KIP THORNE

YILDIZLARARASI BİLİMİ



Yıldızlararası filmiyle ilgili merak ettiğiniz her şey

3. BASKI

INTERSTELLAR

CHRISTOPHER NOLAN'IN ÖNSÖZÜYLE

ALFA | BİLİM

KIP THORNE

California Teknoloji Enstitüsünde kuramsal fizik dalında onursal Feynman profesörü, *Yıldızlararası* filminin bilim danışmanı ve yönetici yapımcısı, çok satan *Black Holes & Time Warps* [*Kara Delikler ve Zaman Bükülmeleri*] dahil dört kitabın yazarıdır. Pasadena, California'da yaşamaktadır.

BARIŞ GÖNÜLŞEN

1974 yılında İzmir'de doğdu. İzmir Bornova Anadolu Lisesi Almanca Bölümü ve Ortadoğu Teknik Üniversitesi İktisat Bölümü mezunudur; serbest yazarlık ve çevirmenlik yapmaktadır. Çevirdiği eserler arasında yayınevimizce yayınlanan *101 Soruda Kuantum* (K. Ford), *Uranyum Savaşları* (A. D. Aczel), *Son Moda Saçmalar* (A. Sokal & J. Bricmont), *Zamanın Kısa Tarihi* (S. Hawking), *Ucuz Roman* (Dana Polan), *Bilim Tarihi* (John Gribbin) ve *Tanrı ve Yeni Fizik* (Paul Davies) bulunmaktadır.

Yıldızlararası Bilimi
© 2014, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

The Science of Interstellar
© 2014, Kip Thorne
Metin © Kip Thorne
Önsöz © 2014, Christopher Nolan
Film © 2014 Warner Bros. Entertainment Inc.
INTERSTELLAR ve ilgili bütün karakterler ve malzemeler
© Warner Bros. Entertainment Inc.'e aittir.
WB LOGO:TM & © Warner Bros. Entertainment Inc.
Aşağıda numarası bulunan görseller Warner Bros'tan izin alınarak kullanılmıştır.
1.2, 3.3, 3.4, 3.6, 5.6, 8.1, 8.5, 8.6, 9.7, 9.9, 9.10, 9.11, 11.1, 14.9, 15.2, 15.4, 15.5, 17.5, 17.9, 18.1, 19.2, 19.3, 20.1, 20.2, 24.5, 25.1, 25.7, 25.8, 25.9, 27.8, 28.3, 29.8, 29.14, 30.1, ve 31.1.
Görseller © 2014 Warner Bros. Entertainment Inc.

Kitabın Türkçe yayın hakları Akcalı Telif Hakları Ajans aracılığıyla Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti.'ne aittir. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında, yayıncının yazılı izni olmaksızın hiçbir elektronik veya mekanik araçla çoğaltılamaz. Eser sahiplerinin manevi ve mali hakları saklıdır.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Redaksiyon Mehmet Ata Arslan
Kapak Tasarımı Füsun Turcan Elmasoğlu
Sayfa Tasarımı Mürüvet Durna - Ayşe Ersoy Yılmaz

ISBN 978-605-171-018-1
1. Basım: Şubat 2015
3. Basım: Ekim 2019

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa-İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 45099

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Alemdar Mahallesi Ticarethane Sokak No: 15 34110 Cağaloğlu-İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 (pbx) Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 43949

KIP THORNE

YILDIZLARARASI BİLİMİ



INTERSTELLAR

CHRISTOPHER NOLAN'IN ÖNSÖZÜYLE

ÇEVİRİ
BARIŞ GÖNÜLŞEN

ALFA

ÖNSÖZ

Yıldızlararası için çalışmanın bana verdiği zevkin çok önemli bir parçası da Kip Thorne'u tanımam oldu. Bilime karşı duyduğu bulaşıcı heyecan, keza yarım yamalak görüşler sunmaya olan isteksizliği ilk konuşmamızdan itibaren gün gibi ortadaydı. Kendisine taşıdığım fikirsel zorlukların hepsine yaklaşımı her zaman soğukkanlı, ölçülü ve her şeyden önemlisi *bilimsel* oldu. Benim bilimin yolundan fazla sapmamamı sağlama uğraşı sırasında, herhangi bir şeyi kanıtları olmadan kabul etme isteksizliğime karşı asla sabırsızlık göstermedi (onun ışık-hızından-daha-hızlı olmayı yasaklamasına karşı benim iki hafta süren direnişim elbette nazik bir of çekmeye neden olmuş olabilir).

Kendi rolünü bir bilim polisliği olarak değil anlatıya ortaklık olarak belirledi, yazarken kendimi sıkıştırmış olduğum köşelerden çıkabilmem için bilimsel dergileri ve akademik makaleleri didik didik etti. Kip bana bilimi tanımlayan ana özelliği öğretti; doğanın sürprizleriyle yüz yüze geldiğinde taşıdığı alçakgönüllülüğü. Bu tutumu ona, spekülatif kurgunun paradoks ve bilinmezliğe saldırmak için başka bir açıdan sunduğu olasılıkların (hikâye anlatıcılığının) tadını çıkarmasına olanak verdi. Bu kitap Kip'in onun müthiş zekâsına veya olağanüstü bilgi birikimine sahip olmayan bizlere bilimi ulaşılır kılma yönündeki dur durak bilmeyen dürtüsünün ve canlı hayal gücünün harika bir göstergesidir. O, insanların evrenimizin çılgınca gerçeklerini anlamasını ve bunlardan heyecan duymasını istiyor. Bu kitap okuyucularının bilime duydukları merak ölçüsünde konunun içerisine dalmalarını sağlayacak şekilde kurgulanmış; kimse dışarıda bırakılmıyor ve herkes benim Kip'in kıvrak zekâsına ayak uydurmaya çalışırken aldığım zevkin hiç olmazsa birazını deneyimleme şansı elde ediyor.

Christopher Nolan
Los Angeles, California
29 Temmuz 2014

İÇİNDEKİLER

Teşekkürler, 7
Önsöz, 9
Giriş, 11

Hollywood'da Bir Bilimci: *Yıldızlararası*'nın Doğuşu 13

I. TEMELLER

Kısaca Evrenimiz 31
Evreni Yöneten Yasalar 42
Bükülmüş Zaman ve Uzay, Gelgitli Kütleçekim 51
Kara Delikler 63

II. GARGANTUA

Gargantua'nın Gövdesi 75
Kütleçekim Sapanları 85
Gargantua'yı Görüntülemek 94
Diskler ve Püskürmeler 108
Rastlantı Evrimin İlk Yapı Taşıdır 122

III. DÜNYADA FELAKET

Küf 127
Oksijensiz Kalmak 134
Yıldızlararası Yolculuk 137

IV. SOLUCANDELİĞİ

Solucandelikleri 149
Yıldızlararası'ndaki Solucandeliğinin Görselleştirilmesi 161
Solucandeliğinin Keşfi: Kütleçekim Dalgaları 170

V. GARGANTUA'NIN ÇEVRESİNDE KEŞİF YOLCULUĞU

Miller'ın Gezegeni 185
Gargantua'nın Titreşimleri 196
Mann'ın Gezegeni 200
Endurance 206

VI. UÇ FİZİK

Dördüncü ve Beşinci Boyutlar 211
Yığın Varlıklar 216
Hapsolmuş Kütleçekim 222
Kütleçekim Sapmaları 231
Profesörün Denklemi 242
Tekillikler ve Kuantum Kütleçekimi 254

VII. DÜĞÜM ÇÖZÜLÜYOR

Yanardağın Ağzı 271
Gargantua'nın İçine Giriş 281
Teserakt (Dört Boyutlu Küp) 288
Geçmişe Mesaj Yollamak 300
Dünyadan Kolonilerin Ayrılması 311

Daha Fazlasını Nereden Öğrenebilirsiniz?, 314
Teknik Notlar, 328
Görsel Haklar, 336
Kaynakça, 341
Dizin, 347

TEŞEKKÜRLER

Beni Hollywood'a davet edip bu ilgi çekici dünya hakkında bana bu kadar çok şey öğrettiği için herkesten önce ortağım Lynda Obst'a, ayrıca Christopher Nolan, Emma Thomas, Jonathan Nolan, Paul Franklin ve Steven Spielberg'e teşekkür ederim.

Lynda'ya *Yıldızlararası*'nın kaynağını bulup aktığı yaklaşımın doğumunda bana yaptığı arkadaşlık ve ortaklık için, onu bu kadar müthiş bir hale dönüştüren Christopher Nolan'ın mahir ellerine ulaşana dek *Yıldızlararası*'nın yaşadığı sıkıntı ve sınavları aşmasında yol göstericiliği için teşekkür ediyorum.

Beni görsel efektler dünyasına davet ederek *Yıldızlararası*'nın solucandeliğinin, kara deliği Gargantua'nın ve birikim diskinin görselleştirilmesinde bana temelleri oluşturma fırsatı verdikleri için Paul Franklin, Oliver James ve Eugénie Von Tunzelmann'a, ayrıca bu temellerin oluşturulmasında bana yakından yardımcı oldukları için Oliver ve Eugénie'ye bir kez daha teşekkür ediyorum.

Bu kitabın taslak haline getirdikleri bilgece yorum ve önerileri için Lynda Obst, Jeff Shreve, Emma Thomas, Christopher Nolan, Jordan Goldberg, Paul Franklin, Oliver James, Eugénie Von Tunzelmann ve Carol Rose'a minnettarım. Taslağın her bir satırının doğruluk ve tutarlılığı için sergiledikleri azimli çaba için Leslie Huang ve Don Rifkin'e teşekkür ediyorum. Görseller konusundaki çok önemli yardım ve/veya önerileri için Jordan Goldberg, Eric Lewy, Jeff Shreve, Julia Druskin, Joe Lops, Lia Halloran ve Andy Thompson'a teşekkür ediyorum. Görsellerin kullanımı için izinlerin alınmasındaki çok önemli yardımı için Pat Holl'e teşekkür borçluyum.

Kitabın gerçek kılınmasını sağladıkları için de Drake McFeely, Jeff Shreve, Amy Cherry ve Hollywood'daki hukuki temsilcilerim Eric Sherman ve Ken Ziffren'a müteşekkirim. (Evet, Hollywood'da çalışan herkesin bir temsilci ya da menajere sahip olması gerekiyor; bu uç noktada bir bilimci olsan da değişmiyor.)

Ve bu macera boyunca sabrı ve desteği için eşim ve hayat ortağım Carolee Winstein'e teşekkür borçluyum.

Yaptığım yorumlama genellikle sahnenin arkasında neler olup bitiyor olabileceğine ilişkin hayal ettiklerimin betimlenmesinden ibaret: Gargantua kara deliğinin tekillikleri, ufku ve görsel şeklinin fiziği; Gargantua'nın gelgitli kütleçekiminin Miller'ın gezegeninde boyu 1 kilometreyi aşan deniz dalgalarını nasıl yaratabildiği; teseraktın, dört boyutlu bir cismin üç boyutlu Cooper'ı beş boyutlu yığının içerisinde nasıl bir yerden bir yere nakledebildiği vb.

Bazen yaptığım yorum *Yıldızlararası*'nın hikâyesinin filmde gördüğümüzün ötesine genişletilmesidir; buna örnek olarak Profesör Brand'in solucandeliğini film başlamadan çok önce, Gargantua yakınlarındaki bir nötron yıldızından dünyaya uzanan bir solucandeliğinde yolculuk eden kütleçekimsel dalgalar aracılığıyla nasıl keşfetmiş olabileceğini verebilirim.

Bu yorumlar elbette bana ait. Bunları Christopher Nolan'ın onaylaması ile Pablo Picasso'nun bir sanat eleştirmeninin yorumlarını onaylaması arasında pek fazla fark yok. Bunlar benim bilimin göz kamaştırıcı güzelliğini aktarabilmemin aracı sadece.

Bu kitabın bazı bölümleri biraz daha zor okunuyor olabilir. Bu gerçek bilimin doğası gereğidir. Bilim düşünmeyi gerektirir. Bazen derin düşünmeyi. Fakat düşünmek ödüllendirir. İsterseniz bu zor bölümleri atlayabilir, isterseniz de anlamaya uğraşırsınız. Uğraşınız sonuçsuz kalırsa o zaman bu benim suçumdur, sizin değil ve bunun için sizlerden özür diliyorum.

Senaryosunu tamamlarken Christopher Nolan'ın bana yönelttiği sorulara benim geceleri kafa patlatmam gibi, umarım en az bir kere siz de kendinizi benim yazdığım bir şey üzerinde gecenin karanlığında, yarı uyur yarı uyanık bir halde kafa yorarken bulursunuz. Sizlerin de, bir kere bile olsa, benim Nolan'ın sorularıyla uğraşırken başıma sık sık geldiği gibi gecenin ilerlemiş bir saatinde düşünürken birden bir Eureka anı deneyimlemenizi umut ediyorum.

Christopher Nolan, Jonathan Nolan, Emma Thomas, Lynda Obst ve Steven Spielberg'e beni Hollywood'a davet ettikleri ve bana rüyamı gerçekleştirmek, bir sonraki kuşağa bilimin güzelliği, büyüleyiciliği ve gücüne dair mesajımı iletmek için bu harika fırsatı tanıdıkları için minnettarım.

Kip Thorne
Pasadena, California
15 Mayıs 2014

GİRİŞ

Bir bilim insanı olarak yarım yüzyılı ardımda bıraktım. Kariyerim (çoğunlukla) gayet eğlenceli ve neşeli geçti ve bana dünyamız ile evrenimiz hakkında sağlam bir bakış açısı armağan etti.

Çocukluğumda ve ardından gençliğimde Isaac Asimov, Robert Heinlein ve diğerlerinin bilimkurgularını, Asimov ve fizikçi George Gamow'un yazdığı popüler bilim kitaplarını okumam beni bilim insanı olmaya heveslendirdi. Onlara çok şey borçluyum. Onların mesajını bir sonraki nesle aktararak bu borcu ödemeyi çok uzun süredir istiyordum; bunun yolu benzer durumdaki gençlere ve yetişkinlere bilimin, gerçek bilimin dünyasını sevdirmekten, bilim alanında çalışmayanlaraysa bilimin nasıl işlediğini ve bireyler olarak bize, uygarlığımıza ve insanlığa ne kadar büyük bir güç kattığını açıklamaktan geçiyordu.

Christopher Nolan'ın *Yıldızlararası* [*Interstellar*] filmi bu mesajın ideal bir biçimde iletilmesine fırsat tanıyordu. İlk fikir aşamasından itibaren *Yıldızlararası*'na katılma şansını elde ettim (ve bu gerçekten bir şanstı). Nolan ve arkadaşlarına filmin dokusunun gerçek bilimle örülmesinde yardımcı oldum.

Yıldızlararası'nın biliminin çoğu, insan kavrayışının bugünkü sınırlarının ötesinde veya o sınırda yer alıyor. Bu filme özel bir değer kattığı gibi, bana da sağlam bilim, bilimsel tahminler ve spekülasyonlar arasındaki ayrımları açıklama fırsatı sunuyor. Bilim insanlarının spekülasyon olarak başlayan fikirleri alıp onların yanlışlıklarını nasıl kanıtladıklarını veya onları bilimsel tahminlere ya da sağlam bilime dönüştürdüklerini anlatmama olanak sağlıyor.

Bunu iki şekilde yapıyorum: Birincisi filmde görülen olgular (kara delikler, solucandelikleri, tekillikler, beşinci boyut ve benzerleri) hakkında bugün bilinenlerin neler olduğunu, bu bildiklerimizi nasıl öğrendiğimizi ve bilinmeyene egemen olmayı nasıl umut ettiğimizi *açıklıyorum*. İkinci olarak *Yıldızlararası*'nda gördüklerimizi, bir sanat eleştirmeninin veya sıradan bir izleyicinin bir Picasso tablosunu yorumlamasına benzer şekilde bir bilim insanının gözünden *yorumluyorum*.

1

HOLLYWOOD'DA BİR BİLİMCİ:

Yıldızlararası'nın Doğuşu

Lynda Obst, Hollywood'daki Ortağım

Yıldızlararası'nın tohumları başarısız bir romantik girişimin yaratıcı bir dostluk ve arkadaşlığa dönüşmesiyle atıldı.

Arkadaşım Carl Sagan 1980 yılının Eylül ayında beni aradı. Kendisi benim bekâr bir baba olarak bir genç kız büyüttüğümü (veya büyütmeye çalıştığımı diyelim, çünkü bu işte pek de iyi değildim), Güney California'ya özgü bir bekâr hayatı yaşadığımı (bunda sadece çok az daha iyi sayılabilirdim) ve bu arada kuramsal fizik kariyeri peşinde koştuğumu (işte bunda kesinlikle çok daha iyiydim) bilmekteydi.

Carl bir tanışma randevusu öneriyordu. Carl'ın yakında başlayacak olan televizyon dizisi *Cosmos*'un dünya prömiyerine katılmak üzere Lynda Obst'la birbirimize eşlik edecektik.

New York Times Magazine'in zeki ve güzel karşı-kültür ve bilim editörü Lynda bir süre önce gazetesi tarafından Los Angeles'a tayin edilmişti. Tayini kocası tarafından şikâyet ve bağırış çığırışla karşılanmış ve ayrılıklarında etken olmuştu. Bu zor durumdan çıkış sağlama amacıyla Lynda *Flashdance* adlı bir filmin konsept danışmanlığını yaparak sinema sektörüne giriş yapmaya çalışıyordu.

Cosmos'un prömiyeri Griffith Gözlemevinde smokin ve gece elbisesi giyilen bir tören biçiminde kurgulanmıştı. Her zamanki saçmalamam sonucu ben buz mavisi bir smokin giydim. Los Angeles'ta kim varsa herkes oradaydı. Kendimi tamamen kaybettim ve harika zaman geçirdim.

Sonraki iki yıl boyunca Lynda'yla ara ara çıktık. Ama kimyamız uygun değildi işte. Onun yoğunluğu beni kendisine çekiyor ama yoruyordu. İlişkimizdeki artıların bu yorgunluğa değip değmediğini kafamda tartışıyordum ama kararı veren ben olmadım. Belki de suçlu benim kadife gömleklerim ve çift örgü kumaş pantolonlarımdı, bilmiyorum. Bir süre sonra Lynda bana olan romantik ilgisini kaybetti ama aramızda daha iyi bir şey gelişmeye başladı: İki çok farklı dünyadan iki çok farklı insan arasındaki istikrarlı ve yaratıcı bir dostluk ve ortaklık.

Filmi 2005 yılı Ekim ayına doğru hızla ileri sarıyorum; yine bizim arada bir çıktığımız baş başa akşam yemeklerinden birindeyiz ve sohbetimiz son kozmolojik keşiflerden sol politikaya, iyi yemeklerden sinema sektörünün değişen koşullarına uzanıyor. Lynda artık Hollywood'un en başarılı ve becerikli yapımcıları arasında yer alıyor [*Flashdance*, *The Fisher King* (*Balıkçı Kral*), *Contact* (*Mesaj*), *How to Lose a Guy in Ten Days* (*Bir Erkek On Günde Nasıl Kaybedilir*)]. Ben evliyim. Karım Carolee Winstein ile Lynda çok yakın dost olmuşlar. Ben de fizik dünyasında fena işler yapmamışım.

Yemeğin sonuna doğru Lynda kafasındaki bilimkurgu filmi fikrini açıyor ve bu fikri geliştirmek üzere benden yardım istiyor. Bu onun ikinci bilimkurgu girişimi olacak: Bana önerisi daha önce *Contact* filminde Carl Sagan'la yaptığı işbirliğine benziyor.

Kendimi hiçbir zaman bir filmin yapılmasına yardım ederken hayal etmedim. Lynda'nın maceralarını gıptayla dinlemenin ötesinde bir Hollywood'a girme arzusu da hiç duymadım. Fakat Lynda'yla çalışmak bana çekici geldi ve fikirleri içerisinde benim öncülüğünü yaptığım bir astrofizik kavramı olan solucandelikleri de vardı. Dolayısıyla beni bir beyin fırtınasına kolayca ikna etti.

Sonraki dört ayda filmin kaba bir taslağını çıkarmamız için birkaç akşam yemeği, e-posta ve telefon görüşmesi yeterli oldu. Filmde solucandelikleri, kara delikler, kütleçekim dalgaları, beş boyutlu bir evren ve insanların daha yüksek boyutlu yaratıklarla karşılaşması olacaktı.

Fakat benim için en önemlisi, *en başından beri gerçek bilime dayanan* büyük bir gişe filmi yaklaşımında ortaklaşmamızdı. İnsan bilgisinin sınırlarında dolanan bir bilim. Yönetmenin, senar-

yo yazarlarının ve yapımcıların bilime saygı duyduğu, bilimden esinlendiği ve bilimi filmin dokusuna yerleştirdiği ve bunu güçlü ve etkili biçimde başardığı bir film. Fizik yasalarının evrenimizde yaratabildiği ve yaratabileceği harika şeyleri ve fiziksel yasalara hâkimiyet yoluyla insanların başarabileceği müthiş şeyleri izleyiciye duyumsatan bir film. Çok sayıda izleyiciye gidip bilim öğrenme ve belki de bilimde kariyer yapma esini sağlayacak bir film.

Dokuz yıl sonra bugün *Yıldızlararası* bizim tasarladığımız tüm bu hedefleri gerçek kılıyor. Fakat oradan buraya uzanan yolda, biraz "*The Perils of Pauline*"[1] misali, hayalimizin başarısızlıkla sonuçlanabileceği pek çok dönemeçten geçtik. Efsanevi yönetmen Steven Spielberg'ü önce kazandık, sonra kaybettik. Müthiş genç senaryo yazarı Jonathan Nolan'ı kazandık, sonra onu iki kez, son derece kritik aşamalarda, her ikisi de aylar sürecek tarzda kaybettik. Film iki buçuk yıl boyunca yönetmensiz ortada kaldı. Sonra Jonathan'ın kardeşi ve yeni neslin en iyi yönetmeni Christopher Nolan'ın ellerinde mucizevi bir şekilde yeniden yaşama döndü ve bambaşka bir şeye dönüştü.

Steven Spielberg, Başlangıçtaki Yönetmen

Biz beyin fırtınasına başladıktan dört ay sonra 2006 yılının Şubat ayında Lynda, Spielberg'ün *Creative Artists Agency*, CAA'daki menajeri Todd Feldman'la bir öğle yemeğindeydi. Feldman hangi filmler üzerinde çalıştığını sorduğunda Lynda ona benimle işbirliğini ve *Yıldızlararası* için kurduğumuz rüyayı, başlangıcından itibaren gerçek bilimle örülü bir bilimkurgu filmi hayalimizi anlattı. Feldman heyecanlandı. Spielberg'ün ilgilenebileceğini düşündü ve Lynda'nın ona *hemen aynı gün* bir tretman yollamasında ısrarcı oldu. ("Tretman" genellikle yirmi sayfa veya daha fazla uzunlukta bir metinle hikâye ve karakterlerin betimlenmesidir.)

Yazılı olarak bizim elimizde olan her şey birkaç e-posta ve yine birkaç akşam yemeği sohbetinde alınmış notlardan ibaretti. Do-

[1] *The Perils of Pauline* [*Pauline'in Tehlikeleri*] ilk kez 1914 yılında dizi film şeklinde sessiz çekilen ve sonrasında birçok yeni çevrimi yapılan bu klasik Amerikan filmi, başkarakteri genç kızın film boyunca karşılaştığı birçok talihsizlik ve kötülükle baş etmek zorunda kaldığı hikâyesiyle sinema tarihinde kült statüsü kazanmış bir başyapıttır –çn.

layısıyla birkaç gün boyunca jet hızıyla çalışarak gurur duyacağımız sekiz sayfalık bir tretmanı çıkardık ve yolladık. Birkaç gün sonra Lynda bana bir e-posta yolladı: "Spielberg okudu ve çok ilgilendi. Onunla kısa bir toplantı yapmamız gerekebilir. Var mısın? XX Lynda."

Şüphesiz ki vardım! Fakat bir hafta sonra, henüz bir toplantı ayarlanamamışken Lynda aradı: "Spielberg bizim *Yıldızlararası*'nı yönetmek için imza atıyor!" Lynda mest olmuştu. Ben mest olmuştum. "Böyle bir şey Hollywood'da asla olmaz," diyordu bana. "Asla." Ama olmuştu.

Daha sonra Lynda'ya hayatımda sadece bir Spielberg filmi izlediğimi itiraf ettim; o da *ET*'ydi elbette. (Yetişkinliğimde sinema filmlerine pek de fazla ilgi duymamıştım.) Bu yüzden bana bir ev ödevi verdi: Kip'in İzlemek Zorunda Olduğu Spielberg Filmleri.

Bir ay sonra, 27 Mart 2006 tarihinde Spielberg'le ya da benim ona yeni hitabımla söylersek Steven'la ilk toplantımızı yaptık. Burbank'te onun film yapım şirketi Amblin'in ortasında kurulu ev rahatlığındaki konferans odasında bir araya geldik.

Toplantımızda Steven ve Lynda'ya *Yıldızlararası*'nın bilimi için iki ana ilke önerdim:

1. Filmde hiçbir şey genel kabul görmüş fizik yasalarına ya da genel kabul görmüş evren bilgimize aykırı olmayacak.
2. Fizik yasalarının ya da evrenin tam anlaşılmamasının izin verdiği (genellikle uçuk) spekülasyonlar gerçek bilimden, en azından kimi "saygıdeğer" bilimcilerin olası gördüğü fikirlerden kaynağını alacak.

Steven hemfikir olmuş gibi görünüyordu, ardından da Lynda'nın bizimle beyin fırtınası yapacak bir grup bilim insanının bir *Yıldızlararası* Bilim Atölyesinde bir araya getirilmesi önerisini kabul etti.

Atölye 2 Temmuzda California Teknoloji Enstitüsünde (Caltech) benim ofisimin aşağısındaki bir konferans odasında gerçekleşti.

Sekiz saatlik, serbest akışlı, sarhoşluk verici bir tartışmaydı; on dört bilim insanı (astrobiyologlar, gezegenbilimciler, kuramsal fizikçiler, evrenbilimciler, psikologlar ve bir uzay politikası uzmanı) artı Lynda, Steven, Steven'ın babası Arnold ve bendik. Toplan-

tıdan yorgun, fakat yeni fikirlerin ve eski fikirlerimize itirazların doygunluğuyla coşkun çıktık. Bu Lynda ve benim tretmanımızı gözden geçirip genişletmemiz için de itici bir güç oldu.

Başka görevlerimizden dolayı altı ayımızı aldı ama 2007 yılının Ocak ayında tretmanımız otuz yedi sayfaya çıkmış oldu, ayrıca artık elimizde *Yıldızlararası*'nın bilimi hakkında on altı sayfalık bir metin vardı.

Jonathan Nolan, Senaryo Yazarı

Bu arada Lynda ve Steven potansiyel senaryo yazarlarıyla görüşmeler gerçekleştiriyorlardı. En sonunda, otuz bir yaşında (ağabeyi Christopher'la) ortak olarak sadece iki senaryo yazmış ama ikisi de büyük iş yapmış *The Prestige* [*Prestij*] ve *The Dark Knight*'ın [*Kara Şövalye*] senaristi Jonathan Nolan'la yollarımızın birleşmesi uzun bir sürecin ardından mümkün oldu.

Jonathan ya da dostlarının kullandığı isimle Jonah bilim alanında fazla bilgiye sahip değildi belki ama zeki, meraklı ve öğrenmeye istekliydi. Daha derine inen sorular sorarak *Yıldızlararası*'nda kullanılan bilimsel bilgiyle ilgili kitapları silip süpürmeye aylarını ayırdı. Ve filmimize Steven, Lynda ve benim memnuniyetle kabul ettiğimiz büyük yeni fikirler ekledi.

Jonah'la çalışmak harikaydı. Birçok kez Caltech fakülte kulübü Athenaeum'da genellikle iki-üç saat süren öğle yemeklerimizde onunla birlikte beyin fırtınaları yaptık. Jonah yemeklere yepyeni fikir ve sorularla dolup taşmış halde gelirdi. Hemen anında tepkimi verirdim: Bu bilimsel olarak mümkün, bu değil... Tepkilerim bazen yanlış olurdu. Jonah sıkıştırırdı: Neden? Peki ya şu...? Ben yavaşımdır. Eve gider, o fikrin üstüne güzel bir uyku çekerdim. Gecenin yarısında, içimdeki ilk tepkiyi bastırmışsam, bu kez onun olabileceğini söylediği şeyi olur kılacak bir yol bulurdum. Ya da onun istediği sonucu sağlayacak bir alternatif... Böyle böyle yarı uykulu hallerimde yaratıcı düşünme işinde de başarılı olmaya başladım.

Ertesi sabah geceleyin yazdığım yarı bağdaşık notları toparlar, deşifre eder ve Jonah'a bir e-posta yazardım. O da telefon, e-posta ya da başka bir öğlen yemeğiyle yanıt verir ve birbirimize

yaklaşırdık. Bu yolla örneğin kütleçekim sapmalarına ve bu sapmaların insanlığı dünyadan göç ettirmek için kullanılması fikrine ulaştık. Ben de şu anki bilginin biraz ötesine geçerek sapma ve aykırılıkları bilimsel olarak mümkün kılmanın yollarını keşfettim.

Kritik anlarda Lynda'yı aramıza kattık. Bizim fikirlerimizi eleştirmekte müthişti ve bizim başımızı başka yönlere çevirmemizi sağlardı. Bizim beyin fırtınamıza paralel olarak o büyüsünü yaratıcı özerkliğimizi koruyabilmemiz için Paramount Pictures'ı uzağımızda tutmakta kullanıyor ve *Yıldızlararası*'nı gerçek bir film haline getirmenin önümüzdeki aşamalarını planlıyordu.

Jonah, Lynda, Steven ve ben 2007 yılının Kasım ayına geldiğimizde Lynda'nın ve benim özgün tretmanımız, Jonah'ın büyük fikirleri ve tartışmalarımızdan çıkan birçok başka fikre dayalı olarak radikal biçimde yenilenmiş bir hikâye yapısı konusunda anlaşmıştık ve Jonah yazmaya dalmıştı. Sonra 5 Kasım 2007 tarihinde Amerikan Yazarlar Birliği grev ilan etti. Jonah'ın yazmaya devam etmesi yasaktı ve ortadan kayboldu.

Ben panikledim. Bütün emeğimiz, rüyalarımız, her şey boşa mı gidecekti? Lynda'ya sordum. Sabırlı olmalıyız, dedi ama onun da çok üzüldüğü belliydi. *Sleepless in Hollywood* [*Hollywood'da Uykusuz*] adlı kitabının 6. Bölümünde grevin öyküsünü çok canlı biçimde anlatır. Bölümün adı "Felaket"tir.

Grev üç ay sürdü. 12 Şubatta bittiğinde Jonah yazmaya ve Lynda ve benimle yoğun tartışmalara yeniden döndü. Sonraki on altı ayın sonunda uzun, ayrıntılı bir senaryo çerçevesi ve ardından birbirini izleyen üç taslak senaryo çıkardı. Her biri bittiğinde değerlendirme için Steven'la bir araya geliyorduk. Steven bir saat ya da bazen bir saati de aşan bir süre boyunca derinleştirici sorular sorar, ardından değişiklik için öneri ya da ricaları olur ve bazı talimatlar iletirdi. Her şeye müdahil bir yapısı yoktu; düşünceli, doğrudan, yaratıcı ve bazen sertti.

2009 yılının Haziran ayında Jonah, Steven'a senaryonun 3. taslağını verdi ve sahneden kayboldu. Çok öncesinden *The Dark Knight Rises*'ı [*Kara Şövalye Yükseliyor*] yazma sözü vardı ve işini *Yıldızlararası* üzerinde çalışırken bir ay bir ay daha diye diye epeydir ertelemişti. Daha fazla erteleyemezdi ve biz senaristsiz kalmıştık. Bir de bunların üstüne Jonah'ın babası ağır biçimde

hastalandı. Babası Aralık ayında ölene dek Jonah Londra'da aylarca yanında kaldı. Bu uzun ara verilince Steven'ın ilgisini kaybedeceğinden korktum.

Fakat Steven da bizimle dayandı ve Jonah'ın dönüşünü bekledi. O ve Lynda senaryoyu tamamlamak için başkasını işe alabilirlerdi ama Jonah'ın yeteneğine çok değer veriyorlardı ve beklediler.



Şekil 1.1: Jonah Nolan, Kip ve Lynda Obst

Sonunda 2010 yılının Şubat ayında Jonah döndü ve 3 Martta Steven, Lynda, Jonah ve ben bir araya gelerek Jonah'ın dokuz ay önce yazdığı 3. taslağı ele aldığımız çok verimli bir toplantı yaptık. Biraz sersemlemiştim, kendimi iyi hissetmiyordum. En azından işler yeniden rayına oturmuştu.

Sonra 9 Haziranda, Jonah 4. taslakla boğuşurken Lynda'dan bir e-posta aldım: "Steven'la bir problemimiz var. İlgileniyorum." Fakat çözülebilecek bir şey değildi. Spielberg ve Paramount *Yıldızlararası*'nın bir sonraki aşaması için anlaşmaya varamadılar ve Lynda sorunun çözüme ulaşmasına aracılık edemedi. Birden yönetmensiz kalmıştık.

Yıldızlararası çok pahalıya mal olacaktı, Steven ve Lynda bunu bana ayrı ayrı söylemişti. Paramount'un bu büyüklükte bir filmi emanet etmekten çekinmeyeceği çok az sayıda yönetmen vardı. *Yıldızlararası* belirsizlikte sürüklenerek ağır ağır ölüyor, dedim kendi kendime. Yıkılmıştım. Başta Lynda da aynı durumdaydı. Ama o sorun çözmede olağanüstüdür.

Christopher Nolan, Yönetmen ve Senaryo Yazarı

Lynda'nın "Steven'la bir problemimiz var" mailinden yalnızca on üç gün sonra mailimde sevinçten havalara uçan bir devam mesajı gördüm: "Emma Thomas'la harika konuşma..." Emma, Christopher Nolan'ın eşi/yapımcısı ve bütün filmlerinde birlikte çalıştığı kişidir. Kendisi ve Christopher filmle ilgilenmişler. Lynda heyecandan titriyordu. Jonah onu arayıp "bu olası en iyi sonuç" demiş. Fakat anlaşmanın sağlanması, bizim Christopher ve Emma'nın kararlı olduğunu bilmemize karşın çeşitli nedenlerden kaynaklı iki buçuk yıl sonra oldu.

Bu yüzden oturduk ve bekledik. Haziran 2010'da başladık beklemeye, 2011 yılı geçti, bekleyişimiz ta 2012 yılı Eylülüne dek sürdü. Bu süre boyunca kendimi yiyip bitirdim. Lynda benim karşımda kendinden emin bir havadaydı. Fakat daha sonra yazdıklarını asıl kendisine yazdığını itiraf edecekti: "Yarın uyanırız, bir bakmışız iki buçuk yıl beklemenin ardından Chris Nolan da gitmiş. Kendi fikriyle de gelebilir. Başka bir yapımcı ona daha çok seveceği bir senaryo verebilir. Bir ara vermeye karar verebilir. O zaman onu bu kadar beklemekle hata yaptığım ortaya çıkar. Bunlar olur. Hayatım bu benim, yaratıcı yapımcıların hayatı bu. Ama bizim için mükemmel yönetmen o. Dolayısıyla bekliyoruz."

Sonunda görüşmeler başladı ve bu görüşmeler benim maaş derecemin çok çok üstündeydi. Christopher Nolan filmi ancak Paramount Nolan'ın son filmlerini yapan stüdyo olan Warner Bros.'la paylaşırsa yönetecekti, dolayısıyla normalde rakip olan bu iki stüdyo arasında (son derece karmaşık) bir anlaşma yapılması gerekti.

En sonunda 18 Aralık 2012'de Lynda mail attı: "par ve warners koşullarda anlaştılar. Değerimi bil! İlkbaharda başlıyoruz!!!" Ve o andan başlayarak *Yıldızlararası* Christopher Nolan'ın ellerine geçince her şey yolunda gitmeye başladı. En sonunda! Engelsiz, eğlenceli ve canlı.

Christopher, Jonah'ın senaryosuna gayet hâkimdi. Sonuçta kardeştiler ve Jonah yazarken üzerine konuşmuşlardı. Senaryo ortaklıklarında olağanüstü derecede başarılı bir geçmişe sahiptiler: *The Prestige*, *The Dark Knight*, *The Dark Knight Rises*. Jonah ilk taslakları yazıyor, ardından Christopher taslağı ele alıyor ve yeniden yazıyor, kâğıda geçirirken her sahneyi nasıl çekeceği üzerine etraflıca düşünüyordu.

Christopher *Yıldızlararası*'nda ipleri tam anlamıyla eline alınca Jonah'ın senaryosunu kendisinin üzerinde çalıştığı başka bir projeyle birleştirdi ve filme tamamen yeni bir perspektif ve bir dizi yeni büyük fikir ekledi; bu fikirler filmi hiç beklenmedik yepyeni yönlere taşıyacaktı.

Ocak ayının ortalarında, kendisine bir süre sonra hitap etmeye başlayacağım ismiyle Chris, Warner Bros. stüdyolarında kurulu film yapım şirketi Syncopy'deki ofisinde baş başa bir toplantı yapmamızı istedi.

Konuştukça Chris'in film için gereken bilim bilgisine ciddi düzeyde hâkim ve derin bir sezgiye sahip olduğu ortaya çıktı. Sezgileri zaman zaman yanlış olabiliyordu ama genellikle doğruydu. Ve olağanüstü düzeyde meraklıydı. Konuşmalarımız sıkça *Yıldızlararası*'ndan onu büyüleyen ilgisiz başka bilim konularına sapıyordu.

Bu ilk toplantıda Chris'in önüne hemen daha önce önerdiğim bilimsel ana ilkeleri koydum: Hiçbir şey yerleşik fizik yasalarına aykırı olmayacak; spekülasyonların hepsi kaynağını bilimden alacaktı. Aynı eğilimde olduğu görülüyordu ama bana eğer bilimle ilgili yaptıklarını beğenmezsem onu kamuoyu önünde savunmam gerekmediğini söyledi. Bu beni biraz yumuşattı. Şu an filmin post prodüksiyon aşamasındayız ve onun müthiş bir film olmasının önüne engel olmasına izin vermeden bu ilkeleri izleyebilme başarısından çok etkilendiğimi söylemeliyim.

Chris Ocak ortasından Mayıs başına dek yoğun biçimde Jonah'ın senaryosunu yeniden yazma işi üzerinde çalıştı. Zaman zaman o ya da asistanı Andy Thompson beni arayarak bilim meselelerini konuşmak için ya da benim yeni senaryo taslağını okumam ve ardından üzerinde konuşmak için onun ofisine veya evine gelmemi rica ettiler. Konuşmalarımız uzun sürerdi, genellikle doksan dakika; bazen de bunları bir ya da iki gün sonra yapılan uzun telefon konuşmaları izlerdi. Beni düşündüren konular ortaya atardı. Jonah'la çalışırken olduğu gibi ben yine en iyi geceleri düşünürdüm. Ertesi sabah düşüncelerimi grafik ve çizimler içeren birkaç sayfalık bilgi notları biçiminde yazar ve bunları Chris'e elden teslim ederdim. (Chris fikirlerimizin dışarıya sızmasından ve ardından hayranlarının beklentilerine layık olamamaktan kaygı duyardı. Hollywood'da ağzı en sıkı yönetmenlerden birisidir.)

Chris'in fikirleri ara sıra benim ana ilkelerimi çiğniyor gibi görünürdü ama şaşırtıcı bir şekilde her zaman bu fikirlerin bilimsel anlamda mümkün olmasını sağlayacak bir yol bulurdum. Sadece bir kez acınacak şekilde başarısız oldum. Bunun üzerine iki haftalık bir dönemde yapılan birkaç konuşmanın ardından Chris geri adım attı ve filmin o parçasını başka bir yönde ilerletti.

Dolayısıyla sonuç itibarıyla Chris'in yaptıklarını bilimsel açıdan savunma konusunda hiçbir tereddüdüm yok. Tam tersine bu konuda çok istekliyim! O, Lynda ve benim gerçek bilime dayanan ve gerçek bilimin dokusuna işlediği büyük bir gişe filmi hayalimizi gerçek kıldı.

Yıldızlararası'nın hikâyesi Jonah ve Chris'in ellerinde tamamen değişti. Lynda ve benim tretmanımız ile film arasında sadece ana fırça darbeleri yönünden bir benzerlik var. Film çok daha iyi oldu! Bilimsel fikirler için de aynısı geçerli: Bunların hepsi benim demem kesinlikle mümkün değil. Chris filme çok ilgi çekici bilimsel fikirler taşıdı; fizikçi meslektaşlarım bunların benden geldiğini zannedeceklerdir ki açıkçası ben de bu fikirleri ilk duyduğumda neden ben bunları düşünemedim dedim. Benim Chris'le, Jonah'la ve Lynda'yla yaptığım konuşmalardan da son derece ilginç fikirler doğdu.



Şekil 1.2: Kip ve Christopher Nolan *Endurance*'ın[2] yönetim modülünün içinde set hakkında konuşuyorlar.

[2] Filmde uzay gemisine verilen *Endurance* ismi dayanıklılık anlamına gelmektedir –çn.

Bir Nisan akşamı Carolee ve ben Pasadena'daki evimizde Stephen Hawking için yüz kişilik karma bir kalabalığın olduğu büyük bir parti verdik: Bilim insanları, sanatçılar, fotoğrafçılar, sinemacılar, tarihçiler, öğretmenler, toplum örgütçüleri, emek örgütçüleri, ticari girişimciler, mimarlar ve diğerleri. Chris ve Emma geldiler, keza Jonah Nolan ve eşi Lisa Joy ve elbette Lynda. Gecenin geç saatlerinde hep birlikte bir balkonda, yıldızların altında, parti gürültüsünden uzakta, sessizce konuşarak oturduk; bu benim Chris'i bir sinemacı olarak değil de bir insan olarak ilk kez tanıma fırsatım oldu. O kadar zevkliydi ki!

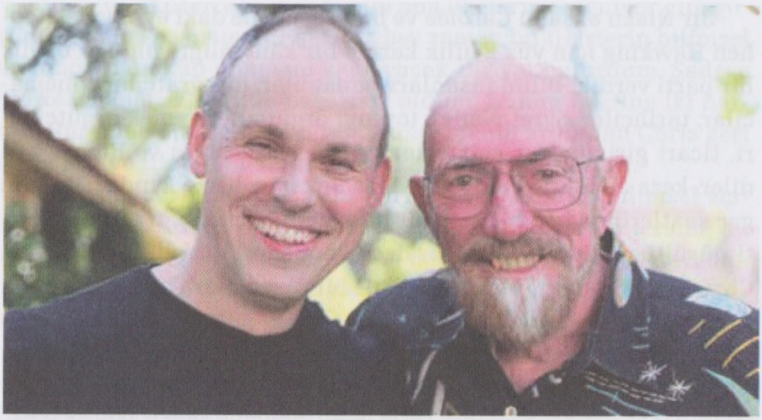
Chris konuşması karşısındakine büyük bir zevk veren, ayakları yere basan birisi ve müthiş bir iğneleyici mizah duygusuna sahip. Bana başka bir arkadaşımı, Intel'in kurucusu Gordon Moore'u hatırlatıyor: Her ikisi de alanlarının zirvesinde, tamamen gösterişsiz ve sadeler. Her ikisi de eski araba kullanıyor, eski arabalarını daha lüks öbür arabalarına tercih ediyorlar. Her ikisi de benim kendimi rahat hissetmemi sağlıyor, içe kapanık biri olduğum düşünülürse bu pek de kolay değildir.

Paul Franklin, Oliver James, Eugénie von Tunzelmann: Görsel Efektler Ekibi

2013 yılı Mayıs ayının ortalarında bir gün Chris beni aradı. *Yıldızlararası*'nın bilgisayar grafiklerini görüşmek üzere Paul Franklin adında birini benim evime yollamak istiyordu. Paul ertesi gün geldi ve benim ev ofisimde iki saat süren zevkli bir beyin fırtınası yaptık. Chris gibi güçlü ve etkin değil, hal ve tavırlarında alçakgönüllüydü. Zekiydi. Üniversitede beşeri bilimlerden mezun olmuş olmasına rağmen bilim konusunda derin bir bilgiye sahip olduğunu gösterdi.

Paul ayrılırken ona görsel efektler için hangi grafik şirketini kullanmayı düşündüğünü sordum. "Benimkini" dedi sakince. Saf saf "Hangi şirket bu?" diye sordum. "Double Negative. Londra'da 1000, Singapur'da 200 çalışanımız var."

Paul ayrıldıktan sonra ismini Google'ladım ve Double Negative'in kurucu ortağı olmakla kalmayıp Chris'in *Inception* (*Başlangıç*) filmiyle görsel efektler dalında bir Akademi ödülü sahibi olduğunu öğrendim. Kendi kendime "Bu sinema sektörü konusunda bir eğitim almamın zamanı geldi" diye söylendim.



Şekil 1.3: Paul Franklin ve Kip.

Birkaç hafta sonra yapılan bir video konferansta Paul *Yıldızlararası*'nın görsel efektler ekibinin Londra'da yaşayan temel elemanlarını benimle tanıştırdı. Benim konumla en çok ilgisi olanlarsa görsel efektleri yaratan bilgisayar kodlarını yazacak bilim insanlarının yöneticisi Oliver James ve Oliver'ın bilgisayar kodlarını alıp filmde etkili görüntüler yaratmak için kapsamlı sanatsal müdahalelerde bulunacak olan sanat ekibinin başındaki Eugénie von Tunzelmann'dı.

Oliver ve Eugénie *Yıldızlararası*'nda rastladığım fizik eğitimi almış ilk insanlardı. Oliver'ın optik ve atom fiziği alanında eğitimi vardı ve Einstein'ın özel göreliliğinin teknik ayrıntılarını biliyordu. Eugénie Oxford'da veri mühendisliği ve bilgisayar bilimi odaklı eğitim almış bir mühendisti. Benimle aynı dili konuşuyorlardı.



Şekil 1.4: Eugénie von Tunzelmann, Kip ve Oliver James.

Hızla harika bir iş ilişkisi geliştirdik. Birkaç ay boyunca neredeyse tam zamanlı olarak kara deliklerin ve solucandeliklerinin civarındaki evrenin görüntüleri için denklemler formüle etmekle uğraştım (8 ve 15. Bölüm). Mathematica adı verilen düşük çözünürlüklü, kullanıcı dostu bir bilgisayar yazılımı kullanarak denklemlerimi test ettim ve ardından denklemleri ve Mathematica kodunu Oliver'a yolladım. O bunları bir çırpıda hazmedip *Yıldızlararası* için ihtiyaç duyulan ultra yüksek kaliteli IMAX görüntüleri yaratabilecek ileri derecede geliştirilmiş bilgisayar kodlarına çevirdi ve ardından Eugénie ve ekibine teslim etti. Onlarla birlikte çalışmak bir zevkti.

Son ürün aşamasında *Yıldızlararası*'ndaki görüntüler mükemmel oldu! Ve bilimsel olarak da hatasızdılar.

Oliver bana ilk film görüntülerini gönderdiğinde nasıl mest olduğumu hayal edemezsiniz. Tarihte ilk kez ben (ve bunu yaşayan ilk bilim insanıydım) hızla dönen bir kara deliğin neye benzediğini ultra yüksek netlikte görmekteydim. Kara deliğin çevresine görsel olarak ne etkide bulunduğunu görmüştüm.

Matthew McConaughey, Anne Hathaway, Michael Caine, Jessica Chastain

Çekimler başlamadan iki hafta önce 18 Temmuzda filmde Cooper'ı oynayan Matthew McConaughey'den bir e-posta aldım: "Yıldızlararası için" diyordu, "Size bazı sorular sormak istiyorum ve ... Eğer L.A. çevresindeyseniz şahsen olmasını tercih ederim. Uygun bir zamanınız olursa bildirin lütfen, mcConaughey."

Altı gün sonra Beverly Hills'te bir butik otel olan L'Hermitage'ın süit odalarından birinde buluştuk. Oraya yerleşmiş, Cooper rolünü ve *Yıldızlararası*'nın bilimini anlamaya çalışıyordu.

Geldiğimde kapıyı üzerinde bir şort ve atlet, ayakları çıplak ve *Dallas Buyers' Club*'ı [*Sınırsızlar Kulübü*] yeni çekmiş olmanın zayıflığıyla açtı (daha sonra bu rolüyle En İyi Erkek Oyuncu Oscarını aldı). Bana "Kip" deyip diyemeyeceğini sordu; elbette dedim ve benim kendisine nasıl seslenmem gerektiğini sordum. "Matt dışında her şey olur; Matt'ten nefret ediyorum." "Matthew." "McConaughey." "Hey sen." "Ne istersen." Hayatımda haddinden fazla sa-

yıda Matthew olduğu ve ayrıca söylemesi çok hoş olduğu için ben "McConaughey"yi seçtim.

McConaughey süitin acayip geniş oturma/yemek odasındaki bütün mobilyaları L şeklinde bir kanepe ve bir kahve masası hariç kaldırtmıştı. Yerin ve masanın üstü her biri belirli bir konu hakkında ve rastgele biçimde dağınık tarzda kaleme alınmış notlarla dolu 30x45 cm kâğıt sayfalarıyla doluydu. Kanepeye oturduk. Bir kâğıt seçip göz atıyor ve bir soru soruyordu. Sorduğu genelde derin bir soru oluyor ve uzun bir sohbeti tetikliyor, bu arada da o kâğıdına notlar alıyordu.

Sık sık konuşma beklenmedik yönlere kayıyor ve kâğıt unutuluyordu. Çok uzun zamandan beri yaptığım en ilginç ve zevkli sohbetlerden biriydi bu! Konuşmamız fiziğin, özellikle de kuantum fiziğinin yasalarından dine ve mistisizme, *Yıldızlararası*'nın biliminden ailelerimize ve özellikle çocuklarımıza, hayat felsefelerimizden her birimizin esin kaynaklarına, kafalarımızın nasıl işlediğine, keşifleri nasıl yaptığımıza dek uzandı. İki saat sonra ayrıldığımda müthiş bir coşkuyla mutluluktan uçuyordum.

Daha sonra Lynda'ya buluşmamızdan bahsettim. "Çok doğal" yanıtını verdi. Neyle karşılaşacağımı bana söyleyebilirdi; *Yıldızlararası* onun McConaughey'le üçüncü filmiydi. Söylemediğine memnunum. Kendi kendime keşfetmek benim için bir zevk oldu.

Bir sonraki e-posta bundan birkaç hafta sonra Amelia Brand'i oynayan Anne Hathaway'den geldi. "Merhaba Kip! Umarım bu e-postam sana ulaşır... E-posta adresini bana Emma Thomas sorularım olursa diye verdi. Konu o kadar derin ki birkaç sorum var tabii, ne yalan söyleyeyim!.. Kısa bir konuşsak acaba mümkün olur mu? Çok teşekkür ederim, Annie."

Programlarımız şahsen buluşmaya uygun olmadığı için telefonda konuştuk. Kendisinin fizik konusuna biraz ilgili olduğunu, oynadığı karakter Brand'in ise fiziğe eksiksiz biçimde hâkim olduğunu söyledi; ardından şaşırtıcı derecede teknik fizik soruları sormaya başladı: Zaman ile kütleçekim arasındaki ilişki nedir? Neden daha yüksek boyutlar olabileceğini düşünüyoruz? Kuantum kütleçekimi araştırmalarında mevcut durum nedir? Kuantum kütleçekimi konusunda yapılmış deneysel testler var mı? Ancak konuşmanın sonunda konudan ayrılıp müzik üzerine konuşmamıza izin verdi açıkçası. O lisede trompet çalmıştı; bense saksafon ve klarnet.

Yıldızlararası'nın film çekimleri sırasında ben sette çok çok az bulundum. Bana ihtiyaç duyulmuyordu. Fakat bir sabah Emma Thomas beni *Endurance* setinde dolaştırdı; Sony Stüdyolarının 30. sahasında *Endurance* uzay aracının yönetim ve seyir kapsülünün tam boy taklit modeliydi bu.

Olağanüstü derecede etkileyiciydi: 14 metre uzunluğunda, 8 metre genişliğinde, 5 metre yüksekliğinde, havada asılı duran; yatay düzlemden neredeyse tamamen dikey konuma kayabilen, detayları çok ince bir güzellikteydi. Aklımı başımdan aldı ve merakımı uyandırdı.

"Emma aynı şey bilgisayar grafikleriyle yapılabilecekken niçin bu devasa, karmaşık setler inşa ediliyor?" Yanıtı "Hangisi daha ucuz, o belli değil" oldu. "Bir de bilgisayar grafikleri hâlâ daha gerçek bir setteki görsel ayrıntıların ikna ediciliğini sağlayamıyor." Mümkün olan her durumda o ve Chris, Gargantua kara deliği gibi bu şekilde çekilemeyecek olan şeyler haricinde hep gerçek setler ve gerçek pratik efektler kullandılar.

Başka bir zaman da Profesör Brand'in kara tahtalarına onlarca denklem ve grafik çizdim ve Chris Profesörün ofisinde çekim yaparken Michael Caine'i Profesör, Jessica Chastain'i de Murph rolünde oynarken izledim[3]. Caine ve Chastain'in bana gösterdikleri sıcak ve dostça saygı beni afallattı. Çekimlerde bir rolüm olmamasına rağmen *Yıldızlararası*'nın gerçek bilimcisi, bu büyük gişe filminin doğru bir bilimsel duruşa sahip olması için herkesin elinden geleni yapmasını esinleyen adam olarak nam salmıştım.

Adımın bu şekilde çıkmış olması Hollywood ikonlarıyla çok etkileyici sohbetler yapmama vesile oldu: Sadece Nolan'lar değil, McConaughey ve Hathaway ve ayrıca Caine, Chastain ve diğerleriyle. Lynda'yla benim yaratıcı dostluğumuzdan gelen keyif de cabasıydı.

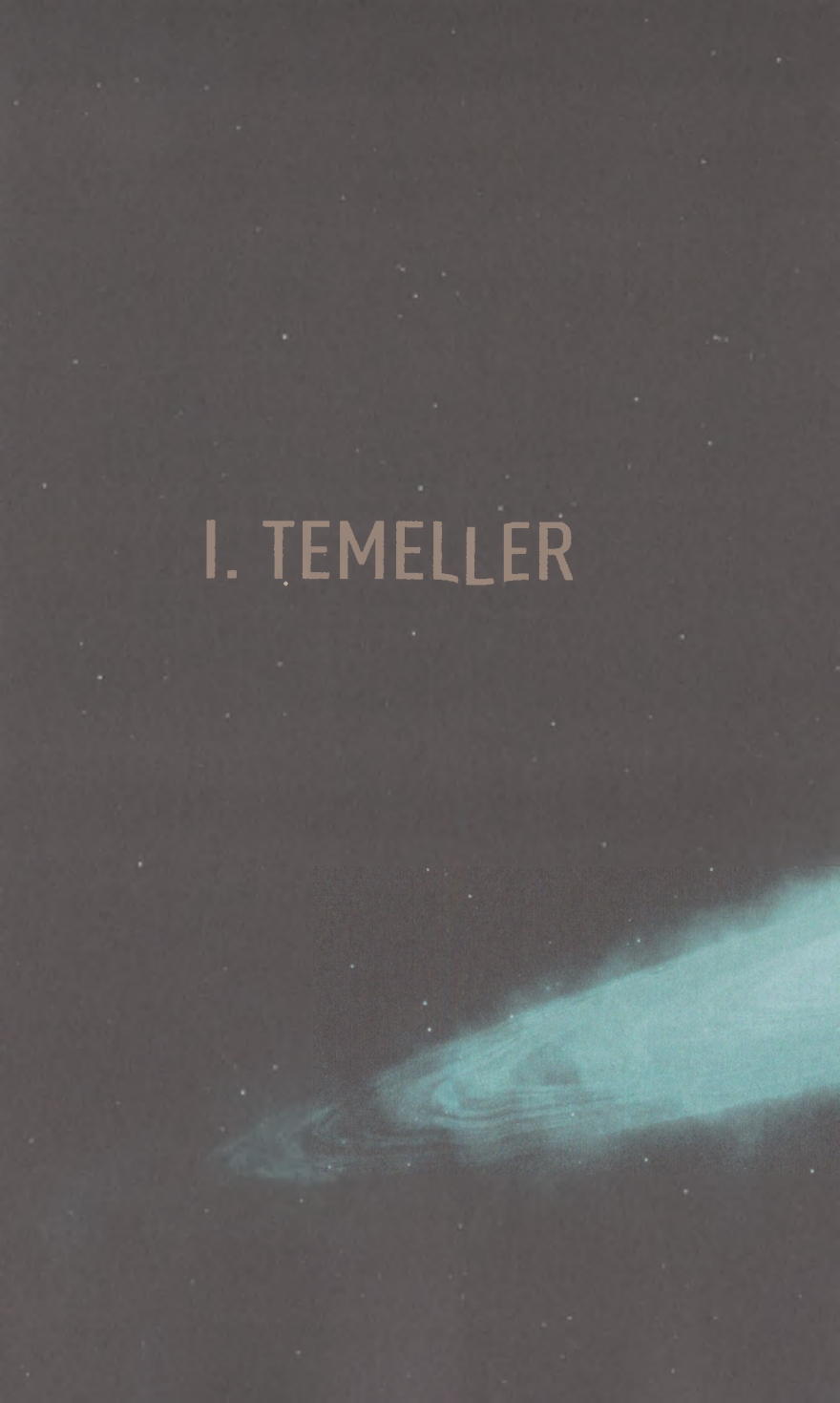
Şimdi Lynda ve benim *Yıldızlararası* hayalimizin en son aşamasına geldik. Bu aşamada sizler, seyirciler *Yıldızlararası*'nın bilimini merak ediyor ve filmde gördüğünüz acayip şeylerin açıklamasının peşine düşüyorsunuz.

Yanıtlar burada. Bu kitabı yazma nedenim bu. Keyfini çıkarın!

---

[3] *Bkz.* 25. Bölüm.

I. TEMELLER



2

KISACA EVRENİMİZ

Evrenimiz uçsuz bucaksızdır. Olağanüstü güzeldir. Bazı yönlerden dikkat çekici ölçüde basit, bazı yönlerden son derece karmaşıktır. Evrenimizin muhteşem zenginliğinden biz sadece benim şimdi belirteceğim birkaç temel gerçeğe ihtiyaç duyacağız.

Büyük Patlama

Evrenimiz 13,7 milyar yıl önce dev bir patlamayla doğdu. Patlamaya biraz saygısız denebilecek "Büyük Patlama"[1] adını veren dostum Fred Hoyle, o tarihlerde (1940'lı yıllar) bunun olmayacak uydurma bir fikir olduğunu düşünen bir uzaybilimciydi.

Fred'in hatalı olduğu kanıtlandı. Daha sonra patlamanın ışımasını tespit ettik, hatta (bu satırları yazmamın) bir hafta öncesinde patlamanın başlamasının ardından gelen saniyenin trilyonda birinin trilyonda birinin trilyonda birinde salınan ışımanın belli belirsiz kanıtını gördük![2]

Ne Büyük Patlamayı tetikleyen şeyi ne de eğer varsa ondan öncesini biliyoruz. Fakat evren bir şekilde devasa bir aşırı sıcak gaz denizi olarak ortaya çıktı ve bir nükleer bomba ya da bir doğalgaz boru hattı patlamasının ateşlediği bir ateş topu gibi her yönde genişledi. Tek fark Büyük Patlamanın (bildiğimiz kadarıyla) yıkıcı olmamasıydı. Aksine evrenimizdeki her şeyi *yarattı* ya da her şeyin tohumlarını attı.

---

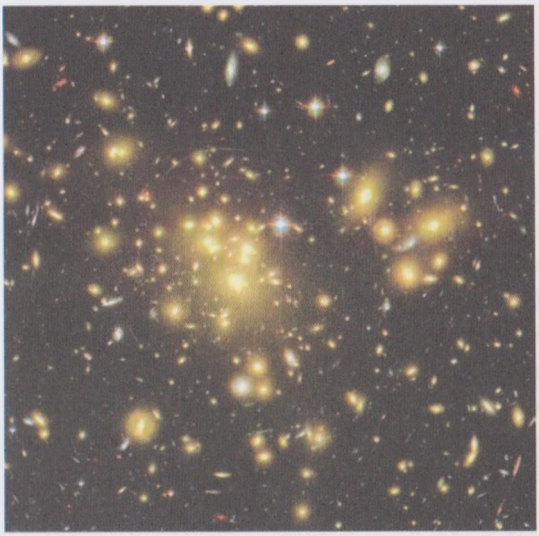
1 "The Big Bang" –çn.

2 2014 yılının Mart ayında yapılan bu müthiş keşif hakkında daha fazla bilgi edinmek için Google'da "Büyük Patlamanın kütleçekimsel dalgaları" ya da "CMB kutuplanması" kelimelerini aratın. 16. Bölümün sonunda bu konudan ben de bahsedeceğim.

Büyük Patlama hakkında uzun bir bölüm yazmak isterdim ama büyük bir irade örneği sergileyerek kendimi tutuyorum. Kitabın geri kalanında daha fazlasına ihtiyacımız yok.

Galaksiler

Evrenimiz genişledikçe sıcak gaz soğudu. Bazı bölgelerde gazın yoğunluğu diğer bölgelere oranla rastgele biçimde biraz daha fazlaydı. Gaz yeterince soğuyunca kütleçekim, yüksek yoğunluk bölgelerinin kendi üzerlerine doğru içe çekilmelerini sağlayarak galaksilerin (yıldızlardan, gezegenlerinden ve yıldızların arasına yayılmış gazlardan oluşan dev bir yıldız kümesi) doğumuna vesile oldu; *bkz.* Şekil 2.1. İlk galaksi, evren birkaç yüz milyon yaşındayken oluştu.



Şekil 2.1: Abell 1689 adlı zengin galaksi kümesi ve çok sayıda başka uzak galaksinin Hubble Uzay Teleskobu tarafından çekilen fotoğrafı.

Görülebilen evrende kabaca bir trilyon galaksi vardır. En büyük galaksiler birkaç trilyon yıldız içerir ve yaklaşık bir milyon ışık yılı[3] genişliğindedir; en küçükleri yaklaşık 10 milyon yıldıza sahiptir ve bin ışık yılı genişliğindedir. Neredeyse bütün büyük

[3] Bir ışık yılı ışığın bir yıl içerisinde katettiği mesafedir; yaklaşık on trilyon kilometredir.

galaksilerin merkezinde güneşin ağırlığının bir milyon katı ya da daha fazla ağırlığa sahip[4] devasa bir kara delik vardır (5. Bölüm).

Dünya, Samanyolu adını verdiğimiz bir galakside yer alır. Samanyolu'nun yıldızlarının çoğu, bulutsuz bir gecede dünyanın gökyüzü boyunca uzanan parlak ışık şeridi içerisindedir. Sadece parlak şeritte gördüklerimiz değil, geceleyin gökyüzünde gördüğümüz iğne ucu büyüklüğündeki ışıkların neredeyse hepsi Samanyolu'ndadır.

Bize en yakın büyük galaksiye Andromeda adı verilir (Şekil 2.2). Dünyadan 2,5 milyon ışık yılı uzaktadır. Yaklaşık bir trilyon yıldızı vardır ve yaklaşık 100.000 ışık yılı genişliğindedir. Samanyolu Andromeda'nın ikizi gibidir; büyüklüğü, şekli ve yıldız sayısı hemen hemen aynıdır. Şekil 2.2 Samanyolu olsaydı bu durumda dünya sarı işaret koyduğum yerde olurdu.



Şekil 2.2: Andromeda galaksisi

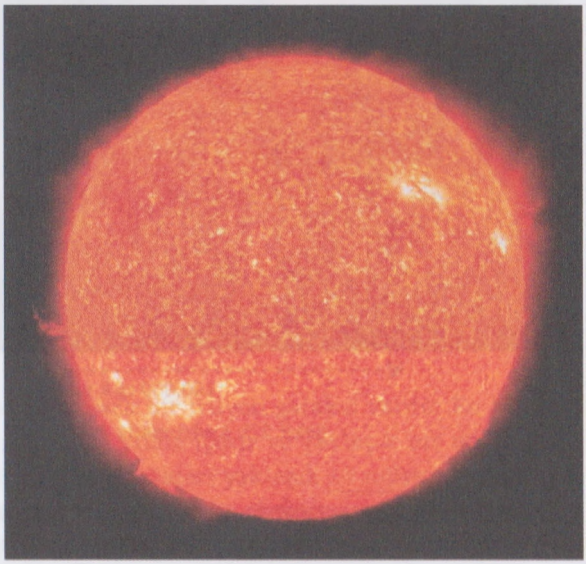
[4] Daha teknik dille söylersek, kütlesi güneşin kütlesinin bir milyon ya da daha fazla katıdır; bu ondan sabit bir uzaklıktaysanız kütleçekim kuvvetinin milyonlarca güneşinkiyle aynı olduğu anlamına gelir. Bu kitapta "kütle" ve "ağırlık" kavramlarını aynı anlamda kullanıyorum.

Andromeda devasa bir kara delik içerir; bu kara delik güneşten 100 milyon kat daha ağırdır ve dünyanın yörüngesi kadar büyük bir genişliktedir (*Yıldızlararası*'ndaki Gargantua'yla aynı ağırlık ve büyüklükte; 6. Bölüm). Şekil 2.2'nin merkezindeki parlak kürenin ortasında bulunmaktadır.

Güneş Sistemi

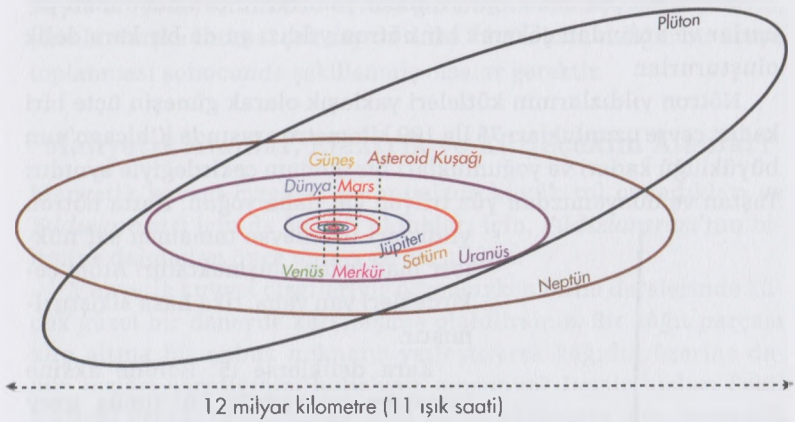
Yıldızlar büyük sıcak gaz toplarıdır, genellikle çekirdeklerindeki nükleer yakıtı yakarak sıcak kalırlar. Güneşin tipik bir yıldız olduğunu söyleyebiliriz. Çapı 1,4 milyon kilometredir, dünyadan yaklaşık yüz kat daha geniştir. Yüzeyinde alev parlamaları, sıcak noktalar ve daha az sıcak noktalar görülür ve bir teleskopla baktığınızda büyülenirsiniz (Şekil 2.3)

Güneşin etrafında dünya dahil sekiz gezegen, ayrıca çok sayıda cüce gezegen (içlerinden en ünlüsü Plüton'dur), çok sayıda kuyruklu yıldız, asteroid ve göktaşı adı verilen daha küçük kayalık cisimler elips şeklinde yörüngeler izleyerek dönerler (Şekil 2.4). Dünya güneşe en yakın üçüncü gezegendir. Muhteşem halkalara sahip olan Satürn altıncı gezegendir ve *Yıldızlararası*'nda bir rolü vardır (15. Bölüm).



1,4 milyon km

Şekil 2.3: NASA'nın Güneş Dinamikleri Gözlemevinin çektiği güneş fotoğrafı.



Şekil 2.4: Güneşin gezegenlerinin, Plüton'un ve çok sayıda asteroid içeren bir bölgenin yörüngeleri.

Güneş sistemi güneşten bin kat daha büyüktür, ışığın bir ucundan diğer ucuna ulaşması on bir saat sürer.

Güneşten sonraki en yakın yıldıza, Proxima Centauri'ye olan uzaklığımız 4,24 ışık yılıdır ve bu güneş sisteminin bir uçtan bir uca olan uzaklığının 2500 katıdır! 13. Bölümde yıldızlararası yolculuk açısından içinde bulunduğumuz feci duruma değineceğim.

Yıldızların Ölümü: Beyaz Cüceler, Nötron Yıldızları ve Kara Delikler

Güneş ve dünya yaklaşık olarak 4,5 milyar yaşındadır, bu evrenin yaşının yaklaşık üçte biri demektir. Yaklaşık olarak 6,5 milyar yıl kadar sonra güneş kendisini sıcak tutan yakıt olan çekirdeğindeki nükleer yakıtı tüketecektir. Ardından çekirdeğinin etrafındaki kabuğun içindeki yakıtı yakmaya başlayacak ve yüzeyi dünyayı kendisine çekip kavuracak şekilde genişleyecektir. Kabuğun yakıtı harcanıp dünya kavrulduktan sonra güneş küçülerek bir beyaz cüce yıldız haline gelecek, büyüklüğü yaklaşık dünya kadar olacak ama yoğunluğu dünyadan bir milyon kat daha yüksek olacaktır. Beyaz cüce gitgide soğuyacak, on milyarlarca yıl süren bu soğuma sonrasında yoğun, karanlık bir cüruf halini alacaktır.

Güneşten çok daha ağır yıldızlar yakıtlarını çok daha hızlı yakarlar ve ardından çökerek bir nötron yıldızı ya da bir kara delik oluştururlar.

Nötron yıldızlarının kütleleri yaklaşık olarak güneşin üçte biri kadar, çevre uzunlukları 75 ila 100 kilometre arasında (Chicago'nun büyüklüğü kadar) ve yoğunlukları bir atomun çekirdeğiyle aynıdır: Taştan ve dünyamızdan yüz trilyon kat daha yoğun. Hatta nötron yıldızları neredeyse tamamen saf nükleer maddeden oluşmaktadır: Atom çekirdekleri yan yana, tıka basa sıkıştırılmıştır.



Şekil 2.5: Bir beyaz cüce [solda], bir nötron yıldızı [ortada] ve bir kara delik [sağda], herbirinin ağırlığı güneşin 1,2 katı kadardır. Burada beyaz cücenin yüzeyinin çok küçük bir bölümünü gösteriyorum.

Kara deliklerse (5. Bölüm) aksine tamamen ve sadece bükülmüş uzay ve bükülmüş zamandan oluşmaktadır. (Bu acayip iddiayı 4. Bölümde açıklayacağım.) Hiçbir madde içermezler ama hiçbir şeyin, ışığın bile içinden dışarıya kaçamadığı "olay ufukları" ya da sadece "ufuklar" dediğimiz yüzeylere sahiptirler. Kara olmalarının nedeni budur. Bir kara deliğin çevre uzunluğu kütlesiyle orantılıdır: Ne kadar ağırsa, o kadar büyüktür.

Tipik bir nötron yıldızı ya da beyaz cüceyle aynı kütleye sahip (güneşin 1,2 katı ağırlığında) bir kara delik, yaklaşık olarak 22 kilometrelik bir çevre uzunluğuna sahiptir: Bu bir nötron yıldızının çevre uzunluğunun dörtte biri ve bir beyaz cücenin çevre uzunluğunun binde biridir. *Bkz.* Şekil 2.5.

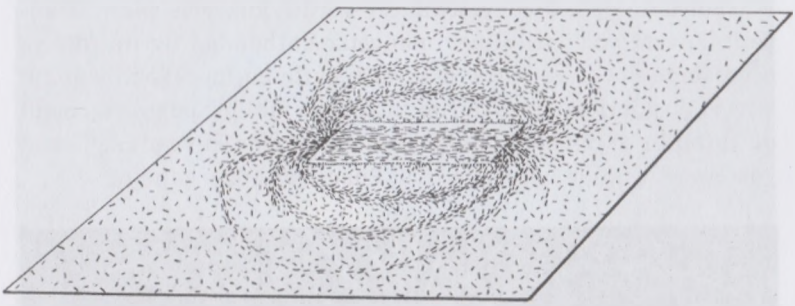
Yıldızlar genellikle kabaca 100 güneşin ağırlığından daha ağır olmadıkları için, kendilerinden doğan kara delikler de 100 güneşten daha ağır değildir. Galaksilerin merkezindeki dev kara delikler güneşten bir milyon ila 20 milyar kat daha ağırdırlar, bu yüzden bir yıldızın ölümü sonucunda doğmuş olmazlar.

Başka bir yolla, bir ihtimal devasa gaz bulutlarının çökmesi yoluyla, yine bir başka ihtimal çok sayıda daha küçük kara deliğin bir araya toplanması sonucunda şekillenmiş olsalar gerektir.

Manyetik Alanlar, Elektrik ve Kütleçekim Alanları

Manyetik kuvvet çizgileri evrenimizde büyük rol oynadıkları ve *Yıldızlararası* için de önemli oldukları için, *Yıldızlararası*'nın bilimine dalmadan önce onları da ele alalım.

Manyetik kuvvet çizgileriyle öğrenciyken bilim derslerinde küçük güzel bir deneyde karşılaşmış olabilirsiniz. Bir kâğıt parçası alıp altına bir çubuk mıknatıs yerleştirerek kâğıdın üzerine demir tozları serptiğinizi hatırlıyor musunuz? Demir tozları Şekil 2.6'daki deseni oluştururlar. Aksi halde görünmez olan manyetik kuvvet çizgileri doğrultusunda yönlenirler. Kuvvet çizgileri mıknatısın kutuplarının birinden başlar, mıknatısın etrafında savrulur ve diğer kutbun içine uzanır. Manyetik *alan* tüm manyetik kuvvet çizgilerinin toplamıdır.



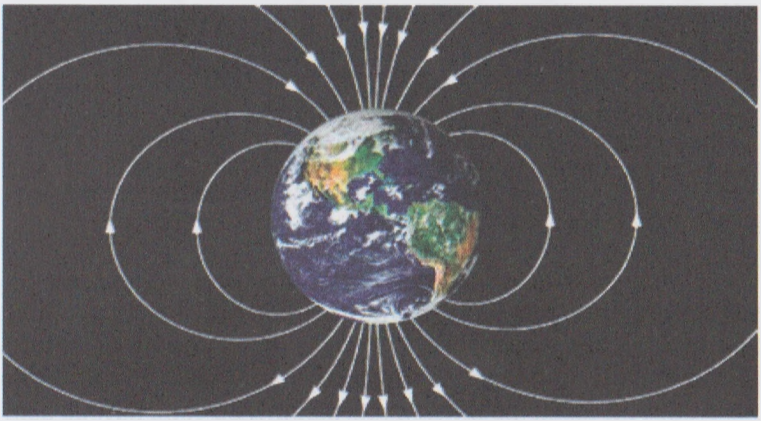
Şekil 2.6: Bir çubuk mıknatıs nedeniyle oluşan manyetik kuvvet çizgileri bir kâğıt parçasının üzerine serpilen demir tozlarıyla görünür kılınmış. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy'den alınmıştır.*]

İki mıknatısı kuzey kutupları birbirine bakarken itmeye çalıştığınızda kuvvet çizgileri birbirini iter. Mıknatıslar arasında bir şeyin olduğunu görmezsiniz ama manyetik alanın itici kuvvetini hissedersiniz. Bu manyetik havaya kaldırmalar için kullanılabilir, manyetize bir cisim (bu bir tren bile olabilir) bu yolla havada asılı kalır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Çin'in Şangay kentindeki dünyanın ilk manyetik olarak havaya kaldırılmış ticari treni.

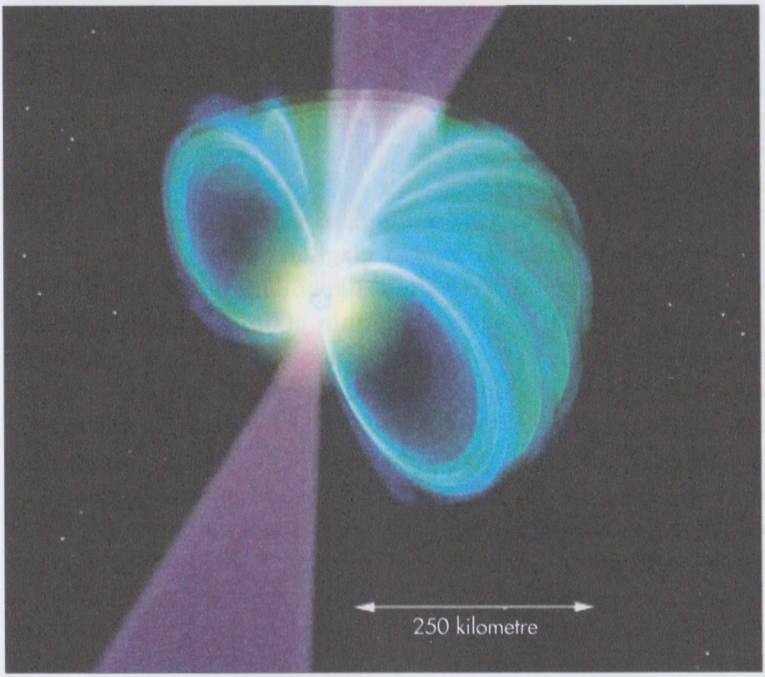
Dünyanın da iki manyetik kutbu vardır; kuzey ve güney. Manyetik kuvvet çizgileri güney manyetik kutbundan ayrılır, dünya çevresinde döner ve kuzey manyetik kutbuna iner (Şekil 2.8). Bu kuvvet çizgileri demir tozlarını tuttukları gibi bir pusula iğnesini de tutabilir ve iğneyi mümkün olduğu ölçüde kuvvet çizgilerini gösterecek şekilde hareket ettirir. Pusulalar böyle çalışır.



Şekil 2.8: Dünyanın manyetik kuvvet çizgileri



Şekil 2.9: Norveç'teki Hammerfest kentinin gökyüzünde Kuzey Işıkları



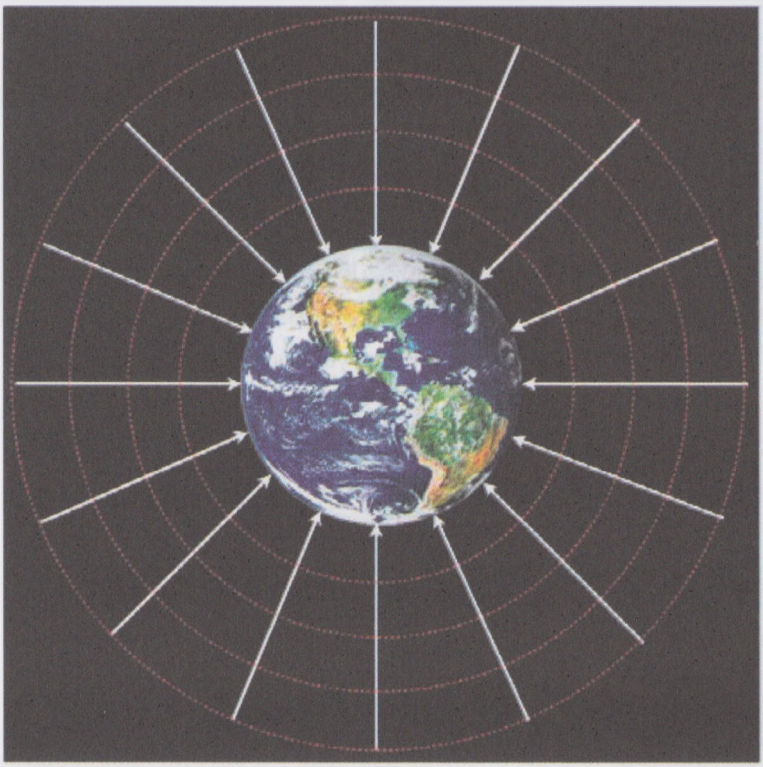
Şekil 2.10: Halka şeklindeki manyetik alanı ve püskürmeleriyle bir sanatçının nötron yıldızı yorumu.

Dünyanın manyetik kuvvet çizgileri Aurora Borealis sayesinde görülmektedir (Kuzey Işıkları; Şekil 2.9). Güneşten dışarı doğru uçan protonlar kuvvet çizgilerince yakalanır ve onlarla birlikte dünyanın atmosferine girerler. Burada protonlar oksijen ve azot molekülleriyle çarpışarak oksijen ve azotun parlak ışık yaymasını sağlar. Bu parlak ışık Aurora'dır.

Nötron yıldızları, kuvvet çizgileri dünyanınkiler gibi halka şeklinde olan çok güçlü manyetik alanlara sahiptir. Nötron yıldızının manyetik alanına kapılmış hızlı hareket eden parçacıklar kuvvet çizgilerine ışık vererek Şekil 2.10'daki mavi halkaları yaratır. Parçacıkların bazıları alanın kutuplarından kurtulup dışarı akar ve şekildeki iki mor püskürmeyi üretir. Bu püskürmeler bütün ışıma türlerinden oluşurlar: Gama ışınları, X ışınları; morötesi, görsel, kızılaltı ve radyo dalgaları. Yıldız döndükçe ışıklı püskürmeleri nötron yıldızının üstündeki gökyüzünde bir ışıldak gibi salınır. Dünyadan her püskürme geçişinde astronomlar bir ışıma titreşimi görürler, bu yüzden bu cisimlere "pulsarlar" adını vermişlerdir.

Evren manyetik alanlar dışında başka tür alanlar (kuvvet çizgileri toplamı) da içerir. Bunlardan birine örnek olarak elektrik alanlarını (örneğin elektrik akımının kablolardan akmasını sağlayan elektrik kuvveti çizgileri toplamını) verebiliriz. Başka bir örnek kütleçekim alanlarıdır (örneğin bizi dünyanın yüzeyine çeken kütleçekim kuvveti çizgilerinin toplamı).

Dünyanın kütleçekim kuvvet çizgileri ışınsal olarak dünyanın içine doğru uzanır ve cisimleri kendileriyle birlikte dünyaya doğru çekerler. Kütleçekim kuvvetinin etkinliği kuvvet çizgilerinin yoğunluğuyla (sabit bir alandan geçen çizgilerin sayısıyla) orantılıdır. İç tarafa doğru ilerledikçe kuvvet çizgileri giderek azalan alana sahip kürelerden (Şekil 2.11'de noktalı kırmızı küreler) geçerler, bu yüzden çizgilerin yoğunluğu kürenin alanıyla ters orantılı olmalıdır. Bu dünyanın kütleçekiminin ona yaklaşıldıkça 1/(kırmızı kürelerin alanı) oranında arttığı anlamına gelir. Her bir kürenin alanı dünyanın merkezinden r uzaklığının karesine orantılı olduğu için, dünyanın kütleçekim çekmesinin etkinliği $1/r^2$ oranında artar. Bu Newton'ın kütleçekim için öngördüğü ters kare yasasıdır ve bu temel fizik yasası, Profesör Brand'in *Yıldızlararası*'ndaki tutkusu ve bizim *Yıldızlararası*'nın bilimi hakkında açıklayacağımız sıradaki esastır.



Şekil 2.11: Dünyanın kütleçekim kuvveti çizgileri.

3

EVRENİ YÖNETEN YASALAR

Dünyayı Haritalandırmak ve Fizik Yasalarının Anlamını Çözmek

Fizikçiler on yedinci yüzyıldan bu yana evrenimizi şekillendiren ve yöneten fizik yasalarını keşfetmeye uğraşıyorlar. Bu zamanında dünya coğrafyasını keşfetmeye uğraşan Avrupalı kâşiflerinkine benzer bir çabadır (Şekil 3.1).

Bu çaba sayesinde 1506 yılında Avrasya artık anlaşılır olmaya başlamış ve Güney Amerika'nın titrek ışığı da yavaş yavaş fark edilmeye başlanmıştı. 1570 yılına gelindiğinde Kuzey ve Güney Amerika anlaşılır olmaya başladı ama bu kez Avustralya'dan bir iz yoktu. 1744 yılına geldiğimizde Avustralya'ya odaklanma başladı fakat Antarktika bilinmeyen topraklardı.

Benzer biçimde (Şekil 3.2) 1690 yılında *Newton'ın fizik yasaları* odak noktası olmaya başlamıştı. Kuvvet, kütle ve ivme gibi kavramlar ve bunları birbirine bağlayan $F = ma$ gibi denklemlerle Newton yasaları ayın dünya etrafındaki ve dünyanın güneş etrafındaki hareketini, bir uçağın uçuşunu, bir köprünün inşaatını ve bir çocuğun bilyelerinin çarpışmasını tam ve kesin olarak betimliyordu. 2. Bölümde bizler de bir Newton yasası olan kütleçekimin ters kare yasasıyla karşılaşmıştık.

1915 yılında Einstein ve diğerleri Newton yasalarının çok hızlıların dünyasında (ışık hızına yakın hızlarda hareket eden cisimler), çok büyüklerin dünyasında (bir bütün olarak evrenimiz) ve yoğun kütleçekim dünyasında (örneğin kara delikler) başarısız olduğuna dair sağlam kanıtlar buldular. Bu başarısızlıkları düzeltmek amacıyla Einstein bize fizikte devrim yaratan görelilik yasalarını verdi (Şekil 3.2). Görelilik yasaları bükülmüş zaman ve bükülmüş uzay kavramlarını kullanarak (bir sonraki bölümde bunları açıklayacağım) evrenin genişlemesini, kara delikleri, nötron yasalarını ve solucandeliklerini öngördü ve açıkladı.



1506— Martin Waldseemuller



1570— Abraham Ortelius



1744— Emanuel Bowen

Şekil 3.1: 1506, 1570 ve 1744 yıllarındaki dünya haritaları.

1924 yılına gelindiğinde artık Newton yasalarının çok küçüklerin (moleküller, atomlar ve temel parçacıkların) dünyasında da başarısız olduğu açığa çıkmıştı. Bununla başa çıkmak için Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger ve diğerleri bize *kuantum fizik yasalarını* hediye ettiler (Şekil 3.2). Her şeyin rastgele biçimde en azından birazcık dalgalandığı (26. Bölümde anlatacağım) ve bu dalgalanmaların daha önce ortada olmayan yeni parçacıklar ve ışımalar üretebildiği biçimindeki kavramları kullanarak kuantum yasaları bize lazerleri, nükleer enerjiyi, ışık yayan diyotları ve kimyanın derinlikli biçimde kavranmasını hediye etti.



Şekil 3.2: Evreni yöneten fizik yasaları.

1957 yılına gelindiğinde görelilik yasaları ile kuantum yasalarının esasen bağdaşmaz oldukları açığa çıktı. Kütleçekiminin yoğun *ve* kuantum dalgalanmalarının güçlü olduğu dünyalarda birbirlerinden farklı şeyleri, birbirleriyle bağdaşmayan şeyleri öngörmekteydiler.[1] Evrenimizin Büyük Patlamayla doğuşu (2. Bölüm), Gargantua gibi kara deliklerin içi (26 ve 28. Bölüm) ve zamanda geriye doğru yolculuk (30. Bölüm) bu dünyalara dahildir. Bu dünyalarda bağdaşmaz görelilik ve kuantum yasalarının "ateşli evliliği"[2] yeni *kuantum kütleçekim yasalarına* yol açar (Şekil 3.2).

---

[1] Bu dünyalarda örneğin ışığın enerjisi olağanüstü büyük kuantum dalgalanmalarına sahiptir. Bu dalgalanmalar o kadar büyüktür ki uzayı ve zamanı aşırı derecede ve rastgele bükerler. Dalgalanma bükülmesi Einstein'ın görelilik yasalarının kapsamının ötesindedir ve bükülmenin ışık üzerindeki etkisi ışığın kuantum yasalarının kapsamının ötesindedir.

[2] "Ateşli evlilik" ifadesi şeyleri isimlendirmede müthiş bir yeteneği olan ustam John Wheeler tarafından ortaya atılmıştır. John "kara delik" ve "solucandeliği" sözcüklerini ve "bir kara deliğin saçı yoktur" ifadesini de öneren kişidir; 5 ve 14. Bölüm. Bir keresinde bana tam olarak doğru kelimeyi ya da ifadeyi bulmaya çalışırken sıcak bir banyoda saatlerce uzanıp zihninin havada süzülmesine izin verdiğini söylemişti.

Henüz kuantum kütleçekim yasalarını bilmiyoruz ama yirmi birinci yüzyılda dünyanın en iyi fizikçilerinin sayesinde süper-sicim kuramı dahil olmak üzere bazı inandırıcı ipuçlarına sahibiz (21. Bölüm). Tüm bu sezgilerimize karşın kuantum kütleçekim halen bizim için neredeyse hiç bilinmeyen bir alan durumunda. Bu da heyecanlı bilimkurgulara hareket alanı tanıyor ve Christopher Nolan bu hareket alanını *Yıldızlararası*'nda büyük bir beceriyle kullanıyor; *bkz.* 28–31. bölümler.

Bilimsel Doğrular, Bilimsel Tahminler ve Spekülasyonlar

Yıldızlararası'nın bilimi dört alana da yayılıyor: Newtoncı, görelilik, kuantum ve kuantum kütleçekim. Buna bağlı olarak da buradaki bilimin bir kısmı doğru, bir kısmı bilimsel tahmin ve bir kısmı da spekülasyondan oluşuyor.

Doğru olması için bilimin yerleşiklik kazanmış fizik yasalarına (Newtoncı, görelilikçi ya da kuantum) dayalı olması ve bu yasaları nasıl uygulayacağımız konusunda emin olmamıza yetecek bir gözlem temeline sahip olması gerekir.

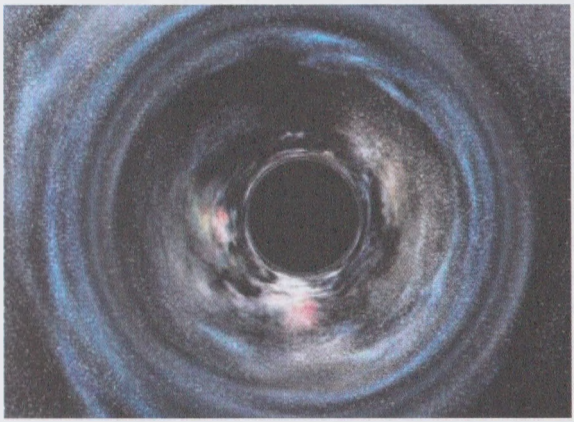
2. Bölümde anlatılan nötron yıldızları ve onların manyetik alanları tam da bu açıdan doğrudurlar. Niçin? Birincisi nötron yıldızlarının kuantum ve görelilik yasaları gereğince var oldukları kesin olarak öngörülmektedir. İkincisi gökbilimciler nötron yıldızlarının pulsar ışımasını (2. Bölümde betimlenen radyo dalgaları, X ışınları ve ışık titreşimleri) en ince ayrıntılarına dek çalışmışlardır. Bu pulsar gözlemleri kuantum ve görelilik yasaları tarafından çok güzel ve kesin biçimde açıklanabilmektedir; tek şart pulsarın dönen bir nötron yıldızı olmasıdır ve aksi yönde herhangi bir açıklama da bulunmuş değildir. Üçüncüsü nötron yıldızlarının süpernovalar adı verilen astronomik patlamalar oluşturdukları kesin şekilde öngörülmektedir ve pulsarların eski süpernovaların kalıntıları olan genişleyen büyük gaz bulutlarının merkezinde oldukları görülmüştür. Bu yüzden biz astrofizikçiler kuşkusuz eminiz; nötron yıldızları gerçekten var ve gözlemlenen pulsar ışımasını gerçekten üretiyorlar.

Doğrulara bir başka örnek Gargantua kara deliği ve yıldızların görüntülerini çarpıtmasını sağlayan ışık ışınlarının bükülmesidir

(Şekil 3.3). Bu durum eğlence parkındaki aynalarda olduğu gibi kavisli bir lens ya da ayna tarafından görüntünün bozulmasına benzediği için fizikçiler bu biçim bozulmasına "kütleçekimsel merceklenme" diyorlar.

Einstein'ın görelilik yasaları, kara deliklerin kütleçekimsel merceklenmeleri dahil yüzeylerinden dışarıya doğru olan bütün özelliklerini kesin biçimde öngörmektedir[3]. Gökbilimciler Gargantua gibi devasa büyüklüktekiler dahil olmak üzere kara deliklerin evrenimizde var olduklarının kesin gözlemsel kanıtlarına sahiptirler. Gökbilimciler henüz kara deliklerinkini olmasa da başka cisimlerin yarattığı kütleçekimsel merceklenmeyi gözlemişlerdir ve gözlemlenen merceklenme Einstein'ın görelilik yasalarıyla kesin bir uyum içerisindedir. Bu benim için yeterlidir. Gargantua'nın kütleçekimsel merceklenmesi, Paul Franklin'in Double Negative ekibinin benim verdiğim görelilik denklemlerini kullanarak simüle ettikleri biçimiyle doğrudur. Gerçekte de görünümü böyle olacaktır.

Öte yandan *Yıldızlararası*'nda dünyadaki insan yaşamını tehdit eden küf (Şekil 3.4 ve 11. Bölüm) bir anlamda bilimsel bir tahmin, bir anlamda da spekülasyondur. Açıklayalım.



Şekil 3.3: Gargantua'nın gölgesinde göründüğü şekliyle Gargantua'nın galaksisindeki yıldızlar. Gargantua her bir yıldızdan gelen ışık ışınlarını büker ve bu şekilde galaksisinin görünümünü aşırı derecede bozar: Galaksi "kütleçekimsel merceklenir." [*Double Negative ekibinin bu kitap için yaptığı bir simülasyondan*]

[3] 5, 6 ve 8. Bölüm.



Şekil 3.4: Küflenmiş mısır yakılıyor. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

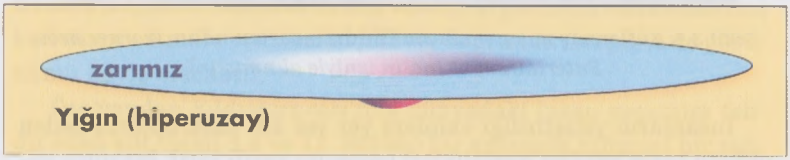
İnsanların yetiştirdiği ekinlere yer yer küf (mikropların neden olduğu hızla yayılan hastalıklar) bulaştığı yazılı tarih boyunca görülmüştür. Bu küflerin temelinde yatan biyoloji kimyaya, kimya da kuantum yasalarına dayanır. Bilim insanları henüz kuantum yasalarından ilgili *bütün* kimyanın nasıl çıkarsanacağını bilmiyorlar (fakat *çoğunu* çıkarsayabiliyorlar); keza kimyadan ilgili bütün biyolojinin nasıl çıkarsanacağını da henüz bilmiyorlar. Yine de biyologlar küfler üzerine yapılmış gözlem ve deneylerden çok şeyler öğrenmiş durumdalar. İnsanların bugüne kadar rastladığı küfler bir bitki türünden diğerine insan yaşamını tehlikeye düşürecek kadar büyük bir hızla bulaşmış değil. Fakat bilgilerimiz dahilinde bunun olmayacağının garantisine de sahip değiliz. Bu tarz bir küfün mümkün olması *bilimsel bir tahmindir*. Günün birinde gerçekleşmesiyse çoğu biyoloğun muhtemel görmediği bir *spekülasyondur*.

Yıldızlararası'nda gerçekleşen kütleçekim sapmaları (24 ve 25. Bölüm), örneğin Cooper'ın havaya attığı paranın birdenbire yere yapışması *spekülasyondur*. Dünyadan kolonilerin havalandırılması için sapmaların kullanılması da (31. Bölüm) spekülasyondan ibarettir.

Deneysel fizikçiler kütleçekim ölçümleri yaparken sapmaların (Newton ve görelilik yasalarıyla açıklanamayacak aykırı dav-

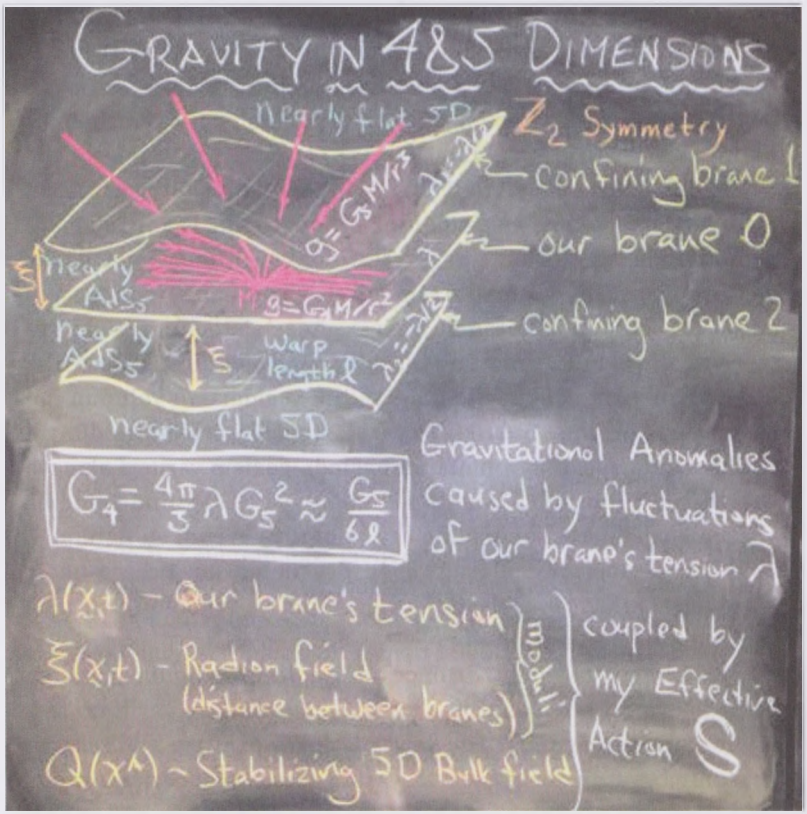
ranışların) varlığını tespit etmek için çok uğraşmış olsalar da, ikna edici herhangi bir kütleçekim sapması dünya üzerinde hiç görülmemiştir.

Fakat kuantum kütleçekimini anlama arayışımızda elde edilen bulgulara göre evrenimizin fizikçilerin "yığın" [bulk] adını verdikleri daha yüksek boyutlu bir "hiperuzay" içerisinde yer alan bir membran olması (fizikçiler buna "zar" [brane] adını veriyor) olası görünüyor; bu konuda *bkz.* Şekil 3.5 ve 4 ve 21. Bölüm. Fizikçiler, Profesör Brand'in ofisinde yaptığı gibi, Einstein'ın görelilik yasalarını bu yığın içerisine taşıdıklarında (Şekil 3.6) kütleçekim sapmalarının, diğer bir deyişle yığının içerisinde yer alan fiziksel alanların tetiklediği aykırılıkların mümkün olabileceğini keşfederler.



Şekil 3.5: Evrenimiz güneşin çevresinde üç boyutlu bir yığının içerisinde yer alan iki boyutlu bir yüzey olarak resmedilmiş. Gerçekte zarımız üç, yığın ise dört uzay boyutuna sahiptir. Bu şekil 4. Bölümde daha ayrıntılı olarak açıklanıyor; özellikle *bkz.* Şekil 4.4.

Yığının gerçekten var olduğuna hiç emin değiliz. Yığın varsa orada Einstein'ın yasalarının hüküm süreceği de sadece bilimsel bir tahmin. Yığının eğer varsa, kütleçekim sapmaları yaratabilecek alanlar içerip içermediği, eğer içeriyorsa bu sapmaların kullanılabilir olup olmadığı konusunda da hiçbir fikrimiz yok. Sapmaların varlığı ve bunlardan yararlanılabilmesi görece daha uç nitelikte spekülasyonlar. Fakat bunlar özellikle gecenin geç vaktinde birkaç birayı devirdikten sonra benim ve kimi fizikçi dostlarımın dalgasını geçmekten hoşlandığımız ifadeyle bilime dayalı spekülasyonlardır. Bu yüzden benim *Yıldızlararası* için savunduğum temel ilkelerle çelişmezler: "...spekülasyonlar gerçek bilimden, en azından kimi 'saygıdeğer' bilimcilerin olası gördüğü fikirlerden kaynağını alacak" (1. Bölüm).



Şekil 3.6: Profesör Brand'in tahtasındaki görelilik denklemleri kütleçekim sapmalarının olası temellerini betimliyorlar. Ayrıntılar için *bkz.* 25. Bölüm.

Bu kitap boyunca Yıldızlararası'nın bilimini ele alırken bu bilimin statüsünü açıklayacağım (doğru, bilimsel tahmin ya da spekülasyon) ve kısım ya da bölümlerin başında şu uyarı işaretlerini kullanacağım:

- (D) doğru
- (BT) bilimsel tahmin
- (S) spekülasyon

Elbette bir fikrin statüsü (gerçek, bilimsel tahmin ya da spekülasyon) değişebilir ve filmde ve bu kitapta yer yer bu tarz değişiklikler göreceksiniz. Cooper açısından yığın bilimsel bir tahmindir

ama teseraktın içine girdiğinde doğru ya da gerçek halini alır (29. Bölüm); kuantum kütleçekim yasaları bir spekülasyondur ancak bu durum TARS bu yasaları bir kara deliğin içerisinden alıncaya dek geçerlidir, ardından Cooper ve Murph için doğru ya da gerçek halini alırlar (28 ve 30. Bölüm).

On dokuzuncu yüzyıl fizikçileri için Newton'ın kütleçekim için tespit ettiği ters kare yasası mutlak bir doğruydu. Fakat 1890'lara gelindiğinde Merkür'ün güneş etrafındaki yörüngesinde gözlenen çok küçük bir sapma tarafından devrimci bir tarzda alaşağı edildi (24. Bölüm). Newton'un yasası güneş sistemimizde doğruya çok çok yakındır ama tam olarak doğru değildir. Bu aykırılık Einstein'ın yirminci yüzyıldaki görelilik yasalarının yolunun döşenmesine yardımcı oldu ki bu yasalar güçlü kütleçekim dünyasında yoluna spekülasyon olarak başladı, gözlem verileri akmaya başladıkça bilimsel bir tahmin halini aldı ve 1980 yılında giderek gelişen gözlemlerin sonucunda artık doğruya evrildi (4. Bölüm).

Bilimsel doğruları alaşağı eden devrimler son derece nadir görülürler. Fakat gerçekleştiklerinde bilim ve teknoloji üzerinde yoğun etkide bulunurlar.

Siz de kendi yaşamınızda önce bilgiye dayalı tahmin, ardından da doğru ya da gerçek halini alan spekülasyonların varlığını tespit edebiliyor musunuz? Hiç yerleşik doğrularınızın yıkılmasına ve bunun hayatınızda bir devrim yaratmasına şahit olmadınız mı?

4

BÜKÜLMÜŞ ZAMAN VE UZAY, GELGİTLİ KÜTLEÇEKİM

Ⓓ

Einstein'ın Zaman Bükülmeleri Yasası

Einstein 1907 yılından itibaren ara ara kütleçekimini anlama çalışmalarına yoğunlaştı. En sonunda 1912'de göz kamaştırıcı bir fikir yakaladı. Zamanın ağır cisimlerin (dünya ya da bir kara delik gibi) kütleleri tarafından bükülmüş olması gerektiğinin ve kütleçekimin de bu bükülme nedeniyle gerçekleştiğinin farkına vardı. Bu sezgisini benim "Einstein'ın zaman bükülmeleri yasası" demekten hoşlandığım kesin ve net bir matematik formülüyle anlattı[1]. Bunu sözel olarak şöyle ifade edebiliriz: *Her şey en yavaş yaşlanacağı yerde yaşamaktan hoşlanır ve onu oraya kütleçekim çeker.*

Zamanın yavaşlaması ne kadar büyükse, kütleçekimin etkisi o kadar güçlüdür. Zamanın günde sadece birkaç mikro saniye yavaşlatıldığı dünya üzerinde kütleçekimin etkisi zayıftır. Zamanın günde birkaç saat yavaşlatıldığı bir nötron yıldızının üzerinde kütleçekim kuvveti muazzamdır. Bir kara deliğin yüzeyinde zaman durma noktasına gelecek şekilde yavaşlar, bu yüzden kütleçekim etkisi o kadar müthiştir ki ondan hiçbir şey, ışık bile kaçamaz.

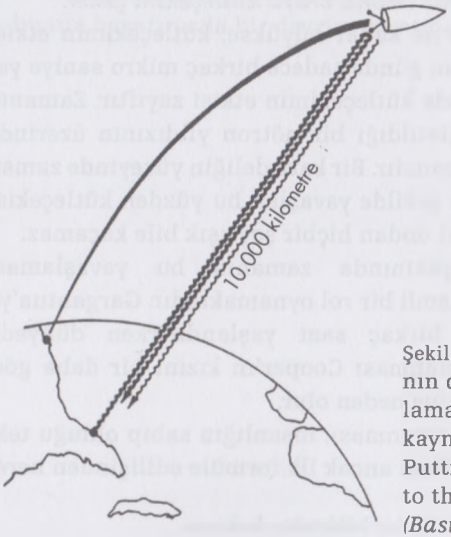
Bir kara deliğin yakınında zamanın bu yavaşlaması *Yıldızlararası*'nda çok önemli bir rol oynamaktadır. Gargantua'ya yolculuğu onu sadece birkaç saat yaşlandırırken dünyada Murph'ün seksen yıl yaşlanması Cooper'ın kızını bir daha görmekten umudunu kesmesine neden olur.

Einstein'ın yasasının sınanması, insanlığın sahip olduğu teknolojinin zayıflığından dolayı ancak ilk formüle edilişinden nere-

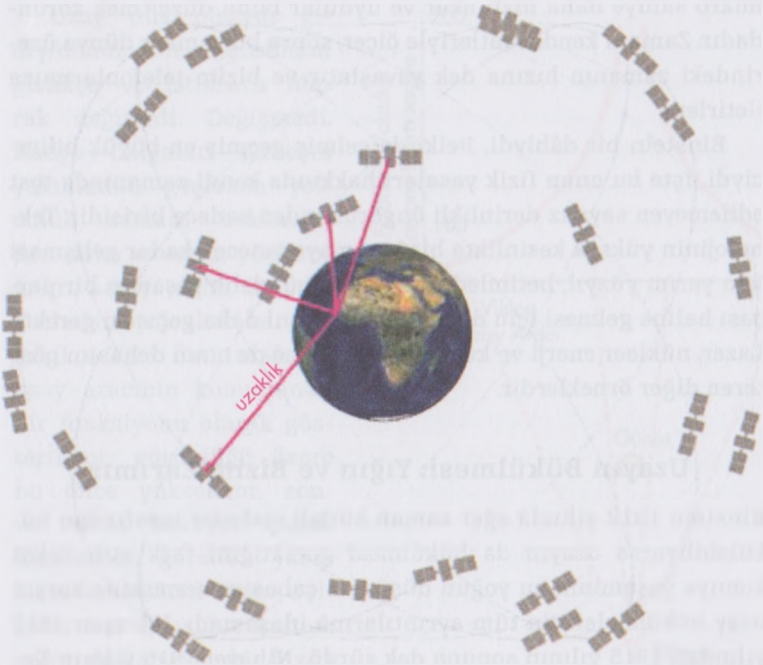
[1] Kitabın sonundaki *Teknik Notlar* bölümüne bakınız.

deyse yarım yüzyıl sonra olanaklı oldu. İlk iyi test 1959 yılında Bob Pound ve Glen Rebca'nın Harvard Üniversitesindeki 22,5 metrelik bir kulenin bodrum katındaki zaman ile kulenin çatı katındaki zamanın akış hızını karşılaştırmak için Mössbauer etkisi adı verilen yeni bir teknik kullanmalarıyla gerçekleşti. Deneyleri son derece zarif bir hassasiyete sahipti: Bir günde 0,0000000000016 saniyelik (bir saniyenin 1,6 trilyonda biri) farkları saptayacak kadar iyiydi. Ulaştıkları çarpıcı sonuç bu hassasiyetin 130 katı bir farktı ve Einstein'ın yasasıyla müthiş bir uyum içerisindeydi: Zaman bodrum katında çatı katına oranla her gün bir saniyenin 210 trilyonda biri kadar daha yavaş akıyordu.

Harvard'dan Robert Vessot'nun 1976 yılında bir NASA roketinin üzerine yerleştirdiği atom saatini 10.000 kilometre yüksekliğe çıkartması ve saatin çalışma hızını yer üstündeki saatlerle karşılaştırmasıyla birlikte, ulaşılan kesinlik daha da arttı (Şekil 4.1). Vessot yerin üzerinde zamanın 10.000 kilometre yüksekliktekinden bir günde yaklaşık 30 mikro saniye (0,00003 saniye) daha yavaş aktığını buldu ve ölçümü Einstein'ın zaman bükülmeleri yasasıyla deneysel kesinlik sınırları içerisinde uyumlu çıktı. Bu kesinlik (Vessot'nun ölçümündeki belirsizlik) yüz binde yediydi: Bir günde 30 mikro saniyenin 0,00007'siydi.



Şekil 4.1: Atom saatleri zamanın dünya üzerindeki yavaşlamasını ölçüyor. [Alınan kaynak: Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test, *Clifford M. Will (Basic Books, 1993)*.]



Şekil 4.2: Küresel konumlama sistemi.

Akıllı telefonlarımızın nerede olduğumuzu 10 metrelik kesinlikle söylemesini sağlayan küresel konumlama sistemi (GPS) 20.000 kilometre yükseklikteki 27 uydunun yolladığı radyo dalgalarına dayanmaktadır (Şekil 4.2). Dünyada herhangi bir yerden görülebilen uyduların sayısıysa genellikle sadece dört ile on iki arasında değişir. Görülebilen uydulardan gelen her radyo sinyali akıllı telefona uydunun konumunu ve sinyalin gönderildiği zamanı söyler. Akıllı telefon sinyalin varış zamanını ölçer ve bunu gönderilme zamanıyla karşılaştırarak sinyalin ne kadar yol aldığını, uydu ile telefon arasındaki uzaklığı öğrenir. Birkaç uydudan elde edilen uzaklık ve konumları bilmesiyle akıllı telefon kendi yerini öğrenmek için üçgenleme yapabilir.

Sinyal gönderim zamanları, uydunun üzerinde ölçülen gerçek zamanlar olsaydı bu düzenleme başarısız olurdu. 20.000 kilometre yükseklikteki zaman dünya üzerindeki zamandan günde kırk

mikro saniye daha hızlı akar ve uydular bunu düzeltmek zorundadır. Zamanı kendi saatleriyle ölçer, sonra bu zamanı dünya üzerindeki zamanın hızına dek yavaşlatır ve bizim telefonlarımıza iletirler.

Einstein bir dâhiydi. Belki de gelmiş geçmiş en büyük bilimciydi. İşte bu onun fizik yasaları hakkında kendi zamanında test edilemeyen sayısız derinlikli öngörüsünden sadece birisidir. Teknolojinin yüksek kesinlikte bir sınamaya yetecek kadar gelişmesi için yarım yüzyıl, betimlediği olgunun gündelik yaşamın bir parçası haline gelmesi için de bir yarım yüzyıl daha geçmesi gerekti. Lazer, nükleer enerji ve kuantum şifreleme de onun dehasını gösteren diğer örneklerdir.

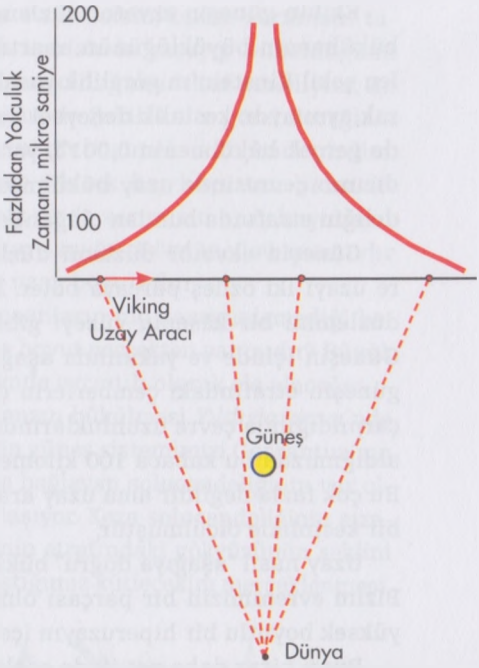
Uzayın Bükülmesi: Yığın ve Bizim Zarımız

Einstein 1912 yılında eğer zaman kütleli cisimler tarafından bükülebiliyorsa uzayın da bükülmesi gerektiğini fark etti. Fakat konuya yaşamının en yoğun düşünsel çabasını vermesine karşın uzay bükülmelerinin tüm ayrıntılarına ulaşamadı. Uğraşısı 1912 yılından 1915 yılının sonuna dek sürdü. Nihayet 1915 yılının Kasım ayında büyük bir Eureka anında uzay bükülmeleri dahil bütün görelilik yasalarını kapsayan "genel göreliliğin alan denklemini" formüle etti.

İnsan teknolojisi bir kez daha yüksek kesinlikte testler için yetersizdi[2]. Bu kez birkaç ana deneyle sonuçlanacak olan ihtiyaç duyulan ilerleme için altmış yıl geçmesi gerekti. İçlerinden en beğendiğim Harvard'dan Robert Reasenberg ve Irwin Shapiro'nun yürüttüğü deneydi. 1976-1977 yıllarında Mars'ın yörüngesindeki iki uzay aracına radyo sinyalleri gönderdiler. *Viking 1* ve *Viking 2* adlı uzay araçları sinyalleri güçlendirdiler ve gidiş-dönüş yolculuk zamanının ölçülmesi için tekrar dünyaya yolladılar. Dünya ve Mars güneş etrafındaki yörüngelerinde hareket ettikleri için radyo sinyalleri değişim gösteren yollar izledi. Başlangıçta izlenen yollar güneşten uzaktı, ardından güneşin yakınından ve sonra Şekil 4.3'ün alt yarısında gösterildiği üzere yine uzağından geçtiler.

[2] Yine de 24. Bölümün ilk kısmına bakınız.

Uzay düz olsaydı gidiş-dönüş yolculuk zamanı gittikçe ve istikrarlı olarak değişirdi. Değişmedi. Radyo dalgaları güneşin yakınından geçerken yolculuk zamanı beklenenden daha uzundu, yüzlerce mikro saniye daha uzundu. Fazladan yolculuk zamanı Şekil 4.3'ün üst tarafında uzay aracının konumunun bir fonksiyonu olarak gösteriliyor; görüldüğü üzere bu önce yükseliyor, sonra tekrar azalıyor. Şimdi Einstein'ın görelilik yasalarından birinin radyo dalgalarının ve ışığın mutlak sabit, değişmeyen bir hızda yolculuk ettiğini söylediğini hatırlatalım[3]. Bu yüzden dünyadan uzay aracına olan uzaklık güneşin yakınından geçerken beklendiğinden daha uzun olmalıydı: Yüzlerce mikro saniye çarpı ışık hızı kadar daha uzun ki bu yaklaşık 50 kilometre ediyordu.



Şekil 4.3: Dünyadan gelen radyo sinyallerinin önce Viking'e oradan tekrar dünyaya yolculuk zamanı.

Bu daha uzun olma durumu, uzay bir kâğıt parçası gibi düz olsa olanaksız olurdu. Bunu güneşin uzayı bükmesi yaratıyordu. Reasenberg ve Shapiro bu fazladan zaman gecikmesinden ve bunun uzay aracı dünyaya göreli olarak hareket ettiğinde nasıl değiştiğinden hareketle uzay bükülmesinin şekline ulaştılar. Daha doğru ifade edersek *Viking* radyo sinyallerinin izlediği yolların oluşturduğu iki boyutlu yüzeyin şeklini ortaya çıkardılar. Bu yüzey güneşin ekvator düzlemine çok yakındı, bu yüzden onu burada bu şekilde betimleyeceğim.

[3] Bu değişmeme, "plazma düzeltmeleri" denilen ve gezegenler arası uzaydaki elektronlarla etkileşim yüzünden az bir miktar yavaşlama düzeltmesi yapıldıktan sonra geçerlidir.

Ekibin güneşin ekvator düzlemi için ölçtüğü şekil Şekil 4.4'te bükülmenin büyüklüğünün abartılmış haliyle gösteriliyor. Ölçülen şekil Einstein'ın görelilik yasalarının öngördüğünün tam olarak aynısıydı; kesinlik deneysel hata sınırları içerisindeydi ki bu da gerçek bükülmenin 0,001'i, yani binde biriydi. Bir nötron yıldızının çevresinde uzay bükülmesi çok daha büyüktür. Bir kara deliğin etrafında bundan olağanüstü derecede daha büyüktür.

Güneşin ekvator düzlemi düzlemin üstü ve altı olmak üzere uzayı iki özdeş parçaya böler. Buna rağmen Şekil 4.4 ekvator düzlemini bir kâsenin yüzeyi gibi bükülmüş şekilde gösteriyor. Güneşin içinde ve yakınında aşağıya doğru bükülür, dolayısıyla güneşin etrafındaki çemberlerin çapları π sayısıyla (3,14159...) çarpıldığında çevre uzunluklarından daha büyük olur; güneşi ele aldığımızda bu kabaca 100 kilometrelik bir fazladan uzunluktur. Bu çok fazla değildir ama uzay aracı tarafından rahatlıkla, binde bir kesinlikle ölçülmüştür.

Uzay nasıl "aşağıya doğru" bükülebilir? *Neyin* içinde bükülür? Bizim evrenimizin bir parçası olmayan, "yığın" adı verilen daha yüksek boyutlu bir hiperuzayın içerisinde bükülür!

Bunu biraz daha net ifade edelim. Şekil 4.4'te güneşin ekvator düzlemi üç boyutlu bir yığının içine doğru bükülen iki boyutlu bir yüzeydir. Bu biz fizikçilerin evreni düşünme biçimimizi etkileyen bir olgudur. Evrenimiz üç uzay boyutuna sahiptir (doğu-batı, kuzey-güney, yukarı-aşağı) ve biz onu kısa yoldan daha yüksek boyutlu bir *yığının* içerisinde bükülmüş üç boyutlu bir membran ya da *zar* olarak düşünürüz. Yığın kaç boyuta sahiptir? Bunu 21. Bölümde ayrıntılı biçimde ele alacağım ama *Yıldızlararası* içerisinde yığın fazladan sadece bir uzay boyutuna sahiptir: Toplam dört boyutludur.



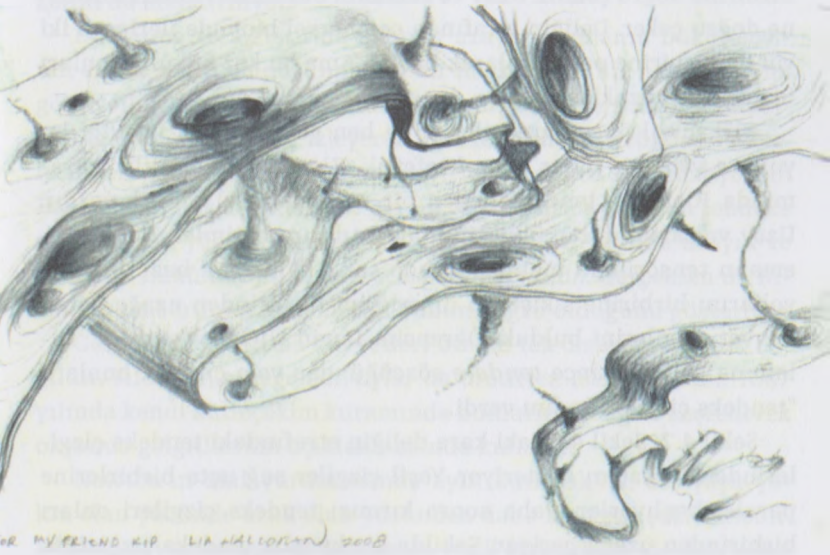
Şekil 4.4: *Viking* radyo sinyallerinin güneşin ekvator düzlemi içerisinden izlediği yollar.

İnsanların bizim üç boyutlu evrenimizin, bizim zarımızın tamamının dört boyutlu bir yığın içerisinde yaşayıp büküldüğünü kafasında canlandırmasının çok zor olduğunu itiraf etmeliyim. Bu yüzden kitap boyunca bir örneğini de Şekil 4.4'te görebileceğiniz üzere zarımız ve yığının resimlerini bir boyut eksik biçimde çizdim.

Yıldızlararası'nda karakterler sık sık *beş* boyuttan bahsediyorlar. Üçü bizim kendi evrenimiz ya da zarımızın uzay boyutlarıdır (doğu-batı, kuzey-güney, yukarı-aşağı). Dördüncüsü zamandır ve beşincisi de yığının fazladan uzay boyutudur.

Yığın gerçekten var mıdır? İnsanların hiç deneyimlemediği beşinci bir, hatta belki de daha fazla boyut gerçekten var mıdır? Büyük bir olasılıkla evet. Bunu 21. Bölümde ayrıntılı olarak ele alacağız.

Uzayın bükülmesi (bizim zarımızın bükülmesi *Yıldızlararası*'nda çok önemli bir rol oynuyor. Örneğin güneş sistemimizi Gargantua'nın yer aldığı evrenin uzak köşelerine bağlayan solucandeliğinin var olması açısından hayati bir önem taşıyor. Keza solucandeliğinin etrafındaki ve Gargantua kara deliğinin etrafındaki gökyüzünün şeklini bozuyor; bu da Şekil 3.3'te karşılaştığımız kütleçekim merceklenmesi.



Şekil 4.5: Bizim zarımızdan çıkıp yığının içine doğru uzanan ve içinden geçen kara delikler ve solucandelikleri. Hem bizim zarımızdan hem de yığından bir uzay boyutu eksiltilmiştir. [*Çizim sanatçı Lia Halloran'a ait.*]

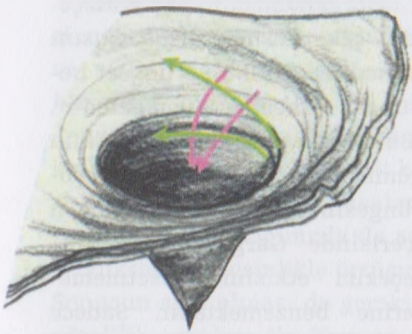
Şekil 4.5 uzay bükülmelerinin uç bir örneğidir. Sanatçı dostum Lia Halloran'ın yaptığı bu fantastik çizim evrenimizin bizim zarımızdan çıkıp yığının içerisine doğru uzanan ve giren çok sayıda solucandeliğine (14. Bölüm) ve kara deliğe (5. Bölüm) sahip varsayımsal bir bölgesini resmediyor. Kara delikler "tekillikler" denen keskin noktalarda sonlanıyor. Solucandelikleri zarımızın bir bölgesini bir diğer bölgesine bağlıyor. Adet olduğu üzere bizim zarımızın üç boyutundan birini kaldırıyorum, böylece zar iki boyutlu bir yüzey gibi görünüyor.

Gelgitli Kütleçekim

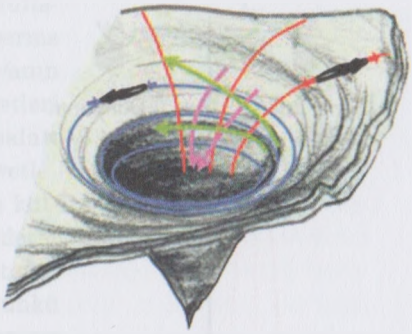
Einstein'ın görelilik yasaları gezegenlerin, yıldızların ve güçsüz kalan uzay araçlarının bir kara deliğin yakınındayken deliğin bükülmüş uzay ve zamanının izin verdiği en düz yolları izleyerek hareket edeceklerini söyler. Şekil 4.6 bu tür dört yol örneğini göstermektedir. Kara deliğin içine doğru giden iki eflatun yol birbirine paralel olarak başlar. Her bir yol düz kalmaya çalışırken iki yol birbirine doğru çekilir. Uzay ve zamanın bükülmesi onları birbirine doğru çeker. Deliğin etrafında çembersel biçimde ilerleyen iki yol da birbirine paralel olarak başlar. Ama bu kez bükülme onları birbirinden uzaklaştırır.

Birkaç yıl önce öğrencilerim ve ben gezegenlerin izlediği bu yollara yeni bir bakış açısı keşfettik. Einstein'ın görelilik kuramında Riemann tensörü denen bir matematiksel nicelik vardır. Uzay ve zamanın bükülmesinin ayrıntılarını betimler. Biz bu Riemann tensörünün matematiğinde saklı kalmış ve bazı gezegen yollarını birbirine sıkıştırıp diğerlerini birbirinden uzağa geren kuvvet çizgilerini bulduk. Öğrencim David Nichols "germek" anlamına gelen Latince *tendere* sözcüğünden yola çıkarak bunlara "tendeks çizgileri" adını verdi.

Şekil 4.7, Şekil 4.6'daki kara deliğin etrafındaki tendeks çizgilerinden birkaçını gösteriyor. Yeşil çizgiler sağ uçta birbirlerine paralel başlıyorlar, daha sonra kırmızı tendeks çizgileri onları birbirinden uzağa geriyor. Şekilde bir kırmızı tendeks çizgisinin üzerine uzanmış bir kadın çizdim. O da geriliyor; başı ile ayakları arasında kırmızı tendeks çizgisi tarafından uygulanan bir germe kuvveti hissediyor.



Şekil 4.6: Bir kara deliğin yakınında gezegenlerin hareketinin izleyeceği dört yol. Deliğin resmi Lia Halloran'ın Şekil 4.5'teki çiziminden alınmıştır.



Şekil 4.7: Bir kara deliğin etrafındaki tendeks çizgileri. Deliğin resmi Lia Halloran'ın Şekil 4.5'teki çiziminden alınmıştır.

Eflatun renkli yollar üst taraflarda birbirlerine paralel olmaya başlıyorlar. Ardından mavi tendeks çizgileriyle birbirlerine doğru sıkıştırılıyorlar ve bedeni mavi tendeks çizgisinin üzerinde olan kadın da sıkıştırılıyor.

Bu germe ve sıkıştırma aslında uzay ve zamanın bükülmesinin etkisi üzerinde düşünmenin bir başka yolu. Bir bakış açısına göre yollar, gezegen yollarının bükülmüş uzay ve zamanda mümkün olan en düz rotayı izleyerek hareket etmesi yüzünden birbirlerinden uzağa geriliyor ya da birbirlerine doğru sıkıştırılıyorlar. Başka bir bakış açısına göre germe ve sıkıştırmayı yapan tendeks çizgileri. Bu yüzden tendeks çizgileri derin bir şekilde uzayın ve zamanın bükülmesini temsil etmek durumunda. Gerçekten de Riemann tensörünün matematiği bunun doğru olduğunu gösteriyor.

Germe ve sıkıştırma kuvvetleri üreten tek cisim kara delik değildir. Yıldızlar, gezegenler, aylar da üretirler. Isaac Newton 1687 yılında kendi kütleçekim kuramında bunların varlığını keşfederek okyanus gelgitlerinin açıklanmasında kullandı.

Newton'ın akıl yürütmesinde ayın kütleçekimi, dünyaya yakın olan yüzünde uzak olan yüzünden daha kuvvetli çekmektedir. Dünyanın yanlarında da çekmenin yönü biraz daha içe doğrudur, çünkü dünyanın iki yanında çok az daha farklı yönde, ayın merkezi doğrultusundadır. Ayın kütleçekimi konusundaki bu alışılmış bakış açısı Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Newton'ın dünyanın okyanuslarındaki gelgitler konusundaki açıklaması.

Öte yandan dünya bu kütleçekim çekmelerinin *ortalamasını hissetmez*, çünkü yörüngesi boyunca serbestçe düşmektedir[4]. (Bu *Endurance* mürettebatının gemi kara deliğin üzerindeki yörüngesindeyken *Endurance*'ın içerisinde Gargantua'nın kütleçekim etkisini hissetmemelerine benzemektedir. Sadece *Endurance*'ın dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvvetleri hissederler.) Dünyanın *hissettiği* Şekil 4.8'in sol yarısındaki kırmızı oklarla gösterilen ortalamaları çıkartılmış ay çekimidir; diğer bir deyişle aya doğru ve aydan uzağa doğru bir gerilme ve yan taraflardan bir sıkıştırma hissedilir (Şekil 4.8'in sağ yarısı). Kara deliğin etrafında da niteliksel olarak aynı şey yaşanır (Şekil 4.7).

Hissedilen bu kuvvetler okyanusu aya bakan ve aydan uzaktaki yüzlerinde dünya yüzeyinden uzağa doğru gerer ve buralarda deniz seviyesinde yükselme yaratır. Yine hissedilen kuvvetler okyanusları dünyanın yan taraflarında dünya yüzeyine doğru sıkıştırır ve buralarda da deniz seviyesinde alçalma yaratır. Dünya kendi ekseni etrafında tam bir dönüş (her yirmi dört saatte bir olmak üzere) döndükçe, okyanus seviyesinde iki yükselme ve iki alçalma görürüz. Newton'ın okyanus dalgalarına açıklaması buydu; sadece küçük bir pürüz vardı: Güneşin gelgitli kütleçekimi de gelgitlere etki etmekteydi. Onun germe ve sıkıştırması da ayın germe ve sıkıştırmasına eklenir.

[4] Einstein 1907'de kendisinin de düşüyor olsa, örneğin evinin çatısından düşerken kütleçekimini hissetmeyeceğinin farkına vardı. Buna "hayatımın en mutlu düşüncesi" adını verdi, çünkü bu onun kütleçekimini anlama çalışmalarına başlamasına vesile oldu ve bu arayış onu bükülmüş zaman ve uzay kavramlarına ve bükülmeyi yöneten yasalara götürdü.

Okyanus gelgitlerindeki rolleri nedeniyle bu kütleçekimsel germe ve sıkıştırma kuvvetlerine (dünyanın *hissettiği* kuvvetler) gelgit kuvvetleri dendi. Newton'ın kütleçekim yasaları kullanılarak ölçülen bu gelgit kuvvetleri, Einstein'ın görelilik yasalarını kullanarak hesapladığımızla da son derece yüksek bir kesinlikle örtüşmektedir. Sonucun aynı olması da gerekir, çünkü görelilik yasaları ile Newton yasaları kütleçekim zayıf olduğunda ve cisimler ışıktan çok daha yavaş hızlarda hareket ettiklerinde her zaman aynı öngörülere sahiptirler.

Aydan kaynaklanan gelgitlerin göreliliğe göre betimlemesinde (Şekil 4.9) gelgit kuvvetleri, dünyanın yan taraflarını sıkıştıran mavi tendeks çizgileri ve aya doğru ve aydan uzağa doğru geren kırmızı tendeks çizgileri tarafından yaratılır. Bu tam da bir kara deliğin tendeks çizgileri gibidir (Şekil 4.7). Ayın tendeks çizgileri ayın uzay ve zamanı bükmesinin görsel cisimleşmesidir. Bu kadar küçük bir bükülmenin okyanus gelgitlerine neden olacak kadar büyük kuvvetler yaratabilmesi dikkate değer!



Şekil 4.9: Gelgitlere görelilikçi bakış açısı: Ayın tendeks çizgileri tarafından üretilirler.

Miller'ın gezegeninde (17. Bölüm) gelgit kuvvetleri müthiş derecede büyüktür ve Cooper ve mürettebatının karşılaştığı dev dalgaların sebebidir.

Şu anda gelgit kuvvetlerine ilişkin üç bakış açısına sahibiz:

- *Newton'ın bakış açısı* (Şekil 4.8): Dünya ayın bütün kütleçekim etkisini hissetmez, onun yerine toplam (dünyada yerine göre değişen) çekme eksi ortalama çekmeyi hisseder.
- *Tendeks bakış açısı* (Şekil 4.9): Ayın tendeks çizgileri dünyanın okyanuslarını gerer ve sıkıştırır; aynı şekilde (Şekil 4.7) bir kara deliğin tendeks çizgileri de kara deliğin etrafındaki gezegen ve yıldızların yolunu gerer ve sıkıştırır.

- *En kısa yol bakış açısı* (Şekil 4.6): Bir kara deliğin etrafındaki yıldız ve gezegenlerin izlediği yollar, deliğin bükülmüş uzay ve zamanı içerisinde mümkün en düz rotalardır.

Aynı olgu hakkında üç farklı bakış açısına sahip olmak son derece değerli olabilir. Bilimciler ve mühendisler hayatlarının çoğunu bulmacaları çözmeye uğraşarak geçirirler. Bu bulmaca bir uzay aracının nasıl tasarımlanacağı olabilir. Ya da kara deliklerin nasıl davrandığını çözmek de olabilir. Bulmaca ne olursa olsun, eğer bir bakış açısı ilerleme sağlamıyorsa başka bir bakış açısı sağlayabilir. Bir bulmacaya önce bir bakış açısından ardından bir başkasından bakmak sık sık yeni fikirleri tetikleyebilmektedir. *Yıldızlararası*'nda Profesör Brand'in kütleçekim sapmalarını anlamaya ve insanlık için kullanmaya çalışırken yaptığı budur. Benim yetişkin hayatımın çoğunu yapmaya ayırdığım da budur.

5

KARA DELİKLER

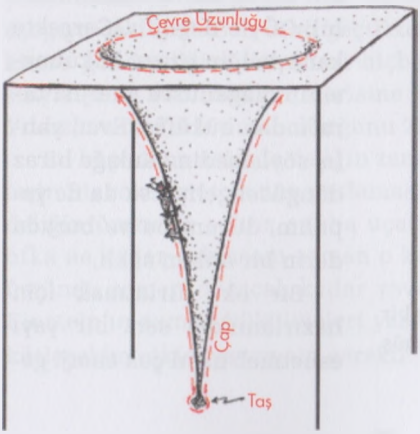
Kara delik Gargantua *Yıldızlararası*'nda çok önemli bir rol oynuyor. Bu bölümde kara delikler hakkındaki temel gerçeklere bakalım, bir sonrakinde de Gargantua'ya odaklanacağız.

Önce acayip bir iddia: *Kara delikler* bükülmüş uzay ve bükülmüş zamandan oluşurlar. Başka hiçbir şey, herhangi bir madde vs yoktur.

Şimdi açıklamaya geçelim.

Trampolin Üzerindeki Karınca: Bir Kara Deliğin Bükülmüş Uzayı

Bir karınca olduğunuzu ve bir çocuğun uzun ayaklar arasında gerilmiş bir lastik tabakasından oluşan trampolin üzerinde yaşadığınızı hayal edelim. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere ağır bir taş, lastiği

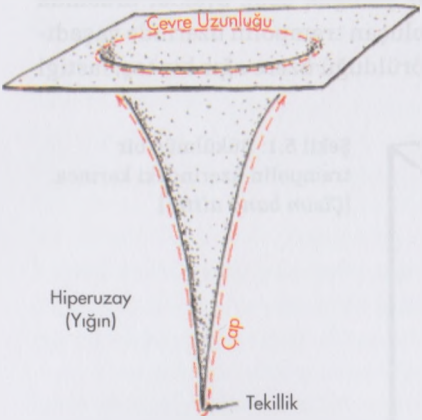


Şekil 5.1: Bükülmüş bir trampolin üzerindeki karınca. [*Çizim bana aittir.*]

aşağıya doğru eğiyor. Kör bir karınca olduğunuz için ne kutupları ne taşı ne de eğilmiş lastik tabakayı görebiliyorsunuz. Ama zeki bir karıncasınız. Lastik tabak sizin bütün evreniniz ve siz onun bükülmüş olduğundan şüpheleniyorsunuz. Şeklini tespit etmek için üst tarafında bir çember çizerek yürüyor ve çevre uzunluğunu ölçüyor, ardından da çemberin merkezinden geçerek bir tarafından diğer tarafına yürüyor ve çapını ölçüyorsunuz. Evreniniz düz olsaydı, çevre uzunluğu $\pi = 3{,}14159...$ sayısı çarpı çaptır. Fakat çevre uzunluğunun çaptan çok daha küçük olduğunu keşfediyorsunuz. Evreninizin yüksek derecede bükülmüş olduğu sonucuna ulaşıyorsunuz!

Dönmeyen bir kara deliğin etrafındaki uzay trampolinle aynı bükülmeye sahiptir: Kara deliğin içerisinden ekvatoryal bir dilim alın. Bu iki boyutlu bir yüzeydir. Yığından görüldüğü şekliyle bu yüzey trampolinle aynı biçimde bükülmüştür. Şekil 5.2 Şekil 5.1'in aynısıdır; sadece karınca ve ayaklar kaldırılmış, taşın yerini de kara deliğin merkezindeki *tekillik* almıştır.

Tekillik, yüzeyin bir nokta oluşturduğu ve bu yüzden "sonsuz bükülmüş" olduğu ve anlaşılan o ki gelgitli kütleçekim kuvvetlerinin sonsuz derecede yeğin olduğu, dolayısıyla germe ve sıkıştırmalardan bildiğimiz maddenin varoluşunu kaybettiği çok küçük bir bölgedir. 26, 28 ve 29. Bölümde Gargantua'nın tekilliğinin bundan biraz daha farklı olduğunu ve bunun nedenlerini göreceğiz.



Sekil 5.2 Yığından görüldüğü biçimiyle bir kara deliğin içi ve çevresindeki bükülmüş uzay. [*Çizim bana aittir.*]

Trampolinde uzayın bükülmesine taşın ağırlığı sebep olur. Benzer biçimde kara deliğin uzayı bükmesine de merkezindeki tekilliğin sebep olduğu düşünülebilir. Öyle değildir. Gerçekte kara deliğin uzayı, bükülmesinin olağanüstü enerjisi tarafından bükülür. Evet, yanlış söylemedim. Kulağa biraz döngüsel geliyorsa da ne yapalım, durum bu ve burada derin bir anlam saklı.

Bir oku fırlatmak için hazırlanırken sert bir yayı esnetmek nasıl çok enerji ge-

rektiren bir şeyse, aynı şekilde uzayı esnetmek, onu bükmek de çok enerji gerektirir. Ve esnetme enerjisinin esneyen yayın içinde birikmesi gibi (ta ki ip bırakılıp yayın enerjisini oka aktarana dek), bükülme enerjisi de kara deliğin bükülmüş uzayı içerisinde toplanır. İşte bir kara delikte bu bükülme enerjisi o kadar büyüktür ki bükülmeyi yaratır.

Bükülme doğrusal olmayan, kendi kendini önyükleyen bir biçimde bükülmeyi doğurur. Bu Einstein'ın görelilik yasalarının temel bir özelliğidir ve gündelik deneyimden çok çok farklıdır. Öyle ki zamanda geriye giden ve kendi kendisini doğuran varsayımsal bir bilimkurgu karakterine benzetilebilir.

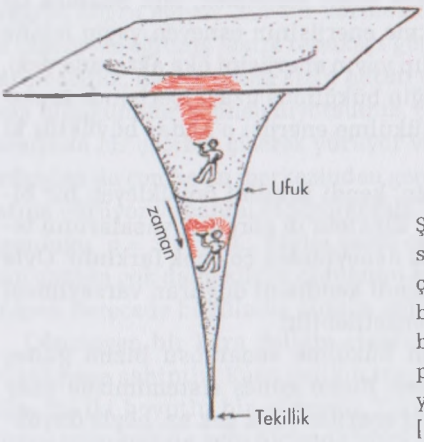
Bu bükülmeye sebep olan bükülme senaryosu bizim güneş sistemimizde hiç gerçekleşmez. Bizim güneş sistemimizde uzay bükülmeleri o kadar zayıftır ki enerjileri çok çok az, böyle önyüklemeli bükülmeler üretmek için de çok yetersizdir. Güneş sistemimizdeki uzay bükülmelerinin hemen hepsi doğrudan madde tarafından üretilir (güneşin maddesi, dünyanın maddesi, diğer gezegenlerin maddesi), bir kara delikte ise tam tersine bükülmenin sorumlusu tamamen bükülmedir.

Olay Ufku ve Bükülmüş Zaman

Bir kara deliğin bahsi ilk açıldığında muhtemelen önce onun bükülmüş uzayını değil, Şekil 5.3'te gösterilen içine hapsetme gücünü düşünürsünüz.

Bir mikrodalga verici taşırken bir kara deliğin içine düşseydim, deliğin *olay ufkunun* içinden geçer geçmez acımasızca aşağıya, deliğin tekilliğinin içine doğru çekilirdim. Ve herhangi bir yolla iletmeye çalıştığım her türlü sinyal de benimle beraber aşağıya çekilirdi. Ben ufku geçtikten sonra ufkun üzerindeki hiç kimse gönderdiğim sinyalleri hiçbir biçimde göremezdi. Ben ve sinyallerim kara deliğin içerisine hapsedilmiş olurduk. (Bunun *Yıldızlararası*'nda nasıl olduğunu 28. Bölümde okuyabilirsiniz.)

Bu hapsolma aslında deliğin zaman bükmesi nedeniyle gerçekleşir. Bir roket motorunun patlamasını kendime destek yapıp kara deliğin üzerinde salına salına uçabiliyor olsaydım, bu durumda ufka ne kadar yakınsam zaman o kadar yavaş akardı. Ufkun tam üstünde zaman duracak kadar yavaşlar ve benim de bu yüzden Einstein'ın zaman bükülmeleri yasası gereği sonsuz kuvvette bir kütleçekim etkisi yaşamam gerekir.



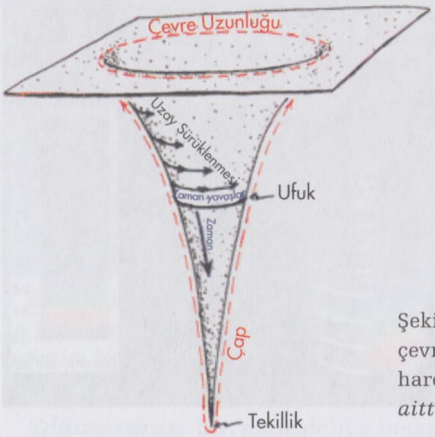
Şekil 5.3: Olay ufkunu geçtikten sonra yolladığım sinyaller dışarı çıkamaz. Not: Bu çizimde bir uzay boyutu iptal edildiği için ben iki boyutlu bir Kip'im ve zarımızın parçası olan bükülmüş iki boyutlu yüzeyden aşağıya doğru kayıyorum. [*Çizim bana aittir.*]

Olay ufkunun içerisinde ne olur? Orada zaman o kadar aşırı biçimde bükülmüştür ki uzamsal olduğunu düşüneceğiniz bir yönde akar: Aşağıya tekilliğe doğru akar. Bu aşağıya doğru akış aslında bir kara delikten hiçbir şeyin kaçamamasının nedenidir. Her şey acımasızca geleceğe doğru çekilir[1] ve deliğin içinde gelecek aşağıya, ufuktan uzağa doğru olduğu için, yukarıya ufkun dışına hiçbir şey kaçamaz.

Uzay Burgacı

Dünya nasıl kendi etrafında dönüyorsa aynı şekilde kara delikler de dönebilir. Dönen bir delik çevresindeki uzayı girdap türü bir dönme hareketine sürükler (Şekil 5.4). Bir hortumdaki hava gibi uzay en hızlı deliğin merkezinde döner ve dönme dışa, delikten uzağa doğru hareket edildikçe yavaşlar. Deliğin ufkuna doğru düşen her şey, bir hortumun rüzgârına yakalanan ve sürüklenen çer çöp misali, uzayın burgacı tarafından deliğin etrafında sürekli bir dönüşe sürüklenir. Ufkun kıyısında bu dönmenin sürüklemesine karşı kendini korumanın hiçbir yolu yoktur.

[1] Zamanda geriye gitmek mümkünse bunu ancak uzayda dışarıya doğru yolculuk yapıp ardından ayrılmadan önce başlangıç noktanıza geri dönerek yapabilirsiniz. Sabit bir noktada başkalarının orada zamanda ileri doğru gidişlerini izleyerek zamanda geriye *gidemezsiniz*. Bu konudan 30. Bölümde bir kez daha bahsedeceğiz.

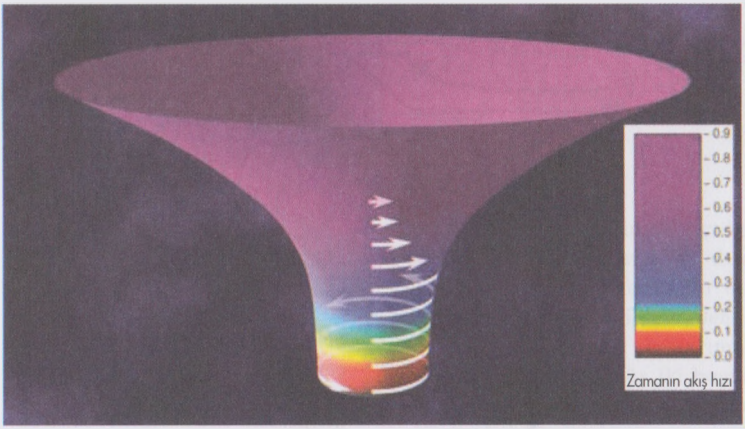


Şekil 5.4: Dönen bir kara deliğin çevresindeki uzay bir dönme hareketine kapılır. [*Çizim bana aittir.*]

Kara Deliğin Çevresinde Bükülmüş Uzay ve Zamanın Tam Gösterimi

Uzayzaman bükülmesinin bu üç yönü de (uzayın bükülmesi, zamanın yavaşlaması ve bozulması, uzayın hızla dönmesi) matematiksel formüllerle betimlenmektedir. Bu formüller Einstein'ın görelilik yasalarından çıkarsanmıştır ve kesin öngörüleri Şekil 5.5'te niceliksel olarak gösterilmiştir (Şekil 5.1'den Şekil 5.4'e kadar olan şekiller hatırlıyorsanız sadece nitelikseldi.)

Şekil 5.5'teki yüzeyin bükülmüş yapısı, tam da yığından deliğin ekvator düzlemine bakabilseydik göreceğimiz şeydir. Renkler ufkun üzerinde sabit bir yükseklikte havada asılı kalabilen birisinin ölçümüyle zamanın yavaşlamasını göstermektedir. Maviden yeşile geçiş sırasında zaman, delikten uzaktaki akış hızının yüzde 20'sine inmiştir. Sarıdan kırmızıya geçişte zaman, uzaktaki normal hızının yüzde 10'una kadar yavaşlamıştır. Yüzeyin en altındaki kara çemberde zaman durur. Bu olay ufkudur. Bu bir küre değil çemberdir, çünkü biz sadece ekvator düzlemine, evrenimizin (zarımızın) iki boyutuna bakıyoruz. Üçüncü uzay boyutunu ekleseydik ufuk düzleştirilmiş bir küre halini alırdı: Bir küremsi. Beyaz oklar uzayın kara deliğin etrafında dönme hızını gösteriyor. Dönme ufukta hızlıdır; biz bir uzay aracının içinde yukarıya doğru tırmandıkça düşer.



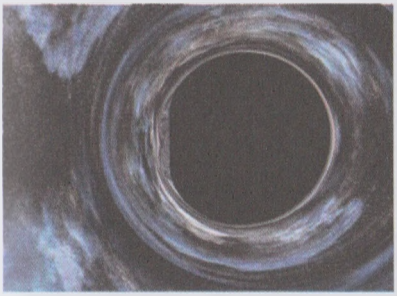
Şekil 5.5: Hızla dönen bir kara deliğin etrafındaki bükülmüş uzay ve zamanın tam gösterimi. Kara delik mümkün olan en yüksek hızın yüzde 99, 8'i hızla dönmektedir. [*Çizim benim bir eskizime dayanarak Don Davis tarafından yapılmıştır.*]

Tam bir kesinlikle çizilmiş olan Şekil 5.5'te deliğin içini göstermiyorum. Buna ileride 26 ve 28. Bölümde geleceğiz.

Şekil 5.5'teki bükülme bir kara deliğin esasıdır. Onun matematiksel ayrıntılarından fizikçiler merkezindeki tekilliğin doğası hariç kara delik hakkındaki her şeyi çıkarsayabilirler. Tekillik içinse henüz tam anlaşılamamış kuantum kütleçekimi yasalarına ihtiyaç duyarlar (26. Bölüm).

Bir Kara Deliğin Bizim Evrenimiz İçerisinden Görünüşü

Biz insanlar zarımızla sınırlanmışız. Ondan kaçıp yığının içerisine giremeyiz (*Yıldızlararası*'nda Cooper'a yaptıkları gibi aşırı gelişmiş bir uygarlık teserakt ya da başka bir aracın içerisinde bize bir gezinti sağlamadıkça; *bkz.* 29. Bölüm). Bu yüzden Şekil 5.5'te gösterilen bir kara deliğin bükülmüş uzayını göremeyiz. Filmlerde çok sık, örneğin Disney Stüdyolarının 1979 tarihli filmi *The Black Hole*'da [*Kara Delik*] gösterilen kara delik hunileri ve girdapları evrenimizde yaşayan hiçbir canlı tarafından görülmeyecektir.





Şekil 5.6: Sağda gösterilen yıldız alanının önünde hareket eden haliyle hızla dönen bir kara delik [*solda*]. [*Double Negative görsel efektler ekibinin bu kitap için ürettiği bir simülasyondan.*]

Yıldızlararası bir kara deliği insanların gerçekten görüp deneyimleyeceği tarzda doğru biçimde resmeden ilk Hollywood filmidir. Şekil 5.6 filmden alınmayan bir örnektir. Kara delik, arkasındaki yıldızların alanına kara bir gölge düşürür. Yıldızlardan gelen ışık ışınları deliğin bükülmüş uzayı tarafından bükülür; *kütleçekimsel olarak merceklenmişlerdir* ve merkezdeş bir biçim bozulması şekli üretirler. Gölgenin sol kenarından bize gelen ışık ışınları, deliğin dönen uzayıyla aynı yönde hareket ederler. Uzay burgacı onlara bir itilim sağlar ve gölgenin sağ kenarındaki uzayın dönmesine karşı direnen ışık ışınlarının ufka daha yakın olanlarından kaçmalarına olanak verir. Gölgenin solda düzleşmiş olup sağda dışa doğru büyümesinin nedeni budur. Bu konu ve bir kara deliğin bizim evrenimizin, bizim *zarımızın* içinde yakından göründüğü şekliyle gerçekte neye benzediğinin diğer yönleri üzerinde 8. Bölümde ayrıca söyleyeceklerim olacak.

Bunun *Gerçek* Olduğunu Nereden Biliyoruz?

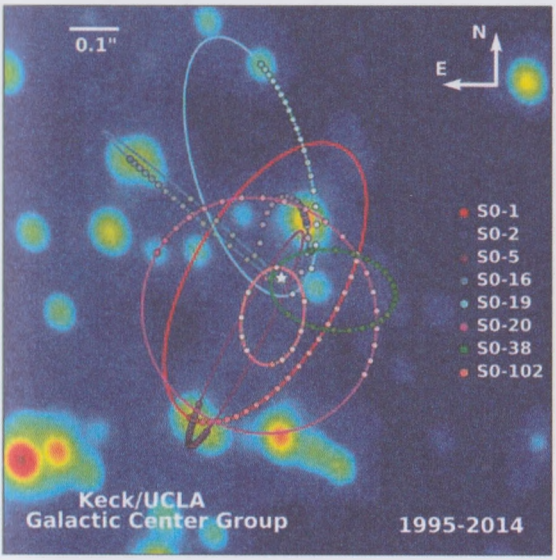
Einstein'ın görelilik yasaları yüksek bir kesinlikle test edildi. Kuantum fiziğiyle karşılaştıkları anlar hariç doğru olduklarına eminim. *Yıldızlararası*'ndaki Gargantua gibi büyük bir kara delik için kuantum fiziği yalnızca kara deliğin merkezine yaklaşıldığında, onun tekilliği içerisinde söz konusudur. Dolayısıyla eğer evrenimizde varlarsa kara deliklerin Einstein'ın görelilik yasalarının emrettiği ve benim yukarıda anlattığım özelliklere sahip olmaları gerekir.

Bahsettiğim bu ve başka bazı özellikler Einstein'ın denklemlerinden entelektüel olarak birbirlerinin üzerinde yükselen çok sayıda fizikçi tarafından çıkarsanmıştır (Şekil 5.7); içlerinden en önemlileri Karl Schwarzschild, Roy Kerr ve Stephen Hawking'tir. Schwarzschild I. Dünya Savaşı sırasında 1915 yılında Alman-Rus cephesindeki trajik ölümünden kısa bir süre önce dönmeyen bir kara deliğin etrafındaki bükülmüş uzayzamanın ayrıntılarına ulaşmıştır. Fizikçilerin jargonunda bu ayrıntılara "Schwarzschild metrikleri" denmektedir. 1963 yılında Kerr (Yeni Zelandalı bir matematikçi) aynısını dönen bir kara delik için yaptı: Dönen deliğin "Kerr metriğini" çıkarsadı. 1970'lerin başında da Stephen Hawking ve diğerleri kara deliklerin yıldızları yuttuğunda, çarpıştıklarında ve birleştiklerinde ve diğer cisimlerin gelgit kuvvetlerini hissettiklerinde uymak zorunda oldukları yasalar kümesinin çıkarımını yaptılar.

Kara deliklerin var olduğu kesindir. Einstein'ın görelilik yasaları, kütleli bir yıldız kendisini sıcak tutan nükleer yakıtı tükettiğinde yıldızın kendi içine doğru patlaması gerektiğini iddia ediyor. J. Robert Oppenheimer ve öğrencisi Hartland Snyder 1939 yılında Einstein'ın yasalarını kullanarak, eğer içe patlama tamamen küreselse içe doğru patlayan yıldızın kendi etrafında bir kara delik yaratmak, ardından deliğin merkezinde bir tekillik yaratmak ve daha sonra da tekilliğin içine çekilerek yutulmak *zorunda olduğunu* keşfettiler. Geride hiç madde kalmıyordu. Hiçbir madde. Ortaya çıkan kara delik tamamen bükülmüş uzay ve zamandan oluşuyordu. 1939'dan bu yana geçen yıllarda fizikçiler Einstein'ın yasalarını kullanarak içe doğru patlayan yıldızın deforme ve dönüyor olsa da bir kara delik üreteceğini gösterdiler. Bilgisayar simülasyonları tüm ayrıntıları ortaya serdi.



Şekil 5.7: Kara delik bilimcileri. *Soldan sağa:* Karl Schwarzschild (1873–1916), Roy Kerr (1934–), Stephen W. Hawking (1942–), J. Robert Oppenheimer (1904–1967) ve Andrea Ghez (1965–).



Şekil 5.8: Andrea Ghez ve arkadaşlarının ölçümüyle Samanyolu galaksimizin merkezindeki dev kara deliğin etrafındaki yıldızların gözlemlenen yörüngeleri.

Gökbilimciler evrenimiz içerisinde çok sayıda kara deliğin var olduğunu gösteren ikna edici kanıtlara ulaştılar. En güzel örnek Samanyolu galaksimizin merkezinde yer alan büyük kara deliktir. UCLA'den Andrea Ghez öncülük ettiği küçük bir gökbilimciler grubuyla birlikte bu kara deliğin etrafındaki yıldızların hareketlerini gözledi (Şekil 5.8). Her bir yörüngenin üzerindeki noktalar birer yıl aralıklarla yıldızın konumudur. Kara deliğin yerini beyaz bir yıldız sembolüyle işaretledim. Ghez yıldızların gözlemlenen hareketlerinden deliğin kütleçekiminin yeğinliğinin çıkarımını yaptı. Kütleçekim etkisi sabit bir uzaklıkta güneşin aynı uzaklıktaki etkisinden 4,1 milyon kat daha büyüktü. Bu kara deliğin kütlesinin güneşinkinden 4,1 milyon kat daha büyük olduğu anlamına gelir!

Bu kara deliğin yaz geceleri gökyüzünde nerede olduğunu Şekil 5.9 gösteriyor. Yay takımyıldızının, çaydanlığın alt sağında X işaretli "Galaktik Merkez"dedir.

Evrenimizdeki neredeyse bütün büyük galaksilerin merkezinde büyük bir kara delik yer almaktadır. Bunların çoğu Gargantua kadar ağır (100 milyon güneş), hatta daha ağırdır. Şimdiye dek ölçülenlerin en ağırı güneşten 17 milyar kat daha kütlelidir; NGC1277 adlı verilmiş ve dünyadan 250 milyon ışık yılı uzaktaki (görülebilen evrenin kenarına kadar olan yolun kabaca onda biri) bir galaksinin merkezinde bulunmaktadır.



Şekil 5.9: Galaksimizin merkezinin gökyüzündeki yeri. Orada dev bir kara delik bulunmaktadır.

Bizim kendi galaksimizin içerisinde daha küçük, kaba bir hesapla 100 milyon kara delik vardır: Bu kara delikler genel olarak güneşin üç ila otuz katı ağırlıktadır. Bunu tüm bunların kanıtlarını gördüğümüz için değil, gökbilimciler nükleer yakıtlarını tükettiğinde kara deliğe dönüşecek ağır yıldızların sayımını yaptıkları için biliyoruz. Gökbilimciler bu sayımdan böyle kaç adet yıldızın yakıtını tüketip kara deliğe dönüştüğünü çıkartmış durumdalar.

Demek ki evrenimizde kara delikler çok yaygın. Şansımıza bizim güneş sistemimizde hiç kara delik yok. Olsaydı deliğin kütleçekimi dünyanın yörüngesini altüst ederdi. Dünya güneşin yakınına savrularak pişer ya da güneşten uzağa gider donardı; hatta belki de güneş sisteminin dışına ya da kara deliğin içine sürüklenirdi. İnsanlar olarak yeni koşullarda bir yıldan fazla hayatta kalmayı başaramazdık!

Gökbilimciler dünyaya en yakın kara deliğin kabaca 300 ışık yılı uzakta olduğunu tahmin ediyorlar: Bu da (güneş hariç) en yakın yıldıza, Proxima Centauri'ye olan uzaklığımızın yüz katı uzakta demektir.

Şimdi evrenin, alanların, bükülmüş zaman ve uzayın, özellikle de kara deliklerin bilgisini kuşanmış olduğumuza göre, sonunda *Yıldızlararası*'ndaki Gargantua'yı keşfetmeye hazırız demektir.

II. GARGANTUA



6

GARGANTUA'NIN ANATOMİSİ

Bir kara deliğin kütlesini ve hangi hızla döndüğünü bilseydik Einstein'ın görelilik yasalarından deliğin bütün diğer özelliklerini çıkarsayabilirdik: Büyüklüğünü, kütleçekim etkisinin yeğinliğini, olay ufkunun ekvatorun yanında merkezkaç kuvvetlerce dışa doğru ne kadar gerildiğini, arkasındaki cisimlerin kütleçekimsel merceklenmesinin ayrıntılarını. Her şeyi.

Bu müthiş bir şeydir. Gündelik deneyimimizden çok farklıdır. Benim ağırlığımı ve ne kadar hızlı koştuğumu bildiğinizde hakkımdaki her şeyi çıkarsayabilmenize benzer: Gözlerimin rengini, burnumun uzunluğunu, IQ'mu...

"Kara deliklerin" isim babası, benim de hocam John Wheeler bunu "kara deliğin saçı yoktur" ifadesiyle anlatır; diğer bir deyişle kara deliğin kütlesi ve spini (dönmesi) dışında ayrıca *bağımsız* bir özelliği yoktur. Aslında "Bir kara deliğin sadece iki saç teli vardır ve bunlardan geri kalan her şeylerini ortaya çıkartabilirsin," demeliydi ama bu kara delik biliminde ve bilimcilerin sözlüğünde hızla yerleşen "saçı yoktur" kadar kolay akılda kalmazdı[1].

Yıldızlararası'nda gösterildiği gibi Einstein'ın görelilik yasalarını bilen bir fizikçi Miller'ın gezegeninin özelliklerinden Gargantua'nın kütle ve spinini çıkartıp buradan da hakkındaki bütün özelliklere ulaşabilir. Şimdi bunun nasıl olduğuna bakalım[2].

---

[1] "Kara deliğin saçı yoktur" ifadesinin Fransızcaya kelime kelimesine çevirisi o kadar müstehcen bir anlam taşımaktadır ki Fransız yayımcılar buna hararetle karşı çıkmış ama sonuç alamamışlardır.

[2] Bazı sayısal ayrıntılar için bu kitabın sonundaki "Teknik Notlar" bölümüne bakabilirsiniz.

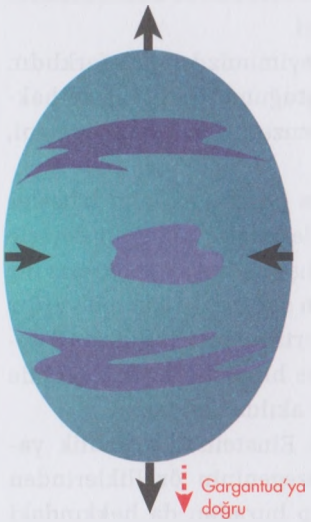
Gargantua'nın Kütlesi

Ⓓ

Miller'ın gezegeni (ayrıntılı olarak 17. Bölümde ele alacağız) Gargantua'ya hayatta kalmasını gözettiğimizde mümkün olan en yakın yerdedir. Bunu biliyoruz çünkü mürettebatın aşırı zaman kaybı yalnızca Gargantua'ya çok yakın olduklarında gerçekleşebilir.

Bu kadar yakın bir mesafede Gargantua'nın gelgit yaratan kütleçekim kuvvetleri (4. Bölüm) özellikle şiddetlidir. Miller'ın gezegenini Gargantua'ya doğru ve ondan uzağa gerer ve gezegenin yanlarını sıkıştırırlar (Şekil 6.1).

Bu germe ve sıkıştırmanın yeğinliği Gargantua'nın kütlesinin karesiyle ters orantılıdır. Niçin? Gargantua'nın kütlesi ne kadar büyükse çevre uzunluğu da o kadar büyüktür, dolayısıyla Gargantua'nın kütleçekim kuvvetleri de gezegenin çeşitli bölgelerinde o ölçüde benzerdir, bu da daha zayıf gelgit kuvvetlerine sebep olur. (Gelgit kuvvetleri konusunda Newton'ın bakış açısına bakınız; Şekil 4.8.) Ayrıntılar üzerinde çalıştıktan sonra Gargantua'nın kütlesinin güneşin kütlesinden en az 100 milyon kat daha büyük olması gerektiğine karar verdim. Gargantua bundan daha az kütleli olsaydı Miller'ın gezegenini paramparça ederdi!



Şekil 6.1 Gargantua'nın gelgitli kütleçekim kuvvetleri Miller'ın gezegenini gerer ve sıkıştırır.

Yıldızlararası'nda olanlara ilişkin yaptığım bütün bilimsel yorumlarda Gargantua'nın kütlesinin gerçekten de 100 milyon güneş olduğunu varsaydım[3]. Örneğin 17. Bölümde Gargantua'nın gelgit kuvvetlerinin Miller'ın gezegenindeki Ranger'ı[4] batıran dev deniz dalgala-

[3] Güneşin kütlesinin 200 milyon katı daha mantıklı bir değer olurdu ama sayıları basit tutmak istiyordum ve 200 milyonda hesaplamalar uzadığı için 100 milyonu seçtim.

[4] "Ranger," filmde ana uzay gemisi *Endurance*'tan ayrılabilen küçük uzay araçlarına verilen isimdir –çn.

rını nasıl doğurduğunu açıklarken de bu kütle varsayımını kabul ediyorum.

Bir kara deliğin olay ufkunun çevre uzunluğu, deliğin kütlesine orantılıdır. Gargantua'nın 100 milyon güneş kütlesi için ufkun çevre uzunluğu hesaplandığında sonuç dünyanın güneş etrafındaki yörüngesine yakın çıkıyor: Yaklaşık *1 milyar kilometre*. Bu epey büyük bir sayı! Paul Franklin'in görsel efektler ekibinin *Yıldızlararası*'ndaki görüntüleri üretirken bana danışarak kabul ettiği çevre uzunluğu da budur.

Fizikçiler bir kara deliğin yarıçapını ufkunun çevre uzunluğu bölü 2π (yaklaşık 6,28) olarak kabul ederler. Kara deliğin içerisindeki aşırı uzay bükülmesi nedeniyle bu deliğin gerçek yarıçapı değildir. Bizim evrenimizde ölçüldüğü gibi ufuktan deliğin merkezine olan gerçek uzaklık bu değildir. Ancak yığının içinde yapılan ölçüm itibarıyla olay ufkunun *yarıçapıdır* (çapının yarısıdır); *bkz.* birkaç sayfa ilerideki Şekil 6.3. Gargantua'nın yarıçapı bu anlamda yaklaşık 150 milyon kilometredir ve dünyanın güneş etrafındaki yörüngesinin yarıçapıyla aynıdır.

Gargantua'nın Spini

Christopher Nolan Miller'ın gezegeninde zamanın yavaşlaması konusunda oradaki bir saatin dünyada yedi yıl olmasını istediğini söylediğinde şok olmuştum. Bunun mümkün olmayacağını düşündüm ve Chris'e de söyledim. Chris "Pazarlık yok" diyerek ısrar etti. Böylece ne ilk ne de son olarak bir kez daha eve gittim, düşündüm, Einstein görelilik denklemleriyle bazı hesaplamalar yaptım ve bir yolunu buldum.

Eğer Miller'ın gezegeni Gargantua'ya içine düşmemesi şartıyla olabilecek en yakın yerde olur[5] ve Gargantua da yeterince hızlı dönerse Chris'in bir saatte yedi yıllık zaman yavaşlamasının mümkün olduğunu keşfettim. Fakat Gargantua'nın kendi etrafında *müthiş hızlı* dönmesi gerekiyordu.

Kara deliklerin sahip olabileceği maksimum bir spin (dönme) hızı vardır. Bu en üst değerden daha hızlı dönerlerse ufuk gözden

[5] Şekil 17.2'ye ve 17. Bölümde yer alan bu konudaki tartışmaya bakınız.

kaybolur, içindeki tekilliği bütün evren serbestçe görür; diğer bir deyişle tekillik *çıplak* hale gelir ve fizik yasaları bunu büyük ihtimalle yasaklar (26. Bölüm).

Chris'in bu büyük zaman yavaşlamasının Gargantua'nın neredeyse maksimum hızda dönmesini gerektirdiğini buldum. En üst değerden yaklaşık 100 trilyonda bir oranında daha az[6]. *Yıldızlararası*'ndaki bilim yorumlarımın çoğunda bu spin değerini kullandım.

Robot TARS Gargantua'nın içine düştüğünde *Endurance*'ın mürettebatı spin hızını çok çok uzaktan bakarak doğrudan ölçebildi (Şekil 6.2)[7]. Uzaktan göründüğü kadarıyla TARS ufku hiç geçmedi (çünkü geçtikten sonra gönderdiği sinyaller kara delikten dışarı çıkamaz). Hatta TARS'ın içeriye düşüşü yavaşlıyor gibi ve o da hemen ufkun üstünde duruyor gibi gözüktü. Ve uzaktan görünüm itibarıyla o belli bir noktada dururken Gargantua'nın dönen uzayı onu Gargantua'nın çevresinde döndürüp durdu. Gargantua'nın spininin mümkün olan en üst sınıra yakın olmasıyla uzaktan görünüm itibarıyla TARS'ın yörüngesini tamamlama süresi yaklaşık olarak bir saatti.

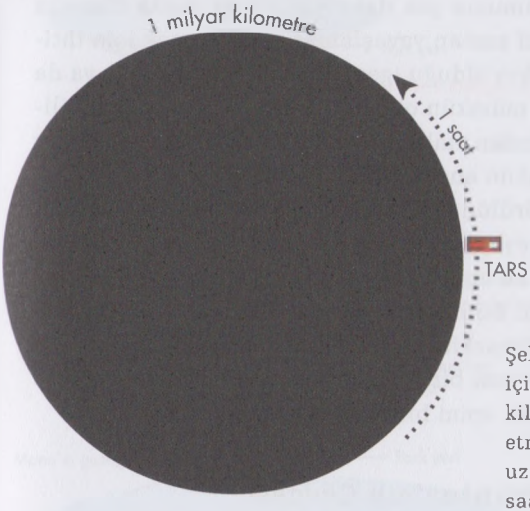
Matematik hesabı kendiniz yapabilirsiniz: Gargantua'nın etrafındaki yörünge uzaklığı bir milyar kilometre ve TARS bu uzaklığı 1 saatte tamamlıyor, demek ki uzaktan ölçülen hızı yaklaşık olarak saatte bir milyar kilometre ve bu da neredeyse ışık hızına eşit! Eğer Gargantua maksimum değerden daha hızlı dönseydi TARS çevresinde ışık hızından daha hızlı dönerdi ve bu Einstein'ın hız sınırını çiğnerdi. Böylece kara delikler için neden mümkün olan maksimum bir spin olduğunu anlamanın bulgusal bir yolunu da göstermiş olduk.

1975 yılında kara delikleri maksimumdan daha hızlı dönmekten alıkoyan bir doğal mekanizmanın varlığını keşfetmiştim: Bir kara delik maksimum spine yaklaştığında, deliğin döndüğü yönle

---

[6] Başka bir ifadeyle spini, maksimum eksi maksimumun 0,00000000000001'idir.

[7] TARS içine düştüğünde Endurance çok çok uzakta değil, kritik yörüngede, ufka oldukça yakın bir yerde, deliğin çevresinde neredeyse TARS kadar hızla döner durumdaydılar; dolayısıyla Amelia Brand *Endurance*'ın içindeyken TARS'ın yüksek hızla sürüklendiğini görmedi. Bu konuda daha fazlası için *bkz.* 27. Bölüm.



Şekil 6.2 TARS Gargantua'nın içine düşerken deliğin milyar kilometrelik çevre uzunluğu etrafındaki sürüklenmesi uzaktan görünüm itibarıyla bir saatte tamamlandı.

aynı yörüngede bulunan ve bu yüzden yakalandıklarında deliğin spinini (dönmesini) arttıran cisimleri yakalamakta zorluk yaşar. Fakat delik, spinine zıt yönde yörüngede bulunan ve yakalandıklarında deliğin spinini yavaşlatan şeyleri kolayca yakalar. Bu yüzden spin maksimuma yaklaştığında kolayca yavaşlar.

Ben keşfimde Satürn'ün halkalarına benzeyen ve deliğin spiniyle aynı yönde yörünge hareketi gösteren bir gaz diskine odaklandım: Bir *akresyon* [*birikim*] *diski* (9. Bölüm). Diskteki sürtünme gazın dönmesini ve kara deliğin içerisine giderek sarmallaşarak girmesini sağlar. Sürtünme gazı da ısıtır ve gazdan fotonların ışımasını sağlar. Uzayın kara deliğin etrafındaki dönmesi deliğin dönmesiyle aynı yönde giden fotonları yakalar ve onları yana atar, böylece deliğin içine ulaşamazlar. Öte yandan dönme, spinin aksi yönünde gitmeye çalışan fotonları yakalayarak bunları deliğin içerisine çeker ve bunlar da spini yavaşlatırlar. En sonunda deliğin spini maksimumun 0,998'ine ulaştığında dengeye ulaşılır ve yakalanan fotonların spini azaltması ile biriken gazın spini yükseltmesi tam olarak eşit etkide olur. Bu denge dayanıklı bir görünüm arz eder. Şahsen astrofiziksel ortamların çoğunda kara deliklerin maksimumun yaklaşık 0,998'inden daha hızlı spin etmemesini beklerim.

Fakat spinin maksimuma çok daha yaklaştığı, hatta Chris'in Miller'ın gezegenindeki zaman yavaşlamasını sağlamak için ihtiyaç duyduğu kadar yakın olduğu (gerçek evrende çok nadir ya da hiç olmasa da yine de mümkün olan) durumları da hayal edebiliyorum: Maksimum spinden maksimumun 100 trilyonda biri kadar daha az bir spin; mümkün ancak muhtemel değil.

Filmlerde bu çok görülür. İyi bir film yapmak amacıyla başarılı sinemacılar sık sık şeyleri uçlaştırırlar. *Harry Potter* gibi bilimsel fantezi filmlerinde bu uç bilimsel olarak mümkün olanın sınırlarının çok ötesindedir. Bilimkurgudaysa genel olarak ihtimaller dünyasında kalınır. Bilimsel fantezi ile bilimkurgu arasındaki ana ayrım budur. *Yıldızlararası* bir fantezi film değil, bilimkurgudur. Gargantua'nın aşırı hızlı spini bilimsel olarak mümkündür.

Gargantua'nın Gövdesi

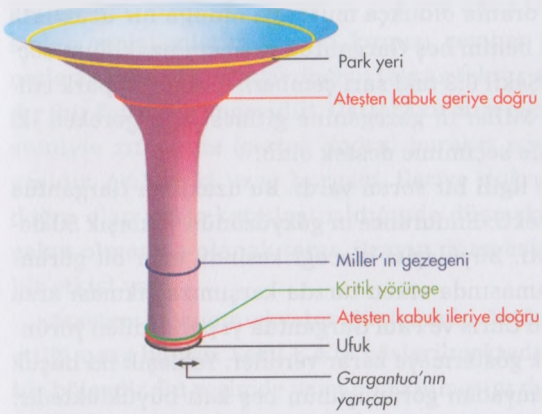
Ⓓ

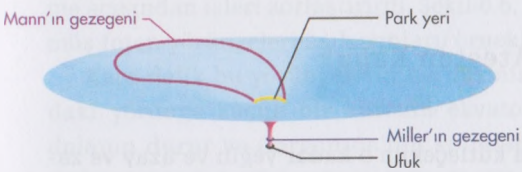
Gargantua'nın kütlesi ve spinini belirledikten sonra gövde yapısını hesaplamak için Einstein'ın denklemlerini kullandım. Bir önceki bölümde olduğu gibi burada da sadece dış gövde yapısı üzerine odaklanıyor, gövdesinin iç yapısını (özellikle Gargantua'nın tekilliklerini) 26 ve 28. Bölüme bırakıyoruz.

Şekil 6.3'te üstteki resimde Gargantua'nın ekvator düzleminin şeklini yığından görüldüğü biçimiyle görüyorsunuz. Bu Şekil 5.5'e benzemektedir, fakat Gargantua'nın spini mümkün olan maksimuma çok daha yakın olduğu için (Şekli 5.5'te binde ikiyken burada 100 trilyonda bir olduğu için) Gargantua'nın ağzı çok daha uzundur. Ufka ulaşmadan önce aşağıda çok daha uzağa uzanır. Yığından görüldüğü biçimiyle ufkun yanındaki bölge uzun bir silindire benzer. Silindirik bölgenin uzunluğu yaklaşık iki ufuk çevre uzunluğudur; bu 2 milyar kilometre eder.

Silindirin kesitleri çizimde çemberlerdir fakat Gargantua'nın ekvator düzleminden çıkartarak zarımızın üçüncü boyutunu ekleseydik bu kesitler düzleştirilmiş küreler (küremsiler) halini alırdı.

Yıldızlararası'ndaki bilimsel yorumlarımda gerçekleşen birkaç özel konumu Gargantua'nın ekvator düzlemi üzerinde işaretledim: Gargantua'nın olay ufku (siyah çember), Cooper ve TARS'ın filmin sonuna doğru Gargantua'nın içine düşmeden önce üzerinde bu-





Şekil 6.3: Miller'ın gezegeninde zamanın aşırı yavaşlamasına ulaşmak için gerektiği şekliyle, spini mümkün olan maksimumun sadece 100 trilyonda biri kadar azken Gargantua'nın gövde yapısı.

lundukları kritik yörünge (yeşil çember; 27. Bölüm), Miller'ın gezegeninin yörüngesi (mavi çember; 17. Bölüm), mürettebat Miller'ın gezegenini ziyaret ederken *Endurance*'ın içine park ettiği yörünge (sarı çember) ve Mann'ın gezegeninin ekvatoral olmayan yörüngesinden bir kesitin ekvator düzlemine düşürülmüş hali (mor çember). Mann'ın gezegeninin yörüngesinin dış kısmı Gargantua'dan o kadar uzak ki (Gargantua'nın yarıçapının 600 katı veya daha fazlası; 19. Bölüm) içine sığması için resmi çok daha büyük bir ölçekte çizmek zorunda kaldım (alttaki resim), hatta bu durumda bile dürüst davranmadım: Dış kısmı yapmam gereken 600 yarıçap uzunluğu yerine 100 Gargantua yarıçapında tuttum. Kırmızı çemberler için yazılan ateşten kabuk nedir, birazdan göreceğiz.

Bu yerleri nasıl ve neye göre belirledim? Burada park edilen yörüngeyi bir örnek olarak vereyim, diğerlerini daha sonra konuşuruz. Filmde Cooper üzerine yerleşilen yörüngeyi şöyle anlatıyor: "O halde Gargantua'nın çevresinde Miller'ın gezegenine paralel ama ondan biraz daha dışarda, daha geniş bir yörüngeyi izliyoruz." Bunun da Gargantua'dan "zaman kaymasının dışında" olmaya yetecek kadar uzak olmasını, diğer bir ifadeyle zamanın yavaş-

lamasının dünyaya oranla oldukça mütevazı olduğu bir uzaklıkta olmasını istiyor. Bu benim beş Gargantua yarıçapı uzaklığını seçmemde etken oldu (Şekil 6.3'teki sarı çember). Ranger'ın park edilen bu yörüngeden Miller'ın gezegenine gitmesi için gereken iki buçuk saatlik süre de seçimime destek oldu.

Fakat bu seçimle ilgili bir sorun vardı. Bu uzaklıkta Gargantua fazla büyük gözükecekti; Endurance'ın gökyüzünün yaklaşık 50 derecesini kapsayacaktı. Büyüleyici olacağı kesindi, ama bu görüntünün filmin bu aşamasında erken tarzda karşımıza çıkması arzu edilmezdi! Bu yüzden Chris ve Paul Gargantua'yı park edilen yörüngede çok daha küçük göstermeye karar verdiler: Yaklaşık iki buçuk derece ki bu ayın dünyadan görünüşünün beş katı büyüklüktedir; hâlâ etkileyicidir ama karşı konulmaz bir etkileyiciliği de yoktur.

Ateşten Kabuk

Ⓓ

Gargantua'nın yakınında kütleçekim o kadar yeğin ve uzay ve zaman o kadar bükülmüştür ki ışık (fotonlar) dışarı çıkmadan önce deliğin etrafında birçok kez dönüp durarak ufkun dışındaki yörüngelere tutsak kalabilir. Tutsak kalınan bu yörüngeler fotonların eninde sonunda daima onlardan kaçması nedeniyle *kararsızdır*. (Ufkun içinde yakalanan fotonlarsa asla dışarı çıkamazlar.)

Geçici olarak tutsak düşen bu ışığa "ateşten kabuk" demeyi seviyorum. Bu ateş kabuğu Gargantua'nın *Yıldızlararası*'ndaki görsel şeklinin altında yatan bilgisayar simülasyonlarında (8. Bölüm) önemli bir rol oynuyor.

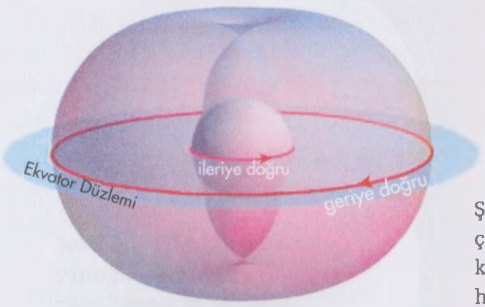
Dönmeyen bir kara delikte ateşten kabuk ufkun çevre uzunluğundan 1,5 kat daha büyük bir çevre uzunluğuna sahip bir küredir. Tutsak düşen ışık bu kürenin etrafında (dünyadaki sabit boylam çizgileri gibi) büyük çemberler çizerek hareket eder ve bir kısmı kara deliğin içine sızarken kalanı dışarıya, deliğin dışına sızar.

Bir kara delik dönüyorsa ateşten kabuğu içe ve dışa doğru yayılır, böylece bir kürenin sadece yüzeyi olmaktan çıkıp sonlu bir hacim işgal eder. Dev bir spine sahip Gargantua'daysa ekvator düzlemindeki ateşten kabuk, Şekil 6.3'teki alttaki kırmızı çemberden üstteki kırmızı çembere dek genişler. Ateşten kabuk Miller'ın

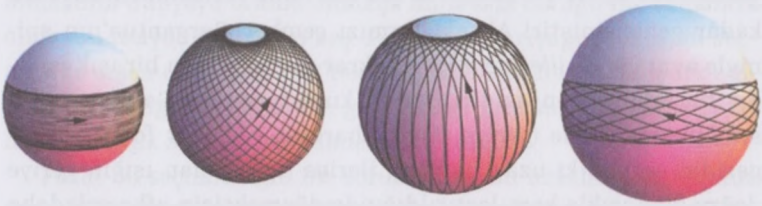
gezegenini, kritik yörüngeyi ve çok çok daha fazlasını kapsayacak kadar genişlemiştir! Alttaki kırmızı çember Gargantua'nın spiniyle aynı yönde (*ileriye doğru*) tekrar tekrar dönen bir ışık ışınıdır (bir foton yörüngesidir). Üstteki kırmızı çember Gargantua'nın spiniyle zıt yönde (*geriye doğru*) hareket eden bir foton yörüngesidir. Açıktır ki uzay burgacı, ileriye doğru olan ışığın geriye doğru olan ışıkla karşılaştırıldığında düşmeksizin ufka çok daha yakın olmasına olanak tanır. Uzayın dönmesinin ne kadar büyük bir etkisi var!

Ateşten kabuğun ekvator düzleminin üstünde ve altında işgal ettiği uzay bölgesi Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Bu geniş halkasal bir bölgedir. Bu resimde uzayın bükülmesini dışarıda bırakıyorum, çünkü bu ateşten kabuğun üç boyutunu tam anlamıyla gösterebilme açısından işleri zorlaştırırdı. Şekil 6.5, geçici olarak tutsak düşmüş foton yörüngeleri (ışık ışınları) örneklerini göstermektedir.

Kara delik bu yörüngelerin her birinin merkezindedir. En soldaki yörünge küçük bir kürenin ekvator bölgesinin çevresinde dolanıp durur ve Gargantua'nın spiniyle aynı yönde, hep ileriye doğru gider. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'teki alttaki (içteki) kırmızı yörüngeyle hemen hemen aynıdır. Şekil 6.5'te bir sonraki yörünge çok az daha büyük bir küre çevresinde, neredeyse kutupsal ve hafif ileriye doğru bir yönde dolanır. Üçüncü yörünge daha da büyüktür ama geriye doğru ve neredeyse kutupsaldır. Dördüncü neredeyse tamamen ekvatoral ve geriye doğrudur; yani Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'teki üstteki (dıştaki) kırmızı ekvatoral yörüngeye yakındır. Bu yörüngeler aslında birbirlerinin içerisindedirler; görülmesi daha kolay olsun diye onları ayırdım.



Şekil 6.4: Gargantua'nın çevresindeki ateşten kabuğun işgal ettiği halkasal bölge.



Şekil 6.5: Einstein'ın görelilik denklemleri kullanılarak hesaplanan ateşten kabuğun içine geçici olarak tutsak düşmüş ışık ışınları (foton yörüngeleri) örnekleri.

Ateşten kabuğun içine geçici olarak tutsak düşmüş fotonların bazıları dışarıya kaçar; bunlar Gargantua'dan sarmal biçimde uzaklaşırlar. Geri kalanlar içe doğru sarmal yaparak kurtulur; bunlar da Gargantua'ya doğru sarmal biçimde yaklaşarak onun ufkunun içerisine dalarlar. Kaçan ama tutsak olmanın kıyısındaki fotonlar Gargantua'nın *Yıldızlararası*'ndaki görsel şeklinde büyük etki sahibidir. *Endurance* mürettebatının gözünden Gargantua'nın gölgesinin kenarına işaret eder ve gölgenin kenarı boyunca ince parlak bir çizgi yaratırlar: Bir "ateş halkası" (8. bölüm).

7

KÜTLEÇEKİM SAPANLARI

Hızlar çok yüksek olduğu için Gargantua'nın yakınındaki bir uzay aracının idare edilmesi zordur. Bir gezegen, bir yıldız ya da bir uzay aracı hayatta kalmak için Gargantua'nın devasa kütleçekimine onunla karşılaştırılabilecek ölçüde büyük bir merkezkaç kuvvetiyle karşılık vermek zorundadır. Bu çok yüksek hızda hareket etmek zorunda olduğu anlamına gelir. Anlayacağınız, ışık hızına yaklaşması gerekir. Benim *Yıldızlararası*'ndaki bilim yorumumda *Endurance* mürettebatı Miller'ın gezegenini ziyaret ederken on Gargantua yarıçapında park etmişken ışık hızının üçte biri bir hızda hareket eder: $c/3$ (c ışık hızıdır). Miller'ın gezegeni de ışık hızının yüzde 55'i olan bir hızda hareket eder: $0{,}55c$.

Park edilen yörüngeden Miller'ın gezegenine ulaşmak için benim yorumumda (Şekil 7.1) Ranger, Gargantua'nın kütleçekiminin



Şekil 7.1: *Yıldızlararası*'nda yaptığım yorumlamaya göre Ranger'ın Miller'ın gezegenine gidişi.

onu aşağıya çekebilmesi için ileriye doğru hareketini *c*/3'ten çok daha fazla düşürmek zorundadır. Ayrıca gezegenin yakınına ulaştığında da Ranger'ın aşağıya doğru gidişten ileri doğru harekete geçiş yapması gerekir. Düşerken aşırı düzeyde hız kazanmış olmasına rağmen gezegeninin 0,55*c*'lik hızına ulaşarak ona inmek için yaklaşık olarak *c*/4'lük bir hız düşürme gerekir.

Ranger'ın pilotu Cooper'ın bu devasa hız değişikliklerini yaratmak için kullanabileceği olası mekanizmalar nelerdir?

Yirmi Birinci Yüzyıl Teknolojisi

Hızda gereken değişikliğe kabaca *c*/3 dersek bu saniyede 100.000 kilometre demektir (saatte değil, *saniyede*!).

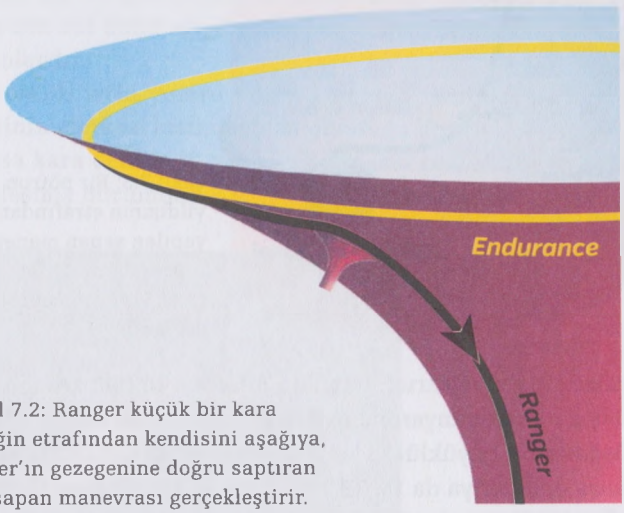
Fakat bizim şu an sahip olduğumuz en güçlü roketler saniyede 15 kilometreye ulaşabilir: Gereken hız bundan 7 bin kat daha yüksektir. *Yıldızlararası*'nda *Endurance* dünyadan Satürn'e saniyede ortalama 20 kilometrelik bir hızla iki yılda gitmektedir ve bu da gereken hızın beş binde biridir. Bence insanların yirmi birinci yüzyılda yapacağı uzay araçlarının en hızlısı saniyede 300 kilometreye ulaşabilir. Bu bile nükleer roketler alanında büyük bir Ar-Ge çalışmasını gerektirecektir ama *Yıldızlararası*'nda ihtiyaç duyulan hız bundan da üç yüz kat fazlasıdır.

Şansımıza doğa bize *Yıldızlararası*'nda gereken *c*/3 gibi devasa hız değişikliklerini elde etmek için bir yol sunuyor: Gargantua'dan çok daha küçük kara deliklerin etrafından yapılacak kütleçekim sapanları.

Miller'ın Gezegenine Sapanla Yolculuk

Yıldızlar ve küçük kara delikler Gargantua gibi dev kara deliklerin etrafında toplaşırlar (bir sonraki bölümde bu konudan bahsedeceğiz). Filmdeki bilim yorumumda ben Cooper ve ekibinin Gargantua'nın yörüngesinde dolanan bütün küçük kara delikleri araştırdıklarını hayal ediyorum. Bunlardan Ranger'ı dairesele yakın yörüngesinden kütleçekimsel olarak saptırmaya ve Miller'ın gezegenine doğru baş aşağı dalacak şekilde yollamaya uygun biçimde konumlanmış olan birini tespit ediyorlar (Şekil 7.2). Bu kütleçekim destekli manevraya "kütleçekim sapan atışı" denir ve

güneş sisteminde NASA tarafından sıkça kullanılmaktadır; şüphesiz ki güneş sisteminde kütleçekim bir kara delikten değil gezegenlerden gelmektedir (bu bölümün sonuna bakınız).

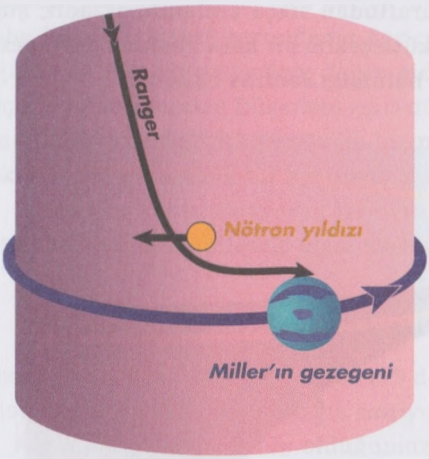


Şekil 7.2: Ranger küçük bir kara deliğin etrafından kendisini aşağıya, Miller'ın gezegenine doğru saptıran bir sapan manevrası gerçekleştirir.

Bu sapan manevrası *Yıldızlararası*'nda görülmez ve bahsi de geçmez ama *bir sonrakinden* Cooper bahseder: "Bakın, hızı düşürmek için bu *nötron yıldızının* etrafından salınabilirim" der. Hız düşürmek gereklidir çünkü Gargantua'nın devasa kütleçekim etkisinin etkisi altında *Endurance*'ın yörüngesinden Miller'ın yörüngesine düşüldüğünde Ranger çok fazla hız kazanmıştır; Miller'ın gezegeninden $c/4$ daha hızlı hareket etmektedir. Şekil 7.3'te Miller'ın gezegenine göre sol yöne doğru ilerleyen nötron yıldızı Ranger'ın hareketini saptırır ve aracı gezegene yumuşak biçimde inmesini sağlayacak şekilde yavaşlatır.

Şimdi bu sapan atışı meselesinin hiç hoş olmayan bir özelliğine gelelim. Hatta öldürücü bir özellik bu: Gelgit kuvvetleri (4. bölüm).

Hızları $c/3$ ya da $c/4$ oranında değiştirmek için Ranger'ın küçük kara deliğin ve nötron yıldızının yoğun kütleçekimlerini hissedecek kadar yakınına gelmesi gerekir. Bu yakın mesafelerde eğer saptırıcı yarıçapı 10.000 kilometreden az bir nötron yıldızı ya da kara delikse, insanlar ve Ranger gelgit kuvvetleri tarafından paramparça edilir (4. Bölüm). Ranger'ın ve insanların hayat-



Şekil 7.3: Bir nötron yıldızının etrafından yapılan sapan manevrası iniş aracının Miller'ın gezegenine ulaşmasını sağlar.

ta kalması için saptırıcı, büyüklüğü en az 10.000 kilometre olan (yaklaşık olarak dünyanın büyüklüğünde) bir kara delik olmalıdır.

Doğada bu büyüklükte kara delikler *vardır*. Bunlara orta kütleli kara delikler ya da IMBH'ler[1] denir ve büyük boyutlarına rağmen bunlar Gargantua'nın yanında çok küçük kalırlar; Gargantua onlardan on bin kat daha büyüktür.

Dolayısıyla Christopher Nolan Ranger'ı yavaşlatmak için bir nötron yıldızı değil, dünya büyüklüğünde bir IMBH kullanmalıydı. Bu konuyu Jonah'ın senaryosunu yeniden yazdığı dönemin başlarında Chris'le konuştum. Konuşmamızdan sonra Chris nötron yıldızını seçti. Neden? Çünkü filmde birden fazla kara delik olmasının izleyici kitlesinin kafasını karıştırmasını istemiyordu. Bir kara delik, bir solucandeliği ve bir de nötron yıldızı, *Yıldızlararası*'nın diğer zengin bilimsel malzemesiyle birlikte hepsi iki saatlik hızlı bir filmde özümsenecekti; Chris tüm bunların altından kalkmayı düşünmüştü. Gargantua'nın yakınına seyretmek için güçlü kütleçekim sapanlarının *gerekli* olduğunu kabul eden Chris bilimsel olarak mantıksız bir saptırıcı (bir kara delik yerine nötron yıldızı) kullanmasının karşılığında, Cooper'ın diyaloğuna bir sapan atışı ifadesi ekledi.

[1] IMBH, "intermediate-mass black hole" [orta kütleli kara delik] ifadesinin İngilizce baş harflerinin kısaltmasıdır –çn.

Galaktik Çekirdeklerin İçinde Orta Kütleli Kara Delikler

10.000 kilometrelik bir IMBH yaklaşık 10.000 güneş kütlesi ağırlığındadır. Bu Gargantua'nın on binde biridir ama tipik bir kara delikten bin kat daha ağırdır. Cooper'ın ihtiyaç duyduğu saptırıcılar bunlardır.

Bazı IMBH'lerin yumru yıldız kümeleri denilen yoğun yıldız kümelerinin merkezi kısımlarında oluştuğu düşünülür ve bazıları da devasa kara deliklerin yer aldığı galaksi çekirdeklerinin içerisine yerleşmiş durumdadır.



Şekil 7.4: *Solda*: Gargantua büyüklüğünde bir kara delik barındıran Andromeda Galaksisi. *Sağda*: Bir IMBH'nin aşama aşama yavaşlayarak dev bir kara deliğin yakınlarına gömülmesini sağlayan dinamik sürtünme.

Bir örnek olarak, bizim galaksimize en yakın büyük galaksi olan Andromeda'nın (Şekil 7.4) çekirdeğinde Gargantua büyüklüğünde bir kara delik saklıdır ve 100 milyon güneş kütlesindedir. Bu kadar devasa kara deliklerin yakınına çekilen yıldız sayısı çok büyük olur; bu kübik ışık yılı[2] başına bin yıldız düşmesi demektir. Bir IMBH bu kadar yoğun bir bölgeden geçtiğinde yıldızları kütleçekimsel olarak saptırır ve arkasında yoğunluğu giderek artan bir girdap yaratır (Şekil 7.4). Girdap IMBH'yi kütleçekimsel olarak

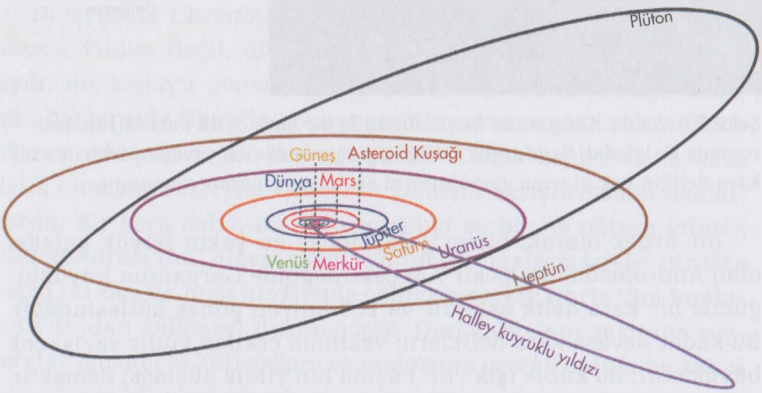
[2] 1 kübik ışık yılı her bir yüzü 10 trilyon kilometre büyüklüğünde bir küptür ve bu $8{,}47\times10^{47}$ m^3 eder –çn.

çeker ve IMBH'nin hızını yavaşlatır; bu sürece "dinamik sürtünme" adı verilir. IMBH çok tedricen yavaşlarken dev kara deliğin çevresine giderek daha fazla gömülür. Bu açıdan bakıldığında benim *Yıldızlararası*'ndaki yorumumda doğa Cooper'a sapan atışları için ihtiyaç duyduğu IMBH'leri sağlayabilir[3].

Üstün Derecede Gelişmiş Uygarlıkların Yörünge Seyri: Bir Ara Başlık

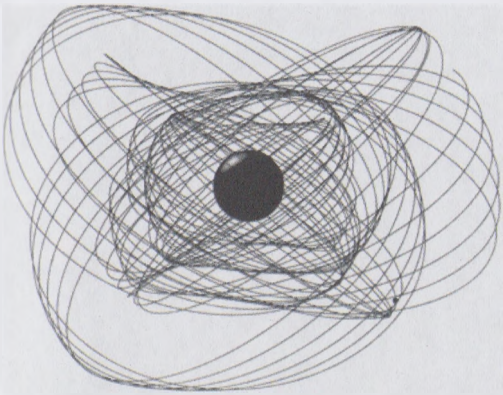
Bizim güneş sistemimizdeki gezegen ve kuyruklu yıldızların yörüngelerinin hepsi çok yüksek kesinlikte elipsler çizmektedir (Şekil 7.5). Newton'ın kütleçekim yasaları bunu güvence altına alır ve dayatır.

Fakat Einstein'ın görelilik yasalarının hâkim olduğu Gargantua gibi devasa bir dönen kara deliğin etrafında yörüngeler çok daha karmaşıktır. Şekil 7.6 buna örnektir. Bu yörünge için Gargantua etrafındaki her bir yolculuk birkaç saat ile birkaç gün arasındadır, dolayısıyla Şekil 7.6'daki tüm bir desenin oluşması yaklaşık bir yılda tamamlanır. Birkaç yıl sonra yörünge, varmak isteyeceğiniz hız istediğiniz gibi olmamış olsa da neredeyse arzu edebileceğiniz bütün istikametlerden geçmiş olur. Hızı değiştirmek ve hedefli bir buluşma sağlamak için muhtemelen bir sapan atışı gerekecektir.



Şekil 7.5: Güneş sistemimizdeki gezegenlerin, Plüton'un ve Halley kuyruklu yıldızının, hepsinin yörüngeleri elipstir.

[3] IMBH'leri ihtiyaç duyulan konum ve zamanlarda bulma olasılığı düşüktür ama fizik yasalarının sınırları içerisinde olduğu için onlardan bilimkurgu ruhuyla faydalanabiliriz.



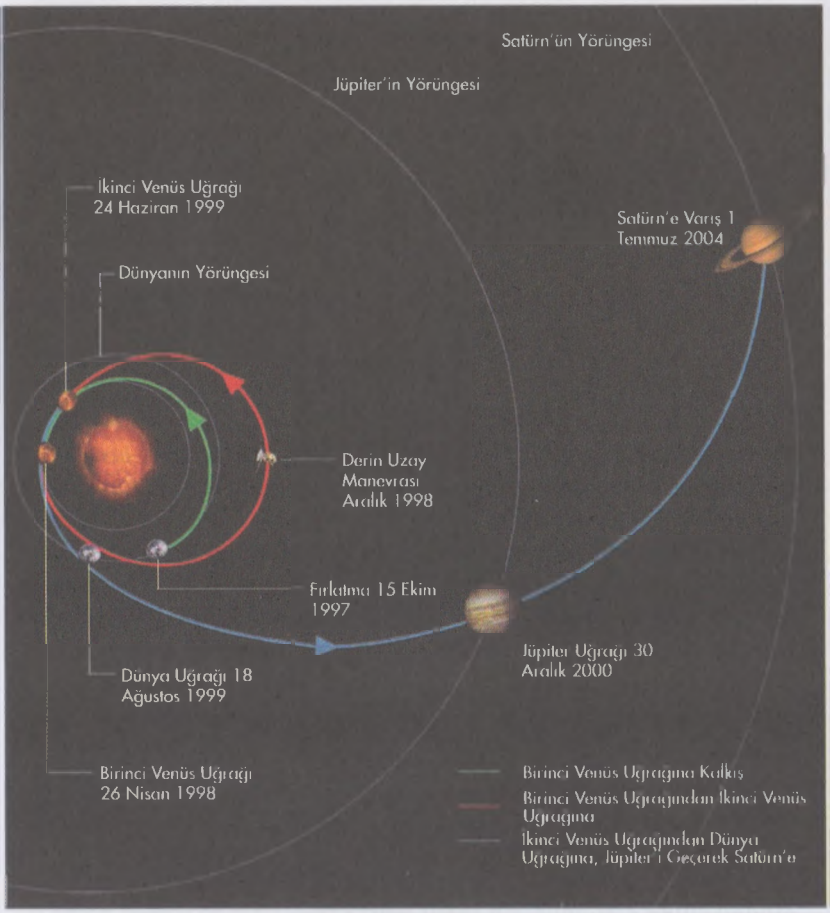
Şekil 7.6: Tek bir uzay aracı, gezegen ya da yıldızın Gargantua gibi hızla-dönen devasa bir kara deliğin etrafındaki yörüngesi. [Steve Drasco'nın bir simülasyonundan alınmıştır.]

Üstün derecede gelişmiş bir uygarlığın bu kadar karmaşık yörüngeleri nasıl kullanabileceğini sizin *hayal gücünüze* bırakıyorum. Film için yaptığım bilimsel yorumlarda sadelik açısından genellikle bunlardan uzak durdum ve öncelikli olarak dairesel, ekvatoral yörüngeler (park eden *Endurance*'ın ve Miller'ın gezegeninin yörüngesi ve kritik yörünge böyledir) ve *Endurance* bir dairesel ekvatoral yörüngeden diğerine seyahat ederken olduğu gibi basit yörüngeler üzerinde durdum. Bir kuraldışı örnek Mann'ın gezegeninin yörüngesi oldu, onu da 19. Bölümde ele alacağız.

NASA'nın Güneş Sisteminde Kullandığı Kütleçekim Sapanları

Şimdi mümkün olanın (fizik yasalarının izin verdiklerinin) dünyasından güneş sistemimizin rahat sınırları içerisinde gerçek hayatta karşılaştığımız tartışmasız kütleçekim sapanlarına (2014 yılı itibarıyla insanların gerçekten başarmış olduklarına) dönelim.

NASA'nın *Cassini* uzay aracını duymuş olabilirsiniz (Şekil 7.7). Dünyadan 5 Ekim 1997 tarihinde deposunda varış yeri olan Satürn'e ulaşmasına yetmeyecek kadar az bir yakıtla kalkış yapmıştı. Aradaki açık sapan atışlarıyla kapatıldı: Sırasıyla Venüs etrafında 26 Nisanda; ikinci bir sapan atışı yine Venüs etrafında 24 Temmuz 1999'da, dünya etrafında 18 Ağustos 1999'da ve Jüpiter etrafında 30 Aralık 2000'de gerçekleşti. 1 Temmuz 2004'te Satürn'e ulaşan *Cassini* Satürn'ün en yakın ayı İo'nun etrafından yaptığı sapan atışının yardımıyla yavaşladı.



Şekil 7.7: Cassini'nin dünyadan Satürn'e giderken izlediği yol.

Bu sapan atışlarının hiçbiri benim yukarıda anlattıklarıma benzemiyordu. Uzay aracının hareket yönünü güçlü biçimde saptırmak yerine Venüs, dünya, Jüpiter ve İo onu yolundan gayet hafif biçimde saptırdılar. Neden?

Saptırıcıların kütleçekimi, güçlü bir saptırma üretmekten çok uzak bir zayıflıktaydı. Venüs, dünya ve İo açısından sapma ister istemez küçük kalacaktı çünkü kütleçekimleri doğal olarak zayıftı. Jüpiter çok daha yeğin bir kütleçekimine sahiptir ama büyük

bir sapma *Cassini*'yi yanlış yöne saptırabilirdi; Satürn'e ulaşmak için küçük bir sapma gerekiyordu.

Sapmaların küçüklüğüne rağmen *Cassini* bu yakın uçuşlardan yakıtının yetersizliğini gidermesine yetecek büyüklükte bir itki sağladı. *Cassini* yakın uçuşların her birinde (İo hariç) saptıran gezegenin arkasından ama belli bir açıyla seyretti, böylece gezegenin kütleçekimi *Cassini*'yi optimal biçimde ileriye çekerek hızlandırdı. *Yıldızlararası*'nda *Endurance* da Mars'ın etrafında benzer bir sapan atışı yapıyor.

Cassini Satürn'ü ve Satürn'ün aylarını son on yıldır keşfediyor ve bize müthiş görüntü ve bilgiler yolluyor, sahipsiz bir güzellik ve bilim hazinesi sunuyor. Göz atmak isterseniz *bkz.* http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/main/.

Güneş sistemindeki bu zayıf sapan atışlarının aksine Gargantua'nın yoğun kütleçekimi aşırı yüksek hızlarda hareket eden cisimleri bile yakalayabilir ve onları güçlü biçimde gerilmiş sapan atışlarıyla etrafa fırlatabilir. Bunu bir ışık ışınına bile yapabilir. İşte bu da Gargantua'yı görmenin anahtarı olan kütleçekimsel merceklenmeye sebep olur.

8

GARGANTUA'YI GÖRÜNTÜLEMEK

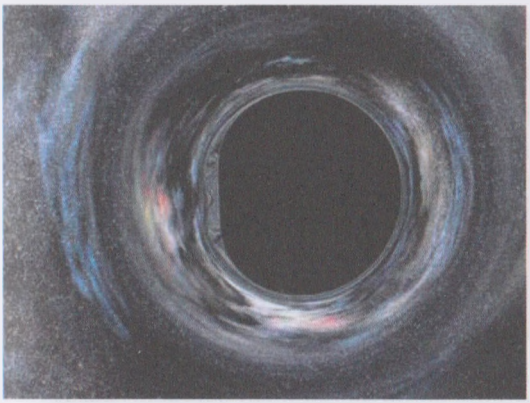
Ⓓ

Kara delikler ışığı salmaz, bu yüzden Gargantua'yı görmenin tek yolu diğer cisimlerden gelen ışık üzerindeki etkisine bakmaktır. *Yıldızlararası*'ndaki diğer cisimler bir birikim [akresyon] diski (9. Bölüm) ve onun içerisinde yaşadığı –bulutsular ve zengin bir yıldızlar alanını da içeren– galaksidir. Sadelik amacıyla bundan sonrasında sadece yıldızları hesaba katalım.

Gargantua yıldızların alanına siyah bir gölge düşürür; bununla da kalmaz, her bir yıldızın ışık ışınlarını saptırarak kameranın gördüğü yıldız örüntüsünün şeklini bozar. Bu tahribat 3. Bölümde bahsedilen kütleçekimsel merceklenmedir.

Şekil 8.1 bir yıldızlar alanının önünde hızla dönen bir kara deliği (adına Gargantua diyelim) Gargantua'nın ekvator düzleminde olsaydınız size gözükeceği biçimiyle göstermektedir. Gargantua'nın gölgesi tamamen siyah olan bölgedir. Gölgenin kenarının hemen dışındaki, benim gölgenin kenarının daha ayrıksı gözükmesi için kalemle üzerinden geçtiğim çok ince yıldız ışığı halkasına "ateş halkası" denmektedir. Bu halkanın dışında merkezdeş kabuklardan oluşan bir örüntüye sahip yoğun biçimde serpilmiş yıldızları görüyoruz; bu örüntüyü kütleçekimsel merceklenme yaratmıştır.

Kamera Gargantua'nın çevresinde hareket ettikçe yıldız alanı da hareket ediyor gibi gözükür. Merceklenmeyle bağlantılı bu hareket ışık örüntülerinin çarpıcı biçimde değişmesini sağlar. Yıldızlar bazı bölgelerde yüksek hızda akarken, bazılarında hafifçe dalgalanır, bazı bölgelerde de donmuştur; bu konuda bu kitabın Interstellar.withgoogle.com adresindeki sayfasında yer alan film görüntüsüne bakınız.



Şekil 8.1: Gargantua gibi hızla dönen bir kara deliğin etrafında kütleçekimsel olarak merceklenen yıldız örüntüsü. Uzaktan bakıldığında gölgenin radyan cinsinden ölçülen açısal çapı, 9 Gargantua yarıçapı bölü gözlemcinin Gargantua'dan uzaklığıdır. [Double Negative görsel efektler ekibinin bir simülasyonundan alınmıştır.]

Bu bölümde gölge ve ateş halkasından başlayarak bütün bu özellikleri açıklayacağım. Ardından da *Yıldızlararası*'ndaki kara delik görüntülerinin nasıl yaratıldığını anlatacağım.

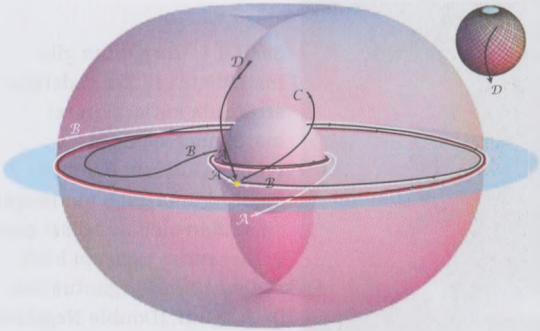
Bu bölümde Gargantua'ya görüntü kazandırırken onu hızla dönen bir kara delik olarak ele alıyorum, çünkü *Endurance* mürettebatının dünyaya göreli olarak aşırı bir zaman kaybı yaşamasının sağlanması için böyle olması gerekiyor (6. Bölüm). Fakat bu hızlı dönmede Gargantua'nın gölgesinin sol kenarındaki düzleşme (Şekil 8.1) ve yıldız akıntısı ile birikim diskinin bazı sıra dışı özellikleri izleyici kitlesinin kafasını karıştırabilirdi, bu yüzden Christopher Nolan ve Paul Franklin filmdeki Gargantua görüntüleri için daha küçük, maksimumun yüzde 60'ı düzeyinde bir dönme seçtiler. Bu konuda 9. Bölümün son kısmına bakabilirsiniz.

Uyarı: Bundan sonraki üç alt başlıkta yer alan açıklamalar çok fazla düşünmeyi gerektirebilir, bunları atlayabilir ve kitabın geri kalanına devam edebilirsiniz. Sorun değil!

Gölge ve Ateş Halkası

Gargantua'nın gölgesinin ve onun yanındaki ince ateş halkasının ortaya çıkışında en önemli rolü ateşten kabuk (6. Bölüm) oynuyor. Ateşten kabuk Şekil 8.2'de Gargantua'yı çevreleyen mor bölgedir ve sağ üst resimdeki gibi tutsak düşmeye yaklaşmış foton yörüngelerini (ışık ışınlarını) içerir.[1]

[1] *Bkz.* Şekil 6.4 ve 6.5



Şekil 8.2: Gargantua (merkezdeki küremsi), onun ekvator düzlemi (mavi), ateşten kabuğu (mor ve eflatun) ve gölgenin kenarının ve yanındaki ince halkanın görüntülerini size getiren siyah ve beyaz ışık ışınları.

Sarı noktayla işaretlediğim yerde olduğunuzu varsayın. Beyaz ışık ışınları A ve B ve onlara benzeyen diğerleri size ateş halkası görüntüsünü sağlar; siyah ışık ışınları A ve B ise size gölgenin kenarının görüntüsünü sağlar. Örneğin beyaz ışın A kaynağını Gargantua'dan uzak bir yıldızdan alır, içe doğru gider ve Gargantua'nın ekvator düzleminde ateşten kabuğun iç kenarında yakalanır, burada uzayın dönmesi nedeniyle döne döne uçmaya başlar, ardından kaçar ve gözlerimize gelir. Yine A ile gösterilmiş siyah ışınsa kaynağını Gargantua'nın olay ufkundan alır, dışa doğru gider ve ateşten kabuğun aynı iç kenarında tuzağa düşer, burada dönerek uçuşmaya başlar, ardından kaçar ve beyaz ışın A'nın yanında o da gözlerimize ulaşır. Beyaz ışın size ince halkanın bir zerresinin görüntüsünü getirir; siyah ışınsa gölgenin kenarının bir zerresinin görüntüsünü. Işınları yan yana birleştirip gözlerimize yönlendiren ise ateşten kabuktur.

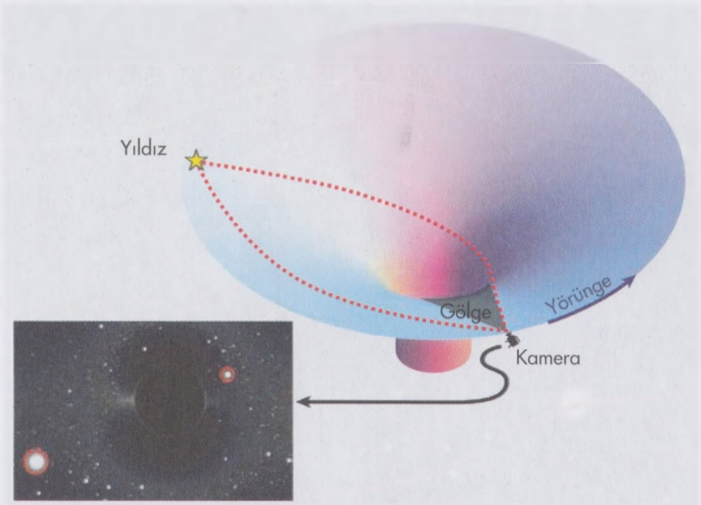
Beyaz ve siyah B ışınlarında da durum benzerdir; tek fark A ışınları saat yönünün tersine giderken (ve uzayın dönmesinin desteğini alarak) iç kenarda tutsak düşerken, B ışınlarının ateşten kabuğun dış kenarına saat yönünde giderken (uzayın dönmesine karşı mücadele ederken) tutsak düşmeleridir. Şekil 8.1'de görülen gölgenin sol kenarındaki düzleşme ve sağ kenarındaki yuvarlaklaşmanın nedeni, ateşten kabuğun iç kenarından ve ufkun çok yakınından gelen A ışınları ve ateşten kabuğun dış kenarından ve çok daha dışarıdan gelen B ışınlarıdır.

Şekil 8.2'deki siyah ışınlar ufukta başlar, dışarıya doğru ilerler, ateşten kabuğun içindeki ekvatoral olmayan yörüngelere kapılır,

ardından tutsak düştükleri yörüngelerden kaçarak gözlerimize ulaşır ve ekvator düzleminin dışında yer alan gölge kenarının zerrelerinin görüntülerini getirirler. D ışınının tutsak düştüğü yörünge üst sağ küçük resimde gösterilmiştir. Uzak yıldızlardan gelen beyaz C ve D ışınları (gösterilmemiştir) siyah C ve D ışınlarının yanında yakalanır ve C ve D'nin yanında gözlerinize gelerek gölge kenarının zerrelerinin yanı sıra ateşten kabuğun zerrelerinin görüntülerini getirmiş olurlar.

Dönmeyen Bir Kara Delik Tarafından Merceklenme

Gölgenin dışındaki kütleçekimsel olarak merceklenmiş yıldızların örüntüsünü ve kamera hareket ettikçe akışlarını anlamak için dönmeyen bir kara deliği ve tek bir yıldızdan yayılan ışık ışınlarını ele alarak başlayalım (Şekil 8.3). Yıldızdan kameraya iki ışık ışını gidiyor. Her ikisi de deliğin bükülmüş uzayında izleyebilecekleri en düz yoldan ilerliyor fakat bükülme nedeniyle iki ışın da bükülüyor.

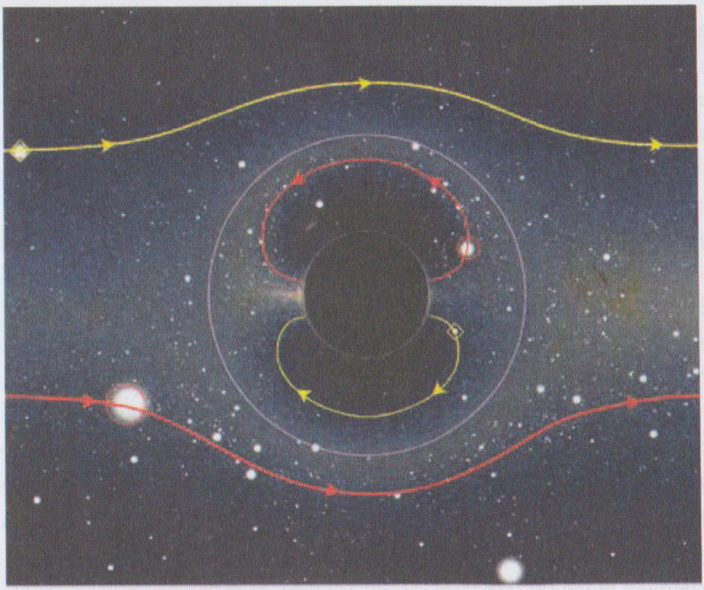


Şekil 8.3 *Üstte*: Yığından görüldüğü şekliyle dönmeyen bir kara deliğin etrafındaki bükülmüş uzay ve bir yıldızdan kameraya bükülmüş uzayın içerisinden giden iki ışık ışını. *Altta:* Kameranın gördüğü kütleçekimsel olarak merceklenmiş yıldız örüntüsü. [Alain Riazuelo'nun bir simülasyonundan alınmıştır; simülasyonunun filmdeki görüntülerinden oluşan bir klip için *bkz.* www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar.]

Bükülen ışınlardan biri kameraya deliğin sol tarafını dolaşarak giderken, diğeri sağ tarafından gider. Her ışın kameraya kendi yıldız görüntüsünü getirir. İki görüntü kameranın gördüğü biçimiyle Şekil 8.3'teki ek resimde gösterilmiştir. Kameranın gördüğü diğer yıldızlardan ayırmak için onları kırmızı yuvarlakla işaretledim. Sağdaki görüntünün deliğin gölgesine soldakinden çok daha yakın olduğuna dikkat edin. Bunun nedeni onun bükülen ışınının deliğin olay ufkunun daha yakınından geçmiş olmasıdır.

Diğer yıldızların her biri resimde iki kez, deliğin gölgesinin iki zıt tarafında görünür. Çiftlerin bazılarını siz de görebiliyor musunuz? Kara deliğin gölgesi resimde kameraya hiçbir ışının gelemeyeceği yönlerden oluşur; üst çizimdeki "gölge" olarak işaretlenen üçgen şeklindeki bölgeye bakın. Gölgenin içinde "olmak isteyen" ışınların hepsi kara delik tarafından yakalanır ve yutulur.

Kamera yörüngesinde (Şekil 8.3) sağa doğru hareket ettikçe, kameranın gördüğü yıldız örüntüsü Şekil 8.4'te gösterildiği biçimde değişir.



Şekil 8.4: Şekil 8.3'teki yörüngesinde sağa doğru hareket edince kameranın gördüğü değişen yıldız örüntüsü. [Alain Riazuelo'nun simülasyonundan alınmıştır; *bkz.* www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar.]

Bu şekil iki yıldızı özellikle öne çıkarmaktadır. Biri kırmızı daireyle gösterilmiştir (Şekil 8.3'te işaretlenen aynı yıldızdır). Diğeri sarı elmas şeklinin içindedir. Her yıldızın iki görüntüsünü görmekteyiz: Bir görüntü pembe çemberin dışında, diğeri pembe çemberin içindedir. Bu pembe çembere "Einstein halkası" denmektedir.

Kamera sağa doğru gittikçe görüntüler sarı ve kırmızı eğriler boyunca hareket eder.

Einstein halkası dışındaki yıldız görüntüleri (bunlara birincil görüntüler diyelim) beklendiği biçimde hareket ederler: Soldan sağa yumuşak biçimde ama hareket ettikçe de kara delikten uzağa doğru saparak. (Sapmanın neden deliğe doğru değil de ondan *uzağa doğru* olduğunu düşünerek bulabiliyor musunuz?)

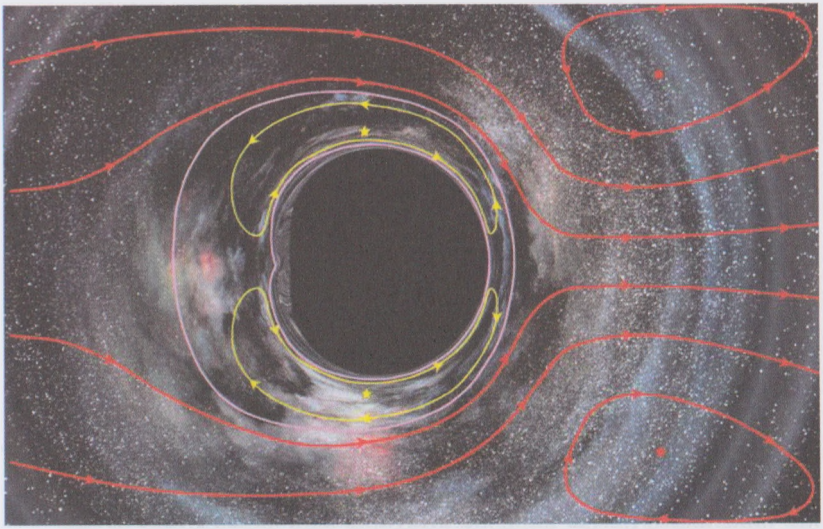
Fakat ikincil görüntüler, Einstein halkasının içindekiler beklenmedik bir tarzda hareket eder: Gölgenin sağ kenarından ortaya çıkmış gibi görünür, gölge ile Einstein halkası arasındaki halkanın içine doğru ilerler, gölgenin etrafında sola doğru sıçrar ve yeniden gölgenin kenarına doğru inerler.

Bunu Şekil 8.3'teki üstteki çizime geri dönerek anlayabilirsiniz. Sağdaki ışın kara deliğin yakınından geçer, dolayısıyla sağ yıldız görüntüsü onun gölgesinin yakınındadır. Zamansal olarak daha öncesinde, kamera daha sol taraftayken sağ ışının daha güçlü bükülmesi ve kameraya ulaşması için kara deliğin daha da yakınından geçmesi gerekiyordu, dolayısıyla sağdaki görüntü gölgenin kenarına çok yakındı. Öte yandan zamansal olarak daha öncesinde soldaki ışın deliğin görece daha uzağından geçmişti ve dolayısıyla neredeyse düzdü ve delikten görece daha uzak bir görüntü üretti.

Şimdi eğer hazırsanız Şekil 8.4'te gösterilen görüntülerin sonraki hareketlerini düşünebilirsiniz.

Hızla Dönen Bir Kara Delik Tarafından Merceklenme: Gargantua

Gargantua'nın kendi etrafında çok hızlı dönmesinin yarattığı uzay dönmesi kütleçekimsel merceklenmeyi değiştirir. Şekil 8.1'deki yıldız örüntüleri (Gargantua) Şekil 8.4'tekilerden (dönmeyen bir kara delik) daha farklı görünür, akış örüntüleriyse daha da farklılaşır.



Şekil 8.5: Gargantua gibi hızla dönen bir kara deliğin yakınındaki bir kameranın gördüğü şekliyle yıldız akış örüntüleri. Double Negative görsel efektler ekibinin bu simülasyonunda delik mümkün olan en yüksek hızın yüzde 99,9'u bir hızla dönmekte ve kamera çevre uzunluğu, ufkun çevre uzunluğundan altı kat daha büyük olan çembersel, ekvatoral bir yörüngededir. Bu simülasyonun film klibi için *bkz.* bu kitabın Interstellar.withgoogle.com'daki sayfası.

Gargantua'da akış (Şekil 8.5) pembe eğrilerle gösterilen iki Einstein halkasının varlığını ortaya çıkartır. Dış halkanın dış tarafında (örneğin iki kırmızı eğri boyunca) yıldızlar sağa doğru bir akış gösterir; Şekil 8.4'teki dönmeyen kara delikte de durum aynıdır. Fakat uzay burgacının akışı deliğin gölgesinin arka kenarında uzanan daralmış yüksek hızlı şeritlerde toplamıştır ve şeritler ekvatorda biraz keskince bükülür. Ayrıca dönme akışta anaforlar yaratmıştır (kapalı kırmızı eğriler).

Her bir yıldızın ikincil görüntüsü iki Einstein halkası arasında karşımıza çıkar. İkincil görüntülerin her biri kapalı bir eğri boyunca hareket eder (örneğin iki sarı eğri) ve dış halkanın dış tarafında kırmızı akış hareketlerinin zıt yönünde dolaşım gösterir.

Gargantua'nın gökyüzünde kütleçekimsel merceklenmenin geçersiz olduğu çok özel iki yıldız vardır. Biri Gargantua'nın kuzey kutbunun hemen üzerinde, diğeri güney kutbunun hemen altında

yer alır. Bunlar dünyanın kuzey kutbunun hemen üstünde yer alan Polaris yıldızının[2] analoglarıdır. Gargantua'nın kutup yıldızlarının birincil (kırmızı) ve ikincil (sarı) görüntüleri üzerine beş köşeli yıldızlar koydum. Biz insanlar dünyanın dönme hareketi tarafından taşındıkça dünyanın gökyüzündeki bütün yıldızlar Polaris'in etrafında dönüyor gibi gözükür. Kamera deliğin etrafındaki yörüngesinde ilerledikçe Gargantua'nın birincil yıldız görüntüleri de benzer biçimde kırmızı kutup yıldızı görüntüleri etrafında dolaşır ama dolaşım yolları (örneğin kırmızı girdaplı iki eğri) uzayın burgacı ve kütleçekimsel merceklenme tarafından son derece çarpıtılır. Benzer biçimde ikincil yıldız görüntülerinin hepsi de sarı kutup yıldızı görüntüleri etrafında (örneğin çarpıtılmış iki sarı eğri boyunca) döner.

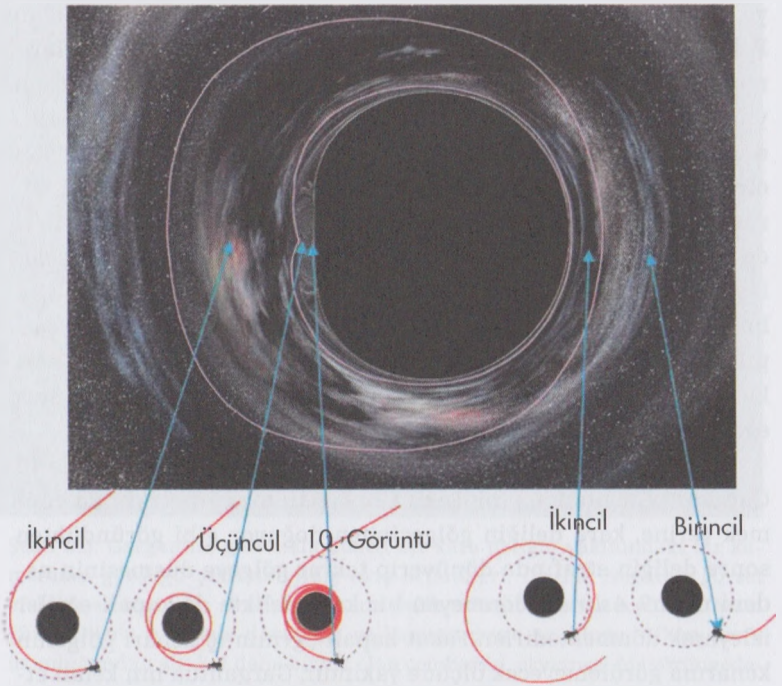
Dönmeyen bir kara delikte (Şekil 8.4) ikincil görüntülerin Gargantua'da olduğu gibi (Şekil 8.5) kapalı bir eğri etrafında dönmek yerine, kara deliğin gölgesinden doğuyor gibi göründükten sonra deliğin etrafında dönüverip tekrar gölgeye düşmesinin nedeni nedir? *Aslında* dönmeyen bir kara delikte de kapalı eğriler izleyerek dönmektedirler. Fakat kapalı eğrinin iç kenarı gölgenin kenarına görülemeyecek ölçüde yakındır. Gargantua'nın kendi etrafındaki dönmesi uzay burgacını sağlar ve bu dönme iç Einstein halkasını dışa doğru hareket ettirir, böylece ikincil görüntülerin tam dolaşımlı örüntüsünü (Şekil 8.5'teki sarı eğriler) ve iç Einstein halkasını ortaya çıkartır.

İç Einstein halkasının içinde akış örüntüsü daha karmaşıktır. Bu bölgedeki yıldızlar evrendeki yıldızların hepsinin üçüncül ve yüksek dereceden görüntüleridir; aynı yıldızlar dış Einstein halkasının dışında birincil görüntüler ve Einstein halkalarının arasında ikincil görüntüler olarak gözükürler.

Şekil 8.6'da Gargantua'nın ekvatoral düzleminde beş küçük resim gösteriyorum; Gargantua'nın kendisi siyah, kameranın yörüngesi kesik çizgili mor ve bir ışık ışını kırmızı renktedir. Işık ışını kameraya mavi okun ucundaki yıldız görüntüsünü getiriyor. Kamera Gargantua'nın etrafında saatin ters yönünde hareket ediyor.

---

[2] Halk arasında Kutup yıldızı, Demirkazık, Kuzey yıldızı adlarıyla tanınan, Küçükayı takımyıldızının en parlak yıldızı –çn.



Şekil 8.6: Mavi okların ucundaki yıldızların görüntülerini getiren ışık ışınları. [*Şekil 8.1 ve Şekil 8.5'teki gibi yine bir Double Negative simülasyonundan alınmıştır.*]

Tek tek bu resimleri inceleyerek kütleçekimsel merceklenme konusunda epey bir bilgi edinebilirsiniz. Şuna dikkat edin: Yıldıza giden gerçek yön yukarı ve sağa doğrudur (kırmızı ışınların dış taraftaki uçlarına bakın). Kamera ve her bir ışının başlangıcı yıldız görüntüsüne işaret ediyor. Onuncu görüntü gölgenin sol kenarına çok yakın ve sağdaki ikincil görüntü sağ kenarın yanındadır; kameranın hareketlerini bu görüntülerle karşılaştırma yoluyla gölgenin yukarıya doğru olan yönde yaklaşık 150 dereceye denk geldiğini görüyoruz. Bu kameradan Gargantua'nın merkezine olan gerçek yön, sola ve yukarıya doğru olmasına karşın böyledir. Merceklenme gölgeyi Gargantua'nın gerçek yönüne göreli olarak hareket ettirmiştir.

Yıldızlararası'ndaki Kara Deliğin ve Solucandeliğinin Görsel Efektlerinin Yaratılması

Chris Gargantua'nın dönen bir kara deliğe yakından bakıldığında *gerçekte* nasıl görünüyorsa öyle gözükmesini istedi, bu yüzden Paul'e bana danışmasını söyledi. Paul de beni Londra'daki görsel efektler stüdyosu Double Negative'de topladığı ekiple bağlantıya geçirdi.

Ekibin baş bilimcisi Oliver James'le yakın bir çalışma yürütmek bana heyecan verdi. Oliver'la telefon ve Skype'la konuştuk, elektronik dosya ve e-postalaştık ve Los Angeles'ta ve onun Londra'daki ofisinde buluştuk, yüz yüze konuştuk. Oliver üniversitede optik ve atom fiziği alanlarında eğitim almıştı ve Einstein'ın görelilik yasalarını anlıyordu, dolayısıyla ikimiz aynı teknik dili konuşuyorduk.

Fizikçi meslektaşlarım içerisinde daha önce bir kara deliğin yörüngesinde dolanırken, hatta içerisine düşülürken nelerin görüleceğinin bilgisayar simülasyonlarını yapmış olanlar vardı. Aralarında en uzman olanları Paris'teki Institut d'Astrophysique'den Alain Riazuelo ve Boulder'daki Colorado Üniversitesinden Andrew Hamilton'dı. Andrew dünyanın birçok yerindeki gökevlerinde gösterilen kara delik filmleri yaratmış ve Alain de Gargantua gibi çok çok hızlı dönen kara deliklerin simülasyonunu yapmıştı.

Bu yüzden ilk başta Oliver'ı Alain ve Andrew'la ilişkiye geçirmeyi ve onlardan Oliver'ın ihtiyaç duyduğu girdileri sağlamalarını istemeyi planladım. Birkaç gün boyunca bu kararımdan rahatsız düşünüp durdum ve ardından fikrimi değiştirdim.

Yarım yüzyıllık fizik kariyerim boyunca yeni keşifleri kendim yapmak ve öğrencilerim yeni keşifler yaparken onlara yol göstermek için az emek harcamadım. Benden önce başkaları yapmış olsa da, bir kez olsun bir şeyi sadece eğlenceli olduğu için neden yapmayayım diye sordum kendime. Böylece kendim yapmaya karar verdim. Ve ilginçtir, bir yan ürün olarak bu çaba yeni (mütevazı) keşiflere sebep oldu.

Einstein'ın görelilikçi fizik yasalarını kullanarak ve büyük oranda başkalarının daha önceki çalışmalarına (özellikle Fransa'daki Laboratoire Univers et Théories'den Brandon Carter'ın ve Columbia Üniversitesinden Janna Levin'in çalışmalarına) dayanarak Oliver'ın ihtiyaç duyduğu denklemleri hesapladım. Bu

denklemler belli bir ışık kaynağından, örneğin uzak bir yıldızdan kaynaklanan ve Gargantua'nın bükülmüş uzay ve zamanının içinden geçerek kameraya ulaşan ışık ışınlarının izlediği yolları hesaplıyordu. Ardından denklemlerim bu ışık ışınlarından sadece ışığın kaynaklarını ve Gargantua'nın uzay ve zamanı bükmesini değil, kameranın Gargantua'nın etrafındaki hareketini de hesaba katarak kameranın gördüğü görüntüleri hesaplıyordu.

Denklemleri elde ettikten sonra bu kez Mathematica adlı uygulayıcı dostu bir bilgisayar yazılımını kullanarak sayıları yerine bizzat yerleştirip görüntüleri çıkardım. Benim Mathematica bilgisayar koduyla elde ettiğim görüntüleri Alain Riazuelo'nun görüntüleriyle karşılaştırdım ve birbirleriyle uyuştuklarını gördüğümde sevinçten havalara uçtum. Ardından denklemlerimin ayrıntılı betimlemelerini kâğıda döküp bunları Matematica kodumla birlikte Londra'daki Oliver'a gönderdim.

Benim kodum çok yavaştı ve çözünürlüğü de düşüktü. Oliver'ın aşması gereken zorluk, benim denklemlerimi filmde ihtiyaç duyulan son derece yüksek kaliteli IMAX görüntüleri yaratabilecek bilgisayar koduna çevirmekti.

Oliver ve ben bu problemi adım adım çözdük. Dönmeyen bir kara delik ve hareket etmeyen bir kamerayla işe başladık. Ardından buna kara deliğin dönmesini ekledik. Onun ardından kameranın hareketini ekledik: İlk hareket çembersel bir yörüngeye oturtmak, ardından bir kara deliğin içine daldırmaktı. Sonra da bir solucandeliğinin etrafındaki kameraya geçtik.

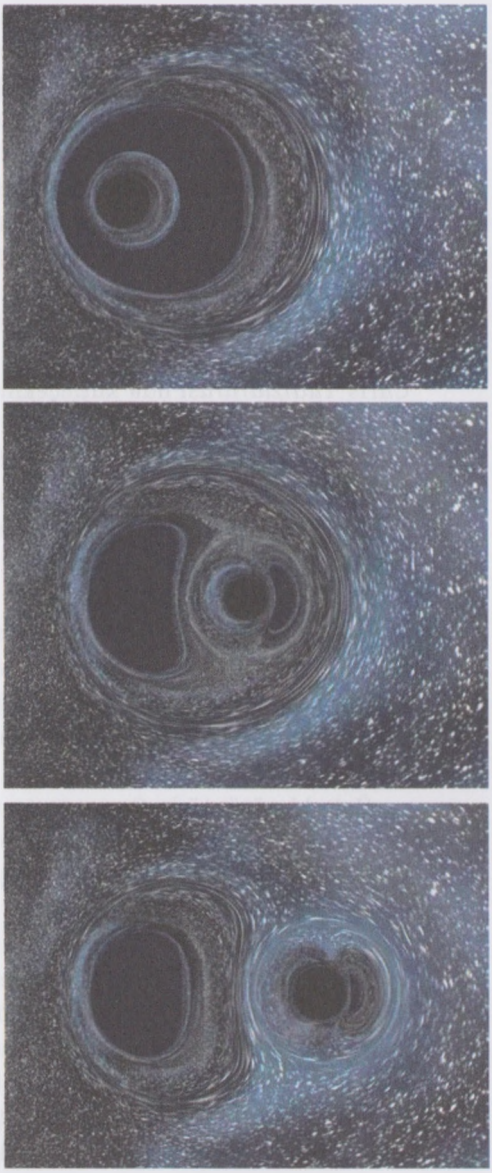
Bu noktada Oliver bombayı patlattı: Daha incelikli bazı efektleri modellemek için sadece bir ışık ışınının izlediği yolu betimleyen denklemlere değil, aynı zamanda ışık ışını kesitinin kara delikten geçme yolculuğu sırasında boyutları ve şeklinin nasıl değiştiğini gösteren denklemlere de ihtiyacı vardı.

Bunun nasıl yapılacağını az çok biliyordum ama denklemler korkunç şekilde karmaşıktı ve hata yapmaktan korkuyordum. Bu yüzden teknik literatürü araştırdım ve gereken denklemleri 1977 yılında Serge Pineault ve Rob Roeder'in Toronto Üniversitesinde tam da benim ihtiyacım olan denklemlere yakın biçimde çıkarmış olduklarını gördüm. Kendi aptallıklarımla üç hafta kadar boğuştuktan sonra onların denklemlerini tam ihtiyaç duyulan forma so-

kabildim, Mathematica'ya yükledim ve bunları kendi bilgisayar kodunda birleştirecek olan Oliver için hazır hale getirdim. Böylelikle en sonunda onun kodu film için gereken kalitede görüntüleri yaratabilirdi.

Double Negative'de Oliver'ın bilgisayar kodu henüz daha başlangıç demekti. Kodu Eugénie von Tunzelmann'ın liderliğindeki sanat ekibine aktardı, onlar da bir birikim diski eklediler (9. Bölüm) ve Gargantua'nın mercekleyeceği yıldızları ve bulutsularıyla birlikte arka plan galaksisini yarattılar. Ardından ekip *Endurance*'ı, Rangerları ve iniş araçlarını ve kamera animasyonunu (değişen hareketini, yönünü, görüntü alanını vs) eklediler ve görüntüleri son derece etkili formların içerisine yerleştirdiler: Filmde karşımıza çıkan olağanüstü sahnelere dönüştürdüler. Bu konuda daha ayrıntılı bir ele alış için 9. Bölüme bakabilirsiniz.

Bu arada ben Oliver ve Eugénie'nin bana yollamış olduğu yüksek çözünür-



Şekil 8.7: Arka planda Gargantua varken bir IMBH kullanarak yapılan kütleçekim sapan atışı. [Benim kendi simülasyon ve görselleştirmemdir.]

lükteki film klipleri üzerinde kafa patlatıyor, görüntülerin neden böyle göründüğü ve yıldız alanlarının neden böyle aktığı konusunda bir kavrayış geliştirmeye uğraşıyordum. Bu film klipleri benim için deneysel veri gibiydi: Bu simülasyonlar, olmasalar benim kendi başıma asla düşünerek bulamayacağım şeyleri açığa çıkarıyorlardı; örneğin bir önceki kısımda anlattığım şeyleri (Şekil 8.5 ve 8.6). Bu arada yeni öğrendiğimiz şeyleri anlatan birkaç teknik makale yayımlamayı da planladık.

Kütleçekim Sapanı

Chris *Yıldızlararası*'nda kütleçekimsel bir sapan atışı göstermemeye karar vermiş olsa da Ranger'ı Miller'ın gezegenine doğru ilerletirken bunun Cooper'a nasıl görüneceğini merak ediyordum. Bu yüzden denklemlerimi ve Mathematica'yı kullanarak simüle edilmiş görüntüler yarattım. (Benim görüntülerimin çözünürlüğü kodumun yavaşlığı nedeniyle Oliver ve Eugénie'kilerden çok daha düşük yoğunluktaydı.)

Şekil 8.7 benim *Yıldızlararası*'ndaki bilimsel yorumumla Cooper'ın Ranger'ının Miller'ın gezegenine doğru inişini başlatmak için orta kütleli bir kara deliğin (IMBH) etrafından savrulmasının bir dizi görüntüsünü gösteriyor. Bu Şekil 7.2'de anlatılan sapan atışıdır.

Üstteki görüntüde Gargantua arka plandadır ve IMBH onun önünden geçmektedir. IMBH Gargantua'ya doğru yönelmiş uzak yıldızların ışık ışınlarını yakalar, ışınları kendi etrafında döndürür ve kameraya doğru fırlatır. Bu IMBH'nin gölgesinin etrafındaki yıldız ışığı halkasını açıklamaktadır. IMBH Gargantua'dan bin kat daha küçük olmasına rağmen Ranger'a Gargantua'dan çok daha yakındır, sadece biraz daha küçük gözükmesi bu yüzdendir.

Sapan atışıyla hareket eden kameranın gördüğü şekliyle IMBH sağa doğru hareket ediyor gibi gözükürken Gargantua'nın birincil gölgesini kendi arkasında bırakır (Şekil 8.7'de ortadaki resim) ve kendisinin önünde Gargantua'nın ikincil bir görüntüsünü yaratır. Bu iki görüntü bir kara deliğin kütleçekimsel olarak merceklediği bir yıldızın birincil ve ikincil görüntüleriyle tamamen benzerlik içerisindedir; fakat şimdi merceklenen Gargantua'nın gölgesi,

mercekleyen de IMBH'dir. En alttaki resimde IMBH ileriye doğru hareket ettikçe ikincil gölgenin boyutları küçülmektedir. Bu kez sapan atışı neredeyse tamamlanmıştır ve Ranger'ın üzerindeki kamera aşağıya, Miller'ın gezegenine doğru yönelmiştir.

Bu görüntüler tüm etkileyiciliklerine karşın yalnızca IMBH'ye ve Gargantua'ya çok yakınken görülebilir, dünyanın sahip olduğu mevcut devasa mesafeden görülemezler. Dünyadaki astronomlar açısından dev kara delikler konusunda görsel olarak en etkileyici şeyler, onlardan dışarı çıkan püskürmeler ve etraflarında yörüngede hareket eden parlak sıcak gaz disklerinin ışığıdır. Şimdi bunları ele alacağız.

9

DİSKLER VE PÜSKÜRMELER

Kuasarlar

Radyo teleskoplarla görülen cisimlerin çoğu muazzam gaz bulutları, yıldızlardan çok daha büyük bulutlardır. Fakat 1960'lı yılların başlarında çok küçük yeni cisimler de bulundu. Gökbilimciler bu cisimlere "yıldız benzeri radyo kaynakları[1]" sözünün kısaltmasından türetilen *kuasarlar* adını verdi.

1962 yılında Caltech astronomlarından Maarten Schmidt, Palomar dağındaki dünyanın en büyük optik teleskobundan bakarken 3C273 adındaki bir kuasardan gelen ışığı keşfetti. Zayıf bir püskürme yapan parlak bir yıldız gibi görünüyordu (Şekil 9.1). Ve bu çok garipti!

Schmidt 3C273'ün ışığını (zaman zaman ışığın bir prizmadan geçirilmesiyle yapıldığı üzere) sahip olduğu çeşitli renklere ayırdığında Şekil 9.1'in altında gösterilen tayf çizgilerini gördü. İlk bakışta bunlar şimdiye dek gördüğü hiçbir tayf çizgisine benzemiyordu. Birkaç aylık çalışmanın ardından 1963 yılının Şubat ayında çizgilerin hiçbir şeye benzememesinin nedeninin dalga boylarının normalden yüzde 16 daha büyük olmasından kaynaklandığının farkına vardı. Buna Doppler kayması denir; nedeni kuasarın dünyadan ışık hızının yüzde 16'sı, yaklaşık *c*/6'lık bir hızla uzaklaşmasıydı. Bu aşırı hızlı harekete sebep olan şey ne olabilirdi? Schmidt'in bulabildiği en az çılgın açıklama evrenin genişlemesiydi.

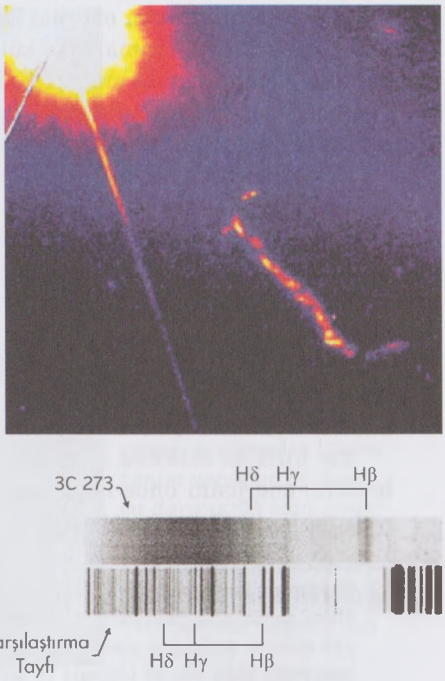
Evren genişledikçe dünyadan uzaktaki cisimler bizden çok yüksek bir hızda uzaklaşırken daha yakındaki cisimler daha ya-

---

[1] İngilizcesi "quasi-stellar radio sources" –çn.

vaş uzaklaşır. 3C273'ün ışık hızının altıda biri olan çok büyük hızı 3C273'ün dünyadan 2 milyar ışık yılı uzakta olduğu anlamına geliyordu. Bu o zamana dek görülen neredeyse en uzaktaki cisimdi. Schmidt parlaklığından ve uzaklığından yola çıkarak 3C273'ün ışık yönünden güneşten 4 trilyon kat ve en parlak galaksilerden de yüz kat daha güçlü olduğu sonucuna vardı!

Bu olağanüstü büyük güç, bir ay kadar kısa bir sürede tekrarlanan dalgalanmalar yaşıyordu; dolayısıyla ışığın çoğu, ışığın onu bir aylık bir süre zarfında aşabildiği kadar küçük bir cisimden gelmek zorundaydı ve bu dünya ile ona en yakın yıldız olan Proxima Centauri arasındaki uzaklıktan çok çok daha küçüktü. Neredeyse aynı güce sahip başka kuasarlar birkaç saatlik sürelerde dalgalanıyorlardı, demek ki onlar da bizim güneş sistemimizden çok daha büyük olmak zorundaydı. *Parlak bir galaksinin gücünün yüz katının bizim güneş sistemimizle aynı büyüklükte bir bölgeden gelmesi olağanüstü bir şeydi*!



Şekil 9.1: *Üstte*: 3C273'ün NASA'nın Hubble Uzay Teleskobuyla çekilmiş fotoğrafı. Yıldızın (üst solda) büyük görünmesinin tek nedeni soluk püskürmenin (alt sağda) görülebilmesi için fotoğrafın sürekspoze edilmiş olmasıdır. Püskürme o kadar küçüktür ki büyüklüğü ölçülemez. *Altta*: Maarten Schmidt'in tayf çizgileri ile dünyadaki bir laboratuarda ölçülen hidrojenin tayf çizgileri karşılaştırılıyor. Kuasarın üç çizgisi hidrojenin Hβ, Hγ ve Hδ adı verilen çizgileriyle aynı ama dalga boyları yüzde 16 artmış haldedir. (Tayf çizgilerinin görüntüleri fotoğraf negatifidir: Siyah çizgiler aslında parlaktır.)

Kara delikler ve Birikim Diskleri

Bu kadar küçük bir bölgeden bu kadar büyük bir güç nasıl yayılabilir? Doğadaki temel kuvvetleri düşündüğümüzde üç olasılık vardır: Kimyasal enerji, nükleer enerji ya da kütleçekim enerjisi.

Kimyasal enerji moleküller yeni türde moleküller oluşturmak için birleştiklerinde serbest bırakılan enerjidir. Benzinin yanması buna örnektir: Havadaki oksijeni benzin molekülleriyle birleştirerek su, karbondioksit ve bol ısı yaratır. Fakat buradan doğan güç yine de çok çok çok az olur.

Nükleer enerji atom çekirdekleri yeni atom çekirdekleri oluşturmak üzere birleştiklerinde ortaya çıkar. Atom bombası, hidrojen bombası ve bir yıldızın içerisindeki nükleer yakıtın yanması buna örnektir. Bu kimyasal enerjiden çok daha güçlü olmasına rağmen (bir benzin yangını ile bir nükleer bomba arasındaki farkı düşünün) astrofizikçiler nükleer enerjinin kuasarlara güç vermesi için mantıklı bir açıklama bulamıyorlar. Yine çok zayıf oluyor.

Böylece tek olasılık olarak geriye bizim *Endurance*'ı Gargantua'nın etrafında seyahat ettirirken başvurduğumuz enerji türü olan kütleçekim enerjisi kalıyor. *Endurance*'ta kütleçekim enerjisinden faydalanma, orta kütleli bir kara deliğin arkasından yapılan sapan atışıyla mümkün oluyordu (7. Bölüm). Kara deliğin yoğun kütleçekimi anahtar rol oynuyordu. Benzer biçimde kuasarlarda da gücün kara delikten gelmesi zorunlu.

Astrofizikçiler bir kara deliğin bunu nasıl yapabildiğini bulmak için birkaç yıl uğraştılar. Cevabı bulan kişi İngiltere'deki Kraliyet Greenwich Gözlemevinden Donald Lynden-Bell oldu. Onun varsayımına göre bir kuasar manyetik bir alanın içinden geçen bir sıcak gaz diskiyle (bir birikim diski) çevrelenmiş devasa bir kara delikti (Şekil 9.2).

Evrenimizde sıcak gazlar hemen her zaman manyetik alanların içinden geçer (2. Bölüm). Bu alanlar gazla bitişiktir; gaz ve alanlar uyumlu biçimde birlikte hareket ederler.

Bir birikim diskinin arasından geçerken manyetik alan, kütleçekim enerjisini önce ısıya, sonra da ışığa çevirmede katalizör rolü üstlenir. Alanın sağladığı son derece güçlü sürtünme[2] gazın

[2] Sürtünme karmaşık bir süreç sonucunda ortaya çıkar: Hareket eden gaz alanı sarar, onu pekiştirir ve böylece hareket enerjisini manyetik enerjiye çevirir; ardından uzayın komşu bölgelerinde zıt yönlere işaret eden manyetik alan tekrar birleşir ve bir süreç sonucunda manyetik enerjiyi ısıya çevirir. Sürtünmenin doğası budur: Hareket ısıya çevrilir.

dairesel hareketini yavaşlatır, onun kütleçekimin etkisine karşı dayanmasını sağlayan merkezkaç kuvveti azaltır, böylece gaz içeriye, kara deliğe doğru hareket eder. Gaz içe doğru hareket edince deliğin kütleçekimi onun yörüngesel hareketini hızlandırır, bu hızlanma sürtünmenin onu yavaşlatmasından bile fazladır. Başka sözlerle ifade edersek kütleçekim enerjisi kinetik enerjiye (hareket enerjisine) çevrilmiş olur. Ardından manyetik sürtünme bu yeni kinetik enerjinin yarısını ısı ve ışığa çevirir ve süreç tekrarlanır.

Enerji kara deliğin kütleçekiminden gelir. Onu sağlayan aracılar manyetik sürtünme ve diskin gazıdır.

Lynden-Bell'in vardığı sonuca göre astronomların gördüğü kuasarların parlak ışığı, diskin ısınmış gazından gelmektedir. Dahası manyetik alan gazın elektronlarından bazılarını hızlandırarak yüksek enerjilere çıkartır ve ardından elektronlar manyetik kuvvet çizgileri etrafında sarmallaşarak kuasarın gözlemlenen radyo dalgalarını yayarlar.



Şekil 9.2: Sanatçının gözünden kara deliğin etrafındaki birikim diski ve deliğin kutuplarının yakınından çıkan püskürmeler. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

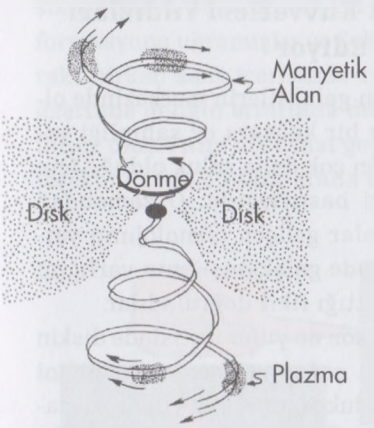
Lynden-Bell tüm bu ayrıntılara Newton, görelilik ve kuantum fizik yasalarının bir kombinasyonunu kullanarak ulaştı. Kara deliklerden madde püskürmesi hariç astronomların kuasarlar hakkında görmüş olduğu her şeyi kolayca açıkladı. Düşünme biçimini ve hesaplamalarını aktaran teknik makalesi (Lynden-Bell 1979) tüm zamanların en iyi astrofizik makalelerinden biridir.

Püskürmeler: Dönen Uzaydan Güç Devşirmek

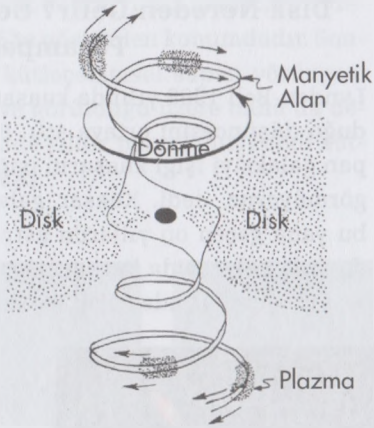
Sonraki birkaç yıl içerisinde astronomlar kuasarlardan dışarı uzanan çok sayıda püskürme daha keşfederek bunları ayrıntılarıyla incelediler. Kısa süre sonra bunların kuasarın kendisinden (kara delikten ve onun birikim diskinden) dışarı atılan sıcak manyetize gaz akımları olduğu anlaşıldı (Şekil 9.2). Dışarı atma da son derece güçlüydü: Gaz neredeyse ışık hızına yakın bir hızla püskürtülüyordu. Gaz ilerledikçe ve kuasardan uzaktaki malzemelerin içine süründüğünde ışık radyo dalgaları, X ışınları hatta gama ışınları biçiminde güç yayıyordu. Püskürmeler bazen kuasarın kendisi kadar parlak, en parlak galaksilerden yüz kat daha parlak olabiliyordu.

Sonraki on yıl boyunca astrofizikçiler püskürmelerin nasıl kuvvet kazandığını ve onları bu kadar hızlı, bu kadar dar ve bu kadar düz yapan şeyin ne olduğunu açıklamak için uğraştılar. Yanıt birkaç seçenek biçiminde geldi; içlerinden en ilginci Oxford fizikçisi Roger Penrose'un oluşturduğu temelden ilerleyen, İngiltere'deki Cambridge Üniversitesinden Roger Blandford ve öğrencisi Roman Znajek'in 1977 yılındaki açıklamasıydı; *bkz.* Şekil 9.3.

Birikim diskinin gazı dönerek gitgide kara deliğin içerisine girer. Blandford ve Znajek'e göre deliğin olay ufkunu geçerken her bir gaz zerresi manyetik alanının her bir zerresini ufkun üzerinde bırakır ve ardından çevreleyen gaz orada tutunur. Kara delik döndükçe uzayı dönme hareketine sürükler (Şekil 5.4 ve 5.5) ve dönen uzay manyetik alanı döndürür (Şekil 9.3). Dönen manyetik alan, bir hidroelektrik enerji santralindeki dinamoda olduğu gibi, yoğun bir elektrik alan yaratır. Elektrik alan ve dönen manyetik alan beraberce plazmayı (sıcak iyonize gaz) ışık hızına yakın bir hızda yukarı ve aşağı doğru savurur ve iki püskürme yaratarak bunlara güç verir. Püskürmelerin yönleri jireskopik hareket nedeniyle sabit durumda olan kara deliğin dönmesi tarafından (yılların ortalaması alındığında) sabit tutulur.



Şekil 9.3: Püskürmelerin ortaya çıkışı konusunda Blandford-Znajek mekanizması. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]



Şekil 9.4: Şekil 9.3'e benzerdir, tek fark birikim diskine bağlı bir manyetik alan olmasıdır. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

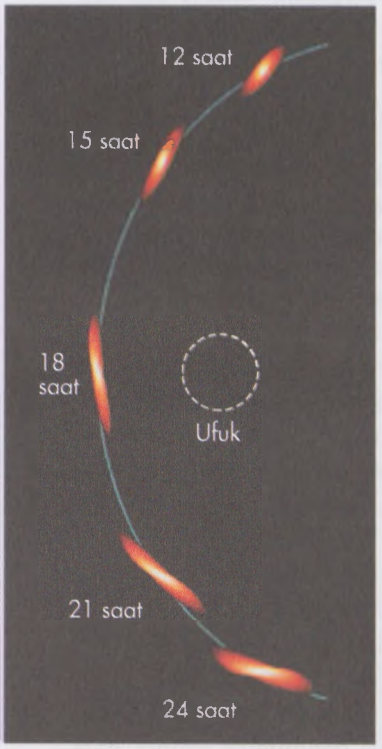
3C273'de sadece bir püskürme görülmeye yetecek ölçüde parlaktı (Şekil 9.1) ama diğer birçok kuasarda ikisi de görülür.

Blandford ve Znajek esasen Einstein'ın görelilik yasalarına dayanarak bütün ayrıntıları ortaya çıkardılar. Söyledikleriyle astronomların gördüğü püskürmeler hakkındaki hemen her şeyi açıklayabiliyorlardı.

Açıklamanın ikinci seçeneğinde (Şekil 9.4) dönen manyetik alan kara delik yerine birikim diskine bağlanmıştır ve diskin yörüngesel hareketiyle birlikte sürüklenir. Onun dışında hikâye aynıdır: Dinamo hareketi; plazmanın dışarı fırlaması. Bu seçenek kara delik dönmediğinde bile başarılı bir açıklama sağlamaktadır. Fakat kara deliklerin çoğunun hızla döndüğüne eminiz, dolayısıyla benim tahminimce Blandford-Znajek mekanizması (Şekil 9.3) kuasarlarda en sık rastlanan mekanizma olsa gerektir. Ancak bu konuda önyargılı olabilirim. Çünkü 1980'lerde Blandford-Znajek fikirlerinin değişik yönlerini araştırmaya çok zaman ayırdım, hatta onlar hakkında teknik bir kitabın ortak yazarlığını yaptım.

Disk Nereden Gelir? Gelgit Kuvvetleri Yıldızları Paramparça Ediyor

Lynden-Bell 1969 yılında kuasarların galaksilerin merkezinde olduğu düşüncesini ortaya attı. Bizler bir kuasara ev sahipliği yapan galaksiyi ışığı kuasarın ışığından çok daha soluk olduğu için görmüyoruz, dedi. Kuasar galaksiyi bastırıyordu. O zamandan bu yana geçen on yıllarda astronomlar gelişen teknolojinin yardımıyla çok sayıda kuasarın çevresinde galaksi ışığının varlığını tespit ederek Lynden-Bell'in ortaya attığı fikri doğruladılar.



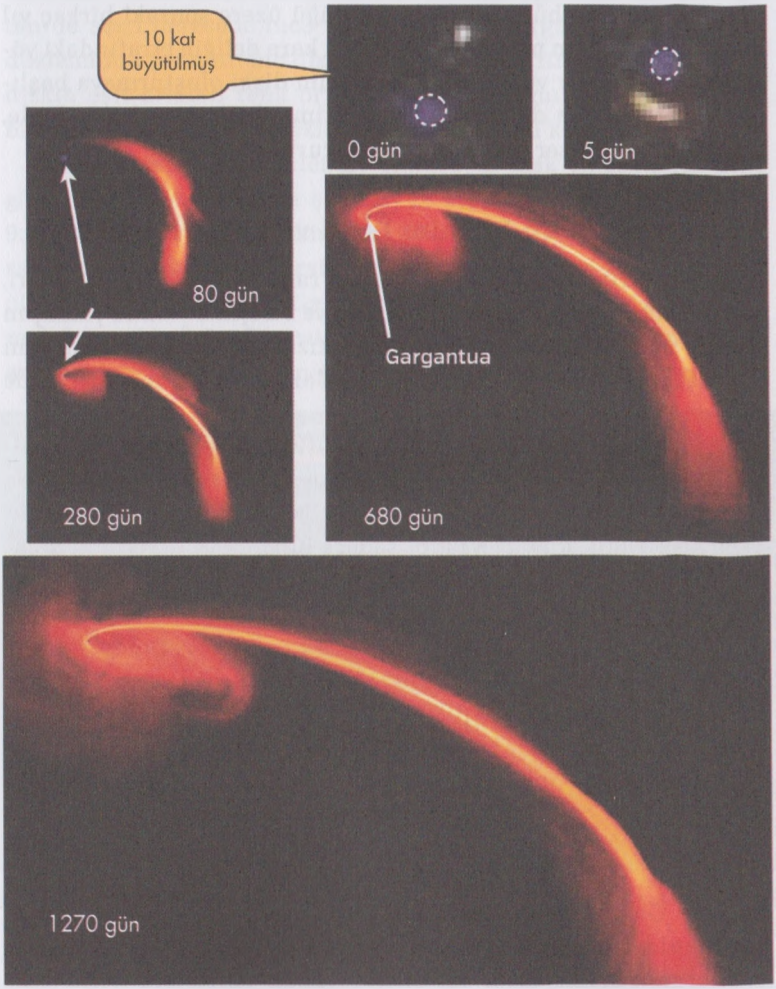
Şekil 9.5: Bir kırmızı dev yıldızın Gargantua'ya benzer bir kara delik tarafından gelgitle parçalanması.

Bu son on yıllar içerisinde diskin gazının çoğunun nereden geldiğini de bulduk. Yer yer bir yıldız kuasarın kara deliğinin o kadar yakınında gezinir ki deliğin gelgitli kütleçekimi (4. Bölüm) yıldızı paramparça eder. Parçalanan yıldızın gazının çoğu kara delik tarafından yakalanarak bir birikim diski oluşturur ama gazın bir bölümü de kaçar.

Astrofizikçiler aradan geçen yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisinin yardımıyla bunu simüle ettiler. Şekil 9.5 Santa Cruz'daki California Üniversitesinden James Guillochon, Enrico Ramirez-Ruiz ve Daniel Kasen ile Bremen Üniversitesinden Stephan Rosswog'un yakın zamanda yaptıkları bir simülasyondandır[3]. Zaman 0'ken (gösterilmemektedir) yıldız neredeyse tam olarak kara deliğe doğru yönelmiştir ve deliğin gelgitli kütleçekimi yıldızı Şekil 6.1'deki gibi deliğe doğru germeye ve yanlarından

[3] Şekil 9.5'te kara deliğin boyutlarını Gargantua'nınkiyle, yıldızın boyutlarını da bir kırmızı devin boyutlarıyla değiştirdim, keza zaman işaretlerini de buna uygun biçimde değiştirdim.

sıkıştırmaya başlamıştır. On iki saat sonra yıldız şiddetli bir deformasyona uğramıştır ve Şekil 9.5'te gösterilen konumdadır. Sonraki birkaç saat içerisinde mavi kütleçekimsel sapan yörüngesi üzerinde deliğin etrafında döner ve görüldüğü üzere daha da deforme olur. Yirmi dört saat geçtiğinde yıldız parçalanır; kendi kütleçekimi artık onu bir arada tutamaz.



Şekil 9.6: Şekil 9.5'teki yıldızın sonraki kaderi

Yıldızın sonraki kaderi James Guillochon'un Suvi Gezari'yle (Johns Hopkins Üniversitesi) birlikte yaptığı başka bir simülasyonla Şekil 9.6'da gösterilmektedir. Bu simülasyondan yapılan film için *bkz.* http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2012/18/video/a/.

En üstteki iki görüntü Şekil 9.5'in hemen öncesi ve hemen sonrasıdır; deliği ve bozulan yıldızı görünür kılmak için bu iki görüntüyü diğerlerinin on katı büyüttüm.

Görüntülerin bütününden görüldüğü üzere sonraki birkaç yıl içerisinde yıldızın malzemesinin çoğu kara deliğin etrafındaki yörüngeye kapılıyor ve burada bir birikim diski oluşturmaya başlıyor. Kalan madde de deliğin kütleçekim etkisinden akış halinde, püskürmeye benzer bir yol izleyerek kurtuluyor.

Gargantua'nın Birikim Diski ve Kayıp Püskürme

Tipik bir birikim diski ve püskürmesi radyasyon yayar (X ışınları, gama ışınları, radyo dalgaları ve ışık) ve bu ışıma yanına yaklaşan insanı kızartacak kadar yoğundur. Kızarmaktan kaçınmak için Christopher Nolan ve Paul Franklin Gargantua'ya aşırı derecede solgun bir disk verdiler.

Buradaki "solgunluk" insan ölçütleri içerisinden bir solgunluk değil, sadece tipik kuasarların ölçütleri açısındandır. Gargantua'nın diski tipik bir kuasarın diski gibi yüz milyon derece değil, güneşin yüzeyi gibi sadece birkaç bin derecedir, dolayısıyla bol ışık yaymasına karşın, yok denecek kadar az X ışını ve gama ışını yayar. Gaz bu kadar soğuk olunca atomların termal hareketleri diski fazla şişiremeyecek kadar yavaştır. Disk incedir ve çok az bir şişmeyle neredeyse Gargantua'nın ekvator düzlemine mahkûm durumdadır.

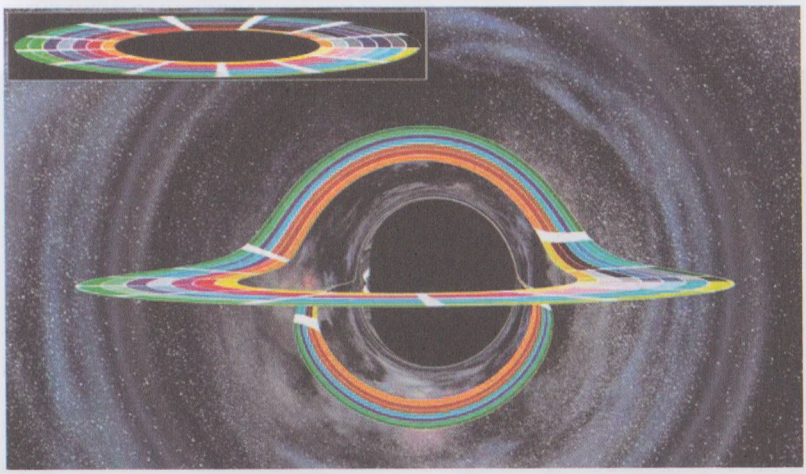
Arkasında bıraktığı milyonlarca yıl içerisinde bir yıldız parçalamamış, uzun zamandır "beslenmemiş" kara delikler etrafında böyle disklere rastlanabilir. Normalde diskin plazmasıyla sınırlanmış olan manyetik alan büyük oranda dışarıya sızmış olabilir. Daha önce manyetik alandan güç alan püskürme de sonlanmış olabilir. Gargantua'nın diski böyle bir disktir: Püskürmesiz, ince ve insanlar için görece güvenli. Görece elbette.

Gargantua'nın diski internette ya da astrofizikçilerin teknik yayınlarında gördüğünüz ince disk resimlerinden oldukça

farklı görünmektedir çünkü bu resimlerde çok önemli bir özellik göz ardı edilmektedir: Diskin kara deliği tarafından kütleçekimsel merceklenmesi. Chris'in görsel doğrulukta ısrarcı olduğu *Yıldızlararası*'nda bu özellik atlanmamıştır.

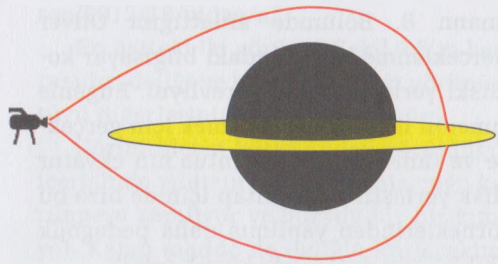
Eugénie von Tunzelmann 8. Bölümde anlattığım Oliver James'in kütleçekimsel merceklenme konusundaki bilgisayar kodunun içine bir birikim diski yerleştirmekle görevliydi. Eugénie ilk adım olarak merceklenmenin ne yaptığını görmek için gerçekten de aşırı derecede ince ve tam olarak Gargantua'nın ekvator düzleminde yer alan bir disk yerleştirdi. Bu kitap için de bize bu diskin eşit aralıklı renk örneklerinden yapılmış daha pedagojik bir versiyonunu üretti (Şekil 9.7'nin üstündeki küçük şekil).

Kütleçekimsel merceklenme olmasaydı disk ek şekildeki gibi görünürdü. Merceklenme çok büyük bir değişiklik yaratır (Şekil 9.7'deki asıl görüntü). Diskin arka kısmının kara deliğin arkasında saklanmasını bekleyebilirsiniz. Öyle olmaz. Aksine kütleçekimsel olarak merceklenme biri Gargantua'nın üstünde, diğeri altında olmak üzere iki görüntü yaratır; *bkz.* Şekil 9.8. Diskin Gargantua'nın arkasındaki üst yüzünden yayılan ışık ışınları, deliğin üzerinden



Şekil 9.7: Gargantua'nın ekvator düzleminde yer alan son derece ince bir disk Gargantua'nın bükülmüş uzay ve zamanı tarafından kütleçekimsel olarak merceklenmiş. Burada Gargantua çok hızlı dönmektedir. *Ek şekil*: Kara deliğin yokluğunda diskin görünümü. [Eugénie von Tunzelmann'ın Double Negative'deki sanat ekibinden alınmıştır.]

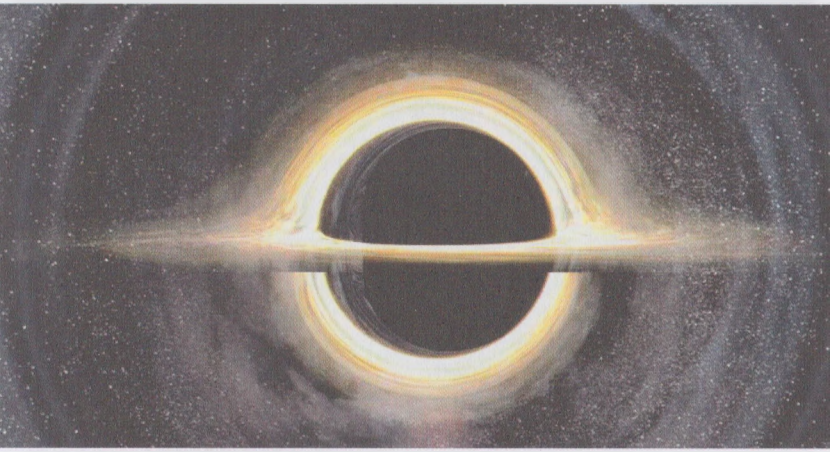
atlayarak kameraya ulaşır ve Şekil 9.7'deki Gargantua'nın gölgesinin üstünden dolanan disk görüntüsünü yaratır; Gargantua'nın gölgesinin altından dolanan disk görüntüsünde de durum aynıdır.



Şekil 9.8: Işık ışınları (kırmızı) kameraya birikim diskinin Gargantua'nın arkasındaki arka kısmının görüntülerini ulaştırır: Görüntülerin biri deliğin gölgesinin üstünden, diğeri deliğin gölgesinin altından gelir.

Bu birincil görüntülerin içerisinde diskin ince ikincil görüntülerini görürüz, gölge kenarının yakınında gölgenin üstünden ve altından dolanmaktadır. Resim çok daha büyütülmüş olsaydı, gölgenin giderek daha yakınında üçüncül ve daha yüksek görüntüleri de görürdünüz.

Merceklenen diskin gördüğünüz şekli almasının nedenini kendiniz bulabiliyor musunuz? Gölgenin altından dolanan birincil görüntü, üstünden dolanan ince ikincil görüntüye neden bağlanmış-



Şekil 9.9: Gargantua'nın son derece ince renkli diskinin (Şekil 9.7) yerini daha gerçekçi bir son derece ince birikim diski almış. [Eugénie von Tunzelmann'ın Double Negative'deki sanat ekibinden alınmıştır.]

tır? Neden üstten dolanan ve alttan dolanan görüntüler üzerindeki renk örnekleri bu kadar genişlemiş, kenardakiler sıkışmıştır? ...

Gargantua'nın uzay dönmesi (solda bize doğru, sağda bizden uzağa doğru hareket eden uzay) disk görüntülerinin şeklini bozar. Diski solda gölgeden uzağa, sağda gölgeye doğru iter, böylece disk bir yanı biraz eğik görünür. (Nedenini açıklayabilir misiniz?)

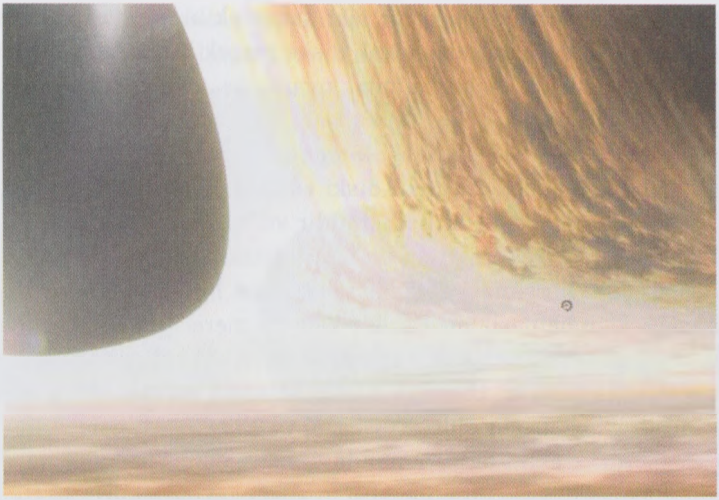
Daha fazla ilerlemek amacıyla Eugénie von Tunzelmann ve ekibi renkli disk seçeneği (Şekil 9.7) yerine daha gerçekçi bir ince birikim diski koydular: Şekil 9.9. Bu çok daha güzeldi ama yeni problemlere sebep oldu. Chris izleyici kitlesinin kafasının diskin orantısızlığı ve kara deliğin gölgesi, gölgenin düz sol kenarı, bu kenarın yakınındaki (8. Bölümde bahsedilen) karmaşık yıldız alanı örüntüleriyle karman çorman olmasını istemiyordu. Bu yüzden o ve Paul Gargantua'nın dönmesini maksimumun 0,6'sına kadar yavaşlattılar ve bu tuhaflıkları törpülediler. (Eugénie diskin soldan bize doğru ve sağdan bizden uzağa doğru hareketi nedeniyle ortaya çıkan Doppler kaymasını zaten çıkarmıştı. Bu diski çok daha orantısız yapardı: Solda açık mavi ve sağda loş kırmızı; izleyici kitlesi için tamamen kafa karıştırıcı olurdu!)

Ardından Double Negative'deki sanat ekibi yer yer farklılaşan bir şekilde biraz kabartarak diske gerçek bir solgun birikim diskinde olmasını beklediğimiz kıvamı ve yüzey kabarmasını verdi. Diski Gargantua'nın yakınında daha sıcak (daha parlak), uzağındaki yerlerde daha soğuk (daha loş) yaptılar. Uzak yerlerde daha kalın yaptılar çünkü diski ekvator düzlemine sıkıştıran Gargantua'nın gelgitli kütleçekimidir ve bu kütleçekim kara delikten uzaklaştıkça zayıflar. Arka plandaki galaksiyi eklediler: Çok katmanlı bir sanat çalışmasıydı bu (toz, bulutsular, yıldızlar). Ve merceklenme parlamasını; bir kamera merceğinde diskin parlak ışığının saçılmasından doğacak olan ışık şeridi, parıldama ve bulanıklığı eklediler. Ulaşılan sonuç filmdeki muhteşem ve saygı uyandıran görüntüler oldu (Şekil 9.10 ve 9.11).

Eugénie ve ekibi aynı zamanda diskin gazının Gargantua'nın içine düşmekten kaçınabilmesi için yörüngesinde hareket etmesini sağladılar elbette. Kütleçekimsel merceklenmeyle birleşince gazın yörünge hareketi filmdeki etkileyici akıntı efektlerini ortaya çıkardı, akıntı efektleri Şekil 9.11'de görülen gaz akış çizgileri yoluyla hissettirildi.



Şekil 9.10: Gargantua ve birikim diski, diskin sol kenarının üzerinde Miller'ın gezegeni. Disk o kadar parlaktır ki yıldızlar ve bulutsular zar zor görülmektedir. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]



Şekil 9.11: Gargantua'nın diskinin bir kısmının *Endurance* üzerinden geçerken yakından görünüşü. Siyah bölge disk ve arka planda saçılmış bir miktar beyaz ışıkla çerçevelenmiş haliyle Gargantua'dır. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

Bu görüntüleri ilk gördüğümde nasıl bir keyif aldım! Şimdiye dek ilk defa bir Hollywood filminde bir kara delik ve diski biz insanlar yıldızlararası yolculuğu başardığımızda nasıl göreceksek o haliyle gösterilmişti. Bir fizikçi olarak da ben ilk kez kütleçekimsel olarak merceklenmiş, dolayısıyla kara deliğin gölgesinde saklanmak yerine deliğin üstünden ve altından dolanan gerçekçi bir diski görüyordum.

Solgun ama muhteşem derecede güzel ve püskürmesiz diskiyle Gargantua'nın etrafı gerçekten tehlikesiz miydi? Amelia Brand öyle düşünüyor...

10

RASTLANTI EVRİMİN İLK YAPI TAŞIDIR

Yıldızlararası'nda Miller'ın gezegeninin insan yaşamı için elverişsiz olduğu açığa çıktıktan sonra Amelia Brand daha yakındaki Mann'ın gezegeni yerine Gargantua'dan çok uzaktaki Edmunds'ın gezegenine gitmeyi savunur: "Rastlantı evrimin ilk yapı taşıdır" der Cooper'a. "Fakat bir kara deliğin etrafındaki yörüngede bulunuyorsan yeterince şey olamaz; o asteroidleri ve kuyruklu yıldızları, aksi halde sana ulaşabilecek olan diğer olayları içine çekip yutar. Uzağa, onun oyun alanının dışına doğru gitmeliyiz."

Bu *Yıldızlararası*'nda karakterlerin bilimsel açıdan yanlış oldukları birkaç sahneden biridir. Christopher Nolan Brand'in savının yanlış olduğunu biliyordu ama Jonah'ın senaryo taslağında yer alan bu sözleri muhafaza etmeyi seçti. Sonuçta bütün bilim insanları her zaman doğru değerlendirme yapacak diye bir şey yok.

Gargantua asteroidleri ve kuyruklu yıldızları (keza gezegenleri ve yıldızları ve küçük kara delikleri de) yutmaya uğraşsa da, bunu nadiren başarır. Neden?

Gargantua'dan uzaktayken bir cisim, yörüngesinin neredeyse doğrudan kara deliğe doğru olduğu durumlar haricinde, büyük bir açısal momentuma[1] sahiptir. Bu büyük açısal momentum, cismin yörüngesinin onu kara deliğin yakınına her taşıyışında Gargantua'nın kütleçekim etkisini kolaylıkla alt eden merkezkaç kuvvetlerini doğurur.

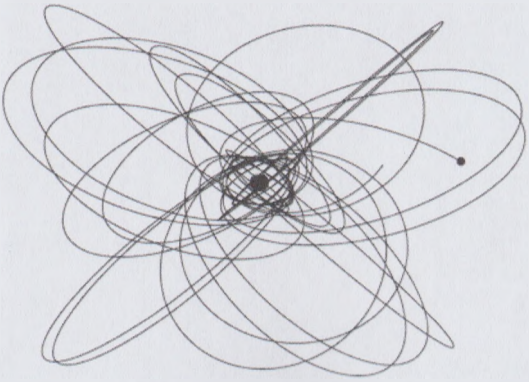
Tipik bir yörünge Şekil 10.1'deki biçime sahiptir. Gargantua'nın yeğin kütleçekimiyle çekilen cisim içe doğru gider. Fakat ufka

[1] Açısal momentum cismin çembersel hızının Gargantua'ya olan uzaklığıyla çarpımıdır ve bu açısal momentum önemlidir çünkü yörünge karmaşık olsa bile cismin yörüngesi boyunca sabittir.

ulaşmadan önce merkezkaç kuvvetler cismi tekrar dışa doğru savurmaya yetecek ölçüde artar. Bu neredeyse sonsuz biçimde tekrar tekrar gerçekleşir.

Burada araya girebilecek tek şey başka bir kütleli cisimle (küçük bir kara delik, yıldız ya da gezegen) tesadüfi bir yakın temastır. Cisim diğer cismin etrafından bir sapan atışı güzergâhı izleyerek savrulur (7. Bölüm) ve böylece açısal momentumu değişmiş bir şekilde Gargantua'nın etrafında yeni bir yörüngeye oturur. Yeni yörünge de hemen her zaman tıpkı eskisi gibi büyük bir açısal momentuma ve cismi Gargantua'dan koruyan merkezkaç kuvvetlere sahiptir. Yeni yörünge cismi çok nadir olarak doğrudan denebilecek şekilde Gargantua'ya doğru taşır ve merkezkaç kuvvetlerin yenemeyeceği kadar küçük bu açısal momentumda cisim Gargantua'nın ufkunun içine gömülür.

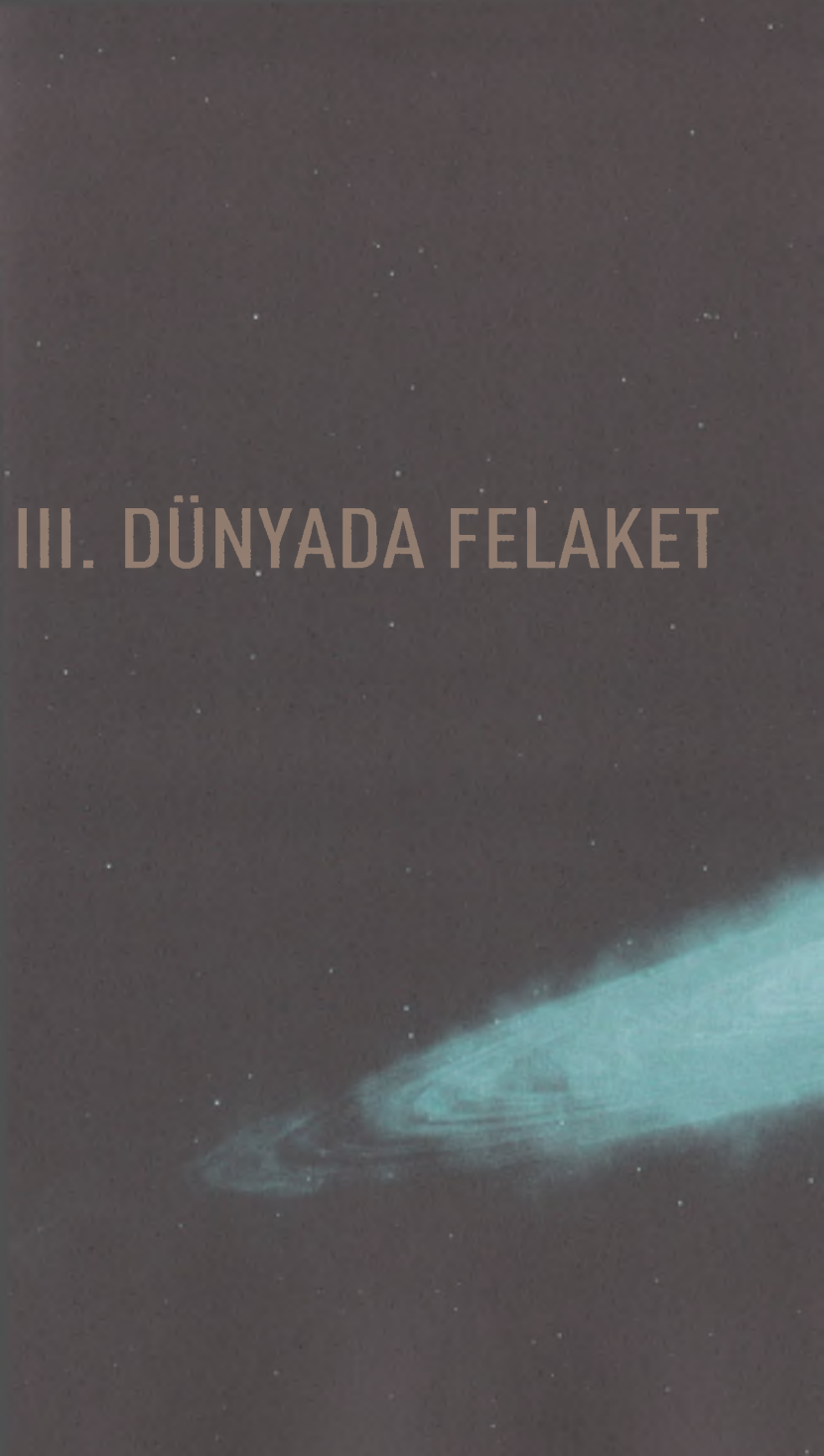
Astrofizikçiler Gargantua gibi dev kara deliklerin etrafında dolanan milyonlarca yıldızın eşanlı yörünge hareketlerinin simülasyonunu yapmışlardır. Sapan atışları aşamalı olarak bütün yörüngeleri değiştirmekte ve bu yolla yıldızların yoğunluklarını da (belirlenmiş bir hacimde kaç yıldız varsa) değiştirmektedir. Gargantua'nın yakınındaki yıldız yoğunluğu azalmayacak, artacaktır. Asteroid ve kuyruklu yıldızların rastgele bombardımanı daha sık görülecektir, daha az değil. İnsanlar dahil bireysel yaşam formları için Gargantua'nın yakınındaki çevre daha tehlikeli bir hal alacak ve yeterli sayıda birey hayatta kalırsa bu daha hızlı evrimi teşvik edecektir.



Şekil 10.1: Gargantua gibi hızla dönen bir kara deliğin etrafındaki bir cismin tipik yörüngesi. [Steve Drasco'nun bir simülasyonundan alınmıştır.]

Gargantua'nın ve onun tehlikeli ortamının tecrübesini edindik, şimdi kısa bir yön değişikliği yapalım: Dünyaya ve güneş sistemimize doğru, dünya üzerindeki felakete ve yıldızlararası bir yolculuk yoluyla bu felaketten kaçmanın zorluğuna gidelim.

III. DÜNYADA FELAKET



11

KÜF



2007 yılında Jonathan (Jonah) Nolan senaryo yazarı olarak *Yıldızlararası*'na katıldığında filmi insan uygarlığının bugünkü uygarlığın soluk bir kalıntısı olduğu ve küfle de son darbeyi yediği bir çağın içerisine yerleştirdi. Jonah'ın ağabeyi Christopher Nolan daha sonra filmi yönetmen olarak devraldığında da bu fikri sahiplendi.

Fakat Jonah'ın zihninde canlandırdığı şekliyle Cooper'ın dünyasının bilimsel olarak mümkün olup olmadığı Lynda Obst'un, Jonah'ın ve benim kafalarımızı biraz kurcalıyordu: İnsan uygarlığı nasıl olup da bu kadar zayıflamasına karşın yine de birçok açıdan bu kadar normal görünebilirdi? Bir küfün gıda olarak kullanılan ekinlerin hepsini yeryüzünden silebilmesi bilimsel olarak mümkün müydü?

Ben küf konusunda fazla bilgili değilim, bu yüzden danışmak için uzmanlara başvurduk. 8 Temmuz 2008 tarihinde Caltech fakülte kulübü Athenaeum'da bir akşam yemeği organize ettim. Harika yemek. Nefis şarap. Jonah, Lynda, ben ve uzmanlık alanlarına göre seçilmiş Caltech'ten dört biyoloji uzmanı: Elliot Meyerowitz bir bitki uzmanı; Jared Leadbetter bitkilere zararlı çeşitli mikroplar alanında uzman; Mel Simon bitkileri oluşturan hücreler ve bu hücrelerin mikroplardan nasıl etkilendiği konusunda uzman; David Baltimore biyolojinin bütünü hakkında geniş bir perspektife sahip Nobel ödüllü biyolog. (Caltech harika bir yer. Son üç yıldır arka arkaya Londra'daki *Times* tarafından dünyanın en iyi üniversitesi seçilmiş olmasına karşın küçük bir yer denebilir. Bilimin bildiğim bütün dalla-

rında uzmanlaşmış olmasına rağmen sadece 300 profesör, 1000 lisans öğrencisi ve 1200 lisansüstü öğrenciye sahip. Dolayısıyla Küf Gecemiz için ihtiyaç duyduğumuz uzmanları bulmak ve bir araya getirmek kolay oldu.)

Yemek başlayınca yuvarlak masamızın üzerine bir mikrofon koydum ve iki buçuk saat boyunca serbestçe akan konuşmamızı kaydettim. Bu bölüm bu kayda dayanmaktadır ancak insanların söylediklerini ben kendi kelimelerimle aktardım; onlar da kontrol ettiler ve benim ifadelerimi onayladılar.

Fazla zorlanmadan ulaştığımız görüş birliği şudur: Cooper'ın dünyası bilimsel olarak mümkün *ama pek muhtemel değil.* Gerçekleşmemesi çok büyük olasılık ama gerçekleşebilir de. Bu yüzden bu bölüme spekülatif anlamında S işareti koydum.

Cooper'ın Dünyası

Şarap ve ordövrlerle birlikte Jonah, Cooper'ın dünyası hakkında kafasındaki hayali anlattı (Şekil 11.1): Bir dizi felaket birleşerek Kuzey Amerika'nın nüfusunu onda birine düşürmüş ve diğer kıtalarda da durum aynı. Büyük oranda bir tarım toplumu haline gelmişiz, doyma ve barınma mücadelesi içerisindeyiz. Fakat bizimki bir distopya değil. Hayat halen katlanılır durumda, hatta bazı yönlerden de hoş, beyzbolun devam etmesi gibi güzel ayrıntılar var. Ancak artık büyük düşünmüyoruz. Artık büyük şeyleri amaç edinmiyoruz. Hayatı sürdürmenin birazcık ötesine geçen şeyleri amaç ediniyoruz.

Çoğumuz felaketlerin bittiğini, biz insanların bu yeni dünyada kendimizi güvence altına aldığımızı ve işlerin yeniden iyiye gitmeye başlayabileceğini düşünüyoruz. Fakat gerçekte küf o kadar ölümcül ve bir gıda ürününden diğerine o kadar hızlı sıçrıyor ki, insanlık Cooper'ın torunlarının yaşama mücadelesinin ardından nihai olarak yok olmaya mahkûm.

Hangi Felaketler?

Hangi tür felaketler Cooper'ın dünyasına yol açmış olabilir? Biyoloji uzmanlarımız mümkün ancak muhtemel olmayan bir dizi yanıt önerdiler. İşte bazıları:





Şekil 11.1: Cooper'ın dünyasındaki hayatın bazı yönleri. *Üstte*: Bir beyzbol maçı sırasında ufukta görünen toz fırtınası. *Altta*: Fırtınadan sonra Cooper'ın evi ve kamyoneti. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

Leadbetter: Bugün (2008) insanların çoğu kendi yiyeceğini üretmiyor. Yiyeceğimizi yetiştirmek ve dağıtmak, suyumuzu dağıtmak için küresel bir sisteme bağımlıyız. Bu sistemin bazı biyolojik ya da jeofizik felaketler nedeniyle çökmesini hayal etmek mümkün. Küçük ölçekli bir örnek, Sierra Nevada dağlarında ardı ardına birkaç yıl kar yağmasa Los Angeles'ta içme suyu kıtlığının

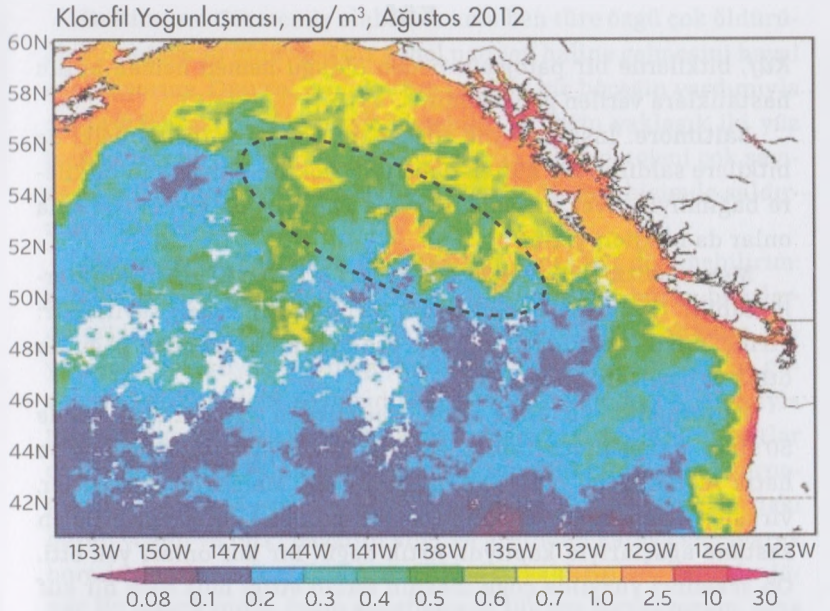
oluşacak olmasıdır. On milyon insan göç etme tehlikesiyle karşı karşıya kalacak ve California'daki tarımsal üretim dibe çakılacaktır. Çok daha büyük ölçekte gerçekleşen felaketleri düşünmek de hiç zor değildir. Cooper'ın dünyasında nüfusun çarpıcı biçimde azalması ve tarım toplumuna dönüş yapılmasıyla üretim ve dağıtım sorunları azaltılmıştır.

Simon: Mümkün olan bir başka felaket: İnsanlık tarihinde bizimle *patojenler* (insan vücuduna ya da diğer hayvanlara ve bitkilere saldıran mikroplar) arasında kesintisiz bir savaş yaşanmıştır. Biz insanlar bize doğrudan saldıran patojenlerle baş edebilmek için çok yönlü ve karmaşık bir bağışıklık sistemi geliştirdik. Fakat patojenler evrimleşmeye devam ediyor ve biz her zaman onların yarım adım arkasındayız. Bir noktada patojenlerin bizim bağışıklık sistemimizin yetişemeyeceği hızda değişmesinden doğacak bir felaket olabilir.

Baltimore: Örneğin AIDS virüsü seks yerine hızlı bir biçimde öksürük ya da hava yoluyla taşınan çok daha bulaşıcı bir forma evrilebilir.

Simon: Dünyanın küresel ısınma nedeniyle eriyen buz örtüsü, uzun süredir uykuda bekleyen son buzul çağından kalma öldürücü bir patojeni serbest bırakabilir.

Leadbetter: Başka bir senaryo da şu: İnsanlar küresel ısınma konusunda panikleyebilir. Isınmanın en büyük nedeni atmosferdeki karbondioksit artışıdır. Bizi kurtarmak için dünyanın okyanuslarını fotosentez yoluyla atmosferdeki karbondioksitin çoğunu tüketecek su yosunlarını (algler) üretecek şekilde tohumlayabilirler. Okyanuslara atılacak bol demir bu işi görebilir. Fakat bu durumda istenmeyen yan etkilerin doğurduğu felaketler gerçekleşebilir. Okyanusları zehirleyecek *toksinler* (zehirli kimyasallar, ölümcül olmayan yaşam biçimleri) üreten yeni tür su yosunları elde edilebilir. Bu durumda balık ve bitki yaşamında kitlesel ölümler olacaktır. İnsan uygarlığı ağırlıklı olarak okyanuslara dayanır. Bu insanlar için bir felaket olabilir. Olanaksız mı? Hiç olanaksız değil. Su yosunları üretmek için okyanusa demirin yerel biçimde atıldığı deneyler yapıldı ve o kadar fazla yosun oluşturuldu ki bunlar uzaydan yeşil noktalar biçiminde görülüyordu (Şekil 11.2). Ortaya çıkan yosunların bazıları bilimin daha önce hiç görmediği türlerdendi! Şanslıydık: Yeni yosunlar zehirli değildi ama olabilirlerdi de.



Şekil 11.2: Britanya Kolombiyası kıyılarından okyanusun içine 100 ton demir sülfat bırakılmasının ardından klorofil yoğunlaşması (algler) haritası. Demir uyarmalı alg büyümesi kesik çizgili elipsin içindeki yüksek alg yoğunlaşmasına sebep oldu. [NASA'nın Giovanni/Goddard Yer Bilimleri Veri ve Bilgi Hizmetleri Merkezinden alınmıştır.]

Meyerowitz: Atmosferimizin ozon deliğinden geçerek bize ulaşan morötesi ışık senin muazzam su yosunu tarlalarını mutasyona uğratarak yeni patojenlerin doğmasına sebep olabilir. Bu patojenler okyanusun içindeki bitkilerin kökünü kazıyabilir ve ardından karaya sıçrayarak tarlaları yok etmeye başlayabilir.

Baltimore: Böyle felaketlerle karşılaştığımızda onlarla başa çıkmak için tek umudumuz ileri teknoloji ve bilimdir. Eğer siyasi olarak bilim ve teknolojiye yatırım yapmazsak ya da evrimin reddi gibi bilgi karşıtı ideolojilerle bu felaketlerin kaynağı diye bilim ve teknolojideki ilerlemeyi duraksatırsak kendimizi ihtiyaç duyduğumuz çözümlerden yoksun buluruz.

Bu senaryoların çoğunun bir sonucu olan *küf* konusuna böyle geldik.

Küf

Küf, bitkilerde bir patojenin neden olduğu hemen hemen bütün hastalıklara verilen genel addır.

Baltimore: İnsanlığı yok edecek bir şey istiyorsanız belki de bitkilere saldıran bir küften daha iyisi yoktur. Yemek için bitkilere bağımlıyız. Evet, hayvanları ya da balıkları da yiyebiliriz ama onlar da bitkileri yerler.

Meyerowitz: Küfün sadece otlakları ortadan kaldırması yeterli olabilir. Otlak ve çayırlar bizim tarımımızın temeli sayılabilir: Pirinç, mısır, arpa, darı, buğday. Yediğimiz hayvanların çoğu da otlak ve çayırlardan beslenir.

Meyerowitz: Şu anda zaten yetiştirilen yiyeceklerin yüzde 50'sinin patojenlerce tahrip edildiği bir dünyada yaşıyoruz ve hatta Afrika'da bu oran çok daha yüksek. Mantarlar, bakteriler, virüsler... hepsi patojen haline gelebilir. Doğu kıyılarımız eskiden kestane ağaçlarıyla kaplıydı. Artık değil. Bir küf onları yok etti. On sekizinci yüzyılda çoğu insanın tercih ettiği muz türü bir küf sonucunda bugün kaybolmuş durumda. Yerini alan tür Cavendish muzu bugün yine küf tehdidi altında.

Kip: Ben küflerin sadece dar bir bitki grubuna saldıran ve diğerlerine sıçramayan *türe özgü* bir nitelik taşıdıklarını sanıyordum.

Leadbetter: *Genel küfler* de var. Çok sayıda türe saldıran genel küfler ile sadece birkaç türe saldıran türe özgü küfler arasında bir denge var gibi gözüküyor. Türe özgü küfte öldürücülük çok yüksek olabilir; çok özgün bir bitki grubunun örneğin yüzde 99'unu yıkıma uğratabilir. Genel küfte saldırılan bitki aralığı çok daha geniştir ama bu aralıktaki herhangi bir bitki için öldürücülüğü çok daha küçük olabilir. Bu doğada tekrar tekrar karşımıza çıkan bir şablon.

Lynda: Çok daha öldürücü hale gelen bir genel küf olabilir mi?

Meyerowitz: Daha önce böyle bir şey oldu. Dünya tarihinin başlangıç dönemlerinde siyanobakteriler oksijen üretmeye ve dolayısıyla dünyanın atmosferinin bileşimini köktenci bir biçimde değiştirmeye başladıklarında dünya üzerinde var olan hemen hemen her şeyi öldürmeyi başardılar.

Leadbetter: Ama oksijen siyanobakterilerin ürettiği öldürücü bir yan ürün, bir zehirdi; genel bir patojen değil.

Baltimore: Görmemiş olabiliriz ama ben türe özgü çok öldürücü bir patojenin öldürücü bir genel patojen haline gelmesini hayal edebiliyorum. Onu çok sayıda türe taşıyan bir böceğin yardımıyla saldırdığı bitki aralığını genişletebilir. Örneğin yaklaşık iki yüz farklı bitki türü yiyen bir Japon böceği taşıdığı patojeni çok sayıda türe taşıyabilir ve patojen bu türlere öldürücü biçimde saldırmaya adapte olabilir.

Meyerowitz: Tamamen öldürücü bir genel küf düşünebilirim: Kloroplastlara saldıran bir patojen. Kloroplastlar bütün bitkilerde ortak olarak bulunan bir şeydir. Fotosentez (bir bitkinin büyümesi için ihtiyaç duyduğu karbonhidratları üretmek için güneş ışığını havadaki karbondioksitle ve köklerinden gelen suyla birleştirdiği süreç) açısından hayati önem taşırlar. Kloroplastlar olmasa bitki ölür. Kloroplastlara saldıran yeni bir patojenin örneğin okyanuslarda evrimleştiğini düşünelim. Önce okyanuslardaki bütün yosun ve bitki hayatını siler ve ardından karaya sıçrayarak burada da bütün kara bitkilerini ortadan kaldırır. Her yer çöle döner. Bu mümkündür, bunu engelleyecek bir şey görmüyorum. Ama pek inandırıcı değildir. Gerçekleşmesi neredeyse hiç olası değildir ama Cooper'ın dünyası için bir temel oluşturabilir.

Bu spekülasyonlar bize bir biyoloğun geceleri uykusunu kaçıracak türdeki kâbus senaryoları hakkında bir fikir verdi. *Yıldızlararası*'nda dünyada her tarafa yayılmakta olan öldürücü bir genel küf üzerinde duruldu. Fakat Profesör Brand'in ikinci bir kaygısı vardı: İnsanların soluduğu oksijen tükeniyordu.

12

OKSİJENSİZ KALMAK



Yıldızlararası'nın başlarında Profesör Brand Cooper'a şunları söylüyor: "Dünya atmosferinin yüzde 80'i azot. Biz azotu teneffüs bile etmiyoruz. Ama küf ediyor. O uygun şartlarda geliştikçe bizim havamızdaki oksijen giderek azalıyor. Açlıktan ölen son insanlar boğularak ölen ilk insanlar olacaklar. Senin kızının nesli de dünyada hayatta kalan son kuşak olacak."

Profesörün öngörüsünün dayanacağı bilimsel bir temel var mı?

Bu soru bilimin iki dalının kesişim alanında yer alıyor: Biyoloji ve jeofizik. Bu yüzden küf yemeğimizdeki biyologlara, özellikle Elliot Meyerowitz'e ve iki jeofizikçiye, Caltech profesörleri Gerald Wasserburg (dünya, ay ve güneş sisteminin kökeni ve tarihi konusunda bir uzman) ve Yuk Yung'a (dünyamızın atmosferi ve diğer gezegenlerin atmosferinin fizik ve kimyası alanında bir uzman) bu soruyu sordum. Onlardan ve onların salık verdiği teknik makalelerden öğrendiklerimi aktarıyorum.

Solunabilir Oksijenin Yaratılması ve Tüketilmesi

Bizim soluduğumuz oksijen O_2 birbirlerine elektronlarla bağlanmış iki oksijen atomundan oluşan bir moleküldür. Dünyada başka formlarda çok oksijen var: Hemen akla gelenler karbondioksit, su, yerkabuğundaki mineraller. Fakat bizim bedenlerimiz bu oksijeni bazı organizmalar onu serbest bırakıp O_2'ye çevirmedikçe kullanamıyor.

Atmosferdeki O_2 nefes alınması, yakılması ve bozunum yoluyla *tüketiliyor*. O_2'yi teneffüs ettiğimizde bedenlerimiz onu karbonla birleştirerek karbondioksit, CO_2 oluşturuyor ve bu süreçte bedenlerimizin kullandığı epey bir enerji serbest kalıyor. Odun

yandığında alevler hızla atmosferin O_2'si ile odunun karbonunu birleştirerek CO_2 oluşturuyor ve bu yanmanın devamını sağlayan ısıyı üretiyor. Ölü bitkiler orman tabanı üzerinde bozunduklarında karbonları yavaş biçimde atmosferin O_2'siyle birleşiyor ve CO_2 ve ısı oluşturuyor.

Atmosferin O_2'si esasen fotosentez tarafından yaratılıyor: Bitkilerdeki kloroplastlar[1] (11. Bölüm) CO_2'yi C ve O_2'ye ayırmak için güneş ışığının enerjisini kullanıyor. Bitkiler büyümeleri için gereken karbonhidratları biçimlendirmek için karbonu sudan aldıkları hidrojen ve oksijenle birleştirirlerken O_2 dünyanın atmosferinin içerisine salınıyor.

O_2 Tüketimi ve CO_2 Zehirlenmesi

Geçen bölümün sonunda Elliot Meyerowitz'in ortaya attığı gibi evrimin kloroplastlara zarar veren bir patojen yarattığını varsayalım. Fotosentez, tümü bir hamlede değil ama bitkiler öldükçe ağır ağır sonlanır. Artık O_2 yaratılmaz ama halen daha solunum, yanma ve bozunum, görünen o ki en fazla da bozunum yoluyla tüketilmektedir. Geriye kalan insanların şansına dünya yüzeyinde bütün O_2'yi yutacak kadar fazla bozunuma uğrayan bir bitki yaşamı yoktur.

Bozunumun çoğu otuz yıl sonra bitmiş olacak ve O_2'nin yaklaşık olarak sadece yüzde 1'i harcanmış olacaktır. Eğer yiyecek bulabilirlerse Cooper'ın çocukları ve torunlarının nefes almasına bol bol yetecek O_2 hâlâ vardır.

Fakat atmosferdeki bu O_2'nin yüzde 1'i karbondioksite dönüştürülmüş olacaktır ve bu artık (atmosferin çoğu nitrojen olduğu için) atmosferin yüzde 0,2'sinin CO_2 olacağı anlamına gelir. Bu hassasiyeti yüksek kişilerin rahat nefes alamamasına ve muhtemelen de dünyanın sıcaklığını (sera etkisi yoluyla) Celcius cinsinden 10 derece (18 Fahrenheit derece) yükseltmeye yetecek miktarda bir CO_2dir; nazikçe ifade edersek durum herkes için rahatsızlık vericidir!

Herkeste nefes almada rahatsızlık yaratması ve sersemliğe neden olması için atmosferdeki O_2'nin on katının CO_2'ye çevrilmiş

[1] Kloroplastlar ve fotosentez okyanuslardaki alglerde ve siyanobakterilerde de gerçekleşir; bunların ikisini de basitleştirilmiş betimlemem içerisinde bitki yaşamı içerisinde ele alıyorum. (Bir anlamda siyanobakteriler de kloroplastın bir formu sayılabilir.)

olması, hemen hemen herkesin CO_2 zehirlenmesinden ölmesi için de bunun bir beş katı kadarının daha çevrilmiş olması gerekir; kısacası toplamda elli katına ulaşmak gerekir. Ben bunun gerçekleşmesi için akla yatacak bir mekanizma bulmayı başaramadım.

Öyleyse Profesör Brand'in söylediği yanlış mı? (Kuramsal fizikçiler bile hata yapabilir. Özellikle de kuramsal fizikçiler. Biliyorum, çünkü onlardan biriyim.) Büyük ihtimalle evet, söylediği yanlış ama doğru olması da ihtimaller dâhilinde. Profesör haklı *olabilirdi* ancak bu jeofizikçilerin okyanus tabanları hakkındaki bilgisinin ciddi bir biçimde kusurlu olmasını gerektirirdi.

Okyanus tabanlarında da karada olduğu gibi bozunmamış organik malzeme vardır. Jeofizikçiler okyanus tabanlarındaki miktarın karadakinin yirmide biri kadar olduğunu tahmin ediyorlar. *Eğer* hatalılarsa ve okyanus tabanlarında karadakinden elli kat daha fazla varsa ve *eğer* bunu hızla deşeleyip açığa çıkaracak bir mekanizma varsa, o zaman bunun CO_2 üretmek üzere bozunması herkesin nefes alacak oksijensiz kalmasına ve CO_2 zehirlenmesinden ölmesine neden olabilir.

Öte yandan her birkaç bin yılda bir gerçekleşen bir istikrarsızlık okyanusun altüst olmasını tetikler. Yüzeydeki su alta çöker ve alttaki suyu yüzeye iter. Cooper'ın yaşadığı dönemde böyle çok şiddetli bir altüst oluşun yaşanıp yukarıya sürüklenen taban suyunun okyanus tabanının organik materyalinin çoğunu kendisiyle birlikte taşıması düşünülebilir. Birden atmosfere maruz kalan bu malzeme bozunabilir ve atmosferdeki O_2'yi öldürücü miktarda CO_2'ye dönüştürebilir.

Olamaz mı? Olabilir. Ama iki nedenle bu olasılık çok düşüktür: Okyanus tabanında jeofizikçilerin düşündüğünden 1000 kat daha fazla bozunmamış organik malzeme olması çok uzak ihtimaldir ve bu kadar şiddetli bir okyanus altüst oluşunun gerçekleşmesi çok uzak ihtimaldir[2].

Hal böyleyken *Yıldızlararası*'nda dünya kesin biçimde ölmekte ve insanlık kendisine yeni bir ev bulmak zorundadır. Güneş sistemi dünya hariç konuksever değildir, bu yüzden arayış güneş sistemimizin ötesine uzanmıştır.

---

[2] Jeofiziksel tahminlerdeki çok büyük belirsizliklere ilişkin bazı niceliksel ayrıntılar ve açıklamalar için bu kitabın sonundaki *Teknik Notlar*'a bakınız.

13

YILDIZLARARASI YOLCULUK

İlk toplantılarında Profesör Brand Cooper'a insanlık için yeni yerleşim yerlerinin araştırılması amacıyla uzaya Lazarus görev güçlerinin gönderildiğini söyler. Cooper yanıt verir: "Güneş sistemimizde yaşamı destekleyebilen bir gezegen yok, en yakın yıldıza ulaşmak da binlerce yıl sürer. Bu çabaya faydasız demek bile fazla olur. Onları nereye yolladınız Profesör?"

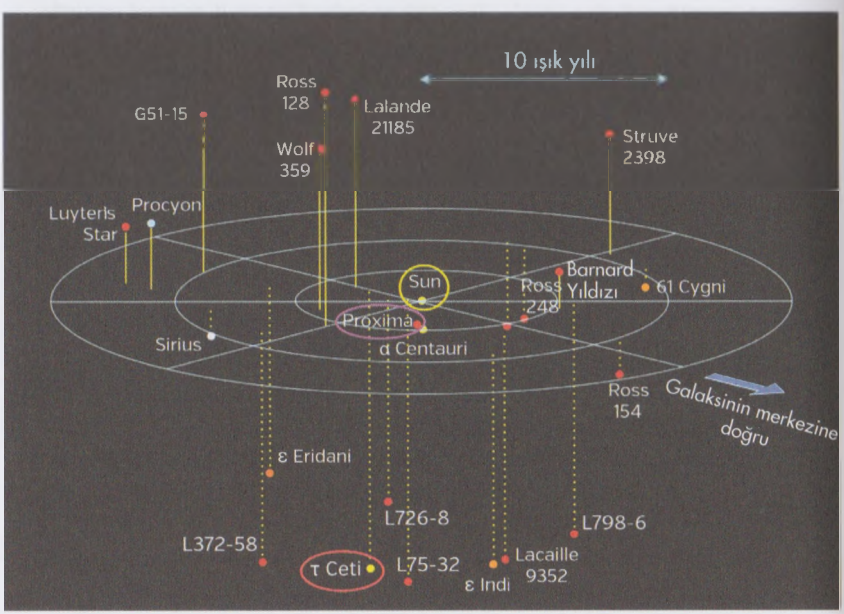
Faydasızdan-bile-beter bu zorluk, en yakın yıldızların ne kadar uzak olduğunun farkına vardığınızda apaçık hale gelir (Şekil 13.1). Şüphesiz eğer bir solucandeliğiniz yoksa...

En Yakın Yıldızların Uzaklığı

Yerleşime uygun bir gezegene sahip olduğu düşünülen (güneşimiz hariç) en yakın yıldız Tau Ceti dünyadan 11,9 ışık yılı uzaktadır; bu demektir ki ışık hızıyla yolculuk etsek ona ulaşmak 11,9 yılımızı alır. Bizim bilmediğimiz yerleşilebilecek başka gezegenler varsa da, bundan çok daha yakın olmadıkları kesindir.

Tau Ceti'nin aşina olduğumuz başka şeylerle karşılaştırıldığında bizden ne kadar *uzak* olduğunu anlamak için, gelin uzaklık ölçeğini aşırı derecede düşürelim. Bu uzaklığın New York şehrinden Avustralya'daki Perth şehrine, dünyanın çevresinin yarısı kadar olduğunu düşünelim.

Güneşten sonra bize en yakın yıldız Proxima Centauri dünyadan 4,24 ışık yılı uzaktadır ancak elimizde onun yerleşilebilir bir gezegene sahip olduğuna ilişkin bir kanıt yoktur. Tau Ceti'nin uzaklığını New York ile Perth arası olarak düşündüğümüzde, Proxima Centauri'nin uzaklığı New York ile Berlin arası kadardır. Bize Tau Ceti'den çok daha yakındır denemez!



Şekil 13.1: Dünyadan 12 ışık yılı uzaklık içerisinde yer alan bütün yıldızlar. Güneş, Proxima Centauri ve Tau Ceti sarı, mor ve kırmızı yuvarlak içine alınmıştır. [*Bu haritayı Richard Powell'ın www.atlasoftheuniverse.com sayfasından uyarladım.*]

Karşılaştırma yapmak için insanların yıldızlararası uzayda en uzağa gönderdiği insansız uzay aracı olan *Voyager 1*'in şu an dünyadan yaklaşık 18 ışık saati uzakta olduğunu belirtelim. Bu uzaklığa ulaşmak için otuz yedi yıl yolculuk etmesi gerekti. Tau Ceti'nin uzaklığını New York ile Perth arası olarak kabul ettiğimizde, bu durumda dünya ile *Voyager 1* arasındaki mesafe yaklaşık 3 kilometre (2 mil) oluyor: Empire State binasından Greenwich Village'ın güneyine kadar olan uzaklık. Bu New York'tan Perth'e olan mesafeden aşırı derecede azdır.

Dünya ile Satürn arasındaki uzaklık daha da azdır: Empire State binasından Park Avenue'ya olan mesafe, New York'ta doğu-batı yönünde iki blok kadardır ve 200 metre tutar. Dünya ile Mars arası mesafe sadece 20 metre; dünya ile ayın arası ise (şimdiye kadar insanların gittiği en uzak mesafe) sadece 6 santimetredir.

Dünyanın çevresinin yarısı kadar bir uzaklığa gitmenin zorluğu ile bizim aya gitmekle başardığımız *altı santimetre* yolculuğu birbiriyle karşılaştırın. İnsanları güneş sistemimizin dışındaki yerleşilebilir gezegenlere götürmek için gerekli olan teknolojik sıçrama budur!

Yirmi Birinci Yüzyıl Teknolojisiyle Yolculuk Süreleri

Ⓓ

Voyager 1 Jüpiter ve Satürn etrafından yaptığı kütleçekim sapan atışlarından destek alarak güneş sisteminin dışına çıkarken saniyede 17 kilometre hızla yol alıyor. *Yıldızlararası*'nda *Endurance* dünyadan Satürn'e yolculuğunu saniyede ortalama 20 kilometrelik bir hızla iki yılda tamamlıyor. Benim tahminime göre yaşadığımız bu yirmi birinci yüzyılda roket teknolojisi ve güneş sistemindeki kütleçekim sapanları birlikte kullanıldığında ulaşılacak en yüksek hız saniyede yaklaşık 300 kilometredir.

Saniyede 300 kilometrelik bu hızla Proxima Centauri'ye ulaşmak için 5.000 yıl, Tau Ceti'ye ulaşmak için 13.000 yıl gerekir. İç açıcı bir beklenti olduğu söylenemez!

Yirmi birinci yüzyılda çok daha hızlı gidebilmek için solucan deliği gibi bir şeye muhtacız (14. Bölüm).

Çok Uzak Geleceğin Teknolojisi

ⒷⓉ

Teknoloji bilgisine sahip bilimciler ve mühendisler ışık hızına yakın hızlarda yolculuğu mümkün kılacak çok uzak geleceğin teknolojilerinin neler olabileceğini düşünmek için çok çaba sarf etmişlerdir. İnternetten araştırarak fikirleri hakkında epey bir bilgi edinebilirsiniz. Bence bu fikirleri gerçekleştirmek insanların yüzyıllarını alacaktır. Ama beni şu konuda ikna ettiklerini söyleyebilirim: Son derece gelişmiş uygarlıkların yıldızların arasındaki mesafeyi ışık hızının onda biri ya da daha fazlası bir hızla geçmeleri mümkün olabilir.

Işık hızına yakın hızlarda seyahat örneklerinden benim ilgimi çeken acayip ama hoş üç örneği sizinle paylaşmak istiyorum.

Termonükleer Füzyon

BT

Termonükleer füzyon [birleşme] için bu üç fikir içerisinde en tutucusu diyebiliriz. Dünyada kontrollü füzyon prensibiyle çalışan nükleer enerji santrallerinin geliştirilmesi için yapılan Ar-Ge çalışmaları 1950'lerde başladı ve 2050'lere dek tam başarı sağlanamayacak. Ar-Ge'yle geçen tam bir yüzyıl! Bu yaşanan zorluğun gerçekçi bir ölçütü diyebiliriz.

Peki, 2050 yılında füzyon enerji santrallerine sahip olmamız uzay araçlarını füzyonla çalıştırma açısından ne anlam taşıyacak? İlk basit pratik tasarımlar bizi saniyede 100 kilometre, bu yüzyılın sonunda da muhtemelen saniyede 300 kilometre hıza ulaştıracak. Işın hızına yaklaşmak içinse füzyonu yepyeni bir yaklaşımla kullanabilmek zorunlu olacak.

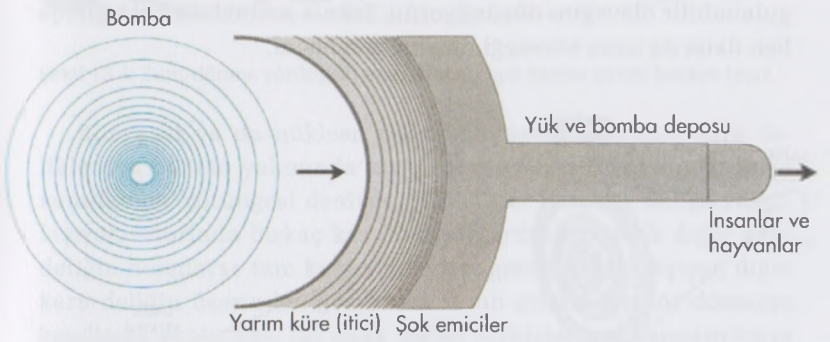
Füzyonun taşıdığı olasılıkları gösteren basit bir hesaplama yapabiliriz: İki döteryum (ağır hidrojen) atomu bir helyum atomu oluşturmak için kaynaşarak birleştiğinde, kalan kütlelerinin 0,0064'ü (yaklaşık yüzde 1'i) enerjiye çevrilir. Bunun hepsi birden helyum atomunun kinetik enerjisine (hareket enerjisine) dönüşmüş olsaydı, atom ışık hızının onda biri bir hızla hareket edebilirdi[1]. Buna göre döteryum yakıtının bütün füzyon enerjisini bir uzay aracının düzenli hareketine çevirebiliyor olsaydık kabaca ışık hızının 1/10'u hızında, eğer zekiysek bundan biraz daha yüksek hızda bir uzay aracı elde edebiliriz demektir.

1968 yılında büyük saygı duyduğum müthiş bir fizikçi olan Freeman Dyson yeterince gelişkin bir uygarlığın ellerinde bu sonuca ulaşabilecek bir çalışma sistemini kabaca betimleyerek analiz etti.

Termonükleer bombalar ("hidrojen bombaları") 20 kilometre çapındaki yarım küresel bir şok emicisinin tam arkasında patlatılıyor (Şekil 13.2). Bomba artıkları gemiyi ileriye itiyor ve gemi Dyson'ın en iyimser tahminiyle ışık hızının otuzda biri bir hıza

[1] Hareket enerjisi $Mv^2/2$'dir; M helyum atomunun kütlesi, v ise hızıdır. Bunu serbest bırakılan enerji olan 0,0064 Mc^2'ye eşitleyin; c ışık hızıdır. (Burada Einstein'ın ulaştığı ünlü sonucu kullanıyorum; kütleyi enerjiye çevirdiğinizde ortaya çıkarttığınız enerji kütle çarpı ışık hızının karesidir.) Bu iki formülü eşitlemenin sonucu $v^2 = 2 \times 0{,}0064c^2$ olur ve bu da v'nin c/10'a yakın olduğunu gösterir.

ulaşıyor. Daha az kaba bir tasarım daha iyi bir sonuç elde edebilir. 1968 yılında Dyson böylesi bir itme sisteminin yirmi ikinci yüzyılın sonlarına doğru, bugünün 150 yıl sonrasına ulaşmadan önce kullanışlı olamayacağı tahminini yürüttü. Bence bu bile aşırı iyimser bir tahmindir.



Şekil 13.2: Freeman Dyson'ın bomba güçlü itme sistemi. [Dyson (1968)'den alınmıştır.]

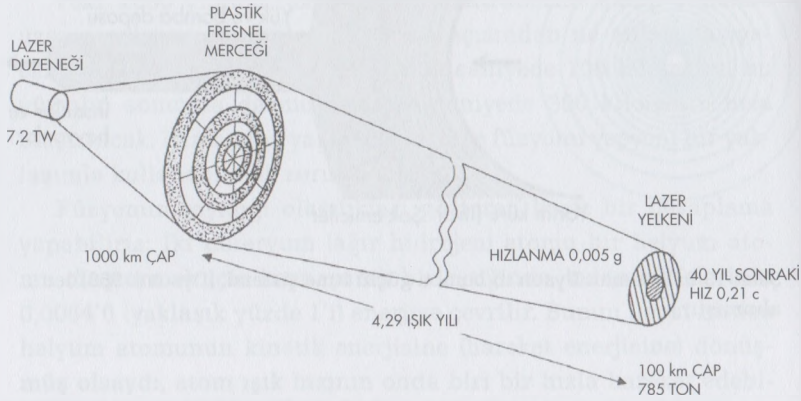
Lazer Işını ve Işık Yelkeni

Saygı duyduğum bir başka fizikçi, Robert Forward 1962 yılında uzak, odaklanmış bir lazer ışını tarafından itilen yelkenli bir uzay aracı hakkında popüler bir dergide kısa bir makale kaleme aldı (Forward 1962). 1984 yılında yazdığı bir teknik makalede tasarımını daha incelikli ve kesin bir hale getirdi (Şekil 13.3).

Uzayda ya da ayda kurulmuş güneş enerjili bir lazer düzeneği 7,2 terawatt gücünde bir lazer ışını yaratır. (Bu Amerika Birleşik Devletleri'nin 2014 yılındaki toplam enerji tüketiminin yaklaşık iki katıdır!) Bu ışın 1000 kilometre çapında bir Fresnel merceğiyle odaklanır. Işın, çapı 100 kilometre ve ağırlığı yaklaşık 1000 metrik ton olan ve kendisinden daha az kütleli bir uzay aracına bağlanmış uzaktaki bir yelkene odaklanmaktadır. (Işının yönü bir açısal saniyenin yaklaşık olarak milyonda biri bir kesinlikte olmalıdır.) Işının ışık basıncı yelkeni ve uzay aracını ışık hızının yaklaşık beşte biri

kadar bir hıza çıkartarak Proxima Centauri'ye doğru bir yolculukta kırk yıl sonra yolun yarısına ulaştırır. Ardından tertibatta yapılan bir değişiklik yolculuğun kalan yarısında geminin hızını düşürür ve böylece uzay aracı bir gezegene inebilecek yavaşlıkta bir hızla varış yerine ulaşır. (Yavaşlamanın nasıl sağlandığını bulabilir misiniz?)

Forward da Dyson gibi düzeneğinin yirmi ikinci yüzyılda uygulanabilir olacağını düşünüyordu. Teknik zorluklara baktığımda ben daha da uzun süreceği düşüncesindeyim.

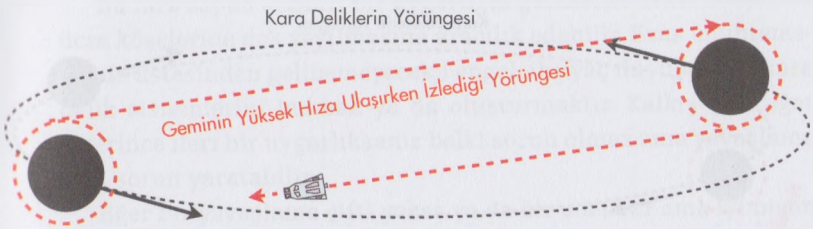


Şekil 13.3: Robert Forward'ın lazer ışını ve ışık yelkeniyle itme sistemi. [Forward (1984)'den alınmıştır.]

Bir Çift Kara Delik Sisteminde Kütleçekim Sapanı Kullanılması

Üçüncü örnek Dyson'ın bir fikrinden (1963) yola çıkarak benim ortaya attığım çılgın (bayağı çılgın!) bir proje.

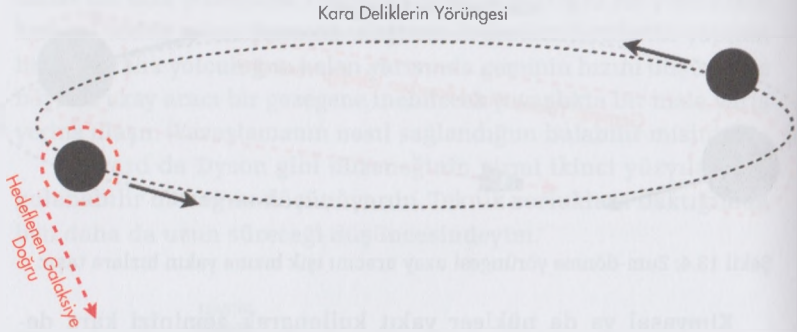
Yaşamınızın birkaç yılı içerisinde ışık hızına yakın bir hızla evrenin diğer ucuna (sadece yıldızlar arası değil, galaksiler arası bir yolculukla) uçmak istediğinizi varsayalım. *Çift kara delik sistemi* dediğimiz birbirinin etrafında dönen iki kara deliğin yardımıyla bunu yapabilirsiniz. Oldukça eliptik bir yörüngede olmaları ve kütleçekim gelgitlerinin geminize zarar vermeyeceği kadar büyük olmaları gerekir.



Şekil 13.4: Zum-dönme yörüngesi uzay aracını ışık hızına yakın hızlara taşır.

Kimyasal ya da nükleer yakıt kullanarak geminizi kara deliklerden birinin yakınında bir yörüngeye oturtuyorsunuz: Buna zum-dönme yörüngesi deniyor (Şekil 13.4). Geminiz deliğe yaklaşıyor, etrafında birkaç kez dönüyor, ardından delik diğer kara deliğin neredeyse tam karşısındayken geminiz uzaklaşıyor, diğer kara deliğin üzerinden geçiyor ve onun etrafından bir dönmeye kendisini kaptırıyor. İki delik halen birbirlerinin karşısındaysa dönme kısadır: Tekrar ilk kara deliğe yaklaşırsınız. Delikler artık birbirlerinin karşısında değilse dönme çok daha uzundur; delikler tekrar birbirlerinin karşısına gelene dek ikinci deliğin çevresinde önce bir yörüngeye oturarak beklemeniz, ondan sonra ilk deliğe doğru tekrar uçmanız gerekir. Bu şekilde, sadece delikler birbirine yaklaşırken delikler arasında yolculuk yaparak geminiz giderek artan hızlara ulaşır ve çift delik sistemi yeterince eliptikse ışık hızına istediğiniz kadar yaklaşabilirsiniz.

Her bir deliğin etrafında ne kadar kalacağınızı denetlemek üzere sadece çok az bir roket yakıtına ihtiyaç duyacak olmanız çok çarpıcı bir olgudur. Püf noktası, deliğin kritik yörüngesinin üzerinde seyretmek ve burada kontrollü dönmenizi gerçekleştirmektir. Kritik yörünge konusunu 27. Bölümde ele alacağım. Şimdilik bunun son derece *kararsız* bir yörünge olduğunu söylemek yeterlidir. Bunu oldukça pürüzsüz bir yanardağ ağzının çevresinde motosikletle dolaşmaya benzetebiliriz. Hassas bir denge kurarsanız yanardağın ağzında istediğiniz kadar kalabilirsiniz. Ayrılmak istediğinizde motosikletin ön tekerleğinin hafifçe kayması yana yatarak ağızdan aşağı kaymanıza neden olur. Kritik yörüngeden ayrılmak istediğinizde hafif bir roket itmesi, merkezkaç kuvvetlerin kontrolü almasına ve geminizin yan yatıp diğer kara deliğe doğru savrulmasına neden olur.

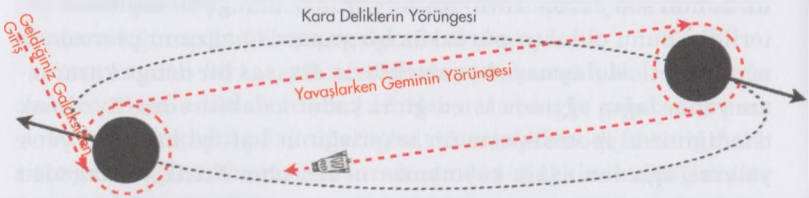


Şekil 13.5: Uzak bir galaksiye doğru gitmek üzere kritik yörüngeden ayrılma.

Arzu ettiğiniz şekilde ışık hızına yakın bir hıza çıktığınızda, geminizi kritik yörüngeden ayırarak gitmek istediğiniz evrenin uzak bir köşesindeki galaksiye doğru yola koyulabilirsiniz (Şekil 13.5).

Yolculuk uzun sürebilir; 10 milyar ışık yıllık bir uzaklığa kadar çıkabilir. Fakat ışık hızına yakın bir hızda hareket ettiğinizde zamanınız dünyadakinden çok daha yavaş akar. Işık hızına yakın bir hızdaysanız hedefinize sizin ölçümüzle birkaç yılda hatta daha kısa bir sürede ulaşabilirsiniz; eğer bulabilirseniz hedeflediğiniz yerdeki yüksek derecede eliptik bir çift kara delik sisteminin yardımıyla da yavaşlayabilirsiniz! *Bkz.* Şekil 13.6.

Eve de aynı yöntemle dönebilirsiniz. Ama eve dönüşünüz pek hoş olmayabilir. Siz sadece birkaç yıl yaşlanmışken evde milyarlarca yıl geçmiş olacaktır. Karşınızda ne bulacağınızı hayal edin.



Şekil 13.6: Hedeflenen çift kara delik sisteminde sapan atışlarıyla yavaşlama.

Bu tarz sapan atışları bir uygarlığın galaksiler arası uzayın en ücra köşelerine dek yayılmasına aracılık edebilir. Esas (muhtemelen de üstesinden gelinemeyecek!) engel, ihtiyaç duyulan çift kara delik sistemlerini bulmak ya da oluşturmaktır. Kalkış çifti eğer yeterince ileri bir uygarlıksanız belki sorun olmaz ama yavaşlama çifti sorun yaratabilir.

Eğer bir yavaşlama çifti yoksa ya da bir adet var ama iyi nişan alamamış ve onu kaçırmışsanız ne olur? Evrenin genişlemesi nedeniyle bu dikkat isteyen bir sorudur. Bir düşünün derim.

Uzak bir gelecekte ulaşılabilecek bu üç itme sistemi ne kadar heyecan verici olursa olsun, üçü de gerçekten *uzak geleceğin* işidir. Yirmi birinci yüzyıl teknolojisini kullanarak başka güneş sistemlerine ulaşmak için binlerce yıl harcamaya mahkûm durumdayız. Dünyada gerçekleşecek bir felaket durumunda daha hızlı yıldızlararası yolculuk için tek umut (son derece zayıf bir umut) *Yıldızlararası*'nda olduğu gibi bir solucandeliği ya da uzayzaman bükülmesinin başka bir uç biçimidir.

IV. SOLUCANDELİĞİ



14

SOLUCANDELİKLERİ

Solucandelikleri Adı Nereden Geliyor?

Astrofizikte solucandelikleri adını ortaya atan kişi yardımcı danışmanım John Wheeler'dı. Elmalardaki solucanlardan yola çıkmıştı (Şekil 14.1). Elmanın üzerinde yürüyen bir karınca için elmanın yüzeyi bütün evrendir. Eğer elmanın içinden bir solucan geçmişse, karıncanın yukarıdan aşağıya ulaşması için iki yol vardır: Dışarıdan dolaşmak (karıncanın evreni içinden gitmek) ya da solucandeliğinden aşağıya doğru gitmek. Solucandeliği yolu daha kısadır; karıncanın evreninde bir uçtan diğerine gitmek için kısa yol budur.

Solucandeliğinin içinden geçtiği elmanın tatlı iç yapısı karıncanın evreninin bir parçası değildir. Üç boyutlu bir yığın ya da hiperuzaydır (4. Bölüm). Solucandeliğinin duvarı, karıncanın evreninin bir parçası olarak düşünülebilir. Evrenle aynı boyutluluğa sahiptir (iki boyutludur) ve solucandeliğinin girişinde evrenle (elmanın yüzeyiyle) birleşir. Başka bir bakış açısıyla yaklaşırsak solucandeliğinin duvarı karıncanın evreninin bir parçası *değildir*; karıncanın kendi evreninde bir noktadan diğer bir noktaya ulaşma amacıyla yığının içerisinden geçmesini sağlayan bir kısa yoldur.



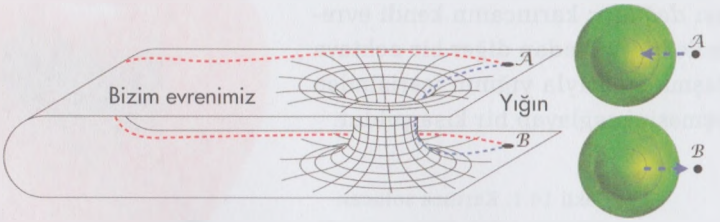
Şekil 14.1: Karınca solucandeliğine sahip elma üzerinde keşif gezisinde.

Flamm'ın Solucandeliği

Einstein'ın genel görelilik yasalarını formüle edişinden hemen bir yıl sonra, 1916 yılında Ludwig Flamm Viyana'da Einstein'ın denklemlerinin (o bu ismi vermese de) solucandeliklerini betimleyen bir çözümünü keşfetti. Bugün Einstein'ın denklemlerinin çok çeşitli türde (çok sayıda farklı şekil ve davranışa sahip) solucandeliklerine izin verdiğini biliyoruz, fakat Flamm'ınki tam olarak küresel olan ve kütleçekim sahibi madde içermeyen tek solucandeliğiydi. Flamm'ın solucandeliğinden ekvatoral bir dilim aldığımızda, böylece solucandeliği ve bizim evrenimiz (zarımız) üç değil sadece iki boyuta sahip olduğunda ve ardından evrenimize ve solucandeliğine yığından baktığımızda, bunlar Şekil 14.2'nin sol kısmında olduğu şekilde görünür.

Bizim evrenimizin boyutlarından biri çıkartıldığında, kendinizi bükülmüş katmanın ya da solucandeliğinin duvarı üzerinde hareket etmeye mahkûm edilmiş iki boyutlu bir yaratık olarak düşünmeniz gerekir. Evrenimizdeki A konumundan B konumuna yolculuk için izlenebilecek iki rota vardır: Solucandeliğinin duvarından aşağıya doğru kısa yol (mavi çizgilerle gösterilen eğri) ya da bükülmüş katmanın, evrenimizin üzerinden gidilecek uzun yol (kırmızı çizgilerle gösterilen eğri).

Elbette gerçekte evrenimiz üç boyutludur. Şekil 14.2'nin sol tarafındaki merkezdeş çemberler aslında sağda gösterilen iç içe yeşil kürelerdir. A konumundan mavi yolu izleyerek solucandeliğinin içine girerseniz giderek küçülen kürelerin içerisinden geçersiniz. Ardından birbirinin içine yuvalanmış bu kürelerin çevre uzunluklarının değişmesi durur. Sonrasında da B konumuna doğru ilerleyerek solucandeliğinden çıkarken kürelerin genişliği giderek artar.

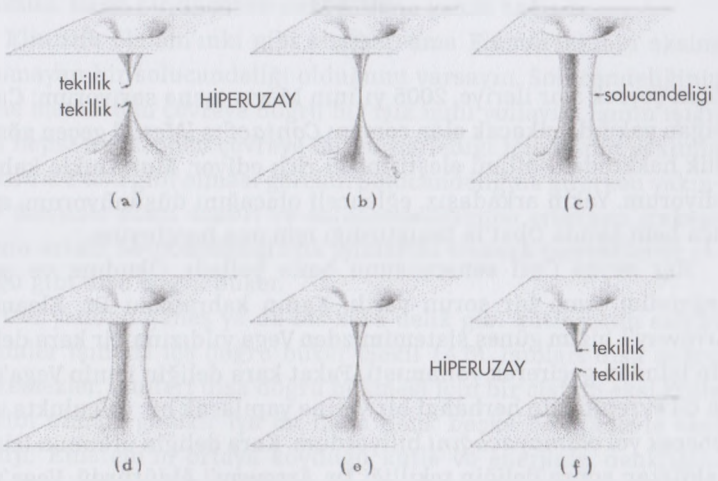


Şekil 14.2: Flamm'ın solucandeliği

On dokuz yıl boyunca fizikçiler Flamm'ın Einstein'ın denklemlerine getirdiği bu olmayacak çözüme, solucandeliğine karşı kayıtsız kaldılar. Sonra 1935 yılında bizzat Einstein ve fizikçi arkadaşı Nathan Rosen Flamm'ın çalışmasından habersiz olarak Flamm'ın çözümünü tekrar keşfettiler, özelliklerini buldular ve gerçek dünyadaki önemi hakkında tahminlerde bulundular. Flamm'ın çalışmasından habersiz olan diğer fizikçiler de onun solucandeliğine "Einstein-Rosen Köprüsü" demeye başladılar.

Solucandeliğinin Çöküşü

Einstein'ın denklemlerinin matematiğinden bu denklemlerin öngörülerinin tam bir kavranışına ulaşmak genellikle zordur. Flamm'ın solucandeliği bunun çok çarpıcı bir örneğidir. 1916 yılından 1962'ye dek neredeyse yarım bir yüzyıl boyunca fizikçiler solucandeliğinin durağan, sonsuza dek değişmez olduğunu düşündüler. Sonra da John Wheeler ve öğrencisi Robert Fuller zannedilenin aksini keşfetti. İlgili matematiğe daha yakından bakarak solucandeliğinin Şekil 14.3'te gösterildiği üzere doğduğunu, genişlediğini, küçüldüğünü ve öldüğünü keşfettiler.



Şekil 14.3: Flamm'ın solucandeliğinin (Einstein-Rosen köprüsünün) dinamikleri. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

Başlangıçta (a) resminde evrenimiz iki tekilliğe sahiptir. Zaman ilerledikçe tekillikler yığının içerisinden birbirlerine doğru uzanır ve buluşarak solucandeliğini yaratır (b). Solucandeliğinin çevre uzunluğu genişler; (c) ve (d). Ardından daralır ve inceldiği yerden kopar (e). Geride iki tekillik bırakır (f). Doğum, genişleme, küçülme ve kopma o kadar hızlı gerçekleşir ki hiçbir şey, ışık bile solucandeliğinin içinden geçerek bir taraftan diğer tarafa ulaşacak zaman bulamaz. Ulaşmaya kalkan, solucandeliğinin içinde yolculuğu göze alan herkes ya da her şey kopma noktasında yok olacaktır!

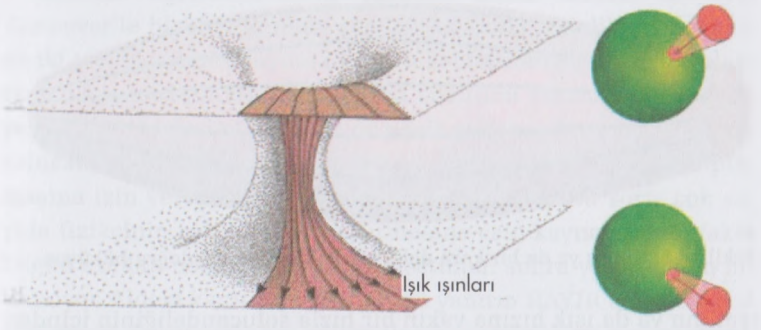
Bu öngörü kaçınılmaz bir nitelik taşır. Evren eğer olur da bir şekilde kütleçekim sahibi madde içermeyen küresel bir solucandeliği yaratırsa o solucandeliği böyle hareket ederdi. Einstein'ın görelilik yasaları bunu böyle emrediyordu.

Bu sonuç Wheeler'ı korkutmuyordu. Tam tersine bundan memnundu. O tekillikleri (uzayın ve zamanın sonsuz biçimde bükülmüş olduğu yerleri) fizik yasaları için bir "kriz" olarak görürdü. Krizler harika öğretmenlerdir. Akıllıca incelersek fizik yasaları hakkında müthiş sezgilere ulaşabiliriz. Buna 26. Bölümde döneceğim.

Mesaj

Filmi çeyrek asır ileriye, 2005 yılının Mayıs ayına sarıyorum; Carl Sagan yakında çıkacak olan romanı *Contact*'ta [*Mesaj*] geçen görelilik hakkındaki bilimi eleştirmemi rica ediyor. Mutlulukla kabul ediyorum. Yakın arkadaşız, eğlenceli olacağını düşünüyorum, ayrıca beni Lynda Obst'la tanıştırdığı için ona borçluyum.

Her neyse Carl senaryosunu bana yolladı. Okudum ve çok beğendim. Ama bir sorun vardı. Kadın kahramanı Dr. Eleanor Arroway'i bizim güneş sistemimizden Vega yıldızına bir kara deliğin içinden geçirerek yollamıştı. Fakat kara deliğin içinin Vega'ya ya da evrenimizin herhangi bir yerine yapılacak bir yolculukta izlenecek yol *olamayacağını* biliyordum. Kara deliğin ufkunun içine daldıktan sonra deliğin tekilliği Dr. Arroway'i öldürürdü. Vega'ya çabuk ulaşmak için bir kara deliğe değil solucandeliğine ihtiyacı vardı. Fakat *kopmayan* bir solucandeliğine. *Karşıdan karşıya geçilebilecek* bir solucandeliğine...

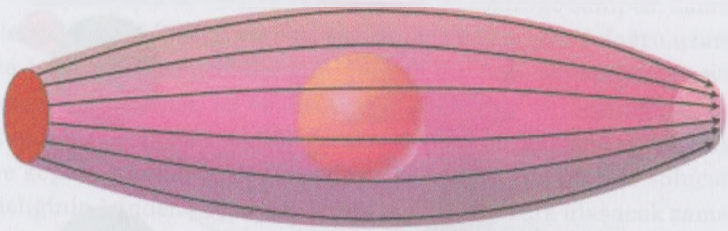


Şekil 14.4: Merkezden çevreye doğru bir ışık ışını küresel, kat edilebilir bir solucandeliğinin içinden geçiyor. *Solda*: Bir uzay boyutu eksik olduğunda yığından görüldüğü şekliyle. *Sağda*: Evrenimizin içinde görüldüğü şekliyle. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

Böylece kendi kendime, kısıldığı yerden kopmasını engelleyebilecek, onu açık tutabilmek, böylece içinden geçilebilir hale getirmek için Flamm'ın solucandeliğine ne yapmam gerekir diye sordum. Basit bir düşünce deneyi bana yanıtı sağladı.

Elinizde Flamm'ınki gibi küresel, ama Flamm'ınkinin aksine kopmayan bir solucandeliği olduğunu varsayın. Solucandeliğinin içine merkezden çevreye doğru bir ışık ışını yollayın. Işının ışığının hepsi merkezden çevreye doğru ilerlediği için ışının şeklinin Şekil 14.4'teki gibi olması gerekir. Solucandeliğine girerken yakınsar (kesitsel alanı azalır) ve solucandeliğinden çıkarken ıraksar (alanı artar). Solucandeliği ışık ışınlarını ıraksak merceklerde olduğu gibi dışa doğru büker.

Öte yandan güneş ya da bir kara delik gibi kütleçekim sahibi cisimler ışınları içe doğru büker (Şekil 14.5). Işınları dışa doğru bükemezler. Işınları dışa doğru bükmesi için bir cismin eksi kütle sahibi olması gerekir (ya da buna denk başka bir ifadeyle eksi enerji; Einstein'ın ortaya koyduğu kütle ve enerjinin denkliğini hatırlayın). Bu temel gerçekten hareketle vardığım sonuç, küresel bir solucandeliğinin eksi enerjiye sahip bir tür malzemeyle kaplanmış olması gerektiği oldu. En azından malzemenin enerjisi ışık



Şekil 14.5: Güneş ya da bir kara delik bir ışık ışınını içe doğru büküyor.

ışınının ya da ışık hızına yakın bir hızla solucandeliğinin içinden geçen herhangi başka bir şey ya da kimsenin gördüğü biçimiyle eksi olmak zorundaydı.[1] Böyle malzemelere "egzotik madde" adını verdim. (Daha sonra öğrendim ki, Einstein'ın görelilik yasalarına göre küresel olsun olmasın *bütün* solucandeliklerinin içinden ancak ve sadece egzotik maddeyle kaplanmışsa geçilebilir. Davis'teki California Üniversitesinden Dennis Gannon'ın 1975 yılında kanıtladığı teoremin gereği budur. Okuma-yazmam zayıf olduğu için Gannon'ın teoreminden habersizdim.)

Kuantum fiziğinin yasalarının acayipliği sağ olsun; egzotik maddenin *var olabilmesi* son derece şaşırtıcı bir gerçektir. Hatta fizikçiler laboratuarlarında, birbirine yakın biçimde konumlandırılmış elektriksel açıdan iletken iki plaka arasında *çok küçük* miktarlarda egzotik madde oluşturmayı bile başardılar. Buna Casimir etkisi adı veriliyor. Ancak ben 1985 yılında bir solucandeliğinin açık kalmasına *yetecek miktarda* egzotik madde içerip içeremeyeceği konusunda emin değildim. Bu yüzden iki şey yaptım.

Birincisi dostum Carl'a Eleanor Arraway'i Vega'ya kara delik yerine bir solucandeliğinin içinden göndermesini öneren bir mektup yazdım ve ekte solucandeliğinin egzotik maddeyle kaplanmış olması gerektiği yönünde yaptığım hesaplamaların bir kopyasını yolladım. Carl önerimi kabul etti (ve romanının teşekkürler bölümünde denklemlerimden bahsetti). İşte solucandeliklerinin modern bilimkurguya; romanlar, sinema filmleri ve televizyona girişi böyle oldu.

[1] Enerji görelilik fiziğinde bir acayiptir; birinin ölçtüğü enerji, kişinin ne kadar hızlı ve ne yönde hareket ettiğine bağlıdır.

İkincisi öğrencilerimden ikisiyle, Mark Morris ve Ulvi Yurtsever'le birlikte içinden geçilebilen solucandelikleri hakkında iki teknik makale yayımladım. Makalelerimizde fizikçi meslektaşlarımızın düşünmesi için, acaba kuantum yasaları ve görelilik yasalarının birleşimi çok ileri düzeyde gelişmiş bir uygarlığın bir solucandeliğini açık tutmaya yetecek kadar egzotik madde toplamasına izin verebilir mi, sorusunu ortaya attık. Bu soru, çok sayıda fizikçinin çok sayıda araştırmasına esin kaynağı oldu; fakat bugün aradan neredeyse otuz yıl geçtikten sonra yanıtı halen bilinmiyor. Eldeki kanıtların üstünlüğü yanıtın HAYIR olabileceğini gösteriyor, dolayısıyla kat edilebilir solucandelikleri olanaksızdır. Fakat nihai bir yanıttan da halen uzağız. Bu konuda daha ayrıntılı bir okuma için fizikçi meslektaşlarım Allen Everett ve Thomas Roman'ın *Time Travel and Warp Drives* [*Zaman Yolculuğu ve Bükülme Sürüşleri*] kitabına bakabilirsiniz (Everett ve Roman 2012).

İçinden Geçilebilen Bir Solucandeliğinin Görünüşü

(BT)

İçinden geçilebilen bir solucandeliği bizim evrenimizde yaşayan bizim gibi insanlara nasıl görünür? Kesin bir yanıt veremem. Bir solucandeliği açık *tutulabilse* bile bunun *nasıl* olduğunun kesin ayrıntıları gizemini korur, dolayısıyla solucandeliğinin şeklinin kesin ayrıntıları bilinmemektedir. Fakat aksine kara delikler için Roy Kerr bize kesin ayrıntıları vermiştir, bu yüzden 8. Bölümde anlattığımız net öngörüleri yapabiliyorum.

Dolayısıyla solucandelikleri için ancak bilimsel bir akıl yürütme yapabiliyorum ancak bu tahminlere ilişkin azımsanmayacak da bir güvenle konuşabiliyorum. Başlığa (BT) sembolünü bu yüzden koydum.

Dünya üzerinde bir solucandeliği olduğunu ve bunun yığının içerisinden geçerek Dublin, İrlanda'daki Grafton Caddesinden Güney California'daki çöle açıldığını hayal edelim. Solucandeliğinin içerisindeki uzaklık sadece birkaç metre olabilir.

Solucandeliğinin girişlerine "ağızlar" denir. Dublin ağzının karşısındaki kaldırımın üstündeki bir kafede siz oturuyorsunuz. California ağzının açıldığı çölde de ben duruyorum. İki ağız da kristal topa benziyor. Ben California ağzının içine baktığımda



California çölündeki ağız



Dublin'deki ağız

Şekil 14.6: Bir solucandeliğinin ağızlarının içine bakıldığında görülen görüntüler. [Soldaki fotoğraf Catherine MacBride'a, sağdaki Mark Interrante'ye ait.]

Dublin'deki Grafton Caddesinin çarpık bir görüntüsünü görüyorum (Şekil 14.6). Bu görüntü bana, optik bir fiberden geçen ışığa benzer biçimde, Dublin'den California'ya solucandeliği yoluyla yolculuk eden ışık tarafından getiriliyor. Siz de Dublin'deki ağzınızın içine baktığınızda California çölündeki Joshua ağaçlarının (kaktüs ağaçları) çarpık bir görüntüsünü görüyorsunuz.

Solucandelikleri Astrofiziksel Cisimler Olarak Doğal Biçimde Var Olabilir mi?



Yıldızlararası'nda Cooper "solucandeliği doğal olarak gerçekleşen bir olgu değil" diyor. Onunla tamamen aynı fikirdeyim! Fizik yasaları içinden geçilebilen solucandeliklerine izin verseydi bile bence gerçek evrende doğal biçimde var olmaları son derece düşük bir ihtimaldi. Yine de bunun spekülasyondan fazla öteye gitmediğini, bir bilimsel tahmin bile sayılamayacağını itiraf etmeliyim. Belki bilimsel bir spekülasyon sayılabilir ama yine de spekülasyondur, bu yüzden bu bölüme  işareti koydum.

Doğal solucandelikleri konusunda neden bu kadar karamsarım? Evrenimizde yaşlanınca solucandeliği haline gelebilecek cisimler görmüyoruz. Fakat astronomlar nükleer yakıtlarını tüketiklerinde çökerek kara delikler oluşturacak olan olağanüstü çok sayıda kütleli yıldız görüyorlar.

Öte yandan solucandeliklerinin mikroskopla görülemeyecek kadar küçük ölçeklerde "kuantum köpüğü" formunda doğal olarak *var olduklarını* umut etmek için de bir sebep yok (Şekil 14.7). Bu köpük, henüz yeterince anlaşılamamış kuantum kütleçekim yasaları tarafından bir şekilde yönetilen tarzda sürekli varlık kazanıp kaybederek dalgalanan solucandeliklerinin oluşturduğu varsayımsal bir ağdır (26. Bölüm). Köpük, herhangi bir anda bir biçime sahip olmasının belli bir olasılık, başka bir biçime sahip olmasının başka bir olasılık olması ve bu olasılıkların sürekli değişmesi anlamıyla olasılığa dayanmaktadır. Ayrıca köpük gerçekten çok çok küçüktür: Bir solucandeliğinin tipik uzunluğu Planck uzunluğu dediğimiz uzunlukta olacaktır: 0,00000000000000000000000000000001 santimetre ki bu bir atom çekirdeğinin büyüklüğünün milyarda birinin yüz milyarda biridir. Buna küçük denir!!!

John Wheeler 1950'li yıllarda kuantum köpüğünün varlığı konusunda ikna edici gerekçeler ileri sürmüştü ama şimdi kuantum kütleçekimi yasalarının köpüğü bastırabileceği ve hatta doğmasını engelleyebileceği yönünde kanıtlara sahibiz.

Kuantum köpüğü gerçekten *varsa*, umarım solucandeliklerinden bazılarının kendiliğinden insan boyutlarına ya da büyük boyutlara ulaşabildiği ve hatta bunu evren çok çok gençken evrenin son derece hızlı "şişerek" genişlemesi sırasında yaptığı doğal bir süreç vardır. Fakat biz fizikçiler böyle doğal bir büyümenin olabileceği ya da olduğu hakkında en küçük bir kanıtın bile ipucuna sahip değiliz.



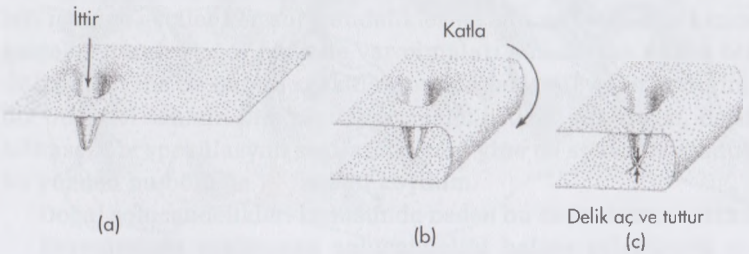
Şekil 14.7: Kuantum köpüğü. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

Doğal solucandeliklerinin var olabilmesine ilişkin diğer çok küçük umut evrenin Büyük Patlamayla yaratılmasıdır. İçinden geçilebilen solucandeliklerinin Büyük Patlamayla birlikte oluşmuş olduğu düşünülebilir ama hiç muhtemel değildir. Düşünülebilir olması, Büyük Patlamayı hiç de iyi anlayamamış olmamız basit gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Muhtemel olmaması, Büyük Patlama hakkında bildiğimiz hiçbir şeyin o esnada içinden geçilebilen solucandeliklerinin oluşabileceği konusunda bize herhangi bir ipucu vermemesi nedeniyledir.

Solucandelikleri Bizden Aşırı İleri Bir Uygarlık Tarafından Yaratılabilir mi?

İçinden geçilebilen solucandeliklerinin son derece gelişkin bir uygarlık tarafından yapılmış olması bu konuda taşıdığım tek ciddi umut. Fakat bunda da devasa engellerle karşılaşılacaktır, dolayısıyla karamsarım.

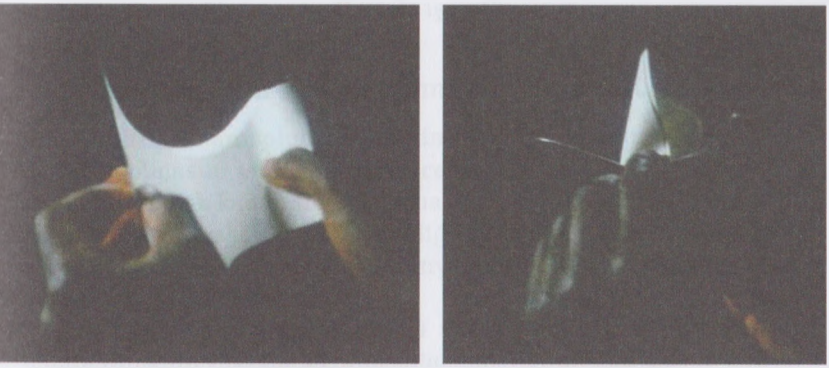
Daha önce hiç yokken bir solucandeliği yapmanın yollarından biri, onu kuantum köpüğünden çıkartmak (eğer köpük varsa), insan boyutlarına veya daha üzerine dek büyütmek ve açık kalması için egzotik maddeyle kaplamaktır. Bu aşırı gelişmiş bir uygarlık için bile epey uzun bir sıra gibi gözüküyor; ancak belki de bunun nedeni sadece bizim köpüğü, çıkartılmasını ve büyütülmesinin ilk evrelerini kontrol eden kuantum kütleçekim yasalarını anlamıyor oluşumuzdur (26. Bölüm). Elbette egzotik maddeyi de pek fazla tanımıyoruz.



Şekil 14.8: Bir solucandeliği yaratmak. [*Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım* Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*'den alınmıştır.*]

İlk bakışta bir solucandeliği yapmak kolay gözüküyor (Şekil 14.8). Sadece bir baca ağzı yaratmak için bizim zarımızın (bizim evrenimizin) bir parçasını yığının içine doğru ittir, yığının içinde yayılan zarımızı katla, baca ağzının tam altında zarımızın içinde bir delik aç, baca ağzında bir delik aç ve iki deliği birbirine tuttur. *Hepsi bu!*

Yıldızlararası'nda Romilly aynı şeyi bir kâğıt parçası ve kalemle gösteriyor (Şekil 14.9). Kalem ve kâğıtlarla oynarken dışardan ne kadar kolay görünse de, bahsedilen kâğıt parçası bizim zarımız olduğunda ve bu işlemler bizim zarımızın içinde yaşayan bir uygarlık tarafından zarın içerisinden gerçekleştirilmek zorunda olduğunda işler korkunç ürkütücü bir hal alıyor. Aslına bakarsanız ilki, yani zarımızın içinde bir baca ağzı yaratmak haricinde (bu sadece bir nötron yıldızı gibi, çok yoğun bir kütleyi gerektirir) bu manevraların herhangi birinin zarımızın içerisinden nasıl gerçekleştirileceği konusunda hiçbir fikre sahip değilim. Üstelik zarımızın içinde delikler açmak mümkün olsaydı bile bu ancak kuantum kütleçekimi yasalarının yardımıyla yapılabilirdi. Einstein'ın görelilik yasaları zarımızın yırtılmasını yasaklar, bu yüzden tek umudumuz yırtığı yasaların geçersiz olduğu yerde, kuantum kütleçekimi dünyasında yapmaktır. O zaman da yeniden hemen hiç bilmediğimiz alana girmiş oluyoruz (Şekil 3.2).



Şekil 14.9: Romilly solucandeliklerini açıklıyor. *Solda*: Bir kâğıt parçasını katlıyor. *Sağda*: Kâğıdın içinden bir kalem geçirerek iki parçayı birleştiriyor. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

Sözün Özü

Fizik yasalarının içinden geçilebilen solucandeliklerine izin verdiğinden şüpheliyim ama bu tamamen önyargı da olabilir. Hatalı olabilirim. *Var olabiliyorlarsa da*, astrofiziksel evrende doğal biçimde oluşabildiklerinden son derece kuşkuluyum. Oluşabilmeleri konusunda tek gerçek umudum ise ileri derecede gelişmiş bir uygarlığın elinde yapay yoldan oluşmaları. Fakat böyle bir uygarlığın bunu nasıl yapabileceği konusunda son derece cahiliz. Uygarlıkların, en azından zarımızın (evrenimizin) içindeki en gelişmişleri açısından bile durum epey iç karartıcı görünüyor.

Ama *Yıldızlararası*'nda solucandeliğinin yığının içinde yaşayan, varlıkları (yığının dört boyutu gibi) dört uzay boyutuna sahip bir uygarlık tarafından yapıldığı, açık tutulduğu ve Satürn'ün yanına yerleştirildiği düşünüldü.

Burada *tümüyle* bilinmeyen topraklardayız. Yine de yığın varlıkları 22. Bölümde tartışacağız. Bu arada *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliği hakkında konuşalım.

15

YILDIZLARARASI'NDAKİ SOLUCANDELİĞİNİN GÖRSELLEŞTİRİLMESİ



Yıldızlararası'ndaki solucandeliğinin yığının içerisinde yaşaması muhtemel aşırı gelişmiş bir uygarlık tarafından inşa edildiği düşünüldü. Bu düşünceden hareketle *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğinin görselleştirilmesi için temelleri belirlerken Oliver James[1] ve ben aşırı gelişmiş mühendislermişiz gibi davrandık. Solucandeliklerine fizik yasalarının *izin verdiğini* varsaydık. Solucandeliğini yapanların onu açık tutmak için gereken yeterli egzotik maddeye sahip olduklarını varsaydık. Yapanların solucandeliğinin içinde ve çevresinde uzay ve zamanı biz nasıl arzu edersek o şekilde bükebildiklerini varsaydık. Bunlar son derece uç varsayımlardı, bu yüzden bu bölümü spekülasyonun 'siyle işaretliyorum.

Solucandeliğinin Kütleçekimi ve Zaman Bükülmesi

Christopher Nolan solucandeliğinin zarif bir kütleçekim etkisine sahip olmasını istedi. *Endurance*'ı kendi etrafında yörüngede tutmaya yetecek kadar şiddetli, ama hafif bir roket patlamasının *Endurance*'ı yavaşlatıp solucandeliğinin içine nazikçe düşmesini sağlayacak kadar da zayıf. Bu dünyanınkinden çok daha az bir kütleçekim etkisi demekti.

Einstein'ın zaman bükülmeleri yasası bize solucandeliğinin içinde zamanın yavaşlamasının solucandeliğinin kütleçekim etki-

---

[1] Double Negative'deki baş bilimci Oliver James'in solucandelikleri ve kara deliklerin *Yıldızlararası*'nda görselleştirilmelerine temel oluşturan bilgisayar kodunu yazdığını hatırlatalım; *bkz.* 1 ve 8. Bölüm.

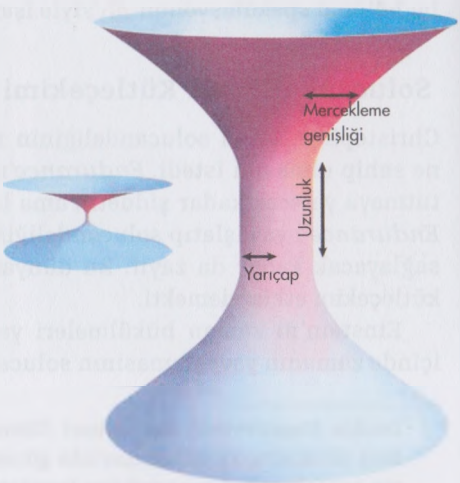
sinin şiddetiyle orantılı olduğunu söyler. Bu çekme dünyanınkinden daha zayıf olduğu için, zamanın yavaşlaması dünya üzerindekinden sadece milyarda bir daha küçük olmak zorundadır (bu bir milyar saniyelik zamanda, yani otuz yılda bir saniyelik yavaşlama demektir). Bu yavaşlama o kadar azdır ki Oliver ve ben solucandeliğini tasarlarken bunu göz ardı ettik.

Solucandeliğinin Şeklini Ayarlamak İçin "Kollar"

Solucandeliğinin şekli konusundaki son karar hakkı Christopher Nolan (yönetmen) ve Paul Franklin'in (görsel efektler amiri) elindeydi. Benim görevim Oliver ve Double Negative'deki çalışma arkadaşlarına şekli ayarlamak için kullanabilecekleri "kolları" (ya da teknik dille söylersek parametreleri) vermekti. Daha sonra onlar solucandeliğinin görünüşünün parametrelerin çeşitli ayarlarındaki simülasyonlarını yarattılar ve bunları içlerinden en etkilisini seçecek olan Chris ve Paul'e gösterdiler.

Ben solucandeliğinin şekli için üç parametre verdim; böylelikle şekli ayarlamanın üç yolunu göstermiş oldum (Şekil 15.1).

Birinci parametre solucandeliğinin yığından içeri bakan aşırı gelişmiş düzeydeki mühendis tarafından ölçülmüş *yarıçapıdır* (Gargantua'nın yarıçapının benzeridir). Bu yarıçapı $2\pi = 6{,}28318...$ ile çarptığımızda, *Endurance*'ı solucandeliğinin çevresinde ve içine doğru uçururken Cooper'ın ölçtüğü gibi solucandeliğinin çevre



Şekil 15.1 Yığından görüldüğü haliyle bir solucandeliği ve şeklini ayarlamak için verdiğim üç parametre. [Soldaki küçük resim aynı solucandeliğinin yığının içinde çok daha uzaktan görünüşüdür, böylece daha dış kısımlarını görebiliyoruz.]

uzunluğunu elde ederiz. Chris yarıçapı ben çalışmaya başlamadan önce seçti. Bir diğer isteği de solucandeliğinin yıldızları kütleçekimsel merceklemesinin o sırada NASA'nın elinde bulunan en iyi büyük teleskop teknolojisiyle dünyadan zar zor da olsa görülebilmesiydi. Bu yarıçapı yaklaşık bir kilometrede sabitledi.

İkinci parametre Cooper ya da yığının içindeki bir mühendis tarafından ölçülmüş haliyle solucandeliğinin *uzunluğudur*.

Üçüncü parametre solucandeliğinin ışığı, arkasındaki cisimlerden ne kadar güçlü biçimde merceklediğini belirlemektedir. Merceklemenin ayrıntıları solucandeliğinin ağızlarının yakınındaki uzayın şekli tarafından sabitlenir. Ben bu şekli dönmeyen bir kara deliğin ufkunun dışındaki uzayın şekline benzer şekilde seçtim. Seçtiğim şeklin ayarlanabilir tek bir parametresi vardı: Güçlü merceklenme yaratan bölgenin genişliği. Buna mercekleme genişliği[2] adını verdim ve Şekil 15.1'de de gösterdim.

Parametrelerin Solucandeliğinin Görünümüne Etkisi

Aynı Gargantua için yaptığım gibi (8. Bölüm) Einstein'ın görelilik yasalarını kullanarak solucandeliğinin etrafında ve içinde ışık ışınlarının izleyeceği yollar için denklemleri çıkardım, solucandeliğinin kütleçekimsel merceklenmesini hesaplamak için denklemlerimi kullanmamı sağlayacak bir işlem düzenledim ve buna dayanarak bir kameranın solucandeliğinin etrafında ve içinde hareket ederken ne göreceğini ortaya çıkardım. Denklemlerim ve işlemlerimin beklediğim türde görüntüler ürettiğini gördükten sonra bunları Oliver'a yolladım ve o da film için gereken IMAX görüntü kalitesini yaratma becerisine sahip bilgisayar kodunu yazdı. Eugénie von Tunzelmann buna solucandeliğinin merceklemesi için arka plandaki yıldız sahalarını ve astronomik cisimlerin görüntülerini ekledi ve ardından o, Oliver ve Paul benim parametrelerimin etkisini araştırmaya başladılar. Ben de bağımsız olarak kendi incelemelerimi yaptım.

---

[2] Merceklemenin çoğu solucandeliğinin yığının içindeki şeklinin oldukça eğrisel olduğu bölgenin içerisinde gerçekleşir. Bu dış açısının 45 dereceden daha dik olduğu bölgedir; bu yüzden mercekleme genişliğini, yığının içinde solucandeliğinin boğazından 45 derece dış açılı konuma olan radyal uzaklık olarak tanımladım.

Eugénie Satürn'e solucandeliğinin içinden baktığımız Şekil 15.2 ve 15.4'teki resimleri bu kitap için hazırlama nezaketini gösterdi. (Onun resimlerinin çözünürlüğü benim ilkel bilgisayar kodumun üretebileceğinden çok daha yüksekti.)

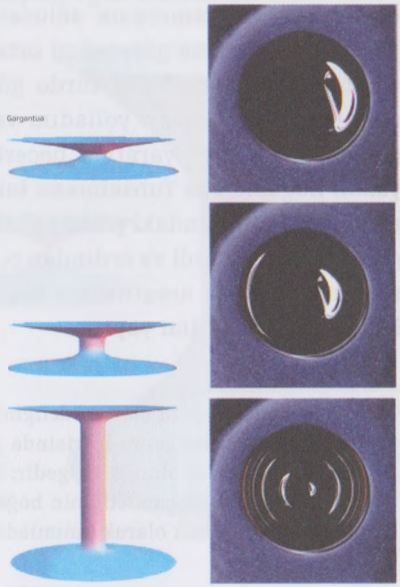
Solucandeliğinin Uzunluğu

İlk önce solucandeliğinin uzunluğunun gösterişsiz merceklemeyle (küçük mercekleme genişliğiyle) yarattığı etkiye baktık; *bkz.* Şekil 15.2.

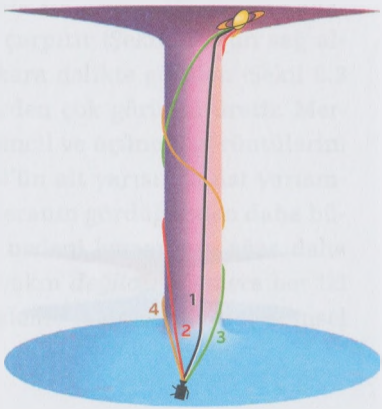
Solucandeliği kısayken (en üstteki resim) kameranın solucandeliğinin içinden baktığında gördüğü Satürn'ün çarpık görüntüsü birincil görüntüdür ve solucandeliğinin kristal topa benzer ağzının sağ yarısını kaplamaktadır. Kristal topun sol kenarında son derece ince ikincil, merceksi görüntü vardır. (Sağda daha alttaki merceksi yapı Satürn değildir; bu dış evrenin çarpık görünümlü bir parçasıdır.)

Solucandeliğinin boyu uzatıldığında (ortadaki resim) birincil görüntü küçülür ve içe doğru hareket eder, ikincil görüntü de içe doğru hareket eder ve kristal topun sağ kenarında çok ince bir merceksi üçüncül görüntü ortaya çıkar.

Daha da uzatıldığında (alttaki resim) birincil görüntü daha da küçülür, bütün görüntüler içe doğru hareket eder, kristal topun sol kenarında dördüncü bir görüntü ortaya çıkar, sağ kenarında bir beşinci ve bu böyle devam eder.



Şekil 15.2: *Solda*: Solucandeliğinin küçük mercekleme genişliğiyle (solucandeliğinin yarıçapının sadece yüzde 5'i) yığından görünüşü. *Sağda*: Kameranın gördüğü görüntü. *Yukarıdan aşağıya*: Solucandeliğinin uzunluğu deliğin yarıçapının 0,01, 1 ve 10 katı arttırılıyor. [Oliver James'in benim denklemlerime dayanan kodunu kullanarak Eugénie von Tunzelmann'ın ekibinin yaptığı simülasyonlardan.]



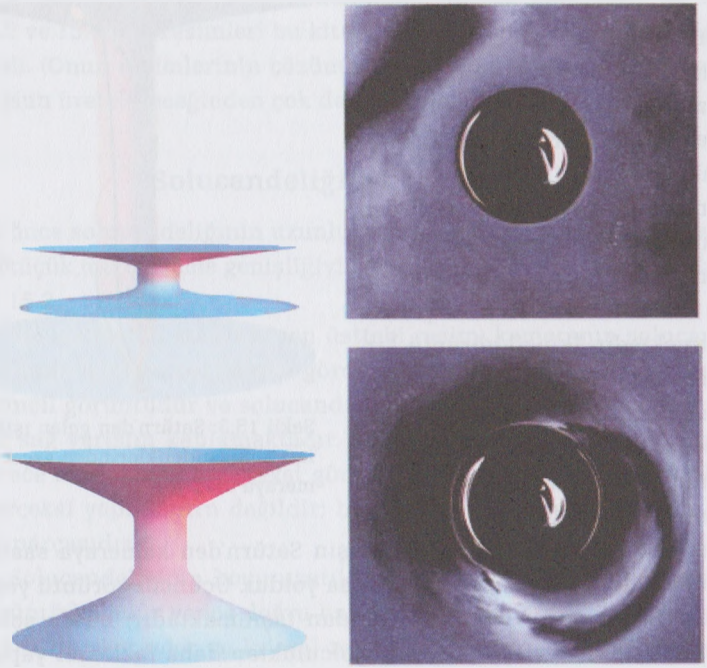
Şekil 15.3: Satürn'den gelen ışık ışınları solucandeliklerinden geçerek kameraya ulaşıyor.

Bu görüntülerin anlamı yığından görüldüğü haliyle solucandeliği üzerine ışık ışınları çizilmesi yoluyla anlaşılabilir (Şekil 15.3). Birincil görüntü siyah ışık ışını (1) tarafından taşınmaktadır ve bu Satürn'den kameraya çevresine sıkıca dolanmış bir ışın demetiyle birlikte mümkün olan en kısa yoldan gitmektedir. İkincil görüntü kırmızı ışını (2) çevreleyen bir demet tarafından taşınmaktadır ve bu kırmızı ışın solucandeliğinin duvarı üzerinde siyah ışının zıt yönünde, saat yönünün tersine gitmektedir. Bu kırmızı ışın Satürn'den kameraya saatin ters yönünde mümkün olan en kısa yoldur. Üçüncül görüntü yeşil ışını (3) saran bir demet tarafından taşınmaktadır; bu da solucandeliğinin etrafında bir tam yolculuktan daha fazlasını yapan mümkün olan en kısa saat yönünde ışındır. Dördüncü görüntü de kahverengi ışını saran bir demet tarafından taşınmaktadır, bu da solucandeliğinin etrafında bir tam yolculuktan daha fazlasını yapan mümkün olan en kısa saat yönünün tersinde ilerleyen ışındır.

Beşinci ve altıncı görüntüleri siz açıklayabilir misiniz? Solucandeliğinin boyu uzadığında görüntüler neden küçülmektedir? Görüntüler neden solucandeliğinin kristal top ağzının kenarında ortaya çıkıyor ve içe doğru hareket ediyor?

Solucandeliğinin Mercekleme Genişliği

Solucandeliğinin uzunluğunun kameranın ne gördüğünü nasıl etkilediğini anladıktan sonra uzunluğu uygun biçimde, solucandeliğinin yarıçapıyla aynı olacak şekilde sabitleyerek bu kez kütleçekimsel merceklenmeyi değiştirmeye başladık. Solucandeliğinin mercekleme genişliğini sıfırın yakınından solucandeliğinin çapının yaklaşık yarısına çıkardık ve bunun kameranın gördüklerine etkisini hesaplamaya başladık. Şekil 15.4 iki uç örneği göstermektedir.



Şekil 15.4: Solucandeliğinin bir yıldız sahasını ve Satürn'ü kütleçekimsel merceklemesi: Mercekleme genişliğinin solucandeliğinin çapının 0,014 ve 0,43 katı olduğunda yarattığı etki üstteki ve alttaki görüntülerde gösteriliyor. [*Oliver James'in benim denklemlerime dayanan kodunu kullanarak Eugénie von Tunzelmann'ın ekibinin yaptığı simülasyonlardan.*]

Çok küçük bir mercekleme genişliği olduğunda solucandeliğinin şekli (sol üstte), dışındaki evrenden (yatay tabakalar) solucandeliğinin boğazına (dikey silindir) sert bir geçişe sahiptir. Kameranın gördüğü şekliyle (sağ üstte) solucandeliği sol üstteki solucandeliğinin kenarındaki koyu bulutun ve yıldız sahasının şeklini çok az çarpıtmaktadır. Bunun dışında yıldız sahasını zayıf kütleçekime sahip herhangi bir ışın geçirmez cismin, örneğin bir gezegen ya da uzay aracının yapacağı gibi neredeyse tümüyle maskelemektedir.

Şekil 15.4'ün alt yarısında mercekleme genişliği solucandeliğinin yarıçapının yaklaşık olarak yarısıdır, bu yüzden boğazdan (dikey silindir) dışardaki evrene (asimptotik biçimde yatay tabaka) yavaş bir geçiş vardır.

Bu büyük mercekleme genişliğiyle solucandeliği, yıldız sahasını ve koyu bulutu güçlü biçimde çarpıtır (Şekil 15.3'ün sağ altındaki görüntü) ve dönmeyen bir kara delikte görülen (Şekil 8.3 ve 8.4) hemen hemen aynı yolla birden çok görüntü üretir. Mercekleme aynı zamanda Satürn'ün ikincil ve üçüncül görüntülerini de büyütür. Solucandeliği Şekil 15.3'ün alt yarısında üst yarısındakinden daha büyük gözükür. Kameranın gördüğünden daha büyük bir açıya karşılık gelir. Bunun nedeni kameranın ağza daha yakın olması değildir; çünkü daha yakın *değildir*. Kamera her iki resimde de aynı uzaklıktadır. Genişleme tamamen kütleçekimsel merceklenme nedeniyledir.

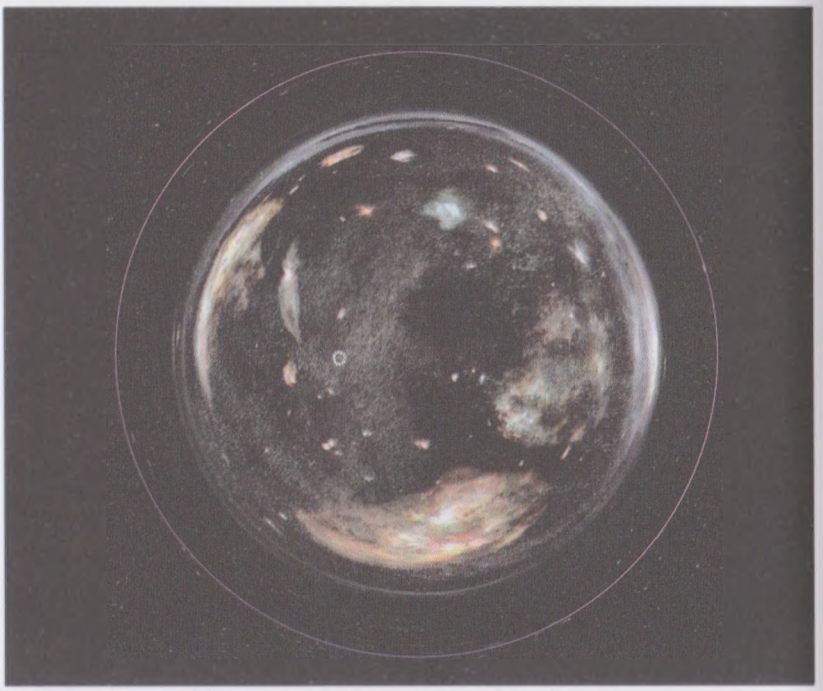
Yıldızlararası'ndaki Solucandeliği

Chris'in uzunlukları ve mercekleme genişlikleri farklı solucandelikleri olasılıklarını gördüğünde yaptığı seçim net oldu. Orta ve büyük uzunlukta solucandeliğinin içinden görülen birden çok görüntü izleyici kitlesi için kafa karıştırıcı olurdu, bu yüzden *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğini çok kısa yaptı: Solucandeliğinin yarıçapının yüzde 1'i uzunluğunda. *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğine yine az miktarda, gösterişsiz bir mercekleme genişliği verdi; solucandeliğinin yarıçapının yüzde 5'i kadar bir genişlikle yıldızların onun çevresindeki merceklenmesi fark edilebilir ve ilgi çekici ama Gargantua'nın merceklemesinden çok daha küçük oldu.

Ortaya çıkan solucandeliği Şekil 15.2'nin en üstündekidir. *Yıldızlararası*'nda buna Double Negative ekibinin yarattığı uzağında yer alan güzel sarmal bulutsu, toz kulvarları ve yıldız sahalarıyla bir de galaksi eklenince seyri muhteşem oldu (Şekil 15.5). Benim için bu filmin en nefis sahnelerinden biriydi.

Solucandeliğinin İçinden Yolculuk

10 Nisan 2014 tarihinde acil bir telefon aldım. Chris *Endurance*'ın solucandeliğinin içinden geçilen yolculuğu görselleştirmede sorun yaşıyor ve tavsiyemi istiyordu. Arabamla post-prodüksiyon düzenlemelerinin yapıldığı Syncopy yerleşkesine gittim ve Chris bana sorunu gösterdi.



Şekil 15.5: Solucandeliğinin *Yıldızlararası* için yapılan tanıtım filmlerinden birindeki görünüşü. *Endurance* solucandeliğinin önünde, merkeze yakın bir yerde görülüyor. Solucandeliğinin etrafına pembe kalemle Şekil 8.4'teki dönmeyen kara delikte olduğu gibi bir Einstein halkası ekledim. Kütleçekimsel olarak merceklenen yıldızların birincil ve ikincil görüntüleri burada oradakiyle aynı biçimde hareket ediyor. Tanıtım filmine bakarak bunları tespit edip hareketlerini çizebilir misiniz? [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır*]

Paul'un ekibi benim denklemlerimi kullanarak solucandeliği yolculuğunun değişik solucandeliği uzunlukları ve mercekleme genişlikleri için farklı farklı görselleştirmeler üretmişti. Filmde gösterilen kısa, gösterişsiz merceklemeli solucandeliğinde yolculuk hızlı oluyor ve ilgi çekici bir hal almıyordu. Uzun bir solucandeliğinde duvarların vınlayarak geçildiği uzun bir tünelin içinde yolculuk gibi oluyordu; bu da filmlerde daha önce gördüğümüz görüntülere çok fazla benziyordu. Chris bana vınlaması farklı çok sayıda değişik biçim gösterdi ve ben de bunlardan hiçbirinin

onun istediği etkide bir tazeliğe sahip olmadığı konusunda hemfikir oldum. Gece bu fikirle yatıp kalktıktan sonra da henüz bir sihirli kurşun çözümüne ulaşamamıştım.

Ertesi gün Chris Londra'ya uçtu ve kendisini Paul'un Double Negative ekibiyle bir odaya kapatarak çözüm aramaya koyuldu. En sonunda benim solucandeliği denklemlerimi terk etmek ve Paul'un sözleriyle "solucandeliğinin içi için çok daha soyut bir yoruma gitmek" zorunda kaldılar; sonuç olarak bu benim denklemlerimle yapılan simülasyonlarla canlandırılmış ama sanatsal dirilik eklemek için önemli oranda değiştirilmiş bir yorum oldu.

Yıldızlararası'nın erken gösterimlerinden birinde solucandeliği yolculuğunu gördüğümde memnun oldum. Tam olarak doğru olmasa da bir solucandeliği yolculuğunun ruhunu ve duygusunu büyük ölçüde yakalamıştı, taze ve ilgi uyandırıcıydı.

Siz izlediğinizde nasıl buldunuz?

16
SOLUCANDELİĞİNİN KEŞFİ: KÜTLEÇEKİM DALGALARI

İnsanlar *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğinin varlığını nasıl keşfetmiş olabilirler? Bunun bir fizikçi olarak beğendiğim bir yolu var. Bu bölümde bunu *Yıldızlararası*'nın hikâyesinde bilinenlere dayanarak kestirim yoluyla açıklayacağım; elbette bu benim yorumum, Christopher Nolan'ın yorumu değil.

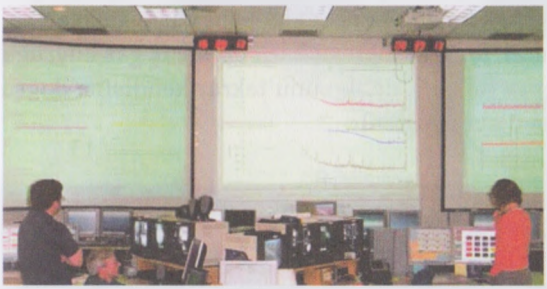
LIGO Bir Kütleçekim Dalgaları Patlaması Saptar

Benim canlandırmama göre film başlamadan önce Profesör Brand yirmili yaşlarında LIGO adlı bir projede yönetici yardımcılığı yapıyordu: Lazer İnterferometresi Kütleçekim Dalgası Gözlemevi [Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory], kısa adıyla LIGO (Şekil 16.1). LIGO uzak evrenden dünyaya ulaşan uzayın şeklindeki dalgalanmaları araştırıyordu. Kütleçekim dalgaları adı verilen bu dalgalanmalar kara delikler birbirleriyle çarpıştıklarında, bir kara delik bir nötron yıldızını parçaladığında, evren doğduğunda ve birçok başka şekilde ortaya çıkar.

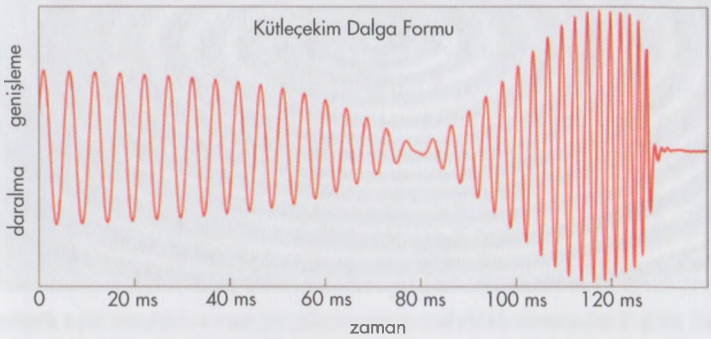
LIGO 2019 yılında bir gün daha önce görülmemiş güçte bir kütleçekim dalgaları patlaması tespit eder (Şekil 16.2). Dalgalar birkaç kez yükselip alçalan, ardından birdenbire kesilen bir genlikle salınımda bulunmaktadır. Patlamanın tümü sadece birkaç saniye sürer.

Profesör Brand ve ekibi dalgaların şeklinin ("dalga formlarının"; Şekil 16.2) süper bilgisayarlarda gerçekleştirilen simülasyonlarıyla karşılaştırılması yoluyla dalgaların kaynağını ortaya çıkarırlar.





Şekil 16.1: *Üstte*: Washington, Hanford'daki LIGO kütleçekim dalga dedektörünün havadan fotoğrafı. *Solda*: Dedektörün yönetildiği ve sinyallerinin izlendiği LIGO kontrol odası.



Şekil 16.2: LIGO'nun tespit ettiği kütleçekim dalga formunun son 120 milisaniyesi (ms). [*Çizim, Yanbei Chen ve Foucart vd. (2011) tarafından yapılan simülasyonlara dayandırılmıştır ve Kip'e aittir.*]

Bir Kara Deliğin Yörüngesindeki Nötron Yıldızı

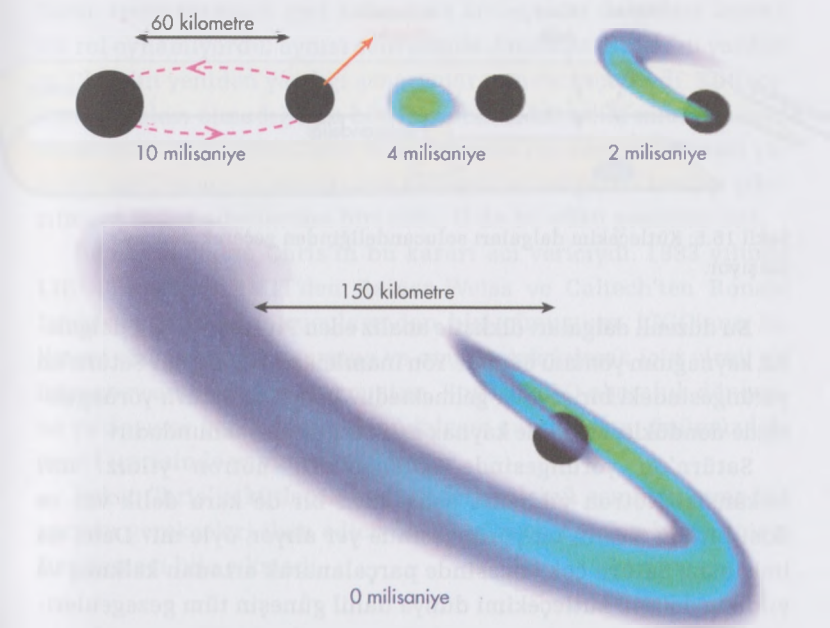
Dalgaları bir kara deliğin yörüngesinde dolanan bir nötron yıldızı yaymıştır. Yıldız güneşin 1,5 katı ağırlığında, kara delikse güneşin 4,5 katı ağırlıktadır ve hızla dönmektedir. Dönme uzayı hareket sürüklemiş, uzay dönmesi de yıldızın yörüngesini ele geçirmiş ve onu yan yatmış bir topaç gibi ağır ağır devinmeye zorlamıştır. Devinimdeki yalpalama dalgaları modüle etmiş, genlik yönünden yükselme ve alçalmalara sebep olmuştur (Şekil 16.2).

Dalgalar taşıdıkları enerjiyle birlikte evrenin içinde yolculuğa başlarlar (Şekil 16.3). Enerjisi giderek azalan yıldız gitgide içe doğru sarmallaşarak kara deliğe yaklaşır. Yıldız ile delik arasındaki uzaklık 30 kilometreye indiğinde kara deliğin kütleçekim gelgiti yıldızı parçalamaya başlar. Yıldız enkazının yüzde doksan yedisini kara delik yutar, dışarı atılan yüzde 3 bir sıcak gaz kuyruğu oluşturur, daha sonra da kara delik bunu tekrar kendisine doğru çeker ve bir birikim diski şekillenir.



Şekil 16.3: Kütleçekim dalgaları yörüngedeki yıldız ve delikten dışa doğru yayılıyor; yığından görünüm. *[Çizim benim eskizime dayanarak LIGO laboratuar ressamı tarafından yapıldı.]*

Şekil 16.4'da yıldızın hayatının son birkaç milisaniyesini gösteren bir bilgisayar simülasyonu görülüyor. Sonlanmadan on mi-

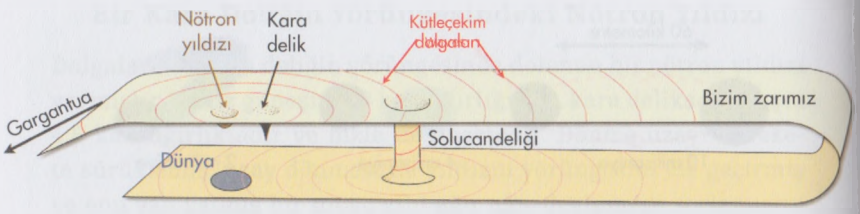


Şekil 16.4: Nötron yıldızının hayatının son birkaç milisaniyesinin bilgisayar simülasyonu. *[Francois Foucart ve arkadaşlarının bir simülasyonundan alınmıştır. Bkz. http://www.black-holes.org/]*

lisaniye önce kara delik kırmızı okla gösterilen eksen etrafında, yıldız da deliğin çevresinde resmin dikey ekseninde dönüyor. Dört milisaniyede deliğin tendeks çizgileri yıldızı parçalamak üzere germeye başlıyor. İki milisaniyede deliğin dönen uzayı yıldız enkazını deliğin ekvator düzleminin içerisine fırlatmış. Sıfır milisaniyede enkaz bir birikim diski oluşturmaya başlıyor.

Solucandeliğinin Keşfi

Profesör Brand ve ekibi sonraki iki yılda LIGO'nun verilerini incelerken nötron yıldızının yaydığı çok zayıf dalgaların varlığını keşfederler. Yıldızın geçmişte bir santimetre yüksekliğinde ve birkaç kilometre genişliğinde çok küçük bir tepesi vardır (böyle dağların olabileceği düşünülmektedir). Bu dağ yıldızın dönüşü tarafından beraberinde taşındıkça zayıf ancak sürekli, günbegün salınan dalgalar üretmiştir.



Şekil 16.5: Kütleçekim dalgaları solucandeliğinden geçerek dünyaya ulaşıyor.

Bu düzenli dalgaları dikkatle analiz eden Profesör Brand dalgaların kaynağının yönünü öğrenir. Yön inanılmazdır! Dalgalar Satürn'ün yörüngesindeki bir şeyden gelmektedir. Dünya ve Satürn yörüngelerinde döndüklerinde bile kaynak hep Satürn'ün yakınındadır!

Satürn'ün yörüngesinde dolanan bir nötron yıldızı mı? İmkânsız! Nötron yıldızına eşlik eden bir de kara delik var ve ikisi birden Satürn'ün yörüngesinde yer alıyor, öyle mi? Daha da imkânsız! Satürn çok öncesinde parçalanarak ortadan kalkmış ve yıldızla deliğin kütleçekimi dünya dahil güneşin tüm gezegenlerinin yörüngelerini çok öncesinde bozmuş olurdu. Yörüngesi bozulan dünya önce güneşin yakınına, sonra da çok uzağına sürüklenirdi. Yanmış, donmuş ve ölmüş olurduk.

Ama dalgalar oradaydı işte. Satürn'ün yakınlarında tartışmasız biçimde ortaya çıkmıştı.

Profesör Brand bunun için sadece bir açıklama bulabiliyordu: Dalgalar Satürn'ün yörüngesinde dolanan bir solucandeliğinden geliyor olmalıydı. Dalgaların kaynağı olan kara delik ve nötron yıldızı da solucandeliğinin diğer ucunda olmalıydı (Şekil 16.5). Dalgalar yıldız ve delikten çıkarak uzaklara gitmişti. Dalgaların minik parçaları solucandeliği tarafından yakalanmış, onun içinden yolculuk etmiş ve ardından güneş sistemi içerisinde yayılmıştı. Bunların küçük bir kısmı da dünyaya ulaşmış ve LIGO kütleçekim dalgası dedektörünün içinden geçmişti.

Bu Hikâyenin Kökeni

Bu hikâyenin kısa bir versiyonu Lynda Obst ve benim *Yıldızlararası* için 2006'da yazdığımız ilk tretmanda yer alıyordu. Fakat

bizim tretmanımızın geri kalanında kütleçekim dalgaları önemli bir rol oynamıyordu; aynısı sonrasında Jonathan Nolan'ın yazdığı ve Chris'in yeniden yazdığı senaryolar için de geçerliydi. Kütleçekim dalgaları olmadığında bile filmdeki ciddi bilim miktarı zaten devasaydı. Bu yüzden Chris *Yıldızlararası*'nın zengin bilimsel yükünü hafifletmeye çalıştığında kütleçekim dalgaları kesilip çıkarılmaya doğal adaylardan biri oldu. O da bu yükü gemiden attı.

Benim açımdan Chris'in bu kararı acı vericiydi. 1983 yılında LIGO Projesinin (MIT'den Rainer Weiss ve Caltech'ten Ronald Drever'la birlikte) kurucularından biri olmuştum. LIGO'nun bilimsel vizyonunu oluşturmuş ve onu gerçek kılmak için yirmi yıl boyunca canımı dişime takmıştım. Bugün LIGO olgunluk dönemine yaklaşıyor ve ilk kütleçekim dalgası saptamasını önümüzdeki on yıl içerisinde yapması bekleniyor.

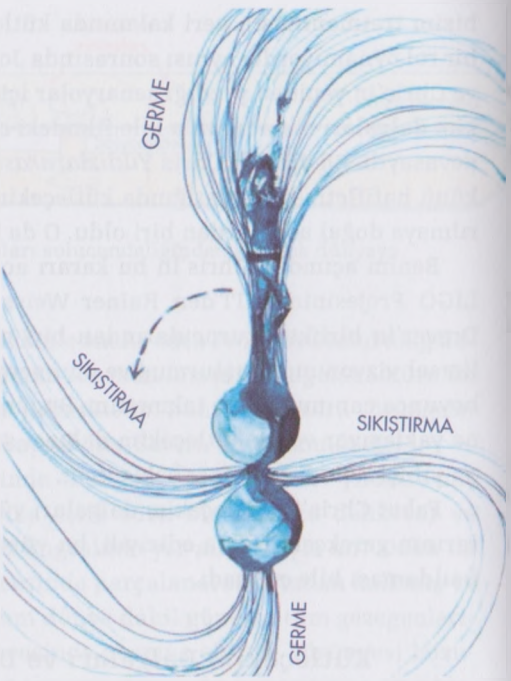
Fakat Chris'in kütleçekim dalgaları yükünü gemiden atma kararının gerekçeleri ikna ediciydi, bu yüzden benden bir protesto fısıldaması bile çıkmadı.

Kütleçekim Dalgaları ve Dedektörleri

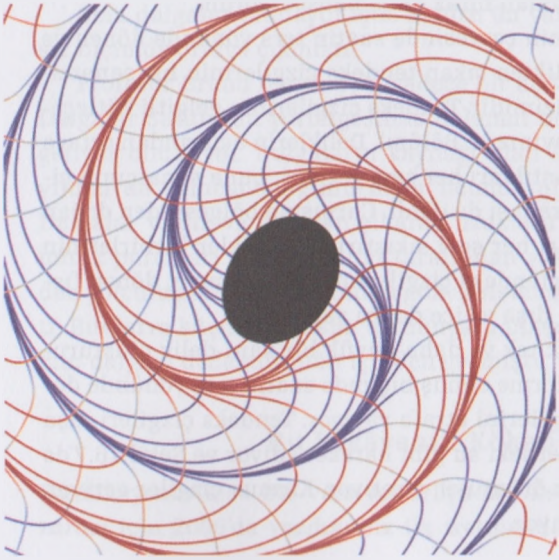
Yıldızlararası'na geri dönmeden önce arzularıma teslim oluyor ve kütleçekim dalgalarından biraz daha bahsediyorum.

Şekil 16.6 birbirinin çevresinde saatin ters yönünde dönen ve çarpışan iki kara delikten çıkan tendeks çizgilerinin bir sanatçının algısı uyarınca çizimidir. Tendeks çizgilerinin gelgitli kütleçekim ürettiğini hatırlayınız (4. Bölüm). Deliklerin uçlarından ortaya çıkan çizgiler karşılaştıkları her şeyi geriyor; buna sanatçının çizime yerleştirdiği arkadaşı da dâhil. Çarpışma bölgesinden doğan çizgiler karşılaştıkları her şeyi sıkıştırıyor. Delikler birbirlerinin çevresinde döndükçe tendeks çizgilerini etrafa taşıyor, dönen fıskiyelerdeki su misali dışa ve içe doğru yayıyorlar.

Delikler birleşerek tek ve daha büyük bir kara delik oluşturuyor. Bu kara delik deforme olmuş biçimde saatin ters yönünde dönüyor ve tendeks çizgilerini etrafa yayıyor. Tendeks çizgileri dışa doğru dönen fıskiyelerdeki su gibi hareket ediyor ve Şekil 16.7'de gösterdiğim çapraşık örüntüyü yaratıyor. Kırmızı çizgiler geriyor. Mavi çizgiler sıkıştırıyor.



Şekil 16.6: Birbirinin çevresinde saatin ters yönünde dönerken çarpışan iki kara delikten çıkan tendeks çizgileri. *[Resim Lia Halloran'a aittir.]*



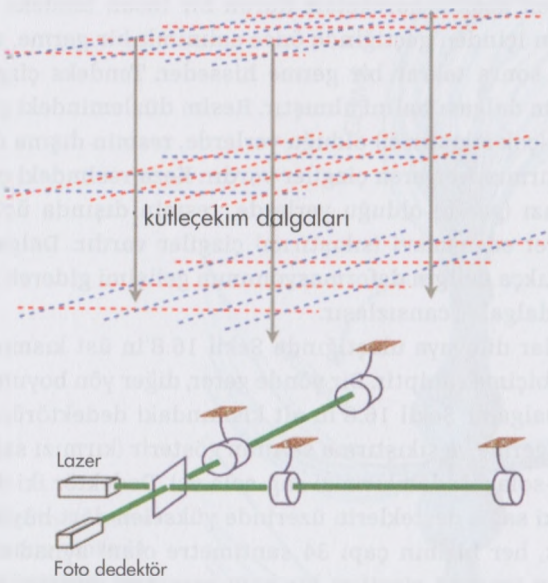
Şekil 16.7: Dönen deforme olmuş bir kara delikten açıkan tendeks çizgileri. *[Çizim Rob Owen'a aittir.]*

Delikten uzakta hareketsiz duran bir insan tendeks çizgileri kendisinin içinden geçtiğinde önce salınımlı bir germe, sonra sıkıştırma, sonra tekrar bir germe hisseder. Tendeks çizgileri bir kütleçekim dalgası halini almıştır. Resim düzlemindeki çizgilerin çok mavi (çok sıkıştırıcı) olduğu yerlerde, resmin dışına doğru çıkan çok kırmızı ve geren çizgiler vardır. Keza resimdeki çizgilerin çok kırmızı (geren) olduğu yerlerde, resmin dışında üçüncü bir yöne işaret eden mavi (sıkıştırıcı) çizgiler vardır. Dalgalar dışa doğru aktıkça deliğin deformasyonunun gelişimi giderek daha zayıflar ve dalgalar cansızlaşır.

Dalgalar dünyaya ulaştığında Şekil 16.8'in üst kısmında gösterdiğim biçime sahiptir. Bir yönde gerer, diğer yön boyunca sıkıştırırlar. Dalgalar Şekil 16.8'in alt kısmındaki dedektörün içinden geçerken germe ve sıkıştırma salınım gösterir (kırmızı sağ-soldan mavi sağ-sola, oradan kırmızı sağ-sola vs). Dedektör iki dik kolun sonundaki sabit desteklerin üzerinde yükselen dört büyük (40 kilogramlık, her birinin çapı 34 santimetre olan) aynadan oluşur. Dalgaların tendeks çizgileri bir kolu gererken diğerini sıkar, ardından ilkini sıkarken ikincisini gerer, bu böyle sürekli tekrarlanarak devam eder. Aynalar arasındaki salınımlı bölme interferometre (girişim ölçümü) denen bir teknikle lazer ışınlarıyla izlenir. LIGO'nun ismi de buradan gelir: Lazer İnterferometresi Kütleçekim Dalgası Gözlemevi.

Şu anda LIGO, merkezi Caltech'te olmak üzere on yedi ulustan 900 bilimcinin işbirliği yaptığı uluslararası bir girişim. Mevcut yönetimi David Reitze (müdür), Albert Lazzarini (müdür yardımcısı) ve Gabriella Gonzalez'den (işbirliği sözcüsü) oluşuyor. Evrenin anlaşılmasında taşıdığı büyük önemden dolayı da kaynakları büyük oranda Ulusal Bilim Vakfı üzerinden ABD'li vergi yükümlüleri tarafından karşılanıyor.

LIGO'nun Hanford, Washington'da ve Livingston, Louisiana'da kütleçekim dalga dedektörleri var ve bir üçüncüsünü Hindistan'a kurmayı planlıyor. İtalya, Fransa ve Hollanda'daki bilimciler Pisa yakınlarında benzer bir interferometre kurdular, Japon fizikçiler de bir dağın altındaki bir tünelde yeni bir dedektör daha inşa ediyorlar. Bu dedektörlerin hepsi beraber çalışacak ve kütleçekim dalgaları kullanılarak evrenin keşfedilmesi için dünya çapında dev bir ağ oluşturacaklar.



Şekil 16.8: Kütleçekim dalgaları bir LIGO dedektörüne çarpıyor.

LIGO'da çalışan çok sayıda bilimciyi eğittikten sonra 2000 yılında çalışmalarımın yönünü başka yerlere çevirdim. Fakat LIGO ve onun uluslararası ortaklarının olgunluğa ve ilk kütleçekim dalgalarını saptamaya yaklaşmasını büyük bir memnuniyetle gözlüyorum.

Evrenin Bükülmüş Yüzü

Yıldızlararası insanların kara delikler, solucandelikleri, tekillikler, kütleçekim sapmaları ve daha yüksek boyutlarla karşılaştığı bir macera. Bu olguların hepsi bükülmüş uzay ve zamandan "yapılmış" ya da bu bükülmeye çok yakından bağlıdır. Bu yüzden bunlara "evrenin bükülmüş yüzü" adını veriyorum.

Biz insanlar henüz evrenin bükülmüş yüzünün pek az deneysel ya da gözlemsel verisine sahibiz. Kütleçekim dalgaları bu yüzden önemli: Bükülmüş uzaydan yapılmış oldukları için bükülmüş yüzü araştırmak için ideal bir araç özelliği taşıyorlar.

Okyanusu sadece çok sakin bir günde görmüş olduğunuzu varsayalım. Bu durumda büyük bir fırtınayla birlikte ortaya çıkan

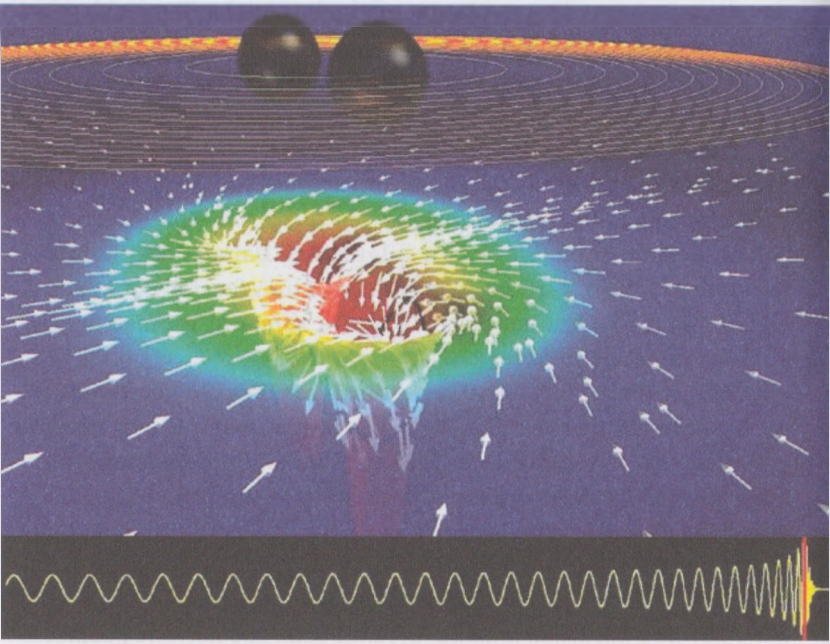
dev deniz kabarmaları ve okyanus dalgaları kırılmaları hakkında hiçbir bilginiz olmaz.

Bizim bükülmüş uzay ve zaman konusundaki bilgimizi de buna benzetebiliriz. Bükülmüş uzay ve bükülmüş zamanın, bir "fırtınada" –uzayın şeklinin delicesine salındığı, keza zamanın akış hızının delice salındığı bir durumda– hangi davranışları sergileyecekleri konusunda çok az şey biliyoruz. Benim için bu çok enteresan ve büyüleyici bir bilgi sınırı. Daha önceki bölümlerde tanıştığımız yaratıcı isim bulucu John Wheeler buna "geometrodinamik" adını vermiştir: Uzay ve zamanın geometrisinin çılgınca dinamik davranışı.

1960'lı yılların başında Wheeler'ın öğrencisiyken kendisi beni ve başkalarını geometrodinamik konusunu araştırmaya teşvik etti. Denedik ve feci başarısız olduk. Einstein'ın denklemlerinin öngörülerini öğrenmeye yetecek kadarıyla nasıl çözüleceğini bilmiyorduk ve astronomik evrende geometrodinamiği gözlemlemek için başka bir yola da sahip değildik.

Kariyerimin çoğunu bunu değiştirmeye adadım. LIGO'yu arkadaşlarımla kurarken amacım evrenin uzak köşelerinde geometrodinamiği gözlemlemekti. 2000 yılında LIGO'daki görevlerimi başkalarına devrettiğimde Caltech'te Einstein'ın görelilik denklemlerini sayısal olarak çözme yoluyla süper bilgisayarlarda geometrodinamiği simüle etmeyi amaçlayan bir araştırma grubunun kuruluşunda yer aldım. Bu projeye SXS adını verdik: Uç Uzayzamanların Simülasyonu [Simulating eXtreme Spacetimes]. Şu an bu Saul Teukolsky'nin Cornell Üniversitesindeki araştırma grubu ve başka kimselerle birlikte işbirliği içerisinde yürütülen bir çalışma halini almış durumda.

Geometrodinamiğin harika bir gösterimini iki kara deliğin çarpışmasında görebiliriz. Kara delikler çarpıştıklarında uzay ve zamanı çılgınca dolanımlara sokuyorlar. SXS simülasyonlarımız artık olgunluk dönemine ulaştılar ve bize göreliliğin öngörülerini bildirmeye başladılar (Şekil 16.9). LIGO ve ortakları önümüzdeki birkaç yıl içerisinde çarpışan kara deliklerden gelen kütleçekim dalgalarını gözlemleyecek ve bizim simülasyonlarımızın öngörülerini test edecekler. Bu geometrodinamik konusunda araştırmalar açısından harika bir dönem!



Şekil 16.9: İki kara deliğin çarpışma anındaki simülasyonu. *Üstte*: Deliklerin yörüngeleri ve gölgelerinin bizim evrenimizdeki görünüşü. *Ortada*: Deliklerin bükülmüş uzay ve zamanının yığından görünüşü, oklar uzayın harekete sürüklenmesini, renkler zamanın bükülmesini gösteriyor. *Altta*: Yayılan kütleçekim dalga formu. Bu simülasyon özdeş, dönmeyen kara delikler içindir. *[SXS ekibinin bir simülasyonunun Harald Pfeifer tarafından filmleştirilmesinden alınmıştır.]*

Büyük Patlamanın Kütleçekim Dalgaları

Sevdiğim bir Rus dostum, Leonid Grishchuk 1975 yılında çok şaşırtıcı bir tahminde bulundu: Ona göre Büyük Patlamada daha önceden bilinmeyen bir mekanizma sonucunda zengin bir kütleçekim dalgaları birikimi oluşmuştu. Büyük Patlamadan gelen kütleçekim kuantum dalgalanmaları, dediğine göre evrenin ilk genişlemesinde olağanüstü biçimde yükselmiş ve yükselmesiyle birlikte de ilksel kütleçekim dalgaları halini almıştı. Eğer keşfedilirse bu kütleçekim dalgaları evrenimizin doğumunu görmemizi sağlayabilirdi.

Sonraki yıllarda Büyük Patlama konusundaki bilgilerimiz olgunlaştıkça, dalgaların neredeyse görünen evrenin kendisi kadar büyük, milyarlarca ışık yıllık dalga boylarında en güçlü halinde olacağı ve LIGO'nun yüzlerce ve binlerce kilometrelik, çok daha kısa dalga boylarında saptanmak içinse çok zayıf olacağı açığa çıktı.

Bazı kozmologlar 1990'lı yılların başında bu milyarlarca ışık yılı uzunluğundaki *kütleçekim* dalgalarının evreni dolduran *elektromanyetik* dalgalar üzerine kendine özgü bir iz bırakmış olması gerektiğini fark ettiler ki buna kozmik mikro dalga ardalanı ya da kısaca CMB [Cosmic Microwave Background] diyoruz. Hemen ardından bir kutsal kâse ortaya çıktı: Bu CMB izini araştır, bundan izi üreten ilksel kütleçekim dalgalarının özelliklerini ortaya çıkart ve bu yolla evrenin doğumunu araştır.

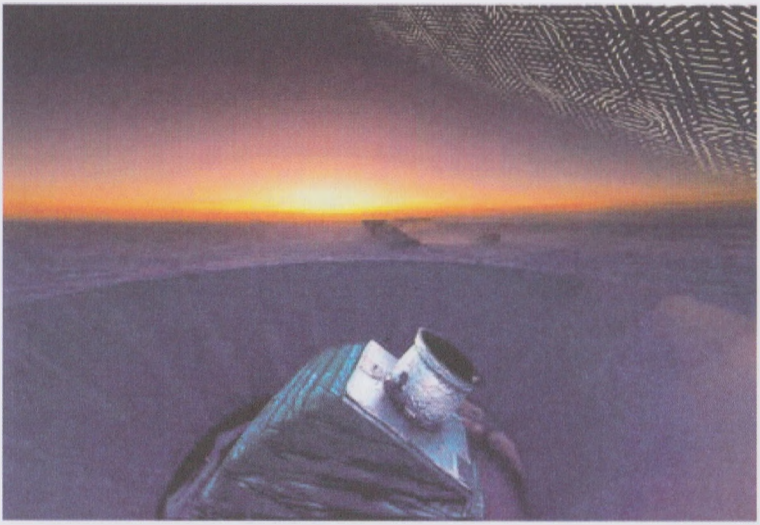
CMB izi 2014 yılının Mart ayında ben bu kitabı yazarken, Caltech'te aynı koridorda çalıştığımız bir kozmolog olan Jamie Bock'un kurduğu bir ekip[1] tarafından keşfedildi (Şekil 16.10).

Müthiş bir keşifti ama bir uyarı notu da vardı: Jamie ve ekibinin bulduğu iz kütleçekim dalgaları değil başka bir şey tarafından da bırakılmış olabilirdi. Bu kitap baskı aşamasındayken kesin emin olmak için çalışmalar yoğun biçimde sürüyordu.

İzin nedeni gerçekten Büyük Patlamadan bugüne ulaşan kütleçekim dalgalarıysa o zaman bu yaklaşık elli yılda bir karşımıza çıkan türden bir kozmolojik keşif demektir. Bu bize evrenin doğumundan sonraki saniyenin trilyon birinin trilyon birinin trilyon biri kadar bir süre sonrasındaki evren hakkında bir bilgi vermiş olacak. Kuramcıların bu ilk anlarda evrenin genişlemesinin aşırı derecede hızlı, kozmologların jargonuyla söylersek "enflasyonist biçimde hızlı" olduğu biçimindeki öngörüsünü doğrulayacak. Kozmoloji için yepyeni bir çağı açacak.

---

[1] Keşfi gerçekleştiren ekibin resmi yöneticileri Jamie'yle birlikte onun doktora sonrası öğrencileri John Kovac (şimdi Harvard'da) ve Chao-Lin Kuo (şimdi Stanford'da) ve ayrıca Clem Pryke'tı (şimdi Minnesota Üniversitesinde).



Şekil 16.10: İlksel kütleçekim dalgalarının izini keşfeden Jamie Bock'un ekibinin yaptığı Bicep2 dedektörü. Güney Kutbundaki Bicep2 burada Güney Kutbunda senede sadece iki kez gerçekleşen tan vaktinde gösteriliyor. Çevresindeki buz örtüsünün ışımasından korunması için bir koruyucuyla kaplanmış. Üst sağdaki küçük resim CMB'de ölçülen izi gösteriyor: Bir kutuplaşma örüntüsü. CMB'nin elektrik alanı kısa kesikli yönlerde gösterilmiş.

Kütleçekim dalgalarına karşı beslediğim tutkunun gereğini yerine getirdiğime, *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğinin keşfedilmesinde nasıl kullanılabileceklerini gösterdiğime (ve solucandeliklerinin, özellikle de *Yıldızlararası*'ndakinin özelliklerini sergilediğime) göre, artık sizi *Yıldızlararası*'ndaki solucandeliğinin diğer tarafında bir geziye çıkarabilirim. Gezimiz Miller'ın gezegenini, Mann'ın gezegenini ve Cooper'ı buralara taşıyan *Endurance*'ı kapsıyor.

V. GARGANTUA'NIN ÇEVRESİNDE KEŞİF YOLCULUĞU



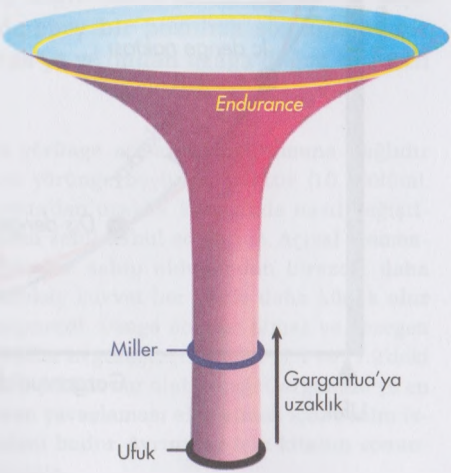
17

MILLER'IN GEZEGENİ

Cooper ve mürettebatının ilk ziyaret ettiği gezegen Miller'ın gezegeni. Bu gezegendeki en etkileyici şeyler zamanın burada olağanüstü yavaşlaması, devasa deniz dalgaları ve olağanüstü büyüklükteki gelgitli kütleçekim. Bunların üçü de birbiriyle bağlantılı ve gezegenin Gargantua'ya yakınlığından kaynaklanıyor.

Gezegenin Yörüngesi

Yıldızlararası'na ilişkin benim yaptığım bilimsel yorumda Miller'ın gezegeni Şekil 17.1'de gösterilen Gargantua'nın ufkuna çok yakın mavi yerdedir (*Bkz.* 6. Bölüm ve 7. Bölüm).

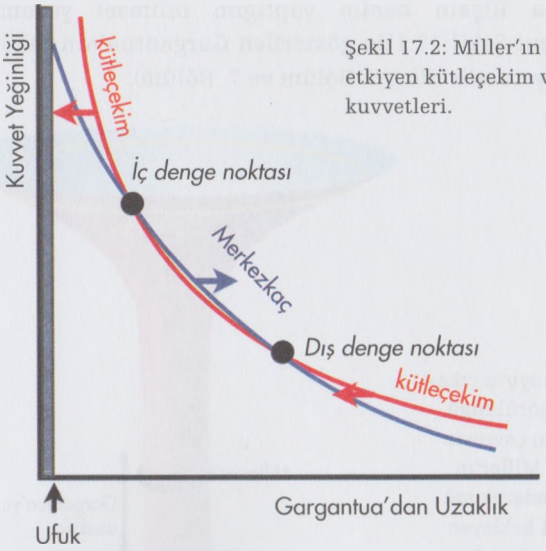


Şekil 17.1: Bir uzay boyutu çıkarıldığında yığından görüldüğü haliyle Gargantua'nın çevresindeki bükülmüş uzay. Miller'ın gezegeninin ve park ederek mürettebatın dönmesini bekleyen *Endurance*'ın yörüngeleri de görülüyor.

Orada uzay bir silindirin yüzeyi gibi bükülmüştür. Şekilde silindirin kesitleri, çevre uzunlukları biz Gargantua'ya yaklaştıkça ya da ondan uzaklaştıkça değişmeyen çemberlerdir. Gerçekte, eksik boyutu eklediğimizdeyse bu kesitler yaklaşıp uzaklaştıkça çevre uzunlukları değişmeyen küremsidir.

Öyleyse bu konum silindir üzerindeki diğer konumlardan niçin farklıdır? Bu konumu özel kılan nedir?

Yanıt Şekil 17.1'de *gözükmeyen* zamanın bükülmesinde saklı. Zaman Gargantua'nın yakınında yavaşlar ve biz Gargantua'nın olay ufkuna yaklaştıkça yavaşlama aşırı biçimde artar. Bu yüzden Einstein'ın zaman bükülmeleri yasası uyarınca (4. Bölüm) biz ufkun yanındayken kütleçekim son derece yeğin hale gelir. Şekil 17.2'de kütleçekim kuvvetinin yeğinliğini gösteren kırmızı eğri keskin biçimde yukarı doğru döner. Onun aksine gezegenin hissettiği merkezkaç kuvvetiyse daha ağır değişen bir ivmeye sahiptir. Sonuç olarak iki eğri iki konumda kesişir. Buralarda gezegen dışa doğru merkezkaç kuvvetinin içe doğru kütleçekim kuvvetini dengelemesiyle Gargantua etrafında dolanabilir.



Şekil 17.2: Miller'ın gezegenine etkiyen kütleçekim ve merkezkaç kuvvetleri.

İç denge noktasında gezegenin yörüngesi kararsızdır: Gezegen çok az dışarı doğru itilse (örneğin yakından geçen bir kuyruklu yıldızın kütleçekimi tarafından), merkezkaç kuvveti rekabeti kazanır ve gezegeni çok daha uzağa iter. Gezegen içe doğru itilirse, kütleçekim kuvveti baskın çıkar ve gezegen Gargantua'nın içine çekilir. Bu Miller'ın gezegeninin iç denge noktasında fazla uzun süre kalamayacağı anlamına gelir.

Dış denge noktasıysa tam aksine kararlıdır: Miller'ın gezegeni buradayken dışa doğru itilirse, kütleçekim üste çıkar ve gezegeni tekrar geriye çeker. Gezegen içe doğru itilirse merkezkaç kuvvetler kazanır ve onu tekrar dışa iter. İşte benim *Yıldızlararası* yorumumda burası Miller'ın gezegeninin bulunduğu yerdir.[1]

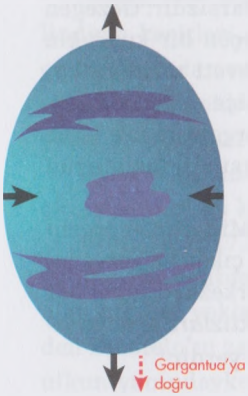
Zamanın Yavaşlaması ve Gelgitli Kütleçekim

Gargantua'nın çevresindeki kararlı, dairesel yörüngelerin içerisinde kara deliğe en yakın olanı Miller'ın gezegeninin yörüngesidir. Bu onun maksimum zaman yavaşlamasına sahip yörünge olduğu anlamına gelir. Dünya üzerindeki yedi yıl Miller'ın gezegenindeki bir saattir. Orada zaman dünya üzerinde olduğundan altmış bin kat daha yavaş akar! Christopher Nolan'ın film için istediği buydu.

Fakat Gargantua'ya bu kadar yakın olduğu için benim film için yaptığım yorumda Miller'ın gezegeni muazzam bir gelgitli kütleçekime maruz kalmaktadır, öyle ki Gargantua'nın gelgit kuvvetleri gezegeni neredeyse parçalayacak ölçüde büyüktür (6. Bölüm). Neredeyse parçalayacak, tam değil. Onun yerine gezegenin biçimini bozmaktadırlar. Hem de epey bir bozulma söz konusudur (Şekil 17.3). Gezegen Gargantua'ya ve ondan uzağa doğru kuvvetli çıkıntılara sahiptir.

---

[1] Merkezkaç kuvvet gezegenin yörünge açısal momentumuna bağlıdır ve yörünge hızının bu ölçüsü yörünge boyunca sabittir (10. Bölüm). Şekil 17.2'de kuvvetin Gargantua'dan uzaklık karşısında nasıl değiştiğini çizerken açısal momentumu sabit kabul ediyorum. Açısal momentum Miller'ın gezegeninin gerçekte sahip olduğundan birazcık daha az olsaydı bu durumda merkezkaç kuvvet her yerde daha küçük olur ve Şekil 17.2'deki iki eğri kesişmezdi. Denge noktası olmaz ve gezegen Gargantua'nın içine düşerdi. Miller'ın gezegeninin Şekil 17.1 ve 17.2'deki konumunun gezegenin istikrarlı şekilde var olabileceği Gargantua'ya en yakın konum; maksimum zaman yavaşlaması elde etmek için benim istediğim konum olmasının nedeni budur. Ayrıntılar için kitabın sonundaki *Teknik Notlar*'a bakabilirsiniz.



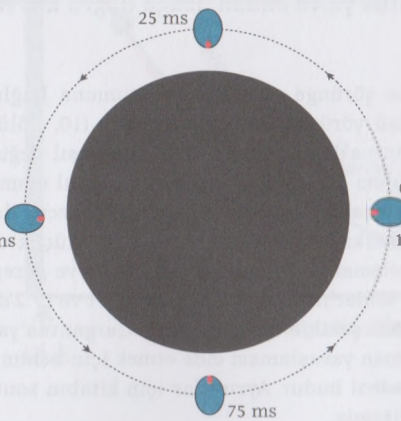
Şekil 17.3: Miller'ın gezegeninin gelgit deformasyonu.

Miller'ın gezegeni Gargantua'nın karşısında dönseydi (Gargantua'ya karşı hep aynı yüzünü göstermeseydi) bu durumda gezegenden görüldüğü biçimiyle gelgit kuvvetleri de dönerdi. Gezegen önce doğu-batı yönlerinden sıkışır ve kuzey-güney yönlerinden uzardı. Ardından, bir çeyrek dönme sonrasında sıkışma kuzey-güney, uzama doğu-batıda olurdu. Bu sıkışma ve uzamalar gezegenin kabuğunun (katı dış katmanlarının) dayanıklılığıyla karşılaştırıldığında muazzam olurdu. Kabuk tozlaşır, ardından sürtünme onu ısıtır ve eritir, tüm gezegeni ateş kırmızısı bir hale getirirdi.

Miller'ın gezegeninin görünümündeki farklılık sadece bununla da kalmazdı! Dolayısıyla sonuç açık: Benim bilimsel yorumumda gezegen Gargantua'ya doğru hep aynı yüzünü (Şekil 17.4) ya da hemen hemen aynı yüzünü (bunu daha sonra ele alacağım) göstermek zorundaydı.

Uzay Burgacı

Einstein yasaları uzaktan, örneğin Mann'ın gezegeninden bakıldığında Miller'ın gezegeninin Gargantua'nın milyar-kilometre-çevre-uzunluğundaki yörüngesini 1,7 saatte bir dolaşmasını emreder.



Şekil 17.4: Miller'ın gezegeninin uzak yıldızlara göre yörünge hareketi ve dönmesi. Gezegenin yüzeyindeki kırmızı nokta ve gelgit çıkıntısı her zaman Gargantua'nın karşısındadır.

Bu kabaca ışık hızının yarısıdır! Zamanın yavaşlaması nedeniyle Ranger'ın mürettebatı bir yörünge periyodunu bundan altmış bin kat daha küçük ölçerler: Bir saniyenin onda biri. Gargantua etrafında saniyede on dönüş. Bu *gerçekten* hızlıdır! Peki, ışıktan daha hızlı değil midir? Değildir; bunun nedeni de Gargantua'nın kendi etrafındaki hızlı dönmesinin sebep olduğu uzay burgacıdır. Gezegenin konumundaki dönen uzaya göreli olarak ve orada ölçülen zamanı kullanarak gezegen ışıktan daha yavaş hareket eder ve belirleyici olan budur. Böylelikle hız sınırı zorunluluğu geçerliliğini korur.

Benim filmdeki bilimsel yorumumda gezegen Gargantua'ya hep aynı yüzünü döndüğü için (Şekil 17.4) kendi etrafında yörünge hızıyla aynı hızda, saniyede on dönüşle dönmelidir. Kendi etrafında bu kadar hızlı nasıl dönebilir? Merkezkaç kuvvetler gezegeni parçalamaz mı? Hayır ve kurtarıcı kahraman yine uzayın dönmesidir. Eğer gezegen kendi etrafında yakınındaki uzayın dönmesiyle tam olarak aynı hızda dönerse rahatsız edici *hiçbir* merkezkaç kuvvet hissetmez; zaten hemen hemen bu hızda dönmektedir. Dolayısıyla kendi etrafında dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvvetler aslında zayıftır. Eğer uzak yıldızlara göreli olarak dönmez olsaydı, dönen uzaya göreli olarak saniyede on dönüş hızında döner ve merkezkaç kuvvetlerce paramparça edilirdi. Göreliliğin yapabildiği şeyler çok acayip.

Miller'ın Gezegenindeki Dev Dalgalar

Ranger uzay aracı Miller'ın gezegenindeyken onun üzerine gelen 1,2 kilometre yüksekliğindeki iki dev deniz dalgasının sebebi ne olabilir? (Şekil 17.5)

Bir süre araştırdım, fizik yasalarıyla çeşitli hesaplamalar yaptım ve filmdeki bilimsel yorumumda bu soru için olası iki yanıta ulaştım. İki yanıt da gezegenin Gargantua'ya *tam olarak* kilitlenmemiş olmasını gerektiriyor. Gezegen Gargantua karşısında az bir miktar ileriye ve geriye doğru, Şekil 17.6'daki soldaki yönelmeden sağdakine, sonra tekrar soldakine doğru vs sallanmak zorunda kalıyor.

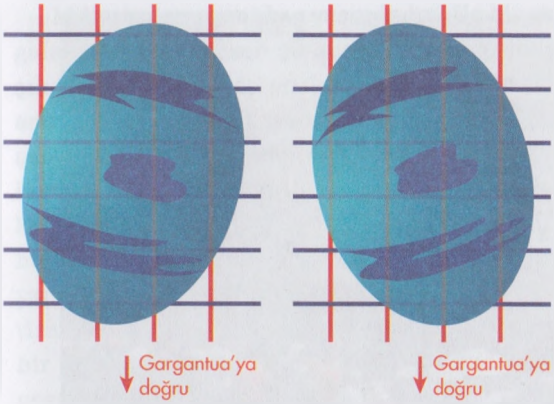
Bu sallanma Gargantua'nın gelgitli kütleçekimine baktığınızda göreceğiniz üzere doğal bir şeydir.



Şekil 17.5: Ranger'ın üzerine doğru gelen dev deniz dalgası
[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]

Şekil 17.6'da gelgitli kütleçekimini tendeks çizgileri aracılığıyla gösteriyorum. Gezegen hangi yöne (Şekil 17.6'da sola ya da sağa) eğimli olmuş olursa olsun Gargantua'nın mavi sıkıştırıcı tendeks çizgileri onun kenarlarını içe itiyor ve bu da gezegeni tekrar tercih ettiği, Gargantua'nın en yakınındaki ve uzağındaki çıkıntıları edinerek yönlenmeye doğru sürüklüyor (Şekil 17.3). Benzer biçimde Gargantua'nın kırmızı geren tendeks çizgileri altının Gargantua'ya doğru çıkıntı yapmasını sağlayarak üst çıkıntısını Gargantua'dan uzağa itiyor. Bu aynı zamanda gezegeni tekrar tercih ettiği yönlenmeye taşıyor.

Sonuç, eğer yan yatmalar gezegenin kabuğunun tozlaşmayacağı kadar küçükse gezegenin öne ve arkaya doğru sallanıp durmasıdır. Bu sallanmanın zaman dilimini, soldan sağa ve tekrar tersine bir sallanmanın ne kadar süreceğini hesapladığımda hoş bir sonuç çıktı: Yaklaşık bir saat. Bu dev dalgalar arasında geçen sürenin, Chris'in benim bilimsel yorumumu bilmeden seçtiği zamanın aynısıydı.



Şekil 17.6: Miller'ın gezegeninin Gargantua'nın gelgitli kütleçekimi nedeniyle sallanması: Geren tendeks çizgileri (kırmızı) ve sıkıştıran tendeks çizgileri (mavi).

Benim bilimsel yorumumda dev dalgalara getirdiğim ilk açıklama, gezegen Gargantua'nın gelgitli kütleçekiminin etkisi altında sallanırken gezegenin okyanuslarının çalkalanmasıdır.

"Gelgit oyuğu" adı verilen benzer bir çalkalanma dünyada da, denize dökülen düz nehirlerde gerçekleşir. Okyanus dalgası yükseldiğinde bir su duvarı nehre doğru körüklenerek gidebilir; genelde incedir ama genellikle de epey büyük bir duvardır. Şekil 17.7'nin üst yarısında bir örnek görebilirsiniz: 2010 yılının Ağustos ayında Çin, Hangzhou'da Qiantang Nehri üzerindeki gelgit oyuğu. Tüm etkileyiciliğine karşın bu gelgit oyuğu Miller'ın gezegenindeki 1,2 kilometre yüksekliğindeki dalgalarla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Fakat bu gelgit oyuğuna neden olan ayın gelgitli kütleçekimi de Gargantua'nın devasa kütleçekim gelgitinin yanında çok küçük, gerçekten çok küçüktür!

İkinci açıklamam tsunamiler. Miller'ın gezegeni sallanırken Gargantua'nın gelgit kuvvetleri gezegenin kabuğunu tozlaştırmayabilir; bunun yerine kabuğu saat başı bir öyle bir böyle deforme edebilir ve bu deformasyonlar da kolayca olağanüstü şiddette yer sarsıntılarına (bunlara "Miller sarsıntıları" demek daha doğru olacak sanırım) neden olabilir. Bu Miller sarsıntıları gezegenin okyanuslarında tsunamileri tetikleyecek ve bunlar dünyada şimdiye dek görülmüş tsunamilerin hepsinden çok daha büyük olacaktır. (Şekil 17.7'nin alt yarısında şimdiye dek görülmüş en büyük tsunamilerden biri olan ve 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'daki Miyako kentini vuran tsunamiyi görüyorsunuz.)



Şekil 17.7: *Üstte*: Qiantang nehri üzerindeki bir gelgit oyuğu. *Altta*: Miyako kentindeki tsunami.

Miller'ın Gezegeninin Geçmişi

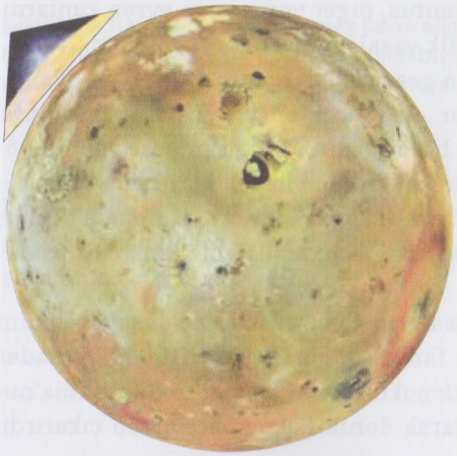
Miller'ın gezegeninin geçmişi ve geleceği üzerine spekülasyonlarda bulunmak ilginç olacaktır. Mevcut fizik bilginizi kullanarak ya da internette dolanarak bir deneyin derim. (Kolay olmayacak ama!) Düşünmeniz için birkaç şeyden bahsedeceğim.

Miller'ın gezegeni kaç yaşındadır? Uç bir varsayım olarak eğer galaksisi çok gençken şu andaki yörüngesinde doğmuşsa (yaklaşık 12 milyar yıl önce) ve Gargantua o zamandan bu yana hep aynı aşırı hızlı dönüşünü sürdürmüşse, o halde gezegenin yaşı yaklaşık olarak 12 milyar yıl bölü 60.000 (gezegendeki zaman yavaşlaması): 200.000 yıldır. Bu dünyadaki jeolojik süreçlerin çoğuyla karşılaştırdığımızda son derece genç demektir. Miller'ın gezegeni bu kadar genç olup göründüğü gibi görünebilir mi? Gezegen, okyanuslarını ve oksijen zengini atmosferini bu kadar çabuk geliştirebilir mi? Eğer olmuyorsa o halde gezegen nasıl olup da başka bir yerde şekillenip Gargantua'ya bu kadar yakın olan bu yörüngeye gelmiş olabilir?

Gezegenin sallanması, gezegenin içindeki sürtünme bütün sallanma enerjisini ısıya çevirene dek ne kadarlık bir süre boyunca sürebilir? Geçmişte ne kadar süre boyunca sallanmış olabilir? 200.000 yıldan çok daha kısaysa, o zaman belki de bir şey onun sallanmasına sebep olmuştur. Buna ne sebep olabilir?

Sürtünme sallanma enerjisini ısıya çevirdiğinde gezegenin iç yapısı ne kadar sıcak olur? Yanardağlara ve lav akıntılarına sebep olacak kadar sıcak mıdır?

Jüpiter'in uydusu İo bunun çarpıcı bir örneğidir. Jüpiter'in çevresinde yüzeyine en yakın biçimde dönen büyük uydu İo sallanmaz. Fakat eliptik bir yörünge izleyerek Jüpiter'e yakla-



Şekil 17.8: *Galileo* uzay aracının çektiği fotoğraflara göre İo'da ç sayıda yanardağ ve lav akıntısı var. *Küçük resim*: 50 kilometre yüksekliğinde bir yanardağ ağz

şıp uzaklaşarak hareket eder, bu yüzden Miller'ın gezegeninin Gargantua'nın gelgitli kütleçekiminin salındığını hissetmesi gibi, o da Jüpiter'in gelgitli kütleçekiminin güçlendiğini, sonra zayıfladığını, tekrar güçlendiğini hisseder. Bu İo'yu dev yanardağlar ve lav akıntılarının oluşumuna yetecek derecede ısıtır (Şekil 17.8).

Gargantua'nın Miller'ın Gezegeninden Görünüşü

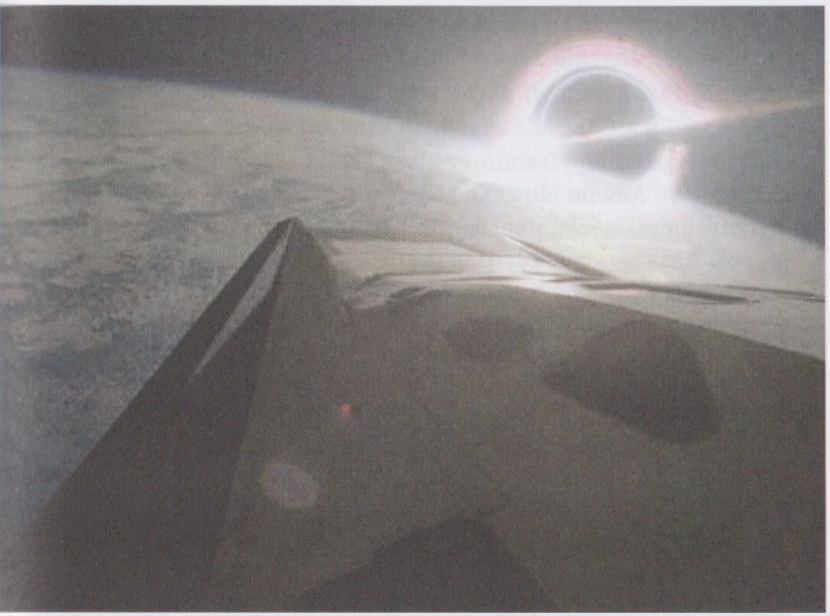
Yıldızlararası'nda Ranger içindeki Cooper ve mürettebatıyla birlikte Miller'ın gezegenine yaklaşırken yukarıdaki gökyüzünde Gargantua'yı 10 derecelik bir açıyla (ayın dünyadan görünüşünün yirmi katı büyüklükte) ve parlak birikim diskiyle çevrelenmiş olarak görürüz. *Bkz.* Şekil 17.9. Bu oldukça etkileyici bir görüntü olmasına karşın aslında Gargantua'nın açısal büyüklüğü Miller'in gezegeninin bulunduğu konumda olması gerekene göre büyük oranda azaltılmıştır.

Filmde benim seçtiğim bilimsel yoruma uyarak Miller'ın gezegeni gerçekten Gargantua'ya aşırı bir zaman yavaşlaması yaşayacak kadar yakın olsaydı, bu durumda Şekil 17.1'de görüldüğü gibi Gargantua'nın bükülmüş uzayının silindirik bölgesinin derinliklerinde yer alması gerekirdi. Bu durumda Miller'ın gezegeninden silindirden aşağı doğru baktığınızda Gargantua'yı, silindirden yukarı doğru baktığınızda dış evreni görüyor olurdunuz muhtemelen; dolayısıyla gezegeni çevreleyen gökyüzünün kabaca yarısını (180 derece) Gargantua, diğer yarısını da evren kaplardı. Aslında Einstein'ın görelilik yasalarının öngörüsü budur.

Şu da açık ki; Miller'ın gezegeni Gargantua'nın içine düşmeden istikrarlı biçimde var olabilecek en yakın noktada olduğu için, birikim diskinin bir bütün olarak Miller'ın gezegeninin yörüngesinin dışında olması gerekir. Bu yüzden mürettebatın gezegene yaklaşırken üstlerinde devasa bir disk, altlarında da devasa bir kara delik gölgesi görmesi gerekir. Bu da yine Einstein yasalarının öngörüsü gereğidir.

Eğer Chris Einstein yasalarının emrettiklerine uysaydı filmini berbat ederdi. Bu kadar fantastik görüntüleri filmde bu kadar erken görmek, filmin doruk noktası olan Cooper'ın Gargantua'nın içine düşmesini görsel olarak doruk noktası olmaktan çıkarırdı.

Bu yüzden Chris bu tür görüntüleri bilinçli olarak filmin sonuna sakladı ve sanatsal yetkisine başvurarak Miller'ın gezegeninin yakınında Gargantua'yı ve diskini birlikte ve ayın dünyadan görünüşünün "sadece" yirmi katı bir büyüklükte resmetti.



Şekil 17.9: Ranger ön planda inmek üzere alçalırken Gargantua ve diski Miller'ın gezegeni tarafından kısmi bir tutulmaya uğramış. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

Ben bir bilim insanı olmama ve bilimkurguda bilimsel doğruluk peşinde koşmama rağmen Chris'i hiç suçlayamam. Kararı veren ben olsam ben de aynısını yapardım. Ve siz de bana teşekkür ederdiniz.

18

GARGANTUA'NIN TİTREŞİMLERİ

Ⓓ

Cooper ve Amelia Brand Miller'ın gezegenindeyken Romilly Gargantua'yı gözlemlemek üzere *Endurance*'ta kalır. Yaptığı çok hassas gözlemlerden kütleçekim sapmaları konusunda yeni şeyler öğrenmeyi ummaktadır. En önemlisi de (sanıyorum) Gargantua'nın tekilliğine ait (26. Bölüm) kuantum verilerinin olay ufkundan dışarı sızmasını ve bunun kütleçekim sapmalarının nasıl kontrol edileceği konusunda (24. Bölüm) kendisine bilgi sağlamasını ummaktadır. Ya da Romilly'nin kısa ve özlü dilinden söylersek "kütleçekimin çözülmesi" hakkında bilgi edinecektir.

Amelia Brand Miller'ın gezegeninden döndüğünde Romilly ona şunları söyler: "Kara delik hakkında öğrenebileceğim her şeyi öğrendim ama babana bir şey yollayamadım. Alabiliyoruz ama hiçbir şey dışarı çıkmıyor."

Romilly ne gözlemlemişti? Açıkça belirtmiyor ama bence Gargantua'nın titreşimlerine odaklanmıştı ve bu bölümde sizlere filmin bu bölümü hakkındaki yorumumu aktaracağım.

Kara Deliklerin Titreşimleri

Caltech'teki öğrencilerimden Bill Press 1971 yılında kara deliklerin bir keman yayının titreşimine benzer şekilde özel, *tınlaşımlı frekanslarda* (sıklıklarda) titreşebildiklerini keşfetti.

Bir keman yayı doğru çalındığında çok saf bir tını yayar; yayılan tek bir sıklığa sahip ses dalgalarıdır. Biraz daha farklı çalındığında bu saf tınının yanı sıra ayrıca bu saf tınının daha yüksek armonilerini yayar. Başka bir deyişle (eğer yay sıkıca sıkıştırılmış, sıkıştıran parmak etrafta dolanmıyorsa) titreşimleri sadece belli bir ayrık sıklık kümesinde, yayın tınlaşımlı sıklıklarında ses üretir.

Aynısı parmağınızı sürttüğünüz bir şarap bardağının ağzı ve çekiçle vurulan bir çan için de geçerlidir. Press'in keşfine göre bir kara deliğin içine bir şey düştüğünde de aynısı oluyordu.

Bir yıl sonra öğrencilerimden bir diğeri, Saul Teukolsky Einstein'ın görelilik yasalarını kullanarak dönen bir kara delik için bu tınlaşımlı titreşimlerin matematiksel açıklamasına ulaştı. (Caltech'te ders vermenin en iyi yanı bu, harika öğrencilerimiz oluyor!) Teukolsky'nin denklemlerini çözerek biz fizikçiler bir kara deliğin tınlaşımlı sıklıklarını hesaplayabiliyoruz. Fakat bunların son derece hızlı dönen bir kara delik için (Gargantua gibi) çözümü çok zordur. O kadar zor ki başarıyla yapılması için kırk yıl geçmesi beklendi; bunu başaranların içinde öne çıkan iki kişi de yine Caltech öğrencileri olan Huan Yang ve Aaron Zimmerman oldu.

2013 yılının Eylül ayında *Yıldızlararası*'nın aksesuar sorumlusu (sahne donanımlarından sorumlu kişi) Ritchie Kremer benden Romilly'nin Brand'a gösterebileceği gözlem verilerini istedi. Ben de elbette bu konuda dünyanın en ileri uzmanlarının yardımına başvurdum: Yang ve Zimmerman'a. Çabucak Gargantua'nın tınlaşımlı titreşim sıklıklarını ve ayrıca titreşimlerin kütleçekim dalgalarına enerji aktararak sönümlenme hızlarını gösteren tabloları Teukolsky'nin denklemlerini kullanarak ve kendi hesaplarına dayalı olarak hazırladılar. Ardından onlar buna kuramsal öngörüleri destekleyecek sahte gözlemsel verileri eklediler, ben de Gargantua'nın olay ufkunun (ya da gölgesinin kenarının diyelim) resimlerini, Double Negative'deki görsel efektler ekibinin simülasyon görüntülerini ekledim. Sonuç olarak Romilly'nin gözlemsel veri kümesine ulaşmış olduk.

Christopher Nolan, Romilly'nin gözlemlerini Amelia Brand'e anlattığı sahneyi çekerken o sırada Romilly elindeki veri kümesini Brand'e gösterme zahmetine girmedi. Masada duruyordu ama eline almadı. Buna rağmen veri kümesi benim *Yıldızlararası*'ndaki bilim yorumumda merkezi bir yer tutuyor.

Gargantua'nın Tınlaşımlı Titreşimleri

Şekil 18.1 veri kümesinin ilk sayfasıdır. Bu sayfadaki her veri satırı Gangantua'nın titreştiği tek bir tınlaşımlı sıklığa karşılık gelmektedir.

İlk sütun Gargantua'nın titreşimlerinin şekliyle ilgili üç rakamlı bir kod ve benim bilimsel yorumuma göre resim de Romilly'nin çektiği bir filmin görüntüsü ve titreşimlerin öngörülen şekle sahip olduğunu doğruluyor. İkinci veri sütunu titreşim sıklığını, üçüncüsü de Teukolsky'nin denklemlerinin öngördüğü üzere titreşimin sönümlenme hızını gösteriyor.[1] Dördüncü ve beşinci sütunlar Romilly'nin gözlemleri ile kuramsal öngörüler arasındaki farkı gösteriyor.

Benim yorumuma göre Romilly gözlemleri ile kuram arasında birkaç sapma, aykırılık, kesin uyuşmazlık buluyor. Bu uyuşmazlıkları kırmızıyla gösteriyor. Veri kümesinin birinci sayfasında (Şekil 18.1) sadece bir aykırılık var ama uyuşmazlık çok şiddetli: Onun ölçümlerindeki belirsizlikten otuz dokuz kat daha büyük!

Benim yorumuma göre Romilly bu aykırılıkların "kütleçekimin çözülmesinde" (sapmaların nasıl kullanılacağının öğrenilmesinde) yardımcı olabileceğini düşünüyor. Öğrendiklerini dünyadaki Profesör Brand'e iletebilmeyi istiyor ama dışarıyla iletişim bağlantısı hasara uğramış, dolayısıyla amacına ulaşamamış.

Buna rağmen tekilliğinin içerisinde saklı çok önemli kuantum verilerini almak için Gargantua'nın içini görebilmeyi arzu ediyor (26. Bölüm). Fakat bunu başaramıyor.

Öte yandan gözlemlediği aykırılıkların kuantum verilerinin bir kısmını kodlayıp kodlamadığını da bilmiyor. Bir ihtimal deliğin bu kadar hızlı dönmesi sonucunda kuantum verilerinin bir kısmı ufuktan dışarıya sızdı ve aykırılıklara sebep oldu. Romilly verileri ona ulaştırabilseydi belki Profesör Brand bunu anlayabilirdi.

Kütleçekim sapmaları ve sapmalardan faydalanılmasının anahtarı olarak Gargantua'nın içindeki kuantum verileri hakkında birçok başka şey üzerinde daha sonra (24, 25 ve 26. Bölümde) söyleyeceklerim olacak. Ama şu an için bu kadarı yeterli. Şimdi Gargantua'nın çevresindeki keşif yolculuğumuza Mann'ın gezegeniyle devam edelim.

---

[1] Tınlaşımlı sıklıklar için tabloda verilen sayısal değerler bildiğimiz birimlerde değil. Bunu bildiğimiz değerlere çevirmek için ışık hızının küpüyle çarpmamız ve $2\pi GM$'ye bölmemiz gerekiyor ki $\pi = 3.14159...$, G Newton'ın kütleçekim sabiti ve M Gargantua'nın kütlesidir. Bu dönüştürme çarpanı yaklaşık olarak saatte bir titreşimdir, dolayısıyla tabloda öngörülen ilk sıklık yaklaşık olarak saatte 0,67 titreşimdir. Sönümlenme için dönüştürme çarpanı da aynıdır.

GARGANTUA

Quasinormal Mode Frequencies – Averaged Over All Data

DM Family

Mode	Theory		Observed/Theory - 1	
(l,m,n)	Re(ω) M	Im(ω) M	Re(ω) M	Im(ω) M
(2,1,0)	0.6664799	0.05541304	0.000054±23	0.00038±44
(2,1,1)	0.6665907	0.1662391	0.000008±8	0.00025±26
(2,1,2)	0.6667016	0.2770652	0.000040±17	0.00039±39
(2,1,3)	0.6668124	0.3878913	0.000016±24	0.00051±8
(2,1,4)	0.6669232	0.4987174	0.000003±25	0.00005±8
(2,0,0)	0.5235067	0.0809975	0.000057±10	0.00017±19
(2,0,1)	0.5236687	0.2429925	0.000029±9	0.00065±13
(2,0,2)	0.5238307	0.4049875	0.000005±31	0.00042±15
(2,0,3)	0.5239927	0.5669825	0.000023±12	0.00039±50
(2,0,4)	0.5241547	0.7289775	0.000041±61	0.00003±46
(3,2,0)	1.0749379	0.03192427	0.000014±91	0.00009±71
(3,2,1)	1.0750018	0.09577282	0.000019±32	0.00021±24
(3,2,2)	1.0750656	0.1596214	0.000004±25	0.00006±21
(3,2,3)	1.0751295	0.2234699	0.000024±14	0.0011±19
(3,2,4)	1.0751933	0.2873185	0.000032±38	0.00007±28
(3,1,0)	0.8623969	0.06574082	0.000004±74	0.00051±27
(3,1,1)	0.8625284	0.1972225	0.00039±1	0.00016±9
(3,1,2)	0.8626599	0.3287041	0.000019±35	0.00057±41
(3,1,3)	0.8627914	0.4601857	0.000030±35	0.00002±21



Şekil 18.1: Yang ve Zimmerman'ın Romilly'nin Amelia Brand'e göstermesi için hazırladıkları verilerin ilk sayfası. *[Yıldızlararası'ndan bir sahne donanımı, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

19

MANN'IN GEZEGENİ

Miller'ın gezegeninin insan yerleşimi için olanaksız olduğunu keşfettikten sonra Cooper ve mürettebatı Mann'ın gezegenine gider.

Gezegenin Yörüngesi ve Bir Güneşinin Olmaması

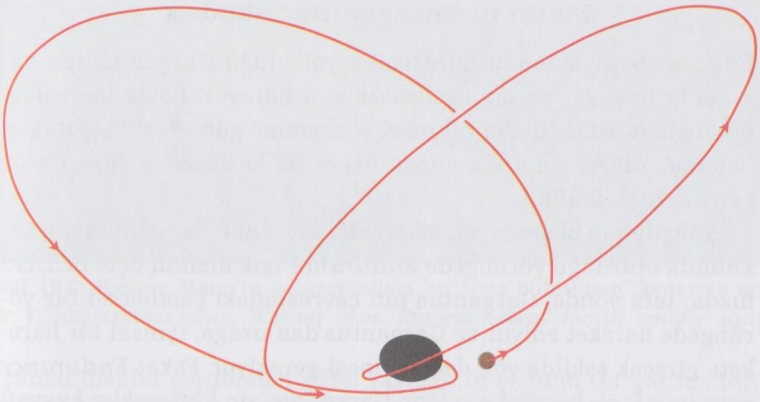
Yıldızlararası'ndaki iki şeyden yola çıkarak Mann'ın gezegeni için olası bir yörüngeye ulaştım:

Birincisi Doyle Mann'ın gezegenine yolculuğun aylar süreceğini söylüyor. Buradan *Endurance* Mann'ın gezegenine vardığında onun yolculuğun başladığı Gargantua yakınlarından uzak olması gerektiğini çıkartıyorum. İkincisi *Endurance*'ın Mann'ın gezegeni etrafındaki yörüngesindeki patlamalı kazanın hemen sonrasında mürettebat *Endurance*'ın Gargantua'nın ufkuna doğru çekildiğini görüyor. Buradan da Mann'ın gezegeninden ayrıldıklarında gezegenin Gargantua'nın yanında olması gerektiğini çıkartıyorum.

Bu iki gerekliliği birden yerine getirmesi için Mann'ın gezegeninin yörüngesi son derece uzun olmak zorunda. Gezegenin Gargantua'ya yaklaşırken Gargantua'nın birikim diskinin girdabına kapılmaktan kurtulması için de yörüngenin diskin bulunduğu Gargantua'nın ekvatoral düzleminin mümkün olduğunca fazla üstünde ya da altında olması gerekir.

Bu koşullar Şekil 19.1'deki gibi bir yörüngeyi zorunlu kılıyor ki aslında yörüngenin bundan çok daha uzağa, 600 Gargantua yarıçapı bir uzaklığa uzanması gerekiyor.[1] Halley kuyruklu yıl-

[1] Filmde *Endurance* Mann'ın gezegeni etrafındaki yörüngesindeyken Gargantua'nın gökyüzünde yaklaşık 0,9 dereceye karşılık geldiğini gö-



Şekil 19.1: Mann'ın gezegeni için David Saroff'un yazdığı son derece kullanıcı dostu bir web uygulaması kullanılarak hesaplanmış muhtemel yörünge; *bkz.* http://demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits.

dızının güneş sistemimizdeki yörüngesi gibi (Şekil 7.5), gezegen Gargantua'nın çevresinde yakından döner, sonra uzak bir mesafeye kaçar, sonra geri döner, Gargantua'nın etrafında salınır ve tekrar dışarıya uzağa kaçar. Uzayın Gargantua'nın yakınında bükülmesi gezegenin her uğrayışında Gargantua'nın çevresinde bir ya da iki kez dönmesine ve şekilde görüldüğü gibi dışarı doğru ikinci ayrılışında ikincisine göre yörüngesinin daha geniş bir açıdan devinmesine neden olur.

İçe ve dışa doğru yolculuklarında Mann'ın gezegenine bir güneşin eşlik etmesi mümkün olamaz çünkü Gargantua'nın yakınına geldiklerinde çok büyük gelgit kuvvetleri gezegeni ve güneşi birbirinden kopartır ve onları çok farklı uzak yörüngelere fırlatırdı. Bu yüzden Miller'ın gezegeni gibi bu gezegen de Gargantua'nın solgun birikim diski tarafından ısıtılmak ve aydınlatılmak zorundadır.

---

rüyoruz; bu ayın dünyadan görünüşünün büyüklüğünün yaklaşık iki katıdır. Buradan Mann'ın gezegeninin delikten yaklaşık 600 Gargantua yarıçapı uzaklıkta olduğunu hesaplıyorum. Bu uzaklıkta gezegenin içe doğru Gargantua'nın yakınına gitmesi için gereken zaman en az kırk gündür; bu mürettebatın Mann'ın gezegeninin yakınında ve üzerinde geçirmiş *gibi göründüğünden* çok daha uzundur ama gezegene ulaşmak için dış taraftan yolculuk açısından mantıklıdır; *bkz.* 7. Bölüm.

Mann'ın Gezegenine Yolculuk

Endurance'ın Mann'ın gezegenine yolculuğu Gargantua'nın yakınında başlıyor ve ondan uzakta son buluyor. Böyle bir yolculuk (benim filme ilişkin bilimsel yorumuma göre) biri yolculuğun başında, diğeri sonunda olmak üzere iki kütleçekim sapan atışı gerektirir (7. Bölüm).

Yolculuğun başında güçlükler çift yönlüdür: Gargantua'nın yakınında oturduğu yörüngede *Endurance* ışık hızının üçte biri, c/3 hızda, ters yönde, Gargantua'nın çevresindeki çembersel bir yörüngede hareket ediyor ve Gargantua'dan uzağa, ışınsal bir hareket girecek şekilde yön değiştirmesi gerekiyor. Fakat *Endurance* yeterince hızlı hareket etmiyor. Gargantua'nın kütleçekim kuvveti o kadar etkili ki, eğer *Endurance* ışınsal bir yörüngeye saptırılır ama hâlâ başlangıç hızı c/3'ü korursa, Mann'ın gezegenine olan uzaklığın ancak çok küçük bir kısmını aşmasına kalmadan Gargantua onu çekecek ve durduracaktır. Gargantua'nın kütleçekimini altetmek ve Mann'ın gezegenine gezegenin hızıyla aynı, kabaca c/20'lik bir hızla ulaşmak için ilk sapan atışının *Endurance*'ı yaklaşık olarak ışık hızının yarısı kadar hızlandırması şarttır. Bunu başarmak için Cooper uygun konumda ve uygun hızda hareket eden bir orta kütleli kara delik (IMBH) bulmak zorundadır.

Gereken IMBH'yi bulmak kolay değildir, bulunduğunda da ona yörüngesindeki doğru noktada ve anda ulaşmak kolay olmayabilir. Aylarca süren yolculuğun çoğu IMBH'ye ulaşmakla geçebilir ve IMBH'nin gelmesi için ciddi bir bekleme gerekebilir. Sapan atışı tamamlandığında önce yaklaşık c/2 hızıyla başlayan, aşama aşama yavaşlanmasıyla kabaca c/20 hıza düşen yolculuk da ek olarak ayrıca bir kırk gün kadar sürecektir.

İkinci sapan atışında bu kez *Endurance* Mann'ın gezegeninin yakınında uygun bir IMBH'nin çevresinden savrulur ve gezegenle randevusuna nazikçe süzülür: Bu buluşma fazla roket yakıtı gerektirmez.

Mann'ın Gezegenine Varış: Buz Bulutları

Filmde *Endurance* Mann'ın gezegeninin çevresindeki yörüngesine yerleşiyor ve ardından Cooper ve mürettebatı gezegene bir Ranger'la iniyorlar. Gezegen beklenebileceği üzere buzlarla kaplı,



Şekil 19.2: Ranger Mann'ın gezegenindeki bir "buz bulutunun" kenarına sürtünüyor. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

çünkü (benim yorumuma göre) yaşamının çoğunu Gargantua'nın birikim diskinin sıcaklığından uzakta geçiriyor. Ranger'ın gezegene yaklaşırken bulut gibi görünen şeylerin arasında manevralar yaptığını görüyoruz, ama ardından bunlardan birine sürtününce (Şekil 19.2) bulutun aslında bir tür buzdan yapılmış olduğunu fark ediyoruz.

İlk olarak Paul Franklin'le yaptığım bir konuşmada aklıma geldiği üzere ben bu bulutların büyük oranda donmuş karbondioksit, "kuru buz" olduklarını düşünüyorum ve bunlar gezegenin Şekil 19.1'deki gibi birikim diski yönünde içe doğru ilerlemesiyle giderek ısınmaya başlıyorlar. Kuru buz ısındığında gaz durumuna geçer (buharlaşır), bu yüzden bulut olarak gözükenler kuru buz ile gaz buharının bir karışımı, belki de ağırlıklı olarak buhar olabilir. Ranger'ın iniş yaptığı daha alçak irtifalarda sıcaklık daha yüksektir ve üzerine iniş yaptıkları buz büyük ihtimalle sadece donmuş sudur.

Dr. Mann'ın Jeolojik Verileri

Filmde Dr. Mann gezegeninde organik malzeme olup olmadığını araştırmış durumda ve umut verici kanıtlar bulduğunu iddia ediyor. Umut verici ama kesin değil. Verilerini Brand ve Romilly'ye gösteriyor.

Veriler her bir taş parçasının nereden toplandığını, oradaki jeolojik çevre koşullarını örneklerin kimya analizleriyle birlikte belirten alan notlarından oluşuyor. Bu kimyasal analizler Dr. Mann'ın organik maddelerin varlığına ilişkin kanıtlarıdır.



Şekil 19.3: *Üstte*: Romilly (David Oyelowo calandırıyor) ve Brand (Anne Hathaway) Dr. Mann'ın jeolojik verilerini kendisiyle tartışıyorlar. *Altta*: Erika Swenson'ın film için hazırladığı verilerden bir sayfa: Gezegenin yüzeyinden sözde toplanmış taşların kimyasal analizlerinin sonuçları. Birkaç taş canlı varlıklardan kaynaklı olabilecek umut verici organik malzeme kanıtı niteliği taşıyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

sample	cytochromes	Redox enzymes	PA hydrocarbons	formaldehyde
EBL-VR01	0.03	0.379	8.7	1.64
EBL-VR03	0.02	0.103	2.3	1.20
EBL-VR04	0.02	0.170	3.9	1.38
EBL-OS01	0.02	0.128	2.9	1.26
EBL-OS02	0.01	0.038	0.8	0.88
EBL-OS04	0.01	0.020	0.4	0.71
GBO-VR01	0.04	0.426	9.7	1.67
GBO-VR02	0.02	0.155	3.5	1.34
GBO-VR03	0.01	0.015	0.3	0.64
GBO-VR05	0.02	0.115	2.6	1.24
GBO-OS01	0.04	0.613	14.0	1.76
GBO-OS02	0.00	0.009	0.1	0.50
GBO-OS03	0.02	0.115	2.6	1.24
GBO-OS04	0.03	0.237	5.4	1.49
EFO-VR02	0.01	0.051	1.2	0.98
EFO-VR03	0.02	0.186	4.2	1.41
EFO-VR05	0.02	0.103	2.3	1.20
EFO-VR08	0.05	0.938	21.5	1.79
EFO-VR11	0.07	1.645	37.9	1.64
EFO-OS01	0.00	0.003	0.0	0.25
EFO-OS02	0.03	0.219	5.0	1.46
EFO-OS03	0.01	0.045	1.0	0.93
EFO-KS01	0.02	0.128	2.9	1.28

Şekil 19.3 bu verilerden bir sayfayı gösteriyor. Aslında film için bu verileri Caltech'te jeoloji doktorası yapan yetenekli öğrenci Erika Swenson hazırladı. Erika Dr. Mann'ınkilere benzer türde alan çalışmaları ve kimya analizleri yaptı.

Filmde Dr. Mann'ın verilerinde sahtecilik yaptığı ortaya çıkıyor. Bu şüphesiz biraz ironik, çünkü Erika da verilerinde sahtecilik yapmıştı. Mann'ın gezegenine gidip bir alan çalışması yapmamıştı. Belki bir gün bu da yapılır...

Bu kitapta Dr. Mann'ın trajedisi hakkında hiçbir şey yazmıyorum. Bu biraz bilim de içeren ama esasen insani bir trajedi. Trajedinin zirvesi *Endurance*'a ağır hasar veren bir patlama oluyor. Patlama, hasar ve *Endurance*'ın tasarımı: İşte bunlar bilim ve mühendislik meseleleri, bu yüzden şimdi bunlardan bahsedelim.

20

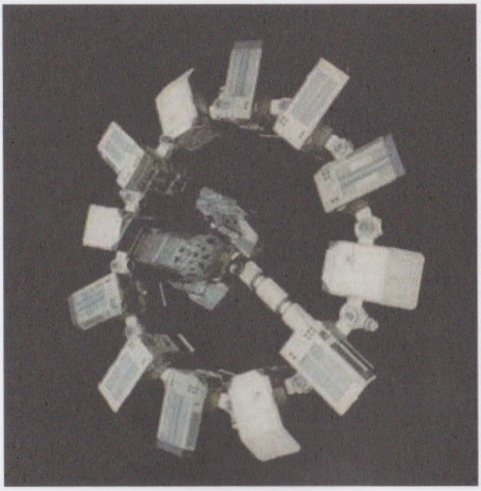
ENDURANCE

Ⓓ

Gelgitli Kütleçekim ve *Endurance*'ın Tasarımı

Endurance bir halkaya bağlanmış on iki parça ve halkanın merkezindeki bir kontrol parçasından oluşuyor (Şekil 20.1). İki iniş aracı ve iki Ranger *Endurance*'ın merkezi parçasının üzerine kenetleniyor.

Benim film için yaptığım bilimsel yorumda *Endurance* şiddetli gelgitli kütleçekim kuvvetlerine dayanabilecek şekilde tasarlandı. Bu *Endurance*'ın solucandeliğinin içinden geçmesi açısından önemliydi. *Endurance*'ın halkasının çapı olan 64 metre solucandeliğinin çevre uzunluğunun yaklaşık olarak yüzde biridir. Çelik



Şekil 20.1: *Endurance* merkezi kontrol parçasına kenetlenmiş iki Ranger ve iki iniş aracıyla birlikte görülüyor. Rangerlar *Endurance*'ın halka düzleminin dışında, iniş araçlarıysa düzleme paralel olarak konumlandırılmış. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

ve diğer katı malzemeler yüzde sıfır virgül bir-ikiden büyük tahribatlara maruz kaldığında kırılır ya da akar, dolayısıyla tehlike açıktı. Gargantua'nın bulunduğu solucandeliğinin diğer tarafında *Endurance*'ın karşılaşacakları konusunda da pek az şey biliniyordu, bu yüzden solucandeliğininkinden çok daha şiddetli gelgit kuvvetlerine dayanacak şekilde tasarlandı.

İnce bir fiber, fiberin malzemesinin herhangi bir kısmı yüzde 1'lik bile bir tahribata uğramadan karmaşık şekiller alacak şekilde bükülebilir. Burada püf noktası fiberin inceliğidir. İşte biz de *Endurance*'ın dayanıklılığını, asma bir köprüyü ayakta tutan ve kuvvetli bir rüzgâr estiğinde gerektiği gibi esneyebilen bir kablonun telleri gibi, halkanın etrafında gerilmiş çok büyük sayıda ince fibere borçlu olduğunu hayal edebiliriz. Fakat bu halkayı *haddinden fazla* esnek hale getirecektir. Halka, gelgitli kuvvetlere maruz kaldığında parçaları birbirine çarpacak şekilde şiddetli bir deformasyona uğramamak için deforme olmaya karşı daha yüksek bir dirence ihtiyaç duyar.

Benim yorumumda tasarımcılar *Endurance*'ı deformasyona karşı direnebilecek ama beklenenden çok daha şiddetli gelgit kuvvetleriyle karşılaşırsa da kırılmadan deforme olabilecek şekilde yapmak için çok sıkı bir çalışmayı başarıyla yürüttüler.

Mann'ın Gezegeninin Yörüngesindeki Patlama

Dr. Mann bilmeden Endurance'ın halkasını kıran, halka parçalarından ikisini imha eden ve ikisine de de zarar veren büyük bir patlamaya sebep olduğunda (Şekil 20.2) bu tasarım felsefesi gerçekten işe yarıyor.

Patlama halkanın kendi çevresinde öyle bir hızla dönmesine sebep oluyor ki parçalar 70 gee'lik (dünyanın kütleçekiminin 70 katı) bir merkezkaç kuvvet hissediyor. Kırılan uçlar birbirinden uzağa savruluyor ama kopmuyor ve halkanın parçaları birbirine çarpmıyor. Benim bilimsel yorumuma göre bu zeki mühendislerce yapılan harika bir muhafazakâr tasarım örneği!

Aklıma gelmişken filmdeki patlamanın beni etkilediğini de söylemeliyim. Uzaydaki bir patlama ses dalgalarını iletecek hava olmadığı için ses yapmaz. *Endurance* patlamasında ses yoktur.



Şekil 20.2: *Solda*: *Endurance*'ta patlama; iniş aracı üstte, Mann'ın gezegeni aşağıda görülüyor. (Görünen ışınsal on ışık ışını, patlama nedeniyle yayılan parçalardan dolayı değil, ışığın kamera merceklerinin içine saçılması nedeniyle mercek parlaması yüzündendir.) *Sağda*: Endurance'ın patlama sonrası hasarlı hali. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

Böyle bir patlamada çıkan alevler onları besleyen oksijen hızla uzayın içine karıştığı için aynı hızla sönmek zorundadır. Filmdeki alevler hızla sönmektedir. Paul Franklin bana patlama bilgisayarla yaratılan bir görsel efekt değil de, bir film setinde yapılmış gerçek bir patlama olduğu için bu sonuca ulaşmak için ekibinin çok çalışması gerektiğini söyledi. Bu da Christopher Nolan'ın bilimsel doğruluğa bağlılığının bir başka örneğidir.

Gargantua'nın çevresindeki keşif yolculuğumuz bizi gezegenler fiziğinden alıp (gelgit deformasyonları, tsunamiler, gelgit oyukları...) Gargantua'nın titreşimleri ve organik yaşam belirtilerinden geçirerek mühendislik meselelerine kadar (*Endurance*'ın dayanıklı tasarımı ve zarar gördüğü patlama) getirdi. Bu başlıklar benim de hoşuma gitmesine rağmen (ki çoğu hakkında araştırmalar yaptım ya da ders kitapları yazdım) en büyük tutkum değil. Benim asıl tutkum uç fizik; insan bilgisinin sınırı ve hemen ötesindeki fizik. İşte şimdi buraya giriyoruz.

VI. UÇ FİZİK

21

DÖRDÜNCÜ VE BEŞİNCİ BOYUTLAR
DÖRDÜNCÜ BOYUT OLARAK ZAMAN

Ⓓ

Bizim evrenimizde uzay üç boyuta sahiptir: Yukarı-aşağı, doğu-batı ve kuzey-güney. Ama bir arkadaşımızla yemeğe çıktığımızda ona sadece nerede buluşacağımızı değil *zamanını* da söylememiz gerekir. Bu anlamda zaman dördüncü bir boyuttur.

Fakat zaman uzaydan daha farklı türde bir boyuttur. Batı yönünden de gidebiliriz doğu yönünden de, bunda bir sorun yoktur; seçimimizi yapar ve gideceğimiz yere varırız. Ama öğle yemeği için restorana varmışsak, orada artık birden zamanda geriye yolculuk yapamayız. Ne kadar çok uğraşırsak uğraşalım sadece ileriye doğru gidebiliriz. Görelilik yasaları bunu güvence altına alır. Buna zorunlu kılar.[1]

Buna rağmen zaman, *evet*, dördüncü bir boyuttur; o *evrenimizin* dördüncü boyutudur. Bizim hayat sahamız üç uzay boyutu artı bir zaman boyutu olmak üzere dört boyutlu uzay-zamandır.

Biz fizikçiler bu uzayzaman sahasını deneyler ve matematik yoluyla araştırdığımızda uzay ve zamanın değişik yönlerden birleşik olduğunu keşfediyoruz. En basit düzeyde, dünyadan uzaya baktığımızda ışığın bize ulaşma süresinden dolayı otomatik olarak zamanda geriye bakıyoruz. Bir kuasarın bir milyar ışık yılı uzakta olduğunu, teleskoplarımıza ulaşan ışığın bize doğru olan yolculuğuna ilk başlamasının bundan bir milyar yıl önce olması sayesinde görüyoruz.

---

[1] Öte yandan görelilik yasaları dolambaçlı bir yolla da olsa bir zamanda geriye yolculuk olasılığı sunar: Uzayın derinliklerine gitmek ve dönüşte dünyadan ayrılıştan öncesine dönmek. Buna 30. Bölümde değineceğim.

Çok daha derin bir düzeydeyse durum şu: Siz bana göre yüksek bir hızda hareket ettiğinizde ikimiz hangi olayların eşanlı olduğu konusunda anlaşamıyoruz. Siz biri güneş, diğeri dünya üzerinde olan iki patlamanın eşanlı olduğunu düşünebilirsiniz ama ben dünyadaki patlamanın güneştekinden beş dakika önce olduğunu düşünüyorum. Bu anlamda sizin tamamen uzamsal (aralıklı; patlamaların ayrı olması) olarak değerlendirdiğiniz şeyi ben uzay ve zamanın bir karışımı olarak görüyorum.

Uzay ve zamanın bu karışması sezgilerimize aykırı olabilir ama bu evrenimizin dokusuna işlemiş temel bir özelliktir. Aklımızın karışmaması açısından şanslıyız ki bu durumu 30. Bölüm hariç elinizdeki kitapta göz ardı edebilmemiz mümkün oldu.

Yığın: Gerçek mi?

BT

Bu kitap boyunca ben bükülmüş uzayı görselleştirirken evrenimizi (örneğin Şekil 21.1'de olduğu gibi) üç uzay boyutuna sahip bir yığının içerisinde yer alan iki boyutlu bir bükülmüş membran ya da zar olarak resmettim. Elbette gerçekte zarımız üç uzay boyutuna, yığın ise dört boyuta sahip; fakat çizim konusunda pek iyi sayılmam, bu yüzden resimlerimde genellikle bir boyutu atıyorum.

Yığın gerçekten var mı yoksa bizim hayal gücümüzün bir ürünü mü? 1980'li yıllara dek fizikçilerin çoğu, ben dahil bunun hayal gücümüzün bir ürünü olduğunu düşünüyorduk.



Şekil 21.1: Bir boyut eksiltildiğinde yığından görüldüğü şekliyle, büyük bir kara deliğin içerisine doğru sarmallaşan küçük bir kara delik. *[Çizim benim bir eskizime dayanarak Don Davis tarafından yapılmıştır.]*

Nasıl hayal mahsulü olabiliyordu? Evrenimizin bükülmüş olduğunu kesin olarak bilmiyor muyduk? *Viking* uzay aracına gönderilen radyo sinyalleri bu bükülmüşlüğü son derece kesin biçimde ortaya çıkarmıyor muydu? *Evet*... Uzayımız gerçekten bükülmüş olduğuna göre, onun daha yüksek boyutlu bir uzay, bir çeşit yığın içerisinde bükülmüş olması gerekmiyor muydu?

Hayır. Evrenimizin daha yüksek boyutlu bir yığın gerçekten var olmaksızın da bükülmüş halde olması gayet mümkündür. Biz fizikçiler evrenimizin bükülmesini bir yığının yardımı olmadan da matematiksel olarak açıklayabiliyoruz. Bükülmeyi yöneten Einstein'ın görelilik yasalarını bir yığının varlığına başvurmaksızın formüle edebiliyoruz. Hatta aslında araştırmalarımızda genellikle hep böyle yapıyoruz. Yığın 1980'lere dek bizim için sadece görsel bir yardımcıydı. Matematik hesaplamalarımızda ne olup bittiği hakkında bize bir görü sağlayan ve kendi aramızda ve fizikçi olmayan kimselerle iletişim kurmamızda faydalı bir yardımcı. Görsel bir yardımcı. Gerçek bir şey değil.

Peki, yığının gerçek olması ne anlama gelir? Gerçek olup olmadığını nasıl test edebiliriz? Bizim ölçtüğümüz şeyleri etkileyebiliyorsa yığın gerçektir. 1980'li yıllara kadar da yığının ölçümlerimizi etkileyebildiğine ilişkin bir veriye sahip değildik.

Bu 1984 yılında değişti. Hem de radikal biçimde. Londra Üniversitesinden Michael Green ve Caltech'ten John Schwarz kuantum kütleçekimi yasalarının keşif araştırmalarında çığır açıcı bir ilerleme gerçekleştirdiler.[2] Fakat gariptir ki yaptıkları keşif, sadece evrenimiz bir zaman boyutu ve dokuz uzay boyutuna sahip, bizim zarımızdan altı fazla uzay boyutuna sahip bir yığının içerisine gömülü bir zarsa işliyordu. Green ve Schwarz'ın izlediği "süper-sicim kuramı" adı verilen matematiksel biçimde, yığının fazladan boyutları zarımızı çok çeşitli biçimlerde, yeterince ileri teknolojiye sahip olduğumuzda fizik deneylerinde de ölçülebilecek yollardan etkiliyor. Bu yollar kuantum fizik yasalarının Einstein'ın görelilik yasalarıyla uyumlulaşmasını sağlayabilir.

Green-Schwarz keşfinden beri biz fizikçiler süper-sicim kuramını çok ciddiye alıyor ve araştırılması ve ilerletilmesi için büyük çaba harcıyoruz. Dolayısıyla da yığının gerçekten var olduğu ve evrenimizi gerçekten etkileyebildiği düşüncesini de çok ciddiye almaktayız.

---

[2] Bu araştırmalara ilişkin kısa bir bilgilendirme için 3. Bölüme bakınız.





Şekil 21.2: *Solda*: Michael Green (solda) ve John Schwarz 1984 yılında keşiflerini yaptıkları dönemde Aspen, Colorado'da kır yürüyüşündeler. *Sağda*: Michael Green (solda) ve John Schwarz (sağda) yaptıkları keşif nedeniyle üç milyon dolar değerindeki 2014 Temel Fizik Ödülünü alıyorlar. Ortadakiler Yuri Milner (ödülün kurucusu) ve Facebook kurucularından Mark Zuckerberg.

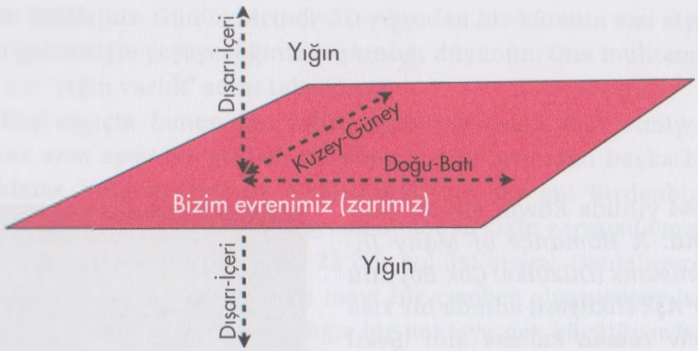
Beşinci Boyut

BT

Süper-sicim kuramı her ne kadar yığının bizim evrenimize göre fazladan altı boyuta sahip olduğunu söylese de, pratik amaçlarımız için fazladan boyutların aslında sadece bir adet olduğunu düşünmemizin önünde bir engel yok. (Bunu 23. Bölümde açıklayacağım.)

Bu nedenle ve fazladan altı boyut bir bilimkurgu filmi için biraz fazla olduğu için *Yıldızlararası*'ndaki yığın sadece bir fazladan boyuta sahip ve toplamda beş boyutlu. Bizim zarımızla ortak olarak üç uzay boyutunu paylaşıyor: Doğu-batı, kuzey-güney ve yukarı-aşağı. Dördüncü boyutu, zaman boyutunu da zarımızla paylaşıyor. Bir de beşinci bir boyuta sahip, *dışarı-içeri* ve bu Şekil 21.3'te görüldüğü gibi zarımıza dik olarak, zarın hem üstüne hem altına doğru uzanıyor.

Her ne kadar Profesör ve diğerleri "dışarı-içeri" ibaresini kullanmayıp sadece "beşinci boyuta" gönderme yapmakla yetinseler de, dışarı-içeri boyutu *Yıldızlararası*'nda çok önemli bir rol oynuyor. Dışarı-içeri önümüzdeki iki bölümde ve 25, 29 ve 30. Bölümde merkezi bir yer tutacak.

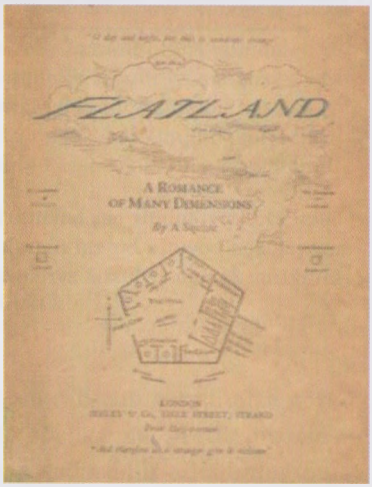


Şekil 21.3: Evrenimiz beş boyutlu bir yığının içerisinde yer alan dört uzayzaman boyutlu bir zar olarak gösteriliyor. İki boyutu grafiğin dışında bıraktım: Zaman ve bizim evrenimizin yukarı-aşağı boyutu.

22

YIĞIN VARLIKLAR
2D ZAR VE 3D YIĞIN

1844 yılında Edwin Abbott *Flatland: A Romance of Many Dimensions* [*Düzülke: Çok Boyutlu Bir Aşk Hikâyesi*] adında bir kısa hiciv roman kaleme aldı (Şekil 22.1)[1]. Bugün Viktorya dönemi kültürüne yönelik eleştirisi bir acayip ve kadınlara dönük tutumu çok çirkin görünüyor olmasına karşın romanın geçtiği yer *Yıldızlararası*'yla çok yakından ilgili. Okumanızı tavsiye ederim.



Şekil 22.1: *Düzülke*'nin ilk baskısının kapağı.

Kitap Düzülke adı verilen iki boyutlu bir evrende yaşayan kare şeklindeki bir varlığın maceralarını anlatır. Kare, Çizgiülke denen tek boyutlu bir evreni, Noktaülke denen sıfır boyutlu bir evreni ve kendisi açısından hepsinden daha hayret verici olan Uzayülke adlı üç boyutlu bir evreni ziyaret eder. Üstelik Düzülke'de yaşarken Uzayülke'den gelen küresel bir varlık tarafından ziyaret edilir.

Christopher Nolan'la yaptığımız ilk toplantıda ikimiz de birbirimizin Abbott'un kısa romanını okumuş ve sevmiş olduğunu öğrendiğimizde bundan çok memnun olmuştuk.

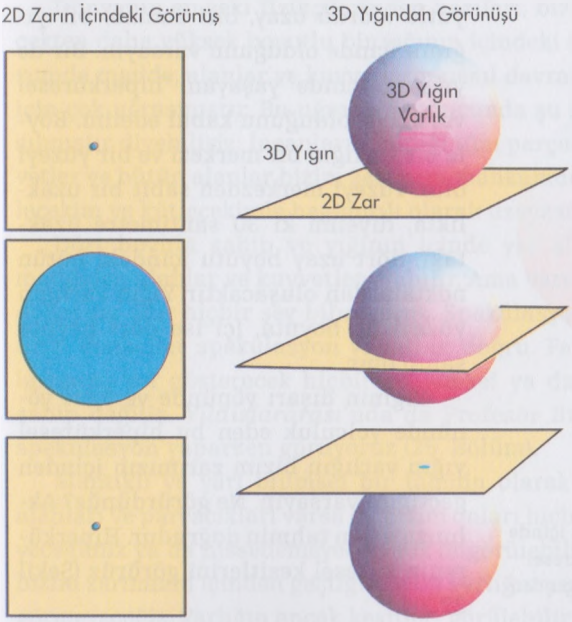
---

[1] İnternette çok rahat bulunabiliyor. Örneğin *bkz.* Wikipedia'daki "Flatland" başlığı.

Abbott'un romanının ruhuna uygun olarak, siz de Düzülke'deki gibi iki boyutlu bir evrende yaşayan kare misali iki boyutlu bir varlık olduğunuzu düşünün. Evreniniz bir masa üstü, bir düz bir kâğıt parçası ya da lastik bir membran olabilirdi. Modern fiziğin ruhuyla, ben buna bir *iki boyutlu (2D) zar* diyeceğim.

İyi bir eğitim almış bir kişi olarak sizin zarınızın içine gömülü olduğu 3D bir zarın var olduğunu düşünüyorsunuz ama bundan emin değilsiniz. Günün birinde 3D yığından bir kürenin sizi ziyarete gelmesiyle yaşayacağınız şaşkınlığı düşünün. Ona muhtemelen bir "yığın varlık" adını takardınız.

Başlangıçta bunun bir yığın varlık olduğunu fark etmiyorsunuz ama epey bir gözlem ve düşünmenin ardından başka bir açıklama bulamıyorsunuz. Gözlemlediğiniz şey şu: Birdenbire, hiçbir uyarı, hiçbir görünen kaynak olmadan sizin zarınızda mavi bir nokta ortaya çıkıyor (Şekil 22.2'de sol üst çizim). Genişleyerek maksimum çapa dek büyüyen mavi bir çember oluşturuyor (sol ortadaki çizim) ve sonra ağır ağır bir noktaya dek küçülüyor (sol alt çizim) ve tamamen gözden kayboluyor.



Şekil 22.2: Üç boyutlu bir küre iki boyutlu bir zarın içinden geçiyor.

Maddenin korunumuna inanıyorsunuz. Hiçbir cisim yoktan var olamaz, ama bu cisim var oldu. Bulabildiğiniz tek açıklama Şekil 22.2'nin sağ tarafında gösteriliyor. Üç boyutlu bir yığın varlık (bir küre) sizin zarınızın içinden geçti. Geçerken siz kendi zarınızda onun değişen iki boyutlu kesitini gördünüz. Kesit kürenin güney kutbunda bir noktayla başladı (sağ üst çizim). Azami büyüklükteki bir çember biçiminde genişlemesi kürenin ekvator düzleminde gerçekleşti (sağ ortadaki çizim). Daha sonra küçüldüğü nokta kürenin kuzey kutbuydu, ardından da gözden kayboldu (sağ alt çizim).

Şimdi 3D yığında yaşayan 3D bir insanın sizin 2D zarınızdan geçtiğini düşünün. Ne görürsünüz?

Bizim 3D Zarımızdan Geçen Beşinci Boyuttan Gelen Yığın Varlıklar

Bizim 3D Zarımızın İçindeki Görünüşü



Şekil 22.3: Bizim zarımızın içinde görüldüğü haliyle, hiperküresel bir yığın varlık zarımızın içinden geçiyor.

Üç uzay ve bir zaman boyutu olan bizim evrenimizin gerçekten de beş boyutlu (dördü uzay, biri zaman) bir yığının içinde olduğunu varsayın. Bir de yığının içinde yaşayan "hiperküresel varlıklar" olduğunu kabul edelim. Böyle bir varlığın bir merkezi ve bir yüzeyi olur. Yüzeyi merkezden sabit bir uzaklıkta, diyelim ki 30 santimetre uzaktaki, dört uzay boyutu içindeki bütün noktalardan oluşacaktır. Yığın varlığın yüzeyi üç boyuta, içi ise dört boyuta sahip olur.

Yığının dışarı yönünde ve içeri yönünde yolculuk eden bu hiperküresel yığın varlığın bizim zarımızın içinden geçtiğini varsayın. Ne görürdünüz? Aklınıza gelen tahmin doğrudur. Hiperkürenin küresel kesitlerini görürüz (Şekil 22.3).

Hiçlikten bir nokta doğar (1). Genişleyerek üç boyutlu bir küre halini alır (2). Küre maksimum çapa dek genişler (3), sonra küçülür (4), bir noktaya dek iner (5) ve gözden kaybolur.

Yığında yaşayan dört boyutlu bir insan bizim zarımızdan geçse ne görürdük peki? Bu konuda spekülasyon yapmak için dört boyutlu bir insanın (iki ayaklı, bir gövdeli, iki kollu, bir başlı) yığının içinde, dört uzay boyutuyla nasıl görünmesi, neye benzemesi gerektiğini kafanızda canlandırabilmeniz gerekir. Buradan yola çıkarak da kesitlerinin nasıl görünmesi gerektiğini...

Yığın Varlıkların Doğası ve Kütleçekimi

BT & S

Yığın varlıklar *varsa* neyden yapılmışlardır? Bizim gibi atomlardan oluşmadıkları kesin. Atomların üç uzay boyutu vardır. Sadece üç uzay boyutunda var olabilir, dört uzay boyutunda var olamazlar. Aynısı atomaltı parçacıklar için de geçerlidir. Elektriksel alanlar ve manyetik alanlar (2. Bölüm) ve atom çekirdeklerini bir arada tutan kuvvetler için de geçerlidir.

Dünyanın en zeki fizikçilerinden bazıları, bizim evrenimiz gerçekten daha yüksek boyutlu bir yığının içindeki bir zar ise, bu durumda madde, alanlar ve kuvvetlerin nasıl davranacağını anlamak için çok uğraşmıştır. Bu uğraşlar sonucunda şu kesin sonuca ulaşılmıştır diyebiliriz: İnsanların bildiği tüm parçacıklar, bütün kuvvetler ve bütün alanlar bizim zarımıza mahkûmdur, biri hariç: Kütleçekim ve kütleçekimle bağlantılı olarak uzayzamanın bükülmesi.

Dört boyuta sahip ve yığının içinde yer alan başka türden maddeler, alanlar ve kuvvetler olabilir. Ama varsa bile biz onların doğasına dair hiçbir şey bilmiyoruz. Spekülasyonlarda bulunabiliriz. Fizikçiler spekülasyon yaparlar, doğru. Fakat spekülasyonlarımıza yol gösterecek hiçbir gözlemsel ya da deneysel kanıta sahip değiliz. *Yıldızlararası*'nda da Profesör Brand'i tahtasında spekülasyon yaparken görüyoruz (25. Bölüm).

Mantıklı ve yarı bilimsel bir tahmin olarak yığın kuvvetleri, alanları ve parçacıkları varsa da bizim onları hiçbir zaman göremeyeceğimiz ya da hissedemeyeceğimiz öngörülebilir. Bir yığın varlık bizim zarımızın içinden geçtiğinde bu varlığın yapıldığı malzemeyi görmeyeceğiz. Varlığın ancak kesitleri görülebilir olacak.



Şekil 22.4: Bizim zarımızdan geçen bir yığın varlık, boya örneklerinden oluşan bir duvarı görüşümüzü büker ve döndürür.

Öte yandan varlığın kütleçekimini ve uzay ve zamanı bükmesini hissedecek ve göreceğiz. Örneğin midemde bir hiperküresel yığın ortaya çıkarsa ve yeterince güçlü bir kütleçekim kuvvetine sahipse, midem kasılmaya başlayabilir, çünkü kaslarım varlığın küresel kesitinin merkezince yutulmaya karşı direnmeye çalışırken sertleşir.

Yığın varlığın kesiti bir dama tahtası şeklindeki boya örneklerinin önünde ortaya çıkar ve ortadan kaybolursa, uzay bükülmesi renkleri mercekler ve gördüğüm görüntüyü Şekil 22.4'ün üst yarısındaki gibi büker.

Yığın varlık dönüyorsa bu durumda da Şekil 22.4'ün alt kısmındaki gibi uzayı benim hissedebileceğim ve görebileceğim bir dönme hareketine sürükler.

Yıldızlararası'ndaki Yığın Varlıklar

Yıldızlararası'ndaki bütün karakterler adını pek az kullansalar da yığın varlıkların var olduğuna ikna olmuş durumdadır. Karakterler yığın varlıklara genellikle "Onlar" demektedir. Saygıdan ileri gelen bir "Onlar." Filmin başlarında Amelia Brand'in Cooper'a dediği şekliyle: "Onlar her kimlerse bizi sakınıyor gibi gözüküyorlar. O solucandeliği bizim diğer yıldızlara yolculuk yapmamızı sağlıyor. Tam da ihtiyaç duyduğumuz zamanda karşımıza çıktı."

Christopher Nolan'ın zeki ve ilgi çekici fikirlerinden biri Onlar'ın aslında bizim soyumuzdan gelen kişiler olmasını düşün-

mesiydi: Uzak gelecekte ek bir uzay boyutu elde edecek şekilde evrimleşmiş ve yığında yaşayan insanlar. Filmin sonlarında Cooper TARS'a şöyle der: "Hâlâ anlamadın mı TARS? Onlar varlıklar değil. Onlar biziz, yardım etmeye çalışıyoruz, tıpkı benim Murph'e yardım etmeye çalıştığım gibi." TARS yanıt verir: "Bu teseraktı (Cooper'in içinde gezindiği; 29. Bölüm) insanlar inşa etmedi." "Henüz etmedi," der Cooper, "ama bir gün edecekler. Sen değil, ben değil, ama insanlar, bizim bildiğimiz dört boyutun ötesine evrimleşmiş insanlar."

Cooper, Brand ve *Endurance* mürettebatı bizim yığın geleceğimizin kütleçekimini ya da uzayı bükmelerini ve döndürmelerini gerçekte hiç hissetmez ya da görmezler. Bu eğer yapılırsa *Yıldızlararası*'nın devam filmine bırakılmıştır. Fakat yaşlı Cooper 30. Bölümde değineceğimiz gibi kapanan teseraktın içindeki yığın içerisinde gezinerek bizzat *Endurance*'ın mürettebatına ve kendisinin gençliğine uzanır, yığının içinden temas kurar, kütleçekimsel olarak uzanır. Brand onun varlığını hisseder ve görür ve onun Onlar olduğunu düşünür.

23

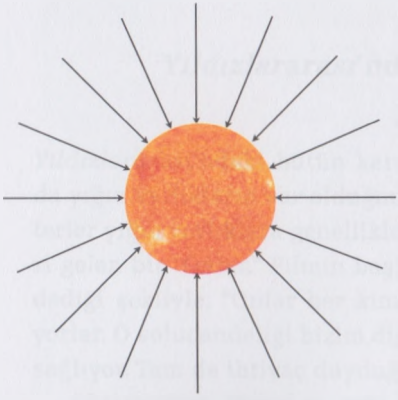
HAPSOLMUŞ KÜTLEÇEKİM BEŞ BOYUTTA KÜTLEÇEKİM SORUNU

BT

Yığın gerçekten *varsa*, bu durumda uzayının bükülmüş olması *zorunludur*. Bükülmüş olmasaydı kütleçekim ters kare yasası yerine ters küp yasasına uyardı, güneşimiz gezegenlerini muhafaza edemez ve güneş sistemi dağılırdı.

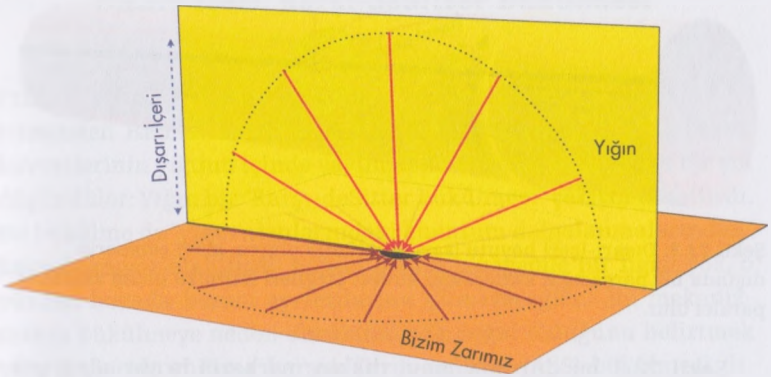
Tamam. Yavaşlıyorum ve ağır ağır açıklıyorum.

Güneşin kütleçekim kuvveti çizgilerinin, dünyanın ve diğer tüm küresel cisimlerin çizgilerinin yaptığı gibi, güneşin merkezine doğru ışınsal olarak yöneldiğini ve cisimleri kendileriyle beraber güneşe doğru çektiklerini (2. Bölüm) hatırlayın (Şekil 23.1). Güneşin kütleçekim kuvvetinin yeğinliği, kuvvet çizgilerinin yoğunluğuyla (sabit bir alanın içinden geçen çizgilerin sayısıyla) orantılıdır. Çizgilerin içinden geçtiği enine alanlar (küreler) iki boyuta sahip olduğu için de, çizgilerin yoğunluğu, dolayısıyla kütleçekimin yeğinliği r çapının artmasıyla $1/r^2$ uyarınca düşer. Newton'ın kütleçekim için *ters kare yasası* budur.



Şekil 23.1: Güneşin çevresindeki kütleçekim kuvvet çizgileri.

Sicim kuramı yığının içindeki kütleçekiminin de kuvvet çizgileriyle tanımlandığını iddia eder. Yığının içindeki uzay bükülmüş değilse, o halde güneşin kütleçekim kuvvet çizgileri ışınsal olarak yığının içine doğru da yayılacaktır (Şekil 23.2). Yığının fazladan boyutu yüzün-



Şekil 23.2: Yığın bükülmüş değilse, kütleçekim kuvvet çizgileri yığının içine ışınsal olarak yayılır. Noktalı çemberler sadece gözlerinize yol göstermek amacıyla eklenmiştir. *[Şekilde Lisa Randall'ın Warped Passages (Randall 2006) kitabında yer alan bir çizim model alınmıştır.]*

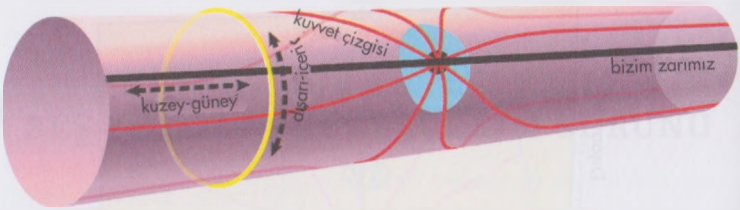
den (*Yıldızlararası*'nda fazladan sadece bir boyut var) kütleçekimin içerisine yayılabileceği yalnızca iki değil, üç enine boyut vardır. Bu yüzden *yığın varsa ve bükülmüş değilse, o zaman kuvvet çizgilerinin yoğunluğu ve dolayısıyla kütleçekimin yeğinliği biz güneşten uzaklaştığımızda $1/r^2$ değil, $1/r^3$ oranında azalmalıdır.* Güneşin dünya üzerindeki çekme kuvveti iki yüz kat daha zayıf, Satürn üzerine uyguladığı çekme ise şu andakinden 2000 kat daha zayıf olacaktır. Kütleçekimin bu kadar hızlı zayıflamasıyla güneş gezegenlerini yörüngesinde tutamaz, gezegenler yıldızlararası uzaya dağılırlar.

Fakat bu anlattıklarımız gerçekleşmemekte, gezegenler uzaya dağılmamaktadır. Hareketlerinin ölçümü de güneşin kütleçekiminin uzaklığın ters karesi oranında zayıfladığını kesin bir biçimde kanıtlamaktadır. Buradan çıkan sonuç çok nettir: Eğer bir yığın *varsa* bu yığın, kütleçekimin beşinci boyutun, *dışarı-içeri* boyutunun içine yayılmasını bir şekilde engelleyecek şekilde bükülmüş olmalıdır.

Dışarı-İçeri Büklümlü müdür?

BT

Yığının dışarı-içeri boyutu sımsıkı bir rulo şeklinde *büklümlü* olsaydı, kütleçekim yığının içerisinde yayılamaz ve ters kare yasası yeniden işlerlik kazanırdı.



Şekil 23.3: Dışarı-içeri boyutu (sarı) büklümlü olursa, mavi çemberin dışında bir parçacığın kütleçekim kuvvet çizgileri (kırmızı) bizim zarımıza paralel olur.

Şekil 23.3 bu durumu mavi diskin merkezinde yer alan çok küçük bir parçacığın kütleçekimi için resmediyor. Bu resimde iki uzay boyutu gösterilmemiş, bu yüzden bizim zarımızın boyutlarından sadece birini (kuzey-güney) ve yığının dışarı-içeri boyutunu görüyoruz. Parçacığın yakınında, mavi diskin içerisinde kuvvet çizgileri hem dışarı-içeri hem de kuzey-güney boyutları içerisinde yayılıyor, dolayısıyla (gösterilmeyen boyutlar da eklendiğinde) kütleçekimin yeğinliği bir ters küp yasasına uyuyor. Fakat mavi diskin dışında büklüm kuvvet çizgilerinin bizim zarımıza paralel olmasına da neden oluyor. Artık dışarı-içeri boyutuna yayılmıyorlar ve Newton'ın ters kare yasası yeniden geçerli oluyor.

Kuantum kütleçekimini anlamaya uğraşan fizikçiler bunun muhtemelen bir ya da ikisi dışında bütün fazladan boyutların kaderi olduğunu düşünüyorlar: Mikroskobik ölçekte büklümlüdürler ve kütleçekimin aşırı hızlı biçimde yayılmasını önlerler. *Yıldızlararası*'nda Christopher Nolan bu büklümlü boyutları göz ardı ediyor ve sadece büklümlü olmayan bir yığın boyutuna odaklanıyor. Bu onun dışarı-içeri, beşinci boyutu oluyor.

Dışarı-içeri neden büklümlü olmamak zorunda? Chris için cevap basit: Büklümlü bir yığın çok küçük bir hacme sahiptir; ilgi çekici bir bilimkurgunun geçtiği yer ondan çok daha büyük bir hacme sahip olmak zorundadır. Filmde yaptığı gibi Cooper'ın teserakta girerek yığının içinde yolculuk edebilmesi için teseraktın büklümlü bir boyutun sağlayabileceğinden çok daha büyük bir hacme gereksinimi vardır.

Dışarı-İçeri: Karşı-deSitter Bükülmesi

BT

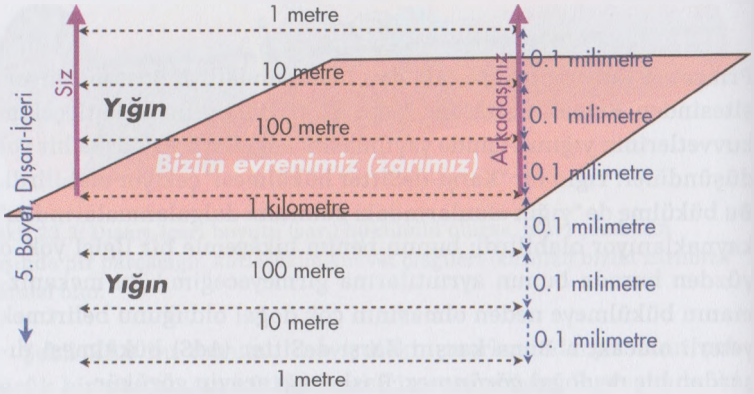
Princeton Üniversitesi ve MIT'den Lisa Randall ve Boston Üniversitesinden Raman Sundrum (Şekil 23.4) 1999 yılında kütleçekim kuvvetlerinin yığının içinde yayılmasını engelleyecek başka bir yol düşündüler: Yığın bir "Karşı-deSitter bükülmesi" çekiyor olabilirdi. Bu bükülme de "yığın alanlarındaki kuantum dalgalanmalarından" kaynaklanıyor olabilirdi; bunun benim hikâyemle bir ilgisi yok, o yüzden burada bunun ayrıntılarına girmeyeceğim.[1] Bu mekanizmanın bükülmeye neden olmasının çok doğal olduğunu belirtmek yeterli olacaktır. Buna karşın Karşı-deSitter (AdS) bükülmesi dışardan hiç de doğal *görünmez*. Basbayağı acayip gözükür.

Bir mikrop olduğunuzu ve mikroskobik bir teseraktın (29. Bölüm) bir yüzünde yaşadığınızı varsayın. Teseraktınızın içinde bizim zarımızın dışına doğru, dik yönde yolculuk ediyorsunuz (Şekil 23.5'te yukarı doğru). Yine bizim zarımızdan dışarı doğru dik yönde yolculuk eden bir başka mikrobik arkadaşınız daha var diyelim. Siz ve arkadaşınız bizim zarımızdan ayrıldığınızda birbirinizden 1 kilometre uzaktasınız. İkiniz de tam olarak dış yönde, bizim zarımıza dik yolculuk etmenize rağmen aranızdaki mesafe AdS bükülmesi yüzünden dik biçimde büyük bir hızla düşer. Bir milimetrenin onda biri (insan saçının kalınlığı) yolculuk ettiğinizde aranızdaki mesafe on kat azalmıştır: 1 kilometreden 100 metreye düşmüştür. Bir sonraki 0,1 milimetre aranızdaki mesafeyi on kat daha düşürerek 10 metre yapar, sonraki 0,1 milimetre 1 metreye indirir ve bu böyle devam sürer.



Şekil 23.4: Lisa Randall (1962- , sağda) ve Raman Sundrum (1964- , solda).

[1] Kuantum dalgalanmalarını 26. Bölümde, yığın alanlarını 25. Bölümde ele alıyorum.



Şekil 23.5: Yığının AdS bükülmesi

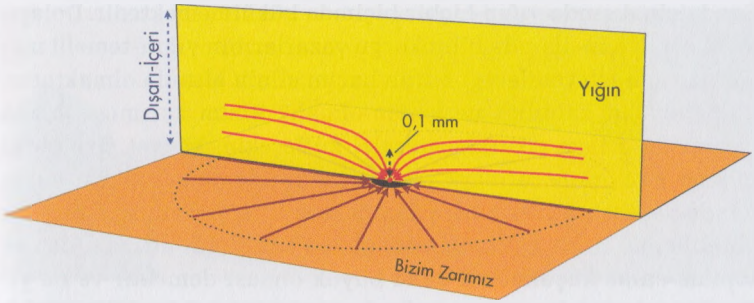
Bizim zarımıza paralel mesafelerin bu azalışını kafada canlandırmak zordur. Açıkçası ben Şekil 23.5'tekinden daha iyi bir anlatım yolu bilmiyorum. Fakat hayret verici sonuçlara sahip olduğu kesin.

Bir kere "fizik yasalarında hiyerarşi problemi" adı verilen bir gizemi açıklama potansiyeli taşıyor; fakat bu bizim kitabımızın sınırları içerisinde değil.[2] Konumuza dönersek bu hızlı küçülme nedeniyle kütleçekim kuvvet çizgilerinin içerisinde yayılabileceği (bizim zarımızın üstünde ya da altında) çok küçük bir hacim vardır (Şekil 23.6). Bizim zarımıza 0,1 milimetreden daha az yakınlıkta kuvvet çizgileri enine üç boyutun içine rahatlıkla yayılır, böylece kütleçekim ters küp yasasına uyar. 0,1 milimetreden daha uzakta kuvvet çizgileri zarımıza paralel bükülür ve böylelikle sadece iki enine boyuta yayılır, bu yüzden de kütleçekim gözlemlenen ters kare yasasına uyar.[3]

---

[2] Ayrıntılar için *bkz.* Lisa Randall, *Warped Passages* (HarperCollins, 2006).

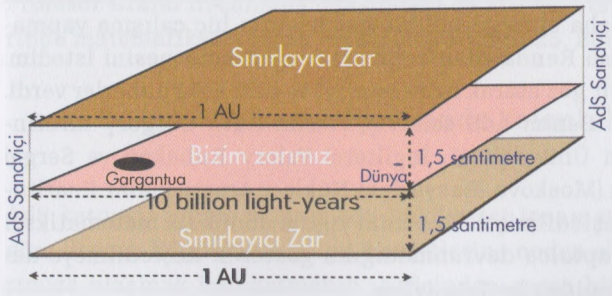
[3] Ters kare yasasının başladığı sihirli uzaklık neden örneğin 1 kilometre ya da pikometre değil de 0,1 milimetredir? Ben aslında 0,1 milimetreyi öylesine seçtim. Deneyler kütleçekimin yaklaşık olarak 0,1 milimetrenin altında ters kare yasasına uyduğunu kanıtladı, dolayısıyla bu sihirli uzaklığın üst sınırıdır. Bundan çok daha küçük bir seçim de yapılabilirdi.



Şekil 23.6: Yığın AdS bükülmesi yaşıyorsa, bu durumda kütleçekim kuvvet çizgileri bizim zarımıza paralel bükülür, çünkü zardan uzakta içinde yayılmaya uygun çok küçük bir hacim vardır. *[Şekilde Lisa Randall'ın Warped Passages (Randall 2006) kitabında yer alan bir çizim model alınmıştır.]*

AdS Sandviçi: Yığının İçerisinde Bol Yer Olması

Ne yazık ki, dışa doğru hareket ettikçe zarımıza paralel mesafelerin dikine küçülmesi, yığının bizim zarımızın üstünde ve altındaki hacmini hem Cooper ve teseraktı için hem de yığının içerisindeki herhangi bir insan faaliyeti için aşırı küçük hale getirmektedir. Bu sorunun varlığını 2006 yılında henüz *Yıldızlararası* fikri yeni doğmuşken fark ettim ve çabucak filmdeki bilimsel yorumumda buna bir çözüm düşündüm: AdS bükülmesi bizim zarımızın etrafındaki ince bir katmana, bir "sandviçe" hapsolacaktı. Bunun için bizimkilerin yanına iki başka zar, sınırlayıcı zar eklenecekti (Şekil 23.7). Bu zarların arasındaki sandviçte yığın AdS bükülmesi yaşar.



Şekil 23.7: Sınırlayıcı iki zarın arasındaki AdS sandviçi. Zarlar arasındaki AdS katmanı hafif griyle gösterilmiştir.

Sandviçin dışında yığın hiçbir biçimde bükülmemektedir. Dolayısıyla sandviçin dışında bilimkurgu yazarlarının yığın-temelli maceralar için isteyebileceği bütün hacim elinin altında olmaktadır.

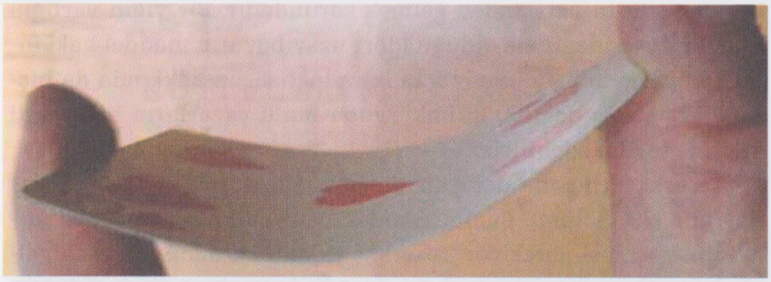
Sandviçin kalınlığı ne kadar olmalı? Bizim zarımıza (bizim zarımızda ortaya çıkarak) paralel kütleçekim kuvvet çizgilerini bükmeye ve orada tutmaya yetecek kalınlıkta olmalı ki, zarımızın içinde yaşayan bizler kütleçekimin ters kare yasasına uyduğunu görebilelim. Daha kalın olamaz, çünkü kalınlığın artması demek toplam enine küçülmenin daha büyük olması demektir ve bu yığın konusunu işleyen maceralarda sorunlara yol açabilir. (Bizim bütün evrenimizin AdS katmanının dışından görünümü itibarıyla bir toplu iğne başı kadar küçüldüğünü düşünsenize!) Gerekli olan kalınlık 3 santimetredir, böylece bizim zarımızdan sınırlayıcı bir zara yolculuk ettiğinizde bizim zarımıza paralel uzaklıklar onun on beş üssü kadar küçülür: Bu bin trilyon kat küçülme demektir.

Yıldızlararası için yaptığım yorumda Gargantua gözlemlenebilir evrenin çok uzak bir köşesindedir: Dünyadan kabaca 10 milyar ışık yılı uzaktadır. Cooper teseraktın içinde Gargantua'nın göbeğinden yığının içerisine AdS katmanından geçerek yükselir. Burada dünyaya olan uzaklık 10 milyar ışık yılı bölü bin trilyondur ve bu güneş ile dünya arasındaki uzaklıkla hemen hemen aynı, yani bir "astronomik birim"dir (1 AU; Şekil 23.7). Ardından Cooper bu 1 AU'luk uzaklığı yığının içerisinde bizim zarımıza paralel olarak geçerek dünyaya ulaşır ve Murph'ü ziyaret eder; *bkz.* Şekil 29.4.

TEHLİKE: Sandviç Kararsızdır

AdS katmanının ve sınırlayıcı zarlarının matematiksel açıklamasını hesaplamak için 2006 yılında Einstein'ın görelilik yasalarını kullandım. Daha önce görelilikle beş boyutta hiç çalışma yapmadığım için Lisa Randall'dan analizimi değerlendirmesini istedim. Lisa hızlıca bir göz atarak bana bazı iyi ve bazı kötü haberler verdi.

İyi haber: Benim AdS sandviçi fikrim Ruth Gregory tarafından (Durham Üniversitesi, İngiltere) Valery Rubakov ve Sergei Sibiryakov'la (Moskova, Rusya'daki Nükleer Araştırmalar Enstitüsü) birlikte keşfedilmişti. Bu benim yığına dönük ilk matematiksel girişimimde aptalca davranmadığımı gösterdi. Keşfedilmeye değer bir şeyi yeniden keşfetmiştim.



Şekil 23.8: Bir iskambil kâğıdı iki ucundan bükülüyor ve ardından kırılıyor.

Kötü haber: Edward Witten (Princeton) ve diğerleri AdS sandviçinin *kararsız* olduğunu göstermişti! Sınırlayıcı zarlar başparmağınızla başka bir parmağınız arasında uçlarından sıkıştırdığınız bir iskambil kâğıdına benzer şekilde baskı altındadır (Şekil 23.8). İskambil kâğıdı bükülür ve daha fazla bastırırsanız şekli bozulur. Benzer biçimde sınırlayıcı zarlar bükülecek ve zarımızın (evrenimizin) içerisine çarparak onu tahrip edecektir. Bütün evren imha olacaktır! Bu olabilecek en kötü haberdir!!

Fakat evrenimiz eğer gerçekten bir AdS sandviçi içerisinde yaşıyorsa (ki ben yaşadığından çok şüpheliyim) onu kurtarmanın birkaç yolunu, fizikçilerin diliyle ifade edersek "sınırlayıcı zarlara istikrar kazandırmanın" birkaç yolunu akıl edebiliyordum.

Benim *Yıldızlararası*'ndaki yorumumda Profesör Brand tıpkı benim yaptığım gibi Einstein'ın görelilik denklemleriyle çalışarak AdS sandviçini yeniden keşfediyor. Bu noktada üzerinde çalıştığı tahtanın Şekil 3.6'daki fotoğrafına bakabilirsiniz. Profesörün kütleçekim sapmalarını anlama ve kontrol etme çabasıyla sınırlayıcı zarlar stabilize ediliyor sonra birbirine dolanıyor. Filmde bu çaba Profesör Brand'in çalışma odasındaki on altı yazı tahtasının üzerinde matematiksel olarak görülebiliyor; *bkz.* 25. Bölüm.

AdS Katmanı İçerisinde Yolculuk



AdS katmanı içinde uzayın AdS bükülmesi insan standartlarına göre devasa büyüklükte gelgit kuvvetlerine neden olur. Bizim zarımıza ulaşmak için katmanın içerisinden geçen bir yığın varlık

bu kuvvetlerin üstesinden gelmek zorundadır. Bir yığın varlığın oluştuğu maddenin ne olduğu (dört uzay boyutlu madde) hakkında hiçbir şey bilmediğimiz için buradaki sorun hakkında da hiçbir fikre sahip değiliz. Bilimkurguda bunu yazarların maharetli ellerine teslim edebiliriz.

Teseraktın içinde dolaşan Cooper için durum o kadar basit değildir (29. Bölüm). Benim filmdeki yorumumda onun AdS katmanını geçmesi gerekiyor. Teserakt ya onu katmanın devasa gelgit kuvvetlerinden korumak ya da AdS katmanını onun yolunun üzerinden kaldırmak zorunda. Aksi halde Cooper spagetti haline gelir.

Kütleçekimini hapsederek AdS katmanı onun yeğinliğini ayarlar. *Yıldızlararası*'nda kütleçekimin yeğinliğinin, muhtemelen AdS katmanı içindeki dalgalanmalar nedeniyle dalgalandığını görüyoruz. Bu dalgalanmalar (kütleçekim sapmaları) *Yıldızlararası*'nda çok önemli bir rol oynuyor. Şimdi bunu ele alacağız.

24

KÜTLEÇEKİM SAPMALARI

Kütleçekim sapması kütleçekim hakkında bizim evren anlayışımıza ya da evreni kontrol eden fiziksel yasalar konusundaki bilgilerimize uymayan bir şeydir; *Yıldızlararası*'nda Murph'ün nedenini bir hayalete bağladığı kitapların düşmesi buna bir örnektir.

Fizikçiler, 1850'den bugüne kütleçekim sapmalarını araştırmak ve tespit edilen birkaç sapmayı anlamak için büyük çaba harcadılar. Neden? Çünkü gerçek bir aykırılık bir bilimsel devrim yaratmaya, doğru (D) olduğunu düşündüğümüz şeylerde büyük bir değişiklik yaratmaya adaydı. 1850 yılından bu yana da bunu üç kez yaşadık.

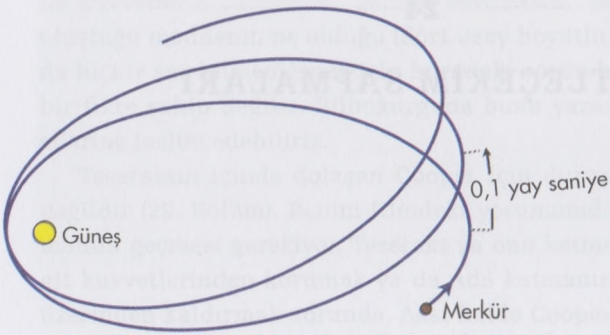
Yıldızlararası'nda Profesör Brand'in kütleçekim sapmalarını anlama mücadelesi bu önceki devrimlerin ruhuyla benzerlik göstermektedir; bu yüzden ilk olarak kısaca bunları aktaralım izninizle.

Merkür'ün Yörünge Sapması

(D)

Newton'ın kütleçekimle ilgili ters kare yasası (2. ve 23. Bölüm) güneşin etrafındaki gezegenlerin yörüngelerinin elips şeklinde olmasını zorunlu kılar. Her gezegen diğer gezegenlerden küçük çekişler hisseder ve bu çekişler gezegenin elipsinin yavaş yavaş yönlenme değiştirmesine, diğer bir ifadeyle kademeli olarak *devinmesine* neden olur.

1859 yılında Observatoire de Paris'te (Fransa) gökbilimci Urbain Le Verrier Merkür gezegeninin yörüngesinde bir aykırılık keşfettiğini duyurdu. Merkür'ün yörüngesinde diğer gezegenlerin neden olduğu toplam devinmeyi hesapladığında sonuç yanlış çıkıyordu. Merkür'ün yörüngesini her tamamlayışında ölçülen devinim, gezegenlerin yaratabileceğinden yaklaşık 0,1 yay saniye daha fazlaydı (Şekil 24.1).



Şekil 24.1: Merkür'ün yörüngesindeki aykırı devinim. Bu resimde yörüngenin eliptikliğini (uzatılmış şeklini) ve deviniminin büyüklüğünü olduğundan büyük gösteriyorum.

0,1 yay saniye çok küçük bir açıdır, bir çemberin sadece bir milyonda onu kadardır; doğru. Ama Newton'ın ters kare yasası hiçbir aykırılığın, hiçbir sapmanın vs olamayacağı konusunda ısrarcıdır.

Le Verrier bu aykırılığın güneşe Merkür'den daha yakın, henüz keşfedilmemiş bir gezegenin kütleçekim kuvvetinden kaynaklandığına inandı ve bu gezegene "Vulcan" adını verdi.

Gökbilimciler boş yere Vulcan'ı aradılar. Bulamadılar, bulamadıkları gibi aykırılığın herhangi bir başka açıklamasına da ulaşamadılar. Sonuç 1890 yılına gelindiğinde açık görünüyordu: Newton'ın ters kare yasası çok az da olsa yanlış olsa gerekti.

Hangi şekilde yanlış? Devrimci bir şekilde yanlış: Einstein'ın yirmi beş yıl sonra keşfettiği şekilde yanlış. Zaman ve uzayın bükülmesinin güneşe bahşettiği kütleçekim kuvveti Newton'ın ters kare yasasına uyar ama sadece yaklaşık olarak. Kesin ve tam olarak değil.

Kendi görelilik yasalarının gözlemlenen aykırılığı açıkladığını fark eden Einstein kalp çarpıntısı geçirecek kadar heyecanlandı ve coşkuyla doldu: "Birkaç gün boyunca sevinçli bir heyecan içerisinde kendimden geçmiş haldeydim."

Bugün ölçülen aykırı devinim ile Einstein yasalarının öngörüleri binde bir (aykırı deviniminin binde biri) oranında uyuşmaktadır. Gözlemlerle bu duyarlılıkta bir örtüşme Einstein açısından büyük bir zaferdir!

Galaksilerin Birbirleri Etrafındaki Yörüngelerindeki Sapmalar

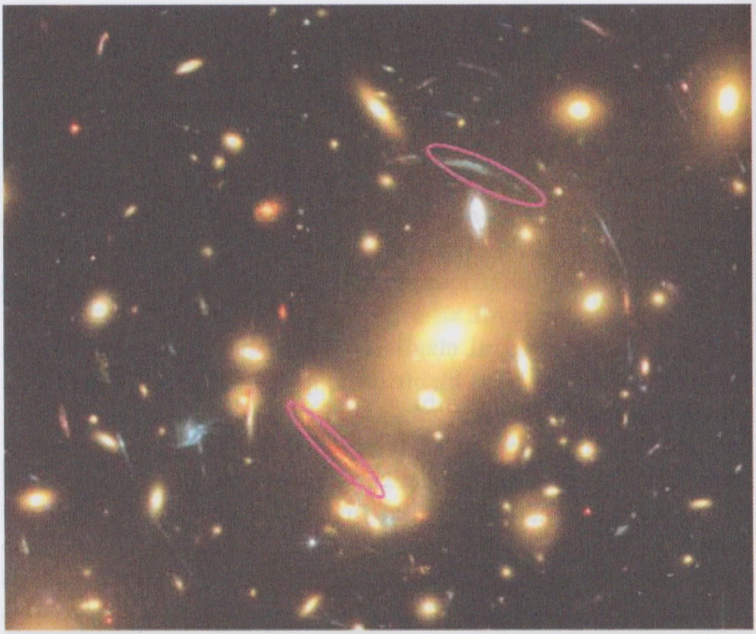
Ⓓ

Caltech astrofizikçilerinden Fritz Zwicky 1933 yılında galaksilerin birbirleri etrafındaki yörüngelerinde çok büyük bir aykırılık keşfettiğini açıkladı. Galaksiler dünyadan 300 milyon ışık yılı uzakta yaklaşık bin galaksiden oluşan Berenices'in Saçı [Coma Berenices] Takımyıldızı içerisindeki Saç Kümesi [Coma Cluster] (Şekil 24.2) içerisindeydi.

Galaksilerin spektral çizgilerinin Doppler kaymasından yola çıkarak Zwicky bunların birbirlerine göreli olarak ne kadar hızlı hareket ettiklerini tahmin edebiliyordu. Her bir galaksinin parlaklığından da galaksinin kütlesini ve dolayısıyla diğer galaksiler üzerinde uyguladığı kütleçekim kuvvetini hesaplayabiliyordu. Galaksilerin hareketleri o kadar hızlıydı ki kütleçekim çekmelerinin galaksi kümesini bir arada tutma olanağı hiçbir biçimde yoktu. Evren ve kütleçekim konusunda tüm bildiklerimiz galaksi



Şekil 24.2: Coma galaksi kümesinin büyük bir teleskoptan elde edilen görüntüsü.



Şekil 24.3: Abell 2218 galaksi kümesi içindeki kara madde daha uzak galaksileri kütleçekimsel olarak mercekler. Merceklenen galaksilerin (benim eflatun rengiyle gösterdiğim) görüntüleri yay şeklindedir ve 8. Bölümde Gargantua'nın kütleçekim merceklemesinde görülen yay yapılara benzemektedir.

kümesinin dağılması ve bir süre sonra da tamamen ortadan kalkması gerektiğini gösteriyordu. Bu durumda galaksi kümesi tüm bu galaksilerin rastgele hareketleriyle oluşmuş olmalıydı ve diğer astronomik olgularla karşılaştırıldığında göz açıp kapayıncaya kadar geçecek bir süre içerisinde dağılmak zorundaydı.

Varılan bu sonuç Zwicky'ye göre kabul edilebilir değildi. Doğru bildiklerimizde bir yanlışlık vardı. Zwicky bir bilimsel tahmin yaptı: Saç Kümesi, kütleçekimi tüm galaksi kümesini bir arada tutacak kadar yeğin bir çeşit "kara maddeyle" dolu olmalıydı.

Aslında gökbilimcilerin ve fizikçilerin keşfettiğini düşündüğü birçok aykırılık, gözlemlerde ilerleme sağlandığında ortadan kalkar. Bunda öyle olmadı. Hatta daha da büyüdü. 1970'li yıllara geldiğimizde kara madde denen şeyin çoğu galaksi kümesinin, hatta tekil galaksilerin içerisinde yer aldığı anlaşılmıştı. 2000'ler-

de nasıl Gargantua yıldızların ışığını kütleçekimsel olarak mercekliyorsa (8. Bölüm) aynı şekilde bu kara maddenin daha uzak galaksilerden gelen ışığı kütleçekimsel olarak merceklediği (Şekil 24.3) anlaşıldı. Bugün bu mercekleme evrenimizdeki kara maddenin haritalandırılması için kullanılıyor.

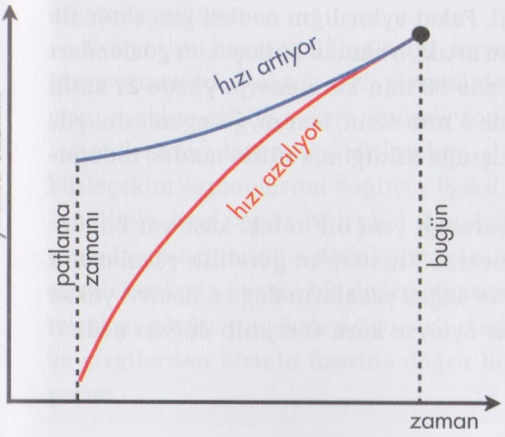
Ve yine bugün fizikçiler kara maddenin gerçekten devrimci bir şey olduğundan, daha önce hiç görülmemiş türden temel parçacıklardan oluştuğundan ve fakat bunun kuantum fizik yasalarına ilişkin mevcut en ileri kavrayışımızla öngörülebilen bir parçacık türü olduğundan epey bir eminler. Fizikçiler kutsal kâseyi bulma görevine kalkışmış durumdalar: Bugün dünyanın içinden hiç fark edilmeden geçip giden bu kara madde parçacıklarını saptama ve özelliklerini ölçmenin peşinde koşuyorlar.

Evrenin Genişlemesindeki Aykırı Hızlanma

Ⓓ

İki araştırma grubu birbirinden bağımsız olarak 1998 yılında evrenin genişlemesindeki son derece şaşırtıcı bir aykırılığı keşfetti. Bu keşiflerinden dolayı grupların liderleri (Berkeley'deki California Üniversitesinden Saul Perlmutter ve Adam Reiss ile Avustralya Ulusal Üniversitesinden Brian Schmidt) 2011 Nobel Fizik Ödülünü kazandılar.

İki grup da süpernova patlamalarını gözlemliyordu: Bunlar büyük bir yıldız nükleer yakıtını tüketerek bir nötron yıldızı oluş-



Şekil 24.4: Patlama anında (gördüğümüz ışığın yayıldığı anda) yıldıza uzaklık iki varsayımla gösteriliyor: Evrenin genişlemesinin hızı artıyordu (kırmızı) ya da azalıyordu (mavi). Patlama beklenenden daha sönüktü, dolayısıyla daha uzaktaydı. Evren hız kazanıyor olmak zorunda.

turmak üzere kendi içine doğru patladığında ve bu içe patlama enerjisi yıldızın dış katmanlarını uzaklara uçurduğunda tetiklenen patlamalardır. Araştırmacılar uzak süpernovaların beklenenden daha sönük ve bu yüzden beklenenden daha uzak olduğunu keşfettiler. O kadar uzaktaydılar ki evrenin genişlemesi geçmişte bugün olduğundan daha yavaş olmak zorundaydı. Genişlemenin hızı artıyordu. *Bkz.* Şekil 24.4.

Oysa kütleçekim ve evren hakkında bildiklerimiz bize evrende her şeyin (yıldızlar, galaksiler, galaksi kümeleri, kara madde vs) kütleçekimsel olarak *birbirlerini çekmek* zorunda olduklarını kesin bir biçimde söylüyordu. Bu çekme nedeniyle de evrenin genişlemesini *yavaşlatmaları* gerekirdi. Evrenin genişlemesinin zaman geçtikçe hızlanması değil yavaşlaması gerekiyordu.

Bu nedenle kişisel olarak ben iddia edilen hızlanmaya inanmadım, gökbilimci ve fizikçi meslektaşlarımdan birçoğu da inanmadı. Tamamen farklı yöntemlerle yapılan gözlemler bunu doğrulayana kadar da inanmadık. Ardından pes ettik.

Peki, o zaman ne oluyor? İki olasılık var: Einstein'ın kütleçekim görelilik yasalarında bir şeyler yanlış. Veya sıradan madde ve kara maddeye ek olarak evreni dolduran bir başka şey daha var. Kütleçekimsel olarak *geriye iten* bir şey.

Fizikçilerin çoğu Einstein'ın görelilik yasalarını sever ve onlardan vazgeçmeyi hiç istemez, bu yüzden bir itkinin varlığına sıcak bakmaktadır. İten bu varsayımsal maddeye "kara enerji" adı verilmiştir.

Son karar verilmiş değil. Fakat aykırılığın nedeni gerçekten de kara enerjiyse (bu her neyse artık), o zaman kütleçekim gözlemleri bize evrenin kütlesinin yüzde 68'inin kara enerji, yüzde 27'sinin kara madde ve sadece yüzde 5'inin sizin, benim, gezegenlerin, yıldızların ve galaksilerin oluştuğu bildiğimiz türde madde olduğunu söylüyor.

Dolayısıyla fizikçilerin aradığı yeni bir kutsal kâse var bugün: Evrenin hızlanan genişlemesine Einstein'ın görelilik yasalarının bir ihlalinin mi (eğer öyleyse doğru yasaların doğası nedir?) yoksa itici kara enerjinin mi (eğer öyleyse kara enerjinin doğası nedir?) neden olduğunu anlamak.

Yıldızlararası'ndaki Kütleçekim Sapmaları

Aktardığım sapma ve aykırılıkların aksine *Yıldızlararası*'ndaki kütleçekim sapmaları dünya üzerinde görülüyor.

Fizikçiler, 1600'lerin sonunda bizzat Isaac Newton'dan itibaren dünya üzerinde gerçekleşmiş böylesi aykırılıkları bulmak için çok uğraş sarf ettiler. Bu arayışların sonunda çok sayıda aykırılık iddiası oldu, ama bütün iddialar daha dikkatli araştırmalar sonucunda boşa çıktı.

Yıldızlararası'ndaki sapmalar acayiplikleri, şiddetleri ve zaman geçtikçe değişme biçimleri yönünden hayret vericidir. Yirminci yüzyılda ya da yirmi birinci yüzyılın başında benzer şeyler gerçekleşmiş olsaydı fizikçiler bunları kesinlikle tespit eder ve büyük bir hevesle araştırırlardı. *Yıldızlararası* filminin geçtiği zamanda dünyadaki kütleçekim bir şekilde değişim geçirmiş durumda.

Hatta Romilly filmde Cooper'a şöyle diyor: "[Dünyadaki] kütleçekim sapmalarını elli yıl kadar önce saptamaya başladık" ve ayrıca hemen hemen aynı zamanda hepsinden daha önemli en büyük sapma saptanıyor: Daha önce orada yokken birden Satürn'ün yakınlarında bir solucandeliğinin ortaya çıkması.

Filmin açılış sahnelerinden birinde bir Ranger aracını indirmeye çalışırken bizzat Cooper da bir aykırılıkla karşılaşıyor. Romilly'ye bunu "durduk yere bir şey kontrollü uçuşumu bozdu" diyerek açıklıyor.

Cooper'ın hasat makinelerini mısır tarlalarında dolaşırken idare etmek için taktığı GPS sistemi de kontrolden çıkıyor ve bir grup makine çiftlik evinin önünde toplanıyor. Cooper bunu GPS sistemlerinin dayandığı kütleçekim düzeltmelerini altüst eden kütleçekim sapmalarına bağlıyor (Şekil 4.2).

Filmin başlarında Murph'ü donakalmış biçimde tozların yatak odasının zeminine doğal olmayan bir hızla düşüşünü ve ince çizgili barkoda benzer bir desen oluşturacak şekilde toplaşmasını izlerken görüyoruz. Sonra Cooper'ı çizgilere bakarken (Şekil 24.5) ve çizgilerden birinin üzerine doğru bir metal para atarken izliyoruz.



Şekil 24.5: Cooper Murph'ün yatak odasının zeminindeki toz örüntüsüne uzun uzun bakıyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

Yıldızlararası'na ilişkin yaptığım bilimsel yorumda Profesör Brand'in ekibinin sapmalar hakkında geniş bir veri hazinesi toplamış olduğunu tahmin ediyorum. Bir fizikçi olarak benim için, film yorumumda da Profesör Brand için en ilgi çekici veri *gelgitli kütleçekimde* ortaya çıkan yeni ve değişen desenlerdir.

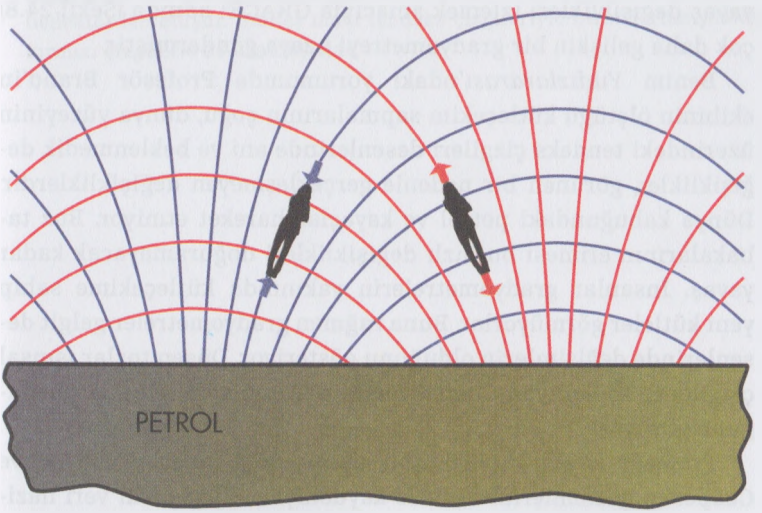
Gelgitli kütleçekimle ilk kez 4. Bölümde karşılaştık: Bir kara deliğin yarattığı gelgitli kütleçekim ve ayın ve güneşin dünya üzerinde yarattığı gelgitli kütleçekim. 17. Bölümde Gargantua'nın gelgitli kütleçekimini Miller'in gezegenine etki ederken gördük; dev "Miller sarsıntılarına," tsunamilere ve gelgit oyuklarına neden oluyordu. 16. Bölümde gelgitli kütleçekimin bir kütleçekim dalgasının içindeki küçük gerilme ve sıkışmalarını gördük.

Gelgitli kütleçekim sadece kara delikler, güneş, ay ve kütleçekim dalgaları tarafından değil, aslında kütleçekim sahibi bütün cisimler tarafından üretilir. Örneğin dünya kabuğunun petrol içe-

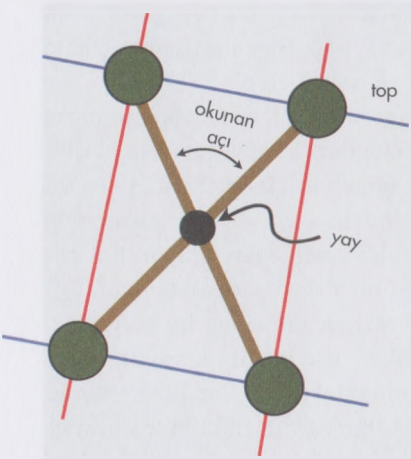
ren bölgeleri yalnız taş içeren bölgelerinden daha az yoğundur, bu yüzden kütleçekim çekmeleri daha zayıftır. Bu gelgitli kütleçekim kuvvetlerinde alışılmadık bir desene neden olur.

Şekil 24.6'da bu gelgit kuvveti desenini göstermek için tendeks çizgilerini kullanıyorum (tendeks çizgileri konusunda *bkz.* 4. Bölüm). Sıkıştırıcı tendeks çizgileri (maviyle gösteriliyor) petrollü bölgeden dışarı uzanıyor, geren tendeks çizgileri ise (kırmızıyla gösteriliyor) daha yoğun olan petrolsüz bölgeden çıkıyor. Her zamanki gibi iki tendeks çizgisi ailesi birbirlerine dik uzanıyor.

Kütleçekim gradyometresi adı verilen bir cihaz bu gelgit desenlerini ölçebilmektedir (Şekil 24.7). Bir burulma yayına bağlanmış iki çapraz som çubuktan oluşmaktadır. Her bir çubuğun sonunda kütleçekimini hisseden toplar vardır. Çubuklar normalde birbirine diktir ama şekilde mavi tendeks çizgileri üstteki iki topu birbirine, alttaki iki topu da birbirine doğru sıkıştırmaktadır; aynı anda kırmızı tendeks çizgileri ise sağdaki top çiftini birbirinden uzağa, keza soldaki çifti de yine birbirinden uzağa germektedir. Sonuç olarak yay gelgit kuvvetlerine karşı bir denge



Şekil 24.6: Dünya kabuğunun bir kesiti üzerindeki tendeks çizgileri. Kırmızı çizgiler kendileriyle birlikte bir gelgitli germe üretiyor. Mavi çizgilerse gelgitli sıkıştırma doğuruyor.



Şekil 24.7: Robert Forward'ın 1970 yılında Hughes Araştırma Laboratuarlarında tasarlayıp oluşturduğu basit bir kütleçekim gradyometresi örneği.

oluşturana dek çubuklar arasındaki açı azalır. Bu gradyometrenin gösterdiği değerdir, onun "okuduğu açıdır."

Bu gradyometre Şekil 24.6'daki gelgit deseni içerisine doğrudan taşınırsa okuma açısı petrol yatağının olduğu bölgenin üzerinde açılır, petrolsüz bölgedeyse tekrar kapanır. Yerbilimciler petrol ve maden yataklarını ararken buna benzer ancak daha gelişmiş gradyometreleri kullanırlar.

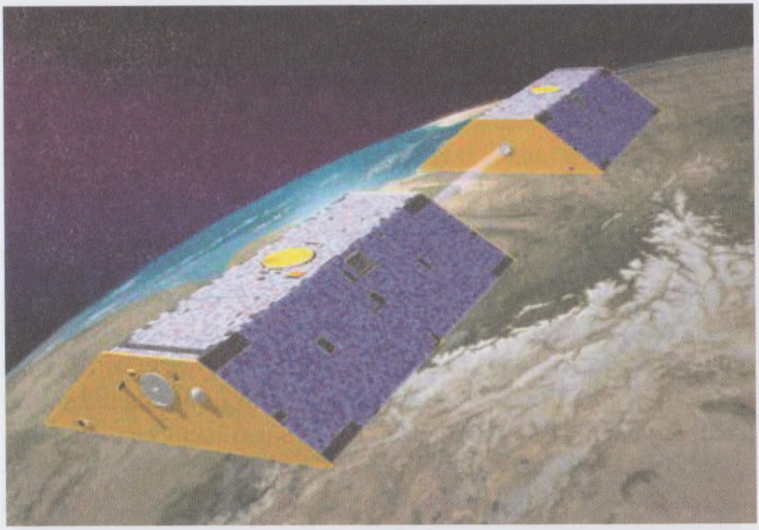
NASA dünyanın üzerindeki gelgit alanlarını haritalandırmak ve örneğin buz tabakaları erimesinin ortaya çıkardığı gelgitli kütleçekimindeki yavaş değişiklikleri izlemek amacıyla GRACE[1] adında (Şekil 24.8) çok daha gelişkin bir gradyometreyi uzaya göndermiştir.

Benim *Yıldızlararası*'ndaki yorumumda Profesör Brand'in ekibinin ölçtüğü kütleçekim sapmalarının çoğu, dünya yüzeyinin üzerindeki tendeks çizgileri desenlerinde ani ve beklenmedik değişiklikler, görünen bir nedenle gerçekleşmeyen değişikliklerdir. Dünya kabuğundaki petrol ve kayaçlar hareket etmiyor. Buz tabakalarının erimesi bu hızlı değişiklikleri doğuramayacak kadar yavaş. İnsanlar gradyometrelerin yakınında kütleçekime sahip yeni kütleler görmüyorlar. Buna rağmen gradyometreler gelgit desenlerinde değişimlerin olduğunu gösteriyor. Düşen tozlar ışınsal çizgilerde toplanıyor. Cooper metal paranın zeminde dik durduğunu görüyor.

Profesör Brand'in ekibi bu desen değişimlerini izliyor ve Cooper'in gözlemlerini hevesle kaydediyor. Ellerindeki veri hazi-

[1] Kütleçekim Ölçümü ve İklim Deneyi [*The Gravity Recovery and Climate Experiment*] kapsamında ABD/Almanya ortak uzay görevi 2002 yılının Mayıs ayında başlatıldı ve 2014'te veri toplamaya halen devam ediyor.

nesi Profesörün kütleçekimini anlama araştırmasına hizmet ediyor ve bu tüm bu macera Profesörün denkleminde merkezileşiyor.



Şekil 24.8: GRACE uydusu, birbirlerinin mikrodalga izlerini takip eden iki dedektörden oluşur. Bunlar mavi tendeks çizgileriyle birbirlerine yaklaşır, kırmızı çizgilerle de uzaklaşırlar.

25

PROFESÖRÜN DENKLEMİ

Yıldızlararası'nda kütleçekim sapmalarının Profesör Brand'i heyecanlandırmasının iki nedeni var. Bunlara neyin sebep olduğunu bulursa bu kütleçekim konusundaki kavrayışımızda bir devrimi, Einstein'ın görelilik yasaları kadar büyük bir devrimi tetikleyebilir. Daha önemlisi de şu: Eğer bu sapmaların nasıl kontrol edilebileceğini bulursa bu NASA'nın can çekişen dünyadan büyük kolonileri havalandırabilmesini ve onları evrende başka bir yerdeki yeni bir eve doğru yollayabilmesini sağlayabilir.

Profesörün sapmaları anlaması ve amaç doğrultusunda kullanabilmesinin anahtarı, kara tahtasının üzerine yazdığı bir denklemdir (Şekil 25.7, ileride). Filmde o ve Murph bu denklemi çözmeye uğraşıyorlar.

Murph ile Profesörün Defterleri ve Kara Tahta

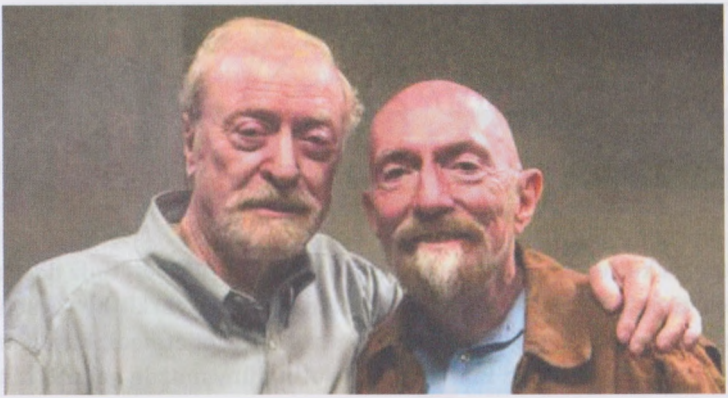
Caltech'ten etkileyici iki fizik öğrencisi çekimler başlamadan önce Profesörün denklemi üzerine hesaplamalarla dolu defterler hazırladılar. Elena Murchikova hiç yazılmamış yeni bir defteri yetişkin Murph'ün güzel yazısıyla yazılmış hesaplamalarla doldurdu. Keith Matthews yıpranmış eski bir defteri Profesör Brand'in Profesör ve benim gibi ihtiyar adamlarda sık görülen özensiz el yazısıyla kaydedilmiş hesaplamalarıyla doldurdu.

Filmde (Jessica Chastain'in canlandırdığı) yetişkin Murph, defterindeki matematik hesapları hakkında (Michael Caine'in canlandırdığı) Profesörle konuşuyor. Kuantum kütleçekim ve kozmolojisi alanında uzman olan Murchikova Chastain'e diyaloğu, defteri ve tahtaya yazacağı şeyler konusunda tavsiyede bulunmak

için setteydi. Çok başka dünyalardan gelen her ikisi de kızıl saçlı bu iki zeki ve güzel kadını bir arada görmek çok şaşırtıcıydı.

Bana gelirsek, ben de Christopher Nolan'ın ricasıyla Profesör Brand'in tahtasını çizimler ve matematik hesaplarla dolduran kişiydim; elbette buna Profesörün denklemi de dahildi (şu büyük denklem). Oynadığı Profesör rolü için beni bir çeşit asıl örnek gibi gördüğünü düşündüğüm Michael Caine'le (Şekil 25.1) konuşmaktan da büyük zevk aldım. Chris'in, usta bir zanaatkârın çektiği sahnelere tam istediği tarzda şekil verişini izlemek de büyük zevkti.

Profesörün ofisindeki çekimden haftalar öncesinde Chris ve ben büyük denklemin ne olması gerektiği konusunda kafa patlatıyorduk. (1. Bölümdeki Şekil 1.2'de Chris elinde tartıştığımız denklem üzerine yazılmış bir kâğıt tomarı tutuyor.) Şimdi ulaştığımız sonuç konusunda kendi uzun bilimsel yorumumu, filmin öyküsüne dönük bir dış değerlendirme olarak sizlerle paylaşıyorum.

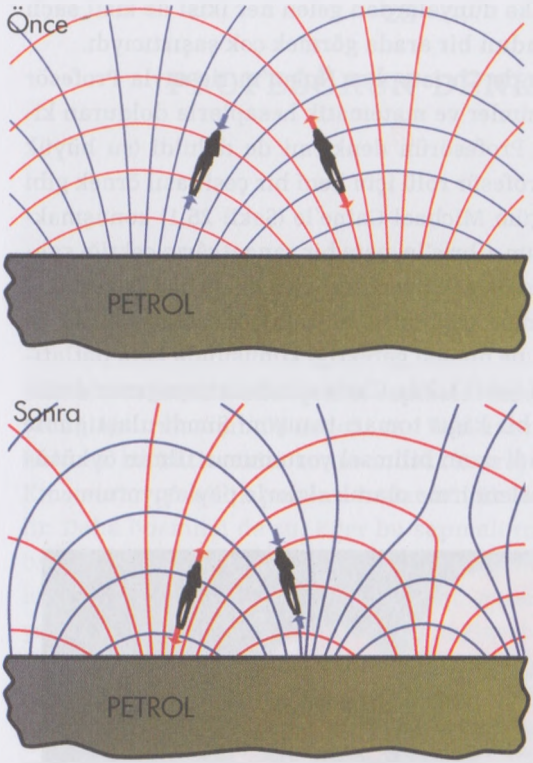


Şekil 25.1: Michael Caine (Profesör) ve ben Profesörün ofisindeki setteyiz.

Sapmaların Kaynağı-Beşinci Boyut

Benim tahmini değerlendirmeme göre Profesörün sapmaların beşinci boyutun ya da yığının kütleçekimi nedeniyle olduğuna inanması fazla uzun sürmedi. Niçin?

Gelgitli kütleçekimindeki ani değişiklikler bizim dört boyutlu evrenimizde görünen bir kaynağa sahip değildir. Benim değerlendirmemde örneğin Profesörün ekibi bir petrol yatağı üzerindeki



Şekil 25.2: Bir petrol yatağı üzerindeki gelgitli kütleçekimini ani bir değişiklik öncesi ve sonrasında gösteren tendeks çizgileri (4. Bölüm).

gelgitli kütleçekimin birkaç dakika içerisinde beklediğimiz desenden (Şekil 25.2'deki üst resim) radikal biçimde farklı bir desene (alt resim) dönüştüğünü görüyor. Petrol hareket etmedi. Kayaçlarda bir değişiklik yok. Bizim dört boyutlu dünyamızda gelgitli kütleçekim hariç hiçbir şey değişmedi.

Bu ani değişiklikler bir şeyden kaynaklanmak *zorunda*. Kaynak bizim evrenimizde, bizim zarımızın üstünde değilse, o halde olabileceği sadece bir yer var diye düşünüyor Profesör: Yığının içinde.

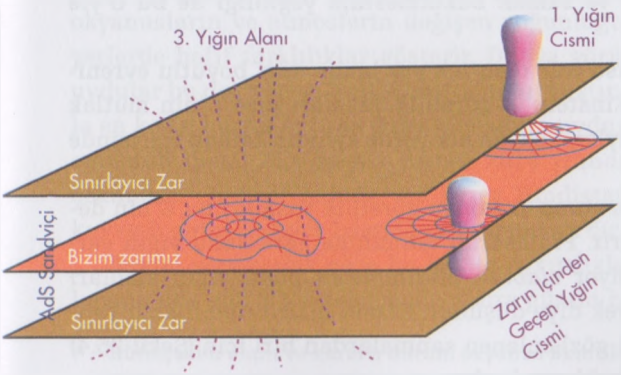
Benim değerlendirmeme göre Profesör yığının içinde bir şeyin bu sapmaları doğurmasının sadece üç yolu olduğunu düşünebilir ve ilk ikisini de hızla reddeder:

1. Yığının içindeki bir cisim (hatta belki bir canlı cisim, bir yığın varlık) bizim zarımızın yanına gelmiş ama içinden geç-

memiş olabilir (Şekil 25.3'te sağ üstte). Cismin kütleçekimi yığının bütün boyutlarının içine ulaşır, dolayısıyla bizim zarımızın içine de ulaşabilir. Fakat bizim zarımızı çevreleyen AdS katmanı (23. Bölüm) cismin gelgitli tendeks çizgilerini bizim zarımızın paraleline sürer ve bizim zarımıza sadece çok küçük bir kısmının ulaşmasına izin verir. Bu yüzden Profesör bu senaryoyu reddeder.

2. Bizim zarımızın içinden geçen bir yığın-cisim, yığın-cisim hareket ettikçe değişen bir gelgitli kütleçekim doğurabilir (Şekil 25.3'te sağ ortada). Fakat benim değerlendirmeme göre Profesörün ekibinin gözlemlediği değişen kütleçekim desenlerinin çoğu bu açıklamaya uymaz. Tendeks çizgileri yerelleşmiş bir cismin sahip olduklarından daha dağınık olma eğilimindedir. Bazı gelgit aykırılıkları yerelleşmiş cisimlerden olabilir ama çoğu başka bir şey olmak zorundadır.
3. Bizim zarımızdan geçen yığın alanları değişen gelgitli kütleçekime sebep olabilir (Şekil 25.3'ün sol tarafı). Benim değerlendirmeme göre Profesör sapmaların çoğunun en uygun açıklamasının bu olduğu sonucuna varacaktır.

Bir "yığın alanı" nedir? Fizikçiler *alan* sözcüğünü uzayda yayılan ve karşılaştığı şeyler üzerinde kuvvet uygulayan bir şeyi anlatmak için kullanır. Hatırlarsanız bizim evrenimizin, bizim zarımızın içerisinde var olan alanların birkaç örneğiyle karşılaşmıştık: 2. Bölümde manyetik alanlar (manyetik kuvvet çizgileri toplaşmaları), elektrik alanları (elektrik kuvvet çizgileri toplaş-



Şekil 25.3: Yığının gözlemlenen kütleçekim sapmalarına neden olmasının üç yolu. Kırmızı ve mavi eğriler bir yığın-cisim ya da yığın-alan tarafından üretilen gelgitli tendeks çizgileridir.

maları), kütleçekim alanları (kütleçekim kuvvet çizgileri toplaşmaları) ve 4. Bölümde gelgit alanları (geren ve sıkıştıran tendeks çizgileri toplaşmaları).

Bir yığın alanı, beş boyutlu bir yığının içinde yer alan bir kuvvet çizgileri toplaşmasıdır. Ne tür kuvvet çizgileri olduğunu Profesör de bilmiyor ama fikirler de yürütüyor; birazdan göreceğiz. Şekil 25.3 bizim zarımızın içinden geçen bir yığın alanını (mor kesikli çizgilerle) gösteriyor. Bu yığın alanı bizim zarımızın içinde gelgitli kütleçekimi (kırmızı ve mavi tendeks çizgileri) yaratıyor. Yığın alanı değiştikçe gelgitli kütleçekimi de değişiyor ve (Profesörün düşüncesine göre) gözlemlenen sapmaların çoğuna sebep oluyor.

Ancak benim senaryoma göre yığın alanlarının tek rolünün bu olmadığından da şüpheleniyor. Yığın alanları bizim zarımızın içinde yaşayan cisimlerin, örneğin bir taş ya da gezegenin ürettiği kütleçekiminin yeğinliğini de kontrol ediyor olabilir.

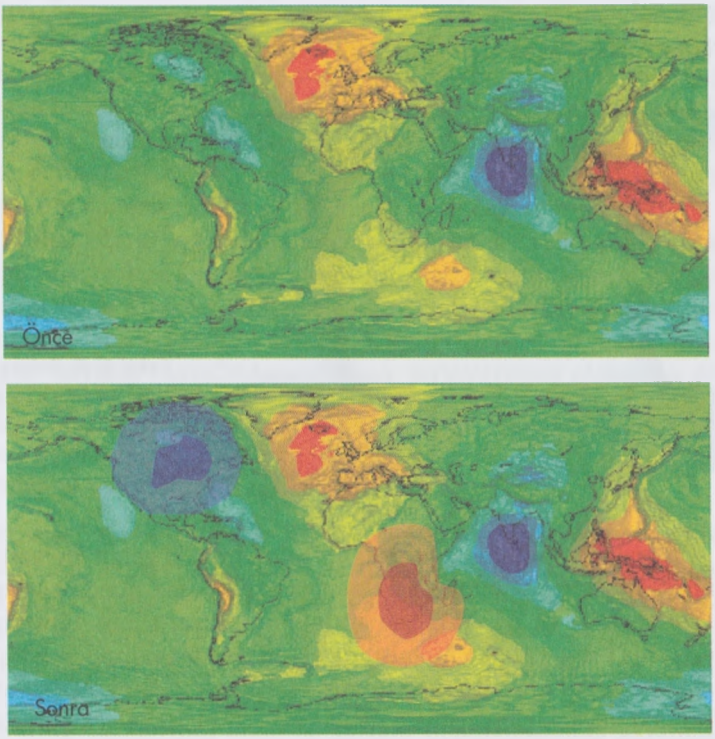
Yığın Alanları Kütleçekimin Yeğinliğini Belirliyor

Bizim zarımızın içindeki her bir küçük madde parçasının kütleçekimi Newton'ın ters kare yasasına büyük bir kesinlikle uyar (2. ve 23. Bölüm): Kütleçekim kuvveti $g = Gm/r^2$ formülüyle gösterilir; r o madde parçasından uzaklık, m o madde parçasının kütlesi ve G Newton'ın kütleçekim sabitidir. Bu G, kütleçekim kuvvetinin toplam yeğinliğini belirler.

Einstein'ın daha büyük bir kesinliğe sahip görelilikçi kütleçekim yasalarında, kütleçekimin yeğinliği ve maddenin neden olduğu bütün uzay ve zaman bükülmesinin yeğinliği de bu G'yle orantılıdır.

Eğer yığın yoksa (var olan tek şey bizim dört boyutlu evrenimizse) o zaman Einstein'ın görelilik yasaları bize G'nin mutlak sabit olduğunu söyler. Uzayda her yerde aynıdır. Zaman içerisinde asla değişmez.

Ama eğer yığın *varsa*, o zaman görelilik yasaları bu G'nin değişmesine izin verir. Profesörün tahminine göre bunu yığın varlıkları kontrol ediyor *olabilir*. *Muhtemelen* bunu yığın alanları belirliyor olsa gerek diye düşünür. Filmin hikâyesine ilişkin yaptığım bu yorumda gözlemlenen sapmalardan biri için (Şekil 25.4) olabilecek en iyi açıklama budur.



Şekil 25.4: Dünyanın kütleçekim kuvvetini gösteren haritalar. *Üstte*: GOCE uydusunun yaptığı ölçümlere göre 2014 yılında durum. *Altta*: Aykırılıkların yaşandığı dönemdeki ani değişim sonrasında durum.

Dünyanın kütleçekim kuvvetinin yeğinliği kayaların, petrolün, okyanusların ve atmosferin değişen yoğunluğu nedeniyle çeşitli yerlerde hafif farklılıklar gösterir. Dünya yörüngesine fırlatılan uydular bu değişen yeğinliği haritalandırmıştır. 2014 yılı itibarıyla en kesin harita Avrupa Uzay Ajansı'nın uydusu GOCE'den[1] elde edilendir (Şekil 25.4'ün üst yarısı). 2014 yılında dünyanın kütleçekiminin en zayıf olduğu yer kuzey Hindistan (mavi bölge), en kuvvetli olduğu yerler İzlanda ve Endonezya'dır (kırmızı bölgeler).

Benim yorumuma göre bu harita aykırılıklar görülmeye başlanana dek pek fazla değişmedi. Sonra günün birinde, birdenbire

[1] Kütleçekim alanı ve kararlı durum okyanus akıntıları inceleme [*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*], GOCE.

dünyanın kütleçekim kuvveti Kuzey Amerika'da biraz zayıfladı, Güney Afrika'daysa güçlendi (Şekil 25.4'ün alt yarısı).



Şekil 25.5: Solucandeliği. *Solda*: Ortasından kapanıyor. *Sağda*: Yığın alanları tarafından açık tutuluyor.

Profesör Brand bunu yığın alanlarının ürettiği gelgit kuvvetlerindeki bir değişim olarak açıklamaya çalıştı ama bunda zorlandı. Bulabildiği en iyi açıklama kütleçekim sabiti G'nin dünyanın içerisinde Güney Afrika'nın altında artmış ve dünyanın içerisinde Kuzey Amerika'nın altında azalmış olmasıydı. Güney Afrika'nın altındaki kayaçlar birdenbire daha kuvvetli biçimde çekiyor; Kuzey Amerika'nın altındaki kayaçlar birdenbire daha zayıf biçimde çekiyordu! Bu değişiklikler bizim zarımızın içinden geçen ve G'yi kontrol eden bir tür yığın alanı tarafından üretilmiş olsa gerek diye düşündü.

Profesör Brand (benim senaryoma göre) yığın alanlarının *sadece* dünyadaki kütleçekim sapmalarının nedeni olmakla kalmadığını düşünüyordu. Yığın alanları çok önemli iki rol daha oynar: Solucandeliğini açık tutarlar ve evrenimizi yıkımdan korurlar.

Solucandeliğinin Açık Tutulması

Güneş sistemimizi Gargantua'nın yakınına bağlayan solucandeliği kendi haline bırakıldığında ortasından kapanacaktır (Şekil 25.5). Gargantua'yla bağlantımız kopacaktır. Bu Einstein'ın görelilik yasalarının kesin emridir (14. Bölüm).

Eğer yığın *yoksa* solucandeliğini açık tutmanın tek yolu onu kütleçekimsel olarak iten egzotik maddeyle kaplamaktır (14. Bö-

lüm). Evrenimizin genişlemesini hızlandırdığı düşünülen kara enerji (24. Bölüm) muhtemelen yeterince itici değildir. Aslına bakılırsa 2014 yılı itibarıyla şunu da söyleyebiliriz ki, kuantum fiziği yasaları aşırı derecede gelişmiş bir uygarlığın bile solucandeliğini açık tutmaya yetecek miktarda egzotik madde toplamasına izin vermiyor gibi görünüyor. Ben bu sonucun Profesör Brand'in yaşadığı dönemde daha da kesinleşmiş olacağını öngörüyorum.

Fakat filmin öyküsüne ilişkin benim sizlere yazdığım bu arka plan anlatısında Profesör başka bir alternatifin farkına varıyor. Bu işi yığın alanları yapmış olabilir. Solucandeliğini onlar açık tutuyor olabilir. Profesör solucandeliğinin Satürn'ün yanına zaten yığın varlıkları tarafından açılarak yerleştirilmiş olduğunu düşündüğü için de onu açık tutan yığın alanları ona doğal görünür.

Evrenimizin Yıkımdan Korunması

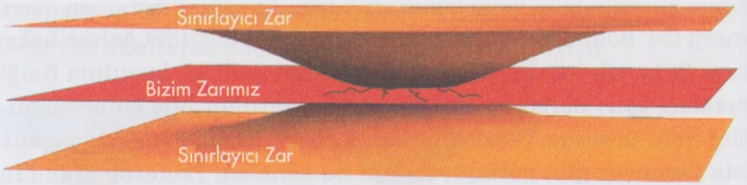
Kütleçekimin evrenimizde Newton'ın ters kare yasasına büyük bir kesinlikle uyması için, bizim zarımızın iki sınırlayıcı zar arasında, aralarındaki AdS bükülmesiyle sıkıştırılmış olması, diğer bir deyişle sandviç olması gerekir (23. Bölüm). Ancak sınırlayıcı zarlar basınçla dolmuş[2] ve iki parmak arasında sıkıştırılan iskambil kâğıdı misali bükülmeye yatkındır (Şekil 23.8). Bu Einstein'ın görelilik yasalarının yığın ve zarlara uygulandığında karşımıza çıkan kesin öngörüsüdür.

Bu bükülme, eğer etkisi giderilmezse sınırlayıcı zarların bizim zarımızla, bizim evrenimizle çarpışmasına sebep olacaktır (Şekil 25.6).[3] Evrenimiz yıkıma uğrayacaktır!

---

[2] Einstein'ın görelilik yasalarına göre evrenimizin genişlemesine sebep olan (sebep olduğunu tahmin ettiğimiz) kara enerjinin ikinci bir etkisi daha vardır: Kara enerji zarımızın içinde, gerilmiş bir paket lastiğindeki veya lastik levhadaki gerginliğe benzeyen çok büyük bir gerginlik üretir. Yine Einstein'ın yasaları AdS sandviçi dışındaki uzayzamanın arzu ettiğimiz biçimde bükülmeden azade olması için, her bir sınırlayıcı zarın bizim zarımızın iç gerginliğinin yarısı kadar büyük bir iç gerginliğe sahip olma zorunluluğunu emreder. Tehlikeli olan bu basınçtır.

[3] Veya bükülme zarlardan birinin ya da ikisinin dışa doğru açılmasına sebep olur, AdS katmanını geçersiz kılar ve böylece Newton'ın ters kare yasasını yıkarak gezegenlerin hepsinin güneşten uzağa savrulmasına sebep olur; evrenimiz için çok kötü sayılmaz ama insanlar için oldukça feci sonuçları olur.



Şekil 25.6 Zar çarpışması.

Benim senaryomda Profesör evrenimizin yıkıma uğramadığını açık bir şekilde gözlemlemektedir. Demek ki bir şey sınırlayıcı zarların bükülmesini önlemektedir. Bu işi yapabileceğini düşündüğü tek şey yığın alanlarıdır. Sınırlayıcı zarlardan biri ne zaman bükülmeye başlasa yığın alanları bir şekilde onun üzerinde bir kuvvet uygulamakta, onu tekrar eski düzgün haline ittirmektedir.

Ve En Sonunda Profesörün Denklemi!

Fizik yasaları matematik dilinde ifade edilir. Cooper Profesör Brand'le karşılaşmadan önce (benim filme dair hayal ettiğim alt senaryoda) Profesör yığın alanlarının matematiksel bir ifadesini oluşturmayı deneyerek sapmaları nasıl yarattıklarını, evrenimizin kütleçekim sabiti *G*'yi nasıl kontrol ettiklerini, solucandeliğini nasıl açabildiklerini ve bizim zarımızın çarpışmalardan korunmasını nasıl sağladıklarını göstermeye çalıştı.

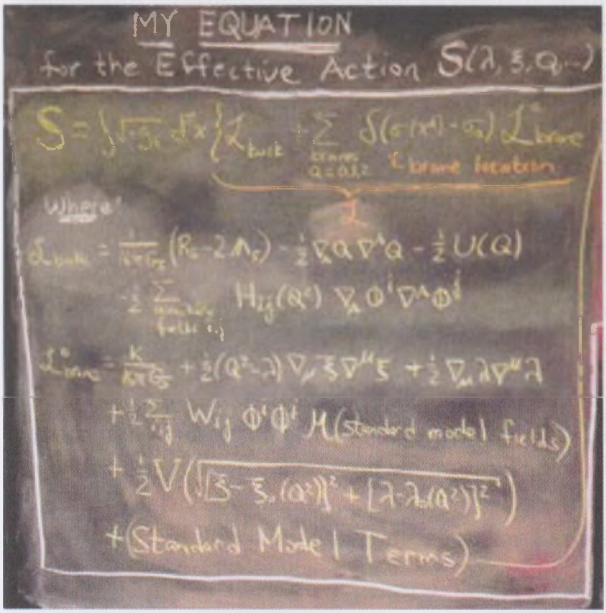
Matematiğini oluştururken Profesöre ekibinin toplamaya devam ettiği gözlemsel veri hazinesi (24. Bölüm) ve Einstein'ın beş boyutlu fiziğe uygulanan görelilik yasaları yol gösteriyordu.

Profesör tüm sezgilerini ve öngörülerini tek bir denklemde, bir büyük denklemde toplayarak bunu çalışma odasındaki on altı kara tahtadan birisinin üzerine yazdı (Şekil 25.7).[4] Cooper denklemi NASA'ya yaptığı ilk ziyarette görür ve denklem otuz yıl sonra, Murph büyüyerek parlak bir fizikçi haline gelip denklemi çözmesi için Profesöre yardım ettiği sırada da hâlâ oradadır.

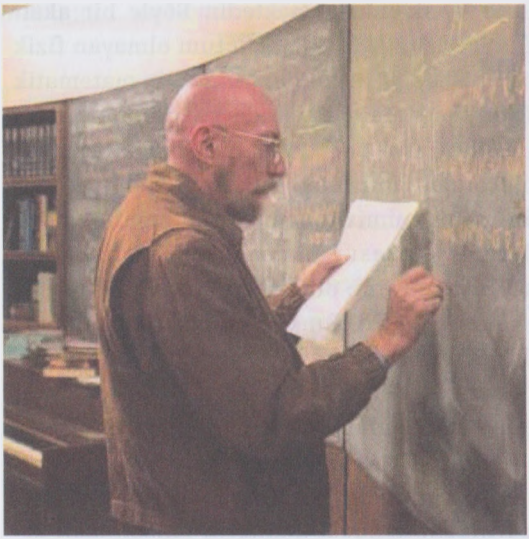
[4] Denklemdeki çeşitli sembollerin anlamları, denklem hakkındaki diğer bilgilerle birlikte Profesörün diğer on beş tahtası üzerinde açıklanıyordu ve bunların hepsini filmin bu sahneleri için ben hayalet yazar olarak tahtaya yazdım. Interstellar.withgoogle.com'daki bu kitapla ilgili sayfada bu on altı tahtanın hepsinin fotoğraflarını görebilirsiniz.

Bu tür bir denkleme "aksiyon" denmektedir. Böyle bir aksiyonla başlayan ve ondan gelinerek bütün kuantum olmayan fizik yasalarının çıkartıldığı (fizikçiler açısından) ünlü bir matematik işlemi vardır. Profesörün denklemi de aslında kuantum olmayan yasaların hepsinin anasıdır. Fakat *doğru* yasaları (sapmaların nasıl ortaya çıktığını, solucandeliğinin nasıl açık tutulduğunu, *G*'nin nasıl kontrol edildiğini ve evrenimizin nasıl korunduğunu *doğru olarak* öngören yasaları) doğurması için denklemin kesin biçimde doğru matematiksel biçime sahip olması zorunludur. Profesör doğru biçimi bilmez. Tahmin eder. Onunkisi bilimsel bir tahmindir ama nihayetinde bir tahmindir.

Denklemi bol bol tahmin içerir: Tahtasında yer alan ve "U(Q), $H_{ij}(Q^2)$, W_{ij} ve M (standart model alanları)" denen şeyler hakkında tahminlerdir bunlar (Şekil 25.7). Aslına bakarsanız bunlar yığın alanının kuvvet çizgilerinin özellikleri ve bizim zarımızı nasıl etkiledikleri ve bizim zarımızın içindeki alanların onları nasıl etkilediği hakkında tahminlerdir. (Daha fazla bilgi için bu kitabın sonundaki *Teknik Notlar*'a bakabilirsiniz.)



Şekil 25.7



Şekil 25.8: Hayalet yazar olarak Profesörün tahtasına yinelemeli tahminler yazıyorum.

Profesör ve ekibi profesörün "denklemini çözmek" dediklerinde benim yorumuma göre iki şeyi kastetmektedirler: Birincisi tahmin ettikleri tüm bu şeylerin ["U(Q), $H_{ij}(Q^2)$, W_{ij} ve M (standart model alanları)"] *doğru* biçimlerine ulaşmak. İkincisi (ünlü işlemin yolunu izleyerek) evrenimiz hakkında, sapmalar hakkında ve hepsinden önemlisi kolonilerin dünyadan kaldırılması için sapmaların nasıl kontrol edileceği hakkında bilmek istediği her şeyin onun denkleminden gelerek çıkartılması.

Filmde karakterler "kütleçekimini çözmekten" bahsettiklerinde de aynı şeyi söylüyorlar.

Filmde Profesörü çok yaşlanmışken yetişkin Murph'le beraber denklemini yinelemeler yoluyla çözmeyi denerken görüyoruz. Bir tahtada bilinmeyen şeylerin bir listesini yapıyorlar (sahne çekilmeden hemen önce tahtaya benim yazdığım tahminler; Şekil 25.8 ve 25.9). Sonra, benim senaryoma göre Murph her bir tahmini kendilerinin yazdıkları muazzam bir bilgisayar programına yüklüyor. Bilgisayar bu tahmin için fiziksel yasaları ve o yasaların kütleçekim sapmalarının nasıl davranacağı hakkındaki öngörülerini hesaplıyor.



Şekil 25.9: Murph yinelemeli tahminler listesi üzerinde düşünüyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

Benim tahminim, tahminlerin hiçbiri gözlemlere benzer sapmalar öngörmüyor. Fakat filmde Profesör ve Murph uğraşmaya devam ediyorlar. Yinelemeye devam ediyorlar: Bir tahmin yapıyor, sonuçlarını hesaplıyor, tahminden vazgeçiyor ve bir sonraki tahmine geçiyorlar, daha sonra bir tahmin daha, bir tahmin daha, bir tahmin daha derken yorgunluk çöküyor. Ertesi gün tekrar başlıyorlar.

Filmde bir süre sonra Profesör ölüm döşeğinde yatarken Murph'e itiraf ediyor: "Yalan söyledim Murph. Sana yalan söyledim." Bu epey dokunaklı bir sahne. Murph buradan Profesörün en başından beri denkleminde bir hata olduğunu bildiği sonucunu çıkarıyor. Dr. Mann da Profesörün kızına aynısını Mann'ın gezegeninde aynı derecede dokunaklı bir sahnede söylüyor.

Fakat aslında, Profesörün ölümünden kısa bir süre sonra Murph fark ediyor ki: "Onun çözümü doğruydu. Yıllardır çözüm elindeydi. Ve bu yanıtın yarısı." Diğer yarısı bir kara deliğin içerisinde bulunabilir. Bir kara delik tekilliğinin içinde...

26

TEKİLLİKLER VE KUANTUM KÜTLEÇEKİMİ

Yıldızlararası'nda Cooper ve TARS Gargantua içerisindeki kuantum verilerine, Profesörün denklemini çözmesine yardım edebilecek ve insanlığın dünyadan ayrılışını sağlayabilecek verilere ulaşmaya çalışıyorlar. Verilerin Gargantua'nın merkezindeki (Romilly'nin tahminine göre "nazik") tekilliğin içerisinde bulunması gerektiğine inanıyorlar. Kuantum verileri nedir? Profesöre nasıl yardım edebilir? Nazik bir tekillik ne demektir?

Kuantum Yasalarının Önceliği

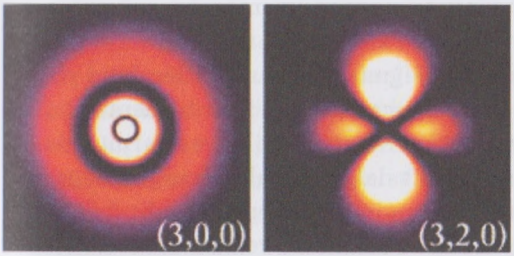
Ⓓ

Bizim evrenimiz temel itibarıyla kuantumdur. Bu ifadeden kastım her şeyin rastgele dalgalanmasıdır, en azından birazcık. Ama her şeyin!

Çok küçük şeylere bakmak için yüksek kesinlikte cihazlar kullandığımızda, büyük dalgalanmalar görürüz. Bir atomun içerisindeki bir elektronun konumu o kadar hızlı ve o kadar rastgele dalgalanır ki, elektronun belirli bir anda nerede olduğunu bilemeyiz. Bu dalgalanmalar atomun kendisi kadar büyüktür. Bu yüzden kuantum fizik yasaları elektronun gerçek konumu açısından nerede olup olmadığını değerlendirirken *olasılıklarla* uğraşır (Şekil 26.1).

Büyük şeylere bakmak için dedektörler kullandığımızda da, eğer cihazlarımız yeterli duyarlılıktaysa, yine dalgalanmalar görürüz. Fakat büyük şeylerin dalgalanması çok küçüktür. LIGO kütleçekim dalgası dedektörlerinde (16. Bölüm) lazer ışınları 40 kg ağırlığındaki asılı aynaların konumlarını izler.[1] Bu konumlar

[1] Daha kesin ifade edersek, aynaların kütle merkezlerinin konumları izlenmektedir.

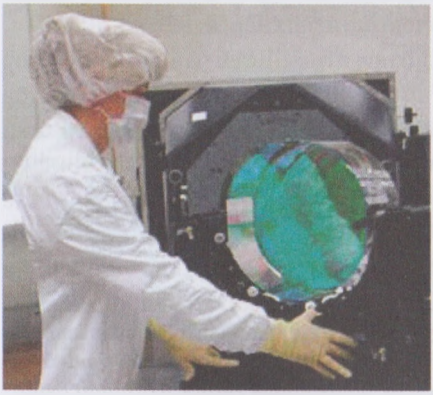


Şekil 26.1: Elektronun iki farklı hidrojen atomu içerisindeki konum olasılığı. Olasılık beyaz bölgelerde yüksek, kırmızı bölgelerde daha düşük, siyahlarda ise çok düşüktür. (3,0,0) ve (3,2,0) sayıları iki atomun olasılık resimlerinin isimleridir.

rastgele dalgalanırlar, ama dalgalanma miktarları bir atomun büyüklüğünden çok daha azdır: Tam ifade edersek aslında *bir atomun büyüklüğünün on milyarda biridir* (Şekil 26.2). Buna rağmen LIGO'nun lazer ışınları bu dalgalanmaları bundan birkaç yıl sonrasında görecektir. (LIGO'nun tasarımı bu rastgele dalgalanmaların kütleçekim dalgalarının ölçülmesinde sorun oluşmasını engeller. Ben ve öğrencilerim bunun bir sorun oluşturmayacağından emin olunmasına yardım ettik.)

İnsan büyüklüğünde ya da daha büyük cisimler sadece çok küçük kuantum dalgalanmalarına sahip olduğu için fizikçiler bu dalgalanmaları hemen hemen her zaman göz ardı ederler. Matematik hesaplamalarımızda dalgalanmaları göz ardı etmek fizik yasalarını sadeleştirir.

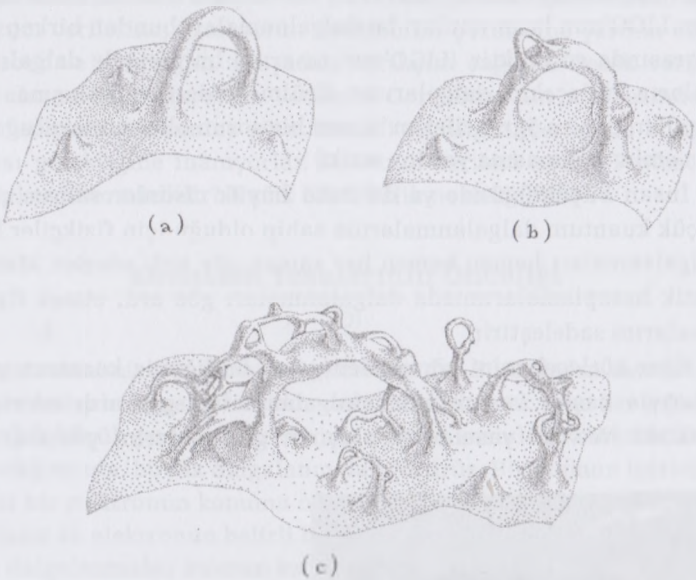
Eğer kütleçekimini görmezden gelen bildiğimiz kuantum yasalarıyla başlar ve ardından dalgalanmaları göz ardı edersek fizikteki Newton yasalarına ulaşırız; gezegenlerin, yıldızların,



Şekil 26.2: 40 kilogramlık bir ayna LIGO'ya takılmak üzere hazırlanıyor. Konumu kuantum mekaniksel açıdan çok çok hafif biçimde, bir atomun çapının on milyarda biri kadar dalgalanmaktadır.

köprülerin ve bilyelerin betimlenmesinde son birkaç yüzyılda kullandığımız yasalardır bunlar. *Bkz.* 3. Bölüm.

Henüz tam olarak kavrayamadığımız kuantum kütleçekimi yasalarıyla başlar ve ardından dalgalanmaları göz ardı edersek bu kez fizikte Einstein'ın gayet iyi kavranan görelilik yasalarını elde etmemiz gerekir. Göz ardı ettiğimiz dalgalanmalar, örneğin dalgalanan son derece küçük bir solucandelikleri köpürmesidir (bütün uzaya yayılmış "kuantum köpüğü"; Şekil 26.3 ve 14. Bölüm)[2]. Dalgalanmalar atıldığında Einstein'ın yasaları kara deliklerin etrafındaki uzay ve zaman bükülmesini ve dünya üzerindeki zaman yavaşlamasını tam bir kesinlikle betimler.



Şekil 26.3: Kuantum köpüğü. Köpüğün sol üstteki şekli alması için bir olasılık (diyelim ki 0,4), sağ üstteki şekli alması için başka bir olasılık (diyelim ki 0,5) ve alttaki şekil için başka bir olasılık (diyelim ki 0,1) vardır. *[Çizim benim yaptığım bir taslağa dayanarak Matt Zimet tarafından gerçekleştirildi; kitabım Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy'den alınmıştır.]*

[2] John Wheeler'ın var olabileceğini 1955 yılında ileri sürdüğü kuantum köpüklerinde solucandeliklerinin boyutları 10^{-35} metreydi: Bir atomdan 10 trilyon çarpı trilyon kat daha küçük bu uzunluğa *Planck uzunluğu* denir.

Tüm bu girizgâh bizi en can alıcı noktaya getirmek içindi: *Profesör Brand hem yığın hem de bizim zarımız için geçerli kuantum kütleçekimi yasalarını keşfedebilse, ardından bu yasaların dalgalanmalarını göz ardı etme yoluyla buradan denkleminin kesin biçimine ulaşabilirdi (25. Bölüm).* Ve bu kesin biçim ona, kütleçekim sapmalarının kaynağını ve sapmaların nasıl kontrol edileceğini, dolayısıyla (umut ettiği üzere) dünyadan kolonilerin ayrılması için nasıl kullanılacaklarını söylerdi.

Benim film yorumuma göre Profesör bunu biliyordu. Ayrıca kuantum kütleçekim yasalarının öğrenilebileceği bir yerin olduğunu da biliyordu: *Tekilliklerin içi.*

Tekillikler: Kuantum Kütleçekiminin Etkinlik Alanı

Ⓓ

Bir tekilliğin başlangıcı, uzay ve zamanın bükülmesinin sınırsız gelişme gösterdiği bir yerdir. Burada uzay bükülmeleri ve zaman bükülmeleri sonsuz derecede güçlü hale gelir.

Evrenimizin bükülmüş uzayını okyanusun dalgalı yüzeyi gibi düşünürsek, o zaman bir tekilliğin başlangıcını inmek üzere olan bir dalganın tepesine ve tekilliğin iç yapısını da indikten sonraki köpüklere benzetebiliriz (Şekil 26.4). İnmeden önceki düz dalga Einstein'ın görelilik yasalarıyla benzeştirebileceğimiz düz fizik yasalarıyla yönetilir. İndikten sonraki köpük köpüren suyu açıklayabilecek yasaları gerektirir; bunlar da kuantum köpüğüyle kuantum kütleçekimi yasalarına benzetilebilir.

Tekillikler kara deliklerin iç merkezinde bulunur. Einstein'ın görelilik yasaları tekilliklerin varlığını tartışmasız biçimde öngörmektedir, ancak bize tekilliklerin içinde ne olduğunu söyleyemez. Bunun için kuantum kütleçekim yasalarına ihtiyacımız var.

1962 yılında fizik doktorası yapmak için Caltech'ten (lisansımı yaptığım üniversiteden) Princeton Üniversitesine gittim. Princeton'ı seçmemin nedeni John Wheeler'ın orada ders vermesiydi. Einstein'ın görelilik yasaları söz konusu olduğunda Wheeler döneminin en yaratıcı dehasıydı. Ondan ders almak istiyordum.

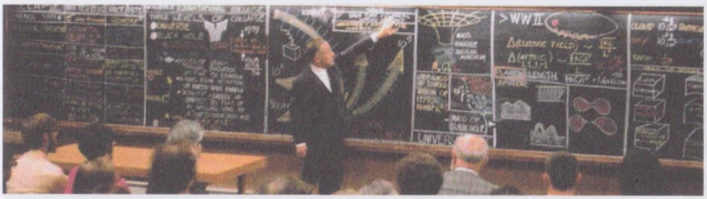


Şekil 26.4: İnmek üzere olan bir okyanus dalgasının tepesindeki tekillik.

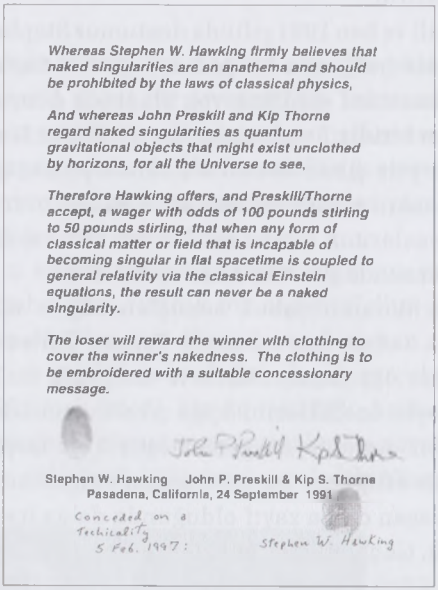
Bir Eylül günü korkarak Profesör Wheeler'ın odasının kapısını çaldım. Bu büyük adamla ilk kez karşılaşacaktım. Sıcak bir gülümsemeyle selamlaştı benimle, oturana dek bana eşlik ederek hemen (ben tam bir çaylak değil de saygıdeğer bir meslektaşıymışım gibi) yıldızların içe doğru patlamalarının gizemleri konusunda konuşmaya başladı. Merkezlerinde tekillikleri olan kara delikleri üreten içe patlamalar. Bu tekillikler ona göre "Einstein'ın görelilik yasaları ile kuantum yasalarının ateşli evliliğinin gerçekleştiği yerlerdi." Wheeler bu evliliğin meyvesi olan kuantum kütleçekimi yasalarının tekilliklerde çiçek açtığını ileri sürüyordu. Tekillikleri anlayabilirsek kuantum kütleçekim yasalarını da öğrenecektik. Tekillikler kuantum kütleçekiminin şifresinin çözümünde bir Rosetta taşıydı.[3]

Bu özel dersten bir bilinç dönüşümü ve aydınlanma yaşayarak çıktım. Wheeler'ın herkese açık dersleri ve yazılarından birçok başka fizikçi daha benzer biçimde çıktı ve onun tekillikleri ve tekilliklerin kuantum kütleçekim yasalarını anlama çalışmasına dahil oldu. Bu çalışma bugün de sürmektedir. Bu çalışmadan süper-sicim kuramı doğdu, bu kuram da evrenimizin daha yüksek boyutlu bir yığın içinde yer alan bir zar olması gerektiği inancına yol açtı (21. Bölüm).

[3] M.S. 800 yılında Harun Reşid tarafından kurulduğu için onun adını alan Reşid (Rosetta), Kuzey Mısır'da Akdeniz kıyısında bir kenttir. Bu kentte 1799 yılında bir Fransız lejyoner tarafından bulunan ünlü Reşid (ya da Rosetta) Taşı sayesinde Mısır hiyerogliflerinin çözümü mümkün olmuştur –çn.



Şekil 26.5: John Wheeler 1971 yılında tekillikler, kara delikler ve evren konusunda ders verirken.



Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds stirling to 50 pounds stirling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

Conceded on a technicality 5 Feb. 1997: Stephen W. Hawking

Şekil 26.6: Çıplak tekillikler konusunda girdiğimiz iddia.[4]

[4] "Stephen W. Hawking çıplak tekilliklerin lanetli olduğuna ve klasik fizik yasaları tarafından yasaklanması gerektiğine kesinkes inanırken, John Preskill ve Kip Thorne çıplak tekillikleri bütün evrenin görmesi için ufuklar tarafından örtülmeden var olabilecek kuantum kütleçekim cisimleri olarak değerlendirmekte, Bu yüzden düz uzayzamanda tekil hale gelmeye kabiliyetsiz herhangi bir klasik madde ya da alan biçimi klasik Einstein denklemleri aracılığıyla genel görelilikle eşleştiğinde, sonucun asla bir çıplak tekillik olamayacağı hususunda bir iddiayı 100'e karşı 50'şer bahis oranıyla Hawking önermekte ve Preskill/Thorne kabul etmektedir.
Kaybeden taraf kazanan tarafa kazanan tarafın çıplaklığını örtmek üzere giysi temin edecektir. Giysiye kişiye özel bir mesaj işlenecektir.
Pasadena, California, 24 Eylül 1991
Yenilgi 5 Şubat 1997'de teknik bir nedenle kabul edilmiştir" –çn.

Çıplak Tekillikler?

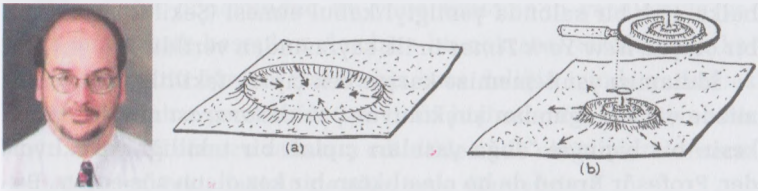
BT

Bir kara deliğin *dışında* bir tekillik bulabilsek ya da yaratabilsek bu müthiş bir şey olurdu. Bir kara deliğin olay ufkunun altında saklanmayan bir tekillik. *Çıplak bir tekillik*. O zaman *Yıldızlararası*'nda Profesörün işi kolay olurdu. NASA'daki laboratuarında oturduğu yerden çıplak bir tekillikten hayati kuantum verilerini çıkartırdı.

John Preskill ve ben 1991 yılında dostumuz Stephen Hawking'le çıplak tekillikler hakkında bir iddiaya girdik. Caltech profesörü olan Preskill kuantum enformasyon alanında dünyanın en büyük uzmanlarından biridir. Stephen da *Star Trek*, *The Simpsons* ve *The Big Bang Theory*'de çıkan "tekerlekli sandalyedeki adam"dır. Aynı zamanda çağımızın en büyük dâhilerinden biri olur kendisi. John ve ben fizik yasalarının çıplak tekilliklere izin verdiğini iddia ettik. Stephen yasakladığını iddia etti (Şekil 26.6).

Hiçbirimiz iddianın çabuk sonuçlanacağını düşünmemiştik ama öyle oldu. Sadece beş yıl sonra Teksas Üniversitesinden bir doktora sonrası öğrencisi, Matthew Choptuik fizik yasalarının yeni, beklenmeyen özelliklerini açığa çıkarma umuduyla bir süper bilgisayarda bir simülasyon gerçekleştirdi ve büyük ikramiyeyi kazandı. Simüle ettiği şey bir kütleçekim dalgasının içe patlamasıydı.[5] İçe patlayan dalga zayıf olduğunda dalga içe patladı ve ardından dağıldı. Güçlü olduğunda dalga içe patladı ve bir kara delik oluşturdu. Gücü çok hassas biçimde orta büyüklükte bir güce "ayarlandığında" bu kez dalga uzayın ve zamanın şeklinde bir tür kaynama yarattı. Kaynama giderek kısalan dalga boylarına oturarak dışa doğru giden kütleçekim dalgaları üretti. En sonunda da arkasında son derece küçük bir çıplak tekillik bıraktı (Şekil 26.7).

[5] Aslında simüle ettiği şey sayısal dalga denen bir şeydi ama bu konuyla ilgisiz bir teknik ayrıntı. Birkaç yıl sonra North Carolina Üniversitesinden Andrew Abrahams ve Chuck Evans, Choptuik'in simülasyonlarını bir kütleçekim dalgası kullanarak tekrarladılar ve aynı sonuca ulaştılar: Bir çıplak tekillik.



Şekil 26.7: *Solda*: Matthew Choptuik. *Ortada*: İçe patlayan bir kütleçekim dalgası. *Sağda*: Dalganın doğurduğu kaynama ve büyütecin merkezindeki çıplak tekillik.

Aslında böyle bir tekillik doğada asla gerçekleşemez. İhtiyaç duyulan ayarlama doğal bir şey değildir. Fakat müthiş derecede gelişmiş bir uygarlık bir dalganın içe patlamasını tam olarak ayarlayarak yapay yoldan böyle bir tekillik üretebilir ve ardından tekilliğin davranışından kuantum kütleçekim yasalarını çıkarsamayı deneyebilir.

Choptuik'in simülasyonunu gördükten sonra Stephen iddiayı kaybettiğini kabul etti, "teknik bir nedenle" diye de ekledi (Şekil 26.6'nın altına düşülen not). Hassas ayarlamanın adil olmadığını düşündü. Çıplak tekilliklerin *doğal olarak* gerçekleşip gerçekleşemeyeceğini bilmek istedi, biz de tekilliğin herhangi bir hassas bir ayarlamaya gerek olmadan ortaya çıkması gerektiğini belirten yeni bir ifade ekleyerek iddiamızı yeniledik. Yine de Stephen'ın



Şekil 26.8: Hawking 1997 yılında Caltech'te verdiği bir ders sırasında Preskill ve Thorne karşısında yenilgiyi kabul ediyor.

halka açık bir salonda yenilgiyi kabul etmesi (Şekil 26.8) önemli bir olaydı. *New York Times*'in ilk sayfasından verildi.

İddiamızı yenilememize karşın ben çıplak tekilliklerin evrenimizde var olduğundan kuşkuluyum. *Yıldızlararası*'nda Dr. Mann kesin bir biçimde "doğa yasaları çıplak bir tekilliği yasaklıyor" der, Profesör Brand de bu olasılıktan bir kez olsun söz etmez. Bunun yerine Profesör kara deliklerin içerisindeki tekilliklere odaklanır. Ona göre bu tekillikler kuantum kütleçekimin yasalarının öğrenilmesi için tek umuttur.

Bir Kara Deliğin İçindeki BKL Tekilliği

BT

Wheeler'ın döneminde (1960'larda) bir kara deliğin içindeki tekilliği keskin bir noktaya benzer şekilde düşünürdük. Maddeyi sonsuz derecede yoğun hale gelip imha olana dek sıkıştıran bir nokta. Şu ana dek bu kitapta ben de kara deliğin tekilliğini böyle tarif ettim (örneğin Şekil 26.9).



Şekil 26.9: Lia Halloran'ın çeşitli kara delikleri noktasal uçlarındaki tekilliklerle gösterdiği hayal mahsulü çizim. [*Şekil 4.5'ten alınan bir kesit*]

Wheeler'ın döneminden bu yana Einstein'ın yasalarıyla yapılan matematik hesaplamalar bize bu noktasal tekilliklerin kararsız olduğunu öğretti. Onları bir kara deliğin içinde yaratmak hassas ayarlama gerektirir. Çok hafif biçimde, örneğin içine bir şeyin düşmesi sonucu rahatsız edildiklerinde olağanüstü derecede değişirler. Peki, değişip ne olur, neye dönüşürler?

Üç Rus fizikçi, Vladimir Belinsky, Isaac Khalatnikov ve Eugene Lifshitz yanıtı tahmin etmek için 1971 yılında uzun, karmaşık hesaplamalar kullandılar. 2000'li yıllarda bilgisayar simülasyonları yeterli derecede geliştiğinde de tahminleri Oakland Üniversitesinden David Garfinkle tarafından doğrulandı. Ortaya çıkan kararlı tekillikler bugün Belinsky, Khalatnikov ve Lifshitz'in onuruna BKL adını taşıyor.

Bir BKL tekilliği kaotiktir. Son derece kaotik. Ve ölümcüldür. Son derece ölümcül.

Şekil 26.10'da hızlı dönen bir kara deliğin içinde ve dışında uzayın bükülmesini gösteriyorum. Bu kara deliğe düşerseniz deliğin iç yapısı başlangıçta düz ve belki de hoştur. Fakat tekilliğe yaklaştıkça etrafınızdaki uzay kaotik bir örüntüyle gerilmeye ve sıkışmaya başlar. Ve gelgit kuvvetleri sizi kaotik biçimde germeye ve sıkıştırmaya başlar. Germe ve sıkıştırma başta naziktir ama hızla güçlü hale, ardından aşırı güçlü hale gelir. Et ve kemikleriniz darbelenir ve kopar. Ardından bedeninizi oluşturan atomlar darbelenir ve kopar; tanınmayacak şekilde çarpılır, eciş bücüş hale gelirsiniz.



Şekil 26.10: Alt tarafındaki BKL tekilliğiyle Gargantua gibi hızlı dönen bir kara deliğin bükülmüş uzayı. Tekilliğin yakınındaki kaotik germe ve sıkıştırma kesin değil, sezgisel olarak gösterilmiştir.

Einstein'ın görelilik yasaları tüm bunları ve ortaya çıkan kaotik örüntüyü açıklar. Rusların, B, K ve L'nin öngördüğü budur. Onların

öngöremediği, bugün kimsenin öngöremediği, kaotik darbeleme sonsuz bir kreşendo şeklinde arttığında atomlarınızın ve atomaltı parçacıklarınızın kaderinin ne olacağıdır. Bu kaderi sadece kuantum kütleçekim yasaları bilir. Fakat siz, kişi olarak siz çoktandır ölmüşsünüzdür ve kuantum verilerine erişmeniz ve kaçmanıza olanak yoktur.

Bu kısma bilimsel tahmin anlamına gelen (BT) işaretini koydum çünkü bir kara deliğin çekirdeğinin içindeki tekilliğin BKL tekilliği olup olmadığından tam olarak emin *değiliz*. Einstein'ın görelilik yasaları BKL tekilliklerine izin veriyor elbette. Garfinkle bunu bilgisayar simülasyonlarıyla doğruladı. Fakat bir kara deliğin çekirdeğinde muazzam germe ve sıkıştırmalı BKL örüntülerinin gerçekten gerçekleştiğini doğrulamak için daha gelişmiş simülasyonlara ihtiyaç var. Bu simülasyonların sonucunun "evet, gerçekleşiyorlar" olacağından neredeyse tam olarak eminim. Ama tam olarak emin değilim.

Bir Kara Deliğin İçeri Doğru ve Dışarı Doğru Tekillikleri

(BT)

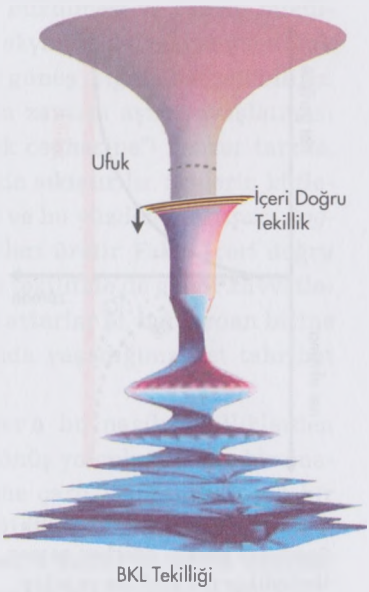
Fizikçi meslektaşlarım ve ben 1980'lerde bir kara deliğin içerisinde sadece bir tekillik olduğundan ve bunun bir BKL tekilliği olduğundan bilimsel bir tahmin olarak oldukça emindik. Fakat hatalıydık.

Kanada'daki Alberta Üniversitesinde Einstein yasalarının matematiğini çalışan Eric Poisson ve Werner Israel 1991 yılında ikinci bir tekillik keşfettiler. Bu tekillik kara delik yaşlandıkça zamanla büyüyordu. Kara deliğin içerisinde zamanın uç derecede yavaşlaması nedeniyle ortaya çıkıyordu.

Gargantua gibi bir dönen kara deliğin içerisine düşerseniz sizin ardınızdan kaçınılmaz olarak bir süre başka şey daha düşecektir: Gaz, toz, ışık, kütleçekim dalgaları vs. Dışarıdan bakan benim deliğin içine giren bu şeyleri görmem milyon çarpı milyarlarca yıl tutabilir. Fakat şimdi deliğin içinde olan sizin görüşünüzle bu, sizin zamanınızın benimkiyle karşılaştırıldığında aşırı derece yavaşlaması nedeniyle sadece birkaç saniye ya da daha kısa bir süre tutabilir. Sonuç olarak sizin görüşünüze göre bütün bu şeylerin hepsi size doğru ışık hızında ya da ışık hızına yakın bir hızda içeri

düşen ince bir tabakada birikir. Bu tabakanın doğurduğu yoğun kütleçekim kuvvetleri uzayı çarpıtır ve eğer tabaka size çarparsa sizi de çarpıtacaktır.

Gelgit kuvvetleri sonsuza doğru artar. Sonuç kuantum kütleçekim yasalarına bağlı bir "*içeri doğru tekilliktir*" (Şekil 26.11).[6] Fakat gelgit kuvvetleri (Poisson ve Israel'in çıkarımına göre) o kadar hızla artar ki, bunlar size çarparsa siz tekilliğe ulaştığınız anda sizi sadece sonlu bir miktarda deforme etmiş olacaklardır. Bu durum zaman geçtikçe yukarı-aşağı yön boyunca net gerilmenizi ve kuzey-güney ve doğu-batı yönleri boyunca net sıkışmanızı gösteren Şekil 26.12'de açıklanmaktadır. Tekilliğe çarptığınızda net gerilme ve sıkışmanız sonludur, fakat gerilme ve sıkışma hızlarınız (siyah eğrilerin eğimleri) sonsuzdur. Bu sonsuz hızlar sonsuz gelgit kuvvetleridir ve tekilliğe işaret eder.



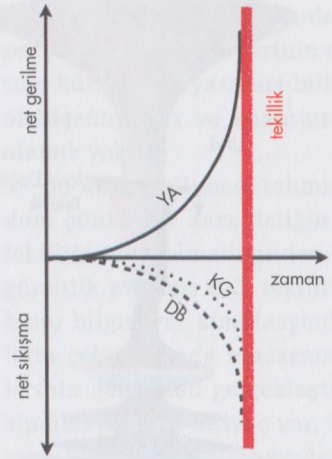
Şekil 26.11: Sizin ardınızdan kara deliğin içine düşen şeylerin yarattığı içeri doğru tekillik. Düşen şeyler siyah, kırmızı, gri ve portakal renklerde değişen katmanlarla gösterilmiştir.

Tekilliğe ulaştığınızda bedeniniz net olarak sadece sonlu bir miktarda sıkıştırılmış ve gerilmiş olduğu için hayatta kalabilmeniz düşünülebilir. (Düşünülebilir, ama bence muhtemel değil.) Bu açıdan baktığımızda içeri doğru tekillik BKL tekilliğinden çok daha "naziktir." Hayatta kalırsanız sonra ne olacağını sadece kuantum kütleçekim yasaları bilir.

Biz fizikçiler 1990'lar ve 2000'lerde hikâyenin hepsi bu diye düşünüyorduk: Kara delik doğduğunda ortaya çıkan bir BKL tekilliği. Ve daha sonra gelişen bir içeri doğru tekillik. Hepsi bu.

---

[6] Israel ve Poisson bu tekilliğe *kütle şişme tekilliği* tekilliği adını verdiler ve o zamandan beri fizikçilerin kullandığı isim budur. Ben *içeri doğru tekillik* demeyi tercih ediyorum ve kitapta da bu ismi kullandım.



Şekil 26.12: İçeri doğru tekillik üzerinize hücum ederken zaman ilerledikçe net gerilme ve sıkışmanız.

Daha sonra 2012 yılında, Christopher Nolan *Yıldızlararası*'nı yeniden yazma ve yönetme görüşmelerini yaparken Donald Marolf (Santa Barbara'daki California Üniversitesi) ve Amos Ori (Hayfa, İsrail'deki Technion) üçüncü bir tekillik keşfettiler. Bu tekilliğin keşfi de elbette yine astronomik gözlemler yoluyla değil, Einstein'ın görelilik yasalarının derinlemesine araştırılması yoluyla gerçekleştirilmişti.

Şimdi geriye baktığımızda aslında bu tekilliğin görülmesi gerekiyordu diyebiliyoruz. Bu tıpkı içeri doğru tekilliğin büyümesi gibi, kara delik yaşlandıkça büyüyen bir dışarı doğru tekilliktir. Onu doğuran siz içine düşmeden *önce* kara deliğin içine düşmüş nesnelerdir (gaz, toz, ışık, kütleçekim dalgaları vs); *bkz.* Şekil 26.3. Bu şeylerin çok küçük bir kısmı yukarı size doğru tekrar saçılır,



Şekil 26.13: Kara deliğin içine sizden önce düşerek geriye doğru saçılan şeylerin yarattığı dışarı doğru tekillik ve sizden sonra düşen şeyler tarafından yaratılan içeri doğru tekillik. Siz onların arasında kalırsınız. Soluk biçimde gösterilen bölge kara deliğin dışı ve BKL tekilliğidir; bunlarla artık temas kuramazsınız çünkü arasında kaldığınız tekilliklerin ötesindedirler.

onu saçan da deliğin yarattığı uzay bükülmesi ve zaman bükülmesidir. Bunu eğrisel, pürüzsüz bir okyanus dalgasına saçılarak bize bir dalga görüntüsünü sağlayan güneş ışığına benzetebiliriz.

Yukarı saçılan şeyler kara deliğin zamanı aşırı yavaşlatması tarafından, ses patlamasına (bir "şok cephesine") benzer tarzda, ince bir katman haline gelecek şekilde sıkıştırılır. Şeylerin kütleçekimi sonsuz derecede güç kazanan ve bu yüzden bir *dışarı doğru tekillik* haline gelen gelgit kuvvetleri üretir. Fakat içeri doğru tekillikte olduğu gibi bu dışarı doğru tekillikte de gelgit kuvvetleri naziktir: O kadar hızlı, o kadar ani artarlar ki, bunlardan birine rastlarsanız, tekilliğe çarptığınız anda yaşadığınız net tahribat sonsuz değil, sonludur.

Yıldızlararası'nda Romilly Cooper'a bu nazik tekilliklerden bahseder: "[Mann'ın gezegeninden] dönüş yolculuğun için bir önerim var. Kara deliğe son bir kere daha çarp. Gargantua yaşlı bir dönen kara delik. Nazik tekillik dediğimiz şeyi var [onun]." "Nazik mi?" diye sorar Cooper. "Şüphesiz pek o kadar da nazik değiller ama gelgitli kütleçekimi ufku hızlı geçen bir şeyin hayatta kalabilmesine yetecek kadar da hızlı." Cooper kuantum verileri arayışında bu konuşmaya da güvenerek daha sonra Gargantua'nın içine dalacaktır (28. Bölüm). Doğrusu bu cesaret isteyen bir dalıştır. Hayatta kalıp kalmayacağını önceden bilemez. Bunu kesin olarak sadece kuantum kütleçekim yasaları bilir. Ya da yığın varlıklar...

Yıldızlararası'nda son sahnelerin arkasında yatan uç-fizik temellerini böylece ortaya serdiğimize göre şimdi düğümün çözüldüğü sahnelere geçebiliriz.



VII.
DÜĞÜM ÇÖZÜLÜYOR

27

YANARDAĞIN AĞZI

Ⓓ

Yıldızlararası'nda Cooper *Endurance*'ı Mann'ın gezegenindeki ölüm sarmalından henüz yeni çıkarmışken robot CASE'in söyledikleriyle büyük bir rahatlama hisseder: "Gargantua'nın çekimine girmek üzereyiz."

Cooper hızla bir karar verir: "Yön bulma sistemi hasar gördü ve dünyaya dönmemize yetecek kadar yaşam desteğimiz yok. Ama Edmunds'ın gezegenine kadar idare edebiliriz." Amelia Brand "Yakıt durumu ne?" diye sorar. "Yeterli değil," yanıtını verir Cooper. "Gargantua'nın bizi ufka [ufkun yakınına] kadar çekmesine izin verelim, sonra onun çevresinden yapacağımız bir sapan atışı bizi Edmunds'ın gezegenine indirir." "Elle mi yapacağız?" "Ben bunun için buradayım zaten. Bizi tam kritik yörüngenin içine oturtacağım."

Birkaç dakika sonra kritik yörüngeye otururlar ve kızılca kıyamet kopar.

Bu bölümde bu konudaki bilimsel yorumumu paylaşacağım.

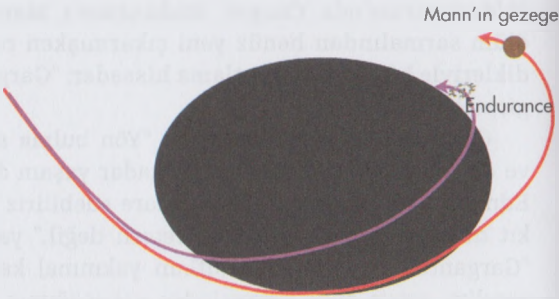
Gelgitli Kütleçekimi: *Endurance*'ın Mann'ın Gezegeninden Kurtulması

Benim yorumuma göre Mann'ın gezegeni oldukça uzatılmış bir yörünge izler (19. Bölüm). *Endurance* gezegene ulaştığında gezegen Gargantua'dan görece uzaktadır fakat içe doğru yaklaşmaktadır. *Endurance*'taki patlama gezegen kara deliğe yaklaşmaktayken gerçekleşir (Şekil 27.1).

Cooper patlamanın ardından *Endurance*'ı kurtarır ve yukarı, gezegenden uzağa doğru kaldırır. Benim yorumuma göre *Endurance*'ı Gargantua'nın devasa gelgit kuvvetlerinin aracı gezegenden uzağa koparak farklı bir yörüngeye yollayabileceği kadar yükseğe kaldırır (Şekil 27.2).



Şekil 27.1: Mann'ın gezegeninin yörüngesi ve *Endurance*'taki patlama anındaki konumu.



Şekil 27.2: *Endurance* Gargantua'nın gelgit kuvvetleri tarafından Mann'ın gezegeninden uzağa atılır. *[Endurance'ın görüntüs Yıldızlararası'ndan alın mıştır.]*

Merkezkaç kuvvetler Mann'ın gezegenini bir sonraki dıştan uzak seferine doğru savururken *Endurance* kritik yörüngeye doğru gider.[1]

Kritik Yörünge ve Yanardağ Benzetmesi

Şekil 27.3'te daha önce kullandığımdan daha farklı türde bir resim kullanarak kritik yörüngeyi ele alacağım. Bu resmi önce sezgisel olarak betimleyecek, ardından fizik diliyle açıklayacağım.

Şekil 27.3'teki yüzeyi evinizde, döşemenizin üstünde duran granitten dümdüz bir heykel olarak düşünün. Yontulmuş yanardağ kendisini çevreleyen derin bir hendeğin içine batar şekilde oturtulmuş.

[1] Bu büyük farkın nedeni, gelgit kuvvetleri işini yaptıktan sonra *Endurance*'ın Mann'ın gezegenine göre açısal momentumunun hafif daha az olmasıdır. Şekil 27.3'te *Endurance* yanardağın ağzına tırmanır ama Mann'ın gezegeni ağza bile ulaşamaz; yanardağın yan tarafından aşağı doğru dönerek iner (merkezkaç kuvvetler onu dışarı iter) ve ardından Gargantua'dan uzağa, kütleçekim enerji yüzeyine yükselir.



Şekil 27.3: *Endurance*'ın kütleçekim ve merkezkaç enerjilerini gösteren yanardağa benzer bir yüzeyde izlediği güzergâh.

Endurance Mann'ın gezegeninden koptuktan sonra bu granit yüzeyin üzerinde serbestçe yuvarlanan çok küçük bir bilye gibidir. İçe, hendeğe doğru yuvarlandıkça bilye yüzeyin aşağı doğru eğimi nedeniyle hızlanır. Ardından yanardağ tarafına yuvarlanır, ilerledikçe yavaşlar ve yanardağın ağzına arta kalan bir miktar dairesel hareketle ulaşır. Bundan sonra ağzın üzerinde dönerek yuvarlanır; içe, yanardağın içine düşmek ile dışa, aşağı hendeğe doğru düşmek arasında incelikli ve kararsız bir dengededir.

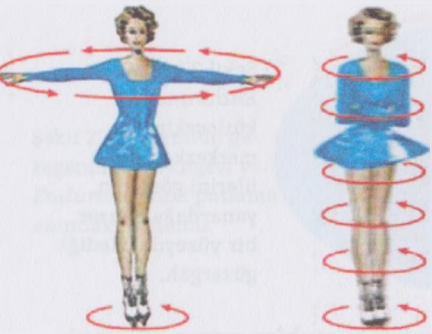
Yanardağın içi Gargantua'dır. Yanardağın ağzı da *Endurance*'ın Edmunds'ın gezegenine doğru kalkış yaptığı kritik yörüngedir.

Yanardağın Anlamı: Kütleçekimsel ve Dairesel Enerji

Yanardağın anlamını, fizik yasalarıyla ilişkisini açıklamak için biraz teknik konuşmam lazım.

Fazla karışıklık yaratmamak için *Endurance*'ı Gargantua'nın ekvatoral düzleminde hareket ediyor gibi düşünelim. (*Endurance*'ın ekvatoral olmayan güzergâhında da ana fikir aynıdır, fakat kara delik küresel olmadığı için ayrıntılar karmaşıklaşır.) Yanardağ benzetmesi kritik yörüngenin ve Gargantua'nın güzergâhının gerçek fiziğini gayet düzgün biçimde özetliyor. Nasıl olduğunu açıklamak için iki fizik kavramına ihtiyacım var: *Endurance'ın açısal momentumu* ve *enerjisi*.

Gelgit kuvvetleri Mann'ın gezegeninden kopardıktan sonra *Endurance* belli miktarda bir açısal momentuma sahiptir (Gargantua etrafındaki dairesel hızı çarpı Gargantua'dan uzaklığı). Görelilik yasaları bize bu açısal momentumun *Endurance*'ın güzergâhı



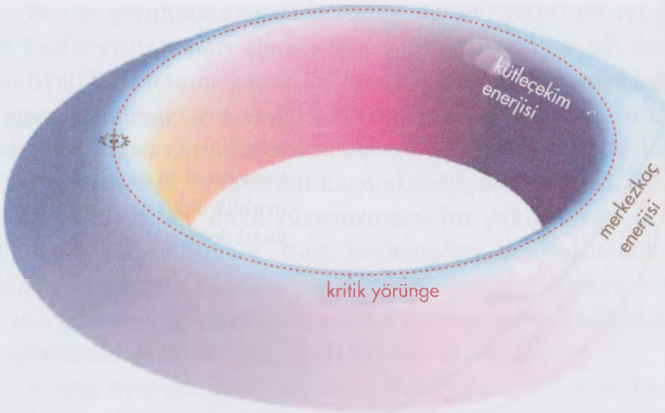
Şekil 27.4: Buz patencisi

boyunca sabit kaldığını söyler; *bkz.* 10. Bölüm. Bu şu anlama gelir: *Endurance* Gargantua'nın içine doğru dalarken Gargantua'ya olan uzaklığının düşmesiyle dairesel hızını arttırır. Bir buz patencisinde de aynı şeyi görürüz, kollarını içe doğru hareket ettirdikçe dönme hızı artar (Şekil 27.4).

Endurance Gargantua'ya doğru belli miktarda bir enerjiyle ilerler ve bu da açısal momentumu gibi güzergâhı boyunca sabit kalır. Bu enerji üç parçadan oluşur: *Endurance'ın kütleçekim enerjisi*, *Endurance* Gargantua'ya yaklaştıkça giderek daha fazla negatif hale gelir; *merkezkaç enerjisi* (Gargantua etrafındaki dairesel hareketinin enerjisi), dairesel hareket hızlandığı için *Endurance* Gargantua'ya yaklaştıkça artar ve *radyal kinetik enerjisi* (Gargantua'ya doğru hareketinin enerjisi).

Şekil 27.3'teki yüzey *Endurance*'ın kütleçekim enerjisine ek olarak dikey biçimde gösterilen merkezkaç enerjisi ve yatay biçimde gösterilen Gargantua'nın ekvatoral düzlemindeki konumudur. Yüzeyin aşağı doğru çöktüğü yerlerde *Endurance*'ın kütleçekim artı merkezkaç enerjisi azalır, dolayısıyla radyal kinetik enerjisi artmak zorundadır (toplam enerji değişmediği için); radyal hareketi hızlanmak zorundadır. Bizim sezgisel yanardağ benzetmemizde de olan tam olarak budur.

Şekil 27.3'teki hendeğin dışındaki yüzeyin yüksekliği *Endurance*'ın negatif kütleçekim enerjisi tarafından belirlenir (*bkz.* şekildeki "kütleçekim enerjisi" yazısı). Karşılaştırıldığında buradaki pozitif merkezkaç enerji önemsizdir. Fakat yanardağın dış kenarında yüksekliği belirleyen ve artarak burada kütleçekim enerjisine üstünlük kuran merkezkaç enerjidir. Yanardağın içinde, Gargantua'nın ufkunun yakınında kütleçekim enerjisi olağanüstü negatif değerlere ulaşır ve merkezkaç enerjiye üstünlük kurar, bu yüzden aşağı doğru gömülür (Şekil 27.5). Kritik yörünge yanardağın ağzıdır.



Şekil 27.5: *Endurance*'ın yanardağın ağzındaki kritik yörüngesi; merkezkaç enerji ve kuvvet ağzın dışında hâkim, kütleçekim enerjisi ve kuvvetiyse içeride hâkimdir. *[Endurance'ın görüntüsü Yıldızlararası'ndan alınmıştır.]*

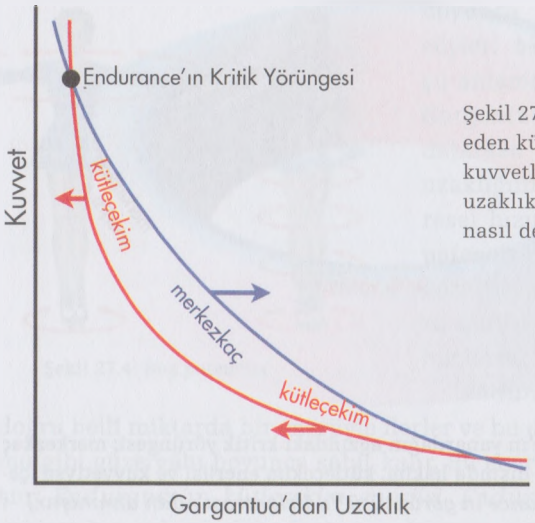
Kritik Yörünge: Merkezkaç ve Kütleçekim Kuvvetlerinin Dengesi

Yanardağın ağzına ulaştığında *Endurance* ideal olarak onun etrafında hiç durmadan sabit hızda yolculuk eder. İçeri ya da dışarı hareket etmediği için yanardağ ağzı üzerinde kütleçekimin içe doğru çekmesi, geminin hızlı dairesel hareketinden ortaya çıkan dışa doğru merkezkaç kuvvetle tam olarak dengelenmek zorundadır.

Şekil 26.7'de, Miller'ın gezegeni için çizilen kuvvet dengesine (Şekil 17.2) benzer tarzda gösterilen durum tam da budur. *Endurance*'ın kritik yörüngesinde kırmızı eğri (*Endurance*'a etki eden içe doğru kütleçekimsel çekme) ve mavi eğri (dışa doğru merkezkaç kuvvet) kesişirler, dolayısıyla iki kuvvet dengededir.

Fakat yanardağ ağzı benzetmesinde de görülebileceği gibi denge kararsızdır[2]. Eğer *Endurance* rastgele sadece birazcık içe doğ-

[2] Bizim yanardağ ağzı benzetmemiz ile bu kuvvet çıkarımları arasındaki uyuşma çok önemli bir gerçek nedeniyledir: *Endurance*'a etkiyen net kuvvet (kütleçekim kuvveti artı merkezkaç kuvvet) enerji yüzeyinin eğimiyle orantılıdır (Şekil 27.3 ve 27.5). Neden böyle olduğunu hesaplayabilir misiniz?



Şekil 27.6: *Endurance*'a etki eden kütleçekim ve merkezkaç kuvvetleri ve Gargantua'ya olan uzaklık değiştikçe bunların nasıl değiştikleri.

ru itilirse, bu durumda kütleçekim merkezkaç kuvvete baskın çıkar (kırmızı eğri mavi eğrinin üstüne çıkar), dolayısıyla *Endurance* Gargantua'nın ufkuna doğru içe çekilir. Eğer Endurance birazcık dışa doğru itilirse, o zaman da merkezkaç kuvvet kütleçekimle savaşını kazanır (mavi eğri kırmızı eğrinin üstündedir), bu yüzden *Endurance* dışa doğru itilir ve Gargantua'nın sıkı tutuşundan kaçar.

Öte yandan (17. Bölümde gördüğümüz gibi) Miller'ın gezegeninin yörüngesi üzerinde kütleçekim ve merkezkaç kuvvetleri arasındaki denge kararlıdır.

Ağızda Yaşanan Felaket: TARS ve Cooper'ın Fırlatılması

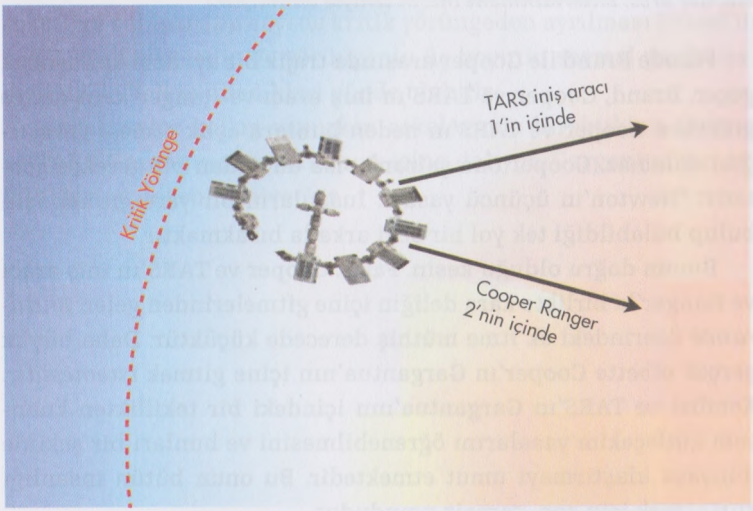
Benim filmdeki bilimsel yorumumda yanardağın ağzı çok dardır, dolayısıyla ağzın üzerindeki kritik yörünge son derece kararsızdır. Yön bulmada yapılacak çok küçük hatalar *Endurance*'ın Gargantua'ya doğru (yanardağın içinde aşağıya doğru) ya da ondan uzağa (aşağıya hendeğe doğru) yan yatarak kaymasına sebep olacaktır.

Hatalar kaçınılmazdır, bu yüzden *Endurance*'ın rotası bir otomobilin seyir kontrolüne benzer ama ondan çok daha iyi ve başarıyla tasarımlanmış bir geri besleme sistemiyle sürekli olarak düzeltilmek zorundadır.

Benim yorumumda geri besleme sistemi yeterince iyi değildir ve *Endurance* yanardağın iç dudağının altından aşağı doğru çok tehlikeli bir biçimde kayar. *Endurance* kritik yörüngeye tekrar tırmanmak için elinde olan bütün itiş gücünü kullanmak zorundadır.

Fakat bu aksiyon dolu sahneler ve çok çeşitli bir izleyici grubu için fazla teknik ve incelikli kaçmaktadır, bu yüzden Christopher Nolan daha basit, daha yüzevurumcu bir yaklaşım seçti. Dengesizlikten bahsedilmedi. Geri beslemeden bahsedilmedi. *Endurance* Gargantua'ya fazla yakınlaşmaya başladı sadece ve Cooper buna tekrar tırmanarak Gargantua'nın ağzından kaçabilmek için toplayabildiği bütün itiş gücüyle karşılık verdi.

Sonuç aynıdır: TARS'ın kullandığı iniş aracı 1 ve Cooper'ın kullandığı Ranger 2 *Endurance*'a bağlıyken roketlerini ateşler ve *Endurance*'ı Gargantua'nın kütleçekim tutuşundan tekrar dışarıya iterler. Ardından mümkün olan son tepmeyi elde etmek için patlayıcı sürgü mekanizmaları patlayarak *Endurance*'ı iniş aracı 1 ve Ranger 2'den uzaklaştırır. İniş aracı ve Ranger, kendileriyle birlikte TARS ve Cooper'ı taşıyarak aşağıya Gargantua'ya doğru dalmaya başlarlar ve *Endurance* kurtulur (Şekil 27.7 ve 27.8).



Şekil 27.7: *Endurance* roketlerin ateşlenmesinin ardından iniş aracı 1 ve Ranger 2'nin tahliyesiyle tekrar kritik yörüngeye fırlatılır. *[Endurance'ın görüntüsü Yıldızlararası'ndan alınmıştır.]*



Şekil 27.8: *Endurance*'ın içindeki Brand'in gözünden Ranger 2 Gargantua'ya doğru inerken, ön plandaki iki *Endurance* parçasıyla birlikte görülüyor. Ranger resmin daha alttaki merkezinde soluk biçimde görülen cisimdir ve etrafını Gargantua'nın birikim diski çevrelemektedir. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

Filmde Brand ile Cooper arasında trajik bir ayrılma konuşması geçer. Brand, Cooper ve TARS'ın iniş aracı ve Ranger kara deliğe giderken Cooper ve TARS'ın neden bunlara eşlik etmesi gerektiğini anlamaz. Cooper ona şairane olsa da sudan bir gerekçe gösterir: "Newton'ın üçüncü yasası. İnsanların bir yere gitmek için bulup bulabildiği tek yol bir şeyi arkada bırakmaktır."

Bunun doğru olduğu kesin. Fakat Cooper ve TARS'ın iniş aracı ve Ranger'la birlikte kara deliğin içine gitmelerinden gelen *Endurance* üzerindeki ek itme müthiş derecede küçüktür. Daha büyük gerçek elbette Cooper'ın Gargantua'nın içine gitmek *istemesidir*. Kendisi ve TARS'ın Gargantua'nın içindeki bir tekillikten kuantum kütleçekim yasalarını öğrenebilmesini ve bunları bir şekilde dünyaya ulaştırmayı umut etmektedir. Bu onun bütün insanlığı kurtarmak için son, çaresiz umududur.

Endurance'ın Edmunds'ın Gezegenine Doğru Yolculuğu

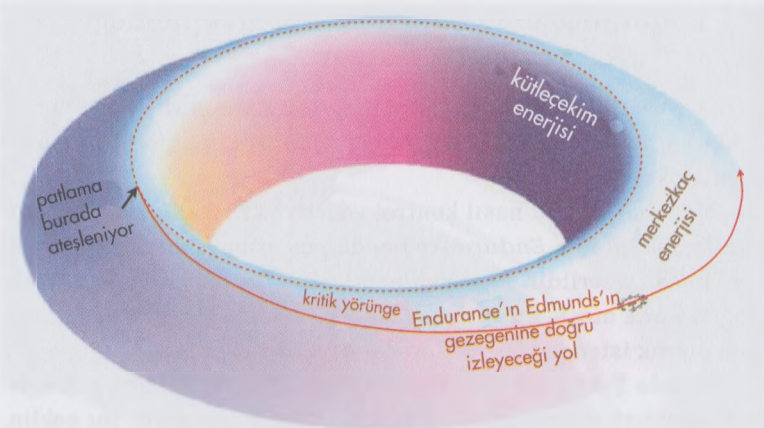
Kritik yörünge Brand ve robot CASE açısından *Endurance*'ı istedikleri yöne, özellikle de Edmunds'ın gezegenine götürmek için ideal noktadır.

Fırlatma yönünü nasıl kontrol ederler? Kritik yörünge çok kararsız olduğu için *Endurance*'ı ondan çıkarmaya küçük bir roket patlaması yeterlidir. Eğer patlama kritik yörüngede tam olarak doğru yerde ateşlenir ve doğru şiddete sahip olursa *Endurance*'ı tam olarak istenen yöne yollayacaktır (Şekil 27.9).

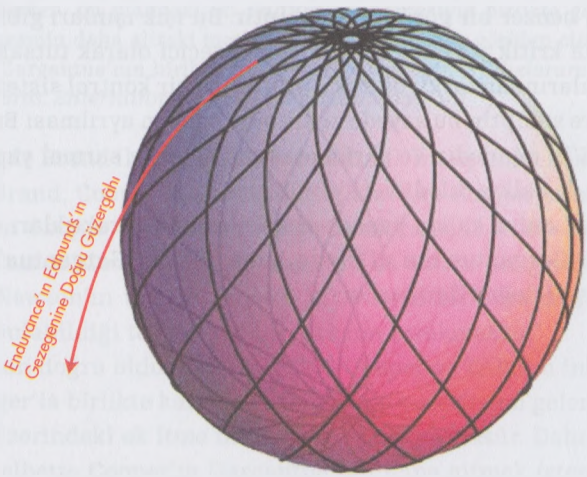
Aslında Şekil 27.9 sizi Brand ve CASE'in istedikleri yöne gidebilecekleri konusunda tam olarak ikna etmeyebilir. Bu şeklin kritik yörüngenin üç boyutlu yapısını yansıtamamasından kaynaklanmaktadır. Bunun için Şekil 27.10'a bakınız.

Bu sarmal kritik yörünge, Gargantua'nın ateş kabuğunun içinde geçici olarak hapsolan ışık ışınlarının izlediği yola (Şekil 6.5 ve 8.2) çok benzer bir görünüme sahiptir. Bu ışık ışınları gibi *Endurance* da kritik yörünge üzerindeyken geçici olarak tutsak düşer. Işık ışınlarından farklı olarak *Endurance* bir kontrol sistemine ve roketlere sahiptir, bu sayede kritik yörüngeden ayrılması Brand'in ve CASE'in elindedir. Ve yörüngenin üç boyutlu sarmal yapısı nedeniyle de kalkış diledikleri yönde olabilir.

Ancak onlar kalkış yaparken arkalarında bıraktıkları Cooper ve TARS Gargantua'nın ufkunun içine dalıyor. Gargantua'nın tekilliklerine doğru ilerliyorlar.



Şekil 27.9: *Endurance*'ın kritik yörüngeden çıkarak Edmunds'ın gezegenine doğru gidişi.



Şekil 27.10: *Endurance*'ın kritik yörüngesinin ve Edmunds'ın gezegenine doğru yola çıkışının üç boyutlu gösterimi. Kritik yörünge Gargantua'yı çevreleyen bir kürenin etrafını sarmalar.

28

GARGANTUA'NIN İÇİNE GİRİŞ BİRAZ KİŞİSEL TARİH

Carl Sagan 1985 yılında kadın kahramanı Eleanore Arroway'i (Jodie Foster) bir kara deliğin içinden geçirip Vega yıldızına göndermek istediğinde ona *HAYIR!* dedim. Kadın kara deliğin içinde ölecekti. Deliğin merkezindeki tekillik onu acı verici ve kaotik bir biçimde parçalarına ayıracaktı. Bu yüzden ona Dr. Arroway'i bir solucandeliğinin içinden göndermesini tavsiye ettim (14. Bölüm).

2013 yılındaysa Christopher Nolan'ı Cooper'ı Gargantua kara deliğinin içine göndermesi için teşvik ettim.

1985 ile 2013 arasındaki çeyrek yüzyılda ne olmuştu? Bir kara deliğin içine düşme konusundaki tutumum neden bu kadar çarpıcı biçimde değişti?

Biz fizikçiler 1985 yılında bütün kara deliklerin içinin kaotik, yıkıcı BKL tekillikleri yüzünden oturmaya elverişsiz olduğunu ve bir kara deliğin içine giren her şeyin tekilliğin germe ve sıkıştırması tarafından imha edileceğini düşünüyorduk (26. Bölüm). Bizim epeyce bilimsel tahminimiz buydu. Yanlış biliyormuşuz.

Aradaki çeyrek yüzyılda kara deliklerin içerisinde matematiksel olarak iki ek tekillik keşfedildi: Bunlar *nazik* tekilliklerdi; elbette bir tekillik ne kadar nazik olabilirse o kadar (26. Bölüm). Bunlardan birinin içine düşen Cooper'ın hayatta kalabilmesine izin vermeye yetecek kadar nazik. Hayatta kalma konusunda benim de şüphelerim var ama emin de olamayız. Bu yüzden şimdi bilimkurguda hayatta kaldığını varsaymanın saygıdeğer bir fikir olduğunu düşünüyorum.

Geride kalan çeyrek yüzyılda ayrıca evrenimizin belki de daha yüksek boyutlu bir yığının içindeki bir zar olabileceğini öğren-

dik (21. Bölüm). Dolayısıyla yığında yaşayan ve Cooper'ı son anda tekillikten kurtarabilecek canlı varlıkların (yığın varlıkların çok ileri bir uygarlığının) olmasını da saygıdeğer bir düşünce olarak değerlendiriyorum. Christopher Nolan'ın seçimi de bu oldu.

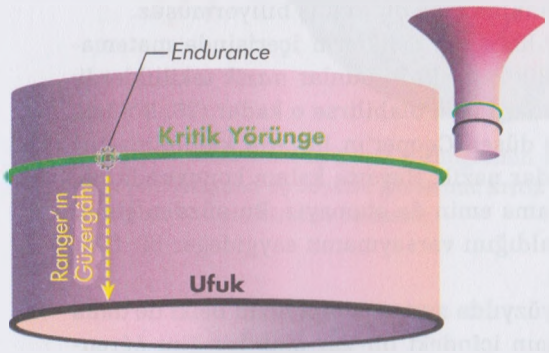
Olay Ufkundan Geçmek

Ⓓ

Yıldızlararası'nda Cooper'ın sürdüğü Ranger 2 (ve TARS'ın pilotluk ettiği iniş aracı 1) *Endurance*'tan ayrıldığında aşağıya Gargantua'nın olay ufkuna doğru sarmal bir hareketle gidiyor ve sonra da içinden geçiyor. Bu aşağıya doğru kıvrılarak gitme konusunda Einstein'ın görelilik yasaları ne diyor?

O yasalara ve bu nedenle benim filmdeki yorumuma göre Brand *Endurance*'tan bakarak Ranger'ın ufka girdiğini asla göremez. Cooper'ın ona ufkun içinden göndermeyi denediği hiçbir sinyal de dışarı çıkamaz. Ufkun içinde zamanın akışı aşağıya doğrudur ve bu aşağı doğru zaman akışı Cooper'ı ve gönderdiği bütün sinyalleri kendisiyle birlikte aşağı doğru, ufuktan uzağa sürükler. *Bkz.* 5. Bölüm.

Öyleyse Brand *ne* görür (elbette eğer o ve CASE Brand'in bir şeyler izlemesine yetecek kadar uzun bir süreliğine *Endurance*'ı stabilize edebilirlerse)? Hem *Endurance* hem de Ranger Gargantua'nın bükülmüş uzayının silindirik kısmının derinliklerinde olduğu için (Şekil 28.1), her ikisi de dairesel açıdan Gargantua'nın dönen uzayı tarafından hemen hemen aynı açısal hızla (aynı yörünge periyoduyla) sürüklenir. Bu yüzden Brand'in



Şekil 28.1: *Endurance*'ın yörüngedeki referans çerçevesinden görüldüğü şekliyle, Ranger'ın Gargantua'nın bükülmüş uzayı içerisinde izlediği yol. *Endurance* görebilmeniz için olduğundan çok daha büyük çizilmiştir. *Küçük resim*: Gargantua'nın bükülmüş uzayının daha büyük bir görünüşü. *[Endurance'ın görüntüsü Yıldızlararası'ndan alınmıştır.]*

yörüngedeki referans çerçevesinde gördüğü görüntüde Ranger *Endurance*'tan ayrıldığında ufuk yönünde hemen hemen dik biçimde aşağıya düşer (Şekil 28.1). Filmde de böyle gösterilir.

Brand Ranger'ın ufka yaklaşmasını izlerken Einstein'ın yasalarının emri gereği Ranger'ın üzerindeki zamanın yavaşladığını ve ardından kendi zamanına göreli olarak donduğunu görmek zorundadır. Bunun birkaç sonucu vardır: Brand Ranger'ın aşağı doğru hareketinin yavaşladığını ve ardından ufkun hemen üzerinde donduğunu görür. Ranger'dan gelen ışığın, Ranger'ın ışığının giderek daha uzun dalga boylarına (giderek daha kırmızı hale gelerek daha düşük sıklıklara) kaydığını görür, en sonunda da Ranger tamamen kararır ve görülemez hale gelir. Cooper'ın Ranger'da ölçtüğü zamana göre bir saniye arayla ilettiği veri parçaları Brand'e Brand'in ölçümüne göre giderek daha büyük zaman aralıklarıyla varır. Birkaç saat sonra Brand Cooper'dan alıp alabileceği en son parçayı, Cooper'ın ufku delip geçmeden önce yolladığı son parçayı alır.

Cooper ise aksine ufku geçtikten sonra bile Brand'den sinyaller almaya devam eder. Brand'in sinyallerinin Gargantua'ya girmesi ve Cooper'a ulaşması açısından herhangi bir sorun yoktur. Cooper'ın sinyalleri dışarıya Brand'e gidemez. Einstein'ın yasaları kesindir. Her şey böyle olmak zorundadır.

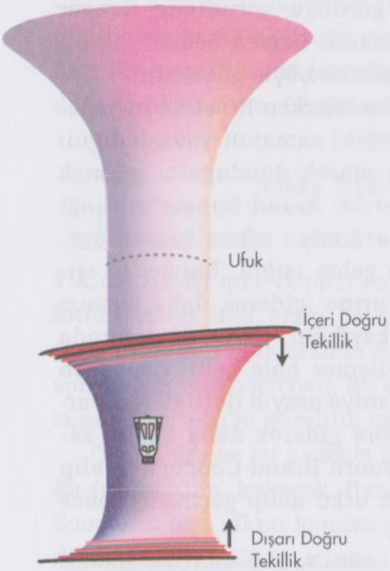
Dahası bu yasalar bize Cooper'ın ufuktan geçerken özel bir şey görmeyeceğini söyler. Yolladığı verilerden hangisinin Brand'e ulaşacak son parça olduğunu, en azından kolayca, bilemez. Kendi etrafına bakınarak ufkun nerede olduğunu tam olarak söyleyemez. Ufuk onun için bir gemiyle üzerinden geçerken dünyanın ekvatorunu fark etmekten farksızdır, ayırt edilemez.

Brand ve Cooper'ın birbiriyle çelişiyor gibi gözüken bu gözlemleri iki şeyin sonucudur: Zamanın bükülmesi ve birbirlerine gönderdikleri bilgi ve ışık açısından sonlu yolculuk zamanı. Bu iki şeyi *beraber* dikkatle düşündüğümde ben hiçbir çelişki görmüyorum.

Tekillikler Arasında Sandviç Olmak

BT

Ranger Cooper'ı Gargantua'nın derinliklerine doğru taşırken Cooper üzerindeki evreni görmeye devam eder. Ona bu görüntüyü getiren ışığın takip edilmesi içeri doğru bir tekilliktir. Tekillik başlan-



Şekil 28.2: Ranger'ın Gargantua'nın içeri doğru ve dışarı doğru tekillikleri arasında kalmasını gösteren bir çizim. Ranger görebilmeniz için olduğundan çok daha büyük çizilmiştir.

gıçta zayıftır, ancak giderek daha fazla nesnenin Gargantua'nın içine düşüp ince bir tabaka halinde toplaşmasıyla birlikte hızla güçlenir (27. Bölüm). Einstein'ın yasaları böyle emreder.

Ranger'ın altındaysa dışarı doğru bir tekillik vardır ve bu kara deliğin içine çok önceden düşmüş ve yukarıya Ranger'a doğru yeniden saçılan nesneler tarafından oluşturulmuştur (27. Bölüm).

Ranger iki tekillik arasında sıkışarak sandviç olur (Şekil 28.2). Kaçınılmaz olarak biri ya da diğeri ona çarpacaktır.

İki tekillik konusundaki durumu Chris'e açıkladığımda o hangisinin Ranger'a çarpacağını hemen bildi. Dışarı doğru tekillik. Neden? Çünkü Chris *Yıldızlararası* için fiziksel cisimlerin zamanda geriye doğru yolculuk etmesini engelleyen bazı fizik yasalarını daha öncesinde benimsemişti (30. Bölüm). İçeri doğru tekilliğe Cooper'ın düşmesinden sonra (dış evrenin zamanıyla, keza dünyanın zamanıyla ölçüldüğünde; sonra) Gargantua'nın içine düşen nesneler sebep olur. Eğer Cooper'a bu tekillik çarpar ve hayatta kalırsa, evrenin uzak geleceği onun geçmişi olacaktır. *Bizim geleceğimizde* o kadar uzakta olacaktır ki, yığın varlıkların yardımıyla bile güneş sistemine (eğer dönebilirse) ancak milyarlarca yıl sonra dönebilecektir. Bu onun kızı Murph'le yeniden birleşmesini engelleyecektir.

Bu yüzden Chris Cooper'a içeri doğru değil, dışarı doğru tekilliğin çarpmasını kesin olarak seçti; Cooper'a Gargantua'nın içine Ranger'dan sonra değil, *Ranger'dan önce* düşmüş nesnelerden doğan tekillik çarpacaktı.

Fakat Chris'in seçimi benim filmdeki bilimsel yorumum açısından bir miktar sorun yaratmaktaydı. Yine de bu zamanda geriye doğru yolculuk kadar büyük bir sorun sayılmazdı. Eğer Ranger

Gargantua'nın içine doğrudan kritik yörüngeden düşerse, o zaman düşüşü içeri doğru tekilliğin ona yetişip çarpabileceği kadar yavaş olur. Chris'in isteği olan, Ranger'a dışarı doğru tekilliğin çarpması içinse, Ranger'ın ışık hızında sökün eden içeri doğru tekillikten neredeyse daha hızlı olması şarttı. Eğer içe doğru büyük bir tepme almışsa Ranger bunu yapabilirdi. Bu nasıl olacaktı? Her zamanki gibi: *Endurance*'tan ayrıldıktan hemen sonra uygun bir orta kütleli kara deliğin etrafından yapılacak sapan atışıyla.

Cooper Gargantua'nın İçindeyken Ne Görür?

İçe doğru düşerken yukarıya baktığında Cooper dış evreni görüyor. Düşüşü hızlandırılmış olduğu için dış evrendeki zamanın kendi zamanıyla kabaca aynı hızda aktığını[1] ve dış evrenin görüntüsünün büyüklüğünün gökyüzünün yaklaşık yarısından çeyreğine kadar azaldığını[2] görüyor.

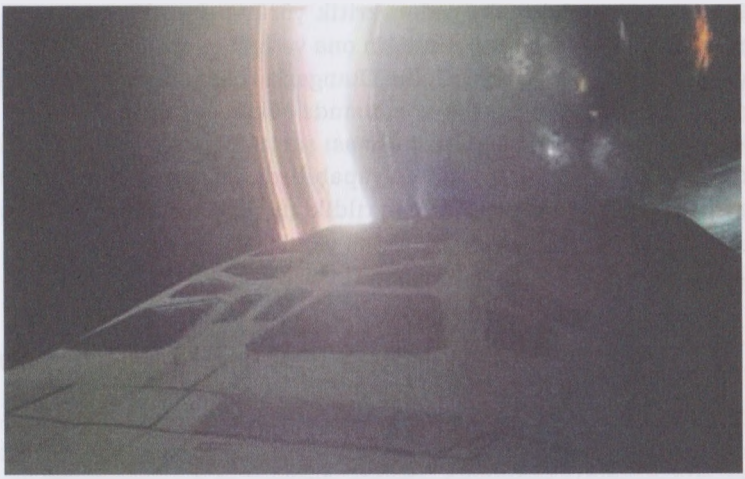
Filmde bunun nasıl gösterildiğini ilk gördüğümde Paul Franklin'in ekibinin bunu doğru verdiğini fark edince çok memnun oldum; hatta benim kaçırdığım bir şeyi de doğru vermişlerdi: Filmde yukarıdaki evrenin görüntüsünün etrafını Gargantua'nın birikim diski çevreler (Şekil 28.3). Bunun neden böyle olması gerektiğini açıklayabilir misiniz?

Cooper tepesinde olan bütün bu şeyleri görür ama içeri doğru tekilliği görmez. Tekillik aşağıya ona doğru ışık hızında hareket etmekte, ona üzerindeki diskin ve evrenin görüntülerini getiren ışık ışınlarının peşinde koşmakta ama yetişememektedir.

Kara deliklerin içinde neler olduğu konusunda biraz cahil olduğumuz için Chris ve Paul'e hayal güçlerini Cooper'ın düşerken altta ona doğru geldiğini gördüğü şeyleri resmetmekte kullanırlarsa daha rahat olacağımı söyledim. Sadece bir ricam oldu: "Lütfen Disney Stüdyolarının *Black Hole* [*Kara Delik*] filminde yaptığı gibi bize kara deliğin içinde oturan Şeytan'ı ve Hades'in ateşlerini göstermeyin." Chris ve Paul kıkırdadılar. Asla şeytana uymayacaklardı.

[1] Teknik dille ifade edersek yukarıdan gelen sinyaller bu hız yüzünden kırmızıya Doppler kayması yaşar, bu da deliğin kütleçekim etkisinin ürettiği maviye kaymayı telafi eder, bu yüzden renkler hemen hemen normal görünür.

[2] Yıldız ışığının sapması nedeniyle.



Şekil 28.3: Cooper'ın Gargantua'nın içinden, Ranger'ınının gövdesi üzerinden yukarıya doğru baktığında gördüğü şekliyle, yukarıdaki evren birikim diski tarafından çevrelenmiş. Gargantua'nın gölgesi soldaki siyah bölgedir. [Yıldızlararası*'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

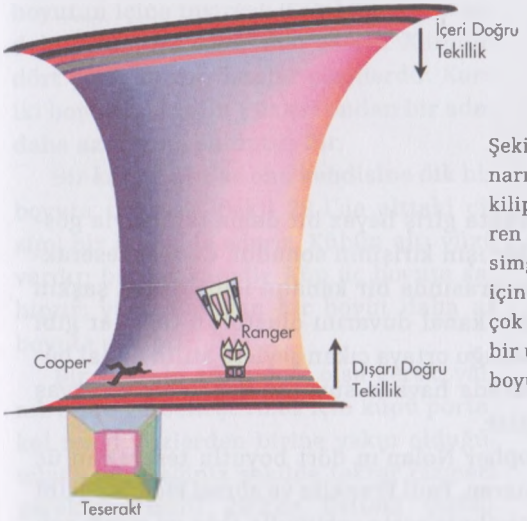
Onların betimlemesi gördüğümde bana çok anlamlı geldi. Aşağı doğru baktığında Cooper kendisinden önce Gargantua'nın içine düşmüş ve hâlâ içe doğru düşmekte olan cisimlerin ışığını görmeliydi. Bu cisimlerin kendisinin ışık yayması gerekmez. Onları, nasıl biz ayı kırınıma uğramış güneş ışığından görüyorsak, o da üstteki birikim diskinden gelen kırınıma uğramış ışıkta görebilir. Beklentim bu cisimlerin çoğunlukla yıldızlararası toz olması yönünde ve bu da Cooper'ın filmde düşerken karşılaştığı sise de açıklık getirir.

Ayrıca Cooper kendisinden daha yavaş seyreden içeri doğru şeyleri de yakalayıp geçebilir. Filmde Ranger'ına çarpıp seken ince beyaz parçaları bununla açıklayabiliriz.

Teserakt Tarafından Kurtarılma (S)

Benim bilimsel değerlendirmeme göre Ranger dışarı doğru tekilliğe yaklaştıkça giderek artan gelgit kuvvetleriyle karşılaşıyor. Cooper tam en son anda dışarı çıkıyor. Gelgit kuvvetleri Ranger'ı parçalıyor. Görsel olarak Ranger ikiye parçalanıyor.

Tekilliğin kenarında Cooper'ı, oraya herhalde yığın varlıklar tarafından yerleştirilmiş olan teserakt (dört boyutlu küp) bekliyor (Şekil 28.4).



Şekil 28.4: Cooper'ı tekilliğin kenarında teserakt tarafından çekilip çıkarılmak üzereyken gösteren bir çizim. Ranger ve Cooper simgeleri sizin görebilmeniz için olmaları gerektiğinden çok çok daha uzakta ve bu çizimde bir uzay boyutu atıldığı için iki boyutlu olarak çizilmiştir.

29

TESERAKT (DÖRT BOYUTLU KÜP)

Yıldızlararası'nda teserakta giriş beyaz bir dama tahtasıyla gösterilir. Her beyaz kare bir ışın kirişinin sonudur. Cooper teseraktın içine girince kirişler arasında bir kanalın içine düşer, şaşkın ve sersemlemiş bir halde kanal duvarını oluşturan tuğlalar gibi görünen ama kitaplar olduğu ortaya çıkan şeylere atılır. Kanal büyük bir odaya açılır, burada havada süzülür, debelenir ve yavaş yavaş ortama uyum sağlar.

Bu özel oda Christopher Nolan'ın dört boyutlu teseraktın üç boyutlu bir yüzünü gösteren, Paul Franklin ve görsel efektler ekibi tarafından üzerinden geçilmiş eşsiz çekimidir. Oda ve etrafı son derece karmaşık bir yapıya sahiptir. İlk gördüğümde bir teseraktın ne olduğunu bilmeme karşın ben de Cooper gibi bir dengemi kaybetme hissi duydum. Chris ve Paul teseraktı o kadar müthiş bir biçimde zenginleştirmişlerdi ki, ancak onlarla konuştuktan sonra tam olarak anlayabildim.

Şimdi ne biliyorsam ve fizikçi gözlerimin filtresinden geçirerek ne öğrenmişsem onu anlatacağım. Standart basit teseraktla başlıyorum, daha sonra Chris'in geliştirilmiş teseraktına geçeceğim.

Noktadan Çizgiye, Çizgiden Kareye, Kareden Küpe, Küpten Teserakta

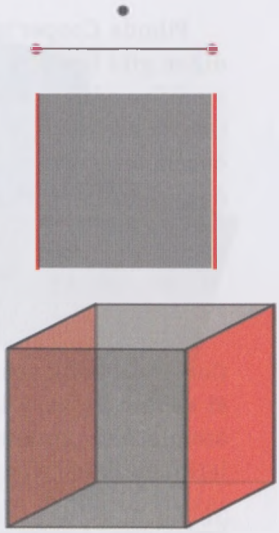
Standart bir teserakt bir hiperküptür, dört uzay boyutuna sahip bir küptür. Bunun ne anlama geldiğini 29.1 ve 29.2 sayılı şekillerde sırasıyla gösteriyorum.

Bir nokta alır (Şekil 29.1'de ilk çizim) ve onu bir boyuta taşırsak bir çizgi elde ederiz. Çizginin iki yüzü (sonu) vardır; bunlar

noktalardır. Çizginin bir boyutu vardır (bir boyut boyunca genişler); yüzlerinin boyut sayısı bir boyut daha azdır: Sıfır.

Bir çizgiyi alır ve onu kendisine dik bir boyutun içine taşırsak (Şekil 29.1'de ortadaki çizim) bir kare elde ederiz. Karenin dört yüzü vardır; bunlar çizgilerdir. Kare iki boyuta sahiptir; yüzleri ondan bir adet daha az boyuta sahiptir: Bir.

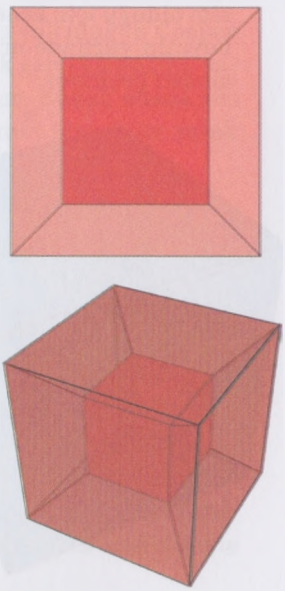
Bir kareyi alır ve onu kendisine dik bir boyuta taşırsak (Şekil 29.1'de alttaki çizim) bir küp elde ederiz. Kübün altı yüzü vardır; bunlar karedir. Küp üç boyuta sahiptir; yüzleri ondan bir boyut daha az boyuta sahiptir: İki.



Şekil 29.1: Noktadan çizgiye, kareye, küpe.

Bir sonraki adım açık olsa gerek, yalnız bunu görselleştirmek için küpü portakal rengi yüzlerden birine yakın olduğunuzda göreceğiniz şekilde tekrar çizmem gerekiyor (Şelil 29.2'de üstteki çizim). Burada özgün kare (küçük, koyu portakal rengindeki) kübü oluşturmak için size doğru hareket ettirildiğinde kübün ön yüzü, dıştaki kare olacak şekilde genişlemiş gibi görünüyor.

Bir kübü alır ve onu kendisine dik bir boyuta taşırsak (Şekil 29.2'de alttaki çizim) bir teserakta ulaşırız. Teseraktın resmi bir üstteki resme, kübün resmine benzerdir: Birbirinin içerisinde iki küp gibi görünür. Resimde içteki küp teseraktın dört boyutlu hacmini süpürmek için dışa doğru genişlemiştir. Teseraktın sekiz yüzü vardır; her biri bir küptür. (Tespit edip sayabilir misiniz?) Teserakt dört uzay boyutuna sahiptir; yüzleri ondan bir boyut daha az sayıda boyut sahibidir: Üç. Hem teserakt hem de yüzleri bir zaman boyutuna sahiptir, resimde gösterilmemiştir.



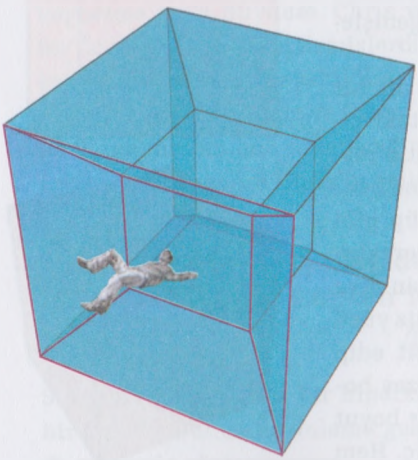
Şekil 29.2: Küpten teserakta.

Filmde Cooper'ın girdiği oda, her ne kadar daha önce söylediğim gibi Chris ve Paul tarafından zeki ve karmaşık bir biçimde modifiye edilmiş olsa da, teseraktın kübik sekiz yüzünden biridir. Gerçekleştirdikleri akıllıca değişiklikleri açıklamadan önce filmin önceki teserakt sahnelerine ilişkin yorumumu anlatmak için standart basit teseraktı kullanacağım.

Cooper Teseraktın İçerisinde Taşınıyor

Cooper elektrik ve nükleer kuvvetlerce bir arada tutulan ve hepsi sadece üç uzay boyutu ve bir zaman boyutunda var olabilen atomlardan yapılmış olduğu için, teseraktın üç-uzay-boyutlu yüzlerinden (küplerinden) birinin içinde kalmaya mahkûmdur. Teseraktın dördüncü uzay boyutunu tecrübe edemez. Şekil 29.3 onu, kenarlarını benim mor çizgilerle beliginleştirdiğim teseraktın ön yüzünde yüzerken gösteriyor.

Benim filmdeki yorumumda teserakt tekillikten yığının içine yükseliyor. Yığınla aynı uzay boyutu sayısına sahip (dört) bir cisim olduğu için kendisine yığında kolaylıkla yer bulabiliyor. Ve üç boyutlu yüzünde misafir olan üç boyutlu Cooper'ı yığının içerisinden geçiriyor.



Şekil 29.3: Cooper teseraktın üç boyutlu yüzünün içinde.

Bu noktada Gargantua'nın dünyaya uzaklığının bizim zarımızdaki (bizim üç uzay boyutuna sahip evrenimizdeki) ölçüme göre yaklaşık 10 milyar ışık yılı olduğunu hatırlatalım. Fakat yığının içindeki ölçüme göre bu uzaklık yalnızca 1 AU (astronomik birim; güneş ile dünya arasındaki mesafe) kadardır; *bkz.* Şekil 23.7. Bu yüzden benim yorumumda teserakt, artık yığın varlıklar hangi sevk sistemini sunuyorsa onunla yolculuk ederek Cooper'ı yığın aracılığıyla evrenimizin öte yakasındaki dünyaya hızla taşıyabiliyor.



Şekil 29.4: Cooper teseraktın bir yüzünün içinde taşınarak yığının içerisinden bizim zarımızın üstüne getiriliyor. Bu resimde bir uzay boyutu çıkarılmıştır.

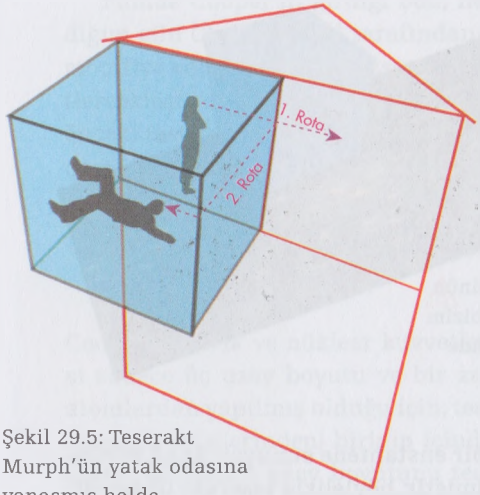
Şekil 29.4 bu yolculuktan bir enstantene sunuyor. Anlık görüntüden bir uzay boyutu eksiltilmiştir, böylelikle teserakt üç boyutlu bir yığının içindeki üç boyutlu bir küp olmakta ve Cooper bizim iki boyutlu evrenimize (zarımıza) paralel seyahat eden kübün iki boyutlu bir yüzünün içindeki bir adamın iki boyutlu gösterimiyle karşımıza çıkmaktadır.

Filmde gösterilenle uyumlu olması için bu yolculuğun Cooper hâlâ düşmekten şaşkın bir haldeyken çabucak gerçekleştiğini, sadece birkaç dakika sürdüğünü hayal ediyorum. Büyük odada süzülürek dinlenmeye henüz başlamışken teserakt Murph'ün yatak odasının yanı başına yanaşıverir.

Yanaşma Sırasında: Murph'ün Yatak Odasının Görünümü

Bu yanaşma nasıl gerçekleşiyor? Benim yorumuma göre dünyanın yakınındaki yığının içine ulaşan teserakt Murph'ün yatak odasına ulaşmak için bizim zarımızı kaplayan 3 santimetre kalınlığındaki AdS katmanının içinden geçmek zorundadır (23. Bölüm). Herhalde teseraktı inşa eden yığın varlıklar inişinin önündeki engeli kaldırmak için onu AdS katmanını bir kenara itebilecek teknolojiyle donatmışlardır.

Şekil 29.5 bu engel kaldırıldıktan sonra teseraktın Cooper'ın çiftlik evindeki Murph'ün odasının yanına yanaşmış halini gös-



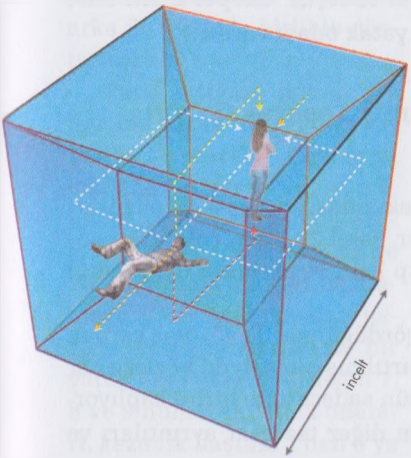
Şekil 29.5: Teserakt Murph'ün yatak odasına yanaşmış halde.

teriyor. Burada yine uzay boyutlarından biri çıkartılmıştır; böylece teserakt üç boyutlu bir küp olarak, çiftlik evi, yatak odası, Murph ve elbette Cooper iki boyutlu olarak gösterilmiştir.

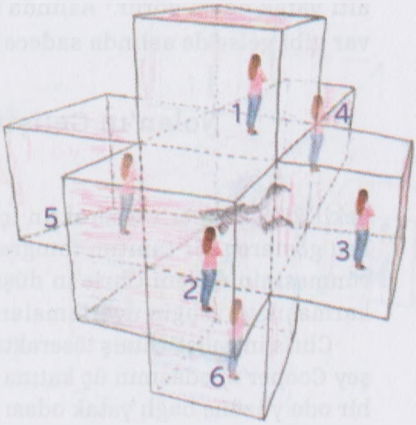
Teseraktın arka yüzü Murph'ün yatak odasıyla örtüşmektedir. Bunu biraz daha ayrıntılı olarak açıklayalım. Arka yüz teseraktın üç boyutlu bir kesitidir ve Murph'ün yatak odasının içinde yer alışı Şekil 22.2'de bir kürenin dairesel kesitinin iki boyutlu bir zarın içinde yer almasıyla ve Şekil 22.3'te bir hiperkürenin küresel kesitinin üç boyutlu bir zar içerisinde yer almasıyla benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla Murph'ün yatak odasındaki her şey, buna Murph dahil, aynı zamanda teseraktın arka yüzünün içindedir.

Murph'ten çıkan bir ışık ışını Murph'ün yatak odası ile teseraktın ortak kenarına ulaştığında gidebileceği iki yer vardır. Işın bizim zarımız içinde kalabilir: Şekil 29.5'teki 1. Rotayı izleyerek açık bir kapıdan dışarı çıkar ya da bir duvarın içine girerek soğurulur. Veya ışın teseraktın içinde kalabilir: 2. Rotayı izleyerek bir sonraki teserakt yüzüne girer ve geçer ve ardından Cooper'ın gözlerine ulaşır. Işının fotonlarından bazıları 1. Rotayı izler; diğerleri 2. Rotayı izler ve Cooper'a Murph'ün görüntüsünü ulaştırır.

Şimdi daha önce dahil etmediğimiz boyutu yeniden eklediğim Şekil 29.6'ya bakalım. Bulunduğu odanın sağ duvarının içinden baktığında Cooper Murph'ün yatak odasının içini sağ duvarının içinden görüyor (sağdaki beyaz ışık ışını). Odasının sol duvarının içinden baktığında Cooper Murph'ün yatak odasının içini sol duvarının içinden görüyor (soldaki beyaz ışık ışını). Arkasındaki duvarın içinden baktığında yatak odasının içini arka duvarının içinden görüyor. Önündeki duvarın içinden baktığında (portakal



Şekil 29.6: Cooper Murph'ün yatak odasının içini (portakal rengi köşeler) teseraktın yüzünün altı duvarının her birinden (mor köşeler) bakarak görebiliyor. Bu çizimde şahsen Murph'ü görmesini tercih ettik.



Şekil 29.7: Murph'ün yatak odasının Cooper'ın kendi teserakt yüzünden gördüğü altı görünümü. *[Çizim bana aittir.]*

rengi ışık ışını) yatak odasının içini ön duvarın içinden görüyor. (Şekil 29.6'da görülmüyor olsa da bunun neden doğru olduğunu açıklayabilir misiniz?) Sarı ışını izleyerek baktığında Murph'ün tavanından aşağıyı görüyor. Kırmızı ışın boyunca baktığında tabanın içerisinden görüyor. Cooper bakış yönünü değiştirdikçe sanki Murph'ün yatak odasının etrafını dönüyor gibi oluyor. (Geliştirilmiş teseraktını ilk gösterdiğinde Chris de durumu bana böyle anlattı.)

Şekil 29.6'da altı ışık ışınının hepsi de Murph'ün yatak odasına ulaşmadan önce ara küplerin (teserakt yüzlerinin) içinden geçmek zorundadır. Filmde Cooper'ın odasından yatak odasına giderken önemli bir mesafe kat etmezler, bu yüzden Chris ve Paul teseraktı bir boyuta büzüştürmek zorundaydılar; Şekil 29.6'daki gri ok ve "incelt" işareti bu nedenle koyulmuştur.

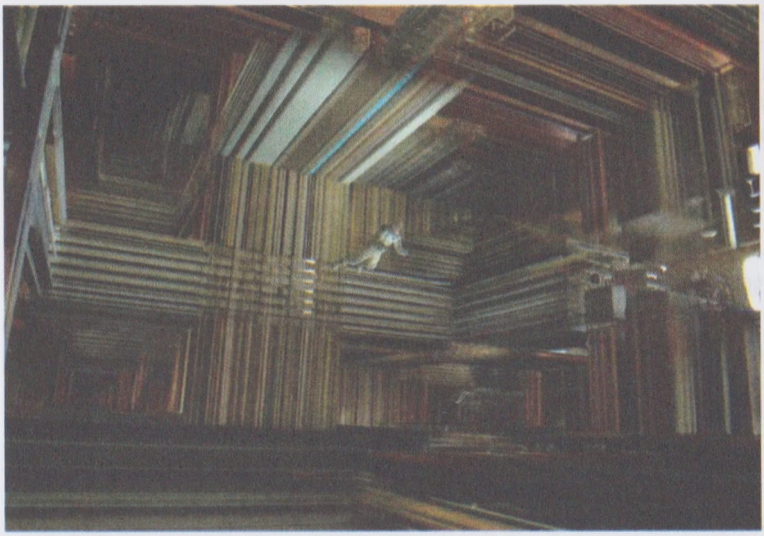
Bu büzüştürmenin ardından Cooper'ın odasının bütün yüzleri araya giren hiçbir boşluk olmadan, derhal ve doğrudan Murph'ün yatak odasının yüzlerinden birinin içine bakar, böylece Cooper açısından durum Şekil 29.7'deki gibi gözükür. Her biri odasının bir yüzüyle sınırı olan ve baktığı yön hariç hepsi birbiriyle özdeş

altı yatak odası görür.[1] Aslında hepsi özdeştir. Cooper'a altı adet var gibi gelse de aslında sadece bir yatak odası vardır.

Nolan'ın Geliştirilmiş Teseraktı

Şekil 29.8 Cooper'ı teseraktın içindeki odasında havada süzülürken gösteren bir tanıtım fotoğrafıdır. Şekil 29.7'den çok farklı görünmesinin nedeni Chris'in düşünüp Paul ve ekibinin uyguladığı karmaşık ve zengin uyarlamalardır.

Chris'in geliştirilmiş teseraktını gördüğümde ilk gözüme çarpan şey Cooper'ın odasının üç katına çıkartılmış olmasıydı, böylece her bir oda yüzüne bağlı yatak odası yüzün sadece üçte birini kaplıyordu. Bunu Şekil 29.9'da kullanılmayan diğer teserakt ayrıntıları ve



Şekil 29.8: Cooper Nolan'ın geliştirilmiş teseraktının içinde süzülüyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

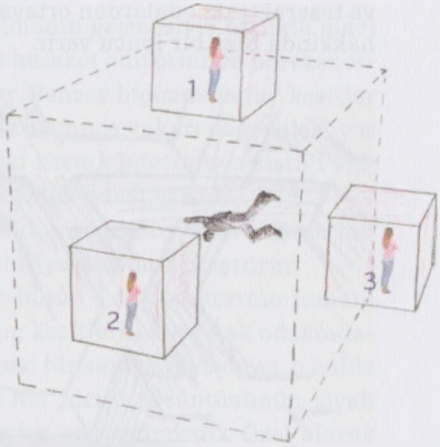
[1] Şekil 29.7'de Cooper baş aşağı devrilmiştir, bu yüzden Şekil 29.6'daki gibi Murph'ün başının üstüne bakmaktadır. Bu 2, 3, 4 ve 5 numaralı duvar görüntülerinde Murph'ün de devrilmesini gerektirir. Fakat Murph'ün dört görüntüde baş aşağı ve ikisinde sağ tarafında gösterilmesi izleyici kitlesi için kafa karıştırıcı olurdu, bu yüzden duvar görüntüleri burada da, filmde de ters çevrilmedi.

odanın görüntüye girmeyen arka üç yüzüyle birlikte gösteriyorum.[2]

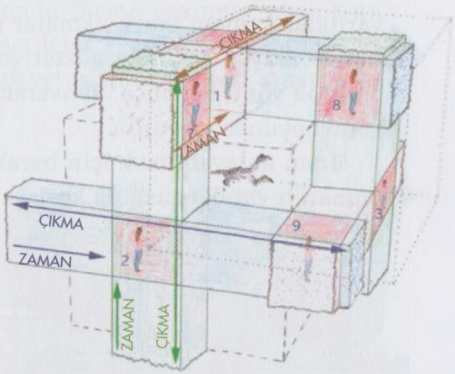
Fark ettiğim ikinci şey her bir yatak odasından dışarıya çıkarak Cooper'ın odasına çapraz iki yönde uzanan iki çıkma oldu (Şekil 29.10 ve 29.11). Chris ve Paul'ün bana yaptığı açıklamaya göre bu çıkmalar nerede kesişiyorsa orada bir yatak odası vardı; örneğin 7, 8 ve 9 numaralı yatak odaları, keza ilk baştaki 1'den 6'ya kadar olan yatak odaları.

Çıkmalar sınırları belirsiz biçimde uzanır ve kesişim yerlerinde yatak odaları ve Cooper'ınki gibi odalardan[3] oluşmuş sonsuz görünümlü bir örgü yaratır [Şekil 29.10'daki kesikli kenarlar]. Örneğin 7, 8 ve 9 numaralı yatak odası yüzleri kenarları noktalarla gösterilmiş olan bir odanın içine bakmaktadır; bu odanın arka-sol-alt köşesi Cooper'ın odasının ön-sağ-üst köşesiyle çakışmaktadır.

TARS Cooper'a "Burada zamanın bir fiziksel boyut olarak gösterildiğini gördün" derken yatak odaları



Şekil 29.9: Coober'ın odasının boyutları üç katı çıkarıldı ve böylece altı yatak odası onun odasının yüzlerinin merkezine oturtuldu. [*Çizim bana aittir.*]

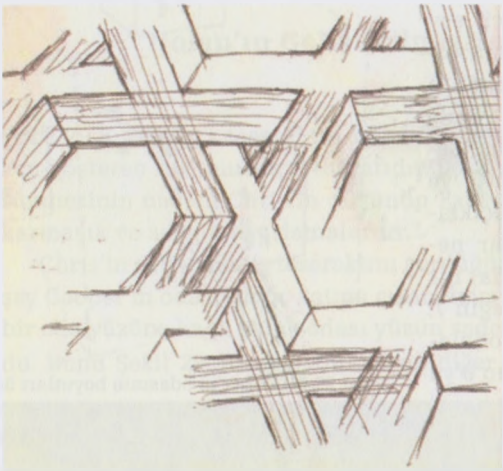


Şekil 29.10: Çıkmalar bütün yatak odalarından dışarı uzanıyor ve zaman onlarla birlikte akıyor. [*Çizim bana aittir.*]

[2] Filmde Murph'ün odası küp şeklinde değildir; boyu, eni ve yüksekliği 6 metre, 5 metre ve 3 metredir ve Cooper'ın odası da her boyutun üç katıdır: 18, 15 ve 9 metre. Kolaylık olması için ben hepsini küp şeklinde gösterdim.

[3] Chris ve Paul bu odalara "boşluklar" diyorlardı, çünkü bunlar hiçbir çıkmanın geçmediği bölgelerdi.

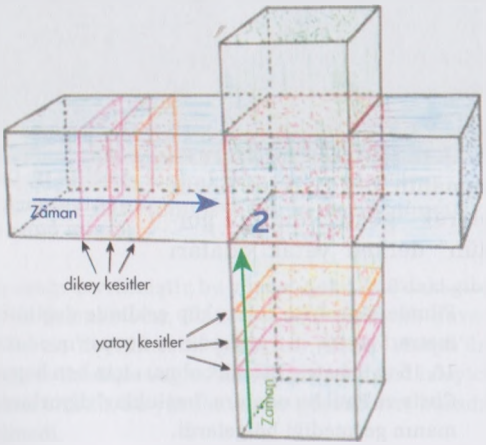
ve teserakttaki odalardan ortaya çıkan örgü ve çıkmaların anlamı hakkında bize bir ipucu verir.



Şekil 29.11: Christopher Nolan'ın geliştirilmiş teserakt fikrini oluştururken çalışma defterine çizdiği çıkmaların oluşturduğu örgü.

Chris ve Paul benim için bu ipucuna açıklık getirdiler. Yığın varlıklar zamanı mavi çıkmalar için Şekil 29.10'daki mavi ok yönünde akıyor şeklinde gösteriyorlardı; zaman yeşil çıkmalarda yeşil ok yönü boyunca, kahverengi çıkmalarda da kahverengi ok yönü boyunca akıyordu.

Bunu anlayabilmek için beraberce Şekil 29.12'de gösterilen, 2 numaralı yatak odasında kesişen çıkma çiftine bakalım. Resimde



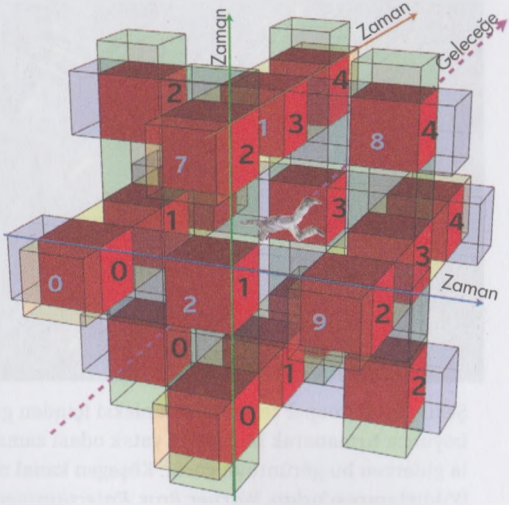
Şekil 29.12: Murph'ün yatak odasının iki çıkma boyunca hareket eden kesitleri. Yatak odası (2) iki kesit kümesinin kesiştiği yerde yer alıyor. *[Çizim bana aittir.]*

dik olan odadan geçen kesitler zamanın geçmesiyle birlikte mavi zaman okunu izleyerek sağ yönde hareket ediyorlar ve hareket ettikçe mavi çıkmayı oluşturuyorlar. Benzer biçimde yatay kesitler de zaman geçtikçe yeşil zaman oku boyunca yukarı doğru ilerliyor ve yeşil çıkmayı yaratıyorlar. Bu iki kesit kümesinin kesiştiği yerde (çıkmaların kesiştiği yerde) bir yatak odası vardır.

Aynısı diğer bütün çıkmalarda da geçerlidir. İki çıkmanın her kesişmesinde taşıdıkları kesitler bir yatak odası oluşturur.

Kesitlerin sonlu hızı nedeniyle bütün yatak odalarının zamanı birbiriyle uyumlu değildir. Örneğin kesitlerin bir yatak odasındaki çıkmayı izleyerek diğerine gitmesi bir saniye sürüyorsa, o halde Şekil 29.13'teki yatak odalarının her biri 0 görüntüsünün siyah renkle gösterilen saniye sayısı kadar geleceğindedir. Özel olarak belirtirsek; yatak odası 2 yatak odası 0'ın bir saniye ilerisinde, yatak odası 9 yatak odası 0'ın iki saniye ilerisinde ve yatak odası 8 yatak odası 0'ın dört saniye ilerisindedir. Neden böyle olduğunu açıklayabilir misiniz?

Filmde bitişik yatak odaları arasındaki zaman kayması tam bir saniye değil, bir saniyenin onda birine yakındır. Murph'ün yatak odasının penceresindeki perdeler rüzgârda dalgalanırken bitişik yatak odalarını dikkatle izleyerek yatak odaları arasındaki zamanı tahmin edebilirsiniz.

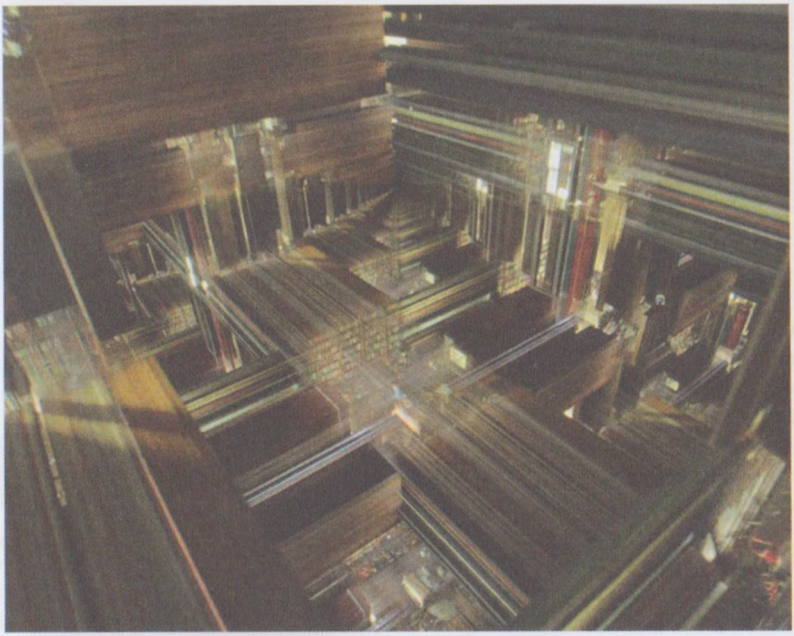


Şekil 29.13: Hareket eden kesitlerin (çıkmaların) kesişimleri sonucu ortaya çıkan yatak odaları örgüsünün bir bölümü. Mavi sayılar daha önceki şekillerdeki numaralandırma sisteminin bir devamı olarak belirli yatak odalarını gösteriyor. Yatak odalarındaki siyah sayılar, o yatak odasının yatak odası 0'ın *geleceğinde* sahip olduğu zaman miktarını göstermektedir. Kesikli mor ok Cooper'ın yatak odasının geleceğine en hızlı şekilde gidebileceği yönü göstermektedir

Elbette filmdeki teseraktın içindeki her yatak odası Murph'ün zamanın belirli bir anındaki (Şekil 29.13'te siyahla gösterilen zamandaki) gerçek yatak odasıdır.

Cooper yatak odası çıkmalarının içindeki zamanın akışından çok daha hızlı hareket edebilir, böylece teserakt kompleksi içinde kolayca seyahat ederek yatak odası zamanlarından dilediğine gidebilir!

Murph'ün yatak odası zamanının geleceğine en hızlı şekilde gitmek için odasındaki bir köşegeni izleyerek mavi, yeşil, kahverengi zamanların artış yönünde (sağa, yukarıya, içe doğru), yani Şekil 29.13'teki kesikli mor çizgi boyunca hareket etmesi gerekir. Böylesi köşegenler çıkmalardan yoksundur; Cooper'ın üzerinde yolculuk edebileceği açık kanallardır. Filmde onun eski hayaletvari kitap düşmelerinin gerçekleştiği yatak odası zamanından kol saatinin tıkladığı yatak odası zamanına gitmek için böyle bir açık çapraz kanal boyunca yolculuk ettiğini görüyoruz (Şekil 29.14).



Şekil 29.14: Cooper teserakt kompleksi içinden geçen köşegen bir kanal boyunca tırmanarak Murph'ün yatak odası zamanının geleceğine hızla giderken bu görüntüyü görür. Köşegen kanal resmin üst ortasındadır. [Yıldızlararası *'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.*]

Cooper kompleksin içinde yukarı ve aşağı çapraz biçimde hareket ederken gerçekten zamanda ileri ve geriye doğru yolculuk mu etmektedir? Bahsedilen zamanda ileriye ve geriye gitme Amelia Brand'in yığın varlıklarına atfettiğiyle aynı mı? "Onlar için zaman belki de herhangi bir fiziksel boyuttan başka bir şey değil. Onlar için geçmiş içine inebildikleri bir vadi, gelecek de üzerine tırmanabildikleri bir dağ olabilir. Ama bizim için öyle değildir. Tamam mı?"

Yıldızlararası'nda zaman yolculuğuna hükmeden *yasalar* nelerdir?

30

GEÇMİŞE MESAJ YOLLAMAK
Filmi İzleyenler İçin Belirlenen İletişim Kural Kümeleri

Ⓓ

Christopher Nolan *Yıldızlararası*'nın yönetmeni olup senaryoyu yeniden yazmadan önce, kardeşi Jonah bana kural kümelerini öğretti.

Bir bilimkurgu filminde hedeflenen gerilim düzeyini elde etmek için, dedi Jonah, izleyiciye oyunun kurallarının, filmin "kural kümesinin" söylenmesi şarttır. Fizik yasaları ve çağın teknolojisi neye izin verir ve neyi yasaklar? Kurallar açık değilse, bu durumda birçok izleyici kahramanı beklenmedik biçimde kurtaracak mucizevi bir olayın beklentisine girecek ve gerilim olması gereken düzeyde olmayacaktır.

Elbette seyirciye "Bu filmin kural kümesi şöyle..." diyemezsiniz. Bunun ustalıkla ve doğal bir şekilde iletilmesi gerekir. Ve işte Chris bu işin ustası. Kural kümelerini karakterlerinin diyalogları yoluyla izleyiciye iletiyor. *Yıldızlararası*'nı bir sonraki izleyişinizde diyaloglarda kural kümesini veren bu izleri yakalamaya çalışmanızı tavsiye ederim.

Christopher Nolan'ın Zaman Yolculuğu Konusundaki Kural Kümesi

Ⓢ

Zamanda geriye yolculuğun hemen hiç bilinmeyen topraklar niteliği taşıyan, dolayısıyla biz fizikçilerin neye izin verilip neye izin verilmediğini bilmediğimiz kuantum kütleçekim yasalarınca yönetildiği ortaya çıktı (aşağıda açacağım).

Chris izin verilen ve yasaklanan zaman yolculuğu konusunda iki özel seçim yaptı ve bunlar onun kural kümesini oluşturdu:

Kural 1: Üç uzay boyutuna sahip fiziksel cisim ve alanlar, örneğin insanlar ve ışık ışınları bizim zarımızın içinde bir konumdan diğerine zamanda geriye gidemedikleri gibi taşıdıkları bilgi de gidemez. Fizik yasaları ya da uzayzamanın gerçek bükülmesi bunu engeller. Bu, cisimler ister sonsuza dek zarımızın içinde kalıyor olsun ister bizim zarımızın içindeki bir noktadan diğerine bir teseraktın üç boyutlu yüzeyi içinde seyahat ediyor olsunlar geçerlidir. Bu yüzden örneğin Cooper kendi geçmişine asla gidemez.

Kural 2: Kütleçekim kuvvetleri bizim zarımızın geçmişine mesaj taşıyabilir.

Filmde Kural 1 gayet iyi bir gerilim yaratıyor. Cooper Gargantua'nın yanında oyalanırken Murph giderek yaşlanıyor. Zamanda geriye yolculuk olasılığı olmadığı için Cooper'ın Murph'e bir daha asla geri dönememe tehlikesi artıyor.

Kural 2 Cooper'a umut veriyor. Bu, kütleçekimini kullanarak zamanda geriye doğru genç Murph'e kuantum verilerini iletmesi ve onun da Profesörün denklemini çözerek insanlığın dünyadan ayrılmasını sağlaması umududur.

Bu kurallar *Yıldızlararası*'nda nasıl gerçeklik kazanıyor?

Murph'e Mesaj Yollanması

Teseraktın içine düşüp orada dolaşırken Cooper gerçekten de zamanda bizim zarımızın zamanına göreli olarak geriye doğru, Murph'ün yaşlı bir kadın olduğu dönemden on yaşındaki haline yolculuk ediyor. Bunu teserakttaki yatak odalarından Murph'e bakarken onu on yaşında görmesiyle yapıyor. Murph'e hangi yatak odasındayken bakacağını seçme yoluyla çeşitli yatak odası zamanlarında bakabilmesi anlamında Cooper bizim zarımızın zamanına (yatak odasının zamanına) göreli olarak geriye ve ileriye doğru hareket edebiliyor. Cooper bizim zarımıza tekrar girmediği için bu Kural 1'in çiğnenmesi anlamına gelmiyor. Zarımızın dışında, teseraktın üç boyutlu kanalının içinde kalıyor ve Murph'ün

yatak odasına, Murph'ten kendisine zamanda ileriye doğru yolculuk eden ışık aracılığıyla bakıyor.

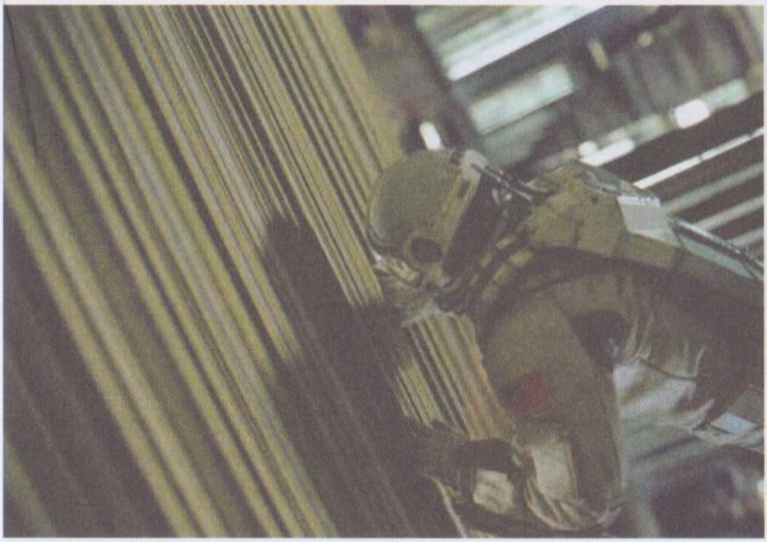
Fakat Cooper Murph'ün on yaşındaki döneminde zarımızın içine yeniden giremediği için de ona ışık yollayamıyor. Bunu yapsa Kural 1'i ihlal etmiş olurdu. Oysa ışık Murph'e kendi geleceği olan Cooper'ın kişisel geçmişinden bilgi getirebilirdi; kendisinin yaşlı bir kadın olduğu bu dönemden gelen bilgi, bizim zarımızın içinde bir yerden başka bir yere zamanda geriye doğru veri anlamına gelirdi. Demek ki on yaşında yatak odasında olan Murph ile teserakttaki Cooper arasında tek yönlü bir aynaya ya da bir kara deliğin ufkuna benzetebileceğimiz bir tür tek yönlü uzayzaman bariyeri var. Işık Murph'ten Cooper'a gelebilir ama Cooper'dan Murph'e gidemez.

Benim *Yıldızlararası*'na ilişkin bilimsel yorumuma göre tek yönlü bariyerin basit bir açıklaması var: Cooper teseraktın içinde her zaman on yaşındaki Murph'ün geleceğindedir. Işık geleceğe doğru Murph'ten ona yolculuk edebilir. Geçmişe doğru, ondan Murph'e yolculuk edemez.

Fakat Cooper'ın keşfettiği gibi kütleçekim bu tek yönlü bariyeri aşabilir. Kütleçekim sinyalleri zamanda geriye, Cooper'dan Murph'e gidebilir. Bunu ilk kez Cooper Murph'ün kitaplığındaki kitapları çaresizce dışarıya ittirdiğinde görürüz. Şekil 30.1 filmin bu sahnesinden bir enstanteneyi göstermektedir.

Filmdeki bu görüntüyü açıklamak için Chris ve Paul'ün bana anlattığı gibi benim de size yatak odası çıkmalarından biraz daha bahsetmem gerekiyor. Benim Şekil 30.2'de konu dışı şeyleri ayıklayarak tekrar gösterdiğim, Şekil 29.10 ve 29.12'de önde yer alan mavi çıkmaya bir daha bakalım. Bu çıkmanın Murph'ün yatak odasının içinden, mavi yönü izleyerek (sağ yönde) yatak odası zamanında ileriye yolculuk ederek geçen bir dikey kesitler kümesi olduğunu hatırlatalım.

Yatak odasındaki her bir cisim, örneğin her bir kitap yatak odasının çıkmasına katkıda bulunmaktadır. Aslında kitap kendi çıkmasına sahiptir ve bu yatak odasının daha büyük çıkmasının bir parçası olarak mavi ok yönünde zamanda ileriye doğru hareket eder. Biz fizikçiler bu çıkma türüne kitabın "dünya tüpü" deriz. Kitabın içindeki her bir madde parçacığının çıkmasına da parçacığın "dünya çizgisi" diyoruz. Dolayısıyla kitabın dünya tüpü, ki-



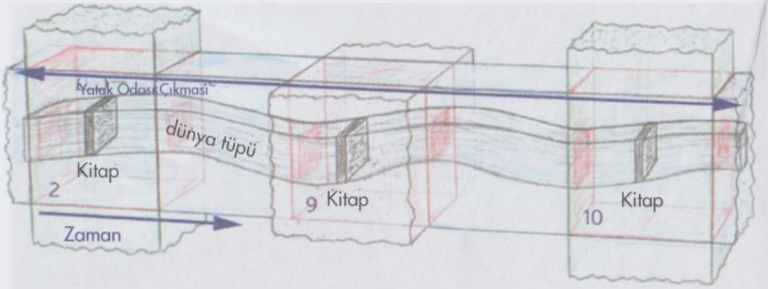
Şekil 30.1: Cooper sağ elini bir kitabın dünya tüpünü itmek için kullanıyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

tabı oluşturan bütün parçacıkların dünya çizgilerinin bir demetidir. Chris ve Paul de bu dili konuşmaktadırlar. Filmde gördüğünüz çıkmalar boyunca uzanan ince çizgiler, Murph'ün yatak odasının içindeki madde parçacıklarının dünya çizgileridir.

Şekil 30.1'de Cooper kitabın dünya tüpüne yumruğuyla tekrar tekrar vurarak bir kütleçekim kuvveti yaratıyor ve bu zamanda geriye doğru, Murph'ün yatak odasını Cooper'ın gördüğü ana gidiyor ve ardından da kitabın dünya tüpünü ittiriyor. Kitabın tüpü hareket ederek yanıt veriyor. Tüpün hareketi Cooper'a onun ittirmelerine anlık bir yanıt gibi geliyor. Ve hareket tüpten sol aşağıya doğru hareket eden bir dalga halini alıyor (Şekil 30.2)[1]. Hareket yeterince güçlü hale gelince kitap kitaplıktan aşağı düşer.

Cooper TARS'tan kuantum verilerini aldığı sırada artık bu iletişim yönteminde ustalaşmıştır. Filmde onu bir saatin yelkovanının dünya tüpü üzerine parmağıyla bastırırken görüyoruz. Onun bastırmaları zamanda geriye doğru bir kütleçekim kuvveti

[1] Neden sola doğru? Tüp, yatak odası zamanının bütün anlarında bu yüzden hep aynı çapraz konumdadır. Bunu bir düşünün derim.



Şekil 30.2: Murph'ün yatak odasının çıkması içerisindeki bir kitabın dünya tüpü. Kitap ve kitabın dünya tüpü gerçekte olduklarından çok daha büyük çizilmiştir. *[Çizim bana aittir.]*

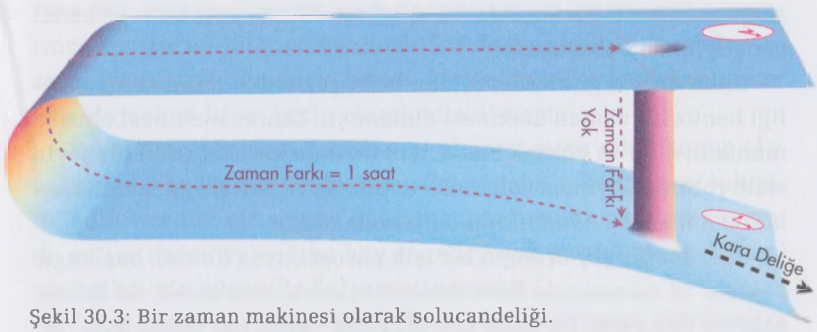
üretiyor ve bu yelkovanın tıklamasını kuantum verilerini taşıyan bir Mors alfabesi mesajına çeviriyor. Teserakt tıklama şablonunu yığının içinde depoluyor ve mesaj böylece tekrar tekrar yineleniyor. Kırk yaşındaki Murph otuz yıl sonra yatak odasına tekrar geldiğinde yelkovanı hâlâ tıklar halde buluyor ve Cooper'ın ona yollamak için o kadar uğraştığı şifreli kuantum verilerini tekrar tekrar yinelediğini görüyor.

Zamanda geriye doğru kütleçekim kuvveti nasıl işliyor? İsterseniz bu konuda bir fizikçi olarak değerlendirmemi aktarmadan önce zamanda geriye doğru yolculuk konusunda bildiklerimi ya da bildiğimi düşündüklerimi size anlatayım.

Bir Yığın Olmadan Zamanda Yolculuk: Bu Konuda Bildiğimi Düşündüklerim (BT)

Carl Sagan'ın harekete geçirmesiyle (14. Bölüm) 1987 yılında solucandelikleri hakkında hayret verici bir şey fark ettim. Fizik yasaları solucandeliklerine izin veriyorsa, o zaman Einstein'ın görelilik yasaları da onların zaman makinelerine dönüştürülmesine izin verecektir. Bunun çok hoş bir örneği bir yıl sonrasında Rusya, Moskova'dan yakın arkadaşım Igor Novikov tarafından keşfedildi. Igor'un örneği, Şekil 30.3, bir solucandeliğinin zaman makinesine dönüşümünün zeki varlıkların yardımı olmadan, doğallığında gerçekleşebileceğini gösteriyordu.

Şekil 30.3'te solucandeliğinin alttaki ağzı bir kara deliğin yörüngesinde yer alıyor, üstteki ağzıysa kara delikten uzakta. Kara



Şekil 30.3: Bir zaman makinesi olarak solucandeliği.

deliğin yoğun kütleçekim kuvveti nedeniyle Einstein'ın zaman bükülmeleri yasası, zamanın alttaki ağızda üstteki ağızdan daha yavaş akmasını emrediyor. Daha yavaş derken, kütleçekimin yoğun etkisinin yolu boyunca karşılaştırıldığında daha yavaş demek istiyoruz; kastedilen dış evrenden geçen kesikli mor yoldur. Somut olması için bunun bir saatlik bir gecikme doğurduğunu varsayıyorum; böylece dış evrenden gidilmesiyle karşılaştırıldığında şekilde gösterilen alttaki saat üstteki saatin bir saat gerisindedir. Ve bu zaman gecikmesi büyümeye devam etmektedir.

Solucandeliğinin içinde sadece çok küçük bir kütleçekim kuvveti olduğu için Einstein'ın zaman bükülmeleri yasasına göre solucandeliğinin içinden bakıldığında zaman esasen üst ağızda da alt ağızla aynı hızla akar. Dolayısıyla saatler solucandeliğinin içerisinden karşılaştırıldığında bir zaman gecikmesi yoktur. İki saat eşzamanlıdır.

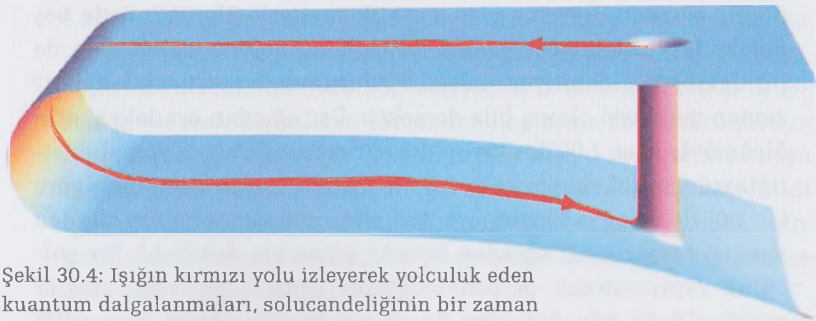
Varsayımlarımıza yine somut olarak devam edelim: Dış evrende bir ağızdan diğerine olan uzaklık saatlerle ölçtüğünüzde beş dakikada gidilebilecek kadar kısa olsun, solucandeliğinden de bir dakikada gidebiliyor olalım. Bu durumda bu solucandeliği bir zaman makinesi olmuş bile demektir. Üst ağızdan oradaki saatin ölçümüyle saat 2.00'de ayrılıp dış evrenden alt ağıza yolculuk ettiğinizde üstteki saate göre 2.05'te alttaki saatin zamanına göre ise 1.05'de bu ağza ulaşırsınız. Ardından solucandeliğinin içinden yukarıya doğru, alt ağızdan üstteki ağıza bir dakikalık bir yolculuk yapıyorsunuz. Solucandeliğinin içinden geçerken saatler eşanlı olduğu için, üst ağza iki saatin de aynı olarak gösterdiği 1.06 zamanında varırsınız. Başlangıç noktanıza saat 2.00'deki ay-

rılışınızdan elli dört dakika önce tekrar dönmüş oldunuz ve kendi gençliğinizle buluştunuz.

Daha önceki günlerde, zaman farkı çok daha azken solucandeliği henüz bir zaman makinesi olmamıştı. Zaman makinesi olması, mümkün olan en yüksek hızda, ışık hızında hareket eden bir şeyin sizin rotanız boyunca yolculuk edebildiği ve üstteki ağza tam başladığı anda geri dönebildiği o ilk anda oldu.

Eğer bu bir şey örneğin bir ışık parçacığıysa (foton), başlangıç noktası ve zamanında bir fotonla başladık, ama şimdi iki fotona sahibiz demektir. Bu ikisi yolculuğunu yaptıktan sonra aynı yer ve zamanda dört, sonra sekiz, sonra on altı... foton olacaktır! Solucandeliğinden kreşendo gibi artarak boşanan bir enerji ortaya çıkar, öyle ki belki de bu enerjinin kütleçekimi bir zaman makinesi halini aldığı tam da o anda solucandeliğini imha etmeye yetecektir.

Böyle bir durumda bunu önlemek zor görünmüyor. Solucandeliğini fotonlardan koruyun. Fakat kalkan koyup engelleyemeyeceğiniz bir şey var: Son derece yüksek frekanslı ışık dalgalanmaları; kuantum yasalarına göre ister istemez var olan kuantum dalgalanmaları (26. Bölüm). Sung-Won Kim (benim araştırma grubumda yer alan bir doktora sonrası öğrencisi) ve ben 1990 yılında bu tip dalgalanmaların kaderini hesaplamak için kuantum yasalarını kullandık. Büyüyen bir patlama sonucuna ulaştık (Şekil 30.4). Başta bu patlamanın solucandeliğini etkilemeyecek kadar zayıf olduğunu düşündük. Patlamaya rağmen solucandeliği bir zaman makinesi olur düşüncesindeydik. Stephen Hawking bizi aksine



Şekil 30.4: Işığın kırmızı yolu izleyerek yolculuk eden kuantum dalgalanmaları, solucandeliğinin bir zaman makinesi haline geldiği anda şiddeti birikerek artan bir patlama oluşturuyor.

ikna etti. Bizi patlamanın kaderinin kuantum kütleçekim yasalarınca kontrol edildiğine inandırdı, biz de ikna olduk. Ancak bu yasalar iyi anlaşıldığında zamanda geriye doğru yolculuğun mümkün olup olmadığını kesin olarak bilebileceğiz.

Fakat Stephen zaman makinesi olmamasının nihai sonuç olacağından o kadar emindi ki, bunu "kronolojinin korunması tahmini" adını verdiği bir sistem düzeyine taşıdı: Fizik yasaları zamanda geriye doğru yolculuğu hep engelleyecek, böylelikle de "evreni tarihçiler için güvenilir durumda tutacaktı."

Geçen yirmi yıl içerisinde çok sayıda araştırmacı Hawking'in kronolojinin korunması tahmininin doğruluğunu ya da yanlışlığını kanıtlamak için uğraştı. Sonuç bence onunla benim 1990'larda tartıştığımız zamandakiyle aynı ve değişmedi: Kesin sonucu sadece kuantum kütleçekim yasaları bilir.

Bir Yığınla Zaman Yolculuğu

Tüm bu araştırmalar ve sonuçlar (bilimsel tahminler) *geniş bir beşinci boyuta sahip bir yığın yoksa* geçerli olan fizik yasalarına dayanmaktadır. *Yıldızlararası*'nda olduğu gibi, eğer geniş bir yığın *varsa*, zaman yolculuğu meselesi nasıl olur?

Biz fizikçiler Einstein'ın görelilik yasalarını o kadar ikna edici ve güçlü buluruz ki, bizim zarımızda geçerli oldukları gibi yığında da geçerli olabilirler mi acaba, diye düşünürüz. Bu yüzden Lisa Randall, Raman Sundrum ve diğerleri Einstein yasalarını sadece basit bir adım ekleyerek, uzaya yeni bir boyut ekleyerek beş boyutlu yığın için genişletmişlerdir. Bu genişletme matematiksel açıdan temiz ve güzel bir yoldan ilerlediği için de biz fizikçilere doğru yolda olduğumuzu düşündürmüştür. Benim filmdeki yorumumda Profesör Brand bu genişletmeyi denkleminde ve kütleçekim sapmalarını anlama çabasında dayanak noktası olarak kullanır (25. Bölüm).

Eğer bu spekülatif genişletme doğruysa; o halde zaman yığının içinde bizim zarımızın içindeki gibi, temel olarak aynı şekilde davranacaktır. Bu durumda yığının içindeki cisimler ve sinyaller, bizim zarımızın içindekiler gibi, yerel olarak ölçülen zaman içerisinde

(yerel yığın zamanında) sadece bir yönde hareket edebilir: Geleceğe doğru. Yerel olarak geriye doğru gidemezler. Eğer yığının içinde zamanda geriye yolculuk mümkünse, bu sadece yığının uzayı içerisinde seyahat ederek ve yolculuk başlamadan önce geri dönerek ve bu sırada yerel yığın zamanında hep ileri doğru hareket ederek elde edilebilir. Bu Şekil 30.3'te gösterilen yolculuğun yığın versiyonudur.

Murph'e Mesaj Yollanması: Bir Fizikçi Olarak Yaptığım Değerlendirme

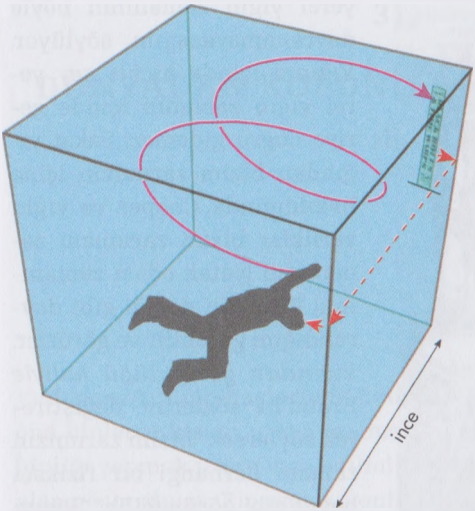


Zamanın bu betimlenişi Cooper'ın Murph'e mesaj yollamasına ilişkin benim bir fizikçi olarak yaptığım değerlendirmenin temelini oluşturmaktadır.

Teseraktın yüzlerinin üç boyutlu, içinin dört uzay boyutlu bir cisim olduğunu hatırlayın. İç kısım yığının bir parçasıdır. Filmdeki teserakt sahnelerinde gördüğümüz her şey yüzlerde yer almaktadır: Cooper, Murph, Murph'ün yatak odası, yatak odasının çıkmaları, kitabın ve saatin dünya tüpleri; hepsi teserakt yüzlerinde yer alır. Teseraktın yığın içini hiç görmeyiz. Göremeyiz, çünkü ışık dört uzay boyutunun içinde yolculuk edemez, sadece üç uzay boyutunda ilerler. Fakat kütleçekim ışığın yapamadığını yapabilir.

Benim yorumumda Cooper Murph'ün yatak odasında bir kitabı gördüğünde, bunu teseraktın yüzlerinde yolculuk eden bir ışık ışını aracılığıyla yapar (örneğin Şekil 30.5'teki kesikli gösterilen kırmızı ışın). Bir kitabın dünya tüpüne ya da saatin yelkovanının dünya tüpüne bastırdığında, Şekil 30.5'teki eflatun eğriyi izleyerek teseraktın yığın iç yapısı içerisinde sarmallaşan bir kütleçekim sinyali (yığın içinde bir kütleçekim dalgası) yaratır. Sinyal yerel yığın zamanda ileriye doğru, fakat yatak odası zamanında yola çıkmadan önce ulaşacak şekilde geriye doğru hareket eder[2].

[2] Yığındaki mühendisler yerel yığın zamanında ileriye doğru, ancak yatak odası zamanına göreli olarak geriye doğru giden kütleçekim sinyallerine olanak sağlayan bir bükülme yapmaya çalışamazlar mı? Ben bunu başaran bir uzayzaman bükülmesinin matematiksel betimlemesini sizler için kolaylıkla yazabilirim; bunun için kitabın sonundaki teknik notlara, özellikle TN 1'e bakabilirsiniz. Yığındaki mühendislerin bu bükülmeyi pratikte yapıp yapamayacakları kuantum kütleçekim yasalarına bağlıdır; bu yasaları bendeniz bilmiyorum ama TARS Gargantua'nın tekilliğinde keşfediyor.



Şekil 30.5: Cooper kesikli kırmızıyla gösterilmiş ışın ışını aracılığıyla bir kitabı görüyor ve eflatun renkli eğri boyunca sarmallaşan bir kütleçekim sinyali aracılığıyla kitap üzerinde bir kuvvet uyguluyor. Şekilde bizim zarımızın uzamsal boyutlarından birini çıkardım.

Kitabı kitaplıktan dışarı ittiren ve saatin yelkovanının seğirmesine sebep olan işte bu kütleçekim sinyalidir.

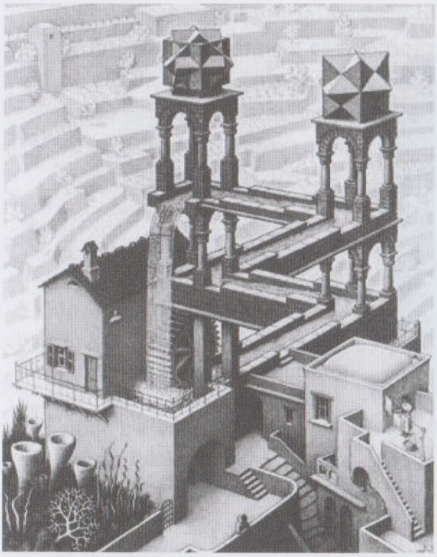
Bu benim en sevdiğim Escher resimlerinden biri olan *Waterfall*'daki duruma benzemektedir (Şekil 30.6). Resimdeki aşağıya doğru iniş yatak odası zamanının ileriye doğru akışına benzetilebilir, akan su da yerel zamanın ileri doğru akışına benzemektedir. Suyun üstündeki bir yaprak suyla beraber ileri doğru taşınır, bu da yığının içindeki sinyallerin yerel zamanda ileri doğru taşınması gibidir.

Suyun aşağıya düşmesiyle beraber aşağıya taşındığında yaprak, kitaptan Cooper'a giden ışık ışını gibidir: Sadece yerel zamanda ileri doğru değil, aşağıya doğru da (yatak odası zamanında ileriye doğru) yolculuk eder. Su kemeri üzerinde taşınırken yaprak Cooper'dan kitaba giden kütleçekim sinyali gibidir: Yerel zamanda ileri doğrudur ama yukarıya[3] (yatak odası zamanında geriye doğru) gider.

O zaman bu bakış açısına göre Amelia Brand'in yığındaki varlıkların gördüğü zaman hakkındaki betimlemesini nasıl açıklıyorum? "Onlar için zaman belki de herhangi bir fiziksel boyuttan başka bir şey değil. Onlar için geçmiş içine inebildikleri bir vadi, gelecek de üzerine tırmanabildikleri bir dağ olabilir."

Einstein yasaları yığının içine doğru genişletildiklerinde bize

[3] Optik bir aldanma aracılığıyla



Şekil 30.6: Waterfall *[M. C. Escher'in çizimidir.]*

yerel yığın zamanının böyle davranamayacağını söylüyor. Yığının içinde hiçbir şey yerel yığın zamanın içinde geriye doğru gidemez. Fakat yığından bizim zarımızın içine bakıldığında Cooper ve yığın varlıklar bizim zarımızın zamanının (yatak odası zamanının) Brand'in dediği gibi davrandığını görebilir ve görürler. *Yığından göründüğü haliyle* Brand'in sözlerini değiştirerek söylersek "bizim zarımızın zamanı herhangi bir fiziksel boyut gibi görünebilir." "Bizim zarımızın geçmişi Cooper'ın (teseraktın çapraz kanalında aşağı doğru ilerleyerek) içine tırmanabileceği bir vadi gibi görünür ve bizim zarımızın geleceği Cooper'ın (teseraktın çapraz kanalında yukarı doğru ilerleyerek; Şekil 29.14) yukarı doğru tırmanabileceği bir dağ gibi görünür."

Brand'in sözlerine ilişkin benim bir fizikçi olarak yapabileceğim çeviri bu ve Chris de söyleneni benzer şekilde anlıyor.

Beşinci Boyuttan Brand'e Dokunmak

Yıldızlararası'nda kuantum verilerinin Murph'ün ellerine güvenli tarzda ulaştırılmasıyla Cooper'ın görevi bitiyor. Onu yığının içinde taşıyan teserakt kapanmaya başlıyor.

Tesarakt kapanırken Cooper solucandeliğini görüyor. Solucandeliğinin içinde de *Endurance*'ı Gargantua'ya ilk yolculuğuna giderken görüyor. *Endurance*'ın yanından geçerken dışarı uzanıyor ve kütleçekimsel olarak beşinci boyuttan Brand'e dokunuyor. Brand kendisine dokunanın bir yığın varlık olduğunu düşünüyor. Hızla kapanan bir teseraktın içindeki yığının içinde yolculuk eden bu varlık ona dokunuyor: Bu yorgun ve daha yaşlı Cooper.

31

DÜNYADAN KOLONİLERİN AYRILMASI



Yıldızlararası'nın başlarında Cooper NASA tesisine ilk geldiğinde ona binlerce insanı uzaya taşımak ve onlara nesiller boyu ev sahipliği yapmak üzere inşa edilmiş silindir şeklinde dev bir çevrili alan gösteriliyor: Bir uzay kolonisi. Başka bir yerde inşa edilmekte olan başka koloniler olduğu da kendisine söyleniyor.

Cooper Profesöre "Dünyadan nasıl kalkıyor bu?" diye soruyor. Profesör yanıtında "Bu ilk kütleçekim sapmaları her şeyi değiştirdi" diyor. "Artık kütleçekimin amaçlarımız için gerçekten kullanılabildiğini biliyorduk. Ben kuram üzerinde çalışmaya başladım ve bu istasyonu inşa etmeye başladık."

Yıldızlararası'nın sonunda koloninin içinde gündelik yaşamın uzayda süzülen bir gemide olsa dahi yeniden sağlanmış olduğunu görüyoruz.

Koloni uzaya nasıl gönderildi? Çözümün anahtarı elbette, TARS'ın Gargantua'nın tekilliğinden elde ettiği (26. ve 28. Bölüm) ve Cooper'ın Murph'e ilettiği (30. Bölüm) kuantum verileriydi (benim bilimsel değerlendirmeme göre *kuantum kütleçekim yasalarıydı*).

Benim yorumuma göre Murph bu yasalardan kuantum dalgalanmalarını ayırma yoluyla kütleçekim sapmalarını yöneten kuantum olmayan yasaları öğrendi. Bu yasalardan da sapmaların nasıl kontrol edileceğini buldu.

Bir fizikçi olarak ayrıntıları bilmeye ben de can atıyorum. Profesör Brand kara tahtalarını kaplayan denklemlerinde doğru yol üzerinde mi ilerliyordu? (25. Bölüm ve Interstellar.withgoogle.com'da bu kitabın sayfası.) Murph'ün kuantum verileri eline gelmeden önce söylediği gibi gerçekten cevabın yarısına ulaş-



Şekil 31.1: Cooper pencereden baktığında çocukların uzay kolonisinin içinde beyzbol oynadığını görüyor. *[Yıldızlararası'ndan, Warner Bros. Entertainment Inc.'in izniyle alınmıştır.]*

mış mıydı? Yoksa çok mu uzağındaydı? Sapmaları ve kütleçekimi kontrol etmenin sırrı acaba bambaşka bir şey midir?

Belki *Yıldızlararası* için yapılacak bir devam filmi bize bunları söyler. Christopher Nolan devam filmlerinin ustasıdır; inanmayan Batman üçlemesini izleyebilir.

Ama bir şey kesin görünüyor. Murph Newton'ın kütleçekim sabiti G'nin dünyanın içinde nasıl azaltılacağını bulmuş olmak zorunda. Dünyanın kütleçekim kuvvetinin Newton'ın ters kare yasasıyla gösterildiğini hatırlayın (25. Bölüm): $g = Gm/r^2$, r^2 dünyanın merkezinden uzaklığın karesi, m dünyanın kütlesi ve G Newton'ın kütleçekim sabitidir. Newton'ın G'sini ikiye bölerseniz dünyanın kütleçekimini yarı yarıya azaltmış olursunuz. G'yi bine bölerseniz, dünyanın kütleçekimini binde birine düşürmüş olursunuz.

Beni yorumuma göre Newton'ın G'si dünyanın içinde diyelim ki normal değerinin binde birine, yine diyelim ki bir saatliğine düşürülürse, roketlerle dev kolonileri uzaya yollamak mümkün olur.

Bunun bir yan ürünü, yine benim yorumuma göre şu olur: Dünyanın çekirdeği (üstündeki gezegenin devasa ağırlığıyla artık

bastırılmadığı için) dışa doğru yayılır ve dünya yüzeyini yukarıya doğru iter. Bunu olağanüstü büyük depremler ve tsunamiler izler. Koloniler uzaya yükselirken bunların dünya üzerinde yarattığı tahribat, küf kaynaklı felaketin üzerine binen korkunç bir bedele daha yol açar. Newton'ın *G*'si normal kuvvetine yeniden getirildiğinde bu sefer dünya eski normal boyutuna büzüşmek zorunda kalır ve bu da yeni depremler ve tsunami felaketlerine sebep olur.

Ama insanlık kurtulmuştur. Ve Cooper ile doksan dört yaşındaki Murph yeniden birleşir. Ardından Cooper Amelia Brand'i aramak üzere evrenin çok uzak derinliklerine doğru yola koyulur.

Veda Ederken Son Düşünceler

Yıldızlararası'nı her izlediğimde ve dönüp bu kitabı her karıştırışımda filmin içerdiği müthiş bilimsel çeşitlilik beni hayrete düşürüyor. Bu bilimin zenginliği ve güzelliği de...

Hepsinden çok da *Yıldızlararası*'nın altında yatan iyimser mesaj beni etkiliyor: Fizik yasalarının hükmettiği bir evrende yaşıyoruz. Biz insanlar kendi kaderimizi belirlemek için bu yasaları keşfetme, çözme, ustalaşarak kullanma becerisine sahibiz. Bize yardım edecek yığın varlıklar olmasa da, biz insanlar evrenin bizim önümüze getirebileceği felaketlerin çoğuyla baş etme yeteneğine sahibiz. Bu iklim değişikliğinden biyolojik ve nükleer felaketlere dek bizim kendi önümüze kendimizin getirdiği felaketler için de geçerli.

Fakat böyle yapmak, kendi kaderimizi belirlemek, içimizden büyük bir kesimin bilimi anlamasını ve sevmesini gerektiriyor. Bilim nasıl işler? Bize evren, dünya ve hayat hakkında neler öğretir? Neleri başarabilir? Yetersiz bilgi ya da teknoloji nedeniyle ortaya çıkan sınırları nelerdir? Bu sınırlar nasıl aşılabilir? Spekülasyondan bilimsel tahmine, oradan gerçeğe nasıl geçiş yaparız? Doğru bildiklerimizi değiştiren devrimler olağanüstü derecede nadir görülür, ama yine de ne kadar önemlidirler...

Umarım bu kitap bunların yanıtlarının anlaşılmasına katkıda bulunmuştur.

DAHA FAZLASINI NEREDEN ÖĞRENEBİLİRSİNİZ?

1. Bölüm: Hollywood'da Bir Bilimci: *Yıldızlararası*'nın Doğuşu

Hollywood kültürüyle ve sinema sektörünün değişen koşullarıyla ilgilenen okurlara ortağım Lynda Obst'un iki kitabını hararetle tavsiye ediyorum: *Hello, He Lied: & Other Truths from the Hollywood Trenches* (Obst 1996) ve Sleepless in *Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* (Obst 2013).

2. Bölüm: Kısaca Evrenimiz

Harika resimler ve geceleyin gökyüzünde çıplak gözle, dürbünler ve teleskoplarla neler görebileceğinize dair verdiği bağlantılarla bütün evrenimize genel bir bakış için *bkz.* Universe: The Definitive Visual Guide (Rees 2005). Evrenimizin ilk anları, Büyük Patlamayla ortaya çıkışı ve Büyük Patlamanın nasıl başlamış olabileceği konusunda birçok iyi kitap yazılmış. Bunların içinden özellikle sevdiklerim: *The Inflationary Universe* (Guth 1997); *Big Bang: The Origin of the Universe* (Singh 2004); *Many Worlds in One: The Search for Other Universes* (Vilenkin 2006); *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos* (Barrow 2011) ve *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Carroll 2011) kitabından 3, 14 ve 16. Bölüm. Büyük Patlama konusunda son araştırmalar için http://www.preposterousuniverse.com/blog/ adresindeki bloğa bakabilirsiniz; Sean Carroll, *Preposterous Universe* (Carroll 2014)

3. Bölüm: Evreni Yöneten Yasalar

Yirminci yüzyılın en büyük fizikçilerinden Richard Feynman 1964 yılında evrenimizi yöneten yasaların doğasına derinlemesine nüfuz eden herkese açık bir dizi ders verdi. Daha sonra da ders

notlarını en sevdiğim kitaplardan biri haline getirdi, *The Character of Physical Law* (Feynman 1965). Aynı konuda daha ayrıntılı, daha güncel ve daha uzun bir kitap için *bkz. The Fabric of the Cosmos:Space, Time, and the Texture of Reality* (Greene 2004). Daha rahat akan, size daha eğlenceli gelebilecek ve aynı ölçüde derin bir kitap: *The Grand Design* (Hawking ve Mlodinow 2010).

4. Bölüm: Bükülmüş Zaman ve Uzay, Gelgitli Kütleçekim

Einstein'ın bükülmüş uzay ve zaman kavramları, bunların gelgitli kütleçekimle bağlantısı ve bu kavramlar üzerine kurulmuş olan görelilik yasaları için *bkz. Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (Thorne 1994) ve Einstein'ın haklı olduğunu gösteren deney bolluğu için de *bkz. Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Will 1993). *"Subtle Is the Lord . . .": The Science and the Life of Albert Einstein* (Pais 1982) Einstein'ın bilime tüm katkılarına derinlikli biçimde odaklanan bir Einstein biyografisi; Thorne ve Will'inkilere göre daha sert giden ve çok daha akademik bir kitap. Einstein'ın başka kapsamlı biyografileri de var –içlerinden benim özellikle beğendiğim *Einstein: His Life and Universe* (Isaacson 2007)– ama içlerinden hiçbiri Einstein'ın bilimini Pais'inkinin ayrıntılarına ve doğruluğuna yaklaşan bir tarzda ele almıyor.

Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity (Schutz 2003) yazılmış ve kütleçekimini ve evrende üstlendiği rolleri (hem Newton'ın kütleçekimi hem de Einstein'ın bükülmüş uzayzamanı) genel okuyucu için derinlikli biçimde tartışan bir eser. Aynı bilgileri ileri bir fizik lisans ya da mühendislik öğrencisi düzeyinde veren ders kitaplarından beğendiklerim James Hartle'dan *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle 2003) ve Bernard Schutz'tan *A First Course in General Relativity* (Schutz 2009).

5. Bölüm: Kara Delikler

Kara delikler konusunda ayrıntılar ve onlar hakkında bildiğimizi düşündüğümüz şeyleri nasıl bilebildiğimiz konusunda önerilerim *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe* (Begelman

ve Rees 2009), *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) ve 2012 yılında Stephen Hawking'in yetmişinci doğum gününde verdiğim bir ders olan http://www.ctc.cam.ac.uk/hawking70/multimedia_kt.html. Andrea Ghez Samanyolu galaksimizin merkezindeki kara delik hakkında ekibinin yaptığı harika keşifleri bir Ted konuşmasında http://www.ted.com/speakers/andrea_ghez ve ekibinin web sitesinde http://www.galacticcenter.astro.ucla.edu açıklıyor.

6. Bölüm: Gargantua'nın Gövdesi

Kara deliklerin bu bölümde anlatılan özellikleri için *bkz. Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) kitabının 7. Bölümü, özellikle de 272–295 sayfaları arası; denklemlerle, daha teknik bir düzey içinse *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle 2003). Bu kitabın sonundaki *Teknik Notlar* bölümüne de bakınız. Ateşten kabuk ve fotonların geçici olarak hapsolduğu yörüngeler için *bkz.* Edward Teo'nun teknik makalesi (Teo 2003).

7. Bölüm: Kütleçekim Sapanları

Kütleçekim sapanları konusunu benimkinden biraz daha teknik bir temelde ele alınışı için önerim şu Wikipedia makalesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_assist. Fakat kara delikler etrafından yapılan sapan atışları konusunda söylediklerine inanmayın. Şu ifadesi (4 Temmuz 2014 itibarıyla) basbayağı yanlış: "Eğer bir uzay aracı bir kara deliğin Schwarzschild yarıçapına [ufuk] yaklaşırsa uzay o kadar bükülü hale gelir ki sapan atışı yörüngeleri kaçış için kara deliğin hareketinin ekleyebileceğinden daha büyük bir enerjiye ihtiyaç duyar." Aslında Wikipedia'yı her zaman tedbirli bir kuşkuculukla okumanız gerekir. Benim deneyimime göre, benim uzman olduğum alanlarda Wikipedia'nın söylediklerinin yaklaşık yüzde 10'u ya yanlış ya da hataya sevk ettiren bir nitelik taşıyor.

Kütleçekim sapanları konusunda daha güvenilir ama daha dar kapsamlı bir kaynak için *bkz.* http://www2.jpl.nasa.gov/basics/grav/primer.php. Kütleçekim sapanlarıyla ilgili *Yıldızlararası*'yla bağlantılı bir video oyunu da geliştirildi, *bkz.* Game.InterstellarMovie.com.

Kütleçekim sapanları konusunda bahsettiğim orta kütleli kara deliklerle ilgili teknik sayılabilecek bir ele alış için *bkz. Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm (Meier 2012)* kitabının 4. Bölümü.

David Saroff'un yazdığı ve http://demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits adresinden ulaşılabilen bir araç kullanarak Şekil 7.6'daki gibi hızlı dönen kara delikler etrafında karmaşık yörüngeler yaratabilir ve bunları keşfedebilirsiniz.

8. Bölüm: Gargantua'yı Görüntülemek

Yıldızlararası'ndakine benzer tarzda, kara deliklerin yıldız alanlarını kütleçekimsel merceklemesi konusunda simülasyonlar yapan birçok fizikçi var ve bunlar internette bulunabilir. İçlerinden özellikle etkileyicisi Alain Riazuelo'nun yaptıkları; *bkz.* www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar. Ayrıca alttaki 28. Bölüme de bakın.

Paul Franklin'in ekibi ve ben, benim verdiğim denklemleri kullanarak onların gerçekleştirdiği simülasyonlar hakkında teknik denebilecek birkaç makale kaleme almayı planlıyoruz; *Yıldızlararası*'ndaki Gargantua'nın, diskinin ve solucandeliğinin görüntülerinin altında yatan simülasyonlar ve şaşırtıcı şeyleri açığa çıkaran başka ek simülasyonlar gerçekleştirildi. Bu makalelere şuradan ulaşabilirsiniz: http://arxiv.org/find/gr-qc.

9. Bölüm: Diskler ve Püskürmeler

Kuasarlar, birikim diskleri ve püskürmelerin derinlikli biçimde ele alındığı örnekler *Gravity's Fatal Attraction* (Begelman ve Rees 2009), *Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) kitabının 9. Bölümü ve daha teknik ve ayrıntılı bir düzey için *bkz. Black Hole Astrophysics* (Meier 2012). Yıldızların kara delikler tarafından gelgitli parçalanması ve ortaya çıkan birikim diskleri için (arkadaşlarıyla beraber Şekil 9.5 ve 9.6'nın temelinde yatan simülasyonların yaratıcısı olan) James Guillochon'un sitesine bakınız: http://astrocrash.net/projects/tidal-disruption-of-stars/. Birikim diskleri ve püskürmelerinin astrofizik açıdan gerçekçi film klip-

leri için önerim Ralf Kaehler'in (Stanford Üniversitesi) Jonathan C. McKinney, Alexander Tchekhovskoy ve Roger D. Blandford'un (McKinney, Tchekhovskoy ve Blandford 2012) simülasyonlara dayalı olarak ürettiği şuradaki kliplerdir: http://www.slac.stanford.edu/~kaehler/homepage/visualizations/black-holes.html. Doppler kaymaları ve kütleçekim merceklemesinin olduğu birikim disklerinin görüntüleri için astrofizikçi Avery Broderick'in sitesine bakılabilir: http://www.science.uwaterloo.ca/~abroderi/Press/. *Yıldızlararası*'nda Gargantua'nın birikim diskinin altında yatan simülasyonlar (örneğin Şekil 9.9) şu adreste çıkacak bir veya birkaç makalede anlatılacak: http://arxiv.org/find/gr-qc.

10. Bölüm: Rastlantı Evrimin İlk Yapı Taşıdır

Kütleli bir kara deliğin yakınındaki yıldız yoğunluğunun azalmayıp arttığını gösteren simülasyonların teknik olmayan herhangi bir ele alınışını ben bilmiyorum. Teknik bir ele alış ve analiz için *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* (Merritt 2013) kitabının 7. Bölümüne ve özellikle Şekil 7.4'e bakınız.

11. Bölüm: Küf

Güncel bilim haberlerini takip eder ya da sadece etrafınızdaki dünyayı incelerseniz bu bölümde biyolog arkadaşlarımın betimlediği türden senaryoların örneklerini görürsünüz; bunlar şu ana dek şansımıza ılımlı örneklerdir, felaket örnekleri değildir. En son çıkanlardan biri öldürücü bir virüsün bitkilerden bal arılarına sıçramasıydı, http://blogs.scientificamerican.com/artful-amoeba/2014/01/31/suspicious-virus-makes-rare-crosskingdom-leap-from-plants-to-honeybees; bu *Yıldızlararası*'nda görülen bamyadan mısıra sıçramadan çok daha büyük bir sıçramaydı, ama çok daha az öldürücü bir patojendi. Başka bir örnek Amerika'da geçmişte baskın olan ağaç türlerinin hızlı kaybıdır: Sadece 11. Bölümde Meyerowitz'in bahsettiği kestane ağacı değil, Amerikan karaağacı, http://landscaping.about.com/cs/treesshrubs/a/american_elms.htm ve Palomar Dağındaki 5 metrelik teleskobun yanındaki kulübemin çevresindeki dev çam ağaçları da aynı durumdadır.

12. Bölüm: Oksijensiz Kalmak

Oksijenin solunabilir oksijen molekülü O_2 ile karbondioksit CO_2 ve ayrıca diğer formlar arasında (bunlarda daha yavaş) döngüsüne dünyanın "oksijen döngüsü" denir. Bir Google'layın. Karbonun atmosferdeki CO_2, bitkiler ve ayrıca kömür, petrol ve kerojen gibi diğer formlar arasında (sonunculardа daha yavaş) döngüsüne ise "karbon döngüsü" denir. Bunu da Google'layın. Bu döngülerin eşleşmiş olduğu açıktır; birbirlerini etkilerler. 13. Bölümün temelini de oluşturmaktadırlar.

13. Bölüm: Yıldızlararası Yolculuk

Güneş dışı gezegenlerin keşfi çok hızlandı. Her gün güncellenen kataloglar için tüm gezegenlerin listesi için *bkz.* http://exoplanet.eu ve http://exoplanets.org. Yerleşilebilir nitelik taşıyan güneş dışı gezegenlerin kataluğu da şurada: http://phl.upr.edu/hec. Güneş sisteminin dışında hayat ve güneş dışı gezegenler araştırmalarının tarihi ve insan tarafı için *bkz. Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* (Lemonick 2012) ve *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* (Billings 2013); teknik ve bilimsel ayrıntılar içinse *bkz. The Exoplanet Handbook* (Perryman 2011). *Confessions of an Alien Hunter: A Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence* (Shostak 2009) dünyadan yollanan radyo dalgaları ve başka yöntemlerle dünya dışı zekâ arayışını (SETI) harika biçimde anlatan bir kaynak.

Biz insanların yıldızlararası yolculuk çabamızda elde etmeye uğraştığımız teknolojiler konusunda tavsiyem http://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_travel ve http://fourthmillenniumfoundation.org. Astronot Mae Jemmison bir sonraki yüzyılda güneş sisteminin dışına insan gönderilmesi konusunda başı çekiyor, *bkz.* http://100yss.org. Yıldızlararası yolculuk konusunda ışık hızından hızlı motorlar ve solucandelikleri hakkında yazılmış bir ton saçmalık var. Bu yüzyılın ve muhtemelen önümüzdeki birkaç yüzyılın teknolojisi bu yönde gerçekçi bir çabaya izin vermekten uzak; elbette çok daha gelişmiş bir uygarlık bize *Yıldızlararası*'ndaki gibi gerekli uzayzaman bükülmelerini sağlamazsa diyelim. Bu yüzden biz insanların sizin ömrünüz ya da torunları-

nızın çocuklarının yaşam süresi içerisinde yıldızlararası yolculuğa yetecek kadar güçlü bükülmeleri üretebileceğini iddia eden makaleleri vs okuyarak zamanınızı boşa harcamayın.

14. Bölüm: Solucandelikleri

Neredeyse yirmi yıl önce yazılmış olmasına karşın solucandelikleri konusunda ayrıntılı bilgi için özellikle *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (Visser 1995) kitabını öneriyorum. Ayrıca önerilerim *Black Holes & Time Warps*'ın (Thorne 1994) son bölümünü, *Time Travel and Warp Drives*'ın (Everett ve Roman 2012) 9. Bölümünü ve *Black Holes, Wormholes, and Time Machines*'in (Al-Khalili 2012) 8. Bölümünü öneririm. Solucandeliğini açık tutmak için gereken egzotik madde konusunda en son değerlendirmelerden biri için *bkz. Time Travel and Warp Drives*'ın (Everett ve Roman 2012) 11. Bölümü.

15. Bölüm: *Yıldızlararası*'ndaki Solucandeliğinin Görselleştirilmesi

Paul Franklin'in ekibi ve ben internette http://arxiv.org/find/gr-qc adresinde solucandeliğinin görselleştirilmesi üzerine çalışmamamız hakkında bir veya birkaç makaleyle daha fazla ayrıntı vermeyi planlıyoruz.

16. Bölüm: Solucandeliğinin Keşfi: Kütleçekim Dalgaları

LIGO ve kütleçekim dalgaları hakkında güncel bilgiler için LIGO Bilimsel İşbirliği'nin web sayfası http://www.ligo.org'a, özellikle de "News" ve "Magazine" bölümlerine; ayrıca LIGO Laboratuarının web sayfası http://www.ligo.caltech.edu'ya, ayrıca Kai Staats'in 2014 yapımı filmine (http://www.space.com/25489-ligo-a-passion-for-understanding-complete-film.html) bakınız. İnternette benim kütleçekim dalgaları ve evrenin bükülmüşlüğü konusunda verdiğim bazı eğitici dersleri bulabilirsiniz, örneğin "Pauli dersleri" kapsamında verdiklerim http://www.multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011 böyledir, ancak bunların sıralamanın tersi yönde (yani alttan yukarıya doğru) izlenmesi gerekir; daha teknik bir dü-

zey için de şu var: http://www.youtube.com/watch?v=Lzrlr3b5aO8. Kara delik çarpışmaları ve yaydıkları kütleçekim dalgalarının SXS ekibinin simülasyonlarına dayalı olarak çekilen filmleri için *bkz.* http://www.blackholes.org/explore2.html.

Kütleçekim dalgaları konusunda genel okuyucu için güncel kitaplar yok, benim önerim çok fazla eskimemiş olan *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time* (Bartusiak 2000) adlı kitaptır. Einstein'dan bu yana kütleçekim dalgaları araştırmalarının tarihi için *bkz. Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Kennefick 2007).

17. Bölüm: Miller'ın Gezegeni

Bu bölümde Miller'ın gezegeni hakkında çok sayıda iddiada bulunuyorum: Yörüngesi, kendi etrafında dönmesi (sallanma dönemi haricinde Gargantua'ya karşı hep aynı yüzünü gösteriyor), Gargantua'nın onu deforme eden ve sallandıran gelgit kuvvetleri; ayrıca Gargantua'nın yaşadığı uzay dönmesi ve bu dönmenin eylemsizliğe, merkezkaç kuvvetler ve ışık hızı ışık sınırına etkisi. Bu iddiaların hepsi Einstein'ın görelilik yasaları, onun genel göreliliğince destekleniyor. Dönen bir kara deliğin yakınında yörünge hareketi çizen bir gezegen için bu tarz şeyleri konunun uzmanı olmayanlar için açıklayan ve tartışan benim 17. Bölümüm dışında herhangi bir kitap, makale ya da ders hatırlamıyorum. Mezun olmak üzere olan üniversite öğrencileri Hartle'ın ders kitabı *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*'deki (Hartle 2003) kavram ve denklemleri kullanarak benim iddialarımı kontrol etmeyi deneyebilirler.

Miller'ın gezegeninin geçmişi kısmında ileri sürdüğüm sorular fazla görelilik fiziği gerektirmez. Hemen hemen bütünüyle Newton'ın fizik yasalarıyla açıklanabilirler ve konuyla ilgili bilgi almak için en uygun kaynaklar jeofizik ya da gezegenlerin ve uydularının fiziği üzerine kitaplar ve web siteleridir.

18. Bölüm: Gargantua'nın Titreşimleri

Bill Press'in kara deliklerin titreşebildiğini keşfetmesi ve Saul Teukolsky'nin bu titreşimleri yöneten denklemleri çıkarması hak-

kında *bkz. Black Holes & Time Warps* (Thorne1994) kitabının 295-299 arasındaki sayfaları. Şekil 18.1 ve Romilly'nin veri kümesinin işlediği kara delik titreşimleri ve bu titreşimlerin sona ermesi konusunda bakılabilecek teknik makale Yang vd. (2013) adlı Huan Yang, Aaron Zimmerman ve arkadaşlarının makalesidir.

21. Bölüm: Dördüncü ve Beşinci Boyutlar

Uzay ve zamanın birleşmesi konusunda daha fazla ayrıntı için *bkz. Black Holes & Time Warps* (Thorne 1994) kitabımın 73-79 arasındaki sayfaları. John Schwarz ve Michael Green'in imzasını taşıyan süper-sicim atılımı ve bunun fizikçileri fazladan boyutlara sahip yığının varlığını kabul etmek zorunda nasıl bıraktığı konusunda *bkz. The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (Greene 2003).

22. Bölüm: Yığın Varlıklar

Edwin A. Abbott'ın *Flatland*'inin (Abbott 1884) oldukça başarılı canlandırma filmi için *bkz. Flatland: The Film* (Ehlinger 2007). *Flatland*'nin altında yatan matematiğin ve hikâyenin on dokuzuncu yüzyıl İngiliz toplumuyla bağlantılarının ayrıntılı ele alınışı için *bkz. The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Stewart 2002) [Türkçede *Açıklamalı Düzülke: Çok Boyutlu Bir Macera* (Ayrıntı, 2008)]. Dördüncü uzay zamanın görsel açıdan nasıl olabileceği konusunda *bkz. The Visual Guide to Extra Dimensions, Cilt 1: Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* (McMullen 2008).

23. Bölüm: Hapsolmuş Kütleçekim

Bu bölümün içerdiklerinin çoğu konusunda önerim *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (Randall 2006). Bu Raman Sundrum'la beraber AdS bükülmesinin zarımızın yakınındaki kütleçekimini hapsedebildiğini (Şekil 23.4 ve 23.6) keşfetmiş olan Lisa Randall'ın kaleme aldığı ve yığın ve ekstra boyutları üzerine modern fizikçilerin fikirlerini ve öngörülerini kapsamlı biçimde değerlendiren bir çalışma. AdS katmanı ve benim tekrar keşfettiğim AdS sandviçi fikri ilk olarak

Ruth Gregory, Valery A. Rubakov ve Sergei M. Sibiryakov'un (Gregory, Rubakov ve Sibiryakov 2000) teknik bir makalesinde ileri sürüldü ve tartışıldı; AdS sandviçinin kararsız olduğu da Edward Witten'ın yazdığı (Witten 2000) bir teknik makalede gösterildi.

24. Bölüm: Kütleçekim Sapmaları

Merkür'ün yörüngesindeki aykırı devinimin ve Vulcan gezegeni arayışının tarihi için bilim tarihçisi N. T. Roseveare'in *Mercury's Perihelion from Le Verriere to Einstein* (Roseveare 1982) adlı akademik yapıtını, ayrıca daha okunabilir ancak daha az kapsamlı bir nitelik taşıyan Richard Baum ve William Sheehan adlı astronomların *In Search of the Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* (Baum and Sheehan 1997) eserini öneririm.

Evrenimizde kara maddenin var olduğunun keşfedilmesi ve kara madde konusunda güncel araştırmalar için son derece akıcı bir kitap olan, bu alanda önde gelen araştırmacılardan Katherine Freeze'in kaleme aldığı *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter*'ı (Freeze 2014) öneriyorum.

Evrenin genişlemesinin aykırı hızlanması ve buna sebep olması muhtemel kara enerji konusunda *The Cosmic Cocktail*'in (Freeze 2014) son bölümünü ve ayrıca *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* (Panek 2011) kitabını öneririm.

25. Bölüm: Profesörün Denklemi

Newton'ın kütleçekim sabiti *G*'nin yer ve zamana göre değişebileceği ve bir çeşit kütleçekimsel olmayan alan tarafından kontrol ediliyor olabileceği hakkında fikirler ben 1960'lı yılların başlarında doktora öğrencisiyken Princeton Üniversitesi fizik bölümünde hararetle tartışılan bir konu başlığıydı. Bu fikirler, Einstein'ın genel göreliliğine ilginç bir alternatif olan "Brans-Dicke kütleçekim kuramı" [*Was Einstein Right?*'ın (Will 1993) 8. Bölümü] ile bağlantılı olarak Princeton profesörlerinden Robert H. Dicke ve öğrencisi Carl Brans tarafından ileri sürülmüştü. Bu konuda kısa bir kişisel hatıra aktarımı için *bkz. Einstein Online* (Brans 2010) içerisindeki "Varying Newton's Constant: A Personal History of

Scalar-Tensor Theories." Brans-Dicke kuramı farklı *G*'lerin varlığını arayan bir dizi deneye ilham verdi fakat ikna edici sonuçlar bulunamadı; örneğin *bkz. Was Einstein Right?*'ın (Will 1993) 9. Bölümü. Bu fikirler ve deneyler *Yıldızlararası*'nda kütleçekim sapmaları ve bunların nasıl kontrol altına alınacağı konusundaki yorumlarımdan bazılarına ilham kaynağı oldu: Yığın varlıklar *G*'nin şiddetini kontrol ediyor ve değişmesini sağlıyorlardı.

Şekil 25.6'ta kara tahtasının üzerinde gösterilen Profesörün denklemi bu fikirler üzerinde yükselmektedir. Einstein'ın görelilik yasalarının (genel görelilik) yığının beşinci boyutuna genişletilmesini de içermektedir ki bu konu Roy Maartens ve Koyama Kazuya'nın (Maartens and Kazuya 2010) makalesinde dile getirilmiştir; ayrıca denklem "varyasyon analizi" denen matematikten örnekler içermektedir; *bkz.* örneğin http://en.wikipedia.org/wiki/Calculus_of_variations. Profesörün denklemi konusunda bazı teknik ayrıntılar için *Teknik Notlar* bölümüne de bakabilirsiniz.

26. Bölüm: Tekillikler ve Kuantum Kütleçekimi

Kuantum dalgalanmaları ve kuantum fizik alanına daha genelden bir ilk giriş için *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* (Davies and Brown 1986) kitabını öneriyorum. LIGO'nun aynaları gibi insan boyutunda cisimlerin kuantum davranışı hakkında fizikçi olmayanlar için yazılmış makale ya da kitap bilmiyorum; teknik düzeyde bu konuyu üçüncü Pauli dersimin ikinci yarısında (ilk başta sıralanmış) tartışıyorum: http://www.multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011. John Wheler otobiyografisinde kuantum köpüğü fikrine nasıl ulaştığını anlatıyor [*Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* (Wheeler ve Ford 1998) içerisinde 11. Bölüm]

Black Holes & Time Warps'ın (Thorne 1994) 11. Bölümünde 1994 yılında kara deliklerin içi konusunda bilinenleri ve bunların nasıl öğrenildiğini anlatıyorum; BKL tekilliği ve dinamikleri, tekilliğin çekirdeğini kuantum kütleçekiminin kontrol etmesi ve bunun kuantum köpüğüyle bağlantısı ve o dönemde Erik Poisson ve Werner Israel (Poisson and Israel 1990) tarafından yeni keşfedilmiş ve özellikleri henüz tam anlaşılamamış olan içeri doğru tekillik (kütle-şişme tekilliği) işlenen konular arasında yer alıyor. Dışarı doğru tekillik o kadar yeni keşfedildi ki bu konuda henüz

fizikçi olmayanlar için ayrıntılı bir inceleme yok; teknik keşif makalesi Donald Marolf ve Amos Ori'nin kaleme aldığı Marolf and Ori (2013)'tür. Matthew Choptuik'in çok küçük, süreksiz çıplak tekilliklerin mümkün olduğunu keşfetmesi de onun teknik makalesiyle duyuruldu ve açıklandı: (Choptuik 1993).

27. Bölüm: Yanardağın Ağzı

Bu bölümün büyük çoğunluğunda geçen yanardağa benzer yüzey (Şekil 27.3, 27.5 ve 27.9) temel fizik denklemleriyle betimlenebilir; keza *Endurance*'ın güzergâhı, güzergâhın ağzın üstündeki kararsızlığı ve *Endurance*'ın Miller'ın gezegenine gidişi de. *Teknik Notlar* bölümüne bakınız.

28. Bölüm: Gargantua'nın İçine Giriş

Black Holes & Time Warps'ın (Thorne 1994) önsözünde bir kara deliğin ufkunun içine düşmenin neye benzeyeceği ve nasıl hissettireceğini, hem düşen kişinin gördüğü ve hissettikleri hem de kara deliğin dışındaki birisi tarafından göründüğü şekliyle buradakinden çok daha ayrıntılı olarak betimliyorum. Kara deliğin kütlesi ve dönmesinin görüş ve hissi nasıl etkilediğini de anlatıyorum.

Andrew Hamilton dönmeyen bir kara deliğe düşmenin nasıl görüneceğini hesaplamak için bir "Kara Delik Uçuş Simülatörü" kurdu. Yaptığı hesaplamalar Paul Franklin'in ekibinin *Yıldızlararası* için yaptıklarına benzerdir (8, 9 ve 15. Bölüm) ama *Yıldızlararası*'ndan yıllarca önce gerçekleştirilmiştir. Andrew simülatörünü kullanarak harika film klipleri hazırlamıştır, bunları web sitesinde http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh ve dünyadaki çeşitli gökevlerinde bulabilirsiniz (*bkz.* http://www.spitzinc.com/fulldome_shows/show_blackholes).

Andrew'ın film görüntüleri *Yıldızlararası*'nda gördüklerimizden birkaç yönden farklıdır: Birincisi eğitsel amaçla Andrew bazen kara deliğin ufkunu çizgi örgüleriyle gösterir (gerçek kara deliklerde ve *Yıldızlararası*'nda bu tip örgüler yoktur) ve böyle yaparak aynı zamanda kara delik oluşturmak üzere içe patlayan yıldızı bir "geçmiş ufuk"[1] ile değiştirir. İkincisi "Gerçekçi Bir Kara

[1] Daha net ve daha teknik ifade edersek, kamerasını kara deliğin içine değil, Einstein'ın denklemenin en fazla genişlemiş Schwartzschild çözümü veya Reissner-Nordstrom çözümüne düşürür.

Deliğe Yolculuğu"nda http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/realistic.html Andrew deliğine bir püskürme ve birikim diski bahşeder. Diskteki gaz ufun içine düşer ve geçer ve bu içe düşen gaz kameranın ufukta ve ötesinde gördüklerinde baskın çıkar. Bunun aksine *Yıldızlararası*'nda püskürme yoktur ve birikim diski o kadar durgundur ki o anda gazının hiçbir bölümünü ufkun içine ve ötesine yollamamaktadır, bu yüzden deliğin iç yapısı görece karanlık görünür. Öte yandan *Yıldızlararası*'nda Cooper loş bir ışık sisiyle ve ondan önce düşen şeylerin beyaz pul pul parlamalarıyla karşılaşır. Bunlar simülasyonların sonucu olarak değil Double Negative sanatçıları tarafından yerleştirilmiştir.

29. Bölüm: Teserakt (Dört Boyutlu Küp)

Christopher Nolan bana *Yıldızlararası*'nda bir teserakt kullanacağını söylediğinde çok memnun oldum. Teseraktları ilk kez on üç yaşındayken George Gamow'un harika kitabı *One, Two, Three, . . . Infinity*'de (Gamow 1947) okumuştum ve bu benim kuramsal bir fizikçi olmayı istememde büyük bir rol oynamıştı. Teserakt hakkında ayrıntılı bir inceleme için *The Visual Guide to Extra Dimensions*'a (McMullen 2008) bakabilirsiniz. Christopher Nolan'ın geliştirilmiş teseraktı türünün tek örneğidir; henüz bu kitap ve *Yıldızlararası*'yla bağlantılı diğer kitaplar haricinde hiçbir yerde kamuya açık bir değerlendirmesi yapılmamıştır.

Madeleine L'Engle'in çocuklar için yazdığı klasikleşmiş bilim fantezi romanı *A Wrinkle in Time*'da (L'Engle 1962) çocuklar babalarını bulmak için bir teserakt aracılığıyla seyahat eder ("teser" ederler). Buna dair benim yorumum Cooper'ın Şekil 29.4'te gösterilen Gargantua'nın merkezinden Murph'ün yatak odasına seyahati gibi bunun da bir teseraktın yüzü içerisinde yığının içinden yapılan bir yolculuk olduğudur.

30. Bölüm: Geçmişe Mesaj Yollamak

Fizikçilerin yığın olmadan dört uzayzaman boyutunda zamanda geriye doğru yolculuk konusunda şu andaki değerlendirmesi için *Black Holes & Time Warps*'ın (Thorne 1994) son bölümüne, *The Future of Spacetime*'da (Hawking vd. 2002) Hawking, Novikov ve be-

nim bölümlerime ve *Time Travel and Warp Drives*'a (Everett and Roman 2012) bakılabilir. Bu fizikçilerin hepsi zaman yolculuğu kuramına önemli biçimlerde katkı sağlamış isimlerdir. Modern zamanlardaki zaman yolculuğu araştırmaları hakkında tarihsel bir kayıt olması açısından *bkz. The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics* (Toomey 2007). Zaman yolculuğunun fizik, metafizik ve bilimkurgu alanlarından karşılaştırmalı ele alınışı için *bkz. Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction* (Nahin 1999). *From Eternity to Here: The Quest for The Ultimate Theory of Time* (Carroll 2011) zamanın doğası konusunda fizikçilerin bildiği ve düşündüğü hemen her şeyi içeren harika bir kitaptır.

Evrenimizin daha yüksek bir yığının içerisinde bir zar olduğu kabul edildiğinde zaman yolculuğu konusunda genel okura yazılmış herhangi bir iyi kitap ya da makale bilmiyorum ama 30. Bölümde belirttiğim gibi Einstein'ın yasalarının daha yüksek boyutlara genişletilmesi bize yığın olmadığında yapılanlarla esasta aynı öngörüleri vermektedir.

Cooper'ın Murph'e zamanda geriye doğru mesajlar yollamasının teknik ayrıntıları için *Teknik Notlar*'a bakınız.

31. Bölüm: Dünyadan Kolonilerin Ayrılması

Yıldızlararası'ndaki yorumumda kolonilerin dünyadan ayrılması için Murph'un kullandığı yöntem (*G*'nin azaltılması) konusunda 25. Bölümün içinde söylediklerime bakabilirsiniz.

Princeton Üniversitesinde doktora öğrencisi olduğum1960'lı yılların başında fizik profesörlerimden biri olan Gerard K. O'Neill uzayda *Yıldızlararası*'nın sonunda gördüğümüz kolonilerle benzerlikler taşıyan koloniler kurulması konusunda tutkulu bir fizibilite çalışmasına başlamıştı. Yöneticiliğini yaptığı bir NASA çalışmasıyla da taçlanan araştırması harika bir kitapla sonuçlandı; *The High Frontier: Human Colonies in Space* (O'Neill 1978) adlı bu eseri hararetle tavsiye ediyorum. Fakat Freeman Dyson'ın kitaba yazdığı önsöze dikkat ediniz, orada O'Neill'ın uzay kolonileri rüyasının kendi yaşam süresi içerisinde neden gerçekleşmediği anlatılıyor ve ancak çok daha uzak bir gelecekte gerçekleşebileceği öngörülüyor.

TEKNİK NOTLAR

Evrenimizi yöneten fizik yasaları matematik diliyle ifade edilir. Matematikten rahatsızlık duymayan okurlar için fizik yasalarından çıkan birkaç formülü aşağıya yazıyor ve bu kitaptaki bazı şeyleri çıkarsamak için onları nasıl kullandığımı gösteriyorum. Denklemlerimizde sık sık karşımıza çıkan iki sayı ışık hızı $c = 3{,}00 \times 10^8$ metre/saniye ve Newton'ın kütleçekim sabiti $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ metre^3/kilogram/saniye^2'dir. Kulandığım bilimsel gösterimde 10^8; 1'in ardından gelen sekiz sıfır, 100.000.000 ya da yüz milyon anlamına, 10^{-11} ise 0,[on sıfır]1, yani 0,00000000001 anlamına gelmektedir. Yüzde birden daha yüksek kesinlik istemediğim için kullandığım sayılarda sadece iki ya da üç basamağı, bir sayı çok az biliniyorsa da sadece bir basamağı gösteriyorum.

4. Bölüm: Bükülmüş Zaman ve Uzay, Gelgitli Kütleçekim

Einstein'ın zaman bükülmeleri yasasının en basit, niceliksel biçimi şudur: İki özdeş saati yan yana ve birbirine göre hareketsiz şekilde, hissettikleri kütleçekim kuvvetinin yönü boyunca birbirlerinden ayrılmış biçimde yerleştirin. R tıklama hızlarındaki kesirsel fark, D aralarındaki uzaklık ve g (en hızlı yaşlanandan en yavaş yaşlanana dek gösteren) hissettikleri kütleçekim ivmesi olsun. Bu durumda Einstein yasası $g = Rc^2/D$'dir, der. Harvard kulesinde yapılan Pound-Rebca deneyinde R bir günde 210 pikosaniye, yani $2{,}43 \times 10^{-15}$, kule yüksekliği D ise 22,3 metreydi. Bunları Einstein'ın yasasına yerleştirdiğimizde g = 9,8 metre/saniye^2 çıkar ve bu da dünyanın kütleçekim ivmesidir.

6. Bölüm: Gargantua'nın Gövdesi

Gargantua gibi kendi etrafında son derece hızlı bir biçimde dönen bir kara delikte ufkun ektavor düzlemindeki çevre uzunluğu C'ye

$C = 2\pi GM/c^2 = 9{,}3\ (M/M_{güneş})$ kilometre formülüyle ulaşılır. Burada M deliğin kütlesidir ve $M_{güneş} = 1{,}99 \times 10^{30}$ kilogram da güneşin kütlesidir. Çok yavaş dönen bir kara delikte çevre uzunluğu bu büyüklüğün iki katıdır. Ufkun yarıçapı bu çevre uzunluğu bölü 2π'dir: Gargantua için $R = GM/c^2 = 1{,}48 \times 10^8$ kilometredir ve bu dünyanın güneş çevresindeki yörüngesinin yarıçapıyla hemen hemen aynıdır.

Gargantua'nın kütlesini çıkarsadığım düşünüş yolu şöyledir: Miller'ın gezegeninin kütlesi m gezegenin yüzeyine içeriden bir kütleçekim ivmesi uygular ve bunu Newton'ın ters kare yasası $g = Gm/r^2$'den elde edebiliriz; r gezegenin yarıçapıdır. Gezegenin Gargantua'dan en uzak ve ona en yakın yüzleri üzerinde Gargantua'nın gelgitli kütleçekimi geren bir ivme (r uzaklığında gezegenin yüzeyi ile merkezi arasında Gargantua'nın kütleçekim farkı) uygular ve bu $g_{gelgit} = (2GM/R^3)r$ formülünden elde edilir. Burada R gezegenin Gargantua etrafındaki yörüngesinin yarıçapıdır ve Gargantua'nın ufkunun yarıçapıyla hemen hemen aynıdır. Yüzeyindeki bu geren ivme gezegenin kendi içerden kütleçekim ivmesini aşarsa gezegen parçalanır; bu yüzden g_{gelgit} g'den küçük olmalıdır: $g_{gelgit} < g$. Yukarıdaki formüllere g, g_{gelgit} ve R'yi koyarak ve gezegenin kütlesini $m = (4\pi/3)r^3\varrho$'deki ϱ yoğunluğu cinsinden ifade edersek, bir miktar işlemle $M < \sqrt{3}c^3/\sqrt{2\pi G^3\rho}$ sonucunu elde ederiz. Miller'ın gezegeninin yoğunluğunun $\varrho = 10.000$ kilogram/metre^3 (yaklaşık bu kadar sıkıştırılmış kaya) olduğunu tahmin ediyorum, buradan Gargantua'nın kütlesi için $M < 3{,}4 \times 10^{38}$ kilogram olduğu sonucunu elde ediyorum ki bu yaklaşık yaklaşık olarak 200 milyon güneşinkiye aynıdır; bunu 100 milyon güneş olarak yuvarlıyorum.

Einstein'ın formüllerini kullanarak Miller'ın gezegeni üzerindeki zaman yavaşlamasını, S = bir saat/(yedi yıl) = $1{,}63 \times 10^{-5}$'i Gargantua'nın dönme hızının mümkün en hızlı dönmesinden ne kadar az olduğunu gösteren α kesirine, $\alpha = 16S^3/(3\sqrt{3})$'e bağlayan bir formül çıkarsadım. Bu formül sadece çok hızlı dönmeler için doğrudur. S değerini formüle yerleştirerek $\alpha = 1{,}3 \times 10^{-14}$ değerini elde ederiz; bu Gargantua'nın aktüel dönmesinin mümkün olan ün yüksek hızla dönmesinden yaklaşık yüz trilyonda bir az olduğu anlamına gelir.

8. Bölüm: Gargantua'yı Görüntülemek

Double Negative'teki Oliver James'e Gargantua çevresindeki ışık ışınlarının yörünge hareketiyle ilgili verdiğim denklemler Levin ve Perez-Giz (2008) içerisinde Ek A bölümünde yer alanların değişik bir biçimi. Işın demetlerinin evrimiyle ilgili denklemlerimiz de Pineult ve Roeder (1977a) ve Pineult ve Roder'dekilerin (1977b) değişik bir biçimidir. http://arxiv.org/find/gr-qc adresinde yayınlayacağımız makalelerde Paul Franklin'in ekibi ve ben denklemlerimizin spesifik biçimlerini veriyor, uygulanmalarının ve ortaya çıkan simülasyonların ayrıntılarını değerlendiriyoruz.

12. Bölüm: Oksijensiz Kalmak

13. Bölümdeki ifadelerimin temelini oluşturan hesaplamalar burada. Bu aynı zamanda bir bilim insanının nasıl tahmin yürüttüğünün hoş bir örneğidir. Sayılar fazlasıyla yaklaşık değerler taşıyor; tek bir basamak olacak şekilde alıyorum.

Dünyanın atmosferinin kütlesi 5×10^{18} kilogramdır. Bunun yüzde 80'i azot, yüzde 20'si moleküler oksijen O_2'dir; bu 1×10^{18} kilogram O_2 eder. Çürümemiş bitki yaşamı (jeofizikçilerin ifadesiyle "organik karbon") içerisindeki karbon miktarı yaklaşık 3×10^{15} kilogramdır, bunun kabaca yarısı okyanus yüzey katmanlarında, yarısı karadadır [Hedges ve Keil'de (1995) Tablo 1]. Her iki form da ortalama olarak olarak yaklaşık otuz yılda oksidize olur (CO_2'ye dönüştürülür). CO_2'de iki oksijen atomu (atmosferden gelen) ve sadece bir karbon atomu olduğu için ve bir oksijen atomunun kütlesi bir karbon atomunun kütlesinin 16/12'si olduğuna göre bütün bitkiler öldükten sonra tüm bu karbonun oksidasyonu $2 \times 16/12 \times (3 \times 10^{15}$ kilogram$) = 1 \times 10^{16}$ kilogram O_2 tüketecektir ki bu da atmosferdeki oksijenin yüzde 1'idir.

Dünya okyanuslarında ani altüst oluşlar ve bunların nasıl ortaya çıkabileceğinin kuramı için *bkz.* Adkins, Ingersoll ve Pasquero (2005). Böyle bir altüst oluş tarafından yüzeye çıkartılabilecek olan okyanus tabanlarındaki organik karbon miktarının standart tahmini, okyanus akıntıları ve hayvan hareketliliğiyle karışmış bir üst tortul tabakaya odaklanır. Bu karışık katmanın karbon içeriği, tortulara salınan karbonun tahmini oranı (yılda yaklaşık 10^{11} kilogram) ile karbonunun okyanus suyundaki oksijen tarafından

okside edilmesi için gereken ortalama zamanın (1000 yıl) çarpımıdır ve sonuç yirmide biri karada ve okyanus yüzey katmanları içinde olmak üzere $1,5 \times 10^{14}$ kilogramdır (Emerson ve Hedges 1988, Hedges ve Keil 1995). Fakat: (i) Tahmini tortulaşma oranı çok büyük derecede yanlış olabilir; örneğin Baumgart vd. (2009) kapsamlı ölçümlere dayanarak Hint Okyanusunda Java ve Sumatra açıklarındaki salınım oranını elli katsayılı bir belirsizlikle tahmin etmektedir ve bu değerin bütün okyanusa taşınması karışık katman içinde 3×10^{15} kilogramlık karbon sonucunu verir (aynısı karada ve okyanus yüzey katmanları için de geçerlidir). (ii) Tortulaşan karbonun önemli bir bölümü deniz suyuyla temasa geçerek karışmayan ve muhtemel ani okyanus altüst oluşları dışında oksidize olmayan bir alt tortu katmanının içine batabilir. Son altüst oluşun en son gerçekleşen buz çağında, bundan 20.000 yıl önce olduğu düşünülüyor ve bu karışık katman içindeki oksidasyon zamanından yirmi kat daha uzundur. Dolayısıyla karışmamış katman karışık katmandan, keza karadaki ve okyanus yüzeyindekinden yirmi kat daha fazla organik karbon sahibi olabilir. Yeni bir altüst oluşla okyanus yüzeyine getirilir ve orada oksidize olursa bu herkesin oksijensiz kalmasına ve CO_2 zehirlenmesinden ölmesine yeter: *bkz.* 12. Bölümün sonu. Bu yüzden böyle bir senaryonun gerçekleşmesi hemen hiç muhtemel olmasa da düşünülebilir.

15. Bölüm: *Yıldızlararası*'ndaki Solucandeliğinin Görselleştirilmesi

Christopher Nolan *Yıldızlararası*'nın solucandeliğinin çapının birkaç kilometre olmasını istedi. Solucandeliğinin açısal çapı dünyadan görüldüğü şekliyle radyan cinsinden, bu çap bölü dünyadan uzaklığıdır ki bu yaklaşık 9 astronomik birim ya da $1,4 \times 10^9$ kilometredir (Satürn'ün yörüngesinin yarıçapı). Bu yüzden solucandeliğinin açısal çapı yaklaşık olarak (2 kilometre)/($1,4 \times 10^9$ kilometre) = $1,4 \times 10^{-9}$ radyandır ve bu 0,0003 yay saniye eder. Radyo teleskoplar dünya-ötesi interferometre (girişimölçer) kullanarak rutin biçimde bu açısal çözünürlüğe ulaşırlar. "Uyarlanabilir optik" adı verilen bir teknik kullanarak yeryüzündeki optik teleskoplar, ayrıca uzaydaki Hubble uzay teleskobu 2014 yılında bundan yüz kat daha kötü açısal çözünürlüğe ulaşmaktadır. Hawaii'deki

ikiz Keck teleskopları arasındaki girişim ölçümü solucandeliğinin açısal çapından on kat daha kötü bir çözünürlüğe ulaşabilmektedir ve *Yıldızlararası*'ndaki olayların geçtiği çağda daha geniş aralıklara yerleştirilmiş optik teleskoplar arasındaki optik girişim ölçümünün solucandeliğinin 0,0003 yay saniyesinden daha iyi çözünürlüklere ulaşılmasını sağlaması gayet mantıklıdır.

17. Bölüm: Miller'ın Gezegeni

Newton'ın kütleçekim yasalarına matematiksel biçimiyle aşinaysanız astrofizikçiler Bohdan Paczynski ve Paul Wiita'nın onlarda yaptığı değişiklikleri (Paczynski ve Wiita 1980) öğrenmek ilginizi çekebilir. Bu modifikasyonda dönmeyen bir kara deliğin kütleçekim ivmesi Newton'ın ters kare yasasında değişikliğe uğratılarak $g = GM/r^2$, $g = GM/(r - r_h)^2$ 'ye dönüşür. Burada M değilin kütlesi, r deliğin dışında g ivmesinin hissedildiği yarıçaptır ve $r_h = 2GM/c^2$ dönmeyen deliğin ufkunun yarıçapıdır. Bu modifikasyon genel göreliliğin öngördüğü kütleçekim ivmesine şaşırtıcı biçimde iyi bir yaklaştırımdır.[1] Bu modifiye edilmiş kütleçekimini kullanarak Şekil 17.2'nin[2] niceliksel bir versiyonunu oluşturup buradan Miller'ın gezegeninin yörünge yarıçapını çıkartabilir misiniz? Ulaştığınız sonuç sadece kabaca doğru olabilir, çünkü Gargantua'nın kütleçkiminin Paczynski-Wiita betimlemesi kara deliğin dönmesi nedeniyle uzayın bir girdap hareketine sürüklenmesini göz önüne almaz.

25. Bölüm: Profesörün Denklemi

Profesörün denkleminde (Şekil 25.6) görülen çeşitli matematik sembollerinin anlamları onun diğer on beş tahtasında açıklanmaktadır ve Interstellar.withgoogle.com'da bu kitapla ilgili web sayfasında bulunabilir. Denklemindeki "Aksiyon" S ("kuantum et-

---

[1] Bu Paczynski-Wiita kütleçekim modifikasyonu *Yıldızlararası*'yla ilintili bir kütleçekim sapan atışı video oyunu için kara deliğin uzay aracı yörüngeleri üzerindeki etkisini ortaya çıkarmakta kullanılmıştır; *bkz.* Game.InterstellarMovie.com.

[2] Bağlantılı bir hesaplama için *bkz.* aşağıda 27. Bölüm için verilen teknik notlar.

kili aksiyonun" klasik limiti) "Lagrange" $\mathcal{L}$ fonksiyonunlarının bir integrali olarak ifade edilmektedir. Langrangianlar beş boyutlu yığının ve bizim dört boyutlu zarımızın uzayzaman geometrilerini ("metrikler") kapsar, ayrıca yığının içinde yaşayan bir alanlar kümesini (Q, σ, λ, ε ve ϕ^i ile gösterilir) ve zarımızda yaşayan "standart model alanlarını" (elektrik ve manyetik alanlar dahil) içerir. Alanlar ve uzayzaman metrikleri farklılaştırılarak S Aksiyonunun bir uçdeğeri (maksimumu, minimumu veya eyer noktası) aranır. Bir uçdeğere ulaştıran koşullar alanların evrimlerini kontrol eden bir "Euler-Lagrange" denklemler kümesidir. Bu varyasyon hesaplamalarında standart bir işlemdir. Profesör ve Murph bilinmeyen yığın alanları ϕ^i, bilinmeyen fonksiyonlar $U(Q)$, $H_{ij}(Q^2)$, M (standart model alanları) ve Lagrange denkleminde ortaya çıkan bilinmeyen sabitler W_{ij} için tahmin listeleri ortaya atarlar. Şekil 25.9'da beni onların tahmin listelerinden birini tahtaya yazarken görüyorsunuz. Ardından her bir tahmin kümesi için çeşitli alanları ve uzayzaman geometrilerini uyguluyor, Euler-Lagrange denklemlerini çıkartıyor ve ardından bilgisayar simülasyonlarında bu denklemlerin öngörülerini kütleçekim sapmaları için açımlıyorlar.

27. Bölüm: Yanardağın Ağzı

Bu not enerji ve açısal momentumun korunmasının ve Newton'ın kütleçekim yasalarının matematiksel gösterimine aşina okurlar içindir. Yanardağa benzer yüzey için aşağıdaki formüle (i) Gangantua'nın kütleçekim ivmesi için Paczynski-Wiita'nın yaklaşık formülünü kullanarak, $g = GM/(r - r_h)^2$ (*bkz.* yukarıdaki 17. Bölüm için teknik notlar) ve (ii) enerji ve açısal momentum korunum yasalarını kullanarak ulaşmanız konusunda size meydan okuyorum. Formül 17. Bölüm için verilen teknik notlardaki gösterim artı *Endurance*'ın açısal momentumu (birim kütle başına) için L kullanılarak şöyledir:

$$V(r) = -\frac{GM}{r - r_h} + \frac{1}{2}\frac{L^2}{r^2}$$

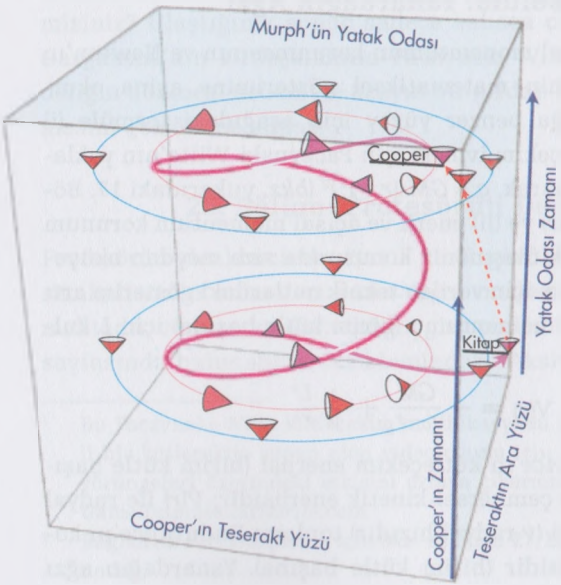
İlk terim *Endurance*'ın kütleçekim enerjisi (birim kütle başına), ikincisiyse onun çembersel kinetik enerjisidir; $V(r)$ ile radyal kinetik enerji $v^2/2$'nin (v radyal hızıdır) toplamı Endurance'ın korunan toplam enerjisidir (birim kütle başına). Yanardağın ağzı

$V(r)$'nin maksimum olduğu yerde r yarıçapındadır. Bu denklemleri ve fikirleri kullanarak sizleri 27. Bölümde Endurance'ın güzergâhı, güzergâhın yanardağın ağzındaki dengesizliği ve Edmuns'un gezegenine doğru fırlatılışı hakkında ortaya attığım iddiaları kanıtlamaya çağırıyorum.

30. Bölüm: Geçmişe Mesaj Yollamak

Yığının içinde de bizim zarımızın içinde olduğu gibi mesajların ve diğer şeylerin gidebileceği uzayzamandaki konumlar hiçbir şeyin ışıktan hızlı gidemeyeceğini söyleyen yasa tarafından kısıtlanır. Biz fizikçiler bu yasanın sonuçlarını araştırmak için uzayzaman diyagramları kullanırız. Çizdiğimiz uzayzaman diyagramlarında her bir olayda bir "gelecek ışık konisi" olur. Işık bu olaydan dışarıya bir ışık konisi boyunca ilerler; ışıktan yavaş hareket eden diğer her şey bir olaydan çıkışını alıp yolculuk ederken ya koni üzerinde ya da onun içinde yol alır. *Bkz.* örneğin *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Hartle 2003).

Şekil TN.1 benim *Yıldızlararası* yorumumda gelecek ışık konilerinin teseraktın içinde ve yüzleri üzerindeki durumlarını gös-



Şekil TN.1 Bir uzay boyutu eksiltilmiş şekliyle teseraktın içinde uzayzamanın nedensel yapısı.

teriyor. (Bu benim 30. Bölümün 1. dipnotunda bahsettiğim uzayzaman bükülmesinin matematiksel betimlemesidir. Fizikçiler bu ışık konileri örüntüsüne teseraktın içindeki "uzayzamanın nedensel yapısı" derler. Şekil TN.1 aynı zamanda Cooper'ın teseraktın içyapısından geçirerek Murph'ün odasına yolladığı kütleçekim dalgası mesajının (kuvvetinin) dünya çizgisini (menekşe rengi eğri) göstermekte ve Cooper'ın yatak odasını görmesine aracılık eden yatak odasından çıkarak teserakt yüzlerinden geçen ışık ışınının dünya çizgisini (kırmızı kesikli çizgi) bize vermektedir. Bu Şekil 30.5'te gösterilen tamamen uzamsal diyagramın uzayzaman versiyonudur.

Bu diyagrama bakarak kütleçekim dalgası mesajının ışık hızında yolculuk etmekle beraber yine de nasıl yatak odası zamanına ve Cooper'ın zamanına göreli olarak geriye doğru hareket ettiğini anlayabiliyor musunuz? Bunun aksine ışık ışınının nasıl ışık hızında hareket edip yatak odası zamanına ve Cooper'ın zamanına göreli olarak ileri doğru hareket ettiğini anlayabiliyor musunuz? Bunu Şekil 30.6'daki Escher'in çizimini nasıl ele aldığımızla karşılaştırın.

GÖRSEL HAKLAR

Aşağıdaki görseller için © Warner Bros. Entertainment Inc.:
1.2, 3.3, 3.4, 3.6, 5.6, 8.1, 8.5, 8.6, 9.7, 9.9, 9.10, 9.11, 11.1, 14.9, 15.2, 15.4, 15.5, 17.5, 17.9, 18.1, 19.2, 19.3, 20.1, 20.2, 24.5, 25.1, 25.7, 25.8, 25.9, 27.8, 28.3, 29.8, 29.14, 30.1, 31.1

Aşağıdaki görseller için © Kip Thorne: 2.4, 2.5, 3.2, 3.5, 4.3, 4.4, 4.8, 4.9, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 8.2, 8.7, 9.8, 13.4, 13.5, 13.6, 14.5, 15.1, 15.3, 16.2, 16.5, 16.8, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.6, 19.1, 21.3, 22.2, 22.3, 22.4, 23.2, 23.5, 23.6, 23.7, 23.8, 24.1, 24.4, 24.6, 24.7, 25.2, 25.3, 25.5, 25.6, 26.5, 26.10, 26.11, 26.12, 26.13, 27.1, 27.3, 27.6, 27.10, 28.2, 29.1, 29.2, 29.12, 30.2, 30.3, 30.4, TN.1

1.1: Carolee Winstein

1.2: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.

1.3: Tyler Ott

1.4: Rosie Draper

2.1: NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Racah Institute of Physics/The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Bilim Ekibi ve ESA

2.2: Adam Evans, www.sky-candy.ca

2.3: NASA/SDO ve AIA, EVE ve HMI bilim ekiplerinin izniyle

2.6: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet

2.7: © Best View Stock/Alamy

2.8: Dünyanın Görüntüsü: NASA

2.9: © Picture Press/Alamy

2.10: © Russell Kightley/Science Source

2.11: Dünyanın Görüntüsü: NASA

3.1: Waldseemuller haritası: Harita görüntüsü için izin Norman B. Leventhal Harita Merkezi, Boston Public Library/Sidney R. Knafel Collection, Phillips Academy, Andover, MA. Ortelius haritası: Library of Congress Geography ve Map Division Washington, D.C. Bowen haritası: Geographicus Rare Antique Maps

3.3: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James
3.6: Kip Thorne. © Warner Bros.
4.2: United States Government, adaptasyon Kip Thorne
4.5: © Lia Halloran, www.liahalloran.com
4.6: © Lia Halloran ve Kip Thorne
4.7: © Lia Halloran ve Kip Thorne
5.5: NASA/JPL-Caltech izniyle.
5.6: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James
5.7: Karl Schwarzschild: fotoğraf Robert Bein, izin AIP Emilio Segrè Visual Archives. Roy Kerr: Roy P. Kerr. Stephen Hawking: © Richard M. Diaz. Robert Oppenheimer: en.wikipedia.org—J._Robert_Oppenheimer. Andrea Ghez: Mary Watkins (UCLA)
5.8: Keck/UCLA Galactic Center Group; Andrea Ghez
5.9: Akira Fujii/ESA/Hubble
6.5: © Kip Thorne, desenler Edward Teo'nun (2003) çizimlerinden esinlenmiştir
7.4: Soldaki: © Robert Gendler (robgendlerastropics.com). Sağdaki: © Kip Thorne
7.6: Steve Drasco, yardımcı fizik profesörü, California Polytechnic State University, San Luis Obispo
7.7: Courtesy NASA/JPL-Caltech
8.1: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James
8.3: Yıldız alanı görüntüsü: Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS; çizim: Kip Thorne. Film kamerası ikonu için izin basarugur
8.4: Yıldız alanı görüntüsü: Alain Riazuelo, IAP/UPMC/CNRS; çizim: Kip Thorne
8.5: Görüntü: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James; çizim: Kip Thorne. © Warner Bros. ve Kip Thorne
8.6: Görüntü: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James; çizim: Kip Thorne. © Warner Bros. ve Kip Thorne. Film kamerası ikonu için izin basarugur
9.1: Fotoğraf: NASA/STScI. Tayf: Maarten Schmidt
9.2: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
9.3: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
9.4: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
9.5: James Guillochon

9.6: James Guillochon
9.7: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James
9.8: Film kamerası ikonu için izin basarugur. © Kip Thorne
9.9: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James
10.1: Steve Drasco, assistant professor of physics, California Polytechnic State University, San Luis Obispo
11.2: NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center/Giovanni. James G. Acker'a özel teşekkürler.
13.1: © Kip Thorne ve Richard Powell, www.atlasoftheuniverse.com
13.2: Freeman Dyson
13.3: Copyright © American Institute of Aeronautics and Astronomics, Inc. 1983. Bütün hakları saklıdır.
14.1: Elma © Preto Perola/Shutterstock.com. Karınca:© Katarzyna Cielecka/Fotalia.com
14.2: Soldaki solucandeliği çizimi daha önce Misner, Thorne ve Wheeler'da (1973) yayımlandı; çizimin mirasçısı: Kip Thorne
14.3: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzinEva Zimet
14.4: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
14.6: Soldaki: © Catherine MacBride. Sağdaki: © Mark Interrante
14.7: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
14.8: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
15.2: Soldaki: Kip Thorne. Sağdaki: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James. © Warner Bros. ve Kip Thorne
15.4: Soldaki: Kip Thorne. Sağdaki: Double Negative Visual Effects: Eugénie von Tunzelmann ve Oliver James. © Warner Bros. ve Kip Thorne
16.1: Fotoğraflar LIGO Laboratory'nin izniyle
16.3: LIGO Laboratory'nin izniyle
16.4: Görüntüleri F. Foucart vd.nin (2011) simülasyonundan yaratanlar Robert McGehee, Ian Mac-Cormack, Amin Nikbin ve Keara Soloway
16.6: © Lia Halloran, www.liahalloran.com
16.7: Görüntü izni Robert Owen, Fizik ve Astronomi Bölümü, Oberlin College
16.9: Görsel için izin SXS collaboration, www.blackholes.org
16.10: Steffen Richter
17.7: Üstteki: © Xinhua/Xinhua Press/Corbis. Alttaki: © AFLO/Nippon News/Corbis

17.8: NASA/JPL/University of Arizona
18.1: Veriler: Huan Yang, Aaron Zimmerman; görüntü: Oliver James ve Eugénie von Tunzelmann. © Warner Bros.
21.1: İzin NASA/JPL-Caltech
21.2: Soldaki: izin John Schwarz. Sağdaki: Steve Jennings/Getty Images
22.1: History of Science Collection, John Hay Library, Brown University
23.1: Güneş görseli: NASA/SDO ve AIA, EVE ve HMI bilim ekiplerinin izniyle
23.4: Randall fotoğraf: © Tsar Fedorsky, 2014. Sundrum fotoğraf: Raman Sundrum, kuramsal fizik profesörü, University of Maryland, College Park
24.2: NASA/JPL-Caltech/GSFC/SDSS
24.3: Andrew Fruchter (STScI) vd. WFPC2, HST, NASA
24.8: NASA/JPL
25.1: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.
25.4: ESA–GOCE High Level Processing Facility
25.7: Kip Thorne. © Warner Bros.
25.8: Melinda Sue Gordon. © Warner Bros.
26.1: Kamusal hale getiren PoorLeno
26.2: LIGO Laboratory fotoğraf izniyle
26.3: Mülkiyet hakkı Matthew H. Zimet. İzin Eva Zimet
26.4: ChrisVanLennepPhoto/Shutterstock.com
26.6: © Stephen Hawking, John Preskill, Kip Thorne
26.7: Soldaki: © Matthew W. Choptuik 2000. Orta sağdaki: © Kip Thorne
26.8: Fotoğraf Irene Fertik 1997
26.9: © Lia Halloran, www.liahalloran.com
27.2: Kip Thorne çizim; Endurance'ın görüntüsü Double Negative. © Kip Thorne ve Warner Bros.
27.4: Jeff Darling, www.diseno-art.com
27.5: Kip Thorne çizim; Endurance'ın görüntüsü Double Negative. © Kip Thorne ve Warner Bros.
27.7: Kip Thorne çizim; Endurance'ın görüntüsü Double Negative. © Kip Thorne ve Warner Bros.
27.9: Kip Thorne çizim; Endurance'ın görüntüsü Double Negative. © Kip Thorne ve Warner Bros.
28.1: Kip Thorne çizim; Endurance'ın görüntüsü Double Negative. © Kip Thorne ve Warner Bros.

28.4: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam Cameron D. Bennett'ın çiziminden uyarlanmıştır

29.3: Tesseract: "Hypercube." Patent Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons—http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypercube.svg#mediaviewer/File:Hypercube.svg, uyarlayan Kip Thorne. Sürüklenen adam: çizim Cameron D. Bennett

29.4: Yıldız ve galaksilerin görüntüsü: Şekil 2.1'e yaptığım tahrif, izin veren NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Racah Institute of Physics/The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Bilim Ekibi ve ESA. Sürüklenen adamın gölgesi Cameron D. Bennett'in çiziminden uyarlandı.

29.5: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam Cameron D. Bennett'in çiziminden uyarlandı. Ayaktaki kadın uyarlamasının kaynağı Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com

29.6: Tesseract: "Hypercube." Patent Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons—http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hypercube.svg#mediaviewer/File:Hypercube.svg, uyarlayan Kip Thorne. Sürüklenen adam: çizim Cameron D. Bennett. Ayaktaki kadın: Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com. Lines, oklar ve metin: Kip Thorne

29.7: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam: Cameron D. Bennett. Ayaktaki kadın: Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com

29.9: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam: Cameron D. Bennett. Ayaktaki kadın: Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com

29.10: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam: Cameron D. Bennett. Ayaktaki kadın: Kamenetskiy Konstantin/Shutterstock.com

29.11: © Christopher Nolan

29.13: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adam: Cameron D. Bennett

30.5: Çizim © Kip Thorne. Sürüklenen adamın gölgesi Cameron D. Bennett'in çiziminden uyarlandı

30.6: M. C. Escher's Waterfall © 2014 The M. C. Escher Company–The Netherlands. Bütün hakları saklıdır

KAYNAKÇA

Abbott, E. A. (1884). *Flatland* (Dover Thrift Baskısı 1992, New York); internette rahatlıkla bulunabilir, örrneğin for http://en.wikisource.org/wiki/Flatland_(second_edition).

Adkins, J. F., Ingersoll, A. P. ve Pasquero, C. (2005). "Rapid Climate Change and Conditional Instability of the Glacial Deep Ocean from the Thermobaric Effect and Geothermal Heating," *Quaternary Science Reviews*, 24, 581–594.

Al-Khalili, J. (2012). *Black Holes, Wormholes, and Time Machines*, ikinci baskı (CRC Press, Boca Raton, Florida).

Barrow, J. D. (2011). *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos* (W. W. Norton, New York).

Bartusiak, M. (2000). *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time* (The Berkeley Publishing Group, New York).

Baum, R. Ve Sheehan, W. (1997). *In Search of the Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* (Plenum Trade, New York).

Baumgart, A., Jennerjahn, T., Mohtadi, M. ve Hebbeln, D. (2010). "Distribution and Burial of Organic Carbon in Sediments from the Indian Ocean Upwelling Region Off Java and Sumatra, Indonesia," *Deep-Sea Research I*, 57, 458–467.

Begelman, M. ve Rees, M. (2009). *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, 2. baskı (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere).

Billings, L. (2013). *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* (Penguin Group, New York).

Brans, C. (2010). "Varying Newton's Constant: A Personal History of Scalar-Tensor Theories," *Einstein Online*, 1002; şurdan ulaşılabilir: http://www.einstein-online.info/spotlights/scalar-tensor.

Carroll, S. (2011). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Oneworld Publications, Oxford, İngiltere).

Carroll, S. (2014). *Preposterous Universe*, http://www.preposterousuniverse.com/blog/.

Choptuik, M. W. (1993). "Universality and Scaling in Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field," *Physical Review Letters, 70*, 9.

Davies, P.C.W. ve Brown, J. R. (1986). *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere).

Dyson, F. J. (1963). "Gravitational Machines," *Interstellar Communication* içinde, editör A.G.W. Cameron (W. A. Benjamin, New York), s: 115–120.

Dyson, F. J. (1968). "Interstellar Transport," *Physics Today*, Ekim1968, s: 41–45.

Ehlinger, L. (2007). *Flatland: The Film*, YouTube'ta http://www.youtube.com/watch?v=eyuNrm4VK2w; ayrıca *bkz.* http://www.flatlandthefilm.com.

Emerson, S. Ve Hedges, J. I. (1988). "Processes Controlling the Organic Carbon Content of Open Ocean Sediments," *Paleoceanography, 3*, 621–634.

Everett, A. ve Roman, T. (2012). *Time Travel and Warp Drives* (Chicago Üniversitesi Yayınları, Chicago).

Feynman, R. (1965). *The Character of Physical Law* (British Broadcasting System, Londra); ciltsiz baskı (MIT Yayınları, Cambridge, Massachusetts). [*Fizik Yasaları Üzerine*, çev: Nermin Arık, Alfa Bilim dizisi, 2012]

Forward, R. (1962). "Pluto—the Gateway to the Stars," *Missiles and Rockets, 10*, 26–28.

Forward, R. (1984). "Roundtrip Interstellar Travel Using Laser-Pushed Lightsales," *Journal of Spacecraft and Rockets, 21*, 187–195.

Foucart, F., Duez, M. D., Kidder, L. E. ve Teukolsky, S. A., "Black Hole–Neutron Star Mergers: Effects of the Orientation of the Black Hole Spin," *Physical Review D 83*, 024005 (2011); ayrıca şurada: http:arXiv:1007.4203.

Freeze, K. (2014). *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, New Jersey).

Gamow, G. (1947). *One, Two, Three . . . Infinity: Facts and Speculations of Science* (Viking Press, New York; şu an ulaşmak için Dover Publications, Mineola, New York).

Gregory, R., Rubakov, V. A. ve Sibiryakov, S. M. (2000). "Opening Up Extra Dimensions at Ultra-Large Scales," *Physical Review Letters, 84*, 5928–5931; ayrıca şurada http://lanl.arxiv.org/abs/hep-th/0002072v2.

Greene, B. (2003). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 2. baskı (W. W. Norton, New York). [*Evrenin Zarafeti*, TÜBÜTAK Yayınları, çev: Ebru Kılıç, 2011]

Greene, B. (2004). *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (Alfred A. Knopf, New York). [*Evrenin Dokusu*, TÜBÜTAK Yayınları, çev: Murat Alev, 2013]

Guillochon, J., Ramirez-Ruiz, E., Rosswog, S. ve Kasen, D. (2009). "Three-Dimensional Simulations of Tidally Disrupted Solar-Type Stars and the Observational Signatures of Shock Breakout," *Astrophysical Journal, 705*, 844–853.

Guth, A. (1997). *The Inflationary Universe* (Perseus, New York).

Hartle, J. (2003): *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Pearson, Upper Saddle River, New Jersey).

Hawking, S. (1988). *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes* (Bantam Books, New York). [*Zamanın Kısa Tarihi*, çev. Barış Gönülşen, Alfa Bilim Dizisi, 2013]

Hawking, S. (2001). *The Universe in a Nutshell* (Bantam Books, New York). [*Ceviz Kabuğunda Evren*, çev. Kemal Çömlekçi, Alfa Bilim Dizisi, 2013]

Hawking, S. ve Mlodinow, L. (2010). *The Grand Design* (Bantam Books, New York). [*Büyük Tasarım*, çev. Selma Öğünç, Doğan Kitap, 2013]

Hawking, S., Novikov, I., Thorne, K. S., Ferris, T., Lightman, A. ve Price, R. (2002). *The Future of Spacetime* (W. W. Norton, New York).

Hawking, S. ve Penrose, R. (1996). *The Nature of Space and Time* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, New Jersey). [*Zamanın ve Uzayın Doğası*, çev: Umur Daybelge, Alfa Bilim Dizisi, 2011]

Hedges, J. I. ve Keil, R. G. (1995). "Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis," *Marine Chemistry, 49*, 81–115.

Isaacson, W. (2007). *Einstein: His Life and Universe* (Simon & Schuster, New York).

Kennefick, D. (2007). *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, New Jersey).

Lemonick, M. (2012). *Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* (Walker, New York).

L'Engle, M. (1962). *A Wrinkle in Time* (Farrar, Strauss and Giroux, New York).

Levin, J. ve Perez-Giz, G. (2008). "A Periodic Table for Black Hole Orbits," *Physical Review D, 77*, 103005.

Lynden-Bell, D. (1969). "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars," *Nature, 223*, 690–694.

Maartens, R. ve Koyama K. (2010). "Brane-World Gravity," *Living Reviews in Relativity 13, 5*; ayrıca şurada http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2010-5/.

Marolf, D. ve Ori, A. (2013). "Outgoing Gravitational Shock-Wave at the Inner Horizon: The Late-Time Limit of Black Hole Interiors," *Physical Review D, 86*, 124026.

McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A. ve Blandford, R. D. (2012). "Alignment of Magnetized Accretion Disks and Relativistic Jets with Spinning Black Holes," *Science, 339*, 49–52; ayrıca şurada http://arxiv.org/pdf/1211.3651v1.pdf.

McMullen, C. (2008). *The Visual Guide to Extra Dimensions*. Cilt 1: *Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* (Custom Books).

Meier, D. L. (2012). *Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm* (Springer Verlag, Berlin).

Merritt D. (2013). *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* (Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton, New Jersey).

Misner, C. W., Thorne, K. S. ve Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation* (W. H. Freeman, San Francisco).

Nahin, P. J. (1999). *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, 2. baskı (Springer Verlag, New York).

Obst, L. (1996). *Hello, He Lied: & Other Truths from the Hollywood Trenches* (Little, Brown, Boston).

Obst, L. (2013). *Sleepless in Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* (Simon & Schuster, New York).

O'Neill, G. K. (1978). *The High Frontier: Human Colonies in Space* (William Morrow, New York; 3. Baskıyı yayınlayan Apogee Books, 2000).

Paczynski, B. ve Wiita, P. J. (1980). "Thick Accretion Disks and Supercritical Luminosities," *Astronomy and Astrophysics, 88*, 23–31.

Pais, A. (1982). *"Subtle Is the Lord . . .": The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford, İngiltere).

Panek, R. (2011). *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* (Houghton Mifflin Harcourt, New York).

Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe* (Alfred A. Knopf, New York).

Perryman, M. (2011). *The Exoplanet Handbook* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere).

Pineault, S. ve Roeder, R. C. (1977a). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. I. Analytical Results," *Astrophysical Journal, 212*, 541–549.

Pineault, S. ve Roeder, R. C. (1977b). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. II. Numerical Results," *Astrophysical Journal, 213*, 548–557.

Poisson, E. ve Israel, W. (1990). "Internal Structure of Black Holes," *Physical Review D, 41*, 1796–1809.

Randall, L. (2006). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (HarperCollins, New York).

Rees, M., editör (2005). *Universe: The Definitive Visual Guide* (Dorling Kindersley, New York).

Roseveare, N. T. (1982). *Mercury's Perihelion from Le Verriere to Einstein* (Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford, İngiltere).

Schutz, B. (2003). *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity* (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere)

Schutz, B. (2009). *A First Course in General Relativity*, 2. baskı (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere).

Singh, P. S. (2004). *Big Bang: The Origin of the Universe* (HarperCollins, New York).

Shostak, S. (2009). *Confessions of an Alien Hunter: A Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence* (National Geographic, Washington, DC).

Stewart, I. (2002). *The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Basic Books, New York).

Teo, E. (2003). "Spherical Photon Orbits Around a Kerr Black Hole," *General Relativity and Gravitation, 35*, 1909–1926; ayrıca şurada http://www.physics.nus.edu.sg/~phyteoe/kerr/paper.pdf.

Thorne, K. S. (1994). *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (W. W. Norton, New York).

Thorne, K. S. (2002). "Spacetime Warps and the Quantum World: Speculations About the Future," Hawking vd. içerisinde. (2002).

Thorne, K. S. (2003). "Warping Spacetime," *The Future of Theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Stephen Hawking's 60th Birthday* içerisinde, editörler G. W. Gibbons, S. J. Rankin ve E.P.S. Shellard (Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge, İngiltere), 5. Bölüm, s: 74–104.

Toomey, D. (2007). *The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics* (W. W. Norton, New York).

Visser, M. (1995). *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (American Institute of Physics, Woodbury, New York).

Vilenkin, A. (2006). *Many Worlds in One: The Search for Other Universes* (Hill and Wang, New York).

Wheeler, J. A. ve Ford, K.(1998). *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* (W. W. Norton, New York).

Will, C. M. (1993). *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Basic Books, New York).

Witten, E. (2000). "The Cosmological Constant from the Viewpoint of String Theory," ayrıca şurada http://arxiv.org/abs/hep-ph/0002297.

Yang, H., Zimmerman, A., Zenginoğlu, A., Zhang, F., Berti, E. ve Chen, Y. (2013)."Quasinormal Modes of Nearly Extremal Kerr Spacetimes: Spectrum Bifurcation and Power-Law Ringdown," *Physical Review D*, 88, 044047.

DİZİN

Abbott, Edwin 216
Abell 2218 galaksi kümesi 234
Abrahams, Andrew 260
Adkins, Jess F. 330
AIDS virüsü 130
Al-Khalili, J. 341
Andromeda galaksisi 33, 34, 89
Arroway, Eleanor 152
Aurora Borealis 40

Baltimore, David 127
Barrow, John D. 341
Bartusiak, Marcia 341
Baum, Richard 323
Baumgart, A. 341
Begelman, Mitchell 341
Belinsky, Vladimir 263
beşinci boyut (dışarı-içeri) 11, 214, 223
beyaz cüceler 35
Bicep2 182
bilimkurgu 80, 281
birikim 111, 112
Blandford, Roger 112
Blandford-Znajek etkisi 112, 113
Bock, Jamie 181, 182
Bohr, Niels 43
Bowen, Emanuel 43
Brand, Amelia 26, 78, 121, 122, 196, 197, 199, 220, 271, 299, 309, 313
Brand, Profesör 12, 27, 40, 48, 49, 62, 133, 134, 136, 137, 170, 173, 174, 198, 219, 229, 231, 238, 240, 242, 243, 248, 249, 250, 257, 262, 307, 311
Brans, Carl 323
Broderick, Avery 318
Brown, Julian R. 341
bükülmüş uzayzaman 70, 315

Caine, Michael 25, 27, 242, 243
Carroll, Sean 314
Carter, Brandon 103
CASE 271, 279, 282
Cassini uzay aracı (NASA) 91
Chastain, Jessica 25, 27, 242
Chen, Yanbei 171
Cherry, Amy 7
Choptuik, Matthew W. 339
Coma galaksi kümesi 233
Cooper 12, 25, 47, 49, 50, 51, 61, 68, 80, 81, 86, 87, 88, 89, 90, 106, 122, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 135, 136, 137, 156, 163, 182, 185, 194, 196, 200,

202, 220, 221, 224, 227, 228, 230, 237, 238, 240, 250, 254, 267, 271, 276, 277, 278, 279, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 297, 298, 299, 301, 302, 303, 304, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 326, 327, 334, 335

Davies, P. C. W. 1, 324, 341
dinamik sürtünme 89, 90
Disney filmi The Black Hole [Kara Delik] 68
dördüncü boyut, zaman 211, 214
Double Negative görsel efektler 46, 69, 100, 197
Doyle 200
Drasco, Steve 91, 123, 337
Drever, Ronald 175
Druskin, Julia 7
Duez, Mathew D. 342
Dyson, Freeman 140, 141, 327, 338

egzotik madde 154, 155, 158, 161, 248, 249, 320
Ehlinger, Ladd 342
Einstein, Albert 315, 344
Einstein halkası 99, 100, 168
elektrik alanları 40, 245
Escher, M. C. 310, 340
Everett, Allen 155

Feldman, Todd 15
Feynman, Richard 314
filmi mükemmel kılmak için verilen bilimsel ödünler 79, 117, 167
fizik yasaları 44, 45, 156, 161, 226, 250
Flamm, Ludwig 150
Flatland [Düzülke] 216
Ford, Kenneth 345
Forward, Robert 141, 142, 240
Foster, Jodie 281
Foucart, Francois 173
Franklin, Paul 7, 23, 24, 46, 77, 95, 116, 162, 203, 208, 285, 288, 317, 320, 325, 330
Freeze, Katherine 323
Fuller, Robert 151

galaksiler 32, 36, 71, 109, 112, 114, 142, 145, 233, 236
Gamow, George 11, 326
Gannon, Dennis 154
Garfinkle, David 263
Gargantua, Yıldızlararası'ndaki 34, 69, 72, 317
gelgitli kütleçekim 185, 187, 191, 206, 238
gelgit oyukları 208, 238
geometrodinamik 179
Gezari, Suvi 116
Ghez, Andrea 70, 71, 316, 337
GOCE uydusu (ESA) 247
Goldberg, Jordan 7
Gonzalez, Gabriella 177
GPS 53, 237
GRACE uydusu (NASA) 240
Green, Michael 213, 214, 322
Greene, Brian 342
Gregory, Ruth 228, 323
Grishchuk, Leonid 180
Guillochon, James 114, 116, 317, 337
güneş sistemi 34, 35, 50, 87, 109
güneş sistemimizdeki gezegenler 90
Guth, Alan 343

Halley kuyruklu yıldızı 90, 200
Halloran, Lia 7, 57, 58, 59, 177, 262, 337, 338, 339
Hamilton, Andrew 103, 325
Hartle, James 315
Hathaway, Anne 25, 26, 204

Hawking, Stephen 23, 70, 260, 306, 316, 337, 339, 345
Hebbeln, Dierk 341
Hedges, John I. 342
Heisenberg, Werner 43
Holl, Pat 7
Hollywood, kültürü 16, 27, 314
Hoyle, Fred 31
Huang, Leslie 7

IMBH (orta kütleli kara delik) 88, 89, 90, 202
Ingersoll, Andrew P. 341
Interrante, Mark 156, 338
Isaacson, Walter 315, 343
Israel, Werner 264, 324
İo (Jüpiter'in ayı) 193

James, Oliver 7, 23, 24, 103, 117, 161, 164, 166, 330, 336, 337, 338
Jemmison, Mae 319
Jennerjahn, Tim 341
Joy, Lisa 23

Kaehler, Ralf 317
kara deliğin etrafındaki kritik yörünge 71, 91, 143, 144, 271, 272
kara deliklerin çevresindeki akresyon (birikim) diskleri 79, 94, 95, 105, 110, 113, 114, 118, 120

kara deliklerin içerisinde tekillikler 257, 258
karşı-deSitter (AdS) sandviçi. 227, 228, 229, 245, 322
karşı-deSitter (AdS) uzay bükülmesi 225
Kasen, Daniel 114
Keil, Richard G. 343
Kennefick, Daniel 343
Kerr, Roy 70, 155, 337
Khalatnikov, Isaac 263
Kidder, Lawrence E. 342
kimyasal enerji 110
Kip Thorne'un fotoğrafları 19, 22, 24
Kip Thorne'un LIGO'daki rolü 177, 178, 181
Kip Thorne'un Yıldızlararası'ndaki rolü 13, 15, 16
Kovac, John 181
Koyama, Kazuya 324, 343
Kremer, Ritchie 197
kuantum dalgalanmalar 44, 180, 225, 255, 306
kuantum köpüğü 157, 256, 257
kuantum kütleçekim yasaları 44, 157, 158, 257, 264, 265, 278, 300
kuasarlar 108-110
Kuo, Chao-Lin 181
küresel konumlama sistemi 53
kütleçekim alan çizgileri 175, 222, 223, 224, 226, 227
kütleçekimin ters kare yasası 42, 228
kütleçekimsel merceklenmesi, Gargantua'nın 46
kütleçekimsel merceklenmesi, solucandeliklerinin 163
kütleçekim ve merkezkaç kuvvetler 276

Lazzarini, Albert 177
Leadbetter, Jared 127
Lemonick, Michael 319, 343
L'Engle, Madeleine 326
Le Verrier, Urbain 231
Levin, Janna 103
Lewy, Eric 7
Lifshitz, Eugene 263
Lops, Joe 7
Lynden-Bell, Donald 110

Maartens, Roy 324

MacBride, Catherine 156, 338
Mac-Cormack, Ian 338
Mann, Dr. 203, 204, 205, 207, 253, 262
Mann'ın gezegeni 81, 91, 122, 182, 188, 200, 203, 208
Marolf, Donald 266, 325
Matthews, Keith 242
McConaughey, Matthew 25
McFeely, Drake 7
McGehee, Robert 338
McKinney, Jonathan C. 317
McMullen, Chris 344
Meier, David L. 317, 344
merkezkaç kuvvetler 60, 75, 122, 123, 143, 186, 187, 189, 272
Merkür'ün yörüngesindeki aykırı devinim 231, 232, 323
Merritt, David 318, 344
Meyerowitz, Elliot 127, 134, 135
Miller'ın gezegeni 75, 76, 81, 85, 188, 191, 193, 194, 195, 200
Misner, Charles W. 338, 344
Mlodinow, Leonard 315, 343
Mohtadi, Mahyar 341
Moore, Gordon 23
Morris, Mark 155
Murchikova, Elena 242
Murph 27, 50, 51, 221, 228, 231, 237, 238, 242, 250, 252, 253, 284, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 301, 302, 303, 304, 308, 310, 311, 312, 313, 326, 327, 333, 334, 335

Nahin, Paul J. 327, 344
Newton, Isaac 59, 237
Newton fizik yasaları 42, 45
Nichols, David 58
Nikbin, Amin 338
Nolan, Christopher 7, 9, 11, 12, 15, 19, 20, 22, 45, 77, 88, 95, 116, 122, 127, 161, 162, 170, 187, 197, 208, 216, 220, 224, 243, 266, 277, 281, 282, 288, 296, 300, 312, 326, 331, 340
Nolan, Jonathan 7, 12, 15, 17, 175
nötron yıldızları 35, 40, 45
Novikov, Igor 304
nükleer enerji 43, 110, 140

Obst, Lynda 7, 12, 13, 19, 127, 152, 174, 314
oksijen döngüsü 319
O'Neill, Gerard K. 327
Oppenheimer, J. Robert 70
Ori, Amos 266, 325
Ortelius, Abraham 43
Owen, Rob 177
Oyelowo, David 204

Paczynski, Bohdan 332
Paczynski-Wiita yaklaşık betimleme yöntemi 332, 333
Pais, Abraham 315, 344
Panek, Richard 323, 344
Pasquero, Claudia 330, 341
patojenler 130, 131, 132
Penrose, Roger 112
Perez-Giz ,G. 330, 343
Perlmutter, Saul 235
Perryman, M. 319, 344
Pfeifer, Harald 180
Picasso, Pablo 12
Pineault, Serge 104
Poisson, Eric 264
Pound, Bob 52
Preskill, John 259, 260, 339
Press, Bill 196, 321
Profesör Brand'in denklemi 27, 49, 229, 240, 243
Proxima Centauri 35, 139, 142
Pryke, Clem 181

Ramirez-Ruiz, Enrico 114
Randall, Lisa 223, 225, 226, 227, 228, 307, 322
Reasenberg, Robert 54

Rebca, Glen 52
Rees, Martin 314, 316, 317, 341, 344
Reiss, Adam 235
Reitze, David 177
Riazuelo, Alain 97, 98, 103, 104, 317, 337
Rifkin, Don 7
Roeder, Rob C 344
Roeder, Rob 104
Roman, Thomas 155
Romilly 159, 196, 197, 198, 199, 203, 204, 237, 254, 267, 322
Rose, Carol 7
Rosen, Nathan 151
Roseveare, N. T. 323
Rosswog, Stephan 114
Rubakov, Valery 228

Sagan, Carl 13, 14, 152, 281, 304
Samanyolu 33, 71, 316
Saroff, David 201, 317
Schmidt, Brian 235
Schmidt, Maarten 108, 109, 337
Schrödinger, Erwin 43
Schutz, Bernard 315
Schwarz, John 213, 214, 322, 338
Schwarzschild, Karl 70, 337
Shapiro, Irwin 54
Sheehan, William 323
Sherman, Eric 7
Shostak, Seth 319, 345
Shreve, Jeff 7
Sibiryakov, Sergei 228
Simon, Mel 127
Singh, P. Simon 314, 345
Snyder, Hartland 70
Soloway, Keara 338
solucandelikleri 11, 14, 25, 57, 58, 149, 154, 159, 160, 167, 178, 256, 304, 319
Spielberg, Steven 7, 12, 15
Stewart, Ian 322, 345
Sundrum, Raman 225, 307, 322, 338
süper-sicim kuramı 45, 213, 214, 258
Swenson, Erika 204, 205

TARS 50, 78, 79, 80, 220, 221, 254, 276, 277, 278, 279, 282, 295, 303, 308, 311
Tau Ceti 137, 138, 139
Tchekhovskoy, Alexander 317
tendeks (uzama) çizgileri 58, 59, 61, 173, 175
Teo, Edward 316, 337
Teukolsky, Saul 179, 197, 321
Thomas, Emma 7, 12, 19, 26, 27
Thompson, Andy 7, 21
Thorne, Kip 9, 12, 259, 336, 337, 338, 339, 340
Toomey, David 327, 345
tsunamiler 191, 238, 313

uzay kolonileri 327

Vessot, Robert 52
Viking uzay aracı 55, 213
Vilenkin, Alex 314, 345
Visser, M. 320, 345
von Tunzelmann, Eugénie 23, 24, 105, 117, 118, 119, 163, 164, 166, 336, 337, 338
Vulcan 232, 323

Waldseemuller, Martin 43
Wasserburg, Gerald 134
Weiss, Rainer 175
Wheeler, John 44, 75, 149, 151, 157, 179, 256, 257, 259
Wiita, Paul 332
Will, Clifford M. 52
Winstein, Carolee 7, 14, 336
Witten, Edward 229, 323
yanardağ benzetmesi 272, 273
Yang, Huan 197, 322, 338

Yıldızlararası'ndaki kara delik 95
Yıldızlararası'ndaki kütleçekim sapmaları 237
yıldızlararası yolculuk 137, 145
Yung, Yuk 134
Yurtsever, Ulvi 155

zaman yolculuğu 44, 299, 301, 307, 327
Zhang, F. 345
Ziffren, Ken 7
Zimmerman, Aaron 197, 322, 338
Znajek, Roman 112
Zwicky, Fritz 233