

Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

Yedek ve Duyuru Kanallarımız

Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

- Telegram: <https://t.me/birkitapbir>
- WhatsApp Kanalımız : <https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4lvMoc0Y>

WALTER LEWIN Warren Goldstein ile birlikte

Fizik Aşkına

GÖKKUŞAĞININ UCUNDAN
ZAMANIN EŞİĞİNE
BİR YOLCULUK



WALTER LEWIN

Warren Goldstein ile birlikte

Fizik Aşkına

WALTER LEWIN Hollanda'da doğup büyüdü. 1965'te fizik doktora diplomasını Delft'teki Teknoloji Üniversitesi'nden aldı. MIT'ye 1966'da postdoktora için geldi. Aynı yıl yardımcı doçent ve 1974'te de profesör oldu. Çok başarılı bir gök fizikçisi ve X ışını gökbiliminde öncü olan Lewin dört yüz elliden fazla bilimsel makale yayımladı. Kırk üç yıl boyunca MIT'de üç ayrı fizik dersi verdi. Bu dersler o kadar tutuldu ki videoya kaydedildi ve MIT'nin OpenCourseWare'inde, YouTube'da, iTunes U'da ve Academic Earth'de çok büyük ilgi gördü. 2009 yılında MIT'den emekli olan Lewin'in ödülleri ve onur nişanları arasında, NASA Üstün Bilimsel Başarı Madalyası (1978), Alexander von Humboldt Ödülü, Guggenheim Bursu (1984), MIT Bilim Konseyi Ödülü (1984), MIT Fizik Bölümü'nden W. Buechner Ödülü (1988), patlayan atarcanın keşfinden dolayı NASA Grup Başarı Ödülü (1997) ve Everett Moore Baker Memorial, Lisans Öğretiminde Üstün Başarı Ödülü (2003) bulunuyor.

WARREN GOLDSTEIN Tarih profesörü ve Hartford Üniversitesi Tarih Bölümü kürsü başkanı, James E. ve Frances W. Bent Akademik Yaratıcılık Ödülü (2006) sahibi. Lisans ve lisansüstü öğrenimini Yale Üniversitesi'nde tamamladı. Çok üretken ve ödüllü bir tarihçi, denemeci, gazeteci ve konuşmacı olan Goldstein'in geniş bir yelpazeyi kapsayan yazıları *New York Times*, *Washington Post*, *Boston Globe*, *Newsday*, *Chicago Tribune* ve *Times Literary Supplement* gibi yayınlarda çıktı. Kitapları arasında, *Playing for Keeps: A History of Early Baseball* ve eleştirmenlerin övgüyle bahsettiği biyografisi *William Sloane Coffin, Jr.: A Holy Impatience* yer alıyor.



Metis Yayınları
İpek Sokak 5, 34433 Beyoğlu, İstanbul
Tel: 212 2454696 Faks: 212 2454519
e-posta: info@metiskitap.com
www.metiskitap.com
Yayınevi Sertifika No: 10726

Fizik Aşkına
Gökkuşağının Ucundan
Zamanın Eşiğine Bir Yolculuk
Walter Lewin (Warren Goldstein ile birlikte)

İngilizce Basımı:
For the Love of Physics
From the End of the Rainbow to the
Edge of Time – A Journey Through
the Wonders of Physics
Free Press, 2012

© Walter Lewin ve Warren Goldstein, 2011
Türkçe Yayım Hakları © Metis Yayınları, 2011
Çeviri Eser © Nedim Çatlı, 2012

Birinci Basım: Eylül 2012

Yayıma Hazırlayan: Özde Duygu Gürkan

Kapak Fotoğrafı:
Walter Lewin MIT'de ders anlatırken, Mayıs 2011

Kapak Tasarımı: Emine Bora

Dizgi ve Baskı Öncesi Hazırlık: Metis Yayıncılık Ltd.
Baskı ve Cilt: Yaylacık Matbaacılık Ltd.
Fatih Sanayi Sitesi No. 12/197-203
Topkapı, İstanbul Tel: 212 5678003
Matbaa Sertifika No: 11931

ISBN-13: 978-975-342-864-4

WALTER LEWIN Warren Goldstein ile birlikte

Fizik Aşkına

**GÖKKUŞAĞININ UCUNDAN
ZAMANIN EŞİĞİNE
BİR YOLCULUK**

Çeviren: Nedim Çatlı



metis

*Bana fizik ve sanat sevgisini
aşılarnış olan herkese*

WALTER LEWIN

Torunum Caleb Benjamin Luria'ya

WARREN GOLDSTEIN

İçindekiler

Giriş	11
1 Atom Çekirdeğinden Uzayın Derinliklerine	19
2 Ölçümler, Belirsizlikler ve Yıldızlar	38
3 Hareket Halindeki Cisimler	53
4 Kamışla İçmenin Sihri	73
5 Gökkuşağının Üstü ve Altı, Dışı ve İçi	91
6 Tellilerin ve Nefeslilerin Armonileri	115
7 Elektriğin mucizeleri	135
8 Manyetizmanın Gizemleri	157
9 Enerjinin Korunumu – <i>Plus ça change...</i>	174
10 Dış Uzaydan Gelen X Işınları!	193
11 X Işını Balonculuğu, İlk Zamanlar	204
12 Kozmik Felaketler, Nötron Yıldızları ve Kara Delikler	220

13	Gök Balesi	237
14	X Işını Patlatıcıları!	249
15	Görme Biçimleri	261
Teşekkür		271
Ek 1:		
	Memeli Femurları	275
Ek 2:		
	Newton Yasaları İşbaşında	277
	Dizin	283

Giriş

Bir seksen sekiz boyunda, zayıf, üstünde kolları dirseğe kadar sıvanmış, mavi iş gömleğine benzer bir şey, ayağında haki pantolon, sandalet ve beyaz çoraplarla, profesör ders verdiği amfinin önündeki alanı bir o yana bir bu yana adımlıyor, el kol hareketleriyle nutuk atarcasına konuşuyor ve arada bir de, sıra sıra dizilmiş karatahtalarla bel altı hizasındaki laboratuvar masası arasında durup bir şeyleri vurguluyor. Önünde yukarıya doğru yükselen dört yüz sandalye var. Öğrenciler yerlerinde kımıldanıyorlar ama gözlerini profesörlerinden ayırmıyorlar. Profesör, vücudunda dolaşan çok güçlü bir tür enerjiyi zor zapt ediyor izlenimini uyandırıyor. Açık alnı, söz dinlemeyen dağınık kıvr saçları, gözlükleri ve tanımlanamayan hafif Avrupalı aksanıyla, Christopher Lloyd'un *Geleceğe Dönüş* filminde canlandırdığı Doktor Brown'u andırıyor – ciddi, bu dünyadan olmayan, hafif kaçık mucit-bilimadamı.

Fakat burası Doktor Brown'un garajı değil – burası Massachusetts Teknoloji Enstitüsü: Amerika Birleşik Devletleri'ndeki, hatta belki de dünyadaki en seçkin bilim ve mühendislik üniversitelerinden biri; tahtada ders anlatan da Profesör Walter H. G. Lewin. Turlamayı bırakıp sınıfa dönüyor. "Şimdi. Ölçüm yapmadaki en önemli husus, ki *bütün* üniversite fizik kitaplarında *daima* gözardı edilir" –kollarını iki yana açıyor, parmaklar aralı– "ölçümlerinizdeki belirsizliktir." Duraksıyor, düşünmelerine zaman tanımak için bir adım atıyor ve tekrar duruyor: "Belirsizliğini bilmeden yaptığınız bütün ölçümler tamamen *anlamsızdır*." Sonra vurgu yapmak için eller havada iki yana açılıyor. Bir duraksama daha.

"Tekrar edeyim. Bunu bu gece sabahın üçünde uyandığınızda duymanızı istiyorum." İki işaretparmağını şakaklarına dayayıp burarak beynini deliyormuş gibi yapıyor. "Belirsizliğini bilmeden yaptığınız

bütün ölçümler tamamen *anlamsızdır*." Öğrenciler büsbütün kendilerinden geçmiş bir halde bakakalıyorlar.

Fizik 8.01'in ilk dersi başlayalı daha sadece on bir dakika olmuş, üniversiteler için dünyanın en ünlü fiziğe giriş dersi.

New York Times gazetesi Aralık 2007'de bir MIT "web yıldızı" olarak Walter Lewin'i başsayfada haber yaptı. YouTube, iTunes U ve Academic Earth'ün yanı sıra, MIT'nin OpenCourseWare (Açık-DersMalzemeleri) sitesinde de yayınlanan fizik derslerine geniş yer verdi. Lewin'in dersleri MIT'nin internette yayınladığı ilk dersler arasındaydı, MIT bunun karşılığını da aldı. Bu dersler müthiş ilgi gördü. Doksan dört ders –üç tam ders dizisi artı yedi tek ders– her gün yaklaşık üç bin izleyici toplayıp yılda bir milyon kere ziyaret ediliyor. Ziyaretçiler arasında hiç de azımsanmayacak sayıda ziyaretçiyle Bill Gates de yer alıyor. Gates Klasik Mekanik dersi 8.01 ile Elektrik ve Manyetizma dersi 8.02'nin tamamını izlemiş; Walter'a gönderdiği mektuplarda (kağıt posta!) söylediğine göre Titreşimler ve Dalgalar dersi 8.03'e geçmeyi dört gözle bekliyormuş.

"Hayatımı değiştirdiniz" cümlesi, Lewin'in her gün dünyanın dört bir yanından her yaş insandan aldığı e-postalarda sık görülen bir konu satırı. San Diego'dan bir çiçekçi olan Steve şöyle yazmış: "Yere daha canlı adımlarla basıyorum ve hayata fizik rengi gözlerle bakıyorum." Tunus'ta hazırlık okuyan bir mühendislik öğrencisi olan Muhammet şöyle yazmış: "Ne yazık ki burada, ülkemde, profesörlerim sizin aksinize fizikte hiç güzellik görmüyorlar, bundan dolayı çok sıkıntı çektim. Bizim sadece sınavda başarılı olmak için 'tipik' alıştırmaların nasıl çözüleceğini öğrenmemizi istiyorlar, bu minik ufkun ötesine bakmıyorlar." Amerika'dan birkaç yüksek lisans diploması almış olan İranlı Seyit şöyle yazmış: "Sizi fizik dersi verirken izleyene kadar hayattan gerçekten hiç zevk almamıştım. Profesör Lewin, hayatımı gerçekten değiştirdiniz. Öğretme şekliniz ders ücretinin on katına bedel ve bütün öteki hocaları değil ama BAZI hocaları birer suçlu durumuna düşürüyorsunuz. Kötü ders anlatmak korkunç bir SUÇ'tur." Ya da Hindistan'dan Siddharth: "O denklemlerin ötesindeki fiziği hissedebiliyordum. Öğrencileriniz sizi daima, benim de daima hatırlayacağım gibi hatırlayacaklar – hayatı ve öğrenmeyi hiç tahmin etmediğim kadar ilginç kılan çok, çok iyi bir hoca olarak."

Muhammet, Lewin'in Fizik 8.01'deki son dersinden bir alıntı yapıyor coşku ve tasdikle: "Belki derslerimden, fiziğin heyecan verici ve güzel olabildiğini ve her zaman çepeçevre her tarafımızda olduğunu daima hatırlayacaksınız, yeter ki onu görmeyi ve güzelliğini anlamayı öğrenmiş olun." Başka bir hayran, Marjory şöyle yazmış: "Sizi elimden geldiğince sık izliyorum; bazen haftada beş kere. Kişiliğinize, mizah anlayışınıza ve hepsinden önemlisi meseleleri kolaylaştırma yeteneğinize hayranım. Lisede fizikten nefret ederdim, fakat siz bana sevdirdiniz."

Walter Lewin fiziğin harikalarını anlatırken sihir yaratıyor. Sırrı ne mi? "Ben insanları kendi dünyalarıyla tanıştırıyorum," diyor, "içinde yaşadıkları ve aşına oldukları dünyayla, fakat bir fizikçi gibi yaklaşmıyorum – henüz. Sudaki dalgalardan söz ediyorsam, kendi banyo küvetlerinde belli deneyler yapmalarını istiyorum; bununla bağlantı kurabilirler. Gökkuşaklarıyla bağlantı kurabilirler. Fiziğin çok sevdiğim yanlarından biri de bu: Bir sürü şeyi açıklama fırsatı buluyorsunuz. Bu da harika bir tecrübe olabiliyor – onlar için ve benim için. Onlara fiziği sevdிரıyorum! Bazen, öğrencilerim gerçekten kendilerini verdiklerinde dersler neredeyse seyircilerin de katıldığı doğaçlama tiyatro gösterilerine dönüşüyor."

Onu beş metrelik bir merdivenin tepesine tünemiş, yerdeki bir beher kabından, laboratuvar hortumundan yapılma kıvrım kıvrım bir kamışla kızılıık suyu emerken bulabilirsiniz. Ya da çenesine birkaç milimetre mesafede salınan, küçük fakat oldukça güçlü bir yıkım güllesinin yolu üzerine başını koyarak ağır yaralanmaya davetiye çıkarabilir. Su dolu iki boya kutusuna tüfikle ateş ediyor olabilir, ya da Van de Graaff jeneratörü denilen ve bir bilimkurgu filmindeki kaçık bilimadamının laboratuvarından çıkmış gibi görünen büyük bir düzeneikle kendisine 300.000 volt elektrik yükleyebilir, zaten dağınık olan saçları kafasında dimdik. Vücudunu bir deney ekipmanı gibi kullanır. Her zaman dediğı gibi, "Ne de olsa bilim fedakârlıklar gerektirir". Bir uygulamalı konu anlatımında amfinin tavanından sarkıtılmış bir ipin ucundaki son derece rahatsız metal bir top üzerine oturur (sarkaçların anası diyor buna) ve öğrenciler salınımları tempoyla sayarken bir o yana bir bu yana salınır durur; bunların hepsi, bir sarkacın herhangi bir zamanda yaptığı salınım sayısının, ucundaki ağırlıktan bağımsız olduğunu kanıtlamak için.

Oğlu Emanuel (Chuck) Lewin bu derslerden bazılarına katılmıştı, şunları anlatıyor: "Bir keresinde sesini değiştirmek için içine helyum çektiğini gördüm. Tam etkiyi yaratmak için –şeytan ayrıntıda gizlidir– genellikle bayılmasına ramak kalana kadar devam eder." Karatahtanın usta sanatçısı Lewin çalakalem geometrik şekiller, vektörler, grafikler, gökbilimsel fenomenler ve hayvan resimleri çizer. Kesik çizgileri çizme yöntemi bazı öğrencileri o kadar kendinden geçirmiş ki, "Some of Walter Lewin's Best Lines" (Walter Lewin'in En İyi Çizgilerinden Bazıları) başlıklı komik bir YouTube videosu yapmışlar: Lewin'i 8.01 dersleri sırasında farklı tahtalara ünlü kesik çizgilerini çizerken gösteren, ders fragmanlarından oluşan bir klip. (Şurada seyredebilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=ra-url4s0pjU)

İnsanda saygı uyandıran, karizmatik kişiliğiyle Lewin tam bir eksantrik: tuhaf davranışlarıyla fiziğe saplantı derecesinde düşkün biri. Cüzdanında daima kutuplayıcı denen iki aygıt taşır ki, mavi gökyüzü, bir gökkuşağı ya da pencerelerden gelen yansımalar gibi herhangi bir ışık kaynağı kutuplanırsa bunu görebilsin ve yanında her kim varsa o da görebilsin.

Derse giydiği o mavi iş gömleklerine ne demeli? Ama bunların hiç de iş gömleği olmadığı anlaşılıyor sonra: Lewin iki-üç yıla bir sipariş veriyor, her seferinde bir sürü, Hong Kong'daki bir terziye istediği özelliklere uygun yaptırıyor, yüksek kalitede pamuktan. Soldaki kocaman cebi, Lewin takvimini barındırmak için tasarlamış. Burada şu cep koruyucu zimbirtılardan bulamazsınız –bu fizikçi-aktör-hocanın, kılı kırk yaran bir moda anlayışı var– bu da insana bugüne kadar bir profesörün taktığı en tuhaf süs iğnesinin nedenini merak ettiriyor: plastikten sahanda yumurta. "Gömleğimde olması yüzümde olmasından iyidir," diyor Lewin.

Sol elinde kocaman pembe Lucite yüzüğün ne işi var? Peki tam göbek deliği hizasında gömleğini tırtıklayan o gümüşü şey ne, arada bir kaçamak bakış attığı?

Her sabah Lewin giyinirken kırk yüzük ve otuz beş süs iğnesi seçeneği var, bir de bir sürü bilezik ve kolye. Zevki eklektikten (Kenya boncuklu bilezikler, büyük kehribar parçalarından bir kolye, plastikten meyve süs iğneleri) antikalara (ağır bir gümüş Türkmen bilekliği), tasarımcı ve sanatçı yapımı mücevherlere, düpedüz ve gülünç

derecede çirkin olanlara kadar seyrediyor (keçeden yapılma meyve şekerlemelerinden oluşan bir kolye). "Öğrencilerin dikkatini çekmeye başladı," diyor, "ben de her derste başka bir tane takmaya başladım. Özellikle de çocuklara ders anlattığımda. Bayılıyorlar."

Peki gömleğine tutturulmuş dev bir kravat iğnesine benzeyen o şey ne? Özel olarak yapılmış bir kol saati (bir ressam arkadaşından hediye), yüzü aşağıya dönük, böylece Lewin aşağıya, gömleğine bıkıp saatin kaç olduğunu öğrenebiliyor.

Lewin bazen başkalarına dikkati dağılmış görünür, muhtemelen şu klasik dalgın profesörler gibi. Ama gerçekte genellikle fiziğin bazı yönlerini düşünmekle derinden meşguldür. Nitekim karısı Susan Kaufman geçenlerde şöyle demişti: "New York'a gittiğimiz zamanlar arabayı hep ben kullanırım. Fakat geçenlerde bir harita çıkardım, ne içindi tam hatırlamıyorum, ama açınca, eyalet sınırlarının her tarafının denklemlerle dolu olduğunu fark ettim. Bunları son ders verdiği zaman yapmış; birlikte arabayla giderken sıkılmış. Fizik hep aklındaydı. Öğrencileri ve okul günün yirmi dört saati onunlaydı."

Uzun zamandır dostu olan mimarlık tarihçisi Nancy Stieber'e göre Lewin'in belki de en çarpıcı kişilik özelliği, "ilgisinin lazer keskinliğindeki yoğunluğu. Neyle uğraşıyorsa kendini azami ölçüde vermiş gibidir, dünyanın yüzde 90'ını devreden çıkarır. O lazervari odaklanmasıyla kendisi için elzem olmayan şeyleri eler; kendini öyle yoğun bir şekilde kaptırır ki fevkalade bir *joie de vivre* (yaşam sevinci) yayar."

Lewin mükemmeliyetçi biri; ayrıntılara fanatik denecek derecede saplantısı var. Sadece dünya çapında bir fizik hocası değil, X ışını gökbiliminde de bir öncü ve X ışınlarını hatırı sayılır bir kesinlikle ölçmek için tasarlanmış ultra hassas ekipmanla, atomaltı ve gökbilim fenomenlerini inşa ederek, test ederek ve gözlemleyerek yirmi yıl geçirdi. Dünyanın atmosferinin üst sınırlarını tarayan devasa ve son derece narin balonlar uçurdu, X ışını patlamaları gibi egzotik gökbilim fenomenlerini ortaya çıkardı. Kendisinin ve meslektaşlarının yaptığı saha keşifleri, yıldızların devasa süpernova patlamalarıyla ölümünün doğasındaki sır perdesinin kalkmasına yardımcı oldu ve kara deliklerin gerçekten var olduklarını doğruladı.

Lewin hiç bıkmadan usanmadan tekrar tekrar test etmeyi öğrendi – hem gözlemsel gökfizikçisi olarak başarısının, hem de Newton ya-

salarının görkemini (keman tellerinin neden böylesine güzel tınılar çıkardığını ve asansörde giderken çok kısa bir süreliğine bile olsa neden ağırlığınızın azalıp arttığını) bu kadar net ortaya koyabilmesinin sırrı da bu zaten.

Dersleri için daima boş bir sınıfta en az üç defa prova yapar, sonuncusu ders günü sabah saat beştedir. Derste onunla çalışmış eski bir öğrencisi, gökfizikçisi David Pooley, "Derslerinin yolunda gitmesini sağlayan şey, onlara ayırdığı zamandır," diyor.

MIT'nin fizik bölümü Lewin'i 2002'de prestijli bir öğretim ödülüne aday gösterdiğinde, bazı meslektaşları tam da bu niteliklere odaklanmıştı. Lewin'den fizik öğrenme deneyimine dair en canlı tasvirlerden biri, Elektrik ve Manyetizma dersini 1984'te almış olan Steven Leeb'den geldi (Steven şimdi MIT'nin Elektromanyetik ve Elektronik Sistemler Laboratuvarı'nda elektrik mühendisliği ve bilgisayar bilimi profesörü). "Sahneye fırlardı," diye hatırlıyor Leeb, "bizi beyinlerimizden yakalar ve çılgın bir elektromanyetizma trenine bindirirdi – bu his hâlâ ensembledir. Kavramları sadeleştirme konusundaki benzersiz yaratıcılığıyla sınıfta tam bir dâhiydi."

Lewin'in fizik bölümünden bir meslektaşı olan Robert Hulsizer, Lewin'in sınıf içi uygulamalı anlatımlarından bazı görüntüleri seçip başka üniversitelerdeki öğrencilere fikir vermek için bir tür kısa film yapmaya çalışmış, ama imkânsız olduğunu görmüş. "Uygulamalar giriş ve sonuç evresini de içerecek biçimde fikirlerin gelişimiyle öyle güzel iç içe girmişti ki, uygulamanın ne zaman başlayıp ne zaman bittiğini belirlemek zordu. Bana göre, Walter'ın parçalara bölünemez bir sunum zenginliği vardı."

Walter Lewin'in fiziğin harikalarını anlatırkenki yaklaşımının en heyecan verici yanı, dünyamızın bütün harikaları karşısında duyup bizlere ilettiği büyük sevinçtir. Oğlu Chuck, o sevinç duygusunu ona ve kardeşlerine kazandırmak için babasının nasıl çabaladığını sevgiyle hatırlıyor. "Bazı şeyleri görmenizi ve güzelliklerinden derinden etkilenmenizi sağlama, içinizdeki sevinç, şaşkınlık ve heyecan kazanını karıştırma gibi bir yeteneği var. Merkezinde olduğu o küçük inanılmaz pencerelerden söz ediyorum; yaşadığınız için, yarattığı bu olayda onun yanında olduğunuz için kendinizi çok mutlu hissediyordunuz. Bir keresinde Maine'de tatildegdık. Hava pek iyi değildi, hatırlıyorum, biz çocuklar da öylesine takılıyorduk, çocukların

yaptığı gibi, sıkılmış bir halde. Babam bir şekilde küçük bir top buldu ve o anda garip küçük bir oyun yarattı, akabinde yan komşulardan başka çocuklar da geldi, bir de baktık, dördümüz, beşimiz, altımız top atıyor, yakalıyor ve gülüşüyorduk. Son derece heyecanlandığımı ve neşelendiğimi hatırlıyorum. Geriye dönüp hayatta beni motive eden şeyin ne olduğunu düşündüğümde, cevabın o pür neşe anlarında, iyi bir hayatın nasıl olabileceğini görmüş, hayatın neler getirebileceğini sezmiş olmamda yattığını anlıyorum, ki bunu babamdan aldım."

Walter eskiden kışın çocuklarının oynaması için bir oyun ayarlayıp kâğıt uçakların aerodinamik kalitesini test ederdi – uçakları oturma odasındaki büyük, açık şömineye fırlatarak. "Annem dehşet içindeyken," diye hatırlıyor Chuck, "onları ateşten kurtarırdık – bir dahaki sefere yarışı kazanmaya ant içerdik!"

Akşam yemeğine misafirler geldiğinde Walter Aya Gidiş oyununu yönetirdi. Chuck'ın hatırladığı haliyle bu oyun şöyleydi: "Işıkları kısırdık, masanın üzerine yumruklarımızla vurarak davula benzer seslerle, bir roket fırlatılışındaki gürültüyü taklit ederdik. Hatta bazı çocuklar masanın altına girip de vururlardı. Sonra uzaya ulaşıncı yumruklamayı keserdik ve aya ayak bastık mı, hepimiz oturma odasında, acayip abartılı adımlar atarak, çok düşük bir kütleçekiminde yürüyormuş gibi yapardık. Bu esnada, misafirler herhalde şöyle düşünüyordu: 'Bu insanlar kafayı üşütmüş!' Ama biz çocuklar için olağanüstüydü! Aya Gidiş!"

Yarım yüzyıldan daha uzun bir süre önce bir sınıfa ilk adımını attığından beri Walter Lewin öğrencilerini aya götürüyor. Gökkuşaklarından nötron yıldızlarına, bir farenin femurundan müzik seslerine kadar doğal hayatın gizemi ve güzelliğiyle ve dünyayı açıklamak, yorumlamak, temsil etmek için çırpınan biliminsanlarının ve sanatçıların gayretleriyle mütemadiyen kendinden geçen Walter Lewin, yaşayan en tutkulu, kendini adanmış, becerikli bilim kılavuzlarından biridir. Takip eden bölümlerde, Lewin hayat boyu içinde taşıdığı fizik sevgisini açığa vurup sizinle paylaşıırken, o tutkuyu, kendini adanmışlığı ve beceriyi bizzat tecrübe edeceksiniz. İyi yolculuklar!

Warren Goldstein

Atom Çekirdeğinden Uzayın Derinliklerine

Çok şaşırtıcı, gerçekten. Annemin babası okuma yazma bilmezdi, kapıcıydı. İki kuşak sonra ben MIT'de profesörüm. Hollanda eğitim sistemine çok şey borçluyum. Hollanda'daki Delft Teknoloji Üniversitesi'nde yükseköğrenimimi yaparak bir taşla üç kuş vurdum.

Daha en başından fizik dersleri vermeye başladım. Okul masraflarım için Hollanda'da devletten öğrenci kredisi almam gerekti. Tam zamanlı çalışmam, yani haftada en az yirmi saat ders vermem durumunda, devlet her yıl kredi borcumun beşte birini siliyordu. Ders vermenin başka bir yararı da askere gitmek zorunda kalmayışımdı. Askerlik benim için en kötüsüydü, tam bir *felaket* olurdu. Her tür otorite biçimine karşı alerjim var –mizacım böyle– eninde sonunda diklenip yerleri silmek zorunda kalacağımı biliyordum. Ben de tam zamanlı olarak matematik ve fizik derslerine girdim. Rotterdam'da, Libanon Lyceum'daki on altı-on yedi yaşındaki çocuklara her hafta yirmi iki saat bilfiil ders verdim. Askerlikten kurtuldum, kredi borcumu ödemem gerekmedi, bir de doktora yapıyordum.

Nasıl ders verileceğini de öğrendim. Lise öğrencilerine ders vermek, genç dimağları olumlu biçimde değiştirebilmek çok müthiş bir şeydi. Bu okul epey katı olmasına rağmen, ben hep derslerin ilgi çekici olmasına, ayrıca öğrencileri de eğlendirmeye gayret ettim. Dersliklerin pencere tepeleri vasistastı, bazen müdürler bir sandalyeye çıkıp oradan öğretmenleri gözetlerlerdi. İnanabiliyor musunuz?

Okul hayatına kendimi kaptırmadım, lisansüstü eğitimi aldığım için de heyecanla dolup taşıyordum. Amacım bu heyecanı öğrencilerime de aktarmak, etraflarını saran dünyanın güzelliğini yeni bir bi-

çimde görmelerine yardımcı olmak, onları fizik dünyasını güzel göreceğ, fiziğin her yerde olduğunu, hayatımıza nüfuz ettiğini anlayacak hale getirmektir. Önemli olanın derste hangi eksikleri *kapattığınız* değil, nelerin üstünü *açtığınız* olduğunu keşfettim. Derste konu işlemek sıkıcı bir uğraş olabilir, öğrenciler de bunu hisseder. Oysa fizik yasalarını ortaya çıkarmak, denklemlerin nereden geldiğini anlatmak bütün yenilikleri ve heyecanı keşif sürecini gözler önüne serer, ki öğrenciler de bunun bir parçası olmaya bayılır.

Bunu sınıf ortamından çok uzaklarda, farklı bir biçimde de yapma fırsatım oldu. Okul her yıl bir öğretmenin görece uzak, ilkel bir kamp alanına çocukları bir haftalığına götürdüğü tatilin masraflarını karşılardı. Karım Huibertha'yla bir kere biz de gittik ve çok sevindik. Yemekleri hep birlikte yaptık ve çadırlarda yattık. Sonra şehrin ışıklarından çok uzaklarda olduğumuzdan, bütün çocukları bir gece vakti uyandırıp ellerine sıcak çikolata verdikten sonra dışarı çıkarak yıldızları seyrettirdik. Takımyıldızları ve gezegenleri tespit ettik, Samanyolu'nu bütün ihtişamıyla gördüler.

Gökfiziği çalıştığımdan ya da okuttuğımdan değil –hatta ben o sıralar evrendeki en küçük parçacıklardan bazılarını tespit edecek deneyler tasarlıyordum– ama gökbilim beni hep büyülemiştir. Aslına bakarsanız, dünyayı arşınlayan hemen hemen her fizikçinin bir gökbilim sevdası vardır. Tanıdığım pek çok fizikçi lisedeyken kendi teleskoplarını yapmışlardı. Çok eski dostum ve MIT'de de çalışma arkadaşım olan George Clark lisedeyken bir teleskop için 15 santimlik bir ayna kesip cilalamıştı. Fizikçiler gökbilimi neden o kadar çok severler? Bir kere, fizikteki pek çok gelişme –örneğin, yörüngesel hareket kuramları– gökbilimle ilgili sorulardan, gözlemlerden ve kuramlardan ortaya çıkmıştır. Fakat aynı zamanda, gökbilim gece göğüne koca harflerle nakşedilmiş fiziktir: tutulmalar, kuyrukluyıldızlar, akan yıldızlar, küresel yıldız kümeleri, nötron yıldızları, gama ışını patlamaları, parçacık püskürmeleri (*jets*), gezegen bulutsuları, süpernovalar, galaksi kümeleri, kara delikler.

Gökyüzüne şöyle bir bakıp kendinize bazı bildik soruları sorun: Gökyüzü neden mavi, günbatımı neden kırmızı, bulutlar neden beyaz? Cevapları fizikte! Güneşin ışığı gökkuşağının bütün renklerinden oluşmuştur. Fakat atmosferde ilerlerken havadaki moleküllere ve mikrok toz parçacıklarına (1 cm'nin 1/10.000'i olan mikrondan çok daha

küçük) çarparak her bir yana dağılır. Buna Rayleigh saçılımı denir. Bütün renkler içinde en çok saçılanı mavi ışıktır, kızıl ışıktan yaklaşık beş kat daha çok saçılır. O yüzden gündüz göğüne hangi yönde bakarsanız bakın* mavi baskındır, gökyüzünün mavi olması da işte bu yüzden. Gökyüzüne ayın yüzeyinden bakarsanız (belki resimlerini görmüşsünüzdür), gökyüzü mavi değildir – siyahtır, gece bizim göğümüz gibi. Neden mi? Çünkü ayın atmosferi yok.

Günbatımları neden kızıl olur? Gökyüzünün mavi olmasıyla aynı sebepten. Güneş ufuktayken, ışınlarının atmosferin daha büyük bir kesimini geçmesi gerekir, ayrıca yeşil, mavi ve mor ışık güneş ışığından süzülerek en çok saçılanlardır. Işık gözümüze –ve tepemizdeki bulutlara– ulaştığı zamana kadar çoğunlukla sarı, portakal rengi ve de özellikle kırmızıdan ibarettir. Güneşin batarken ve doğarken gökyüzünde bazen neredeyse yangın varmış gibi görünmesinin sebebi işte budur.

Bulutlar neden beyazdır? Bulutlardaki su damlacıkları göğümüzü mavi yapan minik parçacıklardan çok daha büyüktür ve ışık bu çok daha büyük parçacıklardan saçıldığında, içindeki bütün renkler eşit biçimde saçılır. Bu da ışığın beyaz kalmasına sebep olur. Fakat bulut nemden dolayı çok kesifse ya da başka bir bulutun gölgesinde kalmışsa, o zaman içinden fazla ışık geçemez ve bulut kararır.

Yapmasını çok sevdiğim uygulamalı anlatımlardan birisi derslerimde bir parça "mavi gökyüzü" yaratmaktır. Bütün ışıkları kapatırım ve yazı tahtamın yakınında sınıfın tavanına çok parlak bir beyaz spot ışığı yansıtırım (spot ışığının çevresi özenle sarılmıştır). Sonra birkaç tane sigara yakıp ışık huzmesine tutarım. Duman parçacıkları Rayleigh saçılımı sağlayacak kadar küçüktür ve en çok saçılan da mavi ışık olduğundan öğrenciler mavi duman görür. Sonra bu gösteriyi bir adım öteye götürürüm. Dumanı içime çekip ciğerlerimde bir dakika kadar tutarım – her zaman kolay olmaz, ama bilim arada bir fedakârlık ister. Sonra nefesimi bırakıp dumanı ışık huzmesine üfleirim. Öğrenciler bu sefer de beyaz duman görür – işte bir beyaz bulut yaratmış oldum! Minik duman parçacıkları akciğerlerimde büyür, çünkü orada çok su buharı vardır. O yüzden şimdi bütün renkler eşit olarak saçılır ve saçılan ışık beyazdır. Işığın renginin maviden beya-

* Aman dikkat – güneşe asla bakmayın.

za değişimi hakikaten müthiştir!

Bu uygulamayla iki soruyu birden cevaplamış oluyorum: Gök-yüzü neden mavidir ve bulutlar neden beyazdır? Aslında ışığın kutuplanmasıyla ilgili çok ilginç üçüncü bir soru daha var. Ona da 5. Bölüm'de değineceğim.

Öğrencilerimle şehirden uzaklardayken onlara Andromeda galaksisini gösterebiliyordum – çıplak gözle görebileceğiniz tek galaksi, yaklaşık 2,5 milyon ışık yılı uzakta (24 milyon kere trilyon kilometre), gökbilimdeki mesafelere göre kapı komşusu sayılır. Yaklaşık 200 milyar yıldızdan oluşuyor. Bir düşünün – 200 milyar yıldız, ama biz onu ancak sönük, bulanık bir leke olarak ayırt edebiliyoruz. Pek çok göktaşı da yakalıyorduk – insanların çoğu bunlara yıldız kayması der. Sabrınız varsa her dört ya da beş dakikada bir görmeniz mümkün oluyordu. O günlerde uydular yoktu, ama şimdi onlardan da sürüsüyle görebilirsiniz. Dünyanın yörüngesinde şimdi iki binden fazla var, eğer beş dakika süreyle gözlerinizi dikebilirseniz, bir tane görmeniz neredeyse kesindir, özellikle de gün batarken ya da doğarkenki ilk birkaç saat içinde, güneş henüz uyduyu da aydınlatacak şekilde doğmamış ya da batmamışken, güneş ışığının hâlâ uydudan gözlerinize yansıdığı anda. Uydu ne kadar uzaktaysa –dolayısıyla dünyadaki günbatımı ile uydudaki günbatımı arasındaki zaman farkı ne kadar büyükse– gece uyduyu o oranda geç görebilirsiniz. Uyduları ayırt edebilirsiniz çünkü gökyüzündeki her şeyden (göktaşları hariç) daha hızlı hareket ederler; eğer kırpışıp duran bir şeyse, uçaktır, haberiniz olsun.

Yıldızlara baktığımız zamanlarda insanlara Merkür'ü göstermek özellikle hoşuma gider. Güneşe en yakın gezegen olduğundan çıplak gözle görmek çok zordur. Şartlar yılda sadece yirmi ila yirmi beş akşam ve sabah en uygundur. Merkür güneşin etrafındaki turunu seksen sekiz günde tamamlar, işte bu yüzden ona ayakları kanatlı Romen haberci tanrısının adı verilmiştir; görülmesinin çok güç olmasının sebebi de yörüngesinin güneşe çok yakın olmasıdır. Dünyadan baktığımızda, güneşten hiçbir zaman 25 derece civarından daha uzakta olmaz – bu ise saat on bir olduğunda akreple yelkovan arasındaki açıdan daha dardır. Onu ancak güneşin batışından hemen sonra, doğuşundan hemen önce ve dünyadan bakıldığında güneşten en uzak olduğu zaman görebilirsiniz. ABD'de daima ufka yakındır;

görebilmek için şehirden uzakta olmanız neredeyse şarttır. Ama bir de buldunuz mu, gerçekten harikadır!

Yıldızlara bakmak bizi evrenin uçsuz bucaksızlığına bağlar. Gece gökyüzüne bakmayı sürdürüp gözlerimizi yeterince uzaklara odaklarsak, kendi Samanyolu'muzun daha ötelere uzanan üstyapısını oldukça güzel bir şekilde görebiliriz – bir araya toplanarak yarı saydam, harikulade narin bir kumaş dokumuş 100 ila 200 milyar yıldız. Evrenin büyüklüğü akıllara durgunluk vericidir, fakat önce Samanyolu'nu düşünerek bunu kavramaya başlayabilirsiniz.

Şimdiki tahminlere göre evrendeki galaksi sayısı, kendi galaksimizdeki yıldız sayısı kadar olabilir. Aslında bir teleskop uzayın derinliklerine çevrildiğinde, gördüğü şey çoğunlukla galaksilerdir –hakikaten çok büyük mesafelerde tek yıldızları ayırt etmek imkânsızdır– ve her biri milyarlarca yıldız içerir. Ya da bilinen evrendeki en büyük yapıyı, galaksilerin oluşturduğu Büyük Sloan Duvarı'nı düşünün. Üç yüzden fazla gökbilimci ve mühendisle, yirmi beş üniversite ve araştırma kurumunun ortak çabalarının sonucu olan büyük proje Sloan Sayısal Gökyüzü Taraması (Sloan Digital Sky Survey) tarafından haritası çıkarılmıştır. Bu amaca tahsis edilmiş Sloan teleskobu her gece gözlem yapıyor; 2000 yılında faaliyete başladı ve en azından 2014 yılına kadar da devam edecek. Büyük Sloan Duvarı'nın uzunluğu bir milyar ışık yılından fazla. Başınız mı döndü? Dönmediyse, o zaman, gözlemlenebilir evrenin (evrenin tamamı değil, sadece gözlemleyebildiğimiz kısmı) kabaca 90 *milyar ışık yılı* genişliğinde olduğunu bir düşünün.

İşte fiziğin gücü: Bize gözlemlenebilir evrenimizin 100 milyar kadar galaksiden meydana geldiğini söyleyebiliyor. Ayrıca bize, görünen evrenimizdeki bütün maddenin sadece yaklaşık yüzde 4'ünün yıldızları ve galaksileri (sizi ve beni) meydana getiren sıradan madde olduğunu söyleyebiliyor. Yaklaşık yüzde 23'ü karanlık madde denilen şeydir (görünmez). Var olduğunu biliyoruz, fakat ne olduğunu bilmiyoruz. Geriye kalan yüzde 73'üne, yani evrenimizdeki enerjinin esas kısmınaysa karanlık enerji denir ve o da görünmez. Onun ne olduğunu da bilen yoktur. Meselenin özü şu ki, evrenimizdeki kütle/enerjinin yüzde 96'sından bihaberiz. Fizik pek çok şeyi açıklamıştır, fakat çözmemiz gereken hâlâ pek çok gizem var, bu da bana çok ilham veriyor.

Fizik hayal edemeyeceğiniz bir uçsuz bucaksızlığı araştırır, fakat aynı zamanda çok küçük diyarların, örneğin bir protonun zerresi kadar olan nötrinolar gibi maddenin küçücük parçalarının da içine dalar. Fizik alanındaki ilk günlerimde zamanımın büyük kısmını işte burada harcıyordum, çok küçüklerin diyarında, radyoaktif çekirdeklerden salıverilen parçacıkların ve ışımanın ölçümlerini yapıp haritalarını çıkarıyordum. Nükleer fizikti bu, ama bomba yapılan türden değil. Çok temel düzeyde maddenin ne menem bir şey olduğunu inceliyordum.

Görüp dokunabildiğiniz hemen hemen bütün maddenin hidrojen, oksijen ve karbon gibi elementlerin birleşerek oluşturdukları moleküllerden meydana geldiğini, bir elementin en küçük biriminin, bir çekirdek ile elektronlardan oluşan atom olduğunu muhtemelen biliyorsunuz. Hatırlayalım, çekirdek proton ve nötronlardan oluşur. Evrendeki en hafif ve en bol element olan hidrojenin bir protonu ve bir elektronu vardır. Fakat çekirdeğinde bir protonun yanı sıra bir de nötronu olan başka bir hidrojen formu da bulunur. Hidrojenin bir izotopudur bu, aynı elementin farklı bir formu; buna döteryum adı verilir. Hidrojenin, çekirdekteki protona eşlik eden iki nötronlu üçüncü bir izotopu daha vardır ki buna da trityum denir. Belli bir elementin bütün izotopları aynı proton sayısına sahiptir, fakat farklı sayıda nötronları vardır ve elementlerin farklı sayıda izotopları olur. Mesela oksijenin on üç izotopu vardır, altın elementininse otuz altı.

Bu izotopların pek çoğu karardır – yani aşağı yukarı sonsuza dek var olurlar. Fakat çoğunluğu kararsızdır, başka bir deyişle radyoaktiftirler ve radyoaktif izotoplar bozunur: Yani er ya da geç kendilerini başka elementlere dönüştürürler. Dönüştükleri elementlerin bir kısmı karardır, o zaman radyoaktif bozunma durur, fakat diğerleri kararsızdır ve kararlı bir hale ulaşınca kadar bozunma devam eder. Hidrojenin üç izotopundan sadece biri, trityum radyoaktiftir – bozunarak kararlı bir helyum izotopuna dönüşür. Oksijenin on üç izotopundan üçü karardır; altının otuz altı izotopundan sadece biri karardır.

Radyoaktif izotopların ne hızda bozunduğunu "yarı ömür"leriyle –bir mikrosaniyeden (saniyenin milyonda biri) milyarca yıla uzanan bir yelpaze– ölçtüğümüzü hatırlarsınız. Trityumun yaklaşık on

iki yıl yarı ömrü olduğunu söylediğimizde, bunun anlamı, belli miktardaki bir trityum numunesindeki izotopların yarısının on iki yılda bozunacağıdır (yirmi dört yılın sonunda sadece bir çeyreği kalacaktır). Nükleer bozunma, pek çok farklı elementin dönüştürülüp yaratıldığı en önemli süreçlerden birisidir. Simya değildir. Hatta, doktora araştırmalarım sırasında radyoaktif altın izotoplarının bozunup cıvaya dönüştüğüne tanık oldum, ortaçağ simyacılarının hoşlanacağı gibi tersine değil. Öte yandan cıvanın ve platinin de bozunup altına dönüştüğü pek çok izotopu vardır. Fakat sadece bir platin izotopu ve sadece bir cıva izotopu bozunup parmağınıza takacağınız türden kararlı altına dönüşür.

Bu çalışma son derece heyecan vericiydi; resmen ellerimde bozunan radyoaktif izotoplar vardı. İş çok da hareketliydi. Çalıştığım izotopların yarı ömürleri genellikle sadece bir ya da birkaç gündü. Sözgelimi, altın-198 iki buçuk günden biraz fazla bir yarı ömre sahiptir, o yüzden hızlı çalışmam gerekiyordu. Arabamla Delft'ten, bu izotopları yapmak için siklotron kullandıkları Amsterdam'a gidip, tekrar Delft'teki laboratuvara koşturuyordum. Orada izotopları sıvı formuna dönüştürmek için bir asidin içinde çözüyordum, sonra çok ince bir tabaka üzerine koyup dedektörlerin içine yerleştiriyordum.

Nükleer bozunmaya ilişkin bir kuramı doğrulamaya çalışıyordum: çekirdeklerden gelen elektron yayılımının gama ışınına oranını tahmin eden bir kuram. Çalışmam çok hassas ölçümler gerektiriyordu. Bu çalışma pek çok radyoaktif izotop için daha önce yapılmıştı, fakat yakın zamandaki bazı ölçümler kuramın öngördüğünden farklı çıkmıştı. Danışmanım Profesör Aaldert Wapstra kuramın mı yoksa ölçümlerin mi yanlış olduğunu belirleme çalışması yapmamı önerdi. Müthiş tatmin edici bir çalışmaydı, fevkalade girift bir yapboz üzerinde çalışmak gibi bir şeydi. Karşımdaki zorlu hedef, ölçümlerimi, başka araştırmacıların benden önce ortaya koyduklarından çok daha hassas kılmaktı.

Elektronlar o kadar küçüktür ki bazıları onların fiilen bir büyük-lüklerinin olmadığını söyler – çapları bir santimetrenin bin trilyonunda birinden küçüktür. Gama ışınlarının dalga boyları da bir santimetrenin milyarda birinden azdır. Yine de fizik onları tespit edip hesaplamam için gerekli imkânı sunuyordu. Deneysel fiziğin sevdiğim bir başka yanı da budur: Görünmeze "dokunmamızı" sağlar.

İhtiyacım olan ölçümleri elde etmek için elimdeki numuneyi son damlasına kadar kullanmak zorundaydım, çünkü ne kadar çok sayım yaparsam ölçümüm o kadar hassas olacaktı. Sık sık 60 saat aralıksız, genellikle uyumadan çalıştığım oluyordu. Biraz saplantı halini almıştı.

Deneyisel fizikçi için ölçüm hassasiyeti her şeyin anahtarıdır. Doğru ölçüm önemli olan *tek* şeydir ve hata payını da göstermeyen bir ölçüm anlamsızdır. Bu basit, güçlü, her şeyin temelinde yatan fikir üniversite fizik ders kitaplarında neredeyse hep gözardı edilir. Ölçümün doğruluk derecesi hayatımızdaki pek çok şeyde büyük öneme sahiptir.

Radyoaktif izotoplarla yaptığım çalışmada ulaşmam gereken hassasiyet derecesi çok zorluydu, fakat üç-dört yıl zarfında ölçümlerde gitgide daha iyi sonuçlar aldım. Dedektörlerin bir kısmını iyileştirdikten sonra ölçümler son derece doğru çıkmaya başladı. Kuramı doğruluyordum ve sonuçları yayımlıyordum, sonunda bu çalışma doktora tezim oldu. Beni özellikle tatmin eden şey sonuçlarımın nihai oluşuydu, zira pek sık rastlanan bir şey değildir bu. Fizikte ve genel olarak bilimde, pek çok zaman sonuçlar açık seçik değildir. Kesin bir sonuca ulaştığım için şanslıydım. Bir muammayı çözüp fizikçi olarak rüşdümü ispat etmiş ve atomaltı dünyasının meçhul topraklarının haritasının çıkarılmasına yardımcı olmuştum. Yirmi dokuz yaşındaydım ve esaslı bir katkıda bulunduğumdan içim içime sığmıyordu. Hepimizin yazgısında Einstein ve Newton'ın yaptığı gibi devasa temel keşifler yer almaz, fakat araştırmak için hâlâ uygun topraklar mevcut, hem de istemediğiniz kadar.

Diplomamı aldığım dönemde evrenin doğasına dair yepyeni bir keşif çağının başlıyor olmasından dolayı da şanslıydım. Gökbilimciler baş döndürücü bir hızla keşifler yapıyorlardı. Bazısı Mars ve Venüs'ü su buharı bulmak için inceliyordu. Bazıları yerkürenin manyetik alan çizgilerini çevreleyen yüklü parçacık kemerlerini keşfetmişti, bunlara bugün Van Allen kemerleri diyoruz. Başkaları da kuasar olarak bilinen, muazzam büyüklükteki güçlü, yıldızvari radyo dalgası kaynaklarını keşfetmişti. Kozmik mikrodalga arka plan (CMB) ışınması 1965'te keşfedildi – büyük patlamanın ortaya çıkardığı enerjinin izleri, evrenin kökenini açıklayan, tartışma konusu olmuş büyük patlama kuramı için güçlü bir kanıttı. Kısa süre sonra, 1967'de gök-

bilimciler atarca adını alan yeni bir yıldız kategorisi keşfedeceklerdi.

Nükleer fizikte çalışmaya devam edebilirdim, o alanda da pek çok keşif yapıp duruyordu. Bu çalışma çoğunlukla hızla artan atomaltı parçacıkların keşfine yönelikti, özellikle de proton ve nötronların yapıtaşları olduğu ortaya çıkan kuark adındaki parçacıkların keşfine. Kuarklar davranış biçimleri açısından o kadar tuhaftı ki fizikçiler onları sınıflandırmak için çeşni dedikleri isimler verdiler: yukarı, aşağı, garip, tılsım, üst ve alt. Kuarkların keşfi, tamamen kuramsal bir fikrin doğrulandığı, bilimdeki o harika anlardan biriydi. Kuramcılar kurkların varlığını öngördü, deneyciler de onları bulmayı başardı. Öyle egzotiktiler ki, maddenin temellerinin bizim bildiğimizden çok, çok daha karmaşık olduğunu ortaya çıkardılar. Sözgelimi, bugün protonların iki yukarı kuark ile bir aşağı kuarktan oluştuğunu, gluon adı verilen başka tuhaf parçacıklarla vücut bulan güçlü nükleer kuvvetle bir arada tutulduklarını biliyoruz. Bazı kuramcılar kısa zaman önce yukarı kuarkın, bir protonun kütlesinin yaklaşık yüzde 0,2'si kadar, aşağı kuarkın da protonun kütlesinin yaklaşık yüzde 0,5'i kadar kütlesi olduğunu hesapladı. Bu artık dedenizin bildiği eski atom çekirdeği değildi.

Parçacık koleksiyonu büyüleyici bir araştırma alanı olabilirdi eminim, fakat güzel bir tesadüfle, çekirdekten yayılan ışımayı ölçmek için edindiğim beceriler evreni incelemek için son derece kullanışlı çıktı. 1965'te MIT'den Profesör Bruno Rossi'den X ışını gökbilimi (*X-ray astronomy*) üzerinde çalışmak üzere bir davetiye aldım. Bu tamamen yeni bir sahaydı, o sırada daha birkaç yıllık bir geçmişti vardı –1959'da Rossi önyak olmuştu.

MIT karşıma çıkıp çıkabilecek en büyük fırsattı. Rossi'nin kozmik ışınlar üzerine yaptığı çalışma zaten efsaneviydi. Rossi savaş sırasında Los Alamos'ta bir bölümün başındaydı ve gezegenlerarası plazma adı da verilen güneş rüzgârının –*aurora borealis*'imize sebep olan ve kuyruklu yıldızların kuyruklarını güneşten öteye "üfle-yen", güneşten fırlatılmış yüklü parçacık akımı– ölçümlerinde öncülük etmişti. Şimdi de aklına kozmosta X ışını arama fikri gelmişti. Tamamen keşfe yönelik bir çalışmaydı; bunları bulup bulamayacağına dair hiçbir fikri yoktu.

O sıralarda MIT'de her şey serbestti. Ne fikriniz olursa olsun, insanları yapılabilirliğine ikna edebilirsiniz, üzerinde çalışabilirdiniz.

Hollanda'dan ne kadar farklıydı! Delft'te katı bir hiyerarşi vardı, lisansüstü öğrencilerine de aşağı tabaka muamelesi yapılırdı. Çalıştığım binanın ön kapısının anahtarları profesörlere verilirdi, fakat lisansüstü öğrencisi olarak sadece bisikletlerin konulduğu bodrum katının anahtarını alırdınız. Binaya her girişinizde bisiklet ardiyesinden geçmek zorunda kalırdınız ve böylece size bir *hiç* olduğunuz hatırlatılırdı.

Saat beşten sonra çalışmak isterseniz her gün öğleden sonra saat dörde kadar, geç vakte kalmak zorunda olduğunuzu mazur gösterecek bir form doldurmanız gerekiyordu. Ben neredeyse her gün bunu yaptım. Bürokrasi gerçekten tam bir baş belasıydı.

Bulduğum enstitüden sorumlu üç profesörün ön kapıya yakın özel park yerleri vardı. Bir tanesi –kendi danışmanım– Amsterdam'da çalışır ve Delft'e sadece haftada bir defa salı günleri gelirdi. Bir gün ona sordum: "Siz burada değilken park yerinizi kullanmamın sakıncası var mı acaba?" "Tabii ki yok," dedi, fakat daha oraya park ettiğim birinci gün, dahili telefonla arayıp arabamı oradan kaldırmam için mümkün olan en sert biçimde talimat verdiler. İşte bir örnek daha: İzotoplarımı almak için Amsterdam'a gitmem gerektiğinden bana bir fincan kahve için 25 sent, öğle yemeği için de 1,25 gulden veriliyordu (1,25 gulden o sıralar yaklaşık üçte bir ABD dolarıydı), fakat ikisi için de ayrı ayrı fiş sunmam gerekiyordu. Bunun üzerine 25 senti yemek fişine ekleyip sadece 1,50 guldenlik tek bir fiş sunup sunamayacağımı sordum. Bölüm başkanı Profesör Blaisse bana yazdığı mektupta, eğer gurme yemekler yemek istiyorsam kendi cebimden yiyebileceğimi ifade etti.

Dolayısıyla MIT'ye geçip bütün bunlardan kurtulmak büyük sevinçti; kendimi yeniden doğmuş gibi hissettim. Her şey sizi teşvik etmek için yapılıyordu. Ön kapının anahtarını aldım ve tam da istediğim gibi gece gündüz çalışabildim. Benim için o binanın anahtarı her kapıyı açan bir anahtardı. Fizik bölümünün başkanı oraya gelişimden altı ay sonra, 1966 Haziranında fakültede bir görev teklif etti. Kabul ettim ve hiç ayrılmadım.

İkinci Dünya Savaşı'nın yıkımlarını yaşadığım için de MIT'ye gelişim çok mutluluk vericiydi. Naziler ailemin yarısını öldürmüştü, henüz tam olarak hazmedemediğim bir trajedi. Bazen anlattığım oluyor, ama nadiren, zira benim için gerçekten çok zor – altmış beş yıl

geçti ama hâlâ dayanılır gibi değil. Ablam Bea'yla bu konuyu açtığımızda hemen hemen her seferinde ağlıyoruz.

1936 doğumluyum ve Almanlar Hollanda'ya 10 Mayıs 1940'ta saldırdığında daha dört yaşındaydım. En eski anılarımdan biri, Nazi birlikleri ülkeme girerken hepimizin, annemin anne babası, annem, babam, ablam ve benim, evimizin (La Hey'de Amandelstraat 61) ban-yosunda saklanmasıdır. Gaz saldırıları yapılacağına dair uyarılar olduğundan burunlarımıza ıslak mendil tutuyorduk.

Hollanda polisi Yahudi büyükbabam ve büyükannem Gustav Lewin ve Emma Lewin Gottfeld'i 1942'de evlerinden yaka paça götürdü. Yine o sıralarda, halam Julia'yı, kocası Jacob'u (Jenno deniyordu) ve üç çocuğunu –Otto, Rudi ve Emmie– sürükleyerek bavullarıyla kamyonlara bindirip Hollanda'daki aktarma kampı Westerbork'a gönderdiler. Yüz binden fazla Yahudi başka kamplara giderken Westerbork'tan geçmiştir. Naziler büyükannemle büyükbabamı hemen Auschwitz'e gönderip vardıkları gün yani 19 Kasım 1942'de öldürdüler – zehirli gazla. Büyükbabam yetmiş beş yaşındaydı, büyükannemle aynı yaşta, o yüzden çalışma kamplarına uygun olamazlardı. Westerbork ise tam tersine çok tuhaftı; Yahudiler için bir tatil yeri havası verilmişti. Bale gösterileri ve dükkânlar vardı. Annem sık sık patates gözlemesi yapar ve postayla Westerbork'taki akrabalarımıza gönderirdi.

Jenno eniştem Hollandalılar için "*stateloos*" yani "devletsiz" olduğundan –milliyeti yoktu– ayağını sürüyüp yaklaşık bir yıl ailesiyle Westerbork'ta kalmayı başardı, daha sonra Naziler aileyi bölüp farklı kamplara yolladı. Julia halamı ve kuzenlerim Emmie ile Rudi'yi önce Almanya'daki Ravensbrück kadınlar toplama kampına gönderdiler, sonra da yine Almanya'daki Bergen-Belsen'e. Burada savaş bitene kadar tutsak kaldılar. Julia halam kampın Müttefikler tarafından kurtarılışından on gün sonra öldü, fakat kuzenlerim sağ kaldı. En büyük kuzenim Otto da Ravensbrück'e gönderilmişti, oradaki erkekler kampına; savaşın bitimine yakın Sachsenhausen toplama kampında buldu kendini, Nisan 1945'teki Sachsenhausen ölüm yürüyüşünden sağ salim çıktı. Jenno eniştemi doğrudan Buchenwald'a gönderip orada öldürdüler – diğer 55.000'den fazla insanla birlikte. Ne zaman bir Yahudi katliamı filmi görsem –ki gerçekten uzun bir süre hiç seyretmedim– hemen filmdeki karakterlerin yerine kendi ailemi

koyarım. *Hayat Güzeldir*'i seyredilmesi müthiş zor, hatta nahoş bulmam bu yüzdendi. Bu kadar ciddi bir konuda şaka yapmayı bir türlü aklım almıyordu. Hâlâ Naziler tarafından kovalandığımı gördüğüm tekrar eden kâbuslarım oluyor, bazen dehşete kapılmış bir şekilde uyanıyorum. Hatta bir kere rüyamda Naziler tarafından kendi infazıma tanık oldum.

Bir gün bu yürüyüşe çıkmayı isterim, babamın anne babasının son yürüyüşüne, tren istasyonundan Auschwitz'deki gaz odalarına doğru. Yapar mıyım yapmaz mıyım bilmiyorum, ama hatıralarını yâd etmenin bir yolu gibi geliyor bana. Böylesi bir canavarlığa karşı yapabileceğimiz tek şey küçük jestler. Bu ve bir de unutmamak: Aile bireylerimin toplama kamplarında "öldüğü" gibi bir şeyi asla söylemem. Daima *katledildi* kelimesini kullanırım, böylelikle dilin gerçeği saklamasına izin vermem.

Babam Yahudiydi ama annem değildi; Yahudi olmayan bir kadınla evlenmiş bir Yahudi olduğundan, hemen bir hedef olmamıştı. Fakat çok geçmeden, 1943'te hedef oldu. Sarı yıldızı takmak zorunda kaldığını hatırlıyorum. Annem değil, ablam değil, ben değil, ama o taktı. Biz pek dikkat etmemiştik, en azından başlarda. Yıldızı biraz saklamıştı, giysilerinin altına, ki bu yasaktı. Korkutucu olan şey aşama aşama Nazi kısıtlamalarına uyuşuydu ve gittikçe de kötüleşiyordu. Önce toplu taşıma araçlarını kullanması yasaklandı. Sonra parklara alınmadı. Sonra restoranlara alınmadı; yıllardır gittiği yerlerde istenmeyen adam ilan edilmişti! Ama inanılmaz olan, insanların bunlara uyum sağlama becerileriydi.

Babam artık toplu taşıma araçlarına binemez olunca, "Zaten ne kadar biniyorum ki?" dedi. Artık parklara girmesi yasaklanınca, "Zaten parka ne kadar gidiyorum ki?" dedi. Sonra restoranlara gidemeyince, "Sanki restorana ne kadar gidiyorum ki?" dedi. Bu korkunç şeyleri önemsizmiş gibi göstermeye çalışıyordu, eften püften sıkıntılarını gibi, belki çocukları için, belki aynı zamanda kendi iç huzuru için. Bilmiyorum.

Benim için hâlâ konuşulması en zor şeylerden biri. Suyun yükseldiğini yavaş yavaş görüp de sizi boğacağını anlamama becerisi nereden geliyor? Nasıl oluyor da hem görüyorlar, hem de görmüyorlardı? Benim üstesinden gelebileceğim bir şey değil. Elbette bir bakıma tamamen anlaşılır bir durum; belki de hayatta kalabilmeni-

zin tek yolu budur, kendinizi kandırabildiğiniz sürece.

Naziler parkları Yahudilere yasaklasa da, babamın mezarlıklarda yürümesi serbestti. Şimdi bile yakınlardaki bir mezarlıktaki pek çok yürüyüşümüzü hatırlarım. Aile bireylerimizin nasıl ve neden öldüklerini hayal ederdik – bazen dördünün aynı günde öldüğü olmuştu. Bugünlerde Cambridge'in ünlü Mount Auburn Mezarlığı'nda yürürken bunu hâlâ yaptığım oluyor.

Yetişme çağımda başıma gelen en acıklı şey babamın birden ortalıktan kayboluşuydu. Gittiği günü çok net hatırlıyorum. Okuldan eve gelince gittiğini bir şekilde sezmiştim. Annem evde yoktu, onun için dadı Lenie'ye "Babam nerede?" diye sordum. Bir cevap geveledi, sözde beni rahatlatacak bir şey, ama bir şekilde babamın bizi terk etmiş olduğunu biliyordum.

Bea onu ayrılırken görmüş, fakat yıllar sonrasına kadar bana hiç söylemedi. Güvenlik için dördümüz de aynı odada yatıyorduk; sabahın dördünde babamın kalkıp bir torbaya bazı giysiler koyduğunu görmüş. Sonra babam annemi öpüp çıkmış. Annem nereye gittiğini bilmiyordu; bu bilgi çok tehlikeli olurdu, çünkü Almanlar babamın nerede olduğunu öğrenmek için anneme işkence yapabilirlerdi, o da onlara söylerdi. Şimdi biliyoruz ki onu Direnişçiler saklamış, daha sonraları da Direnişçiler aracılığıyla ondan bazı mesajlar aldık, fakat o sırada nerede olduğunu, hatta yaşayıp yaşamadığını bilmemek kesinlikle korkunç bir şeydi.

Yokluğunun annemi ne kadar derinden etkilediğini anlayamayacak kadar küçüktüm. Annemle babam evimizi bir okul haline getirmişti (öğretme aşkıma mutlaka önemli bir katkısı olmuştur); annem de babamsız sürdürmeye çabaladı. Depresyona meyli vardı zaten, fakat bir de kocası gidince, biz çocuklarının da toplama kampına gönderilebileceğinden endişe duyuyordu. Bizim için hakikaten dehşete kapılmış olmalı ki –elli beş yıl sonra bana anlattığı gibi– bir gece Bea'ya ve bana mutfakta uyumamız gerektiğini söyleyip hava kaçıışı olmasın diye de kapıların altına perde, battaniye ve havlu basmış. Gazı açıp bizim uyurken ölmemizi planlıyormuş, fakat sonuna kadar gitmemiş. Böyle düşündüğü için onu kim suçlayabilir – Bea'yla benim suçlamadığımızı biliyorum.

Çok korkuyordum. Biliyorum gülünç geliyor ama tek erkek ben olduğumdan bir nevi evin erkeği olmuştum, hem de daha yedi-sekiz

yaşındayken. Oturduğumuz yer olan La Hey'de, kıyıda onarım gerektiren pek çok ev vardı, plajlarımıza sığınak yapan Almanlar tarafından yarı yarıya yıkılmış evler. Oraya gidip o evlerden, yemek pişirmek ve ısınmak için yakacak odun çalardım – "toplardım" diyecektim, ama çalmaktı.

Kışları sıcak tutması için şu sert, kaşındıran, kötü kaliteli yünlerden giyinirdik. Şu gün bile hâlâ yüne tahammül edemem. Cildim o kadar hassas ki çok sıkı dokunmuş yumuşak çarşaflarda uyuyorum. Çok ince, kaliteli pamuklu gömlekler sipariş etmemin sebebi de bu – bunlar cildimi tahriş etmiyor. Kızım Pauline'i yünlü giymiş görünce yüzümü çeviriyormuşum; savaşın üzerimdeki etkisi hâlâ bu kadar güçlü iştir.

Babam savaş sürerken döndü, 1944 güzüydü. Ailemdeki kişiler bunun nasıl olduğuna dair farklı hikâyeler anlatıyor, fakat benim anlayabildiğim kadarıyla, harika biri olan Lauk teyzem bir gün Amsterdam'daymış, La Hey'den yaklaşık 45 kilometre uzakta – ve babamı bir kadınla görüvermiş! Uzaktan takip edince bir eve girdiğini görmüş. Daha sonra teyzem tekrar gitmiş ve babamın bir kadınla yaşadığını keşfetmiş.

Teyzem anneme söylemiş, annemin önce bunalımı artmış ve morali iyice bozulmuş, fakat bana söylenene göre kendini toparlayıp gemiyle Amsterdam'a gitmiş (trenler artık çalışmıyordu), dosdoğru eve yürüyüp zili çalmış. Kadın açmış kapıyı, annem de, "Kocamla konuşmak istiyorum," demiş. Kadın, "Mr. Lewin'in karısı benim," diye cevap vermiş. Fakat annem ısrar etmiş: "Kocamı istiyorum." Babam gelmiş kapıya, annem, "Tasını tarağını toplayıp benimle gelmen için sana beş dakika süre veriyorum, aksi halde boşanırsınız ve çocuklarını da asla göremezsiniz," demiş. Üç dakika sonra babam eşyalarıyla aşağı inip annemle geri dönmüş.

Bazı açılardan geri dönüşü çok daha kötüydü, çünkü insanlar babamın –onun adı da Walter Lewin'di– Yahudi olduğunu biliyordu. Direnişçiler ona Jaap Horstman adında sahte kimlik belgeleri vermişti; ahlamlarla bana, ona Jaap amca dememizi tembihlediler. Tamamen bir mucize –Bea da ben de buna hâlâ anlam veremiyoruz– ama hiç kimse onu ele vermedi. Bir marangoz evimizin bodrum katına ambar kapağı gibi bir kapı yaptı. Onu kaldırıncı babam aşağı inip döşeme altı boşluğunda saklanabiliyordu. Şaşırtıcı bir şekilde

babam yakalanmaktan kurtuldu.

Savaşın yaklaşık son sekiz ayı boyunca evde kalmıştı, savaşın bizim için en kötü zamanları yani 1944 kışının *hongerwinter* tabir edilen kış ayları da dahil. İnsanlar açlıktan öldüler – yaklaşık yirmi bin insan öldü. Isınmak için yakacak odun yerine evin altına sürünüp her bir kışı –zemin katı destekleyen büyük hatılları– söktük.

Kıtlık kışında lale soğanları, hatta ağaç kabukları yedik. İnsanlar yiyecek karşılığı babamı polise teslim edebilirlerdi. Almanlar da teslim edilen her Yahudi için para veriyorlardı (galiba elli guldendi, o sıralar on beş dolar civarı).

Almanlar bir gün evimize geldiler de. Bir de baktık, daktiloları topluyorlarmış, bizimkilere baktılar, eskiden daktilo dersi verdiğimiz daktilolara, fakat çok eski olduğunu düşündüler. Bu Almanların kendilerine özgü bir aptallıkları vardı; daktiloları toplamaları söylüyorlarsa Yahudileri toplamıyorlardı. Film gibi, biliyorum. Ama gerçekten oldu.

Savaşın bütün travmasından sonra galiba şaşırtıcı olan şey, aşağı yukarı normal bir çocukluk geçirmemdi. Annem babam okullarını işletmeye devam ettiler –Haagsch Studiehuis– bunu savaştan önce ve savaş sırasında da yapmışlardı, daktilo, steno, dil ve ticaret dersleri veriyorlardı. Üniversitedeyken orada ben de öğretmenlik yaptım.

Annem babam sanat hamisiydi, ben de sanat hakkında bilgi edinmeye başladım. Akademik ve sosyal bakımdan üniversitede harika yıllar geçirdim. 1959'da evlendim, 1960 Ocağında lisansüstü programına başladım ve o yıl daha sonra ilk kızım Pauline dünyaya geldi. Oğlum Emanuel (şimdi adı Chuck) bundan iki yıl sonra doğdu, ikinci kızımız Emma da 1965'te geldi. İkinci oğlumuz Jakob 1967'de ABD'de dünyaya geldi.

MIT'ye vardığımda şans benden yanaydı; o sıralar devam etmekte olan keşifler patlamasının tam göbeğinde buldum kendimi. Onlara sunduğum uzmanlık alanı –uzay araştırmaları hakkında hiçbir şey bilmememe rağmen– Bruno Rossi'nin öncü X ışını gökbilimi ekibi için biçilmiş kaftandı.

V-2 roketleri dünyanın atmosferinin sınırlarını aşmış, keşifler için de yepyeni bir fırsatlar denizi belirmişti. Kaderin cilvesine bakın ki V-2 bir Nazi olan Wernher von Braun tarafından tasarlanmıştı. Roketleri İkinci Dünya Savaşı sırasında Müttefiklerin sivillerini

öldürmek için geliştirmişti. Bu roketler korkunç derecede yıkıcıydı. Bunları, Peenemünde'de ve Almanya'daki kötü şöhretli yeraltı Mittelwerk fabrikasında, toplama kamplarındaki esir işçiler imal etmiş ve bu süreçte yirmi bin kadarı ölmüştü. Bu roketler de çoğu Londra'da olmak üzere yedi bin sivil öldürmüştü. Annemin anne babasının La Hey'e yakın evlerinden 1,5-2 kilometre mesafe uzakta bir füze fırlatma rampası vardı. Roketler ateşlenirken çıtırtı sesini, fırlatılırken de gürleme sesini hatırlıyorum. Bir bomba taarruzunda Müttefikler V-2 tesisini yok etmeye çalışmış, fakat hedefi tutturamayınca beş yüz Hollandalı sivili öldürmüşlerdi. Savaşın sonra Amerikalılar von Braun'u ABD'ye getirdiler, o da kahraman oldu. Buna aklım hiç ermemiştir. O bir savaş suçlusuydu!

Von Braun V-2'lerin nükleer başlık taşıyan sonraki nesilleri Redstone ve Jupiter füzelerini üretmek için on beş yıl ABD ordusuyla çalıştı. 1960'ta NASA'ya girdi ve Alabama'daki Marshall Uzay Uçuş Merkezi'ni yönetti. Orada aya astronot gönderen Satürn roketlerini geliştirdi. Roketlerinin yeni nesilleri X ışını gökbilimi sahasını açtı, böylece, roketler silah olarak başladıysa da hiç değilse bilim için de çok kullanıldı. 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında dünyanın atmosferinden dışarıyı gözetleme ve başka türlü göremeyeceğimiz şeylere bakma fırsatı vererek dünyaya –yok, yok, evrene!– yeni pencereler açtılar.

Dış uzaydan gelen X ışınlarının keşfi konusunda Rossi içgüdülerini dinlemişti. 1959'da Martin Annis adında, o sırada Cambridge'de American Science and Engineering adındaki bir araştırma firmasının başında olan eski bir öğrencisinin yanına gidip, "Hadi bir bakalım dışarılarda X ışını var mı," demişti. Geleceğin Nobel Ödülü sahibi Riccardo Giacconi'nin başkanlığındaki ASE ekibi, 18 Haziran 1962'de fırlattıkları bir rokete Geiger-Müller sayaçları yerleştirdiler. Roket dünyanın atmosferinin ötesine geçerek –atmosfer X ışınlarını soğurduğu için bu bir zorunluluktu– 80 kilometre yukarıda sadece altı dakika geçirdi.

Tabii ki X ışınlarını tespit ettiler; daha da önemlisi, X ışınlarının güneş sisteminin dışındaki bir kaynaktan geldiğini kanıtladılar. Bu olay tüm gökbilimi değiştiren bir bomba etkisi yarattı. Kimse bunu beklemiyordu, kimse ışınların neden orada olduğunu bilmiyordu; kimse bu bulguyu gerçek anlamda kavrayamamıştı. Rossi duvara

bir fikir atmış, yapışıp yapışmayacağına bakmıştı. Bunlar insanı büyük bir bilimci yapan türden içgüdülerdir.

MIT'ye geldiğim tarihi tam olarak hatırlıyorum: 11 Ocak 1966, çünkü çocuklarımızdan biri kabakulak olmuştu, biz de Boston'a gidişimizi ertelemek zorunda kalmıştık; kabakulak bulaşıcı olduğundan KLM uçmamıza izin vermemişti. İlk günümde Bruno Rossi ve George Clark'la tanıştım. George 1964'te çok yüksek bir irtifada –yaklaşık 43 bin metre– çok yüksek enerjili (o irtifaya kadar nüfuz eden türden) X ışını yayan kaynakları bulmak için balon uçurmuş ilk kişiydi. Bana şöyle dedi: "Benim gruba katılmak istersen harika olur." Kesinlikle doğru zamanda doğru yerde bulunuyordum.

Bir şeyi ilk siz yaparsanız, başarılı olmanız kaçınılmaz. Ekibimiz ardı ardına keşifler yaptı. George çok cömertti; iki yılın sonunda grubu tamamen bana devretti. Gökfiziğinin en yeni dalgasında en ön saflarda olmak fevkaladeydi.

Kendimi o sırada gökfiziğinde devameden en heyecan verici çalışmaların içinde bulmam inanılmaz bir şanstı, fakat işin aslı fiziğin bütün alanları müthiştir; hepsi merak uyandırıcı hazlarla doludur ve sürekli şaşırtıcı yeni keşifler çıkarır ortaya. Biz yeni X ışını kaynaklarını bulurken parçacık fizikçileri sürekli çekirdeğin temel yapıtaşlarını buluyorlardı, çekirdekleri bir arada tutan şeyin gizemini çözüyorlardı, "zayıf" nükleer etkileşimleri taşıyan W ve Z bozonlarını ve "güçlü" etkileşimleri taşıyan kuark ve gluonları keşfediyorlardı.

Fizikçiler zamanda çok gerileri, evrenin ta kıyılarını görmemize ve sonsuz sayıda gibi görünen galaksileri ortaya koyan o şaşırtıcı resmi, Hubble Ultra Derin Alan'ı (Hubble Ultra Deep Field) yapmamıza olanak sağladı. Bu bölümü bitirmeden önce internette Hubble Ultra Derin Alan'a mutlaka bakın. Bu resmi kendilerine ekran koruyucusu yapan arkadaşlarım var!

Evren yaklaşık 13,7 milyar yaşında. Ne var ki büyük patlamadan bu yana uzayın kendisi de muazzam biçimde genişlediği için, şu anda, büyük patlamadan 400 ila 800 milyon yıl sonra oluşmuş ve şimdi 13,7 milyar ışık yılından çok daha uzakta bulunan galaksileri gözlemliyoruz. Gökbilimcilerin şimdiki tahminlerine göre, gözlemlenebilir evrenin kıyısı bizden her yönde yaklaşık 47 milyar ışık yılı ötede. Uzayın genişlemesinden dolayı, çok uzaktaki pek çok galaksi bizden ışık hızından daha hızlı uzaklaşıyor. Einstein'ın özel

görelilik kuramında koyutladığı gibi, hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı gidemeyeceği kanısıyla yetişmiş olanlarınıza bu şok etkisi yapabilir, hatta imkânsız görünebilir. Ne var ki Einstein'ın genel görelilik kuramına göre, uzayın kendisi genişlerken iki galaksi arasında hız sınırı yoktur. Biliminsanlarının bugün evrenbilimin –tüm evrenin kökenini ve evrimini inceleyen bilim– altın çağında yaşadığımızı düşünmesinin geçerli sebepleri var.

Fizik, gökkuşaklarının güzelliğini ve kırılğanlığını, kara deliklerin varlığını, gezegenlerin neden halihazırdaki gibi hareket ettiğini, bir yıldız patladığında meydana gelen şeyi, kendi etrafında dönen buz patencisinin kollarını kendine çekince neden hızlandığını, astronotların uzayda neden ağırlıksız olduklarını, evrendeki elementlerin nasıl oluştuğunu, evrenimizin ne zaman başladığını, bir flütten nasıl müzik çıktığını, ekonomimizi olduğu kadar bedenlerimizi de çalıştıran elektriği nasıl ürettiğimizi ve büyük patlamanın nasıl ses çıkardığını açıklamıştır. Atomaltının en küçük alanlarının ve evrenin en uzak kısımlarının haritasını çıkarmıştır.

Ben MIT'ye geldiğimde çoktan güngörmüş bir ihtiyar kurt olan dostum ve meslektaşım Victor Weisskopf, *The Privilege of Being a Physicist* (Fizikçi Olmanın Ayrıcalığı) adında bir kitap yazdı. Bu harika başlık, insanların gece dikkatle gökyüzüne bakmaya başladıkları zamanlardan beri gökbilim ve gökfiziğindeki en heyecan verici dönemlerin tam göbeğinde olduğum için hissettiklerimi çok güzel ifade ediyor. MIT'de aynı çatı altında çalıştığım, ofisleri koridorun hemen karşısında olan insanlar, tüm bilimdeki en temel soruların peşini bırakmamak için akıl almaz ölçüde yaratıcı ve incelikli teknikler tasarladılar. Hem insanlığın yıldızlar ve evrene dair müşterek bilgisinin artmasına yardımcı olduğum, hem de birkaç genç kuşağın bu muhteşem alanı anlamasını ve sevmesini sağladığım için kendimi ayrıcalıklı hissediyorum.

Avcumun içinde bozunan izotopları tuttuğum o ilk zamanlardan beri, eski olsun yeni olsun fizik keşiflerinden; fiziğin zengin tarihi ve daima genişleyen keşif sahasından; çevremdeki dünyanın beklenmedik harikalarına gözlerimi açışımdan aldığım haz hiç bitmedi. Benim için fizik bir görme biçimi – görkemli olanı ve sıradan olanı, enginlikleri ve zerrelere harikulade bir şekilde dokunmuş güzel bir bütün olarak görme.

Fiziği öğrencilerim için canlı kılma çabalarım işte bu doğrultuda. hep yapmaya çalıştığım şey bu. Onlar için keşiflerin güzelliğini hatırlamanın, çetrefil matematiği üzerine odaklanmaktan daha önemli olduğunu düşünüyorum – sonuçta çoğu fizikçi olacak değil. Dünyayı farklı bir şekilde görmelerine yardımcı olmak; daha önce akıllarına hiç gelmemiş soruları sormak; gökkuşaklarını daha önce hiç görmedikleri biçimde görmelerini sağlamak ve matematiğin küçük ayrıntılarından çok fiziğin enfes güzelliğine odaklanmak için elimden ne geldiyse yaptım. Elinizdeki kitabın amacı da bu: fizikçilerin dünyamızın işleyişini ve hayret uyandıran zarafet ve güzelliğini aydınlatan harikulade yöntemlerine gözlerinizi açmaya yardımcı olmak.

Ölçümler, Belirsizlikler ve Yıldızlar

Anneannem ve Galileo Galilei

Fizik temelde deneysel bir bilimdir, ölçümler ve belirsizlikler de her deneyin, her keşfin canıdır. Fizikte çığır açan kuramsal keşifler bile, ölçülebilen niceliklere ilişkin öngörüler biçiminde ortaya çıkar. Sözelimi Newton'ın ikinci yasası, $F = ma$ (kuvvet eşittir kütle çarpı ivme), belki de fizikteki en önemli denklem, ya da Einstein'ın $E = mc^2$ 'si (enerji eşittir kütle çarpı ışık hızının karesi), fizikteki en ünlü denklem. Fizikçiler yoğunluk, ağırlık, uzunluk, elektrik yükü, kütleçekim gücü, sıcaklık ya da hız gibi ölçülebilir nicelikler arasındaki bağıntıları matematiksel denklemler dışında başka nasıl ifade ederler?

Burada bir parça yanlış olduğumu itiraf edeyim, çünkü doktora araştırmam farklı türden nükleer bozunmaların yüksek hassasiyette ölçümünden ibaretti ve X ışını gökbiliminin ilk yıllarındaki katkılarım, on binlerce ışık yılı uzaktaki yüksek enerjili X ışını ölçümlerimden gelmişti. Ama neticede ölçümsüz fizik olmaz. Aynı derecede önemli olan bir başka şey de, hata payı bilinmeden anlamlı ölçümün olmayacağıdır.

Farkında olmadan, sürekli makul miktarlarda bir hata payı olduğunu varsayalım. Bankanız hesabınızda ne kadar para olduğunu bildirdiğinde, yarım kuruştan daha az bir hata payı beklersiniz. İnternette bir giysi satın aldığınızda, bir numaralık beden farkının çok küçük bir kesrinden daha fazla bir fark beklemesiniz. 34 beden pantolondaki sadece yüzde 3'lük bir oynama bile belde tam 2,5 santimlik fark yapar; o da 35 bedene denk düşer ve belinizden sarkar ya da 33 beden olur ve siz de o kadar kiloyu nasıl aldığınıza şaşırırsınız.

Ölçümlerin doğru birimlerle ifade edilmeleri de hayati önem ta-

şır. Sözelimi 125 milyon dolara mal olan on bir yıllık misyonun –Mars İklim Keşif Uydusu– birimlerdeki bir karışıklıktan dolayı sonu felaket olmuştur. Bir mühendis ekibi metrik birim, bir başkası da İngiliz ölçü birimleri kullanmış ve sonuç olarak Eylül 1999'da uzay aracı kararlı bir yörüngeye oturmak yerine Mars'ın atmosferine girmiştir.

Çoğu bilimsanı metrik birimleri kullandığı için ben de bu kitapta genellikle öyle yapacağım. Sıcaklık için de santigrat ya da Kelvin (santigrat artı 273,15) skalalarını kullanacağım.

Fizikte ölçümlerin hayati rolünü anlamam, ölçümlerle doğrulanamayan kuramlara şüpheyle bakmamın sebeplerinden biridir. Sicim kuramını ele alalım, ya da onun cilalanmış kuzeni süpersicim kuramını – "her şeyin kuramı"nı bulma yolunda kuramcılarının en son çabası. Kuramsal fizikçiler –ki sicim kuramıyla uğraşanların arasında çok parlak zekâlıları da var– henüz tek bir deney, sicim kuramının herhangi bir önermesini sınavacak tek bir öngörü bulamadılar. Sicim kuramındaki hiçbir şey deneysel olarak doğrulanamaz – en azından bugüne kadarki durum böyle. Bunun anlamı sicim kuramının hiç öngörü gücünün olmamasıdır, işte bu yüzden Harvard'dan Sheldon Glashow gibi bazı fizikçiler bunun gerçekten fizik olup olmadığını bile sorguluyor.

Bununla birlikte, sicim kuramının parlak zekâlı ve ikna edici savunucuları var. Brian Greene de onlardan biri, kitabı ve PBS programı *Evrenin Zarafeti* (programda benimle de kısaca söyleşi yapıyor) çekici ve güzel. Edward Witten'in, beş farklı sicim kuramını birleştirip uzayın on bir boyutu olduğunu, biz alt düzey varlıkların bunların sadece üçünü gördüğünü ileri süren M-kuramı çılgın bir şey, üzerinde düşünmek de çok ilginç.

Fakat kurambaşını alıp gidince, büyükannem gelir aklıma, annemin annesi, sezgileri güçlü bir bilimsanı gibi görünmesine yol açan bazı harika deyişleri ve huyları olan çok müthiş bir kadındı. Sözelimi, eskiden bana ayaktayken yatarkenkinden daha kısa olursun derdi. Öğrencilerime derste bunu göstermeye bayılırım. İlk ders günü, onlara anneannemin şerefine bu acayip fikri teste tabii tutacağımı ilan ederim. Tabii tümünden şaşkına dönerler. Şöyle düşündüklerini tahmin edebiliyorum: "Ayaktayken yatarkenkinden daha kısamı? İmkânsız!"

İnanmama eğilimleri anlaşılabilir. Elbette yatıyorkenki ve ayak-taykenki uzunluklar arasında bir fark varsa çok küçük olmalı. Zaten iki karış olsa fark ederdiniz, değil mi? Sabah yataktan kalkıp diki-lince *afallardınız*, iki karış kısalmışsınız. Fakat fark sadece 0,1 san-timetreyse asla bilmeyebilirsiniz. İşte o yüzden, eğer anneannem haklı idiye, farkın birkaç santimetre olacağını düşünüyordum.

Deneyimi uygulayabilmek için önce ölçümlerimdeki hata payı konusunda onları ikna etmem gerek tabii. O yüzden önce bir alü-minyum çubuğu dikey ölçerek başlarım –150,0 cm gelir– sonra on-lardan, artı eksi, bir santimetrenin onda biri kadarlık bir hata payı-yla ölçmemin muhtemelen mümkün olacağı konusunda onay alırım. O zaman dikey ölçüm $150,0 \pm 0,1$ cm olur. Sonra da çubuğu yatay-ken ölçerim ve $149,9 \pm 0,1$ cm bulurum, bu da dikey ölçüme uyar – ölçümlerin hata payları çerçevesinde.

Alüminyum çubuğu iki konumda da ölçerek ne elde etmiş olu-rum? Çok şey! Bir kere, bu iki ölçüm benim uzunluğu, yaklaşık 0,1 cm (1 mm) hata payıyla ölçebildiğimi gösterir. Fakat en azından bir o kadar önemli olan şey de, öğrencilerime onlarla oyun oynamadığımı kanıtlamak istemem. Örneğin yatay ölçümleirim için özel "ayar çektiğim" bir metre hazırladığımı düşünün – bunu yapmak korkunç ve çok namussuzca bir şey olurdu. Alüminyum çubuğun uzunluğu-nun iki ölçümde de aynı olduğunu göstererek, bilimsel dürüstlüğü-mün şüphe götürmez olduğunu kanıtlamış olurum.

Sonra bir gönüllü isterim, ayaktayken ölçüp rakamı tahtaya ya-zarım: 185,2 cm –artı eksi 0,1 cm tabii, hata payıyla. Sonra masamın üzerindeki ölçme düzeneğime uzanmasına yardımcı olurum (düze-nek devasa bir Ritz Stick'e benziyor, ayakkabıcılardaki tahta ayak ölçme aletine – buradaki fark gönüllünün bütün bedeninin ayağın yerine geçmesi). Rahat olup olmadığı hakkında espriler yapıp bilim uğruna yaptığı fedakârlıktan dolayı onu kutlarım, bu da onu birazcık huzursuz eder. Şapkamın içinden ne mi çıkaracağım? Üçgen tahta bloğu kafasına yavaşça dayarım ve o orada uzanırken rakamı tahta-ya yazarım. Şimdi elimizde iki ölçüm var, ikisinin de hata payı 0,1 cm. Sonuç nedir?

İki ölçüm arasındaki farkın 2,5 cm oluşuna şaşırdınız mı, artı ek-si 0,2 cm tabii ki? Sonuç olarak şunu söyleyeyim ki çocuk yatar va-ziyette en az 2,3 cm daha uzun çıkar. Uzanmakta olan öğrencimin

yanına geri giderim ve ona, uyurken, ayaktaikenkinden kabaca 2,5 cm daha uzun olduğunu söyleyip –burası en güzel kısmı– "Anneannem haklıymış! Her zaman haklıydı!" derim.

Şüphemiz mi var? Anneannem çoğumuzdan daha iyi bir bilimin-sanıymış. Biz ayakta dururken kütleçekimi omurgamızdaki omurlar arasındaki yumuşak dokuyu sıkıştırır, yatar konumdayken de omurgamız genişler. Bildiğiniz bir şeyse bu gayet normal gelebilir, fakat tahmin eder miydiniz? Hatta NASA'daki biliminsanları bile ilk uzay görevlerini planlarken bu etkiyi öngöremediler. Astronotlar uzaydayken giysilerinin sıkıtiğından şikâyetçi oldular. Daha sonra Skylab görevi sırasında yapılan incelemeler, boyları ölçülen altı astronottan altısının da boylarında yüzde 3'lük uzama olduğunu gösterdi –boyunuz 185 cm civarındaysa, uzama 5 cm'den biraz fazla olacak demektir. Artık astronot kıyafetleri bu uzamaya pay bırakacak biçimde yapılıyor.

İyi ölçümlerin neler öğretebildiğini görüyor musunuz? Anneannemin haklı olduğunu ispat ettiğim o aynı sınıfta, bazı çok garip şeyleri ölçerek çok eğleniyorum, hepsi modern bilim ve gökbilimin babası büyük Galileo Galilei'nin bir önermesini test etmek için. Galileo bir zaman kendine şu soruyu sormuş: "Neden en büyük memeliler mevcut boyutlarındalar da çok daha büyük değiller?" Ve sorusunu, memeliler fazla ağır olsaydı kemikleri kırılırdı, diye cevaplamış. Bunu okuyunca haklı olup olmadığını öğrenmek için içimde büyük bir merak uyandı. Sezgiyle bakıldığında cevabı doğru gibiydi, fakat kontrol etmek istiyordum.

Memelilerin femurlarının –kalça kemiklerinin– ağırlıklarının büyük kısmını taşıdığını biliyordum, bunun üzerine farklı memelilerin femur kemiklerinin karşılaştırmalı ölçümlerini yapmaya karar verdim. Galileo haklı idiye, o zaman aşırı ağır bir memeli için femur kemiği o hayvanı taşıyacak kadar güçlü olmayacaktı. Tabii memelinin femurunun gücünün, kemiğin kalınlığına bağlı olması gerektiğinin farkındaydım. Kalın kemikler daha fazla ağırlık taşıyabilir – sezgisel bir şey. Hayvan ne kadar büyükse, kemiklerin de o kadar güçlü olması gerekirdi.

Hayvan büyüdükçe femurun boyu da uzayacaktı tabii ve ben de hayvanlar büyüdükçe femurların ne kadar uzayıp ne kadar kalınlaştığını karşılaştırarak Galileo'nun fikrini test edebileceğimi anladım.

Yaptığım hesaplamalara göre –burada değinmek istemeyeceğim kadar karmaşık (Ek 1'de açıklıyorum)–Galileo haklı idiyse, o zaman memeliler büyüdükçe femurlarının kalınlığının, uzunluklarından daha hızlı artmak zorunda olacağını belirledim. Örneğin yaptığım hesaba göre, bir memelinin başka bir memeliden beş kat daha büyük olması durumunda –böylece femur da beş kat uzun olacaktı– femurunun kalınlığının yaklaşık on bir kat daha büyük olması gerekirdi.

Bunun anlamı, belli bir noktada femurların kalınlıklarının uzunluklarıyla aynı olacağıdır, hatta belki daha da fazla, ki bu da bazı abuk sabuk memeliler yaratırdı. Böyle bir hayvan kesinlikle hayatta kalmaya en uygunlardan biri olmazdı ve bu da, memelilerin büyüklüğü üzerinde azami bir sınır olmasının nedenini açıklardı.

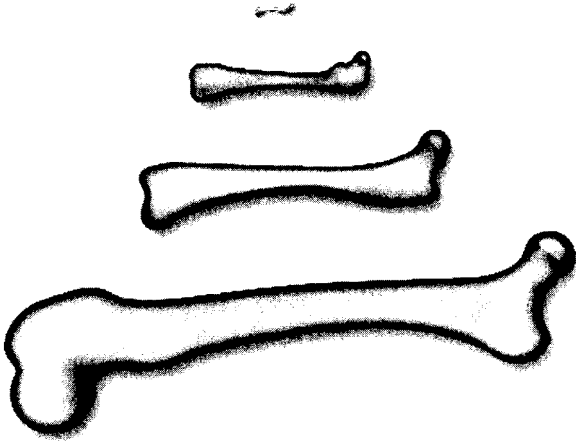
Yani kalınlığın uzunluktan daha hızlı artacağını öngörmüştüm. İşte gerçek eğlence başlıyordu.

Harvard Üniversitesi'ne gittim –orada çok güzel bir kemik koleksiyonu var– ve bir rakunla bir atın femurlarını istedim. Öğrendiğime göre at rakundan yaklaşık dört kat büyüktü, nitekim atın femuru ($42,0 \pm 0,5$ cm) rakunun femurunun ($12,4 \pm 0,3$ cm) yaklaşık üç buçuk katı uzunluktaydı. Buraya kadar her şey güzel. Rakamları formülümün içine yerleştirdim ve atın femurunun rakunun femurundan altı kattan biraz daha fazla kalın olması gerektiğini öngördüm. Kalınlığı ölçtüğümde (rakun için yarım santimetre, at için de 2 santimetre yanılma payıyla) atın kemiğinin beş kat daha kalın olduğu çıktı ortaya, artı eksi yaklaşık yüzde 10. O halde durum Galileo açısından çok iyi görünüyordu. Ne var ki büyük hayvanların yanı sıra küçük hayvanları da içerecek şekilde verileri artırmaya karar verdim.

Tekrar Harvard'a gittim, onlar da bana üç kemik daha verdi, biri antilobun, biri opossumun, biri de farenin. Bunları yan sayfada görebilirsiniz.

Ne kadar harika ve romantik, değil mi? Şekillerin ilerleyişi çok hoş, farenin femurunun ne kadar narin, ne kadar minicik olduğuna bakın. Ufacık tefecik bir fare için ufacık tefecik bir femur. Ne güzel değil mi? Doğal dünyamızın her bir detayına duyduğum hayranlık hiç bitmeyecek.

Peki ya ölçümler? Onlar denkleme nasıl oturdu? Hesaplamaları yapınca şaşkına döndüm, gerçekten şaşkına döndüm. At femuru fare femurundan yaklaşık 40 kat daha uzundu ve hesaplarıma göre



250 kat daha kalın olması gerekiyordu. Fakat sadece 70 kat daha kalındı.

Bunun üzerine kendi kendime, "Neden bir filin femurunu istemedim ki? Meseleyi kökünden çözerdi," dedim. Harvard'a tekrar gittiğimde galiba biraz kızmışlardı, ama yine de seslerini çıkarmadan bir fil femuru verdiler. Eminim artık tek istedikleri benden kurtulmaktı! İnanın o kemiği taşımak zordu; bir metreden uzundu ve bir ton ağırlığındaydı. Ölçümlemlerimi yapmak için sabırsızlanıyordum; bütün gece uyuyamadım.

Ne buldum biliyor musunuz? Farenin femuru $1,1 \pm 0,05$ cm uzunluğunda ve $0,7 \pm 0,1$ mm kalınlığındaydı – gerçekten çok ince. Filin femuru 101 ± 1 cm uzunluğundaydı, fareninkinden yaklaşık 100 kat daha uzun. Peki ya kalınlığı? Onu da 86 ± 4 mm olarak ölçtüm, farenin femurunun çapının kabaca 120 katı. Fakat benim hesaplarıma göre, Galileo haklı idiyse, filin femurunun fareninkinden kabaca 1000 kat daha kalın olması gerekiyordu. Başka bir deyişle, 70 cm civarında bir kalınlığı olmalıydı. Ama gerçek kalınlık yaklaşık 9 cm'ydı. İstemesem de büyük Galileo Galilei'nin yanıldığı sonucuna vardım!

Yıldızlararası Uzayı Ölçmek

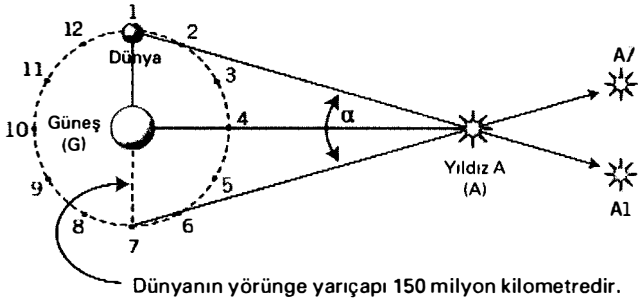
Fiziğin ölçümlerin bela olduğu alanlarından birisi gökbilimdir. Ölçümler ve hata payları gökbilimciler için büyük sorunlardır, özellikle de böyle muazzam mesafelerle uğraştığımız için. Yıldızlar ne kadar uzaktadır? Ya güzel komşumuz Andromeda galaksisi? Peki ya en güçlü teleskoplarla görebildiğimiz bütün o galaksiler? Uzaydaki en uzak nesneleri gördüğümüzde, ne kadar uzağı görüyoruz? Evrenin büyüklüğü nedir?

Bunlar tüm bilimdeki en temel ve derin sorulardan bazılarıdır ve farklı cevaplar evren görüşümüzü tepetaklak etmiştir. Aslında tüm bu mesafe meselesinin harika bir geçmişi var. Gökbilim evriminin izini, yıldız uzaklıklarını hesaplamadaki değişen tekniklerde sürebilirsiniz, ki bunlar da her aşamada ölçümlerin doğruluk derecesine bağlıdır, yani gökbilimcilerin ekipmanı ve yaratıcılığına. On dokuzuncu yüzyılın sonuna kadar gökbilimcilerin bu hesaplamaları tek yapma yolu ıraklık açısı denilen bir şeyi ölçmekti.

Farkında olmasanız bile hepiniz ıraklık açısı fenomenine aşinasınızdır. Nerede oturuyor olursanız olun, etrafınıza bakıp üzerinde belirgin bir şey olan bir duvar bulun –kapı ya da asılı bir resim– veya dışardaysanız, büyük bir ağaç gibi manzarada belirgin bir şey. Şimdi elinizi tam karşınıza uzatıp bir parmağınızı o nesnenin sağında ya da solunda kalacak gibi kaldırın. Önce sağ gözünüzü kapatın, sonra da sol gözünüzü kapatın. Parmağınızın kapı girişine ya da ağaca göre sağa ya da sola kaydığını göreceksiniz. Şimdi parmağınızı gözlerinize daha yakın tutun ve aynı şeyi tekrar yapın. Parmağınız daha fazla hareket edecektir. Bu etki *müthiş*! Buna ıraklık açısı denir.

Bu durum bir nesneyi izlerken farklı görüş hatlarına kayılmasından kaynaklanır – buradaki örnekte sol gözünüzün görüş hattından sağ gözünüzün görüş hattına (gözleriniz birbirinden yaklaşık 6,5 cm uzaktadır).

Yıldızlara olan mesafeyi belirlemenin dayandığı temel fikir budur. Sadece, gözlerimin yaklaşık 6,5 cm'lik ayrılığının oluşturduğu taban çizgisi yerine, dünyanın yörüngesinin çapını (yaklaşık 300 milyon kilometre) taban çizgisi olarak kullanırız. Dünya güneşin etrafında (çapı yaklaşık 300 milyon kilometre olan bir yörüngede) bir



yılda dönerken, yakındaki bir yıldız gökyüzündeki daha uzak yıldızlara kıyasla hareket halinde olacaktır. Yıldızın altı ay arayla ölçülmüş iki konumu arasında gökyüzünde oluşan açığı (ıraklık açısını) ölçeriz. Hepsi altı ay aralıklarla yapılmış pek çok ölçüm kaydederseniz, farklı ıraklık açıları bulursunuz. Yukarıdaki şekilde, kolaylık olsun diye dünyanın yörüngesindeki düzlemde (yörünge düzlemi ya da ekliptik düzlem) bulunan bir yıldızı seçtim. Fakat burada tarif edildiği haliyle ıraklık açısı ölçümlerinin ilkesi bütün yıldızlar için geçerlidir – sadece ekliptik düzlemdekiler için değil.

Diyelim ki yıldız, dünya güneşin yörüngesinde 1. konumdayken gözlemliyorsunuz. O zaman yıldızın arka planda (çok uzaklarda) A1 yönünde izdüşümünü görürsünüz. Aynı yıldız altı ay sonra (7. konumdan) gözlemlerseniz, yıldız A7 yönünde görürsünüz. α ile gösterilmiş açı mümkün olan en büyük ıraklık açısıdır. Benzer ölçümleri 2. ile 8. konumlarda, 3. ile 9. konumlarda ve 4. ile 10. konumlarda yaparsanız, daima α 'dan daha küçük ıraklık açıları bulursunuz. 4. ile 10. konumlardan yapılacak kuramsal gözlemlerde (kuramsal çünkü güneş engel olacağından yıldız 10. konumdan gözlemlenemez), ıraklık açısı sıfır bile olabilir. Şimdi de 1A7 noktalarıyla oluşan üçgene bakın. 1-7 mesafesinin 300 milyon km olduğunu biliyoruz, α açısını da biliyoruz. O halde artık SA mesafesini (lise matematiğiyle) hesaplayabiliriz.

Farklı altı aylık aralıklarla alınmış ıraklık açıları farklılık gösterse de, gökbilimciler bir yıldızın tek bir ıraklık açısı varmış gibi konuşur. Aslında kastettikleri, en büyük ıraklık açısının yarısıdır. En büyük ıraklık açısı 2,00 yay saniye olsaydı, ıraklık açısı 1,00 yay sa-

niye olurdu ve yıldızın uzaklığı da 3,26 ışık yılı çıkardı (ne var ki bize bu kadar yakın yıldız yok). Iraklık açısı ne kadar küçükse mesafe o kadar büyüktür. Iraklık açısı 0,10 yay saniyeyse, uzaklığı 32,6 ışık yılıdır. Güneşe en yakın yıldız Proxima Centauri'dir. Iraklık açısı 0,76 yay saniyedir, dolayısıyla uzaklığı yaklaşık 4,3 ışık yılıdır.

Gökbilimcilerin ölçmek zorunda oldukları yıldız konumlarındaki değişikliklerin ne kadar küçük olduğunu anlamak için bir yay saniyenin ne kadar küçük olduğunu anlamamız gerekir. Gece göğünde zenitten (tam tepenizin hizasındaki nokta) geçecek gibi dünyayı çepeçevre saran devasa bir çember düşünün. Bu çember tabii ki 360 derecedir. Buradaki her bir derece 60 yay dakikaya bölünmüştür ve her bir "yay dakika" da "yay saniye"ye bölünmüştür. Dolayısıyla bu çemberin tamamında 1.296.000 yay saniye vardır. Bir yay saniyenin son derece küçük olduğunu buradan anlayabilirsiniz.

Ne kadar küçük olduğunu gözünüzde canlandırmak için işte bir yol daha: On sentlik madeni parayı kendinizden 3,5 kilometre uzağa koyarsanız, paranın çapı bir yay saniye olur. Her astronot ayın yaklaşık yarım derece genişliğinde olduğunu bilir, yani 30 yay dakika. Buna ayın açısal büyüklüğü denir. Ayı 1800 eşit ince dilime bölebilseniz, her bir dilim bir yay saniye genişliğinde olurdu.

Gökbilimcilerin mesafeleri belirlemek için ölçmeleri gereken iraklık açıları çok küçük olduğundan, ölçümlerdeki hata paylarının onlar için ne kadar önemli olduğunu şimdi anlayabilirsiniz.

Ekipmanlardaki gelişme gökbilimcilere gittikçe daha doğru ölçüm yapma imkânı sundukça, yıldız mesafeleri tahminleri değişti, bazen oldukça ciddi ölçüde. On dokuzuncu yüzyıl başlarında Thomas Henderson göklerdeki en parlak yıldız olan Akyıldız'ın (Sirius) iraklık açısını, yaklaşık çeyrek yay saniyelik bir hata payıyla 0,23 yay saniye olarak ölçmüştü. Başka bir deyişle, yaklaşık yarım yay saniyelik iraklık açısının üst sınırını ölçmüştü, bu da yıldızın bize 6,5 ışık yılından daha yakın olamayacağı anlamına geliyordu. 1839'da bu çok önemli bir sonuçtu. Fakat yarım yüzyıl sonra David Gill, Akyıldız'ın iraklık açısını artı eksi 0,010 yay saniye hata payıyla 0,370 yay saniye olarak ölçtü. Gill'in ölçümleri Henderson'inkiyle uyumluydu, fakat hata payı yirmi beş kat daha küçük olduğundan ondan epey üstündü. $0,370 \pm 0,010$ yay saniyelik bir iraklık açısın-

da, Akyıldız'a olan uzaklık $8,81 \pm 0,23$ ışık yılı olur, ki bu da 6,5 ışık yılından biraz fazladır!

1990'larda, açılımı Yüksek Hassasiyette İraklık Açısı Toplama Uydusu (High Precision Parallax Collecting Satellite) olan Hipparcos (galiba eski çağlarda yaşamış ünlü Yunan gökbilimcinin ismine uyuncaya kadar isimle oynamışlar), sadece bir yay saniyenin yaklaşık binde biri yanılma payıyla yüz binden fazla yıldızın iraklık açısını (dolayısıyla mesafesini) ölçmüştür. İnanılmaz değil mi? On sentlik madeni paranın bir yay saniyeyi göstermesi için ne kadar uzakta olması gerektiğini hatırlıyor musunuz? Bir yay saniyenin binde birini göstermesi için bir gözlemciden 3500 kilometre uzakta olması gerekir.

Hipparcos'un iraklık açısını ölçtüğü yıldızlardan bir tanesi tabii ki Akyıldız'dı, sonucu da $0,37921 \pm 0,00158$ yay saniye. Bu da Akyıldız'ın mesafesini $8,601 \pm 0,036$ ışık yılı olarak verir.

Bugüne kadar yapılmış en doğru iraklık açısı ölçümü 1995-1998 yılları arasında radyo gökbilimcileri tarafından Sco-1 adlı çok, çok özel bir yıldız için yapılmıştır. Bununla ilgili her şeyi 10. Bölüm'de anlatacağım. $0,00036 \pm 0,00004$ yay saniyelik bir iraklık açısı ölçtüler, bu da $9,1 \pm 0,9$ bin ışık yılı mesafeye karşılık geliyor.

Ekipmanımızın sınırlı hassasiyetinden dolayı gökbilimde uğraşmamız gereken hata paylarının ve elverişli gözlem zamanlarının kısıtlılığının yanı sıra, bir de gökbilimcilerin kâbusları vardır: "bilinmeyen-gizli" belirsizlikler. Belki bir şeyi atladığınız için ya da aletleriniz kötü ayarlandığı için farkında bile olmadığınız bir hata yapıyorsunuz. Diyelim ki banyodaki tartınız 5 kiloyu sıfır gösterecek gibi ayarlanmış ve satın aldığınız günden beri hep öyleymiş. Hatayı ancak doktora gidince –az kalsın kalp krizi geçirecekken– anlıyorsunuz. Buna sistematik hata diyoruz ve ödümüzü patlatıyor. Eski savunma bakanı Donald Rumsfeld'in hayranlarından değilim, fakat 2002'deki bir basın açıklamasında "Bilmediğimiz bazı şeyler olduğunu biliyoruz. Fakat bir de bilinmeyen bilinmeyenler var – bilmediğimizi bilmediklerimiz," dediğinde az da olsa bir sempati duydum değil.

Ekipmanımızın sınırlarının ortaya koyduğu güçlükler, çok parlak ama çoğunlukla hak ettiği değeri görmemiş kadın gökbilimci Henrietta Swan Leavitt'in başarısını daha da şaşırtıcı kılıyor. Leavitt

yıldızların uzaklığını ölçmede devasa bir sıçrayış sağlayan çalışmasına başladığında, 1908'de Harvard Gözlemevi'nde bir alt kadro pozisyonunda çalışıyordu.

Bilim tarihinde bu tür şeyler o kadar sık olmuştur ki bu sistematik bir hata olarak görülmelidir: kadın bilimcilerin yeteneğini, beyin gücünü ve katkılarını hesaba almamak.*

Leavitt işi gereği Küçük Macellan Bulutu'ndan (Small Magellanic Cloud, SMC) binlerce fotoğraf plakasını incelerken, belli bir yıldız sınıfında (Sefeid değişken yıldızları diye bilinen büyük titreşen yıldızlar) yıldızın optik parlaklığı ile periyodu (bir tam titreşim için gereken süre) arasında bir ilişki olduğunu fark etti. Periyodu ne kadar uzunsa, yıldızın parlaklığının o kadar çok olduğunu keşfetti. Görüleceği gibi, bu keşif, yıldız kümelerine ve galaksilere olan uzaklığı doğru ölçmenin kapılarını açmıştır.

Bu keşfin değerini anlamak için, önce parlaklıkla (*brightness*), aydınlatma gücü (*luminosity*) arasındaki farkı anlamamız gerekir. Optik parlaklık, yeryüzünde aldığımız ışığın saniyede metrekaresine düşen enerji miktarıdır. Optik teleskoplarla ölçülür. Optik aydınlatma gücüyse, bir gökbilim nesnesinin saniyede yaydığı enerji miktarıdır.

Sözelimi Venüs, genellikle gece tüm gökyüzündeki en parlak nesnedir, gökyüzündeki en parlak yıldız olan Akyıldız'dan bile daha parlaktır. Venüs dünyaya çok yakındır; bu yüzden çok parlaktır, fakat neredeyse kendinden gelen hiçbir parlaklığı yoktur. Büyüklüğü güneşimizin iki katı, aydınlatma gücüyse yaklaşık yirmi beş katı olan güçlü nükleer fırın Akyıldız'a göre daha az enerji yayar. Bir nesnenin aydınlatma gücünü bilmek gökbilimcilere onun hakkında çok şey söyler, fakat aydınlatma gücünün zorluğu, onu ölçmenin iyi bir yolunun olmamasıdır. Parlaklığı ölçerseniz çünkü görebildiğiniz bir şeydir; aydınlatma gücünü ölçemezsiniz. Aydınlatma gücünü ölçmek için hem yıldızın parlaklığını hem de uzaklığını bilmeniz gerekir.

* Bu, nükleer fisyonun keşfedilmesine yardımcı olan Lise Meitner'in, DNA'nın yapısının keşfedilmesine yardımcı olan Rosalind Franklin'in, atarcaları keşfeden ve danışmanı Antony Hewish'e "atarcaların keşfindeki tartışılmaz rolünden" dolayı verilen 1974 Nobel Ödülü'ne ortak olması gereken Jocelyn Bell'in başına geldi.

1913'te Ejnar Hertzsprung, 1918'de de Harlow Shapley, istatistiksel ıraklık açısı adı verilen bir teknik kullanarak Leavitt'in parlaklık değerlerini aydınlatma gücüne dönüştürmeyi başardılar. SMC'deki periyodu belli bir Sefeid'in aydınlatma gücünün, başka bir yerdeki Sefeid'inkiyle aynı olduğunu varsayarak, bütün Sefeidler için (SMC dışında olanlar da dahil) aydınlatma gücü bağıntılarını ölçmenin bir yolunu elde ettiler. Bu yöntemin ayrıntılarına girecek değilim, zira epey teknik bir konu; burada anlaşılması gereken önemli nokta, aydınlatma gücü-periyot bağıntısının hesaplanmasının mesafe ölçümlerinde bir kilometre taşı olduğudur. Bir yıldızın aydınlatma gücünü ve parlaklığını bilerseniz, uzaklığını hesaplayabilirsiniz.

Aydınlatma gücündeki skalanın çok geniş olduğunu da belirtiyim bu arada. Üç günlük periyodu olan bir Sefeid, güneşin aydınlatma gücünün yaklaşık bin katına sahiptir. Periyodu otuz güneş, aydınlatma gücü güneşinkinin yaklaşık on üç bin katıdır.

1923'te büyük gökbilimci Edwin Hubble, Andromeda galaksisinde (M31 diye de bilinir) Sefeidler buldu, bunlardan galaksinin uzaklığının yaklaşık 1 milyon ışık yılı olduğunu hesapladı, pek çok gökbilimci için hakikaten şok edici bir sonuç. Shapley dahil pek çoğu kendi Samanyolu'muzun, M31 de dahil bütün evreni içine aldığını ileri sürmüştü; Hubble ise Andromeda'nın bizden neredeyse aklın almayacağı kadar uzakta olduğunu gösterdi. Ama durun – Andromeda galaksisinin uzaklığına google'da bakarsanız 2,5 milyon ışık yılı mesafede olduğunu bulursunuz.

Bu, bilinmeyen bilinmezler durumuydu. Bütün dehasına rağmen Hubble sistematik bir hata yapmıştı. Hesaplamalarını, daha sonra 2. tip Sefeidler olarak adlandırılan yıldızların bilinen aydınlatma gücüne dayandırmıştı, ama aslında gözlemlediği şey, gördüğünü sandığından *dört kat* daha fazla aydınlatma gücüne sahip bir tür Sefeid değişkeniydi (bunlara daha sonra 1. tip Sefeidler adı verildi). Gökbilimciler aradaki farkı ancak 1950'lerde fark ettiler, bir gecede son otuz yılın mesafe ölçümlerinin 2 kat farkla yanlış olduğunu anladılar – bilinen evrenin büyüklüğünü *ikiye katlayan* büyük bir sistematik hata.

2004'te gökbilimciler yine Sefeid değişkeni yöntemini kullanarak Andromeda galaksisinin uzaklığını $2,51 \pm 0,13$ milyon ışık yılı olarak ölçtüler. 2005'te başka bir grup, örten ikili yıldız sistemi (*ec-*

lipsing binary stars) yöntemini kullanarak $2,52 \pm 0,14$ milyon ışık yılı değerini elde ettiler. Bu iki ölçüm birbiriyle mükemmel uyum içinde. Yine de hata payı yaklaşık 140.000 ışık yılı (yaklaşık 13×10^{17} kilometre). Ve bu galaksi, gökbilim standartlarına göre kapı komşumuz sayılır. Pek çok başka galaksinin uzaklıklarıyla ilgili hatta paylarını varın siz hesap edin.

Gökbilimcilerin neden daima standart mum dedikleri şeylerin –aydınlatma güçleri bilinen nesneler– peşinde olduğunu şimdi daha iyi anlayabilirsiniz. Bunlar kozmosa güvenilir mezuralar oluşturmak için bir dizi yaratıcı yolla mesafeleri tahmin etmemizi sağlar. Kozmik mesafe merdiveni dediğimiz şeyin oluşumunda hayati bir rol oynamışlardır.

Iraklık açısını bu merdivenin ilk basamağındaki mesafeleri ölçmek için kullanırız. Hipparcos'un inanılmaz derecede doğru iraklık açısı ölçümleri sayesinde, bu şekilde birkaç bin ışık yılına kadar olan mesafelerde bulunan nesnelerin uzaklıklarını büyük bir hassasiyetle ölçebiliriz. Bir sonraki basamakta Sefeidler vardır, yüz milyon ışık yılına kadar olan mesafelerde bulunan nesnelerin uzaklıklarını iyi tahmin etmememizi sağlarlar. Merdivenin sonraki basamakları için gökbilimciler, burada değinilmeyecek kadar teknik olan bir sürü egzotik ve karmaşık yöntem kullanırlar, ki bunların pek çoğu standart muma dayanır.

Daha ilerileri ölçmeyi istedikçe, mesafe ölçümleri gitgide daha çetrefil bir hal alır. Bunun sebebi kısmen 1925'te Edwin Hubble'ın, evrendeki bütün galaksilerin birbirlerinden uzaklaştığını ortaya koyan çok önemli keşfidir. Tüm gökbilimdeki, belki geçtiğimiz yüzyılın tüm bilimindeki en sarsıcı ve mühim keşiflerden biri olan Hubble'ın keşfine ancak Darwin'in doğal seçim yoluyla evrimi keşfi rakip olabilir.

Hubble galaksilerin yaydığı ışığın, tayfın daha az enerjili ucuna, dalga boylarının daha uzun olduğu "kırmızı" uca doğru belirgin bir kayma gösterdiğini gördü. Buna kızıla kayma denir. Kızıla kayma ne kadar büyükse, galaksinin bizden uzaklaşması o kadar hızlıdır. Bu etkinin ses versiyonunu yeryüzünde Doppler etkisi olarak biliriz; bir ambulansın bize doğru mu geldiğini yoksa bizden öteye mi gittiğini nasıl anladığımızı açıklar, çünkü ambulans hızla giderken notaları pestir ve bize doğru hızla gelirken de tizdir. (Doppler etkisi-

ni daha ayrıntılı olarak 13. Bölüm'de ele alacağım.)

Hubble kıızıla kaymalarını ve mesafelerini ölçebildiği bütün galaksilerde, bu nesneler bizden ne kadar uzaktaysa, bizden uzaklaşma hızlarının da o kadar arttığını keşfetti. Demek ki evren genişliyordu. Ne olağanüstü bir keşif! Her galaksi diğer tüm galaksilerden hızla uzaklaşıyordu.

Bu, galaksiler milyarlarca ışık yılı uzaktayken mesafe kavramında büyük bir kafa karışıklığına sebep olabilir. Işığın (örneğin 13 milyar yıl önce) yayıldığı zamanki mesafeyi mi kastediyoruz, yoksa şu an olduğunu sandığımız mesafeyi mi – çünkü nesne o 13 milyar yıl içinde bizden uzaklığını önemli ölçüde artırmıştır. Bir gökbilimci bu mesafenin yaklaşık 13 milyar ışık yılı olduğunu bildirebilir, buna ışığın yolculuk süresi uzaklığı denir; başka bir gökbilimci de aynı nesne için 29 milyar ışık yılı mesafe bildirebilir, buna da evrenle genişleyen uzaklık (*co-moving distance*) denir.

Hubble'ın bulguları o zamandan beri Hubble yasası olarak bilinirdi: Galaksilerin bizden uzaklaşma hızları, bize olan uzaklıklarıyla doğru orantılıdır. Bir galaksi ne kadar uzaktaysa, o kadar hızlı uzaklaşıp gidiyordur.

Galaksilerin hızlarını ölçmek görece kolaydı: Kıızıla kayma miktarı hemen galaksinin hızına dönüştürülür. Ne var ki doğru mesafeleri elde etmek başka bir meseleydi. En zor kısmı buydu. Hatırlarsanız, Hubble'ın Andromeda bulutsusunun mesafe ölçümünde 2,5 katlık bir hata vardı. Basit sayılabilecek bir denklem buldu: $v = H_0 D$. Burada v galaksinin hızı, D o galaksiden bize olan mesafe, H_0 da bir sabittir, şimdi Hubble sabiti deniyor. Hubble bu sabitin yaklaşık 500 olduğunu hesapladı, birimi de kilometre/saniye megaparsaniyeydi (1 megaparsaniye 3,26 milyon ışık yılıdır). Sabitindeki hata payı yaklaşık yüzde 10'du. Yani bir örnek verirsek, Hubble'a göre bir galaksi 5 megaparsaniye mesafedeyse, bize göre hızı yaklaşık 2500 kilometre/saniyedir.

Evrenin hızla genişlediği açık. Fakat Hubble'ın keşfinin ortaya çıkardığı şey sadece bu değildi. Hubble sabitinin değerini gerçekten bilerseniz, o zaman büyük patlamadan bu yana geçen zamanı, yani evrenin yaşını hesaplamak için zamanı geri çevirebilirdiniz. Hubble'ın kendisi evrenin 2 milyar yaşında olduğunu hesaplamıştı. Bu hesap yerbilimcilerin 3 milyar yılın üstünde ölçtükleri dünyanın ya-

şıyla ters düşüyordu. Bu Hubble'ın canını fena sıktı, haklı olarak. Tabii birtakım sistematik hatalar yapmakta olduğunun farkında değildi. Bazı durumlarda farklı Sefeid türlerini karıştırmakla kalmıyor, içinde yıldızların olduğu gaz bulutlarını çok uzak galaksilerdeki parlak yıldızlar sanıyordu.

Yıldız uzaklıklarını ölçmedeki seksen yıllık gelişmeye bakmanın bir yolu, bizatihi Hubble sabitinin tarihine bakmaktır. Gökbilimciler neredeyse yüz yıldır Hubble sabitinin değerini tespit etmeye çaballıyor. Bunun sonucunda sabit sadece yedi kat azalmakla kalmadı –ki bu evrenin boyutunu muazzam biçimde artırıyordu– evrenin yaşını da değiştirdi: Hubble'ın başlangıçta bulduğu 2 milyar yıldan, şimdiki tahminimiz olan yaklaşık 14 milyar yıla – aslında $13,75 \pm 0,11$ milyar yıl. Artık kısmen, Hubble'ın adını taşıyan o muhteşem yörünge teleskobuyla yapılan gözlemlere dayanarak, Hubble sabitinin $70,4 \pm 1,4$ kilometre/saniye megaparsaniye olduğunda fikir birliğine vardık. Hata payı sadece yüzde 2 – inanılmaz bir şey!

Bir düşünün: 1838'de başlayan ıraklık açısı ölçümleri, gözlemlenebilen evrenin milyarlarca ışık yılı ötedeki kıyısına ulaşmak için gerekli alet ve matematik araçlarının gelişimine temel oluşturdu.

Bunun gibi gizemleri çözmede kaydettiğimiz bütün o hatırı sayılır ilerlemelere rağmen geriye kalan pek çok gizem daha var tabii. Evrendeki karanlık madde ve karanlık enerji oranını ölçebiliyoruz, fakat bunların ne olduğu hakkında hiçbir fikrimiz yok. Evrenin yaşını biliyoruz, fakat hâlâ ne zaman ve nasıl sona ereceğini ya da sona erip ermeyeceğini merak ediyoruz. Kütleçekim gücünü, elektromanyetizmayı, zayıf ve güçlü nükleer kuvvetlerin hassas ölçümlerini yapabiliyoruz, fakat bunların bir gün tek bir birleşik kuramda toplanıp toplanmayacağını hiç bilmiyoruz. Kendi galaksimizde ya da başka birinde düşünen başka canlıların olup olmadığını da bilmiyoruz. Yani daha gidecek çok yolumuz var. Fakat asıl harika olan, fizik araçlarının bu kadar çok soruyu cevaplamış olması, hem de fevkalade yüksek doğruluk derecesinde.

Hareket Halindeki Cisimler

İşte denemesi eğlenceli bir şey. Bir banyo tartısı üzerine çıkın – doktorunuzun muayenehanesindeki o havalı şeylerden birine değil, üzerine çıktığınızda çalışan o dijital cam şeyler de olmaz, şu bildiğimiz banyo tartısına çıkın. Ayakkabılarınızı çıkarmasanız da olur (kimseyi etkilemeniz gerekmiyor), gördüğünüz sayının da önemi yok ya da sonucun hoşunuza gidip gitmemesinin. Şimdi, çabucak ayakuçlarınızda yükselin; sonra kendinizi orada öyle tutun. Tartının biraz delirdiğini göreceksiniz. Burada olup bitenleri net olarak görebilmek için bunu defalarca tekrarlamanız gerekebilir çünkü her şey çok çabuk olup bitiyor.

Önce ibre yukarı çıkıyor, değil mi? Sonra çok aşağılara iniyor, sonra da siz hareket etmeden önceki yere, ilk ağırlığınıza dönüyor. Fakat elinizdeki tartıya göre ibre (ya da numaralı disk) sabit hale gelene kadar hâlâ biraz salınabilir. Sonra topuklarınızı aşağı indirirken, özellikle çabuk yaptığınızda, ibre önce aşağı iner, derken yukarı çıkıp ağırlığınızı da geçer gider, ardından bilmek istediğiniz, belki de istemediğiniz ağırlığınızın üzerinde durur. Peki neler oldu burada? Ne de olsa topuklarınızı aşağı indirseniz de, ayakuçlarınızda yükselseniz de kilonuz aynıdır, değil mi? Yoksa değil midir?

Bunu anlamak için, ister inanın ister inanmayın, Sir Isaac Newton'a ihtiyacımız var, benim bütün zamanların en büyük fizikçisi adayım. Meslektaşlarımdan bazıları bana katılmıyor, ne de olsa Albert Einstein da güçlü bir aday, fakat kimse en tepedeki iki fizikçinin Einstein ve Newton olup olmadığını sorgulamıyor. Ben oyumu neden Newton'a veriyorum? Çünkü onun keşifleri çok temel ve çeşitliydi. Işığın doğasını inceledi ve bir renk kuramı geliştirdi. Geze-

genlerin hareketlerini incelemek için ilk aynalı teleskobu yaptı, ki bu da onun zamanındaki mercekli teleskoba göre büyük bir ilerlemeydi, hatta bugün bile neredeyse bütün önemli teleskoplar onun tasarımıdaki temel ilkeleri takip eder. Akışkanların hareketinin özelliklerini inceleyerek fiziğin ana dallarından birinde öncülük etti ve ses hızını hesaplamayı da başardı (sadece yaklaşık yüzde 15'lik bir sapması vardı). Hatta Newton matematikte koskoca yeni bir dal icat etti: yüksek matematik. Neyse ki Newton yasaları olarak bilineğelen en ustalıkli eserini kavramak için yüksek matematiğe başvurmamız gerekmiyor. Umarım bu bölümde bu basit görünümlü yasaların ne kadar geniş kapsamlı olduğunu gösterebilirim.

Newton'ın Üç Hareket Yasası

İlk yasa hareketsiz olan bir cismin bu hareketsiz olma durumunu koruyacağını ve hareket halindeki bir cismin de hareketini aynı yönde ve aynı hızda sürdüreceğini ileri sürer – tabii iki durumda da bir kuvvetin etkisi altında değilse. Ya da Newton'ın kendi ifadesiyle: "Dışarıdan uygulanan kuvvetler tarafından değiştirmeye zorlanmadıkça, hareketsiz bir cisim bu hareketsizlik durumunu, sabit doğrusal hareket halindeki bir cisim de bu durumunu korur." Bu eylemsizlik yasasıdır.

Eylemsizlik kavramı bize yabancı değil, fakat biraz üzerinde düşünürseniz, aslında insanın sezgilerine ne kadar ters olduğunu anlarsınız. Şimdi bu yasayı verili kabul ediyoruz, oysa gündelik hayatta karşılaştığımız durumlara apaçık ters. Ne de olsa hareket eden şeyler nadiren düz bir hatta hareket eder. Ayrıca kesinlikle süresiz hareket edip gitmez. Belli bir noktada durmalarını bekleriz. Hiçbir golfçü eylemsizlik yasasını bulamazdı, pata vuruşlarının çok azında top doğru bir hat üzerinde gider, çoğu da delikten önce durur. O zaman olduğu kadar şimdi de insan sezgisine uyan şey tam tersi bir fikirdir – yani cisimlerin doğal olarak durmaya eğilimli olması. İşte bu yüzden bu fikir, Newton'ın çığır açan buluşuna kadar Batı dünyasının bu meselelere bakışına binlerce yıl hâkim olmuştur.

Newton bir golf topunun genellikle deliğe gidmeden durmasını sürtünme kuvvetinin yavaşlatmasına ve ayın uzaya fırlayıp gitme-

den dünyanın etrafında dönüp durmasını da kütleçekim kuvvetinin onu yörüngesinde tutmasına bağlayarak nesnelerin hareketine ilişkin tepetaklak anlayışımızı tekrar doğru yerine oturtmuştur.

Eylemsizlik gerçeğini daha sezgisel olarak kavramak için, buz pateni yaparken pistin sonunda dönüşün ne kadar zor olabildiğini bir düşünün – bedeniniz düz gitmeye devam etmek ister, siz de, kollarınızı çılgın gibi sağa sola savurmadan ya da duvara girmeden o istikametten çıkmak için patenlerinize uygun açıyla ne kadar güç uygulamanız gerektiğini öğrenmek zorundasınızdır. Ya da kayakçıysanız, hızla yolunuza çıkan başka bir kayakçıya çarpmamak için çabucak istikamet değiştirmenizin ne kadar zor olabildiğini düşünün. Bu durumlarda eylemsizliği genelde olduğundan çok daha fazla fark etmemizin sebebi, iki durumda da bizi yavaşlatıp hareketimizi değiştirmemize yardımcı olacak sürtünmenin çok az olmasıdır. Golf pistinin buzdan yapıldığını gözünüzde bir canlandırın; o zaman golf topunun nasıl dur durak demeden gitmek isteyeceğini gayet iyi anlarsınız.

Bunun ne kadar devrim yaratan nitelikte bir idrak olduğunu düşünsenize... Sadece eski anlayışı baş aşağı etmekle kalmadı, sürekli bize etki eden ama görünmeyen bir sürü kuvvetin keşfine yolu açtı – sürtünme kuvveti, kütleçekimi, manyetik kuvvet ve elektrik kuvveti gibi. Katkısı o kadar önemliydi ki, fizikte kuvvet birimine newton dendi. Fakat Newton sadece bizim bu gizli kuvvetleri "görmemizi" sağlamakla kalmayıp, bunları nasılölçeceğimizi de gösterdi.

İkinci yasayla kuvvetlerin ölçümü için son derece basit ama güçlü bir yol sundu. Bazılarının tüm fizikteki en önemli denklem olarak nitelendirdiği ikinci yasa şu ünlü $F = ma$ denklemdir. Sözle ifade edersek: Bir nesne üzerindeki *net* kuvvet F , nesnenin kütlesi m 'nin, nesnenin *net* ivmesi a 'yla çarpımına eşittir.

Gündelik hayatımızda bu formülün ne kadar çok işe yaradığını görmek için röntgen (X ışını) cihazını ele alalım. X ışınları için tam doğru enerji aralığının nasıl elde edileceğini bulmak hayati öneme sahiptir. Şimdi Newton'ın denkleminin bize bunu nasıl sağladığına bakalım.

Fizikteki ana bulgulardan biri –buna daha sonra yine değineceğiz– elektrik yüklü bir parçacığın (mesela bir elektron, proton ya da iyonun) bir elektrik alanına yerleştirilmesi durumunda bir kuvvetle

karşılaşacağıdır. Parçacığın yükünü ve elektrik alanının gücünü bilirsek, o parçacığa etki eden elektrik kuvvetini hesaplayabiliriz. Öte yandan, kuvveti bildiğimiz zaman da Newton'ın ikinci yasasını kullanarak parçacığın ivmesini hesaplayabiliriz.*

Bir röntgen cihazında, elektronlar hızlandırılarak X ışını tüpü içindeki bir hedefe çarparlar. Elektronların hedefe çarptıkları hız, elde edilen X ışınlarının enerji aralığını belirler. Elektrik alanının gücünü değiştirerek elektronların ivmesini değiştirebiliriz. Dolayısıyla elektronların hedefe çarptığı hız, istenilen X ışını enerji aralığını seçmek için ayarlanabilir.

Böyle hesapların yapılmasını kolaylaştırmak için fizikçiler kuvvet birimi olarak newton'ı kullanır – 1 newton, 1 kilogramlık bir kütleyi saniyede 1 metre/saniye hızlandıran kuvvettir. Neden "saniyede bir metre/saniye" dedik? Çünkü ivme varken hız sürekli değişir; başka bir deyişle, hız değişimi ilk saniyeden sonra durmaz. İvme sabitse, o zaman hız her saniye aynı miktarda değişir.

Bunu daha net görebilmek için Manhattan'daki yüksek bir bina-dan bırakılan bir bowling topu örneğini düşünelim – mesela Empire State Binası'nın gözlem güvertesinden. Yeryüzüne bırakılan nesnelerin ivmelerinin yaklaşık saniyede 9,8 metre/saniye olduğu biliniyor; buna kütleçekim ivmesi denir ve fizikte g ile gösterilir. (Kolaylık olsun diye şimdilik hava direncini gözardı ediyorum; daha sonra söz edeceğim.) İlk saniyenin sonunda topun hızı 9,8 metre/saniye-dir. İkinci saniyenin sonunda bir 9,8 metre/saniyelik daha hız kazanacaktır, böylece 19,6 metre/saniye hızla hareket edecektir. Üçüncü saniyenin sonunda da 29,4 metre/saniyeyle yol alacaktır. Topun yere çarpması yaklaşık 8 saniye alır. O zamanki hızı 8 kere 9,8 yani yaklaşık 78 metre/saniyedir (yaklaşık 280 kilometre/saat).

Peki, Empire State Binası'nın tepesinden aşağı bir sentlik madeni para attığınızda aşağıdaki birini öldüreceği hep söylenip durur, buna ne dersiniz? Yine hava direncinin rolünü saymayacağım, ama bu durumda etkisinin önemli olduğunu da vurgulayayım. Onu hesaba katmasanız da, saatte 280 kilometre hızla çarpan bir sentlik madeni para muhtemelen sizi öldürmeyecektir.

* Kütleçekiminin yüklü parçacığa uyguladığı kuvvetin ihmal edilebilir derecede küçük olduğunu varsaydım.

Aslında fizikte tekrar tekrar karşımıza çıktığından, bu kitapta da tekrar tekrar karşımıza çıkacak bir meseleyi halletmek için burası uygun bir yer: kütleyle ağırlık arasındaki fark. Dikkat ederseniz Newton, denkleminde ağırlığı değil kütleliyi kullandı. Siz bu ikisinin aynı şey olduğunu düşünüyor olabilirsiniz, ama aslında temelden farklı şeylerdir. Ağırlık birimi olarak yaygın şekilde libre ve kilogramı kullanıyoruz, fakat işin aslı, bunlar kütle birimleridir.

Aralarındaki fark gerçekten basit. Kütleniz evrenin neresinde olursanız olun aynıdır. Evet, doğru – ayda, dış uzayda ya da bir asteroidin yüzeyinde. Değişen sizin *ağırlığınız*dır. O halde ağırlık nedir? İşte işler burada biraz çetrefil bir hal alıyor. Ağırlık, kütleçekim kuvvetinin sonucudur. Ağırlık bir kuvvettir: kütle çarpı kütleçekim ivmesidir ($F = mg$). Dolayısıyla ağırlığımız üzerimize etki eden kütleçekiminin gücüne bağlı olarak değişir, astronomların ayda daha hafif olmalarının sebebi de budur. Ayın kütleçekimi yeryüzündekinin yaklaşık altıda biri kadardır, o yüzden aydaki astronomlar dünyadaki kilolarının yaklaşık altıda biri kadar çekerler.

Belli bir kütle için dünyadaki kütleçekim kuvveti, dünyanın neresinde olursanız olun hemen hemen aynıdır. O yüzden, bu iki kategoriye (kütle ve ağırlık) birbiriyle karıştırıyor olmamıza rağmen, "Falanca hanım elli dört kilo", "Filanca bey seksen kilo" gibi ifadeler kullanmak sorun olmaz. Bu kitapta kuvvet için (yani ağırlık için) kilo yerine teknik fizik birimleri kullanıp kullanmama konusunda uzun uzadıya düşündüm ve sonunda fazla kafa karıştıracığından dolayı vazgeçtim – hiç kimse, kütlesi 80 kilogram olan bir fizikçi bile, "Ben yedi yüz seksen dört newton geliyorum," demez ($80 \times 9,8 = 784$). Onun yerine sizden aradaki farkı aklınızda tutmanızı isteyeceğim; ki kısa bir süre sonra buna geri döneceğiz, ayakucumuzda yükseldiğimizde tartının neden sapıttığı gizemine döndüğümüz zaman.

Kütleçekim ivmesinin fiilen dünyanın her yerinde aynı olması, muhtemelen duymuş olduğunuz bir gizemle ilgilidir: Farklı kütlelerdeki nesneler aynı hızla düşerler. Galileo hakkında ilk çıkan biyografilerden birinde ilk defa anlatılan ünlü bir hikâyeye göre, Galileo eğri Pisa Kulesi'nin tepesinden bir top güllesiyle daha küçük bir tahta topu aynı anda aşağıya bıraktığı bir deney yapmış. Niyeti, rivayete göre, Aristoteles'e atfedilen, ağır nesnelerin hafif olanlardan daha hızlı düşeceği iddiasını çürütmekmiş. Bu söylentiye uzun

süre kuşkuyla bakıldı ve artık bugün Galileo'nun asla böyle bir deney yapmamış olduğu gayet açık görünüyor, ama yine de iyi bir hikâye – o kadar iyi bir hikâye ki, Apollo 15'in komutanı David Scott, farklı kütlelere sahip nesnelerin vakum ortamında aynı hızla düşüp düşmeyeceklerini görmek için bir çekiç ile bir şahin tüyünü aynı anda ayın yüzeyine bıraktı. Harika bir video, buradan ulaşabilirsiniz: [video.google.com/videoplay?docid=6926891572259784994#](https://www.youtube.com/watch?v=6926891572259784994#).

Bu videoda bana çarpıcı gelen şey, ikisinin de nasıl *yavaş* düştüğü. Daha önce düşünmeden ikisinin de hızlı düşmesini bekleyebilirsiniz, en azından çekicin kesin öyle. Fakat ikisi de yavaş düşüyor çünkü aydaki kütleçekim ivmesi dünyadakinden yaklaşık altı kat daha azdır.

Galileo farklı kütlelerdeki iki nesnenin aynı anda yere ineceğini söylerken neden haklıydı? Sebebi kütleçekim ivmesinin bütün nesneler için aynı olmasıdır. $F = ma$ denklemine göre, kütle büyüdükçe kütleçekim kuvveti artar, fakat ivme bütün nesneler için aynıdır. O yüzden yere aynı hızla ulaşırlar. Tabii büyük kütleli nesnenin enerjisi daha çok olacağından darbe etkisi de daha büyük olur.

Burada şunu kaydedelim ki, bu deney dünyada yapılsaydı tüy ve çekiç aynı anda yere düşmezdi. Bunun sebebi, şu âna kadar hesaba katmadığımız hava direncidir. Hava direnci hareket eden nesnelere karşı gelen bir kuvvettir. Rüzgârın da tüye, çekice olduğundan daha fazla etkisi olacaktır.

Bu da bizi ikinci yasanın önemli bir özelliğine götürür. Yukarıda verildiği gibi denklemdeki *net* kelimesi hayati öneme sahiptir, çünkü doğada bir nesneye neredeyse her zaman birden fazla kuvvet etki eder; hepsinin hesaba katılması gerekir. Bunun anlamı kuvvetlerin toplanması gerektiğidir. Bu kadar basit değil aslında, çünkü kuvvetler vektör dediğimiz şeylerdir, büyüklüklerinin yanı sıra bir de yönleri vardır, yani net kuvveti belirlemek için $2 + 3 = 5$ gibi bir hesap yapamazsınız. 4 kilogramlık bir kütle üzerinde sadece iki kuvvetin etki ettiğini farz edelim; 3 newtonluk bir kuvvet yukarıya, 2 newtonluk bir kuvvet de aşağıya yöneliyor olsun. Bu durumda iki kuvvetin toplamı 1 newton olur, yönü de yukarı doğrudur, Newton'ın ikinci yasasına göre bu nesne saniyede 0,25 metre/saniyelik bir ivmeyle yukarı doğru hızlanacaktır.

İki kuvvetin toplamı sıfır bile olabilir. m kütesine sahip bir nesneyi masanın üzerine koyarsam, Newton'ın ikinci yasasına göre, nesne üzerindeki kütleçekim kuvveti aşağı yönde mg (kütle x kütleçekim ivmesi) newton olur. Nesne hızlandırılmadığı için, üzerindeki net kuvvetin sıfır olması gerekir. Yani yukarı yönde başka bir mg newton kuvvetinin olması şarttır. O da masanın nesneyi itme kuvvetidir. Aşağı yöndeki bir mg kuvveti ile yukarı yöndeki bir mg kuvvetinin toplamı da sıfırlık bir kuvvet eder!

Bu da bizi Newton'ın üçüncü yasasına götürür: "Her etkiye karşı eşit ve zıt bir tepki vardır." Bunun anlamı, iki nesnenin birbiri üzerine uyguladığı kuvvetin daima birbirine eşit ve zıt yönde olduğudur. Ben buna "Etki, eksi tepkiye eşittir" demeyi severim – ya da daha yaygın bilinen haliyle, "Her etkiye karşılık eşit ve ters yönde bir tepki vardır."

Bu yasanın öngördüklerinin bir kısmı sezgiyle anlaşılır: Tüfek, ateş ettikten sonra omzunuza geri teper. Fakat bir de, bir duvarı ittiğinizde, duvarın ters yönde ve tamamen aynı kuvvetle sizi geri ittiğini düşünün. Doğum gününüzdeki çilekli pasta, pasta tabağını aşağı iter, o da onu eşit miktardaki bir kuvvetle yukarı iter. Bu üçüncü yasa ne kadar tuhaf olursa olsun, etrafımız bu yasanın işbaşındaki örnekleriyle doludur.

Hiç yerde yatan bir hortuma bağlı musluğu açıp da hortumun yılan gibi sağa sola kıvrılıp durduğunu, şansınız varsa küçük kardeşinizi de ıslattığını gördünüz mü? Bu neden olur? Çünkü su hortumdan fırlayıp çıkarken, aynı zamanda hortumu geri de iter, bunun sonucunda da hortum dört bir yana kıvrılıp durur. Ya da bir balonu şişirip sonra elinizden bırakınca, balonun odada deli gibi dolandığını da görmüşsünüzdür. Burada olan şey, balonun havayı iterek dışarı atmasıdır, balondan çıkan havanın da balonu geri itmesidir, böylece odanın içinde vın diye dolaşırken, yılan gibi kıvrılan bahçe hortumunun havadaki versiyonunu oluşturur. Bu, jet uçaklarının ve roketlerin dayandığı ilkedен farklı değildir.

Şimdi bu içgörünün ne kadar garip ve derin olduğunu hakikaten anlamak için, Newton yasalarının otuz katlı bir binanın tepesinden aşağı bir elma attığımızda olacağını söylediği şeyi düşünelim. İvmenin g olacağını biliyoruz, saniyede 9,8 metre/saniye. Şimdi, elmanın kütlesi yaklaşık yarım kilogram olsun. İkinci yasayı kullanarak ($F =$

ma) dünyanın elmayı $0,5 \times 9,8 = 4,9$ newtonluk bir kuvvetle çektiğini buluruz. Şu âna kadar her şey yolunda.

Fakat şimdi de üçüncü yasanın gerektirdiği şeyi düşünün: Dünya elmayı $4,9$ newton'luk bir kuvvetle çekiyorsa, o zaman elma da dünyayı $4,9$ 'luk bir kuvvetle çekecektir. Böylece, elma dünyaya düşerken, dünya da elmaya düşecektir. Bu size gülünç geliyor, değil mi? Ama bekleyin. Dünyanın kütlesi elmanınkinden çok, çok daha büyük olduğundan rakamlar tuhaflaşır. Dünyanın kütesinin yaklaşık 6×10^{24} kilogram olduğunu bildiğimizden, elmaya doğru ne kadar düştüğünü hesaplayabiliriz: yaklaşık 10^{-22} metre, yaklaşık bir protonun on milyonda biri kadar – öylesine küçük bir mesafe ki ölçülmesi bile mümkün değil, hatta anlamsız.

İki kütle arasındaki kuvvetin hem eşit hem de zıt yönlerde olması fikri hayatımızın her alanında etkilidir ve tartınızın üstünde ayaklarınızda yükseldiğinizde tartının neden sapıttığının cevabıdır. Bu bizi gene ağırlığın ne olduğu meselesine getirip onu daha net anlamamızı sağlar.

Banyo tartısı üzerinde durduğunuzda, kütleçekimi sizin üzerinize mg kuvvetiyle asılmaktadır (buradaki m sizin kütlelerinizdir), tartı da aynı kuvvetle sizi yukarı itmektedir, öyle ki üzerinizdeki net kuvvet sıfırdır. Sizi yukarı iten bu kuvvet tartının aslında ölçtüğü şeydir, ağırlığınız olarak geçen şey budur. Hatırlarsanız ağırlıkla kütle aynı şey değildir. Kütlelerinizin değişmesi için rejim yapmanız gerekir (ya da tabii tersini yapıp daha çok da yiyebilirsiniz), fakat ağırlığınız çok daha kolay değişir.

Diyelim ki kütleleriniz (m) 55 kilogram. Banyonuzdaki tartının üzerindeyken, tartı üzerine mg kuvvetiyle aşağıya bastırırsınız, tartı da aynı mg kuvvetiyle sizi iter. Üzerinizdeki net kuvvet sıfırdır. Tartının sizi ittiği kuvvet göstergede okuyacağınız rakamdır.

Şimdi de sizi bir asansörde tartalım. Asansör hareket etmezken (ya da sabit hızla hareket ederken) sizin ivmeniz yoktur (asansörün de) ve tartı sizi 55 kilogram gösterir, tıpkı banyodaki tartının gösterdiği gibi. Asansöre girip (asansör hareketsizken) tartıya çıkarsınız tartı 55 kilogram gösterir. En üst katın düğmesine bastığınızda, asansör hız alabilmek için kısa bir süre yukarı doğru hızlanır. Buradaki ivmenin 2 metre/saniye ve sabit olduğunu varsayalım. Asansörün hızlandığı o kısa süre içinde, üzerinizdeki net kuvvet sıfır ola-

maz. Newton'ın ikinci yasasına göre üzerinizdeki net kuvvet $F_{net} = ma_{net}$ olmalıdır. Net ivme saniyede 2 metre/saniye olduğundan, üzerinizdeki net kuvvet yukarı yönde $m \times 2$ 'dir. Üzerinizdeki kütleçekim kuvveti aşağı yönde mg olduğundan, sizin üzerinizde yukarı doğru $mg + 2m$ değerinde bir kuvvet olur ki, o da $m(g + 2)$ olarak yazılabilir. Bu kuvvet nereden geliyor? Tartıdan geliyor olması gerek (başka nereden olabilir?). Tartı size yukarı doğru $m(g + 2)$ kuvveti uygular. Hatırlarsanız tartının gösterdiği ağırlık, sizi yukarı ittiği kuvvettir. O halde tartı size ağırlığınızın yaklaşık 66 kilogram olduğunu söyler (hatırlayalım, g yaklaşık saniyede 10 metre/saniyedir). Epey kilo almışsınız!

Newton'ın üçüncü yasasına göre, tartı size yukarı doğru $m(g + 2)$ 'lik bir kuvvet uygularsa, sizin de tartıya aynı kuvveti aşağı doğru uyguluyor olmanız gerekir. Şimdi şöyle akıl yürütebilirsiniz: Tartı sizi sizin ona uyguladığınız kuvvetle itiyorsa, o zaman üzerinizdeki net kuvvet sıfırdır, o halde hızlanıyor olamazsınız. Böyle düşünürseniz çok yaygın bir hataya düşersiniz. Size etki eden sadece iki kuvvet vardır: kütleçekiminden dolayı aşağıya doğru mg ve tartıdan dolayı yukarıya doğru $m(g + 2)$, böylece üzerinizde yukarı doğru $2m$ 'lik bir net kuvvet vardır, ki bu da sizi saniyede 2 metre/saniye hızlandırır.

Asansör hızlanmayı bıraktığı an ağırlığınız tekrar normale döner. Dolayısıyla ağırlığınızın artması sadece o kısa, yukarı doğru ivmelenme ânında olur.

Asansörün aşağı doğru hızlanması durumunda kilo kaybedeceğinizi artık kendi başınıza çıkarabilmeniz gerekir. İvmenin aşağı doğru saniyede 2 metre/saniye olduğu süre zarfında, tartı, ağırlığınızı $m(g - 2)$ olarak kaydedecektir, bu da yaklaşık 44 kilogramdır. Yukarı giden bir asansörün bir yerde durması gerektiğinden, durmadan önce kısa bir süreliğine aşağı doğru hızlandırılması gerekir. Dolayısıyla asansör yolculuğunuzun sonuna doğru kilo kaybettiğinizi göreceksiniz, ki bu da hoşunuza gidebilir! Fakat bundan hemen sonra, asansör durduğunda kilonuz tekrar normale dönecektir (55 kilogram).

Diyelim ki sizden gerçekten ama gerçekten hiç hoşlanmayan biri asansör halatını kesiyor, siz de hızla asansör boşluğunda g ivmesiyle aşağı iniyorsunuz. O sırada fizik düşünmeyeceğinizi tahmin edebili-

yorum, fakat bu ilginç (ve kısacık) bir deney olurdu. Ağırlığınız $m(g - g) = 0$ olacaktır; ağırlıksızsınız. Tartı da sizinle aynı ivmeyle aşağı düşüyor olduğundan, artık sizin üzerinizde yukarı doğru bir kuvvet uygulamaz. Tartıya bakarsanız sıfırı gösterecektir. Aslında havada süzülüyor durumdasınız, asansörün içindeki diğer her şey de süzülüyor durumda. Elinizde bir bardak su olsaydı ve ters çevirebilseydiniz su dökülmezdi – tabii bu, sizden yapmamanızı önemle rica edeceğim bir deney!

Bu bize astronotların uzaygemilerinde neden havada süzöldüklerini açıklar. Bir uzaykapsülü ya da uzaymekiği yörüngedeyse, aslında serbest düşüş halindedir, tıpkı asansörün serbest düşüşü gibi. Serbest düşüş tam olarak nedir? Cevabı sizi şaşırtabilir. Serbest düşüş, üzerinizdeki kuvvetin tamamen kütleçekim kuvvetinden ibaret olması durumudur, başka hiçbir kuvvet size etkide bulunmuyordur. Yörüngedeyken, astronotlar, uzaygemisi ve içindeki her şey serbest düşüşle dünyaya doğru düşmektedir. Astronotların şap diye yeryüzüne yapışmamasının sebebi, dünyanın kavisli olması ve astronotların, uzaygemisinin ve içindeki her şeyin çok hızlı hareket etmesinden dolayı, dünyaya doğru düşerlerken, gezegenin yüzeyinin onlardan kıvrılarak kaçmasıdır; bu nedenle asla dünyanın yüzeyine çarpmazlar.

O halde mekikteki astronotlar ağırlıksızdır. Mekikte olsaydınız kütleçekiminin olmadığını düşünürdünüz; ne de olsa mekikteki hiçbir şeyin ağırlığı yoktur. Yörüngedeki mekiğin sıfır kütleçekimi ortamında olduğu söylenegelir, zira algıladığınız şey budur. Ne var ki kütleçekimi olmasaydı mekik yörüngede kalmazdı.

Şu ağırlığın değişmesi fikri başlı başına o kadar büyüleyici bir şey ki bu fenomeni—hatta ağırlıksızlığı—gerçekten sınıfta göstermek istiyordum. Masaya çıkıp ayaklarıma sımsıkı bağlı tartının üzerinde dursam? O zaman belki öğrencilerime, yarım saniye kadar bir süre serbest düşüşte olduğumu, tartının sıfırı işaret ettiğini bir şekilde—özel bir kamera ayarlayıp—gösterebilirdim. Bunu bizzat denemenizi tavsiye edebilirdim ama hiç zahmet etmeyin; bana inanın, pek çok kez denedim ama sadece pek çok tartı kırdım. Sorun şu ki, satın alabileceğiniz tartılar yeterince çabuk tepki vermiyor, çünkü yaylarında eylemsizlik var. Newton'ın yasalarından biri ötekini zora sokuyor! Otuz katlı bir binadan aşağı atlayabilseydiniz, bu sonucu görmek

için muhtemelen yeterli zamanınız (yaklaşık 4,5 saniyeniz) olurdu, ama tabii bu deney de başka sorunlar yaratırdı.

O halde, tartıları kırmadan ya da binalardan atlamadan işte size arka bahçenizde ağırlıksızlığı tecrübe edebileceğiniz bir deney – ama bir piknik masası ve sağlam dizler gerekiyor. Bunu sınıfımın önündeki laboratuvar masamdan yapıyorum. Masaya çıkın, iki elinizi uzatıp iki ya da dört litrelik bir su kavanozunu tutun, ama kenarlarından değil, ellerinizin üzerine hafifçe yerleştirin. Ellerinizin üstünde öylece durması gerekiyor. Şimdi masadan aşağı atlayın, siz havadayken kavanozun ellerinizin yukarısında süzölmeye başladığını göreceksiniz. Atlayışınızı bir arkadaşınıza kameraya çektirebilirseniz, ağır oynatımda su kavanozunun süzölmeye başladığını açık seçik göreceksiniz. Neden? Çünkü siz aşağı doğru hızlanırken, ellerinizde tutabilmek için kavanoza yukarı doğru uyguladığınız kuvvet sıfır olmuştur. Kavanoz şimdi saniyede 9,8 metre/saniye hızlanacaktır, tıpkı sizin gibi. Siz de kavanoz da serbest düşüştesiniz.

Fakat bütün bunlar siz ayakuçlarınızda yükseldiğinizde tartınızın delirmesini nasıl açıklar? Kendinizi yukarı ittiğinizde yukarı doğru hızlanırsınız, tartının sizin üzerinizdeki kuvveti de artar. Bu yüzden o kısa süre zarfında ağırlığınız artar. Ama aynı şekilde, ayakuçlarınızda yükselirken bir noktada durduğunuzda hızınız düşer, bunun anlamı da ağırlığınızın azalmasıdır. Sonra topuklarınızı indirince bütün süreç tersine döner – böylece kütlelerinizi hiç değiştirmeden saniyenin küçük bir kesrinde kilonuzu nasıl daha çok ya da daha az tartabildiğinizi göstermiş olursunuz.

Evrensel Kütleçekim Yasası: Newton ve Elma

İnsanlar yaygın bir şekilde Newton'ın üç yasasından bahseder, fakat aslında dört yasa formülleştirmiştir. Newton'ın bir gün meyve bahçesinde otururken ağaçtan düşen bir elmayı gözlemlediği hikâyesini hepimiz duymuşuzdur. Newton'ın ilk biyografi yazarlarından biri, bu hikâyeyi Newton'ın kendisinin anlattığını ileri sürüyordu. Newton'ın arkadaşı William Stukeley, Newton'la yaptığı bir konuşmadan alıntı yaparak şunları yazmıştı: "Düşüncelere dalmış bir haldeyken bir elmanın düşmesi vesile olmuş. Bu elmanın neden hep yere

dikey olarak inmesi gerekiyor ki, diye düşünmüş kendi kendine."* Fakat pek çok kişi bu hikâyenin doğru olduğuna inanmadı. Zaten Newton bu hikâyeyi Stukeley'ye ölmeden bir yıl önce gibi geç bir dönemde anlatmıştı ve ciltler dolusu yazılarının hiçbir yerinde de bundan söz etmiyordu.

Yine de şüphe götürmeyecek şekilde doğru olan şey, elmanın ağaçtan düşmesine sebep olan kuvvetin ayın, dünyanın ve güneşin –hatta evrendeki tüm nesnelerin– hareketine de hükmettiğinin ilk farkına varanın Newton olduğudur. Bu olağanüstü bir idrakti, ama bir kere daha, Newton onunla da yetinmedi. Evrendeki her nesnenin diğer nesneleri çektiğini fark etti – ve bu çekimin ne kadar güçlü olduğunu hesaplayan, evrensel kütleçekim yasası diye bilinen bir formül buldu. Bu yasa iki nesne arasındaki kütleçekim kuvvetinin nesnelerin kütlelerinin çarpımıyla doğru orantılı, aralarındaki mesafenin karesiyle de ters orantılı olduğunu ifade eder.

O halde başka bir deyişle, tamamen varsayımsal bir örnek verirek, ki gerçeklikle hiçbir ilgisi olmadığını vurgulayayım, dünya ve Jüpiter güneşin yörüngesinde aynı mesafede olsalardı, o zaman, Jüpiter dünyadan yaklaşık 318 kat daha büyük olduğundan, güneşle Jüpiter arasındaki kütleçekim kuvveti, güneşle dünya arasındakinden yaklaşık 318 kat daha büyük olurdu. Jüpiter'le dünyanın kütleleri aynı olsaydı ve Jüpiter şimdiki yörüngesinde bulunsaydı (dünyanın yörüngesine göre güneşten beş kat daha uzaktadır), o zaman da kütleçekim kuvveti uzaklığın karesiyle ters orantılı olduğundan, güneşle dünya arasındaki kuvvet güneşle Jüpiter arasındakinden yirmi beş kat daha büyük olurdu.

Newton 1687'de yayımlanan ünlü eseri *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*'da (Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkelere) evrensel kütleçekim yasasını sunmak için bir denklem kullanmamıştı, fakat bugün fizikte çoğunlukla şu şekilde ifade ediyoruz:

$$F_{kç} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

* İngiliz Kraliyet Cemiyeti geçenlerde Stukeley'nin elyazmasının dijital kopyasını internet sitelerine koydu. Şu adresten bulabilirsiniz: royalsociety.org/turning-the-pages/.

Burada $F_{k\check{c}}$, m_1 kütlesindeki bir nesneyle m_2 kütlesindeki bir nesne arasındaki kütleçekim kuvvetidir, r de ikisi arasındaki mesafedir; 2'nin anlamı "kare"dir. G nedir? Kütleçekim sabiti denilen şeydir. Newton böyle bir sabitin olduğunu biliyordu tabii, fakat *Principia*'da bahsedilmiyor. O zamandan beri yapılmış pek çok ölçümden, şimdi G 'nin en doğru değerinin $6,67428 \pm 0,00067 \times 10^{-11}$ olduğunu biliyoruz.* Biz fizikçiler de Newton'ın tahmin ettiği gibi bu değer in tüm evrende aynı olduğuna inanıyoruz.

Newton yasalarının yarattığı etki devasaydı ve ne kadar övölse yeri ydi; *Principia* bugüne kadar yazılmış bilim eserlerinin en önemlilerindendir. Newton yasaları güneş in ve gezegenlerin kütlelerinin hesaplanmasını mümkün kılmıştır. Bunun yapılma biçimi harikula de güzeldir. Herhangi bir gezegenin yörünge periyodunu bilerseniz (Jüpiter ya da dünyanın mesela) bir de güneşe olan uzaklığını, güneş in kütlesini hesaplayabilirsiniz. Sihir gibi bir şey, değil mi? Bunu bir adım daha öteye götürebiliriz; Jüpiter'in parlak aylarından (1609' da Galileo tarafından keşfedilmiştir) birinin yörünge periyodunu bilerseniz ve Jüpiter'le o ay arasındaki mesafeyi de bilerseniz, Jüpiter'in kütlesini hesaplayabilirsiniz. Bu yüzden, dünyanın çevresindeki ayın yörünge periyodunu bilerseniz (27,32 gündür) ve dünyayla ay arasındaki ortalama mesafeyi de bilerseniz (yaklaşık 385.000 kilometre), o zaman dünyanın kütlesini yüksek doğruluk derecesiyle hesaplayabilirsiniz. Bunun nasıl yapıldığını Ek 2'de gösteriyorum. Biraz matematik bilginiz varsa hoşunuza gidebilir!

Fakat Newton yasaları bizim güneş sistemimizin çok ötelere uzanır. Yıldızların, ikili yıldız sistemlerinin (13. Bölüm), yıldız kümelerinin, galaksilerin, hatta galaksi kümelerinin hareketini belirleyip açıklar. Newton yasalarının ayrıca yirminci yüzy ılda karanlık madde dediğimiz şey in keşfedilmesinde de pay ı vardır. Bundan daha sonra ayrıntılı söz edeceğim. Yasaları güzeldir – nefes kesici derecede basit ama aynı zamanda inanılmaz derecede güçlüdür. Çok şey açıklarlar ve açıklığa kavuşturdukları fenomen yelpazesi akıllara durgunluk verir.

* Olur da bu değeri kullanmak isterseniz kütleleri kilogram cinsinden, mesafe r 'yi de metre cinsinden alın. Kütleçekim kuvveti o zaman newton cinsinden çıkar.

Hareket fiziğini, nesneler arasındaki etkileşim fiziğini ve gezegenlerin işleyiş fiziğini bir araya getirerek Newton gökbilim ölçümlerine yeni tür bir düzen getirdi; yüzyıllar boyu yapılmış kafa karıştıran bir yığın gözlemin birbirleriyle bağlantılı olduğunu gösterdi. Başkalarında da onun idrakinin kırıntılarından vardı ama bunları onun gibi bir araya getirememişlerdi.

Newton doğmadan bir yıl önce ölen Galileo, Newton'ın ilk yasasının ilk versiyonunu bulmuştu ve pek çok nesnenin hareketini matematiksel olarak açıklayabiliyordu. Bütün nesnelerin belli bir yükseklikten aynı hızla düşeceğini de keşfetmişti (hava direnci yokken). Ne var ki bunun *neden* doğru olduğunu açıklayamadı. Johannes Kepler gezegen yörüngelerinin *nasıl* işlediğinin temellerini çıkardı fakat *nedeni* hakkında hiçbir fikri yoktu. O nedeni Newton açıkladı. Üstelik –gördüğümüz gibi– cevaplar ve ortaya çıkardığı pek çok sonuç hiç de sezgiyle keşfedilecek şeyler değil.

Hareket kuvvetleri beni daima büyüler. Kütleçekimi daima bizimledir; tüm evreni kapsar. Şaşırtıcı yanı –daha doğrusu şaşırtıcı yanlarından bir tanesi– uzaktan etki etmesidir. Gezegenimizin birbirinden 150 milyon kilometre ayrı olan iki nesnenin kütleçekim kuvveti sayesinde yörüngede kaldığını ve hepimizin bu sayede hayatta olduğunu gerçekten hiç durup düşündünüz mü?

Sarkaçların Hareketleri

Kütleçekim kuvveti hayatımızda her yere nüfuz etmiş bir kuvvet olsa da, dünyamız üzerindeki pek çok etki biçimi kafamızı karıştırır. Kütleçekiminin insanın sezgilerine nasıl ters işlediğini göstererek öğrencileri şaşırtmak için bir sarkaç sunumu yaparım. Nasıl olduğunu anlatayım.

Çoğunuz çocuk parkında sizden daha hafif biriyle, örneğin yürümeye yeni başlayan bir çocukla salıncakta yan yana sallandığınızda ondan daha yavaş sallanacağınızı sanırsınız. Ama durum öyle değil. Bir sarkacın tam bir salınımı için tamamlaması gereken süre, ki buna sarkacın periyodu diyoruz, sarkaca asılı ağırlıktan etkilenmez (bu ağırlığa sarkaç topuzu diyoruz). Burada iki şartı karşılayan basit bir sarkaçtan söz ettiğime dikkatinizi çekerim. Birincisi, topu-

zun ağırlığının ipin ağırlığından çok daha fazla olması gerekir ki, ipin ağırlığı gözardı edilebilsin. İkincisi, topuzun ebatları onu bir noktaymış gibi ele alabileceğimiz küçüklükte olmalıdır, o da sıfır ebattır.* Evde basit sarkaç yapmak kolaydır: İnce bir sicimin ucuna bir elma bağlayın, ama boyu elmanın boyunun en az dört katı olsun.

Newton'ın hareket yasalarını kullanarak basit sarkacın periyodunun hesaplanması için sınıfta bir denklem türetip sonra bu denklemi sınarım. Bunu yapabilmek için sarkacın salınım açısının küçük olduğunu varsaymam gerekir. Bununla ne kastettiğimi daha açık anlatabilirim. Evde yaptığınız sarkaca, sallanırken bir sağa bir sola gidip gelişine baktığınızda, çoğu zaman sarkacı hareket halindeyken görürsünüz, ya sağa gidiyordur ya sola. Ne var ki tam bir salınım sırasında sarkacın durduğu iki zaman vardır, sonra yön değiştirir. Bu olduğunda sicimle düşey eksen arasındaki açı azami değere ulaşmıştır; buna sarkacın genliği diyoruz. Hava direnci (sürtünme) gözardı edilebilirse, sarkacın en sol uçtaki azami açısı en sağdaki açıyla aynıdır. Türettiğim denklem sadece küçük açılar (küçük genlikler) için geçerlidir. Fizikteki bu tür bir türetmeye küçük açı yaklaşımı denir. Öğrencilerim bana hep sorar: "Küçük dediğiniz ne kadar küçük?" Bir kız öğrenci daha da ayrıntılı sormuştu: "Beş derecelik bir genlik küçük müdür? On derecelik genlik için denklem hâlâ geçerli mi, yoksa on derece küçük değil mi?" Tabii bunlar harika sorular, ben de bunu derste sınamayı öneriyorum.

Türettiğim denklem oldukça basit ve çok zarif, ama son zamanlarda matematikle uğraşmamışlar için biraz korkutucu görünebilir:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

T sarkacın periyodu (saniye cinsinden), L sicimin uzunluğu (metre cinsinden), π 3,14 ve g kütleçekim ivmesi (saniyede 9,8 metre/saniye). O halde, denklemin sağ tarafı, 2π çarpı sicimin boyunun kütleçekim ivmesine bölümünün kareköküdür. Burada bunun neden doğru denklem olduğunun ayrıntılarına girmeyeceğim (isterse-

* İpin kütlesi gözardı edilmezse ve/veya topuz nokta kütle olarak ele alınmayacak kadar büyükse, o zaman bu basit sarkaç olmaktan çıkar. Buna fiziksel sarkaç deriz ve farklı davranış gösterir.

niz kaydettiğim derslerimde yaptığım türetmeyi takip edebilirsiniz; site bağlantı adresi aşağıda).

Denklemleri burada veriyorum ki böylece uygulamalarımın bunu nasıl hassasiyetle teyit ettiğini görebilesiniz. Denklem 1 metre uzunluğundaki bir sarkacın yaklaşık 2 saniyelik bir periyodu olacağını öngörüyor. O uzunluktaki bir sarkacın on salınımı tamamlaması için geçen zamanı ölçüyorum, o da yaklaşık 20 saniye ediyor. 10'a bölünce, periyodun 2 saniye olduğunu buluruz. Sonra dört kat daha kısa bir sicimi olan bir sarkaca gidiyorum. Denklem periyodun iki kat daha kısa olacağını öngörüyor. Sicimi 25 cm uzunluğunda yapıyorum ve gerçekten de on salınım yaklaşık 10 saniye sürüyor. Yani her şey çok güven verici.

Denklemleri elle tutulan küçük, elmalı bir sarkaçtan daha özenli bir teste tabi tutmak için sınıfta inşa ettiğim basit bir sarkacım var: ucunda 15 kilogram ağırlığında çelik bir topuz olan 5,18 metre uzunluğundaki bir ip. Buna bütün sarkaçların anası diyorum. Bunu şu adreste dersimin sonuna doğru görebilirsiniz: ocw.mit.edu/courses/physics/8-01-physics-i-classical-mechanics-fall-1999/video-lectures/embed10/.

Bu sarkacın T periyodu ne olmalıdır?

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{5,18}{9,8}}, \text{ o da } 4,57 \text{ saniyedir.}$$

Bunu sınamak için, öğrencilerime söz verdiğim gibi hem 5 derecelik hem de 10 derecelik bir genlikte periyodu ölçüyorum.

Öğrenciler görsün diye büyük dijital göstergeli bir zamanölçer kullanıyorum, zamanı saniyenin yüzde biri hassasiyetinde gösteriyor. Yıllar boyunca zamanölçeri sayısız defalar açıp kapatarak tepki süremi sınadım, saniyenin onda biri olduğunu biliyorum (günümdeysem tabii). Bu, aynı ölçümü on kere tekrarlırsam, periyodu en fazla 0,1 saniye (bilemediniz 0,15) farkla ölçeceğim anlamına gelir. O halde, ister tek salınımın süresini, ister on salınımın süresini ölçeyim, ölçümümde artı eksi 0,1 saniye hata payı olacaktır. Bu yüzden sarkacı on kere salınmaya bırakıyorum ki, bir kere salınmasından on kat daha doğru bir periyot değeri elde edeyim.

Topuzu ipin düşeyle olan açısı yaklaşık 5 derece olacak kadar dışa çekip bırakarak zamanölçeri çalıştırıyorum. Sınıf her bir salınımı

yüksek sesle sayıyor ve on salınımdan sonra zamanölçeri durduruyorum. Müthiş bir şey – zamanölçer 45,70 saniyeyi gösteriyor, tek salınım için tahminimin on katı. Sınıf çılgınca alkışlıyor.

Sonra genliği 10 dereceye çıkarıyorum, topu bırakıyorum, sınıfa saydırıyorum ve tam onuncuda zamanölçeri durduruyorum: 45,75 saniye. On salınım için $45,75 \pm 0,1$ saniye, tek salınım için $4,575 \pm 0,01$ saniyeye karşılık gelir. 5 derecelik genlikteki ölçüm, 10 derecelik genlikteki ölçümle aynı (ölçümlerin hata payları çerçevesinde). Demek ki denklemim hâlâ çok doğru.

Sonra sınıfa soruyorum: Diyelim ki topuzun üzerine ben oturup onunla salındım – aynı periyodu mu elde ederdik, yoksa değişirmiydi? Bu şeyin üzerine oturmaya hiç can atmıyorum (gerçekten insanın canını yakıyor), fakat bilim uğruna, öğrencilerin gülmesi ve iştirak etmesi için bu fırsatı kaçıramam. Tabii topuz üzerine dik oturamam, yoksa ipi fiilen kısaltır, periyodu da bir parça azaltmış olurum. Fakat topuzla aynı hizada olacak şekilde vücudumu mümkün olduğunca yatay konuma getirirsem, ipin boyunu aşağı yukarı aynı tutmuş olurum. Topuzu yukarı çekiyorum, bacaklarımın arasına alıyorum, ipi kavıyorum, sonra kendimi bırakıyorum.

Sarkaçtan sallanırken tepki süremi uzatmadan zamanölçeri başlatıp durdurmam kolay değil. Fakat bunu o kadar çok yaptım ki, ölçümlerimde $\pm 0,1$ saniye hata payını elde edebileceğimden oldukça eminim. On defa salınıyorum, öğrenciler salınımları yüksek sesle sayıyorlar – ayrıca ben yüksek sesle oflayıp puflarken bu absürd duruma da gülüyorlar – on salınımdan sonra zamanölçeri durdurunca 45,61 saniyeyi gösteriyor. Bu da $4,56 \pm 0,01$ saniyelik bir periyot demektir. "Fizik işe yarıyor!" diye bağırıyorum, öğrenciler çıldırıyor.

Anneanneler ve Astronotlar

Kütleçekiminin başka bir çetrefil yanı da, bizi gerçekte olduğundan başka bir yöne çekiyormuş gibi algılama hatasına düşebilmemizdir. Kütleçekimi daima dünyanın merkezine doğru çeker – yani dünyada, Plüton'da değil tabii. Fakat bazen kütleçekiminin yatay etki ettiğini algılarız ve bu yapay ya da algılanan kütleçekimi dediğimiz şey kütleçekiminin kendisine karşı koyuyormuş gibi görünebilir.

Bu yapay kütleçekimini, anneannemin her salata yapışında uyguladığı bir yöntemle kolaylıkla gösterebilirsiniz. Anneannemin böyle fantastik fikirleri vardı – hatırlayın, yatarken ayakta olduğumdan daha uzun olduğumu bana öğreten oydu. Neyse, anneannem salata yaparken gerçekten çok eğlenirdi. Marulu süzgeçte yıkar, sonra da onu yapraklarına zarar verecek bir bez havluda kurutmak yerine, kendi icat ettiği tekniği uygulardı: Süzgeci alıp üstünü bir durulama beziyle örter ve bezi ambalaj lastiğiyle sabitleyip süzgeci deli gibi çevirirdi – yani gerçekten çok hızlı.

İşte bu yüzden bu uygulamayı yaparken, ilk iki sırada oturan öğrencilere sayfaları ıslanmasın diye defterlerini kapatmalarını söylerim mutlaka. Sınıfa marul getiririm, masamdaki lavaboda bir güzel yıkayıp süzgeçte hazırlarım. "Hazır olun," derim, sonra kolumu dikey bir daire çizerek şekilde kuvvetlice sallıyorum. Su damlaları her yere saçılır! Tabii şimdi, anneannemin yöntemi yerine ruhsuz plastik salata kurutucuları var – bence çok yazık. Modern hayatın getirdiği pek çok şey romantizmi alıp götürüyor gibi.

Bu yapay kütleçekiminin aynısı, astronotlar tarafından da dünyanın çevresindeki yörüngeye doğru hızlanırlarken hissedilir. Dos-tum ve MIT'den meslektaşım olan Jeffrey Hoffman uzaymekliğinde beş uçuş yaptı; mürettebatın fırlatma sırasında 0,5g'den başlayarak katı yakıt aşamasının sonunda 2,5g'ye varan bir dizi farklı ivme yaşadıklarını anlatıyor bana. Sonra kısa bir süreliğine yaklaşık 1g'ye düşüyor, bu noktada sıvı yakıt yanmaya başlıyor ve ivme tekrar artarak fırlatmanın son dakikasında 3g'ye ulaşıyormuş – mekiğin saatte yaklaşık 27.300 kilometrelik bir hıza ulaşmasıysa toplam sekiz buçuk dakika sürüyormuş. Hiç rahat bir durum değilmiş. Nihayet yörüngeye ulaştıklarında ağırlıksız oluyor ve bunu sıfır kütleçekimi olarak hissediyorlarmış.

Artık sizin de bildiğiniz gibi, hem süzgecin kendisini ittiğini hissedenden marul, hem koltukların kendilerini ittiğini hissedenden astronotlar bir tür yapay kütleçekimi yaşamaktalar. Anneannemin anlayışı –ve bizim salata kurutucularımız– yapraklarına yapışmış suyu maruldan ayırıp süzgecin deliklerinden dışarı fırlatan bir merkezkaçın versiyonlarıdır. Bu algılanan kütleçekimini yaşamamız için astronot olmanız gerekmiyor. Lunaparklardaki Rotor denilen o gaddar canavara binişinizi düşünün. Burada bir döner tablanın kenarında sırtı-

nız metal bir korkuluğa dayalı ayakta durursunuz. Gittikçe artan bir hızla dönmeye başlayınca, korkuluğa gitgide daha fazla bastırıldığınızı hissedersiniz, değil mi? Newton'ın üçüncü yasasına göre, duvarın sizi ittiği kuvvetle siz de duvarı itersiniz.

Duvarın sizi ittiği kuvvete merkezci kuvvet denir. Sizin dönmeyi için gereken ivmeyi sağlar; ne kadar hızlı giderseniz merkezci kuvvet o kadar büyük olur. Unutmayın, bir daire çizerek gidiyorsanız, süratiniz değişmese de bir kuvvet (dolayısıyla da bir ivme) gereklidir. Benzer şekilde, Ek 2'de ele aldığım gibi, kütleçekimi gezegenlerin güneşin etrafında dönmesi için gereken merkezci kuvveti sağlar. Merkezci kuvvetle merkezkaç kuvvetinin büyüklükleri aynı fakat yönleri farklıdır. İkisini karıştırmayın. Size etkiyen *sadece* merkezci kuvvettir (merkezkaç kuvveti değil) ve duvara etkiyen kuvvet de sadece merkezkaç kuvvetidir (merkezci kuvvet değil).

Bazı Rotorlar o kadar hızlı döner ki üzerinde dikildiğiniz zemini alçaltır ama siz aşağı kaymazsınız. Neden aşağı kaymazsınız?

Bir düşünün. Rotor hiç dönmezken üzerinizdeki kütleçekim kuvveti aşağı kaymanıza yol açar, çünkü sizinle duvar arasındaki sürtünme kuvveti (yukarı doğru olacaktır), kütleçekim kuvvetini dengeleyecek kadar büyük değildir. Fakat Rotor zemini alçakken döndüğünde, sürtünme kuvveti –merkezci kuvvete bağlı olduğundan– kütleçekim kuvvetini dengeleyecek kadar büyük olacaktır, dolayısıyla düşmezsiniz.

Yapay kütleçekimini göstermenin bir sürü yolu var. İşte evde deneyebileceğiniz bir tanesi – yani bahçenizde. Boş bir teneke boya kutusunun kulpuna bir ip bağlayıp içine su doldurun –yarıya kadar olsa daha iyi, yoksa çevirmek bayağı zor olur– sonra başınızın üstünde kutuyu var gücünüzle daire çizecek şekilde çevirin. Yeterince hızlı dönmeyi sağlamak biraz alıştırmaya isteyebilir. Ama yaptığınızda tek bir damlanın bile dökülmediğini göreceksiniz. Sınıfta öğrencilerime yaptırıyorum, dehşet eğlenceli bir şey! Bu küçük deney, Rotor'un bazı özellikle tehlikeli versiyonlarında, alet yavaş yavaş hızlanıp da sonunda tamamen tepetaklak olduğunuzda neden aşağı düşmediğinizi de açıklar (tabii güvenlik sebebiyle sizi bu şeye ayrıca bağliyorlar).

Bir tartının bize uyguladığı itme kuvveti, tartının bize ağırlığımız olarak söylediği şeyi belirler; astronotları ağırlıksız yapan küt-

leçekim kuvvetidir – onun yokluğu değil; ve bir elma dünyaya düşerken, dünya da elmaya düşmektedir. Newton yasaları basittir, geniş kapsamlıdır, derindir ve sezgilere son derece terstir. Sir Isaac Newton ünlü yasalarını oluştururken hakikaten gizemli bir evrenle mücadele ediyordu ve hepimiz onun bu gizemlerden bazılarının sırrını çözme ve dünyamızı kökten yepyeni bir biçimde gösterme yeteneğinden bol bol faydalandık.

Kamışla İçmenin Sihri

En sevdiğim sınıf içi uygulamalı anlatımlardan birisinde, iki teneke boya kutusu ve bir tüfek var. Tenekelerden birini ağzına kadar suyla dolduruyorum ve kapağını sımsıkı kapatıyorum. Sonra ikinci tenekeyi ağzında iki parmak kalacak kadar dolduruyorum, onu da bir güzel kapatıyorum. Bunları birbiri arkasına masaya yerleştirdikten sonra, birkaç metre ötedeki ikinci bir masanın yanına gidiyorum. Burada uzun beyaz bir tahta kutu var, bir tür mekanizmayı gizlediği belli. Kutuyu kaldırıyorum, teneke kovalara hedef almış, tezgâha sabitlenmiş bir tüfek çıkıyor ortaya. Öğrencilerin gözleri kocaman açılıyor – derste tüfekle ateş mi edeceğim?

"Bu boya kutularının içinden bir mermi geçirsek ne olurdu?" diye soruyorum. Cevap beklemiyorum. Eğilip tüfeğin nişanını kontrol ediyorum, genellikle sürgü koluyla biraz oynuyorum. Gerilimi yükseltmek için bu iyi oluyor. Tüfeğin haznesinden dışarıya biraz toz üflüyorum, içine bir mermi koyuveriyorum ve duyurumu yapıyorum: "Pekâlâ, işte mermiyi koyduk. Buna hazır mıyız?" Sonra tüfeğin yanında dikilerek parmağımı tetiğe koyup sayıyorum. "Üç, iki, bir" – ateş. Boya tenekelerinden birisinin kapağı hemen havaya fırlıyor, ötekiyse yerinde kalıyor. Hangi boya tenekesi kapağından oluyor?

Bunun cevabını bilmek için önce, havanın sıkıştırılabilir, suyunsa sıkıştırılamaz olduğunu bilmeniz gerekir. Bütün gazlar gibi hava molekülleri de birbirlerine sokulup sıkışabilir, fakat bütün sıvı molekülleri gibi su molekülleri de sıkışamaz. Bir sıvının yoğunluğunu değiştirmek için korkunç kuvvetler ve basınçlar gerekir. Şimdi, bir mermi boya tenekelerine girerken, kendisiyle birlikte büyük bir ba-

sınç getirir. Havası olan tenekede, hava bir yastık ya da darbe emici gibi davranır, o yüzden suya bir şey olmaz ve teneke patlamaz. Fakat tamamen suyla dolu olan tenekede su sıkışamaz. O yüzden, merminin suda fazladan getirdiği basınç çeperlerde ve tenekenin tepesinde büyük bir kuvvet uygular ve kapak yukarı fırlar. Tahmin edebileceğiniz gibi çok dramatik bir durum, öğrencilerim hemen her zaman şok geçirir.

Hava Basıncıyla Çevriliyiz

Derslerimde basınç konusuyla hep çok eğlenmişimdir; hava basıncıysa özellikle eğlencelidir çünkü pek çok yanı sezgilere çok terstir. Özellikle hissetmeye çalışmadığımız müddetçe hava basıncına maruz kaldığımızın farkına bile varmayız, varınca da bizi şaşırtır. Orada olduğunu bir kere fark ettik mi –ve anlamaya başladık mı– her yerde varlığının delillerini görmeye başlarız, balonlardan barometrelere, kamışla neden sıvı içilebildiğinden, okyanusta ne kadar derinlere dalıp şnorkel kullanabileceğinize kadar.

Kütleçekimi ve hava basıncı gibi ilkin görmediğimiz ve varlığını kanıksadığımız şeyler, bütün fenomenlerin en büyüleyicileri olup çıkıveriyor. Bir ırmakta yan yana güle oynaya yüzen iki balık fıkrası gibi. Balıklardan biri yüzünde kuşkucu bir ifadeyle ötekine dönüp sorar: "Son zamanlarda hep konuşulup duran şu 'su' da neyin nesi?"

Bize gelince, biz de görünmeyen atmosferimizin ağırlığını ve yoğunluğunu kanıksamışız. Aslında engin bir hava okyanusunun dibinde yaşıyoruz, her gün her saniye üzerimize çok büyük bir basınç uyguluyor. Avuç içim yukarı bakacak biçimde elimi ileri uzattığımı varsayın. Şimdi de 1 santimetre genişliğinde kare profil, çok uzun bir borunun ta gökyüzüne kadar elimin üzerinde durduğunu hayal edin. Yüz altmış kilometreden fazla eder. Sırf boru içindeki havanın ağırlığı –boruyu boş verin– yaklaşık 1 kilogram olurdu.* Bu, hava basıncını ölçmenin yollarından biridir: Bir santimetrekaredeki 1,03 kilogramlık basınca standart atmosfer denir.

* Unutmayın ey bilimsanları, burada teknik dilden ziyade yaygın bir dil kullanıyorum. Kilogram aslında ağırlık değil kütle birimi olmasına rağmen genellikle her ikisi için de kullanılıyor, benim burada yaptığım da bu.

Hava basıncını –ve bütün başka basınçları da– hesaplamanın başka bir yolu oldukça basit bir denklem kullanmaktır – o kadar basit ki, genellikle bunun bir denklem olduğunu söylemeden sözle belirtirim. Basınç, kuvvetin alana bölümüdür: $P = F/A$. O halde deniz seviyesinde hava basıncı santimetre-kare başına yaklaşık 1 kilogramdır.

İşte kuvvet, basınç ve alan arasındaki ilişkiyi gözde canlandırmak için size bir yol daha. Diyelim ki bir gölcükte buz pateni yapıyorsunuz ve birisi suya gömülüyor. Buzdaki deliğe nasıl yaklaşırsınız? Buzda yürüyerek mi? Hayır, karınüstü yatar, karış karış ilerlersiniz, bedeninizin kuvvetini buz üzerinde daha geniş bir alana yayarsınız, böylece buz üzerinde daha az basınç uygulayarak kırılma ihtimalini azaltırsınız. Buza ayaktaiken ve yatarken uyguladığınız basınçlar arasındaki fark çok büyüktür.

Diyelim ki 70 kilosunuz ve buzda iki ayağınızın üzerinde dikiliyorsunuz. İki ayağınızın yüzey alanı yaklaşık 500 santimetre-kareyse (0,05 metre-kare), metre-kareye 70/0,05 kilogramlık bir basınç uygularsınız, yani 1400 kilogram. Bir ayağınızı kaldırırsanız basınç ikiye katlanarak metre-karede 2800 kilograma çıkar. Boyunuz benim boyum gibi 1,83 civarıysa ve buzda uzanıyorsanız ne olur? O zaman 70 kilogramı yaklaşık 8000 santimetre-kareye yayarsınız, yani 0,8 metre-kareye, bedeniniz de metre-kareye sadece 87,5 kilogramlık bir basınç uygular, bu da tek ayak üzerindeyken uyguladığınızdan kabaca otuz iki kat daha azdır. Alan büyüdükçe basınç azalır; benzer biçimde, alan küçüldükçe basınç artar. Basınca dair pek çok şey sezgilere terstir.

Örneğin basıncın yönü yoktur. Fakat basıncın sebep olduğu kuvvetin yönü vardır; basıncın uygulandığı yüzeye diktir. Şimdi elinizi uzatın (avuç içi yukarıda) ve eliniz üzerine uygulanan kuvveti düşünün – boru artık işin içinde değil. Benim elimin alanı 150 santimetre-kare civarındadır, o halde onu aşağı iten 150 kilogramlık bir kuvvet olması gerekir. Peki o zaman nasıl oluyor da elimi havada o kadar kolay tutabiliyorum? Ne de olsa halterci değilim. Aslında tek kuvvet bu olsaydı o ağırlığı taşıyamazdınız. Ama dahası var. Havanın uyguladığı basınç bizi çepeçevre kuşattığı için elinizin tersinde de yukarı yönde 150 kilogramlık bir kuvvet vardır. O yüzden eliniz üzerindeki net kuvvet sıfırdır.

Fakat onca kuvvet üzerine etki ediyorsa eliniz neden ezilmiyor? Belli ki elinizdeki kemikler ezilmeyecek kadar sağlam. Elinizin büyüklüğünde bir tahta parçası alın; kesinlikle atmosfer basıncıyla ezildiği yok.

Peki ya göğüs kafesim? Yaklaşık 1000 santimetrekarelik bir alana sahip. O halde hava basıncından dolayı üzerine etkiyen net kuvvet yaklaşık 1000 kilogramdır: 1 metrik ton. Sırtımdaki net kuvvet de 1 ton olur. Akciğerlerim neden içe çökmüyor? Bunun sebebi, ciğerlerimin içindeki hava basıncının da 1 atmosfer olması; yani ciğerlerimin içindeki hava ile, göğüs kafesime basınç yapan dışarıdaki hava arasında basınç farkı yok. O yüzden kolaylıkla soluyabiliyorum. Göğüs kafesiniz boyutlarında karton, tahta ya da metal bir kutu düşünün. Kutuyu kapatın. Kutu içindeki hava soluduğunuz havadır – 1 atmosfer. Kutunun ezilmeme sebebi ciğerlerinizin içe çökmeme sebebiyle aynıdır. Evler atmosfer basıncıyla içe çökmez çünkü içerideki hava basıncı dışarıdakiyle aynıdır; buna basınç dengesi diyoruz. Bir kutunun (ya da evin) içindeki hava basıncı 1 atmosferden çok daha düşük olsaydı durum çok farklı olurdu; bir ihtimal, derste gösterdiğim gibi içine göçerdi. Buna daha sonra devam edeceğim.

Normalde hava basıncının farkında olmayışımız, bizim için önemli olmadığı anlamına gelmez. Nitekim hava durumu tahminlerinde sürekli alçak ve yüksek basınç sistemlerinden söz ederler. Ve hepimiz biliyoruz ki, yüksek basınç sistemi güzel açık havalar getirmeye eğilimlidir, alçak basınç sistemiyse bir tür fırtına cephesi yaklaşıyor demektir. O yüzden hava basıncını ölçmeyi fazlasıyla isteriz – fakat hissedemiyorsak bunu nasıl yapacağız? Bunun barometreyle yapıldığını biliyor olabilirsiniz, ama tabii bu da çok şey açıklamıyor.

Kamışların Sihri

Gelin, muhtemelen onlarca defa yaptığınız küçük bir numarayla başlayalım. Bir kamışı bir bardak suya daldırırsanız –ya da benim derste yaptığım gibi kızılıcık suyuna– içi suyla dolar. Sonra kamışın başına bir parmağınızı koyup bardaktan dışarıya çekmeye başlarsanız, su kamışın içinde kalır; neredeyse bir sihir gibi. Bu neden olur? Açıklaması basit değil.

Bunun nasıl meydana geldiğini açıklamak için –ki bu da bizi barometreye yaklaştıracak– sıvılardaki basıncı anlamamız gerekir. Sadece sıvının sebep olduğu basınca hidrostatik basınç denir ("hidrostatik", "hareketsiz sıvı" tamlamasının Latincesinden türetilmiştir). Bir sıvının –okyanus diyelim– yüzeyi altındaki toplam basınç, suyun yüzeyi üstündeki atmosfer basıncı ile (ileri uzattığınız elinizde olduğu gibi) hidrostatik basıncın toplamıdır. İşte temel bir ilke: *Durağan olan belli bir sıvıda, basınç aynı seviyelerde aynıdır. Dolayısıyla yatay düzlemde basınç her yerde aynıdır.*

Demek ki bir yüzme havuzundayken, havuzun sığ kısmında elinizi 1 metre aşağı indirdiğinizde, elinizdeki toplam basınç, yani atmosfer basıncı (1 atmosfer) ile hidrolik basıncın toplamı, arkadaşınızın havuzun derin ucunda, yüzeyin 1 metre altındaki eli üzerindeki basınçla aynı olacaktır. Fakat elinizi yüzeyden 2 metre aşağıya indirirseniz, iki kat yüksekliğinde bir hidrostatik basınçla karşılaşır. Belli bir seviyenin üstündeki sıvı arttıkça, o seviyedeki hidrostatik basınç da artar.

Aynı ilke hava basıncı için de geçerlidir bu arada. Bazen atmosferden bir hava okyanusuymuş gibi söz ederiz, bu okyanusun dibinde de, dünya yüzeyinin büyük kesiminde basınç yaklaşık 1 atmosferdir. Fakat çok yüksek bir dağın tepesinde olsaydık, üstümüzde daha az hava olurdu, dolayısıyla atmosfer basıncı daha az olurdu. Everest Dağı'nın zirvesinde atmosfer basıncı bir atmosferin yaklaşık üçte biridir.

Şimdi, yatay düzlemde bir şekilde basınç aynı değilse, o zaman yatay düzlemde basınç eşitlenene kadar sıvı akacaktır. Havada da durum aynıdır, etkisini de rüzgâr olarak biliyoruz – farkı kapatmak için yüksek basınçtan alçak basınca hareket eden hava, basınç eşitlenince durur.

O halde kamışta olup biten ne? Kamışı bir sıvıya batırdığınızda –şimdilik tepe ucu açık olsun– sıvı, kamışın dışında bulunan bardaktaki sıvının yüzeyiyle aynı seviyede olana kadar kamışa dolar; iki yüzeydeki basınç da aynıdır: 1 atmosfer.

Şimdi diyelim ki kamışı emiyorum. İçindeki havanın birazını dışarı çıkarıyorum, bu da kamışın içindeki sıvının üzerinde bulunan hava sütununun basıncını azaltır. Kamış içindeki sıvı olduğu yerde kalsaydı, o zaman yüzeyindeki basınç 1 atmosferden düşük olurdu,

çünkü sıvının üzerindeki basınç düşmüştü. Bu durumda iki yüzeyde, yani kamışın içinde ve dışında, *aynı seviyede* (aynı yatay düzlemde) ölçülen basınç birbirinden farklı olurdu – ama buna da izin yoktur. Bundan dolayı kamıştaki sıvı, kamışın dışındaki yüzeyle aynı seviyede bulunan kamışın içindeki basınç 1 atmosfer olana kadar yükselir. Kamış içindeki hava basıncını emerek yüzde 1 düşürürsem (yani 1,00 atmosferden 0,99 atmosfere) o zaman, içmeyi düşündüğümüz herhangi bir içecek –su, kızılıncık suyu, limonata, bira ya da şarap– yaklaşık 10 santimetre yükselir. Nasıl mı biliyorum?

Efendim, kamış içindeki sıvının, üzerindeki 0,01 atmosferlik hava basıncının kaybını gidermek için yükselmesi gerekir. Bir sıvıdaki hidrostatik basıncı hesaplama formülünden –burada anlatmaya-cağım– su için (ya da benzer yoğunluktaki her sıvı için) 0,01 atmosferlik hidrostatik basıncın 10 santimetrelik bir sütunla elde edildiğini biliyorum.

Kamışınızın boyu 20 santimetre olsaydı, hava basıncını 0,98 atmosfere düşürmek ve böylece suyun 20 santimetre yükselip ağzınıza ulaşmasını sağlamak için epey sıkı emmeniz gerekirdi. Sonrası için bunu aklınızda tutun. Uzay mekiğindeki ağırlıksızlık (3. Bölüm) ve kamışların işleyişi (bu bölüm) hakkında her şeyi artık bildiğinize göre, sizin için ilginç bir problemim var: Mekikte bir meyve suyu topu havada süzülüyor. Meyve suyu ağırlıksız olduğundan bardağa ihtiyaç yok. Bir astronot meyve suyu topuna özenle bir kamış sokuyor ve kamıştan emmeye başlıyor. Meyve suyunu bu şekilde içebilir mi? Mekikteki hava basıncının yaklaşık 1 atmosfer olduğunu varsayabilirsiniz.

Şimdi parmağınızla tepe ucunu kapattığınız kamış örneğine tekrar dönelim. Kamışı yavaş yavaş yukarıya (örneğin 5 santimetre) kaldırırsanız, kamış hâlâ meyve suyunun içinde olduğu sürece meyve suyu kamıştan dışarı kaçmayacaktır. Hatta neredeyse (tam değil) daha önceki yerinde aynen kalacaktır. Kaldırmadan önce kamışın kenarını meyve suyu hizasında işaretleyerek bunu sınavabilirsiniz. Kamışın içindeki meyve suyunun yüzeyi şimdi bardaktaki meyve suyunun yüzeyinden yaklaşık 5 santimetre yukarıda olacaktır.

Fakat kamışın içini ve dışını eşitleyen –aynı seviyede– sıvıdaki basınca dair daha önceki kutsal beyanımız dikkate alındığında bu nasıl mümkün olabilir? Bu durum kuralı ihlal etmiyor mu? Hayır etmi-

yor! Doğa çok zekidir; parmağınızla kamışın içinde hapsedilen hava, hacmini tam uygun miktarda (0,005 atmosfer) artırarak, bardaktaki sıvının yüzeyiyle aynı seviyede olan kamıştaki sıvının basıncının aynı olmasını sağlar: 1 atmosfer. İşte bu yüzden meyve suyu tamına 5 santimetre yükselmez de biraz daha az, belki 1 milimetre daha az yükselir – bu da havaya, basıncını istenilen miktara düşürmesi için gereken fazladan hacmi vermeye tam yetecek kadardır.

Bir boruyu bir ucunu kapatarak yavaşça yukarı kaldırdığınızda borunun içindeki suyun (deniz seviyesinde) ne kadar yukarı çıkabileceğini tahmin edebilir misiniz? Boruyu kaldırmaya başladığınızda içinde ne kadar havanın hapsedildiğine bağlı. Kamışta çok az hava varsa ya da hiç hava yoksa, suyun çıkabileceği azami yükseklik 10 metreden biraz fazla (10,36 metre) olurdu. Tabii bunu küçük bir bardakla yapamazsınız, fakat bir kova su işinizi görebilir. Şaşırdınız mı? Kavraması daha da güç olan şey borunun şeklinin bir öneminin olmaması. Eğip büküp, hatta bir spirale dönüştürebilirsiniz, ama su yine de 10,36 metre dikey yüksekliğe ulaşır, çünkü 10,36 metre su 1 atmosferlik hidrostatik basınç sağlar.

Atmosfer basıncı azaldıkça azami su sütunu yüksekliğinin azalacağını bilmemiz, atmosfer basıncını ölçmek için bize bir yol sağlar. Bunu görmek için atmosfer basıncının 0,82 atmosfer olduğu Washington Dağı'na (yaklaşık 1900 metre yüksekliğinde) gidebiliriz, o zaman buna göre borunun dışındaki yüzeydeki basınç artık 1 atmosfer değil, sadece yaklaşık 0,82 atmosferdir. O halde, borunun dışındaki su yüzeyiyle aynı seviyede olan, borunun içindeki su basıncını ölçtüğümde onun da 0,82 atmosfer olması gerekir. Dolayısıyla azami su sütunu yüksekliği daha düşük olacaktır. Borudaki azami su yüksekliği o zaman 0,82 çarpı 10,36 metre, o da yaklaşık 8,5 metre olur.

Bu sütunun yüksekliğini kızılıçık suyuyla, boruyu santimetre ve metrelere bölerek ölçersek, bir kızılıçık suyu barometresi yaratmış oluruz – yani hava basıncındaki değişiklikleri gösterecektir. Bu arada, Fransız bilimadamı Blaise Pascal'ın kırmızı şarap kullanarak bir barometre yaptığı söylenir, ki bir Fransızdan da bu beklenirdi. On yedinci yüzyılın ortalarında barometreyi icat ettiği bilinen, kısa bir süreliğine Galileo'nun asistanlığını da yapmış İtalyan Evangelista Torricelli, barometresi için en sonunda cıvada karar kılmıştır. Bu-

nun sebebi şudur: Belli bir sütunda daha yoğun sıvılar daha çok hidrostatik basınç üretirler, bu yüzden de boruda daha az yükselmek zorunda kalırlar. Sudan 13,6 kat daha yoğun olan cıva, borunun boyunu çok daha elverişli hale getirmiştir. 10,36 metrelik su sütununun hidrostatik basıncı (1 atmosfer), 10,36 metre bölü 13,6'nın sonucu olan 0,76 metrelik cıvayla aynıdır.

Torricelli aslında ağırlıkla ilkin hava basıncını ölçmeye çalışmıyordu. Yüksek emiş güçlü pompaların kaldırabileceği su sütununun bir limiti olup olmadığını bulmaya çalışıyordu – sulamada önemli bir sorun. Yaklaşık 1 metre boyunda, altı kapalı bir cam tüpün tepesinden cıva döktü. Sonra tüpün ağzını başparmağıyla kapatıp ters çevirdi ve bir cıva kâsesi içine tutarak parmağını çekti. Böyle yapınca, cıvanın bir kısmı tüpten çıkarak tekrar kâseye döküldü, fakat kalan sütunun boyu 76 santimetreydi. Tüpün tepesinde kalan boşluğun bir vakum ortamı olduğu sonucuna vardı. Bu, bir laboratuvar da elde edilmiş ilk vakum ortamlarından biridir. Cıvanın sudan yaklaşık 13,6 kat daha yoğun olduğunu biliyordu, o halde bir su sütununun azami yüksekliğinin –zaten gerçekte bilmek istediği de oydu– yaklaşık 10,36 metre olacağını hesaplayabilirdi. Bunun hesabını yaparken, yan fayda olarak, sıvının zaman içinde yükselip alçaldığını fark etti ve bu değişikliklerin atmosfer basıncından dolayı olduğuna kanaat getirdi. Epey parlak bir fikir. Yaptığı bu deney, cıvalı barometrelerin tüplerinin tepesinde neden hep bir vakum alanı olduğunu da açıklıyor.

Su Altındaki Basınç

Torricelli bir su sütununun azami yüksekliğini keşfederken, aynı zamanda, sizin de okyanusta bir anlığına bir balık görmeye çalışırken düşünmüş olabileceğiniz bir şeyi keşfetti. Öyle sanıyorum ki hayatınızın bir noktasında muhtemelen şnorkelle yüzmeyi denemişsinizdir. Şnorkellerin çoğunun borusu otuz santimi geçmez; eminim bazen daha derinlere gitmek istemiş, keşke şnorkel daha uzun olsaydı diye düşünmüşsünüzdür. Sizce şnorkelin de hâlâ işe yarayacağı ne kadar bir derinliğe inebilirsiniz? Bir buçuk metre, üç metre, altı?

Bu sorunun cevabını derste manometre denilen basit bir ağıtla bulmayı severim; bildik bir laboratuvar aletidir. Çok basittir, siz de evde kolaylıkla yapabilirsiniz, birazdan tarif edeceğim. Burada bulmak istediğim şey, yüzeyden ne kadar aşağıda olup da hâlâ ciğerlerime hava çekebileceğim. Bunu keşfetmek için göğsüm üzerindeki hidrostatik basıncı ölçmemiz gerek. Bu basınç ben aşağılara gittikçe daha da güçlü hale gelir.

Hatırlarsanız, bizi çevreleyen basınç aynı seviyelerde aynı olup atmosfer basıncıyla hidrostatik basıncın toplamıdır. Suyun altında şnorkelle yüzersem, dışarıdan gelen havayı solurum. Bu havanın 1 atmosferlik basıncı vardır. Sonuç olarak, şnorkel aracılığıyla havayı içime çektiğimde, ciğerlerimdeki havanın basıncı aynı olur, 1 atmosfer. Fakat göğsümdeki basınç atmosfer basıncı *artı* hidrostatik basınçtır. O halde, şimdi göğsüm üzerindeki basınç, ciğerlerimin içindeki basınçtan *daha yüksektir*; aradaki fark tamı tamına hidrostatik basınçtır. Nefesi dışarı verirken bu bir sorun teşkil etmez, fakat nefes alırken göğsümü genişletmem gerekir. Suda fazla derinlerde olduğum için hidrostatik basınç fazla yüksek olursa, işte bu basınç farkını yenecek kas gücüne sahip değilim, dolayısıyla artık içime hava çekemem. Bu yüzden de, daha derinlere gideceksem hidrostatik basıncı yenmem için basınçlı hava solumak zorundayım. Fakat çok basınçlı hava vücudumuzu epey zorlar, dalgıçlar için katı zaman sınırlaması bu yüzden vardır.

Şimdi tekrar şnorkelle dönersek, ne kadar aşağıya gidebilirim? Bunu bulmak için amfinin duvarına bir manometre takıyorum. 4 metre uzunluğunda şeffaf plastik bir boru düşünün. Bir ucunu solda duvarın yukarısına bağlayıp, sonra bükerek duvarda U şekline getiriyorum. U'nun iki kolu da 2 metreden biraz daha az. Borunun içine 2 metrelik kızılçık suyu dolduruyorum, o da doğal olarak U borusunun iki kolunda da aynı seviyeye oturuyor. Şimdi, borunun sağ ucundan içeri üfleyerek kızılçık suyunu U borusunun sol tarafına itiyorum. Kızılçık suyunu itebildiğim dikey mesafe, bana şnorkelle ne kadar derinde yüzebileceğimi söyleyecek. Neden mi? Çünkü bu, ciğerlerimin suyun hidrostatik basıncını yenmek için ne kadar basınç uygulayabileceğinin bir ölçüsüdür – bu amaç için kızılçık suyuyla su eşdeğerdir, fakat öğrencilerin kızılçık suyunu görmesi daha kolaydır.

Öne eğiliyorum, içimdeki havayı tamamen boşaltıyorum, ciğerlerimi doldurmak için içime nefes çekiyorum, borunun doğru ucunu ağzıma alıp var gücümle içine üflüyorum. Yanaklarım çöküyor, gözlerim yuvalarından çıkıyor, kızıl-cık suyu U borusunun sol tarafında gıdım gıdım yükseliyor ve yüksele yüksele – ne kadar yükseliyor tahmin edebilir misiniz? 50 santimetre. Oraya varmak için canım çıkıyor ve orada birkaç saniyeden fazla duramıyorum. O halde, kızıl-cık suyunu sol tarafta 50 santimetre yukarı ittim, bu da aynı zamanda sağ tarafta 50 santimetre aşağı ittim demektir – toplamda, kızıl-cık suyu sütununu dikey olarak 100 santimetre, yani tam bir metre oynattım. Tabii şnorkelle soluduğumuzda içimize hava çekiyoruz, havayı şnorkelden dışarı atmıyoruz. Belki de havayı içimize çekmek daha kolaydır? O yüzden deneyi bir kere daha, fakat bu sefer kızıl-cık suyunu borudan elimden geldiğince yukarı doğru içime çekiyorum. Ne var ki sonuç kabaca aynı; içime çektiğim tarafta sadece 50 santimetre kadar yükseliyor – tabii öteki tarafta da 50 santimetre alçalıyor, ben de yorgunluktan ölüyorum.

Az önce suyun 1 metre altında, 1 atmosferin onda birine denk bir basınçta şnorkelle yüzmeyi taklit etmiş oldum. Öğrencilerim mütemadiyen bu gösteriden hayrete düşerler ve ihtiyarlayan bu profesörlerinden daha iyi sonuç alabileceklerini sanırlar. Bu yüzden ben de iri yarı güçlü bir çocuğu davet edip denemesini isterim ve var gücüyle çabaladıktan sonra yüzü kıpkırmızı parlar ve şaşkına döner. Benden sadece biraz daha iyi yapabilmiştir – birkaç santimetre daha çok.

İşte bu, şnorkelle hâlâ nefes alabilirken ne kadar aşağıya gidebileceğimizin üst sınırını çizer – topu topu 1 metrecik. Bunu da gerçekten sadece birkaç saniye başarabiliriz. İşte bu yüzden çoğu şnorkel 1 metreden çok daha kısadır, genellikle otuz santimetre civarındadır. Siz de daha uzun bir şnorkel yapmayı deneyin – her tür borudan yapabilirsiniz – ve ne oluyor bir görün.

Biraz şnorkelle yüzmek için daldığınızda göğsünüze ne kadar kuvvet etki ettiğini merak edebilirsiniz. Yüzeyden 1 metre aşağıda hidrostatik basınç bir atmosferin yaklaşık onda biri kadardır, ya da santimetre kareye bir kilogramın onda biri kadar da diyebiliriz. Şimdi, göğüs bölgenizin alanı yaklaşık 1000 santimetrekaredir. O halde göğüs bölgenizdeki kuvvet yaklaşık 1100 kilogramdır, akciğerinizdeki hava basıncından dolayı göğüs bölgenizin iç çeperi üzerinde-

ki kuvvet de yaklaşık 1000 kilogramdır. O yüzden, onda birlik basınç farkı, 100 kilogramlık bir kuvvet farkına karşılık gelir! Mesele-ye bu açıdan baktığınızda şnorkelle yüzmek epey zor görünüyor değil mi? Bir de 10 metre aşağı gitseydiniz hidrostatik basınç tam 1 atmosfer olurdu, her santimetrekareye 1 kilogram – zavallı göğüs bölgeniz üzerine uygulanan kuvvet de, akciğerinizdeki 1 atmosfer basıncın ürettiği dış kuvvetten yaklaşık 1000 kilogram (1 ton) daha fazla olurdu.

Asyalı inci avcılarının –bazıları rutin olarak 30 metre dalmışlardır– böyle derinliklerde hayatlarını tehlikeye sokmuş olmalarının sebebi de budur. Şnorkel kullanamayacakları için nefeslerini tutmak zorunda kalmışlar, onu da ancak birkaç dakika yapabildikleri için ellerini çabuk tutmaları gerekmiştir.

Bir denizaltının arkasındaki mühendislik başarısını ancak şimdi hakkıyla anlayabilirsiniz. 10 metre aşağıda bir denizaltı düşünelim ve içerideki hava basıncı da 1 atmosfer olsun. Hidrostatik basınç (denizaltındaki iç ve dış basınç farkı) yaklaşık metrekarede 10.000 kilogramdır, yani yaklaşık 10 ton. Demek ki çok küçük bir denizaltı da olsa, sadece 10 metre dalmak için bile çok sağlam olması gerekiyor.

On yedinci yüzyılın başlarında denizaltını icat eden zatın –Cornelis van Drebbel, kendisi Hollandalıydı, övünmek gibi olmasın– başarısını bu kadar hayret verici kılan şey budur. Denizaltını su yüzeyinin sadece 5 metre kadar altında çalıştırabiliyordu, ama öyle de olsa, yarım atmosfer hidrostatik basınçla uğraşmak zorundaydı, ayrıca denizaltını deri ve tahtadan inşa etmişti! O zamanki rivayetlere göre gemilerden birisini İngiltere'deki Thames Irmağı'nda, bu derinlikte başarıyla manevra yaptırarak denemiş. Bu modelin altı kürekçiyle çekildiği, on altı yolcu taşıdığı ve saatlerce su altında kalabildiği söyleniyor. Şamandıralar "şnorkel"leri hemen suyun yüzeyinde tutuyordu. Mucit, Kral I. James'i etkilemeyi umuyordu, donanması için üç-beş tane sipariş vermeye ikna etmeye çalışıyordu, fakat ne yazık ki kral ve amiralleri yeterince etkilenmemişti, denizaltı savaşta hiç kullanılmadı. Belki gizli bir silah olarak van Drebbel'in denizaltısı etkileyici değildi, fakat bir mühendislik başarısı olarak fevkaladeydi. Van Drebbel ve ilk denizaltılar hakkında şu sitede daha çok bilgi bulabilirsiniz: www.dutchsubmarines.com/specials/special_drebbel.htm.

Modern donanma denizaltılarının ne kadar derinlere dalabileceği askeri sırdır, fakat genel kaniya göre 1000 metre kadar derine ine-bilirler, ki burada hidrostatik basınç 100 atmosfer yani metrekare-başına bir milyon kilodur (1000 ton). Tabii ABD denizaltılarının çok yüksek kalite çelikten yapıldığını söylemeye gerek yok. Rus denizaltılarının daha güçlü titanyumdan yapıldığı için daha da derinlere dalabildiği söyleniyor.

Bir denizaltının çeperlerinin yeterince sağlam olmaması ya da fazla derinlere dalması durumunda neler olacağını göstermek kolay. Bunu yapmak için bir vakum pompasını üç litrelik bir teneke boya kutusuna bağlayıp, teneke içindeki havayı yavaş yavaş dışarıya pompalıyorum. Dışarıdaki ve içerideki hava basıncı farkı ancak 1 atmosfer kadar olabilir (bunu denizaltınıninkiyle karşılaştırın!). Boya tene-kelerinin yeterince sağlam sayıldığını biliyoruz, fakat gözümüzün önünde, basınç farkı yüzünden, bu teneke kutu, incecik alüminyum meşrubat kutusu gibi çöküyor. Adeta görünmez bir dev eline alıp da avcunun içinde ezmiş gibi. Bir zaman hepimiz muhtemelen plas-tik bir şişeyle temelde aynı şeyi yapmışızdır, içindeki havayı epey emip içine çöktürmüşüzdür. Sezgisel olarak şişenin sizin emme gücünüzden dolayı ezildiğini düşünebilirsiniz. Fakat gerçek sebep, ben boya tenekesindeki havayı boşaltırken, ya da siz su şişesindeki ha-vanın bir kısmını emip çıkarırken, dış hava basıncına karşı koyacak miktarda yeterli iç basıncın artık olmamasıdır. İşte kendi atmosferi-mizin her an yapmaya hazır olduğu şey budur. Kesinlikle her an.

Bir metal boya kutusu, plastik su şişesi – bunlar tamamen sıradan şeyler, değil mi? Fakat bunlara fizikçi gözüyle bakarsak bambaşka bir şey görürüz: muhteşem güçteki kuvvetlerin dengesini. Büyük ölçüde görünmez olan birtakım kuvvetlerin –atmosfer ve hidrostatik basıncın yarattığı kuvvetler ile amansız kütleçekim kuvvetinin– bu dengeleri olmasaydı yaşamamız mümkün olmazdı. Bu kuvvetler o kadar güçlüdür ki, dengeyi biraz bile bozsalar –ya da bozduklarında– felakete sebep olabilirler. Diyelim ki bir uçağın ka-binindeki bir ek yerinde 10 bin metrede (buradaki atmosfer basıncı sadece 0,25 atmosferdir) saatte yaklaşık 900 kilometre hızla gider-ken bir sızıntı oluştu. Ya da Patapsco Irmağı'nın yüzeyinden 15 ila 30 metre aşağıda Baltimore Limanı Tüneli'nin tepesinde saç teli ka-dar bir çatlak açıldı.

Bir dahaki sefere şehirde bir sokakta gezerken, bir fizikçi gibi düşünmeyi deneyin. Gerçekten görmekte olduğunuz ne? Bir kere, her binanın içindeki şiddetli bir çatışmanın sonucunu görüyorsunuz – çalışma hayatındaki çekişmeleri kastetmiyorum. Çatışma alanının bir yanında, dünyanın kütleçekim kuvveti binanın tamamını alaşağı etmeye çalışıyor – sadece duvarları, tavanları ve döşemeleri değil, aynı zamanda çalışma masalarını, klima borularını, posta kanallarını, asansörleri, sekretermiş yönetim kurulu başkanymış demeden herkesi, hatta sabah kahvelerini ve kruvasanları da. Öteki yandaysa, çelik, tuğla ve betonun birleşmiş kuvveti ile yerin kendisi binayı yukarı, göğe itiyorlar.

Şu halde, mimari ve yapı mühendisliğine, aşağı yöndeki kuvveti durdurma mücadelesi sanatı diye bakılabilir. Bazı tüy gibi dikilmiş gökdelenleri yerin kütleçekiminden kaçmış gibi görebiliriz. Ama aslında böyle bir şey yapmış degiller – kelimenin tam anlamıyla bu mücadelenin çitasını yükseltiyorlar. Biraz düşünecek olursanız, bu durağanlığın sadece geçici bir süre için olduğunu anlarsınız. Doğal dünyamızın kuvvetleri aman vermezken yapı malzemeleri aşınır, zayıflar ve çürür. Sadece zaman meselesi.

Bu denge oyunları büyük şehirlerde çok tehditkâr olabilir. New York Şehri'nde 2007'de meydana gelen korkunç bir kazayı ele alalım. Caddenin altındaki 60 santimetre genişliğindeki seksen üç yıllık bir boru, içinde taşıdığı çok yüksek basınçlı buharı birden tutamaz hale geldi. Bunun sonucunda oluşan gayzer, Lexington Bulvarı'nda içine bir çekiciyi de alan 6 metrelik bir çukur açtı ve yanı başındaki yetmiş yedi katlı Chrysler Binası'ndan daha yüksekler kadar püskürdü. Böyle yıkıcı potansiyeldeki kuvvetler hemen hemen her zaman hassas bir dengede tutulmasaydı, kimse sokaklarda dolaşamazdı.

Muazzam güçteki kuvvetler arasındaki bu yenişememe durumlarının hepsi insan marifetinin ürünü değil. Ağaçları düşünün. Sakin, sessiz, hareketsiz, yavaş, şikâyet bilmez – kütleçekimi kuvvetiyle savaşmak için hidrostatik basıncın yanı sıra onlarca biyolojik strateji uygularlar. Her yıl yeni dalların sürgün vermesi, gövdesine yeni halkalar eklenmesi, ağaçla yer arasındaki kütleçekim kuvveti arttıkça ağacın daha da sağlamlaşması ne büyük başarı. Yine ağaç, özsuyunu en yüksek dallarına kadar pompalar. Ağaçların 10 metreden daha uzun olabilmeleri hayret verici değil mi? Ne de olsa su be-

nim kamışında 10 metre kadar yükselebiliyor, hiçbir zaman daha yukarıya çıkmaz; su ağaçlarda neden (ya da nasıl) çok daha yükseklere çıkabiliyor? En uzun Sekoya ağaçları 90 metreden daha yüksek, bir şekilde de ta en tepedeki yapraklarına su çekiyorlar.

Büyük bir fırtınadan sonra kırılmış koca bir ağaca çok üzülmemin sebebi bu. Şiddetli rüzgârlar ya da dallarında biriken buz ve yoğun kar, ağacın ustalıkla idare ettiği kuvvetlerin narin dengesini altüst etmeyi başarabiliyor. Bu hiç bitmeyen mücadeleyi düşününce, atalarımızın dört ayak üzerindeyken iki ayak üzerinde kalkarak kendilerini ispatladıkları o kadim zamanın kadrini daha iyi anladığımı fark ediyorum.

Bernoulli ve Ötesi

Kütleçekiminin aralıksız çekimine meydan okuma ve değişken hava basıncı rüzgârlarının üstesinden gelme konusundaki en şaşırtıcı insan başarısı muhtemelen uçmaktır. Uçmak nasıl mümkün oluyor? Bernoulli ilkesiyle ve kanatların altından ve üstünden akan havayla ilgili bir şey olduğunu duymuş olabilirsiniz. Bu ilke adını, 1738'de *Hydrodynamica* (Hidrodinamik) kitabında, şimdi Bernoulli denklemini dediğimiz şeyi yayımlayan matematikçi Daniel Bernoulli'den almıştır. Basit bir biçimde ifade edersek, sıvı ve gaz akışları için söz konusu olan bu ilkeye göre, bir akışın hızı arttıkça, akıştaki basınç azalır. Bunu kafanızda oturtmak zor, ama uygulamada görebilirsiniz.

Bir dosya kâğıdını –standart A4 kâğıt diyelim– kısa kenarı ağızınıza (içine değil ama) gelecek şekilde elinizde tutun. Kâğıt kütleçekiminden dolayı aşağı kıvrılacaktır. Şimdi, kâğıdın tepesinden dosya doğru ileriye güçlüce üfleyip ne olduğuna bir bakın. Kâğıdın yükseldiğini göreceksiniz. Ne kadar şiddetli üflediğinize bağlı olarak kâğıdı gerçekten hoplatabilirsiniz de. Şimdi Bernoulli ilkesini göstermiş oldunuz – ve bu basit fenomen uçakların nasıl uçtuğunu da açıklar. Çoğumuz bu manzaraya alışık olsak da, bir Boeing 747'nin havalandığını seyretmek ya da bu şey yükselirken koltuğumuzda kemerimiz bağlı durmak hakikaten garip bir deneyim. Çocukların uçakla ilk havalanmalarını nasıl bir sevinçle seyrettiklerine bir bakın. Boeing 747-8'in azami kalkış ağırlığı yaklaşık 450 tondur. Nasıl oluyor da havada kalıyor?

Uçak kanadı, kanadın üstünden geçen hava altından geçen havaya göre daha hızlı akacak biçimde tasarlanır. Bernoulli ilkesinden dolayı, kanadın tepesindeki daha hızlı hava akışı, kanadın yukarısındaki hava basıncını düşürür ve o alçak basınç ile kanadın altındaki yüksek basınç arasında oluşan fark, yukarı doğru kalkışı sağlar. Buna Bernoulli kaldırma kuvveti diyelim. Pek çok fizik kitabı uçakların yukarı kalkışından tamamen Bernoulli kaldırma kuvvetinin sorumlu olduğunu söyler—aslında bu görüş her yerde var. Fakat bir-iki dakika düşünürseniz bunun doğru olamayacağı sonucuna varırsınız. Çünkü doğru olsaydı, o zaman uçaklar nasıl olup da baş aşağı uçabilirdi?

O halde Bernoulli ilkesi yukarı kalkışın tek sebebi olamaz. Bernoulli kaldırma kuvveti dışında bir de tepki kaldırma kuvveti denen bir şey vardır. B. C. Johnson bunu, "Aerodinamik Kaldırma Kuvveti, Bernoulli Etkisi, Tepki Kaldırma Kuvveti" (mb-soft.com/public2/lift.html) adlı o hoş makalesinde ayrıntılı olarak anlatıyor. Tepki kaldırma kuvveti (adını Newton'ın üçüncü yasasından alıyor: Her etki için eşit ve zıt yönde bir tepki vardır), hava uçağın yukarı bakan kanadının altından geçerken devreye girer. Bu hava, kanadın ön kısmından arkaya doğru hareket ederken kanat tarafından aşağı itilir. Bu kısım "etkidir". Bu etkinin yukarı yönde eşit bir hava tepkisiyle karşılaşması gerekir, o yüzden kanat yukarı kaldırılır. Boeing 747'ye gelince (yaklaşık 9.000 metre irtifada saatte 900 kilometre hızla giderken), kaldırma kuvvetinin yüzde 80'den fazlası tepki kaldırma kuvvetinden, yüzde 20'sinden azı da Bernoulli ilkesinden gelir.

Tepki kaldırışını siz kendiniz de bir dahaki sefer arabada giderken kolaylıkla gösterebilirsiniz. Hatta bunu küçükken yapmış bile olabilirsiniz. Araba hareket ederken pencereyi aşağı indirin, kolunuzu dışarı uzatın, elinizi arabanın gidiş yönünde tutun ve parmaklarınızı yukarıyı gösterecek biçimde elinizi eğin. Elinizin yukarı doğru itildiğini hissedeceksiniz. İşte! Tepki kaldırma kuvveti.

Bazı uçakların neden baş aşağı uçabildiklerini şimdi anladığınızı sanabilirsiniz. Ne var ki, bir uçak 180 derece döndüğünde hem Bernoulli kuvvetinin hem de tepki kuvvetinin aşağı yönde olacağının farkında mısınız? Unutmayın, normal uçuşta tepki kuvveti yukarı yöndedir çünkü kanatların açısı yukarı doğrudur, fakat 180 derecelik bir konum değiştirme sonucunda açıları aşağı doğru olacaktır.

Tepki kaldırışını hissetmek için deneyi tekrar yapın. Parmakları-

nızı yukarı doğru eğimli tuttuğunuz sürece yukarı yönde bir kuvvet hissedersiniz. Şimdi parmaklarınızın eğimi aşağı doğru olacak biçimde açıyı değiştirin; bu defa aşağı yönde bir kuvvet hissedeceksiniz.

O halde aşağı doğru uçmak nasıl mümkün oluyor? Gerekli kaldırma kuvveti bir şekilde yukarı yöndeki bir tepki kuvvetinden gelmeli, zira elimizde tek o var. Pilot (baş aşağı uçarken) uçağın ön cephesini, kanatlar tekrar yukarıya doğru bir açı yapacak biçimde kaldırırrsa mümkün olur bu ancak. Uсталık isteyen bir iş, sadece çok tecrübeli pilotlar yapabilir. Sadece tepki kaldırma kuvvetine güvenmek de epey tehlikeli, çünkü doğası gereği tepki kaldırma kuvveti pek istikrarlı değildir. Bu istikrarsızlığı elinizi arabanın penceresinden uzatıp deney yaparken de hissedebilirsiniz. Eliniz epey bir sallanır. Hatta çoğu uçak kazasının kalkışa ve inişe geçerken meydana gelmesinin sebebi, tepki kaldırma kuvvetinin kontrol edilmesindeki bu güçlüktür. Tepki kaldırma kuvvetinin toplam kaldırmadaki yüzdesi, normal irtifada uçuşa oranla kalkışta ve inişte daha yüksektir. Büyük bir uçak indiğinde bazen uçağın dingildedığını hissetmeniz bundandır.

İçecek Hırsızı

Basıncın gizemleri insanı neredeyse mütemadiyen hayrete sürükler. Örneğin kamışla içmenin fiziğine dönelim. İşte düşünmeniz için son bir bilmece, kafa yormaya birebir.

Evde bir gün kendi kendime, "Bardaktan meyve suyu içebileceğim en uzun kamış ne kadar olurdu acaba?" diye sordum. Hepimiz süper uzun kamışlar görmüşüzdür, genellikle kıvrımlı bükümlü, çocukların pek sevdiği.

Daha önce meyve suyunu en fazla yaklaşık 1 metre –ve ancak birkaç saniyeliğine– hareket ettirecek kadar güçlü emebildiğimizi görmüştük, yani 1 metreden daha uzun bir kamışla meyve suyunu içime çekmem mümkün değildi. Bunun üzerine, ince plastik bir borudan 1 metrekesip denemeyekarar verdim. Hiç sorun olmadı; meyve suyunu bir güzel içebiliyordum. Sonra 3 metrelik bir parça kesmeye karar verdim ve mutfağımdaki bir sandalyeye çıkıp yere bir kova su koydum – ve pek tabii ki o kadar uzaktan da içime çekebili-

yordum. Hayret verici. Sonra kendi kendime şöyle düşündüm: Evimin ikinci katına çıksam ve aşağıda, diyelim ki veranda önünde duran ve elinde kocaman bir bardak meyve suyu ya da şarap ya da her ne ise –hadi *çok* büyük bir kızılçık suyuyla votka diyelim– olan birini görsem, benim de elimde gerçekten uzun bir kemiş olsa, o içeceği emerek çalabilir miydim? Bunu keşfetmeye karar verdim, bu da derste yapmaya bayıldığım gösterilerden biri oldu. Öğrencileri her seferinde ağzı açık bırakıyor.

Uzun, sarmalanmış bir şeffaf hortum çıkarıyorum ve ön sıradan bir gönüllü istiyorum. Sınıfta bütün öğrencilerin görmesi için yere büyük bir beher kızılçık suyu –votkasız– koyuyorum. Hortumu tutup uzun bir ayaklı merdivene çıkmaya başlıyorum; yerden yaklaşık 5 metre yukarıya kadar uzanıyor!

"Eveet, işte kemişim," diyerek hortumun bir ucunu yere bırakıyorum. Bir öğrenci hortumun ucunu bardakta tutuyor, sınıfın beklentisini hissediyorum. Öğrenciler benim ta yukarılarda olmama inanamıyor. Hatırlarsanız kızılçık suyunu sadece yaklaşık 1 metre yerinden oynatabildiğime tanıklık etmişlerdi. Şimdiyse yerden yaklaşık 5 metre yukarıdayım. Nasıl olup da bunu yapabiliyorum?

İçime çekmeye başlıyorum, kızılçık suyu hortumun içinde ağır ağır yükselirken biraz da homurdanıyorum: önce 1 metre, sonra 2, sonra da 3. Sonra seviye biraz alçalıyor, fakat hemen ardından kızılçık suyu çok ağır tırmanışına tekrar başlayarak ağzıma kadar geliyor. Yüksek sesle bir "Mmmmm" yapıyorum ve sınıfta alkış kopuyor. Şimdi burada neler oldu? Kızılçık suyunu bu kadar yükseğe kadar nasıl emebildim?

Doğrusunu söylemek gerekirse, hile yaptım. Önemli olduğundan değil, oyunda hiç kural yok çünkü. Her emişimin ardından, artık içime daha fazla hava alamadığım zaman, dilimi hortumun ağzına koyuyorum. Başka bir deyişle hortumun ağzını kapatıyorum, böylelikle kızılçık suyu hortumda kalıyor. Sonra nefesimi bırakıyorum ve tekrar emmeye başlıyorum – ve bunu pek çok defa tekrarlıyorum. Ağzım bir tür emme tulumba oluyor, dilim de bir tür kapama musluğu.

Kızılçık suyunu o 5 metreye çıkarmak için hortumun içindeki basıncı yaklaşık yarım atmosfere indirmem gerekiyor. Evet, merak ediyorsanız eğer, aynı hileyi manometreyle de yapabilirdim, o za-

man çok daha uzun bir sütun kıızılcık suyunu içime çekmeyi başarır-
dım. Bu, denizin ya da gölün yüzeyinin çok daha aşağılarında şnor-
kelle de yüzebileceğim anlamına gelir mi?

Ne dersiniz? Cevabı biliyorsanız bana bir not yazıp ofisime bırakın!

Gökkuşağının Üstü ve Altı, Dışı ve İçi

Gündelik hayattaki pek çok küçük mucize –hakikaten göz alıcı olabiliyorlar– çoğu zaman onları nasıl göreceğimizin eğitimini almadığımız için fark edilmeden geçip gidiyor. Hatırlıyorum da bir sabah, dört-beş yıl kadar önce, en sevdiğim mavi kırmızı Rietveld koltuğumda sabah espressomu içerken birden pencerenin önündeki bir ağacın yapraklarının sebep olduğu, duvarımda kıpraşan gölgeler arasında yuvarlak ışık beneklerinden oluşan güzel bir örüntü fark ettim. Bunları tespit etmiş olmaktan o kadar sevinç duymuştum ki gözlerim ışımış. Karım Susan ne olduğunu tam bilemeden fakat her zamanki ferasetiyle bir sorun olup olmadığını merak etti.

"Bunun ne olduğunu biliyor musun?" diye karşılık verdim, ışık halkalarını işaret ederek. "Bunun neden olduğunu anlıyor musun?" Sonra açıkladım. Işığın duvarda dairelerden ziyade küçük titrek ışımlar yapmasını beklersiniz, değil mi? Fakat yapraklar arasındaki pek çok küçük açıklığın her biri bir *kamera obskura*, yani iğne deliği fotoğraf makinesi gibi davranıyordu; böyle bir fotoğraf makinesi de ışık kaynağının resmini kopyalar – bu örnekte güneşin resmini kopyalıyor. Işığın arasından aktığı açıklıkların şekli şemali ne olursa olsun, açıklık küçük olduğu sürece duvara yansıyan, ışık kaynağının kendisinin kopyasıdır.

O halde yarım güneş tutulmasında, penceremden içeriye akan güneş ışığı duvarımda daireler oluşturmaz – bütün dairelerin bir yanı ısırılmış gibi olur, çünkü güneşin şekli öyle olacaktır. Aristoteles bunu iki bin yıldan uzun bir süre önce biliyordu! Hemen yatak oda-

mın duvarında, ışığın olağanüstü özelliklerini gösteren bu ışık beneklerini görmek müthiştı.

Gökkuşağının Sırları

Aslında ışık fiziğinin harikulade etkileri baktığımız her yerde vardır, kimi zaman en sıradan yerlerde, kimi zaman da doğanın en güzel yaratımlarımdan bazılarında. Sözelimi gökkuşakları: fantastik, harika fenomenler. Ve her yerdeler. Büyük biliminsanları –optiğın babası olarak bilinen, on birinci yüzyılda yaşamış Müslüman bilimadamı ve matematikçi İbn El Haytam; Fransız filozof, matematikçi ve fizikçi René Descartes; ve bizzat Sir Isaac Newton– gökkuşaklarını büyüleyici bulmuş ve açıklamaya çalışmışlardır. Buna rağmen pek çok fizik hocası derslerinde gökkuşağını gözardı eder. Buna inanamıyorum; bence *hainlik* bu.

Gökkuşağının fiziğinin kolay olmasından değil. O halde neden? Hayal gücümüzü öylesine kuvvetli çekıştiren bir şeyi ele almayı nasıl reddedebiliriz? Bu görkemli eserlerin içkin güzelliğinin arkasındaki sırrı anlamayı nasıl istemeyebiliriz? Derste gökkuşağını anlatmaktan her zaman zevk almışımdır; öğrencilerime, "Bu dersin sonunda hayatınız asla eskisi gibi olmayacak, asla," derim. Aynısı sizin için de geçerli.

Eski öğrencilerim ve derslerimi internetten izlemiş olan başkaları onlarca yıldır bana normal postayla ve e-postayla gökkuşağı ve başka atmosfer fenomenlerinin harika resimlerini gönderip duruyorlar. Adeta tüm dünyaya yayılmış bir gökkuşağı izci şebekem varmış gibi hissediyorum. Bu resimlerden bazıları olağanüstü, özellikle de Niagara Şelalesi'nden çekilmiş olanlar – o kadar çok çisenti var ki gökkuşakları muhteşem. Belki daha sonra siz de bana resim göndermek istersiniz. Çekinmeyin!

Eminim hayatınızda onlarca belki yüzlerce gökkuşağı görmüşsünüzdür. Florida ya da Hawaii'de veya güneş parlarken sık sağanakların olduğu başka tropikal bölgelerde zaman geçirdiyseniz daha da çok görmüş olabilirsiniz. Güneş parlarken bahçenizi bir hortumla ya da püskürteçle suladıysanız, muhtemelen gökkuşakları yaratmışsınızdır.

Çoğumuz pek çok gökkuşağına *bakmışızdır*, fakat çok azımız gökkuşağı *görmüşüzdür*. Eski mitolojiler bunlara tanrıların yayları, köprüleri ya da patikaları derdi – ölümlülerin evleriyle tanrılarınkini bağlayan yollar. Batıda çok bilindiği gibi, gökkuşağı Tanrı'nın Tervat'ta verdiği, yeryüzüne bir daha her şeyi yıkıp yok eden bir tufan getirmeyeceği sözünü temsil eder: "Yayımı bulutlara yerleştirdim."

Gökkuşağındaki cazibenin bir kısmı çok geniş bir alana yayılmasından kaynaklanır; gökyüzünde bir yandan bir yana heybetli bir şekilde uzanır, ömrü de pek azdır. Fakat fizikte çoğu zaman olduğu gibi, onların da kökenleri son derece küçük bir şeyin çok büyük rakamlarda bir araya gelmesine dayalıdır: çapları bazen 1 milimetreden az olan ve gökyüzünde süzülen minicik küresel su topları.

Biliminsanları en az bin yıldır gökkuşağının kökenlerini araştırırsun, gerçekten akla yatan ilk açıklamayı 1704'te *Opticks* (Optik) adlı eserinde Isaac Newton sundu. Newton, gökkuşağının oluşumunda hepsi temel önemde olan birkaç şeyi birden anlamıştı. İlk, normal beyaz ışığın bütün renklerin birleşmesinden oluştuğunu gösterdi ("gökkuşağının bütün renklerinden" diyecektim, ama o zaman aceleci davranmış oluruz). Cam bir prizmada kırınmasını (bükülmesini) sağlayarak ışığı bileşen renklerine ayırdı. Sonra, kırınmış ışığı tekrar başka bir prizmadan geçirerek renkli ışığı birleştirip tekrar beyaz ışığa dönüştürmek suretiyle prizmanın kendisinin bir şekilde renkleri yaratmadığını ispatladı. Ayrıca su dahil pek çok farklı malzemenin ışığın kırınımına yol açacağını keşfetti. Gökkuşağını oluşturmada ışığın kırınımına ve yansımaya sebep olan yağmur damlalarının kilit öneme sahip olduğunu işte bu şekilde anladı.

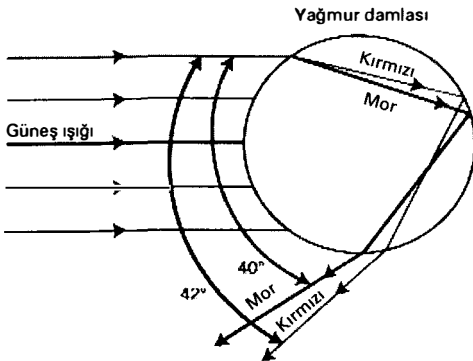
Newton doğru bir biçimde şu sonuca vardı: Gökyüzündeki bir gökkuşağı, güneş, sayısız yağmur damlası ve bu yağmur damlalarını tam uygun açıdan gözlemleyen gözlerinizin başarılı bir ortak ürünüdür. Bir gökkuşağının nasıl oluştuğunu anlamak için, ışığın bir yağmur damlasının içine girdiğinde ne olduğunu mercek altına almamız gerekir. Fakat unutmayın ki bu tek bir yağmur damlası için söyleyeceklerim gerçekte gökkuşağını meydana getiren sayısız damla için de geçerlidir.

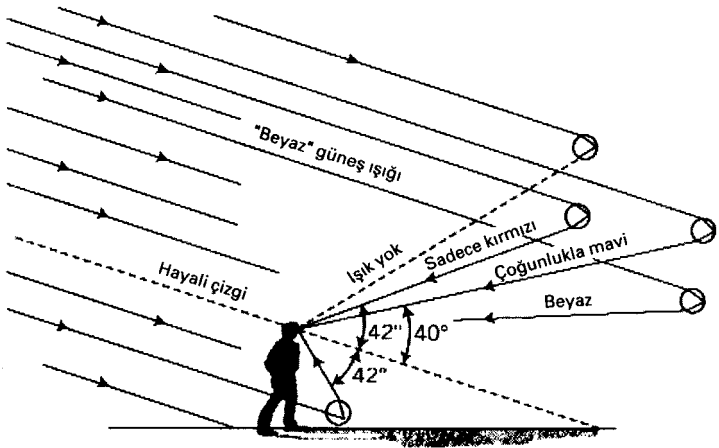
Gökkuşağını görmemiz için üç şartın yerine gelmesi gerekiyor. Birincisi, güneşin arkanızda olması şart. İkincisi, gökyüzünde önünüzde yağmur damlaları olması gerekir – kilometrelerce uzakta da

olabilir, sadece birkaç yüz metre ötede de. Üçüncüsü, güneş ışığının bulut gibi hiçbir engelle karşılaşmadan yağmur damlalarına ulaşabilmesi gerekir.

Bir ışık ışını yağmur damlasına girip kırınınca bütün bileşen renklerine ayrılır. Kırmızı ışık en az kırılırken –yani bükülürken– mor ışık en çok kırınandır. Bütün bu farklı renkli ışınlar yağmur damlalarının arkasına doğru yolculuklarını sürdürürler. Işığın bir kısmı yoluna devam edip yağmur damlasından çıkar, fakat bir kısmı da bir açıyla çarpıp yağmur damlasının ön tarafına geri döner, yani yansır. Aslında ışığın bir kısmı birden çok kez yansır, fakat bu ancak daha sonra önemli hale gelir. Şu an için sadece bir kere yansıyan ışıkla ilgileniyoruz. Işık damlanın önünden çıkınca bir kısmı tekrar kırınır, farklı renklerdeki ışınları daha da ayırıştırır.

Bu ışık ışınları yağmur damlasından geçerken kırınıp yansıdıktan ve tekrar kırındıktan sonra yönleri bayağı değişmiştir. Gökkuşağını görmemizi sağlayan ana unsur, kırmızı ışığın, güneş ışığının damlaya ilk girdiği yönden *daima* yaklaşık 42 derece *daha küçük* bir açıyla yağmur damlasından çıkmasıdır. Ve bu bütün yağmur damlaları için aynıdır, çünkü güneş fiilen sonsuz uzaklıkta sayılır. Kırmızı ışığın çıkış açısı 0 dereceyle 42 derece arasında her şey olabilir, fakat asla 42 dereceden fazla olamaz – ve bu azami açı farklı renklerin her biri için farklıdır. Mor ışık için en büyük açı yaklaşık 40 derecedir. Her bir renge ait bu farklı azami açılar gökkuşağında ki renkli şeritleri açıklamaktadır.





"Hayali çizgi" ile 42 derece açı yapan bütün yağmur damlaları kırmızı olur. 40 derece açı yapanlar mavi olur. 40'tan küçük derecelerde açı yapanlar beyaz olur (güneş ışığı gibi). 42 dereceden büyük açı yapan yağmur damlalarından ise ışık gelmez.

Şartlar uygun olduğunda bir gökkuşağını tespit etmenin kolay bir yolu vardır. Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, güneşten başlayıp kafamdan geçerek yerdeki gölgeye giden bir hat çizersem, bu çizgi güneşin yağmur damlalarına girdiği yöne tamı tamına paraleldir. Güneş gökte yükseldikçe bu çizgi de dikleşecek, gölge de kısılacaktır. Tabii tersi de geçerli. Güneşten gelip kafamdan geçerek yerdeki gölgeye giden bu çizgiye hayali çizgi diyeceğiz. Bu çizgi size gökkuşağını görebilmek için gökyüzünde nereye bakmanız gerektiğini söyleyeceğinden çok önemlidir.

Hayali çizgiden yaklaşık 42 derece uzağa bakarsanız –dosdoğru yukarıya, sağa ya da sola olmasının önemi yok– orası gökkuşağının kırmızı bandını göreceğiniz yerdir. Yaklaşık 40 derece uzağa –yukarıya, sağa ya da sola– baktığınızdaysa gökkuşağının mor bandını göreceksiniz. Fakat aslında moru gökkuşağında görmek zordur, o yüzden maviyi çok daha kolaylıkla görürsünüz – dolayısıyla bundan böyle sadece mavi diyeceğiz. Bunlar daha önce, yağmur damlalarını terk eden ışığın azami açılarını anlatırken sözünü ettiğim aynı açılar değil mi? Evet – ve tesadüf de değil. Şekle bir daha bakın.

Peki ya gökkuşağındaki mavi bant? Hatırlarsanız, onun sihirli rakamı yaklaşık 40 dereceydi, kırmızı banttın 2 derece daha az. O halde mavi ışık *farklı yağmur damlalarından azami* 40 derecelik bir açıyla kırılırken, yansırken ve tekrarkırılırken görülebilir. Yani mavi ışığı hayali çizgiden 40 derece uzakta görürüz. 40 derecelik bant hayali çizgiye 42 derecelik banttın daha yakın olduğundan mavi bant daima gökkuşağının kırmızı bandının *iç tarafında* olacaktır. Gökkuşağını oluşturan öteki renkler –portakal, sarı, yeşil– kırmızı ve mavi bantlar arasında bulunur. Bu konuda daha fazla bilgi için internetten gökkuşağı dersime bakabilirsiniz: ocw.mit.edu/courses/physics/8-03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video-lectures/lecture-22/.

Şimdi belki merak ediyorsunuzdur, mavi ışığın azami açısında sadece mavi ışık mı görürüz? Ne de olsa kırmızı ışık (42 dereceden daha az olan) 40 derecede de ortaya çıkabilir. Bu soruyu sorduysanız bravo size – çok zekice bir soru. Cevabı şu: Belli bir renk azami açısında bütün öteki renklere baskın çıkar. Ama kırmızının durumu farklıdır; açısı en yüksek olduğundan oradaki *tek* renktir.

Gökkuşağı neden düz bir doğru değil de yay şeklindedir? Gözlerinizden başınızın gölgesine uzanan hayali çizgiye ve sihirli sayı 42'ye tekrar bakın. Hayali çizgiden öteye –her yöne– 42 derece ölçtüğünüzde bir renk yayını takip edersiniz. Fakat biliyorsunuz ki bütün gökkuşakları tam yay biçiminde değildir – bazıları gökte ufak parçacıklardan ibarettir. Bu, gökyüzünde her yönde yeterli yağmur taneleri olmadığında meydana gelir ya da gökkuşağının belli kısımları bulutların gölgesine denk geldiğinde.

Güneş, yağmur damlaları ve gözleriniz arasındaki bu işbirliğinin başka bir yönü daha var ve bunu bir kere gördünüz mü, gökkuşaklarının –doğal ya da yapay– neden böyle olduğuna dair çok daha fazla şey anlayacaksınız. Örneğin neden bazı gökkuşakları sadece ufku kucaklarken bazıları kocaman oluyor? Kıyıya vuran dalgalar da ya da fıskiyelelerde, şelalelerde ya da bahçe hortumunuzun püskürttüğü sudaki gökkuşaklarının açıklaması nedir?

Gözlerinizden kafanızın gölgesine giden hayali çizgiye tekrar dönelim. Bu çizgi, arkanızda güneşten başlar ve yere kadar uzanır. Ne var ki bu çizgiyi hayalinizde istediğiniz kadar uzatabilirsiniz, hatta kafanızın gölgesinden daha da ötelere. Bu hayali çizgi çok kul-

lanışlıdır; çevresi gökkuşağı olan bir dairenin merkezinden (güneşin karşı noktası) geçip gittiğini gözünüzde canlandırabilirsiniz. Bu daire, eğer dünya engel olmasaydı gökkuşağının nerede oluşacak olduğunu gösterir. Güneşin gökyüzünde ne kadar yüksekte olduğuna bağlı olarak gökkuşağı da ufukta alçalacak ya da yükselecektir. Güneş çok yüksekten gökkuşağı ufuktan sadece başını gösterir, oysa ikinci vakti güneş batmadan hemen önce ya da sabah erken saatte güneş doğmak üzereyken, güneşin gökte alçakta, sizin gölgenizin de uzun olduğu zaman, işte o zaman gökkuşağı muazzam büyüklükte olup göğün yarısına uzanabilir. Neden yarısına? Çünkü ufkun üstünde olabileceği azami açı 42 derecedir – yani 45 dereceye yakın. Bu da başınızdan dosdoğru yukarıya giden 90 derecenin yarısı eder.

Peki gökkuşağı avına nasıl çıkabilirsiniz? Öncelikle bir gökkuşağının ne zaman oluşacağına dair içgüdülerinize güvenin. Çoğumuzun bu konuda sezgileri güçlüdür: şiddetli bir yağmurdan hemen önce ya da sonra güneşin parladığı o zamanlar. Ya da hafif bir sağanak varken ve güneş ışığı hâlâ yağmur damlalarına ulaşabiliyorken.

Gökkuşağının çıkacağını hissettiğiniz zaman yapacağınız şey ise şu: Önce arkanızı güneşe dönün. Sonra başınızın gölgesini bulun, sonra hayali çizgiden yaklaşık 42 derece uzaktaki herhangi bir yöne bakın. Yeterli güneş ışığı varsa, yeterli yağmur damlası varsa, işbirliği işe yarayacak ve rengârenk bir yay göreceksiniz.

Diyelim ki güneşi hiç göremiyorsunuz – bir şekilde bulutların ya da binaların arkasına gizlenmiş ama parlayıp duruyor. Güneşle yağmur damlaları arasında bulutlar olmadığı sürece, yine de bir gökkuşağı görebilmeniz gerekir. Doğuya bakan oturma odamdan, ikinci vakti, batıda olan güneşi görmediğim zaman gökkuşakları görebiliyorum. Aslında çoğu zaman bir gökkuşağını yakalamak için hayali çizgi ve 42 derece numarasına ihtiyacınız yok, fakat her ikisine de dikkat etmenizin büyük önemi olduğu bir durum var. Massachusetts kıyıları açığındaki Plum Adası kumsallarında yürümeyi çok severim. İkinci vakti güneş batıdadır, okyanus da doğuya düşer. Dalgalar yeterince yüksek olursa ve pek çok küçük su damlası çıkarırlarsa, bu damlacıklar yağmur damlaları gibi davranırlar ve siz de iki gökkuşağının iki küçük parçasını görürsünüz: bir tanesi hayali çizginin yaklaşık 42 derece solunda ve ikincisi de yaklaşık 42 derece sağında. Bu gökkuşakları sadece bir an kalır, o yüzden önceden ne-

reye bakacağınızı bilerseniz büyük yardımı olur. Sürekli başka dallar da geleceğinden, yeterince sabrederseniz daima başarılırsınız. Devamı bu bölümün ilerisinde.

Gelecek sefer bir gökkuşağı yakaladığınızda yapabileceğiniz bir şey daha var. Bazı ışıkların yağmur damlasından kırınarak çıktığı azami açı konusunu hatırlıyor musunuz? Bazı yağmur damlalarından mavi, kırmızı ya da yeşil rengin yansıdığını görseniz de, yağmur damlalarının kendileri o kadar seçici olamaz: Pek çok ışığın 40 dereceden *daha az* açılarda da kırınmasına, yansımaya, tekrar kırınmasına yol açar. Bu ışık aşağı yukarı aynı şiddetlerdeki farklı renklerin bir karışımıdır. Bunu beyaz ışık olarak görürüz. Gökkuşağının mavi bandı içinde gökyüzünün çok parlak ve beyaz olmasının sebebi budur. Aynı zamanda, kırınan, yansıyan ve tekrar kırınan ışık ışınlarının hiçbirisi yağmur damlasından 42 derecenin ötesinde bir açıyla çıkamaz, o yüzden yayın hemen dışarısındaki gökyüzü yayın içine göre daha karanlıktır. Bu etki gökkuşağının iki yanını karşılaştırdığınızda çok iyi görünür. Eğer özellikle onu aramıyorsanız muhtemelen farkına bile varmazsınız. The Atmospheric Optics internet sitesinde bu etkiyi görebileceğiniz şahane resimler var: www.atoptics.co.uk.

Öğrencilerime gökkuşaklarını açıklamaya başlayınca ne kadar zengin bir konu olduğunu fark ettim – ve ne kadar çok şey öğrenmem gerektiğini. Çifte gökkuşağını ele alalım, muhtemelen zaman zaman görmüşsünüzdür. Aslında gökyüzünde hemen her zaman iki gökkuşağı vardır: birinci gökkuşağı yani işlediğimiz konu ve bir de ikinci (tali) dediğimiz gökkuşağı.

Çifte gökkuşağı görmüşlüğünüz varsa, ikinci yayın ilkinden daha sönük olduğunu muhtemelen fark etmişsinizdir. Ama ikinci yayda renklerin sırasının mavi dışarıda ve kırmızı içeride, yani ilkinin tersi olduğunu muhtemelen *fark etmemişsinizdir*. Bu kitabın fotoğraf bölümünde şahane bir çifte gökkuşağı resmi var.

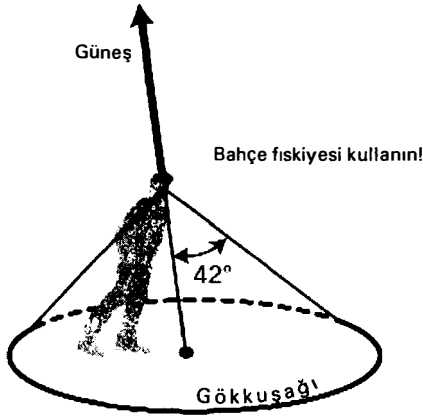
İkinci gökkuşağının kökenini anlamak için ideal yağmur damlamıza geri dönmemiz gerekiyor – tabii yine unutmayalım ki ikinci bir gökkuşağını oluşturmak için de sayısız damla gerekir. Damlalara giren ışık ışınlarının bir kısmı sadece bir defa yansır; bazılarıysa çıkmadan önce iki kere yansır. Işık ışınları belli bir yağmur damlasına girdiğinde pek çok defa yansiyabiliyorken, birinci gökkuşağı

sadece *bir defa* yansıyanlardan meydana gelir. Öte yandan ikinci gökkuşağı, kırınarak dışarı çıkmadan önce içeride iki defa yansıyanlardan meydana gelir. Yağmur damlasının içindeki bu fazladan zıplama ikinci gökkuşağındaki renklerin tersine çevrilmesinin sebebidir.

İkinci gökkuşağının birinci gökkuşağından farklı bir konumda olmasının sebebi –daima onun dışarısındadır– iki kere yansıyan kırmızı ışınların, damlayı daima yaklaşık 50 dereceden büyük (evet daha büyük) açılarla terk etmeleridir ve iki defa yansımış mavi ışınlar da dışarıya daima yaklaşık 53 dereceden daha büyük açılarla çıkar. Bu yüzden ikinci gökkuşağını birinci gökkuşağının 10 derece *dışarısında* aramanız gerekir. İkinci gökkuşağının çok daha sönük olmasının sebebi, yağmur damlalarının içinde iki defa yansıyan ışığın, bir defa yansıyan ışığa göre çok daha az olmasıdır, o yüzden de gökkuşağını oluşturacak daha az ışık olur. İkinci gökkuşağının görülmesini zorlaştıran tabii ki budur, fakat şimdi genel olarak birinci gökkuşaklarına eşlik ettiklerini ve onları nerede arayacağınızı öğrendiğinize göre bunlardan çok daha fazla göreceğinize eminim. Ayrıca The Atmospheric Optics sitesine birkaç dakika ayırmanızı da öneririm.

Artık gökkuşağının nasıl oluştuğunu bildiğinize göre, kendi bahçenizde, otoparkınızın girişinde, hatta kaldırımında sadece bir bahçe hortumuyla küçük bir optik sihir yapabilirsiniz. Fakat burada yağmur damlalarını yönlendirebileceğiniz için ve fiziksel olarak size yakın olduklarından, arada birkaç büyük fark var. İlki, güneş çok yukarılardayken bile gökkuşağı yapabilirsiniz. Neden? Çünkü kendinizle yerdeki gölgeniz arasında yağmur damlaları oluşturabilirsiniz, doğal şartlarda nadiren meydana gelen bir şey. Güneş ışığının ulaştığı yağmur damlaları olduğu sürece, gökkuşakları olabilir. Bunu zaten yapmış olabilirsiniz, ama belki de bilerek değil.

Hortumun ucunda bir ağızlık varsa ince püskürtmeye ayarlayın, böylece damlacıklar epey küçük olur. Güneş tepeye çıkınca hortumun ağzını yere yöneltip suyu püskürtmeye başlayın. Dairenin tamamını hemen göremezsiniz, fakat gökkuşağının parçalarını göreceksiniz. Ağızlığı daire biçiminde hareket ettirmeye devam ederken, parça parça gökkuşağı dairesinin tamamını göreceksiniz. Neden mi böyle yapmak zorundasınız? Çünkü başınızın arkasında gözünüz yok!



Hayali çizgiden yaklaşık 42 derece uzakta kırmızıyı göreceksiniz, dairesel kuşağın iç kenarı mavi olacak ve kuşağın içinde beyaz ışık göreceksiniz. Bahçemi sularken bu yaratma eylemini gerçekleştirmeye bayılırım; özellikle tatmin edici kısmı, çepeçevre dönüp tam 360 derecelik bir gökkuşağı yapabilmektir. (Tabii güneş o zaman hep arkanızda olmayacak.)

1972'de soğuk bir kış günü sınıfım için bu ev yapımı gökkuşaklarından bazı iyi fotoğraflar çekmeye o kadar azmetmişim ki, zavallı kızım Emma'nın –daha yedi yaşındaydı– eline bahçemdeki hortumu tutuşturup, havaya su püskürtürken fotoğraf makinesiyle resimler çektim. Galiba bir bilimsanının kızıysanız, bilim uğruna biraz fedakârlığa katlanmanız gerekiyor. Ama neticede gerçekten müthiş resimler çektim; garaj girişinin kontrast siyah zeminini arka plan olarak kullanarak ikinci gökkuşağının fotoğrafını almayı bile başardım. Kitaptaki fotoğraflarda Emma'nın resmini görebilirsiniz.

Umarım bunu siz de denersiniz – ama yazın yapın. İkinci kuşağı göremezseniz de fazla hayal kırıklığına uğramayın – garaj yolunuz yeterince koyu renk değilse ikinci gökkuşağı görünmeyecek kadar sönük olabilir.

Gökkuşaklarının nasıl yakalanacağını anladıktan sonra, artık onları aramak için giderek daha karşı koyulmaz bir istek duyacaksınız. Bengenellikle kendime engel olamam. Geçenlerde Susan ve ben arabayla eve dönüyorduk, yağmur başladı, fakat biz doğuya gidiyor-

duk, güneşe doğru. Ben de –bayağı da bir trafik olmasına rağmen– arabayı kenara çektim; arabadan çıktım, döndüm ve işte oradaydı, güzeller güzeli!

İtiraf etmeliyim, güneş parıldarken ne zaman bir fıskiye'nin yanından yürüyerek geçsem, orada olacağını bildiğim gökkuşağını aramak için kendimi konumlandırıyorum. Güneşli bir gün bir fıskiye'nin yanından geçiyorsanız siz de deneyin. Sırtınızı güneşe dönerek güneşle fıskiye arasında durun; unutmayın, fıskiye'nin püskürttüğü sular gökyüzündeki asılı kalmış yağmur damlaları gibi hareket eder. Başınızın gölgesini bulun –böylece hayali çizgi kurulur. Sonra o çizgiden 42 derece uzağa bakın. O yönde yeterince damla varsa gökkuşağının kırmızı bandı gözünüze ilişecektir, sonra da yayın geri kalan kısmı hemen görüntüye girer. Bir fıskiyede tam olarak yarım daire şeklinde bir yay görmek nadiren mümkün olur–bunun tek yolu fıskiye'ye çok yakın olmaktır– fakat görünüşü o kadar güzeldir ki daima denemeye değer.

Bir kere buldunuz mu, sizi uyarayım, yanınızdan geçenlerin de ondan haberdar olması isteği uyanabilir içinizde . Bu fıskiye gökkuşaklarını sık sık yanımdan geçenlere işaret ederim, eminim bazıları da beni tuhaf bulur. Fakat ben, böyle gizli harikaların tadını neden tek başıma ben çıkarayım ki, diye düşünürüm. *Tabii ki* onları insanlara göstereceğim. Hemen önünüzde bir gökkuşağının olabileceğini biliyorsanız onu neden aramayasınız, neden başkalarının da görmesini sağlamayasınız? O kadar güzel ki.

Öğrenciler sık sık sorarlar, bir üçüncü gökkuşağı da var mı diye. Cevap hem evet hem hayır. Üçüncü gökkuşakları, sizin de tahmin etmiş olabileceğiniz gibi yağmur damlalarının içindeki üç yansıma sonucu ortaya çıkar. Bu kuşak güneşin merkezindedir, karşı noktasının merkezindeki birinci kuşak gibi onun da 42 derece yarıçapı vardır ve kırmızı dış taraftadır. Dolayısıyla onu görmek için güneşe doğru bakmanız gerekir ve bir de güneşle sizin aranızda yağmur yağması. Fakat durum bu olunca hemen hemen asla güneşi görmezsiniz. Başka sorunlar da var: Pek çok güneş ışını hiç yansımadan yağmur damlalarının içinden geçip gidecektir, ki bu da fiilen üçüncü gökkuşağının görülmesini imkânsız kılacak bir biçimde güneşin etrafında çok parlak ve çok büyük bir kızartı yaratacaktır. Üçüncü gökkuşağı ikinci gökkuşağından daha da sönüktür. Ayrıca birinci ve

ikinci kuşaklardan çok daha geniştir; dolayısıyla gökkuşağının zaten sönük olan ışığı gökyüzünde daha da fazla yayılır ve görülmesi daha da zorlaşır. Bildiğim kadarıyla bir üçüncü gökkuşağı fotoğrafı mevcut değil, üçüncü gökkuşağını gören birini de tanımıyorum. Yine de görüldüğüne dair bazı söylentiler var.

Kaçınılmaz bir şekilde insanlar gökkuşaklarının gerçek olup olmadığını bilmek istiyor. Yoksa bunlar serap mı da biz yaklaştıkça geriye çekiliyorlar, diye merak ediyorlar. Hem gökkuşağının sonunu neden göremiyoruz? Eğer aklınızın bir yerinde bu soru vardysa, rahat nefes alın. Gökkuşakları gerçektir, gerçek güneş ışığının gerçek yağmur damlalarıyla ve gerçek gözlerinizle etkileşimi sonucu meydana gelir. Fakat gözlerinizle güneşin ve yağmur damlalarının hassas bir işbirliğiyle meydana geldiği için, caddenin karşısındaki kişiden farklı bir gökkuşağı görürsünüz. Aynı derecede gerçek, ama farklı.

Gökkuşağının yere değen ucunu genellikle göremeyişimizin sebebi onun var olmaması değil, bizden çok uzakta olması ya da binaların, ağaçların veya dağların arkasına saklanması, veyahut orada havada daha az yağmur damlası bulunması ve gökkuşağının fazla sönük kalmasıdır. Fakat gökkuşağına yeterince yaklaşırsanız dokunabilirsiniz bile; örneğin bahçe hortumuyla yaptığınız gökkuşağına dokunabilmeniz gerekir.

Ben şahsen duş alırken gökkuşaklarını elimde tutma alışkanlığı bile edindim. Bunu bir gün tesadüfen keşfettim. Duşumdan akan suya doğru baktığımda, duşun içinde iki (evet iki!) parlak birinci gökkuşağı gördüm, her biri yaklaşık otuz santimetre uzunluğunda ve iki-üç santimetre genişliğindeydi. Çok heyecan vericiydi, çok güzel; rüya gibiydi. Uzanıp ellerime aldım. Ne his ama! Kırk yıldır gökkuşağı dersleri veriyorum ve daha önce hiçbir zaman kolumu uzatma mesafesinde iki tane birinci gökkuşağı görmemiştim.

Burada meydana gelen şey şu: İnce bir dilim güneş ışığı banyo penceresinden duşuma vurmuştu. Bir bakıma, bir fısıkiyenin önünde değil içinde dikiliyordum. Su bana çok yakın olduğundan ve gözlerimin arasındaki mesafe de 7-8 santimetre olduğundan, her bir gözümün kendi ayrı hayali çizgisi oluşmuştu. Açılar tam uygundu, su miktarı tam uygundu ve her bir gözüm kendi birinci gökkuşağını gördü. Gözümün birini kapattığımda gökkuşaklarından biri kayboluyordu; öteki gözümü kapattığımda öteki kuşak kayboluyordu. Bu

hayret verici manzaranın resmini çekmeyi çok isterdim, fakat çeke-mezdim çünkü fotoğraf makinemin sadece bir "gözü" vardı.

O gün o gökkuşaklarına o kadar yakın olmak onların ne kadar gerçek olduklarını yeni bir şekilde anlamamı sağladı. Başımı hareket ettirdiğimde onlar da hareket ediyordu, fakat başım olduğu yerde kaldığı sürece onlar da kalıyordu.

Arada bir sabah duşlarımın vaktini bu gökkuşaklarını yakalayacağım zamana göre ayarlarım. Güneşin banyo pencereinden uygun açıyla içeri göz atması için gökyüzünde uygun noktada bulunması gerekir, bu da sadece mayıs ortasıyla temmuz ortası arasında olur. Güneşin belli aylarda erken doğup gökyüzünde daha yukarılara çıktığını muhtemelen biliyorsunuzdur; ayrıca Kuzey Yarımküre'de kış aylarında (doğunun) güneyinde daha çok yükselir, yazları da (doğunun) kuzeyinde daha çok yükselir.

Banyo pencere güneye bakıyor ve o tarafta bir bina var, böylece güney yönünden ışık asla girmiyor. O halde güneş ışığı sadece kabaca güneydoğu tarafından geliyor. Duşkuşaklarını ilk gördüğüm zaman çok geç vakitte, saat on civarı duş alıyordum. Kendi duşunuzda gökkuşakları görmek için güneş ışığının püsküren suya ulaşabileceği bir banyo penceresine ihtiyacınız olacak. Aslında, banyo penceresinden bakıp da güneşi hiç göremiyorsanız duşkuşağı aramanızın anlamı yok – hiç oluşmaz. Güneş ışığının gerçekten duşunuza ulaşabilmesi şart. Ama doğrudan içeri girse bile hiç garantisi yok, çünkü pek çok su damlasının sizin hayali çizginizin 42 derece uzağında bulunması gerekir – ve bulunmayabilir.

Bunlar muhtemelen yerine getirilmesi zor şartlar, ama neden denenmesin? Bir de güneşin ikindi vakti banyonuzda tam uygun biçimde vurduğunu keşfederseniz, o zaman belki duş saatlerinizi değiştirmeyi düşünebilirsiniz.

Denizciler Neden Güneş Gözlüğü Takar

Her gökkuşağı avına çıkışınızda, güneş gözlükleriniz polarize dediğimiz türdense aman çıkarmayı unutmayın, yoksa gösteriyi kaçırabilirsiniz. Bununla ilgili komik bir tecrübem oldu. Daha önce dediğim gibi Plum Adası'nın kumsalları boyunca yürüyüşe çıkmayı çok severim. Dalgaların sıçrattığı sularda nasıl küçük gökkuşakları gö-

rebileceğinizi de açıklamıştım. Yıllar önce bir gün kumsal boyunca yürüyordum. Güneş pırıl pırıldı ve rüzgâr esiyordu, dalgalar kumsalla yaklaşırken devrildikçe epey su püskürüyordu – o yüzden bu bölümün başında sözünü ettiğim gibi sık sık küçük gökkuşağı parçacıkları görüyordum. Bunları arkadaşşıma göstermeye başladım, o da benim söz ettiğim şeyi göremediğini söyledi. Bu şekilde beş-altı defa bir ileri bir geri gitmişizdir. "İşte bir tane," diye bağıırıyordum birazcık kızgın. "Hiçbir şey görmüyorum," diye bağıırarak karşılık veriyordu arkadaşım. Derken bende ampul yandı ve gözlüklerini çıkarmasını istedim. Baktığımda – tabii ki polarize güneş gözlükle-riydi. Gözlükleri yokken gökkuşaklarını gördü, hatta sonra bana o göstermeye başladı! Neler olup bitiyordu?

Gökkuşağı doğadaki acayıplıklardan biridir çünkü ışığının hemen hemen tamamı polarizedir. Muhtemelen gözlükleri tarif etmek için söylenen "polarize" (kutuplanmış) terimini biliyorsunuzdur. Bu terim teknik açıdan tam doğru değil, amasize kutuplanmış ışığı açıklayayım – sonra güneş gözlüklerine ve gökkuşaklarına geleceğiz.

Dalgalar "bir şey"in titreşimleri olarak elde edilirler. Titreşen akort çatalı ya da keman teli ses dalgaları çıkarır, bir sonraki bölümde bunlardan söz edeceğim. Işık dalgaları titreşen elektronlarla elde edilir. Şimdi, titreşimlerin hepsi tek bir yönde ve de dalganın yayılım yönüne dikse, bu dalgalara doğrusal kutuplanmış dalgalar deriz. Kolaylık olsun diye bundan böyle "doğrusal" terimini atıyorum çünkü bu tür kutuplanmış ışıktan sadece bu bölümde söz ediyorum.

Ses dalgaları asla kutuplanmaz, çünkü basınç dalgalarındaki salınımlı hava molekülleri olarak daima aynı yönde yayılırlar – bir Slinky'de* meydana getirebileceğiniz dalgalar gibi. Ne var ki ışık kutuplanabilir. Güneş ışığı ya da evinizdeki lambalardan gelen ışık kutuplanmış değildir. Bununla birlikte, kutuplanmış olmayan ışığı kolaylıkla kutuplanmış ışığa çevirebiliriz. Bunun bir yolu, polarize (kutuplanmış) denilen güneş gözlüklerinden almaktır. Bu gözlüklerin adının neden tam doğru olmadığını artık biliyorsunuz: Aslında "polarize eden" (kutuplayan) güneş gözlükleridir. Başka bir yol da bir doğrusal kutuplayıcı satın almak (Polaroid Firması'nın kurucusu

* Uzayarak açılıp sonra tekrar kendi üstüne kapanarak zıplayabilen, metal veya plastikten yapılma, helezon şeklinde bir yay. –y.n.

Edwin Land tarafından icat edilmiştir) ve dünyaya onunla bakmaktır. Land'in kutuplayıcıları hep 1 milimetre kalınlığında olup her boyu vardır. Böyle bir kutuplayıcıdan (kutuplayan güneş gözlükleri de dahil) geçen hemen hemen bütün ışık kutuplanmış olur.

İki dikdörtgen kutuplayıcıyı üst üste koyup (evde deney yapmaları için her bir öğrencime bunlardan ikişer tane dağıtıyorum) birbiriyle 90 derece açı yapacak şekilde çevirirseniz, aralarından hiç ışık geçmez.

Doğa, Land'in kutuplayıcılarından birinin yardımı olmaksızın bir sürü kutuplanmış ışık üretir. Güneşin yönünden 90 derece ötede ki mavi gökyüzünden gelen ışığın hemen hemen tamamı kutuplanmıştır. Nasıl mı anlayabiliriz? Bir doğrusal kutuplayıcıyla mavi gökyüzüne bakın (güneşten 90 derece uzakta herhangi bir yere) ve bakarken yavaş yavaş döndürün. Gökyüzünün parlaklığının değiştiğini fark edeceksiniz. Gökyüzü neredeyse tamamen karardığında, gökyüzünün o bölümündeki ışık hemen hemen tamamen kutuplanmıştır. Demek ki kutuplanmış ışığı tanımak için tek ihtiyacınız olan şey bir kutuplayıcıdır (iki tane olursa çok daha eğlenceli olur).

Birinci Bölüm'de beyaz ışığı sigara dumanında saçarak nasıl mavi ışık "yarattığımı" anlatmıştım. Bunu, amfi içinde saçılan mavi ışığın yaklaşık 90 derecelik bir açıyla saçılmasını sağlayarak ayarlıyorum; bu ışık da neredeyse tamamen kutuplanmıştır. Öğrenciler derse daima yanlarında getirdikleri kendi kutuplayıcılarıyla bunu görebilirler.

Güneş ışığı veya lambadan gelen ışık da suya ya da cama Brewster açısı dediğimiz tam uygun bir açıyla çarparsa, neredeyse tamamen kutuplanmış olur. Tekneyle gezenlerin ve denizcilerin kutuplayan güneş gözlüğü takmalarının sebebi budur – su yüzeyinden yansıyan ışığın çoğunu engeller. (David Brewster optikte pek çok araştırma yapmış, on dokuzuncu yüzyılda yaşamış bir İskoç fizikçiydi.)

Cüzdanımda daima en az bir kutuplayıcı taşıyorum –evet, *daima*– öğrencilerime de aynısını yapmaları için ısrar ederim.

Kutuplanmış ışıkla ilgili bütün bunları neden mi anlatıyorum? Çünkü gökkuşaklarından gelen ışık neredeyse tamamen kutuplanmıştır. Kutuplanma su damlalarının içindeki güneş ışığı yansıyınca meydana gelir. Bunun da gökkuşaklarının oluşması için gerekli şart olduğunu biliyorsunuz.

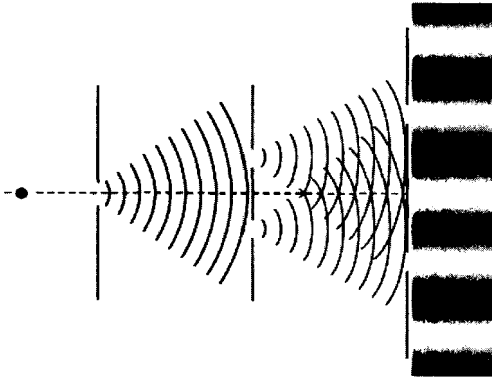
Derslerimde özel bir tür gökkuşağı yapıyorum (tek bir tane ama çok büyük bir su damlası kullanarak) ve bununla şunları gösteriyorum: (1) Kırmızı, gökkuşağının dış kısmındadır, (2) mavi iç kısmındadır, (3) gökkuşağının içindeki ışık parlak ve beyazken dışında durum farklıdır ve (4) gökkuşağından gelen ışık kutuplanmıştır. Gökkuşaklarının kutuplanması benim için çok büyüleyici (üzerimde daima kutuplayıcı taşımamın bir sebebi). Dersimdeki bu harika uygulamalı anlatımı şu adreste görebilirsiniz: ocw.mit.edu/courses/physics/8-03-physics-iii-vibrations-and-waves-fall-2004/video-lectures/lecture-22/.

Gökkuşağının Ötesi

Gökkuşakları en iyi bilinen ve en renkli atmosfer yaratılarıdır, fakat hiç de yalnız değiller. Bir sürü atmosfer fenomeni var, bazıları gerçekten garip ve çarpıcı, ötekilerse derin bir gizemle sarmalanmış. Ama biraz gökkuşaklarıyla kalalım – bakalım bizi nerelere götürecekler.

Çok parlak bir gökkuşağına dikkatle bakarsanız, iç kenarında bazen bir açık bir koyu olarak sıralanmış renkli bantlar görebilirsiniz – bunlara fazladan (*supernumerary*) gökkuşakları denir. Kitaptaki fotoğraflarda bir tanesini görebilirsiniz. Bunu açıklayabilmek için Newton'ın ışık ışınları açıklamasını terk etmemiz gerekir. Newton ışığın parçacıklardan meydana geldiğini düşünüyordu, dolayısıyla ışık ışınlarının yağmur damlaları içine girdiğini, içeride sağa sola çarptığını ve sonra çıktığını hayal ederken, bu ışınların minik parçacıklar gibi davrandığını varsaymıştı. Fakat fazladan gökkuşaklarını açıklayabilmek için ışığın dalgalardan oluştuğunu düşünmemiz gerekir. Ve fazladan gökkuşağı yapmak için ışık dalgalarının gerçekten küçük, bir milimetre çapından da küçük yağmur damlalarına girmesi şarttır.

Bütün fizikteki en önemli deneylerden biri (genellikle çift yarıklı deneyi diye anılır) ışığın dalgalardan oluştuğunu göstermiştir. 1801-1803 yılları civarında yapılmış olan bu ünlü deneyde, İngiliz bilimadamı Thomas Young ince bir ışık demetini iki demete ayırdı ve bir perdede ışığın ancak dalgalardan oluşması durumunda açıklana-



bilecek bir örüntü (iki demetin toplamı) gözlemledi. Daha sonra zaman içinde bu deney farklı şekilde, gerçekten iki küçük yarık (ya da iğne deliği) kullanılarak yapıldı. Şimdi, ince bir ışık demetinin ince bir kartona açılmış çok küçük ve birbirlerine yakın iki iğne deliğine çarptığını varsayarak devam ediyorum. Işık iğne deliklerini geçip bir perdeye çarpar. Eğer ışık parçacıklardan oluşmuşsa, bir parçacık deliklerin ya birinden geçer ya da ötekinden (ikisinden birden geçemez) ve dolayısıyla perdede iki parlak nokta görürsünüz. Ne var ki gözlemlenen örüntü çok farklıdır. İki dalganın perdeye vurmuş olması durumunda görmeyi bekleyeceğiniz şeyin bire bir aynısıdır – bir dalga deliklerin birinden gelir ve aynı zamanda tıpatıp aynısı bir dalga da ötekinden gelir. İki dalga eklenince girişim dediğimiz fenomen görülür. Bir delikten çıkan dalgaların tepe noktaları, ötekinden gelen dalgaların çukurlarıyla eşleşince dalgalar birbirlerini yok eder ve buna yıkıcı girişim denir. Bunun perdede meydana geldiği yerler (birkaç tane vardır) karanlık kalır. Ne kadar hayret verici değil mi – ışık artı ışık, karanlığa dönüşüyor! Öte yandan, iki dalganın birbirleriyle eşzamanlı olduğu, yani tepe noktaları ve çukurlarının birbirine denk geldiği öteki yerlerde yapıcı girişim vardır ve karşımıza parlak benekler çıkar (bunlardan da birkaç tane olacaktır). Bu durumda perdede bir karanlık, bir parlak benek olacak biçimde yayılmış bir örüntü görürüz, ki Young'ın bölünmüş demet deneyiyle gözlemlediği de tamı tamına buydu.

Bunu derslerimde kırmızı lazer ışığı ve bir de yeşil lazer ışığı kullanarak gösteririm. Gerçekten görmeye değer. Öğrenciler yeşil ışığın örüntüsünün kırmızı ışığınkine çok benzer olduğunu fark ederler; tek farkı, koyu ve parlak benekler arasındaki aralık yeşil ışıktaki epeyce daha küçüktür. Bu aralık ışığın rengine (dolayısıyla dalga uzunluğuna) bağlıdır (dalga boyları hakkında daha fazla bilgi bir sonraki bölümde).

Biliminsanları yüzyıllardır ışığın parçacıklardan mı yoksa dalgalardan mı meydana geldiğini bulmak için uğraşıp didinmekteydi; bu deney onları ışığın dalga olduğu yolundaki baş döndürücü ve kati sonuca götürdü. Artık ışığın hem parçacık hem de dalga gibi davradığını biliyoruz, fakat *bu* baş döndürücü sonuç, bir yüzyıl daha, kuantum mekaniğinin gelişmesini beklemek zorunda kaldı. Şu an için daha öteye gitmemiz gerekmiyor.

Tekrar fazladan gökkuşaklarına dönersek, ışık dalgalarının girişimi karanlık ve parlak bantları yaratan şeydir. Damlaların çapı 0,5 milimetreye yaklaştığında bu fenomen çok belirginleşir. Fotoğraflar bölümünde bir fazladan gökkuşağı görebilirsiniz, ötekiler de şurada: www.atopics.co.uk/rainbows/supers.htm.

Girişim etkileri (çoğunlukla kırınım denir), damlacıkların çapları yaklaşık 40 mikrondan (0,04 milimetre) daha küçük olduğunda daha da belirgin bir hal alır. Böyle olduğunda renkler o kadar çok yayılır ki, farklı renklerin dalgaları tamamen birbirine girer; renkler karışır ve gökkuşağı beyaza döner. Beyaz gökkuşakları bir ya da iki karanlık bant gösterir (fazladan gökkuşağı). Çok nadir olur, benim de hiç görmüşlüğüm yok. Carl Wales adında bir öğrencim 1970'lerin ortasında bana birkaç tane beyaz gökkuşağı resmi gönderdi. Resimleri yaz mevsiminde, yüzen bir buzul olan Fletcher Buz Adası'ndan (yaklaşık 5 x 11 kilometre) sabahın ikisinde çekmiş (evet sabahın ikisinde). O sırada Kuzey Kutbu'ndan yaklaşık 500 kilometre ötedeydi. Fotoğraflar bölümünde beyaz bir gökkuşağının hoş bir resmini görebilirsiniz.

Bu beyaz kuşaklar siste de görülebilirler. Sisler olağanüstü minik su damlacıklarından oluşur. Beyaz siskuşaklarını tespit etmek zor olabilir; farkına varmadan pek çok defa görmüş olabilirsiniz. Sisin güneş ışığı arasından geçecek kadar ince olduğu zamanlar, siskuşaklarının ortaya çıkması muhtemeldir. Sabah erken vakit bir ırmak kı-

yısında ya da limandaysam, güneş de gökyüzünde alçaktaysa ve sis de yayılmışsa, bunların avına çıkarım, bir sürü de görmüşümdür.

Bazen arabanın ön farlarıyla siz de bir siskuşağı yaratabilirsiniz. Araba kullanırken gece sisi etrafınızı sarıyorsa, güvenle park edebileceğiniz bir yer bakın. Ya da evdeyseniz ve sis çıkmışsa, arabanızı sise doğru çevirin ve ön farları açın. Sonra arabadan uzaklaşın ve farların huzmelerinin olduğu yerde sise bakın. Şansınız varsa bir siskuşağı görebilirsiniz. Bunlar sisli bir gecenin kasvetini daha da tekinsiz kılar. Arabasının farlarıyla yaptığı siskuşaklarına denk gelen bir arkadaşımızın sonuçlarını şurada görebilirsiniz: www.extremestability.com/08-9-9.htm. Beyaz kuşaklardaki karanlık bantları fark ettiniz mi?

Su damlacıklarının büyüklüğü ve ışığın dalga doğası, göklere zarafet katan en güzel fenomenlerden birini daha açıklar: gloriler. En iyi, bulutların üzerinden uçarken görülürler. İnanın aramaya değer. Tabii bunun için cam kenarında oturmanız gerekir – kanatlar üstünde de olmaz, aşağıdaki görüntünüzü kapatır. Garantiye almanız gereken bir şey, güneşin, uçağın koltuğunuzun bulunduğu tarafın tersinde olmasıdır, o yüzden günün saati ve uçuş yönüne dikkat etmeniz gerekecek. Güneşi pencerenizden görebiliyorsanız, deney bitmiştir. (Bu konuda bana güvenmenizi isteyeceğim; ikna edici bir açıklama pek çok karmaşık matematik gerektiriyor.) Bu koşullar yerine gelmişse, o zaman güneşin karşı noktasının nerede olduğunu kestirmeye çalışın ve aşağıyıda kalan bu noktaya bakın. Eğer hedefi vurduysanız bulutlarda renkli halkalar görebilirsiniz ve uçağınız bulutların çok yukarılarında uçmuyorsa, uçağın gölgesini çevreleyen gloriyi bile görebilirsiniz – glorilerin birkaç dereceden yaklaşık 20 dereceye kadar değişen çapları olur. Damla ne kadar küçükse gloriler o kadar büyük olur.

Pek çok glori resmi çektim, bir tanesinde uçağımın gölgesi açıkça görülüyordu ve gerçekten eğlenceli tarafı da, koltuğumun konumunun glorinin merkezinde, yani güneşin karşı noktasında bulunmasıydı. Bu resimlerden biri fotoğraflar arasında.

Glorileri her yerde bulabilirsiniz, sadece uçaklardan değil. Doğa yürüyüşüne çıkanlar güneş arkalarındayken aşağıdaki puslu vadilere baktıklarında bunları sık sık görürler. Bu durumlarda epey ürperici bir etki oluşur. Kendi gölgelerinin puslu havada yansısını görür-

ler, çevresinde de glori – bazen rengârenk birkaç halkayla. Kesinlikle hayaletvari bir görünüm. Bu fenomen Brocken heyulası olarak da bilinir (Brocken kuşağı da denir), adını Almanya'da glori manzaralarının yaygın olduğu yüksek bir zirveden almıştır. Aslında insanların gölgelerinin etrafını çevreleyen gloriler azizlerin başlarındaki haleye o kadar benzer ve figürlerin kendileri de dünyevilikten o kadar uzaktır ki, "glori"nin azizlerin başlarının etrafındaki ışık çemberi için kullanılan eski bir kelime olduğunu öğrenince şaşırırsınız. Çin'de gloriler Buda'nın ışığı olarak bilinir.

Bir keresinde, gloriyle çevriliyken kendi gölgemin harika bir fotoğrafını çektim, Aziz Walter'ın resmi diyorum buna. Çok seneler önce bazı Rus gökbilimci arkadaşlarım tarafından Kafkas Dağları'ndaki 6 metrelik teleskoplarına davet edilmişim. O zamanlar dünyanın en büyük teleskobuydu. Hava gözlem yapmak için çok berbat. Her gün oradaydım, akşam beş buçuk gibi aşağıdaki vadiden bir sis duvarı sökün edip teleskobu tümünden içine alırdı – yani tamamen. Ziyaretim boyunca hiç gözlem yapamadık. Yükselen sisin bir resmi fotoğraflarda var. Gökbilimcilerle konuşmalarımdan sisin çok yaygın olduğunu öğrendim. Bunun üzerine sordum: "O halde teleskop niye burada yapıldı?" Teleskobun oraya yapıldığını çünkü bir Parti yetkilisinin karısının onu tam orada istediğini, böylece meselenin bittiğini söylediler. Nerdeyse sandalyemden düşüyordum.

Her neyse, birkaç gün sonra fantastik bir fotoğraf çekebileceğim geldi aklıma. Sis her gün doğu yönündeki vadiden çıkıp geldiğinde güneş batıda hâlâ tesirli oluyordu, gloriler için mükemmel ortam. Ertesi gün gözlemevine fotoğraf makinemi de getirdim, sis işbirliği yapmayabilir diye de tedirgin oluyordum. Ama tabii sis duvarı kabardı, güneş hâlâ parlıyordu, benim de arkam dönüktü. Bekledim de bekledim, derken, hoop gölgemin etrafında bir glori oluverdi ve şak diye çektim. Sabırsızlık içinde filmi tab ettirdim –dijital öncesi dönemdi– ve işte oradaydı! Gölgem uzun ve hayaletvari, makinemin gölgesi de muhteşem bir glorinin halkalarının merkezindeydi. Bu resmi fotoğraf bölümünde görebilirsiniz.

Başınızın etrafında bir hale görebilmek için böyle egzotik yerlerde olmanız gerekmez. Güneşli bir sabah erkenden çiy düşmüş çimenler üzerindeki gölgenize bakarsanız (tabii güneş ışığı arkanızdayken), Almancada *Heiligenschein* yani "kutsal ışık" denilen şeyi

sık sık görürsünüz: başınızın gölgesi etrafında bir parıltı. (Çok renkten oluşmaz; bir glori değildir.) Otlar üzerindeki çiy taneleri güneş ışığını yansıtıp bu etkiyi yaratır. Bunu denerseniz –umarım denersiniz– glori bulmaktan daha kolaydır. Sabahın erken vakti olması ve güneşin alçaktan parlamasından dolayı gölgenizin epey uzun olduğunu görürsünüz, ortaçağ tablolarındaki ince uzun ve haleli azizlere benzersiniz.

En olmadık yerlerde karşınıza çıkacak pek çok farklı türde gökkuşağı ve hale sizi şaşırtabilir. En sevdiğim gözlemim, 2004 Haziranında güneşli bir gün olmuştur –hatırlıyorum, yaz gündönümüydü, 21 Haziran– Susan (o sırada henüz karım değildi), oğlum ve kız arkadaşıyla Massachusetts, Lincoln'deki deCordova Müzesi'ni geziyorduk. Araziden girişe doğru yürürken oğlum seslendi. Orada önümüzde, yerde, baş döndürücü, rengârenk, neredeyse dairesel bir gökkuşağı vardı. (Gündönümü olduğu için güneş Boston'da olabileceği en yüksek noktadaydı, ufuktan yaklaşık 70 derecede.) Nefes kesiciydi.

Fotoğraf makinemi çıkarıp mümkün olduğunca çabuk bir dizi resim çektim. Ne kadar beklenmedik bir şey. Yerde hiç su damlacığı yoktu, sonra bu kuşağın zaten su damlalarıyla meydana gelmiş olamayacağını fark ettim, çünkü kuşağın yarıçapı 42 dereceden çok daha küçüktü. Ama yine de tıpkı bir gökkuşağına benziyordu: Kırmızı dış taraftaydı, mavi iç tarafta ve kuşağın içinde parlak beyaz ışık vardı. Bunu ne meydana getirmiş olabilirdi? Bir şeyin şeffaf, küresel parçacıklarının bunu yapmış olması gerektiğini anladım, fakat bunlar ne olabilirdi?

Kuşağın resimlerinden birini fotoğraflar bölümünde görebilirsiniz; o kadar güzel çıkmış ki, NASA'nın "günün gökbilim gizemi" resmi oldu, 13 Eylül 2004'te internette yayımlandı.* (Bu arada bu çok müthiş bir sitedir, her gün bakmanızı öneririm: apod.nasa.gov/apod/astropix.html.) Bunun ne olduğuna dair yaklaşık üç bin tahmin geldi. En sevdiğim cevapsa dört yaşındaki Benjamin Geisler'dan elle yazılmış bir notla geldi: "Gizemli fotoğrafınız galiba ışık, pastel kalem, keçeli kalem ve renkli kurşunkalemle yapılmış." MIT'deki odamın dışındaki duyuru panosunda asılı. Bütün cevaplardan yaklaşık otuzu

* Fotoğrafımı internette görmek isterseniz, sitenin Archive bölümüne tıklayın ve 13 Eylül 2004'e gidin. Sitenin genel adresi için yukarıdaki URL'yi kullanın.

doğru yoldaydı, ama sadece beşi tam hedeften vurmuştu.

Bu bilmeceye en iyi ipucu, ziyaretimiz sırasında müzede yoğun bir inşaat çalışmasının sürüyor olmasıydı. Özellikle, müzenin duvarlarına kumlama yapılmıştı. MIT'de uygulamalı fizikten sorumlu olan ve yıllarca birlikte çalıştığım Markos Hankin bana bazı kumlamalarda cam boncukların kullanıldığını söyledi – ama o sırada bunu bilmiyordum. Gerçekten de yerde pek çok minik cam boncuk vardı. Bir avuç dolusu boncuğu da eve götürmüştüm. Bizim gördüğümüz şey camkuşağıymış, cam boncuklardan oluşmuş bir gökkuşağı, şimdi resmi bir gökkuşağı kategorisi olmuş durumda; yaklaşık 28 derecelik bir yarıçapı var, fakat gerçek rakam camın cinsine göre değişiyor.

Markos'la ben derslerimde kullanmak üzere bizim de bir tane yapıp yapamayacağımızı görmek için sabırsızlanıyorduk. Bir-iki kilo cam boncuk aldık, büyük boy siyah kâğıtlara yapıştırdık ve amfinin arkasından üzerlerine bir spot ışığı tuttuk. İşe yaradı! Öğrencileri teker teker sınıfın ön kısmına gelmeleri için davet ettim, burada yazı tahtasının önünde ayakta durup gölgelerini kendi özel camkuşaklarının tam ortasına düşürdüler.

Bu, öğrenciler için öyle heyecan verici bir deneyimdi ki siz de evde denemek isteyebilirsiniz; camkuşağı yapmak çok zor değil. Hediflerinizin ne olduğuna bağlı. Sadece kuşağın renklerini görmek istiyorsanız, o gayet kolay. Eğer başınızı çepeçevre saran bütün bir kuşağı görmek istiyorsanız, o biraz daha zahmetli.

Kuşağın küçük bir parçasını görmek için gerekli şeyler, yaklaşık 30 x 30 cm siyah karton, şeffaf püskürtmeli yapıştırıcı ve şeffaf yuvarlak cam boncuklar. Şeffaf ve küre biçiminde olmaları şart. Biz çapları 150 ile 250 mikron arasında değişen "iri taneli cam boncuk püskürtme malzemesi" kullandık, şu adreste bulabilirsiniz: tinyurl.com/glassbeads4rainbow.

Tutkalı kartonun üzerine sürün, sonra boncukları üzerine serpin. Boncuklar arasındaki ortalama mesafenin hayati bir önemi yok, fakat birbirlerine ne kadar yakın olurlarsa o kadar iyi. Boncukları serperken dikkatli olun – bunu dışarıda denerseniz muhtemelen daha iyi olur, böylece boncukları evde yerlere saçmazsınız. Tutkalın kurumasını bekleyin, güneşli bir güne dışarı çıkın.

Hayali çizgiyi oluşturun (başınızdan, başınızın gölgesine). Kartonu o çizgi üzerinde bir yere yerleştirin; böylece başınızın gölgesi-

ni kartonda göreceksiniz (güneş alçaktaysa kartonu bir sandalye üzerine koyabilirsiniz; güneş yukarılardaysa yere koyun – unutmayın, deCordova Müzesi'ndeki cam boncuklar da yerdeydi. Kartonu başınızdan ne kadar uzağa koyacağınıza kendiniz karar verebilirsiniz. Diyelim ki 1,2 metre öteye yerleştirdiniz. Sonra kartonu hayali çizgiden, çizgiye dik olacak bir yönde 0,6 metre uzağa taşıyın. Bunu herhangi bir yönde yapabilirsiniz (sol, sağ, yukarı, aşağı). O zaman camkuşağının renklerini göreceksiniz. Kartonu daha da öteye koymayı tercih ederseniz, mesela 1,5 metreye, o zaman kuşağın renklerini görmek için kartonu yaklaşık 0,75 metre oynatmanız gerekir. Bu rakamlara nasıl ulaştığımı merak ediyor olabilirsiniz. Sebebi basit, bir camkuşağının yarıçapı yaklaşık 28 derecedir.

Renkleri görünce, kuşağın öteki kısımlarını aramak için kartonla hayali çizginin etrafında daire çizebilirsiniz. Böyle yaparak dairenin tamamının haritasını parça parça çıkarmış olursunuz, tıpkı bahçe hortumuyla yaptığınız gibi.

Gölgenizin etrafındaki kuşağın tamamını görmek isterseniz daha büyük bir kartona ihtiyacınız olacaktır –tam 1 metre karelik bir karton işi görür– ve de buna yapışmış çok daha fazla cam boncuğa. Başınızın gölgesini kartonun merkezine yakın yerleştirin. Kartonla başınız arasındaki mesafe yaklaşık 80 santimetreyse camkuşağının tamamını hemen görürsünüz. Kartonu çok uzağa koyarsanız –örneğin 1,2 metre– kuşağın tamamını göremezsiniz. Seçim sizin; iyi eğlenceler!

Güneşli bir gün değilse, bir duvara kartonu bantlayıp ya da asıp *çok* güçlü bir ışık yansıtarak –spot ışığı gibi– deneyi içeride de yapabilirsiniz. Işık arkanızda kalacak gibi konumlanın, başınızın gölgesi de bir metrelik kartonun merkezinde olsun. Kartondan 80 santimetre uzakta durursanız, gölgenizi çevreleyen kuşağın tamamını görebilmeniz gerekir. Camkuşağına hoş geldiniz!

Güzelliğinin farkına varmak için bir gökkuşağının, siskuşağının ya da camkuşağının niçin oluştuğunu anlamamız gerekmiyor elbette, fakat gökkuşağı fiziğini anlamak bize bir çift yeni göz daha verir (buna bilginin güzelliği diyorum). Sisli bir sabah ya da duş alırken, bir fıskiye'nin yanından geçerken ya da uçakta herkes film seyrettiği sırada pencereden dışarıyı dikizlerken yakalayabileceğimiz küçük harikalar için daha tetikte oluruz. Umarım bir daha gökkuşağı çıka-

cağını hissettiğinizde arkanızı güneşe dönüp, hayali çizgiden yaklaşık 42 derece öteye bakarak gökyüzünde muhteşem bir gökkuşağının kırmızı üst kenarını görürsünüz.

İşte tahminim: Bir daha gökkuşağı gördüğünüzde, kırmızının dış tarafta, mavinin de iç tarafta olup olmadığını kontrol edeceksiniz; ikinci gökkuşağını bulmaya çalışacaksınız ve renklerinin sırasının ters olduğunu teyit edeceksiniz; birinci kuşağın içinde gökyüzünün parlak olduğunu, dışında da çok koyu olduğunu göreceksiniz; ve üzerinizde bir kutuplayıcı taşıyorsanız (ki daima taşımalısınız), iki kuşağın da güçlü bir şekilde kutuplanmış olduğunu doğrulayacaksınız. Kendinize hâkim olamayacaksınız. Hayatınızın sonuna kadar peşinizi bırakmayacak bir hastalıktır bu. Benim hatam, ama sizi tedavi edemeyeceğim, hatta bunun için üzgün bile değilim, hem de hiç!

Tellilerin ve Nefeslilerin Armonileri

On yaşındayken keman dersleri aldım, fakat bir felakettim, bir yıl sonra bıraktım. Sonra yirmili yaşlarımda piyano dersleri aldım, yine bir felakettim. İnsanların notaları nasıl okuyup farklı ellerdeki on parmakla bunları müziğe dönüştürebildiklerini hâlâ anlayamıyorum. Fakat müzikten çok zevk alırım ve müzikle aramdaki duygusal bağa ek olarak, fizik sayesinde onu anlar hale de geldim. Aslında müziğin fiziğini seviyorum, ki o da tabii sesin fiziğiyle başlar.

Sesin bir nesnenin –davulun yüzeyi, akort çatalı ya da bir keman teli gibi– bir ya da daha fazla kere çok hızlı titreşmesiyle başladığını muhtemelen biliyorsunuzdur. Bu titreşimler apaçık ortada, değil mi? Fakat bu şeyler titreşirken gerçekte nelerin olup bittiği o kadar ortada değil, çünkü bu genellikle göze görünmez.

Bir akort çatalının ileri-geri hareketi önce kendine en yakın havayı sıkıştırır. Sonra, öteki tarafa hareketederken yakınındaki havayı gevşetir. Bu dönüşümlü itme ve çekme havada bir dalga yaratır, bir basınç dalgası, ki buna ses dalgası diyoruz. Bu dalga kulaklarımıza ses hızı dediğimiz hızla çok çabuk ulaşır: yaklaşık 340 metre/saniye (üç saniyede yaklaşık bir kilometre). Bu, ses hızının oda sıcaklığında havadaki hızıdır. İçinde yol aldığı ortama bağlı olarak çok değişebilir. Ses hızı sudayken havadakine göre beş kat, demirdeyse on beş kat fazladır.

Vakum ortamındaki ışık hızı (ve bütün elektromanyetik ışımlar) c diye bilinen, değeri yaklaşık 300.000 kilometre/saniye olan ünlü bir sabittir, fakat görünen ışığın sudaki hızı yaklaşık dörtte bir oranında daha yavaştır.

Şimdi tekrar akort çatalına dönelim. Çıkardığı ses kulaklarımıza çarpınca, kulak zarlarımızı tam olarak akort çatalının havayı sıkıştırırkenki salınım hızıyla bir içeri bir dışarı iter. Sonra, neredeyse absürd derecede karmaşık bir sürecin ardından, ortakulağın harikulade bir şekilde çekiç, örs ve üzengi diye adlandırılmış kemiklerini titreştirir ve bunlar da içkulaktaki sıvı içinde dalgalar oluşturur. Bu dalgalar da ardından beyne gönderilen elektriksel sinir dürtülerine çevrilir ve sizin beyniniz de bu sinyalleri ses olarak yorumlar. Ne süreç ama.

Ses dalgaları –aslında bütün dalgalar– üç temel özelliğe sahiptir: frekans, dalga boyu ve genlik. Frekans belli bir noktadan belli bir zaman diliminde geçen dalga sayısıdır. Bir tekne ya da yolcu gemisinden okyanustaki dalgaları seyrediyorsanız ve diyelim ki bir dakikada on dalga geçiyorsa, o zaman bunların dakikada onluk bir frekansının olduğunu söyleyebiliriz. Fakat gerçekte biz frekansı saniyedeki salınım olarak ölçeriz, buna hertz ya da Hz de denir; saniyede 200 salınım, 200 hertzdır.

Dalga boyuna gelince, bu da dalganın iki tepe noktasının arasındaki mesafedir – ya da iki çukur noktasının. Dalgaların temel özelliklerinden biri, bir dalganın frekansı arttıkça dalga boyunun kısalması ve dalga boyu arttıkça da frekansının düşmesidir. Burada fizikte son derece önemli olan bir dizi ilişkiye ulaştık: hız, frekans ve dalga boyu arasındaki ilişkiler. Bir dalganın dalga boyu, hızının frekansına bölümüdür. Bu, elektromanyetik dalgalar (X ışını, görünen ışık, kızılötesi ve radyo dalgaları) için geçerli olduğu gibi, banyo küvetindeki ses dalgaları ve okyanustaki dalgalar için de geçerlidir. Bir örnek olarak, havadaki 440 hertzlik bir ses tonunun (piyanoda orta oktavdaki la notası) dalga boyu, 340 bölü 440, o da 0,77 metredir.

Durup bunu bir dakika düşünecek olursanız, çok mantıklı olduğunu göreceksiniz. Herhangi bir ortamda ses hızı sabit olduğundan (gazlar hariç, onlarda sıcaklığa bağlıdır), belli bir zaman diliminde ses dalgaları arttıkça, o zamana sığabilmek için dalgaların boyları daha kısa olmak zorunda. Tersinin de geçerli olduğu ortada: Aynı süre içinde dalga azaldıkça, her birinin daha uzun olması gerekiyor. Dalga boyu için, farklı türlerde farklı ölçümlerimiz var. Örneğin, ses dalgalarını metre cinsinden ölçmemize rağmen, ışık dalga boylarını nanometre cinsinden ölçeriz (bir nanometre, metrenin milyarda biridir).

Peki ya genlik? Yine bir tekneden okyanustaki dalgaları seyrettiğinizi düşünün. Bazı dalgaların, aynı dalga boyunda olsa da, ötekilerden daha yüksek olduğunu göreceksiniz. Dalganın bu özelliğine o dalganın genliği denir. Bir ses dalgasının genliği, sesin ne kadar yüksek ya da alçak olacağını belirler: Genliği arttıkça daha yüksek seslidir, azaldıkça da alçak sesli. Bunun sebebi, genlik arttıkça dalganın taşıdığı enerjinin artmasıdır. Bütün sörfçülerin bildiği gibi, bir okyanus dalgası ne kadar yüksekse o kadar çok enerji depolar. Gitarın tellerini daha güçlü tıngırdatarsanız, onlara daha fazla enerji aktarıyorsunuz ve daha yüksek bir ses çıkarıyorsunuz demektir. Su dalgalarının genliğini metre ve santimetre cinsinden ölçeriz. Havadaki bir ses dalgasının genliği, hava moleküllerinin basınç dalgasındaki ileri-geri hareketlerinin mesafesidir, fakat bunu hiçbir zaman bu şekilde ifade etmeyiz. Onun yerine, sesin *şiddetini* ölçeriz, bu da desibel cinsinden ifade edilir. Desibel yelpazesi epey karmaşıktır, ama neyse ki onu bilmeniz gerekmiyor.

Öte yandan bir sesin perdesini, yani müzikteki gamda ne kadar yüksek ya da alçak olduğunu frekans belirler. Frekans yükseldikçe perdesi yükselir; frekans düştükçe perdesi düşer. Müzik yaparken frekansı (yani perdeyi) sürekli değiştiririz.

İnsan kulağının duyabildiği frekans aralığı muazzam genişliktedir: yaklaşık 20 hertzden (piyanodaki en düşük nota 27,5 hertzdir) ta 20.000 hertzlere kadar. Derslerimde, işitimölçer denilen, farklı şiddetlerde farklı frekanslar yayarak ses üreten bir makineyi çalıştırdığım müthiş bir uygulamalı anlatımım var. Öğrencilerimden sesi duydukları sürece ellerini yukarıda tutmalarını istiyorum. Kademeli olarak frekansı artırıyorum. Yaşımız ilerledikçe bazılarımız yüksek frekanslardaki sesleri işitme yeteneğini kaybederiz. Benim yüksek frekans eşiğim yaklaşık 4000 hertz, orta do'nun dört oktav üstü, piyano tuşlarının ta sonunda. Fakat ben hiçbir şey işitmemeye başladıktan çok sonraları bile öğrencilerim çok daha yüksek notaları işitebiliyorlar. Kadranı gittikçe yukarıya, 10.000 ve 15.000 hertze kadar yükseltiyorum ve bazı eller inmeye başlıyor. 20.000 hertzde ellerin sadece yarısı kadarı hâlâ yukarıda oluyor. Sonra daha yavaş ilerliyorum: 21.000, 22.000, 23.000. 24.000 hertze geldiğimde genellikle sadece birkaç el hâlâ havada oluyor. Bu noktada onlara küçük bir şaka yapıyorum: Makineyi kapatıyorum, fakat frekansı da-

ha da yukarı, 27.000 hertze çıkarıyormuşum gibi yapıyorum. Genellikle bir ya da iki babayiğit bu süper yüksek notaları duyduğunu ileri sürüyor – tabii ben nazikçe bu balonu patlatana kadar. Birlikte gülelim diye.

Şimdi bir akort çatalının nasıl çalıştığını düşünelim. Akort çatalına daha sert vurursanız, çatal uçlarının saniyedeki titreşim sayısı –dolayısıyla ürettiği ses dalgalarının frekansı– aynı kalır. Hep aynı notayı çalmasının sebebi budur. Fakat daha sert vurduğunuzda çatal uçlarındaki salınımların genliği değişir. Akort çatalına vururken filme alıp ağır çekimde oynatacak olursanız bunu görebilirsiniz. Akort çatalının uçlarının ileri-geri gittiğini ve siz sert vurdukça daha da öteye hareket ettiğini görürsünüz. Genlik arttığandan elde edilen nota daha yüksek sesli olacaktır, fakat çatalın uçları aynı frekansta salınmaya devamedeceğinden nota aynı kalır. Bu tuhaf birdurum, değil mi? Biraz düşünürseniz, aynı sarkaç gibi (3. Bölüm) – orada da periyot (bir salınımın tamamlanması için gerekli süre) salınımların genliğinden bağımsızdır.

Uzayda Ses Dalgaları

Sesin bu ilişkileri dünya dışında da geçerli midir? Uzayda hiç ses olmadığını duydunuz mu hiç? Bunun anlamı, ayın yüzeyinde ne kadar enerjik biçimde piyano çalarsanız çalın, hiç ses çıkarmayacağıdır. Bu doğru olabilir mi? Evet, ayın atmosferi yok; esasen bir vakum ortamı. Bunun üzerine –belki de biraz hüzünle– birbirleriyle çarpışan yıldız ya da galaksilerin en muhteşem patlamalarının derin bir sessizlik içinde meydana geldiği sonucuna varabilirsiniz. Hatta büyük patlamanın, yaklaşık 14 milyar yıl önce evrenimizi yaratan ilk patlamanın kendisinin de tamamen sessizlik içinde meydana geldiğini varsayabiliriz. Fakat bir dakika durun. Hayatın pek çok yönü gibi, uzay da otuz-kırk yıl önce düşündüğümüzden önemli ölçüde daha dağınık ve karmaşık.

Uzayda hangimiz nefes almaya kalkışsak oksijen yokluğundan çabucak ölüp giderdik, ama gerçek şu ki, dış uzay, hatta uzayın derinlikleri tamamen boş değil. Böyle terimler hep görelidir. Yıldızlararası ve galaksilerarası uzay, vakuma, bizim dünyada yapabilece-

ğimiz en iyi vakum ortamından milyonlarca kere daha yakındır. Yine de uzayda ortalıkta yüzen maddenin önemli ve tanımlanabilir özellikleri vardır.

Bu maddenin büyük kısmına plazma denir: hidrojen çekirdekleri (protonlar) ve elektronlar gibi tamamen ya da kısmen yüklü parçacıklardan oluşan ve yoğunlukları birbirinden adamaklılı farklı olan gazlar. Plazma güneş sistemimizde mevcuttur, ona burada güneş rüzgârı deriz, güneşten dışarıya doğru akar (bu fenomene ilişkin bilginizin artmasında Bruno Rossi'nin çok katkısı olmuştur). Plazmalar galaksilerdeki yıldızlar arasında (burada ona yıldızlararası ortam deriz) ve hatta galaksiler arasında da (burada galaksilerarası ortam deriz) olduğu gibi, yıldızların içinde de bulunurlar. Gökfizikçilerinin çoğu, evrendeki gözlemlenebilen maddenin yüzde 99,9'undan fazlasının plazma olduğuna inanıyor.

Bir düşünün. Nerede madde varsa, basınç dalgaları (dolayısıyla ses) elde edilebilir ve bu dalgalar yayılır. Ve uzayda her yerde (güneş sistemimiz dahil) plazmalar olduğundan buralarda pek çok ses dalgası vardır, ama biz bunları duyamayız. Zavallı kulaklarımız epey geniş bir frekans aralığını duyabilir—üç basamaktan fazlasını kapsayan bir aralıktır bu— fakat göksel kürelerin müziğini duymaya donanımlı değiliz.

Size bir örnek vereyim. Ta 2003'te fizikçiler Perseus galaksi kümesindeki—dünyadan yaklaşık 250 milyon ışık yılı ötedeki binlerce galaksi grubu— bir galaksinin merkezindeki aşırı büyük bir kara deliği çevreleyen süpersıcak gazda (plazma) halka dalgacıklar keşfettiler. Bu halkalar açıkça ses dalgalarına işaret ediyordu, kara delik madde yutarken ortaya çıkardığı büyük enerji miktarının sebep olduğu ses dalgaları. (12. Bölüm'de kara delik konusunu daha ayrıntılı ele alacağım.) Fizikçiler dalgaların frekansını hesapladılar ve si bemol perdesini buldular, fakat o kadar alçak bir si bemol ki, frekansı yaklaşık 262 hertz olan orta do'nun 57 oktav (yaklaşık 10^{17} kat) daha altında! Bu kozmik halka dalgalarını şurada görebilirsiniz: science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/09sep_blackholesounds/.

Şimdi tekrar büyük patlamaya dönelim. Evrenimizi doğurmuş olan ilk patlama ilk maddede—sonra genişleyen ve ardından soğuyan, galaksileri, yıldızları ve en nihayetinde gezegenleri yaratan

maddede– basınç dalgaları yaratmışsa, o zaman o ses dalgalarının kalıntılarını görebilmemiz gerekir. Fizikçiler ilk plazmada dalgacıkların o zaman ne kadar ayrı olmaları gerektiğini (yaklaşık 500.000 ışık yılı) ve evrenin 13 milyar yıldır genişlemesinin ardından şimdi ne kadar ayrı olmaları gerektiğini hesapladılar. Buldukları mesafe yaklaşık 500 milyon ışık yılı.

Şu an devam etmekte olan iki devasa galaksi haritalandırma projesi var – New Mexico'daki Sloan Sayısal Gökyüzü Taraması (Sloan Digital Sky Survey; SDSS) ve Avustralya'daki İki Derecelik Alanda Galaksi Kızıla Kayma Taraması (Two-degree Field [2dF] Galaxy Redshift Survey). İkisi de galaksi dağılımlarındaki bu dalgacıkları arayıp, birbirlerinden bağımsız olarak ne buldular dersiniz? "Galaksilerin şu anda birbirlerinden 500 milyon ışık yılı uzakta olmaları, tahmin edilen başka mesafelere göre biraz daha büyük bir ihtimal," sonucuna vardılar. Demek ki büyük patlama, şu an yaklaşık 500 milyon ışık yılı dalga boyunda olan bas bir gong sesi çıkardı, kulaklarımızın duyabileceği herhangi bir şeyden yaklaşık elli oktav aşağıda (10^{15}). Gökbilimci Mark Whittle büyük patlama akustığı dediği şeyle epey bir oyalandı, siz de sitesine giderek deneyebilirsiniz: astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/index_frames.html. Sitede Whittle'ın hem zamanı nasıl sıkıştırdığını (100 milyon yılı 10 saniyeye çevirerek) hem de yapay olarak ilk evrenin ses perdesini elli oktav nasıl yükselttiğini görüp işitebilirsiniz, böylece büyük patlamanın yarattığı "müziği" dinleyebilirsiniz.

Rezonans Harikaları

Rezonans dediğimiz fenomen olmasaydı, dünya kadar şey ya hiç var olmayacaktı ya da çok daha az ilginç olacaktı: sadece müzik değil, radyolar, kol saatleri, trambolinler, çocuk parkındaki salıncaklar, bilgisayarlar, tren düdükları, kilise çanları ve dizinizin ya da omzunuzun MR görüntüleri de. (Buradaki "R"nin "rezonans"a karşılık geldiğini biliyor muydunuz?)

Rezonans tam olarak nedir? Salıncakta bir çocuğu salladığınızı düşünerek bunu kavrayabilirsiniz. Salıncağı sallarken, çok az bir gayretle salınımda büyük genlikler elde edebileceğinizi sezgisel ola-

rak bilirsiniz. Bir sarkaç olan salıncağın net tanımlı bir frekansı olduğundan (3. Bölüm), salıncağı sallayışınızı o frekansla eşzamanlı hale getirebilerseniz, az miktardaki ilave itişlerin, salıncağın yükselişinde gittikçe artan büyük bir etkisi olur. Çocuğunuzu sadece birkaç parmakla hafiften dokunarak gitgide daha yükseğe sallayabilirsiniz.

Bunu yaparken rezonanstan yararlanırsınız. Fizikte rezonans bir şeyin –sarkaç, akort çatalı, keman yayı, şarap kadehi, davul derisi, çelik hatıl, atom, elektron, atom çekirdeği, hatta bir hava sütunu– belli frekanslarda diğerlerine göre daha güçlü titreşmesi eğilimidir. Bunlara rezonans frekansları deriz (ya da doğal frekanslar).

Örneğin akort çatalı daima kendi rezonans frekansında titreşecek biçimde yapılır. Bunu 440 hertzde yaparsa, o zaman konser la'sı, yani piyanoda orta do'nun üstündeki la sesi çıkar. Nasıl titreştirirseniz titreştirin çatalın uçları saniyede 440 defa salınım yapar, yani ileri-geri hareket eder.

Bütün malzemelerin rezonans frekansları vardır; bir sisteme ya da nesneye enerji eklerseniz, bu frekanslarda titreşmeye başlayabilir, çok önemli bir sonuç almak için görece çok az enerji girişi yeterlidir. Örneğin çok ince boş bir şarap kadehine bir kaşıkla hafif hafif vurursanız ya da ıslak parmağınızı bardağın ağzında dolaştırırsanız belli bir tonda ses çıkaracaktır – işte bu bir rezonans frekansıdır. Rezonans –bazen öyle görünse de– emeksiz yemek değildir. Fakat rezonans frekanslarında nesneler sizin kattığınız enerjiyi en randımanlı şekilde kullanırlar.

Atlama ipi de aynı ilkeye dayanır. Ucundan hiç tuttuysanız eğer, ipi hoş bir yay biçiminde sallamanın zaman alacağını bilirsiniz – o yayı elde etmek için elinizle ipin ucuyla daireler çizmiş olsanız da, o hareketin püf noktası, ipi döndürürken sizin aşağı-yukarı ya da ileri-geri gitmenizdir. Belli bir noktada ip güzel bir yay çizerek neşeyle dönmeye başlar; devam etmesi için elinizi belli belirsiz hareket ettirirsiniz, arkadaşlarınız da yayın ortasında atlamaya başlar, sezgisel olarak atlayışlarını ipin rezonansına göre zamanlarlar.

Çocuk parkındayken belki bunu bilmiyordunuz, ama elini oynatması gereken sadece bir kişidir – öteki kişinin ipin öbür ucunu tutması yeterlidir, böyle gayet iyi döner. Buradaki önemli nokta, sizin kendi aranızda ipin en alt rezonans frekansına –temel frekans da denir– ulaşmış olmanızdır. Böyle olmasaydı, iki kişinin iki ipi ters

yönlerde çevirdiği çift ip atlama oyunu neredeyse imkânsız olurdu. İki ipin zıt yönlerde dönmesini ve aynı insanlar tarafından tutulmasını mümkün kılan şey, her birinin çevrilmesi için çok az enerjiye ihtiyaç olmasıdır. Buradaki itici güç elleriniz olduğundan, atlama ipi, harici kaynakla sürülen osilatör dediğimiz şey olur. Sezgisel olarak bilirsiniz ki, ipin bu rezonansına bir kere ulaştınız mı o frekansa kalmak istersiniz, böylece elinizi daha hızlı oynatmazsınız.

Daha hızlı oynatsaydınız o güzel dönen yay, eğri büğrü bir ipe dönüşürdü, ip atlayan kişi de hemen sinirlenirdi. Ama yeterince uzun bir ipiniz olsaydı ve tuttuğunuz ucu daha çabuk sallayabilseydiniz, o zaman çok geçmeden ipin iki yay yarattığını görürdünüz, biri aşağı giderken öteki yukarı giderdi ve ipin orta noktası durağan kalırdı. Bu orta noktaya düğüm diyoruz. O aşamada iki arkadaşınız, her biri bir yayda atlayabilirdi. Bunu sirklerde görmüş olabilirsiniz. Burada neler oluyor? İkinci bir rezonans frekansı yaratmış oluyorsunuz. Hemen hemen titreşen her şeyin birden fazla rezonans frekansı vardır, ki bunu birazdan daha ayrıntılı ele alacağım. Sizin ipinizin de yüksek rezonans frekansları vardır, ki bunu gösterebilirim.

Dersimde, çoklu rezonans frekanslarını göstermek için bir atlama ipi kullanırım. İki dikey çubuk arasına yaklaşık üç metrelik tek bir ip çekerim. Dikey çubuğun biri üzerindeki ipin bir ucunu aşağı-yukarı oynatıp (iki-üç santimetre kadar), frekansını değiştirebileceğim küçük bir motor aracılığıyla salınımını sağlayınca, ip çok geçmeden en düşük rezonans frekansına ulaşır (buna ilk armonik diyoruz; temel frekans da denir) ve bu şekilde atlama ipi gibi bir yay elde ederiz. İpin ucunu daha hızlı çevirmeye başladığımda, çok geçmeden birbirinin tıpatıp aynı iki yay görürüz. Buna da ikinci armonik deriz ve ipi ilk armoniğin iki katı hızla salladığımız zaman olur. O halde ilk armonik 2 hertz ise, yani saniyede 2 titreşimse, ikincisi 4 hertz olur. İpin ucunu daha da hızlı çevirerek ilk armoniğin frekansının üç katına ulaşırsak (yani örneğimizde 6 hertze), o zaman üçüncü armoniğe ulaşırız. İpin oynamayan iki noktasıyla (düğümüyle) üç eşit parçaya bölündüğünü, ipin uçları saniyede altı kere aşağı-yukarı giderken yayların da birbiri peşi sıra bir aşağı bir yukarı gittiğini görürüz.

Hatırlarsanız, işitebileceğimiz en düşük notanın frekansının yaklaşık 20 hertz olduğunu söylemiştim. Çocuk parkındaki atlama ipin-

den müzik duymamanızın sebebi budur – frekansı çok, çok düşüktür. Fakat farklı bir tür iple oynarsak –kemandaki ya da çellodaki gibi örneğin– tamamen başka bir şey olur. Kemanı ele alın. Benim almam hiç hayırlı olmaz, size söyleyeyim – son altmış yılda ilerleme kaydetmedim.

Bir kemandan uzun, güzel, yanık bir nota duymanız için, orada önceden dünyanın fiziği seferber olmuştur. Bir kemanın, bir çellonun, bir arpanın ya da gitar telinin –veya herhangi bir telin ya da ipin– sesi üç faktöre bağlıdır: uzunluğu, gerginliği ve ağırlığı. Telin uzunluğu arttıkça gerginliği azalır ve ağırlığı arttıkça ses perdesi alçalır. Tabii tersi de doğrudur: Tel kısaldıkça gerginliği artar ve tel hafifledikçe ses perdesi yükselir. Telli çalgılarda müzisyenler ne zaman enstrümanlarını bir aradan sonra tekrar ellerine alsalar, doğru notaları, yani frekansları çıkarması için tellerinin gerginliklerini ayarlamaları gerekir.

Ama işin sihri şurada: Kemancı tele bir yay sürttüğü zaman tele enerji aktarıyordur, tel de bir şekilde kendi rezonans frekanslarını (mümkün olan bütün titreşimler içinden) seçer ve –şimdi daha da akıl almaz kısmı geliyor– biz göremesek de *birkaç farklı rezonans frekansında* (birkaç armonikte) *aynı anda titreşir*. Sadece tek bir frekansta titreşen akort çatalına benzemez.

Bu ilave armonikler (temel rezonanstan daha yüksek frekanslı olanlar) genellikle üst ton olarak adlandırılır. Kimi güçlü kimi zayıf olan çeşitli rezonans frekanslarının karşılıklı etkileşimi –armonik kokteyli– bir keman ya da çello notasına teknik adıyla rengini ya da tınısını veren şeydir, bizim içinse kendine özgü sesini tanımamızı sağlayan şey. İşte bu, akort çatalının ya da işitimölçerin veya radyodaki acil durum yayın sisteminin tek frekansının çıkardığı sesle, müzik aletlerinin aynı anda birkaç armonik frekansta titreşen çok daha karmaşık sesi arasındaki farktır. Bir trompetin, obuanın, banjonun, piyanonun ya da kemanın kendilerine özgü sesleri, her bir aletin ürettiği belirgin bir armonik frekans kokteylinden dolaydır. Yüzlerce farklı armonik kokteyl hazırlamada usta olan ve bir müşteriye banjo, başka bir müşteriye orkestra davulu, bir sonrakine de bir erhu ya da trombon servisi yapan görünmez bir kozmik barmen imgesi çok hoşuma gidiyor.

İlk müzik aletlerini geliştirenler, seslerinden zevk almamızı sağ-

layan başka bir hayati özelliği inşa etmede de marifetliymişler. Müziği duyabilmek için ses dalgalarının sadece işitebileceğiniz frekans aralığında kalması yetmez, onları duyabilmeniz için yeterince yüksek olmaları da şarttır. Örneğin, bir teli çekmekle uzaktan duyulacak bir ses çıkmaz. Daha sert çekerek tele (dolayısıyla ürettiği ses dalgalarına) daha fazla enerji aktarabilirsiniz, ama yine de çok güçlü bir ses çıkartamayabilirsiniz. Neyse ki çok seneler –en az bin yıl– önce, insanlar bir ormanın açık alanında ya da bir odada bir uçtan ötekine duyulacak kadar güçlü ses çıkaran müzik aletlerini nasıl yapacaklarını keşfettiler.

Atalarımızın karşılaştığı problemin aynısını yeniden oluşturabilir, sonra da çözebilirsiniz. Otuz santim uzunluğunda bir tel alın, bir ucunu kapı koluna ya da çekmece kulpuna bağlayın, öteki ucunu da iyice gerilene kadar çekin, sonra elinizle çekip bırakarak çalın. Pek bir şey olmuyor, değil mi? Sesini işitebilirsiniz ve de telin boyuna, kalınlığına ne kadar sıkı tuttuğunuza bağlı olarak tanınacak bir nota bile çıkarabilirsiniz. Ama ses pek güçlü değil, doğru mu? Yan odada kimse duyamaz. Şimdi bir plastik bardak alıp teli içinden geçirin ve kapı kolu ya da çekmece kulpundan yukarıda olacak bir açıda tutun (bardak elinize doğru kaymasın diye), sonra da teli çekerek tıngırdatın, daha fazla ses duyacaksınız. Neden mi? Çünkü tel enerjisinin bir kısmını plastik bardağa aktaracaktır, o da aynı frekansta titreşir, ama titreşimlerini havaya aktarmak için çok daha geniş bir yüzeyi vardır. Sonuç olarak daha yüksek ses duyarsınız.

Plastik bardağınızla bir ses yansıtıcısının çalışma ilkesini göstermiş oldunuz – gitar ve kontrbastan keman ve piyanoya kadar bütün telli çalgılar için kesinlikle zorunlu bir şey. Genellikle ahşaptan yapırlar, tellerin titreşimlerini kaparlar ve bu frekansları havaya yayarlar, bu şekilde tellerin sesini büyük ölçüde yükseltirler.

Ses yansıtıcılarını gitar ve kemanlarda görmek kolaydır. Kuyruklu piyanoda ses yansıtıcısı düz ve yatay olup tellerin alt tarafına yerleştirilmiştir, teller de ses yansıtıcısına monte edilmiştir; duvar piyanosundaysa, tellerin arkasında dik durur. Arpta ses yansıtıcısı genellikle tellerin alt uça bağlı olduğu kısımdır.

Derste ses yansıtıcısının çalışma ilkesini farklı şekillerde gösteriyorum. Bir tanesinde kızım Emma'nın anaokulunda yaptığı bir müzik aletini kullanıyorum. Bir Kentucky Fried Chicken kutusuna bağ-

lanmış sıradan bir telden ibaret. Telin gerginliğini bir tahta parçasıyla değiştirebiliyorsunuz. Gerçekten çok eğlenceli; gerginliği artırdıkça ses perdesi yükseliyor. KFC kutusu mükemmel bir ses yansıtıcısı ve öğrencilerim telin çalınmasını oldukça uzaklardan duyabiliyorlar. Sevdiğim gösterilerimden birini de çok seneler önce Avusturya'dan aldığım bir müzik kutusuyla yapıyorum; kibrit kutusundan daha büyük değil ve bir ses yansıtıcısı da yok. Kolu çevirdiğinizde, titreşen çatal uçlarıyla müzik çalıyor. Sınıfta kolu çeviriyorum ama kimse duyamıyor, ben bile! Sonra laboratuvar masama yerleştirip kolu tekrar çeviriyorum. O zaman bütün öğrencilerim duyabiliyor, hatta bu büyük amfinin ta gerilerindekiler bile. Basit bir ses yansıtıcısının bile bu kadar çok işe yarayabilmesi beni daima hayrete düşürmüştür.

Fakat bazen gerçek birer sanat eseri de olabiliyorlar. Yüksek kalitede müzik aleti yapmanın birçok sırrı var. Örneğin Steinway & Sons'ın o dünyaca ünlü piyanolarının ses yansıtıcılarını nasıl yaptıklarını size anlatacaklarını sanmayın! En müthiş ve en beğenilen kemanları yapmış olan, on yedinci ve on sekizinci yüzyılda yaşamış Stradivarius ailesini duymuşsunuzdur. Şu an sadece yaklaşık 540 Stradivarius kemanının var olduğu biliniyor; bir tanesi 2006'da 3,5 milyon dolara satıldı. Bazı fizikçiler "Stradivarius sırları"nı ortaya çıkararak aynı sihirli sesi veren ucuz kemanlar üretme umuduyla bu kemanlar üzerinde geniş araştırmalar yaptı. Bu araştırmaların bir kısmı hakkında şu adreste bilgi bulabilirsiniz: www.sciencedaily.com/releases/2009/01/090122141228.htm.

Notaların belli kombinasyonlarının daha çok ya da daha az hoşagiden bir ses vermesi büyük ölçüde frekanslar ve armoniklerle ilgili. En yaygın ikili nota kombinasyonu –en azından Batı müziğinde– birinin ötekini tam iki katı frekansa sahip olduğu kombinasyondur. Bu seslerin birbirinden bir oktavla ayrıldığını söyleriz. Fakat başka pek çok hoşagiden kombinasyon vardır: akorlar, üçlemeler, beşlemeler vs.

Matematikçiler ve "doğa bilimcileri" eski Yunan'da yaşamış Pisagor'un zamanından beri farklı frekanslar arasındaki o güzel sayısal ilişkilerden büyülenmişlerdir. Tarihçilerin, Pisagor'un ne kadarını kendisinin bulduğu, ne kadarını Babillilerden aldığı ve ne kadarını takipçilerinin keşfettiği konusunda görüş ayrılıkları var, fakat

farklı uzunlukta ve gerginlikteki tellerin tahmin edilebilir ve hoşça giden ses perdeleri ürettiğinin keşfi ona atfediliyor gibi. Pek çok fizikçi ona ilk sicim kuramcısı demekten büyük zevk alır.*

Müzik aleti yapımcıları bu bilgidен mükemmel biçimde yararlandılar. Örneğin bir kemandaki farklı tellerin hepsinin farklı ağırlık ve gerginlikleri vardır, bu sayede, hepsi hemen hemen aynı boyda olsa da yüksek ve düşük frekanslar ve armonikler üretebilirler. Kemancılar tellerinin boylarını, kemanın sapında ellerini aşağı-yukarı hareket ettirerek değiştirirler. Parmakları çenelerine doğru ilerlerken, telin boyunu kısaltıp, ilk armoniğin frekansının yanı sıra daha yüksek armoniklerin frekanslarını da yükseltir. Bu oldukça karmaşıklaşabilir. Hint sitarı gibi bazı telli çalgılarda, asıl çalgı tellerinin yanı sıra ya da onların altında sempatik teller adı verilen fazladan teller bulunur. Bunlar çalgı çalınırken kendi rezonans frekanslarında titreşirler.

Bir çalgının tellerinde çoklu armonik frekanslarını görmek çok zor, belki de imkânsızdır, fakat bunları size bir mikrofonu osiloskoba bağlayarak etkileyici bir biçimde gösterebilirim. Bizzat görmediyseniz de muhtemelen televizyonda görmüşsünüzdür. Osiloskop cihazı, bir ekranda, ortadaki sabit yatay bir çizginin yukarısında ve aşağısında, aşağı-yukarı giden bir çizgi şeklinde, zamana bağlı bir titreşimi –ya da salınımı– gösterir. Yoğun bakım üniteleri ve acil bölümündeki odalar, hastaların kalp atışlarını ölçmek için bunlarla doludur.

Öğrencilerimden daima müzik aletlerini sınıfa getirmelerini isterim, böylece her birinin çıkardığı çeşitli armonik kokteylleri görebiliriz.

La akort çatalını mikrofona tutunca ekranda basit bir 440 hertzlik sinüs eğrisi görünür. Çizgi temiz ve son derece düzenlidir, çünkü daha önce de gördüğümüz gibi, akort çatalı tek bir frekans üretir. Fakat aynı la notasını çalması için kemanını getirmiş olan öğrenciyi davet ettiğimde, ekran çok daha ilginç bir hal alır. Temel frekans hâlâ oradadır –ekranda baskın sinüs eğrisi olarak görebilirsiniz– fakat eğri şimdi yüksek armoniklerden dolayı çok daha karmaşıktır; bir

* Türkçeye "sicim kuramı" olarak çevrilen *string theory*'deki *string* kelimesi, hem sicim hem de tel (gitar teli, keman teli gibi) anlamına gelir. –y.n.

öğrenci çellosunu çalınca da yine farklı bir sonuç oraya çıkar. Bir de kemancının aynı anda iki nota çaldığını hayal edin!

Şarkıcılar ses telleri ("ses kıvrımları" daha tanımlayıcı bir terim olurdu) aracılığıyla hava göndererek rezonans fiziğini göstermeye başladıklarında, mukoza zarları titreşir ve ses dalgaları yaratırlar. Derste bir öğrenciden de şarkı söylemesini isterim; benzer derecede karmaşık eğriler üst üste binerken osiloskop aynı hikâyeyi anlatır.

Piyano çalarken bastığınız tuş, bir çekicin bir tele vurmasını sağlar; bu telin uzunluğu, ağırlığı ve gerginliği, belli bir ilk armonik frekansında salınım yapacak biçimde ayarlanmıştır. Fakat bir şekilde, tıpkı keman telleri ve ses telleri gibi, piyano telleri de yüksek armoniklerde aynı anda titreşir.

Şimdi atomaltı dünyasına muazzam bir düşünce sıçraması yaparak, bir atom çekirdeğinden çok ama çok daha küçük, farklı frekanslarda ve farklı armoniklerde salınım yapan aşırı minik, kemanınki gibi teller ya da sicimler hayal edin. Başka bir deyişle, madde-nin temel yapıtaşlarının bu minicik titreşen sicimler olduğu ihtimalini düşünün: farklı armonik frekanslarda ve pek çok boyutta titreşerek temel parçacıklar denen –kuark, gluon, nötrino, elektron gibi– parçacıkları oluşturan sicimler. Bu adımı atmayı başardıysanız, sicim kuramının temel önermesini kavramışsınızdır demektir. Teorik fizikçilerin evrendeki bütün temel parçacıkları ve kuvvetleri tarif eden tek bir kuram bulmak için son kırk yılda sarf ettikleri gayretleri açıklayan geniş kapsamlı terimdir bu. Bir anlamda "her şey"in kuramı.

Sicim kuramının başarılı olup olmayacağı hakkında kimsenin en ufak bir fikri yok. Nobel Ödüllü Sheldon Glashow bunun "bir fizik kuramı mı yoksa bir felsefe mi" olduğunu sorguluyor. Fakat evrenin en temel birimlerinin aklın almayacağı kadar minik tellerin/ sicimlerin farklı rezonans seviyeleri olduğu doğruysa, o zaman, kuvvetleri ve temel parçacıklarıyla evren, Mozart'ın "Twinkle, Twinkle Little Star" ("Daha Dün Annemizin") parçası üzerine o harikulade, git-tikçe karmaşıklaşan çeşitlemelerinin bir kozmik versiyonuna benziyor olabilir.

Bütün nesnelerin rezonans frekansları vardır, buzdolabınızdaki ketçap şişesinden tutun da, dünyadaki en uzun binaya kadar; pek çoğu gizemlidir ve tahmini zordur. Arabanız varsa, rezonanslar duy-

muşsunuzdur ve pek hoşunuza gitmemiştir. Araba kullanırken mutlaka bir ses duyduğunuz, ama hızlanınca kaybolduğu olmuştur.

Son arabamdaki kontrol paneli, ben ne zaman trafik lambalarında rölantide beklesem temel frekansını yakalamışa benziyordu. Gaza basıp motoru hızlandırınca, hareket etmesem bile, arabanın titreşiminin frekansını değiştirince ses kayboluyordu. Bazen bir süreliğine yeni bir ses duyuyordum, o da genellikle daha hızlı ya da yavaş sürdüğümde kayboluyordu. Farklı hızlarda, yani farklı titreşim frekanslarında, araba—ve binlerce parçası, bir kısmı da ne yazık ki gevşemiş—diyelim ki egzoz susturucusunun ya da tekleyen motor bağlantılarının bir rezonans frekansını yakalıyor ve benimle konuşuyordu. Hepsi aynı şeyi söylüyordu: "Beni tamirciye götür; beni tamirciye götür." Bense bunu hep ihmal ettim – bu rezonansların verdiği zararı daha sonra anlayacaktım. Arabayı nihayet götürdüğümde, tamircinin yanında o korkunç seslerin aynısını çıkaramayınca kendimi biraz aptal gibi hissettim.

Hatırlıyorum da öğrenciyken, erkek öğrenci birliğimizde, yemek sonrasında sevmediğimiz konuşmacıyı dinlerken şarap kadehlerimizi alıp ıslak parmaklarımızı kadehin ağzında gezdirerek ses çıkarırdık, evde kolaylıkla yapabileceğiniz bir şey. Bu bizim şarap kadehlerimizin temel frekansıydı. Bunu aynı anda yapan yüz öğrenci olunca çok sinir bozucu oluyordu tabii (sonuçta bir öğrenci birlikti burası) – ama çok da etkiliydi, konuşmacı mesa'ji alıyordu.

Bir opera sanatçısının uygun notayı yeterince yüksek sesle söyleyerek bir şarap kadehini kırabileceğini duymayan yoktur. Artık rezonans hakkında bilginiz olduğuna göre, bu nasıl olabilir? Basit bir şey, en azından kuramsal olarak, değil mi? Bir şarap kadehini alıp temel frekansını ölçüp o frekansta ses çıkarırsanız ne olur? Benim tecrübelerime göre, çoğu zaman hiçbir şey olmaz. Bir opera sanatçısının böyle bir şey yaptığını hiç görmedim. O yüzden dersimde opera sanatçısı kullanmıyorum. Bir şarap kadehi seçiyorum, hafif hafif vuruyorum ve bir osiloskoplara temel frekansını ölçüyorum – tabii kadehten kadehe fark eder, ama benim kullandığım kadehler için daima 440 ile 480 hertz aralığındadır. Sonra şarap kadehinin temel frekansının *tamamen aynısına* sahip elektronik bir ses üretiyorum (aslında *tamamen aynısı* asla mümkün değil, ama çok yaklaşıma çalışıyorum). Bunu bir amfiye bağlıyorum ve sesi yavaş yavaş aç-

yorum. Sesi neden mi açıyorum? Çünkü ses ne kadar yüksekse, ses dalgasında o kadar çok enerji kadehe çarpacak. Ve şarap kadehinde titreşimlerin genliği büyüdükçe, kadeh içe ve dışa doğru daha çok bükülecek, ta ki (umuyoruz) kırılana kadar.

Kadehin titreştiğini göstermek için kamerayı iyice zumluyorum ve kadehi sestən az farklı bir frekansa ayarlı stroboskopa aydınlatıyorum. Muhteşem! Kadehin kâse kısmının titreşmeye başladığını görüyorsunuz; iki zıt yan önce daralıyor, sonra açılıyor ve hoparlörün sesini artırdıkça hareket ettikleri mesafe gitgide büyüyor, bazen de frekansla biraz oynamam gerekiyor ve derken --çaat!-- kadeh parçalanıyor. Burası daima öğrencilerin en sevdiği kısım; kadehin kırıldığını görmek için sabırsızlanıyorlar. (Bunu internetten izleyebilirsiniz: Elektrik ve Manyetizma 8.02, 27. dersin yaklaşık altı dakika kadar sonrasında: ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/video-lectures/lecture-27-resonance-and-destructive-resonance/.)

Öğrencilere Chladni levhaları denilen bir şeyi göstermeye de bayılırım. Bunlar en garip ve en güzel şekillerde rezonansın etkilerini gösterirler. Bu metal levhalar yaklaşık otuz santim genişliğindedir; kare, dikdörtgen ve hatta yuvarlak olanları vardır, ama en iyisi kare olanlardır. Levha, merkezinden bir çubuğa ya da sabit bir yere bağlanır. Üzerine biraz ince toz serpiştiririz ve bir keman yayını levhaya sürteriz. Levha bir ya da iki rezonans frekansında salınım yapmaya başlar. Levha üzerindeki titreşen dalgaların tepe ve çukur noktalarında, toz silkinip metalin üstünü açar; levhanın hiç titreşmediği yerler olan düğümlerde toplanır. (Tellerin düğüm noktaları olur, fakat Chladini levhası gibi iki boyutlu nesnelerde düğüm çizgileri olur.)

Yayı levhaya sürterek levhayı nasıl ve neresinden "çaldığınıza" bağlı olarak, farklı rezonans frekanslarını titreştirip yüzeyinde müthiş, hiç akla gelmeyen desenler oluşturunuz. Derste daha etkili --ama çok daha az romantik-- bir teknik kullanarak levhayı bir titreşim makinesine bağlarım. Makinenin frekansını değiştirerek, art arda olağanüstü desenler görürüz. Ne demek istediğimi şu YouTube adresinde görebilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=6wmFAwqQB0g. Bu desenlerin ardındaki matematiği bir düşünün hele!

Çocuklar ve aileler için verdiğim derslerde, yayı levhanın kenarlarına sürtsün diye ufaklıkları çağırırım -- böyle güzel ve gizemli de-

senler yapmaya bayılırlar. İşte fizik konusunda iletmeye çalıştığım mesaj da *bu*.

Nefeslilerin Müziği

Fakat orkestranın yarısını dışarıda bıraktık! Ya flüt, obua veya trombon ne olacak? Ne de olsa bunların titreşecek bir teli ya da seslerini yansıtacak bir ses yansıtıcıları yok. Kadim çalgılar olsalar da –bir süre önce gazetede bir akbaba kemiğinden oyulmuş 35.000 yıllık bir flütün fotoğrafını gördüm– nefesli çalgılar tellilere göre biraz daha gizemlidirler, kısmen mekanizmalarının görünmez olmasından.

Tabii farklı nefesliler var. Flüt ve blok flüt gibi bazılarının iki ucu açıkken, klarnet, obua ve trombonun bir ucu kapalıdır (üflemek için delikleri var elbette). Fakat hepsi, ağızdan salınan hava, çalğının *içindeki* hava sütununun titreşmesine neden olunca müzik yapar.

Bir nefesli çalğının içine hava üflemek ya da hava sokmak, gitar teline asılmak ya da bir yayla keman telini titreştirmek gibidir –hava sütununa enerji aktararak o hava oyuğuna koskoca bir frekans tayfını boca ediyorsunuz demektir, hava sütunu da titreşeceği frekansı kendi seçer, genellikle uzunluğuna bağlı olarak. Hayal etmesi zor ama hesaplaması görece kolay bir sonuçla aletin içindeki hava kendi temel frekansını ve yüksek armoniklerden de bazılarını seçip bu frekanslarda titreşmeye başlar. Hava sütunu bir kere titreşmeye başladı mı, tıpkı titreşen akort çatalı uçları gibi havayı itip çeker ve dinleyenlerin kulaklarına doğru ses dalgaları gönderir.

Obuada, klarnette ve saksafonda bir kamışa üflersiniz, o da enerjiyi hava sütununa aktarır ve ses çıkarmasını sağlar. Flütler, pikololar ve blok flütlerde rezonansı yaratan, çalan kişinin bir delikten ya da çalğının ağzından üfleme şeklidir. Bakır nefesli çalgılarda iki dudagınızı sıkıca birleştirip aletin içine doğru bir tür vızıltı biçiminde üflersiniz – bunun eğitimini almamışsanız, ne yapsanız olmaz. Ben canına yandığım şeyin içine ancak tükürük saçabiliyorum!

Aletin, flüt ya da pikolo gibi iki ucu da açıksa, hava sütunu her biri temel frekansın katı olan armoniklerinde titreşebilir, tıpkı telli çalgılarda olduğu gibi. Bir ucu kapalı öbür ucu açık olan tahta ne-

fesli aletlerde borunun şekli önemlidir. Oyuk, obua ve saksafondaki gibi konikse, aletler flüt gibi bütün armonikleri çıkarırlar. Ne var ki oyuk silindir biçimindeyse –klarnet gibi– hava sütunu sadece temel frekansın tek sayı katlarında ses çıkaracaktır: üç katı, beş katı, yedi katı vb. Karmaşık sebeplerden dolayı bütün bakır nefesli çalgılar bütün armoniklerde ses çıkarır, flüt gibi.

Daha sezgisel bir durum ise, hava sütunu uzadıkça, çıkan sesin frekansının küçülüp ses perdesinin alçalmasıdır. Borunun boyu yarıya inerse, ilk armoniklerin frekansı ikiye katlanır. Pikolonun böyle yüksek notalar çalması, fagotun böyle düşük notalar çalması ve Avustralya yerlilerinin nefesli çalgısının (didgeridoo) gerçekten ama gerçekten çok pes notalar çalması bu yüzdendir. Bu genel ilke, soprano ve alto saksafonların neden büyük olandan, yani uzun bariton saksafondan daha yüksek notalar çaldığını da açıklar. Borulu orgun boy boy bir dizi borusunun olmasının da sebebi budur – bazı borulu orglar dokuz oktav aralığında ses çıkarabilir. Yaklaşık 8,7 hertzlik bir temel frekans üretmek kocaman bir boru gerektirir – 19,5 metre uzunluğunda, iki ucu da açık bir boru. Titreşimleri hissetseniz de bu frekans insan kulağının duyabileceği sınırın altındadır. Dünyada bu devasa orglardan sadece iki tane var, zira pek pratik değiller. On kat kısa bir boru, on kat daha yüksek bir temel frekans üretir, yani 87 hertz. Yüz kat kısa bir boruysa yaklaşık 870 hertzlik bir temel frekans üretir.

Nefesli çalgı çalanlar, aletlerine sadece üflemezler. Aletlerindeki delikleri kapayıp açarlar da. Bu da fiilen hava sütununun boyunu kısaltır ya da uzatır, böylece ürettiği frekans yükselir ya da alçalır. Bir çocuk düdüğüyle oynarken, alçak tonların parmaklarınızla bütün delikleri kapadığınızda gelmesi de ondandır, böylece hava sütununun uzatmış olursunuz. Aynı ilke bakır nefesliler için de geçerlidir. Hava sütunu uzadıkça, daireler çizerek gitse de, ses perdesi düşer, yani bütün armonilerin en düşük frekansları çıkar. Si bemol tuba olarak bilinen en alçak perdeli tubanın, yaklaşık 30 hertz temel frekansıyla 5,5 metrelik bir borusu vardır; döner sübap adı verilen ilave sübaplar tonu 20 hertze düşürebilirler; si bemol trompetin borusu 1,4 metre uzunluğundadır. Trompetteki ya da tubadaki düğmeler ek boruları açar ya da kapar, böylece rezonans frekanslarının perdesini değiştirir. Görsel olarak kavranması en basit olan trombondur. Sür-

güsünü dışarı çekmek hava sütununu uzatır, rezonans frekanslarını düşürür.

Dersimde sürgülü bir trombonla "Jingle Bells" çalarım, öğrenciler çok sever – çalabildiğim tek parça olduğunu onlara asla söylemem. Aslında müzisyen olarak o kadar özürlüyüm ki bu dersi kaç kere vermiş olursam olayım yine de önceden prova yapmam gerekir. Sürgüsüne işaret bile koydum – daha doğrusu 1, 2, 3... diye not aldım; müzik notalarını bile okuyamıyorum. Ama daha önce de dediğim gibi, tümünden müzik kabiliyetinden yoksun olmam, müziğin güzelliğini anlamama ya da onunla pek çok eğlenceli deney yapmama mani olmadı.

Şu an bunları yazarken, bir litrelik plastik soda şişesinin içindeki hava sütunuyla eğlenceli bir deney yapıyorum. Kesinlikle mükemmel bir sütun değil, çünkü şişenin boynu kademe kademe genişleyip şişenin gövde çapına ulaşıyor. Şişe boynunun fiziği gerçekten karmaşık olabiliyor, tahmin edebileceğiniz gibi. Fakat nefesli bir çalgının müziğinin temel ilkesi –hava sütunu uzadıkça rezonans frekansları düşer– hâlâ geçerli. Bunu kolaylıkla deneyebilirsiniz.

Bir soda ya da şarap şişesini ağzına yakın bir seviyeye kadar doldurun (suyla!) ve tepesinden üflemeye çalışın. Biraz çalışmanız gerek, fakat çok geçmeden hava sütununu rezonans frekanslarında titreştireceksiniz. Ses önce yüksek perdeli olacak, ne kadar çok içerse-niz (neden suyu önerdiğimi anlıyorsunuz ya) hava sütunu o kadar uzar ve temel frekansın perdesi alçalır. Ben hava sütununu uzattıkça sesi daha hoş buluyorum. İlk armoniğin frekansı düştükçe, benim daha yüksek frekanslarda ek armonikler üretme ihtimalim, sesin de daha karmaşık bir tınıya sahip olma ihtimali artacaktır. Sesi çıkaran şeyin, tıpkı telde olduğu gibi, titreşen şişe olduğunu sanabilirsiniz ve şişenin titreştiğini gerçekten hissedersiniz de, tıpkı bir saksofonun titreştiğini hissedebileceğiniz şekilde. Ama yine de ses çıkaran içerideki hava sütunudur. Bunu adamakıllı anlamak için şu bilmeceyi düşünün: Birbirinin tıpatıp aynısı olan iki şarap kadehi alın, biri boş olsun, öteki yarıya kadar dolu. Sonra kadehlere bir kaşıkla hafif hafif vurarak ya da ıslak parmağınızı kadehlerin ağzına sürterek ilk armoniği canlandırın. Hangi frekans daha yüksek olur ve neden?

Size yanlış cevap vermeniz için tuzak kurduğumdan bu soruyu sormam adil değil – kusura bakmayın! Ama belki de çözersiniz.

Şu fırlıdak hortum mu ne dedikleri 75 santimetrelik esnek, kıvrımlı, renkli plastik hortumlarda da aynı ilke iş başındadır. Görmüş ya da oynamışsınızdır. Nasıl çalıştığını hatırlıyor musunuz? Başınızın etrafında fır döndürmeye başladığınızda, önce düşük frekanslı bir ses duyarsınız. Tabii bunun ilk armonik olmasını beklersiniz, tıpkı ilk defa oynarken benim de beklediğim gibi. Ne var ki ilk armoniği bir türlü elde etmeyi başaramadım. İlk duyduğum hep ikinci armonikti. Hızlandıkça gitgide daha yüksek armonikleri elde edebilirsiniz. İnternetteki reklamlar bu hortumlardan dört ton çıkarabileceğinizi ileri sürüyor, fakat siz sadece üçünü elde edebilirsiniz – dördüncü ton, yani beşinci armonik gerçekten çok ama çok hızlı döndürmeyi gerektiriyor. 75 santimetrelik bir hortumun ilk beş armoniğinin frekanslarını hesapladım ve 223 hertz (bunu hiç çıkaramadım), 446 hertz, 669 hertz, 892 hertz ve 1115 hertz buldum. Ses perdesi epey yükseğe epey çabuk çıkıyor.

Tehlikeli Rezonans

Rezonansın fiziği sınıf içi uygulamalarının çok ötelerine uzanır. Bu farklı müzik aletleriyle müziğin yaratabileceği farklı ruh hallerini bir düşünün. Müzik rezonansı duygularımıza hitap eder, bize neşe, kaygı, sükûnet, hayranlık, korku, sevinç, keder ve daha pek çok şey getirir. Duygusal rezonans da zenginlik ve derinlikle, anlayış, şefkat ve arzu armonikleri dolu bir ilişki yaratır. Başka biriyle "aynı telden çalmak" isteyişimiz tesadüf sayılmaz. Ve bu rezonansı –geçici bir süre için ya da temelli– kaybetmek ne acıdır, ahenk diye hissettiğimiz şeyin uyumsuz bir karışıma ve duygusal gürültüye dönüşmesi. Edward Albee'nin *Kim Korkar Virginia Woolf'tan?* eserindeki George ve Martha karakterlerini düşünün. Birbirlerinin gözlerini oyuyorlar. Kavgaları teke tekken birbirlerini kızıştırıp misafirlerine seyirlik malzeme oluyorlar ancak. Misafire saldırma oyunu için güçlerini birleştirdiklerindeyse çok daha tehlikeli oluyorlar.

Rezonans fizikte de güçlü bir şekilde yıkıcı olabiliyor. Yakın geçmişte yıkıcı rezonansın en görülesi örneği Kasım 1940'ta, Tacoma Narrows Köprüsü'nün asma kısmına yandan gelen bir rüzgâr tam yerinden vurunca meydana geldi. Bir aşağı bir yukarı salınım-

larından dolayı Galloping Gertie (Dört Nala Koşan Gertie) diye anılan bu mühendislik harikası güçlü bir biçimde rezonansa geçti. Yanlamasına vuran rüzgâr köprü'nün genliğini yükselttikçe, yapı titreşmeye ve bükülmeye başladı ve bükülme gitgide uç noktalara gelince, asmalı ana gövde parçalanıp suya düştü. Bu görkemli çöküşü şu adreste izleyebilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxw.

Doksan sene öncesinde, Fransa'nın Angers kentinde, Maine Irmağı üzerindeki bir asma köprü, üzerinden 478 asker ordu nizamıyla uygun adım geçerken çöktü. Yürüyüşleri köprüde bir rezonans yaratmış, bu da bazı çürümüş halatları parçalamıştı; aşağıdaki ırmağa düşünce 200'den fazla asker öldü. Bu facia Fransa'da asma köprü yapımını yirmi yıl durdurdu. 1831'de Broughton Asma Köprüsü'nü uygun adım geçen Britanya birlikleri köprü'nün rezonansa geçmesine neden oldular, köprü'nün bir ucundaki cıvata fırladı ve köprü çöktü. Kimse ölmedi, fakat Britanya ordusu o olaydan sonra köprüden geçen bütün birliklerin uygun adımı bozması talimatını verdi.

Londra'daki Millennium Köprüsü 2000 yılında açıldı, binlerce yaya köprü'nün biraz çalkalandığını keşfetti (mühendislerin lateral rezonans dedikleri şey vardı); hemen birkaç gün sonra yetkililer köprüyü –utanç verici bir şekilde– iki yıl boyunca kapatarak, yayaların adımlarının yarattığı hareketi kontrol altında tutmak için darbe emici pistonlar kurdular. New York şehrindeki büyük Brooklyn Köprüsü bile 2003'teki bir elektrik kesintisi sırasında köprüyü tıklım tıklım dolduran yayaları korkutmuştu ve köprü zeminindeki yatay salınım bazılarının midesini bulandırmıştı.

Böyle durumlarda yayalar köprü üzerinde, genellikle geçmekte olan arabalardan daha çok ağırlık yapar ve ayaklarının birleşik hareketi, uygun adım olmasa bile, köprü zemininde bir rezonans titreşimini –çalkalanmayı– başlatabilir. Köprü bir tarafa gidince, yayalar öteki tarafa yürüyerek durumu telafi eder, bu da çalkalanmanın genliğini artırır. Mühendisler bile kalabalıkların köprüler üzerinde yapabilecekleri etkileri yeterince bilmediklerini itiraf ediyorlar. Neyse ki, binaları yıkabilecek rezonans frekansları yaratma riski olan şiddetli rüzgâr ve depremlere dayanıklı gökdelenler yapma konusunda çok şey biliyorlar. Bir düşünün: Atalarımızın 35.000 yıllık flütünün acıklı sesini üreten aynı ilke, kudretli ve devasa Brooklyn Köprüsü'nü ve dünyadaki en yüksek binaları tehdit edebilir.

Elektriğin Harikaları

Şimdi söyleyeceğim şey en iyi, kışın hava çok kuruyken görülür. Üzerinizde polyester gömlek ya da kazak olsun, sonra hava karanlıkken aynanın karşısına geçin ve gömleğinizi ya da kazağınızı çıkarmaya başlayın. Çatırdama sesleri duyacağınızı anlamışsınızdır, tıpkı kurutma makinesinden çamaşırları çıkarırken olduğu gibi (tabii bütün o elektriği azaltmak için tasarlanmış şu hiç romantik olmayan kurutma makinesi kâğıtlarından kullanmıyorsanız). Fakat şimdi ayrıca onlarca minik, miniminnacık kıvılcım parıltılarını da göreceksiniz. Bunu yapmaya bayılırım çünkü fiziğin gündelik hayatımıza ne kadar yakın olduğunu hatırlatır bana, yeter ki nasıl bakacağımızı bilelim. Ve öğrencilerime hep dediğim gibi, aslında bu küçük gösteriyi yanınızda bir arkadaşla yaparsanız çok daha eğlenceli olur.

Kışın ne zaman bir halı üzerinde yürüyüp kapının koluna ulaşsanız –içiniz bir hoş mu oldu?– elektrik çarpabileceğini ve bunun da statik elektrikten olduğunu biliyorsunuz. Hatta belki bir arkadaşınızı elini sıkarak çarpmış ya da paltonuzu vestiyere bırakırken bir çarpılma hissetmiş olabilirsiniz. Doğrusunu söylemek gerekirse, kışın statik elektrik her yerde kol geziyor gibidir. Fırçalarken saçınızın ayrıldığını hissedersiniz, bazen de şapkanızı çıkardığınızda saçınız kendiliğinden dikilir kalır. Ne var bu kışta, neden o kadar çok kıvılcım uçuşuyor?

Bütün bu soruların cevabı eski Yunan'da başlıyor. Bizim elektrik diye bildiğimiz fenomenin adını koyan ve yazılı kayda geçirenler onlardı. İki bin yıldan çok önce Yunanlılar kehribarın –Yunanlıların ve Mısırlıların mücevher yaptıkları fosilleşmiş reçine– bir kumaş

parçasına sürttüğünüzde kuru yaprak parçacıklarını çektiğini biliyorlardı. Yeterince sürtüldüğünde çarpabilir de.

Yunanlıların partilerde sıkıldıkları zaman, kadınlarının kehribar takılarını giysilerine sürtüp takıyı kurbağalara dokundurduklarını ileri süren hikâyeler okudum. Kurbağalar çaresizlik içinde kaçık partilerden kaçmaya çalışarak sığıyormuş tabii. Bu da belli ki o eski insanlar için büyük bir eğlence kaynağıymış. Bu hikâyelerin iler tutar yanı yok elbette. Bir kere, sarhoş eğlence düşkünleri elektrikle çarp-sın diye etrafta bir sürü kurbağanın beklediği kaç parti hayal edebilirsiniz? İkincisi, birazdan açıklayacağım sebeplerden, kurbağaları görme ihtimalinizin daha yüksek olduğu aylarda ve hava da nemliyse –özellikle Yunanistan'da– statik elektrik çok etkili olmaz. Ama hikâyenin gerçekliği ne olursa olsun, inkâr edilemeyecek şey, "kehribar"ın Yunanca karşılığı olan kelimenin *elektron* olduğudur; o yüzden, evrendeki küçük büyük pek çok şeydeki gibi elektrige adını veren gerçekten de Yunanlılardır.

On yedinci ve on sekizinci yüzyılın Avrupalı fizikçileri, fiziğin doğa felsefesi olarak bilindiği zamanlar, atomlar ya da bileşenleri hakkında hiçbir şey bilmiyorlardı, fakat gözlemcilik, deneycilik ve mucitlik konusunda müthiştiler, bir kısmı da harika kuramcılardı. Kimler vardı kimler: Tycho Brahe, Galileo Galilei, Johannes Kepler, Isaac Newton, René Descartes, Blaise Pascal, Robert Hooke ve Robert Boyle, Gottfried Leibniz, Christiaan Huygens – hepsi keşifler yapıyor, kitaplar yazıyor, birbirleriyle tartışıyor ve ortaçağ skolastik felsefesini baş aşağı ediyorlardı.

1730'lara gelindiğinde, hakiki bilimsel elektrik çalışmaları (salon hokuspokusları değil) İngiltere, Fransa ve tabii Philadelphia'da çoktan başlamıştı. Bütün bu deneyciler, cam bir çubuğu bir ipek parçasına sürttüklerinde bir tür yük kazanacağını (buna A diyelim), fakat kehribar ya da lastiği aynı biçimde sürttüklerinde farklı bir yük kazanacağını (buna da şimdilik B diyelim) keşfetmişlerdi. Yüklerin farklı olduğunu biliyorlardı çünkü ipeğe sürterek A yükü kazandırdıkları iki cam çubuğu alıp yan yana koyduklarında, çubuklar –tamamen görünmez fakat hissedilebilir bir kuvvetle– birbirini itiyordu. B ile yüklü benzer nesneler de birbirlerini itiyordu. Ama farklı yüklü nesneler, diyelim yüklü cam çubuk (A) ve yüklü lastik çubuk (B) birbirlerini itmeyip çekiyordu.

Nesneleri sürterek elektrik yüklemek hakikaten hayret verici bir fenomen, hatta harika bir adı var: "triboelektrik" etkisi (Yunanca "sürtünme"den geliyor). Yükü üreten şey iki nesnenin arasındaki sürtünme gibi geliyor, ama durum bu değil. Sonra anlaşılıyor ki bazı malzemeler B yükünü açgözlü bir şekilde çekiyor, başka malzemelerse ondan kurtulmaya sabırsızlanıyor, böylece A yükünü elde ediyor. Sürtmenin işe yaramasının sebebi, maddeler arasındaki temas noktalarının sayısını artırıp yük aktarımını kolaylaştırması. Sürtünmeyle elektriklenen malzemelerin sıralı listesini (*triboelectric series*) internette kolaylıkla bulabilirsiniz; çizelgedeki iki malzeme birbirlerinden ne kadar uzaksa birbirlerini o kadar kolay yükleyebilirler.

Genellikle tarakların yapıldığı plastik ya da sert lastiği ele alın. Bu madde sürtünmeyle elektriklenme çizelgesinde insan saçından epey uzakta, bu da kışın saçınızı tararken neden bu kadar kolay kıvılcım çıktığını ve saçlarınızın dikildiğini açıklıyor – özellikle de benim saçımın. Bir düşünün: Güçlü bir şekilde saçımı tarayarak hem tarğımı hem saçımı elektrikle yüklediğimden dolayı sadece kıvılcım çıkarmakla kalmıyorum; ayrıca saçın tamamı aynı yükü aldığından –artık hangisiyse– yüklü her saç teli, aynı yüke sahip bütün öteki saç tellerini itiyor ve ben de çılgın bir bilimadamına benzemeye başlıyorum. Ayakkabılarınızı halı üzerinde sürdüğünüzde, ayakkabı tabanınızın ve halının malzemesine bağlı olarak ya A ile ya da B ile kendinizi yüklersiniz. En yakın kapı kolundan çarpıldığınızda, eliniz ya kapı kolundan yük alıyor ya da ona yük bindiriyor demektir. Hangi yükü aldığınızın önemi yok, öyle ya da böyle elektrik çarpmasını hissediyorsunuz!

"Elektrik akışkanı" ya da "elektrik ateşi" dediği şeyin bütün maddelere nüfuz ettiği fikrini ilk ortaya atan Benjamin Franklin'di – diplomat, devlet adamı, editör, siyaset felsefecisi, çift odaklı gözlüklerin, yüzme paletinin, kilometre sayacının ve Franklin sobasının mucidi. Diğer doğa felsefecilerinin deney sonuçlarına bir açıklama getiriyor gibi görüldüğünden, bu kuram gayet ikna edici bulundu. Örneğin İngiliz Stephen Gray elektriğin metal telle uzun mesafelere iletilebileceğini göstermişti, dolayısıyla genellikle görünmeyen bir akışkan ya da ateş (ne de olsa kıvılcımlar ateşe benzer) çok mantıklıydı.

Franklin'e göre, ateşten çok alırsanız pozitif yüklü, eğer ateş ekşiğiniz varsa negatif yüklü oluyordunuz. Franklin ayrıca pozitif-negatif işaret kullanma geleneğini başlattı ve camı bir yün ya da ipek parçasına sürttüğünüzde (A yükü üreterek) ona fazladan ateş verdiğinizizi, dolayısıyla camın pozitif yüklü olması gerektiğini öne sürdü.

Franklin elektriğe neyin sebep olduğunu bilmiyordu, ama onun elektrik akışkanı fikri akıllıca olduğu gibi –tam doğru olmasa da– kullanışlıydı. Savının devamında, akışkanı alıp bir maddeden başka maddeye götürürseniz, fazlalığı olanın pozitif yükleneceğini, akışkanı aldığınız maddenin ise negatif yükleneceğini söylüyordu. Franklin elektrik yükünün korunumu yasasını keşfetmişti. Buna göre elektrik yükünü yoktan var edemezsiniz ve varken yok edemezsiniz. Belli miktarda pozitif yük elde ederseniz, o zaman otomatik olarak aynı miktarda negatif yük yaratırsınız. Elektrik yükü sıfır toplamı bir oyundur – fizikçilerin diliyle elektrik yükü korunur.

Franklin bugün bizim de anladığımız gibi, benzer yüklerin (pozitifle pozitif, negatifle negatif) birbirini ittiğini, zıt yüklerinse (pozitifle negatif) birbirini çektiğini anlamıştı. Deneyleri sonucunda gördü ki, nesnelerin sahip olduğu ateş arttıkça ve aralarındaki mesafe azaldıkça kuvvetler de artıyordu, ister çekme kuvveti olsun ister itme. Ayrıca Gray ve diğerleriyle hemen hemen aynı dönemde, bazı maddelerin akışkanı ya da ateşi ilettiğini –şimdi bütün o maddelere iletken diyoruz– bazılarının ise iletmediğini –bu yüzden onlara iletmeyen ya da yalıtkan adı verilir– keşfetmişti.

Franklin'in çözemediği şey ateşin gerçekten neden meydana geldiğidir. Ateş ya da akışkan değilse, nedir? Ve neden kışın çok fazla var gibidir? (En azından benim oturduğum yerde, ABD'nin kuzey-doğusunda bizi çarpıp duruyor.)

Elektrik ateşinin doğasını kavramak için atomun içine şöyle bir bakmadan önce, elektriğin dünyamızın her tarafına Franklin'in bildiğinden –ve pek çoğumuzun farkında olduğundan– daha çok nüfuz ettiğini görmemiz gerek. Elektrik her gün karşılaştığımız şeylerin çoğunu bir arada tutmakla kalmaz; aynı zamanda gördüğümüz, bildiğimiz, yaptığımız her şeyi mümkün kılar. Düşünememiz, hissedememiz, merak edememiz, beynimizdeki aşağı yukarı 100 milyar hücrenin kim bilir kaç milyonlarcası arasındaki elektrik yüklerinin sıçramasıyla ancak mümkün olabiliyor. Aynı zamanda, nefes

alabilmemiz de sinirlerin ürettiği elektrik itkilerinin göğsümüzdeki farklı kasların karmaşık bir hareketler senfonisi içinde kasılıp gevşemesini sağlamasıyla ancak mümkün oluyor. Örneğin, en basitinden, diyaframınız kasılıp toraksınızda aşağı indiğinde göğüs boşluğunuzu genişletir, akciğerlerin içine hava çeker. Gevşeyip de tekrar yukarı doğru genişleyince, akciğerlerdeki havayı dışarı iter. Bu hareketlerin hiçbiri tüm bedeniniz boyunca sayısız elektrik itkisi sürekli mesaj göndermeden gerçekleşemez. Bu mesajlar kaslara kasılmalarını, sonra da kasılmayı bırakmalarını söyler ve ötekiler işi devralır. Bu süreç, yaşadığınız müddetçe böyle devam eder.

Gözlerimiz görür çünkü retinalarımızın minik hücreleri (siyah-beyazları ve renkleri seçen, sırasıyla, çubuk ve koni hücreleri) tespit ettikleriyle uyarılır ve optik sinirler aracılığıyla beynimize elektrik sinyalleri yollarlar. O zaman beynimiz bir meyve tezgâhına mı yoksa bir gökdelene mi baktığımıza karar verir. Hibrid araçlar gitgide elektriği daha çok kullansa da arabalarımızın çoğu benzinle çalışır, fakat aküden ateşlemeye ve oradan da silindire akan elektrik olmadan hiçbir motorda benzin kullanılamazdı. Silindirde de elektrik kıvılcımları kontrollü patlamaları ateşler, dakikada binlercesini. Moleküller atomları bir arada tutan elektrik kuvvetiyle oluşturulduklarından, kimyasal tepkimeler –benzinin yanması gibi– elektriksiz mümkün olmazdı.

Atlar elektrik sayesinde koşar, köpekler soluk soluğa kalır ve kediler gerinir. Elektrik sayesinde streç film kırışır, koli bandı kendini çeker, selofan ambalaj bir çikolata kutusundan asla ayrılmak istemezmiş gibi görünür. Listenin sonu pek gelecek gibi değil, fakat gerçekten elektrik olmadan var olacağını hayal edebileceğimiz hiçbir şey yok; elektrik olmadan düşünemezdik bile.

Dikkatimizi vücudumuzdaki mikroskobik hücrelerden daha da küçük şeylere çevirdiğimizde de aynı şey geçerlidir. Dünyada her bir madde parçası atomlardan oluşur, elektriği de gerçekten anlamak için atomun içine girip kısaca parçalarına bir bakmamız gerekir: hepsine birden şimdi değil, çünkü bu durumda işler inanılmaz derecede zorlaşır – sadece ihtiyacımız olan parçalara.

Atomların kendisi o kadar küçüktür ki onları sadece en güçlü ve usta aletler –taramalı tünellemeli mikroskoplar, atomik kuvvet mikroskopları ve transmisyon elektron mikroskopları– görebilir. (Bu ci-

hazların çektiği bazı hayret verici resimler var internette. Bir kısmını şurada görebilirsiniz: www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html.)

6,5 milyar atomu alıp –aşağı yukarı yeryüzündeki insan sayısı kadar– yan yana birbirlerine degecek şekilde dizseydim, yaklaşık 60 santimetrelilik bir çizgi oluşurdu. Fakat atom çekirdeği atomdan da küçük, yaklaşık on bin kat daha küçüktür ve içinde nötron ile pozitif yüklü proton vardır. Nötron adından da anlaşılacağı gibi elektrik açısından yüksüzdür; hiç yükü yoktur. Protonlar (Yunanca "ilki" demek) yaklaşık nötronlar kadar bir kütleye sahiptir –akıl almaya-cak kadar küçük, aşağı yukarı bir kilogramın milyarda birinin milyarda birinin iki milyarda biri (2×10^{-27}). Dolayısıyla bir çekirdekte ne kadar proton ve nötron olursa olsun –ki bazılarının iki yüzden fazladır– yine de gerçekten hafif kalır. Ve minicik: Çapı yaklaşık bir santimetrenin sadece trilyonda biridir.

Öte yandan elektriği anlamak için en önemli nokta protonun pozitif yüklü olmasıdır. Bunun pozitif diye anılmasının içsel bir sebebi yok, fakat Franklin'den beri fizikçiler, cam çubuk ipeğe sürtüldükten sonra üzerinde kalan yüke pozitif diyegelmişlerdir, o halde protonlar pozitifdir.

Sonradan ortaya çıktığına göre, atomun elektronlardan oluşan geri kalan kısmı –çekirdeğin etrafında, atomaltı ölçülerine göre epey bir mesafede bir bulut halinde kaynayan negatif yüklü parçacıklar– daha da önemlidir. Atomun çekirdeğini temsilen elinizde bir beyzbol topu olsaydı, etrafındaki elektron bulutu sekiz yüz metre kadar uzakta olurdu. Belli ki atomun büyük kısmı boşluktan ibaret.

Bir elektronun negatif yükü güç bakımından protonun pozitif yüküne eşittir. Sonuç olarak, aynı sayıda proton ve elektronu olan atomlar ve moleküller elektrik açısından yüksüzdürler. Yüksüz olmadıklarında, elektron fazlalıkları ya da eksiklikleri olduğunda, bunlara iyon deriz. 6. Bölüm'de ele aldığımız plazmalar kısmen ya da tamamen iyonlaşmışlardır. Dünyada karşımıza çıkan atom ve moleküllerin çoğu elektrik bakımından yüksüzdür. Saf suda oda sıcaklığında sadece 10 milyonda 1 molekül iyonlaşır.

Franklin'in başlattığı geleneğin sonucu olarak, bazı nesnelerde elektron bolluğu varsa, onların negatif yüklü olduğunu söyleriz; elektron eksikleri varsa, onlara da pozitif yüklü deriz. Camı ipeğe sürterseniz (adeta) pek çok elektronu "söküp atarsınız", böylece cam

en sonunda pozitif yüklü kalır. Aynı ipek parçasına kehribarı ya da sert lastiği sürterseniz, onlar elektron toplayıp negatif yüke sahip olurlar.

Pek çok metalde çok sayıda elektron, atomlarından tamamen kaçmıştır ve atomların arasında serbestçe dolaşır. Bu elektronlar dıştan gelen bir yüke karşı –ister pozitif olsun ister negatif– özelliikle duyarlıdır; böyle bir yük uygulandığında, ona doğru ya da ondan uzağa hareket ederler ve böylece elektrik akımını yaratmış olurlar. Akım hakkında söyleyeceğim çok daha fazla şey var, fakat şu an için, bu malzemelere iletken dediğimizi söylemekle yetineceğim – çünkü yüklü parçacıkları, yani bu örneğimizde elektronları kolaylıkla iletirler, başka bir deyişle hareketlerine imkân sağlarlar. (İyonlar da elektrik akımı yaratabilir, fakat katı maddelerde –dolayısıyla metallerde– değil.)

Elektronların oynamaya, hareket etmeye, pozitif ya da negatif yüklere tepki vermeye hazır oluşlarına bayılıyorum. Yalıtkanlarda bu tür canlılık pek azdır; bütün elektronlar kendi atomlarına pek bağlıdır. Ama yalıtkanlarla biraz eğlenemeyeceğimiz anlamına gelmez bu – özellikle de lastikten yapıma sıradan balonlarla.

Burada anlattığım her şeyi bir paket şişmemiş lastik balon edinecek deneyebilirsiniz (inceleri daha çok işe yarıyor, hani hayvan şekilleri verebildikleriniz). Tabii çoğunuzun hazırda cam çubuğu olmadığına göre, bir su bardağı ya da şarap şişesi, hatta bir ampulün onun yerine geçebileceğini ummuştum, ama ne yaptıysam bunlar işe yaramadı. O halde plastik ya da sert lastikten büyük bir targa ne dersiniz? Bir ipek kumaş parçasına da ihtiyacınız olacak – eski bir kravat ya da atkı veya hayat arkadaşınızın size attırmaya çalıştığı o Hawaii gömleği de işinizi görebilir. Fakat saçınızın darmadağın olmasına aldırmazsanız –bilim uğruna kim aldırır ki?– kendi saçınızı da kullanabilirsiniz. Ve bir kâğıdı yaklaşık otuz-kırk parçaya bölmeniz gerekecek. Sayının önemi yok, fakat küçük olmaları gerekir, on sentlik ya da bir sentlik madeni para kadar.

Bütün statik elektrik deneyleri gibi, bunlarda da kışın daha iyi sonuç alınır (ya da öğleden sonra çöl havasında), hava nemli değil de kuruyken. Neden mi? Çünkü havanın kendisi iletken değildir – hatta epey iyi bir yalıtandır. Ne var ki, havada su varsa, burada ele almayacağımız karmaşık sebeplerden elektrik yükü sızar. Bir çubuk

ya da kumaşın, balonun ya da saçınızın üzerinde yükün toplanmasına izin vermek yerine, nemli hava, kademe kademe yükü sızdırır. Kapı kollarından sadece hava gerçekten kuruyken çarpılma sorunu yaşamanızın sebebi budur.

Görünmez İndüksiyon

Bütün malzemelerinizi toplayın ve elektriğin harikalarından bir kısmına şahit olmak için hazırlanın. Önce tarağınızı, saçınızı iyice bir tarayarak yükleyin, ama saçınızın mutlaka kuru olması gerekir. Tarağı ipek parçasına da sürtebilirsiniz. Sürtünmeyle elektriklenme çizelgesinden, tarağın negatif yükleneceğini biliyoruz. Şimdi bir an durup, tarağı kâğıt parçası yığınının yaklaştırdığınızda ne olacağını düşünün ve de nedenini. "Hiçbir şey" dersiniz de sizi kesinlikle anlarım.

Sonra tarağı, küçük kâğıt parçacığı tepeciğinin sekiz-on santimetre yukarısında tutun. Ağır ağır tarağı indirin ve ne olduğunu seyredin. Hayret verici bir şey, değil mi? Tekrar deneyin – hiç tesadüf değil. Kâğıt parçacıklarından bazıları yukarıya, tarağınıza sıçrar, bir kısmı kısa bir süreliğine yapışıp kalır ve sonra geri düşer, bir kısmı da sıkı sıkıya tutunur. Hatta tarak ve kâğıtları biraz oynatırsanız, kâğıt parçacıklarını kenarlarda dikebilir, tarağın yüzeyinde dans bile ettirebilirsiniz. Neler oluyor burada? Neden bazı kâğıt parçaları tarağa yapışıyor, diğerleri sıçrıyor, dokunuyor ve geri düşüyor?

Bunlar harika sorular, çok hoş da cevapları var. İşte açıklaması: Tarak üzerindeki negatif yükler, kâğıt atomlarındaki elektronları iter, öyle ki bu elektronlar serbest olmadıkları halde atomlarının uzak kısımlarında biraz daha zaman geçirirler. Onlar bunu yaparken atomların tarağa en yakın olan yanları, önceki durumlarından bir parçacık daha pozitif yüklüdür. O yüzden kâğıdın pozitif eğilimli kenarı ya da tarafı, tarağın negatif yükü tarafından çekilir. Bunların çekim kuvveti, tarağın negatif yükü ile kâğıttaki elektronlar arasındaki itici gücü neden geçer? Çünkü elektrik itiş ve çekişi–yüklerin gücüyle doğru orantılıdır, fakat aralarındaki mesafenin karesiyle *ters orantılıdır*. Buna, bu önemli keşfi yapan Fransız fizikçi Charles-Augustin de Coulomb'un adına istinaden Coulomb yasası diyoruz.

Bu yasanın Newton'ın evrensel kütleçekim yasasına şaşırtıcı benzerliğini fark edeceksiniz. Temel yük birimine de coulomb dediğimiz dikkatinizden kaçmasın: Pozitif yük birimi +1 coulomb (yaklaşık 6×10^{18} proton), negatif yük ise -1 coulomb'dur (yaklaşık 6×10^{18} elektron).

Coulomb yasası bize, pozitif yüklerle negatif yükler arasındaki çok küçük bir farkın bile büyük bir etki yaratabileceğini söyler. Ya da başka bir deyişle, daha yakın yüklerin çekim kuvveti, daha uzaktaki yüklerin itme kuvvetini yener.

Bu sürecin tamamına birden *indüksiyon* diyoruz, çünkü yüklü bir nesneyi yüksüz bir nesnenin yanına getirdiğimizde yaptığımız şey, yüksüz nesnenin yakın ve uzak taraflarına yük *indüklemektir*, kâğıt parçalarında bir tür yük kutuplaması yapmaktır. Bu küçük uygulamalı anlatımın birkaç versiyonunu çocuklar ve anne babaları için MIT World'de, "Elektrik ve Manyetizmanın Harikaları" adlı dersimde görebilirsiniz: mitworld.mit.edu/video/319.

Bazı kâğıt parçaları yapışıp kalırken bazılarının gerisin geri düşmesine gelince, o da ilginç. Bir kâğıt parçası tараға dokununca, taraaktaki fazladan elektronların bir kısmı kâğıda doğru hareket eder. Bu durumda tarak ve kâğıt parçası arasında hâlâ elektriksel bir çekim kuvveti olabilir, fakat bu, yerin kütleçekimine karşı gelecek büyüklükte olmayabilir, o yüzden kâğıt parçası düşecektir. Yük aktarımı yüksekse, elektrik kuvveti itici bile olabilir, o zaman hem yerin kütleçekimi hem de elektrik kuvveti kâğıdın düşüşünü hızlandıracaktır.

Şimdi bir balon şişirin, ağzını da düğümleyin ki şişik kalsın ve uç kısmına da bir sicim bağlayın. Evinizde balonu serbestçe bağlayabileceğiniz bir yer bulun. Asılı bir lambaya olabilir örneğin. Ya da sicime biraz ağırlık koyup balonu mutfak masasından sarkıtabilirsiniz, yaklaşık on santimetre ile otuz santimetre arası. Tarağı ipeğe ya da saçınıza güçlü bir şekilde tekrar sürütün – unutmayın, çok sürterseniz daha güçlü yük elde edersiniz. Çok ağır bir şekilde tarağınızı balona yaklaştırın. Ne olacak dersiniz?

Şimdi deneyin. Bu da epey tuhaf, değil mi? Balon tараға doğru hareket ediyor. Tıpkı kâğıtta olduğu gibi, tarağınız balon üzerinde bir tür yük ayrımı yaptı (indüksiyon!). Peki tarağı daha öteye tuttuğunuzda ne olacak – ve neden? Sezgisel olarak, balonun dikey konumuna geri döneceğini biliyorsunuz. Ama şimdi sebebini de bili-

yorsunuz, değil mi? Dış etki yok olunca, elektronların kendi atomlarının uzak taraflarında biraz daha takılmalarının artık bir gerekçesi kalmaz. Bakın, bir tarağı azıcık sürtmeyle, küçük kâğıt parçalarıyla ve bir balonla oynayarak neler neler çıkarabildik.

Şimdi birkaç balonu daha şişirelim. Birini kuvvetlice saçınıza sürterseniz ne olur? Doğru. Saçınız tuhaf şeyler yapmaya başlar. Neden? Çünkü sürtünmeyle elektriklenme çizelgesinde insan saçı pozitif ucun ta başlarında, lastik balonsa gayet negatif olan tarafta. Başka bir deyişle, balon saçınızdan bir sürü elektron kapar ve saçınızı pozitif yüklü olarak bırakır. Benzer yükler birbirini ittiğinden, her bir saç teli pozitif yüklüyken ve diğer bütün benzer yüklü tellerden uzaklaşmak isterken saçınız başka ne yapabilir? Saç telleriniz birbirlerini iter ve dikilir. Örgü şapkanızı kışın başınızdan çıkardığınızda meydana gelen şey de tabii gene budur. Saçınıza sürtünen şapka bir sürü elektronu alıp gider, geriye pozitif yüklü ve havaya dikilmek için yanıp tutuşan saç tellerinizi bırakır.

Tekrar balonlara dönelim. Az önce bir tanesini güçlü bir şekilde saçınıza sürttüünüz (polyester gömleğinize sürtmeniz daha bile çok işe yarayabilir). Şimdi ne önereceğimi anlamışsınızdır herhalde, değil mi? Balonu duvara tutun ya da arkadaşınızın gömleğine. Yapışır. Neden mi? İşte cevabı: Balonu sürttüüğünüzde, elektrikle yüklersiniz. Balonu pek iyi bir iletken sayılmayan duvara dayadığınızda, duvardaki atomların yörüngelerindeki elektronlar, balonun negatif yükünün itici gücünü hissederler ve atomun balona en uzak tarafında azıcık daha fazla zaman geçirirlerken, balona en yakın tarafta da biraz daha az zaman harcarlar – işte indüksiyon!

Duvarın yüzeyi, yani balonun tam dokunduğu yer hafiften pozitif yüklü olacak ve negatif yüklü balon duvara doğru çekilecek. Bu oldukça şaşırtıcı bir sonuç. Fakat neden bu iki yük –pozitif ve negatif yükler– birbirlerini etkisiz hale getirmiyorlar, yükleri aktarıp balonu hemen düşürmüyorlar? Çok iyi bir soru. Bir kere, lastik balon biraz fazladan elektron kaptı. Elektronlar lastik gibi bir yalıtıkanda öyle çok rahat dolaşamazlar, o yüzden yükler oldukları yerde kalma eğilimindedir. Sadece o da değil, çok sayıda temas yaratarak balonu duvara sürttüüğünüz de yok. Orada öylece duruyor ve çekiciliğini kullanıyor. Ama orada aynı zamanda sürtünme sayesinde de tutuluyor. 3. Bölüm'deki Rotor eğlence bineğini hatırlıyor musunuz? İşte

burada elektrik kuvveti, Rotor'un merkezci kuvvetinin oynadığı rolü oynuyor. Ve balon bir süre duvarda kalabiliyor, ta ki havadaki nem yüzünden elektrik yükü balondan yavaş yavaş sızıp gidene kadar. (Balonlarınız yapışmazsa, ya hava fazla nemlidir ve böylece daha iyi bir iletken olmuştur ya da balonlarınız fazla ağırdır – ince olanları sırf bu sebeple önermiştim.)

Halka açık derslere gelen çocuklara balon yapıştırarak çok eğleniyorum. Yıllardır çocukların doğum günü partilerinde yaptım, siz de çok eğlenebilirsiniz!

İndüksiyon her tür nesneyle olur, yalıtkanlarda olduğu gibi iletkenlerde de. Tarak deneyini şu içine helyum doldurulmuş uçan balonlardan biriyle de yapabilirsiniz. Tarağı balonun yanına getirirken, tarağın serbest elektronları negatif yüklü taraktan uzaklaşma eğilimindedir, böylece pozitif yüklü iyonları tarağın yakınında bırakırlar ve onlar da balonu tarağa doğru çeker.

Lastik balonları saçımıza ya da gömleğimize sürterek yükleyebilirsek de, aslında lastik neredeyse ideal bir yalıtandır – iletken telleri kaplamada kullanılmasının sebebi de budur. Lastik, yükün kablolardan nemli havaya ya da yanı başındaki bir nesneye –kıvılcım çıkararak– sıçramasını önler. Ne de olsa, evinizin duvarları gibi yalıtıcı ortamlarda ortalığa sıçrayan kıvılcımlar istemezsiniz. Lastik bizi her zaman elektrikten koruyabilir ve korur. Fakat bir şeyi yapamaz: Bildiğiniz en güçlü statik elektrik biçiminden, yani yıldırımdan bizi koruyamaz. Her nasılsa insanlar lastik ayakkabıların ya da teker lastiğinin sizi yıldırımdan koruyabileceği mitini tekrarlayıp duruyor. Bu fikirlerin nasıl hâlâ yaygın olabildiğini bilemiyorum, fakat bunları *hemen* unutsanız iyi olur! Yıldırımla gelen elektrik o kadar güçlüdür ki bir parça lastiği umursamaz bile. Yıldırım arabanıza düşerse *belki* daha güvende olabilirsiniz –muhtemelen olmazsınız ya, neyse– fakat bunun lastik tekerlerle bir ilgisi yoktur. Bundan biraz sonra bahsedeceğim.

Elektrik Alanları ve Kıvılcımlar

Daha önce yıldırımın büyük bir kıvılcımdan ibaret olduğunu söylemiştim, karmaşık bir kıvılcım, ama yine de bir kıvılcım. Peki o zaman, diyeceksiniz, kıvılcım nedir? Pekâlâ, kıvılcımları anlamak

için elektrik yükü hakkında gerçekten çok önemli bir şeyi anlamamız gerekiyor. Bütün elektrik yükleri görünmez elektrik alanları oluşturur, tıpkı bütün kütlelerin görünmez kütleçekim alanları oluşturmaları gibi. Elektrik alanlarını, zıt yüklü nesneleri birbirlerinin yakınına getirip aralarındaki çekimi gördüğünüzde hissedebilirsiniz. Ya da benzer yüklü nesneleri yan yana getirip itme kuvvetini gördüğünüzde. Bu durumda iki nesne arasındaki elektrik alanının etkilerini görüyorsunuzdur.

Bu alanın gücünü volt/metre cinsinden ölçeriz. Doğrusunu söylemek gerekirse voltun ne olduğunu açıklamak kolay değil, artık volt/metreyi siz düşünün, ama bir deneyeceğim. Bir nesnenin voltajı, elektrik potansiyeli denilen şeyin ölçüsüdür. Yeryüzüne sıfır elektrik potansiyeli tahsis edeceğiz. O halde yeryüzünün voltajı sıfır. Pozitif yüklü bir nesnenin voltajı pozitifdir; pozitif yük birimini (+1 coulomb – yaklaşık 6×10^{18} proton yükü) yeryüzünden ya da yeryüzüne bağlanmış herhangi bir iletken nesneden (örneğin evinizdeki metal tesisattaki musluklarınızdan), o nesneye getirmek için üretmem gereken enerji miktarı olarak tanımlanır. O yük birimini hareket ettirmek için neden enerji üretmem gerekiyor? Şimdi, nesne pozitif yüklüyse, pozitif birim yükünü iteceğini hatırlayalım. O halde o itme kuvvetini yenmek için enerji üretmem gerekir (fizikte iş yapmam gerekir, denir). Enerji birimi juldür. 1 jullük enerji üretmem gerekiyorsa, o zaman, o nesnenin elektrik potansiyeli +1 voltur. 1000 jul üretmem gerekiyorsa, o zaman elektrik potansiyeli +1000 voltur. (1 julün tanımı için bkz. 9. Bölüm.)

Peki, ya nesne negatif yüklüyse? O zaman elektrik potansiyeli negatiftir ve negatif yük birimini (–1 coulomb – yaklaşık 6×10^{18} elektron) yeryüzünden o nesneye hareket ettirmek için üretmem gereken enerji olarak tanımlanır. Bu enerji 150 jul ise, o zaman o nesnenin elektrik potansiyeli –150 voltur.

Bu yüzden volt, elektrik potansiyeli birimidir. Adını İtalyan fizikçi Alessandro Volta'dan almıştır. Volta 1800'de, bugün bizim pil dediğimiz ilk elektrik hücrecini geliştirmiştir. Dikkatedin, volt enerjisi birimi *değildir*; birim yükteki enerji birimidir (jul/coulomb).

Elektrik akımı yüksek elektrik potansiyelinden düşük olana akar. Bu akımın ne kadar güçlü olduğu, elektrik potansiyelindeki farka ve iki nesne arasındaki elektrik direncine bağlıdır. Yalıtkanların çok

yüksek bir direnci vardır; metallerin düşük direnci vardır. Voltaj farkı ne kadar çoksa ve direnç ne kadar düşükse, ortaya çıkan akım o kadar yüksektir. ABD'de, evlerde bulunan duvar prizlerindeki iki yarığın arasındaki potansiyel fark 120 voltur (Avrupa'da 220 volt); fakat bu akım alternatiftir (alternatif akım konusuna bir sonraki bölümde gireceğiz). Akım birimine amper diyoruz, Fransız matematikçi ve fizikçi André-Marie Ampère'den dolayı. Bir kablodaki akım 1 amper ise, bunun anlamı, kablonun her yerinden saniyede 1 coulomb'luk yük geçtiğidir.

Peki ya kıvılcım? Bütün bunlar onu nasıl açıklıyor? Ayakkabınızı halıda çok sürüdüyseniz, kendinizle yeryüzü arasında ya da sizden 6 metre uzaktaki bir metal kapının kolu arasında 30.000 volta kadar çıkabilen bir potansiyel farkı yaratmış olabilirsiniz. Bu, 6 metre mesafedeki 30.000 voltur, ya da 5.000 volt/metre. Kapı koluna yanaşırsanız sizinle kapı kolu arasındaki potansiyel farkı değişmeyecektir, fakat mesafe kısılacak, böylece elektrik alanının gücü artacaktır. Çok geçmeden, siz kapı koluna dokunmak üzereyken, yaklaşık 1 santimetre mesafe üzerinde 30.000 volt olacaktır. Bu da metre başına yaklaşık 3 milyon volt demektir.

Elektrik alanının bu kadar yüksek değerinde (kuru havada ve 1 atmosfer basınçta) elektriksel delinme dediğimiz şey meydana gelir. Elektronlar kendiliğinden o 1 santimetrelik aralığa atlayacaklardır, böyle yapınca havayı da iyonlaştırırlar. Bu da daha fazla elektronun atlamasını sağlayarak bir çığa dönüşür, o da bir kıvılcıma! Elektrik akımı havadan geçerek siz daha kapı koluna dokunmadan elinize çarpar. Eminim şimdi biraz yüzünüzü buruşturuyorsunuzdur, en son yaşadığınız tatlı küçük çarpılmayı hatırlayarak. Kıvılcımın acıtması, elektrik akımının sinirlerinizin çabucak ve hoş olmayan bir biçimde kasılmasına sebep olmasındandır.

Peki çarpıldığınızda o sesi, o çtırdamayı çıkaran nedir? Kolay. Elektrik akımı havayı çabucak ısıtır, bu da küçük bir basınç dalgası yaratır, bir ses dalgası, işte duyduğumuz da odur. Kıvılcımlar ışık da çıkarır – fakat ışığı gündüz görmezsiniz (gerçi bazen gördüğünüz de olur). Işığın nasıl çıktığı biraz daha karmaşık. Havada oluşturulmuş iyonlar havadaki elektronlarla yeniden birleşir ve ellerindeki enerjinin bir kısmını ışık olarak yayarlar. Kıvılcımlardan ışık görmesiniz bile (çünkü karanlık bir odada aynanın önünde de-

ğilsiniz), çok kuru bir havada saçınızı fırçaladığınızda, çıkardıkları çıtırtı seslerini duyarsınız.

Bir düşünün: Hiç zorlanmadan, sırf saçınızı fırçalayarak ya da polyester gömleğinizi çıkararak, saç uçlarınızda ya da gömleğinizin yüzeyinde yaklaşık *metrede 3 milyon voltluk* elektrik alanları yaratınız. O halde bir kapı koluna uzanırken, diyelim ki 3 milimetre mesafede bir kıvılcım hissederseniz, o zaman sizinle kapı kolu arasındaki potansiyel farkı 10.000 voltlarda gezer.

Bu miktar fazla görünebilir, fakat çoğu statik elektrik hiç tehlikeli değildir, çünkü voltajlar çok yüksek de olsa, akım (belli bir zaman diliminde vücudunuzdan geçen yük miktarı) miniktir. Küçük irkilmeler rahatsız etmiyorsa, çarpılma deneyleri yapıp eğlenebilirsiniz – ayrıca fiziği uygulamalı göstermiş de olursunuz. Ama evinizdeki elektrik prizlerine asla metal bir şey sokmayın. Büyük tehlikeye yaratabilir – hatta hayati tehlike!

Cildinize polyester bir kumaş sürterek kendinizi elektrikle yüklemeye çalışın (ayağınızda lastik tabanlı ayakkabılar ya da parmak arası terlikler olsun ki yük yere sızmasın). Işığı kapatın ve parmağınızı metal bir lambaya ya da kapı koluna yavaş yavaş yaklaştırın. Daha dokunmadan, bir kıvılcımın metalle parmağınız arasındaki havadan sıçradığını görmeniz gerekir. Kendinizi ne kadar çok yüklerseniz, kendinizle kapı kolu arasında o kadar büyük bir voltaj farkı yaratırsınız, bundan dolayı da kıvılcım daha güçlü, ses daha yüksek olur.

Öğrencilerimden biri istemeden sürekli elektrikle yükleniyormuş. Sadece kışın giydiği polyester bir bornozu olduğunu söyledi. Talihsiz bir seçim; çünkü ne zaman bornozunu çıkarsa elektrik yükleniyor ve komodinin üzerindeki lambayı kapatırken çarpılıyormuş. İşe bakın ki, sürtünmeyle elektriklelenme çizelgesinde insan teni en pozitif yüklü malzemelerin başında geliyor, polyester de en negatiflerden biri. İşte bu yüzden, karanlık bir odada ayna karşısında uçuşan kıvılcımlar görmek istiyorsanız polyester gömlek giymek en iyisi, ama polyester bornoz değil.

İnsanların nasıl elektrikle yüklenebileceğini oldukça dramatik (ve çok komik) bir şekilde göstermek için, polyester ceket giyen bir öğrenciyi sınıfın önünde plastik bir sandalyeye oturması için davet ediyorum (plastik harika bir yalıtkandır). Sonra, ben kendimi yer-

den yalıtırmak için cam bir levha üzerinde dikilirken, öğrenciyi kedi postuyla dövmeye başlıyorum. Öğrencilerin çınlayan kahkahaları arasında dövme işi yaklaşık yarım dakika sürüyor. Elektrik yükünün korunumu gereği, öğrenciyle ben zıt kutuplarda yükleneceğiz ve aramızda bir potansiyel farkı birikecek. Sınıfa neon flaş lambasının bir ucunun elimde olduğunu gösteriyorum. Sonra amfideki ışıkları söndürüyoruz; zifiri karanlıkta lambanın öteki ucuyla öğrenciye dokunduğumda bir ışık parlaması oluyor (ikimiz de bir çarpılma hissediyoruz)! Öğrenciyle benim aramdaki potansiyel farkı en az 30.000 volt. Neon flaş lambası ve bizim içimizden geçip giden akım ikimizin de elektrik yükünü boşaltıyor. Gösteri çok komik ve etkili.

YouTube'da "Professor Beats Student" (Profesör Öğrenciyi Dövüyor) adlı video, dersimdeki dövme kısmını gösteriyor: www.youtube.com/watch?v=P4XZ-hMHNuc.

Elektrik potansiyelinin sırlarını daha derinlemesine araştırmak için Van de Graaff jeneratörü denilen harika bir aygıt kullanırım. Görünüş olarak silindirik bir sütun üzerine oturtulmuş basit bir metal küreden ibarettir. Aslında devasa elektrik potansiyelleri oluşturmak için çok hünerli bir aygıttır. Benim sınıfımdaki genellikle 300.000 volta kadar çıkar – ama aslında daha yukarılara da çıkabiliyorlar. İnternetteki Elektrik ve Manyetizma ders dizimdeki (8.02) ilk altı derse bakarsanız, Van de Graaff aygıtıyla yaptığım çok komik gösterilerin bazılarını görebilirsiniz. Örneğin elektrik alanının delinmesi sonucunda Van de Graaff'ın büyük kubbesi ile, topraklanmış (yani yeryüzüne bağlanmış) daha küçük bir top arasında kocaman kıvılcımlar çıktığını göreceksiniz. Görünmez bir elektrik alanının gücüyle bir floresan lambanın yandığını, lamba alana dik olduğundaysa "söndüğünü" göreceksiniz. Hatta, zifiri karanlıkta benim lambanın bir ucuna değerek (kısa bir süre) toprakla bağlantı kurduğuma ve ışığın daha da parlamaya başladığını tanık olacaksınız. Birazcık bağırıyorum, çünkü gerçekten esaslı bir elektrik çarpması, ama en ufak bir tehlikesi yok. Ve (öğrencilerimle birlikte) gerçek bir sürpriz istiyorsanız, 6. dersin sonunda ne olduğuna bir bakın. Orada Napolyon'un bataklık gazı kontrolü yaparken uyguladığı, hakikaten akıllara durgunluk veren yöntemi gösteriyorum: ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/videolectures/.

Neyse ki yüksek voltaj tek başına sizi öldürmez ya da yaralamaz. Önemli olan vücudunuzdan geçen akımdır. Akım birim zamandaki elektrik yükü miktarıdır ve daha önce de gördüğümüz gibi, amper cinsinden ölçülür. İnsanı gerçekten öldürecek ya da yaralayacak olan şey akımdır, özellikle de süregense. Akım neden tehlikelidir? En basit şekilde söylemek gerekirse, vücudunuzun içinde hareket eden elektrik yükleri kaslarınızın kasılmasına sebep olur. Aşırı düşük seviyelerde elektrik akımları kaslarınızın kasılmasını sağlar, yani onları "harekete geçirir", bu da hayatımızı sürdürmek için çok önemlidir. Fakat yüksek seviyelerde, kaslarınız ve sinirleriniz o kadar çok kasılır ki kontrolünüz dışında ve acıyla seğirirler. Daha da yüksek seviyelerdeyse kalbiniz durur.

İşte bu sebeplerden dolayı, elektrik ve insan tarihinin karanlık taraflarından biri, elektriğin işkence için –çünkü dayanılmaz acılar verebilir– ve öldürme amaçlı kullanılmasıdır (elektrikli sandalyede). *Milyoner* filmini gördüyseniz polis karakolundaki korkunç işkence sahnelerini hatırlayabilirsiniz. Orada vahşi polis genç Cemal'e elektrotları bağlayıp vücudunun dehşet içinde kıvranmasına sebep olur.

Öte yandan düşük seviyelerdeyse akım sağlıklı olabilir. Beliniz ya da omzunuz için fizik tedavi görmüşseniz, terapistlerin "elektrik uyarımı" dedikleri şeyi tecrübe etmiş olabilirsiniz. Söz konusu kasın üzerine elektrik güç kaynağına bağlı pedler koyup akımı kademeli olarak artırır. Siz hiçbir şey yapmadan kaslarınızın bir kasılıp bir gevşediğini tuhaf bir şekilde hissedersiniz.

Elektrik daha dramatik tedavi çabaları için de kullanılır. TV programlarında hepiniz görmüşsünüzdür, kalp rahatsızlığı geçiren bir hastanın kalp atışlarını düzenli hale getirme gayretiyle birisi defibrilatör denen elektrik pedlerini kullanır. Geçen sene kendi kalp ameliyatımda kalp fonksiyonlarımdır durduğu bir noktada doktorlar kalbimin tekrar atması için defibrilatör kullandılar – ve işe yaradı! Defibrilatörler olmasaydı *Fizik Aşkına* asla gün yüzü göremezdi.

İnsanların öldürücü akımın tam miktarı hakkında farklı görüşleri var, malum sebeplerden: Tehlikeli seviyelerde yapılmış çok deney yok. Ve tabii ki akımın elinizden mi, yoksa beyninizden ya da kalbinizden mi geçtiği de çok şey değiştirir. Belki eliniz sadece yanar. Fakat hemen hemen herkes bir amperin onda birinden fazlasının, bir

saniyeden az bir süre için bile kalbinizden geçmesi halinde sizi öldüreceği konusunda hemfikir. Görünüşe göre elektrikli sandalyelerde çeşitli miktarlar kullanılmış: 2.000 volt civarı ve 5 ila 12 amper.

Hatırlarsanız, çocukken hepimize ekmek kızartıcısından kızarmış ekmeği çıkarmak için çatal ya da bıçak sokmamamız söylenmiştir, elektrik çarpabilir diye. Doğru muydu peki? Ben evimdeki üç aletin teknik özelliklerine baktım: radyo (0,5 amper), ekmek kızartıcım (7 amper) ve espresso makinem (7 amper). Pek çok cihazın altındaki etikette bunları bulabilirsiniz. Bazıları amper bilgisini vermez, ama vat değerini, yani cihazın gücünü, voltaja bölerek –ABD’de genellikle 120 volt– daima hesaplayabilirsiniz. Benim evdeki sigortaların çoğu 15 ila 20 amper. 120 voltluk cihazınızın 1 amper mi yoksa 10 amper mi çektiğinin gerçekten hiçbir önemi yok. Önemli olan, kazara kısa devre yapmaktan uzak durun, daha da önemlisi kazara 120 voltluk bir metal nesneye dokunmaktan; hemen banyodan sonra böyle bir şey yaparsanız, sizi öldürebilir. Peki bütün bu bilgilerin hepsi nereye varıyor? Şuraya: Prizdeyken ekmek kızartıcısına bıçak sokma, dediğinde anneniz *doğru* söylüyordu. Ola ki bir elektrikli cihazınızı tamire kalkışırsanız önce mutlaka prizden çekin. Akımın çok *tehlikeli* olabildiğini asla unutmayın.

İlahi Kıvılcımlar

Tabii en tehlikeli akım türlerinden biri yıldırımdır, aynı zamanda bütün elektrik fenomenleri içinde en müthişlerinden biri. Güçlü, tahmin edilebilirliği sınırlı, çok yanlış anlaşılmış ve gizemli, hepsi bir arada. Yunanlılardan Mayalara kadar olan mitolojilerde şimşekler ya ilahi varlıkların sembolü ya da onların kuşandığı silah olmuştur. Buna da şaşmamak gerek. Dünyada her yıl ortalama 16 milyon gök gürültülü fırtına olur, günde yaklaşık 43.000’den fazla, günün her saati kabaca 1800, saniyede yaklaşık 100 şimşek çakar – ya da her gün 8 *milyon* şimşek gezegenimizin çeşitli yerlerinde çakar.

Şimşek, fırtına bulutları elektrikle yüklenince meydana gelir. Genellikle bulutun üstü pozitif yüklü olur, altı da negatif. Bunun neden böyle olduğu henüz tam olarak anlaşılmış değil. İşin içinde –ister inanın ister inanmayın– hâlâ öğrenmekte olduğumuz bolca at-

mosfer fiziği yer alıyor. Şimdilik işi basitleştirip, yeryüzüne en yakın tarafı negatif olan bir bulut hayal edeceğiz. İndüksiyondan dolayı, buluta en yakın toprak pozitif yüklü olacak, yeryüzüyle bulut arasında bir elektrik alanı oluşturacak.

Yıldırım düşmesinin fiziği epey karmaşık, fakat özü itibariyle, şimşek çakması (elektirsel delinme) bulutla yeryüzü arasındaki elektrik potansiyelinin onlarca milyon volta ulaşması sonucu meydana gelir. Ve yıldırım düşmesinin bir buluttan aşağı, yeryüzüne doğru olduğunu sansak da, aslında elektrik *hem* buluttan aşağı, *hem de* yerden yukarı buluta doğru akar. Sıradan bir yıldırım düşmesindeki elektrik akımı yaklaşık 50.000 amperdir (ama birkaç yüz bin ampere kadar da çıkabilir). Sıradan bir yıldırım düşmesi sırasındaki azami güç yaklaşık bir trilyon (10^{12}) wattır. Bununla birlikte, süresi sadece otuz-kırk mikrosaniyedir. Her yıldırımda açığa çıkan toplam enerji bu yüzden nadiren birkaç yüz milyon julü geçer. Bu da 100 vatlık bir ampulün bir ayda yakacağı miktardır. Bu yüzden, yıldırım enerjisini işlemek sadece elverişsiz değil, aynı zamanda verimsizdir de.

Çoğumuz şimşegi görmemizle gök gürültüsünü duymamız arasında geçen süreye bakarak yıldırımın ne kadar uzağa düştüğünü bilebiliriz. Bu da bize bu olayda etkili olan güçlü kuvvetler hakkında ucundan bir fikir verir. Bunun bir keresinde bir öğrenciden duyduğum açıklamayla hiç alakası yoktur: Yıldırım bir tür alçak basınç alanı oluşturur, gök gürültüsü de bu boşluğa hücum eden havanın öteki taraftaki havayla çarpışması sonucu ortaya çıkar, demişti bu öğrenci. Aslında neredeyse bunun tam tersi söz konusudur. Yıldırımın enerjisi havayı yaklaşık 20.000 dereceye kadar ısıtır, güneşin yüzey sıcaklığının üç katından fazla. Bu aşırı ısınmış hava, çevresindeki serin havaya çarpan güçlü bir basınç dalgası yaratır. Havadaki ses dalgaları beş saniyede yaklaşık bir buçuk kilometre yol kattığından, saniyeleri sayarak yıldırımın ne kadar uzağa düştüğünü kolayca bulursunuz.

Yıldırımların havayı fevkalade ısıtması, gök gürültülü fırtınalarda belki tanık olduğunuz başka bir fenomeni de açıklar. Kırsal alanda gök gürültülü bir fırtınanın ardından havadaki özel kokuyu hiç hissettiniz mi, bir tür tazelik, adeta fırtına havayı yıkayıp temizlemiş gibi? Bunun kokusunu şehirde almak zor, çünkü daima arabalardan gelen çok fazla egzoz var. Belki yine de bu harika kokuyu

hissetmişsinizdir –eğer hissetmediyseniz bir dahaki sefer gök gü-rültülü bir fırtınanın ardından dışarıda olduğunuzda aklınızda ol-sun– ama eminim bunun ozonun kokusu olduğunu bilmiyordunuz (üç oksijen atomundan meydana gelen bir oksijen molekülü). Nor-mal, kokusuz oksijen molekülleri iki oksijen atomundan oluşur ve bunlara O_2 deriz. Fakat yıldırımın boşalmasıyla ortaya çıkan kor-kunç sıcaklık normal oksijen moleküllerini birbirinden kopartır –hepsini değil, ama önemli bir miktarını. Bu oksijen atomları tek baş-larına kararsızdır, o yüzden kendilerini normal O_2 moleküllerine bağlayıp O_3 olurlar – yani ozon.

Ozon az miktarlarda çok hoş koksa da, yüksek oranlarda daha az sevilir. Onu yüksek gerilim nakil hatlarının altında genellikle bula-bilirsiniz. Hatlardan cızırtı sesi duyarsanız, genellikle kıvılcım saçıl-ımı var demektir, bizim korona boşalması dediğimiz şey, o yüzden biraz ozon yaratılmaktadır. Hava sakınse kokusunu alabilmeniz ge-rekir.

Şimdi gene, lastik ayakkabılar giyerek yıldırım çarpmasından kurtulabileceğinize ilişkin fikri düşünelim. 50.000 ila 100.000 am-perlik bir yıldırım, havayı güneşin yüzey sıcaklığının üç katından daha fazla ısıtabiliyorsa, elbette sizi de yakıp kül edebilir, elektrik çarpmasıyla kıvrandırabilir ya da vücudunuzdaki bütün suyu anın-da aşırı sıcak bir buhara dönüştürüp sizi patlatabilir, ister lastikli ayakkabılar olsun ister olmasın. Ağaçların başına gelen budur: Ağacın özsuyu patlar ve ağacın kabuğundan dışarı fışkırır. Yüz milyon jüllük enerji –yaklaşık yirmi iki kiloluk dinamite eşdeğer– öyle hafife alınacak şey değil.

Peki ya yıldırım düştüğünde arabanın içindeyseniz lastik teker-leklerden dolayı güvende olacağınız fikri? Güvende olma ihtimali-niz var –garantisi yok!– ama çok farklı bir sebepten. Elektrik akımı bir iletkenin dış tarafından akar (deri etkisi denen bir fenomen) ve siz de bir arabanın içindeyken esasen metal bir kutu içindesinizdir, o da iyi bir iletkendir. Hatta kontrol panelinizdeki hava oluşunun içine bile dokunup yaralanmayabilirsiniz. Bununla birlikte, bunu dene-memenizi şiddetle tavsiye ederim; bugünlerde çoğu arabanın fiberg-las parçaları olduğundan çok tehlikeli, fiberglasta deri etkisi yoktur. Başka bir deyişle, arabanıza yıldırım düşerse, siz –ve arabanız– aşırı derecede tatsız şeyler yaşayabilirsiniz. Bir arabaya yıldırım düşü-

şünü gösteren kısa görüntüleri ve bir minibüsün, üzerine yıldırım düştükten sonraki fotoğraflarını şu adreslerde belki görmek istersiniz: www.weatherimagery.com/blog/rubber-tires-protect-lightning/ ve www.prazen.com/cori/van.html. Açıkçası, hiç şakaya gelmez!

Neyse ki yolcu uçaklarında durum çok farklı. Bunlara her yıl ortalama birden fazla yıldırım çarpar, fakat deri etkisinden dolayı güle oynaya yollarına devam ederler. Şu görüntüye bakın: www.youtube.com/watch?v=036hpBvjoQw.

Yıldırım ile ilgili yapılmaması gereken başka bir şey de yaygın bir şekilde Benjamin Franklin'e atfedilen o deney: gök gürültülü bir fırtınada, uçurtmanın ipine bir anahtar bağlayıp uçurmak. Sözde Franklin yıldırım bulutlarının elektrik ateşi çıkardığı hipotezini test etmek istemiş. Yıldırım gerçekten bir elektrik kaynağıysa, diye akıl yürütmüş, o zaman uçurtmanın ipinin yağmurda ıslanınca bu elektrik için iyi bir iletken olması gerekir (tabii o, "iletken" kelimesini kullanmış olamaz), böylece elektrik ipin alt ucunda bağlı anahtara kadar gider. Parmak eklemine anahtara yakın tutan kişinin de bir kıvılcım hissetmesi gerekir. Şimdi, Newton'ın ağaçtan düşen bir elmadan ilham aldığı iddiasında olduğu gibi, Franklin'in bu deneyi gerçekleştirdiğine dair de o dönemden kalan hiçbir delil yok, sadece İngiltere'deki Kraliyet Cemiyeti'ne yazdığı mektuptaki bir bahis var, bir de on beş yıl sonra arkadaşı Joseph Priestley'nin (oksijenin kâşifi) yazdığı anlatı. Franklin bu deneyi ister yapmış olsun ister yapmamış –yapsaydı dehşet tehlikeli ve muhtemelen de ölümcül olurdu– bir kulenin ya da çan kulesinin tepesine uzun demir bir çubuk yerleştirme yoluyla yıldırımın yerle temas ettirmek için tasarlanmış başka bir deneyin tarifini yayımladığı kesin. Birkaç yıl sonra, Franklin'le tanışmış ve önerisini Fransızcaya çevirmiş olan Fransız Thomas-François Dalibard deneyin hafif farklı bir biçimini gerçekleştirdi ve olayı sağ salım atlatıp olanları anlattı. 12 metrelik bir demir çubuğu gökyüzüne doğru dikmiş ve çubuğun topraklanmamış alt kısmında kıvılcımlar gözlemlemişti.

O zamanlar Rusya'nın St. Petersburg şehrinde yaşayan ve elektrik fenomenlerini bir hayli incelemiş olan seçkin bir bilimadamı, St. Petersburg Bilimler Akademisi üyesi Profesör Georg Wilhelm Richmann, belli ki Dalibard'ın deneyinden etkilenmiş ve denemek için azmetmiş. Michael Brian Schiffer'ın büyüleyici kitabı, *Draw*

the Lightning Down: Benjamin Franklin and Electrical Technology in the Age of Enlightenment'a göre (Yıldırım Aşağı Çekin: Benjamin Franklin ve Aydınlanma Çağında Elektrik Teknolojisi), evinin çatısına demir bir çubuk bağlamış ve çubuktan birinci kattaki laboratuvarındaki elektrik ölçü aletine pirinç zincir çekmiş.

Şansından –ya da yazgıdan– Bilimler Akademisi'nin bir toplantısı sırasında gök gürültülü bir fırtına başlamış. Richmann eve koşmuş, yanında yeni kitabının illüstrasyonunu yapacak olan ressamı da götürmüş. Richmann ekipmanını gözlemlerken şimşek çakmış, çubuğu ve zinciri dolaşp Richmann'ın kafasından yaklaşık otuz santimetre öteye sıçramış, onu çarpmış ve odanın öbür tarafına fırlatmış, ressamı da çarparak bilincini kaybetmesine yol açmış. Bu sahnenin ana hatlarını gösteren bazı resimlemeler görebilirsiniz, ama bunların söz konusu ressamın kaleminden çıkıp çıkmadığı belli değil.

Franklin de benzer bir tertibat icat edecekti, fakat onunki topraklanmıştı; bugün yıldırımsavar adıyla biliyoruz. Yıldırım topraklamak işe yarıyor, fakat Franklin'in zannettiği sebepten değil. O, yıldırımsavarın, elektrik yüklü bir bulutla bir bina arasında kesintisiz bir boşalma sağlayacağını düşünüyordu, böylece potansiyel farkı düşük olacak ve yıldırım tehlikesi ortadan kalkacaktı. O kadar emindi ki bu fikrinden, Kral II. George'a bu sivri çubukları kraliyet sarayının ve mühimmat depolarının üzerine koymasını tavsiye etti. Franklin'in muhalifleri, yıldırımsavarın sadece yıldırım çekeceğini ve binayla yıldırım bulutları arasındaki potansiyeli düşüren boşalma etkisinin önemsiz olacağını ileri sürüyorlardı. Hikâyeye göre kral, Franklin'e güvenmiş ve yıldırımsavarları kurdurmuş.

Uzun zaman geçmeden mühimmat depolarından birine yıldırım düşmüş ve çok az zarara yol açmış. Yani demir çubuk işe yaramış, fakat tamamen başka sebeplerden. Franklin'i eleştirenler haklıydı: Yıldırımsavarlar gerçekten yıldırımı çeker ve bu çubuktaki boşalma yıldırım bulutundaki muazzam elektrik yükünün yanında önemsiz kalır. Fakat yıldırımsavar gerçekten işe yarar çünkü 10.000 ila 100.000 amperi taşıyacak kadar kalınsa, o zaman akım çubuktan taşmaz ve elektrik yükü toprağa aktarılır. Franklin sadece çok parlak zekâlı değildi – aynı zamanda şanslıydı da!

Kışın üzerimizden bir kazağı çıkarırken duyduğumuz küçük çıtırdamanın nedenini anladığımızda, aynı zamanda, koskoca gökyüzünü aydınlatabilen devasa yıldırım fırtınalarını ve tüm doğadaki en gürültülü ve en dehşet verici seslerden birinin kökenini de anlayabilmemiz olağanüstü bir şey, değil mi?

Bazı açılardan Benjamin Franklin'in bugünkü versiyonlarıyız, anlayışımızın ötesindeki şeyleri kestirmeye çalışıyoruz. 1980'lerin sonlarında biliminsanları ilk kez bulutların ta yukarılarında görülen yıldırım biçimlerinin fotoğraflarını çektiler. Bir tanesine kıvılcık tayf diyor, kıvılcıklı portakal rengi elektrik yüklerinden oluşuyor, yerden 50 ila 90 kilometre yukarılarda. Bir de mavi püskürmeler var, çok daha büyük, bazen 70 kilometreye kadar varıyor, atmosferin yukarı kısmını çarpıyor. Bunların varlığından haberimiz olalı ancak yirmi yılı biraz geçtiğinden, bu olağanüstü fenomenlere neyin sebep olduğu konusunda bilmediğimiz dünya kadar şey var. Elektrik hakkında bütün bildiklerimize rağmen, her gün yaklaşık 45.000'ine tanık olduğumuz her yıldırım fırtınasının arkasında hakiki gizemler var.

Manyetizmanın Gizemleri

Birçoğumuz için mıknatıslar eğlenceli şeylerdir. Bunun sebebi kıs-
men, hissedebileceğimiz ve oynayabileceğimiz –ama aynı zamanda
tümünden görünmez olan– kuvvetler ortaya koymaları. İki mıknatısı
birbirine yaklaştırdığımızda birbirlerini ya çekerler ya da iterler,
tıpkı elektrik yüklü nesnelerin yaptığı gibi. Çoğumuz manyetizma-
nın elektrikle derinden ilintili olduğunu sezeriz – örneğin, bilimle
ilgilenen hemen herkes *elektromanyetik* kelimesini bilir, fakat bun-
ların nasıl ve neden ilişkili olduğunu tam olarak açıklayamayız.
Çok geniş bir konu bu, üzerine başlı başına bir giriş dersi veriyor-
um, o yüzden burada sadece şöyle bir üstünden geçeceğiz. Yine de
manyetizma fiziği göz kamaştırıcı etkiler yaratabilir ve derin bir id-
rake kavuşmamızı sağlayabilir.

Manyetik Alanların Yarattığı Harikalar

Bir mıknatıs alıp eski, düz ekran öncesi bir televizyonun önünde
(cihaz açıkken) tutarsanız, ekranda pek hoş desenler ve renkler gö-
rürsünüz. Likit kristal ekran (LCD) ya da plazma düz ekran öncesi
günlerde, televizyonun arkasından ekrana doğru ateşlenen elektron
demetleri renkleri harekete geçiriyor, fiilen resmi ekrana çiziyordu.
Bu ekranlardan birinin yanında, benim de sınıfta yaptığım gibi, güc-
lü bir mıknatıs tutarsanız neredeyse halüsinatif desenler görürsü-
nüz. Bunlar o kadar ilginç ki, dört-beş yaşındaki çocuklar bile bayı-
lıyorlar. (Bu desenlerin resimlerini netten kolaylıkla bulabilirsiniz.)

Aslında gündelik hayatta çocuklar bunları kendi başlarına keşfe diyor gibiler. Çocukları buzdolabı mıknatıslarını ekran üzerinde gezdirdikten sonra, televizyonlarını eski haline getirmek için tüm nette yana yakıla yardım arayan anne babalar var. Neyse ki çoğu televizyonda, ekranlardaki manyetik özelliği bertaraf eden donanım bulunuyor, sorun da genellikle birkaç gün ya da hafta sonra geçip gidiyor. Ama geçmezse sorunu gidermek için bir teknisyen gerekir. O yüzden evdeki TV ekranınıza (ya da bilgisayar monitörünüze) mıknatıs yaklaştırmayın, tabii umurunuzda olmayacak asırlık bir TV değilse. O durumda biraz eğlenebilirsiniz. Dünyaca ünlü Koreli ressam Nam June Paik görüntüleri eğip bükerek pek çok sanat eseri yarattı, aşağı yukarı aynı yolla. Derste televizyonu açıp özellikle berbat bir programı seçerim –bu gösteri için reklamlar gayet iyidir– ve herkes mıknatısın görüntüyü tümünden çarpıtmasına bayılır.

Tıpkı elektrikte olduğu gibi, manyetizmanın tarihi de kadim zamanlara dayanır. Görünüşe bakılırsa Yunanlılar, Hintliler ve Çinliler iki bin yıldan daha önce, belli taşların –sonradan mıknatıs taşı adını aldı– küçük demir parçalarını çektiğini biliyorlardı (tıpkı Yunanlıların sürtülen kehribarın kâğıt parçacıklarını çektiğini bulmuş olması gibi). Bugünlerde bu maddeye manyetit diyoruz; doğal olarak meydana gelen manyetik bir mineral, hatta yeryüzünde doğal olarak meydana gelen en manyetik malzeme. Manyetit, demir ve oksijenin bir bileşimidir (Fe_3O_4) ve bu yüzden demiroksit olarak bilinir.

Fakat birçok farklı mıknatıs türü vardır, sadece manyetit değil. Manyetizma tarihinde demir çok büyük rol oynamıştır ve manyetizmaya duyarlı pek çok malzemenin içeriğinde kilit bileşendir. Mıknatısa en duyarlı malzemelere ferromanyetik denir ("ferro" demire işaret eden bir önektir). Bunlar genelde metal ya da metal alaşımlardır: elbette demirin kendisi, fakat ayrıca kobalt, nikel, kromdioksit (bir zamanlar teyp bantlarında çokça kullanılırdı). Bunlardan bazıları, bir manyetik alan içine koyularak temelli manyetik hale getirilebilir. Paramanyetik denilen öteki malzemelerse böyle bir alan içine konduklarında mıknatıslanmaları zayıf olur ve alan ortadan kalkınca eski (manyetik olmayan) durumlarına dönerler. Bu grupta alüminyum, tungsten, magnezyum ve –ister inanın ister inanmayın– oksijen vardır. Diyamanyetik adı verilen bazı malzemeler de bir manyetik alan varken oldukça zayıf bir zıt manyetik alan oluştururlar.

Bu kategoridekiler bizmut, bakır, altın, cıva, hidrojen ve sofratuzunun yanı sıra tahta, plastik, alkol, hava ve sudur. (Bazı malzemelerin ferromanyetik, bazılarının paramanyetik ve ötekilerin diyamanyetik olması, elektronların çekirdek etrafındaki dağılımlarıyla ilgilidir – ayrıntılarına girilemeyecek kadar karmaşık.)

Hatta sıvı mıknatıslar bile vardır. Bunlar tam olarak ferromanyetik sıvılar değildir, daha ziyade, mıknatıslara çok güzel ve çarpıcı şekillerde tepki veren ferromanyetik maddelerin çözeltileridir. Bu sıvı mıknatıslardan gayet kolay yapabilirsiniz; nasıl yapılacağını görmek için şu adrese bakın: chemistry.about.com/od/demonstrationsexperiments/ss/liquidmagnet.htm. Oldukça koyu olan bu çözeltiyi bir camın üzerine koyup altına bir mıknatıs tutarsanız olağanüstü sonuçlar için hazır olun – belki ortaokulda görmüş olacağınız gibi manyetik çizgiler boyunca sıra sıra dizilen demir talaşlarını seyretmekten çok daha ilginç.

On birinci yüzyılda Çinliler iğneleri manyetite dokundurarak mıknatıslayıp ipek bir ipten sarkıttıklarında, iğneler kuzey-güney yönünde hiza olmuş, yeryüzünün manyetik alan çizgilerine göre dizilmişti. Sonraki yüzyıla gelindiğinde hem Çin'de hem de ta Manş Denizi'nde rota bulmak için pusulalar kullanılıyordu. Bu pusulalar bir kâse su içinde yüzen mıknatıslanmış bir iğneden oluşuyordu. Ne yaratıcı, değil mi? Tekne ya da gemi ne tarafa dönerse dönsün, kâse de dönüyor fakat iğne kuzey ve güneyi göstermeye devam ediyordu.

Doğa daha da yaratıcı. Bugün artık göçmen kuşların bedenlerinde, dahili pusula olarak kullandıkları, göç yollarına kılavuzluk ettiği anlaşılan minicik manyetitler olduğunu biliyoruz. Bazı biyologlar dünyanın manyetik alanının bazı kuşlardaki ve semender gibi başka hayvanlardaki optik merkezleri uyardığını bile düşünmekte. Yani bir bakıma bu hayvanlar dünyanın manyetik alanını "görebiliyorlar". Nasıl ama?

1600 yılında, tanınmış hekim ve bilimadamı William Gilbert –sıradan bir doktor değil, Kraliçe I. Elizabeth'in hekimi– yayımladığı *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (Mıknatıslar, Manyetik Kütleler ve Dünya Denen Büyük Mıknatıs Üzerine) adlı kitapta dünyanın kendisinin bir mıknatıs olduğunu ileri sürüyordu. Terrella ile –dünyanın modeli olarak yapılmış küçük manyetik küre– yaptığı deneylerin bir sonucuuydu bu. Te-

rella greyfurttan belki bir parça büyüktü ve üzerine yerleştirilmiş küçük pusulalar tıpkı dünya üzerindeki gibi tepki vermişti. Gilbert dünya bir mıknatıs olduğu için pusulaların kuzeyi gösterdiğini ileri sürüyordu; bazılarının düşündüğü gibi Kuzey ve Güney Kutuplarında manyetik adalar olduğu için ya da pusulalar Kutup Yıldızı da denen Kuzey Yıldızı'nı işaret ettiği için değil.

Gilbert dünyanın manyetik bir alanı olduğunu söylerken kesinlikle haklıydı. Dahası, dünyada manyetik kutuplar da vardır (tıpkı buzdolabı mıknatıslarındaki kutuplar gibi), ama bu kutuplar coğrafi Kuzey ve Güney Kutuplarıyla tam örtüşmez. Sadece bu da değil, bu manyetik kutuplar biraz da gezinir, her yıl 15 kilometre civarında. O yüzden bazı açılardan dünya gerçekten bir mıknatıs çubuğu –bir hobi dükkânında bulabileceğiniz mıknatıslanmış sıradan dikkörtgen bir metal parçası– gibi davranır, fakat başka açılardan tamamen farklıdır. Dünyanın neden bir manyetik alanının olduğuna dair geçerli bir kuram düşünebilmeleri bile bilimsanlarının çok uzun zamanını almıştır. Dünyanın merkezinde çok demir olması yeterli değildir, zira belli bir sıcaklığın üstünde (buna Curie sıcaklığı diyoruz) kütleler ferromanyetik özelliklerini yitirirler, ki demir de buna dahildir; demirin Curie sıcaklığı 770°'dir ve dünyanın merkezinin çok daha sıcak olduğunu biliyoruz.

Kuram bayağı karmaşık ve dünyanın merkezinde dönen elektrik akımlarıyla ve dünyanın dönüyor olmasıyla ilgili – fizikçiler buna dinamo etkisi diyor. (Gökbilimciler bu dinamo etkisi kuramını yıldızlardaki manyetik alanları açıklamak için kullanıyorlar. Bunlara, manyetik alanı yaklaşık her on bir yılda bir *tamamen ters* dönen kendi güneşimiz de dahil.) Size şaşırtıcı gelebilir ama bilimsanları dünyanın ve manyetik alanının tam bir matematik modeli üzerinde hâlâ çalışıyorlar; işte bu alan o kadar karmaşık. Çalışmaları, dünyanın manyetik alanının bin yıllar boyunca fevkalade değiştiğine dair jeolojik delillerden dolayı daha da çetrefil hale geliyor: Kutuplar yıllık gezintilerinden daha çok yolculuk etmiş ve görünüşe göre manyetik alan kendini ters çevirmiş – sırf son 70 milyon yılda 150 kereden fazla. Acayip bir şey, değil mi?

Hassas manyetometrelerle donanmış uyduların sayesinde (Danimarka uydusu Ørsted gibi) şimdi dünyanın manyetik alanının hârisasını belli bir kesinlikte çıkarabiliyoruz. Buradan manyetik alanın

uzayda bir milyon kilometreden uzak mesafelere uzandığını biliyoruz. Ayrıca dünyaya yakın manyetik alanın atmosferimizdeki en güzel fenomenlerden birini oluşturduğunu da biliyoruz.

Hatırlarsanız güneş, güneş rüzgârı diye bilinen, çoğunluğunu protonlar ve elektronların oluşturduğu devasa bir yüklü parçacık akımı yayar. Dünyanın manyetik alanı bu parçacıkların bir kısmını manyetik kutuplarda atmosferimize yönlendirir. Ortalama hızları saniyede 400 kilometre olan bu hızlı parçacıklar, atmosferdeki oksijen ve nitrojen moleküllerine çarparlar, kinetik enerjilerinin (hareket enerjisi) bir kısmı ışık biçiminde elektromanyetik enerjiye dönüşür – oksijen yeşil ya da kırmızı ve nitrojen de mavi ya da kırmızı ışık salar. Nereye varacağımı muhtemelen tahmin ediyorsunuz – doğru: Kuzey Yarımküre'de *aurora borealis*, yani kuzey ışıkları ve Güney Yarımküre'de *aurora australis*, yani güney ışıkları denilen o muhteşem ışık gösterilerini yaratan şey budur. Bu ışıkları neden sadece çok kuzeyde ya da çok güneydeyken görebiliyorsunuz? Çünkü güneş rüzgârı dünyanın atmosferine, çoğunlukla, manyetik alanın en güçlü olduğu yerler olan manyetik kutupların yakınlarından girer. Bu etkilerin bazı geceler ötekilerden daha güçlü olmasının sebebi, güneş patlamasının olduğu zamanlar, ışık gösterisini yapacak daha çok parçacığın olmasıdır. Devasa güneş alevleri olduğunda bu etkiler heybetli olabilir, jeomanyetik denilen fırtınalara sebep olur, normal alanların çok uzağında kutup ışımaları oluşur, bazen de radyo yayınlarını, bilgisayarların işlemlerini, uyduların çalışmasını engeller ve hatta elektrik kesintisine bile sebep olur.

Kuzey Kutup Dairesi yakınlarında oturmuyorsanız, bu ışıkları çok sık görmezsiniz. İşte bu yüzden, ABD'nin kuzeydoğusundan Avrupa'ya akşam uçarsanız (zaten uçuşların çoğu akşam oluyor), uçağın sol tarafından bir yer almak isteyebilirsiniz. Atmosferin on bir kilometre yukarısında olacağınızdan, pencereden biraz kuzey ışıklarını görebilirsiniz, özellikle son zamanlarda güneş epey faal idiyse, ki bu bilgiyi de netten bulabilirsiniz. Ben tam bu şekilde defalarca gördüm, o yüzden mümkün oldukça uçağın sol tarafına otururum. Filmeleri ne zaman istesem evde seyredebileceğimi düşünürüm. Uçakta geceleri kuzey ışıklarını ararım, gündüzleri gloriileri.

Dünyanın manyetik alanına hakikaten teşekkür borçluyuz, çünkü onsuz atmosferimizi sürekli bombardımana tutan yüklü parçacık

akımının bazı ciddi sonuçlarına maruz kalabilirdik. Güneş rüzgârı atmosferimizi ve suyu pekâlâ milyonlarca yıl önce yakıp yok etmiş olabilirdi, hayatın gelişimini çok daha zorlaştıracak, belki de imkânsız kılacak şartları oluşturabilirdi. Biliminsanlarının hipotezlerine göre, zayıf manyetik alanı yüzünden Mars'ı kasıp kavuran güneş rüzgârı, Kızıl Gezegen'in ince atmosferini ve görece su eksikliğini açıklıyor – insanların ancak güçlü yaşam destek sistemleri yardımıyla yaşayabilecekleri bir ortam.

Elektromanyetizmanın Gizemi

On sekizinci yüzyılda bazı biliminsanları elektrikle manyetizmanın bir şekilde ilintili olduğu kanısına vardılar; başkalarıysa –örneğin İngiliz Thomas Young ve Fransız bilimadamı André-Marie Ampère– bunların birbirleriyle hiçbir ilgisinin olmadığını düşünüyorlardı. William Gilbert elektrik ve manyetizmanın tamamen farklı fenomenler olduğunu düşünüyordu, ama yine de ikisini de aynı zamanda inceledi ve *De Magnete*'de elektrik konusunda da yazdı. Sürtülmüş kehribarın çekim kuvvetine "elektrik kuvveti" adını verdi (hatırlayın, kehribarın Yunanca karşılığı "*elektron*"du). Hatta statik elektriğin varlığını gösterme ve ölçmenin en kolay yolu olan elektroskobun bir başka biçimini de icat etti. (Elektroskopta bir metal çubuğun ucunda bir tutam şerit vardır. Yüklenir yüklenmez, şeritler birbirlerinden öteye uzanırlar: şapkadan sonra dikilen saçın laboratuvar dengi).

Bavyera Bilimler Akademisi 1776 ve 1777'de, biliminsanlarını elektrikle manyetizma arasındaki ilişki üzerine yazılar kaleme almaya teşvik etti. İnsanlar bir süredir yıldırım boşalmalarından pusuların kafayı yediğini biliyorlardı; Leyden şişelerinin elektrik yükünü boşaltarak iğneleri mıknatıslayan kişi Benjamin Franklin'den başkası değildi. (Yüzyılın ortalarında Hollanda'da icat edilen Leyden şişesi elektrik yüklerini depolayabiliyordu. Kondansatör dedğimiz cihazın ilk versiyonlarından.) Fakat on dokuzuncu yüzyılın başlarında elektrik çalışmaları alıp başını giderken, hiçbir biliminsanı elektrik akımını manyetizmayla açık bir şekilde ilişkilendirmediydi, ta ki Danimarkalı fizikçi Hans Christian Ørsted (1777-1851)

elektrik ve manyetizmayı bir araya getiren hayati önemdeki keşfini yapana kadar. Tarihçi Frederick Gregory'ye göre, modern fizik tarihinde muhtemelen ilk defa muhteşem bir keşif bir sınıf dolusu öğrenci önünde yapılıyordu.

Ørsted 1820'de bir bataryaya bağlı kablodan geçen elektrik akımının, yanı başındaki bir pusula iğnesini etkilediğini fark etti; akım iğneyi kabloya dik konuma getirip manyetik kuzey ve güneyden uzaklaştırmıştı. Kabloyu devreden çıkarıp elektrik akımını kesince iğne normale döndü. Ørsted'in bu deneyini bir dersin parçası olarak bilerek mi yaptığı, yoksa pusulanın tesadüfen orada olmasıyla bu şaşırtıcı etkiye sadece tanık mı olduğu açık değil. Kendi anlattıkları birbirinden farklı – fizik tarihinde birden çok defa gördüğümüz gibi.

İster tesadüf olsun ister kasti, bu, bir fizikçi tarafından gerçekleştirilmiş en önemli deney (diyelim gitsin) olabilir. Akla yatkın bir şekilde, kablodan geçen elektrik akımının bir manyetik alan oluşturduğu, manyetik iğnenin de bu manyetik alandan dolayı hareket ettiği sonucuna vardı. Bu muhteşem keşif on dokuzuncu yüzyılda elektrik ve manyetizma alanında bir araştırma furyası başlattı. Araştırmaları yapan önde gelen isimler André-Marie Ampère, Michael Faraday, Carl Friedrich Gauss ve nihayet muazzam kuramsal çalışmasıyla James Clerk Maxwell'di.

Akım hareket eden elektrik yüklerinden oluştuğuna göre, Ørsted elektrik yüklerinin bir manyetik alan yarattığını göstermişti. Michael Faraday 1831'de, iletken bir bobin içinden bir mıknatıs geçirdiğinde bobinde elektrik ürettiğini keşfetti. Böylece Ørsted'in kanıtlamış olduğu şeyin –elektrik akımlarının manyetik alan oluşturması– tersinin yapılabileceğini gösterdi: Hareket eden manyetik alan da elektrik akımları oluşturuyordu. Fakat ne Ørsted'in ne de Faraday'ın sonuçları sezgisel olarak bir anlam ifade etmiyor, değil mi? Bir mıknatısı iletken bir bobine yaklaştırdığınızda –bakır çok işe yarıyor çünkü çok iyi iletken– ne diye o bobinde akım oluşsun ki? Başta bu keşfin önemi pek açık değildi. Çok geçmeden, anlatılana göre, kötü şöhretli bir politikacı Faraday'a bu keşfinin pratikte bir işe yarayıp yaramayacağını sormuş, Faraday da güya şöyle cevap vermiş: "Efendim, ne işe yarar bilmiyorum. Bununla birlikte gayet emin olduğum bir şey var: Bir gün ona da vergi koyarsınız."

Evde kolaylıkla gösterebileceğiniz bu basit fenomen hiç mantık-

lı gelmeyebilir, fakat, abartısız, tüm ekonomimizi ve tüm insan yapımı dünyayı o yönetiyor. Bu fenomen olmasa biz aşağı yukarı hâlâ on yedinci ve on sekizinci yüzyıldaki atalarımız gibi yaşıyor olacaktık. Mum ışığımız olacaktı, radyo yok, televizyon yok, telefon yok ve bilgisayar yok.

Bugün kullandığımız bu elektriği nasıl elde ediyoruz? Genel olarak, elektriği jeneratörlerle üreten elektrik santrallerinden elde ediyoruz. En temel şekliyle, jeneratörlerin yaptığı şey, bakır bobinleri manyetik alanların içinden geçirmek; artık mıknatısları hareket ettirmiyoruz. Michael Faraday'ın ilk jeneratörü, bir at nalı mıknatısının iki kolu arasında manivelayla çevirdiği bakır bir diskten oluşuyordu. Diskin dış kenarındaki bir dinamo fırçası bir kabloya bağlıydı, dönen diskten merkezindeki aks üzerindeki başka bir fırça da ikinci bir kabloya bağlıydı. İki kabloyu ampermetrenin uçlarına taktığında üretilen akımı ölçecekti. Sisteme girdiği enerji (kas gücü!) bu mekanizmayla elektriğe dönüştürüldü. Fakat bu üreteç muhtelif sebeplerden çok randımanlı değildi – bunların arasında en başta bakır disk eliyle döndürmek zorunda olması geliyor. Bazı açılardan bütün jeneratörlere enerji dönüştürücüleri dememiz gerekir. Yaptıkları tek şey, bir tür enerjiyi –bu örnekte kinetik enerji– elektrik enerjisine dönüştürmek. Başka bir deyişle, emeksiz enerji yemeği yok. (Bir sonraki bölümde enerji dönüştürmeyi daha ayrıntılı ele alıyorum.)

Elektrikten Harekete

Hareketi elektriğe dönüştürmeyi öğrendiğimize göre, tersini, yani elektriği harekete dönüştürmeyi nasıl yapacağımızı düşünelim. Nihayet araba firmaları bunu yapabilmek için elektrik arabası geliştirmeye milyarlarca dolar harcar oldular. Bu arabalar için verimli, güçlü elektrik motorları icat etmeye çalışıyorlar. Peki elektrik motoru nedir? Elektrik motorları, elektrik enerjisini harekete dönüştüren aygıtlardır. Hepsi, aslında epey karmaşık olan ama görünüşte basit bir ilkeye dayalıdır: İçinden akım geçen iletken bir bobini manyetik alanın içine koyarsanız, o zaman bobin dönmek isteyecektir. Ne kadar hızlı döndüğü muhtelif etmenlere bağlıdır: akımın gücü, manyetik alanın gücü, bobinin şekli vb. Fizikçiler bir manyetik ala-

nın iletken bobin üzerinde bir tork uyguladığını söyler. "Tork", bir şeyi döndüren kuvvet için kullanılan bir terimdir.

Hiç lastik değiştirdiyseniz torku gözünüzde canlandırabilirsiniz. Bu işlemin en zor kısımlarından birinin, tekeri dingile bağlayan bijonları gevşetmek olduğunu bilirsiniz. Bu bijonlar genelde çok sıkılmış olduğundan, bazen de donmuş gibi durduğundan, bijonları kavrayan levye üzerinde müthiş bir kuvvet uygulamanız gerekir. Levyenin kolu ne kadar uzunsa, tork o kadar büyük olur. Eğer levye kolu çok uzunsa bijonları gevşetmek için az bir gayret sarf ederek işin içinden çıkabilirsiniz. Patlamış lastiği yedeğiyle değiştirdikten sonra bijonları sıkamak için ters yönde tork uygularsınız.

Tabii bazen ne kadar güçlü itip kaksanız da bijonu yerinden oynatamazsınız. Bu durumda ya biraz WD-40 tatbik edersiniz (bagajda daima WD-40 bulundurmanız gerekir, bu ve pek çok başka sebepten) ve gevşemesi için biraz beklersiniz, ya da levyenin koluna çekikle (daima yanınızda gezdirmeniz gereken bir şey daha!) vurmayı deneyebilirsiniz.

Torkun karmaşıklıklarına burada girmemize gerek yok. Bilmeniz gereken tek şey, bir bobinden akım geçirirseniz (batarya kullanabilirsiniz), bobini de manyetik bir alan içine yerleştirirseniz, bobine bir tork uygulanacağı ve bobinin dönmek isteyeceğidir. Akım arttıkça ve manyetik alan güçlendikçe, tork da büyüyecektir. Bir doğru akım (DC) motorunun altında yatan ilke budur, basit bir versiyonunu yapmak da kolaydır.

Doğru akımla alternatif akım arasındaki fark tam olarak nedir? Bir pilin artı ve eksi kutupları değişmez (artı, artı olarak kalır, eksi de eksi olarak). Dolayısıyla bir pili elektrik kablosuna bağladığınızda, akım daima tek bir yönde akacaktır, işte buna doğru akım diyoruz. Fakat evde (ABD'de) bir elektrik prizinin iki ucu arasındaki potansiyel farkı 60 hertzlik bir frekansla dönüşümlüdür. Hollanda'da ve Avrupa'nın büyük kısmında bu frekans 50 hertzdır. Bir kabloyla örneğin bir akkor lambayı ya da soba rezistansını evdeki prize bağlarsanız, akım 60 hertzlik bir frekansla (yani 120 defa yön değiştirerek) salınım yapacaktır (bir yönden öteki yöne). Buna alternatif akım denir ya da AC.

Her yıl Elektrik ve Manyetizma dersimde bir motor yarışması olur. (Bu yarışma benden önce senelerce, meslektaşlarım ve arka-

daşlarım olan Profesör Wit Busza ve Profesör Victor Weisskopf tarafından yapıldı.) Her öğrenciye bir zarf içinde şu basit malzemeler verilir: iki metrelik yalıtımlı bakır tel, iki ataç, iki raptiye, iki mıkna-tıs ve küçük bir tahta parçası. Ayrıca 1,5 voltluk AA pili kullanmaları gerekir. İstedikleri aleti kullanabilirler, tahtayı kesip delik açabilirler, fakat motor sadece zarfın içindeki malzemelerle yapılmalıdır (bant ya da yapıştırıcı kullanılamaz). Ödev, bu basit malzemelerden mümkün olan en hızlı –yani dakikadaki devir sayısı (RPM) en yüksek– motoru yapmaktır. Ataçlar dönen bobin için yatak görevi görür; kablo bobin yapmak için gereklidir; mıkna-tıslar da, pilden gelen akım bobinin içinden geçtiğinde bobine tork uygulayacak şekilde yerleştirilmelidir.

Yarışmaya girmek istediğinizi varsayalım ve siz pili bobine bağlar bağlamaz bobininiz saat yönünde dönmeye başlasın. Buraya kadar her şey gayet iyi. Fakat şaşkın bakışlarınız arasında, bobininiz dönmeyi sürdürmüyor. Bunun sebebi, her yarım devirde, bobininiz üzerine uygulanan torkun yön değiştirmesidir. Torkun ters yöne geçmesi, saat yönündeki dönüşü direnç yaratır; bobininiz kısa bir süreliğine saat yönünün tersine bile dönmeye başlayabilir. Herhalde bir motordan istediğimiz şey bu değil. Biz tek bir yönde sürekli bir devir istiyoruz (ister saat yönünde olsun ister saat yönünün tersi). Bu sorun, bobinden geçen akımın her yarım devirden sonra yönünü değiştirerek çözülebilir. Bu şekilde bobin üzerindeki tork hep aynı yönde uygulanacaktır ve bu sayede bobin tek yönde dönmeye devam edecektir.

Öğrencilerim motorlarını yaparlarken şu kaçınılmaz yön değiştiren tork sorunuyla başa çıkmak zorundadır – ve birkaç öğrenci komütatör denilen, her yarım devirden sonra akımın yönünü değiştiren bir aygıt yapmayı başarır. Ama karmaşık bir şeydir bu. Neyse ki akımın yönünü değiştirmeden sorunu halleden çok akıllıca ve kolay bir çözüm var. Akımın (dolayısıyla torkun) her yarım devirden sonra sıfır olmasını sağlayabilerseniz, o zaman bobin her devrin yarısında hiç torkla karşılaşmaz, öteki yarısındaysa hep aynı yönde bir torku olur. Net sonuç bobinin dönmeye devam etmesidir.

Bir öğrenci motorunun yaptığı her yüz RPM'ye (devir/dakika) bir puan veriyorum, azami yirmi puana kadar. Öğrenciler bu projeye bayılıyor – ve MIT öğrencileri oldukları için de, bugüne kadar

epey şaşırtıcı tasarımlar geliştirdiler. Siz de şöyle bir denemek isteyebilirsiniz. 11. dersimle ilgili notlarımın pdf bağlantısına tıklayarak yapım talimatını bulabilirsiniz: ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/lecture-notes/.

Hemen hemen bütün öğrenciler yaklaşık 400 RPM dönebilen bir motoru görece kolay yapıyor. Bobinin aynı yönde dönmesini nasıl sağlıyorlar? Önce, kablo tamamen yalıtımlı olduğu için, bobinin bir ucundaki kablonun yalıtımını kazımaları gerekiyor ki pilin bir ucuyla daima temas etsin – tabii hangi ucu seçtiklerinin önemi yok. Epey hüner isteyen, telin öteki ucu. Öğrenciler akımın sadece yarı devrinde akmasını istiyor – başka bir deyişle akımı yarısında kesmek istiyorlar. O yüzden, kablonun o ucundaki yalıtımın *yarısını* kazıyorlar. Yani kablonun çevresinin yarısı çıplak tel oluyor. Akımın durduğu zamanlarda (her yarım devirde), bobin üzerinde tork olmamasına rağmen dönmeye devam ediyor (yarım devirde durduracak kadar sürtünme yok). Kazıma işini tam uygun yapmak ve kablonun hangi yarı çevresinin çıplak olması gerektiğini bulmak için deneyim gerekiyor – ama dediğim gibi, hemen herkes 400 RPM'yi yakalayabiliyor. Benim yaptığım da öyle oldu – fakat 400 RPM'den yukarıya hiçbir zaman çıkamadım.

Sonra bazı öğrenciler benim sorunumun ne olduğunu söyledi. Bobin birkaç yüz RPM'den fazla dönmeye başlayınca, yataklarda (ataçlar) titreşmeye başlayıp sık sık akımı kesiyor, bu yüzden de torku kesintiye uğratiyordu. İşte, daha uyanık öğrenciler, iki tel parçasıyla bobinin uçlarını iki ataca tutturduklarında, az bir sürtünmeyle de olsa dönmesini sürdürmeye imkân verdiğini keşfetmişlerdi. Ve bu küçük ayarın onlara sağladığı devir, ister inanın ister inanmayın, 4000 RPM oldu.

Bu öğrenciler çok yaratıcı. Neredeyse bütün motorlarda, bobinin dönüş eksenini yatay. Fakat bir öğrenci bobinin dönüş ekseninin dikey olduğu bir motor yaptı. Motorlardan en iyisi 5.200 devire kadar çıktı – unutmayın 1,5 voltluk küçücük bir pille çalışıyor! Kazanan öğrenciyi hatırlıyorum. Birinci sınıftaydı, genç adam dersten sonra sınıfın önünde yanımda dururken şöyle demişti: "Profesör Lewin, bu zor bir şey değil ki. Yaklaşık on dakikada size 4.000 devirli bir motor yapabilirim." Ve gözlerimin önünde dediğini yapmaya başladı.

Fakat bunlardan birini yapmaya çalışmanız gerekmiyor. Birkaç

dakikada yapabileceğiniz daha basit motorlar da var, hem de daha az parçayla: alkalın pil, küçük bir parça bakır tel, alçıpan vidası (ya da bir çivi) ve küçük bir disk mıknatıs. Buna tek kutuplu motor denir. Bu elektrik motorunun nasıl yapılacağını adım adım anlatan talimatla, böyle bir motorun çalışırkenki görüntülerini şu adreste bulabilirsiniz (sizin yaptığınız 5000 RPM'yi geçerse bana yazın): www.evilmadscientist.com/article.php/HomopolarMotor.

Motor yarışmasından tamamen farklı olsa da en az onun kadar eğlenceli bir uygulamalı anlatımım daha var. Bunda 30 santimetre çapında bir elektrik bobini ve iletken bir levha kullanıyorum. Bildiğiniz gibi bobin içinden geçen elektrik akımı bir manyetik alan yaratır. Bobin içindeki alternatif akım (AC) alternatif manyetik alan yaratır (pilin ürettiği akımın doğru akım olduğunu hatırlayalım). Amfimdeki elektriğin frekansı, ABD'nin her yerinde olduğu gibi 60 hertz alternatif akım olduğundan, bobinimdeki akım her 1/120 saniyede yön değiştirir. Böyle bir bobini metal bir levhanın hemen üzerine koyarsam, değişen manyetik alan (buna harici manyetik alan diyorum) iletken levhaya nüfuz edecektir. Faraday yasasına göre, bu değişen manyetik alan metal levhada akımların akmasına sebep olacaktır, ki bunlara girdap akımı diyoruz. Girdap akımları da kendi değişen manyetik alanlarını üreteceklerdir. O halde iki manyetik alan olacak: harici manyetik alan ve girdap akımlarının ürettiği manyetik alan.

1/60 saniyelik devrin yarı zamanında, bu iki manyetik alan zıt yöndedir ve bobin levha tarafından itilir; öteki yarı zamandaysa manyetik alanlar aynı yönde olacaktır ve bobin levha tarafından çekilecektir. Anlatılması oldukça zor ve burada işlemek için fazla teknik sebeplerden dolayı, bobin üzerinde net bir itici kuvvet vardır ve bu kuvvet bobini havalandırmaya yetecek kadar güçlüdür. Bunu 8.02 ders dizisi, 19. ders kaydında görebilirsiniz: videolectures.net/mit802s02_lewin lec19/. Dersin yaklaşık 44 dakika 20 saniye sonrasına bakın.

Bir kişiyi havalandırmak için bu kuvvetten yararlanabilmemiz gerektiğini düşündüm ve tıpkı sihirbazların yaptığı gibi, sınıfımda bir kadını havalandırmaya karar verdim. Dev bir bobin oluşturup kadını üzerine yatırıp havaya kaldıracaktım. Arkadaşlarım Markos Hankin ve Bil Sanford (fizik gösteri grubundan) ile birlikte bobinleri-

mizden yeterli akımın geçmesi için çok uğraştık, fakat her seferinde sigortaları attırdık. Bunun üzerine MIT Yapı İşleri ve Teknik Daire Bölümü'nü arayıp ihtiyacımız olan şeyi söyledik –birkaç bin amperlik akım– onlar da güldü. "İstediğiniz akımı size verebilmek için MIT'yi yeniden tasarlamamız gerekir," dediler. Çok fenaydı, bazı kadınlar çoktan bana e-posta yollayıp havalandırılmaya gönüllü olmuşlardı. Hepsine tekrar yazıp üzüntülerimi bildirdim. Fakat bu bizi durdurmadı, dersin yaklaşık 47 dakika 30 saniye sonrasına bakarsanız görebilirsiniz. Ben sözümü tuttum; sadece kadın başta planladığımdan çok daha hafif oldu.

Elektromanyetizma İmdada Yetişir

Bir kadını havaya kaldırmak epey iyi –ve de eğlenceli– bir gösteri olur, fakat manyetik kaldırmanın çok daha şaşırtıcı ve daha işe yarar uygulamaları var. Bu, dünyadaki en havalı, en hızlı, en az çevre kirlüten taşımacılık mekanizmalarının bir kısmından sorumlu yeni teknolojilerin temelini oluşturuyor.

Yüksek hızlı maglev trenlerini duymuşsunuzdur. Birçok insan onları fevkalade büyüleyici buluyor, çünkü görünmeyen manyetik kuvvetlerin sihriyle, en şık modern aerodinamik tasarımı birleştirmişe benziyorlar. Belki "maglev" in "*magnetic levitation*" a (manyetik kaldırma) karşılık geldiğini bilmiyordunuz. Ama manyetik kutupları birbirine yakın tuttuğunuzda birbirlerini ya çektiklerini ya da ittiklerini iyi biliyorsunuz. Bu maglev trenlerinin altında yatan harika fikre göre, eğer bu çekme ve itme kuvvetlerini kontrol altında tutacak bir yol bulursanız, bir treni demiryolu üzerinde havaya kaldırabilmeniz gerekir, sonra da yüksek hızla ister çeker ister itersiniz. Elektromanyetik süspansiyonla (EMS) çalışan bir tür trende, tren üzerindeki elektromıknatıslar treni manyetik çekimle kaldırır. Trenlerden iki yandan C şeklinde bir kol iner; kolun üst tarafı trene bağlıdır, rayın altında olan alt tarafın üst yüzeyindeyse treni ferromanyetik malzemeden yapılmış raya doğru kaldıran mıknatıslar bulunur.

Trenin raylara takılmasını istemediğinizden ve çekim kuvveti doğası gereği kararsız olduğundan, trenlerin raylara tam uygun me-

safede –sadece 1-2 santimetre– kalmasını sağlamak için karmaşık bir geribildirim sistemi gereklidir. Eşzamanlı olarak açılıp kapanan ayrı bir elektromıknatıs sistemi treni ileriye "çekerek" trenin itici kuvvetini sağlar.

Diğer ana maglev tren sistemi türü –elektrodinamik süspansiyon (EDS) olarak bilinir – manyetik itme kuvvetine dayalıdır. Süperiletken denilen olağanüstü aygıtlar kullanılır. Çok soğuk tutulduğunda süperiletkenin hiç elektrik direnci olmaz. Bundan dolayı, süperiletken malzemeden yapılmış süpersoğutulmuş bobin çok güçlü bir manyetik alan yaratmak için çok az elektrik gücü tüketir. Daha da şaşırtıcı olanı, süperiletken manyetik bir kapan gibi davranabilir. Yanına bir mıknatıs itilirse, kütleçekimiyle süperiletken arasındaki etkileşim mıknatısı belli bir mesafede tutar. Bunun sonucunda, süperiletken kullanan maglevler, doğal olarak EMS sistemlerinden çok daha karardır. Süperiletkeni ve mıknatısı birbirine doğru itmeye ya da birbirinden ayırmaya çalışırsanız epey zor olduğunu görürsünüz. Bu ikisi aralarındaki mesafeyi korumak isteyeceklerdir. (Bir mıknatısla bir süperiletken arasındaki ilişkiyi gösteren harika bir kısa video var: www.youtube.com/watch?v=nWTSzBWEsms.)

Altında mıknatıslar olan tren, üzerinde süperiletkenler olan raya fazla yaklaşırsa, artan itme kuvveti treni geri iter. Tren fazla uzaklaşırsa, yerin kütleçekimi treni geri çekip raya doğru hareket etmesine sebep olur. Bunun sonucunda tren vagonu havada dengede kalır. Burada da trenin ilerlemesi çoğunlukla itme kuvvetine dayalıdır, ama bu süreç EMS sistemlerindekiinden daha basittir.

İki yöntemin de artıları ve eksileri vardır, fakat ikisi de geleneksel tren tekerleklerindeki sürtünme sorununu –dolayısıyla eskime ve yıpranmanın ana öğelerinden birini– etkili bir biçimde ortadan kaldırmanın yanı sıra, çok daha sarsıntısız, daha sessiz ve hepsinden önemlisi *daha hızlı* bir yolculuk imkânı sağlamışlardır. (Trenin hızıyla çabucak artan hava direnciyle hâlâ baş etmeleri gerekiyor. Aerodinamik olarak o kadar biçimli tasarlanmalarının sebebi bu.) Elektromanyetik süspansiyonla çalışan ve 2004'te açılmış olan Şangay Maglev Treni, şehirden havalimanına olan 30 kilometrelik mesafeyi, 224 ila 251 kilometre/saatlik bir ortalama hızla (2008 itibariyle) yaklaşık 8 dakikada alır – fakat saatte 431 kilometre yapma yetisine sahiptir, dünyadaki diğer bütün hızlı trenlerden daha hızlıdır. Şan-

gay treninin üreticileri tarafından hazırlanmış kısa bir görüntüsünü şurada seyredebilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=weWmTldrOyo. Maglev trenlerindeki kayıtlara geçmiş en yüksek hız bir Japon deneme hattına ait. Burada JR-Maglev treni saatte 580 kilometreyi gördü. İşte Japon trenine ait kısa bir video: www.youtube.com/watch?v=VuSrLvCVoVk&feature=related.

YouTube'da maglev teknolojisiyle ilgili çok komik ve aydınlatıcı videolar var. Bir oğlanın dönen bir kalemi altı mıknaş ve biraz oyun hamuru kullanarak havaya kaldırdığı şu deneyi siz de evde kolayca deneyebilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=rrRG38WpkTQ&feature=related. Ama bir süperiletken tasarımını gösteren şu videoya da bakın: www.youtube.com/watch?v=GHTAwQXVsuk&feature=related. Bu videoda oyuncak bir trenin bir hat boyunca dönüp duruşu gösteriliyor – ve sistemin açıklamasını içeren kısa bir animasyon bölümü bile var.

Fakat benim en sevdiğim maglev gösterisi Levitron denen şu harika küçük topaştır. www.levitron.com'da farklı versiyonlarını görebilirsiniz. Büromda yüzlerce ziyaretçime keyif vermiş ilk modellerden biri var.

Maglev tren sistemlerinin çevreye hakiki yararları var – elektriği görece verimli kullanıyorlar ve dışarıya sera gazı salmıyorlar. Fakat maglev trenleri bedavaya geliyor değil. Çoğu maglev tren yolları mevcut tren hatlarıyla uyumlu olmadığından, maglev sistemleri çok büyük başlangıç sermayesi gerektiriyor, bu da bugüne kadar çok yaygın kullanıma geçmesine engel oldu. Öyle de olsa, bugün kullandığımızdan daha verimli ve daha temiz toplu taşıma sistemleri geliştirmek geleceğimiz için kesinlikle vazgeçilmez bir şey, kendi gezegenimizi pişirmek istemiyorsak eğer.

Maxwell'in Olağanüstü Başarısı

Pek çok fizikçi James Clerk Maxwell'in bütün zamanların en önemli fizikçilerinden olduğunu, belki de Newton ve Einstein'ın hemen ardından geldiğini düşünür. Maxwell'in katkıları fizikte inanılmaz geniş bir alanı kapsar – Satürn'ün halkalarının analizinden, gazların davranışlarına, termodinamiğe ve renk kuramına kadar. Fakat en

baş döndürücü başarısı, Maxwell denklemleri olarak bilinen, elektiriği ve manyetizmayı tarif eden ve ilişkilendiren dört denklemi ortaya koymasidir. Bu dört denklemin sadece görünüşü basittir; altında yatan matematiği epey karmaşıktır. Fakat integral ve diferansiyel denklemlerle aranız iyiye lütfenderslerime bakın ya da bunlarla ilgili bir şeyler öğrenmek için nette dolaşın. Bizim amaçlarımız doğrultusunda, basit bir dille işte Maxwell'in yaptıkları.

Her şeyden önce Maxwell elektrik ve manyetizma kuramını, bu iki fenomenin tek bir fenomen –elektromanyetizma– olduğunu farklı şekillerde göstererek birleştirdi. Çok önemli bir istisna dışında bu dört denklem onun "yasaları" ya da icatları değildir; şu ya da bu biçimde zaten varlardı. Ne var ki Maxwell'in yaptığı, tamamlanmış bir alan kuramı dediğimiz şeyde bunları bir araya getirmektir.

Bu denklemlerin ilki Gauss'un elektrik yasasıdır, elektrik yükleriyle, onların yarattığı elektrik alanlarının gücü ve dağılımı arasındaki ilişkiyi açıklar. İkinci denklem, Gauss'un manyetizma yasası, dört denklemin en basitidir ve birkaç şey birden söyler: Manyetik tekkutup diye bir şey yoktur. Elektriksel tekkutuplara (tekkutup ya pozitif yüklü bir parçacıktır ya da negatif yüklü) izin veren elektrigin aksine, mıknatıslarda daima bir kuzey ve güney kutbu vardır (buna çiftkutup diyoruz). Mıknatıslarınızdan (bende buzdolabımın üzerinde bir sürü var) birini ikiye bölerseniz her bir parçanın bir kuzey bir de güney kutbu olur; eğer 10.000 parçaya bölerseniz yine her birinin bir kuzey bir güney kutbu olur. Bir elinizde sadece manyetik kuzey kutbu, öteki elinizde sadece manyetik güney kutbu elde etmeniz *hiçbir yolu* yoktur. Fakat elinizde elektrik yüklü (pozitif yüklü olsun) bir nesne varsa ve onu ikiye bölerseniz, iki parça da pozitif yüklü olabilir.

Şimdi işler gerçekten ilginç bir hal almaya başlıyor. Üçüncü denklem, değişen manyetik alanların nasıl elektrik alanları ürettiğini tarif eden Faraday yasasıdır. Bu denklemin daha önce sözünü ettiğim elektrik jeneratörlerine nasıl temel teşkil ettiğini görebilirsiniz. Son denklem ise Ampère yasasıdır ve Maxwell bunu önemli ölçüde değiştirmiştir. Ampère'in kendi yasası bir elektrik akımının manyetik alan ürettiğini gösteriyordu; fakat Maxwell buna bir rötuş yaparak, değişen elektrik alanının da manyetik alan yarattığını eklemiştir.

Maxwell bu dört denklemi kurcalayarak boş uzayda yol alan

elektromanyetik dalgaların varlığını öngörmüştü. Dahası, bu dalgaların hızlarını bile hesaplayabiliyordu. Hakikaten insanı hayrete düşüren sonuçsa, hızlarının ışık hızıyla aynı olmasıydı. Başka bir deyişle, ışığın kendisi de bir elektromanyetik dalga olmalıydı!

Bu bilimadamları –Ampère, Faraday ve Maxwell– topyekûn bir devrimin eşiğinde olduklarını biliyorlardı. Araştırmacılar bir asırdır elektriği anlamak için ciddi şekilde çalışmaktaydı, ama şimdi bu adamlar çıkmış, çığır üstüne çığır açıyorlardı. Bazen gece nasıl uyuyabildiklerine hayret ediyorum.

1861'de bir araya getirdikleriyle, Maxwell denklemleri gerçekten de on dokuzuncu yüzyıl fiziğinin en parlak başarısıydı, hele Newton ve Einstein arasındaki tüm fizikte kesinlikle öyle. Ve bütün derin keşifler gibi, temel bilimsel kuramları birleştirmeye yönelik çabalara yol gösteriyordu.

Maxwell'den bu yana fizikçiler doğanın dört temel kuvvetini –elektromanyetik, güçlü nükleer, zayıf nükleer ve kütleçekim kuvvetleri– tek bir birleşik kuramda toplamak için haddi hesabı olmayan çabalar sarf ettiler.

Birleştirme araştırmaları devam ediyor. Abdus Salam, Sheldon Glashow ve Steven Weinberg, elektromanyetizma ve zayıf nükleer kuvveti elektrozayıf kuvvet olarak birleştirdikleri için 1979'da Nobel Ödülü kazandılar. Pek çok fizikçi, elektrozayıf kuvvet ile güçlü nükleer kuvveti büyük birleşik kuram (*grand unified theory* ya da kısaca GUT) denilen kuramda birleştirmeye çalışıyor. Bu seviyede bunu yapabilmek sarsıcı bir başarı olurdu, Maxwell'inkine paralel bir şey. Ve şayet bir yerlerde bir fizikçi, çoğunun "her şeyin kuramı" dediği şeyi yaratmak için kütleçekimiyle büyük birleşik kuramı birleştirmeyi başarır – eh, işte o zaman fizikte kutsal kâselerin en kutsalı olur. Birleştirme güçlü bir düş.

Elektrik ve Manyetizma ders dizisinde, nihayet Maxwell'in bütün denklemlerini tüm ihtişamı ve yalınlığıyla gördüğümüzde, onları çepeçevre tüm amfiye yansıtır, çiçekler dağıtarak öğrencilerimle bu önemli kilometre taşını kutlarım. Biraz merakta kalabilirsiniz 15. Bölüm'de devamını okuyabilirsiniz.

Enerjinin Korunumu

Plus ça change... *

Yıllar boyunca yaptığım en popüler uygulamalı anlatımların birinde, başımı doğrudan bir yıkım güllesinin yolu üzerine koyarak hayatımı riske atma numarası var – yıkım güllesinin minik bir versiyonu demek daha doğru olur, fakat beni rahatlıkla öldürebilecek bir şey, bundan emin olabilirsiniz. Yıkım ekipleri tarafından kullanılan yıkım gülleleri yaklaşık bin kilo kadarlık bir topuzdan –ya da küresel bir ağırlıktan– yapılabilirken, ben kendiminkini 15 kiloluk bir topuzdan yaptım. Elimde topuzla amfinin bir ucunda durup başımı duvara dayıyor ve topuzu çeneme yaslıyorum. Topuzu salarken hiçbir şekilde bir itme oluşturmamak için son derece dikkatli olmam gerekiyor, minnacık bir dürtme bile olmamalı. En ufak bir itme durumunda beni yaralayacağı kesin – ya da dediğim gibi öldürebilir bile. Öğrencilerimden dikkatimi dağıtmamalarını, gürültü yapmalarını ve hatta bir süre nefes almamalarını istiyorum – yoksa, diyorum, bu benim son dersim olabilir.

İtiraf etmeliyim, bu sunumu her yaptığımda, gülle bana doğru savrulurken adrenalin fırlaması oluyor; buradaki fiziğin beni kurtaracağından ne kadar emin olsam da, gülle havada çeneme milim kalana kadar uçup gelirken orada öyle dikilmek daima sinir bozucu. İçgüdüsel olarak dişlerimi sıkıyorum. Doğrusunu söylemek gerekirse gözlerimi de hep kapatıyorum! Nedir, diye sorabilirsiniz, nedir bu sunuma beni zorlayan? Tüm fizikteki en önemli kavramlar-

* Fr. "Plus ça change, plus c'est la même" (Ne kadar değişirse o kadar aynı kalır) sözünün kısa versiyonu. –y.n.

dan birine olan sonsuz güvenim – enerjinin korunumu yasası.

Dünyamızın en önemli özelliklerinden biri bir enerji biçiminin başka bir enerji biçimine, sonra başka bir türe, sonra gene başka bir türe, hatta tekrar baştaki haline dönüştürülebiliyor olması. Enerji dönüşüme uğrayabilir fakat asla kaybolmaz, yoktan var olmaz. Aslında bu dönüşüm sürekli olur. Bütün uygarlıklar –sadece bizimki değil, teknolojik açıdan en az gelişmiş olanlar bile– çok farklı biçimlerde bu sürece dayalıdır. Yeme eyleminin de apaçık bizim için yaptığı şey budur; çoğunlukla karbonda depolanmış kimyasal enerjiyi, adenozin trifosfat (ATP) adı verilen bir bileşiğe dönüştürür, o da hücrelerimizin farklı işler yapmak için kullanabileceği enerjiyi depolar. Kamp ateşi yaktığımızda da olan budur, odun ya da mangal kömüründe (her birindeki karbon oksijenle birleşir) depolanmış kimyasal enerji ısı ve karbondioksit dönüşür.

Yaydan fırlatılmış oku havada uçuran şey odur, yayın telini gerdiğinizde birikmiş potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirip oku ileri iter. Bir silahta mermileri namludan dışarı fırlatan, baruttaki kimyasal enerjinin, hızla genleşen gazın kinetik enerjisine dönüşümüdür. Bisiklet sürerken, pedalları iten enerji, başlangıçta kahvaltı ya da öğle yemeğiniz olan ve vücudunuz tarafından farklı bir kimyasal enerji biçimine (ATP) çevrilen besinlerden gelir. Kaslarınız bu kimyasal enerjinin bir kısmını mekanik enerjiye dönüştürerek kasılıp gevşer ve pedalı itmenizi sağlar. Arabanızın aküsünde depolanmış kimyasal enerji, marş düğmesini çevirdiğinizde elektrik enerjisine dönüşür. Elektrik enerjisi silindirlere gider, burada benzin karışımını ateşler ve benzin yanarken kimyasal enerji açığa çıkar. Sonra bu enerji ısıya dönüşür, bu da silindirdeki benzinin basıncını artırır ve basınç da pistonları iter. Pistonlar krank milini çevirir ve şanzıman enerjiyi tekerlere iletir, onları döndürür. Bu olağanüstü süreç sayesinde benzindeki kimyasal enerjiden, araba kullanmak için yararlanmış oluruz.

Hibrid otomobiller kısmen bu sürecin tersine dayalıdır. Arabanın kinetik enerjisinin bir kısmı –frene bastığınızda– elektrik enerjisine dönüştürülüp bir aküde depolanır ve bir elektrik motorunu çalıştırabilir. Akaryakıt kullanan bir kazanda, akaryakıtın kimyasal enerjisi ısıya dönüşür, o da ısıtma sistemindeki suyun sıcaklığını yükseltir, sonra da bir pompa bu suyu radyatörlere gönderir. Neon lambalarda,

bir neon gaz tüpü içinde hareket eden elektrik yüklerinin kinetik enerjisi, görünür i ı a d n    r l r.

Uygulamaların sonu yok gibi. Nükleer reaktörlerde uranyum ya da plütonyum çekirdeklerinde depolanmış nükleer enerji, ısı enerjisine d n    r l r; ısı suyu buhara d n    r r, buhar türbinleri döndürür, bu da elektrik üretir. Fosil yakıtlarda depolanmış kimyasal enerji –sadece petrol ve benzin değil, aynı zamanda kömür ve doğal-gaz da– ısıya ve (elektrik santrali söz konusuysa) nihayet elektrik enerjisine dönüşür.

Bir pil yaparak enerji d n    mlerine kolaylıkla tanık olabilirsiniz. Pek çok farklı türde pil vardır, geleneksel ya da hibrid arabanızdakilerden tutun da kablosuz bilgisayar farenizi ve cep telefonunuzu  alı tıranlara kadar. İster inanın ister inanmayın, bir patates, bir sentlik madeni para, galvanizli bir çivi ve iki bakır kablo parçasıyla (her biri yaklaşık 9 santim, her iki ucundan da 1 santimden biraz fazla yalıtkanı sıyrılmış olacak) siz de bir pil yapabilirsiniz. Çivinin büyük bölümünü bir uçtan patatese sokun, öteki ucundan madeni para için bir yarık açın ve parayı içine yerleştirin. Kablolardan birinin bir ucunu çiviye tutun (ya da çivinin başına sarın); öteki kablo parçasını madeni para üzerine tutun ya da parayla temas edecek şekilde yarı ın içine kaydırın. Sonra kabloların boşta kalan uçlarını Noel ağacı lambalarının küçük kablolarına dokundurun. Biraz göz kırpı tırması gerekir. Tebrikler! Bu tür mekanizmalardan onlarcasını YouTube'da görebilirsiniz – neden denemeyesiniz?

Belli ki enerji d n    mleri etrafımızda sürekli olup bitiyor, ama bir kısmı ötekilerden daha bariz. İnsanın sezgilerine en ters olanlardan biri kütleçekim potansiyel enerjisi. Genelde durağan nesnelerin enerjisi olduğunu d   nmesek de, aslında vardır; bazı durumlarda bayağı da fazladır. Kütleçekimi nesneleri daima a a ıya, dünyanın merkezine doğru çekmeye çalıştığı için, belli bir yükseklikten bıraktı ınız her nesne hız kazanır. Bu sırada kütleçekim potansiyel enerjisini kaybeder, fakat kinetik enerji kazanır – hiçbir enerji kaybolmaz ve hiçbiri yoktan var edilmez; sıfır toplamlı bir oyundur bu! m kütleli bir nesne dikey bir h mesafesinden d  erse, potansiyel enerjisi mgh kadar azalır (g kütleçekim ivmesidir, yaklaşık saniyede 9,8 metre/saniye), fakat kinetik enerjisi aynı miktarda artacaktır. Nesneyi dikey olarak h yüksekliğine çıkarırsanız, kütleçekim po-

tansiyel enerjisi mgh kadar artar ve sizin de bu enerjiyi üretmeniz (iş yapmanız) gerekir.

1 kilogram kütlesi olan bir kitap, yerden 2 metre yüksekte bir raf üzerindeyse, o zaman, yere düştüğünde kütleçekim potansiyel enerjisi $1 \times 9,8 \times 2 = 19,6$ jul oranında azalacaktır, fakat kinetik enerjisi yere çarptığında 19,6 jul olacaktır.

Bence *kütleçekim potansiyel enerjisi* ismi harika bir isim. Şöyle düşünün: Kitabı yerden kaldırıp rafa koyarsam, bunu yapmak için enerjimden 19,6 jul gider. Bu enerji kayıp mı olur? *Hayır!* Kitap yerden 2 metre yukarıda olduğuna göre, o enerjiyi bana tekrar kinetik enerji olarak döndürme "potansiyel"i var – ne zaman yere düşürürsem, ister ertesi gün ister bir yıl sonra! Kitap yerden ne kadar yüksekteyse, o kadar çok enerji "potansiyel" olarak mevcuttur, tabii kitabı daha yukarıya koymak için o fazladan enerjiyi sağlamam gerekir.

Benzer biçimde, bir ok atmak istediğinizde yayın telini germek enerji gerektirir. O enerji yayda depolanmıştır ve "potansiyel" olarak, sizin seçtiğiniz bir zamanda, oka hızını veren kinetik enerjiye dönüşmek için hazırdır.

Size harika bir şey göstermek için kullanabileceğim basit bir soru var. Birazcık matematiğe katlanabilirseniz, Galileo'nun yaptığı (ya da yapmadığı) en ünlü deneyin neden işe yaradığını göreceksiniz. Hatırlarsanız, eğik Pisa Kulesi'nden farklı kütlelerde (dolayısıyla farklı ağırlıklarda) toplar bırakarak düşme hızının kütlelerinden bağımsız olduğunu göstermek istediği rivayet ediliyordu. Newton'ın hareket yasasına göre, hareket eden bir nesnenin kinetik enerjisi (KE) hem nesnenin kütlesiyle hem de hızının karesiyle doğru orantılıdır; bunun denklemi $KE = \frac{1}{2}mv^2$ 'dir, o zaman $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ denklemini elde ederiz. Her iki tarafı da m 'ye bölerseniz, m denklemden tamamen çıkar ve geriye $gh = \frac{1}{2}v^2$ kalır. Kesirden kurtarmak için denklemin her iki tarafını da 2'yle çarparsınız ve $2gh = v^2$ sonucunu elde ederiz. Buna göre hız, yani Galileo'nun test ettiği şey $2gh$ 'nin* kareköküne eşittir. Bir de kütlenin denklemden tamamen kaybolduğuna dikkatinizi çekerim! Açıkça burada bir etmen değil –

* Bu denklemi evde kullanmak isterseniz, g için 9,8 ve h 'yi metre cinsinden alın; o zaman v , metre bölü saniye olur. h 1,5 metreyse (yerden yükseklik), nesne yere yaklaşık 5,4 metre/saniye hızla çarpacaktır, o da yaklaşık 19 kilometre/saat eder.

yani hız kütleyle bağlı değil. Somut bir örnek verirsek, 100 metre yükseklikten hava direnci yokken (herhangi bir kütlede) bir kaya bırakırsak yere yaklaşık 45 metre/saniyelik bir hızla çarpacaktır, yani yaklaşık 160 kilometre/saat hızla.

Birkaç yüz bin kilometre öteden dünyaya düşen bir kaya hayal edin (herhangi bir kütlede). Dünyanın atmosferine hangi hızla girecektir? Ne yazık ki hızın $2gh$ 'nin karekökü olduğu yukarıdaki basit denklemini kullanamayız, çünkü kütleçekim ivmesi sıkı sıkıya dünyaya olan mesafeye bağlıdır. Ayın mesafesinde (yaklaşık 385.000 kilometre), dünya kaynaklı kütleçekimi, dünya yüzeyine yakın bir mesafeye göre yaklaşık 3.600 kat daha küçüktür. Buradaki matematiği size göstermeden, bana inanın, hız yaklaşık 40.000 kilometre/saat olurdu!

Belki şimdi gökbilimde kütleçekim potansiyel enerjisinin ne kadar önemli olduğunu anlayabilirsiniz. 13. Bölüm'de ele alacağım gibi, madde büyük bir mesafeden bir nötron yıldızı üzerine düşerse, nötron yıldızına aşağı yukarı saniyede 160.000 kilometre hızla çarpar, evet, saniyede! Kayanın sadece 1 kilogramlık kütlesi olsaydı, o zaman kinetik enerjisi yaklaşık 13 bin trilyon (13×10^{15}) jul olurdu, bu da aşağı yukarı büyük bir elektrik santralının (1000 MW) yaklaşık altı ayda üreteceği enerji miktarıdır.

Farklı türdeki enerjilerin birbirlerine dönüştürülebilir olması yeterince olağanüstü bir şey, fakat daha da muhteşem olan, enerjide asla net bir kaybın olmaması. Asla. Müthiş. Yıkım güllésinin beni öldürmemiş olmasının sebebi budur.

15 kilogramlık gülleyi yerden h dikey mesafesinde çeneme doğru çektiğimde, kütleçekim potansiyel enerjisini mgh kadar artırırım. Gülleyi bıraktığımda, kütleçekiminden dolayı salonda bir yandan öteki yana sallanmaya başlar ve mgh , kinetik enerjiye dönüşür. Burada h , çenemle ipin ucundaki ağırlığın en düşük konumu arasındaki dikey mesafedir. Gülle salınımındaki en düşük noktaya geldiğinde, kinetik enerjisi mgh olacaktır. Gülle yayı tamamlayıp salınımının üst sınırına ulaştığında, bu kinetik enerji tekrar potansiyel enerjiye dönüşür – işte o yüzden sarkacın en yüksek noktasında gülle bir an durur. Kinetik enerji yoksa hareket de yoktur. Fakat bu sadece çok kısa bir anlıgındır, çünkü gülle tekrar aşağı giderek ters yöne salınır ve potansiyel enerji tekrar kinetik enerjiye dönüşür. Kinetik

enerjiyle potansiyel enerjinin toplamına mekanik enerji denir ve sürtünme (bu örnekte topuz üzerindeki hava direnci) yokken toplam mekanik enerji değişmez – korunur.

Bunun anlamı, güllenin, tam bırakıldığı noktadan daha yukarıya çıkamayacağıdır – tabii yolu üzerinde başka hiçbir enerji aktarılmadığı sürece. Hava direnci benim hava yastığımdır. Sarkacın mekanik enerjisinin *çok* küçük bir miktarı hava direnci tarafından soğurur ve ısıya dönüştürülür. Sonuç olarak gülle çeneme sadece üç milimetre kala durur, 8.01 ders dizisinin 11. dersindeki görüntü kaydında da görebilirsiniz. Susan bu gösterimi üç kere gördü – her seferinde tüyleri diken diken olur. Bazıları çok alıştırma yapıp yapmadığımı sorar, ben de daima doğru cevap veririm: Enerjinin korunumu na yüzde yüz güvendiğim için alıştırma yapmama gerek yok.

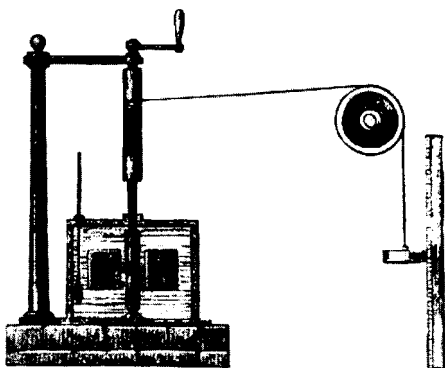
Fakat topu elimden bırakırken en ufak bir şekilde itecek olsaydım –örneğin tam o sırada öksürseydim ve o da topu biraz itmeme sebep olsaydı– o zaman onu bıraktığım noktanın biraz daha yukarısına salınıp çenemi dağıtırdı.

Enerjinin korunumu büyük ölçüde, on dokuzuncu yüzyılda yaşamış bir İngiliz bira yapımcısının oğlu James Joule'ün çalışmaları sayesinde keşfedildi. Çalışmaları enerjinin doğasını anlamada o kadar önemliydi ki, enerjinin ölçüldüğü uluslararası birim jul, onun adından alınmıştır. Babası onu ve erkek kardeşini eğitim görmeleri için ünlü deneysel bilimadamı John Dalton'ın yanına gönderdi. Dalton'ın Joule'e iyi bir eğitim verdiği ortada. Joule babasından miras kalan bira fabrikasının bodrum katında bir sürü yenilikçi deney gerçekleştirdi. Elektriğin, ısıнын, mekanik enerjinin özelliklerini yaratıcı biçimlerde araştırdı. Keşiflerinden birisi elektrik akımının bir iletkende ısı ürettiğidir; bunu da, içlerinden akım geçen farklı türde metal bobinleri su kavanozlarına koyup sıcaklık değişimlerini ölçerek bulmuştur.

Joule ısıнын temelde bir enerji biçimi olduğunu kavramıştı. Bu, yıllar boyunca yaygın biçimde kabul gören ısı anlayışını çürütüyordu. Önceleri bir tür akışkan olduğu düşünülen ısıya kalorik deniyordu – bizim bugünkü *kalori* kelimemiz de oradan geliyor. O zamanların inanışına göre bu akışkan ısı, yüksek yoğunluktaki alanlardan düşük yoğunluğa akıyordu ve kalorik ne yoktan var edilebilirdi ne de varken yok edilebilirdi. Fakat Joule ısıнын, farklı bir yapıya sahip

olduğunu akla getirecek biçimde pek çok yolla üretildiğini fark etti. Örneğin şelaleleri inceledi, alttaki suyun tepedeki sudan daha sıcak olduğunu belirledi ve şelalenin tepesiyle dibi arasındaki kütleçekim potansiyel enerjisi farkının ısıya dönüştüğü sonucuna vardı. Ayrıca bir su çarkının suyu çalkaladığında –Joule'un yaptığı çok ünlü bir deney– suyun sıcaklığını artırdığını gözlemledi ve 1881'de su çarkının kinetik enerjisinin ısıya dönüşmesine ilişkin fevkalade doğru sonuçlar elde etti.

Bu deneyde Joule bir su kabındaki birkaç kanatlı çarkı iple bir makaraya bağlayarak ipin ucundan bir ağırlık sarkıttı. Ağırlık alçaldıkça ip de çark milini çevirip su kabı içindeki kanatların dönmelelerini sağlıyordu. Daha teknik bir dille, bir ipe bağlı m kütesini h mesafesi kadar alçaltıyordu. Potansiyel enerjideki değişiklik mgh idi, düzenek bunu çarkın döngüsel (kinetik) enerjisine dönüştürüyor, o da suyu ısıtıyordu. İşte aygıtın bir resmi:



Deneyi o kadar dâhice kılan, Joule'un suya aktardığı enerjinin tam miktarını ölçebilmesiydi – bu miktar mgh 'ye eşitti. Ağırlık aşağıya yavaş yavaş iniyordu çünkü su çarkın hızlı dönmesini önlüyordu. O yüzden ağırlık yere ihmal edilebilir bir kinetik enerji miktarıyla çarpıyordu. Böylece eldeki bütün kütleçekim potansiyel enerjisi suya aktarılıyordu.

Bir jul ne kadardır? 1 kilogramlık nesneyi 0,1 metreden (10 santimetre) yere bırakırsanız, o nesnenin kinetik enerjisi mgh oranında artmış olur, o da yaklaşık 1 juldür. Size çok görünmeyebilir, fakat

juller oldukça hızlı birikir. Bir beyzbol topunu saatte 160 kilometrenin hemen altında bir hızla atmak için, Amerika Ulusal Beyzbol Ligi'ndeki bir atıcının yaklaşık 140 jüllük enerjiye ihtiyacı vardır, ki bu da yüz gramlık 140 elma dolu bir kovayı tam 1 metre kaldırmak için gereken enerji miktarıyla aynıdır.*

Yüz kırk jüllük bir kinetik enerji size çarparsa, çabuk açığa çıkması ve bir noktada yoğunlaşması şartıyla, sizi öldürmeye yetebilir. Bir-iki saate yayılırsa, farkına bile varmazsınız. Bütün o juller size çarpan bir yastıkta açığa çıkarsa sizi öldürmez. Fakat bir mermide, kayada ya da beyzbol topunda yoğunlaşmışsa ve saniyenin küçük bir kesrindeyse, o zaman işler değişir.

Bu da bizi tekrar yıkım güllerine götürür. Diyelim ki 1000 kilogramlık (1 tonluk) bir yıkım gülleniz var ve 5 metrelik bir dikey mesafeden aşağı bırakıyorsunuz. Yaklaşık 50.000 jüllük bir potansiyel enerjiyi ($mgh = 1000 \times 10 \times 5$) kinetik enerjiye dönüştürecektir. Bayağı sıkı bir vuruş, özellikle de çok kısa bir sürede açığa çıkarsa. Kinetik enerji denklemini kullanarak hızı da çözebiliriz. Salınımının dip noktasında gülle saniyede 10 metre hızla hareket edecektir (saatte yaklaşık 35 kilometre), bu da 1 tonluk gülle için epey yüksek bir hızdır. Bu tür enerjiyi iş başında görmek için, Manhattan'daki bir inşaat sahasına dalan bir minivana vuran yıkım güllesinin internetteki hayret verici görüntülerine bir göz atabilirsiniz: www.lionsden.com/wrecking-ball-vs-dodge-mini-van/.

Ne Kadar Gıda Enerjisine İhtiyacımız Var?

Yaşam süreçlerimizin en temelinde yer alan jul miktarını düşünerek, uygarlığımızı sürdüren enerji korunumunun müthiş hünelerinin önemini anlayıp takdir edebiliriz. Örneğin, insan vücudunun bir günde yaklaşık 10 milyon jüllük bir vücut ısısı üretmesini düşünün. Ateşiniz yoksa vücudunuz aşağı yukarı 37 santigrat derece sıcaklıktadır ve saniyede ortalama yaklaşık 100 jüllük bir hızla kızılötesi ısıtma biçiminde ısı yayar. Ne var ki bu, hava sıcaklığına ve insanın cüsesine bağlıdır. Kişi ne kadar iriye, saniyede o kadar çok enerji ya-

* Kolaylık olsun diye g için 10 metre/saniye kullandım; fizikte bunu çok yaparız.

yar. Bunu bir lambanın yaydığı enerjiyle kıyaslayabilirsiniz; 1 vat, saniyede 1 jullük sarfiyata denktir, o halde 100 jul/saniye, 100 vata eşittir. Bu da ortalama olarak insanların aşağı yukarı 100 vatlık bir ampul seviyesinde ısıma yaydıkları anlamına gelir. Kendinizi ampul kadar sıcak hissetmezsiniz çünkü ısınız çok daha geniş bir alana yayılır. Bir elektrikli battaniyenin sadece 50 vat ürettiğini düşünürseniz, kışın yatakta elektrikli battaniye yerine yanınızda bir insanın olmasının neden daha hoş olduğunu (eminim zaten biliyorsunuzdur ama) şimdi anlıyorsunuzdur.

Onlarca farklı enerji birimi vardır: klimalar için BTU; elektrik için kilovat-saat; atom fiziği için elektron volt; gökbilimciler için erg. Bir BTU yaklaşık 1,055 juldür; bir kilovat-saat $3,6 \times 10^6$ jule denktir; bir elektron volt $1,6 \times 10^{-19}$ juldür; bir erg 10^{-7} juldür. Hepimizin aşına olduğu çok önemli bir enerji birimi kaloridir. Bir kalori 4,2 jule yakındır. O halde, vücutlarımız her gün kabaca 10 milyon jul üretirken, 2 milyon kaloriden biraz daha fazla harcıyoruz demektir. Fakat bu nasıl olabilir? Günde yaklaşık 2000 kalori alıyor olmamız gerekmiyor muydu? Şimdi, yiyecek ambalajlarında *kalori* kelimesini okuduğunuzda, aslında etiketi hazırlayan kişinin demek istediği *kilokaloridir*, yani bin kalori – bu bazen de *kalori* kelimesi büyük *K* ile yazılarak gösterilir. Kolaylık olsun diye yapılıyor, çünkü tek bir kalori çok küçük bir birimdir: 1 gram suyun sıcaklığını 1 santigrat derece yükseltmek için gerekli enerji miktarı. O halde günde 10 milyon jul yaymak için, günde yaklaşık 2400 kilokalorilik (ya da Kalorilik) gıda yemeniz gerekir. Ondan çok fazlasını yerseniz, eh, er ya da geç bedelini ödersiniz. Pek çoğumuzun bildiği ama gözardı etmeye çalıştığı gibi, buradaki matematiğin pek acıması yoktur.

Peki ya bir gün içinde yaptığımız bütün o fiziksel hareketler ne olacak? Onun yakıtını karşılamak için de yememiz gerekmiyor mu? Merdivenleri in çık, evin içinde dolan dur, elektrikli süpürgeyi aç... Ev işleri çok yorucu olabiliyor, o halde çok enerji harcamamız gerekir, değil mi? Ne yazık ki burada size bir sürprizim var. Gerçekten büyük hayal kırıklığı. Bir gün içinde sizin ve benim yaptığımız türden hareketler o kadar utanılası derecede az enerjiye mal olur ki, gıda girişini dengelemek istiyorsanız bunu tamamen gözardı edebilirsiniz, tabii gerçekten çok sıkı bir egzersiz için spor salonuna gitmiyorsanız.

Diyelim ki çalışma odanıza gitmek için asansör yerine üç kat merdiven çıkıyorsunuz. Merdivenden çıkarak vicdanını rahatlatan bir sürü insan tanıyorum, ama bir hesaplayın. O üç kat 10 metrelik bir yüksekliğe karşılık gelsin, siz de her gün üç kere bu merdivenlerden çıkın. Sizi tanımadığıma göre, size 70 kilogramlık bir kütle biçelim. O merdivenleri günde üç defa çıkmak için ne kadarlık enerji gerekir? Hadi gelin gerçekten vicdan rahatlatacak bir iş yapalım – günde beş defaya ne dersiniz? Yolunuzun gerçekten pek sapa olduğunu varsayalım. Günde beş defa, üç kat yukarı. Üretmeniz gereken enerji mgh olup, h , ilk katla dördüncü kat arasındaki yükseklik farkıdır. 70 kilogramı (m) 10 metre/saniyekareyle (g), 10 metreyle (h) ve günde beş defa yaptığınız için 5'le çarpalım ve işte elde ettiğimiz rakam: 35.000 jul. Bunu vücudunuzun her gün yaydığı 10 milyon julle kıyaslayın. Şu kıytırık 35.000 jul için birazcık daha fazla yemeniz gerektiğini mi sanıyorsunuz? Boş versenize. Hiçbir şey değil ki: Toplamın sadece yüzde 1'inin üçte biri. Fakat bu, pazarlamacıların kalori yakan ekipmanlar hakkında saçma sapan iddialarda bulunmalarına engel olmuyor. Bu sabah üst sınıf cihazlara yönelik bir alışveriş kataloğunu açtım ve "normal gündelik hareketler sırasında fazla kalori yakma" imkânı sunan "giyilebilir ağırlıklar" reklamını gördüm. Kol ve bacaklarınızı daha ağır hissetmekten bir ihtimal zevk alabilirsiniz (nedenini bilemesem de), bunları giymek kas da yapacaktır, fakat bu tür bir cezayla kayda değer miktarda kilo vermeyi ummayın!

Şimdi, uyanık bir okur, elbette günde beş kere hiç aşağı inmeden merdiven çıkamayacağımızı fark edecektir. Aşağı indiğinizde o 35.000 jul açığa çıkacak; kaslarınızda, ayakkabılarınızda ve zeminde ısı formunda. Atlayacak olsaydınız, merdivenlerden çıkarak elde ettiğiniz kütleçekim potansiyel enerjisinin tamamı vücudunuzun kinetik enerjisine dönüşürdü – ve muhtemelen bir-iki kemiğinizi kırardınız. O halde, oraya ulaşmak için 35.000 jule ihtiyacınız varken, aşağı indiğinizde bunları kullanılabilir halde geri almıyorsunuz, tabii kinetik enerjinizi alıp, örneğin elektrik enerjisine dönüştürmek için çok zekice bir düzenek ayarı çekmezseniz – ki hibrid arabaların yaptığı tam da bu.

Başka bir şekilde bakalım. Sözelimi bu merdiven çıkışını günde on saate yayalım, belki sabah iki kere, öğleden sonra iki kere, bir

de son defa ikinci vakti. Bu on saat yani 36.000 saniye içinde yaklaşık 35.000 jul ürettiniz. Açıkçası bu gülünç bir rakam – yaklaşık 1 vat. Bunu vücudunuzla karşılaştırın, saniyede ortalama yaklaşık 100 jul, yani 100 vatlık ısı yapıyor. İşte gördüğünüz gibi merdiven çıkmakla yaktığınız enerji tamamen gözardı edilebilir. Bel genişliğinize hiçbir yararı olmayacaktır.

Fakat onun yerine diyelim ki 1500 kilometrelik bir dağa tırmanınız. Bunu yapmak için her zamanki enerji üretiminizin üstüne bir milyon jüllük enerji üretilip kullanmanız gerekir. 10 milyonla kıyaslayınca da bir milyon artık gözardı edilemez. O dağa tırmandıktan sonra haklı olarak acıkırsınız, artık gerçekten daha fazla yiyeceğe ihtiyacınız olur. Bu dağa dört saatte çıkarsanız, ürettiğiniz ortalama güç (güç, bir saniyedeki juldür) önemli büyüklüktedir elbette, o dört saat içinde ortalama 70 vat. Ve vücudunuz beyninize ısrarlı bir mesaj gönderir: "Daha çok yemem gerek."

Normal 10 milyon julünüzden yüzde 10 fazla enerji kullandığınızdan, her zamanki yediğinizden sadece yüzde 10 fazla (yani 240 Kalori fazla) yemeniz gerektiğini düşünebilirsiniz, çünkü bir milyonun, 10 milyonun yüzde 10'u olduğu apaçık ortada. Fakat bu pek doğru değil, ki muhtemelen sezgisel olarak da bunu biliyordunuz. Normalden epey bir fazla yemeniz gerekiyor, çünkü vücudun gıdadan enerjiye dönüştürme sistemi pek verimli değil – en azından fizik açısından. İnsanlardaki en iyi rakam ortalama yüzde 40'tır – yani kalori girişinin en fazla yüzde 40'ını kullanılabilir enerjiye dönüştürüyoruz. Kalanı ısı olarak kaybolur. Enerji korunduğundan bir yerlere gitmek zorundadır. Dağcılık alışkanlığınızı beslemek amacıyla fazladan bir milyon jüllük enerji üretmek için yaklaşık 600 ek Kalori almanız gerekir, bu da kabaca her gün fazladan bir öğüne karşılık gelir.

İhtiyacımız Olan Şeyi Nereden Alacağız?

Gündelik hayattaki aktiviteler için gerekli enerji miktarı beni hayrete düşürüyor. Diyelim ki banyo yapmak istedim ve suyu ısıtmak için ne kadar enerji gerektiğini hesaplamak istiyorum. Denklem çok basit: Kilokalori cinsinden gerekli enerji miktarı, suyun kilogram cin-

sinden kütlelerinin, santigrat cinsinden sıcaklık değişimiyle çarpımıdır. O halde, bir küvetin yaklaşık 100 kilogramlık su alacağını ve sıcaklık değişiminin de 50 santigrat derece civarı olduğunu varsayarsak, gereken enerji kabaca 5000 kilokalori yapar, yani sıcak bir banyo hazırlığı için 20 milyon jüllük enerji gerekir. Küvette banyo yapmak çok keyifli, ama epey bir miktar enerji gerektiriyor. Burada hayret verici olan, enerji ABD'de hâlâ o kadar ucuz ki, banyo yaklaşık 1,5 dolara mal oluyor. İki yüzyıl önce banyo suyu odun ateşiyle ısıtılırdı. Odun ateşi kilogram başına 15 milyon jul içerir, o halde bir aile tek bir banyo için bütün enerjiyi bir kilo odundan çıkarmak zorunda kalırdı. Modern odun sobaları yüzde 70 verimle yanabiliyorsa da, ağıttaki ateş ya da 200 yıl öncesinin sobaları odunu ısıya çok daha düşük bir verimle ve uzun zamanda dönüştürüyordu; o halde 100 kilogramlık bir banyo küvetini ısıtmak için muhtemelen 5-10 kilo odun gerekirdi. Atalarımızın bizden çok daha seyrek banyo yapmalarına ve tüm ailenin aynı banyo suyunu kullanmasına şaşmamak gerek.

Evdeki enerji kullanımına ilişkin bir fikir versin diye işte size bazı rakamlar. Portatif soba yaklaşık 1000 vat kullanır, yani bir saat içinde 3,6 milyon jul harcarsınız – ya da elektriği ölçerken kullanılan yaygın ifadeyle 1 kilovat-saat. Soğuk iklimdeki bir elektrik ocağı kabaca 2500 vat yakar. Pencere tipi klima genelde 1500 vat harcar, merkezi havalandırmaysa yaklaşık 5 ila 20 kilovat. 180 santigrat derecede elektrikli fırın 2 kilovat harcarken, bulaşık makinesi yaklaşık 3,5 kilovat harcar. İşte size ilginç bir karşılaştırma. 17 inçlik (katot ışını tüplü) monitörü olan bir masaüstü bilgisayar 150 ila 350 vat harcarken, beklemeye alınmış bilgisayar ve monitör sadece 20 vat ya da daha az harcar. Skalanın diğer ucundaysa, çalar saatli bir radyo sadece 4 vat harcar. 9 voltluk alkalın bir pil toplamda yaklaşık 18.000 jul ya da 5 vat-saat depoladığından, bir pil çalar saatli radyonuzu bir saatten biraz fazla besleyecektir.

Dünyada yaşayan 6,5 milyardan fazla insan var ve her yıl yaklaşık 5×10^{20} jüllük enerji kullanıyoruz. OPEC'in petrol ambargosundan kırk yıl sonra, bu enerjinin yüzde 85'i hâlâ fosil yakıtlardan geliyor: kömür, petrol ve doğalgaz. 300 milyondan biraz fazla nüfusla dünya nüfusunun yirmide birini teşkil eden ABD, dünya enerji kullanımının beşte birinden sorumlu. Lamı cimi yok: Biz enerji

yağmacısıyız, büyük enerji yağmacıları. Başkan Obama'nın kendisine enerji bakanı olarak Nobel Ödüllü bir fizikçi olan Steven Chu'yu atamasına işte bu yüzden çok sevindim. Enerji sorunlarımızı çözeceksek, enerjinin fiziğine dikkat etmemiz gerekecek.

Örneğin güneş enerjisine potansiyel olarak çok bel bağlanıyor, ben de sıkı bir şekilde geliştirilmesinden yanayım. Fakat karşımızdaki sınırlamaların farkında olmamız şart. Güneşin harika bir enerji kaynağı olduğu su götürmez. 4×10^{26} vatlık -4×10^{26} jul-saniye- güç üretiyor, çoğu görünür ışık olarak ve tayfın kızılötesi kısmında. Dünyayla güneş arasındaki mesafeyi bildiğimizden (150 milyon kilometre), bu gücün ne kadarının dünyaya ulaştığını hesaplayabiliriz. Yaklaşık $1,7 \times 10^{17}$ vat, yani yılda yaklaşık 5×10^{24} jul. Bir metrekairelik bir paneli doğrudan güneşe tutarsanız (bulut olmayacak!), bu panel kabaca 1200 vat alır (burada, gelen gücün yüzde 15'inin yansıyıp dünyanın atmosferi tarafından soğurulduğunu varsayıyorum). Bulut yokken *doğrudan güneşe yöneltilmiş* her metrekairede 1000 vat (1 kilovat) matematik işlemleri için kolay bir rakam.

Güneş enerjisinin potansiyeli muazzam görünebilir. Dünyanın enerji ihtiyacını karşılayacak güneş enerjisini elde etmek için 2×10^{10} metrekaire alan gerekirdi. Bu da yaklaşık benim memleketim Hollanda'nın yüzölçümünün –hiç de büyük bir ülke değil– beş katıdır.

Ama işin içinde bir bityeniği var. Gündüzle geceyi daha hesaba katmadık. Güneşin hep olacağını varsaydık. Bulutlar da var. Ayrıca güneş panelleriniz hareketli değilse, sürekli güneşe doğrultulmuş olarak kalamazlar. Dünyada nerede olduğunuz da önemli. Ekvator-daki ülkeler daha kuzeydeki ülkelere (Kuzey Yarımküre'deki) ya da daha güneydeki ülkelere (Güney Yarımküre'deki) daha çok enerji alırlar (zaten daha sıcaklar).

Sonra, güneşi yakaladığınız tertibatın verimini de hesaba katmamız gerek. Pek çok farklı teknoloji var, daha da artıyor, fakat pratik silikon güneş pillerinin azami verimi yaklaşık yüzde 18'dir (pahalı malzemelerle yapılanlardan farklı olarak). Güneş enerjisini doğrudan su ısıtmak için (önce elektrik enerjisine dönüştürmeden) kullanıyorsanız, verim çok daha yüksektir. Öte yandan petrol yakıtlı bir kalorifer kazanı –pek yeni olmayanı bile– kolaylıkla yüzde 75 ila 80 verimliliğe ulaşabilir. O halde bütün bu kısıtlayıcı faktörleri hesaba katarsak, şöyle bir trilyon metrekaire gibi bir alana ihtiyacınız olur-

du, yani bir milyon kilometrekare – Almanya'nın yaklaşık üç katı bir alan. Hem bütün o güneş enerjisini toplayıp elektriğe dönüştürecek donanımın yapım maliyetini daha düşünmedik bile. Şu an güneşten elektrik elde etmek, fosil yakıtlardan elektrik elde etmekten yaklaşık iki kat daha fazlaya mal oluyor. Mesele güneş enerjisine geçmenin sadece fahiş bir bedele mal olması değil, böyle bir proje bizim mevcut teknolojik yeteneklerimizi ya da siyasi iradeyi düpedüz aşıyor. İşte bu yüzden güneş enerjisi bir süre dünya ekonomisinde gittikçe büyüyen, ama görece küçük bir rol oynayacaktır.

Öte yandan, şimdi başlarsak, önümüzdeki kırk yıl içinde devasa adımlar atabiliriz. Greenpeace ve Uluslararası Enerji Ajansı 2009'da, hükümetlerin çok yüklü mali destekleriyle güneş enerjisiyle elde edilen elektriğin "dünya enerji ihtiyacının 2030'da yüzde 7'sini ve 2050'de tam çeyreğini" karşılayabileceğini öngörüyordu. *Scientific American* dergisi birkaç yıl önce, önümüzdeki kırk yıl içinde hızlandırılmış bir program ve 400 milyar dolar mali desteğin, ABD'nin elektriğinin yüzde 69'unu ve toplam enerji ihtiyacının yüzde 35'ini güneş enerjisiyle karşılamasını sağlayacağını ileri sürüyordu.

Ya rüzgâr enerjisi? Ne de olsa rüzgâr enerjisi insanlar rüzgârlara yelken açtığından beri kullanılıyor. Yel değirmenleri elektrik enerjisinden çok daha uzun süredir var, hatta belki elektrikten bin yıl öncesinden beri. Doğadan enerji elde edip insanın kullanımı için başka bir tür enerjiye dönüştürme ilkesi hep tamamen aynıydı, ister on üçüncü yüzyıl Çin'inde olsun, ister daha da eski İran'da ya da on ikinci yüzyıl Avrupa'sında. Bütün bu yerlerde, insanların üstlendikleri en zor işlerin yapılmasına yel değirmenleri yardımcı olmuştur: içme ya da sulama için su çıkarmaya veya un yapmak için büyük taşlar arasında tahıl öğütmeye. Yel değirmenini rüzgâr enerjisi çalıştırır, ister elektrik üretsın ister üretmesin.

Elektrik enerjisi üreticisi olarak rüzgâr enerjisi kolaylıkla ulaşılır, bitmez tükenmez ve hiç sera gazı salımına neden olmayan bir kaynaktır. 2009'da tüm dünyadaki rüzgâr enerjisi üretimi 340 teravat-saattir (bir teravat-saat bir trilyon vat-saattir), bu da dünyadaki elektrik tüketiminin yaklaşık yüzde 2'sidir. Rüzgâr enerjisi çok çabuk da gelişiyor; hatta son üç yılda elektrik üretimi ikiye katlandı.

Peki nükleer enerji? Nükleer enerji farkında olduğumuzdan çok daha yaygın. Hatta her gün adım attığımız her yerde. Pencere camı

radioaktif potasyum-40 içerir, yarı ömrü 1,2 milyar yıldır ve bozunmasıyla oluşan enerji dünyanın çekirdeğinin (*core*) ısınmasına yardımcı olur. Atmosferdeki bütün helyum, dünya içindeki doğal olarak oluşan izotopların radioaktif bozunumuyla meydana gelir. Alfa bozunumu dediğimiz şey aslında, daha büyük kararsız bir çekirdekten (*nucleus*) gelen helyum çekirdeğinin yayılımıdır.

Benim çok özel ve çok geniş bir Amerikan sofa takımı koleksiyonum var (tabaklar, kseler, fincanlar ve fincan tabakları), tasarımı ve imalatı 1930'larda başlamış. Bu tabaklardan birkaçını sınıfa getirip öğrencilere göstermeyi çok severim. Özellikle portakal rengi olanların ("Fiesta kırmızısı" deniyor) ilerinde uranyum oksit bulunuyor, çünkü seramik cilasında yaygın bir malzeme. Bir tabağı Geiger sayacına tutuyorum ve aygıt hızlı hızlı ötmeye başlıyor. Tabaklardaki uranyum radioaktif ve gama ışınları yayıyor, nükleer reaktörleri çalıştıran sürecin aynısı. Bu gösteriden sonra hep öğrencilerimi eve akşam yemeğine davet ediyorum, ama garip bir şekilde daveti kimse kabul etmiyor.

Fisyon, yani ağır çekirdeklerin bölünmesi büyük miktarda enerji reter. Bu, uranyum-235 çekirdeklerini bölen zincirleme tepkimelerin kontrol altında tutulduğu bir nükleer reaktörde ya da zincirleme tepkimelerin kontrol altına alınmadığı ve muazzam yıkıma sebep olan bir atom bombasında olabilir. Saniyede yaklaşık bir milyar jul (10^9 vat ya da 1000 megavat) reten bir nükleer enerji santrali, yılda yaklaşık 10^{27} uranyum-235 çekirdeği tketer, bu da sadece yaklaşık 400 kilogram uranyum-235'e karşılık gelir.

Ne var ki doğal uranyumun sadece yüzde 0,7'si uranyum-235 içerir (yüzde 99,3' uranyum-238'dir). Bu yüzden, nükleer elektrik santralleri *zenginleştirilmiş* uranyum kullanırlar; zenginleştirme derecesi değişir, fakat genel rakam yüzde 5'tir. Yani yüzde 0,7 uranyum-235 yerine, uranyum yakıt çubukları yüzde 5 uranyum-235 içerir. Böylece 1000 megavatlık bir nükleer reaktör yılda yaklaşık 8000 kilogramlık uranyum tüketecektir, bunun 400 kilogramı uranyum-235'tir. Karşılaştıracak olursak, 1000 megavatlık bir fosil yakıt elektrik santrali yılda 5 milyar kilogram kömür tüketecektir.

Uranyumun zenginleştirilmesi maliyetli bir şey; binlerce santrifüjle yapılıyor. Silah sınıfı uranyum en az yüzde 85 uranyum-235'e kadar zenginleştirilir. Uranyumu, teyit edilemeyen, belirtilmemiş

bir dereceye kadar zenginleştiren ülkeler hakkında dünyanın neden çok endişelendiğini belki şimdi anlayabilirsiniz!

Nükleer elektrik santrallerinde kontrollü zincirleme tepkimele-
rin yarattığı ısı, suyu buhara dönüştürür, o da bir buhar türbinini ça-
lıştırarak elektrik üretir. Bir nükleer elektrik santralının nükleer ener-
jiyi elektrik enerjisine dönüştürme verimi yaklaşık yüzde 35'tir. Bir
nükleer elektrik santralının 1000 megavat ürettiğini okursanız, top-
lam gücü mü 1000 megavattır (bunun 1/3'ü elektrik enerjisine dö-
nüştürülür ve 2/3'ü ısı olarak kaybolur), yoksa tüm elektrik gücü mü
(ki bu durumda santralin toplam gücü 3000 megavat olur), bilmezsi-
niz. Arada büyük bir fark vardır! Dün bir haberde İran'ın kısa bir sü-
re sonra 1000 megavatlık elektrik üretecek bir nükleer elektrik sant-
ralini hizmete açacağını okudum (işte net bir ifade!).

Son birkaç yıl içinde küresel ısınma konusundaki endişeler fev-
kalade artarken, nükleer enerji seçeneği tekrar rağbet görüyor – fo-
sil yakıt yakan elektrik santrallerinin aksine nükleer santraller sera
gazlarını çok yaymıyor. ABD'de tükettiğimiz enerjinin yaklaşık yüz-
de 20'sini üreten yüzden fazla nükleer elektrik santrali var zaten.
Fransa'da bu rakam yaklaşık yüzde 75. Tüm dünyada toplam tüketi-
len elektrik enerjisinin yüzde 15'i nükleer elektrik santrallerinde
üretiliyor. Nükleer güçle ilgili farklı ülkelerin farklı politikaları var,
fakat daha fazla santral kurmak, Three Mile Adası, Çernobil ve Ja-
ponya'daki dillere düşmüş kazaların sebep olduğu korkudan dolayı
epey bir siyasi ikna çabası gerektiriyor. Santraller de *çok* pahalı:
ABD'de her bir santral için tahminler 5 ila 10 milyar, Çin'de ise 2
milyar dolar civarında seyrediyor. Son olarak, nükleer santrallerden
çıkan nükleer atığı depolamak çok büyük bir teknolojik ve siyasi
sorun olmaya devam ediyor.

Dünyada hâlâ muazzam miktarda fosil yakıtımız var, fakat çok
tüketiyoruz, doğanın üretebileceğinden çok daha hızlı. Dünya nüfu-
su artmaya devam ediyor; bir yandan da Çin ve Hindistan gibi en
fazla büyümenin yaşandığı ülkelerde aşırı enerji gerektiren bir ge-
lişme son derece hızlı bir tempoda sürüyor.

Yani gerçekten bundan kaçış yok. Çok ciddi bir enerji krizimiz
var. Bu konuda ne yapmamız gerekir?

Öncelikle her gün ne kadar enerji kullandığımızın daha çok far-
kına varıp daha az kullanmamız önemli. Benim kendi enerji tüketi-

mimin pek mütevazı olduğunu sanıyorum, ama ABD'de yaşadığımdan, dünyadaki ortalama bir kişiden dört ya da beş kat daha fazla enerji tükettiğime de eminim. Elektrik kullanıyorum; evimi ve suyu gazla ısıtıyorum ve yemeği gazla pişiriyorum. Araba kullanıyorum – çok değil ama yine de benzin kullanıyorum. Bütün bunları topladığımda, 2009 yılında günde ortalama 100 milyon jul (30 kilovat-saat) kadar enerji tükettim sanırım, bunun da yaklaşık yarısı elektrik enerjisiydi. Bu, yaklaşık iki yüz köleyi günde 24 saat köpekler gibi çalıştırmanın enerji dengidir. Bir düşünün. Kadim zamanlarda sadece en zengin kraliyet mensupları böyle yaşıyordu. Ne kadar lüks ve inanılmaz zamanlarda yaşıyoruz. Her allahın günü iki yüz köle benim için çalışıyor, günde yirmi dört saat hiç durmadan, bütün bunlar benim şimdiki gibi yaşayabilmem için. 1 kilovat-saat elektrik için (3,6 milyon jul) topu topu 25 sent ödüyorum. Dolayısıyla o iki yüz köle için tüm enerji faturam (gazı ve benzini de içine aldım, onların da birim fiyatı çok farklı değil) ortalama ayda 225 dolar; o da köle başına ayda yaklaşık 1 dolar yapar! O halde bir bilinç değişimi hayatı önem taşıyor. Ama bu işin sadece bir kısmı.

Enerji açısından daha tasarruflu cihazlar kullanmak için alışkanlıkları değiştirmek –örneğin akkor flamanlı lambalar yerine kompakt floresan lamba (CFL) kullanmak– çok şey fark ettirir. Nitekim yapabileceğim değişikliği oldukça etkileyici bir şekilde gördüm. Cambridge'deki evimdeki elektrik tüketimim 2005'te 8860 kilovat-saattir ve 2006'da 8317 kilovat-saat. Bu, aydınlanma, klima, çamaşır makinem ve de kurutucum içindi (sıcak su, yemek pişirme ve ısınma için gaz kullanıyorum). Aralık 2006'nın ortalarında oğlum Chuck (New Generation Energy'nin kurucusudur) bana harika bir hediye verdi: Evimdeki bütün akkor lambaları (toplam yetmiş beş adet) floresan lambalarla değiştirdi. Elektrik tüketimim 2007'de ciddi şekilde 5251 kilovat-saate, 2008'de 5184 kilovat-saate, 2009'da da 5226 kilovat-saate düştü. Elektrik tüketimimdeki bu *yüzde 40'lık düşüş* yıllık faturamı yaklaşık 850 dolar azalttı. Sırf aydınlatma, ABD'deki ev elektriği enerjisi kullanımının yaklaşık yüzde 12'sine, işletmelerdekinin de yüzde 25'ine karşılık geldiği için, yapılması gereken apaçık budur!

Benzer bir yol izleyerek, Avustralya hükümeti 2007'de ülkedeki bütün akkor lambaları floresan lambalarla değiştirmeyi planlamaya

başladı. Bu sadece Avustralya'nın sera gazı salımını önemli ölçüde azaltmayacak, aynı zamanda her evdeki enerji faturalarını (bende olduğu gibi) azaltacak. Ama daha fazlasını yapmamız gerekiyor.

Bir yandan mevcut hayat kalitemizi koruyarak hayatta kalabilmemizin tek yolunun, nükleer füzyonu güvenilir ve ciddi bir enerji kaynağı olarak geliştirmek olduğunu sanıyorum. Fisyon değil – fisyonunda uranyum ve plütonyum çekirdekleri parçalanarak enerji yayar. Füzyondaysa hidrojen atomları birleşerek helyumu oluşturur ve enerji açığa çıkarır. Füzyon yıldızlara –ve termonükleer bombalara– enerji veren süreçtir. Bildiğimiz kadarıyla füzyon, kütle birim başına en güçlü enerji üreten süreçtir – tabii maddeyle karşı-maddenin çarpışması hariç (ama bunun enerji üretimi potansiyeli bulunmaz).

Oldukça karmaşık sebeplerden sadece belli hidrojen türleri (döteryum ve trityum) füzyon reaktörlerine uygundur. Döteryuma (çekirdeğinde bir nötron ve bir proton vardır) kolaylıkla ulaşılır; dünyada yaklaşık her altı bin hidrojenden biri döteryumdur. Okyanuslarımızda yaklaşık bir milyar kilometreküp su bulunduğundan, döteryum temini neredeyse sınırsız sayılır. Trityum dünyada doğal olarak meydana gelmez (yaklaşık on iki yıllık bir yarı ömrü olup radyoaktiftir), fakat nükleer reaktörlerde kolay üretilir.

Gerçek sorun, işlevsel, pratik ve kontrol altında bir füzyon reaktörünün nasıl yapılacağıdır. Bunu başarıp başaramayacağımız hiç belli değil. Hidrojen çekirdeklerinin birleşmesi için, burada dünyada 100 milyon derece seviyesinde sıcaklıklar temin etmemiz gerekir, bu da yıldızların merkezindeki sıcaklığa yakındır.

Biliminsanları füzyon üzerinde pek çok yıldır çalışıyorlar – gitgide daha çok hükümet enerji krizinin gerçek olduğuna ikna olmuş göründükçe daha da sıkı çalışıyorlar galiba. Bunun büyük bir sorun olduğu kesin. Ama ben iyimser biriyim. Ne de olsa meslek hayatım boyunca kendi alanımda, evren hakkındaki fikirlerimizi tepetaklak eden, kesinlikle akıllara durgunluk verici değişikliklere şahit oldum. Örneğin, eskiden çoğunlukla faraziye, birazcık da bilimden ibaret olan kozmoloji, şimdi hakiki bir deneysel bilim oldu ve artık evrenimizin kökenleri hakkında muazzam bilgilere sahibiz. Aslında şu anda, çoğu insanın kozmolojinin altın çağı dediği çağda yaşıyoruz.

X ışını gökbiliminde araştırma yapmaya başladığımda, derin uzayda yaklaşık bir düzine X ışını kaynağı biliyorduk. Şimdiyse on

binlercesini biliyoruz. Mevcut işlemci gücüyle iki kiloluk dizüstü bilgisayarınız, elli yıl önce çalışma odamın bulunduğu MIT binasının büyük kısmını kaplardı. Elli yıl önce gökbilimciler yerde çalışan optik ve radyo teleskoplarına bağlıydılar – o kadar! Şimdi, sadece Hubble Uzay Teleskobu değil, bir dizi X ışını uydu gözlemevi, gama ışını gözlemevi var, ayrıca nötrino gözlemevlerini kullanıyor ve yenilerini kuruyoruz! Elli yıl önce büyük patlamanın olabilirliği kesin karara bağlanmış bir mesele değildi. Şimdiyse, büyük patlamadan sonraki saniyenin ilk milyonda birinde evrenin nasıl bir şey olduğunu (kanımızca) bilmekle kalmıyoruz, 13 *milyar* yaşındaki gökbilim nesnelerini, yani evrenimizi yaratan patlamadan sonraki ilk 500 milyon yılda oluşan nesneleri kendimize güvenerek inceliyoruz. Bu müthiş keşifler ve dönüşümler arka planda dururken biliminsanlarının kontrollü füzyon sorununu çözeceklerini nasıl düşünmem? Zorlukları ya da işin aciliyetini küçümsemek istemem, ama gerçekten bunun bir zaman meselesi olduğuna inanıyorum.



Massachusetts'teki deCordova Müzesi'nde Walter Lewin'in gölgesini sarmalayan camkuşağı. 13 Eylül 2004'te Günün Gökbilim Resmi. *Walter Lewin'in izniyle.*



Rusya'daki Kafkas Dağları'nda bulunan BTA teleskobunun çevresinde yükselen sis. *Walter Lewin'in izniyle.*



Sis yaklaşırken (zamanlaması mükemmeldi)
güneş hâlâ tepedeydi ve işte sonuç: "Aziz Walter".
Walter Lewin'in izniyle.



Colorado'daki Pike's Peak yakınlarında fotoğraflanmış beyaz gökkuşağı.
İçteki koyu renkli fazlardan şeride dikkat edin. *Wojtek Rychlik'in izniyle.*



New Mexico'daki Very Large Array radyo gökbilim gözlemevinin üzerindeki çift gökkuşağının fotoğrafı. Kırmızının birinci gökkuşağının dışında ama ikincinin içinde olduğuna dikkat edin. Ayrıca gökyüzü birinci kuşağın içinde dışına kıyasla çok daha parlak. Öte yandan ikinci kuşağın dışındaki gökyüzü içindeki gökyüzünden daha parlak. İki kuşağın arasındaki koyu renkli bölgeye Alexander'ın karanlık bandı deniyor. *Tufts Üniversitesi'nden Kenneth R. Lang ve Washington'daki Battelle Gözlemevi'nden Douglas Johnson'ın izniyle.*



Yeşil ve mor renkli fazladan kuşakları olan bir gökkuşağı. *Andrew Dunn'ın izniyle.*



Walter Lewin'in kızı Emma soğuk bir kış günü gökkuşağı yaratma işinde babasına cesurca yardımcı oluyor. *Walter Lewin'in izniyle.*



Bir uçağın gölgesini sarmalayan bir glorinin Walter Lewin tarafından çekilmiş fotoğrafı. Walter Lewin'in yeri (kanadın hemen arkasında) glorinin merkezinde bulunuyor.



Yaklaşık 1.150.000 metreküp hacimli bir balonun
Alice Springs, Avustralya'dan kalkışı.
Walter Lewin'in izniyle.



Yaklaşık 1.150.000 metreküp hacimli bir balonun
yaklaşık 44.000 metre yüksekten çekilmiş
fotoğrafı (teleskoptan görüldüğü haliyle).
Walter Lewin'in izniyle.



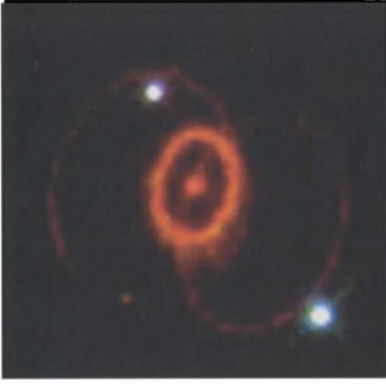
Münih'te yapılan 1972 Yaz Olimpiyatları'nın kapanış törenindeki
Gökkuşáğı balonu. Bu balonun yapımında Walter Lewin Otto Piene ile
birlikte çalıştı (bkz. 15. Bölüm). *Wolf Huber'in izniyle.*



Yaklaşık 950.000 metreküp hacimli bir balon 15 Ekim 1970'te Mildura'da (Avustralya) güneşin doğmasından hemen sonra şişirilirken çekilmiş bir fotoğraf. Bu uçuş sırasında Lewin'in grubu GX 1+4'ü ve 2,3 dakikalık periyodunu keşfetti. *Walter Lewin'in izniyle.*



Yaklaşık on bir ışık yılı genişliğindeki çapıyla Yengeç Bulutsusu. Mavi ışık bulutsudaki manyetik alanın etrafında dönen elektronlar tarafından yayılıyor. Fotoğraftaki filamanımsı şeyler 1054 yılında patlayan yıldızın atmosferinin kalıntıları. Bulutsu dünyadan bakıldığında aydan altı kat küçük görünüyor. *NASA ve Hubble Heritage Team'in izniyle.* Fotoğrafta emeği geçenler: NASA, ESA, JPL, Arizona Devlet Üniversitesi.



Süpernova 1987 A. Üç halka, patlamadan binlerce yıl önce yıldızdan atılan maddelerden oluşuyor. İçteki parlak halkaya ilişkin detaylar metinde mevcut (bkz. 12. Bölüm). Patlayan yıldızdan gelen ışık halkasının ortasında görülebilir. İki beyaz yıldızın SN 1987 A ile bir ilişkisi yok. *Dr. Christopher Burrows, ESA/STSci ve NASA'nın izniyle.*



Cygnus X-1 ikili yıldız sistemine dair bir illüstrasyon. Solda HDE 226868 ismi verilen ve bizim güneşimizin yaklaşık otuz misli kütleye sahip olduğu tahmin edilen donör yıldız bulunuyor. Büyümekte olan kara delik ise sağda – donör yıldızdan gelen gazlarla oluşan toplanma diskiyle sarmalanmış. Kara deliğin kütlesi güneşin kütlesinin yaklaşık on beş misli. *ESA ve Hubble'ın izniyle.*

Dış Uzaydan Gelen X ışınları!

Gökyüzü, etrafımızdaki dünyayı anlamaya çalışan biz insanlara gece gündüz daima meydan okumuştur, fizikçilerin gökbilimden daima büyülenmesinin bir sebebi de budur. "Güneş nedir?" diye merak ederiz. "Neden hareket eder?" Peki ya ay, gezegenler ve yıldızlar? Atalarımızın gezegenlerin yıldızlardan farklı olduğunu; gezegenlerin güneşin yörüngesinde döndüğünü; bu yörüngelerin gözlemlenebileceğini, haritasının çıkarılabileceğini, açıklanabileceğini ve önceden tahmin edilebileceğini kestirmek için neler çektiklerini bir düşünün. On altıncı ve on yedinci yüzyılda bilimdeki en büyük beyinlerin pek çoğu –aralarında Nikola Kopernik, Galileo Galilei, Tycho Brahe, Johannes Kepler, Isaac Newton da var– bu gece gizemlerini çözmek için bakışlarını göklere çevirdiler. Galileo'nun, teleskobunu bir ışık zerresinden hallice olan Jüpiter'e çevirip de yörüngesindeki dört ayı keşfettiğindeki heyecanı bir hayal edin! Öte yandan, her gece çıkıp gelen yıldızlar hakkında çok az şey bilmeleleri de ne kadar sinir bozucuydu kim bilir. Dikkate değer bir nokta da, gerek eski Yunanlı Demokritos'un, gerekse on altıncı yüzyıl gökbilimcisi Giordano Bruno'nun, yıldızların güneşimiz gibi olduğunu ileri sürmüş olmasıdır – fakat onların haklı olduğunu kanıtlayacak delil yoktu. Yıldızlar ne olabilirdi? Onları gökte ne tutuyordu? Ne kadar uzaktaydılar? Neden bazıları diğerlerinden daha parlaktı? Neden farklı renkleri vardı? Ve havanın açık olduğu bir gece bir ufuktan ötekine uzanan o geniş ışık bandı neydi?

O günlerden bugüne gökbilim ile gökfiziğinin öyküsü, bu soruları (ve bazı cevaplar bulunmaya başladıkça boy gösteren ek soruları) cevaplama çabasının öyküsü olmuştur. Yaklaşık son dört yüzyıl

boyunca gökbilimcilerin görmeyi başardığı şeyler, tabii ki teleskoplarının gücü ve hassasiyetine bağlıydı. Büyük istisna Tycho Brahe' ydi. Brahe çok basit aygıtlarla çıplak gözle çok ayrıntılı gözlemler yaptı, ki bu da Kepler'in, Kepler Yasaları diye bilinen üç büyük keşfe ulaşmasını sağladı.

Bu dönemin büyük bölümünde elimizde sadece optik teleskoplar vardı. Biliyorum, gökbilimci olmayanlara bu tuhaf geliyordur. "Teleskop" kelimesini duyunca otomatik olarak aklınıza "içine baktığınız mercekli ve aynalı boru" geliyordur, değil mi? Teleskop nasıl optik olmaz? Başkan Obama 2009'da bir gökbilim gecesi düzenlediğinde Beyaz Saray'ın çimleri üzerine kurulmuş bir sürü teleskop vardı ve her biri optik teleskoptu.

Fakat Karl Jansky'nin Samanyolu'ndan gelen radyo dalgalarını keşfettiği 1930'lardan bu yana, gökbilimciler evreni gözlemledikleri elektromanyetik ışıma tayfını genişletmenin yollarını arıyorlar. İşte peşine düştükleri (ve keşfettikleri) şeyler: mikrodalga ışıma (yüksek frekanslı radyo dalgaları), kızılötesi ve morötesi ışıma (görünür ışığın hemen alt ve hemen üstündeki frekanslar), X ışınları ve gama ışınları. Bu ışımayı tespit etmek için, evreni daha derin ve daha etraflıca incelememizi sağlayan, özel olarak tasarlanmış bir sürü teleskop geliştirdik – bir kısmı X ışını ve gama ışını uyduları. Hatta yeraltında *nötrino* teleskopları bile var, şu an Güney Kutbu'nda kurulmakta olan, işine yakışan adıyla IceCube (Buzküpu) de dahil.

Son kırk beş yıldır –hayatımın gökfiziğine vakfedilmiş kısmı– X ışını gökbiliminde çalışıyorum: Yeni X ışını kaynakları keşfediyor ve gözlemlediğimiz pek çok farklı fenomene açıklama geliştiriyoruz. Daha önce de yazdığım gibi, meslek hayatımın başlangıcı bu alanın heyecanlı, baş döndürücü ilk yıllarına rastlamıştı, sonraki yirmi yıl boyunca da işin tam göbeğindeydim. X ışını gökbilimi hayatımı değiştirdi, ama daha önemlisi, gökbilimin çehresini değiştirdi. Bu ve bunu takip eden dört bölüm sizi bir X ışını evreni gezisine çıkaracak, bütün bilim kariyerinde o evrende çalışmış ve yaşamış birinin bakış açısıyla. X ışınlarının kendisiyle başlayalım.

X Işınları Nedir?

X ışınlarının kulağa egzotik gelen bir adı var; bu isim, "bilinmeyen" olduklarından (bir denklemdeki x gibi) verilmişti, fakat aslında, elektromanyetik tayfın morötesi ve gama ışınları arasındaki görmediğimiz kısmını oluşturan fotonlardan ibarettir – elektromanyetik ışıma. Felemenkçe ve Almancada bunlara X ışını denmez; onun yerine, bu ışınları 1895'te keşfetmiş Alman fizikçi Wilhelm Röntgen'in adı verilmiştir. Bunları, söz konusu tayfın öteki sakinlerini tanımladığımız gibi, üç farklı fakat birbirine bağlı biçimde ayırt ederiz: frekansla (saniyedeki devir sayısı, hertzle gösterilir), dalga boyuyla (tek bir dalganın uzunluğu, metre cinsinden, bu örnekte nanometre) ya da enerjiyle (elektron volt cinsinden, eV veya binlerce elektron volt cinsinden, keV).

İşte çabucak karşılaştırılacak bazı noktalar. Yeşil ışık bir metrenin yaklaşık 500 milyarda biri ya da 500 nanometre kadarlık bir dalga boyuna ve yaklaşık 2,5 elektron voltluk bir enerjiye sahiptir. En düşük enerjili X ışını fotonu yaklaşık 100 eV'dir, yani bir yeşil ışık fotonunun enerjisinin kırk katı; dalga boyu da yaklaşık 12 nanometredir. En yüksek enerjili X ışınları yaklaşık 100 keV'dir, dalga boyu yaklaşık 0,012 nanometredir. (Dişçiniz röntgen çekerken yaklaşık 50 keV'ye kadar X ışını kullanır.) Elektromanyetik tayfın öteki ucunda, ABD'de radyo istasyonları AM bandında 520 kilohertz (dalga boyu 577 metre – bir kilometrenin yarısından biraz fazla) ile 1710 kilohertz (dalga boyu 175 metre – bir futbol sahasının iki katına yakın) arasında yayın yapar. Enerjileri yeşil ışıktan bir milyar kat, X ışınlarından da bir trilyon kat azdır.

Doğa X ışınlarını birtakım farklı yollarla yaratır. Çoğu radyoaktif atom nükleer bozunma sırasında doğal olarak bu ışınları yayar. Burada olan şudur: Elektronlar yüksek enerji durumundan düşük enerji durumuna sıçrar; enerjideki fark bir X ışını fotonu olarak yayılabilir. Elektronların enerji seviyeleri paketçikler halinde (kuantumlanmış ya da nicemlenmiş) olduğundan bu fotonların çok ayrık enerjileri vardır. Ya da elektronlar atom çekirdeklerinin yanından yüksek hızla geçerlerken yön değiştirirler ve enerjilerinin bir kısmını X ışını olarak yayarlar. Gökbilimde, tüm tıpta ya da diş hekimli-

ğindeki X ışını (röntgen) cihazında çok yaygın olan bu tür X ışını yayımına, çok zor bir Almanca adla *bremsstrahlung* diyoruz, kelime anlamı da "frenleme ışıması". Şu adreste *bremsstrahlung* X ışını oluşturulmasına ilişkin bazı yararlı animasyonlar bulabilirsiniz: www.youtube.com/watch?v=3fe6rHnhkuY. Ayrık enerjili X ışınları tıpta kullanılan bazı X ışını cihazlarında da üretilebilir, fakat genel olarak (kesintisiz X ışını tayfı üreten) *bremsstrahlung* egemendir. Yüksek enerjili elektronlar manyetik alan çizgileri etrafında spiral çizerek dolanırken hızlarının yönü sürekli değişir ve bu yüzden de enerjilerinin bir kısmını X ışınları olarak yayarlar; buna senkrotron ışıması diyoruz, ama manyetik *bremsstrahlung* da denir. (Yen-geç bulutsusunda olan da budur – aşağıda.)

Doğa bir de yoğun maddeyi çok ama çok yüksek sıcaklıklara, milyonlarca kelvin dereceye kadar ısıttığında X ışınları yaratır. Buna kara cisim ışıması diyoruz (bkz. 14. Bölüm). Madde bu kadar sıcaklığa ancak epey uç şartlarda ulaşır, bazı muazzam büyüklükteki yıldızların görkemli ölüm patlamaları olan süpernova patlamalarında ya da gaz çok yüksek hızlarda bir kara delik ya da nötron yıldızına düştüğünde (13. Bölüm'de devamı gelecek, söz!). Örneğin güneş, yüzeyinde yaklaşık 6000 kelvin derece sıcaklıkla, enerjisinin yarıdan biraz azını (yüzde 46'sını) görünür ışık olarak yayar. Geriye kalanın çoğu kızılötesi (yüzde 49) ve morötesi ışımadır (yüzde 5). X ışını yayacak kadarki sıcaklığın yanından bile geçmez. Fiziği tam anlaşılmamış olsa da, güneş bir miktar X ışını yayar, ama X ışınlarında yayılan enerji, yaydığı toplam enerjinin sadece milyonda biri kadardır. Sizin vücudunuz da kızılötesi ışıma yayar (bkz. 9. Bölüm); ama görünür ışık yayacak sıcaklıkta değildir.

X ışınlarının en ilginç –ve en işe yarar– yanlarından biri, kemik gibi bazı madde türlerinin X ışınını, yumuşak doku gibi ötekilerden daha çok soğurmasıdır. Ağzınızın ya da elinizin X ışını görüntüsünde (röntgen filminde) açık ve koyu bölgeler olmasının sebebi de budur. Röntgen filmi çektiirdiyseniz, vücudunuzun geri kalan kısmını korumak için size kurşun önlük de giydirmişlerdir, çünkü X ışınlarına maruz kalmak kanser olma riskini de artırır. Atmosferimizin çok iyi bir X ışını soğurucusu olması bu yüzden çoğunlukla iyi bir şeydir. Deniz seviyesinde düşük enerjili (1 keV) X ışınlarının yaklaşık yüzde 99'u sadece 1 santimetrelik havayla soğurulur. 5 keV'lik X

ışınlarında, ışınların yüzde 99'unu soğurmak için yaklaşık 80 santimetre hava gerekir. 25 keV'deki yüksek enerjili X ışınları söz konusuysa, aynı oranı soğurmak için 80 metrelik hava gerekir.

X Işını Gökbiliminin Doğuşu

Ta 1959'da dış uzayda X ışını arama fikrine kapıldığında, Bruno Rossi'nin neden atmosferin tamamen dışına çıkabilecek bir roket kullanmayı önerdiğini şimdi anlıyorsunuzdur. Fakat onun bu X ışını arama fikri çılgınca bir şeydi. Güneş sisteminin dışından gelen X ışınları olduğunu düşünmek için gerçekten hiçbir makul kuramsal sebep yoktu. Fakat Rossi, Rossi'liğini gösterdi ve American Science and Engineering'deki (AS&E) eski öğrencisi Martin Annis'i ve kadrosundaki bir üyeyi, Riccardo Giacconi'yi bu fikrin peşinden gitmeye değer olduğuna ikna etti.

Giacconi ve çalışma arkadaşı Frank Paolini, X ışınlarını tespit edecek özel Geiger-Müller tüplerini geliştirdiler ve bir roketin burun ucuna yerleştirdiler. Bir rokete üç tüp koydular. Bunlara geniş alan dedektörleri adını verdiler, ama o zamanlar "geniş alan" bir kredi kartı büyüklüğüne karşılık geliyordu. AS&E ekibi bu deneye mali destek için arayaşa çıktı, NASA tekliflerini reddetti.

Bunun üzerine Giacconi teklife ay'ı hedef olarak dahil edip, Hava Kuvvetleri Cambridge Araştırma Laboratuvarı'na (AFCRL) yeni-den başvurdu. Buradaki sava göre güneşten gelen X ışınları ay yüzeyinden gelen floresan ışık yayılımını üretiyor olmalıydı ve bu da ay yüzeyinin kimyasal analizini kolaylaştıracaktı. Aynı zamanda güneş rüzgârında mevcut olan elektronların çarpma etkisiyle, ay yüzeyinden *bremssstrahlung* da bekliyorlardı. Ay çok yakın olduğundan X ışınları tespit edilebilirdi. Bu çok zekice bir hamleydi, zira AS&E daha önce (bir kısmı gizli olan) birkaç proje için Hava Kuvvetlerinden destek almıştı, hatta belki kurumun ayla ilgilendiğini de biliyorlardı. Her neyse, bu sefer proje teklifi onaylandı.

1960 ve 1961'deki iki roket başarısızlığının ardından, 18 Haziran 1962'de geceyarısından 1 dakika önce fırlatılan roket, daha önce belirtilmiş olan, aydan gelen X ışınlarını tespit etme ve güneş sisteminin ötesinde X ışını kaynağı arama görevine başladı. Roket 80 ki-

lometrelik çizginin üzerinde sadece altı dakika geçirdi. Burası, Geiger-Müller tüplerinin yaklaşık 1,5-6 keV aralığındaki X ışınlarını atmosferden kaynaklı parazitler olmadan tespit edebileceği yerdirdi. O günlerde roketlerle uzayda gözlem yapmak böyle oluyordu. Roketler atmosfer dışına gönderilirdi, gökleri beş-altı dakika taradıktan sonra tekrar aşağı inerlerdi.

Hakikaten hayret verici olansa, X ışınlarını bulmuş olmalarıydı – aydan gelen değil, güneş sisteminin dışarısından bir yerlerden gelen.

Derin uzaydan gelen X ışınları? Neden? Kimse bu bulguyu anlamıyordu. O uçuştan önce tek bir yıldızın X ışınları yaydığını biliyorduk – kendi güneşimizin. Güneş 10 ışık yılı ötede olsaydı –ki gökbilimde gerçekten hemen iki adım ötede demektir bu– o tarihi uçuştaki donanımın, güneşten gelen X ışınlarını tespit edebilmek için bir *milyon* kere daha duyarlı olması gerekirdi. Bunu herkes biliyordu. O yüzden bu kaynak her nerede bulunuyorsa, güneşten en az bir milyon kere daha çok X ışını yaymak zorundaydı – ve tabii aynı zamanda gerçekten çok yakında olmalıydı. Güneşten (en az) bir milyon ya da bir milyar kere daha çok X ışını üreten gökbilim nesneleri o zamana dek duyulmamış bir şeydi. Böyle bir nesneyi tarif edecek fizik de yoktu. Başka bir deyişle, bunun göklerdeki yepyeni bir fenomen olması gerekiyordu.

1962 yılının 18-19 Haziran gecesi koskoca yeni bir bilim alanı doğdu: X ışını gökbilimi.

Gökfizikçileri, kaynağın tam olarak nerede olduğunu ve başka kaynakların da olup olmadığını keşfetmek için dedektörle donatılmış bir sürü roket göndermeye başladılar. Göklerdeki nesnelerin konumlarını belirlemede daima belirsizlik vardır, bu yüzden gökbilimciler bir "hata kutusu"ndan söz ederler, kenarları derece, yay dakika ya da yay saniye olarak ölçülen, gökyüzünün kubbesine yapıştırılmış hayali bir dikdörtgen. Kutunun boyutlarını, nesne yüzde 90 ihtimalle onun içinde olacak kadar büyük seçerler. Gökbilimciler malum sebeplerden hata kutularına epey kafa yorarlardı; zira kutu küçüldükçe nesnenin konumunun doğruluğu artar. X ışını gökbiliminde bu özellikle önemlidir, çünkü kutu küçüldükçe kaynağın optik karşılığını bulabilme ihtimaliniz artacaktır. O yüzden kutuyu gerçekten olabildiğince küçük yapmak önemli bir başarıdır.

Edinburgh Üniversitesi'nden Profesör Andy Lawrence, e-Astro-

nomer adlı bir gökbilim blogunda bir keresinde, tezi için X ışını kaynaklarının yüzlerce konum krokisini incelediği zamanlardan bir hatırasını yazmıştı. "Bir gece rüyamda bir hata kutusu olduğumu gördüm, kutunun içine almam gereken X ışınını bulamıyordum. Kan ter içinde uyandım." Nedenini anlamak kolay!

Riccardo Giacconi, Herb Gursky, Frank Paolini ve Bruno Rossi'nin keşfettiği X ışını kaynağının hata kutusunun büyüklüğü yaklaşık 10 derece x 10 derece, yani 100 derecekareydi. Güneşin yarım derece genişliğinde olduğunu aklınızda tutun. Kaynağın nerede olduğunu kestirmedeki belirsizlik, alanı güneşimizin 500 katı olan bir kutudan oluşuyordu! Hata kutusu, Akrep ve Cetvel takımyıldızlarının bir kısmını da içine alıyor ve Sunak takımyıldızının sınırına dokunuyordu. Yani açıkça kaynağın hangi takımyıldızda bulunduğunu belirleyememişlerdi.

1963 Nisanında Washington D.C.'deki Deniz Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'nda çalışan Herbert Friedman ve ekibi kaynağın konumuna ilişkin önemli gelişmeler kaydetti. Kaynağın Akrep (Scorpio) takımyıldızında bulunduğunu tespit ettiler, adı da bu yüzden Sco X-1 diye bilinir. Buradaki X, "X ışını"na karşılık geliyor ve 1 de, Akrep takımyıldızında keşfedilen ilk X ışını kaynağı olduğunu gösteriyor. Hiç sözü edilmese de, Sco X-1'in konumunun, Giacconi ve arkadaşlarının X ışını gökbiliminin doğuşuna damga vuran makalelerinde verdiği hata kutusunun merkezinden yaklaşık 25 derece uzakta olması tarihsel önem taşır. Gökbilimciler Kuğu (Cygnus) takımyıldızında yeni kaynaklar keşfettiklerinde, bunlar Cygnus X-1 (ya da kısaca Cyg X-1), Cyg X-2 vb. adlar aldılar; Herkül takımyıldızında keşfedilen ilk kaynak Her X-1 idi; Erboğa'dakiyse (Centauri) Cen X-1. Sonraki üç yıl, roketlerle yaklaşık bir düzine daha yeni kaynak keşfedildi, fakat tek bir istisna, yani Boğa (Taurus) takımyıldızında bulunan Tau X-1 dışında bunların ne olduğu ya da binlerce ışık yılı öteden tespit edebildiğimiz böyle devasa miktarlarda X ışınlarını nasıl ürettikleri hakkında kimsenin bir fikri yoktu.

İstisna olan ise gökyüzündeki en garip nesnelerden biriydi: Yengeç bulutsusu. Yengeç bulutsusu hakkında bir şey bilmiyorsanız, şimdi fotoğraf bölümünü açıp oradaki resmine bakmakta yarar var – hemen tanıyacağınızı sanıyorum. İnternette de pek çok fotoğrafı var. Yaklaşık 6000 ışık yılı ötede hakikaten olağanüstü bir nesne – 1054

yıldındaki bir süpernova patlamasının baş döndürücü kalıntıları, Çinli gökbilimcilerin kayıtlarında (ve muhtemelen Amerikan yerlilerinin resim yazılarında da – şuraya bir göz atın: seds.org/messier/more/m001_sn.html#collins1999), göklerde, Boğa takımyıldızında neredeyse hiç yoktan aniden belirmiş süper parlak bir yıldız olarak geçiyor. (Tam tarihi konusunda bir anlaşmazlık var, ama pek çoğu 4 Temmuz olduğunu ileri sürüyor.) O ay bu nesne, ay dışında gökteki en parlak nesneydi; hatta birkaç hafta boyunca gündüzleri de görülebiliyordu, geceleriye iki yıl daha görünür kaldı.

Ne var ki bir kere sönüp gidince, iki gökbilimci John Bevis ve Charles Messier'nin birbirlerinden habersiz bu bulutsuyu buldukları on sekizinci yüzyıla kadar, belli ki biliminsanları onu akıllarından çıkarmışlardı. Bu zamana gelindiğinde, süpernovanın artıkları (süpernova kalıntısı) bulutsu (bulut gibi) bir nesne olmuştu. Messier kuyruklu yıldız, bulutsular ve yıldız kümeleri gibi nesneleri içeren bir gökbilim kataloğu geliştirdi – Yengeç bulutsusu, kataloğundaki ilk nesnedir, M-1. 1939'da Lick Gözlemevi'nden (Kuzey California) Nicholas Mayall, M-1'in, süpernova 1054'ün kalıntısı olduğunu keşfetti. Bugün, patlamadan bin yıl sonra, Yengeç bulutsusu içinde hâlâ öyle harika şeyler var ki, bazı gökbilimciler tüm meslek hayatlarını onu incelemeye adıyor.

Herb Friedman'in ekibi ayın, 7 Temmuz 1964'te Yengeç bulutsusunun tam önünden geçip bulutsunun görüntüsünü engelleyeceğini fark ettiler. Gökbilimcilerin bu engelleme için kullandıkları terim "gölgeleme"dir – yani, ay Yengeç bulutsusunu gölgeleyecekti. Friedman Yengeç bulutsusunun bir X ışını kaynağı olduğunu doğrulamak istemenin haricinde başka bir şeyi de gösterebileceğini umuyordu – çok daha önemli bir şeyi.

1964'e gelindiğinde, gökbilimciler arasında, varlığı 1930'larda koyut olarak kabul edilmiş ama hiçbir zaman tespit edilememiş bir tür yıldız nesnesine yeniden bir ilgi uyanmıştı: nötron yıldızları. 12. Bölüm'de daha ayrıntılı ele alacağım bu garip nesneler, bir yıldızın hayatındaki son aşamalardan biri olarak değerlendirilmişti, muhtemelen bir süpernova patlaması sırasında doğmuştu ve çoğunlukla nötronlardan oluşuyordu. Var idiyse o kadar büyük bir yoğunlukta olmalıydılar ki, güneşimizin kütesine sahip bir nötron yıldızına yaklaşık 10 kilometrelik bir yarıçap biçiliyordu – tabii böyle bir şe-

yi hayal edebilirsiniz. 1934'te (nötronların keşfinden iki yıl sonra), Walter Baade ve Fritz Zwicky "süpernova" terimini türetilip nötron yıldızlarının süpernova patlamalarında oluştuğunu ileri sürmüşlerdi. Friedman Yengeç bulutsusundaki X ışını kaynağının böyle bir nötron yıldızından ibaret olabileceğini düşünüyordu. Haklı idiye, görmekte olduğu X ışını yayılımı, ay önünden geçerken birdenbire kaybolacaktı.

Friedman ay tam Yengeç bulutsusunun önüne geçerken birbiri peşi sıra bir dizi roket uçurmaya karar verdi. Ay hareket ederken gökteki tam konumunu bildiklerinden ve sayaçları o yöne doğrultabileceklerinden, Yengeç bulutsusu gözden kaybolurken X ışınlarında bir düşüş olup olmadığına bakabileceklerdi. Şanslarından dedektörler gerçekten de bir düşüş yakaladı ve bu gözlem bir X ışını kaynağının ilk kesin optik teşhisi oldu. Önemli bir sonuçtu; optik bir tespitte bulununca, bu esrarengiz ve güçlü X ışını kaynaklarının ardındaki mekanizmayı çok geçmeden keşfedeceğimiz konusunda iyimserdik.

Ne var ki Friedman hayal kırıklığına uğradı. Ay Yengeç bulutsusunun üzerinden geçerken, X ışınları "sönmek" yerine kademe kademe kaybolmuştu, bu da bulutsudan bir bütün olarak geldiğini, tek bir küçük nesneden gelmediğini gösteriyordu. Yani bir nötron yıldızı bulmamıştı. Aslında Yengeç bulutsusunda çok özel bir nötron yıldızı *vardır* ve de X ışını da *yayar*; kendi eksenini etrafında saniyede yaklaşık otuz defa döner! Gerçek bir ziyafet istiyorsanız Chandra X Işını Gözlemevi'nin sitesine gidin (chandra.harvard.edu/) ve Yengeç bulutsusunun (Crab nebula) resimlerini aratın. Sizi temin ederim baş döndürücü resimler. Fakat kırk beş yıl önce uzayda yörüngede resim alan X ışını teleskopları yoktu, o yüzden çok daha fazla yaratıcı olmak zorundaydık. (Jocelyn Bell'in 1967'de radyo atarcalarını keşfinden sonra, Friedman'ın ekibi 1968'de nihayet Yengeç bulutsusundaki nötron yıldızından gelen X ışını titreşimlerini tespit etti – yaklaşık saniyede otuz defa.)

Friedman tam Yengeç bulutsusunun gölgelenmesini gözlemlediği sırada, MIT'deki (müstakbel) arkadaşım George Clark, Teksas'ta, Sco X-1'den gelen yüksek enerjili X ışınlarını aramak için yüksek irtifalı bir gece balon uçuşuna hazırlanıyordu. Fakat Friedman'ın sonuçlarını duyunca –internet yokken bile haber çabuk yayılıyor-

du— planını tamamen değiştirip gündüz uçuşuna dönerek, Yengeç bulutsusundan gelen en az 15 keV'lik X ışını arayışına geçti. Buldu da!

Bütün bunların ne kadar heyecan verici olduğunu kelimelere dökmek zor. Bilimsel keşiflerde yeni bir çağın eşliğindeydik. Kendimizi, evrenin bu hayret verici diyarlarını gizleyen bir perdeyi kaldırıyor gibi hissediyorduk. Gerçekte, dedektörlerimizi o kadar yukarılara göndererek, uzaya dalarak, X ışınlarının hava tarafından soğurulmadan nüfuz edebileceği atmosferin üst kısmına giderek, tüm insanlık tarihi boyunca gözlerimizi kör eden filtreleri söküyorduk. Baştan başa yeni bir tayf alanında iş görüyorduk.

Gökbilim tarihinde bu sık olmuştur. Göklerdeki nesnelerin yeni ve farklı türde ışıma yaydıklarını her öğrenişimizde, yıldızlar ve hayat döngüleri hakkında (nasıl doğuyorlar, nasıl yaşıyorlar, nasıl ve neden ölüyorlar), yıldız kümelerinin oluşumu ve evrimleri hakkında, galaksiler hakkında ve hatta galaksi kümeleri hakkında bildiğimizi sandığımız şeyleri değiştirmek zorunda kalıyorduk. Örneğin radyo gökbilimi, galaksilerin merkezlerinin yüz binlerce ışık yılı uzunluğunda püskürmeler yayabildiğini göstermiştir; ayrıca atarcaların, kuasarların ve radyo galaksilerinin bulunması ve evrenin ilk hali hakkındaki görüşlerimizi köklü biçimde değiştiren kozmik mikrodalga arka plan ışınmasının keşfi de onun sayesinde olmuştur. Gama ışını gökbilimi, evrendeki en güçlü ve (neyse ki) en uzak patlamaların (gama ışını patlamaları olarak bilinir; son parıltılarını, X ışınları ve görünür ışıktan ta radyo dalgalarına uzanan frekanslarda yayar) bir kısmının keşfedilmesini sağlamıştır.

Uzaydaki X ışınlarının keşfinin evren anlayışımızı değiştireceğini biliyorduk. Ama nasıl olacağını bilmiyorduk. Her yere yeni donanımlarımızla baktık, yeni şeyler gördük. Bu sürpriz değil belki. Optik gökbilimciler Hubble Uzay Teleskobu'ndan resimler elde etmeye başlayınca, müthiş bir heyecan ve huşuya kapıldılar ve —belki burası o kadar bariz değil ama— daha fazlasına susadılar. Fakat aslında temel olarak yaptıkları şey, bin yıl geriye uzanan bir alandaki yüzlerce yıllık bir aletin eriştiği alanı genişletmekti. X ışını gökbilimcileri olarak, yepyeni bilimsel bir alanın şafağını yaşıyorduk. Biz nereye götüreceğini ya da neler keşfedeceğimizi kim biliyordu? Biz kesinlikle bilmiyorduk!

Bruno Rossi'nin beni Ocak 1966'da MIT'ye, tam da bu alanın serpilip geliştiği sırada davet etmesi ve benim de George Clark'ın ekibine hemen katılmam ne büyük şans. George çok ama çok keskin zekâlı bir fizikçiydi, gerçekten etkileyici biri, hayatımın geri kalan kısmında arkadaşım oldu. Şimdi bile başıma konan talih kuşuna inanmıyorum – müthiş bir dost ve yeni bir kariyer, ikisi de aynı ayda.

X Işını Balonculuğu, İlk Zamanlar

MIT'ye geldiğimde, dünyada faaliyet halinde beş balon grubu vardı: MIT'de George Clark, Avustralya'daki Adelaide Üniversitesi'nde Ken McCracken, MIT'de Jim Overbeck, San Diego California Üniversitesi'nde Larry Peterson ve Rice Üniversitesi'nde Bob Haymes. Bu bölüm çoğunlukla, 1966 ve 1976 yılları arasındaki dönemde araştırmalarımın merkezinde yer alan X ışını balonculuğu deneyimlerim hakkında. Bu yıllar boyunca Teksas, Palestine'da; Arizona, Page'de; Kanada, Calgary'de ve Avustralya'da gözlemler yaptım.

Balonlarımız X ışını dedektörlerini yaklaşık 44.000 metrelik bir irtifaya taşıdılar. Buradaki atmosfer basıncı, deniz seviyesindekinin sadece yüzde 0,3'ü kadardır. Atmosfer bu kadar inceyken, 15 keV'nin üzerindeki X ışınlarının epey bir bölümü geçer.

Bizim balon gözlemlerimiz roket gözlemlerini tamamlıyordu. Roketle taşınan dedektörler 1 ila 10 keV aralığındaki X ışınlarını, tüm uçuş boyunca sadece beş dakika kadar gözlemliyordu. Balon gözlemleriyse saatlerce devam edebiliyordu (en uzun uçuşum yirmi altı saatti) ve benim dedektörlerim 15 keV'nin üzerindeki aralıkta bulunan X ışınlarını gözlemliyordu.

Roket gözlemleri sırasında tespit edilen kaynakların hepsi balon gözlemleri sırasında tespit edilebilir değildi, çünkü kaynaklar çoğunlukla enerjilerinin büyük kısmını düşük enerjili X ışınlarıyla yayıyorlardı. Öte yandan, biz de roket gözlemleri sırasında görünmeyen, çoğunlukla yüksek enerjili X ışınları yayan kaynakları tespit edebiliyorduk. Bu şekilde, yeni kaynaklar keşfedip bilinen kaynak-

ların tayfını yüksek enerjileri içerecek şekilde genişletmenin yanı sıra, kaynakların X ışını yayma gücünde birkaç dakikadan birkaç saate uzanan zaman ölçeklerinde görülen değişkenlikleri de tespit edebiliyorduk, ki bunu roketlerle yapmak mümkün değildi. Gökfi-ziğindeki araştırmalarımın ilk başarılarından biri buydu.

1967'de Sco X-1'den gelen ani bir X ışını parlaması keşfettik ve çarpılmışa döndük – bu bölümde ileride hepsini anlatacağım. Eki-bim üç X ışını kaynağı daha keşfetti: GX 301-2, GX 304-1 ve GX 1+4; bunlar roket gözlemleri sırasında daha önce hiç görülmemişti ve hepsi birkaç dakikalık zaman ölçeklerinde X ışını şiddetlerinde değişiklikler gösteriyordu. GX 1+4 yaklaşık 2,3 dakikalık bir periyot farkıyla, periyodik değişkenlik bile gösteriyordu. O sırada, bırakın 2,3 dakikalık periyodikliği, X ışını şiddetindeki böyle hızlı değişikliklerin sebebi hakkında bile hiçbir fikrimiz yoktu, fakat yeni bir çığır açmakta olduğumuzu biliyorduk – yeni topraklar keşfediyorduk.

Oysa 1960'ların sonlarında bile, X ışını gökbiliminin önemi bazı gökbilimcilerin kafalarına henüz dank etmemişti. 1968'de Hollandalı gökbilimci Lan Oort'la Bruno Rossi'nin evinde tanıştım. Oort en ünlü gökbilimcilerden biriydi. İleriyi görme yetisi muazzamdı; İkinci Dünya Savaşı'nın hemen ardından Hollanda'da kos-koca bir radyo gökbilimi programı başlatmıştı. O yıl MIT'ye geldiğinde 1966 ve 1967'deki uçuşlarımızdan elde ettiğimiz balon verilerini gösterdim. Fakat bana şöyle dedi – bunu hiçbir zaman unutmayacağım: "X ışını gökbilimi pek önemli bir şey değil." İnanabiliyor musunuz? "Pek önemli bir şey değil." Bundan daha büyük bir yanılgı olamazdı. Bütün zamanların en büyük gökbilimcilerinden biriydi, ama bu alanın önemini zinhar görmüyordu. Belki ben daha genç ve bilgiye daha susamış olduğumdan –dürüst olmak gerekirse o sırada o altmış sekizindeydi– bizim saf altın topladığımızı ve henüz sadece yüzeyi kazıdığımızı apaçık görüyordum.

1960'larda ve 1970'lerde X ışını gökbilimi üzerine yazılmış her makaleyi okuduğumu hatırlıyorum. 1974'te Leiden'de beş konferans verdim (Oort da beni dinleyenler arasındaydı) ve X ışını gökbiliminin *tamamını* işleyebildim. Bugünlerde X ışını üzerine, birden çok alt alanda her gün binlerce makale yayımlanıyor, hiç kimse tüm alanı birden kavrayamıyor. Pek çok araştırmacı tüm meslek yaşamlarını,

tek yıldızlar, toplama diskleri, X ışını ikili sistemleri, küresel kümeler, beyaz cüceler, nötron yıldızları, kara delikler, süpernova kalıntıları, X ışını patlamaları, X ışını püskürmeleri, galaksi çekirdekleri ve galaksi kümeleri gibi özel bir sürü konudan bir tanesi üzerine kuruyorlar. İlk yıllar benim için en harika yıllardı. Çok da zahmetliydi, hemen her açıdan: zihinsel olarak, fiziksel olarak, hatta lojistik bakımından bile. Balonları uçurmak çok karmaşık ve pahalı bir işti, zaman alıyordu, gerginlik yaratıyordu, tarifi pek zor. Ama deneyeceğim.

Havaya Yükselirken: Balonlar, X Işını Dedektörleri ve Kalkış

Bir fizikçi olarak daha bir şey yapmadan önce donanımı kurmak, öğrencilere paralarını vermek ve bazen de uzun yolculuklara çıkmak için gerekli parayı almak zorundasınız (ama kuramcıysanız, sadece bir kâğıda ya da bilgisayar ekranına ihtiyacınız olabilir). Bir sürü bilimsanının gerçekte yaptığı, rekabetin yüksek olduğu programlarda araştırma yapmak için destek isteyen ödenek teklifleri yazmaktır. Biliyorum hiç seksi ya da romantik değil, fakat bana inanın, o olmazsa hiçbir şey olmaz. Hiçbir şey.

Bir deney ya da gözlem için harika bir fikriniz olabilir, fakat bunu onaylanan bir teklife nasıl dönüştüreceğinizi bilmiyorsanız, ondan bir şey çıkmaz. Daima dünyadaki en iyilerle rekabet ediyorduk, yani kıran kırana bir iş. Hâlâ da öyle, her alandaki her bilimsanı için geçerli bu. Nerede başarılı bir deneysel bilimciye bakarsanız –biyolojide, kimyada, fizikte, bilgisayar biliminde, iktisatta ya da gökbilimde olsun fark etmez– aynı zamanda, rekabette tekrar tekrar kazanmanın yolunu bulmuş birine bakıyorsunuz demektir. Buradan çoğunlukla sıcak, mülayim kişilikler çıkmaz. İşte bu yüzden MIT'de on yıl çalışmış olan karım Susan, "MIT'de hiç küçük ego yok," demeyi pek sever.

Fonu kaptığımızı varsayalım – ki biz genelde kapardık (Ulusal Bilim Vakfı ve NASA tarafından cömertçe desteklenmişimdir). Bir balonu 900 kiloluk bir X ışını teleskobuyla (paraşüte bağlı) yaklaşık 50 kilometre yukarı göndermek ve sağ salim yere indirmek çok karmaşık bir süreçti. Balonun uçurulması sırasında sakın ve güvenilir

bir hava şarttı, çünkü balonlar öyle narindi ki ani bir rüzgâr bütün projeyi batırabilirdi. Balonları atmosferde yukarılara çıkarmak ve sonra da takip etmek için belli bir altyapıya sahip olmanız gerekiyordu – balon uçuş pisti, uçuş araçları vb. Samanyolu'nun, galaksi merkezi dediğimiz, pek çok X ışınının bulunduğu merkezinin genel doğrultusunda gözlem yapmak istediğimden, Güney Yarımküre'den gözlemlemem gerekiyordu. Kalkış Mildura ve Alice Springs'den (Avustralya) yapmayı tercih etmiştim. Bu yüzden her seferinde birkaç aylığına evimden ve ailemden –o zaman dört çocuğum vardı– uzak kalıyordum.

Balon uçuşmayla ilgili her şey pahalıydı. Balonların kendileri dev gibiydi. Uçurduklarımın en büyüğü (o zamanlar uçuşmuş en büyük balondur, hâlâ da en büyüğü olabilir) yaklaşık 1,5 milyon metreküp hacme sahipti; tamamen şişirilip 44.000 metrede uçarken, çapı yaklaşık 71,5 metreydi. Balonlar çok hafif polietilenden yapılıyordu – kalınlığı bir milimetrenin yüzde biri kadardı, streç filmlerden ya da sigara kâğıdından daha ince. Fırlatma sırasında yere bir dokunacak olsalar, yırtılırlardı. Bu devasa, güzel balonlar yaklaşık 320 kg ağırlığındaydı. Hep yedekli giderdik ve her biri 100.000 dolara mal oluyordu – kırk yıl önce, paranın para olduğu zaman.

Bunları devasa fabrikalarda imal etmek zorundaydılar. Balonun, soyulmuş mandalınanın dilimlerini andıran kısımları ayrıca yapılıp sıcak pres kaplamayla birbirlerine tutturuluyordu. İmalatçılar kaplama işi için sadece kadınlara güveniyordu; erkeklerin çok sabırsız olup bir sürü hata yaptığını herkesin bildiğini söylüyorlardı. Sonra balonu şişirecek helyumu ta Avustralya'ya göndermemiz gerekiyordu. Sırf helyumu balon başına yaklaşık 80.000 dolar tutuyordu. Bugünkü parayla sadece bir balon ve helyumu 700.000 dolardan fazlaydı, yedek balon, ulaşım, barınma ya da yiyeceği hiç katmıyorum. İşte öyle – Avustralya çölünün ortasında yaşayıp, elimiz tamamen hava şartlarına mahkûm bir halde uzayın derinliklerindeki sırları bulup çıkarmaya çalışıyorduk. Daha size Jack'ten bile söz etmedim. Birazdan geleceğim Jack'e.

Fakat balonlar teleskoplara kıyasla ucuzdu. Yaklaşık bir ton ağırlığında, son derece karmaşık bir makine olan teleskopların her birinin yapımı kabaca iki yıl sürüyor ve bugünkü parayla 1 milyon ila 4 milyon dolara mal oluyordu. Aynı anda iki teleskop alacak para-

mız hiç olmadı. O yüzden, teleskobumuzu kaybetme durumunda –iki kere oldu– en az iki yıl şansımız yoktu. Fon almadan yeni bir tanesinin yapımına başlayamazdık bile. O yüzden bir teleskobu kaybedersek felaket oluyordu.

Sadece benim için değil elbette. Bu durum lisansüstü öğrencilerim için de büyük bir gecikmeye sebep oluyordu. Hepsi teleskopların yapımında ciddi işler üstlenmişti ve doktora tezleri bu aletler ve gözlemlerin sonuçları hakkındaydı. Diplomaları balonlarla birlikte havaya uçuyordu.

Havanın da işbirliğine ihtiyacımız vardı. Stratosferde şiddetli rüzgârlar vardır, yaklaşık yılın altı ayı doğudan batıya saatte yaklaşık 160 kilometre hızla eser, yılın öteki yarısında da batıdan doğuya. Yılda iki defa bu rüzgârlar ters yöne döner –buna yön değişimi diyoruz– ve bu sırada 44.000 metredeki rüzgâr hızları çok düşük olup saatlerce gözlem yapmamıza imkân sağlar. Bu rüzgârları ölçebileceğimiz ve yön değişimi sırasında balonu salabileceğimiz bir yerde olmamız gerekiyordu. İki günde bir her yeri, radarlarla takip ettiğimiz meteoroloji balonlarıyla yokluyorduk. Çoğu zaman yaklaşık 38.000 metreye, yani 38 kilometre yukarıya patlamadan çıkıyorlardı. Fakat hava durumunu tahmin etmek laboratuvar uygulamalarında ray üzerinde bilye yuvarlamaya benzemiyor. Atmosfer çok, çok daha karmaşık, çok, çok daha az öngörülebilir, ama yine de yaptığımız her şey hava tahminini iyi yapmaya dayalıydı.

Dahası da vardı. Yaklaşık 9.000 ila 18.000 metrelik bir irtifada atmosfere tropopoz adı verilir ve burası çok, çok soğuktur –eksi 50 santigrat derece. Balonlarımız burada çok kırılğan hale geliyordu. Jet rüzgârları da oluyor, balonu dövüp duruyordu, balon da haliyle patlayabiliyordu. Yani pek çok şey ters gidebiliyordu. Bir keresinde balonum denize uçup gitti –teleskobun sonu. Görev yükü (*payload*) dokuz ay sonra Yeni Zelanda'daki bir plajda bulundu. Mucizevi bir şekilde, Kodak'ın yardımıyla, sepette filme kaydedilmiş verileri kurtarabildik.

Bu uçuşlar için tekrar tekrar hazırlanıyorduk, buna rağmen hep şöyle diyordum: Deliler gibi hazırlanmış olsak da, yine de biraz şansa ihtiyacımız var. Kimi zaman da çok şansa. Donanımı bu ücra gözlem istasyonuna getiriyorduk. Sonra teleskop üzerinde testler uygulayıp aletlerin ayarını yaparak her şeyin çalışır durumda oldu-

ğundan emin oluyorduk. Teleskobu paraşüte bağlayan, daha sonra da balona bağlayacak halat tertibatını kontrol ediyorduk. Kalkış istasyonunda bütün deneyleri yapıp uçuşa hazır olmamız yaklaşık üç haftamızı alabiliyordu, sonrasında da hava yardımcı olmayabiliyordu. O zaman orada oturup beklerken aküleri şarjlı tutmaktan başka bir şey gelmiyordu elimizden. Alice Springs'in öyle güzel olması çok iyi bir şeydi: Avustralya'nın göbeğinde olağanüstü bir çöl kasabası. Gerçekten kuş uçmaz kervan geçmez bir yer gibiydi, fakat gökyüzü açıktı ve balon uçurmaya çalıştığımız sabah erken vakitler muhteşemdi: Gece seması şafak öncesinin koyu mavisine bürünür, güneş doğarken gökyüzünü ve çölü parlak pembelere ve portakal renklerine boyardı.

Bir kere gitmeye hazır olduk mu, üç-dört saat boyunca sabit bir yönde saatte 5 kilometreden az bir hızla esen rüzgârlara ihtiyacımız oluyordu. Bu süre balonu yerden kaldırmak için gerekli süreydi (sırf şişirilmesi iki saat alıyordu). İşte bu yüzden çoğunlukla, rüzgârın en az olduğu şafak vakti yapıyorduk uçurma işlerini. Fakat hava tahminlerimizin yanlış çıktığı olabiliyordu, o zaman da havanın gönlü olana kadar bekle babam bekle.

Bir keresinde Mildura'da bir balon uçurma işinin tam ortasında dayken –daha şişirme işlemine bile başlamamıştık– hava tahmininin aksine rüzgâr çıktı. Balon mahvoldu, ama şükürler olsun teleskop zarar görmedi! Bütün o hazırlıklar ve 200.000 dolar birkaç saniyede yok oldu. Can sıkıcı şey ararsanız çok. Daha iyi bir havayı bekleyip yedek balonumuzla tekrar denemekten başka çaremiz yoktu.

Başarısızlıklar üstünüze yapıyor. Alice Springs'e düzenlediğim son seferde daha kalkış sırasında arka arkaya iki balon yitirdik, çünkü kalkış tayfası bazı trajik hatalar yapmıştı. Bu seferimiz tam bir başarısızlıktı – ama hiç değilse teleskobumuz zarar görmemişti. Yerden hiç ayrılmamıştı. Teksas, Palestine'da, son seferimde (1980'de), sekiz saatlik uçuş başarılıydı, fakat telsiz komutuyla uçuşu sonlandırdığımızda teleskobumuzu kaybettik; paraşüt hiç açılmadı.

Bugün bile balon uçurma garantili bir iş olmaktan çok uzak. 2010 yılının nisan ayında NASA Alice Springs'de balon uçurmaya teşebbüs ettiğinde bir şeyler ters gitti ve balon havalanmaya çalışırken yere çakıldı, milyonlarca dolar değerindeki donanımı mahvetmenin yanı sıra neredeyse izleyenleri de yaralıyordu. Bu olayı şurada göre-

bilirsiniz: www.physorg.com/news191742850.html.

Yıllar boyunca yaklaşık yirmi balon uçurmuşumdur. Sadece beş tanesi kalkış sırasında başarısızlığa uğradı ya da irtifa kazanmadı (helyum sızdırmış olabilirler). Bu iyi bir başarı oranı olarak değerlendiriliyordu (yüzde 75). Fotoğraflar bölümünde bir balonun (helyumla) şişirilişinin resmini, ayrıca bir balonun havaya salınışının resmini görebilirsiniz.

Balon uçurma sahasına gitmeden aylar önce Massachusetts, Wilmington'daki bir firmada görev yükümüzü test ediyorduk. Teleskobu bir vakum odasına koyup, hava basıncını ta yukarılarda olacağı basınçla aynı seviyeye indiriyorduk, yaklaşık bir atmosferin binde üçüne. Sonra eksi 50 santigrat dereceye kadar soğutup çalıştırıyorduk – bütün X ışını dedektörlerini açıp, yirmi dört saat boyunca bir radyoaktif kaynaktan gelen X ışınlarını yirmi dakikada bir on saniyeliğine izliyorduk. Rakiplerimizin teleskoplarının bazıları –evet, aynı tür şeyleri yapan öteki ekipleri rakibimiz gibi gördüğümüz doğru– bazen aküleri düşük sıcaklıklarda güç kaybettiğinden ya da tümden gittiğinden iş görmüyordu. Bizim başımıza hiç böyle bir şey gelmedi, çünkü bunları enine boyuna test etmiştik. Test döneminde akülerimizin güçten düşeceğini görmüşsek, gerektiğinde nasıl ısıtıp enerji vermeye devam etmesini sağlayacağımızı planlamıştık.

Ya da yüksek voltajlı tellerden kıvılcım saçılmasına yol açan korona boşalması sorununu düşünün. Donanım parçalarımızdan bir kısmı yüksek voltajda ve basıncın çok düşük olduğu, havanın çok yetersiz olduğu ortamda çalışıyordu. Bu da tellerden açık havaya gidecek kıvılcımlar için ideal bir ortamdı. 7. Bölüm'de sözünü ettiğim nakil hatlarının etrafındaki vızıldamaları hatırlıyor musunuz? İşte o korona boşalması. Yüksek voltajla çalışan her deneysel fizikçi korona boşalmasına tanık olacağını bilir. Bu kıvılcımların örneklerini derslerimde gösteriyorum. Orada korona boşalması eğlenceli. 44.000 metrede ise bir facia.

Sokaktaki insanın anlayacağı dille, donanımdan cızırtılar gelir ve o kadar çok elektronik gürültü olur ki, X ışını fotonlarını seçemezsiniz. Bu nasıl bir felaket mi olurdu? Baştan aşağı bir felaket: Balonun uçuşunda hiçbir işe yarar veri elde edemezsiniz. Çözüm, bütün yüksek voltaj kablolarımızı silikon lastikle kaplamaktı. Başkaları da aynı şeyi yaptı ama yine de korona boşalması oldu. Biz

testlerimizin ve hazırlıklarımızın karşılığını aldık. Bizde *hiçbir zaman* korona boşalması olmadı. Bu girift teleskopların yapımında karşılaşılan onlarca çetrefil mühendislik meselesinden sadece biriydi bu – işte bu yüzden yapımları o kadar uzun sürmüş ve o kadar çok paraya mal olmuştur.

Peki teleskobu atmosferde yukarılara gönderdiğimizde, X ışınlarını nasıl tespit ediyorduk? Bu sorunun cevabı basit değil, o yüzden lütfen biraz daha sabredin. Bir kere biz, roketlerin kullandığı (gaz doldurulmuş) orantılı sayaçları değil, özel bir tür dedektör kullanıyorduk (sodyum iyodür kristalleri), 15 keV'den yüksek enerjili X ışınlarını ölçebilen bir şey. Bir X ışını fotonu bu kristallerden biri içine girince, bir elektronu yörüngesinden fırlatıp X ışını enerjisini o elektrona aktarabilir (buna fotoelektrik soğurulma deniyor). Bu elektron da, durmadan önce kristalde bir iyon yolu açar. Bu iyonlar yüksüz hale gelince, çoğunlukla görünür ışık biçiminde enerji salarlar; işte bir ışık parlaması böyle yaratılır – X ışını fotonunun enerjisi bir ışık parlamasına dönüştürülmüştür. X ışınlarının enerjileri yükseldikçe, parlayan ışıkların şiddeti artar. Işık parlamalarını tespit etmek ve bunları elektrik titreşimlerine dönüştürmek için ışık çoğaltıcıları kullanıyorduk: Işık parlaması ne kadar parlaksa, titreşimin gerilimi o kadar yüksekti.

Sonra bu titreşimleri yükseltip ayırtaca gönderiyorduk, o da elektrik titreşimlerini ölçüp büyüklüklerine göre sıralıyordu – bu da X ışınlarının enerji seviyelerini gösteriyordu. İlk zamanlarda X ışınlarını sadece beş farklı seviyede kaydediyorduk.

Balon uçuşundan sonra tespitlerin kaydını tutabilmek için, ilk zamanlarda bunları balonda kaydediyorduk, enerji seviyeleri ve tespit edilme zamanlarıyla. Bu sıralanmış titreşimleri ışık yayan diyotlara göndermesi için de ayırtacı bağlıyorduk. Diyotlar beş ayrı enerji seviyesinde ışık parlamaları örüntüsü yaratıyordu. Sonra bu parlayan ışıkları seri çekim yapan bir fotoğraf makinesiyle çekiyorduk.

Işık yanıyorsa, filmde bir iz yapıyordu. Bir gözlemin filmi, bütün bunlarla, bir dizi kesikli ve kesiksiz çizgi görünümü veriyordu. MIT'ye dönünce filmi, George Clark'ın tasarladığı, kesikli ve kesiksiz çizgileri delikli şeritlere dönüştüren özel bir okuyucuyla "okuyorduk". Sonra delikli şeritleri ışığa duyarlı diyotlarla okuyup verileri teyp bandına kaydediyorduk. Fortran'la bilgisayar kartlarına bir

program yazmıştık (tarihöncesi bir şeymiş gibi geldiğinin farkındayım) ve bunu teyp bandını bilgisayarın belleğine okumak için kullanıyorduk, o da –nihayet!– bize X ışını sayımlarını beş farklı enerji kanalında zamanın bir fonksiyonu olarak veriyordu.

Biliyorum size bir Rube Goldberg makinesi [bir nevi Zihni Sinir projesi] gibi geliyordur. Ama ne yapmaya çalıştığımızı bir düşünün. Sayma değerini (saniyedeki X ışını sayısını) ve X ışını fotonlarının enerji seviyelerini ölçmeye, bir de bunları yaymış olan kaynağın yerini bulmaya çalışıyorduk – bunlar, binlerce yıldır ışık hızıyla yol almış, tüm galaksiye yayılıp katettikleri mesafenin karesi ölçüsünde sürekli seyrelmekte olan fotonlardı. Kontrol sistemiyle teleskobu saatlerce aynı hedefte kilitleyebilen ve her gece tekrar aynı hedefe dönebilen, bir dağ tepesindeki sabit optik teleskobun aksine, biz, kırılğan bir balon bin kiloluk teleskobumuzu yerden 44.000 metre yukarı taşıırken, elimizde ne kadar zaman varsa –daima saatlerle sınırlı– olabildiğince iyi kullanmak zorundaydık (en fazla yılda bir kere).

Bir balon uçuştayken, 1500 ya da 3000 metre yükseklikten onu küçük bir uçakla takip ediyor ve genellikle gözden kaçırmıyordum (gündüzleri tabii – gece değil). Nasıl bir şey olduğunu gözünüzde canlandırabilirsiniz: her seferinde uzun saatler süren uçuşlar. Ufak tefek bir adam değilim. Bu küçük, dört koltuklu uçaklar içinde bir kerede sekiz, on, on iki saat uçunca hasta düşmek işten bile değildi. Artı, balonun yukarıda olduğu bütün süre boyunca gergindim. Rahatlayabileceğiniz tek zaman, verileri elinize aldığınız o tekrar kavuşma ânından sonra oluyordu.

Balon o kadar kocamandı ki, 50 kilometreye yakın bir yükseklikte olmasına rağmen çok net olarak görebiliyordunuz. Radarla kalkış istasyonundan çok uzaklara kadar takip edebiliyorduk, ta ki dünya yuvarlağının kavisi bunu imkânsız kılana kadar. Balona bir radyo vericisi yerleştirmemizin sebebi de buydu, gece de balonun izini sürmeye yoğunluklu olarak radyo feneriyle devam ediyorduk. Bu uçuşla ilgili yerel gazetelerde haber çıkması için ne kadar çok çalışsak da, balonlar yollarından yüzlerce kilometre sapabiliyordu ve havadayken türlü türlü UFO ihbarları alıyorduk. Komikti ama aslında gayet mantıklıydı: Gökyüzünde belirsiz büyüklükte ve mesafede esrarengiz bir varlığa gözleri takılınca insanların aklına başka ne gelecekti sanki? Onlar için bu gerçekten tanımlanamayan uçan

nesneydi. Fotoğraflar bölümünde bir balonun 44.000 metrede teleskopa çekilmiş resmini görebilirsiniz.

Bütün planlamalarımıza ve hava tahminlerimize rağmen 44.000 metrelik irtifadaki rüzgârlar –yön değişimi olsa bile– bizi yarı yolda bırakabiliyordu. Bir keresinde Avustralya'da balonun Alice Springs' den kuzeye yönelmesini bekliyorduk, fakat o dosdoğru güneye havalandı. Günbatımına kadar gözle takip ettik, gece boyunca da telsiz temasımızı sürdürdük. Sabah olduğunda balon Melbourne'e fazla yaklaşmaktaydı, bizimse Sydney ve Melbourne arasındaki hava sahasına girmemize izin yoktu. Kimse balonu vurup indirecek değildi, fakat bir şeyler yapmak zorundaydık. Bunun üzerine, asi balonumuz tam yasak hava sahasına ulaşmak üzereyken, istemeye istemeye görev yükümüzü serbest bırakacak telsiz komutunu verdik. Teleskobu balondan ayırmak balonu paramparça ederdi –yükün ani salınışının sebep olduğu şok dalgasını kaldıramazdı– teleskop düşmeye başlar, paraşüt açılır (1980'deki hariç) ve yavaş yavaş aşağı süzülerek teleskobu sağ salim tekrar yeryüzüne indirirdi. Balonun devasa parçaları da yere çarpar, genellikle yarım hektar civarı bir alana yayılırdı. Her balon uçuşunda bu er ya da geç oluyordu ve (her ne kadar zorunlu olsa da) hep üzücü bir andı, çünkü neticede görevi sona erdiriyorduk – veri akışını kesiyorduk. Teleskobun mümkün olduğunca uzun süre havada kalmasını istiyorduk. O günlerde verilere çok açtık – bütün mesele oydu.

Avustralya'nın Ücra Bölgesinde Teleskoba Kavuşma ve Kanguru Jack

İnişini yumuşatmak için teleskobun altına karton tamponlar koyuyorduk. Gündüzse ve balonla göz temasımız olduysa (aşağı bırak komutunu gönderdikten sonra aniden gözden kayboluyordu), hemen paraşütü görüyorduk; ta aşağıya kadar küçük uçağımızla etrafında daire çizip takip etmek için elimizden geleni yapıyorduk. Bir kere indi miydi, konumunu çok ayrıntılı bir harita üzerinde mümkün olduğunca doğru bir şekilde işaretliyorduk.

Sonra işin gerçekten tuhaf bölümü başlıyordu: Çünkü biz bir uçaktaydık; yılların emeği, yükümüz, bütün verilerimizse aşağıda ya-

tıyordu, neredeyse uzansak alacağımız bir yerde, fakat öyle çölün ortasına in de al olmuyordu! Yapmamız gereken yöre halkının dikkatini çekmekti, bunu yapma şeklimiz de genellikle bir evin üzerinde bir uçağı alçaktan uçurmaktı. Çölde evler birbirlerinden oldukça uzaktı. Oturanlar alçaktan uçan uçağın ne anlama geldiğini biliyor ve genellikle evden çıkıp el sallayarak temasa geçiyorlardı. O zaman çöldeki en yakın iniş pistine (havaalanıyla karıştırmayın) inip gelmelerini bekliyorduk.

Bir uçuş sırasında, bölgede o kadar az ev vardı ki bir süre ev aradık. Sonunda en yakın komşusundan 80 kilometre uzakta oturan bu Jack adındaki arkadaşı bulduk. Sarhoştı ve epey de çatlaklı. Önce bilmiyorduk tabii. Havadan temas kurduk, sonra iniş pistine inip bekledik; yaklaşık 15 saat sonra kamyonuyla çıkıp geldi, ön camı olmayan, şoför mahallinin sadece tepesi kapalı, kasası açık, hurdaya dönmüş bir kamyon. Jack saatte 100 kilometre hızla çölde deli gibi sağa sola dolanarak kanguru kovalayıp vurmayı seviyordu.

Takip uçağımız bizi yükün olduğu tarafa yönlendirirken ben Jack'le ve bir lisansüstü öğrencimle kamyonunda kaldım. Kamyonun ayak basılmamış topraklardan geçmesi gerekiyordu. Uçakla telsiz temasımızı sürdürüyorduk. Jack'le olduğumuz için şanslıydık. Bütün o kanguru avcılığı sayesinde kamyonu nerelerden sürebileceğini gerçekten biliyordu.

Bir de nefret ettiğim bir oyunu vardı, ama ona elimiz mahkûm olduğundan yapabilecek pek bir şeyim yoktu; bana sadece bir kere gösterdi. Köpeğini kamyonun tepesine koydu, hızını saatte 100 kilometreye çıkardı, sonra da frenlere asıldı, köpek de mancınıkla fırlatılmış gibi havada uçup yere indi. Zavallı köpek! Jack kahkahalarla güldükten sonra şöyle dedi: "Yaşlı bir köpeğe yeni numara öğretemezsin."

Yüke ulaşmak yarım günümüzü aldı, bir seksen boyunda bir iguana tarafından korunuyordu – gerçekten korkunç görünümlü bir yaratık. Doğrusunu söylemek gerekirse ödümü kopardı. Ama tabii bunu belli etmek istemedim, o yüzden lisansüstü öğrencime, "Sorun değil. Bu hayvanlar zararsızdır. Önce sen git," dedim. O da gitti, sonra anlaşıldı ki gerçekten de zararsızmışlar. Yüğü kurtarıp Jack'in kamyonuna yüklediğimiz o dört saat boyunca hayvan hiç kıpırdamadı.

Balon Profesörü

Sonra Alice Springs'e geri döndük, tabii balonu salma sırasındaki muhteşem bir fotoğrafla *Centralian Advocate*'ın baş sayfasındaydık. Manşette UZAY ARAŞTIRMASI BAŞLIYOR yazıyordu ve haberde "balon profesörü"nün geri döndüğünden söz ediliyordu. O yörenin ünlü bir şahsiyeti olmuştum, Rotary Kulübü'nde ve bir lisede, hatta bir keresinde de bir et lokantasında konuşmalar yaptım, sonuncusunda bu sayede ekibime bedava yemek kazandım. Aslında yapmak istediğimiz bir an önce filmimizle eve dönmek, tab edip incelemek ve ne bulduğumuzu görmektir. Böylece birkaç günlük toparlanma işlemlerinin ardından yola çıktık. Bu tür bir araştırmanın ne kadar zahmetli olduğunu görüyorsunuz. En az iki yılda bir (bazen her yıl) iki ay gibi bir süre evden uzakta oluyordum. İlk evliliğimin bundan çok çektiği su götürmez.

Aynı zamanda, bütün o stres ve gerginliğe rağmen heyecan vericiydi ve çok eğlenceliydi; Jeff McClintock ve George Ricker başta olmak üzere lisansüstü öğrencilerimle gurur duydum. Jeff şimdi Harvard-Smithsonian Gökfiziği Merkezi'nde kıdemli gökfizikçisi ve X ışını yayan çift yıldız sistemlerindeki kara deliklerin (13. Bölüm'de buna değineceğiz) kütlesini ölçen çalışmasından dolayı 2009 Rossi Ödülü'nü kazandı (ödülün adı kimden geliyor tahmin edin). George –ne mutlu ki– hâlâ MIT'de çalışıyor. Yaratıcı yeni alet tasarlama ve geliştirme konusunda harikadır. En çok gama ışını patlamaları alanındaki çalışmalarıyla tanınır.

Balonculuk kendi çapında çok romantikti. Sabah dörtte ayakta olmak, arabayla havaalanına gitmek, güneşin doğuşunu seyretmek ve balonun o görkemli şişirilme ânını görmek – bu güzel çöl, tepemizde gökyüzü, önceleri sadece yıldızlar, sonra ağır ağır doğan güneş. Derken balon havaya bırakılıp kendini yukarı çekince, şafakta gümüş ve altın rengi parıldardı. Ve siz ne kadar çok şeyin yolunda gitmesi gerektiğini bilirdiniz, o yüzden bütün o zaman boyunca tüm sinirleriniz gerilirdi. Aman tanrım. Balonu havaya salış başarılı gibiyse, yani her biri potansiyel bir felaketin kaynağı olan sayısız ayrıntı birbiri ardına yerine oturmuşsa, bu ne inanılmaz bir histi!

O günlerde gerçekten en ön saflarda koşturuyorduk. Başarının

kısmen Avustralyalı sarhoş bir kanguru avcısının cömertliğine bağlı olduğunu düşünsenize.

Sco X-1'den X Işını Parlaması

Benim için o yıllarda yaptığımız hiçbir keşif, bazı X ışını kaynaklarının yaydığı X ışını miktarlarındaki beklenmedik ve kayda değer artışlardan daha heyecan verici olamazdı. Bazı kaynaklardan gelen X ışını şiddetinin değişken olduğu fikri 1960'ların ortalarından beri ortalıkta dolanıyordu. Philip Fisher ve Lockheed Missiles and Space Company'deki grubu, 1 Ekim 1964'te roket uçuşları sırasında tespit ettikleri yedi X ışını kaynağının X ışını şiddetlerini, Friedman'ın grubunun 16 Haziran 1964'teki roket uçuşlarından elde edilen X ışını şiddetleriyle karşılaştırdılar. Cyg XR-1 (şimdi Cyg X-1 deniyor) kaynağı için X ışını şiddetinin (buna X ışını akısı diyoruz) 1 Ekim'de 14 Haziran'a göre beş kat daha düşük olduğunu buldular. Fakat bu gözlemin gerçek bir değişkenliği gösterip göstermediği açık değildi. Fisher'in grubu, Friedman'ın grubunun kullandığı dedektörlerin kendi kullandıkları dedektörlere kıyasla düşük enerjili X ışınlarına karşı çok daha fazla duyarlı olduğunu ve aradaki farkın bununla açıklanabileceğini belirtti.

1967'de Friedman'ın grubu önceki iki yıl boyunca tespit edilen otuz kaynağın X ışını akısını karşılaştırıp pek çok kaynağın gerçekten de şiddette farklılıklar gösterdiğini belirleyince mesele açıklığa kavuştu. Özellikle çarpıcı olan, Cyg X-1'deki değişkenlikti.

Nisan 1967'de, Avustralya'daki Ken McCracken'in grubu bir roket fırlatıp neredeyse Sco X-1 (bildiğimiz en parlak X ışını kaynağı) kadar parlak bir kaynak keşfetti, oysa bir buçuk yıl önce dedektörler aynı noktayı gözlemlediklerinde bu kaynak kendini göstermemişti. Bu "X ışını novası"nın (adı buydu) Washington D.C.'deki Amerikan Fizik Cemiyeti'nin bahar toplantısı sırasında duyurulmasından iki gün sonra, X ışını gökbilimindeki en seçkin öncülerden birisiyle telefonda yandım ve bana şunu söyledi: "O saçmalığa inanıyor musun?"

X ışınının şiddeti birkaç hafta sonra üç kat düşmüş, beş ay sonraysa en az elli kat azalmıştı. Bugünlerde bu kaynaklara yavan bir isimle "geçici X ışını kaynağı" diyoruz.

McCracken'ın grubu kaynağı, Güneyhaçı adıyla belki daha iyi bileceğiniz Crux takımyıldızında tespit etmişti. Bundan çok heyecanlanmışlardı ve bu keşif onlar için duygusal bir şeye dönüşmüştü, zira o takımyıldızın ta kendisi Avustralya bayrağındadır. Kaynağın yerinin hemen Güneyhaçı'nın dışında, Centaurus'ta olduğu ortaya çıkınca, baştaki Crux X-1 adı Cen X-2 oldu ve bizim Avustralyalılar büyük düş kırıklığına uğradı. Biliminsanları keşifleri hakkında çok duygusal davranabiliyor.

15 Ekim 1967'de George Clark'la birlikte, Avustralya, Mildura'dan kalkan bir balonun on saatlik uçuşu süresince Sco X-1'i gözlemledik ve önemli bir keşif yaptık. Bu keşif, Houston'daki NASA Uzay Merkezi'nde başarılı bir girişimden sonra herkesin alkışlayıp birbirine sarıldığı sahnelere hiç benzemiyordu. Onlar her şeyi bire bir gerçek zamanda görüyor. Bizimse gözlemimiz sırasında verilere erişimimiz hiç yoktu; sadece balonun dayanmasını ve donanımımızın pürüzsüz çalışmasını ümit ediyorduk, o kadar. Ve tabii teleskobu ve verileri nasıl geri getireceğimiz konusunda hep endişeleniyorduk. Bütün kaygıların ve heyecanın odaklandığı yer orasıydı.

Verilerimizi aylar sonra tekrar yurda dönüp MIT'ye geldiğimizde inceledik. Bir gece bilgisayar odasıydım, yanımda asistanım Terry Thorsos vardı. O günlerde MIT'deki bilgisayarlar çok büyüktü ve o kadar çok ısı üretiyorlardı ki odalarda klima çalıştırılıyordu. Gece on bir suları olduğunu hatırlıyorum. Bazı bilgisayar işleriniz varsa, akşamları, araya birkaç iş atmak için uygun oluyordu. O günlerde programlarınızı çalıştırmak için daima bir bilgisayar operatörüne ihtiyacınız vardı. Sıraya girdim ve sabırla beklemeye başladım.

İşte nihayet burada balon verilerine bakıyordum ki birdenbire Sco X-1'den gelen X ışını akısında büyük bir artış gördüm. Hemen orada, çıktıda, X ışını yaklaşık on dakika içinde dört kat yükseliyor ve otuz dakika kadar devam edip sonra alçalıyordu. Sco X-1'den bir X ışını parlaması gözlemlemiştik ve dev gibi bir şeydi. *Bu daha önce hiç gözlemlenmemiştir.* Normalde kendinize, "Bu ani parlama farklı bir şekilde açıklanabilecek bir şey mi? Acaba buna hatalı çalışan bir dedektör mü sebep oldu?" diye sorardınız. Ama bu olayda kafamda hiçbir şüphe yoktu. Aleti avcumun içi gibi biliyordum. Bütün hazırlıklarınıza ve testlerimize güveniyordum. Uçuş boyunca dedektörü sürekli yoklamış ve kontrol için de bilinen bir radyoaktif

kaynağın X ışını tayfını yirmi dakikada bir ölçmüştük – aletler kursuz çalışıyordu. Bu verilere yüzde yüz güveniyordum. Çıktıya bakınca X ışını akısının bir aşağı bir yukarı gittiğini görüyordum; o on saatlik uçuşta gözlemlediğimiz bütün kaynaklardan sadece bir tanesi yukarı fırlayıp aşağı inmişti, o da Sco X-1'di. Gerçekti!

Ertesi sabah George Clark'a sonuçları gösterdim, neredeyse koltuğundan düşüyordu. Bu alanı ikimiz de iyi biliyorduk; sevinçten uçtuk! Gözlemlemeyi bırakın hiç kimse böyle bir şeyi tahmin bile etmiyordu: bir X ışını akısında on dakikalık bir zaman ölçeğinde meydana gelen bir değişiklik. Cen X-2'den gelen akı, ilk tespitten sonraki birkaç hafta içinde üç kat azalmıştı, ama öte yanda on dakika içinde dört katlık bir değişkenlik vardı – yaklaşık üç bin kat daha hızlı.

Sco X-1'in, enerjisinin yüzde 99,9'unu X ışını olarak yaydığını, X ışını aydınlatma gücünün güneşimizin toplam aydınlatma gücünden yaklaşık 10.000 kat fazla olduğunu ve güneşin X ışını aydınlatma gücünün de yaklaşık 10 milyar katı olduğunu biliyorduk. Sco X-1'in on dakikalık bir zaman ölçeğinde eskisinin dört katı bir aydınlatma gücüne erişmesine gelince, bunu anlamamızı sağlayacak bir fizik yoktu. Güneşimizin on dakikada dört kat daha parlak olmasını nasıl açıkladınız? Benim ödümü patlatırdı.

Bu zaman ölçeğindeki değişkenliğin keşfi, X ışını gökbilimindeki –balonlarla yapılmış– en önemli keşif olabilir. Bu bölümde söz ettiğim gibi, roketlerin göremediği X ışını kaynaklarını da keşfettik, onlar da önemli keşiflerdi. Fakat başka hiçbir şey Sco X-1'in on dakikalık değişkenliğinin etkisini yapmadı.

O sıralarda o kadar beklenmedik bir şeydi ki bu, pek çok bilimsanını inanamadı. Biliminsanlarının bile sorgulaması zor, güçlü beklentileri olabiliyor. *Astrophysical Journal Letters*'in efsanevi editörü S. Chandrasekhar bizim Sco X-1 makalemizi bir dergi hakemine gönderdi ve hakem bizim bulgumuza hiç inanamadı. Üzerinden kırk yıldan fazla zaman geçmesine rağmen bunu hâlâ hatırlarım. Hakem şöyle yazmıştı: "Bu saçma bir şey, güçlü X ışını kaynaklarının on dakikalık bir zaman ölçeğinde değişim gösteremeyeceğini biliyoruz."

Makaleyi ikna yoluyla dergiye sokmak zorunda kaldık. Rossi de 1962'de aynı şeyi yapmak zorunda kalmıştı. *Physical Review Letters*'in editörü Samuel Goudsmit, X ışını gökbilimini kuran makaleyi kabul etmişti çünkü söz konusu olan Rossi'ydi ve daha sonra yaz-

dığı gibi, makalenin içeriği için "kişisel sorumluluk" almaya gönüllüydü.

Bugünlerde çok daha duyarlı aletlerimiz olduğundan, pek çok X ışını kaynağının *herhangi bir* zaman ölçeğinde değişkenlik gösterdiğini biliyoruz, yani bir kaynağı günbegün gözlemlerseniz, akısı her gün farklı olacaktır. Saniye saniye izlerseniz, yine değişecektir. Verilerinizi milisaniye milisaniye inceleseniz bile bazı kaynaklarda değişkenlik bulabilirsiniz. Fakat o sıralarda, on dakikalık değişkenlik yeni ve beklenmedikti.

MIT'de, Şubat 1968'de bu keşif hakkında bir konferans verdim ve dinleyenler arasında Riccardo Giacconi ve Herb Gursky'yi görmekten büyük heyecan duydum. Kendimi adeta bir yerlere gelmiş gibi hissettim, alanımda en ön safta bana yer verilmişti.

Sonraki birkaç bölümde sizi X ışını gökbiliminin çözdüğü bir sürü gizemle tanıştıracayım, bir de biz gökfizikçilerinin cevap bulmak için hâlâ boğuştuklarımızı. Nötron yıldızlarına yolculuk edip kara deliklerin derinliklerine daleceğiz. Şapkalarınızı sıkı tutun.

Kozmik Felaketler, Nötron Yıldızları ve Kara Delikler

Nötron yıldızları X ışını gökbilimi tarihinin tam göbeğindedir. Ve gerçekten, ama gerçekten muhteşemdirler. Yüzey sıcaklıkları sık sık bir milyon kelvin derecenin üzerine çıkar. Güneşimizin yüzeyinden yüz bin kattan daha fazla sıcak.

James Chadwick nötronu 1932'de keşfetti (bunun için 1935 Nobel Fizik Ödülü'nü aldı). Bu olağanüstü keşiften sonra –pek çok fizikçi bununla atom yapısı resminin tamamlandığını düşünüyordu– Walter Baade ve Fritz Zwicky nötron yıldızlarının süpernova patlamalarında oluştuğu hipotezini ileri sürdüler. Meğer tam üstüne basmışlar. Nötron yıldızları devasa bir yıldızın ömrü sona ererken görülen hakikaten kıyametvari olaylardan doğar: bilinen evrendeki en hızlı, en görkemli ve en dehşetli olaylardan biri – çekirdek çökmesi süpernovası.

Nötron yıldızı güneşimiz gibi bir yıldız olarak başlamaz, en az sekiz kat daha ağır bir yıldız olarak başlar. Galaksimizde aşağı yukarı bir milyar nötron yıldızı vardır, fakat galaksimizdeki her çeşitten toplam yıldız sayısına kıyasla bir milyar bile nadir olarak değerlendirilmelidir.

Dünyamızdaki –ve evrenimizdeki– pek çok nesne gibi, yıldızlar da muazzam güçlü kuvvetler arasında kaba bir denge tutturma yetisi sayesinde "yaşayabilir". Nükleer enerji yakan yıldızların merkezlerinde on milyonlarca kelvin dereceye varan sıcaklıklarda termonükleer tepkimeler meydana gelir ve bunların ürettiği devasa miktarda enerji yüzünden belli bir basınç oluşur. Güneşimizin merkezindeki

sıcaklık yaklaşık 15 milyon kelvin derecedir ve her saniye, bir milyar hidrojen bombasından daha fazlasına eşdeğer oranda enerji üretir.

Kararlı bir yıldızda bu basınç, yıldızın devasa kütesinin neden olduğu kütleçekimi tarafından gayet güzel dengelenir. Bu iki kuvvet –termonükleer fırının dışa dönük basıncı ve kütleçekiminin içe dönük çekme kuvveti– birbirini dengelemezse, o zaman yıldız kararlı olmaz. Örneğin güneşimizin bugüne kadar yaklaşık 5 milyar yıllık bir hayat yaşadığını ve aynı yolda bir 5 milyar yıl daha devam edeceğini biliyoruz. Yıldızlar ölmek üzereyken gerçekten değişirler, hem de görkemli şekillerde. Merkezlerindeki yakıtın büyük bir kısmını tükettiklerinde, çoğu, ilkin bir ateş gösterisiyle hayatının son evrelerine yaklaşır. Bu özellikle çok ağır yıldızlar için geçerlidir. Bir bakıma süpernovalar, tiyatrodaki tragedya kahramanlarına benzerler. Bu kahramanlar dev hayatlarını şiddetli bir duygu boşalımı içinde sona erdirirler; bazen ateşli, çoğunlukla gürültülü ve Aristoteles'in dediği gibi, seyircide acıma ve dehşet hissi uyandıran bir gösteridir bu.

En taşkın yıldız ölümü çekirdek çökmesi süpernovasıdır, evrendeki en büyük enerjili fenomenlerden biridir. Ona hakkını vermeye çalışacağım. Bu büyük kütleli yıldızların birinin çekirdeğindeki nükleer fırın kısılmaya başlayınca –hiçbir yakıt sonsuza dek dayanmaz– ve yarattığı basınç zayıflamaya başlayınca, geriye kalan kütle amansız, hiç bitmeyen çekim kuvveti onu alt eder.

Tükenen yakıtın bu süreci aslında bayağı karmaşık ama aynı zamanda da büyüleyicidir. Çoğu yıldız gibi, gerçekten büyük kütleli yıldızlar da başlangıçta hidrojen yakıp helyum oluştururlar. Yıldızlar nükleer enerjiyle beslenirler – fisyonla yani çekirdek bölünmesiyle değil, füzyonla yani çekirdek birleşmesiyle: Dört hidrojen çekirdeği (protonu), son derece yüksek sıcaklıklarda birleşerek bir helyum çekirdeğini oluşturur. Bu yıldızların hidrojeni bittiğinde merkezleri büzülür (kütleçekim kuvvetinden), bu da helyum çekirdeklerini birleştirerek karbon yapmaya yetecek sıcaklığı sağlar. Güneşin kütesinin yaklaşık on katından fazla kütesi olan yıldızlar, karbon yaktıktan sonra oksijen yakmaya, neon yakmaya, silikon yakmaya geçerler ve en nihayet demir bir çekirdek oluştururlar.

Her bir yakma döngüsünden sonra çekirdek küçülür, sıcaklığı artar ve bir sonraki döngü başlar. Her döngü bir önceki döngüden daha

az enerji üretir ve her döngü bir öncekinden daha kısa sürer. Örneğin (yıldızın tam kütesine bağlı olarak), hidrojen yakan döngü yaklaşık 35 milyon kelvin derecede 10 milyon yıl sürebilir, fakat son döngü, silikon döngüsü yaklaşık 3 milyar kelvin derecede sadece birkaç gün sürebilir! Her döngü sırasında, yıldızlar bir önceki döngünün ürettiğinin çoğunu yakar. Alın size geridönüşüm!

Bu silsilenin sonundaki silikon füzyonu demir üretir. Demir periyodik cetveldeki elementler içinde en kararlı çekirdeğe sahip olanıdır. Demirin füzyonuyla daha da ağır çekirdekler elde etmek enerji üretmez, enerji gerektirir; o yüzden enerji üreten fırın orada durur. Yıldız gitgide daha çok demir ürettikçe, demir çekirdek hızla büyür.

Bu demir çekirdek güneşin yaklaşık 1,4 katı bir kütleyle erişince, (büyük Chandra'nın adına istinaden) Chandrasekhar sınırı diye bilinen bir tür sihirli sınıra ulaşmış demektir. Bu noktada, merkezdeki basınç, kütleçekiminden gelen güçlü basınca karşı artık dayanamaz ve çekirdek kendi içine çökerek dışa dönük bir süpernova patlamasına sebep olur.

Bir zamanların azametli bir kalesini başı sonu görünmeyen bir ordunun kuşattığını ve dış surların ufalanıp yıkılmaya başladığını hayal edin. (*Yüzüklerin Efendisi*'ndeki bazı muharebe sahneleri geliyor insanın aklına, Orkların besbelli bitip tükenmeyen ordularının surları yarıp geçtikleri zamanki gibi.) Çekirdek milisaniyeler içinde çöker ve üzerine düşen madde –aslında fevkalade yüksek, ışık hızının yaklaşık dörtte birine denk düşen süratlerle içe doğru fırlar– içeri-rideki sıcaklığı 100 milyar kelvin derece gibi akıl almaz bir sıcaklığa yükseltir, güneşimizin çekirdeğinden yaklaşık on bin kat daha sıcak.

Yıldız güneşin kütesinin yaklaşık yirmi beş katından daha az kütleliyse (fakat güneşin kütesinden yaklaşık on kat da daha büyükse), çöküş, merkezinde yepyeni bir tür nesne yaratır: nötron yıldızı. Güneşin kütesinin sekiz ila yaklaşık on katı arasında kütesi olan tek yıldızlar da kendilerini ömürlerinin sonunda nötron yıldızı olarak bulurlar, fakat çekirdekteki nükleer evrimleri (burada ele alınmadı) yukarıdaki senaryodan farklılık gösterir.

Çöken çekirdeğin yüksek yoğunluğunda, elektronlar ve protonlar birleşir. Bir elektronun negatif yükü, bir protonun pozitif yükünü yok eder ve bunlar birleşerek bir nötron ve bir nötrino oluştururlar. Baştaki çekirdekler artık yoktur; bunlar ortadan kalkarak yoz nör-

ron maddesi diye bilinen bir kütleyle dönüşür. (Nihayet biraz cıfcaflı bir isim!) Karşı dengeleme basıncına verilen ada bayılıyorum: yoz nötron basıncı. Eğer bu müstakbel nötron yıldızı, yaklaşık 3 güneş kütesinden *daha* kütleli hale gelirse –başlangıçtaki yıldızın (ata yıldız deniyor) kütesi güneşin kütesinden yaklaşık yirmi beş kat büyük olduğunda durum budur– o zaman kütleçekimi yoz nötron basıncını bile alt eder. Peki sonra ne olur dersiniz? Tahmin edin.

Bildiniz. Doğru tahmin ettiğinizi anladım. Kara delikten başka ne olabilir? Maddenin bizim anlayabileceğimiz hiçbir şekilde var olamayacağı bir yer ortaya çıkar; yaklaşırsanız, kütleçekimi o kadar güçlüdür ki hiçbir ışına ondan kaçamaz: hiçbir ışık, hiçbir X ışını, hiçbir gama ışını, hiçbir nötrino, zinhar *hiçbir şey*. İkili yıldız sistemlerindeki evrim (bkz. bir sonraki bölüm) çok farklı olabiliyor, çünkü ikili yıldızlarda, büyük kütleli yıldızın kabuğu ilk evrelerde kalkabilir ve çekirdeğin kütesi tek yıldızda olduğu kadar hızlı büyümeyebilir. Bu durumda, başlangıçta güneşten kırk kat daha büyük olan bir yıldız bile nötron yıldızı olarak kalabilir.

Nötron yıldızlarını oluşturan ata yıldızları kara deliklerden ayrıran çizginin hiç belirgin olmadığını vurgulamak isterim; bu fark ata yıldızın kütesi dışında da pek çok değışkene bağlıdır – sözgelimi yıldızın dönüş devri de önemlidir.

Fakat neticede kara delikler gerçekten var–çılgın biliminsanlarının ve bilimkurgu yazarlarının uydurduğu bir şey değiller– ve inanılmaz derecede büyüleyiciler. X ışını evreniyle sıkı sıkıya ilintili olan kara deliklere tekrar geleceğim – size söz. Şu an için sadece şunu söyleyeyim: Sadece gerçek olmakla kalmıyorlar – muhtemelen evrende makul büyüklükteki her galaksinin çekirdeğini de oluşturuyorlar.

Tekrar çekirdek çökmesine dönelim. Nötron yıldızı oluşunca –unutmayın, burada milisaniyelerden söz ediyoruz– hâlâ çekirdeğe hücum etmeye çalışan yıldızın maddesi kelimenin tam anlamıyla geri teper, dışa doğru bir şok dalgası oluşturur, fakat geriye kalan demirin atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla tükenen enerjisi yüzünden bu dalga en sonunda durur. (Hatırlarsak, hafif elementler birleşip bir demir çekirdeğini oluşturduğunda enerji açığa çıkıyordu, bu yüzden bir demir çekirdeğini parçalamak enerji tüketecektir.) Elektronlar ve protonlar çekirdek çöküşü sırasında birleşip nötrona

dönüştüklerinde, nötrinolar da üretilir. Ayrıca, yaklaşık 100 milyar kelvin derecelik yüksek çekirdek sıcaklığında, termal nötrino denilen şeyler de üretilir. Nötrinolar çekirdek çöküşünde salınan bütün enerjinin yaklaşık yüzde 99'unu taşır (o da yaklaşık 10^{46} juldür). Geriye kalan yüzde 1 (10^{44} jul) büyük oranda yıldızın fırlatılmış madde sinin kinetik enerjisidir.

Neredeyse kütesiz ve yüksüz olan nötrinolar normalde hemen hemen her maddenin içinden geçip giderler, çoğu da çekirdekten kaçar. Ne var ki çevreleyen maddenin son derece yüksek yoğunluğu yüzünden, enerjilerinin yaklaşık yüzde 1'ini maddeye aktarırlar, o madde de saniyede 20.000 kilometreye varan hızlarla fırlatılıp atılır. Bu maddenin bir kısmı patlamadan binlerce yıl sonra görülebilir – buna süpernova kalıntısı diyoruz (Yengeç bulutsusu gibi).

Süpernova patlamaları baş döndürücüdür; azami parlaklıktaki optik aydınlatma gücü yaklaşık 10^{35} jul/saniyedir. Bu da güneşimizin aydınlatma gücünün 300 milyon katıdır. Galaksimizde böyle bir süpernova meydana geldiğinde göklerdeki müthiş manzaralardan birini oluşturur (ortalama, yüzyılda sadece yaklaşık iki kere meydana gelir). Bugünlerde tam otomatik teleskopların kullanımıyla, görece yanı başımızda bulunan çok sayıda galakside her yıl sayıları yüzlerce den başlayıp bine kadar uzanan süpernova keşfediliyor.

Çekirdek çökmesi süpernovası, güneşimizin son 5 milyar yılda ürettiği enerjinin iki yüz katı enerji yayar ve bütün bu enerji kabaca 1 saniye içinde açığa çıkar – yüzde 99'u da nötrinolarla gelir!

1054 yılında olan da buydu ve patlama göklerdeki son bin yıldaki en parlak yıldızı yarattı – o kadar parlak ki gökyüzünde gündüz bile haftalarca görülebildi. Yıldızlararası panoramada gerçek kozmik bir flaş olan süpernova, gaz soğuyup dağıldığından birkaç yıl içinde sönüp gider. Gaz ortadan kalkmaz gerçi. 1054'teki sadece bir nötron yıldızı yaratmadı, Yengeç bulutsusunu da yarattı. Bu bulutsu tüm gökyüzündeki dikkate değer ve hâlâ değişmekte olan nesnelerden biridir ve yeni veriler, olağanüstü resimler ve gözlemsel keşifler açısından neredeyse bitmek bilmez bir kaynaktır. Başı sonu belli olmayan bir zaman ölçeğinde –milyonlarca, milyarlarca yıl– daha çok jeolojik olarak düşündüğümüz o kadar fazla gök faaliyeti oluyor ki, gerçekten hızlı, saniye ölçeğinde, dakika ölçeğinde hatta yıl ölçeğinde meydana gelen bir şey bulunca özellikle heyecanlanıyo

ruz. Yengeç bulutsusunun bölümleri iki-üç günde bir şekil değiştiriyor; Hubble Uzay Teleskobu ve Chandra X Işını Gözlemevi, Süpernova 1987A'nın (Büyük Macellan Bulutu'nda yer alıyor) kalıntısının da bizim görebileceğimiz gibi şekil değiştirdiğini keşfetti.

Dünyadaki üç farklı nötrino gözlemevi Süpernova 1987A'dan aynı anda nötrino patlamaları yakaladı, buradan çıkan ışıklar bize 23 Şubat 1987'de ulaştı. Nötrinoların tespiti o kadar zor ki, bu üç alet on üç saniyede toplamda sadece yirmi beş tanesini tespit etti: o süre boyunca dünyanın doğrudan süpernovaya dönük yüzeyinin her metrekaresine yağmur gibi yağın kabaca 300 trilyon (3×10^{14}) nötrinodan sadece yirmi beş tanesini. Süpernova başlangıçta üç aşağı beş yukarı 10^{58} nötrino fırlattı, neredeyse akıl almaz yükseklikte bir rakam; fakat dünyaya olan büyük mesafeyi dikkate alırsak (yaklaşık 170.000 ışık yılı), "sadece" 4×10^{28} nötrino –yani on üzeri otuz kat daha azı– dünyaya ulaştı ve bunun da yüzde 99,9999999'undan fazlası dosdoğru dünyanın içinden geçip gitti. Nötrinoların yaklaşık yarısını durdurmak için bir ışık yılı (10^{13} kilometre) kalınlığında kurşun tabakası gerekirdi.

Süpernova 1987A'nın atası yirmi bin yıl kadar öncesinde bir gaz yumağı fırlatmış, o da yıldızın etrafında halkalar oluşturmuştu. Bu halkalar süpernova patlamasından yaklaşık 8 ay sonrasına kadar görünmez olarak kalmıştı. Fırlatılmış gazın hızı görece yavaştı –sadece 8 kilometre/saniye civarı– fakat yıllar geçtikçe bu yumağın yarıçapı yaklaşık bir ışık yılının üçte ikisine ulaşmıştı, 8 ışık ayı civarına.

Süpernova patladıktan yaklaşık sekiz ay sonra, patlamadan çıkan kızılötesi ışık (ışık hızıyla yol alıyor tabii) madde halkasına yetişip adeta elektrik düğmesine bastı – ve halka görünür ışık yaymaya başladı. SN 1987A'nın bir resmini fotoğraflar bölümünde görebilirsiniz.

Ama dahası da var, hem de X ışınlarını içeriyor. Patlamada süpernova tarafından dışarı atılan gaz saniyede yaklaşık 20.000 kilometre hızla gidiyordu, bu da ışık hızından sadece on beş kat küçüktür. Halkanın şu âna dek ne kadar yol katettiğini bildiğimizden, atılmış maddenin halkaya ne zaman çarpması gerektiğini de yaklaşık olarak tahmin etmemiz mümkündür. Madde on bir yıldan birazcık fazla süre sonra X ışını üreterek halkaya çarpmıştı. Tabii hiç unutmamanız gereken nokta şu ki, bu olay sanki son otuz-kırk yılda

meydana gelmiş gibi konuşsak da, gerçekte SN 1987A Büyük Macellan Bulutu'nda bulunduğundan, her şey 170.000 yıl önce oldu.

SN 1987A'nın kalıntısında bugüne kadar hiçbir nötron yıldızı tespit edilmemiştir. Bazı gökfizikçileri, bir nötron yıldızının ilk oluşumundan sonra çekirdek çöküşü sırasında bir kara deliğin oluşmasına inanırlar. 1990'da Santa Cruz'daki California Üniversitesi'nden Stan Woosley'yle bir bahse girdim; kendisi bir süpernova uzmanıdır. Beş yıl içinde bir nötron yıldızının bulunup bulunmayacağı konusunda bahis tutuştuk. Yüz dolarlık bahsi kaybettim.

Bu olağanüstü fenomenlerin ürettiği başka şeyler de var. Süpernovanın süpersıcak fırınında, üst düzey nükleer füzyonlar çekirdekleri birbirleriyle çarpıştırıp demirden çok daha ağır elementler oluşturur, bunlar da zamanla bir araya gelip çökerek yeni yıldızlar ve gezegenler oluşturabilecek gaz bulutlarında alırlar soluğu. Biz insanlar ve bütün hayvanlar yıldızlarda pişmiş elementlerden meydana geliriz. Bu yıldız fırınları olmadan, bu baş döndürücü şiddette patlamalar olmadan –ilki büyük patlamanın kendisi– periyodik cetvelde gördüğünüz elementlerin bu zenginliğine sahip olmazdık. Belki çekirdek çökmesi süpernovasını gökteki bir orman yangınına benzetebiliriz (tabii küçük bir yangın); bir yıldızı yakıp bitirmesi yeni yıldız ve gezegenlerin doğum koşullarını hazırlıyor.

Nereden baksanız, nötron yıldızları uç nesnelerdir. Çapları topu topu on beş-yirmi kilometredir, Mars'la Jüpiter arasında yörüngede dolaşan bazı asteroitlerden küçük, güneşten de yaklaşık yüz bin kere daha küçük, dolayısıyla da güneşin ortalama özgül ağırlığından yaklaşık 300 milyar (3×10^{14}) kat daha yoğundur. Bir çay kaşığı kadar nötron yıldızı maddesi dünyada 100 milyon ton gelir.

Nötron yıldızlarının çok sevdiğim bir yanı, sırf adlarını söylemenin ya da yazmanın bile fizikteki iki uç noktayı –minicik olanla devasa olanı– birbiriyle buluşturmasıdır: asla göremeyeceğimiz kadar küçük şeyler ve beyin kapasitemizi zorlayacak derecede yoğun kütleler.

Nötron yıldızları döner, bazıları şaşırtıcı hızlarda, özellikle de yeni doğduklarında. Neden? Kollarını açıp kendi etrafında dönen bir buz patencisinin kollarını içeri çektiğinde daha hızlı dönmesiyle aynı sebepten. Fizikçiler bunu açısal momentumun korunduğunu söyleyerek tarif ediyorlar. Açısal momentumu ayrıntılı anlatmak bir

parça zor, fakat fikir olarak kavraması kolay.

Bunun nötron yıldızlarıyla ilgisi ne? İşte şu: Evrendeki her nesne döner. O halde, çöküp nötron yıldızına dönüşen yıldız da zaten dönmektedir. Maddesinin büyük kısmını patlamada üstünden atmış fakat bir-iki güneş kütlesine eşdeğer bir kütleyi korumuştur ve bu madde çöküş öncesi çekirdeğinin büyüklüğünden birkaç bin kat daha küçük bir nesnede yoğunlaşmış olarak bulunur. Açısal momentum korunduğu için de nötron yıldızlarının dönme frekanslarının en azından bir milyon kat yükselmesi gerekir.

Jocelyn Bell tarafından keşfedilen ilk iki nötron yıldızı (birazdan buna geleceğiz) kendi eksenlerinde yaklaşık 1,3 saniyede dönerler. Yengeç bulutsusundaki nötron yıldızı saniyede yaklaşık 30 kere döner; öte yandan, bugüne kadar bulunanlar içinde en hızlısı saniyede şaşırtıcı bir devirle 716 kere döner! Bunun anlamı, yıldızın ekvator-daki hızının, ışık hızının yaklaşık yüzde 15'i olmasıdır!

Bütün nötron yıldızlarının dönmesi ve pek çoğunun önemli manyetik alanlarının olması atarca –nabız atar gibi yanıp sönen yıldız– denilen önemli bir yıldız fenomenine sebep olur. Atarcalar, manyetik kutuplarından radyo dalgası demetleri yayan nötron yıldızlarıdır. Bu kutuplar, yani yıldızların çevresinde döndüğü eksenin iki ucu, dünyada da olduğu gibi, coğrafi kutuplardan belirgin biçimde farklıdır. Atarcanın radyo dalgası demetleri yıldız dönerken gökleri bir uçtan ötekine tarar. Bu demetin yolundaki bir gözlemciye, yıldız düzenli aralıklarla göz kırpar, gözlemci bu ışık demetini sadece kısa bir süre görür. Gökbilimciler buna bazen malum sebeplerden deniz feneri etkisi der. Bilinen yarım düzine tek nötron yıldızı vardır. Fakat bunlar radyo dalgaları, görünür ışık, X ışınları ve gama ışınlarını da içine alan, elektromanyetik tayfta son derece geniş bir aralık üzerinde titreşen ikili yıldız sistemlerindeki nötron yıldızlarıyla karıştırılmamalıdır. Yengeç bulutsusundaki atarca onlardan biridir.

İlk atarcayı 1967'de, Cambridge'de lisansüstü öğrencisiyken Jocelyn Bell keşfetti. Bell ve danışmanı Antony Hewish, önce bu atımların düzenliliğine –sadece yaklaşık 0,04 saniye sürüyor ve yaklaşık 1,3373 saniye aralıkla oluyordu (buna atarca periyodu denir)– ne anlam vereceklerini bilemediler. Başlangıçta bu atarcaya, düzenli göz kırpışların dünya dışındaki bir hayatın ürünü olabileceğini ima ederek, "Little Green Men" (Küçük Yeşil Adamlar) karşılığı, LGM-1

adını verdiler. Kısa bir süre sonra Bell tarafından periyodu yaklaşık 1,2 saniye olan ikinci bir LGM daha keşfedildi ve bu atımların dünyaya dışındaki canlılar tarafından üretilmediği anlaşıldı – birbirinden tamamen farklı iki uygarlık, yaklaşık aynı periyotla dünyaya neden sinyal göndersindi? Bell ve Hewish sonuçlarını yayımladıktan kısa bir süre sonra Cornell Üniversitesi'nden Thomas Gold tarafından atarcaların dönen nötron yıldızları olduğu onaylandı.

Kara Delikler

Size buraya geleceğimizi söylemiştim. Bu tuhaf nesnelere doğrudan bakmanın nihayet vakti geldi. İnsanların bunlardan neden korkabildiklerini anlıyorum – YouTube'da biraz zaman geçirirseniz, kara deliklerin nasıl bir şey olabileceğini gösteren onlarca "yeniden canlandırma" videosu görebilirsiniz, çoğu da "yıldızların ölümü" ya da "yıldız yiyciler" kategorisinde. Popüler hayal gücüne göre kara delikler, doymak bilmeyen midesine her şeyi indiren süper güçlü kozmik düdenlerdir.

Fakat süperkütleli kara deliklerin bile çevrelerindeki her şeyi çekip yuttukları iddiası tam bir safsatadır. Başta yıldızlar olmak üzere her tür nesne, yıldız kütleli bir kara deliğin ve hatta son derece kararlı bir süperkütleli kara deliğin bile yörüngesinde dönecektir. Aksi halde, bizim kendi Samanyolu'muz da merkezindeki 4 milyon güneş kütleli dev kara deliğin içinde kaybolup giderdi.

Peki bu garip yaratıklar hakkında ne biliyoruz? Nötron yıldızı, kütleçekim kuvveti onu çökertip kara delik yapmadan önce yaklaşık 3 güneş kütleline kadar bir kütleyle sahip olabilir. Eğer nükleer enerji yakan başlangıçtaki tek yıldız güneşin kütlelerinin yaklaşık yirmi beş katından daha büyük bir kütleyle sahipse, çekirdek çökmesinde madde nötron yıldızı evresinde durmayıp çökmeye devam edecektir. Sonuç? Kara delik.

Kara deliklerin ikili yıldız sistemlerinde eşleri varsa, görünen eşleri üzerindeki kütleçekim etkilerini ölçebiliriz ve bazı nadir durumlarda kütlelerini bile belirleyebiliriz. (Bu sistemleri gelecek bölümde anlatacağım.)

Kara delikte bir yüzey yerine, gökbilimcilerin olay ufku dedik-

leri şey vardır. Bu uzamsal sınırdaki kara deliğin kütleçekim gücü o kadar büyüktür ki, elektromanyetik ışığa bile kütleçekim alanından kaçamaz. Bunun çok anlamlı gelmediğinin farkındayım, o yüzden, kara deliği lastik bir tabakanın ortasında duran ağır bir top gibi hayal etmeye çalışın. Merkezin bel vermesine sebep olur, değil mi? Elinizin altında lastik tabaka yoksa, eski bir çorap ya da atılacak bir külotlu çorabı deneyebilirsiniz. Mümkün olduğunca büyük bir kare kesin ve ortasına bir taş koyun. Sonra bu kareyi kenarlardan yukarı kaldırın. Taşın bir huni biçiminde, kasırganın burgusuna benzeyen bir çöküntü yarattığını hemen görürsünüz. İşte, dört boyutlu uzay-zamanda meydana gelen şeyi siz üç boyutta yaratmış oldunuz. Fizikçiler bu çöküntüye kütleçekim kuyusu der, çünkü bu çöküntü kütleçekiminin uzay-zaman üzerindeki etkisinin bir taklididir. Taşın yerine büyük bir kaya koyarsanız, daha derin bir kuyu yaratmış olursunuz, böylece uzay-zamanı daha kütleli bir nesnenin daha fazla eğip bükeceğini göstermiş olursunuz.

Sadece üç uzay boyutunu düşünebildiğimiz için büyük kütleli bir yıldızın dört boyutlu uzay-zamandan nasıl bir huni yapacağını gerçekten gözümüzde canlandıramayız. Bize kütleçekimini böyle düşünmeyi öğreten Einstein'dı. Einstein kütleçekimini bir geometri meselesine dönüştürdü, ama sizin lisede öğrendiğiniz geometriye değil.

Külotlu çorap deneyi birçok sebepten ideal değil –eminim pek çoğunuz rahat bir nefes almışsınızdır– fakat ana sebep, bir kayanın yarattığı kütleçekimi kuyusu etrafındaki kararlı bir yörüngede bir bilyeyi gerçekten hayal edemeyeceğinizdir. Ama gerçek gökbilim hayatında pek çok nesne, milyonlarca, hatta milyarlarca yıl büyük kütleler etrafında kararlı yörüngelere yerleşirler. Dünyanın yörüngesinde dönen ayı düşünün, güneşin yörüngesinde dönen dünyayı, kendi galaksimizde yörüngede dönen güneş ve 100 milyar başka yıldızı.

Öte yandan bu uygulamalı anlatım bir kara deliği gözümüzde canlandırmamızı sağlar. Örneğin nesnenin kütlesi arttıkça, kuyunun derinliğinin, kenarların sarplığının arttığını, dolayısıyla da kuyudan dışarı çıkabilmek için daha fazla enerji gerektiğini görebiliriz. Büyük kütleli bir yıldızın kütleçekiminden kaçan elektromanyetik ışımının bile enerjisi düşer, yani frekansı azalır ve dalga boyu uzar. Elektromanyetik tayfta daha az enerjili uca kaymaya kızıla kayma

dendiğini zaten biliyorsunuz. Tıkız bir yıldızda (büyük kütleli ama küçük) kütleçekiminin sebep olduğu bir kıızıla kayma vardır. Buna kütleçekimsel kıızıla kayma diyoruz (Doppler etkisinden oluşan kıızıla kaymayla karıştırılmamalı – bkz 2. Bölüm ve önümüzdeki bölüm).

Bir gezegenin ya da yıldızın yüzeyinden kaçmak ve tekrar hiç geriye düşmemeyi garantilemek için asgari bir hıza ihtiyacınız var. Buna kaçış hızı diyoruz, dünya için bu yaklaşık 11 kilometre/saniyedir (saatte yaklaşık 40.000 kilometre). Bu yüzden, dünyaya bağlı bütün uydular saniyede 11 kilometreden daha fazla hıza asla çıkamazlar. Kaçış hızı arttıkça, kaçmak için gereken enerji de artar, çünkü bu, hem kaçmak isteyen nesnenin kaçış hızına hem de kütlesi m' ye bağlıdır (gereken kinetik enerji $\frac{1}{2}mv^2$ 'dir).

Kütleçekimi kuyusunun çok, çok derin olması durumunda, kuyunun dibinden kaçış hızının ışık hızından bile büyük olabileceğini belki tahmin edebilirsiniz. Bu da mümkün olmadığından, çok derin bir kütleçekimi kuyusundan hiçbir şey kaçamaz, elektromanyetik ışıma bile.

Karl Schwarzschild adında bir fizikçi Einstein'ın genel görelilik denklemlerini çözüp, belli bir kütleyle sahip bir kürenin, hiçbir şeyin kaçamayacağı derinlikte bir kuyu –kara delik– yaratması için ne büyüklükte bir yarıçapa sahip olması gerektiğini hesapladı. Bu yarıçapa Schwarzschild yarıçapı diyor ve büyüklüğü nesnenin kütlesine bağlı. Bu, olay ufku dediğimiz şeyin yarıçapıdır.

Denklemin kendisi nefes kesici derecede basittir, fakat sadece dönmeyen kara delikler için geçerlidir ve çoğunlukla Schwarzschild kara delikleri diye anılır.* Denklem çok iyi bilinen sabitleri içerir ve yarıçap da her güneş kütlesi için 3 kilometreden biraz daha az çıkar. Bir kara deliğin büyüklüğünü –yani olay ufkunun yarıçapını– bu şekilde hesaplayabiliyoruz. Örneğin kütlesi 10 güneş kütlesine denk olan bir kara deliğin büyüklüğü yaklaşık 30 kilometredir. Dünyanın kütlesindeki bir kara deliğin olay ufkunun yarıçapını da hesaplayabiliriz –1 santimetreden birazcık daha az– fakat böyle kara deliklerin varlığına dair hiçbir kanıt yok. O halde güneşimizin kütlesi, çapı

* Dönen kara delikler için olay ufku küre biçiminde değil, kutuplardan basıktır – ekvatoru daha şişkindir.

6 kilometre olan bir küreye sıkıştırılıysaydı bir nötron yıldızı gibi olur muydu? Hayır – bu kadar küçük bir küreye sokuşturulmuş bu büyüklükteki kütlemin kütleçekimi etkisi altında, güneşin maddesi çöküp bir kara deliğe dönüşürdü.

Einstein'dan çok önce, 1748'de, İngiliz filozof ve yerbilimci John Michell, ışığın kaçamayacağı kadar büyük kütleçekimine sahip olan yıldızların var olabileceğini göstermişti. Michell basit Newton mekaniği kullandı (bunu şimdi benim birinci sınıf öğrencilerimin hepsi otuz saniyede yapar) ve Schwarzschild'la aynı sonuca vardı: Bir yıldızın kütlesi, güneşin kütesinin N katıysa ve yarıçapı $3N$ kilometreden azsa, ışık kaçamaz. Einstein'ın genel görelilik kuramının basit bir Newtoncu yaklaşımla aynı sonucu vermesi kayda değer bir tesadüf.

Küresel olay ufkunun merkezinde, fizikçilerin tekillik (*singularity*) dediği şey yatar, sıfır hacimli ve sonsuz yoğunlukta bir nokta, sadece denklemlerde sonucu gösteren ama kavranması mümkün olmayan acayip bir şey. Tekillikğin nasıl bir şey olduğu konusunda –hayal gücümüzü zorlamamıza rağmen– kimsenin bir fikri yok. Tekilliği ele alabilecek bir fizik (henüz) yok.

İnternette her yerde kara deliklerin animasyon görüntüleri var, çoğu hem güzel hem korku salıyor, fakat hemen hemen hepsi inanılmaz ölçüde büyük ve kozmik ölçekte bir yıkımı ima ediyor. O yüzden gazeteciler dünyanın en büyük hızlandırıcısı olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın (LHC; Cenevre yakınlarındaki CERN'de bulunuyor) bir kara delik yaratma ihtimalini yazmaya başlayınca, bilimle uğraşmayan insanlar arasında, bu fizikçiler gezegenin geleceğiyle kumar oynuyor diye epey bir endişeye sebep oldular.

Gerçekten de öyle miydi? Diyelim ki kazara bir kara delik *yaratılır* – dünyayı yiyip bitirmeye mi başladılar? Bunu oldukça kolay hesaplayabiliriz. LHC'de 30 Mart 2010'da birbirine zıt proton demetlerinin çarpıştırıldığı enerji seviyesi 7 teraelektron voltu (TeV), 7 trilyon elektron volt, her bir demete 3,5 trilyon. En nihayetinde, LHC'deki biliminsanları 14 TeV'lik çarpışmalar planlıyorlar, bugün mümkün olanın çok ötesinde. Protonun kütlesi $1,6 \times 10^{-24}$ gram. Fizikçiler sık sık bir protonun kütesinin (m) yaklaşık 1 milyar elektron volt olduğunu söyler, o da 1 GeV'dir. Tabii GeV enerjidir, kütle değil, fakat $E = mc^2$ olduğundan (c ışık hızı), E genellikle "kütle" olarak anılır.

Massachusetts paralı yolunda "Yolculukla İlgili Danışmak için 511'i arayın" yazan levhalar var. Bunlardan birini her gördüğümde elektronlar gelir aklıma, çünkü bir elektronun kütlesi 511 keV'dir.

14 TeV'lik çarpışmanın bütün enerjisinin bir kara delik yaratmaya gittiğini varsaysak, bir protonun kütlesinin 14.000 katı bir kütle-ye, yani yaklaşık 2×10^{-20} grama sahip olurdu. Dünya kadar fizikçi ve bilimsel hakem heyeti bu sorun üzerine dağlar gibi literatür taramıştı, sonuçlarını yayımladı ve endişelenmeye hiç gerek olmadığı sonucuna vardı. Nedenini bilmek istiyorsunuz, değil mi? Peki, işte ileri sürülen savlar.

Birincisi, LHC'nin böyle minik kara delikler (mikro kara delik diye bilinir) yaratmaya yetecek enerjiye sahip olması senaryoları, büyük ekstra boyutlar denilen bir kurama dayalıdır ve söylenebilecek en hafif şey, bu kuramın epey spekülatif olduğudur. Bu kuram deneysel olarak ispatlanmış her şeyin çok uzağındadır. O yüzden, daha en başta mikro kara delik yaratma ihtimali bile son derece zayıftır.

Açıkça görüldüğü gibi buradaki endişe, mikro kara deliklerin bir şekilde, kararlı "toplayıcılar" (*accretors*) –madde toplayabilen, kendi üzerlerine çekip büyüyeabilen nesneler– olup yanı başındaki maddeyi (ve en nihayet dünyayı da) hapur hupur yutmaya başlayacağıdır. Fakat kararlı mikro kara delik diye bir şey olsaydı, nötron yıldızlarına ve beyaz cücelere çarpan devasa enerjili kozmik ışınlar (ki bunlar var) tarafından çoktan yaratılmış olurdu ve nötron yıldızlarıyla beyaz cücelerin bünyesinde bulunurdu. Halbuki beyaz cücelerle nötron yıldızları, milyonlarca ve hatta milyarlarca yıllık zaman ölçeklerinde kararlı göründüklerinden, ortalıkta onları içeriden yiyip bitiren hiçbir minik kara delik yok gibi. Başka bir deyişle, kararlı mikro kara delikler sıfır tehdit oluşturuyor.

Öte yandan, ekstra boyutlar kuramı olmadan, 2×10^{-5} gramdan (Planck kütlesi) daha küçük kara deliklerin yaratılması bile mümkün değil. Yani bu kadar küçük kütleli kara delikleri ele alacak hiçbir fizik yok (henüz); bir kuantum kütleçekimi kuramına ihtiyacımız var, o da yok. Şu halde 2×10^{-20} gramlık bir kara delik için Schwarzschild yarıçapının ne olacağı sorusu da anlamsız.

Stephen Hawking kara deliklerin buharlaşabileceğini göstermiştir. Bir kara deliğin kütlesi azaldıkça, buharlaşma hızı artar. 30 güneş kütleli bir kara delik yaklaşık 10^{71} yılda buharlaşırdı. 1 milyar

güneş kütleli süper büyük bir kara delik yaklaşık 10^{93} yıl dayanırdı! Şimdi, 2×10^{-5} gram kütleli bir mikro kara deliğin buharlaşması ne kadar zaman alırdı diye sorabilirsiniz. Harika bir soru, fakat kimse cevabını bilmiyor – Hawking'in kuramı, Planck kütlelerinin altındaki kara delik kütleleri alanında işe yaramıyor. Fakat sırf merakınızı gidermek için söyleyeyim: 2×10^{-5} gramlık bir kara deliğin ömrü yaklaşık 10^{-39} saniyedir. O halde, görünüşe göre, onları meydana getirmek için gereken süreden daha hızlı buharlaşıyorlar. Başka bir deyişle, meydana getirilmeleri bile mümkün değil.

Açıkça görülen o ki, olası 2×10^{-5} gramlık LHC mikro kara deliklerinden kaygılanmak yersiz.

Fakat bunun LHC faaliyete geçmesin diye açılan davaları önlemediğinin farkındayım. Biliminsanlarıyla insanların geri kalan kısmı arasındaki mesafe ve biz biliminsanlarının, yaptığımız şeyi açıklamada çuvallayışımız beni kaygılandırıyor. Dünyadaki en iyi fizikçiler meseleyi inceleyip neden hiçbir tehdit oluşturmayacağını açıkladığı halde bile, gazeteciler ve politikacılar senaryolar uydurup, neredeyse hiçbir dayanağı olmadan halkın korkularını körüklediler. Bilimkurgunun bazı seviyelerde bilimden daha etkili olduğu görülüyor.

Bir kara delikten daha tuhaf bir şey yok galiba. Nötron yıldızı hiç değilse yüzeyiyle kendini ortaya koyuyor. Nötron yıldızı bir biçimde diyor ki, "İşte buradayım ve bir yüzeyim olduğunu size gösterebilirim." Kara deliğin yüzeyi yoktur ve hiçbir şey yaymaz (hiçbir zaman gözlemlenmemiş olan Hawking ışıması hariç).

Toplama diski diye bilinen yassımsı, madde halkasıyla çevrili bazı kara deliklerin (bkz. sonraki bölüm), toplama diskiye dik ama olay ufkunun içinden gelmeyen aşırı yüksek enerjili parçacık püskürmeleri göndermesi, çözülmemiş büyük gizemlerden biridir. Şu resme bir göz atın: www.wired.com/wiredscience/2009/01/spectacular-new/.

Bir kara deliğin olay ufkunun içi hakkındaki her şeyi matematiksel olarak çıkarmak zorundayız. Hiçbir şey kara delikten dışarı çıkamadığından, kara deliğin içinden hiçbir haber almıyoruz – esp-rili bazı fizikçiler "kozmetik sansür" diyor buna. Kara delik kendi mağarası içine gizlenmiştir. Olay ufkunun içine bir kere düştünüz mü,

bir daha asla geri çıkamazsınız – dışarıya sinyal bile gönderemezsiniz. Süper kütleli bir kara deliğin olay ufkunun içine düşmüşseniz, olay ufkunu geçtiğinizin farkına bile varmazsınız. Üzerinden geçip gideceğiniz bir hendek, duvar ya da çıkıntılı bir kaya tabakası yoktur. Ufku geçince, etrafınızdaki hiçbir şey birdenbire değişmez. Burada geçerli olan görelilik fiziğine rağmen, kol saatinize bakarsanız saatin durduğunu veya daha hızlı ya da daha yavaş çalıştığını görmezsiniz.

Sizi uzaktan seyreden biri içinse durum çok farklıdır. Onların gördükleri siz değilsiniz; onların gözleri, bedeninizi bırakıp, kara deliğin kütleçekimi kuyusundan dışarı tırmanan ışığın taşıdığı siz'in *görüntülerinizi* almaktadır. Siz ufka gitgide yaklaştıkça kuyu da gitgide derinleşir. Işığın kuyudan çıkabilmesi için enerjisinden biraz daha harcaması gerekir ve karşısına gitgide daha çok kütleçekimsel kıvrımla kayma çıkar. Bütün yayılmış elektromanyetik ışıma giderek daha uzun dalga boylarına (daha düşük frekanslara) kayar. Siz de giderek daha kırmızı görünür ve sonunda gözden kaybolursunuz, zira sizden gelen ışınların dalga boyu gitgide uzar (kızılötesi ışık gibi), daha uzun radyo dalgalarına dönüşür ve bütün dalga boyları siz olay ufkunu geçerken sonsuza erişir. Yani daha eşiği geçmeden bile uzaktaki gözlemci için fiilen gözden kaybolursunuz.

Uzaktaki gözlemci gerçekten hiç akla gelmeyen bir şeyi de ölçer: Işık kara deliğe yakın bir bölgeden geliyorsa daha yavaş yol alır! Bu durum göreliliğin herhangi bir önermesini ihlal etmez: Kara deliğe yakın yerel gözlemciler ışığı hep aynı c hızında ölçer (yaklaşık 300.000 kilometre/saniye). Fakat uzaktaki gözlemciler ışığın hızını c 'den daha az ölçer. Uzaktaki gözlemcinize doğru yaydığınız ışıkla taşınan görüntülerinizin ona gitmesi, siz bir kara deliğin yakınında değilkenkine göre daha uzun zaman alır. Bunun çok ilginç bir sonucu olur: Gözlemci sizin ufka yaklaşırken yavaşladığınızı görür! Hatta sizin görüntülerinizin ona gitmesi gitgide daha uzun sürer, o yüzden sizinle ilgili her şey ağır çekimdeymiş gibidir. Dünyadaki bir gözlemci için hızınız, hareketleriniz, saatiniz, hatta kalp atışlarınız, siz olay ufkuna yaklaşırken yavaşlar ve ulaştığınızda da tamamen durur. Ufka yakın yaydığınız ışık kütleçekimsel kıvrımla kaymadan dolayı görünmez olmasaydı, bir gözlemci sizi ufkun yüzeyinde ebediyen "donmuş" olarak görürdü.

Kolaylık olsun diye Doppler etkisini gözardı ediyorum, yoksa, siz olay ufkuna yaklaşırken sürekli artan hızınızdan dolayı bu etki fevkalade büyük olacaktır. Aslında, olay ufkunu geçerken ışık hızıyla hareket ediyor olursunuz. (Dünyadaki bir gözlemci için bu Doppler kaymasının etkisi, kütleçekimsel kızıla kaymanın etkilerine benzer olacaktır.)

Siz olay ufkunu geçtikten sonra, dış dünyayla artık iletişim kuramayacağınız zaman, hâlâ dışarıyı görebilirsiniz. Olay ufkunun dışından gelen ışık kütleçekimsel olarak daha yüksek frekanslara ve daha kısa dalga boylarına kayar, o yüzden maviye kaymış bir evren görürsünüz. (Bir nötron yıldızının yüzeyinde durabilseydiniz orada da aynı şey olurdu, aynı sebepten.) Ne var ki büyük bir hızla içeriye düştüğünüz için dış dünya sizden uzaklaşır, böylece dış dünya da kızıla kayar (Doppler etkisinin sonucunda). O zaman sonuç ne olur? Maviye kayma mı kazanır yoksa kızıla kayma mı? Yoksa hiçbirini mi kazanmaz?

Colorado Üniversitesi'ndeki gökbilim laboratuvarı JILA'dan, kara delikler konusunda dünya çapında otorite olan Andrew Hamilton'a sordum, tahmin ettiğim gibi cevap o kadar basit değil. Serbest düşen bir nesne için maviye kayma ve kızıla kayma birbirlerini yok ediyor, fakat dış dünya yukarıda kızıla kaymış, aşağıda kızıla kaymış ve yatay yönlerde maviye kaymış görünüyor. (Bir kara delik içine düşen nesne olmak nasıl bir şey görmek için Hamilton'ın "Bir Schwarzschild kara deliğine yolculuk" filmlerine bakmak hoşunuza gidebilir: jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/schw.html.)

Ayakta duracak bir yer olmazdı yalnız, çünkü hiç yüzey yok. Kara deliği yaratmış maddenin tümü çöküp bir noktaya, bir tekilliğe dönüşmüştür. Peki ya gelgit kuvvetleri – başınızdaki ve ayak uçlarındaki kütleçekim kuvveti arasında fark olacağından dolayı lime lime olmaz mıydınız? (Dünyanın aya bakan yüzünün, aydan uzak olan yüzünden daha büyük bir çekim kuvvetine maruz kaldığında ortaya çıkan sonucun aynı; bu, dünyada gelgitlere neden olur.)

Aslında lime lime olurdunuz; 3 güneş kütleli bir Schwarzschild kara deliği, siz olay ufkunu geçmeden 0,15 saniye önce sizi paramparça ederdi. Bu fenomene, insanın içini kaldıracak bir ifadeyle spagettileştirme deniyor ve vücudunuzun hayal bile edemeyeceğiniz şekilde uzatılması anlamına geliyor. Olay ufkunu bir kere geçtiniz

mi, vücudunuzun çeşitli parçaları yaklaşık 0,00001 saniyede tekillikğe ulaşacaktır, bu süre içinde siz de ezilip sonsuz yoğunlukta bir noktaya dönüşmüş olursunuz. 4 milyon güneş kütleli bir kara delik için –galaksimizin merkezinde olan gibi– olay ufkunu güvenle, hiç sorunsuz geçip gidersiniz, en azından başlangıçta, ama er ya da geç spagetti tarzı dilim dilim kıyıılırsınız! ("Er" seçeneği çok daha muhtemel, bana inanın –çünkü bu olmadan önce sadece yaklaşık 13 saniyeniz kalır, ondan 0,15 saniye sonra da tekillikğe ulaşırsınız.)

Kara delik fikri hakikaten herkes için tuhaf, fakat onları gözlemleyen pek çok gökfizikçisi için özellikle acayip (eski lisansüstü öğrencilerim Jeffrey McClintock ve Jon Miller gibi). Yıldız kütleli kara deliklerin var olduğunu biliyoruz. Bunlar 1971'de optik gökbilimciler Cyg X-1'in bir ikili yıldız sistemi olduğunu ve bu iki yıldızdan birinin kara delik olduğunu gösterdikleri zaman keşfedildi. Öbür bölümde bunların hakkında ne var ne yok anlatacağım. Hazır mısınız?

Gök Balesi

Gökyüzünde şimdiye kadar herhangi bir teleskopla ya da teleskop-suz gördüğünüz pek çok yıldızın, bizim bildik güneşimizin uzakta-ki versiyonlarından çok daha karmaşık olması sizi şaşırtmayacaktır. Gördüklerinizin yaklaşık üçte birinin tek yıldızlar bile olmadığını, ikili yıldız dediğimiz yıldızlar olduğunu bilmeyebilirsiniz: birbirle-rinin yörüngesinde dönen, kütleçekimiyle birbirlerine bağlı yıldız çiftleri. Başka bir deyişle, gece gökyüzüne baktığınızda gördüğünüz yıldızların yaklaşık üçte biri ikili yıldız sistemidir – size tek bir yıldızmış gibi görünseler de. Hatta üçlü yıldız sistemi bile var –bir-biri yörüngesinde dönen üç yıldız– fakat bunlar kadar yaygın değil. Galaksimizdeki parlak X ışını kaynaklarının çoğunun ikili yıldız sistemi çıkmasından dolayı onlarla çok münasebetim oldu. Büyüle-yici şeyler.

İkili sistemdeki yıldızların her biri, ikilinin kütle merkezi dedi-ğimiz, iki yıldızın arasındaki bir noktanın etrafında dolandır. İki yıl-dızın kütlesi eşitse, o zaman kütle merkezi iki yıldızın merkezine eşit mesafededir. Kütleler eşit değilse, o zaman merkez daha kütleli olan yıldızı yakındır. İkisi de yörüngelerini tam olarak aynı sürede tamamladıklarından, daha kütleli yıldızın daha az kütleli olandan daha düşük bir yörünge hızına sahip olması gerekir.

Bu ilkeyi gözünüzde canlandırmak için, iki ucuna eşit kütle bağ-lı, orta noktasından dönen bir dambıl düşünün. Şimdi de bir ucunda 1 kilo, öteki ucunda 5 kilo bağlı yeni bir dambıl düşünün. Bu dam-bılın kütle merkezi daha ağır olan uca epey yakındır, o yüzden, dö-nerken daha büyük olan kütlenin daha küçük bir yörüngesi vardır ve aynı süre içinde daha küçük kütlenin daha uzun yol gitmesi gerekir.

Bunlar iki uca bağlanmış ağırlık değil de yıldızsa, düşük kütleli yıldız kendi yörüngesinde, daha büyük, hantal eşinin beş katı hızla dönüp durur.

Yıldızlardan biri eşinden çok daha fazla kütleliyse, sistemin kütle merkezi daha kütleli olan yıldızın içine bile denk gelebilir. Dünya ile ay örneğinde (ikili bir sistemdir), kütle merkezi dünya yüzeyinin yaklaşık 1700 kilometre altındadır. (Ek 2'de bundan söz ediyorum.)

Gökteki en parlak yıldız olan Akyıldız bizden yaklaşık 8,6 ışık yılı uzaktadır ve Akyıldız A ile Akyıldız B diye bilinen iki yıldızdan oluşan bir ikili yıldız sistemidir. Ortak kütle merkezleri etrafındaki yörüngelerinde yaklaşık elli yılda bir dönüşlerini tamamlarlar (buna yörüngesel periyot diyoruz).

Bir ikili yıldız sistemine baktığımızı nasıl anlayabiliriz? İkili sistemleri çıplak gözle göremeyiz. Sistemin uzaklığına ve kullandığımız teleskobun gücüne bağlı olarak, bazen iki yıldız ayrı ayrı görüp görsel teyit sağlarız.

Ünlü Alman matematikçisi ve gökbilimci Friedrich Wilhelm Bessel, gökteki en parlak yıldız Akyıldız'ın, biri görünür diğeri görünmez iki yıldızdan oluşan bir ikili sistem olduğunu öngörmüştü. Bu sonucu hassas gök gözlemlerine dayandırmıştı – 1838'de ıraklık açısı gözlemleri yapan ilk kişi de oydu (Henderson'ı kıl payı geçmişti – bkz. 2. Bölüm). 1844'te Alexander von Humboldt'a o ünlü mektubunu yazdı: "Hâlâ Akyıldız'ın biri görünür biri görünmez yıldızlardan oluşan ikili bir sistem olduğu kanaatindeyim. Aydınlatma gücünün kozmik cisimlerin temel niteliği olduğunu varsaymamız için hiçbir sebep yok. Sayısız yıldızın görünürlüğü, sayısız başka yıldızın görünmezliğine karşı bir sav değildir." Çok derin bir ifade; görmediklerimize genellikle inanmayız. Bessel bugün görünmeyenin gökbilimi dediğimiz şeyi başlatmıştır.

Hiç kimse 1862'ye kadar o "görünmez" eş (Akyıldız B'yi) fiilen görmedi. O yıl Alvan Clark, benim memleketim olan Massachusetts, Cambridge'de 47 santimetrelik yepyeni bir teleskobu test ediyordu (o zamanların en büyük teleskobu, babasının şirketinde yapılmış). Teleskobunu denemek için Boston ufuk hattında yükselen Akyıldız'a yöneltince Akyıldız B'yi keşfetti (Akyıldız A'dan on bin kat daha sönüktü).

Çok Şükür Tayf Ölçümü Var: Maviye Kaymalar ve Kızıla Kaymalar

Yıldızların –özellikle uzaktaysalar– ikili sistem olduklarını anlamak için en yaygın yöntem tayf ölçümü kullanmak ve Doppler kayması diye bilinen şeyi ölçmektir. Gök fiziğinde tayf ölçümünden daha güçlü bir yöntem ve gökbilimde son birkaç yüzyılda Doppler kaymasından daha önemli bir keşif yoktur denebilir.

Nesnelerin yeterince sıcakken görünür ışık (kara cisim ışıması) yayacaklarını zaten biliyorsunuz. Güneş ışığını bir prizmanın yaptığı gibi ayrıştırarak gökkuşağı oluşturan yağmur damlaları (bkz. 5. Bölüm) size bir uçta kırmızıdan öteki uçta mora kadar kesintisiz bir renk dizisi gösterir. Bir yıldızdan gelen ışığı ayrıştırırsanız yine bir tayf görürsünüz, fakat bütün renkler eşit yoğunlukta olmayabilir. Sözgelimi yıldız ne kadar soğuksa, (kendisi ve tayfı) o kadar kırmızı olacaktır. Avcı (Orion) takımıyıldızında bulunan Betelgeuse'un sıcaklığı sadece 2000 kelvin derecedir; gökyüzündeki en kırmızı yıldızlar arasındadır. Öte yandan yine Avcı takımıyıldızında bulunan Bellatrix'in sıcaklığı 28.000 kelvin derecedir; gökteki en mavi ve en parlak yıldızlar arasındadır ve çoğu zaman Amazon Yıldızı diye anılır.

Yıldız tayfına yakından bakınca, soğurma çizgileri dediğimiz, renklerin azaldığı ya da tümünden yok olduğu dar boşluklar görürüz. Güneşin tayfı böyle binlerce soğurma çizgisi gösterir. Bunlar yıldızların atmosferlerindeki pek çok farklı elementten dolayı meydana gelir. Bildiğiniz gibi atomlar çekirdeklerden ve elektronlardan oluşur. Elektronların rasgele enerjileri olmaz; ayrık enerji seviyeleri vardır – bu belirgin seviyeler arasında enerjileri olamaz. Başka bir deyişle enerjiler "ayrık paketçikler" halindedir, yani kuantumlanmıştır, ki kuantum mekaniğinin adı da buradan gelir.

Yüksüz hidrojenin bir elektronu vardır. Işık bombardımanına tutulursa bu elektron, bir ışık fotonunun enerjisini soğurarak bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine sıçrayabilir. Fakat elektronun enerji seviyelerinin ayrık paketçikler halinde olması yüzünden, bu olay rasgele enerjili bir fotonla olamaz. Elektronun bir seviyeden ötekine kuantum sıçraması yapmasında sadece tam uy-

gun enerjili (dolayısıyla tam uygun frekanslı ve dalga boylu) fotonlar işe yarar. Bu süreç (rezonans soğurması) bu fotonları öldürür ve süregelen tayftaki o frekansta bir boşluk yaratır. Buna da soğurma çizgisi diyoruz.

Hidrojen bir yıldız tayfının görünen kısmında dört soğurma çizgisi (kesin olarak bilinen dalga boylarında ya da renklerde) yaratabilir. Çoğu element çok daha fazla çizgi üretebilir, çünkü hidrojenden çok daha fazla elektronları olur. Aslında her bir elementin kendine özgü emsalsiz bir soğurma çizgisi kombinasyonu vardır, ki bu da parmak izine karşılık gelir. Laboratuvaradaki incelemelerimizden ve ölçümlerimizden bunları çok iyi biliyoruz. Bu yüzden yıldız tayfındaki soğurma çizgilerinin dikkatle incelenmesi bize yıldızın atmosferinde hangi elementlerin olduğunu söyler.

Ne var ki, bir yıldız bizden uzaklaşırsa, Doppler kayması denilen fenomen yıldızın tüm tayfının (soğurma çizgileri de dahil), tayfın kırmızı ucuna doğru kaymasına sebep olur (buna kıızıla kayma diyoruz). Öte yandan tayf maviye kaymışsa, o zaman yıldızın bize doğru hareket ettiğini anlarız. Bir yıldızın soğurma çizgilerinin dalga boyundaki kayma miktarını dikkatle ölçerek yıldızın bize göre hangi hızla hareket ettiğini hesaplayabiliriz.

Örneğin ikili bir sistem gözlemliyorsak, her bir yıldız yörüngesinin yarısında bize doğru, öteki yarısında bizden uzağa hareket edecektir. Eşi de tamamen tersini yapıyor olacaktır. İki yıldız da yeterince parlaksa, tayfta kıızıla kayma ve maviye kayma soğurma çizgileri görürüz. Bu da bize ikili bir yıldız sistemine baktığımızı söyler. Fakat yıldızların yörüngesel hareketlerinden dolayı soğurma çizgileri de tayfla birlikte hareket edecektir. Sözgelimi, yörünge periyodu yirmi yılsa, her bir soğurma çizgisi yirmi yılda tam bir tur yapacaktır (on yıl kıızıla kayma ve on yıl maviye kayma).

Sadece kıızıla kayma (ya da maviye kayma) soğurma çizgilerini görebiliyorsak, tayfta ileri-geri oynayan soğurma çizgileri gördüğümüz takdirde bunun yine bir ikili sistem olduğunu anlarız; çizgilerin tam döngüsü için gereken zamanın ölçümü bize yıldızın yörünge periyodunu verecektir. Bu ne zaman olur? Bir yıldızın optik ışıkla dünyadan görülemeyecek kadar sönük olduğu zaman.

Şimdi X ışını kaynaklarımıza dönelim.

Şklovski ve Sonrası

Ta 1967'de Rus fizikçi Josef Şklovski Sco X-1 için bir model önermişti. "Bütün özellikleriyle bu model, madde toplama halindeki bir nötron yıldızına uyuyor; ... böylesi bir toplama durumunda doğal ve çok bereketli bir gaz kaynağı, birbirine yakın bir ikili sistemin ikincil birleşeninden bir nötron yıldızı olan birincil birleşenine doğru giden gaz akışıdır."

Bu satırları, fikirleri kökünden sarsacak önemde bulmayabileceğinizi anlıyorum. Gökfiziğin olduğca kuru teknik diliyle yazılmış olması da işleri zorlaştırıyor. Fakat neredeyse bütün alanlardaki uzmanlar birbirleriyle böyle konuşurlar. Benim sınıfta amacım –ve bu kitabı yazmamın altında yatan temel gaye– fizikçi meslektaşlarımın şaşırtıcı, çığır açıcı, hatta bazen devrim niteliğindeki keşiflerini, sokaktaki zeki, meraklı insanın gerçekten kavrayabileceği kavramlara ve dile tercüme etmek; uzman bilimsanlarının dünyasıyla sizin dünyanız arasında bir köprü kurmak. Pek çoğumuz sadece alandakilere konuşmayı tercih ediyor gibiyiz, o zaman da çoğu insanın –bilimi gerçekten anlamak isteyenlerin bile– dünyamıza girmesini fevkalade zor hale getiriyoruz.

O halde Şklovski'nin fikrini ele alıp ne önerdiğine bir bakalım: Bir nötron yıldızı ve eşinden oluşan bir ikili yıldız sisteminde nötron yıldızına eşinden madde akıyor. Nötron yıldızı o zaman "madde toplama halinde" olacak – başka bir deyişle, eşinden, donör yıldızdan madde topluyor olacak. Ne tuhaf bir fikir, değil mi?

Şklovski haklı çıktı. Ama işin komiği, Şklovski o sıralarda sadece Sco X-1'den söz ediyordu, dolayısıyla çoğumuz onun bu fikrini fazla ciddiye almadık. Kuramlarda genellikle bu olur. Gökfizikteki kuramların büyük çoğunluğunun sonradan yanlış çıktığını söylersem eminim kuramcı meslektaşlarımı incitmiş olmam. Tabii o yüzden, gözleme dayalı gökfiziğinde pek çoğumuz bu kuramların çoğuna itibar etmeyiz.

Meğer madde toplayan nötron yıldızları gerçekten X ışını üretmek için mükemmel ortamlarmış. Şklovski'nin haklı olduğunu nasıl keşfettik?

Bazı X ışını kaynaklarının ikili sistem doğasını tespit etmek gök-

bilimcileri yetmişli yılların başlarına kadar uğraştırdı – fakat bunların illa da madde toplayan nötron yıldızları olması gerekmiyordu. Sırlarını ilk açığa vuran kaynak Cyg X-1'di ve tüm X ışını gökbilimindeki en önemli kaynak oldu. Cyg X-1 1964'teki bir roket uçuşu sırasında keşfedilmiş çok parlak ve güçlü bir X ışını kaynağıdır, o yüzden o zamandan beri X ışını gökbilimcilerinin dikkatini çeker.

Radyo gökbilimcileri sonra 1971'de Cyg X-1'den gelen radyo dalgaları keşfettiler. Radyo teleskopları Cyg X-1'in gökyüzündeki konumunu yaklaşık 350 yay saniyekarelik bir bölgede (hata kutusu) tespit ettiler, X ışınlarının izini sürerek elde edilmiş olandan yaklaşık yirmi kat daha küçük bir bölge. Sonra onun optik karşılığını aramaya koyuldular. Başka bir deyişle, gizemli X ışınlarını üreten yıldızı *görmek* istiyorlardı.

Radyo hata kutusunda HDE 226868 diye bilinen çok parlak, mavi bir süperdev vardı. Gökbilimciler bunun ne tür bir yıldız olduğunu dikkate alarak, kütlesinin epey doğru bir tahminini çıkarmak için çok benzer başka yıldızlarla karşılaştırmalar yapabilirlerdi. Aralarında dünyaca ünlü Allan Sandage da dahil olmak üzere beş gökbilimci, HDE 226868'in "hiçbir acayıplığı bulunmayan normal B0 süperdevi" olduğu sonucuna vardılar ve Cyg X-1'in optik karşılığı olduğunu reddettiler. Başka (daha az ünlü) optik gökbilimciler yıldızı daha yakından incelediler ve bazı sarsıcı keşiflerde bulundular.

Yıldızın 5,6 günlük yörünge periyotlu ikili bir sistemin üyesi olduğunu keşfettiler. Bu ikili sistemden gelen güçlü X ışını akısının, optik yıldızdan (donör yıldız), çok küçük –tıkız– bir nesneye gelen gaz toplanmasından kaynaklandığı yolunda isabetli bir iddiada bulundular. Sadece büyük kütleli ama çok küçük bir nesneye akan gaz bu bereketli X ışını akısını açıklayabilirdi.

Donör yıldızın, yörüngesinde hareket ederken tayfındaki soğurma çizgilerinin Doppler kayması ölçümlerini yaptılar (hatırlarsanız, dünyaya doğru hareket ederken tayf mavi uca kayar, uzaklaşırken de kızıla doğru kayar) ve X ışını üreten eş yıldızın nötron yıldızı ya da beyaz cüce (Akyıldız B gibi tıkız, çok yoğun bir yıldız) olamayacak kadar büyük kütleli olduğu sonucuna vardılar. Peki bu ikisi de değilse ve bir nötron yıldızından da daha kütleliyse, o zaman başka ne olabilirdi? Elbette – bir kara delik! Onlar da bunu ileri sürdüler.

Fakat gözlemci biliminsanları olduklarından sonuçlarını daha

ihtiyatlı bildirdiler. Keşifleri 7 Ocak 1972'de *Nature*'da çıkan Louise Webster ve Paul Murdin meseleyi şöyle ifade ediyordu: "Eş yıldızın kütlesi muhtemelen 2 güneş kütlesinden büyük olduğundan, bunun bir ihtimal kara delik olabileceği fikrini öne sürmek de kaçınılmaz." Tom Bolton ise bir ay sonra *Nature*'da şöyle yazdı: "Bu durum ikincinin [toplayıcının] apaçık bir kara delik olduğu ihtimalini ortaya koyuyor." Cyg X-1'in güzel bir resmini fotoğraflar arasında görebilirsiniz.

İşte bu harika gökbilimciler –İngiltere'de Webster ve Murdin, Toronto'da Bolton– X ışını ikili sistemlerinin keşfini paylaşmış ve galaksimizdeki ilk kara deliği bulmuşlardır. (Bolton çok gurur duymuştu, birkaç yıl Cyg X-1 plakasıyla dolaştı.)

Bu kesinlikle olağanüstü keşif için belli başlı hiçbir ödül kazanmamış olmaları bana hep tuhaf gelmiştir. Ne de olsa bu alanı kalbinden vurdular – ve onlar *ilkti*! İlk X ışını ikili sistemini enselemişlerdi. Ve toplayıcının muhtemelen bir kara delik olduğunu söylemişlerdi. Ne büyük iş çıkardılar ama!

1975'te kuramsal fizikçi meslektaş Kip Thorne'la, Cyg X-1'in kara delik olmadığı konusunda bahse giren kişi Stephen Hawking'den başkası değildi – halbuki artık çoğu gökbilimci kara delik olduğunu düşünüyordu. On beş yıl sonra Hawking nihayet bahsi kaybettiğini kabullendi, galiba kendi de sevindi, çünkü çalışmalarının çoğu kara delikler etrafında dolanıyordu. Cyg X-1'deki kara deliğin kütlesinin en son ve en doğru ölçümü (yakında yayımlanacak) yaklaşık 15 güneş kütlesidir (bu bilgiyi Jerry Orosz ve eski öğrencim Jeff McClintock'la özel irtibatım sonucu edindim).

Dikkatli biriyseniz çoktan şöyle düşünmeye başlamışsınızdır: "Bir dakika! Az önce kara delikler hiçbir şey yaymaz, kütleçekim kuvvetinden hiçbir şey kaçamaz dediniz – nasıl oluyor da X ışını yayabiliyorlar?" Müthiş bir soru, zaman içinde cevaplayacağıma söz veriyorum, hatta şimdiden biraz çıtlatayım: Kara deliklerden yayılan X ışınları olay ufkunun içinden gelmiyor – kara deliğin *içine* gitme yolundaki maddeden yayılıyor. Bir kara delik, Cyg X-1 gözlemlerimizi açıklığa kavuşturuyor ama öteki ikili yıldızlardan gelen X ışını yayımına ilişkin görülenleri açıklayamıyordu. Bunun için nötron yıldızı ikili sistemlerine ihtiyacımız vardı. Onlar da harika uydu Uhuru'yla keşfedildi.

X ışını gökbilimi alanı, Aralık 1970'te, tamamen X ışını gökbilimine adanmış ilk uydu yörüngeye oturduğu zaman köklü bir değişiklik yaşadı. Kenya'nın bağımsızlığının yedinci yıldönümünde Kenya'dan fırlatılan uduya, Svahilide "özgürlük" anlamına gelen Uhuru adı verildi.

Uhuru şu güne kadar henüz durmamış bir devrim başlattı. Bir uydunun yapabileceklerini bir düşünün. Yılda 365 gün, günde yirmi dört saat gözlem, hiç atmosfer olmadan! Bizim beş-altı yıl öncesine kadar ancak hayalini kurabildiğimiz şekillerde gözlem yapabiliyordu. İki yıldan birazcık daha uzun bir sürede Uhuru, Yengeç bulutsusundan beş yüz kat, Sco X-1'den on bin kat daha sönük kaynakları seçebilecek sayaçlarla X ışını göğünün haritasını çıkardı. Bu cisimlerden 339 tane buldu (ondan önce biz sadece otuz-kırk tanesini bulmuştuk) ve tüm göğün X ışını haritasını sundu.

Bu atmosfer prangasından en sonunda bizi kurtaran uydu gözlemvleri, bizler elektromanyetik tayfın her alanı aracılığıyla derin uzayı –ve içerdiği şaşırtıcı nesneleri– görmeyi öğrenince, evrene bakışımızı yeniden şekillendirdi. Hubble Uzay Teleskobu optik evren görüşümüzü genişletirken, bir dizi X ışını gözlemevi de aynısını X ışını evreni için yaptı. Gama ışını gözlemvleri şimdi daha da yüksek enerjilerde evreni gözlemliyor.

1971'de Uhuru, (Centaury takımıyıldızındaki) Cen X-3'ten 4,84 saniyelik atımlar keşfetti. Bir günlük bir süre zarfında Uhuru, X ışını akısında yaklaşık bir saatte on katlık bir değişiklik gözlemledi. Atımların periyodu önce düştü, sonra yaklaşık yüzde 0,02 ve 0,04 oranında yükseldi, her bir periyot değişimi de yaklaşık bir saat içinde meydana geldi. Bütün bunlar çok heyecan vericiydi, ama çok da kafakarıştırıcı. Bu atımlar, kendi etrafında dönen bir nötron yıldızının sonucu olamazdı; onların dönüş periyotlarının şaşmaz olduğu biliniyordu. Bilinen atarcalardan hiçbirisi periyodunu bir saatte yüzde 0,04 oranında değiştiremezdi.

Uhuru grubu daha sonra, Cen X-3'ün 2,09 günlük bir yörünge periyoduna sahip ikili yıldız sistemi olduğunu keşfedince bütün tablo güzel bir şekilde tamamlandı. 4,84 saniyelik atımlar, toplayıcı nötron yıldızının dönüşünden dolayıcıydı. Bu kanıta karşı konulamazdı. Birincisi, nötron yıldızı donör yıldızının arkasına saklanıp X ışını yayımını engelleyince tekrarlayan tutulmaları (her 2,09 günde bir)

açık seçik gördüler. İkincisi, atımların periyotlarındaki Doppler kaymasını ölçmeyi başardılar. Nötron yıldızı bize doğru hareket ederken atım periyodu biraz daha kısadır, uzaklaşırken de biraz daha uzundur. Bu sarsıcı sonuçlar Mart 1972'de yayımlandı. Bütün bunlar doğal olarak 1971 makalesinde çok kafa karıştırıcı gelen fenomenleri açıklıyordu. Tıpkı Şklovski'nin Sco X-1 için öngördüğü gibiydi: donör yıldızlı bir ikili sistem ve madde toplayıcı bir nötron yıldızı.

Yine o yıl daha sonra, Giacconi'nin grubu, atımları ve tutulmalarıyla bir kaynak daha buldu: Herkül X-1 (ya da tercih ettiğimiz şekliyle, Her X-1). Bir nötron yıldızı X ışını ikili sistemi daha!

Bunlar sonraki on yılda hüküm sürecektir X ışını gökbilimini dönüştüren kesinlikle baş döndürücü keşiflerdi. X ışını ikili sistemleri çok nadirdir; galaksimizdeki yüz milyon ikili yıldızdan belki sadece bir tanesi X ışını ikili sistemidir. Öyle de olsa, artık galaksimizde birkaç yüz X ışını ikili sistemi olduğunu biliyoruz. Çoğu durumda, tıkHz nesne olan madde toplayıcı ya bir beyaz cücedir ya da bir nötron yıldızı, fakat madde toplayıcının kara delik olduğu en az yirmi kadar bilinen sistem var.

1970'te (Uhuru fırlatılmadan önce) grubumun keşfettiği 2,3 dakikalık periyot değişkenliğini hatırlıyor musunuz? O zamanlar bunun ne anlama geldiği hakkında hiçbir fikrimiz yoktu. Ama şimdi, GX 1+4'ün, yaklaşık 304 günlük yörünge periyotlu bir X ışını ikili sistemi olduğunu ve madde toplayan nötron yıldızının kendi eksenini etrafında yaklaşık 2,3 dakikada döndüğünü biliyoruz.

X Işını İkili Sistemleri: Nasıl İşliyor?

Bir nötron yıldızı uygun mesafede, uygun büyüklükteki bir donör yıldızla eşleşince muhteşem havai fişekler yaratabilir. Orada, uzayın kıyılarında, Isaac Newton'ın hayal bile edemeyeceği yıldızlar güzel bir dans sergiliyor, hem de bütün lisans öğrencilerinin kavrayabileceği klasik fizik yasalarına tamamen bağlı bir şekilde.

Bunu daha iyi anlayabilmek için işe yakın çevremizden başlayalım. Dünya ve ay bir ikili sistemdir. Dünyanın merkezinden ayın merkezine bir çizgi çekerseniz, o çizgi üzerinde, aya doğru olan kütleçekim kuvvetinin dünyaya doğru olan kütleçekim kuvvetine eşit

ve zıt olduğu bir nokta vardır. Orada olsaydınız üzerinizdeki net kuvvet sıfır olurdu. O noktanın bir tarafında olsaydınız dünyaya doğru düşerdiniz; öteki tarafında olsaydınız aya doğru düşerdiniz. O noktanın bir adı var; ona iç Lagrange noktası diyoruz. Tabii söz konusu nokta aya çok yakındır, çünkü ayın kütlesi dünyanınkinden yaklaşık seksen kat daha küçüktür.

Şimdi toplayıcı nötron yıldızı ve çok daha büyük bir donör yıldızdan oluşan X ışını ikili sistemlerine geri dönelim. İki yıldız birbirlerine çok yakınsa, iç Lagrange noktası donör yıldızın yüzeyi altında bulunabilir. Durum buysa, donör yıldızın maddesinin bir kısmı, donör yıldızın merkezi yönündeki kütleçekim kuvvetinden daha büyük olan, nötron yıldızı yönündeki bir kütleçekim kuvvetiyle karşılaşacaktır. Bunun sonucunda, madde—sıcak hidrojen gazı—donör yıldızdan nötron yıldızına akacaktır.

Yıldızlar ortak kütle merkezleri etrafında döndüklerinden, madde doğrudan nötron yıldızına doğru düşemez. Yüzeye ulaşmadan önce, nötron yıldızının etrafındaki bir yörüngeye düşer ve toplama diski dediğimiz, sıcak gazdan bir dönen disk yaratır. Diskin iç halkasındaki gazın bir kısmı en sonunda bir yol bulup aşağı nötron yıldızının yüzeyine iner.

Başka bir bağlamda aşına olduğunuz ilginç bir fizik konusu burada devreye girer. Gaz çok sıcak olduğundan iyonlaşır, pozitif yüklü protonlarla negatif yüklü elektronlar birbirinden ayrılır. Fakat nötron yıldızlarının çok kuvvetli manyetik alanları olduğundan, bu yüklü parçacıklar yıldızın manyetik alan çizgilerini takip etmek zorunda kalır, o yüzden bu plazmanın büyük kısmı kendilerini nötron yıldızının manyetik kutuplarında bulur, tıpkı dünyadaki kuzey ışıkları gibi. Nötron yıldızının manyetik kutupları (burada madde nötron yıldızına doğru büzülür) milyonlarca kelvin dereceye erişerek son derece sıcak bölgeler haline gelir ve X ışını yayar. Ve manyetik kutuplar genellikle dönüş ekseninin kutuplarıyla çakışmadığından (bkz 12. Bölüm), biz dünyada, bize bakan sıcak bir bölge olduğunda sadece yüksek X ışını akısını alırız. Nötron yıldızı döndüğü için, ışığı titreşiyor gibi görünür.

Her X ışını ikili sisteminin çevresinde dönen bir toplayıcı diski vardır, ister nötron yıldızı olsun, ister beyaz cüce, ister Cyg X-1'de olduğu gibi bir kara delik. Toplayıcı diskler evrendeki en olağanüs-

tü nesneler arasındadır ve profesyonel gökbilimciler hariç kimse adlarını bile duymamıştır.

Bütün kara delik X ışını ikili sistemlerinin etrafında toplayıcı diskler vardır. Pek çok galaksinin merkezindeki süperkütleli kara deliklerin etrafında dönen toplayıcı diskler bile vardır, ama anlaşılan bizim galaksimizin merkezindeki süperkütleli kara deliğin etrafında (muhtemelen) yok.

Toplayıcı diskler üzerine yönelik araştırmalar gökfiziğinde şimdi başlı başına bir alandır. Bazı harika resimlerini şurada görebilirsiniz: www.google.com/images?hl=en&q=xray+binaries&um=1&ie=UTF. Toplayıcı diskler hakkında bilmediğimiz hâlâ tonlarca şey var. En mahcup eden problemlerden biri, toplayıcı diskteki maddenin tıkız nesneye nasıl bir yoldan geçtiğini hâlâ pek iyi anlamıyor olmamız. Çözülmemiş başka bir sorun da, toplayıcı diskteki kararsızlıkları tam kavrayamamamız. Tıkız nesneye olan madde akışındaki değişkenliğe ve X ışını aydınlatma gücündeki değişkenliğe yol açan şey bu kararsızlıklardır. Birkaç X ışını ikili sisteminde bulunan radyo püskürmelerini de (*radio jets*) pek anladığımız söylenemez.

Bir donör yıldız, toplayıcı yıldıza saniyede yaklaşık 10^{18} grama kadar aktarım yapabilir. Size çokmuş gibi gelebilir, fakat bu hızla bile, dünyanın kütesine eşit miktarda bir madde aktarmak iki yüz yıl alırdı. Madde, toplayıcının şiddetli kütleçekim alanına yakalanarak toplayıcıya doğru akar, bu da gazı son derece yüksek bir hıza çıkarır: ışık hızının üçte biri ile yarısına kadar. Bu maddenin açığa çıkardığı kütleçekim potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşür (kabaca 5×10^{30} vat) ve hücum eden hidrojen gazını milyonlarca dereceye kadar ısıtır.

Maddenin ısınınca kara cisim ışıması yaydığını biliyorsunuz (bkz. 14. Bölüm). Sıcaklık arttıkça ışımanın enerjisi de artar, dalga boyları kısalır ve frekanslar yükselir. Madde 10 ila 100 milyon kelvin dereceye ulaştığında, ürettiği ışıma çoğunlukla X ışınıdır. 5×10^{30} vatın neredeyse tamamı X ışınları şeklinde yayılır; bunu, sadece 10^{20} vatının X ışını olduğu güneşimizin toplam aydınlatma gücüyle (4×10^{26} vat) karşılaştırın. Güneşimizin yüzey sıcaklığı buna kıyasla resmen bir buz kalıbıdır.

Nötron yıldızlarının kendileri optik olarak görülmeyecek kadar küçüktürler – fakat çok daha büyük olan donör yıldızları ve toplayıcı-

cı diskleri optik teleskoplarla görebiliriz. Disklerin kendileri X ışını ısınması denilen bir süreçten dolayı epey bir ışık yayabilirler. Diskten gelen madde nötron yıldızının yüzeyine çarpınca, ortaya çıkan X ışınları her yöne dağılır ve bu yüzden diskin kendine de çarparak onu daha da yüksek sıcaklıklara çıkarır. Bu konuyu bir sonraki bölümde X ışını patlamalarında anlatmaya devam edeceğim.

X ışını ikili sistemlerinin keşfi, güneş sisteminin dışından gelen X ışınlarına ilişkin ilk gizemi çözmüştür. Sco X-1 gibi bir kaynağın X ışını aydınlatma gücünün, optik aydınlatma gücünden neden on bin kat daha büyük olduğunu artık anlıyoruz. X ışınları çok sıcak (onlarca milyon kelvin derecedeki) nötron yıldızından gelir, optik ışıkta çok daha soğuk donör yıldız ve toplayıcı diskten.

Tam da X ışını ikili sistemlerinin nasıl işlediğini iyi kötü anladığımızı sandığımızda, doğa bize bir sürpriz daha yaptı. X ışını gökbilimcileri, kuramsal modelleri geride bırakan gözlemsel keşifler yapmaya başladılar.

1975'te hakikaten tuhaf bir şeyin keşfi, beni bilim kariyerimin zirvesine çıkardı. Bu olağanüstü ve gizemli fenomenleri gözlemleme, inceleme ve açıklama çabası içine tamamen gömülüp gittim: X ışını patlamaları.

X ışını patlamaları hikâyesinin bir kısmı, verilerini tamamen yanlış yorumlamış Rus bilimsanlarıyla ve X ışını patlamalarının çok büyük kütleli kara delikler tarafından (zavallı kara delikler, haksız yere çok suçlandılar) üretildiğine inanan Harvard'daki bazı meslektaşlarımla yaptığım mücadeleyi içeriyor. İster inanın ister inanmayın, patlamalara dair bazı verileri ulusal güvenlik gerekçesiyle yayımlamamam için arandım bile (birden fazla kere).

X Işını Patlatıcıları!

Daima sürprizlerle dolu olan doğa, 1975 yılında X ışını camiasını sarstı. İşler öyle şiddetlendi ki, kimi zaman duygular çığırından çıktı, ben de tam bunun ortasındaydım. Harvard'da yıllardır bir meslektaşım ile tartışıyordum (beni dinlemiyordu), ama Rus meslektaşlarımla şansım daha iyiydi (onlar dinliyordu). Bütün bu olup bitenlerdeki ana rolümden dolayı nesnel olmam çok zor olabilir, ama de-neyeceğim!

Yeni şey X ışını patlamalarıydı. Bunlar Hollanda Gökbilim Uydusu'nun (ANS) verilerini kullanan Grindlay ve Heise ile, ABD'nin nükleer testleri tespit etmek için tasarladığı iki Vela-5 casus uydusu-nun verilerini kullanan Belian, Conner ve Evans tarafından birbirinden bağımsız olarak keşfedildi. X ışını patlamaları Sco X-1'de keşfettiğimiz değişkenlikten tamamen farklı bir hikâyeydi. Sco X-1'den gelen X ışınları on dakikalık zaman diliminde dört katlık bir fırlayış gösterip onlarca dakika böyle kalıyordu. X ışını patlamalarıysa çok daha hızlıydı, çok daha parlaktı ve sadece onlarca saniye sürüyordu.

MIT'de Üçüncü Küçük Gökbilim Uydusu (SAS-3) diye bilinen kendi uydumuz vardı (Mayıs 1975'te fırlatılmıştı). Adı "Uhuru"nun-ki kadar romantik değildi, fakat tüm hayatım boyunca kendimi en çok kaptırdığım çalışma buydu. Patlamaları duymuştuk ve Ocak 1976'da aramaya başladık; marta geldiğimizde biz de beş tane bulmuştuk. Yılın sonunda bulduklarımız toplam ona çıkmıştı. SAS-3'ün duyarlılığından ve ayarlanma biçiminden, patlama kaynaklarını keşfetmek ve incelemek için ideal alet olduğu çıktı ortaya. Tabii, X ışını patlamalarını tespit etmek için özel olarak tasarlanmamıştı; yani bir

anlamda birazcık şans meselesiydi. Talihin hayatımda nasıl başrol oynadığını görüyorsunuz! Çok şaşırtıcı veriler elde ediyorduk –her gün, günde yirmi dört saat gökten yağın altıncıklar– ve yirmi dört saat çalışıyordum. Kendimi işime adanmıştım, fakat aynı zamanda saplantı olmuştu. İstedığınız yöne doğrultup yüksek kalitede veri alabileceğiniz bir X ışını gözlemevine sahip olmak hayatta sadece bir defa karşınıza çıkan bir fırsattı.

İşin aslı, hepimiz "patlama humması"na yakalanmıştık – lisan-süstü ve lisans öğrencileri, destek personeli, post-doklar ve öğretim üyeleri. Hâlâ da bu duyguyu hatırlıyorum, yakıcı bir şeydi. Her birimiz farklı gözlem gruplarına dağıldık. Bunun anlamı birbirimizle bile rekabet eder hale gelmemizdi. Bazılarımız bundan hoşlanmadı, fakat şunu söyleyeyim, bu bizi daha fazlasını ve daha iyisini yapmaya sevk etti ve bilimsel sonuçlar olağanüstüydü.

Bu seviyedeki saplantı evliliğime iyi gelmedi, aile hayatıma da öyle. Bilim hayatım alabildiğince gelişti, fakat ilk evliliğim sona erdi. Elbette benim hatamdı. Yıllar boyu, yerkürenin bir yarısında balon uçurmaya evden bir kere çıktım mı aylarca dönmemiştım. Şimdiyse ha kendi uydumuz olmuştu, ha hâlâ Avustralya'daydım.

Patlama kaynakları bir tür ikinci aile olmuştu. Ne de olsa onlarla yatıp onlarla kalkıyorduk, içini dışını ezberlemiştik. Arkadaşlar gibi, her biri nevi şahsına münhasır, emsalsizdi. Şimdi bile bu kendine has patlama profillerini tanıyorum.

Bu kaynaklardan çoğu yaklaşık 25.000 ışık yılı ötedeydi. Bu sayede, bir patlamadaki toplam X ışını enerjisinin yaklaşık 10^{32} jul olduğunu hesapladık, neredeyse akıl almaz bir rakam. Meseleye şöyle bakın: Bütün dalga boylarında 10^{32} jüllük enerji yayması, güneşimizin yaklaşık üç gününü alır.

Bu patlamalardan bir kısmı –örneğin 2,4 saatlik aralarla patlamalar üreten MXB 1659-29'dan gelenler– neredeyse saat gibi düzenliydi; bir kısmı patlama aralıklarını saatten güne değiştiriyor, bazıları da aylarca hiç patlama göstermiyordu. MXB'deki M, MIT'ye; X, X ışınına; B de "burster"a (patlatıcı) karşılık geliyor. Rakamlarsa ekvatorial koordinat sistemi diye bilinen sistemde kaynakların gök koordinatlarını gösteriyor. İçinizdeki amatör gökbilimciler buna aşinadır.

Elbette buradaki canalcı soru, bu patlamalara neyin sebep olduğuydu. 1976'da Harvard'daki meslektaşarımdan ikisi (X ışını patla-

malarının ortak kâşiflerinden Josh Grindlay de dahil) kendilerini kaptırıp patlamaların, güneşin kütesinden birkaç yüz kat daha büyük kütleli kara delikler tarafından üretildiklerini ileri sürdü.

Çok geçmeden X ışını patlamaları sırasındaki tayfların, soğuyan bir kara cismin tayflarına benzediğini keşfettik. Kara cisim kara delik değildir. Kendisine çarpan bütün ışınmayı yansıtmak yerine soğuran bir nesneyi temsil eden ideal bir yapıdır. (Bildığınız gibi kara/ siyah renk ışınmayı soğurur, beyaz yansıtır – yazın Miami'de bir plaj otoparkına bırakılan siyah bir arabanın içinin, beyaz bir arabanın içinden daha sıcak olmasının sebebi budur.) İdeal kara cismin bir başka özelliği de şudur: Hiçbir şey yansıtmadığı için, yayabileceği tek ışım kendi sıcaklığından gelir. Bir elektrik ocağındaki rezistansı düşünün. Pişirme sıcaklığına ulaşınca kızarmaya başlar, düşük frekanslı kırmızı ışık yayar. Sıcaklığı arttıkça portakal rengine, sonra sarıya ulaşır ve genellikle daha öteye gitmez. Elektrigi kapattığınızda rezistans soğur, yaydığı ışımanın profili aşağı yukarı patlamaların son demleri gibidir. Kara cisimlerin tayfları o kadar iyi bilinir ki, tayfı zaman içinde ölçerseniz, soğurken sıcaklığı hesaplayabilirsiniz.

Kara cisimler çok iyi anlaşıldığından, temel fiziğe dayalı olarak patlamalar hakkında pek çok çıkarsama yapabiliriz, ki bu da oldukça şaşırtıcı bir şey. 25.000 ışık yılı ötedeki bilinmeyen kaynakların X ışını yayım tayflarını incelediğimizi ve MIT'de üniversite birinci sınıf öğrencisinin kullandığı fiziği kullanarak çığır açtığımızı bir düşünsenize!

Bir kara cismin toplam aydınlatma gücünün (saniyede yaydığı enerjinin), sıcaklığının dördüncü kuvvetiyle doğru orantılı olduğunu biliyoruz (ki sezgilerle çıkarılabilecek bir şey değil bu). Aydınlatma gücünün yüzey alanıyla doğru orantılı olduğunu da biliyoruz (ki bu sezgisel – alan ne kadar büyükse o kadar çok enerji dışarı çıkar). O halde, çapları bir metre olan iki küremiz varsa ve biri diğerinden iki kat sıcaksa, daha sıcak olan saniyede on altı kat (2^4) daha fazla enerji yayacaktır. Kürenin yüzey alanı yarıçapının karesiyle doğru orantılı olduğundan, bir nesnenin sıcaklığının aynı kalıp da büyüklüğünün üçe katlanması durumunda, saniyede dokuz kat daha fazla enerji yayacağını da biliyoruz.

Patlamanın herhangi bir ânındaki X ışını tayfı, ışımaya yayan nesnenin kara cisim sıcaklığını verir. Patlama sırasında sıcaklık hızla

yaklaşık 30 milyon kelvin dereceye yükselir, ardından da yavaş yavaş düşer. Bu patlaticılara olan uzaklığı takriben bildiğimizden, kaynağın patlama sırasında herhangi bir andaki aydınlatma gücünü de hesaplayabilirdik. Hem kara cisim sıcaklığını hem de aydınlatma gücünü bildiğiniz takdirdeyse, ışıma yayan nesnenin yarıçapını hesaplayabilirsiniz. Bu da patlama sırasında herhangi bir anda yapılabilir. Bunu ilk yapan kişi, NASA'nın Goddard Uzay Uçuş Merkezi'nden Jean Swank'ti; biz MIT'dekiler de hemen ardından gittik ve patlamaların, yaklaşık 10 kilometre yarıçaplı soğuyan bir nesneden geldiği sonucuna vardık. Bu, patlama kaynaklarının çok büyük kütleli kara delikler değil de nötron yıldızları olduğunun güçlü bir kanıtıydı. Ve bunlar nötron yıldızıysa, muhtemelen X ışını ikili sistemleriydi.

İtalyan gökbilimci Laura Maraschi 1976'da MIT'yi ziyaret ettiği sırada, şubat ayında bir gün odama gelip patlamaların termonükleer parlamaların –yani toplayıcı nötron yıldızlarının yüzeyindeki devasa termonükleer patlamaların– sonucu olduğu fikrini ortaya attı. Hidrojen bir nötron yıldızı üzerine toplanınca, kütleçekim potansiyel enerjisi o kadar büyük bir ısıya dönüşür ki X ışınları yayılır (bkz. önceki bölüm). Fakat bu toplanmış madde nötron yıldızının yüzeyinde birikirken, diyordu Maraschi, kontrolsüz bir süreçte (hidrojen bombasındaki gibi) nükleer füzyona maruz kalabilir ve X ışını patlamasına bu sebep olabilir. Bir dahaki patlama birkaç saat sonra, ateşlenmeye yetecek kadar yeni nükleer yakıt toplanınca olabilir. Maraschi yazı tahtamda basit bir hesapla, nötron yıldızının yüzeyine ışık hızının yaklaşık yarısıyla hücum eden maddenin, termonükleer patlamalar sırasında açığa çıkandan çok daha fazla enerji yaydığını gösterdi, veriler de bunu söylüyordu.

Etkilenmişim – bu açıklama bana mantıklı gelmişti. Termonükleer patlamalar cuk oturuyordu. Gördüğümüz şey bir nötron yıldızındaki dev bir patlamaysa, bu patlamalar sırasında gözlemlediğimiz soğuma düzeni de mantıklıydı. Maraschi'nin modeli patlamaların aralıklarını da iyi açıklıyordu, çünkü bir patlama için gereken madde miktarı zaman içinde birikmek zorundaydı. Toplamanın normal hızında, kritik kütleli biriktirmenin birkaç saat alması gerekirdi, ki pek çok patlamada bulduğumuz türden bir aralıktı bu.

Odamda, ziyaretime gelenleri daima tedirgin eden garip bir radyo bulunduruyorum. İçinde güneş enerjili bir pil var ve sadece pilin

yeterli şarjı varsa çalışıyor. Radyo orada oturmuş güneş ışığını emer-ken ağır ağır şarj olur (kışın çok daha ağır), sonra her on dakikada bir falan –bazen daha uzun sürer, hava berbat– birden çalmaya başlar, ama sadece birkaç saniye, çünkü elektrik enerjisini hemen tüketir. Anlıyor musunuz? Piliindeki birikme tıpkı nötron yıldızındaki toplanmış maddenin birikmesi gibidir: Uygun miktara ulaştığında patlama olur ve sonra sönüp gider.

Maraschi'nin ziyaretinden haftalar sonra, 2 Mart 1976'da, patlama hummasının ortasında MXB 1730-335 adını verdiğim, *günde birkaç bin patlama* üreten bir X ışını kaynağı keşfettik. Patlamalar makineli tüfek ateşi gibi geliyordu – pek çoğunun arası 6 saniyeydi! Bunun bize ne kadar tuhaf geldiğini tam olarak tasvir edebilir miyim bilmiyorum. Bu kaynak –şimdi Rapid Burster (seri patlatıcı) deniyor– tam bir aykırı durumdu ve Maraschi'nin fikrini hemencecik çürütüverdi. Bir kere, termonükleer bir patlama üretmek için nötron yıldızının yüzeyinde altı saniyede yeterli miktarda nükleer yakıtın birikmesinin hiçbir yolu yoktu. Sadece o da değil, patlamalar toplanmanın bir yan ürünüyse, sırf toplanmadan dolayı güçlü, patlamalardaki enerjiyi fazlasıyla geçen bir X ışını akısı görmemiz gerekirdi (kütleçekim potansiyel enerjisinin açığa çıkması), fakat durum bu değildi. O yüzden 1976 Martının başlarında, Maraschi' nin patlamalar için önerdiği harika termonükleer modeli sizlere ömürdü. MXB 1730-335'le ilgili makalemizde, patlamaların sebebinin bir nötron yıldızı üzerindeki "spazmodik toplanma" olduğu fikrini ortaya attık. Başka bir deyişle, çoğu X ışını ikili sistemindeki, sıcak maddenin toplayıcı diskten nötron yıldızına düzenli akışı, Rapid Burster'da çok düzensizdi.

Patlamaları zamana yayarak ölçtüğümüzde, patlama ne kadar büyük olursa, bir sonrakini bekleme zamanımızın da o kadar uzun olduğunu bulduk. Bir sonraki patlamayı bekleme zamanı altı saniye kadar kısa, sekiz dakika kadar da uzun olabiliyordu. Şimşek de benzer bir şey yapar. Özellikle büyük bir yıldırım düştüğünde, bu büyük boşalma, elektrik alanının bir sonraki boşalmaya kadar potansiyelini biriktirmesi için daha uzun bekleneceği anlamına gelir.

O yıl daha sonra X ışını patlamaları hakkında durduk yerde, 1975 tarihli bir Rus makalesinin çevirisi çıktı ortaya; Kosmos 428 uydusuyla 1971'de yapılmış patlama tespitlerini rapor ediyordu.

Ağzımız açık kaldı; Ruslar X ışını patlamalarını keşfetmiş ve Batı'yı yenmişlerdi! Ne var ki bu patlamalar hakkında daha çok şey duydukça epey kuşkuya düştüm. Onların patlamaları benim SAS-3'le tespit etmiş olduğum pek çok patlamadan o kadar farklı davranıyordu ki, Rusların patlamalarının gerçek olup olmadığı konusunda ciddi ciddi şüphelenmeye başladım. Bunların dünyaya yakın bir yerde acayip, tuhaf bir şekilde insan eliyle yapılmış ya da üretilmiş olduğunu düşünüyordum. Demir perde bunun takibini zorlaştırıyordu. Yine de 1977 yazında Sovyetler Birliği'ndeki yüksek seviye bir konferansa davet edilme şansım oldu. Sadece on iki Rus ve on iki ABD'li gökfizikçisi davet edilmişti. Dünyaca ünlü bilimadamları Josef Şklovski, Roald Sagdeev, Yakov Zeldoviç ve Raşid Sunyaev'le ilk defa karşılaştığım yer orasıdır.

Orada –tahmin edebileceğiniz gibi– X ışını patlamaları üzerine bir konferans verdim ve Rus patlama makalesinin yazarlarıyla tanıştım. Pek çok patlamanın verilerini hiç esirgmeden gösterdiler, 1975'te yayımladıklarından çok daha fazlasını. Bütün bunların saçmalık olduğunu daha o an anlamıştım, ama onlara söylemedim, en azından hemen ilk başta. Önce patronları Roald Sagdeev'i görmeye gittim, o sırada Moskova'daki SSCB Bilim Akademisi Uzay Araştırma Enstitüsü müdürüydü. Kendisiyle epey hassas bir konuyu konuşmak istediğimi söyledim. Bunu odasında yapmamamızın iyi olacağını söyledi (her taraf "böcek" kaynıyordu), bunun üzerine dışarı çıktık. Patlamalarının neden sandıkları şey olamayacağını söyledim – hemen anladı. Bunu benim dünyaya duyurmamın, bu arkadaşların başlarını Sovyet rejimi altında ciddi derde sokmasından korktuğumu söyledim. Böyle bir şey olmayacağı konusunda beni temin etti ve onlarla buluşup kendisine söylediklerimin aynısını onlara da anlatmam konusunda teşvik etti. Ben de öyle yaptım ve Rus X ışını patlamalarını bir daha duymadık. Hâlâ dost olduğumuzu da eklemek isterim!

Bu Rus patlamalarına neyin sebep olduğunu merak ediyor olabilirsiniz. O sırada hiçbir fikrim yoktu, ama şimdi biliyorum: İnsan yapıymıydı – ve bilin bakalım kim yapmıştı? Ruslar! Birazdan bu gizemi çözeceğim.

Şimdilik gerçek X ışını patlamalarına dönelim, onları hâlâ çözmeye çalışıyorduk. Patlamaların X ışınları bir X ışını ikili sisteminin toplayıcı diskine (ya da donör yıldızına) dalarken, disk ve yıldız

daha sıcak olur ve tayfın optik kısmında kısa bir süre parlar. X ışınlarının önce diske ve donör yıldıza yolculuk etmesi gerektiğinden, diskten gelen herhangi bir optik anlık parıldamanın, X ışını patlamasından saniyeler sonra bize ulaşmasını bekliyorduk. Bu yüzden koordineli X ışını ve optik patlamalar avına çıktık. Eski lisansüstü öğrencim Jeff McClintock ve çalışma arkadaşları 1977'de iki patlama kaynağını optik olarak teşhis etmişlerdi (MXB 1636-53 ve MXB 1735-44). Bu iki kaynak bizim hedeflerimiz oldu.

Bilimin nasıl işlediğini görüyor musunuz? Bir model doğruysa, o zaman gözlemlenebilir sonuçlarının olması gerekir. 1977 yazında meslektaşım ve dostum Jeffrey Hoffman'la birlikte eşzamanlı bir X ışını, radyo, optik ve kızılötesi "patlama gözlemi" organize ettik.

Bu kendi başına müthiş bir serüvendi. On dört ülkenin kırk dört gözlemevindeki gökbilimcileri, en uygun saatlerdeki kıymetli gözlem zamanını ("karanlık zaman" diye bilinir, ay yokkenki zaman) tek bir sönük yıldıza –hiçbir şey yapmayabilirdi– vakfetmeye ikna etmemiz gerekiyordu. Katılmaya istekli olmaları, gökbilimcilerin X ışını patlamalarının gizemine ne kadar önem verdiklerini gösterir. Otuz beş günü aşkın süreyle, SAS-3'le patlama kaynağı MXB 1636-53'ten 120 X ışını patlaması tespit ettik, fakat yerdeki teleskoplarla kesinlikle hiçbir şey gözlemlenmedi. Ne büyük hayal kırıklığı!

Tüm dünyadaki meslektaşlarımızdan özür dilemek zorunda kaldığımızı tahmin edersiniz, fakat işin aslı şu ki, hiçbiri bunu bir sorun olarak görmedi. Bilim işte böyle bir şey.

Ertesi yıl sadece büyük yer teleskopları kullanarak tekrar denedik. Jeff Hoffman astronot olmak için Houston'a gitmişti, fakat yüksek lisans öğrencim Lynn Cominsky ve Hollandalı gökbilimci Jan van Paradijs (MIT'ye Eylül 1977'de gelmişti) 1978'deki patlama gözetlemesinde bana katıldılar.* Bu sefer MXB 1735-44'ü seçtik. 2 Haziran 1978'de başardık! Josh Grindlay ve çalışma arkadaşları (McClintock da dahil), biz MIT'de SAS-3'le bir X ışını patlaması tespit ettikten birkaç saniye sonra, Şili'deki Cerro Tololo gözlemevinde bulunan 1,5 metrelik teleskopla optik bir patlama tespit ettiler. *Nature*'a kapak olduk, epey onur verici bir şey. Bu çalışma, X ışını pat-

* O sıralar Jan ile çok yakın arkadaş olup 1999'daki zamansız ölümüne kadar yaklaşık 150 ortak bilimsel yayın yapacağımız hiç aklıma gelmezdi.

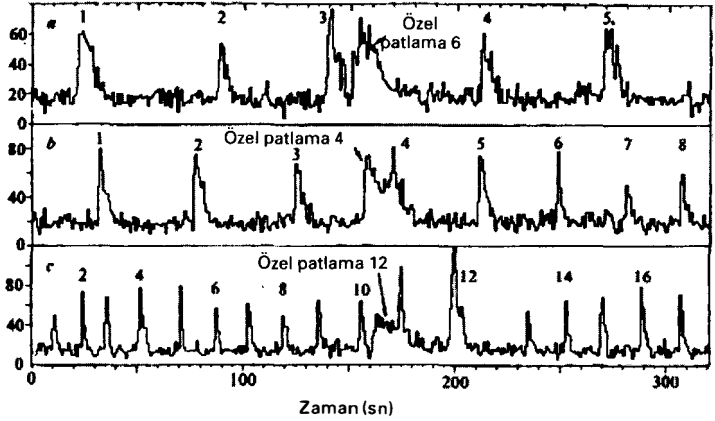
lamalarının X ışını ikili sistemlerinden geldiği yönündeki kanaatimizi daha da güçlendirdi.

Bize en şaşırtıcı gelen, biri dışında bütün patlama kaynakları bir günde bir avuç patlama üretirken Rapid Burster'ın onlardan bu kadar farklı olmasıydı. Cevap, kariyerimin en harika –ve en hayret verici– keşfinde gizli.

Rapid Burster geçici kaynak dediğimiz şeydi. Cen X-2 de geçici kaynaktı (bkz. 11. Bölüm). Ne var ki Rapid Burster tekerrür eden geçici kaynak dediğimiz şeydi. 1970'lerde her altı ayda bir patlıyor ama birkaç hafta sonra yayından kalkıyordu.

Rapid Burster'ı keşfettikten yaklaşık bir buçuk yıl sonra patlama profilinde, bu gizemli kaynağı X ışını patlamalarının Reşit Taşı'na dönüştürecek bir şey fark ettik. 1977 güzünde, Rapid Burster yine faalken, lisans öğrencim Herman Marshall X ışını patlama profillerine çok yakından baktı ve çok seri patlamaların arasında farklı türden bir patlama keşfetti, daha az sıklıkla, yaklaşık her üç ya da dört saatte bir gelen bir patlama. Bu özel patlamalar –başta böyle anıyorduk– pek çok başka patlama kaynağından gelen bütün patlamaları tanımlayan, aynı kara cisimvari soğuma profilini sergiliyordu. Başka bir deyişle, belki de bizim özel patlamalar dediğimiz şeyler –çok geçmeden bunlara Tip I patlamaları dedik, seri patlamalara da (*rapid bursts*) Tip II adını verdik– hiç de o kadar özel değildi. Tip II patlamaları apaçık spazmodik toplanmanın sonucuydu –bu konuda hiç şüphe yoktu– fakat yaygın Tip I patlamaları belki termonükleer parlamalar yüzündendi gerçekten de. Bunu nasıl anladığımızı birazdan anlatacağım – biraz daha sabredin.

1978'de MIT'deki meslektaşım Paul Joss, nötron yıldızlarının yüzeyindeki termonükleer parlamaların doğası hakkında bazı özenli hesaplamalar yapmıştı. Biriken hidrojenin önce sessiz sedasız füzyonla helyuma dönüştüğü, fakat helyum kritik kütleyle, basınca ve sıcaklığa ulaşınca şiddetli bir şekilde patlayıp bir termonükleer patlama ürettiği sonucuna vardı (Tip I patlaması). Bu durum, düzenli toplanmada açığa çıkan X ışını enerjisinin, termonükleer patlamalarda açığa çıkan enerjiden kabaca yüz kat daha büyük olması gerektiği öngörüsünü getirdi. Başka bir ifadeyle, eldeki kütleçekim potansiyel enerjisi, eldeki nükleer enerjiden kabaca yüz kat daha büyüktü.



1977 güzünde Rapid Burster'dan SAS-3'le tespit edilmiş X ışını patlamaları. Çizginin yüksekliği yaklaşık bir saniye aralığında tespit edilmiş X ışını sayısını gösteriyor, yatay eksen ise zamanı gösteriyor. Her panelde yaklaşık 300 saniyelik veri bulunuyor. Seri şekilde tekrarlanan Tip II patlamaları ardışık olarak numaralandırılmış. Her panelde bir "Özel Patlama" görünür durumda; numaraları farklı. Bunlar Tip I patlamaları (termonükleer parlamalar). Bu şekil Hoffman, Marshall ve Lewin'in 16 Şubat 1978'de *Nature*'da yayımlanan makalelerinden alındı.

1977 güzünde gözlemlerimizin beş buçuk günü boyunca Rapid Burster'dan gelen X ışınlarıyla yayılan toplam enerji miktarını ölçtük ve Tip II patlamalarında, "özel" Tip I patlamalarından yaklaşık 120 kat daha fazla enerji yayıldığını bulduk. İşte bu son noktayı koymuştu! O zaman Rapid Burster'ın bir X ışını ikili sistemi olduğunu, Tip I patlamalarının toplayıcı bir nötron yıldızının yüzeyindeki termonükleer parlamalar olduğunu ve Tip II patlamalarının da donör yıldızdan nötron yıldızına akan maddenin kütleçekim potansiyel enerjisinin açığa çıkması sonucu meydana geldiğini öğrendik. Artık bunun tartışma götürür yanı yoktu; bütün Tip I patlama kaynaklarının nötron yıldızı X ışını ikili sistemleri olduğu netleşmişti. Aynı zamanda kara deliklerin patlamaların kaynağı olamayacağını kesin bir şekilde anlamıştık. Kara deliklerin yüzeyi yoktur, o yüzden termonükleer parlamalar üretemezler.

1978'e gelindiğinde, patlama kaynaklarının toplayıcı nötron yıldızı ikili sistemleri olduğu çoğumuz için gün gibi aşikârken, Har-

vard'dan Grindlay patlamaların aslında büyük kütleli kara delikler tarafından üretildiği yönündeki ısrarını sürdürüyordu. Hatta 1978'de, patlamaların nasıl çok büyük kütleli kara delikler tarafından üretildiğini açıklamaya çalıştığı bir makale de yayımladı. Size bilimin-sanlarının kendi kuramlarına duygusal olarak bağlanabildiklerini söylemiştim. Cambridge'deki *The Real Paper* "Harvard ve MIT Kapıştı Kapışacak" başlıklı uzun bir haber yaptı, bir de Grindlay'le benim resmimi koydu.

Patlama kaynaklarının ikili sistem doğasına ilişkin kanıt, 1981'de Danimarkalı arkadaşım Holger Pederson ve Jan van Paradijs'le birlikte patlama kaynağı MXB 1636-53'ün 3,8 saatlik yörünge devrini keşfettiğimiz zaman geldi. Yine de Grindlay'in pes etmesi 1984'ü buldu.

Sizin anlayacağınız, kendine has gizemleri olan normal (Tip I) X ışını patlamalarının kuramının doğrulanmasına yardımcı olan şey, en acayip X ışını kaynağı Rapid Burster oldu. İşe bakın ki, getirdiği bütün açıklamalara rağmen Rapid Burster çoğunlukla bir gizem olarak kalmıştır. Gözlemciler için pek olmasa da kuramcılar için bir mahcubiyet belgesi. Elimizden gelen tek şey –ve bazı açılardan bugüne kadar yapabildiklerimizin en iyisi– "spazmodik toplanma" açıklamasını bulmak oldu (biliyorum, egzotik bir tatilde yakalanacağınız bir hastalık gibi geliyor). Işın doğrusu, bu da sırf laf, fizik değil. Her nasılsa, nötron yıldızına yönelmiş madde geçici olarak diskte alıkonuluyor, sonra bir madde damlası ya da halkası diskten salınıyor ve yıldızın yüzeyine fışkırıp patlamalar halinde kütleçekim potansiyel enerjisi salıyor. Bu salıma disk kararsızlığı diyoruz, fakat bu da sırf laf; bunun neden olduğu ve nasıl işlediği hakkında hiç kimsenin bir fikri yok.

Doğrusunu söylemek gerekirse, X ışını kaynaklarının tekerrür eden geçici davranışının arkasındaki mekanizmanın ne olduğunu da anlamıyoruz. Neden bir başlayıp bir duruyorlar, bir başlayıp bir duruyorlar? Bilemiyoruz. 1977'de, bir keresinde SAS-3'ün bütün dedektörlerinden aynı anda patlamalar yakalamaya başladık. Tuhaf bir durumdur, çünkü gökyüzünü tamamen farklı yönlerde görüyorlardı. Bulabildiğimiz tek mantıklı açıklamaya göre, uzay aracının tamamına çok yüksek enerjili gama ışınları nüfuz ediyordu (X ışınlarının yapamayacağı bir şey) ve ardında sinyaller bırakıyordu. Bütün de-

dektörler aynı anda "alarm verdiğinden" bu gama ışınlarının hangi yönden geldiği hakkında hiçbir fikrimiz yoktu. Birkaç aylık bir süre zarfında bu vakalardan otuz-kırk tane gözlemledik, sonra durdular. Fakat on üç ay sonra tekrar başladılar. MIT'de kimsenin hiçbir fikri yoktu.

Yükseklisans öğrencilerimden Christiane Tellefson'un yardımıyla bu patlamaların listesini oluşturmaya başladım, hatta bunları profillerine göre A, B ve C patlamaları diye sınıflandırdık. Bunları bir dosyaya koyup üzerine BOKTAN PATLAMALAR yazdım.

NASA'dan bazı insanlara (bizi her sene ziyaret ederlerdi) bir sunum yaptığımı ve X ışını patlamalarına dair en son heyecan verici haberlerimizi aktarıp bu tuhaf patlamalardan bazılarını gösterdiğimi hatırlıyorum. Bunları yayımlama konusundaki isteksizliğimi açıkladım; bana ikna edici görünmüyordu bir türlü. Ne var ki yayımlanmasını geciktirmemem için beni teşvik ettiler. Bunun üzerine Christiane'le bir makale yazmaya başladık.

Derken bir gün, hiç hesapta yokken eski öğrencim Bob Scarlett'tan bir telefon geldi. O sıralarda Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'nda gizlilik derecesi yüksek araştırmalar yapıyordu. Bu tuhaf patlamaları yayımlamamamı istedi. Bir açıklama istedim, fakat nedeni bana söylemesi yasaktı. Bu patlamaların meydana geldiği bazı zamanların bilgisini ona vermemi istedi, ben de verdim. İki gün sonra tekrar aradı ve bu sefer bunları ulusal güvenlik gerekçesiyle yayımlamamam için ısrar etti. Az kalsın sandalyemden düşüyordum. Hemen arkadaşım France Córdova'yı aradım; France bir zamanlar MIT'de benimle birlikte çalışmıştı, ama şimdi ayrıca Los Alamos'ta çalışıyordu. Bob'la bu konuyu konuşmuş olmalı, çünkü birkaç gün sonra o da arayıp yayımlamamam konusunda ısrar etti. İçimi rahatlatmak için bu patlamaların gökbilimi açısından değerinin sıfır olduğunu söyledi. Uzun lafın kısası, yayımlamadım.

Çok yıllar sonra neler olduğunu öğrendim: "Boktan patlamalar" nükleer elektrik jeneratörlerinin çalıştırdığı birkaç Rus uydusu tarafından üretiliyordu ve bu jeneratörler son derece güçlü radyoaktif kaynaklar içeriyordu. SAS-3 ne zaman Rus uydularının birine yaklaşırsa, dedektörlerimize radyoaktif kaynaklardan yayılan gama ışınları yağdırıyorlardı. Şimdi: Ta 1971'de Ruslar tarafından tespit edilen o garip patlamaları hatırlıyor musunuz? Bunlara da Rusların

kendi uydularının neden olduğu konusunda artık oldukça eminim... Ne gülünç!

1970'lerin sonlarında başlayıp 1995'i de içine alan hayatımın bu dönemi inanılmaz yoğundu. X ışını gökbilimi o zamanlar gözlemsel gökfiziğinin en önde gelen dalıydı. X ışını patlamalarıyla uğraşmam beni bilimsel kariyerimin zirvesine çıkardı. Her yıl tüm dünyada, Doğu ve Batı Avrupa'da, Avustralya'da, Asya'da, Latin Amerika'da, Ortadoğu'da ve tüm ABD'de muhtemelen on-on beş konferans verdim. Pek çok uluslararası gökfiziği konferansına konuşmacı olarak davet edildim ve X ışını gökbilimi üzerine yazılan üç kitabın baş editörlüğünü yaptım – sonuncusu 2006'da çıkan *Compact Stellar X-ray Sources*'dı (Tıkız Yıldızlardan Oluşan X Işını Kaynakları). Coşkulu, harika zamanlardı.

Ne var ki müthiş ilerlemeler kaydetmiş olmamıza rağmen, Rapid Burster en derin gizemlerini ortaya çıkarmak için yapılan tüm girişimlere direndi. Birisi bir gün çözecek, eminim. Sonra onlar da eşit derecede hayrete düşürücü bir şeyle karşılaşacaklar. Fiziğin sevdiğim yanı bu. MIT'deki odamda Rapid Burster'in patlama profillerinin afiş büyüklüğünde, dikkat çekici bir resmini bulundurmamın sebebi de bu. İster Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda, ister Hubble Ultra Derin Alan'ın en uzak köşesinde olsun, fizikçiler gitgide daha fazla veri elde ediyorlar ve gitgide daha ustalıkla kuramlarla çıkageyorlar. Bildiğim bir şey var ki, ne bulurlarsa bulsunlar, ne ileri sürerlerse sürsünler, ne kuramlaştırırlarsa kuramlaştırsınlar, neticede daha çok gizemi gözler önüne serecekler. Fizikte daha çok cevap, insanı daha çok soruya götürür.

Görme Biçimleri

Çoğu lise ve üniversite öğrencisi, genellikle bir dizi karmaşık matematik formülü olarak öğretildiğinden fizik dersinden nefret eder. Benim MIT'de uyguladığım yaklaşım o değil, bu kitapta uyguladığım yaklaşım da o değil. Ben fiziği dünyamızı görmenin bir yolu olarak sunuyorum; miniminicik atomaltı parçacıklardan evrenimizin uçsuz bucaksızlığına kadar, aksi halde bizden saklı kalacak toprakları açığa çıkaran bir görme biçimi olarak. Kütleçekiminden elektromanyetizmaya kadar, fizik çevremizde etkili olan görünmez kuvvetleri bize gösterir. Ayrıca, sadece gökkuşaklarını değil, aynı zamanda haleleri, siskuşaklarını, glorieleri ve hatta camkuşaklarını nerede ve ne zaman bulacağımız konusunda tetikte olmamızı sağlar.

Her öncü fizikçi dünyaya bakışımızı değiştirmiştir. Newton'dan sonra artık tüm güneş sisteminin hareketlerini anlayıp önceden tahmin edebiliyorduk ve bunun için gerekli matematiğe –yüksek matematik– sahiptik. Newton'dan sonra hiç kimse, güneşin renklerden oluşmadığını ya da gökkuşaklarının, yağmur damlalarında kırınıp yansıyan güneş ışığından ibaret olmadığını iddia edemezdi. Maxwell'den sonra elektrik ve manyetizma sonsuza dek birbirine bağlandı: Hatta bu kitapta onları farklı bölümlere koymam zor oldu.

Fizikle sanat arasında büyüleyici bir ilişki görmemin sebebi budur; sanatta öncülük yapmak da yeni bir görme biçimi, dünyaya yeni bir bakış şekli sunmaktır. Hayatımın büyük bir kısmında fiziğe olduğu kadar modern sanata da tutkuyla bağlandığımı öğrenince şaşırabilirsiniz; ikisiyle de bir aşk ilişkim var! Daha önce büyük porselen koleksiyonumdan söz etmiştim. Ayrıca altmışlı yılların ortalarından itibaren yüzden fazla sanat eseri topladım –tablolar, kollar, heykel-

ler, kilimler, sandalyeler, masalar, kuklalar, maskeler– ve bunları sergilemek için artık evimde duvar ya da yerde boş alan kalmadı.

MIT'deki odamda fizik baskın çıkısa da, üniversiteden geçici olarak aldığım iki büyük sanat eseri var. Fakat evde muhtemelen on kadar fizik kitabı vardır – ve yaklaşık 250 sanat kitabı. Bana sanat sevgisi erkenden aşılandığı için şanslıyım.

Annem babam sanat eserleri toplardı, ama entelektüel bakımdan sanattan çok anlamazlardı. Hoşlarına ne giderse onu alıyorlardı, bu da insanı hiçbir yere götürmeyebilir. Bazen önemli eserler seçiyorlardı, bazen de o kadar önemli olmayan eserleri, en azından geriye dönüp bakınca öyle geliyor. Üzerimde güçlü bir etki yaratmış bir tablo babamın bir portresidir, şimdi Cambridge'deki şöminemin üzerinde asılı. Gerçekten çok çarpıcı. Babam epey ilginç bir karakterdi – ve benim gibi çok dikkafalıydı. Babamı iyi tanıyan ressam, bu bel-den yukarı pozda onu harika yakalamış: koca, kel, uzun kafasını güçlü geniş omuzlarının arasına oturtmuş, küçük ağzı kendinden hoşnut bir tebessüm sergiliyor. Fakat gerçekten göze çarpan şey, gözlükleri: Kalın, siyah çerçeveler görünmeyen gözleri çevreliyor, görünmeyen gözler odada sizi takip ediyor, bu sırada sol kaşı da çerçevenin üzerinden alaycı bir şekilde yukarı kalkmış.

Lisedeyken babam beni sanat galerilerine ve müzelere götürürdü, işte o zaman sanata gerçekten âşık olmaya başladım, çünkü görmenin yeni biçimlerini öğretmişti bana. Galerilerde ve müzelerde, okuldakinin aksine kendi ilgi alanıma göre ilerlemeye, dilediğim zaman durmaya, istediğim kadar kalmaya, kafama esince devam etmeye bayılmıştım. Buralarda sanatla olan ilişkinizi kendiniz geliştiriyorsunuz. Kısa zaman sonra müzelere tek başıma gitmeye başladım; çok geçmeden biraz bilgi edinmiştim bile. Van Gogh'a daldım (biliyorsunuz ismi aslında *fan Khokh* diye okunur – Hollandalı değilseniz telaffuzu mümkün değil, gırtlaktan çıkan iki ses arasında belli belirsiz kısa bir O sesi). On beş yaşındayken bir de baktım sınıfıma van Gogh hakkında bir ders anlatıyorum. Bazen arkadaşlarıma müzeleri gezdiriyordum. Yani beni öğretmenlik işine sokan aslında sanattı.

Başkalarına –hangi yaşta olursa olsun– ufuklarını genişletmek için bir şeyler öğretmenin ne kadar harika bir duygu olduğunu ilk o zaman öğrendim. Sanatın bazı insanlara, fiziğin fizik öğretmenleri

kötü olanlara görüldüğü kadar anlaşılmaz ve zor görünmesi gerçekten üzücü. Son sekiz yıldır her hafta MIT'deki duyuru panoma bir sanat testi koymamın bir sebebi budur – netten çıktısını aldığım bir resim ve "Ressamı kim?" sorusu. Yıl boyunca en çok doğru cevap vermiş üç katılımcıya ödül de veriyorum – çok güzel sanat kitapları. Bazı müdavimler internetin altını üstüne getiriyor ve böylece sanat hakkında bilgi ediniyorlar! O haftalık testlerden o kadar keyif aldım ki, şimdi iki haftada bir Facebook sayfama benzer bir test koyuyorum. Dilerseniz siz de deneyebilirsiniz.

Hayatımın bazı dönemlerinde harikulade, öncü sanatçılarla birlikte çalışma fırsatı yakaladığım için de şanslıyım. 1960'ların sonlarında Alman "gökyüzü ressamı" Otto Piene, MIT'nin İleri Görsel Araştırmalar Merkezi'ne öğretim üyesi olarak geldi ve daha sonra burayı yirmi yıl boyunca yönetti. O zamana kadar pek çok dev balon uçurmuş olduğumdan, Otto'ya gökyüzü sanatında yardımcı olma fırsatını yakaladım. Birlikte çalıştığımız ilk projenin adı Işık Hattı Deneyi'ydi ve helyumla dolu dört tane 75 metre uzunluğunda polietilen hortumdan oluşuyordu. İki ucunu da aşağı tuttuğunuzda, MIT'nin atletizm sahasında ilkbahar meltemleriyle zarif yaylar çiziyordu. Bu dördünü birbirine bağlayıp üç yüz metre uzunluğunda bir balon yaparak bir ucunu gökyüzüne saldık. Geceleyin yüzlerce metre havadaki yılan görünümlü balonlar en acayip ve değişken şekillerde kıvrılıp dalgalanırken, getirdiğimiz spot lambaları bazı kısımlarını aydınlatıyordu. Olağanüstüydü!

Bu projelerdeki işim genellikle teknikti: Otto'nun balonların büyüklüğü ve şekliyle ilgili fikirlerinin uygulanabilir olup olmadığını kestirmektir. Sözgelimi, polietilenin kalınlığı ne olmalıydı? Yükselmesi için hafif olmasını istiyorduk, ama rüzgârlı hava şartlarına dayanacak kadar da sağlam olmalıydı. 1974'te Colorado, Aspen'deki bir etkinlikte, bir "ışık çadırı"nın ip hatlarından çok yüzeyli cam boncuklar sarkıttık. Fizik ve estetik açıdan uygun bir çözüm bulmak için farklı balon büyüklükleri ve boncuk ağırlıklarıyla ilgili pek çok hesap yaptım. Otto'nun sanatsal fikirlerini gerçekleştirmesi için fizikle uğraşmayı çok seviyordum.

Münih'teki 1972 Olimpiyatlarının kapanış törenleri için tasarladığı, devasa beş renkli *Gökkuşağı* balonuna gerçekten kendimi verdim. Tabii Olimpiyatların, İsrailli atletlerin katledilmesiyle öyle fe-

lakete bir biçimde biteceğini bilemezdik; o yüzden Olimpiyat denizinin yaklaşık 150 metre yukarısında kemer oluşturan 450 merelik *Gökkuşağı*'mız, bu facia karşısında bir umut sembolü oldu. *Gökkuşağı* balonunun bir resmini fotoğraflar bölümünde görebilirsiniz. Evrene bakmak için balon uçurmaya başladığımda, böyle projelere katılacağım aklımın ucundan geçmezdi.

Otto beni Hollandalı ressam Peter Struycken'le tanıştırdı. Anemle babam Hollanda'da eserlerini topladığı için sanatını iyi biliyordum. Otto bir gün MIT'de beni arayıp, "Odamda Hollandalı bir ressam var; tanışmak ister miydin?" dedi. Aynı küçük ülkeden olunca, insanlar hep sohbet etmek isteyeceğimizi sanırlar, ama çoğu zaman ben istemem. Otto'ya dedim ki, "Niye isteyeyim, adı ne?" Otto "Peter Struycken" deyince kabul ettim tabii, fakat ne olur ne olmaz diye Otto'ya sadece yarım saat görüşebileceğimi söyledim (doğru değildi). Bunun üzerine Peter odama geldi; neredeyse beş saat konuştuk (evet beş saat!) ve sonrasında onu Legal Sea Foods'da istiridye yemeye davet ettim! En başından kaynaştık ve Peter yirmi yılı aşkın süredir en yakın arkadaşlarımdan biri oldu. Bu ziyaret hayatımı temelli değiştirdi!

O ilk görüşme sırasında Peter'in ana sorununun/sorusunun ("Bir şey, başka bir şeyden ne zaman farklıdır?") tamamen insanın farklılık tanımına dayalı olduğunu "görmesini" sağladım. Bazıları için bir kare bir üçgenden, o da bir çemberden farklı olabilir. Bununla birlikte, kapalı alan oluşturan geometrik çizgileri "aynı" diye tanımlarsanız – eh, işte o zaman bu üç şekil de aynıdır.

Peter bana aynı programla yapılmış on kadar bilgisayar çizimi gösterdi ve "Bunların hepsi aynı" dedi. Bana hepsi çok farklı görünüyordu. Her şey insanın "aynı" tanımına bağlı. Bütün bunların hepsi ona aynı geliyorduyorsa, o zaman belki bir tanesini bana bırakabileceğini söyledim. Bıraktı ve üzerine Hollandaca şunu yazdı: "*Met dank voor een gesprek*" (kelime kelime, "Tartışma için teşekkürlerimle"). Tipik Peter işiydi: çok, çok yalın. Doğrusunu söylemek gerekirse, elimdeki pek çok Struycken'den en çok bu küçük çizimi sevirim.

Peter bende, sadece sanata karşı çok ilgili bir fizikçi değil, aynı zamanda ona çalışmalarında yardımcı olabilecek birini de görmüştü. Kendisi bilgisayar çiziminde dünyanın öncülerinden biridir. Pe-

ter 1979'da (Lien ve Daniel Dekkers'le beraber) bir yılığına MIT'ye geldi ve birlikte çok yakın çalışmaya başladık. Hemen hemen her gün görüşüyorduk ve haftada iki-üç kere onun evine akşam yemeğıne gidiyordum. Peter'dan önce sanata "bakıyordum" – sanatı "görmemi" sağlayan Peter oldu.

O olmasaydı galiba öncü eserlere odaklanmayı, dünyayı görüş biçimimizi nasıl köklü olarak dönüştürebildiklerini görmeyi hiç öğrenemezdim. Sanatın sadece –hatta çoğunlukla– güzellik hakkında olmadığını öğrendim: Sanat keşfetmekle ilgilidir – sanatla fiziğın benim için bir araya geldiğı yer de burası.

O zamandan sonra sanata çok farklı bakmaya başladım. Neden "hoşlandığım" artık benim için önemli değildi. Önemli olan sanatsal nitelikti, dünyaya yeni bir bakış biçimi, bu da ancak sanattan gerçekten bir şeyler anlıyorsanız kavranabilir. Eserlerin yapıldığı yıllara yakından bakmaya başladım. Maleviç'in 1915'ten 1920'ye kadar ki sanat eserleri büyüleyicidir. Başkaları tarafından 1930'larda yapılmış benzer eserler hiç ilgimi çekmiyor. "Sanat ya intihaldir ya da devrim," demiş Paul Gauguin, Gauguin'e has bir kibirle, ama içinde gerçek payı var.

Öncü eserlerin ortaya çıkmasını sağlayan evrimden büyülenmiştim. Sözgelimi, kısa süre sonra bir Mondrian tablosunun yapıldığı yılı doğru olarak söyleyebiliyordum – 1900 ile 1925 yılları arasındaki gelişimi akıllara durgunluk vericiydi. Kızım Pauline de şimdi bunu yapabiliyor. Yıllar içinde müzelerin bazen bir tablo için yanlış tarih verdiğiine birden fazla kere şahit oldum. Bunu belirttiğim zaman (hep yaptığım gibi), müze müdürleri bazen mahcup olurlar ama tarihi daima değiştirirler.

Peter'la bir sürü fikri üzerine çalıştım. İlk projemiz on altı boyutlu "16. Uzak" sanatıydı (on bir boyutuyla sicim kuramını yendik). Peter'ın *Shift* dizisini de hatırlıyorum. Çok karmaşık ve ilginç bir sanat üreten bir bilgisayar programına matematiksel destek geliştirmişti. Fakat matematikten fazla anlamadığı için denklemleri tuhaftı – gerçekten gülünçtü. Matematikğin güzel olmasını istiyordu ama nasıl yapacağını bilmiyordu.

Bir çözüm bulabildim, fizikte hiç o kadar karmaşık değil: üç boyutlu dalgalar. Dalga boyunu belirleyebilirsiniz; dalgaların hızını belirleyebilirsiniz; yönlerini de gösterebilirsiniz. Birbiri içinden ge-

çen dalgalar istiyorsanız yapabilirsiniz. Bir başlangıç koşuluyla başlar, sonra bırakırsınız dalgalar birbirlerine girer ve üst üste toplarsınız. Böylece çok ilginç girişim örüntüleri ortaya çıkar.

Bunun temelinde yatan matematik güzeldi, Peter için de çok önemliydi. Övünüyor değilim – o da size aynısını söylerdi. Hayatında çoğunlukla oynadığım rol bu: işlerin nasıl matematiksel olarak güzel ve kolay anlaşılır hale getirileceğini ona göstermek. Bana her bir dizisinden daima seve seve bir sanat eseri seçtirmiştir. Ne şanslıyım, on üç civarında Struycken'im var!

Peter'la birlikte çalışmam sayesinde, Rotterdam'daki Boijmans van Beuningen Müzesi'nin müdürü tarafından, 1979'da Amsterdam'ın engin kubbesi altında ilk Mondrian konferansımı vermek için davet edildim. Salon tıklım tıklım doluydu; dinleyicilerimin sayısı yaklaşık dokuz yüzdü. Bu çok itibarlı konferans artık iki yılda bir veriliyor. 1981'deki konuşmacı Umberto Eco'ydu, 1993'te Donald Judd, 1995'te Rem Koolhaas ve 2010'da Charles Jencks.

Otto ve Peter'la birlikte çalışmalarımız sanat üretimindeki tek katkım değildi; ben de bir keresinde (şaka yollu) biraz kavramsal sanat yapmaya çalıştım. "20. Yüzyıl Sanatına Bir Fizikçinin Gözüyle Bakmak" adlı dersimi verirken (mitworld.mit.edu/speaker/view/55), evde fizik üzerine bir düzine fakat sanat üzerine en az iki yüz elli kitabım olduğunu anlattım – yirmiye birlik bir oran. Masanın üzerine on sanat kitabı koydum ve dinleyicilerin arada gelip karıştırmalarını istedim. Uygun dengeyi sağlamak için yarım bir fizik kitabı da getirdiğimi söyledim. O sabah bir fizik ders kitabını sırtından ikiye yarımıştım. Onu havaya kaldırdım ve çok özenle kestiğimi belirttim – gerçekten yarım bir kitaptı. "Sanatla ilgilenmeyenleriniz için," dedim kitabı masanın üstüne gürültüyle bırakarak, "buyurun işte!" Ne yazık ki kimse anlamadı.

Rönesans döneminden günümüze kadar sanata şöyle bir baktığımızda bariz bir eğilim görüyoruz. Ressamlar hüküm süren geleneklerin dayattığı kısıtlamaları aşama aşama kaldırıyorlar – konu, biçim, malzeme, perspektif, teknik ve renk kısıtlamalarını. On dokuzuncu yüzyılın sonuna geldiğimizde, ressam, doğal dünyanın bir temsili olarak sanat fikrini tamamen terk etmiş durumda.

Aslında bu öncü eserlerin şimdi pek çoğunu muhteşem buluyoruz, ama sanatçının niyeti bambaşka bir şey. Onlar dünyaya yeni bir

bakış biçimi sundular. Bugün simgeleşmiş ve güzel diye hayran kaldığımız eserlerin pek çoğu –sözelimi van Gogh'un Yıldızlı Gece'si ya da Matisse'in Yeşil Çizgi'si (karısının bir portresi)– zamanında alay ve husumetle karşılanmıştı. Şimdi hangi müzede olsa en popüler ressamlar arasında bulunan bugünün sevilen izlenimcileri de –Monet, Degas, Pissarro, Renoir– tablolarını göstermeye ilk başladıklarında hor görüldüler.

Şimdi çoğumuzun onların eserlerini güzel buluyor olmamız, ressamların çağlarına galip geldiklerini gösterir: Onların yeni görme biçimi, dünyaya bakma biçimi, bizim dünyamız, bizim görme biçimimiz oldu. Yüz yıl önce düpedüz çirkin olan şey şimdi güzel olabiliyor. O zamanın eleştirmenlerinden birinin Matisse'e çirkinlik havarisini demiş olmasına bayılıyorum. Koleksiyoncu Leo Stein, Madame Matisse'in portresi olan *Şapkalı Kadın* tablosuna, "bugüne kadar gördüğüm en berbat boya lekesi" demiş – ama tabloyu satın almış!

Yirminci yüzyılda sanatçılar bulunmuş nesneler kullandılar – bazen Marcel Duchamp'ın pisuarı (o "fıskiye" diyor) ve üzerine kıskırtıcı L.H.O.O.Q. harflerini* yazdığı Mona Lisa'sı gibi insanı şoke eden şeyler. Duchamp büyük özgürleştiriciydi; Duchamp'tan sonra her şey mubah oldu. Sanata bakış şeklimizi sarsmak istiyordu.

Hiç kimse van Gogh, Gauguin, Matisse ve Derain'den sonra renge aynı şekilde bakamaz. Ve gene hiç kimse Andy Warhol'dan sonra Campbell's konserve çorba kutularına ya da Marilyn Monroe'nun bir resmine de aynı şekilde bakamaz.

Öncü sanat eserleri güzel olabiliyor, hatta baş döndürücü de, fakat çoğunlukla –en azından ilk başta kesinlikle– şaşırtıcı, hatta çirkin görünüyorlar. Ne kadar çirkin olursa olsun, öncü sanat eserindeki esas güzellik, anlamında yatıyor. Dünyaya yeni bir bakış hiçbir zaman alıştığınız o sıcak yatak değildir; daima buz gibi soğuk bir duştur. Bence o soğuk duş insanı dinçleştirir, zinde tutar ve özgür kılar.

Fizikteki öncü çalışmalar hakkında da aynı şekilde düşünüyorum. Fizik önceden görünmez ya da puslu olan topraklara o harika aydınlatıcı adımlarından birini daha atınca, dünyayı bir daha asla tam olarak aynı göremeyiz.

* Harfler Fransızca okunduğunda "Elle a chaud qu cul" ("Seksi bir kıcı var") cümlesi ortaya çıkıyor. –y.n.

Bu kitap aracılığıyla tanıttığım pek çok baş döndürücü keşif, ilk yapıldığı zamanda şaşkınlık yaratıcıydı. Bu keşiflerin arkasındaki matematiği öğrenmek zorundaysak, gerçekten insanın gözünü korkutabiliyor. Fakat umarım bu çığır açıcı keşiflere dair anlattıklarım, bunların ne kadar heyecan verici ve güzel olduklarını görmenizi sağlamıştır. Tıpkı Cézanne, Monet, van Gogh, Picasso, Matisse, Mondrian, Maleviç, Kandinski, Brancusi, Duchamp, Pollock ve Warhol'un, sanat dünyasına meydan okuyan yeni yollar açmaları gibi, Newton ve ardından gelenler de bize yeni bir görme gücü verdi.

Fiziğin yirminci yüzyıl başlarındaki öncüleri –aralarında Antoine Henri Becquerel, Marie Curie, Niels Bohr, Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Enrico Fermi de var– biliminsanlarının binlerce değilse de yüzlerce yıllık gerçeklik anlayışlarını tümenden sarsan fikirler ileri sürdüler. Kuantum mekaniğinden önce parçacık parçacıktı ve Newton yasalarına uyuyordu; dalga da dalgaydı ve farklı bir fiziğe uyuyordu. Şimdiyse bütün parçacıkların dalga gibi davranabilip, bütün dalgaların da parçacık gibi davranabildiğini biliyoruz. Dolayısıyla ışığın parçacık mı yoksa dalga mı olduğuna ilişkin on sekizinci yüzyıl tartışmaları (1801'de Thomas Young tarafından dalga lehine sonuçlandırılmış gibi görünüyordu – bkz. 5. Bölüm) artık mesele değil çünkü ışık hem dalga hem parçacık.

Kuantum mekaniğinden önce fiziğin belirlenimci olduğuna inanılıyordu, yani bir deneyi yüz kere yaparsanız, yüz kere tam aynı sonucu elde edeceğiniz düşünülüyordu. Şimdi bunun doğru olmadığını biliyoruz. Kuantum mekaniği olasılıklarla ilgilenir – kesinliklerle değil. Bu o kadar şoke edici bir şeydi ki Einstein bile asla kabul etmedi. "Tanrı zar atmaz" onun ünlü sözüydü. Eh, Einstein yanılmıştı!

Kuantum mekaniğinden önce bir parçacığın konumu ve momentumunun (kütlesiyle hızının çarpımıdır) ilke olarak aynı anda, istenilen doğruluk derecesinde belirlenebileceğine inanırdık. Newton yasaları bize böyle öğretmişti. Şimdi bunun böyle olmadığını biliyoruz. Sezgilere uymasa da, konumunun tespitindeki isabetlilik arttıkça, momentumunun tespitindeki isabetlilik azalır; bu, Heisenberg belirsizlik ilkesi diye bilinir.

Özel görelilik kuramında Einstein, uzay ve zamanın dört boyutlu bir gerçeklik teşkil ettiğini ileri sürdü: uzay-zaman. Işık hızının sabit

olduğu önermesinde bulundu (300.000 kilometre/saniye). Işık hızının yüzde 50'siyle (150.000 kilometre/saniye) giden bir trenin size doğru yaklaştığını ve farının yüzünüzde parladığını varsaysak bile, o trendeki gözlemci de siz de ışığın sürati için aynı rakamı bulurdunuz. Bu insanın sezgisine hiç uymuyor, çünkü normalde tren size yaklaştığına göre, size yöneltilmiş ışığa baktığınızda hızını 300.000 artı 150.000 eşittir 450.000 km/sn olarak ölçmeniz gerekirdi. Ama durum bu değil – Einstein'a göre, 300.000 artı 150.000 gene 300.000 eder! Genel görelilik kuramı ise belki daha bile akıllara durgunluk verici. Einstein gökbilim evrenini bir arada tutan kuvvetin büsbütün yeni bir yorumunu sundu. Kütleçekiminin, bizatihi uzay-zaman dokusunu eğip bükerek işlediğini, geometri içinde cisimleri yörüngelere ittiğini, ışığı bile bükülmeye zorladığını ileri sürdü. Newton fiziğinin önemli revizyonlara ihtiyacı olduğunu gösterdi ve modern evrenbilime yolu açtı: büyük patlama, genişleyen evren ve kara delikler.

1970'lerde MIT'de ders vermeye başladığımda, mizacım gereği, öğrencilerin zaten unutup gideceği ayrıntılardan ziyade işin güzelliği ve heyecanı üzerinde daha çok durdum. İşlediğim her konuda mümkün mertebe meseleyi öğrencilerin kendi dünyasıyla ilişkilendirmeye çalıştım – ellerinin altında olan ama hiç düşünmedikleri şeyleri görmelerini sağladım. Ne zaman bir öğrenci bir soru sorsa, hep "harika bir soru" derim. Asla ve kat'a yapmamanız gereken şey, onlarda kendilerinin aptal, sizin de zeki olduğunuz hissini uyandırmaktır.

Elektrik ve manyetizma dersimde benim için paha biçilmez bir an var. Dönemin büyük kısmında, çaktırmadan, teker teker Maxwell denklemlerine –elektrikle manyetizmanın nasıl ilintili olduğunu, elektromanyetizma denen tek bir fenomenin farklı yönleri olduklarını baş döndürücü bir zarafetle gösteren eşitliklere– yaklaşıyoruz. Bu denklemlerin birbirleriyle diyalogunda inanılmaz, içkin bir güzellik var. Bunları birbirinden ayıramazsınız; beraber, birleşmiş tek bir alan kuramı teşkil ediyorlar.

İşte bu dört güzel denklemi amfinin bütün duvarlarında farklı perdelere yansıtıyorum. "Şunlara bakın," diyorum. "İçinize çekin. Beyninize nüfuz etsinler. Hayatınızda sadece bir kere Maxwell'in dört denklemini birden, ilk defa değerini anlayabilecek şekilde gö-

receksiniz: eksiksiz, güzel ve birbirleriyle diyalog halinde. Bu bir daha asla olmayacak. Asla aynı olmayacaksınız. Bekâretinizi yitirdiniz." Öğrencilerin hayatındaki bu tarihi günün şerefine, eriştikleri entelektüel doruğu kutlamak adına sınıfa altı yüz nergis getiriyorum, her biri bir öğrenciye.

Öğrencilerim bana yıllar sonra, Maxwell denklemlerinin ayrıntılarını unuttuktan çok daha sonra yazıp, o nergis gününü hatırladıklarını söylüyorlar, onların yeni görme biçimlerini çiçeklerle işaret ettiğim günü. Benim için bu en üst seviyede öğretimdir. Benim için öğrencilerin gördükleri şeyin güzelliğini hatırlamaları, tahtaya yazdığınız şeylerin aynısını yapabilmelerinden çok daha önemlidir. Önemli olan, hangi eksikleri *kapattığınız* değil, nelerin üstünü *açtığınız*!

Gayem öğrencilerin fiziği sevmelerini ve dünyaya farklı bir biçimde bakmalarını sağlamak, hem de hayat boyunca! Onların ufuklarını genişletiyorsunuz, daha önce hiç sormadıkları soruları soruyorlar. Burada önemli olan, fizik dünyasının kapılarını, öğrencilerin hayattaki hakiki ilgi alanlarıyla bağlantı kurarak açmak. İşte bu yüzden her zaman öğrencilerime tek tek ağaçlar yerine ormanları göstermişimdir. Bu kitapta sizin için yapmaya çalıştığım da buydu. Umarım bu yolculuk hoşunuza gitmiştir.

Teşekkür

Müstesna yayıncı temsilcimiz Wendy Strothman'ın zekâsı, ileri görüşü, ticaret anlayışı ve manevi desteği olmasaydı, *Fizik Aşkına* bir hüsnükuruntudan hallice bir şey olarak kalırdı. İkimizi bir araya o getirdi, Free Press'te bu kitap için doğru yeri buldu, yayıncı olarak geçen yılların keskinleştirdiği editör gözüyle çok sayıda taslak bölüm okudu, kitabın adını koydu, eserin son haline odaklanmamıza yardımcı oldu. Ayrıca proje boyunca bize destek olan samimi dostluğunu tatmak da bizim için ayrı bir mutluluk ve şanstı.

Free Press'teki editörümüz Emily Loose'un katkılarından ne kadar söz etsek azdır. Bu kitaba dair öngörülerini hepimizi sardı ve düzyazı anlatımına gösterdiği olağanüstü dikkat ikimiz için de bir eğitim oldu. Yayıncılık endüstrisinde masrafları kısmaaya yönelik müthiş bir baskı olmasına rağmen, Emily bu kitabın gerçekten editörlüğünü yapmakta ısrar ederek bizi daima daha anlaşılır olmaya, daha yumuşak geçişler yapmaya ve daha sıkı odaklanmaya zorladı. Becerisi ve yoğun çalışması bu kitabı çok daha iyi bir hale getirdi. Amy Ryan'a da metnin usta düzeltmenliği için teşekkür borçluyuz.

Walter Lewin:

Her gün, internetteki derslerimi izleyen, dünyanın dört bir yanındaki bir sürü insandan harika, genellikle de çok dokunaklı e-postalar alıyorum. Bu dersler Richard (Dick) Larson'ın ileri görüşüyle mümkün oldu. 1998'de İleri Eğitim Hizmetleri Merkezi'nde müdürken ve MIT'de Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde profesörken benim pek alışılmadık derslerimin videoteybe kaydedilip MIT dışındaki öğrencilerin erişimine sunulmasını önerdi. Bunun için the Lord Foundation of Massachusetts'ten ve Atlantic Philanthropies'den hatırı sayılır miktarda fon sağladı. Dick'in girişimi e-öğrenimin öncüsü ol-

du! MIT'nin OpenCourseWare'i 2001'de kapılarını açtığında, derslerim dünyanın her köşesine ulaştı ve şimdi her yıl bir milyondan fazla insan tarafından izleniyor.

19 Aralık 2007'de Sara Rimer *New York Times*'ın başsayfasında beni konu alan bir haber yaptı. Yazısının başlığı şuydu: "71'lik Fizik Profesörü, İnternet Yıldızı Oldu." Bu, elinizdeki kitabı ortaya çıkaran bir dizi zincirleme olaya yol açtı. Teşekkür ederim Sara!

Son iki yıl süresince, hastanede olduğum yetmiş gün boyunca bile (az kalsın ölüyordum), bu kitap daima kafamdaydı. Evde hiç durmadan karım Susan Kaufman'la kitaptan söz ediyordum. Pek çok gece uyku uyutmadı. Susan sabırla bütün bunlara katlandı ve moralimi yüksek tutmayı başardı. Ayrıca, cin editör gözlerini bazı bölümlere çevirip önemli iyileştirmeler yaptı.

Kuzenim Emmie Arbel-Kallus'a ve ablam Bea Bloksma-Lewin'e İkinci Dünya Savaşı sırasındaki olayların çok acı anılarının bir kısmını benimle paylaştıkları için teşekkür borçluyum. Her ikisi için de bunun ne kadar zor olduğunun farkındayım, ki benim için de aynı şey geçerli. Otuz yıllık yakın dostum Nancy Stieber'e hem daima İngilizcemi düzelttiği, hem de çok değerli yorum ve önerilerde bulunduğu için teşekkür ederim. Ayrıca arkadaşım ve meslektaşım George Clark'a da teşekkür etmek isterim, o olmadan MIT'de asla profesör olamazdım. American Science and Engineering'in, Hava Kuvvetleri Cambridge Araştırma Laboratuvarı'na sunulan (ve X ışını gökbiliminin doğumuyla sonuçlanan) teklifinin orijinalini bana George okutmuştu.

Gerektiğinde yardımına koşan Scott Hughes, Enectali Figueroa-Feliciano, Nathan Smith, Alex Filippenko, Owen Gingerich, Andrew Hamilton, Mark Whittle, Bob Jaffe, Ed van den Heuvel, Paul Murdin, George Woodrow, Jeff McClintock, John Belcher, Max Tegmark, Richard Lieu, Fred Rasio, merhum John Huchra, Jeff Hoffman, Wattı Taylor, Vicky Kaspi, Fred Baganoff, Ron Remillard, Dan Kleppner, Bob Kirshner, Amir Rizk, Chris Davlantes, Christine Sherratt, Mark Bessette, Markos Hankin, Bil Sanford ve Andrew Neely'ye de teşekkür borçluyum.

Son olarak, Warren Goldstein'a bana gösterdiği sabır ve esneklik için ne kadar teşekkür etsem azdır; ara sıra çok az zamanda çok fazla fiziğe boğulmuş (ve muhtemelen biraz bunalmış) olsa gerek.

Warren Goldstein:

Walter Lewin hakkında benimle görüşmeyi seve seve kabul ettikleri için şu insanlara teşekkür ederim: Laura Bloksma, Bea Bloksma-Lewin, Pauline Broberg-Lewin, Susan Kaufman, Ellen Kramer, Wies de Heer, Emanuel (Chuck) Lewin, David Pooley, Nancy Stieber, Peter Struycken. *Fizik Aşkına*'da sözleri alıntılanmamışsa bile, her birinin Walter Lewin'i anlamamda çok önemli katkısı olmuştur. Edward Gray, Jacob Harney, Laurence Marschall, James McDonald ve Bob Celmer, kendi uzmanlık alanlarında Walter'ın ve benim hata yapmamı önlemek için ellerinden geleni yaptılar; sorumluluğu onlara yüklemeyi ne kadar istesek de, geri kalan olası hataların tüm sorumluluğu bize aittir. Hartford Üniversitesi 2011 mezunu William J. Leo'ya da kritik bir andaki yardımı için teşekkür etmek isterim. Tanıdığım en zeki üç yazar –Marc Gunther, George Kannar ve Lennard Davis–projenin başlarında çok değerli tavsiyelerde bulundular. Hartford Üniversitesi dekanı Joseph Voelker ve dekan yardımcısı Fred Sweitzer farklı şekillerde, bu kitabı bitirmem için gerekli zamanı bulmamı sağladılar. Karım Donna Schaper'a –vaiz ve organizatörlerin hası ve en son sayıma göre otuz kitabın yazarı– yabancı bir dünyaya dalışımı anlaması ve kutlamasından dolayı derin bir şükran duyuyorum. Torunumuz Caleb Benjamin Luria 18 Ekim 2009'da geldi dünyaya; onu gündelik hayatın fiziğinde kendi müthiş deneylerini yaparken seyretmek çok keyifliydi. Son olarak, şu birkaç yılda bana ikimizin de hiç ihtimal vermediği kadar çok fizik öğretene ve çok uzun süredir içimde yatan bir tutkuyu yeniden ateşleyen Walter Lewin'e duyduğum büyük minneti burada ifade etmek isterim.

Ek 1

Memeli Femurları

Bir memelinin kütlesinin hacmiyle orantılı olduğunu varsaymak akla yatkın. Gelin bir köpek yavrusuyla, ondan dört kat daha büyük olan yetişkin bir köpeği karşılaştıralım. Büyük olan köpeğin tüm doğrusal boyutlarının, yavru köpeğinkinden dört kat büyük olduğunu varsayıyorum – boyu, uzunluğu, bacaklarının uzunluğu ve kalınlığı, kafasının genişliği, her şey. Durum buysa, o zaman büyük olan köpeğin hacmi (dolayısıyla kütlesi) yavru köpeğinkinin yaklaşık altmış dört katıdır.

Bunu görmenin bir yolu, kenarları a , b ve c olan bir küp almaktır. Bu küpün hacmi $a \times b \times c$ 'dir. Bütün kenarları dört kat büyütürseniz, hacim $4a \times 4b \times 4c$ olur, o da $64abc$ eder. Bunu biraz daha matematik diliyle söylersek, memelinin hacmi (dolayısıyla kütlesi) uzunluğunun üçüncü kuvvetiyle doğru orantılıdır, diyebiliriz. Büyük köpek yavru köpekten dört kat büyükse, o zaman hacmi 4 küp (4^3) kat büyük olmalıdır, o da 64 yapar. O halde, femurun uzunluğuna " l " dersek, farklı büyüklükteki memelileri karşılaştırırken kütleleri kabaca l küple (l^3) doğru orantılı olmalıdır.

Peki, bu kütleydi. Şimdi, bütün o ağırlığı destekleyen memelinin femurunun gücünün de kalınlığıyla doğru orantılı olması gerekir, değil mi? Daha kalın kemikler daha çok ağırlık taşıyabilir – sezgiler böyle der. Bu fikri matematiğe tercüme edersek, femurun kuvveti kemiğin kesit alanıyla doğru orantılı olmalıdır. Bu kesit kabaca bir dairedir ve dairenin alanının da πr^2 olduğunu biliyoruz (r dairenin yarıçapı). O halde, dairenin çapı d ise, alan d^2 'yle doğru orantılıdır.

Femurun kalınlığına " d " diyelim. O zaman, Galileo'nun fikrini takip edersek, memelinin kütlesi d^2 'yle doğru orantılı olur (kemikler

memelinin ağırlığını taşıyabilsin diye), fakat aynı zamanda l^3 'le de doğru orantılıdır (bu hep böyledir, Galileo'nun fikriyle ilgisi yok). O halde, Galileo'nun fikri doğruysa, d^2 'nin l^3 'le doğru orantılı olması gerekir; bu da, d 'nin $l^{3/2}$ 'yle doğru orantılı olduğu ifadesiyle aynıdır.

İki memeliyi karşılaştırdığımda biri ötekinden beş kat büyükse (yani femurunun uzunluğu l , küçük memelininkinden yaklaşık beş kat büyükse), femurunun kalınlığı d 'nin, küçük hayvanın femurunun kalınlığından yaklaşık $5^{3/2} = 11$ kat büyük olmasını beklerim. Derslerde bir filin femurunun l uzunluğunun, bir farenin femurunun uzunluğundan yaklaşık 100 kat büyük olduğunu gösterdim; bu yüzden, Galileo'nun fikri doğruysa, filin femurunun d kalınlığının, fareninkinden yaklaşık $100^{3/2} = 1000$ kat kalın olmasını bekleriz.

O halde belli bir noktada, çok ağır memeliler için kemiklerin kalınlığı, uzunluklarıyla aynı –hatta daha da büyük– olmak zorundadır, ki bundan da epey abuk sabuk hayvanlar çıkar; dolayısıyla memelilerin büyüklüğünde azami bir sınır olmasının sebebi budur.

Ek 2

Newton Yasaları İşbaşında

Newton'ın evrensel kütleçekim yasası şu şekilde yazılabilir:

$$F_{k\check{c}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Burada $F_{k\check{c}}$, m_1 kütleli bir nesneyle m_2 kütleli bir nesne arasındaki kütleçekimi kuvvetidir, r de aralarındaki mesafe. G 'ye kütleçekim sabiti denir.

Newton yasaları en azından ilke olarak güneşin ve bazı gezegenlerin kütlelerini hesaplamayı mümkün kılmıştır.

Gelin nasıl yapılıyor bir görelim. Güneşle başlayalım. m_1 'e güneşin kütlesi, m_2 'ye de bir gezegenin kütlesi diyelim (hangi gezegen olursa). Gezegenin yörüngesinin, yarıçapı r olan bir daire olduğunu varsayıyorum ve gezegenin yörünge periyodunun da T olduğunu (T dünya için 365,25 gündür, Merkür için 88 gün ve Jüpiter için 12 yılla yakın).

Yörünge dairesel ya da ona yakınsa (on yedinci yüzyılda bilinen altı gezegenden beşinde öyledir), yörüngedeki bir gezegenin sürati sabittir, fakat hızının yönü daima değişir. Ne var ki, bir nesnenin hızının yönü ne zaman değişse, süratte bir değişiklik olmasa bile bir ivme olmak zorundadır; bundan dolayı da, Newton'ın ikinci yasasına göre, o ivmeyi sağlayacak bir kuvvet şarttır.

Buna merkezci kuvvet (F_m) denir ve yönü daima tam, hareket eden gezegenden güneşe doğrudur. Tabii Newton, Newton olduğundan bu kuvvetin nasıl hesaplanacağını da biliyordu (derslerimde denklemin geldiği yeri gösteriyorum). Bu kuvvetin büyüklüğü şöyledir:

$$F_m = \frac{m_2 v^2}{r} \quad (2)$$

Burada v , yörüngedeki gezegenin hızıdır. Fakat bu hız, yörüngenin çevresinin ($2\pi r$), güneşin etrafındaki bir devri tamamlamak için gereken T zamanına bölümüdür. O halde şöyle de yazabiliriz:

$$F_m = \frac{4\pi^2 m_2 r}{T^2} \quad (3)$$

Bu kuvvet nereden geliyor? Bu kuvvetin kökeni ne? Newton bunun güneşin kütleçekiminden gelmesi gerektiğini fark etti. O halde yukarıdaki denklemlerdeki iki kuvvet tek ve aynı kuvvettir, birbirlerine eşittir:

$$F_{kç} = F_m \quad (4)$$

Değişkenleri yeniden düzenleyerek bununla biraz daha oynarsak (lise cebir bilginizin pasını atmak için iyi bir fırsat), güneşin kütlesini şöyle buluruz:

$$m_1 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad (5)$$

Dikkat ederseniz, gezegenin kütlesi (m_2) beşinci denklemde artık yok; olaya artık girmiyor; tek ihtiyacımız, gezegenin güneşe olan ortalama uzaklığı ve yörünge periyodu (T). Bu sizi şaşırtmıyor mu? Ne de olsa m_2 1. denklemde ve 2. denklemde görünüyor. Fakat bu iki denklemde de var olması sayesinde, $F_{kç}$ ile F_m birbirine eşitlenerek m_2 'nin kalkması sağlanmıştır. Bu yöntemin güzel tarafı da budur ve bütün bunları Sir Isaac'e borçluyuz!

5. denklem $\frac{r^3}{T^2}$ 'nin bütün gezegenler için aynı olduğunu gösteriyor. Hepsinin güneşe çok farklı uzaklıklarda olmasına ve çok farklı yörünge periyotlarına sahip olmalarına rağmen, $\frac{r^3}{T^2}$ hepsi için aynı. Alman gökbilimci ve matematikçi Johannes Kepler bu şaşırtıcı sonucu, Newton'dan çok önce, 1619'da zaten keşfetmişti. Fakat yarıçapın küpü ile yörünge periyodunun karesi arasındaki bu oranın neden sabit olduğu hiç anlaşılmadı. 68 yıl sonra dâhi bilimadamı Newton, bunun, yasalarının doğal sonucu olduğunu gösterdi.

Özetle, 5. denklem bize der ki, herhangi bir gezegenin güneşe olan uzaklığını (r), gezegenin yörünge periyodunu (T) ve G 'yi biliyorsak, o zaman güneşin kütlesini (m_1) hesaplayabiliriz.

Yörünge periyotları on yedinci yüzyıldan çok daha önce yüksek doğruluk derecesiyle biliniyordu. Güneşle gezegenler arasındaki mesafeler de on yedinci yüzyıldan çok daha önce yüksek doğruluk derecesiyle biliniyordu, fakat sadece *görelî* bir ölçekte. Başka bir deyişle, gökbilimciler Venüs'ün güneşe olan ortalama uzaklığının, dünyanınkinin yüzde 72,4'ü kadar olduğunu ve Jüpiter'in ortalama uzaklığının dünyanınkinden 5200 kat daha büyük olduğunu biliyorlardı. Ne var ki bu mesafelerin mutlak değerleri bambaşka bir meseleydi. On altıncı yüzyılda, büyük Danimarkalı gökbilimci Tycho Brahe'nin zamanında gökbilimciler, dünyanın güneşe olan uzaklığının gerçekte olandan yirmi kat daha az olduğuna inanıyorlardı (150 milyon kilometreye yakın). On yedinci yüzyılın başlarında Kepler güneşe daha doğru bir uzaklık biçti, fakat hâlâ gerçektekinden yedi kat daha küçüktü.

5. denklem güneşin kütlesinin, gezegene olan mesafenin küpüyle doğru orantılı olduğunu gösterdiğinden, eğer r mesafesi gerçektekinden yedi kat küçükse, o zaman güneşin kütlesi 7^3 kat daha küçük olacaktır, o da 343 kat demektir – pek de işe yarar bir şey değil.

İtalyan bilimadamı Giovanni Cassini 1672'de dünyadan güneşe olan uzaklığı yüzde 7 hata payıyla ölçünce (o günler için etkileyici bir başarı) çığır açtı. Yani r^3 'teki belirsizlik sadece yaklaşık yüzde 22'ydi. G 'deki belirsizlik ise muhtemelen en az yüzde 30'du. O yüzden tahminim o ki, on yedinci yüzyılın sonuna gelindiğinde güneşin kütlesi yüzde 50'den daha iyi olmayan bir hata payıyla biliniyordu.

On yedinci yüzyılın sonuna gelindiğinde, güneşten gezegenlere olan görelî mesafeler yüksek doğruluk derecesinde bilindiğinden, güneşten dünyaya olan mutlak mesafenin yüzde 7 hata payıyla bilinmesi, bilinen öteki beş gezegenin güneşe olan mutlak mesafelerinin de yüzde 7'lik bir yanılma payıyla hesaplanabileceği anlamına geliyordu.

Güneşin kütlesinin hesaplanmasına ilişkin yukarıdaki yöntem, Jüpiter, Satürn ve dünyanın kütlesini ölçmek için de kullanılabilir. Bu üç gezegenin de yörüngelerinde bilinen aylar var; Galileo Galilei 1610'da Jüpiter'in dört ayını keşfetti, şimdi bunlara Galileo ayla-

rı deniyor. m_1 Jüpiter'in kütlesi ve m_2 de aylarından birinin kütlesiyse, o zaman Jüpiter'in kütlesini 5. denklemi kullanarak hesaplayabiliriz, aynı güneşin kütlesini hesaplayabileceğimiz şekilde, yalnız r şimdi Jüpiter'le ayının arasındaki mesafe, T de o ayın Jüpiter etrafındaki yörünge periyodudur. Dört Galileo ayının (Jüpiter'in altmış üç ayı var!) yörünge devirleri 1,77 gün; 3,55 gün; 7,15 gün ve 16,69 gündür.

Mesafelerdeki ve G 'deki doğruluk dereceleri zaman içinde çok gelişti. On dokuzuncu yüzyıla gelindiğinde G yüzde 1 hata payıyla biliniyordu. Şimdi yaklaşık yüzde 0,01 hata payıyla biliniyor.

Size sayısal bir örnek vereyim. 5. denklemle, (m_2 kütleli) ayımızın yörüngesini kullanarak dünyanın kütlesini (m_1) birlikte hesaplayalım. 5. denklemi uygun biçimde kullanabilmek için r mesafesinin metre cinsinden, T 'nin de saniye cinsinden olması gerekir. G için de $6,673 \times 10^{-11}$ 'i kullanırsak, kütleyi kilogram cinsinden elde ederiz.

Aya olan ortalama mesafe (r) $3,8440 \times 10^8$ metredir; yörünge periyodu (T) yaklaşık $2,3606 \times 10^6$ saniyedir (27,32 gün). Bu rakamları 5. denkleme yerleştirirsek, dünyanın kütlesini $6,030 \times 10^{24}$ kilogram olarak buluruz. Dünyanın kütlesinin şu anki en yakın değeri $5,974 \times 10^{24}$ kilogram, bu da benim hesapladığımdan sadece yüzde 1 düşük! Bu fark nereden geliyor? Bir sebebi, bizim kullandığımız denklemin, ayın yörüngesini dairesel varsaymasıdır, oysa eliptik dediğimiz, uzatılmış daire biçimindedir. Sonuç olarak, aya olan en kısa mesafe 360.000 kilometredir; en uzun mesafeyse yaklaşık 406.000 kilometre. Tabii Newton yasaları eliptik yörüngelerle de işler, fakat matematiği kafanızı patlatabilir. Belki çoktan patlamıştır bile!

Dünyanın kütlesi için bulduğumuz sonucun biraz farklı olmasının bir sebebi daha var. Ayın dünya etrafında dairesel dönüş yaptığını ve bu dairenin merkezinin dünyanın merkezi olduğunu varsaymıştık. O yüzden 1. ve 2. denklemlerde r 'yi dünyayla güneş arasındaki mesafe olarak kabul ettik. 1. denklemden bu doğru; fakat 13. Bölüm'de daha ayrıntılı anlattığım gibi, ayla dünya aslında, ay-dünya sisteminin kütle merkezi etrafında dönüyor ve bu merkez de dünya yüzeyinin yaklaşık 1600 kilometre altında. O halde 3. denklemden r , 1. denklemden r 'den birazcık daha az.

Biz dünyada yaşadığımızdan, kendi gezegenimizin kütlesini hesaplamamız başka yolları da var. Bir tanesi, yüzeye yakın kütleçe-

kim ivmesini ölçmek. Yere bırakıldığında herhangi bir m kütlesi (m herhangi bir değeri alabilir), yaklaşık saniyede 9,82 metre/saniyelik bir ivmeyle (g^*) hızlanacaktır. Dünyanın ortalama yarıçapı $6,371 \times 10^6$ metre civarındadır.

Şimdi Newton'ın 1. denklemine dönelim. $F = ma$ olduğundan (Newton'ın ikinci yasası),

$$G = \frac{m_{\text{dün}}m}{r^2} = mg \quad (6)$$

Burada r dünyanın yarıçapıdır. $G = 6,673 \times 10^{-11}$, $g = 9,82$ metre/saniyekare ve $r = 6,371 \times 10^6$ metreymken, $m_{\text{dün}}$ 'ü kilogram cinsinden hesaplayabiliriz (siz deneyin!). 6. denklemi biraz sadeleştirirsek,

$$m_{\text{dün}} = \frac{gr^2}{G} \quad (7)$$

denklemini elde ederiz. Ben $m_{\text{dün}}$ 'ün değerini $5,973 \times 10^{24}$ kilogram olarak buldum (etkileyici, değil mi?).

Yere bıraktığımız nesnenin m kütesinin 7. denklemde boy göstermediğine dikkat edin! Dünyanın kütlesi yere bıraktığınız nesnenin kütlesine bağlı olamayacağına göre, bu sizi şaşırtmamıştır.

Newton'ın dünyanın ortalama özgül ağırlığının 5.000 ila 6.000 kilogram/metreküp olduğuna inandığını bilmek de ilginizi çeker belki. Bu gökbilimsel bir bilgiye dayanmıyordu; bütün yasalarından tamamen bağımsız bir şeydi. Bu onun en iyi "tecrübeye dayalı" tahmini idi. Dünyanın ortalama özgül ağırlığı gerçekte 5.540 kilogram/metreküptür. Newton'ın tahminini 5.500 ± 500 kilogram/metreküp olarak yazmama izin verirsiniz, belirsizliği sadece yüzde 10'du (müthiş!).

Newton'ın bu tahmini yaşadığı dönemde hiç ciddiye alındı mı bilmiyorum, ama diyelim ki alındı. On yedinci yüzyılda dünyanın yarıçapı çok iyi bilindiğinden, kütlesi yüzde 10 yanılma payıyla hesaplanabilirdi (kütle, hacim çarpı özgül ağırlıktır). O zaman G 'yi de

* Bu arada bu ivme ekvator da, kutuplarda olduğundan yüzde 0,18 daha düşüktür, çünkü dünya kusursuz bir küre değildir. Ekvatordaki nesneler dünyanın merkezinden, kutuplardaki nesnelere göre 20 kilometre daha uzaktır, o yüzden ekvatordaki g düşüktür. 9,82 ortalama bir değerdir.

yüzde 10 hata payıyla hesaplamak için 7. denklem kullanılabilirdi. Bunu size şunun için söylüyorum: Newton'ın dünyanın ortalama özgül ağırlık tahmini kabul edildiğinde, on yedinci yüzyılın sonunda kütleçekim sabiti G yüzde 10'luk bir hata payıyla çoktan biliniyor olabilirdi!

Dizin

- adenozin trifosfat (ATP), 175
ağırlıksızlık, 36, 62-63, 70, 71, 78
Akrep (Scorpio) takımyıldızı, 199
Akyıldız (Sirius), 46-47, 48, 238
Alfa bozunması, 188
alternatif akım (AC), 165, 168
altın, 24-25, 159
Ampère yasası, 172
Ampère, Andre-Marie, 147, 162, 163, 173
Andromeda galaksisi, 22, 44, 49
Annis, Martin, 34, 197
Aristoteles, 57, 91, 221
armonikler, 122-33
astronotlar, 36, 41, 46, 57, 62, 69-71
atarca, 27, 48, 201, 202, 227-8, 244
atmosfer basıncı, 76-77, 79-81
atom bombası, 188
atomlar, 24, 139-40, 195, 220
aurora australis (güney ışıkları), 161
aurora borealis (kuzey ışıkları), 27, 161, 246
Avcı (Orion) takımyıldızı, 239

Baade, Walter, 201, 220
bakır, 159, 163-4
barometre, 74, 76-77, 79-80
basınç, 73-90
basit sarkaç, 67
belirsizlik ilkesi, 268
Bell, Jocelyn, 48n, 201, 227
Bernoulli, Daniel, 86-7
Bernoulli ilkesi, 86-7
Bessel, Friedrich Wilhelm, 238
Bevis, John, 200
birleşik alan kuramı, 52, 173
Bohr, Niels, 268

Bolton, Tom, 243
Boyle, Robert, 136
Brahe, Tycho, 136, 193-4, 279
bremssstrahlung yayımı, 196-7
Brocken tayfları (gloriler), 109-10
Broglie, Louis de, 268
büyük birleşik kuram, 173
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC), 231-3, 260
büyük patlama, 26, 35, 36, 51, 118-20, 192, 226, 269
Büyük Sloan Duvarı, 23
beyaz cüce, 206, 232, 242, 245, 246

camkuşakları, 112-3
CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi), 231
Cézanne, Paul, 268
Chadwick, James, 218
Chandra X ışını gözlemevi, 201, 225
Chandrasekhar sınırı, 222
Chladni levhaları, 129
cıva (element), 25, 79-80, 159
Clark, George, 20, 35, 201, 203, 204, 211, 217-8
Coulomb yasası, 142-3
Curie, Marie, 268
Curie sıcaklığı, 160

çekirdek çökmesi süpernovası, 220-1, 223-4, 226, 228
Çernobil felaketi, 189
çift yarık deneyi, 106
çiftkutup, 172

Dalton, John, 179
Darwin, Charles, 50

- Degas, Edgar, 267
 demir, 115, 158-60, 221-2, 223
 Demokritos, 193
 deniz feneri etkisi, 227
 Derain, André, 267
 Descartes, René, 92, 136
 desibel, 117
 dinamo etkisi, 160
 Dirac, Paul, 268
 doğa felsefesi, 136
 doğal seçim, 50
 doğru akım (DC), 165
 doğrusal kutuplayıcı, 104-5
 Doppler etkisi/kayması, 50, 230, 235, 239-40, 242, 245
 döteryum, 24, 191
 Duchamp, Marcel, 267, 268
 Eco, Umberto, 266
 Einstein, Albert, 26, 35-36, 38, 53, 171, 173, 229-31, 268-9
 elektrik, 135-56, 171-2, 261
 elektromanyetizma, 16, 52, 162, 169, 172-3
 elektronlar, 25, 55-56, 104, 119, 121, 127, 136, 139, 141-5, 147, 157, 162, 195-6, 222, 232, 239-40
 elektroskop, 162
 elementler, 24-25, 36, 222, 223, 226, 239
 enerji, 23, 26, 174-92
 enerjinin korunumu, 174-92
 Erboğa (Centaurus) takımyıldızı, 199, 217, 244
 Eski Yunan, 125, 135-6, 151, 158
 evren, 23-24, 26, 35-36, 44, 49-52, 191-2
 evrenbilim, 36, 269
 evrensel kütleçekimi yasası, 63-6, 143, 277
 evrim, 50
 eylemsizlik yasası, 54-5
 Faraday, Michael, 163-4, 173
 Faraday yasası, 168, 172
 Fermi, Enrico, 268
 ferromanyetizm, 158-60, 169
 Fisher, Philip, 216
 fosil yakıt, 176, 185, 187-8
 fotoelektrik soğurulma, 211
 fotonlar, 195, 210-2, 239-40
 Franklin, Benjamin, 137-8, 140, 154-6, 162
 frekans, 116-33, 134, 165, 168, 195, 202, 229, 234-5, 240, 251
 Friedman, Herbert, 199-201, 216
 galaksiler, 23, 35-36, 44, 48, 50-52, 68, 118-20, 202, 206, 223, 247
 Galileo Galilei, 38, 41-43, 57-58, 65-66, 79, 136, 177, 193, 275-6, 279-80
 gama ışını gökbilimi, 192, 194, 202, 215, 244
 gama ışınları, 20, 25, 188, 192, 194-5, 202, 215, 223, 227, 244, 258-9
 Gauguin, Paul, 265, 267
 Gauss yasaları, 172
 gazlar, 73, 86, 116, 119, 171, 246
 genel görelilik kuramı, 36, 230-1, 269
 Giacconi, Riccardo, 34, 197, 199, 219, 245
 Gilbert, William, 159-60, 162
 girişim, 107-8
 Glashow, Sheldon, 39, 127, 173
 gluonlar, 27, 35, 127
 Goudsmit, Samuel, 218
 gökbilim, 20, 44, 178, 193-4, 202, 229, 239
 gökkuşakları, 91-114
 göktaşları, 22
 Gray, Stephen, 137
 Greene, Brian, 39
 Grindlay, Josh, 249, 251, 255, 258
 güçlü nükleer kuvvet, 27, 52, 173
 güneş enerjisi, 186-7
 güneş gözlükleri, 103-5
 güneş rüzgârı, 27, 119, 161-2, 197
 güneş sistemi, 119, 261
 güneş tutulması, 91

- Hamilton, Andrew, 235
 Hankin, Markos, 112, 168
 hata kutusu, 198-9, 242
 hava basıncı, 73-79, 84
 hava sütunu, 77, 121, 130-2
 Hawking ışıması, 233
 Hawking, Stephen, 232-3, 243
 Heisenberg, Werner, 268
 helyum, 24, 145, 188, 191, 207, 221, 256
 Henderson, Thomas, 46, 238
 her şeyin kuramı, 39, 173
 hertz, 116
 Hewish, Antony, 48, 227-8
 hibrid arabalar, 139, 175-6, 183
 hidrojen, 24, 119, 159, 191, 221-2, 239-40, 246, 252, 256
 hidrostatik basınç, 77-84
 Hubble sabiti, 51-2
 Hubble Uzay Teleskobu, 52, 192, 202, 225, 244
 Hubble yasası, 51
 Hubble, Edwin, 49-52
 Humboldt, Alexander von, 238
 Huygens, Christian, 136
 ıraklık açısı, 44-47, 49, 50, 52, 238
 ışık hızı, 35, 38, 115, 173, 212, 222, 225, 227, 230, 231, 235, 247, 252
 İbn El Haytam, 92
 ikili yıldız sistemleri, 49, 65, 223, 227, 228, 236, 237-8, 241, 243-5
 iletkenler, iletkenlik, 138, 141, 144-6, 153-4, 163-5, 168, 179
 iyonlar, 140, 145, 147, 211, 246
 izotoplar, 24-6, 188
 jeneratörler, 149, 164, 172, 259
 Joule, James, 179-80
 jul, 146, 179-81
 Jüpiter (gezegen), 64, 65, 193, 226, 277, 279-80
 kalori, 179, 182-5
 kamera *obskura*, 91
 kamışla içmek, 88-90
 Kandinski, Vasili, 267
 kara cisim ışıması, 196, 239, 247
 kara delikler, 15, 20, 36, 119, 196, 206, 215, 223, 226, 228-36
 karanlık enerji, 23, 52
 karanlık madde, 23, 52, 65
 karbon, 24, 175, 221
 karbondioksit, 175
 karşı-madde, 191
 kehribar, 14, 135-6, 141, 158, 162
 Kepler, Johannes, 66, 136, 193, 278-9
 Kepler yasaları, 194
 kısa devre, 151
 kıvılcım, 135, 137, 145, 147-9, 151, 153-4, 210
 kızıla kayma, 50-51, 229-30, 235, 240
 kızılötesi ışıma, 181, 186, 194, 196, 225, 234
 kilokalori, 182, 184-5
 kimyasal enerji, 175-6
 kinetik enerji (KE), 161, 164, 175-8, 180-1, 183, 224, 230, 247
 Kopernik, 193
 korona boşalması, 153, 210-1
 kozmik ışınlar, 27, 232
 Kozmik Mikrodalga Arkaplanı (CMB), 26, 202
 kuantum mekaniği, 108, 239, 268
 kuarklar, 27, 35, 127
 kuasarlar, 26, 202
 kutuplanmış (polarize) ışık, 104-6
 kuyrukluyıldızlar, 20, 27, 200
 küresel ısınma, 189
 kütle, 57-59, 60
 kütleçekimi, 41, 55, 57, 60-62, 66, 69-71, 85, 143, 173, 176, 178, 221-3, 229-32, 269
 kütleçekim ivmesi, 56-59, 67, 176, 178
 kütleçekim kuyusu, 229
 kütleçekim potansiyel enerjisi, 176-8, 180, 183, 253, 257-8
 kütleçekim sabiti, 65, 277, 282
 kütleçekimsel kızıla kayma, 230, 234-5

- Lagrange noktası, 246
 Leibniz, Gottfried, 136
 Leyden şişeleri, 162
 madde, 24, 27, 119-20, 127, 139
 maglev trenleri, 169-71
 Maleviç, Kazimir, 265, 268
 manometre, 81, 89
 manyetik kuvvet, 55, 169
 manyetizma, 157-73, 269
 Maraschi, Laura, 252-3
 Mars İklim Keşif Uydusu, 39
 Mars, 26, 39, 162, 226
 Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT), 11, 12, 16, 19, 27-8, 33, 35-6, 166-7, 169, 204, 206, 217, 249, 252, 255, 258-9, 261
 maviye kayma, 235, 239-40
 (ayrıca bkz. Doppler etkisi)
 Maxwell denklemleri, 171-3, 269-70
 Maxwell, James Clerk, 163, 171-3, 261
 McClintock, Jeff, 215, 236, 243, 255, 272
 mekanik enerji, 175, 179
 memeli femurları, 41-43, 275-6
 merkezci kuvvet, 71, 145, 277
 merkezkaç kuvveti, 70-1
 Merkür (gezegen), 22, 277
 Messier, Charles, 200
 Messier kataloğu, 200
 mikro kara delik, 232-3
 mikroskoplar, 139-40
 M-kuramı, 39
 moleküller, 24, 73, 139, 140
 Mondrian, Piet, 265, 266, 268
 morötesi ışınlar, 194-5, 196
 motorlar, 164-8
 müzik, 115
- NASA, 41, 111, 197, 206, 209, 217, 252, 259
 nefesli çalgılar, 130-3
 Newton, Isaac, 26, 53-72, 92-93, 106, 136, 154, 171, 173, 193, 245, 261, 268
 Newton yasaları, 16, 38, 54-72, 87, 143, 177, 231, 268-9, 277-82
 nötrinolar, 24, 127, 192, 194, 222, 223-5
 nötrino teleskopları, 194
 nötron yıldızları, 20, 178, 196, 200-1, 206, 219, 220-8
 nötronlar, 24, 27, 140, 191, 200-1, 220
 nükleer bozunma, 25, 38, 195
 nükleer enerji, 176, 187-9, 220-1, 228, 256
 nükleer fisyon, 48, 188, 191, 221
 nükleer füzyon, 191-2, 221-2, 226, 252, 256
 nükleer santraller, 188-9
- oksijen, 24, 118, 153, 154, 158, 161, 175, 221
 olay ufku, 228, 230-1, 233-6, 243
 osiloskop, 126-7, 128
 ozon, 153
- ölçüm, 11-12, 26, 38-9
 özel görelilik kuramı, 268
- Paolini, Frank, 197, 199
 Paradijs, Jan van, 255, 258
 parlaklık ve aydınlatma gücü, 48-9
 Pascal, Blaise, 79, 136
 Pauli, Wolfgang, 268
 Piene, Otto, 263-4
 pil, 146, 165-8, 176, 185, 252-3
 Pisagor, 125
 Planck kütlesi, 232-3
 Planck, Max, 268
 plazma, 27, 119-20, 246
 prizma, 93, 239
 protonlar, 24, 27, 60, 119, 140, 222, 223, 231-2, 246
- radyo dalgaları, 26, 116, 194, 202, 227, 234, 242
 radyo teleskopları, 192, 242
 Rayleigh saçılımı, 21
 rezonans, 120-34
 Richmann, Georg Wilhelm, 154-5
 Rossi, Bruno, 27, 33-5, 119, 197, 199,

- 203, 205, 218-9
 rotor, 70-1, 144
 Röntgen, Wilhelm, 195
 rüzgâr enerjisi, 187
- Samanyolu galaksisi, 20, 23, 49, 194, 207, 228
 sanat, 261-7
 sarkaçlar, 66-9, 121, 178-9
 Satürn (gezegen), 171, 279
 Schrödinger, Erwin, 268
 Schwarzschild, Karl, 230-1
 Sefidler, 48-50, 52
 sera gazları, 171, 187, 189, 191
 ses, ses dalgaları, 104, 115-34
 siklotron, 25
 siskuşakları, 108-9, 113
 sıvı mıknatıs, 159
 Sloan Sayısal Gökyüzü Taraması (SDSS), 23, 120
 spagettileştirme, 235-6
 standart mumlar, 50
 statik elektrik, 135-6, 141, 145, 148, 162
 Struycken, Peter, 264, 266
 süperiletkenler, 170-1
 süpersicim kuramı, 39
 sürtünme, 54-55, 71, 137, 144, 167, 179
 sürtünmeyle elektriklenme, 137-45, 148
- şimşek, 151-5
 Şklovski, Josef, 241, 245, 254
- tekillik, 231, 235-6
 tekkutup, 172
 teleskoplar, 23, 54, 194
 telli çalgılar, 123-30
 termal nötrinolar, 224
 toplanma diski, 206, 233-4, 246
- tork, 165-7
 Torricelli, Evangelista, 79-80
- uranyum, 176, 188, 191
 uydular, 160-1
 uzay-zaman, 229, 268-9
- vakum, 58, 80, 118-9
 Van de Graaf jeneratörü, 13, 149
 Van Gogh, Vincent, 262, 267, 268
 vat, 151, 182
 Venüs, 26, 48, 279
 volt, 146-7
 vücut ısısı, 181-2
- W bozonları, 35
 Weinberg, Steven, 173
 Weisskopf, Victor, 36, 166
 Witten, Edward, 39
- X ışını, 15, 34, 55-6, 116, 194, 195-7
 X ışını gökbilimi, 15, 27, 34, 38, 191-2, 194, 197-203
 X ışını ikili sistemleri, 206, 243, 245-8, 252-4, 256-7
- Yahudi soykırımı, 29-33
 yapay kütleçekimi, 69-71
 yarı ömür, 24-25
 yay saniye, 45-47, 198
 yel değirmeni, 187
 Yengeç (Crab) bulutsusu (M-1), 196, 199-202, 224-5, 227, 244
 yıldız kümeleri, 20, 48, 65, 200, 202
 Young, Thomas, 106-7, 162, 268
 yoz nötron basıncı, 223
- Z bozonları, 35
 zayıf nükleer kuvvet, 35, 173
 Zeldoviç, Yakov, 254
 Zwicky, Fritz, 201, 220

metis bilim

EVELYN FOX KELLER

Genin Yüzyılı

JOHN GRIBBIN

**Schrödinger'in
Kedisinin Peşinde**

KUANTUM FİZİĞİ VE GERÇEKLIK

ADAM ZEMAN

Bilinç

KULLANIM KILAVUZU

EVELYN FOX KELLER

Toplumsal Cinsiyet

ve Bilim ÜZERİNE DÜŞÜNCELER

DOUWE DRAAISMA

Bellek Metaforları

ZİHİNLE İLGİLİ FİKİRLERİN TARİHİ

JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Yavru Kedileri

GERÇEKLİĞİN PEŞİNDE

FRANS DE WAAL

İçimizdeki Maymun

BİZ NEDEN BİZİZ?

DOUWE DRAAISMA

Yaşlandıkça Hayat Neden

Çabuk Geçer

BELLEĞİMİZ GEÇMİŞİMİZİ

NASIL ŞEKİLLENDİRİR?

GEORGE LEVINE

Darwin Sizi Seviyor

DOĞAL SEÇİLİM VE DÜNYANIN
YENİDEN BÜYÜLENMESİ

J. P. CHANGEUX, P. RICOEUR

Neden Nasıl Düşünürüz?

ETİK, İNSAN DOĞASI
VE BEYİN ÜZERİNE BİR TARTIŞMA

W. H. CALVIN - G. A. OJEMANN

Neil'in Beyniyle Konuşmalar

DÜŞÜNCE VE DİLİN SINIRSEL DOĞASI

JOANNA MONCRIEFF

İlaçla Tedavi Efsanesi

CHARLES SEIFE

Alfa ve Omega

EVRENİN BAŞLANGICI VE SONU

H. R. MATURANA, F. G. VARELA

Bilgi Ağacı

İNSAN ANLAYIŞININ BİYOLOJİK TEMELLERİ

DAVID S. WILSON

Herkes İçin Evrim

DARWIN'IN TEORİSİ
HAYATA BAKIŞ AÇIMIZI
NASIL DEĞİŞTİRİR?

D. GOLDBERG, J. BLOMQUIST

Evren Kullanma Kılavuzu

KARA DELİKLERİN,
ZAMAN PARADOKSLARININ
VE KUANTUM BELİRSİZLİĞİNİN
TEHLİKELERİNİ ATLATMANIN
YOLLARI

TOBIAS DANTZIG

Sayı: Bilimin Dili

HARALD FRITZSCH

Yanılıyorsunuz Einstein!

NEWTON, EINSTEIN,
HEISENBERG VE FEYNMAN
KUANTUM FİZİĞİNİ TARTIŞIYOR

WALTER LEWIN

Warren Goldstein ile birlikte

Fizik Aşkına

GÖKKUŞAĞININ UCUNDAN
ZAMANIN EŞİĞİNE
BİR YOLCULUK

METİS BİLİM

Harald Fritzsch

YANILIYORSUNUZ EINSTEIN!

Newton, Einstein, Heisenberg
ve Feynman Kuantum Fiziğini Tartışıyor

Çeviren: Ogün Duman

Tüm zamanların en önemli fizikçilerinden dördü bir araya gelip kuantum fiziği hakkında konuşsaydı ortaya nasıl bir sohbet çıkardı? Hiç şüphesiz ilginç bir sohbet. Aydınlatıcı. Kışkırtıcı. Hatta eğlenceli.

Alman fizikçi Harald Fritzsch'in Newton, Einstein, Heisenberg ve Feynman'ı bir araya getirdiği *Yanılıyorsunuz Einstein!* bu sıfatların hepsine sahip. Adrian Haller adlı (kurmaca) bir fizik profesörünün bir tren yolculuğu sırasında uyuyakalmasıyla rüyalar âleminde buluşan bu büyük fizikçilerin sohbeti, kuantum kuramının doğuşunu, gelişimini ve bugünkü durumunu yalın ve akıcı bir dille anlatıyor. Sohbet esnasında fizikçilerin birbirlerine takılmaları ve tatlı kaprisleri de cabası. Sözelimi Einstein ısrarla "İhtiyar"ın evrenle zar atmaya çağını, evrenin bir kumarhane olmadığını söyleyerek kuantum kuramına ilişkin hoşnutsuzluğunu dile getirirken, diğerleri onu kuantum kuramına kötü babalık etmekle, kuramın doğumuna katkıda bulunduktan sonra onu ortada bırakmakla suçluyor. Fizikçiler kendi aralarında konuşadursun, biz okurlar da bu sohbe kulak misafiri olarak modern fiziğin en zorlu konularını daha iyi kavrama imkânına kavuşuyoruz.



METİS BİLİM

Tobias Dantzig

SAYI: BİLİMİN DİLİ

Çeviren: Barış Cezar

Sayı kavramı tarih boyunca nasıl bir gelişim izledi? Einstein'ın "sayının evrimi üzerine okuduğum en ilginç kitap" diye niteliği bu klasikleşmiş eserinde matematikçi Tobias Dantzig, bu sorudan yola çıkarak sayıyı mercek altına yatırıyor.

"Mevcut okul müfredatları matematiği kültürel içeriğinden ayırıp sadece teknik detaylardan meydana gelen bir iskelet olarak bırakarak pek çok iyi beyni kaçırmıştır. Bu kitabın amacı bu kültürel içeriği tekrar kazandırmak ve sayının evrimini gerçekten olduğu gibi derin bir insani öykü olarak sunmaktır," diyen Dantzig, matematik tarihini emin adımlarla ilerleyen bir süreç olarak değil, rastlantıların ve sezginin büyük rol oynadığı bir süreç olarak canlandırıyor.

Üzerinde nadiren durduğumuz sıfır kavramının icadı, sayıların mistik anlamları ve onlara atfedilen gizem, sayı ibadeti, ilginç paradokslar, matematikçileri asırlardır düşündüren problemler ve daha birçok konu, Dantzig'in anlattığı ilginç öykünün birbirine bağlı halkalarını oluşturuyor. Bu kitabı okurken görüyoruz ki, yaşadığımız gerçekliğin dokusuna bu kadar derinlemesine işlemiş olan sayı kavramını daha yakından tanımak, bize kendi düşünce yapımız hakkında da önemli ipuçları veriyor.



METİS BİLİM

Dave Goldberg, Jeff Blomquist
**EVREN KULLANMA
KILAVUZU**

Kara Deliklerin, Zaman Paradokslarının
ve Kuantum Belirsizliğinin
Tehlikelerini Atlatmanın Yolları

Çeviren: Cemal Yardımcı

Işık hızıyla hareket ederken aynaya baksam ne görürüm? Sadece bakarak gerçekliği değiştirebilir miyim? *Uzay Yolu*'ndaki gibi bir ışınlama makinesi yapabilir miyim? Büyük Hadron Çarpıştırıcısı dünyayı neden yok etmedi? Evren genişliyorsa neyin içinde genişliyor? Bir kara deliğe düşsem ne olur? Pratik bir zaman makinesi yapabilir miyim?

Bunlar *Evren Kullanma Kılavuzu*'ndaki sorulardan sadece birkaçı. Kitap bu ve benzeri soruları cevaplamanın yanı sıra, fizikteki en önemli meseleleri son derece anlaşılır ve esprili bir dille ele alıyor. Görelilik kuramı, kuantum mekaniği, olasılık ve rasgelelik, parçacıkların standart modeli, uzayın ve zamanın doğası, evrenin yapısı ve evrimi – tüm bunlar birbirinden komik karikatür ve dipnotlar eşliğinde anlatılıyor. Yazarların amacı, fiziğe genellikle yapııştırılan "sıkıcı" yaftasını tersine çevirip bu konuların aslında ne kadar ilginç ve eğlenceli olduğunu göstermek. Nitekim bu amaca başarıyla ulaşmış gibi görünüyorlar.

Unutmayın ki evren karmaşık bir mekanizmaya sahip muazzam bir düzendir. Sağduyulu bir evren vatandaşı, onu kurcalamadan önce işleyişini, kurallarını, sınırlarını anlamak için kullanma kılavuzunu okumayı ihmal etmemelidir. Aksi takdirde başına geleceklerden –korkunç şeyler... Bahsetmek bile istemiyoruz– yayınevimiz sorumlu değildir.



METİS BİLİM

David Sloan Wilson

HERKES İÇİN EVRİM

Darwin'in Teorisi Hayata Bakış Açımızı
Nasıl Değiştirir?

Çeviren: Gürol Koca

Darwin'in doğal seçim teorisini ortaya atmasının üzerinden bir buçuk asır geçti. Bu süre içinde toplanan kanıtlar o kadar güçlü ki, evrimi artık sadece bir teori değil, bir olgu olarak görüyoruz. Fakat, diyor Amerikalı evrimci David Sloan Wilson, diğer disiplinlerle harmanlanmadığı ve günlük hayata uyarlanmadığı sürece evrim teorisinin hakkını vermiş sayılmayız. Zira evrim olup bitmiş bir şey değil, daima gözümüzün önünde, tüm hayatımıza sinmiş durumda. Canlıların tarihi upuzun bir evrim sürecinden ibaret olduğuna göre, hayatı ve kendimizi anlayabilmek için olaylara evrim temelli bir düşünce çerçevesinden bakmalıyız.

Bu düşünce tarzını benimsediğimizde, hamilelik bulantısından obeziteye, dansetmekten gülmeye, din ve ahlaktan siyasete her şey muazzam bir yapbozun, evrim yapbozunun parçaları haline geliyor. Dahası, insanın bu yapbozun sadece küçük bir parçası olduğunu, insana özgü sandığımız pek çok özelliğin aslında evrimin sürekliliği içerisinde çoğu canlıda - hatta tekhücrelilerde bile- görülebildiğini fark ediyoruz; bu da insanın doğadaki yerine ilişkin yanılgılarımızdan sıyrılmamızı sağlıyor.

Wilson'ın yaklaşımındaki diğer bir kritik nokta da, işbirliği ve dayanışmanın evrim sürecindeki önemini vurgulaması. Wilson'a göre evrim süreci, uyum gücü en fazla olan bireyden ziyade en iyi işbirliği yapan, en sağlam dayanışmayı kuran grubun lehinde işliyor. Demek ki barışçıl bir dünya o kadar uzak bir hayal değil.

Herkes İçin Evrim, isminin de ifade ettiği gibi herkesin ilgisini çekecek, herkesin rahatlıkla, keyifle okuyabileceği ve yararlanabileceği ufuk açıcı bir kitap.



