  $(t,x)$  düzleminde izlediğimiz patika, OB doğrusu; bu bizim dünya çizgimiz, aynı zamanda gözlem çerçevesimizin  $t$  eksenidir. Şöförün  $(t,x)$  düzleminde izlediği patika, OŞ doğrusu; bu da onun dünya çizgisi; aynı zamanda şöförün gözlem çerçevesinin  $t'$  eksenidir. Bu eksenin bulmamız lazım. Dikkat edilecek olursa; BOŞ üçgeni dik olduğundan, BOŞ açısını  $v$  hızı belirler ( $\tan \alpha = x_0/t_0 = v$ ). Peki, bu durumda bizim saatimiz  $t=t_0$  anını gösterirken, şöförünki ne der?

Bilindiği üzere, özel görelilik kuramına göre; böyle, 'standart düzen'deki iki gözlem çerçevesi arasındaki veri aktarımları, Lorentz dönüşümüyle yapılır [ $t'=\gamma(t-vx/c^2)$ ,  $x'=\gamma(x-vt)$ ]. Dolayısıyla, şöförün saati  $t_0'=\gamma t_0$  anını gösterir ( $\cos \alpha = t_0/t_0' = 1/\gamma$ ). OŞ çizgisini böylelikle belirlemiş oluruz. Şimdi bir de, şöförün gözlem çerçevesinin  $x'$  eksenini belirlememiz gerekmektedir. Bunun için, şöförün bizim gözlem çerçevesimizde  $x_0$  olan konumunun, onun gözlem çerçevesinde ne olduğuna bakmak yeterli ( $x_0'=\gamma x_0$ ).  $X_0OX_0'$  üçgeni de keza dik olduğundan,  $X_0OX_0'$  açısını  $v$  hızı belirler ( $\cos \alpha = x_0/x_0' = 1/\gamma$ ). Ayrıca,  $X_0OX_0'$  ve BOŞ dik üçgenleri benzer, açıları da

birbirine eşittir. Yani;  $t'$  eksenini  $t$  eksenine,  $x'$  eksenini  $x$  eksenine yaptığı açıyı yapar ( $\alpha$ ). Böylelikle  $x'$  eksenini de belirlenmiş olur.

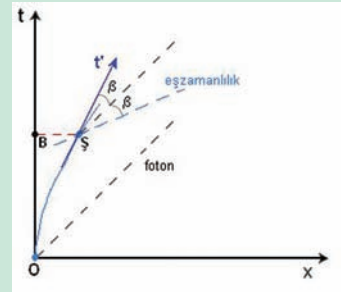
Öte yandan, şekildeki kesikli siyah çizgi,  $x$  eksenine  $45^\circ$ 'lik açı yapan çizgidir; dolayısıyla  $t$  eksenine de  $45^\circ$ 'lik bir açı yapar. O halde;  $t'$  ve  $x'$  eksenlerinin bu çizgiye yaptığı açılar birbirine eşittir ( $\beta=45-\alpha$ ). Peki,  $45^\circ$ 'lik kesikli siyah çizginin anlamı nedir?... Işık hızı  $c=1$  olarak alındığında; ki öyle varsayalım; O noktasında,  $t=t'=0$  anında sağa doğru ışınlanmış olan bir fotonun dünya çizgisidir o. Bu yüzden, bize göre hareket halindeki cisimlerin dünya çizgileri; ışık hızı  $c=1$  üst sınırı olduğu için; kesikli siyah çizginin üzerinde kalmak zorunda.... Şöförün eşzamanlık çizgisi?...

Bizim  $t=0$  anındaki eşzamanlık çizgimiz,  $x$  eksenimizdir. B noktasında,  $t=t_0$  anındaki ise; bu noktada  $x$  eksenimize paralel olan kesikli kırmızı çizgi... Şöförün  $t'=0$  anındaki eşzamanlık çizgisi,  $x'$  eksenidir.  $\mathcal{S}$  noktasında,  $t'=t_0$  anındaki ise; bu noktada  $x'$  eksenine paralel olan kesikli mavi çizgi...

Şimdi bir de, ivmelenme haline bakalım. Araba O noktasından  $\mathcal{S}$  noktasına, hareket ederken hızı sabit kalmak yerine, ivmelenerek artmışsa eğer; izlediği patika,

cek olmalarına karşın, bu hızları gözardı edelim. Adam gökadamaya doğru  $v_A=V$ , biz ise (çok yaklaşık olarak)  $v_B=V+v$  hızıyla yol alıyor oluruz. Koordinat sistemlerimiz  $t_B=t_A=0$  anında çakıştığından, gökadamının konumu, her ikimiz için de aynıdır. Ancak, adama göre hızımız çok düşük olmakla birlikte, gökadamının uzaklığı çok büyük olduğundan; biz gökadamının, adamın seyretmekte olduğundan, 6,32 gün sonraki halini gözlemliyoruz oluruz. Yani, adam örneğin Andromeda'daki bir pazartesi gününün saat 14:00'unu gözleyorsa eğer, biz, izleyen Pazar gününün 18:00'unu gözlemliyoruz. (Bknz. Zamanda ilerleme hareketi.)

Gerçi gökadamız Samanyolu, daha yüksek oranda karanlık madde içerdiğinden, Andromeda'dan daha büyük bir kütleyle sahip. Fakat Andromeda'da bizimkinin 10 misli kadar, trilyon civarında yıldız var. Bunlardan birinin gezegenlerinden birinde, ileri bir teknolojik yaşamın gelişmiş olduğunu varsay-



düz bir çizgi yerine, sağa doğru kıvrılan bir eğri olur. Çünkü bu durumda, eğrinin eğimi giderek azalmakta ve eğim azaldıkça arabanın hızı artmaktadır. Bu patikanın herhangi bir noktasındaki teğeti, şöförün o anki dünya çizgisidir ve kendi  $t'$  zaman eksenine çakışır. Dikkat edilecek olursa, patika boyunca teğetler değiştiğinden, şöförün zaman eksenini  $t'$ , bir önceki durumda farklı olarak; artık hep aynı yönde kalmayıp, saat yönünde dönmektedir. Teğetin eğimi, arabanın o anki hızının tersini verir ve araba ışık hızına ulaşmaya göre; bu eğimin daima 1'den büyük olması gerekir. Teğetin  $45^\circ$ 'lik foton çizgisine yaptığı  $\beta$  açısı, bu hız tarafından belirlenir. Teğetin  $45^\circ$ 'lik çizgiye göre simetriği bu çizgiyle, saat yönünde  $\beta$  açısı yapar ve şöförün eşzamanlık çizgisini oluşturur. Şekildeki kesikli mavi çizgi...

yalım; istendiği takdirde uzay gemileri gönderip, dünyayı yokedebilecek kadar. Nitekim, gezegen yetkilileri bu konuda karar vermek üzere, pazartesi saat 14:00'da toplanmış olsunlar. Toplantı 16:00'da bitecek ve saldırı kararı verilmesi halinde, uzay gemileri hemen yola çıkarılacak. Aksi halde, aramızdaki gök süt liman. Yoldaki adam bu yüzden Andromeda'yı heyecanla izliyor, toplantının sonucunu merakla. Halbuki biz, izleyen Pazar gününün saat 18:00'ını gözlemlemekte olduğumuzdan, ilgili karar çoktan verilmiş ve gereği yerine getirilmiş olmalı. Karar saldırı doğrultusunda idiyse eğer, uzay gemilerini yolda görürüz. Bu durumda geri dönüp, yoldaki arkadaşımıza, ona göre devam etmekte olan toplantının sonucunu merakla beklemeye gerek olmadığını söyleyip, kendisini sakinleşmeye davet edebiliriz.

Öykü kısmı bir yana, bu durumda; gözlemcilerden birinin geleceğindeki, halen izlemekte olduğu bir sürecin sonucunda oluşacak olan bir olay, bir başka gözlemcinin geçmişinde yatıyor. O halde, izlenmekte olan sürecin akıbeti hakkında herhangi bir kuşku olmaz. Bu ise, kuantum mekaniğindeki belirsizlik ilkesine ve olasılıklara dayalı gelişme dinamiklerine aykırı. Öte yandan, herhangi bir gözlemcinin geleceğindeki bir olayı, o an izlemekte olan, uygun bir başka gözlemci bulmak mümkün. O halde evren, klasik mekaniğin öngördüğüne benzer şekilde 'deterministik' olmak zorunda. Matematikçi Roger Penrose tarafından geliştirilen bu ikileme, Andromeda Paradoksu deniyor.

Özetle; özel görelilik kuramına göre her gözlemci, dört boyutlu uzay zamanda özgün birer dünya çizgisine sahip; birbirine göre durağan olanlarınkı birbirine paralel, sabit hızla hareket edenlerinki eğik, ivmelenenlerinki eğri... Her gözlemcinin, dünya çizgisinin kendi saatine göre herhangi bir anında, kendisine özgün bir olaylar kümesini içeren bir 'eşzamanlılık hiperdüzlemi' var. Bu 'hiperdüzlem' aslında, dört boyutlu uzay-zamanın, üç boyutlu bir uzay bileşeni; algıladığımız eşzamanlı olaylardan oluşan 'şimdiki evren manzaramız'. Birbirine göre hareket halinde olanlarımızınkiki, birbirinden farklı. Hatta aynı gözlemci için dahi, başını en ufak bir hızla hareket et-

tirmesi halinde içeriği değişebilmekte. Öte yandan, durağan halimizi terkedip başımızı hareket ettirmek; 'şimdiki evren manzaramız'ı oluşturan 'eşzamanlılık hiperdüzlemi'mizin eğimini, hareket hızının büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak bir miktar değiştirmek anlamına geliyor; yani bir bakıma bakış açımızı döndürmek. Nitekim, farklı evren manzaraları arasındaki veri aktarımlarını sağlayan Lorentz dönüşümleri, 'uzay-zamanda dönme'lere eşdeğer. Bilim felsefecileri C.W. Rietdijk<sup>4</sup> ve H. Putnam'ın, Penrose ile birlikte konu üzerindeki çalışmalarıyla oluşturdıkları görüşe göre, hal böyleyse eğer; uzay-zamanın olası her gözlem noktasının (t,r) uzay bileşeni (r), her biri üçer boyutlu olan birden fazla şimdiki evren manzarasını barındırabiliyorsa, uzay aslında dört boyutlu olmak zorunda. Tıpkı düzlemsel bir kâğıncanın, başını döndürdüğünde farklı düzlemler gözlemesi halinde, yaşadığı uzayın aslında üç boyutlu olması gerektiğinde olduğu gibi. Buna da 'Rietdijk-Putnam-Penrose iddiası' deniyor.

## Mızrak ve kulübe

Düz bir arazide, 12 m uzunluğundaki cam bir kulübenin önünde duruyoruz diyelim; sırtımızı kulübeye dayamış. Kulübenin çelikten, ince iki giyotin kapısı var; giriş hemen yanımızda, çıkışı 12 metre gerimizde ve başlangıç-

ta her ikisi de açık. Tam karşıya baktığımızda, bir sporcunun geldiğini görüyoruz; elinde 20 metrelik bir mızrakla girişe doğru koşuyor; mızrağı ortasından tutmuş, doğrultusu koştuğu yönde ve yere paralel. Bizim elimizde de bir kumanda aleti var; istediğimiz anda düğmesine basıp, hem kapıları 'eşzamanlı' olarak kapatıp tekrar açan bir mekanizmayı harekete geçirebiliyor, hem de bu sırada kulübenin içinin fotoğrafını çekebiliyoruz. Özel görelilik gereği bilgi en fazla ışık hızıyla seyahat edebildiğinden, kapıları bir anda kapatıp açmak mümkün değil; ama bu işi çok kısa bir sürede yapabildiğimizi varsayalım, örneğin milyarda bir saniyede (nanosaniye, ns). Kapılar ince olmakla beraber, kalınlık payları dışarıda tutulmuş ve iç yüzeyleri arasında, temiz bir 12 metre uzaklık bırakılmış olsun. Bize göre; sporcu hareket halinde olduğundan, mızrağın boyu 'Lorentz kısalmış'tır. Sporcu ışık hızının öyle bir kesrine ulaşmış olsun ki (v/c=√3/2), boy yarıya inmiş olsun; yani 10 metreye. Bu durumda bize göre, giriş kapısına tabii; önce mızrağın ön ucu, sonra sporcu, sonra da arka uç ulaşır. Arka uç bu kapıdan içeri girdikten 1 ns sonra kumanda düğmesine bastık diyelim; kapılar da 1 ns içinde kapanıp, tekrar açıldı. Bu sırada sporcu ve mızrak, kulübenin içinde yol almaktaydı; onların fotoğrafı da çekildi, mızrak tümüyle içerde. Mızrağın

## Zamanda ilerlemek

Bizim gökadayı göre hızımız  $v_B=V+v$ , adamınkiki  $v_A=V$ . Koordinat sistemlerimiz  $t_B=t_A=0$  anında çakışıyor ve gökadanın tam bu andaki konumu, her ikimize göre de  $x_G=2,6$  ışık yılı. Hal böyle iken, birinci soru şu: Gökadanın kendi dünya çizgisindeki hangi ( $t_G', x_G'$ ) noktası bizim dünya çizgimizdeki ( $t_B=0, x_B=x_G$ ) noktamıza karşılık gelir? Standart düzendeki iki gözlem çerçevesi veya başvuru sistemi arasındaki Lorentz dönüşümü;  $t'=\gamma(t-vx/c^2)$ ,  $x'=\gamma(x-vt)$ ,  $y'=y$ ,  $z'=z$  ilişkileriyle verildiğine göre, bu sorunun yanıtı;  $0=t_B=\gamma_B(t_G'-v_Bx_G/c^2) \rightarrow t_G'=v_Bx_G/c^2$ ,  $0=x_B=\gamma_B(x_G'-v_Bt_B) \rightarrow x_G'=0$  olarak bulunur. Diğer soru da şu: Gökadanın kendi dünya çizgisindeki hangi ( $t_G'', x_G''$ ) noktası, adamın dünya çizgisindeki ( $t_A=0, x_A=x_G$ ) noktasına karşılık gelir? Bu sorunun yanıtı da;

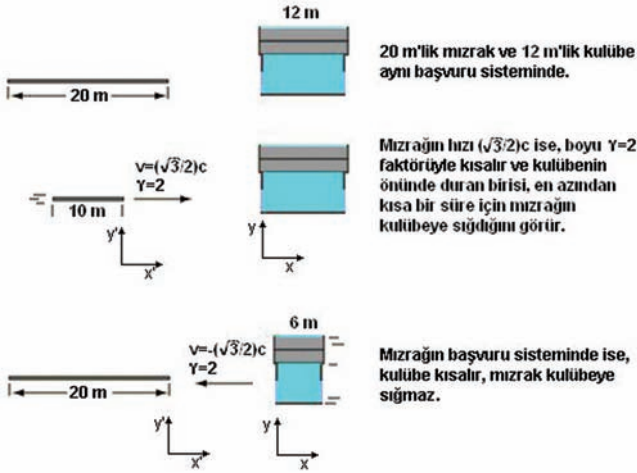
$$0=t_A=\gamma_A(t_G''-v_Ax_G/c^2) \rightarrow t_G''=v_Ax_G/c^2, \\ 0=x_A=\gamma_A(x_G''-v_At_A) \rightarrow x_G''=0$$

olur. Dolayısıyla; Andromeda'nın gözlemlenen konumları, ikimiz için de aynı. Fakat gökadanın, adamın gözlemlemekte olduğu anıyla, bizim gözlemlemekte olduğumuz anı arasında fark var. Anlar arasındaki fark;

$$\Delta t = t_G' - t_G'' = (v_B - v_A)x_G/c^2 = vx_G/c^2 \text{ kadar. Buradaki } x_G=2,6 \text{ ışık yılı, ışığın } \\ 2.600.000 \text{ yılda katettiği yol, yani } (2.600.000 \text{ yıl})c \text{ olduğuna göre;} \\ \Delta t = v.(2.600.000 \text{ yıl})/c \text{ olur. Işık hızı için yaklaşık } c=300.000 \text{ km/s de\u011feriyle;} \\ \Delta t = (0,002 \text{ km/s}).(2.600.000 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ s})/(300.000 \text{ km/s}) = 546.624 \text{ s} = 6,32 \text{ g\u00fcn} \\ \text{ bulunur.}$$

Aslında adama ve 2 m/s hızla koşuyor olmaya da gerek yok. Yalnız başımıza iken, olduğumuz yerde durmuş Andromeda'yı gözlerken, başımızı öne ya da arkaya doğru saniyede 2 cm hızla hareket ettirmemiz halinde, Andromeda'nın gözlemlediğimiz anı 2 saat sonraya kayar.





ön ucu çıkış kapısına vardığında, kapılar açıktır. Sporcu durmaksızın, aynı hızla yoluna devam eder ve kapıdan dışarıya, önce mızrağın ön ucu, sonra sporcu, sonra da arka uç çıkıp gider. Bizim için durum böyle; mızrak bir an için, tümüyle kulübenin içindeydi; fotoğrafını çektik. Halbuki sporcuya göre; mızrak durağan, kulübe hareket halindedir. Mızrağın boyu 20 metre, Lorentz kısalmasına uğrayan kulübeninki ise 6 metredir. 20 metrelik mızrak, 6 metre uzunluğundaki kulübe sığmaz. Dolayısıyla, mızrak tümüyle kulübenin içinde olmuş olamaz. 'Fotoğraf'ımız 'yalan mı söylüyor': Hangisi doğru?...

Aslında ikisi de... Gerçi sporcu açısından bakıldığında; 20 metrelik mızrak 6 metre boyundaki kulübeden geçerken kapılar kapatılırsa; mızrağın kapılardan biri veya diğeri, belki de her ikisi tarafından kısıtılması gerekir gibi görünüyor. Fakat ortada bir çelişki yok. Görünürdeki çelişki, 'eşzamanlılığın göreliliği'nden kaynaklanmakta. Kapıların kapanıp açılması, bizim için öyle olmakla birlikte, sporcu için 'eşzamanlı' değildir. Çünkü, konumları farklı olduğundan, çıkış kapısı, girişten önce kapanıp açılır [ $t'=\gamma(t-vx/c^2)$ ]. Dolayısıyla, sporcu için durum şöyle: Önce, mızrağın ön ucu giriş kapısına varır ve henüz kulübeyi katederken, çıkış kapısı kapanıp açılır. Bundan sonra hep açık kalacaktır. Giriş kapısı ise henüz kapanmamıştır. Ön uç çıkışa ulaştığında, açık olan bu kapıdan dışarı çıkıp yoluna devam eder. Epeyce sonra, arka uç giriş kapısına ulaşır ve kulübeye girdikten sonra, giriş kapısı kapanıp açılır. Dolayısıyla, mızrak bu kapıya da yakalan-

maz. Bundan sonra bir süre için; arka uç kulübenin içinde, ön uç da kulübenin dışında yol alır. Arka uç nihayet çıkış kapısına ulaştığında, mızrak tümüyle kulübenin dışına çıkar ve sporcuyla birlikte yoluna devam eder. (Bknz. İki farklı, ama aralarında tutarlı bakış açısı.)

Peki, kapıları kapattıktan sonra açmasak ne olur?... Kapıların ne kadar gerekiyorsa o kadar sağlam olduklarını varsayacak olursak... Bu durumda sporcuyu gözden çıkarmak lazım tabii, o ayrı bir konu: Mızrağa ne olur?... Bu soruya yanıt aramadan önce, mızrağın gibi katı bir cismin yapısını, kabaca da olsa gözönünde canlandırmakta yarar var. Böyle bir katı cismi oluşturan atom veya moleküller; toplamda nötür olmakla birlikte; orada burada, yerel, artı veya eksi işaretli elektrik yükü 'kalıntıları' taşımakta ve birbirlerine, bu yerel yükler arasındaki 'elektromanyetik' çekme ve itme kuvvetlerinin arasında oluşan dengeler sayesinde tutunmaktadırlar. Dolayısıyla, mızrağı, birbirine esnek yaylarla bağlı bir atomlar kümesi olarak düşünmek mümkündür. Bir tarafından darbeye sıkıştırıldığında, darbe civarındaki atomlar birbirine yaklaşır. Söz konusu elektromanyetik kuvvetler, uzaklığın karesiyle ters orantılı olduklarından, büyür ve daha fazla sıkışmaya karşı koyarlar. Ancak, diğer kısımların bu yeni durumdan haberdar olmaları biraz zaman alır. Çünkü, özel görelilik kuramına göre; bilgi en fazla ışık hızıyla seyahat edebilir ve herhangi bir yerinden aldığı darbeyi anında her tarafına iletebilen, 'ideal' veya 'sonsuz' katı bir cisim, kuramsal düzeyde de olsa, mümkün değildir. Dolayısıyla, cismin bir kısmı sıkışmış olmakla birlikte, diğer kısımları en azından bir süre için, hiçbir şey olmamış gibi davranmaya devam eder. Sıkışmış olan atomlar kümesinin sınırına, 'şok yüzeyi' veya 'şok dalgası' diyelim. Gerçi elektromanyetik etkileşim, ışık hızıyla yayılır. Fakat, bu etki-

leşmelerin net sonucu olarak oluşan 'şok yüzeyi'nin cismin içerisindeki ilerleyişi, kütleleri nedeniyle atalet sahibi olan atomların hareket düzeninde değişimler gerektirdiğinden, ancak ses hızıdır. Cisim ne kadar fazla 'yoğun', atomları birbirine ne kadar yakınsa, elektromanyetik kuvvetler o kadar hızla büyüyüp daha güçlü tepki göstereceğinden, ses hızı o kadar yüksek olur. Fakat her durumda, sesin hızı; kütle sahibi atomların hareketiyle bağıntılı olduğundan, ışık hızına oranla genelde çok daha düşüktür.

Şimdi: Bize göre 10 metre boyunda olan mızrak, kapılar kapandığı anda, tümüyle kulübenin içindedir. Mızrağın ön ucu çıkış kapısına çarpıp, yavaşlamaya başlar. Arkadan gelen kısımlar bu durumdan henüz haberdar değildir. Dolayısıyla, mızrağın ön ucu yavaşlarken, ardından gelen kısımlar hiçbir şey olmamış gibi yollarına devam eder. Kapı da bu sırada bir miktar esner tabii. Mızrağın ön ucu durunca, arkadan gelen atom kümeleri de, önden arkaya doğru sırayla, önündeki durağanlaşan kümeye çarparak yavaşlayıp durmakta; ön uçtan arkaya doğru giderek uzayan, sıkışmış bir kısım oluşmaktadır. Bu kısmın öndeki yüzeyi, kapıda sabittir. Üzerine hızla gelen atomları yavaşlatıp durdurduğu için bir 'şok yüzeyi' oluşturan diğeri, mızrağın arkasına doğru ilerler. Öte yandan, bize göre mızrağın boyu 'Lorentz kısalması' olmakla birlikte, içindeki atomların sayısı değişmemiştir. Dolayısıyla, mızrağı bir arada tutan yerel yüklerin arasındaki mesafeler, durağan haline göre daha kısa ve yükler arasındaki kuvvetler daha büyüktür. Yani mızrak bize göre, sporcuya görünen 20 metre boyundaki durağan halinden çok daha sert bir cisim olarak davranır. Buna rağmen, sıkışarak daha da kısalmakta ve kinetik enerjisini atomlarının arasındaki bağların potansiyel enerjisine dönüştürmektedir. Boyu 10 metrenin bile altına iner. Nihayet tümüyle durduğunda, arka uç geri seker. Sıkışmış olan 'yay'lar bu sefer de boşanmaktadır. Arka ucu, peşinden çektiği tüm diğer kısımlar sırayla izler. Mızrak, çıkış kapısından fırlayıp, giriş kapısına çarpar. Benzeri bir sıkışma süreci burada yaşanır. Mızrak bütünüyle 'durağan'laşmaya zorlandığından, 20 metrelik 'olağan' boyuna ulaş-

maya çalışmaktadır. Ancak, kulübenin boyu sadece 12 metre olduğundan, kapıların arasında sıkışıp kalır. Şok cephesi veya 'şok dalgaları' uzunluk boyunca bir süre daha ileri geri seyahat edip dururken, mızrağın ve kapıların bünyesinde bir miktar ısı üretilir. Başlangıçtaki kinetik enerjinin kalan büyük kısmı, sıkışmanın potansiyel enerjisine dönüşmüştür. Boyu artık 12 metre, herşey durağan...

Bu bize göre olan durum. Ya sporcuya?... Hızını kesemeyip kapıya ulaşana, hatta bir veya diğer şekilde, mızrağı geride bırakıp kendisi kapıdan geçerek ve aynı hızla yoluna devam ederek, olan biteni sonuna kadar izlediğini düşünelim... Mızrağın boyu 20, kulübeninki 6 metre. Ön uç çıkış kapısına çarpıp, durağan hale gelir. Oluşan şok yüzeyi arkaya doğru ilerler ve arka ucla buluştuğunda, mızrağın tümü kulübe göre durağanlaşmıştır. Mızrak bu durumda sporcuya göre, kulübeyle birlikte  $v = -(\sqrt{3}/2)c$  hızla hareket etmeye başlamıştır. Boyunun sporcuya göre, en azından 10 metreye 'Lorentz kısalması' olması gerekir. Fakat, mızrak bir yandan da sıkışmış bir haldedir. Hem de; başlangıçtaki 20 metrelik boyu, bizim hareket halinde iken gördüğümüz 10 metrelik boyunun iki misli ve dolayısıyla atomları arasındaki mesafeler

de öyle olduğundan; mızrak daha esnek davranabilip, daha fazla sıkışmıştır. Boyu 6 metrenin de altına iner. Sporcuya göre de, tümüyle kulübenin içindedir. Sonra, arka uç geri seker ve giriş kapısına çarpıp durduğunda, mızrak iki kapı arasında sıkışıp kalır. Sporcunun gözlemi de, bizimkine benzerdir. Ancak bu sefer; mızrağın boyu 6 metre, kulübeninki gibi...

Bir de fotoğraf meselesi vardı. Mızrak hareket halinde iken, bize göre 10 metre olan boyunun 12 metre uzunluğundaki kulübeden geçerkenki fotoğrafını çekmiştik; tümüyle kulübenin içindeyken... Meğer kulübenin boylamasına camdan yan duvarı, duyarlı bir yüzeymiş; fotoğrafı onunla çekmiş olalım. Hatta, sporcunun bir de yardımcısı var diyelim; elinde yeterince geniş bir duyarlı yüzeyle, sporcuya paralel olarak kulübenin diğer yanında koşuyor. Onun işi daha zor; biz çektiğimiz 'anda', mızrağın bir fotoğrafını da o çekmiş olsun. Bu görüntünün, sporcunun gözlediği manzaranın aynısı olması lazım. Bizim gözlediğimiz görüntünün de, bizim gözlediğimiz manzaranın... İş bittikten sonra hep birlikte oturup, iki fotoğrafı yan yana koyup baktığımızda neler görürüz?

Önce şu noktayı açıklığa kavuşturmakta yarar var. Biz, bize göre dura-

ğan bir cismin fotoğrafını çekerken; duyarlı yüzeye 'aynı anda' ulaşan fotonlar, cisim tarafından aynı anda ışınmış olmuyorlar. Gerçi bu durumda; fotonlar hariç, bize göre herşey durağan olduğundan, bir 'eşzamanlılık' sorunu yok. Sorun, fotonların mecburen farklı uzunluklarda yollar katetmesinden kaynaklanmakta. Dolayısıyla, olağan aygıtlarla çektiğimiz bir fotoğraftaki pikseller, cismin ilgili noktalarının geçmişteki farklı anlara ait görüntülerini yakalamış oluyor. Hele hareket halinde olup bize doğru yaklaşan bir cismin fotoğrafını çekerken, cismin bize en yakın olan noktasından kaynaklanan foton duyarlı yüzeye ulaştığında, en uzak noktasını betimleyecek olan fotonun çok daha erken yola çıkmış olması gerekiyor. Halbuki o erken anda, o uzak nokta daha da geri bir konumdaydı. Dolayısıyla cismin, aslında olduğundan daha uzun bir görüntüsü kayda geçer. Tıpkı hızla seyahat eden bir arabanın fotoğrafının çektiğimizde, görüntünün bulanıklaşıp uzamasına benzer şekilde. Fakat bunlar, hesaplanıp kitaplanarak, dikkate alınabilecek olan hususlar. Dolayısıyla, duyarlı yüzeylerin her ikisinin de, ışık hızının sınırlı olmasından kaynaklanan bu tür gecikmeleri hesaba kattığımızı ve her birinin, mızrağın kendi gözlem çerçevesindeki

## İki Farklı, Ama Aralarında Tutarlı Bakış açısı

Sporcunun gözlem çerçevesi ( $x',y'$ ) mızrağın ön ucunda, bizimki ( $x,y$ ) ise kulübenin girişinde olsun. Mızrağın ön ucu girişe vardığı anda, iki gözlem çerçevesinin orijinleri birbiriyle çakışır. Tam bu anı  $t_0=t'_0=0$  olarak alalım. 'Standart düzen'deki iki başvuru sistemi arasındaki Lorentz dönüşümü;

$t'=\gamma(t-vx/c^2)$ ,  $x'=\gamma(x-vt)$ ,  $y'=y$ ,  $z'=z$  şeklinde. Buradaki  $\gamma=1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$  'Lorentz faktörü',  $v=(\sqrt{3}/2)c$  olduğundan,  $\gamma=2$ 'dir. (Işık hızı tam olarak; 299.792.458 km/s.)

Dolayısıyla, bize göre:

Ön ucun girişe vardığı an:  $t_0 = 0$ ,

Arka ucun girişe vardığı an:  $t_1 = 10m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 38,52$  ns,

Kapıların kapanmaya başladığı an:  $t_K = t_1 + 1$  ns = 39,52 ns,

Kapıların tümüyle açıldığı an:  $t_A = t_K + 1$  ns = 40,52 ns,

Ön ucun çıkışa vardığı an:  $t_2 = 12m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 46,22$  ns,

Arka ucun çıkışa vardığı an:  $t_3 = t_1 + 12m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 84,74$  ns,

Kapılar bize göre 'eşzamanlı' olarak;  $t_K=39,52$  ns'de kapanmaya başlayıp,  $t_A=40,52$  ns'de tekrar açılmış oluyor. Fakat sporcuya göre, kapıların konumları farklı olduğundan, kapanıp açılmaları eşzamanlı değil. Çıkış daha uzakta olduğundan, önce o kapanmaya başlar:

$t_{CK}' = \gamma(t-vx/c^2) = 2(39,52 - (c\sqrt{3}/2)(12m)/c^2) = 2(39,52 - 34,66) = 9,72$  ns.

Sonra da açılır:

$t_{CA}' = \gamma(t-vx/c^2) = 2(40,52 - (c\sqrt{3}/2)(12m)/c^2) = 2(39,52 - 34,66) = 11,72$  ns.

Girişin kapanıp açılması ise, epeyce daha sonra:

$t_{CK}' = \gamma(t-vx/c^2) = 2(39,52 - 0) = 79,04$  ns.

$t_{CA}' = \gamma(t-vx/c^2) = 2(40,52 - 0) = 81,04$  ns.

Dolayısıyla, sporcuya göre:

Ön ucun girişe vardığı an:  $t'_0 = 0$  ns.

Çıkışın kapanmaya başladığı an:  $t'_{CK} = 9,72$  ns.

Çıkışın tümüyle açıldığı an:  $t'_{CA} = 11,72$  ns

Ön ucun çıkışa vardığı an:  $t'_2 = 6m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 23,11$  ns.

Arka ucun girişe vardığı an:  $t'_3 = 20m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 77,03$  ns.

Girişin kapanmaya başladığı an:  $t'_{CK} = 79,04$  ns.

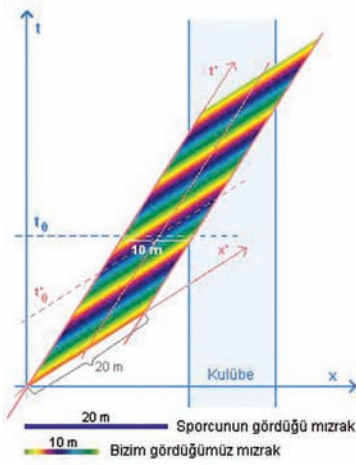
Girişin tümüyle açıldığı an:  $t'_{CA} = 81,04$  ns.

Arka ucun çıkışa vardığı an:

$t'_4 = t'_3 + 6m / (c\sqrt{3}/2)m/s = 77,03 + 23,11 = 100,14$  ns.

Mızrağın ön ucu kulübeye  $t'=0$  anında girdikten 9,72 ns sonra çıkış kapısı kapanmaya başlar ve  $t'=11,72$  ns'de tümüyle açılmış olur. Ancak, ön uç çıkışa henüz varmamış olduğundan, giriş kapısı ise açık olduğundan, burada sorun yok; mızrak kapıya yakalanmaz. Ön uç çıkışa daha sonra,  $t' = 23,11$  ns'de ulaştığında, çıkış kapısı açılmıştır ve bundan sonra hep açık kalır. Giriş kapısı ise hala açıktır. Arka uç girişe  $t'=77,03$  ns'de ulaşır ve geçer. Giriş kapısı daha sonra,  $t'=79,04$  ns'de kapanmaya başlar. Burada da sorun yok, mızrak bu kapıya da yakalanmaz; arka uç  $t'=100,14$  ns'de çıkışa ulaştıktan sonra, kulübeyi terkedip yoluna devam eder.





eşzamanlı olarak ışıdığı fotonları işleme tabi tutup, 'anlık' birer görüntü oluşturduğunu varsayalım. Buna rağmen görüntülerin farklı olması beklenir. Neden, şimdi bakalım...

Kendi gözlem çerçevemizin orijini ni üzerimizde alalım ve olduğumuz yerde duruyor olalım. Zamanımız  $t$  ilerledikçe, hep aynı yerde;  $x=0$  konumundayızdır. Dolayısıyla, bizim 'dünya çizgimiz', şekildeki  $t$  eksenine paralel çıkar. Kulübe bize göre sabit olup, hep 12 metre boyundadır. Yine bize göre  $v=(\sqrt{3}/2)c$  hızıyla sağa doğru hareket etmekte olan mızrağın arka ucu,  $t=t'=0$  anında önümüzden geçmiş olsun. Bundan sonraki herhangi bir  $t$  anında bizden,  $x=vt$  uzaklıktadır. Halbuki bu arka uç, kendi gözlem çerçevesinde, hep aynı konumdadır;  $x'=0$ . Dolayısıyla şekildeki  $(x,t)$  grafiğinde, eğimi  $t/x=1/v$  olan doğruyu izler. Onun 'dünya çizgisi' de budur. Ön uca gelince; bizim herhangi bir  $t$  anımızda, arka uçtan 10 m daha uzağımızdadır. Dolayısıyla, arka ucun dünya çizgisini, 10 metre sağa 'paralel kaydırmak', bize ön ucun dünya çizgisini verir. Nitekim, bu uç da bizden  $v$  hızıyla uzaklaşmaktadır ve  $(x,t)$  grafiğinde, eğimi  $t/x=1/v$  olan diğer doğruyu izler. Bu ucun da keza; kendi, arka ucunla aynı olan gözlem çerçevesindeki konumu, hep aynı olup,  $x'=20$  metredir. Mızrağın tüm diğer noktaları, bu iki uç arasında yer alır. Yani, mızrak; bizim  $(x,t)$  gözlem çerçevesindeki herhangi bir  $t_0$  anımızda, 'bize göre eşzamanlı' noktalardan oluşan 10 metrelik yatay bir çizgi oluştururken; sporcunun  $(x',t')$  gözlem çerçevesinde, 'sporcuya göre eşzamanlı' noktalardan oluşan 20 m'lik bir 'yatay çizgi' oluşturmaktadır.

Ufak tefek bir iki ilave: Eğer ışık hızı  $c=1$  olarak alınacak olursa,  $(x,t)$  gözlem çerçevesindeki  $45^\circ$  eğimli çizgi, bizim  $t=0$  anımızda sağa doğru ışıdığı bir fotonun dünya çizgisini oluşturur. Öte yandan,  $t'$  ekseninin  $t$  eksenine yaptığı açının,  $x'$  ekseninin  $x$  eksenine yaptığı açısına eşit görünmesi raslantı değil. (Bknz. Dünya çizgileri). Çünkü, bizim dünya çizgimiz,  $t=t'=0$  anında çakışmış olduğumuz sol ucun dünya çizgisine; yani bizim  $x=0$  için tüm  $t$  değerlerimiz, sol ucun  $x'=0$  için tüm  $t'$  değerlerine; Lorentz faktörü  $\gamma$  ile bağlıdır ( $t'=\gamma(t-vx/c^2)=\gamma t$ ). Öte yandan, bizim  $t=0$  anımızdaki eşzamanlılık çizgimizi oluşturan  $x$  eksenine de, sol ucun  $t'=0$  anındaki eşzamanlılık çizgisini oluşturan  $x'$  eksenine, aynı Lorentz faktörü  $\gamma$  ile bağlıdır ( $x'=\gamma(x-vt)=\gamma x$ ). Mızrak hızlandıkça,  $t'$  ile  $x'$  arasındaki açı, bir makasın iki ağzı gibi, aralarındaki  $45^\circ$ 'lik doğruya doğru yaklaşır; yani fotonun dünya çizgisine. Bu da doğal: Mızrağın hızı ışık hızına ne kadar yakınsa,  $t'$  ve  $x'$  eksenleri fotonun dünya çizgisine o kadar yaklaşır... Nihayet gelelim sonuca: Bizim herhangi bir  $t=t_0$  anındaki 'eşzamanlı uzay noktalarımız', dünya çizgimizi oluşturan  $t$  eksenimize,  $t=t_0$  noktasında dik olan yatay bir çizgi oluşturur. Ve bizim için mızrağın bu  $t_0$  anındaki 'eşzamanlı görüntüsü', sözkonusu eşzamanlılık çizgimizin 10 metrelik bir kesitinden oluşmaktadır. Mızrağın  $t=t_0$  anımızdaki 'eşzamanlı fotoğraf'ını çektiğimizde, bu görüntüyü kayda geçirmiş oluruz. Ya sporcu?...

Sporcunun da bir dünya çizgisi var, başı kel değil. Sporcu mızrağın tam ortasında olduğu için, onun dünya çizgisi, iki ucun dünya çizgilerinin tam arasında. Öte yandan, sporcunun hızı mızrağınkiyle aynı olduğundan, dünya çizgisinin eğimi de, iki ucunla aynı. Şekilde  $t'$  eksenine paralel olan, ortadaki çizgi... Sporcunun, bizim  $t_0$  anımıza karşılık gelen  $t_0'$  anı, bizim yatay olan eşzamanlılık çizgimizle, onun dünya çizgisinin kesiştiği noktada... Onun eşzamanlılık çizgisi tabii, bu kesişme noktasından geçen ve  $x'$  eksenine paralel olan, kesikli kırmızı çizgi. Sporcu için mızrağın  $t_0'$  anındaki eşzamanlı görüntüsü, bu çizginin üzerindeki 20 metrelik kesit; yarısı önünde, yarısı arkasında. Durumu daha açık bir şekilde görebilmek için

son bir varsayımda daha bulunalım; mızrak kendi gözlem çerçevesindeki birbirini izleyen  $t'$  anlarında renk değiştiriyor olsun. Sporcu da mızrakla aynı gözlem çerçevesinde olduğundan; mızrağın birbirini izleyen anlarda farklı renklere büründüğünü, fakat belli bir  $t_0'$  anında, boylu boyunca tek renk olduğunu görür. Örneğin şekilde, mızrağın  $t_0'$  anındaki renginin lacivert olduğu görülmekte. Sporcu tam bu anda, mızrağın 'eşzamanlı fotoğraf'ını çektiğinde, 20 m uzunluğunda lacivert bir çubuğu kayda geçirmiş olur. Bu görüntü, şeklin sol altında veriliyor. Halbuki bizim  $t_0'$  anımızda çektiğimiz görüntü; kesikli mavi çizginin, mızrağın iki ucuna ait olan dünya çizgilerini kestiği noktaların arasında kalan 10 metrelik kesittir. Bu kesitin rengarenk görüntüsü de, şekilde keza sol alta verilmiş. Mızrak tabii, kendi gözlem çerçevesinde 'yaşayıp', 'yaşlanmakta'dır. Bu görüntüdeki sol uç, mızrağın en 'yaşlı' noktası; yaş  $t_0'$ . Sağa doğru gidildikçe karşılaşılan görüntü noktaları, mızrağın daha eski anlarına ( $t' < t_0'$ ), daha 'genç' ikenki zamanlarına ait. Bizim çektiğimiz eşzamanlı görüntü, bu yüzden rengarenk.

Biz burada görüntü tesbiti için, 'ideal' düzlemsel bir duyarlı yüzey kullandığımızı tasarladık. Halbuki fotoğraf çekmenin tekniği bundan oldukça farklı. Arada açılıp kapanan bir diyafram ve fotonların patikalarını değiştiren bir mercek var; eşzamanlılığı karmaşıktır. En basit haliyle; bir 'toplu iğne başı delikli karanlık oda ve odanın merkezinde küresel bir filmle yapılacak bir çekimle ilgili hesaplamalar; hareket eden cismin görüntüsünün sadece şekil olarak değişmekle kalmayıp, hareket eksenine etrafında biraz da dönerek, bize arka tarafını kısmen göstereceğini gösteriyor. Buna, olguyu ilk incelemiş olanların adına atfen 'Penrose-Terrel dönmesi' denmekte.

Prof. Dr. Vural Altın

#### Dipnotlar

- David L. Hu, John W. M. Bush, Meniscus-climbing insects, *Nature* **437**, 733-736 (29 September 2005).
- Xuefeng Gao, Lei Jiang, Biophysics: Water-repellent legs of water striders, *Nature* **432**, 36 (4 November 2004).
- M. M. Carroll, *Singular constraints in rigid-body dynamics*, *American Journal of Physics*, **52**(11), Nov 1984, pp 1010-1012.
- Rietdijk, C.W. (1966) A Rigorous Proof of Determinism Derived from the Special Theory of Relativity, *Philosophy of Science*, **33** (1966) pp. 341-344