

Keyifli Okumalar Dileriz

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

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

Yedek ve Duyuru Kanallarımız

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

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

JACOB D. BEKENSTEIN

TÜRKÇESİ: CEM ORAN

**KÜTLEÇEKİM
KARA DELİKLER VE
BİLGİ ÜZERİNE**



JACOB DAVID BEKENSTEIN

Jacob David Bekenstein (1947-2015) Mexico City’de doğdu. 1972 yılında Princeton Üniversitesi’nden doktora derecesini aldıktan sonra sırasıyla, Austin’deki Teksas Üniversitesi’nde doktora sonrası araştırmacı ve Ben-Gurion Üniversitesi’nde öğretim üyesi ve Arnow Astrofizik Profesörü ve en son 1990 yılında Kudüs’teki Hebrew Üniversitesi’nde Polak Kuramsal Fizik Profesörü olarak çalıştı. Bekenstein İsrail Bilimler Akademisi ve Dünya Yahudi Bilimler Akademisi’nin bir üyesiydi. 1981 yılında ABD’deki Kütleçekim Araştırma Vakfı’nın birincilik ödülüne, 1988 yılında Rothschild Ödülü’ne ve 2005’te İsrail Ödülü’ne layık görüldü. Yaptığı 100 yayından bazıları: Kara Delikler ve Entropi (1972), Bilgi Transferinin Enerji Maliyeti (1981), İnce Ayar Sabiti: Gerçekten de Sabit mi? (1982), Kuantum Kara Deliğinin Spektroskopisi (1995) ve Düzenlenmiş Newton Dinamiği Paradigması İçin Görelî Kütleçekim Kuramı (2004).

CEM ORAN

1991 yılında İstanbul’da doğdu. İTÜ Uzay Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Barselona Üniversitesi’nden Astrofizik ve Uzay Bilimleri dalında yüksek lisans derecesini aldı. Hâlen İTÜ Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik Bölümü’nde ikinci yüksek lisansına devam ediyor. 2014 yılından bu yana Bilim ve Gelecek Dergisi için gönüllü olarak popüler bilim çevirileri yapıyor.

Kitabın özgün adı: Of Gravity, Black Holes, and Information

GINKO BİLİM - 26

BİLİM KURULU

KEREM CANKOÇAK • GÜNSELİ BAYRAM AKÇAPINAR • FERHAT SARI

KÜTLEÇEKİM, KARA DELİKLER VE BİLGİ ÜZERİNE JACOB. D BEKENSTEIN

Of Gravity, Black Holes, and Information

© Di Renzo Editore, Roma, 2001

TÜRKÇESİ • CEM ORAN

KAPAK ve İÇ TASARIM • DEVRİM KOÇLAN

ISBN 978-605-69691-7-1

Birinci Basım Kasım 2019

© Ginko Kitap Ltd. Şti. 2019

Baskı: Mutlu Basım Yayın - Bahri Mutlu

Davutpaşa Cad. Güven İş Merkezi C Blok No. 256 Topkapı / İst.

Sertifika No: 18569

Ginko: Osmanağa Mah. Ali Suavi Sk. No: 10 D. 3 Kadıköy / İstanbul • Sertifika No: 35054

T: 0216 449 20 99 • F: 0216 449 21 00

www.ginkokitap.com • posta@ginkokitap.com



JACOB D. BEKENSTEIN

KÜTLEÇEKİM, KARA DELİKLER VE BİLGİ ÜZERİNE

TÜRKÇESİ: CEM ORAN



GINKO BİLİM

İÇİNDEKİLER

1. BÖLÜM / BİR FİZİKÇİ OLMAK	7
2. BÖLÜM / KARA DELİKLER VE ENTROPİ ÜZERİNE	45
3. BÖLÜM / EVREN BİLGİDİR	81
4. BÖLÜM / KÜTLEÇEKİMLE İLGİLİ MESELELER	107
5. BÖLÜM / ÖNERİLER VE DERİN DÜŞÜNCELER	135

1. BÖLÜM

BİR FİZİKÇİ OLMAK

Bu, bir fizikçi olarak hayatımın hikâyesidir. Okuyacağınız bölüm hayatımın erken dönemlerindeki bilimsel gelişime yoğunlaşmakla beraber, beni yıllar içinde etkilemiş olan zamanları, olayları, yerleri ve kişileri de anlatıyor. Bu, kaçınılmaz olarak beni deneyimlerimden çıkardığım ve çaylak fizikçilerin kullanabileceği dersleri de yazmaya itiyor.

En başından başlıyorum. 1947’de Mexico City’de doğdum. Ebeveynlerim, ikisi de Polonya göçmeni Yahudiler olan, Joseph ve Esther, II. Dünya Savaşı sırasında Meksika’da tanışmışlar. Küçük kardeşim Bella ile birlikte beni orada yetiştirdiler. O zamandan beri, yaygın bilinen “gezgin Yahudi” deyimini doğrularcasına birçok farklı yerde yaşadım. Birleşik Devletler’de 10 yılı aşkın süre misafirlikten sonra 1974 yılında İsrail’e taşındım. Bugünlerde Kudüs’teki İbrani Üniversitesi’nde hem öğretiyor hem de araştırma yapıyorum.

Daha henüz Meksika’da bir çocukken bilime ilgi duyuyordum. Evde, bazen tehlikeli olan, fizik ve kimya deneyleri yaparak oynadığım zamanları hâlâ hatırlıyorum. 60’lı yılların başlarında lisedeyken arkadaşlarım Noah Feldman ve Mendl Goldfein de bu ilgiyi benimle paylaşıyorlardı; beraber roket yapma girişiminde bulunuyorduk (sonuçta Sputnik sonrası dönemdi). Cebimizdeki parayla şehir merkezindeki tıbbi ve kimyasal ürünler satan dükkanlardan aldığımız çeşitli kimyasallardan roket yakıtı ve oksitleyiciler yapmıştık. Hepsi küçük olan bu roketlerin bir kısmı üzücü bir şekilde başarısız olsa da, az bir kısmı gerçekten uçuyordu; öyle ki birkaç defa asla kurtaramayacağımız derecede uzağa

uçanlar olmuştu. Daima büyük bir gürültünün ve genellikle patlamanın eşlik ettiği bu fırlatmaların bazıları okul bahçesinde gerçekleşti; bu da okul müdürünün sevgisini kazanmamızı sağlamadı tabii. Ailem Meksika'dan ayrıldıktan yıllar sonra bu iki arkadaşımın izini kaybettim. Ama daha sonra 1997'de, kendisi şu an California'da yaşayan Noah, e-postamı internetten bulmuş ve Kudüs'e araçla 20 dk uzaklıktaki küçük bir kasabada yaşamaya başlayan Mendl'ı bulmama yardım etmişti!

Ben 15 yaşındayken ailem Birleşik Devletler'e taşındı. Bu, tam da Küba ile füze krizinin yaşandığı 1964'te oldu. Okulda peş peşe yapılan bomba tatbikatlarıyla ilgili anılar Amerika dönemindeki neredeyse ilk anılarımdır. Liseye ilk olarak Texas, Houston'da gittim ve Brooklyn, New York'ta bitirdim. O yıllarda amatör astronomiye karşı içimde büyük bir ilgi başlamıştı ve bu ilgi tüm hayatım boyunca da devam etti. Üniversitede bu alanda eğitim almak benim için mantıklı olabilirdi. Ancak daha zorlu bir bilim dalını seçmeye karar verdim, çünkü astronomiyi gökyüzündeki cisimlerle niteliksel olarak ilgilenen ve onların görünüş ve davranışlarının arkasındaki en derin nedenlerin üzerinde durmayan, yumuşak bir bilim dalı olarak görmüştüm. Bu izlenimim astronomların metotlarıyla ilgili yetersiz bilgimden ileri gelse de, çoğunlukla astronomların yaptıkları şeylerden daha derinlere inilebileceği yönündeki hislerimin zaman içerisinde haklı çıktığını düşünüyorum. Ne olursa olsun, yönüm fiziğe doğru sapmıştı.

Roketlerle ilgili hikâyemden apaçık belli olduğu gibi, kimyaya karşı uzun soluklu bir ilgim vardı. Böylece 1965'te Brooklyn Politeknik Enstitüsü'ne (bugünün New York Politeknik Üniversitesi) kabul edildiğimde, oraya kimya bölümü öğrencisi olarak girdim. Ailem zengin olmaktan çok uzaktı, ama eğitimim New York'taki tüm lise son sınıf öğrencilerinin girdiği bitirme sınavlarında iyi bir performans göstererek kazandığım New York Eyaleti bursuyla desteklendi. Üniversite hayatımın ilk ayları oldukça zorlu geçti. Uygun kaynakları nereden bulacağı ve ne kadar okuyacağı özellikle belirtilmeden öğrencilerin okuma yapmasının beklendiği bir ortamla karşılaşan çoğu kişinin keşfettiği gibi, lisede hayat üniversitedekinden çok daha kolaydı. Açıkçası bunun için hazırlıklı değildim. Bir kimya sınavından çok düşük bir not aldığımı özellikle hatırlıyorum. Tüm öğrenciler aynı gemi-

deydi ama lise notları dört dörtlük olan ben, bu başarısızlığın etkisini kalbimde ağır bir şekilde hissetmişim. Hemen o zamandan sonra nasıl çalışmam gerektiğiyle ilgili sonuçlar çıkardım. Bu küçük kriz, bir meseleyi yanlış anlamadan doğan başarısızlığın insanın kendisini daha iyiye götürebilmesi için bir araç işlevi görebileceğinin güzel bir örneğiydi. Hayatımda bu kutsal felaketleri defalarca kez deneyimledim.

Kimyayı tanımaya başladıkça, bana en ilgi çekici gelen kısımların aslında fizik olduğunu fark ettim; termodinamik, kinetik, atomik yapı, vb. Böylece ilk senemin sonunda fiziğe geçtim. Poli'deki (Politeknik bu kısaltmayla biliniyordu ve hâlâ da öyle) anılarımdan özellikle aklımda kalan, İngilizce Bölümü'nden –en olmayacak yerden ve üstelik göçmen İngilizcemle– kazandığım en iyi deneme için verilen bir ödül, Mermaid Ödülü'ydü. Bu denememde zaman kavramının gerçekte varlıklardaki değişim ve hareketten meydana geldiğini, kendi başına var olan temel bir şey olmadığını savunmuştum. Hareketi ifade eden tüm denklemlerin içerisinde sanki açıklanma zorunluluğu bulunmayan bir zaman kavramının yer aldığı fizikte, kabul edilen yaklaşım bu şekilde değildi. Ama ben tam aksine ikna olmuşum, büyük ölçüde felsefi düzlemde. Onu günlük konuşma dilinin ifadelerine dökmek için yürüttüğüm akıl, bu şekildedeydi. Bir kimsenin tekdüze bir dersi dinlemek zorunda olduğunu farz edin. Zaman yavaş akıyormuş gibi görünür. Daha açık bir ifadeyle, duvardaki saatin söylediği zaman kişinin öznel veya zihinsel zamanına göre daha yavaş akar. Mekanik bir saatin hassas olduğunu düşünme eğilimindeyiz, öyleyse belki de katlanılan bıkkınlık veya can sıkıntısının yarattığı fazladan zihinsel aktivite yüzünden gerçekte hızlı akanın zihinsel “saat” olduğu sonucuna varabiliriz. Ancak bu zihinsel saat bizim için oldukça gerçek. Tüm bunlardan çıkarabileceğimiz ders, olaylar meydana gelmeden önce zamanın bir anlamı olmadığıdır. Saat mekanizması veya beynin işleyişi gibi her tipten olgu, aynı hızda geçeceği garanti olmayan özel bir tür zaman ortaya çıkartır.

Bununla alakalı bir görüşü yıllar sonra kuantum kütleçekim kuramını öğrenirken keşfettim; zaman sıradan kuantum kuramında düşünüldüğü gibi temel bir kavram değildir. Çeşitli kuantum sistemlerinin kütleçekim altında nasıl davrandıklarına bakılarak

zamanın ayarlanması gerekir. Zaman türetilmiş veya ikincil bir fiziksel kavramdır.

Ben Poli'de iyi öğrencilerin yüksek lisans (ikinci derece) çalışmasını lisans (birinci derece) eğitiminin son senesinde tamamlamasına olanak tanıyan Birleştirilmiş Onur Programındaydım. Bu, tabii ki normal programdan hızlı gitmeyi gerektiriyordu. Dersleri normal fizik öğrencilerinden daha erken almak zorundaydım, ki bazen aldığım derslerin sırasının mantıklı olanın tam tersi yönde olduğu da oldu. Bu şekilde taşıdığım tüm ders yükü yüzünden bir yıl süresince verilen elektromanyetizma kuramı dersinin ikinci sömestrde kalan bölümünü önce, birinci sömestrdekini ise ondan sonra almak zorunda kalmıştım. Dersin ilk yarısını ışığın kuantum kuramındaki sıkışmış durum¹ kavramının kâşiflerinden olan David Stoler veriyordu. Kendisi düzenli bir hocaydı ama dersinin ilk bölümünü kaçırdığımdan dersinde daima problem yaşamıştım. Özellikle, fiziğin hemen tüm branşlarında kullanılan matematiksel bir araç olan Green fonksiyonunu anlamakta zorlanmıştım. Eğitilmemiş gözlerime mantıksız ve kafa karıştırıcı görünmüştü. Kavramı kafamda doğru oturtmak oldukça uzun bir zamanımı aldı ve umutsuzluğun kıyısına kadar geldiğim zamanlar oldu. Bundan sonra anladım ki fizik, kolaya gelecek bir şey değildir. Kavramlar günlük hayatın ötesinde ve hayal gücünü zorlar niteliktedir. Sadece sıkı çalışma ve azim engelleri yıkabilir. Bazı insanlar hızlı öğrenir, ama hiç kimse fiziği zahmete girmeden öğrenemez. Ayrıca; kavramlar zamanla yerine oturduğu için, sizden bir şeyleri mantıksal sırayı takip ederek öğrenmeniz beklenmez. Sıklıkla bir tekniğin neden işe yaradığını gerçekten anlamadan kabul etmeniz ve kavrayışın zamanla geleceğine inanmanız gerekir. Bu durum hatırlayabileceğimden daha fazla kez başıma geldi.

Bir yüksek lisans derecesini tamamlamak için genellikle özgün bir proje üzerine bir tez yazmanız gerekir. Ben benimkini atom fiziğindeki Stark etkisi üzerine yaptım. Stark etkisi, bir atomun yaptığı ışımanın dışarıdan elektrik alana maruz bırakıldığında değişmesidir. Çalışmamı, bir katı hal fizikçisi olan ve bilime ilişkin alışkanlık ve yöntemlerimin gelişimine ciddi katkıları olan

1 Squeezed state –ç.n.

Joseph Krieger'in danışmanlığında yaptım. Genelde izole bir şekilde sürdürülen diğer yüksek lisans projelerinden farklı olarak benim projem, fakültedeki bir diğer öğretim üyesi olan Larry Mendelson'un da ilgisini çekmişti. Krieger ile aralarında Stark etkisini ifade eden formülün yüksek mertebedeki düzeltmelerini hesaplamak konusunda dostça ama azılı bir yarış vardı. Stark etkisini yüksek hassasiyette tahmin edebilmek ve bu sayede kesin deneylerle karşılaştırma yapabilmek istiyorsanız, bu yüksek mertebeli terimler gerekiyordu.

Formüldeki ilk terim ilk kez Alman bir Yahudi astronom ve fizikçi olan ve I. Dünya Savaşı öncesinde eski kuantum kuramı üzerinde çalışan Karl Schwarzschild tarafından bulunmuştu. Lisans sonrası eğitimimin ileriki zamanlarında Schwarzschild'ın buluşuyla ilgili bilgimi yenilemem gerekecekti. Krieger'in tavsiyesi üzerine kuantum kuramında iyi bilinen WKB yönteminden yararlanarak, Stark etkisinin formülünü dördüncü terimine kadar çıkartabiliyordum. Bu açıkça Mendelson'un kendi kullandığı yöntemle ulaşabileceğinin çok ötesindeydi ve böylece yarış Krieger'in lehine sonuçlanmıştı. Ben de bu gayretten hem matematiksel hüner hem de fiziksel önsezi anlamında çok şey kazanmıştım. Çok sıkı çalışmış olduğumu düşünüyorum ama o zamanlara ilişkin olarak anımsadığım, tam bir tatmin olma duygusu. Zihnim daima sonuçları yeni koşullar için nasıl genişletebileceğimle ilgili fikirlerle doluydu. Yeni bir fikri kavradığınızda duyulan mutluluğu ifade etmek zordur; özellikle bu fikir birçok insanın karşılaşmasını beklemeyeceğiniz kadar karmaşıksa. Bunu ancak deneyimlemeniz gerekir.

Krieger eğitimime doktora düzeyinde devam etmek konusunda ikna olmamda oldukça etkili oldu. Aslında böyle bir olasılık aklımda hiç yoktu. Ailem zengin değildi ve her zaman düşündüğüm, okulumu bitirip iş bulmak ve aileme yardımcı olmaktı. Gerçekte, kimyadan fiziğe geçerek bu amacımı kendim sabote etmiştim; o yıllarda kimin bir fizikçiye iş almak isteyeceği belirsizdi, oysa Poli'nin işe alma merkezinde kimyacılar için çok sayıda iş ilanı oluyordu. Krieger benim için yeni bir yaşam biçimine açılan bir pencere araladı, akademik kariyer. Bu ilgimi çekmişti, kimin çekmezdi ki. Diğer yolları seçenlerin çoğu açıkça tercihlerini daha kolay ve muhtemelen ekonomik anlamda daha

Ödüllendirici bir yönde yapmış oluyorlardı. Her neyse, ben kararımı doktora programına başvurmaktan yana yaptım. Annemin bu kararıma muhalefet ettiği bazı zamanları hatırlıyorum, ki kendisi eğitimime devam etmem konusunda beni her zaman teşvik etmiştir. Birinci dereceden sonra eğitime devam etme fikrine aşına değildi; benim için düşündüğü daha çok bir mühendislik kariyeriydi. Ama sonunda beni anladı. Zaman geçtikçe ve kariyerimde ilerledikçe, pratik kaygılarla değil, ilgi alanıma göre tercih yapmış olduğum için çok memnun oldu.

Poli'de başarılı bir iş çıkartmış olmalıyım ki, doktora için başvurduğum tüm enstitülere kabul edildim; Harvard Üniversitesi, MIT ve Princeton Üniversitesi. Hâlâ MIT Fizik Bölümünün o zamanki başkanı Victor Weisskopf'tan ( nl  nükleer fizikçi) aldığım kabul mektubunu saklıyorum. Ama sonunda Princeton'a gitmeye karar verdim. Sebeplerden biri pratikti; Princeton ailemin yaşadığı Brooklyn'e çok daha yakındı. Tabii bunda Krieger'in da etkisi var. O zamanlar parçacık fiziğine ilgi duyuyordum. Krieger beni o alana girmek konusunda uyardı çünkü "birçok insan o alana girmiş ve batmıştı". Bu doğruyd ; bugün bile temel parçacık fiziğinde doktora yapan insanlar arasında okulu bırakma oranı hayli yüksek. Böylece kurtarılmış oldum. Eğer parçacık fiziği olmayacaksa, o halde k lle ekim kuramı da ilgimi çekiyordu ve Princeton k lle ekim araştırmalarında iyiydi. Böylece lisans ve yüksek lisans eğitimimi 1969'da tamamlayıp Ulusal Bilim Kurumunun bursuyla Princeton'a gittim. Bundan sonra Poli'yi çok az gördüm, ama 1995'te New York Politeknik  niversitesi'nin Seçkin Mezunu olarak nitelendirilmiştim.

Princeton'a Haziran 1969'da girdim. İlk yazım boyunca T-deęiřmezlięi² araştırmaları için deneyler yapan Konstantin (Dino) Goulios ve David (Dave) Bartlett'in temel parçacık laboratuvarında asistan olarak çalıştım. T-değişmezliği fizikte geniş alan kaplayan bir kavramdır; mikroskobik (atomik veya atom altı) fiziğin sınırları içerisinde kaldığı sürece, doğadaki tüm gerçek süreçlerin olay zincirini zamanda tersine çevirdiğimiz durumda da gerçekleşebilir olmalarını sağlar. Aksine, daha sonra birçok kez değine eğim termodinamik ise makroskobik fizikle

2 *T-invariance*. Zamanda tersinirlik – .n.

ilgilendir ve T-değişmezliğine sahip değildir. Hiçbir sigaranın yanan bir kibrit değdirilmeden hemen önce söndüğünü gördünüz mü? Bu günlük hayatımızda karşılaştığımız bildik bir olay zincirinin tam tersidir ama asla gerçekleşmez. Temel parçacıkların dünyasında ise olay zincirinin tersine çevrilmesi fizik yasalarınınca mümkündür ve gerçekleşir de.

Dino ve Dave, mikroskobik fizikteki T-değişmezliği yasasında elektromanyetizmanın etkisinden kaynaklanan bir yasa ihlali arıyorlardı. Kurama göre eğer bir yasa ihlali olsaydı bu durum, biri nötronlardan öteki ise protonlardan oluşan iki demet birbirlerine doğru gönderildiğinde, proton ve nötronların birbirleriyle çarpışma oranlarında anormalliklere yol açardı. Dave ve Dino bugün kapalı olan Princeton-Pensilvanya parçacık hızlandırıcısında hızlandırılan bir döteron demetini (proton hafif hidrojenli su için neyse, döteron da ağır hidrojenli su için odur) kullandılar. Bu döteron demeti metalden yapılmış hedefe çarptığında nötronlar döteronlardan ayrılır. Benim projem ana hikâyenin bir parçasını oluşturuyordu; İsveçli nükleer fizikçi Hulthen tarafından ortaya atılan döteronun içsel kuantum durumlarını³ inceleme imkânımız olup olmadığını görmek için nötronların hız dağılımı üzerinde çalışmak. Çalışmanın sonunda Hulthen'ın kuantum durumları lehine bir yığın kanıt elde etmiştim.

Bu deneyden iki şey öğrenmiştim. Deney yoluyla öğrenmenin, çok fazla çalışmanın sonucunda az miktarda bilgi elde edilebiliyor gibi görünse de çok keyif verici olduğunu keşfettim. Ayrıca gördüm ki ellerim pek de fazla hünerli değil. Dino sık sık çok kanallı analizörün –nötron hızlarını ölçtüğüm araç– kalibrasyonunu bozduğum için cihazın üzerinde uzun bir uğraşın sonrasında beni fırçalardı. Dino'yla tekrar 1996 senesinde Moskova'da Andrei Sakharov'un anısına ikincisi düzenlenen bir konferansta karşılaştım ve ona laboratuvarındaki haylazlıklarımı hatırlattım. Her neyse, o yaz Princeton'a gelişimdeki asıl neden olan kuramsal çalışmalara yönelme fikri kafamda oturmuştu.

Dave temel parçacıklardan başka şeylerle de ilgileniyordu. Bana Coulomb'un elektrik yasasını (aynı işarete sahip iki yük, birbirini uzaklığın karesiyle ters orantılı, yüklerinin çarpımıyla

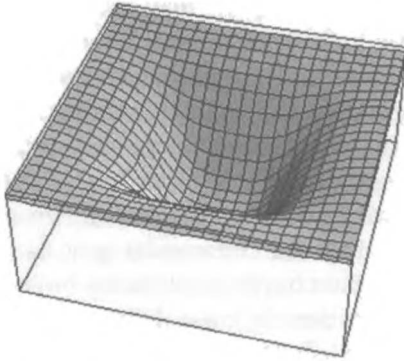
3 Quantum states –ç.n.

doğru orantılı olacak şekilde iter) test eden bir deney göstermişti; bu deneyde çok iyi bir iletken den yapılmış büyük bir kürenin kendi içerisinde elektrik alan yaratıp yaratamayacağı (Coulomb yasasına göre bu olmamalı) inceleniyordu. Sağlam bir bilimsel gerçekten şüphe duyulabileceği ve alternatiflerinin araştırılabileceği fikri karşısında oldukça büyülenmiştim. Aslında geniş açıdan bakıldığında bilimsel kariyerim kabul edilen fizikten bu tarz sapmaları bulmaya çalışarak geçti. Bu konuda Bartlett'in deneyinden etkilenmiş olabilirim. 20 yıl sonra Dave'e Boulder, Colorado'da k t le ekim üzerine bir konferansta rastladığımda onun evrendeki kara maddenin doğasını incelediğini duyunca şaşırmıştım.  leride anlatacağım gibi, ben de Princeton'da bulunduğum yıllardan beri bu konuya  ekilmıştim.

Deneyssel  alışma yapmak Princeton'daki doktora derecesi için bir zorunluluktur. Buna ek olarak, sizden ikinci dönemin sonuna kadar genel fizik sınavlarını –“geneller”– vermeniz beklenir. Sınavlara hazırlanmak için dersleri takip edebilir veya kendi kendinize çalışabilirsiniz. Ben iki yöntemin bir karışımını seçmiştim. Bana iyi tanımlanmış gibi görünen derslere katıldım ve geriye kalanları da kütüphanede kendi başıma anlamaya çalıştım. Seçkin bir kuramsal parçacık fizikçisi ve aynı zamanda oldukça iyi bir eğitimci olan Sam Treiman'ın verdiği kuantum alan kuramı ve akışkanlar mekaniği üzerine dersleri hatırlıyorum. O dersleri izlemek büyük bir keyifti ve onlardan çok şey öğrendim. Hem alan kuramına hem de akışkanlar mekaniğine duydığum yakınlık o zamanlardan geliyor. Aynı zamanda 1980'lerde sicim kuramının (bu konuyla ilgili daha fazlası aşağıda) yaratıcılarından biri olacak olan John Schwarz tarafından verilen kuantum kuramı derslerini duymuştum. Kendisi Treiman'ın tam zıddıydı; düzensiz ve anlaşılması g  . Daha sonra orada öğrendim ki fizik birbirinden oldukça farklı öğretme kabiliyetine sahip insanlar tarafından yapılıyor ve “harika fizikçi” ile “harika  ğretmen” etiketlerinin bir arada bulunması gerekmiyor.

Ama ben gerçekten de Princeton'a k t le ekim üzerine çalışmak için gitmiştim. K t le ekim fiziğin en eski dallarından biridir, ama karşılaşılan zorluklar ve yeni keşifler açısından da en yenilerden biridir. 17. yüzyılın sonlarında Isaac Newton, herhangi iki cismin birbirini her zaman kütlelerinin çarpımıyla doğru orantılı;

aralarındaki uzaklığın karesi ile de ters orantılı olacak şekilde çektiğini ortaya koyan evrensel kütleçekim yasasını ileri sürmüştü. Newton'ın kuramı bilim ve teknoloji için olağanüstü derecede kullanışlı olduğunu kanıtladı (örneğin, tüm uzay görevlerinin planlanmasında onun kuramı kullanılıyor) ve iki yüz yıldan daha uzun bir süre ona meydan okunamadı. Ancak fizikte hiçbir kuram son söz değildir. 20. yüzyılın başlarında Albert Einstein bize yeni bir kütleçekim görüşü kazandırdı; mesele kuvvet değil, uzay ve zaman geometrisinin bir etkisiydi. Okulda bize öğretilen Öklit geometrinin aksine, evrenin gerçek geometrisi kesin bir biçimde sabit değildir; madde tarafından şekillendirilir. Bir kütlenin yakınlığında uzay, bir kürenin yüzeyine benzer şekilde eğriyken; kütleden uzakta, oldukça düzdür. Einstein'ın bu yeni kütleçekim kuramına genel görelilik deniyor. Bu kuram, Newton'ın kuramının geçmeyi başardığı tüm deneylerden başarıyla geçtiği gibi, gerçekleştirilmesi sadece son yüzyıllarda mümkün olan çeşit çeşit hassas deneyin sonuçlarına Newton'inkinden daha iyi uyuyor.



Şekil 1. Einstein'ın kuramına göre yoğun bir kütlenin yakınlığında uzay eğridir.

Son 30 yılda kütleçekim kuramı, onu kuantum kuramıyla birleştirme arayışında olan yüzlerce fizikçinin ilgisini üzerine topladı. Kuantum kuramı mikroskobik nesnelerin –atomlar, moleküller, elektronlar, ışık parçacıkları (fotonlar)– nasıl hareket ettiklerini ve davranışlarını inceler. Kuantum dünyasının kuralları, havaya atılan bir taşın hareketinin uyduğu kurallardan oldukça farklıdır; taşın hareketini daha eski bir kuram olan klasik mekanik

kuramıyla rahatça açıklayabiliriz. Aslında kuantum yasaları tuhafır. Kuantum kuramına göre, serbestçe hareket eden bir elektronun bir köşenin öteki tarafına geçmesi veya bir engele doğru fırlatılan bir atomun her biri farklı yönlere sapan iki parçaya ayrılması ve daha sonra bu parçaların engelin öteki tarafında birleşmiş olarak bulunması mümkündür. Modern fizik tüm maddeleri ve radyasyonu açıklamak için kuantum kuramını doğru bir çerçeve olarak alır. Ancak soruya bahis olan cisim büyükse –trilyonlarca atomdan meydana gelmişse– onun davranışlarını açıklamada kuantum mekaniğiyle klasik mekanik arasında ölçülebilir bir fark yoktur. Bu yüzden, kimse bir taşın nasıl yuvarlandığını açıklamak için kuantum kuramını kullanma zahmetine girmez. Onlarca yıldır fizikçiler Einstein’ın kütleçekim kuramının bir kuantum versiyonunun olup olmadığıyla ve onun küçük cisimlerin kütleçekimsel etkileşimiyle ilgili nasıl tahminlerde bulunabileceğiyle ilgilendiler. Bu kuramla –kuantum kütleçekim– ilgili daha fazla söyleyeceklerim olacak.

Princeton’da genel görelilik üzerine bir yıllık dönemi kaplayan bir ders vardı. İlk yarıyıl da dersi o sıralar Maryland Üniversitesi’nden Princeton’a misafir olarak gelen Charles Misner veriyordu. O derste konunun temellerini işledi. İkinci yarıyıl da ise, ileride çokça değineceğim, John Archibald Wheeler konunun nötron yıldızları, kara delikler ve görelilik kozmolojisi üzerindeki uygulamalarını gösterdi. Tüm bunlar benim için çok heyecan vericiydi ve tezimi kütleçekim üzerine yapmam konusunda kafamın netleşmesini sağladı. O zamanlar genç bir öğretim üyesi, şimdi ise kozmolojinin büyük isimlerinden biri olan James (Jim) Peebles’tan aldığım ders de kozmolojisiye ilişkin farklı bir bakış açısı kazanmamı sağladı. Dersleri son derece eğlenceli olması bir yana, bize evren ve onun evrimi konusunda önemli bir içgörü kazandırdı. Bu ders o kadar büyüleyiciydi ki yıllar sonra bu derslerin Peebles tarafından kitaplaştırıldığını görmekten son derece memnun olmuştum. Peebles bu zamana kadar kozmolojisi üzerine iki kitabın daha yazarlığını yaptı, ama bunlar benim zihnimde ilk kitabı hâkim olan heyecanlı atmosferden yoksundu.

Princeton'ın lisansüstü okulunda öğrencilerin Fransızca, Almanca veya Rusça dillerinden ikisinde sözlü sınavları geçip dil yeterliliğini göstermesi gereklidir. Ben Almanca sınavını kolay-

lıkla geçmiştım çünkü hem Poli’de geçirdiğim birkaç yılda Almancamı ilerletmiştım hem de ailemden dolayı Almancayla yakından ilişkili olan Yiddişe aşınaydım (Bugün hâlâ eşimle aramızda şakalaşmak ve çocuklarımızdan sırlarımızı gizlemek için kullanırız). Sonrasında sıra Fransızca sınavına geldi. Sınavların yapılmasından lisans seviyesi için ünlü bir ders kitabının yazarı olan fizikçi, Profesör Rogers sorumluydu. Size Fransızca yazılmış bilimsel bir metin verir ve siz de metni okuyup, neyle ilgili olduğunu ona anlatmalısınızdır. İlk denememde bana, “sen hiçbir şey bilmiyorsun!” demişti ve sınavdan bırakmıştı. Resmî olarak hiç Fransızca dersi almamış olduğum için tek yapabildiğim şey kütüphanedeki Fransızca makalelere bakmak olmuştu. Daha çok hazırlandıktan sonra Rogers’a tekrar gittim ve beni derhal yenden bıraktı. Pes etmişim. Tüm dil gerekliliklerini yerine getirmeden Princeton’dan doktora derecemi nasıl aldığımı hatırlamıyorum. Belki de kuralları değiştirmişlerdi.

“Geneller”in zor sınavlar olduğu meşhurdur. Daha kötüsü, bu sınavları 2 denemede geçemeyenler okuldan atılıyordu ve gerçekten de başına bu gelen birkaç insan var aklımda. İlk yılımdan sonraki yaz Ekimdeki sınava girmek için kendimi hazır hissetmişim ve koca bir iki yıllık dönemin bitmesini beklemedim. Döneme daha sakın bir şekilde devam etmek istiyordum. Ama sınavlar yaklaştıkça gerginliğim daha ve daha fazla arttı. Sınavlara asla tam olarak hazır bir şekilde girmişliğim yoktur. Üstelik “Geneller” sadece zor değil, aynı zamanda çok yorucuydu da. Üç gün boyunca günde altı saatlik yazılı sınavlara girdikten sonra sıra sözlü sınavlara gelmişti, iki kuramsal soru ve bir de bahsettiğim deneyle ilgili soru vardı. Sınavları geçtiğimde (notlar bize bildirilmemişti) artık daha rahat ve kendimden emin hissetmeye başlamışım.

Sınavda ne kadar iyi yaptığımı ancak yakın zaman önce öğrendim. 1970’lerde Princeton’da eğitim veren bir parçacık fizikçisi olan Don Coyne bana sınav kâğıdımı hâlâ hatırladığını söylemişti. Kütleçekim fiziğinde daima temel meselelerden biri olan Mach ilkesiyle ilgili bir soruyu doğru yanıtlayan tek öğrenci ben olmuşum. Coyne’a göre (muhtemelen sınavın yarattığı travmadan dolayı bu tarz detayları unutmuşum), problemi uzun ve doğru hesaplamalar yaparak çözmüşüm. Halbuki çözüm, iyi fizikçilerin yapacağı gibi, simetriyi hesaba katarak çok daha az

çabayla elde edilebilirmiş. Bundan dolayı Coyne, benim gayretli ama hayal gücünden yoksun bir öğrenci olduğum kanısına varmış. Fizikteki problemleri hataya açık hesaplamalardan kaçınarak çözmenin sağladığı avantajlar, lisans sonrası eğitimim süresince giderek daha fazla belirginleşti ve bu konuda ustalığımı artırmak için çalıştım. Bugünlerde sık sık çok az hesaplama yapmak ve çok fazla genel düşünme biçiminin dışına çıkmakla itham ediliyorum. Sadece ben değişmedim. 1970’lerden bu yana yaşanan gelişmeler Coyne’ın benimle ilgili değerlendirmesini de değiştirdi; geçenlerde Hollanda’nın Utrecht kentinde düzenlenen bir kütleşkim konferansında bana söylediği gibi.

1970’te genel sınavlara doğru Wheeler’ı görmeye gidip ondan beni tez öğrencisi olarak kabul etmesini istedim. Kuramsal kütleşkim araştırmalarının merkezi Princeton’da bu Wheeler sayesindeydi. Ancak onun bunun haricinde fizikte yaptığı birçok başka şey de vardır. 1937’de daha yirmili yaşlarındayken bir nükleer reaksiyon sırasında neler olduğunu basit ve etkin bir şekilde tahmin etmeye yarayan nükleer fizikteki “S-matrisi” denen kavramı bulmuştu. Bundan on yıl sonra belirsizlik ilkesinin ünlü mucidi ve kuantum kuramının kurucularından Werner Heisenberg S-matrisini temel parçacık fiziğine uyarladı. Oradan da tüm fiziğe ve ötesine yayıldı. Bu buluş birçok derste kullanılan standart bir ders kitabı materyalidir. Bugün kuantum kütleşkimle ilgili tartışmaların büyük bir bölümü S-matrisini merkez alır. 1939’da, II. Dünya Savaşı’nın hemen öncesinde, Wheeler ve Niels Bohr (atomun yapısıyla ilgili buluşlarıyla ünlü) nükleer fisyon üzerine klasikleşmiş kuramsal bir makale yazdılar; konusu bir atom çekirdeğinin ikiye parçalanarak, büyük miktarda enerji yayınlamasına aracılık eden bir süreçle ilgiliydi. Uranyum fisyonu Almanya’da Otto Hahn ve Lise Meitner tarafından henüz keşfedilmişti ve Bohr ve Wheeler bu sürecin nasıl işlediğini açıklıyorlardı. Bu makale nükleer bomba ve nükleer reaktör teknolojisi için oldukça önemliydi ve bugün hâlâ atıf alır. Wheeler’ın 1997’de prestijli Wolf Ödülü’ne layık görülmesinin nedeni olarak gösterilen çalışmalarından biri de buydu. Birleşmiş Milletler II. Dünya Savaşı’na girdiğinde, ülkedeki en iyi fizikçilerle birlikte Manhattan projesinde çalışmaya gitti. Wheeler, bombalar için Plütonyum yapmakta kullanılan nükleer malzemenin “zehirleme” etkisini önle-

mekle görevlendirilmişti. Daha sonrasında H-bombası⁴ projesine de dahil edildi. Ama 1950'lerin ortalarından itibaren Wheeler dikkatini kütleçekim fiziğine çevirdi.

Ondan beni öğrencisi olarak almasını istediğimde Wheeler kütleçekim fiziği araştırmalarındaki zorluklardan bahsetmeye başladı, özellikle de kara delik fiziğiyle ilgili olanlarla. 1970'lerin başlarında çok az insan bir kara deliğin ne olduğunu biliyordu. Durum, hemen her bilim kurgu ürününde kara deliklerle karşılaşmış olduğunuz günümüzden oldukça farklıydı. Bugün herkesin bildiği gibi, bir kara delik, güçlü kütleçekimin tesiriyle, görmeyi ummuş olabileceğiniz ışık dahil her şeyi içine hapseden bir uzay bölgesidir. 1970'lerde astronomlar göremeyeceğiniz bir cismin var olması fikrinden hoşlanmamışlardı ama araştırmaların sayısı arttıkça tablo çok hızlı bir şekilde değişti.

Kara delikler üzerine yapılan çalışmalar aslında Britanyalı tanınmış bir bilim insanı ve aynı zamanda bir rahip olan John Michell'in (kendisi hidrojen atomunu keşfeden ve Newton'ın kütleçekim sabitini ve dolayısıyla Dünya'nın kütlesini ölçen ilk insan olan Henry Cavendish'in de yakın arkadaşıdır) önerisiyle yaklaşık iki yüzyıl önce başlamıştır. Michell ışığı içine hapseden (aksi takdirde tamamen kütleçekimleri nedeniyle ışıma yaparlardı) "kara yıldızlar"ın var olabileceğini ortaya atmıştı. Aynı fikir ünlü Fransız bilim insanı ve matematikçi Laplace (aslında Marki Laplace) tarafından da ortaya atılmıştı. Ama tamamen pratik nedenlerden ötürü hem Michell'in hem de Laplace'ın sezgileri, daha önce değindiğim Karl Schwarzschild'ın 1916'da, Einstein'ın kütleçekim kuramının bir kara deliği ifade eden ilk çözümünü keşfine kadar unutuldu (bu bağlamda, yakında çözümle ilgili daha fazla açıklama yapacağım). Şimdilerde bu, Schwarzschild çözümü adıyla anılıyor. Schwarzschild'ın bulduğu sonucu anlatan ve inceleyen 1916 tarihli iki makalesi onun son yazdıkları oldu; I. Dünya Savaşı'nda Kayzer'in ordusunda görev aldığı sırada yakalandığı bir hastalık sonucu kısa süre sonra hayatını kaybetti.

Schwarzschild çözümü, kendi etrafında spini olmayan, küresel bir kara deliğin ve onu çevreleyen kütleçekim alanının matematisel bir tarifidir. Bu, Newton'ın küresel bir kütle için yaptığı

4 Hidrojen bombası -ç.n.

tarifle karşılaştırıldığında bambaşka bir dünyadır. Cisme uzaktan bakıldığında iki tarif de k t le ekim alanının formu konusunda uzla ır. Ama yaklaşıldığında, Schwarzschild'ın tarifi oldukça gariple ir. Merkezden belli bir mesafeye geldi inizde, eğer eve geri dönme niyetindeyseniz ge memeniz gereken özel bir yüzeyle kar ıla ırsınız. Bu yüzeyi geçen bir uzay gezgininin roketleri ne kadar güçlü olursa olsun acımasızca yutulacaktır. Onu geçen ışık da benzer şekilde sonsuza kadar içeri hapsedilir. Bu yüzden, kimse bu küresel yüzeyin içerisinde neler olup bitti iniz göremez. Bu durum ona " fuk" isminin verilmesini açıklar, yani kara deliğin sınırı. Zaman zaman Schwarzschild yarıçapı veya k t le ekim yarıçapı ismiyle anıldığı da olur.

1918'de ve daha sonrasında 1960'larda daha başka kara delik c z mleri bulundu. Ba larda kimse tüm bu sonuçların gerçekten neyi tarif ettiğini anlayamadı. Araştırmacılar yukarıda bahsettiğim şeyleri kavrama noktasına çok sonradan geldi. Ama 1920'ler ve 30'lar boyunca çok fazla karmaşa vardı. Einstein'ın kendisi Schwarzschild c z m n n gösterdiği cisimlerin doğada olu amayacağı g r   ndeydi ve bunu kanıtlamak için elinden geleni yapmıştı.

Ben Schwarzschild c z m n n ne anlama geldiğini ilk anlayan kişinin o zamanlar Berkeley'deki California  niversitesi'nde  alı an Julius Robert Oppenheimer (nükleer bomba alanındaki çalışmalarıyla ünlü) ve onun lisansüstü   rencisi Harold Snyder olduğunu düşünüyorum. 1930'ların ba larında Cambridge'de genç bir Hint fizikçi olan Subrahmanyam Chandrasekhar ve onun yanı sıra büyük Rus fizikçi Lev Landau, halihazırda kullanılabilir durumdaki nükleer yakıtının tamamını tüketen ve kütlesi kritik e i in üstünde olan bir yıldı ın denge durumunda kalamayacağını gösterdiler. Chandrasekhar bunu Hindistan'dan İngiltere'ye yaptığı deniz yolculuğu sırasında ke fetmi ti. Bu gerçek genel görelilikle daha iyi bir şekilde kanıtlanabilir olsa da aslında Newton fizi iyle dahi kanıtlanabilir. Basitçe Güneş'in birkaç kaundan daha fazla a ırlı a sahip soğuk bir kütle için denge durumu yoktur. Hem Chandrasekhar hem de Landau çok sonraları Nobel  d l ne layık g r leceklerdir.

Ama o zaman yüksek kütleli yıldı lara ne olur?

Chandrasekhar'ın Cambridge'deki seçkin danışmanı, yıldı  yapısı kuramının babası ve zamanında genel görelilik alanında

dünya çapında bir uzman olan Sir Arthur Eddington, Chandrasekhar'ın sonuçlarıyla tam da bu noktadan dolayı dalga geçmişti: öyleyse yıldıza ne olacak? Cevap –önemini yarım yüz-yıl sonra kavramış olan bizler için– açık bir şekilde yıldızın içe çökmesi gerektiğidir; ama daha küçük ve yoğun bir yıldız oluşturmak üzere değil tamamen.

II. Dünya Savaşı patlak verdiği gün (1 Eylül 1939), Birleşik Devletler'de prestijli bir fizik dergisi olan *Physical Review*, Oppenheimer ve Snyder'ın makalesini soğuk bir yıldızın bir noktaya çökeceğini ve etrafında çıkışın mümkün olmadığı bir bölge oluşturacağını gösteren hesaplamalarıyla birlikte yayımladı. Peki bunu nasıl keşfettiler? Oppenheimer ve Snyder küresel bir yıldızın yüzeyinin hareketini Einstein'ın denklemlerinin dikte ettiği gibi hesapladılar. Bu ünlü hesaplamaya göre, yüzeyle birlikte hareket eden bir gözlemci onun hızla daha ve daha fazla sıkıştığını görecektir, tümü bir noktaya sıkışına dek. Açık bir şekilde bunun anlamı, başlangıçta yıldız meydana getiren tüm maddenin inanılmaz derecede yüksek bir yoğunluğa kadar ezildiğidir. Oppenheimer ve Snyder büzülen yüzeyin dışındaki bölgenin tam da Schwarzschild çözümünün tarif ettiği gibi olduğunu buldular. Zamanın bir noktasında yıldızın yüzeyinin ufku geçmesiyle kara delik oluşuyordu. Böylece bugün insanlar Schwarzschild'ın çözümünün, bir noktaya çöken küresel bir yıldızın ardında bıraktığı kütleçekim alanını ifade ettiğini anlayabildiler.

Garip görünse de Oppenheimer ve Snyder'in raporu tüm temel gerçeklere sahipti ve kara delik fiziği, Schwarzschild'ın I. Dünya Savaşı sırasında yayımladığı makaleden bu yana doğmayı bekledikten sonra, 1939 yılında doğabilirdi. Ancak II. Dünya Savaşı bu konudaki araştırmalara geçici olarak son verdi. Oppenheimer ilk nükleer bombaların üretileceği Manhattan projesinin bilim bölümünü idare etmekle meşgul oldu ve bundan sonra asla kütleçekim kuramına geri dönmedi. Snyder ise çalışmalarına saf matematik üzerinden devam etti; birçokları tarafından, bugünlerde sıcak bir konu olan sıra değişmeli⁵ olmayan geometrinin öncülerinden biri olarak kabul edilir.

5 Komütatif –ç.n.

H-bombası projesinden akademiye döndüğü zaman, Wheeler, Princeton'daki grubuyla birlikte Chandrasekhar, Landau, Oppenheimer, onun öğrencisi George Volkoff ve Caltech'ten fiziksel kimyacı Richard Tolman'ın elde ettiği sonuçları çöken bir yıldız için kritik kütlenin tam olarak ne olduğu meselesiyle ilgili tekrar incelemeye aldı. 1960'ların başlarına kadar Wheeler'ın grubu 1,5 ila 2 Güneş kütleğine sahip bir yıldızın, parlaması için gereken enerjinin kaynağı olan nükleer yakıtını tükettiğinde mutlaka bir kara deliğe çökeceğini doğruladı. Meseleye ilişkin her şey Wheeler'ın, meslektaşı Masami Wakano ve doktora öğrencileri Kent Harrison ve Kip Thorne ile birlikte 1965 yılında yayımladığı *Kütleçekim Kuramı ve Kütleçekimsel Çöküş* başlıklı monografisinde takdire şayan bir şekilde özetlenmiştir. Orada bahsedildiği gibi, sonuçlar Wheeler'ı, Oppenheimer-Snyder senaryosunun devamında ne olacağı sorusuyla dürüstçe yüzleşmeye itmişti. Wheeler bir kara delik oluşurken şiddetli şeyler olduğu sonucuna vardı. Çalışmasında buna referansla kullandığı ifade "fizikteki en büyük kriz" olmuştur.

Kriz ne demek? Fizikte belirli bir konudaki yerleşmiş kurallar bazı yeni durumlarla başa çıkamadığı zaman kriz meydana gelir. Wheeler bir yıldızın kütleçekimsel çöküşüyle tetiklenen kriz ile yirminci yüzyılın başlarında eski, klasik atom modelinin başarısızlığıyla tetiklenen kriz arasında benzerlik kurmayı sever. Klasik fizikte hızlanan, yavaşlayan veya yön değiştiren (tek kelimele ivmelenen) bir elektrik yükü, enerjisinin bir kısmını görülebilir ışık veya X-ışını gibi elektromanyetik ışıma formunda yayımlamak zorundadır. Ernest Rutherford'un atom çekirdeğini keşfiyle doğan klasik atom modelinde elektronlar çekirdek etrafında büyük hızlarla uçuşurlar. Elektronlar açıkça ivmelenir ve ışıma yapmak zorundadırlar. Bu enerji kaybedecekleri anlamına gelir ki, böylece çekirdeğe daha ve daha fazla yaklaşacaklardır. Gerçekte, klasik elektromanyetik kurama göre yapılan bir hesaplama tüm atomların göz açıp kapayıncaya kadar çökeceğini gösterir. Atomlardan meydana geldiğimize ve hâlâ burada olduğumuza göre, belli ki eski klasik kurallar atomlarla başa çıkamaz.

Daha önce değinmiş olduğum Bohr'un atomun ünlü kuantum modeline (atomun, bir nokta ve etrafındaki döngülerden oluşan, dünya çapındaki logosu Bohr modelinin bir soyutlamasıdır) varı-

şı böyle olmuştur. Bohr'un modelinde yeni kurallar vardır; atomdaki elektronlar yalnızca durum değiştirdiklerinde ışıma yaparlar, her zaman değil. Bir elektron, kendisi için mümkün olan en düşük enerji durumuna düştüğünde, daha fazla ışıma yapamaz. Yani böylece atom denge durumuna gelmiş ve kuantum kuramının en önemli fikirlerinden bazıları doğmuş oldu.

Benzer bir şey, Wheeler'ın üzerinde durduğu gibi, bir yıldızın kütleçekimsel çöküşünde de ortaya çıkıyordu. Oppenheimer-Snyder'ın çizdiği tabloya göre, esasında yıldızın içerisindeki tüm madde kısa süre içerisinde tek bir noktaya sıkıştıyordu. Peki bunda hatalı olan ne? Fizikteki en katı yasalardan biri baryon sayısının korunumu yasasıdır. Baryonlar maddenin ağır yapıtaşlarıdır. Örneğin, atom çekirdeğindeki protonlar ve nötronlar baryondur. Lambda parçacığı gibi laboratuvarlarda daha seyrek görülen başka baryonlar da vardır. Baryon sayısının korunumu yasası der ki, eğer bir baryon ortadan kaybolursa başka birisi ortaya çıkmalıdır. Bir proton bir elektronla birleşerek bir nötron verebilir (pratikte bir de nötrino). Bu güzel, bir baryon önce, bir baryon sonra. Bir lambda parçacığı bir proton verecek şekilde bozunabilir. Yine güzel, bir baryon önce, bir sonra. Ancak bir nötron, biri pozitif yüklü –pozitron– diğeri negatif yüklü bir çift elektrona dönüşemez. Bu baryon sayısının korunumu yasasını ihlal eder çünkü elektronlar baryon değildir. Şimdi bir yıldız 10^{57} baryondan meydana gelir. Oppenheimer-Snyder'ın bizi düşünmeye yönelttiği şey, yıldız bir kara deliğe dönüştüğünde tüm bu baryonların açıkça hepsinin sığamayacağı kadar çok küçük bir bölgeye, bir noktaya, sıkıştırıldığıdır. Öyleyse gerçekte olan nedir? Wheeler bu paradoksun bize tüm laboratuvar deneylerince desteklenmiş olan kutsal baryon sayısının korunumu yasasının kütleçekimsel çöküş sırasında aksadığını söylediğini hissetmişti. Bu “en büyük kriz”di.

Böylece Wheeler, meslektaşları ve öğrencileriyle birlikte bu krizden çıkmanın bir yolunu bulmak için kara delik fiziğini incelemeye başladılar. Bu, tam da Wheeler'dan beni doktora öğrencisi olarak kabul etmesini istediğim döneme denk geliyordu. Wheeler çok renkli bir kişidir. Hiç de uzun boylu değildir ancak varlığıyla her durumu etkisi altına alır. Baş parmağı bir santim eksiktir. Gençliğinde fişek ateşlerken parmağını uçurduğunu söy-

lemişlerdi bana. Ayrıca bir konferans yemeğinin ortasında doğum gününü kutlamak için bir fişek ateşlediğini duymuştum. Princeton’da Wheeler’ın grubu (ve buna ilaveten hem Princeton’dan hem de dışardan gelen birçok konuk) herkesin yemeğini geleneksel Amerikan kese k ğıdında getirdiğı öğlen yemeğı seminerleri düzenlerdi. Bazı oldukça güncel konular üzerine yapılan yaklaşık bir saatlik tartışmadan sonra, Wheeler’ın ilgisi veya sabrı tükenmeye başlardı. Bunun  zerine kese k ğıdını şişir ve gürültüyle patlatırdı. Bu tartışmanın sonuna gelindiğinin sinyaliydi.

Kara delik fiziğı, bugün anladığımız haliyle, tam olarak o zamanlar Princeton’da ve aşağı yukarı eş zamanlı olarak Yakov Zel’dovich ve Vitaly Ginzburg’in gruplarının çalıştığı Moskova’da ve Roger Penrose ve Stephen Hawking ile Brandon Carter’ın birlikte yürüttüğü çalışmalarla Cambridge’de başladı. Ayrıca alana kendi başına katkıda bulunan başka fizikçiler de vardı, Kanada’daki Edmonton  niversitesi’nden Werner Israel dikkat  ekenlerinden biridir. Bu alandaki büyük araştırma gruplarından birinde, tam da doğru zamanda bulunduğum için kendimi daima şanslı hissetmişimdir. Wheeler, bence, kara deliklerin genel anlamda fizikteki uygulamalarının tümüyle farkına varan ilk kişiydi. Hatta 1969’da “kara delik” terimini “tamamen kütleçekimsel olarak   km ş cisim” ifadesinin kısaltması olarak pop lerleştirmiştir. Wheeler, bir ders sırasında büyük bir dinleyici kitlesinin önünde “tamamen kütleçekimsel olarak   km ş cisim” ifadesini kısaltmak için doğru kelimeleri bulmaya çalışıyordu. Dinleyicilerin arasından bir ses, “Neden kara delik demiyoruz?” diye sormuş, Wheeler da bu terimi kapıp onu 30 yıldır olduğı gibi popüler bir ifade haline getirmişti.

Rus gruplar kara delik yerine “donmuş yıldız” terimini kullanıyorlardı. Mantığı şöyledir. Bilgiyi taşıyan diğ r tüm fiziksel aracılar gibi ışığın da ufuk tarafından  vrelenen bölgenin dışına  ıkamayacağına değinmiştim. Bu yüzden yıldız, halihazırda bu bölgenin içine sıkışmışken dışardan görülemez. G r n rl kten g r nmezliğı geçiş aniden gerçekleşmez. Hesaplamaların g sterdiğı üzere, uzaktaki bir gözlemci tarafından görülen ışık kademe-li bir şekilde solar ve bu, yıldızın yüzeyi ufka yaklaşıkça izlediğı yol üzerinde donuyormuş gibi bir izlenim verir. Açıkça “donmuş

yıldız” nitelemesinin kaynağı olan Zel’dovich Rus fiziğinin en büyük şahsiyetlerindendi. Fiziğin onun katkıda bulunmadığı aktif bir alanı yoktur diye düşünüyorum; parçacık fiziği, alan kuramı, akışkanlar mekaniği, –hem klasik hem de kuantum– elektrodinamik, plazma fiziği, kütleçekim, astrofizik ve kozmoloji. Zel’dovich epey genç yaşlarda tutuşucu malzemelerin hızla yanmasının ele alındığı patlama kuramında⁶ bir uzman oluştu. Bu, akışkanlar mekaniği, kimya ve termodinamiğin şeytani derecede karmaşık bir meleziydi. Zel’dovich ve meslektaşı Rayzer, 1960’larda, bu alandaki en ileri ders kitabını kaleme almışlardı. Zel’dovich II. Dünya Savaşı’nın başlarında bu uzmanlığından yararlanarak, istilacı *Wehrmacht*’a karşı Kızıl Ordu tarafından büyük bir etkinliklerle kullanılmış olan Katyusha roketlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştu. Bu roket bugün hâlâ çoğunlukla birtakım terörist birlikler tarafından kullanılıyor ve biz İsrail’dekiler onun öldürücü etkilerini üzücü bir şekilde tanıyoruz.

Zel’dovich daha sonra Sovyetler’in nükleer ve H-bombası çalışmalarına dahil oldu. Savaştan ve Soğuk Savaş’ın ilk yıllarından sonra Zel’dovich, Wheeler gibi, akademiye Moskova’da geri döndü ve bu onun, yine Wheeler’da olduğu gibi, kütleçekim fiziğiyle ilgilenmeye başladığı dönemdi. Bu alana genç bir genel görelilik uzmanı olan Igor Novikov’la ortaklaşa yaptıkları bir çalışmayla giriş yaptı. Zaman geçtikçe Zel’dovich ve Navikov ikilisi kütleçekim, astrofizik ve kozmoloji araştırmalarının semalarında birer yıldız oldular. Sanırım bu konularda Eski Sovyet bloğundan çıkmış en iyi kitaplar, ilk olarak 1970’lerin başlarında yazılmış olan iki ciltlik *Relativistic Astrophysics* [Görelî Astrofizik] isimli kitaplardır. Zel’dovich 1988 yılında öldü ve birkaç yıl sonra Sovyet biliminin çökmesi neticesinde Novikov da Kopenhag’a taşındı.

Genel sınavları geçtikten sonra genel görelilik üzerine sağlam bir temel oluşturmaya yoğunlaştım. Wheeler, Harrison, Thorne ve Wakano’nun kitabı ile Zel’dovich ve Novikov’un iki kitabından ilki araştırma başlıklarıyla tanışmam için bir başlangıç vazifesi

6 *Detonation Theory* –ç.n.

7 1935 ile 1945 yılları arasında Nazi Almanyası’nın birleşik silahlı kuvvetleri –ç.n.

gördüler. Genel göreliliğin ‘ekmek ve tereyağı’¹⁸ olarak Landau ve Lifshitz’in *Classical Theory of Fields* [Klasik Alan Kuramı] ders kitabını ve onun yanı sıra Adler, Bazin ve Schiffer’in eğitime yönelik bir giriş niteliğinde olan kitabını kullandım. O zamanlar genel görelilik üzerine az sayıda giriş seviyesinde kitap vardı. Wheeler’ın öğrencileri olarak sabırsızlıkla onun, eski öğrencileri Misner ve Thorne ile birlikte hazırlamakta olduğu *Gravitation* [Kütleçekim] kitabını yazmayı bitirmesini bekliyorduk. *Gravitation* benim doktora derecemi almamdan bir yıl sonra yayımlanmış olmasına rağmen, biz, Wheeler’ın öğrencileri, el yazması metnin fotokopileri vasıtasıyla aradaki bölümlerin büyük bir kısmına çalışma imkânına sahip olmuştuk. Bu kitap, diğer bütün metinlerden ve monografilerden daha çok, benim kütleçekim fiziğine ve ilginç kabul edilebilecek problem tarzlarına olan bakış açımı şekillendirdi. Yayımlanmış versiyonu çıktığında, benim önceden yayınlamış olduğum iki makaleme atıfta bulunulduğunu görmekten gurur duymuştum.

Princeton’da fizik hariç neredeyse hiçbir şey yapmadım. Bazı öğrenciler var ki size Princeton’daki sosyal hayattan bahsedeceklerdir, ama ben bununla hiç vakit kaybetmedim. Zaman zaman biraz dinlendiğim oluyordu; mesela Pazarları New Jersey’e kadar uzanan yakınlardaki şehir merkezlerine uzun bisiklet turları düzenler veya Princeton’daki Guyot Salonu’nda bulunan zooloji ve jeoloji müzesini ziyaret ederdim. Ayrıca devasa müzik koleksiyonunu dinlemek için Princeton Halk Kütüphanesi’ne giderdim. Ama zamanımın çoğunu, diğer lisansüstü öğrencisi arkadaşlarım gibi çok çalışarak geçirdim.

Princeton’da kütleçekim üzerine güncel gelişmelerle ilgili tüm haberleri duyardık, sadece oranın sakinlerinden değil gelen ziyaretçilerden de. Mesela Roger Penrose birkaç kere ziyarete gelmişti. Senelerce Moskova’daki ünlü Landau Enstitüsü’nün direktörlüğünü yapmış olan Isak Khalatnikov’un bir ziyaretini de hatırlıyorum. Büyük Patlama’daki tekillik konusunda Lifshitz ve Belinsky ile yaptıkları çalışmalar üzerine bir seminer vermişti. Uzun yıllar sonra Khalatnikov’u, Perestroika’nın⁹ ardından Tel Aviv

8 *The bread and butter*. Parçada bir şeyin hayati, çok önemli parçası anlamına gelen kullanılıyor -ç.n.

9 Sovyet lideri Gorbaçov tarafından 1985’de başlatılan ekonomik reformlar -ç.n.

Üniversitesi'ne taşındığında iyi denebilecek düzeyde tanıma fırsatı olmuştı. Dünyaca ünlü matematiksel fizikçi Ludwig Faddeev, Leningrad'dan gelip ayar kuramlarını¹⁰ kuantum kuramıyla birleştirmek için Popov ile geliştirdikleri yeni bir yöntemi değerlendirmişti (ayar kuramları doğadaki elektromanyetik, zayıf ve yeğin kuvvetleri açıklamak için kullanılır). Bu yöntem o zamanlar matematiksel fizik için bir atılım olarak kabul edilmişti ve o zamandan bu yana standart bir teknik haline geldi. İkisi de sonraları beni etkileyen merhum Alfred Schild ve Bryce DeWitt farklı zamanlarda Austin'e gelmişlerdi. Orada bulunduğum üç yıllık sürede dinlediğim tanınmış konuşmacıların listesi uzun. Biz lisansüstü öğrencileri dinlediğimiz tüm bu yeni haberleri kendi aramızda tartışır ve fikirleri daha da ileri götürmeye çalışırdık. Orada herkes çok çalışırdı çünkü bu bir gelenektir, gün doğumundan batımına kadar fizik. Doğrusu, gecenin bir yarısı fizik tartışan veya çalışan birçok insan bulabileceğiniz başka hiçbir yer görmedim.

Ama bütün bunlar hayatın yavan olduğunu söylemek için değil. Renkli şeyler de vardı. Biz lisansüstü öğrencileri zaman zaman kimin en yakışıklı veya en şişman fizikçi olduğunu oylardık. O zamanlar Wheeler'ın çalışma arkadaşı ve daha sonra Roma "La Sapienza" Üniversitesi'nde profesör olan Remo Ruffini, "en yakışıklı" fizikçi oylamasının galibiydi. Keşfettiği meşhur "Regge kutupları" o günlerde parçacık fiziğinin merkezi başlıklarından biri olan ve Princeton'ı sık sık ziyaret eden Torino'lu Tullio Regge ise şişman adam kategorisinin galibiydi (bu konuda resmî olarak bilgilendirildiğinden şüpheliyim).

Değindiğim gibi, Wheeler bana doktora problemi olarak olası birkaç fikir önermişti. Ancak onları formüle dökmek bana zor gelmişti, oldukça muğlaklardı (ve şu an bu izleniminin konuyu kavrayışımındaki muğlaklığın sonucu olduğunu biliyorum). Net bir yön bulabilmek için kütleçekim kuramıyla ilgili literatürü okumaya başladım. Başlarda hiçbir makaleyi anlayamamıştım. Bu moral bozucuydu ve birkaç ay böyle sürdü. Esasen aptal olduğumu düşünmeye başlamıştım. Sonradan berrak bir günde okuduğum şeylerin çoğunu anlamaya başladım. Aynen böyle oldu. Fizikte faz geçişi denen şey gibi ani bir değişimdi. Bilimsel literatürü

10 *Gauge Theories* -ç.n.

başlangıçta anlaşılması güç bulan gençlere yararlı olması için buna değiniyorum. Azmedin!

Küresel bir kütlenin onu ileride yüklü bir kara deliğe çevirecek elektrik yüküyle birlikte çöküşü üzerine bir parça araştırma yaptım. Bu tarz küresel kara delikler Einstein'ın kuramının –ismi- ni 1918'de keşfi yapan iki fizikçiden alan– Reissner-Nordstrom çözümüyle tanımlanmıştı. Yaptığım çalışma büyük bir keşif doğurmasa da yayımlanmak üzere kabul edildiğinde bana kendime güven kazandırdı. Daha ciddi şeyler için hazırdım. Böylece, o zamanlar Wheeler'ın ortaya atmış olduğu bir fikri somutlaştırmaya çalışabileceğimi düşündüm: “Kara deliklerin saçı yoktur.” Peki bu nükteli sözün anlamı nedir?

Sıradan küresel Schwarzschild kara deliği ile hem küresel hem de elektrik yüküne sahip Reissner-Nordstrom kara deliğine yukarıda değinmiştim. Bu sonuncusu, yüklü bir cisimden bekleneceği gibi hem kütleçekim alanı ve hem de elektrik alan tarafından çevreleniyor. 1962'de Schild'in Austin'deki bir öğrencisi olan Roy Kerr kendi etrafında dönen bir kara deliği ifade eden bir çözüm keşfetti; bu, günümüzde “Kerr kara deliği” ismiyle anılıyor. Kendi etrafında döndüğü için bu kara delik artık küresel değildir. Daha sonra 1965'te Pittsburgh Üniversitesi'nden Ezra (Ted) Newman ve beş öğrencisi yeni bir kara delik çözümü yayımladılar. Öğrenciler bu çözümü, Newman'ın onu ev ödevi olarak vermesi üzerine bulmuşlardı. Bu Kerr-Newman kara deliği hem dönüşe hem de elektrik yüküne sahiptir. Etrafı kütleçekim, elektrik ve manyetik alanla çevrilidir. Etrafındaki manyetik alan Dünya'nın manyetik alanı gibi bir şekle sahiptir. O zamandan itibaren kütleçekim araştırmaları topluluğu içindeki büyük soru, başka ne tür kara deliklerin var olabileceğidir. İnsanları en çok ilgilendiren çözümler, biraz önce değindiklerimin tümünde olduğu gibi, denge durumundaki kara delikleri ifade edenlerdir.

Aslında Israel 1967-68 yıllarında; dönmeyen, denge durumundaki bir kara deliğin genel göreliliğe göre ya Reissner-Nordstrom ya da Schwarzschild kara deliği olması gerektiğini söyleyen iki teoremi (bir teorem, birtakım iddiaların titiz bir matematiksel gösterimi veya ispatı anlamına gelir) kanıtladı. Dönmeyen bir kara delik küresel değilse var olamaz. Bu, kara deliklerin kütleçekimin rol oynadığı sıradan cisimlerden farklı olduğunu gösteri-

yor; örneğin birçok asteroit hemen hemen hiç dönmediği halde küresellikten oldukça uzaktır. Daha sonra 1970'te Carter Paris'teki Meudon Gözlemevi'nde bulunan şu anki pozisyonuna geçmeden önce Cambridge'de bulunduğu sırada, genel göreliliğe göre elektrik yükü olmayan ve dönen denge durumundaki bir kara deliğin Kerr kara deliği olmak zorunda olduğunu ispatladı. Bunun anlamı, onu bozacak bir etkide bulunamazsınız; aksi takdirde zaman içerisinde başka bir şeye dönüşmemecesine bir Kerr kara deliği oluşturacaktır.



Şekil 2. Bir Kerr-Newmann kara deliği kütle (M), elektrik yükü (Q) ve açısal momentum (J) değişkenlerine sahiptir; bir kütleçekim alanının yanı sıra, elektrik ve manyetik alan ile çevrelenmiştir. Düz çizgi dönme eksenini gösterir.

Wheeler bu parça parça kanıtlara dayanarak dışarıdan yalıtılmış, denge durumundaki bir kara deliğin varlığının kütle, elektrik yükü ve açısal momentum (dönmenin bir ölçüsü) dışında başka bir değişkene bağlı olamayacağı ve denge durumundaki bir kara

deliğın ancak Schwarzschild, Reissner-Nordstrom veya Kerr-Newman kara deliklerinden biri olabileceğı kestiriminde bulundu. Bu yüzden, denge durumundaki bir kara deliğın dışarıdan gözlenmesi mümkün olan tüm diğerk özelliklerini öğrenebilmeniz için tek bilmeniz gereken, onun kütlesi (Einstein'ın ünlü denklemi $E = mc^2$ ile izah ettiğı üzere enerjisiyle eşdeğerdır), elektrik yükü ve açısal momentumudur. Bunu bir de insanlarla karşılaştırsın; eğer size bir kişinin boy, bel ölçüsü ve ağırlık bilgilerini verseydim onun hakkında çok şey biliyor olmaktan hâlâ epey uzakta olurdu-nuz. Kara delikler ise çok daha basittir! Wheeler bu gözü pek tahminini nükteli bir söz ile özetlemişti: “Kara deliklerin saç ı yoktur.” Kel bir adamı sadece arkasından gördüğünüzde tanıma-nın zor olması gibi, saçın sağladığı tüm görsel ipuçları kayıp olduğundan üç değışkeni de aynı değerkleri alan iki kara delik birbirinden ayırt edilemez; “saçları”, yani kişiye has tanınabilir özellikleri eksiktir.

Wheeler’ın vurguladığı gibi, eğer “saçsızlık” ilkesi doğruysa, baryon sayısı bir kara delik değişkeni olamaz ve baryon sayısının korunumu yasası bir kara deliğin varlığında anlamını yitirir, yani ötesine geçilmiş olur. Peki bu büyük kelimeler ne anlama geliyor? Eğer birisi büyük bir parça madde alıp, molekül ve atomlarının ezilmesiyle onlara karşılık gelen ayırık kimyasal bileşenleri ortadan kayboluncaya dek onu sıkıştırarak olursa, elinde atom çekirdekleri ve elektronlardan, yani nükleer maddeden oluşan bir çorba kalır. Nükleer fiziğe göre bir nükleer maddenin kütlelerini, elektrik yükünü ve açısal momentumunu bilmek onun durumunu belirlemek ve onu aynı miktardaki başka bir nükleer maddeden ayırmak için yeterli değildir. Baryon numarası, lepton numarası, acayıplık¹¹ vb (lepton numarası, elektron ve onun benzeri olan muon gibi hafif parçacıkların sayısıdır; acayıplık ise proton gibi sıradan baryonlarla, daha önce değindiğim lambda gibi daha nadir karşılaşılan baryonları ayırt eder) başka değişkenleri de belirlemeniz gereklidir.

Wheeler'ın, bir kara deliğin dışarıdan yalnızca kütlesi, yükü ve açısal momentumuyla tarif edilebileceği yönündeki iddiası açıkça, büyük bir parça nükleer maddenin bir kara deliğe çökme-

11 Strangeness -ç.n.

si durumunda, bu maddeyi belirlemek için kullanılan baryon numarasının anlamsızlaştığını ifade eder; cismin durumunu tayin etmek için artık ona ihtiyaç kalmaz. Bununla birlikte eğer etrafta bir kara delik varsa, baryon numarasının korunumu yasası kara deliğin içine düşen baryonlarla ilgili hiçbir şey söyleyemez; baryonlar oradan ne kurtulabilir ne de kara deliğin durumuyla ilgili bir iz bırakabilir. Yasanın ötesine geçilmiş olur, anlamsızlaşır. Baryon sayısının korunumunun laboratuvar ortamında son derece iyi bir şekilde test edildiği düşünüldüğünde, Wheeler'ın yasanın aşılabilirliğine ilişkin iddiası kesinlikle sert bir iddiaydı.

Birden aklıma bu iddiayı, Einstein'ın kuramının denge durumunda olup, elektromanyetik alan veya kütleçekim alanı dışında başka bir alanla çevrelenmiş küresel bir kara deliği ifade eden bir çözümünü bulmaya çalışarak sınamak gelmişti. Böyle bir cisim açıkça kütle, açısal momentum (Einstein'ın kuramına göre bunlar kütleçekim alanının kaynakları) ve elektrik yükünün (elektromanyetik alanın kaynağı) ötesinde başka değişkenlere de sahip olacaktı. Peki fazladan hangi alana bakılmalıydı? Bildiğimiz elektromanyetik alanın altı bileşeni vardır, üç bileşen elektrik alanın üç doğrultudaki şiddeti için ve diğer üçü ise benzer şekilde manyetik alan için. Einstein'ın kuramına göre, kütleçekim alanının 10 bileşeni vardır, Newton'ın klasik kütleçekim alanına karşılık gelen bir bileşen ve maddenin üzerindeki etkisi hemen göze çarpmayan diğer dokuzu. Fizikçiler bunların dışında başka alanlara da aşinadır. Bunlardan belki de en basiti, skaler alandır; sadece bir bileşene sahiptir. Buna bir örnek pion alanıdır. Elektromanyetik alan nasıl fotonlardan (hafif parçacıklar) meydana geliyormuş gibi düşünülebilirse, pion alanı da pionlardan, yani sıklıkla baryonların yüksek enerjili çarpışmalarından üretilen parçacıklardan meydana geliyormuş gibi düşünülebilir. Daha net bir ifadeyle pion alanı yeğin (nükleer) kuvvetin taşıyıcısı olarak düşünülebilir, tıpkı elektromanyetik alanın parçacıklar arasındaki elektrik ve manyetik kuvvetlere aracılık etmesi gibi.

İlgi, hepsi yeğin kuvvete tabi olan baryonların etrafında toplandığı için kara deliklerle ilişkili bir skaler (pion) alan aramak benim için doğaldı. Ben kara delikleri oluşturan baryonların muh-biri olabilirdim çünkü baryonların varlığı yeğin kuvvet aracılığıyla kara deliğin dışından hissedilebilirdi. Eğer Einstein'ın denk-

lemlerinin dışsal bir skaler alana sahip bir kara deliğe işaret eden bir çözümünü bulmakta başarılı olabilseydim, kara deliği tarif etmek için kütle, yük ve açısal momentum dışında başka değişkenler olduğunu da göstermiş olabilirdim.

İstenilen çözümün varlığını göstermek için bana gerekli olan, hiç olmazsa, küresel bir kara deliğin yakınlarındaki bir skaler alanı ifade eden diferansiyel denklemi çözmektir. Peki diferansiyel denklem denen şey nedir? Bilindik (cebirsal) bir denklem bir değişkenin kuvvetlerini diğer kuvvetlerle ilişkilendirir; aşağıdaki x değişkenine bağlı cebirsel denklem bunun basit bir örneğidir:

$$x^2 - 4x + 4 = 0$$

x 'in 2 'ye eşit olması gerektiğini hepimiz biliyoruz; bunu bulmaya cebirsel denklemi x için çözmek denir. Bir değişkene bağlı fonksiyonları dikkate almak için nedenlerimiz var. Örneğin, bir çizgi boyunca çeşitli konumlardaki sıcaklık değeri konuma bağlı bir fonksiyondur ve bu $T(x)$ şeklinde yazılır. Bir skaler alan bir şeyleri uzayda konumlandırmak için kullanılan üç koordinatın hepsine ve zamana bağlı bir fonksiyondur. Diğer bir önemli kavram ise bir fonksiyonun türevidir. İlk örneğimizde sıklıkla ilgilenilen şey çizgi boyunca ilerledikçe sıcaklığın değişme miktarıdır. Buna $T(x)$ fonksiyonunun birinci türevi denir; bu x 'e bağlı bir diğer fonksiyondur. Birisi, çizgi üzerinde ilerledikçe türevin ne hızda değiştiğini de bilmek isteyebilir; bu da $T(x)$ fonksiyonunun ikinci türevidir. Ve böyle sürüp gider. Bir diferansiyel denklem, bir fonksiyonun çeşitli türevleri arasındaki bir bağıntıdır. Onu çözmek demek hangi fonksiyonun kendi türevleriyle arasında öyle bir ilişki olduğunu bulmak demektir. Benim çözmem gereken denklem skaler alanın değeriyle onun birinci ve ikinci türevleri arasındaki bir bağıntıydı. Ama yukarıdaki örneklerdeki x koordinatı yerine, kara deliğin merkezinden olan mesafe, skaler alanı ifade eden diferansiyel denklemde hesaba katılır.

Bu denklemi analitik olarak, yani sembolik bir şekilde, çözmek benim için çok zordu. Fizikte bu sıklıkla olur. Bunun üzerine onu bilgisayarda sayısal olarak çözmeyi denedim. İki yöntem arasındaki fark, sembolik çözümün kesin olmasıdır, aranan fonksiyonla ilgili tüm bilgileri verir ve tüm koşullar için geçerli çözümü temsil eder. Aksine, sayısal çözüm ise yaklaşıktır; fonksiyonun bazı ilginç özelliklerini kaçırabilir ve sadece belli bir koşul

için geçerli çözümü temsil eder. Eğer farklı durumları görmek isterseniz, yeni koşullar için tekrar sayısal çözüm yapmanız gerekir. Normalde hesaplama için bilgisayarları kullanmaktan hoşlanmam, çok daha genel olduğundan analitik akıl yürütmeyi tercih ederim. Ancak bu defa bir sonuç elde edebilirsem esnek davranmaya niyetliydim.

Çok geçmeden muhteşem bir şey oldu. Denklemi Princeton'daki bilgisayarda programlamaya uygun formda yenisinden yazmak için uğraşırken, denklemin istenilen tipte bir çözümü olamayacağını sembolik olarak nasıl ispatlayabileceğimi fark ettim! Bu sonucu küresel olmayan (ama yine de denge durumundaki) bir kara delik için genelleştirmek oldukça kolaydı. Bunun anlamı, denge durumundaki bir kara deliğin bir skaler alanın kaynağı olamayacağıdır; eğer kara deliğin içerisinde bu alanın bir kaynağı varsa, alan dışarda açığa çıkmaz. Böylece yeni bir tür "saçsızlık" kuramını nasıl ispat edeceğimi keşfetmiştim. Yöntemim, eğer elektriksel olarak iletken bir maddeden yapılmış, herhangi bir şekle sahip bir kafesiniz varsa ve içerisinde elektrik yükü yoksa, bu kafesin içerisinde denge durumunda bir elektrik alan bulunamayacağını ifade eden teoremin ders kitaplarındaki ispatıyla kıyaslanabilir. Bunun apaçık pratik uygulamaları vardır; kafes elektik alanları dışarıda tutmak için kullanılabilir. Aslında, on dokuzuncu yüzyılın ünlü Britanyalı fiziksel kimyacısı Michael Faraday'dan sonra Faraday kafesi adıyla anılmaya başlanan bu kafesler, deneylerde sonuçları bozabilecek elektrik alanları dışarıda tutmak için rutin olarak kullanılır.

Son değindiğim teorem doğrudur çünkü iletken duvarlar elektrik alanın yalnızca duvarlara dik olduğu koşulu dayatır; yoksa alan yükleri hareket ettirirdi ve durum bir denge durumu olmazdı. Buna bir "sınır koşulu" denir. Fizikte ilgilenilen nicelikleri idare eden diferansiyel denklemler yukarıdaki örnekte olduğu gibi daima basit fiziksel gereklilikleri ifade eden bazı sınır koşullarına tabidir. Aslında, elektromanyetik denklemler bu sınır koşulları altında bir denge çözümüne sahip değildir; elektrik alanın her yerde sıfır olduğunu veren çözüm hariç. Yani aslında girintilerde bulunan tüm elektrik alan yok olmalıdır. Benzer şekilde, kara delikler için de skaler alanla ilgili fiziksel fikirler ufuktaki ve de uzayın daha uzak bölümlerindeki ("sonsuz"daki) sınır koşullarına

çevrilebilir. Teknik detaylara girmeyeceğim ama meselenin özü, ilgili denklemin bu koşullar altında sabit, yani kara delikten uzaklaştıkça değişmeyen, bir skaler alanı koruyacak bir çözüme sahip olmamasıdır. Kara deliğin içerisindeki skaler alan kaynakları sabit bir alan veremeyeceğinden, bu tarz kaynakların kara deliğin dışına bir etkisi olmaz.

Bulduğum sonucu yeni bir tür “saçsızlık” teoremi olduğuna söylemiştim. Israel ve Carter’ın, bir Schwarzschild, Reissner-Nordstrom veya Kerr kara deliği çözümünün, denge durumunda yeni bir kara delik çözümü yaratmak üzere bozulmasının mümkün olmadığını gösteren teoremlerine de daha önce değinmiştim. Benim sonucumda yeni olan şey, dengedeki bir kara deliğe ayrıca bir skaler alan ekleyemeyeceğinizdi. Açık konuşmak gerekirse, ben bu tarz bir sonuç elde eden ilk veya tek kişi değildim. Örneğin, Israel’in bir öğrencisi olan J.E. Chase, 1970’te kütsüz bir skaler alanın (kuantum parçacıklarının ışık hızında hareket ettiği bir alan) dönmeyen, denge durumundaki bir kara deliği çevreleyemeyeceğini göstermişti. Bunu yapmak için Israel’in yöntemini genelleştirmesi ve Einstein denklemlerinin tamamını kullanması gerekmişti ve dolayısıyla savı oldukça karmaşıktı. Buna karşın, biraz önce açıkladığım yaklaşım sadece tek bir denklemden, skaler alanından, yararlanıyordu ve birkaç satırda ifade edilebilecek kadar basitti. Dahası, kütleli veya kütsüz tüm skaler alanlar (kütleli alanlarda parçacıklar ışıktan daha yavaş hareket eder) için uygundu ve Einstein denklemlerini kullanmadığından, eğer kütleçekim çok sayıdaki rakip kütleçekim kuramından biriyle ifade edilmiş olsaydı da geçerli olacaktı. Yani çok genel bir “saçsızlık” teoremiydi.

Sonuçlarım prestijli ve hızlı *Physical Review Letters* dergisinde yayımlandı ve onu takiben detayların işlendiği iki uzun makale de *Physical Review* dergisinde yayımlandı. Bu sonuncular, dönsün veya dönmesin, bir kara deliğin dışında sadece skaler alanın değil, bazı başka alanların da bulunamayacağını gösteriyordu. Örneğin, elektromanyetik alana benzeyen ama parçacıkları ışıktan daha yavaş hareket eden bir alan da dışarıda bırakılıyordu. Bunlar benim kütleçekim kuramı üzerine olan ilk önemli yayınlarımdı. “Saçsızlık” teoremlerine olan yaklaşımım uzun yıllar boyunca güncel kaldı ve makalelerim şaşırtıcı bir şekilde otuz yıldan uzun süre atuf almayı sürdürdü.

Varılan sonuçların zamanla değişmesi bilimde epey sık olan bir şeydir. 1980'lerin sonlarında fizikçiler, Einstein'ın kuramının kara delikleri yeni tipte alanlarla, özellikle ayar alanlarıyla, çevrelenmiş olarak resmettiği yorumunda bulunulabilecek çözümlerini keşfetmeye başladılar. Bunlardan en iyi bilineni elektrik ve manyetik kuvvetlere aracılık eden elektromanyetik alandır. Daha önce değindiğim gibi bu alan altı bileşene sahiptir. Chen-Ning Yang (1956'da Tsung-Dao Lee ile birlikte paritenin korunumlu olmayan bir nicelik olduğunu göstermeleri neticesinde Nobel ödülüne layık görülmüşlerdi) ile öğrencisi Robert Mills 1954'te elektromanyetik alana benzer başka alanların da var olabileceğini, bunların parçacıklarının elektromanyetik alanın fotonları gibi ışık hızında hareket ettiklerini ve yeni türde kuvvetlerin aracısı gibi davranabileceklerini kuramsal olarak gösterdiler. 1970'lerden beri biliyoruz ki, ayar alanları birçok bileşeniyle radyoaktiviteden sorumlu zayıf kuvvete ve proton ile nötronları çekirdekte bir arada tutan yeğin kuvvete aracılık ediyor. İnsanların iddiası artık, bir kara deliğin kendisini çevreleyen bunlar gibi ayar alanlarına sahip olabileceği yönündeydi.

Birçokları bunu saçsızlık fikrinin çöküşü olarak selamladılar. 1972 tarihli doktora tezimde, kendi teoremlerime rağmen “ayar alanı saçı”nın neden göz ardı edilemeyeceğini net bir şekilde açıklayan savımı anımsamak beni çok eğlendirir. Bilimde, dünya meselelerinde olduğu gibi, kabul edilmiş “gerçekler” ile ihtilaf içindeki her şey derhal şöhret kazanır, bu “gerçek” kanıtlanmamış olsa dahi. Dolayısıyla insanlar 1990'lar boyunca şiddetle kara deliklerle iliştirebilecekleri yeni alanlar aradılar ve bu heves bugün hâlâ sönmedi. Bugüne kadarki örneklerin çoğunun “saçsızlık” fikrinin güvenilirliğini sarsmakta zorlandığı epey açık. Değinilen çözümlerin çoğu kararsızdır; eğer dengedeki bir kara deliği bu şekilde bozarsanız değişmeye başlar ve tamamen farklı bir şeye dönüşür.

Açıkcısı, bu kara delikler ve onların “saçı”, kuramcılarının defterleri dışında başka hiçbir yerde bulunamayacaklar! Diğer durumlarda devreye giren ayar alanı doğada meydana gelecek cinsten değildir. Böyle “saçlı” bir kara delik, hayali bir dünyada var olabilir ama bizimkinde değil. Ama *hakiki* “saçlı” kara deliklerin mümkün görüldüğü birkaç örnek vardır. Wheeler'ın esas “saçsızlık” önermesinin hafifçe düzeltilmesi gerekecektir.

Ama ana hikâyeye dönmeme izin verin. Bütün çalışmam boyunca Wheeler'ı "saçsızlık" teoremlerindeki ilerlemem konusunda bilgilendirmiştim. Onu ayda bir kere görmeye gidiyordum. Yarım saatliğine veya bir saatliğine beni dinler, çeşitli yorumlarda ve  onerilerde bulunurdu. ÖĞrencilik yıllarımda onunla olan bire bir etkileşiminin kapsamı bundan ibaretti. O her zaman çok yoğundu ve birçok lisansüstü  Ğrencisi vardı; bir keresinde on dört adet olduklarını saymıştım. Ayrıca bazıları  niversite dışında bulunan, nükleer reaktörler ve diğer uygulamalı şeylerle ilgili olan çeşitli komitelere katılıyordu. Bu yüzden biz  Ğrencilerinin dahil olduğu araştırmaların çoğu kendi aramızdaki etkileşime dayanıyordu. Ben Robert (Bob) Wald, William (Bill) Unruh ve Bahram Mashhoon ile çokça konuşurdum. Bu kişiler Larry Ford ve Bei-Lok Hu ile birlikte bugün k t le ekim fiziğinin tanınan isimleridir. O zamanlar Wheeler'ın diğer bir  Ğrencisi olan Terry Sejnowski ise beyin biliminde büyük bir isim oldu. Derece mi aldıktan sonra Wheeler'la daha sık konuşmaya başladık. Ama tabii ki tezimi okudu ve düzeltme  onerilerinde bulundu. Bugün kendisi sadece biraz daha az yoğun, ama hâlâ oldukça aktif.

Bir gün Wheeler bana 1971 Haziranı'nda Kopenhag'da düzenlenecek olan Altıncı Genel Görelilik ve K t le ekim Konferansı'na gidebileceğimi söyledi. Bu görelilik konferansları    senede bir düzenleniyordu ve k t le ekim kuramı ve deneylerle ilgili en güncel gelişmeleri duymak için iyi bir yerdi. Çok heyecanlanmıştım çünkü hiç Avrupa'da bulunmamıştım ve tabii uluslararası bir konferansta da. Aslında bebekken u mış olmama rağmen, o zamana kadar kendi başıma uçağa binmemiştim. Seyahat konusunda öylesine toydum ki, bir seyahat acentesiyle konuşmak aklıma bile gelmedi; doğrudan New York'taki Loftleidir  zlanda Havayolları'nın ofisine gidip biletleri satın aldım ve seyahat planımı direkt kaynağından yaptım!

Kopenhag'a kara deliklerle ilgili yeni sonuçlar ulaştırdım. Elde ettiğim "saçsızlık" teoremlerinin Einstein'ın k t le ekim denklemlerinden yararlanmadığına ve kullanılan k t le ekim kuramının Einstein'ın genel g reliliğinden farklı olması durumunda dahi, teoremlerin doğru olacağına değinmiştim. O zamanlar, şu an olduğu gibi, en popüler alternatif, Princeton'da profesör olan ve deneysel k t le ekim grubunun başında bulunan Robert

Dicke ve onun öğrencisi Carl Brans tarafından 1961’de Princeton’da geliştirilen kuramdı. İki kuram arasındaki fark, Einstein’ın kuramında kütleçekim alanının bileşenleri tamamen uzayın geometrisiyle ilişkiliyken, Brans-Dicke kuramında kütleçekim alanlarının, Newton sabitinin büyüklüğünü (Einstein’ın kuramında bu sabit, kelimenin tam anlamıyla bir sabittir) konum ve zamana göre ayarlamakla görevli bir skaler alan içermesiydi. Dicke, süperışıma¹² üzerine yaptığı çalışmalar, –isminin duyulmasını sağlayan– radyometrenin icadı ve Einstein’ın kuramının temellerini test etmekte kullanılan yüksek hassasiyetli bir deney olan Dicke deneyi sayesinde harikulade bir deneysel itibara sahipti. Ama aynı zamanda oldukça derin kuramsal sezgilere de sahipti. Onun, kütleçekim kuramıyla bağlantılı deneysel fikirler üzerine verdiği bir derse katılmışım; orada belirli özelliklerde bir kütleçekim kuramı inşa etmenin ilkelerini anlatmıştı.

Dicke’nin derslerinin kariyerim üzerinde büyük tesiri olmuştur. Yıllar sonra kendimi geleneksel fizik kuramlarının alternatiflerini araştırırken bulacak ve Dicke’nin doktrinini harfiyen takip edecektim. Söylemesi garip ama hâlâ öğrenci olduğum sıralar Dicke’yle konuştuğumu hiç hatırlamıyorum. Ben çekingen, o ise ünlü bir bilim insanıydı. Yıllar sonra, 1980’lerin başlarında, Princeton’u ziyaret etmişim ve bana Dicke’nin beni görmek istediği söylenmişti. Sohbetimiz benim için hâlâ oldukça canlı. Benim kara delik termodinamiğinin “büyükbaba”sı olduğumu duyduğunu ve bu alandaki bazı iddiaları kabul etmekte sorun yaşadığını söylemişti. Kısa süre sonra, bir parçacığın elektrik yükünün büyüklüğünün konumdan konuma değişip değişemeyeceği sorusuna (buna daha sonra döneceğim) ilişkin, onun daha önce verdiği bir örneğin akabinde, yazmakta olduğum bir makaleyle ilgili mektuplaşmaya başladık. Dicke 1997’ye kadar yaşadı.

Brans-Dicke kuramına ve kara delik fiziğine aşına olduğumdan, doğal olarak kendime şu soruyu sordum; Brans-Dicke kuramındaki kara deliklerden ne haber? Halihazırda bilinen bir şey vardı. Caltech’ten Thorne ve öğrencisi John Dykla, çeşitli örneklerle dayanarak Brans-Dicke kuramındaki denge durumunda bulunan kara deliklerin genel göreliliğinkilerle tamamen aynı olduğu

12 *Superradiance* –ç.n.

kestiriminde bulundular. Ancak bunu kanıtlayamıyorlardı. Aslında bütün yapılması gerekenin Brans ve Dicke'nin skaler alanının denge durumundaki bir kara deliğin dışında sabit olduğunu göstermek olduğu aklıma geldi. Bunun sebebi sabit bir skaler alan için Brans-Dicke ve Einstein kuramlarının eşdeğer olmasıdır; kuramların arasındaki tek gerçek farkın k t le ekim sabitinin Einstein'ın kuramında gerçekten bir sabitken, Brans-Dicke kuramında bir denkleme bağlı olarak değişiyor olması olduğunu hatırlayın. Denge durumundaki bir kara deliğin dışında sabit olmayan bir pion skaler alanının yasak olduğunu göstermemi sağlayan tekniğin aynısı, Brans-Dicke skaler alanının denge durumundaki bir kara deliğin dışında sabit olması gerektiğini ispatlamamı sağladı. Bu sayede oldukça basit bir şekilde, iki kuramdaki kara deliklerin birbirleriyle aynı olduğu görülüyordu. Brans-Dicke kuramı Schwarzschild, Reissner-Nordstrom ve Kerr-Newman kara deliklerine sahipti, baŐkalarına değil. Brans-Dicke kara deliklerinin de "saçı" yoktu!

Bu ispatı o zamanlar kısmen tanıdığım Thorne'a gönderdim. Kopenhag'da onunla karŐılaŐtıĐımda bana, daha yeni Stephen Hawking'in Cambridge'den kendisine bir  n baskı (bir makalenin dergiye gönderilmeden önceki ön hazırlık versiyonu) gönderdiğini söylemişti ve Hawking orada benimle aynı şeyi ispatlamıŐtı. Dahası, anlaŐıldıĐı üzere bunu benimle aynı yöntemi kullanarak yapmıştı. Atlatıldığım için moralim bozulmuŐtu ve çalışmamı yayımlamaya bile  alıŐmamıŐtum. O zaman yorum talep etmeden önce sonuçları makale olarak bir dergiye göndermiŐ olmam gerektiğinin farkına vardım. Bu benim Hawking'le olan ilk " akıŐmam"dı.

Bu sonuçtan öğrendiğim şey, kara deliklerin herhangi bir k t le ekim kuramının ötesinde, evrensel bir olgu olduğudur. Bu hangi őirket tarafından yapılmış olursa olsun tüm televizyonların size aynı programları gösterdiği gerçeğine benzer bir durum. 1970'lerin sonlarında öğrencim Amnon Meisels ile birlikte k t le ekim sabitinin rolünü bir skaler alanın oynadığı, akla hayale gelebilecek neredeyse tüm kuramların tıpkı Einstein'ın kuramında olduğu gibi aynı Kerr-Newman, Schwarzschild ve Reissner-Nordstrom türünden denge durumunda kara deliklere sahip olduğunu doğruladık. Aynı şey nötron yıldıŐları (selefi olan yıldıŐın

nükleer yakıtını tüketip patlamasıyla artakalan nükleer maddeden oluşan aşırı derecede yoğun yıldız) veya bütün bir evren modeli için söylenemez. Bu ikisinde de kütleçekim çok önemlidir. Rakip kütleçekim kuramlarına göre nötron yıldızları farklı özelliklere sahiptir. Benzer şekilde evrenin evrimini hesaplarken kullandığınız kütleçekim kuramını değiştirirseniz, model evren farklı şekilde evrilecektir.

Farklı kuramların çeşitli detaylarla birbirlerinden ayrılmasına rağmen, kara delikler her nasılsa kütleçekimin bazı derin özelliklerini yakalarlar. Bu yüzden kara deliklerin fizikteki temel önemine ilişkin hiçbir şüphe yoktur. Onlar fiziğin manifestosudur, fiziğin belirli bir tanımının değil.

Bu, kara deliklerin neden büyüleyici olduğunun nedenlerinden yalnızca biri. Kara delikler evrenseldir, tikel değildir. Genç bir adam olarak, çeşitli olası uzmanlık alanlarının geleceğini tartarken evrenin farklı bir köşesinden gelen bir varlık için dahi kavranabilir olan bir şey yapmak istediğime karar vermiştim. İnsan uğraşlarının çoğu böyle değildir (mesela bir uzaylı dünyalı bir hukukçuyu anlayabilir miydi?). Ama doğa bilimleri uzaylı varlıklar için de kavranabilir. Şüphesiz, bilim insan zihninin çalışma biçimine ve insan kültürünün detaylarına göre koşullanmıştır. Ancak bu güçlüklerle rağmen, çeşitli doğa bilimlerinin anahtar sonuçları ve ilkelerinin, mesela kütleçekim yasasının veya ısıma yasalarının, uzaylılar için anlaşılabilir olacağını hissetmiştim. Kara deliklerin de aynı kategoriye girdiğini düşünüyorum. Kara deliklerin termodinamikle olan bağlantıları (buna 2. Bölümde değineceğim) bunun bir diğer ispatı.

Neyse konuyu dağıttım. Ben Kopenhag'daki görelilik konferansında resmî bir katılımcı değildim. Wheeler bana gidebileceğimi söylediğinde katılım için başvuruda bulunmuştum ancak başvurum reddedildi (resmî gerekçe konaklayacağım yerin belirtilmemiş olmasıydı). O yıl, Wheeler'ı ziyarette gelen Norveçli fizikçi Andreas Quale endişelenmememi, kalacağım yeri kendim bulduğum takdirde rahatsız edilmeden konferansa katılabileceğimi söyledi. Öyle de oldu. Kopenhag'da ilk olarak bir öğrenci yurduyla başladım, ama birisi yatağın kendisine ait olduğu iddiasıyla gecenin bir yarısı beni uyandırınca daha emniyetli bir yer aramaya karar verdim ve Danimarkalı bir çiftin evinde bir

Zimmer, yani oda kiraladım. Bu, konferansa rahat bir şekilde katılmama imkân sağladı ve oraya sadece yatmaya gidiyor olsam da hiç rahatsız edilmedim. Ne yazık ki, bu serbest katılım ruhu giderek kayboluyor. Fahiş kayıt ücretini ödememiş olduğu için bir konferanstaki bir derse katılması engellenen öğrenciler gördüm. Fazla söze gerek yok, eski düzenlemeler daha iyiydi.

Bu konferans benim için oldukça göz açıcı oldu. Çokça yeni şey duydum. Sadece hakkında geçen konuşmalardan ve literatürden tanıdığım ünlü araştırmacıları gördüm. Birkaç insanla tanıştım; bu tanışıklıkların bazıları 30 yıl sonra da devam etti. İlk kez orada konferansların diğer yüzünü, karanlık olanı da görmüş oldum ve bu beni hâlâ rahatsız etmeye devam ediyor. Birçok insan konferansları kendi reklamlarını yapma fırsatı olarak görüyor. Bu, kendi çalışmalarının detaylı bir açıklamasını dinlemeleri için insanları zorlamak, karşılıklı bir konuşmayı yönlendirmeye çalışmak, ünlü insanlarla sosyalleşmek vb herkesin hakkının gözetilmesine zarar veren davranışları da kapsıyor. Bilimsel konferansların bu tarz yapmacık faaliyetlerin sergilendiği yegâne yer olmadığı açık, ama bilim evrensel doğrularla ilgileniyorsa şayet, bilimsel bir konferans insan doğasının bu çirkin özelliklerinden azade olmalıdır. Her neyse, ben zihnimi fiziğe yoğunlaştırmaya ve tüm bu halkla ilişkiler faaliyetlerinden uzaklaştırmaya karar verdim. Bu kişisel bir karardı, bir tür özel “Kopenhag Mutabakatı”. Buna hâlâ uyuyorum.

Danimarka’dan dönüş için aldığım Loftleidir biletim, Newyork’a devam etmeden önce ekstra harcama yapmadan Stockholm, Oslo ve Reykjavik’a süre kısıtlaması olmaksızın uğramama imkân veriyordu. Ben de eve dönüş yolculuğumu bir ay süren bir maceraya dönüştürmek için bundan faydalandım. İlk olarak, o sıralar İsveç’in tarihi başkenti Uppsala’da bir üniversite ziyaretinde olan eski dostum Zelek Herman’ı (o zamanlar Princeton’da kimya doktorası yapıyordu) ziyarete gittim, Stockholm’den fazla uzak değildi. Uppsala’da birkaç gün geçirdikten sonra, Finlandiya’da üç günlük bir geziye çıktım. Bu gezi birkaç bin yolcuyla birlikte bir tur gemisiyle yaptığım gidiş dönüş deniz yolculuğunu ve liman şehri Turku’dan Helsinki’ye, oradan ülkenin merkezindeki Tampere’ye ve oradan da tekrar Turku’ya yaptığım tren yolculuklarını kapsıyordu. Finlandiya’yla ilgili en

canlı hatıram, yağmurdan hemen sonra Tampere yakınlarındaki bir orman boyunca yaptığım uzun yürüyüşü. Oranın huzuru ve esansı hâlâ benimle.

Uppsala'ya geri döndüğümde Zelek, ikimiz birlikte İsveç Laponyası'nın içlerine doğru yapacağımız doğa yürüyüşünün hazırlıklarını henüz tamamlamıştı. Sadece Laponya'ya ulaşmak demir yoluyla 24 saatimizi aldı. Kuzey Kutup Dairesi'ni geçtik ve kısa süre sonra *Kungsleden*, yani kralın yolu boyunca devam edecek yürüyüş rotamızın başlangıcı ve İsveç'in madencilik merkezi olan Kiruna'ya ulaştık. Kiruna'da tamamı yerel demir madenlerinden gelen iyi İsveç çeliğinden yapılma bir el baltası satın aldım. Bu bana vahşi doğaya girerken bir gereklilik gibi görünmüştü. Ama bunu sorgulayan bir İsveçli (Zelek İsveç dilini akıcı bir şekilde konuşabiliyordu ve o zamanlar ben de bu dildeki konuşmalarının anlamını güçlülük de olsa seçebiliyordum) bana, "Onunla ayağını uçurmamaya dikkat et!" diye öneride bulundu. İleride netlik kazanacağı gibi bunlar kehanetvari sözcüklerdi. Valizimi önden trenle Kuzey Norveç'teki Narvik'e gönderdikten sonra, Kiruna'dan yola koyulduk.

Rotadaki beşinci günümüzdeydik ve bütün yol boyunca kana susamış tatarcık sinekleriyle kaplanmıştık. Bunlar yeni ve eski dünyada karşılaştığım bütün sineklerden daha kötüydü. Geceleri dinleniyor, gündüzleri ortaya çıkıyorlardı. Sizi kumaşın üzerinden sokabiliyorlardı, yani vücudunuzun hiçbir bölümü koruma altında değildi. Bu yüzden her gün hava hâlâ karanlıkken yola çıkıyorduk. Rotanın sonuna kadar yüzüm öylesine ısırıklarla dolmuştu ki, gezi fotoğraflarında sanki çiçek hastalığından muzdaripmişim gibi görünüyordum. Ama aslında gezi boyunca oldukça sağlıklı ve mutluydum. Oradaki doğanın güzelliği inkâr edilemezdi. Sadece yalın bir tundra bitki örtüsü vardı ve tabii büyük dağlar, geçitler ve Haziran ortasında çeşitli bölgelerde kar! Size iyi bir ruh halinde olduğumu söylemiştim. En azından oradaki zamanımızın çoğunda öyleydim. Ama başlara doğru o zamana kadar yanımda balta taşımış olmamı meşrulaştırdığımı düşünerek biraz odun kesmeye çalıştığım sırada, baltayı çizme vurmuş ve ayak parmağımı fena halde kesmiştim. Yani Kiruna'daki İsveçli'nin bir tür kâhin olduğu açıktı.

Arkadaşım Zelek iyi bir kılavuzdu. Bizi sadece birkaç kere kaybetti. Bunlardan birinde geniş bir nehri geçtiğimizi sanırken kendimizi onun tam ortasındaki bir adada, kıyıya fazla uzak olmayan bir yerde bulmuştuk. Ada Laponya'nın çoğu köşesinden daha fazla tatarcık sineklerinin istilası altındaydı. Yağmur yağmadığı zaman bize eşlik eden hafifliğin ruhu içinde, sanki daha önce kimse o adaya ayak basmamış gibi görünmesine dayanarak kendimi adanın kralı ilan etmiştim. O zamandan beri Zelek bana kral, bütün sineklere de "senin sadık kulların" diye hitap eder; "senin adan" diye hatırlatır bana. Onun sadakatinden onur duyarak ben de ona Zelek Jarl, yani Kont Zelek diye seslenirim. Jarllar Viking İskandinavyası'nda kralın hemen altında bulunan soylulardır. İsveç'teki Birger Jarl ve Norveç'teki Haakon Jarl gibi bazıları herhangi bir nedenden dolayı kral yokken fiilen ülkelerini yönetmişlerdir.

Adadayken bir bataklığa saplanmışım ve beni oradan çıkarmak Zelek ile benim tüm gücümüzü tüketmişti. Her nasıl olduysa kıyıdan uzaklaşmayı başarmıştık. O gün Lapon bir adam ve onun rengeliği sürüsüyle karşılaştık. Koyu renkli bir teni ve güzel mavi gözleri vardı. Yüzü daima tatarcık sinekleriyle kaplıydı ama onları kaçırmak için hiçbir girişimde bulunmuyordu. Arkadaşım onunla İsveççe konuştu, ben de takip etmeye çalıştım. Lapon adam bize nerede olduğumuzu söyledi. Sonrasında bize hiç Palm Springs'te bulunup bulunmadığımızı sordu. Hayrete düşmüştüm. Burada yoğun fiziksel rahatsızlığın sınırlarını aşabilen bir adam vardı; ama muhtemelen asla göremeyeceği bir yerle ilgileniyordu.

Tıpkı çeşitli günlük sorunların veya savaşların veya ekonomik çöküşlerin ortasında çoğunlukla, temel parçacıkların çarpışması sonucunda nelerin olduğuyla veya evrenin uzak köşelerinde nelerin meydana geldiğiyle ilgilenen biz bilim insanları gibi. Yirmi yıl sonra, ailemle birlikte Santa Barbara'da geçirdiğim bir akademik iznimde uzun bir yolculuğa çıkmış ve Palm Springs'in yakınından geçmiştik. Ona yardımcı olmasam da Lapon adamı ve tatarcık sineklerini hatırladım ve hâlâ hayatta olup olmadığını merak ettim. Abisko'da uçsuz bucaksız ve duru Tornetrask Gölü'nün kıyılarında epeyce incelikli bir konaklama hizmeti sunan bir ev tuttuk. Orada hem saunayla hem de Danimarka'nın iyi Tuborg birasıyla tanışmış oldum. Sonraki gün bir tren istasyonuna geldik ve tren bizi Narvik'e götürdü. *Kungsleden* sona ermişti.

Narvik'te valizimi aldık. Zelek, ona yürümesinde yardımcı olduğunu iddia ettiği odundan bir değneği yanında getirmişti. Değneği valizin tutacağından geçirip ikimizin arasına yerleştirerek sokakta o şekilde yürümüştük. Bu durum hayretle karşılanmıştı; şüphemiz Norveçliler bizim çılgın yabancılar olduğumuzu düşündüler. Narvik'te bir *Zimmer* tuttuk ve şehri görmek üzere çıkıp gittik. Narvik limanı II. Dünya Savaşı sırasında Almanlar ve Müttefikler arasındaki büyük deniz savaşının gerçekleştiği yerd. Fünikülerle hem şehrin hem de limanın güzel bir manzarasının görülebildiği tepe noktasına çıktık. Sonraki gün Zelek Uppsala'ya doğru yola koyulurken ben yanımdaki birkaç yolcuyla beraber bizi Lofoten Adaları'na götürecek Hameroy adında küçük bir tekneye atlamıştım. Okuyucunun Jules Verne'in *Denizler Altında Yirmi Bin Fersah* isimli kitabından hatırlayacağı üzere Lofoten'in açıkları, Kaptan Nemo'nun gönülsüz yolcuları Fransız zoolog ve onun uşağının, bir *maelstrom*¹³ içerisine sürüklenen ünlü Nautilus denizaltısından paçayı kurtarmayı başardıkları yerd. Hameroy, Norveç dağlarının, kıyı adalarının ve fiyort ağzılarının manzaralarıyla dolu güzel bir deniz yolculuğundan sonra Svolvaer, Lofoten'deki limana yanaştı. Bu özel ada kara bulutlarla sarılıydı, haliyle pek de davetkâr görünmüyordu. Neyse ki, "Lofoten" ismindeki büyük bir gemi anakaradaki Bodo'ya gitmek üzere hazırды. Bir bilet aldım ve atladım. Gemiden denizin üstündeki kızıl gece yarısı güneşini gördüm. *Kungsleden*'de yarım saat ila bir saat sonra gündoğumunun takip ettiği günbatımını deneyimlemiştik sadece. Ama burada gece yarısı güneşi sadece kısa bir süre için denizin içine batmış ve hemen sonra yeniden ortaya çıkmıştı.

Bodo'dan Norveç'in güneyi boyunca bir tren yolculuğu yaptım. Bu deneyimlediğim en güzel yolculuklardan biriydi. Tren sayısız fiyordun etrafından dolaşmış, yeşil-beyazımtırak suları buzul kökenine ihanet eden nehirler boyunca yol almış ve dağların arasından kıvrılmıştı. Vikingler dönemindeki Norveç'in ilk başkenti olan Trondheim'i görmek için mola verip, birkaç gün gezeceğim Oslo'ya doğru yola devam ettim. Nobel barış ödülleri verilmiş güzel belediye binasını, Viking gemilerini ve Oslo'nun fiyordundaki bir adanın üzerinde bulunan küçük bir

13 Kuzey Buz Denizi'ndeki Morkanaes ile Mosken adaları arasındaki girdap -ç.n.

müzede, okyanus geçen Kon-tiki isimli sal  g rd    m  hatırlıyordum. Daha sonra Reykjav k'te indim ve  zlanda'da be  yoğun gün geçirdim. Bu, hayat boyu  zlanda masalları tutkunu olan benim için yolculu umun tacıydı.  zlanda'nın doğası Norveç'inki kadar güzel değildi belki ama orada g   konuşuyordu: gayzerler, yüksek  elaleler, lav akıntıları, volkanik küllerle kaplanmış alanlar, devasa buzullar ve dahası. Sonra  zlanda masallarında yer alan çeşitli çiftlikler hâlâ orada bulunuyor. O sırada sadece  zlanda'nın güneybatısını ziyaret etme olanağı bulmuş olsam da daha yakın zamanda, liseyi bitiren oğlum Uriya ile birlikte tatil için yapt  ım bir yolculukta çok daha fazlasını görecektim.  zlanda masalları okurken bu ziyaretlerimin etkisiyle fazladan bir coşku duyarım; olayların geçtiği bölgeyi gözümde canlandırabiliyorum. Reykjav k'ten New York'a u tum ve annem, babam ve kız karde imle birkaç gün geçirdikten sonra Princeton'a döndüm.

Bu seyahatim boyunca çok fazla fizik yaptım diyerek sizi kandırmayaca ım. Yapmadım. Ama gezi rahatlatıcı bir deneyim oldu. Yeniden canlanmış bir şekilde döndüm ve Kopenhag'dan beri kafamı kurcalayan bir soruyla u ra maya hazırdım; kara delik fiziğinde hiç termodinamik var mıdır?

2. BÖLÜM

KARA DELİKLER VE ENTROPİ ÜZERİNE

Termodinamik ısıнын bilimidir. Fizikte her ne zaman sıcaklık, ısı, soğuk veya enerji dönüşümüyle ilgili bir meselede karara vermek gerekirse termodinamiğe dayanmak zorunludur. Bu bilim on dokuzuncu yüzyılın başlarında gelişmiştir ve maddenin yapıtaşlarıyla ilgili belirli bir resme dayanmadığından, çıkarımları oldukça güvenilirdir. Dolayısıyla madde çeşitli tipte atomlardan meydana geliyor olmasaydı, fiziğimizde pek çok şey değişmek zorunda kalır ama termodinamiğin yasaları hâlâ uygulanabilir olurdu. Bu yüzden Einstein, termodinamiği bilimin her zaman etrafımızda olacak bir bölümü olarak kabul etmişti.

Kara delikler bağlamında termodinamiğe ilişkin sorular sormak saçma görünebilir. Hiçbir şeyin dışarı çıkmasına izin vermeyen bir uzay bölgesinin sıcaklıkla ne işi olabilir ki? Benim için bağlantı 1970'lerin sonlarında Wheeler'ın, kara deliklerin, termodinamiğin ikinci yasasının geçerliliğini ya da en azından uygulanabilirliğini, bozması gerektiğine ilişkin fikirden bahsetmesiyle başlamıştı. Hepimiz doğadaki düzenin kaosa doğru dönüşme eğiliminin farkındayızdır; düzgün bir şekilde çalışan makinaların bozulmasından, net bir şekilde bilinen şeylerin unutulmasından vb. İyi işleyen şeylerin bozulması durumu doğal bir eğilimdir ve ikinci yasanın özel bir ifadesidir. Fizikte bu yasayı ifade etmenin birçok yolu vardır. On dokuzuncu yüzyılın ortalarında ünlü İskoç bilim insanı William Thomson (daha sonra Lord Kelvin oldu) onu, “döngüsel bir motorun ısıyı, bir miktarını başka hiçbir yere aktarmaksızın tamamen işe dönüştürmesi imkânsızdır” şeklinde ifade etmişti. Yaklaşık aynı zamanlarda Alman fizikçi Rudolf Clausius onu şu şekilde açıklamıştı: “Hiçbir döngüsel cihazın, iş

yapma gerekliliği olmadan ısıyı başka bir yere aktararak bir sistemi –diyelim ki bir odayı– soğutması imkânsızdır”. Clausius oldukça kullanışlı olan “entropi” kavramını icat etmiştir. Bir sistemin entropisi onun içerisindeki düzensizlik miktarının sayısal bir ölçüsüdür. Entropi açısından ikinci yasa, “Evrenin toplam entropisi asla azalamaz” şeklinde ifade edilebilir. İlk bakışta tüm bu ifadeler birbirleriyle bağlantısız görünür. Ama aslında her biri kesin olarak birbirinin eşdeğeridir.

Wheeler’ın bana işaret ettiği şey şuydu. Bir kişinin bir fincan sıcak çayla bir bardak soğuk suyu karıştırdığını düşünün. Birleşik sistemin entropisinin arttığını hesaplamak kolaydır. İkinci yasaya göre bu artış geri döndürülemezdir. Yani bir açıdan bu kişi bir “suç” işlemiştir, çünkü Dünya bu fazladan entropiden asla arındırılmayacaktır. Ama şimdi, Wheeler’ın düşüncesi üzerinden devam edersek, bu kişi kanıtları, yani ılık suyu, fincan ve bardağı, bir kara deliğin içine yuvarlayarak “suç”unu silebilir. Yeni entropi yok olur. Bu şekilde ikinci yasa atlatılmış gibi görünür. Dahası kara deliklerin “saçsızlık” özelliğinden dolayı, ne Wheeler ne de ben, dışardaki bir gözlemcinin kara deliğin entropiyi saklamış olduğu sonucuna nasıl varmış olabileceğini bulamazdık. Netice itibariyle bir kara deliğin değişkenleri olan kütle, yük ve açısal momentum açıkça entropiyle ilişkili değildir. Bunu daha iyi görmek için bir kabın içindeki kütleyi bir kilogram artırdığınızı hayal edin. Kaba neyin, hangi koşullarda eklendiğini bilmediğimiz sürece kütle bilgisi, ne kadar entropi eklendiğini söylemek için yeterli değildir. Bu yüzden Wheeler’ın belirttiği gibi, ikinci yasa kara delikler tarafından “ihlal edilmiş” gibi görünür; en azından dışardaki gözlemciler için.

Bu çıkarımdan hiç tatmin olmamıştım. Termodinamiğin ikinci yasası o kadar geneldir ki (birçok durumda çalışır) onun anlamsız oluşunu sindirmeye hazır değildim. Ama kara deliklerin entropiyi arttırması gereksinimi, bu artışa hiç açık kapı bırakmıyormuş gibi görünen “saçsızlık” fikriyle nasıl bağdaşabilir? Bu noktada, Wheeler’ın genç Yunan  ğrencisi Demetrious Christodoulou tarafından tanıtılan yeni bir kavramın termodinamiksel olasılıklarını düşündüm. Görelilik seminerlerinden birinde (ve daha öncesinde bire bir olarak) onu, dönen bir kara deliğin kütlesinin belli bir bölümünün indirgenemez, yani k   lt lemez olarak kabul edilebileceği yönündeki bulgularını anlatırken dinlemiştim.

Christodoulou kara deliğin dönüşünün hızlandığı veya yavaşladığı hiçbir sürecin bu indirgenemez kütlede bir düşüş yaratamayacağını matematiksel olarak göstermişti. Tipik bir hesaplamada kara deliğin yörüngesinde dolanan ve daha sonra kara delik tarafından yutulan bir parçacığı ele almıştı. Belirli bir yörüngede hareket eden bir parçacığın sahip olması gereken enerjisi ve açısız momentumundan, kara deliğin ne miktarda kütle ve açısız momentum kazanacağını biliyordu. Bu süreçte kara deliğin toplam kütlesi azalıyor olsa da (kara deliğe zıt yönde dönen oldukça düşük enerjili bir parçacık göndermeniz yeterli), Christodoulou kütleyi, ilki asla azalmayacak şekilde iki bölüme ayırabileceğini görmüştü. Kütlenin (enerjinin) bu bölümünün kara deliğin dönüşüne dahil olmadığını düşünün; bu ilk bölüm indirgenemez kütledir. Wheeler bu gerçeğin oldukça önemli olduğunu düşünmüştü. Ayrıca Penrose ve öğrencisi R.M. Floyd'un bir Kerr kara deliğine dışardan bir bozuntu verildiğinde, ufuk alanının genişleyebileceğini ama daralamayacağını örnekler üzerinden gösteren bir makalesini de okumuştum. O zaman birçok insan ufuk alanının indirgenemez kütlenin karesiyle orantılı olduğunun farkına varmıştı.

Yani Penrose ile Floyd ve Christodoulou aynı şeyi söylüyorlardı, ufuk alanı genişleme eğilimindedir. Daha sonra Hawking muhteşem bir teoreme geldi ve sadece öncüllerinin ele aldığı özel süreçler için değil, bir kara deliğin maruz kalacağı herhangi bir değişim için de ufuk alanının asla daralamayacağını gösterdi. Hawking, teoremini ispatlamak için maddenin ve alanların enerjisiyle ilgili bir varsayımda bulunmuştu. Bununla ilgili daha fazla şey söylemeyeceğim ama o zaman tüm fizikçiler bu varsayımı kabul etmişti, yani teorem çok güçlü bir çıkarımdı. İskandinavya serüvenim boyunca bütün bunların Wheeler'ın paradoksuyla bağlantılı olup olmadığını bulmam gerektiğini düşünmüştüm. Ufuk alanının davranışı benim kulağıma entropininkine çok benzermiş gibi geliyordu ve kaybolan entropiyle ilgili bir sorunumuz da vardı. Princeton'a döndüğüm zaman, bir kara deliğin ufkunun entropi gibi işlev gördüğü ve genişleme eğiliminin termodinamiğin ikinci yasasının bir tezahüründen başka bir şey olmadığı sonucuna vardım. Kuşkusuz, bu yasanın tuhaf bir formuydu ama neticede kara deliklerin kendisi de tuhaftı. O zamanlar bu sadece bir fikirdi; hiçbir kanıtım yoktu ve yanlış da çıkabilirdi.

Bunu Wheeler’a söyledim. Fikir ilgisini çekmişti ama o zaman gerçekten inandırıcı gelmemiŐti. Açıkça söylemese de bunu hissetmiştim. Bu onun yaklaşımının tipik bir özelliğiydi. Birlikte çalıŐtıĐı insanların hevesini kırmamaya  zen gösterirdi. Bir süre sonra bana, “bu çılgınca bir fikir, belki de işe yarayacak kadar çılgın” demişti. Kastettiği Şey, eğer tamamen tuhaf görünen bir fikriniz varsa, yeni Şeyler bulmak için en iyi yerin burası olduğuydu; alıŐılagelmiŐ yerlerin değil. Böylece bu yönde devam ettim. Ona bir problemim olduğundan bahsetmiŐtim çünkü alanı entropiye nasıl d n Őt re eĐim belirsizdi. Fizikteki entropi temelde saf bir sayıydı (kimyacıların tersine fizikçiler entropiye kalori/saniye birimini veren suni uzlaŐıdan uzun zaman önce vaz geçmişti). Ancak herkesin bildiği gibi alanın birimi uzunluğun karesiydi, yani saf bir sayıdan oldukça farklıydı.

Wheeler basitçe ufuk alanını Planck uzunluğunun karesine b lmemi önermişti. Planck uzunluğu Newton’ın k t le ekim sabiti G , Planck’ın kuantum sabiti $\hbar$ ve ışık hızı c ’yi $\sqrt{G\hbar/c^3}$ ifadesinde bir araya getirdiğinizde elde ettiğiniz uzunluktur. Kuantum kuramının öncüsü olan Alman fizikçi Max Planck, yirminci yüzyılın başlarında böyle temel bir uzunluğun var olduğunu ve onun oldukça küçük olduğunu (yaklaşık 10^{-33} cm) bildirmiŐti. Wheeler yıllarca bu uzunluğun (bazıları Planck-Wheeler uzunluğu demekten hoşlanır) kuantum k t le ekim kuramıyla bir ilgisi olması gerektiği üzerinde durmuŐtu çünkü hem k t le ekim hem görelilik hem de kuantum kuramının temel sabitlerini içeriyordu. Bu konuŐmamızdan sonra kara delik entropisini, ufuk alanının Planck-Wheeler uzunluğunun karesine bölümü olarak yazmaya başladım. Bu saf bir sayıydı, t pk  entropinin olması gerektiği gibi.

Şüphesiz bir kara deliğin entropisinin alanıyla orantılı olduğunu söylemek, kendi başına onu ispatlamaz. Buna yönelik iyi bir durum oluşturmak için kara delik entropisiyle sıradan entropinin birbirine eklenebilir olduğunu göstermek zorundaydım. Diğer bir deyişle, bir kara deliğin sıradan maddeyle bir arada bulunduğu bir durumda iki tür entropinin toplamının asla azalamayacağını g stermeliydim. Daha önce değindiğim gibi ufuk alanı her deĐiŐimde genişleme eğilimi gösterir ve bu sayede kara deliğin entropisi artar. Soru Şu ki, sıradan entropi taşıyan bir miktar madde bir kara deliğin içerisine düştüğünde ve entropisi kaybolduğunda, kara

deliğin entropisindeki büyüme bu kaybı dengelemek için yeterli midir? Yeterli olacağı iddiası kendi başına açıkça doğru değildi, ispata gereksinim duyuyordu. İşlerin doğru yönde gittiği bazı örnekler bulmuştum. Örneğin, eğer sıradan maddeden oluşan herhangi bir sıcaklıktaki bir yıldız kara delik oluşturmak üzere çökerse, kara deliğin entropisinin (yukarıda belirttiğim yöntemle hesaplamıştım) yıldızinkinden çok daha büyük olacağını bulmuştum. Ama bazen bu fikirle çelişen örnekler bulduğum da oluyordu. Bana en çok sorun çıkartan durumlar, sıcak (ama çok yüksek sıcaklık değerlerinde de olmayan) bir cismin yaptığı ışımanın (termal ışıma) yeterince küçük bir kara delik tarafından yutulduğu durumlardı. Termal ışıma yüksek miktarda entropi taşır. Hesaplamalara göre bu durumdaki genelleştirilmiş entropi, yani iki tür entropinin toplamı, azalıyormuş gibi görünüyordu. Öyleyse kara delik entropisi fikri yanlış mıydı?

Şimdi, termal ışıma tüm olası dalga boylarında dalgaları içerir ama çoğu, ışımanın sıcaklığı tarafından belirlenen bir değer etrafında kümelenmiştir (demir 800 °C'de kırmızıyken, çoktan eridiği 2700 °C'de beyazdır). Biraz önce değindiğim sıkıntının, ışımadaki nispeten yaygın dalga boylarının, kara deliğin yarıçapına göre daha uzun olduğu durumlarda meydana geldiğini fark ettim. Bir dalga için kendi dalga boyundan daha küçük bir yere girmenin hayli zor olduğunu ispatlamak kolaydı. Böylece bu tehlikeli durum için vardığım sonuç, kara deliğin entropiyi yutmakta sıkıntı yaşayacağı ve ikinci yasanın nadiren de olsa ihlal edileceğiydi, tabii bunun mümkün olduğunu varsayarsak. İstatistiksel olarak konuşursak, bildiğimiz sıradan ikinci yasanın nadir de olsa ihlal edildiği durumlar fiziğin diğer branşlarından zaten bilindiği için, bu şekilde probleme geçici bir çözüm bulmuştum. Genelleştirilmiş ikinci yasayı temize çıkartan gerçek çözüm, tam iki yıl sonra Hawking ışınmasının keşfiyle ortaya çıkacaktı. Nasıl olduğunu zamanı gelince açıklayacağım. Ama hikâyenin değeri apaçık ortada. Bilim doğayla ilgili test edilmiş önermeleri hakikat olarak tutar. Ama bazen testlerin yanlışladığı bazı iddiaların daha derinlemesine ele alındıklarında doğru olduklarının ortaya çıktığı da olur. Bilim yapmak bir tür sanattır; çelişkileri göz ardı etmek doğruluk payının aleyhinedir, ama aleyhinde bazı deliller de olsa bazen bir fikirle ilgili idam hükmünün ertelenmesi gerekir, tabii

bunun yanlış anlamadan veya basitçe kavramsal çerçevedeki bir boşluktan kaynaklandığının düşünülmesi kaydıyla.

Genelleştirilmiş ikinci yasanın geçerliliği üzerine düşünürken, bir yandan da kara delik sıcaklığı kavramı üzerinde çalışıyordum. Uzaydaki bir deliğin sıcaklığı olduğunu hayal etmek zordur, ama termodinamik bize başka seçenek tanımaz. Bir kara delik kütleye ve dolayısıyla Einstein'ın ünlü formülü uyarınca enerjiye sahiptir. Ben ayrıca entropiye de sahip olduğunu düşünüyordum. Şimdi şurası açık ki, enerji ve entropinin ikisi de kara delik büyüdükçe büyür. Termodinamikte enerjinin entropiye göre büyüme hızı (teknik olarak enerjinin entropiye göre türevi) sistemin sıcaklığına eşittir. Buna dayanarak hemen kara delik sıcaklığını veren bir formül yazdım. İçerisindeki tüm faktörleri açıkladıktan sonra formülü aşağıda göstereceğim. İlginçtir ki, kara delik büyüdükçe sıcaklık azalır. Bir kara deliğe kütle eklendikçe ısınması beklenecektir ama hayır, tam tersine soğur. Termodinamikte bu tarz sistemler için negatif ısı kapasitesine sahip denir. Bu, kulağa çelişkili gelebilir ama gerçekte sıradan yıldızlar gibi kütleçekimin önemli bir kuvvet olduğu sistemlerin tümü negatif ısı kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla kara delikler için bir istisna yoktur.

Kara delik sıcaklığı astronomik boyutlardaki bir kara delik için oldukça düşüktür. Birkaç Güneş kütlesine sahip bir kara deliğin sıcaklığı, mutlak sıfır noktasından bir santigrat derecenin milyonda biri kadar yüksektir. Peki neden bu kadar düşüktür? Çünkü kara delik sıcaklığı, Planck'ın çok küçük olan kuantum sabitiyle orantılıdır (kuantum olgularının bilardo topu gibi büyük cisimler için görünür olmamasının nedeni budur). O zaman, neden kara delik sıcaklığı Planck'ın kuantum sabitiyle orantılıdır? Kara delik entropisini elde etmek için kara delik alanını Planck-Wheeler uzunluğunun karesine böldüğümüzü hatırlayın. Bu uzunluk $\hbar$ 'nin kareköküyle orantılı olduğundan, kara delik alanını $\hbar$ 'ye bölmüş oluyoruz. Şimdi, açıkladığım gibi, kara delik sıcaklığı kara deliğin kütlesinin entropisine göre değişimdir. Bu, kara delik kütlesindeki (enerjisindeki) küçük bir değişimin, ona karşılık gelen entropideki değişime bölünmesiyle hesaplanır. $\hbar$, entropinin paydasında bulunduğundan, sıcaklığın payında bulunacaktır. Bu yüzden kara delik sıcaklığı $\hbar$ 'yle doğru orantılıdır. Tam olarak bu ifade, daha önce anlattık-

larım ile uyuşacak şekilde, kara delik sıcaklığının kara delik kütlesiyle ters orantılı olduğunu gösterir.

Bunların tümü önemlidir. Bize kara delik sıcaklığının bir kuantum varlığı olduğunu söyler, çünkü eğer dünya klasik olsaydı ($\hbar$ sıfıra indirgenirdi) ortadan kalkardı. Benzer şekilde, büyük bir kara delik (paydada büyük bir kütle görülür) için sıcaklık oldukça düşük bir hal alır; yukarıda değindiğim gibi soğuktur. Tersine, küçük bir kara delik daha sıcaktır. Örneğin, kütlesi Dünya'nın kütlesine yakın olan ilkel kara delikler birkaç santigrat derece sıcaklığında olacaktır. $\hbar$ daha büyük olsaydı da aynı etki olurdu. Bu yüzden oldukça ufak bir kara delik için kuantum etkilerinin görülmesi daha kolay olacaktır; en azından onları gözler önüne serecek doğru olay bulunabilirse. Aslında CERN'in en yeni temel parçacık hızlandırıcısı, Cenevre'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın göreve başlama tarihi yaklaştığından, yüksek enerjili çarpışmaların enkazında küçük kara deliklerin tespit edilmesine ilişkin umutlar da yüksek.

Eldeki kara delik sıcaklığıyla, termodinamiğin üç yasasının benzerlerini kara delikler için ortaya koyabiliyordum. Termodinamiğin birinci yasası açık bir şekilde ilk kez 1847-49 yılları arasında İngiliz fizikçi James Joule ve ünlü Alman fizikçi ve fizyolog Hermann von Helmholtz tarafından ortaya atılmıştır ve bir sistemdeki enerji değişimini, sisteme eklenen ısıya ve sistemin yaptığı işin miktarıyla ilişkilendirir. Birinci yasa bir şirketin hesap defterine benzer; gelir eksi giderler dengeyi tesis eder. Burada ısı girdisi, Clausius'un gösterdiği üzere, sadece sistemdeki entropi değişiminin sistemin sıcaklığıyla çarpımıdır. Şimdi bu yasanın – dengedeki bir kara deliğin alanının kütle, yük ve açıl momentumuna bağlı olması yoluyla ispatladığım – kara delik versiyonu vasıtasıyla, bir kara deliğin, enerjiyle beslendiğinde ya da yükünün veya dönüşünün değişmesine izin verildiğinde entropisinin nasıl değişeceğini söyleyebiliyordum. Bu son değişiklikler kara deliğin dışarıya yaptığı işle ilişkiliydi; tıpkı bir baterinin yaptığı işin ondan dışarıya akan elektrik yüküyle ilişkili olması gibi.

Evrenin (veya iyi bir şekilde izole edilmiş herhangi bir sistemin) entropisinin azalamayacağını söyleyen termodinamiğin ikinci yasasını tartışmıştık. Bu yasanın kara delik versiyonu, kara delik entropisi ile kara deliğin dışındaki sıradan entropinin topla-

mının azalamayacağını s  yler. Bunun   rneklerine değinmiştim. Bu yasayı destekleyen daha bolca   rnek literat  rde yerini aldı. Bunun usule uygun bazı ispatları da yapıldı.

Yirminci y  zyılın başlarında Nobelli Alman fizik  i Walter Nernst tarafından ortaya konulan termodinamiğin     nc   yasası ise, belirli bir sistemi mutlak sıfır sıcaklığına (sıfır santigrat derece değil,   ok daha soğuk olan -273 santigrat derece) getirmek i  in sonsuz sayıda adım gerektiğini ve dolayısıyla bunun imk  nsız olduğunu s  yler. Mutlak sıfır ulaşılmazdır. Dengedeki bir kara delik, ancak ufuk alanı ile k  tle, y  k ve açısal momentumunu ilişkilendiren form  l  n izin verdiği asgari d  zeyde y  ke ve/veya açısal momentuma sahip olduğunda sıfır sıcaklığa sahip olabilir. Bu tarz kara delikler, u   noktadaki kara delikler¹ olarak ifade edilir. Dolayısıyla     nc   yasanın kara delik versiyonuna g  re, genel   zellikteki bir kara deliği u   noktadaki birine sınırlı sayıda adımla d  n  şt  remezsiniz. Bu yasaya g  z   kapalı inanıyordum ama ispatını yapmadım. Onu d  nen astrofiziksel kara delikler i  in dayatan bir mekanizma 1974'te Thorne tarafından g  sterildi. Hem klasik hem de kuantum fiziğinde uzun zaman zarfında elde edilen deneyimler, bu alanda   alışan insanların   oğunu, sıfır sıcaklıktaki kara deliklerin diğer soğuk kara deliklerden olduk  a farklı olduğuna ikna etti. Ama benim sezgim onların doğada oluşamayacağını s  yl  yor.

1972'nin başlarında kendi parmaklarımla yazdığım 180 sayfalık doktora tezimi teslim ettim. "Sa  sızlık" teoremleri beş b  l  m, kara delik termodinamiği ise iki b  l  m aldı.   eşitli başlıklarda beş b  l  m daha vardı. O zamanlar Princeton'da profes  r olan Karel Kuchar tezimi okuyanlardan biriydi ve kara delik termodinamiğini "kabul etmesi" birden olmadı. Wheeler'ın evindeki bir parti sırasında bana, beni aylarca uğraştıracak bir soru sormuştu;   ok y  ksek miktarda entropiye sahip k    k bir k  tleyi kara deliğin i  ine bıraktığınızı d  ş  n  n. K    k bir k  tlenin eklenmesi kara deliği   ok az miktarda değiştirecektir. Bu durumda kara deliğin alanı, b  y  k miktardaki entropi kaybını dengelemek i  in nasıl olup da yeterli d  zeyde b  y  yebilecekti? Eğer b  y  yemezse, genelleştirilmiş ikinci yasanın her koşulda doğru olduğunun kabul edilemeyeceği a  ıktır.

1 *Extreme black holes* -  .n.

O zaman, bildiğim birkaç örneğe dayanarak Kuchar'a verdiğim geçici yanıt, belirli bir kütle ve boyuta sahip bir cisme keyfi büyüklükte entropi sıkıştırılamayacağıydı. Bu örnekleri kara delik entropisi üzerine yazdığım ilk iki uzun makalemde geliştirdim; ilkini sadece birkaç ay sonra yazmıştım. Özünde belirli bir sisteme yükleyebileceğiniz entropi miktarı, kuantum fiziğine ilişkin nedenlerden ötürü kısıtlıydı. 1981 yılında yayımlayacağım makalede resmen ifade edeceğim bu kısıtlama, entropinin evrensel sınırı olacaktı. Buna detaylı olarak aşağıda değineceğim. Bu sınırı o tarihten ancak bir süre sonra düzgün bir şekilde doğrulayabildim; yine de yıllarca bir ihtilaf konusu olarak kalmayı sürdürdü. Bu durum 1990'larda, entropi sınırının, parçacık fizikçileri ve sicim kuramcılar tarafından kabul edilen önemli bir ilkeyle, yani daha sonra değineceğim holografi ilkesiyle ilişkili olduğunun kavranmasıyla ciddi bir şekilde değişti. Ama birbirleriyle hayli ilintili olan tüm bu şeyler 1972 yılında hesapta yoktu.

1 Mayıs 1972'de Wheeler ve onun yanı sıra Kuchar, Ruffini ve Princeton'un diğer bir profesörü Ed Groth'un karşısında tez savunmamı yaptım. O günü çok iyi hatırlıyorum, çünkü 25. doğum günümüne denk gelmişti. Genelleştirilmiş ikinci yasaya ilişkin bir miktar daha utançla yüzleşmek durumunda kalmıştım. Ruffini bana sormuştu, "Eğer bu doğruysa, kara deliğin dışındaki entropi artarken, ikinci yasanın işlemesi için kara delik alanının azaldığı tablo neredeydi?". Bununla ilgili bildiğim bir örnek olmadığını kabul etmek durumunda kalmıştım. İyi bir örnek Hawking ışımasıyla bezelidir ama Hawking ışıması ancak iki yıl sonra bilinir olacaktı. Tezimin ağırlıklı olarak, hayli kesin çıkarımlar olan "saçsızlık" teoremlerinin gücünden ve ufuk alanını entropiyle, geometriyi ise termodinamikle denk tutma yürekliliğimden dolayı kabul edildiğini düşünüyorum. Böylece yirmi beşinci yaş günümde bir doktora derecesi kazanmış oldum. Tezimin tüm bölümlerinin kazandığım derecenin hakkını verdiğini hissetmek için kara delik termodinamiğinde yaptığım geliştirmeler yaklaşık iki senemi aldı. Bu iki yıl, yalnız geçen yıllardı. O zaman için kara delik entropisi oldukça yeniydi ve onu duymuş olan insanların çoğu besbelli anlamsız olduğunu söylüyordu. Bazıları da zamanımı boşa harcadığımı söylüyordu. Yani kara delik entropisi başlarda genel olarak olumsuz dönüş almıştı.

O yaz, tez savunmamdan sonra, Mont Blanc'e yakın k     k bir Fransız tatil kasabası olan Les Houches'teki kara delik fizi  i   zerine d  zenlenen bir yaz okuluna gittim. Princeton'dan ayrılmadan   nce kara delik fizi  indeki ikinci yasayla ilgili bazı sonu  ları k    da d  kt  m ve o sıralar yolculu  umu ayarlamakla epey me  gul oldu  ğumdan, arkada  şım Bahram'dan el yazmamın *Letters al Nuovo Cimento* dergisine g  nderildi  inden emin olmasını istedim. Elimdeki malzemenin kar  şıt g  r    leri alevlendirmeye yazgılı oldu  ğundan emindim, bu y  zden   alı  mamı b  y  k okuyucu kitlesinden dolayı daha do  gal bir adres olan *Physical Review Letters*'a g  ndermedim. O zamana kadar kara delik termodinami  i   zerine iddialarıma ili  kin haberler etrafta dola  mı  tı. Hawking ve meslekta  ı Carter ile James Bardeen (adı standart s  periletkenli  in BCS kuramındaki B'ye kar  şılık gelen, transist  rlerin mucitlerinden biri olan ve iki Nobel sahibi John Berdeen'in o  ullarından biri) e  itmen olarak Les Houches'teydiler. "Kara delik mekani  ğinin yasaları"nı geli  tirmi  lerdi, ki bunların bir kısmının termodinamikle benzerlik g  sterdi  ğinin farkındaydılar ama meseleyi termodinamik olarak ele almayı kararl  lılıkla reddediyorlardı.

Bardeen (  ok tatlı biridir) benim g  r    m   ele  tirmedi. O sıralar h  l   yava   a konu  abiliyor olsa da Hawking'den bir   ey koparmak zordu. Carter ise kara delik termodinami  ine   iddetle kar  şıydı. Onun anla  ılır bir  ok arg  manı vardı. İkimizin okulda yaptı  ı uzun bir konu  mayı   zellikle hatırlıyorum. Bir kara delik ı  ımayı m  kemm  l bir   ekilde so  urdu  ğundan, sıcaklı  ına sıfırı atamaktan ba  ka se  enek olmadığı   zerinde durdu ki bu, kara deliklerin ger  ek bir sıcaklı  a sahip oldu  u y  n  ndeki iddiamla   eli  iyordu. O zaman neredeyse kendime g  venimi yitirmi  tim. Les Houches'teki derslerin arasında yazdı  ım ve *Physical Review*'da yayımlanan "Kara Delikler ve Entropi" ba  lıklı makaleimde, kara deliklerin sıcaklı  ıyla ilgili ifademim biraz zayıf olmasının sebebi budur. Bardeen, Carter ve Hawking okulda "kara delik mekani  ğinin yasaları" ismiyle anılan bir makale yazdılar. Makale, kara delik termodinami  ğinin ba  langıcı olarak bug  n dahi atıf alır. Bu atıfları yapan insanlar makaleyi okusalar iyi olurdu; makale aslında   e  itli kara delik   zelliklerinin termodinamiksel niteli  ini yadsır ve yasaların ger  ek termodinamikle hi   i  leri yoktur. Wheeler'ın daha sonra belirtti  i gibi, "insanlar

kara delik fiziğinin bazı bölümlerinin termodinamiğe benzediğini fark ettiler ama Bekenstein kara delik alanının sadece entropiye benzediğinin değil, onun entropinin kendisi olduğunun üzerinde durdu”.

Eylül 1972’de doktora sonrası araştırmacı olarak Les Houches’ten Austin’deki Texas Üniversitesi’nin Görelilik Merkezi’ne taşındım. Merkezdeki görelilik öğretim üyeleri Schild, DeWitt, Richard Matzner ve Larry Shapley’den meydana geliyordu ve etrafta daima, görev süresi iki seneye kısıtlı olan doktora sonrası araştırmacılar vardı. Matzner’in merkez adına bana iş teklifinde bulunduğu zaman vurguladığı üzere, görevimiz, canımızın istediği herhangi bir konu üzerinde araştırma yapmaktır. Bu özgürlük beni hayli cezbetmişti. Bunu, araştırmamı görelilik icracıları için alışılmış olanın ötesine doğru genişletmek için kullandım. Bazı zamanlar başka görevler için de çağrıldığımız oluyordu. Örneğin, Schild seyahate çıkacağı bir zaman, kendisi yerine derslere girmek üzere birine ihtiyaç duymuş ve kendi görelilik dersini devralmamı istemişti. Benden sadece, Amerikan Matematik Topluluğu’nun bir yayınında basılmış olan bir metni takip ederek dersi hazırlamamı istemesine rağmen, bunu kendim için hayli ilginç bir meydan okuma olarak görmüştüm. Hâlâ bu kitapçığı kitaplığımda saklarım. Ondan öğrendiğim şeylerden biri, kütleçekimsel kırmızıya kaymanın (deneysel olarak bir kütleçekim alanında yukarıya doğru tırmanırken ışık kırmızılaşır, yani dalga boyu kayar) varlığının bizi doğruca uzayzamanın eğri olduğu sonucuna götürdüğüne ilişkin Schild’in güçlü argümanıydı, ki eğri uzayzaman Einstein’ın kütleçekim yaklaşımının temel prensiplerinden biridir. Argüman hayli basit ve güçlüydü. Schild ise hem sevimli hem de düşünceli bir insandı. 1980’lerin başındaki ani ölümü benim için büyük bir şok olmuştu.

DeWitt o dönem kara delik termodinamiğini ciddiye alan sayılı insandan biriydi. Alan kuramındaki derin kavrayışı göz önüne alınınca bu pek de şaşırtıcı değildir. Kara delik ışıması hususunda neyin gelmekte olduğuna ilişkin bir sezgisi olmalıydı. DeWitt Austin’deki Görelilik Merkezi’ni canlı bir yer yapmıştı. Geniş bir fizik bilgisine ve hayli açık, oyuna düşkün bir zihne sahipti. Onu Wheeler’dan sonraki öğretmenim kabul ederim. Onun görüşlerinden öğrendiğim bir dizi şeyi, canlı ve detaylı olarak hatırlıyorum,

ki bunları sadece derslerinden ve yazdıklarından değil,   len yemeği sırasında vb durumlarda edinmiştim. DeWitt 2004'te bir hastalıktan öldü; onun g     yle alan kuramı ve kuantum k t le ekim disiplinleri fakirleşti.

Les Houches'te başladığım kara delik termodinamiği üzerine makalemi Austin'deyken bitirdim; belirli bir cismin içerisinde paketlenebilecek entropi üzerindeki sınırdan yola çıkararak genelleştirilmiş ikinci yasayı savunan ikinci bir makale ve ardından kara deliklerdeki süperışıma olgusu üzerine, yine Les Houches'te başladığım,       bir makale daha yazdım. S perışıma (ilk kez Dicke bu ismi kullanmıştı), bir cismin kendi üzerine etkiyen ışımayı (veya herhangi bir dalgayı) kuvvetlendirme kabiliyetidir. İlk kez Misner ve ondan bağımsız olarak Zel'dovich ve Moskova'daki meslektaşı Andrei Starobinskii tarafından gösterildiği üzere dönen bir kara delik bunu yapabilir. Hâlâ Princeton'dayken, bir Kerr kara deliğinin yeterli derecede düşük frekansta bir dalgaya maruz kalması ve bir kısmını soğurması durumunda alanının daralacağını hesaplamıştım. Ama daha önce değindiğim gibi Hawking'in alan kuramı herhangi bir kara delik dönüşümü sırasında ufuk alanının genişlemesini gerektiriyordu. Yani burada bir çelişki vardı veya öyle görünüyordu.

O zamanlar afallamıştım ve alışılmış düşüncenin aksine, kara deliğin bu dalganın bir kısmını soğurmaya acağı, daha ziyade kendi dönme enerjisi pahasına onu güçlendireceği şeklinde uygun bir çıkarımda bulunamamıştım. Yani kara delik süperışıma yapacaktır. Eğer bu gerçekleşirse kara delik alanı, Hawking'in kuramının gerektirdiği gibi genişleyecektir. Yani Misner beni atlatmıştı. O, bu son argüman olmaksızın doğrudan dalgaların davranışlarının detaylı bir hesaplamasını yapmıştı ve dalgaların kuvvetlendiğini göstermişti. Bu hesaplama tüm dalga tipleri için baştan tekrar yapılmalıydı. Benim arg manımla ilgili iyi olan şey, dalganın kuvvetindeki artışı hassas bir şekilde veremese de, s perışımanın her tip alan için gerçekleşmek zorunda olduğunu göstermesiydi (en azından elektromanyetik alan gibi bozonlarla ilişkili olarak ifade edilenler için). Bu olaydan çıkardığım derslerden biri, sağlam argümanlardan çıkan tuhaf fikirlerin takip etmeye değer olduğuydu; doğadan usule uygun davranması beklenemez çünkü usul  inşa eden bizleriz.

Süperışmanın hikâyesi burada sonlanmadı. Bundan da ilginç bir şey vardı. Sık sık dalga olarak tanımlanan ışımanın, aslında bir parçacık yığını olarak da inşa edilebileceğini hatırlayın; fizikçiler bu parçacıklara “kuanta” (tekil hali: kuantum) der. Dalga türleri kadar çok türde kuantum vardır. Bir elektromanyetik ışıma kuantumları, fotonlardır. Princeton’daki son aylarımda kendime, eğer bir Kerr kara deliğine doğru tek bir kuantum gönderirsek neler olacağını sormuştum. Kuantum kuramına aşina olan herkes, kuantumun kara delik tarafından hiçbir şey dışarı çıkmaksızın soğurulma olasılığı olduğunu kabul edecektir. Ama kuantum, kara deliğe süperışma yaptıracak bir dalganın içindekilere benzer bir kuantumsa, o zaman soğurulması ufuk alanının bir miktar daralmasına yol açacaktır. Buradaki matematik, bizi alandaki daralmadan kaçınmak için süperışmayı düşünmeye zorlayan matematiğin aynısıdır. Ancak bu defa kuantumun kuvvetlenme olasılığı olmadığından (soğurulacağını biliyoruz), önceden yaptığımız gibi problemten kaçamayız.

Süperışma üzerine yazdığım makalede, saf kuantum süreçlerinde zaman zaman Hawking’in alan kuramının ihlal edilmesi gerektiği sonucuna vardım. Ama bu nasıl olabilirdi? Kuram doğru değil miydi? Şimdi, bilimde sık sık karşılaşılan bir meseleye gelelim; varsayımların geçerliliği. Hawking, kuramını ispatlarken bir kara delik ile etkileşime girebilen tüm madde ve alanların her noktada pozitif enerji taşıdığı varsayımında bulunmuştu. Bu kulağa mantıklı gelir; klasik fizik uyarınca ele alınabilen madde ve alanların çoğu için bu doğrudur. Ancak bunun kuantum seviyesinde de doğru olacağından emin olabilir miyiz? Vardığım sonuç hayırdı, kuantum madde ve alanlarında negatif enerji meydana gelmelidir ve bu, zaman zaman alan kuramının ihlaline neden olur. Bu durum, tek bir kuantumla ilgili bulguları açıklar. Yani bu konuda haklıydım. Birkaç yıl sonra Hawking ışıması tanınır hale gelince, Hawking’in alan kuramının bu ışımanın yayımlanmasıyla ihlal edildiği birden herkesin malumu oldu. Şüphesiz, Hawking ışıması saf bir kuantum olgusudur ve öyle olmasından dolayı bazı bölgelerde negatif enerji sergiler.

Süperışmanın büyüleyiciliği bununla sınırlı kalmaz. Mesela, süperışmanın astrofiziğe ilişkin çıkarımları olabilir; süperışmanın mekanizma işlevi görmesiyle evrendeki dönen kara deliklerin düşük

frekanslı elektromanyetik ışıma kaynakları gibi davrandığı düşünülüyor. Süperışıma fikri bunun dışında da geniş çeşitlilikteki birçok etkiyle ilişkilidir. Olayların birbirleriyle ilişkilendirilmesinden bir çeyrek yüzyıl sonra, eski doktora öğrencim Marcelo Schiffer’la “Süperışmanın Birçok Yüzü” [*The many faces of superradiance*] başlıklı bir makale yazdık. Bu makalede, süpersonik hava araçlarının yarattığı şok dalgalarını, kritik hızın üstüne çıkan bir akışın süperakışkanlığının² sönümlenmesini ve nükleer reaktörleri soğutan suları aydınlatan Cherenkov ışımasını da içine alan birçok fiziksel olgunun aslında bir tür süperışıma sergilediğini gösterdik.

Einstein’ın denklemleri için ilk tam çözümümü de Austin’deyken keşfettim. Uzun yıllardır arkadaşım olan, Milwaukee’deki Wisconsin Üniversitesi’nden Leonard Parker, bana “konformal skaler alan”larla ilgili çok şey öğretti. Hatırlayın, bir skaler alan tek bileşenli bir alandır. Konformal skaler alan ilk kez Penrose tarafından ortaya atılmıştı. Elektromanyetik alanla ortak bir özelliğe sahiptir; belirli bir noktadaki uzayın tüm yönlerinin gerilerek belirli bir faktör (diyelim ki 2) kadar uzatıldığı ve bu noktadaki zamanın iki kat hızlı akmasının sağlandığını hayal edin, bu durumda ikisinin de denklemleri biçim olarak değişmeden kalır. Uzay ve zamandaki diğer bir noktada bu faktör farklı (diyelim ki 3) alınabilir ve böyle devam eder.

Matematikçiler bu türden bir uzamaya uzayzamanın konformal bir dönüşümü (“konformal” Latince’de “aynı şekil” demektir) derler. Fizikçiler denklemlerin bu dönüşüm altında değişme özelliğini “konformal değişmezlik” olarak adlandırırlar. Bu önemli bir özelliktir, çünkü soruya konu olan alanın, uzayzamanın belirli özelliklerinden etkilenmediğini ifade eder. Tüm alanlar bu güzel özelliğe sahip değildir. Parçacıkları veya kuantası pionlar olan sıradan skaler alanlar konformal olarak değişmez değildir. Yani konformal skaler alan elektromanyetik alanın bir tür karikatürüdür; bazı benzer özellikleri vardır, ama çok daha basittir. Pensore’un aklına tam da bu yüzden geldiler ve yine bu yüzden daima ilgiyi üzerlerine çekerler.

Bu son nedenden dolayı Einstein’ın kütleçekim kuramının, bu alanların madde rolünü oynadığı çözümlerini aramaya karar verdim. Genel göreliliğin her türden madde yığınının yarattığı kütle-

2 Maddenin sıfır vikozyete sahip bir akışkan gibi davrandığı durum –ç.n.

çekim alanını hesaplamaya izin verdiğini hatırlayın; elektromanyetik alan ve konformal skaler alan gibi alanlar bu açıdan madde gibidirler. Konformal skaler alan “madde”nin en basit örneği olabilir. Ayrıca, Einstein denklemlerinin çözümlerini bulmanın en iyi koşullarda dahi hayli zor olduğuna değinmeliyim. İnsanların yeni çözümler bulmakla ilgilenmelerinin nedeni de budur; çok zor bir şeyi yapmanın meydan okuyuculuğu, aynen bir dağa tırmanmak gibi. Benim için kişisel bir motivasyon olan bir diğer neden ise, o zamana kadarki bütün makalelerimin, başlığında “kara delik” ifadesini taşıdığı gerçeğiydi. Değişik alanlara yönelmem gerektiğini hissediyordum.

Yani çalışmalıyım. Şüphesiz bunu söylemek yapmaktan kolaydı. Einstein’ın denklemleri sayıca epey çoktur ve uzayzaman dört boyutlu olduğundan, bunlar hayli fazla değişken içeren diferansiyel denklemlerdir. Bunlara ek olarak bir de denklemlerin doğrusal olmaması işleri daha kötü yapar. Doğrusal olmayan diferansiyel denklemler, çözüm fonksiyonu sabit bir sayıyla çarpıldığında artık bir çözüm olmaktan çıkan denklemlerdir. Fizikteki bir dizi kritik öneme sahip olgu lineer olmayan diferansiyel denklemlerde ilişkilidir; sıvıların akışı, kaos, bir lazerin çalışması vb. Yani bu tür denklemler çok önemlidir, ama onları çözmek de zordur.

Parker’dan öğrendiğim bir tekniği kullanarak, maddenin rolünü sıradan kütesiz skaler alanın aldığı durum için Einstein’ın denklemlerinin bilinen bir çözümünden yola çıkıp, istediğim tipte bir çözümü nasıl üretebileceğimi tahmin ettim. Bu alan için elde edilmiş olan bazı çözümler halihazırda kitaplarda yerine almıştı, ancak konformal alan için bilinen bir çözüm yoktu. Tahminim, eğer kütesiz skaler alan için elde edilmiş olan bir çözümü uygun bir şekilde dönüştürebilsem, yöntemimin konformal alan için bir çözüm vereceği yönündeydi. Buradaki “dönüştürmek” ifadesi başlangıçta bilinmeyen bir fonksiyona göre biçim değiştirmek anlamına geliyor. Şüphesiz çok fazla sayıda fonksiyon var ama doğru olanı bulduğumda bilecektim, çünkü elde ettiğim çözüm Einstein denklemleriyle uyuyacaktı. Stratejim zekice bir fonksiyon tahmininde bulunmak ve matematiksel süreçten geçirerek çalışıp çalışmadığını kontrol etmektir. Bilgisayar üzerinde cebirsel hesaplamaların henüz icat edilmemiş olduğu o günlerde, bu tarz bir kontrol için tensörlerle yapılan bir veya iki saatlik yorucu

hesaplamalar  arttı. Olağan mesai saatlerinden sonra çoğunlukla Austin'deki apartmanımda çalışarak ge irdi in birkaç ak amın sonunda elimde hâlâ hiçbir şey yoktu. Altı veya yedi tahminim başarısızlıkla sonu lanmı tı. Umudumu kaybetmeye ve aradı ım fonksiyonun belki de hiç var olmadığını veya tahminlerimin öte-sine geçecek kadar karmaşık olduğunu düşünmeye ba lamı ım. Kendime ciddi ciddi, "eğer bir dahaki tahmin de başarısız olursa, konuyu rafa kaldıraca ım ve asla geri d  nmeyece im", demiştim. Bunun  zerine yeni bir tahmin yaptım ve bir saatlik hesaplamadan sonra  alı tı ını gördüm!

O zaman geli tirdi im yöntem bugün hâlâ kullanılıyor. Onu derhal madde niyetine bir konformal skaler alanın bulunduğu durum için, genel g relili in birkaç çözümünü üretmek üzere kullandım. Bunlardan birinde, ufkuyla birlikte bir kara deliğin k t le ekim alanı vardı. Ama bu "kara delik" kendisine eklenmiş bir skaler alana sahipti.  urası açık ki, tüm bu söylediklerim garip bir şeye işaret ediyor. Bu kara deliğin "sa "ı varmış gibi görünüyordu, çünkü elektrik yükü veya kütle doğal olarak bir skaler alan doğurmaz! Bu nokta bana bulduğum şeyin bir kara delik çözümü olmayabileceğini hissettirmi ti. Doğrusu, skaler alan ufukta sonsuz güçlü olmaya ba lıyordu ve bu da bu yüzeyin bilinen diğer ufuklara benzemedi ini gösteriyordu. Bu yüzden, *Annals of Physics* dergisinde yayımlanan keşif makalemde çözümü, tekil çözüm olarak tarif etmiştim, bir kara delik çözümü olarak değil. Ancak DeWitt bunu duyunca bana, "bakaca ın şey bu sonsuzluk değil; ufukta fiziksel olarak tekil olan bir şey olup olmadığını kontrol et," demişti. Bazı hesaplamalardan sonra onun karakteristik DeWitt sezgileriyle doğru yere parmak bastı ını gördüm.

Bu çözümdeki k t le ekim alanında hareket eden bir parçacığın, herhangi bir engelle veya onu parçalamaya eğilimli güçlü kuvvetlerle kar ıla madan ufku geçeceğini hesapladım. Ufuk fizikseldi! 1974'te yeni iddiamı açıklayan kısa bir makale yazdım. Makalede yeni çözümün saçsızlık fikriyle bir sorunu olmadığını çünkü kara deli e eklenen yeni bir alan olsa da çözümle ilişkili yeni bir değişken olmadığını da tartı tım. Kütle ve elektrik yükü tüm özellikleri belirliyordu, t pk  Wheeler'ın "saçsızlık" kestiriminin gerektirdiği gibi.

Keşfimden ötürü son derece gururluydum. Birkaç yıl sonra Moskova'dan N.M. Bocharova, Kirill Bronnikov ve Vitaly Melnikov'un da aslında aynı sonucu bulduğunu ve 1970 yılında tanınmamış bir Rus dergisinde (yıllar sonra dahi Batı kitaplıklarında bulamamıştım) yayımladıklarını öğrendim. Ruslar buldukları şeyin öneminin tam olarak farkına varmışlar gibi görünmüyorlardı. Ama yine de geride bırakılmış olmaktan dolayı biraz hayal kırıklığına uğramıştım. Uzun yıllar sonra Bronnikov ve meslektaşı Yuri Kireyev, soruya konu olan çözümün kararsız olduğunu gösterdiler; küçücük bir bozuntu verilir verilmez başka bir şeye parçalanıyordu. Kerr-Nerman türünden kara delikler kararlı olarak bilinir. Yani bir bakıma Ruslarla benim bulmuş olduğumuz çözüm, kara delik fiziğiyle çok da ilişkili değildi. Hayli çarpıcı ve görünüşte açık olan bir sonucun, yeni şeyler öğrendikçe alakasız olduğunun anlaşılması sık sık olur. Fizikteki hiçbir keşfin bu tehlikeye karşı bağışıklığı yoktur. Bu dersi iyice içselleştirdim. Bu yüzden, fizikteki büyük keşiflere ilişkin iddialara karşı genellikle büyük bir ölçülülükle (tabii bu şüphecilik değilse) yaklaşırım. "Tüm soruların cevabı" veya "her şeyin kurasını" diye ilan etmeden önce, yeni bir fikre çeşitli koşullarla yüzleşmesi için zaman vermeliyiz.

Genel görelilik, Austin'de yaptığım tek şey değildi. Daha önce bahsettiğim gibi, uzun zamandır ilgimi çeken astronomiye de dal budak saldım. Bu alandaki çalışmayı merkezdeki bir diğer doktora sonrası araştırmacı olan Richard Bowers'la birlikte yaptık. Alman astronom Adriaan Blaauw tarafından "kaçan yıldız"³ ismi verilen bir yıldız türü vardır. Kaçan yıldızlar civarımızdaki yıldızların çoğuna göre oldukça hızlı bir şekilde hareket eden mavi yıldızlardır. Blaauw her kaçan yıldızın kökeninin, biri süpernova patlaması sonucunda imha olana kadar birbirlerinin etrafında dönen bir yıldız çifti olduğunu ortaya atmıştı. Sonrasında ikinci yıldız, çiftin parçasıykenki asıl hareketini yansıtacak şekilde yüksek bir hızla "kaçmak" üzere serbest kalmıştı. Bowers ve ben, Polonya doğumlu astrofizikçi Bohdan Paczynski'nin argümanlarıyla uyumlu olarak, bu kaçakların bazılarını hâlâ süpernovadan geriye kalanların eşlik etmesi gerektiğini öngördük. Bu kalıntı pekala bir kara delik olabilirdi ve böylece Blaauw'un on dokuz

3 *Runaway star* -ç.n.

yıldızdan oluşan asıl listesindekilerin ötesinde yeni kaçaklar bulmak, bize yeni kara delik adayları sa layabilirdi.

Bu tarz bir çalışma hayli matematiksel bir konu olan k t le ekim kuramından tamamen farklıydı. Austin'deki astronomi kütüphanesinde saatlerce durup dinlenmeden oturuyor ve gökyüzündeki konumuna göre görünür düzeyde yüksek bir hıza sahip olan yıldızlar arasından mavi kaçan yıldız adaylarını seçmek için yıldız kataloglarına bakıyordum. Bowers'la birlikte adayların oldukça uzun bir listesini yayımladık. Daha sonra bu listeyi umut vadeden tek bir adayı seçip ayırmak için kullanacaktım. Bu yıldız, kataloglarda HD 108 olarak geçiyordu ve diğer insanların yapt ı gözlemlerden öğrendiğim kadarıyla görünmez bir g kcisinin etrafında dönüyordu. Austin'den taşındıktan sonra bunun hakkında bir makale yazdım. Ne yazık ki, bugün deliller HD 108'in uydusunun bir kara delik olmak için yeterli k t leye sahip olmad ı ını gösteriyor.

1974 yılının başlarında Hawking'in kara delik ışmasını duyurdu u ünlü makalesini *Nature* dergisinde yayımlamasıyla tüm bu keyifli u raşlardan sarsılarak uyandım. Hawking'in yapt ı şey, sonraki yıl yayımlanan daha uzun bir makalesinde netlik kazandı; yeni oluşan bir kara deliğin k t le ekim alanının içerisindeki diğer bir alanın kuantum davranışlarının matematiksel bir incelemesini yapmıştı. Beklentiler göz önüne alındığında şaşırtıcı olan şey, kara deliğin kütlesinin yavaşça ışmaya dönüşerek parlaklık kazandı ıydı. Dahası her türden parçacığı barındıran bu ışıma, sıcak bir cismin yapt ı ışımayla aynı karakterdeydi; bu bir termal ışımaydı. Yani burada kara deliğin sıcaklığı tarafından üstü kapalı olarak ışaret edilen kayıp bir ışıma vardı. Neticede Carter yanılıyordu; bir kara deli e sıfır sıcaklık atfedilemezdi, o gerçekten ışıma yapıyordu.

Hawking kara delik sıcaklı ı ı benim iki sene önce k  ıda d kt   mle aynı şekilde hesaplamıştı; özel olarak, M kütlesinde bir Schwarzschild kara deliği için aşağıdaki ifadeyi bulmuştu:

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi GM}$$

Burada BH alt indisi "*black hole*"⁴ ifadesini simgeliyor. Bu formül, şimdi sayısal sabitin $1/8\pi$ olduğunun bilinmesi yenili iyle,

4 Kara delik - .n.

benim doktora tezimde ortaya attığım formülle aynı biçime sahiptir. Kara delik sıcaklığı için olan formülü, kara delik entropisi için olandan elde ettiğimi hatırlayın. Bu ikinci niceliği ufuk alanının, Planck-Wheeler uzunluğunun karesine bölümüyle orantılı almıştım. Konunun o erken dönemlerinde orantı sabitini nasıl belirleyeceğimi bilmiyordum. Sadece birden çok da uzak olmayacağını tahmin etmiştim. Tersten gidilerek, Hawking'in T_{BH} için olan sonucundan yola çıkıp kara delik entropisindeki sabite ulaşılabilirdi; böylece sabitin bir bölü dört olduğu ortaya çıktı. Dolayısıyla bugün kara delik entropisi için yazılan formül aşağıdaki gibidir:

$$S_{BH} = \frac{A}{4L_p^2}$$

Buradaki S , entropi için fizikçilerin geleneksel olarak kullandığı semboldür.

Her şey yerli yerine oturmuştu. Birden kara delik termodinamiği gülünen bir şey olmaktan çıkıp, kabul gören bir şey olmuştu. Tavırlardaki bu çok hızlı değişim beni büyülemişti. Şüphesiz fikirlerime inanıyordum. Ama uzun süren alaylardan sonra, onların zamanla kademeli olarak onay kazanacağını düşünüyordum. Bu bana Schopenhauer'ın deyişini hatırlattı: Tüm gerçekler üç aşamadan geçer:

İlk olarak, alay edilir.

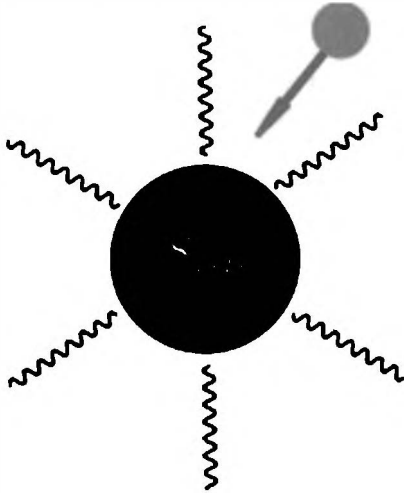
İkinci olarak, şiddetle karşı çıkılır.

Üçüncü olarak, aşıkârmışçasına kabul edilir.

Yukarıdaki kara delik entropisi için olan formül, muhtemelen farklı yollarla en çok türetilmiş olan fiziksel formüllerden biridir. Keşfedilmesinin üzerinden geçen otuz yılda yayımlanan abartısız düzinelerce yaklaşım, bazıları kendi başına, bazıları ise kuantum kütle çekimin gerektirdiğine inanılan küçük düzeltmelerle onu yeniden türetti. Kullanılan yöntemler geniş bir çeşitlilik gösterir. 2001'de iki doktora öğrencim Gilad Gour ve Avraham Mayo'nun kullandığı gibi klasik kara delik kuramına dayanan oldukça basit yaklaşımlardan, sicim kuramına dayanan karmaşık argümanlara kadar gider bu.

Şimdi kara delik termodinamiğinin eski utancını hatırlayın; kara delik entropisinin düştüğü ve dışarıdaki sıradan entropinin onu den-

gelemek için arttuğı durum nerededir? Hawking'ın ışması bu durumu sağlar. Termal ışmanın neden olduğu enerji kaybı, kara deliğin kütlesinin azalmasına ve bununla birlikte ufuk alanının daralmasına neden olur. Elimizdeki kuantum süreci için, neden alan kuramının bu şekilde ihlalinin beklendiğini zaten açıklamıştım. Ama kara delik entropisinin düştüğüne dikkat edin, genelleştirilmiş ikinci yasanın çalışması için kara deliğin dışındaki entropinin bu düşüşü dengeleyecek şekilde artması gerekir. 1974 yazında  srail'deki ilk  ğretim  yeliği görevime başlamak üzere Austin'den taşındıktan kısa süre sonra yeni adresimde yazdığım ilk makalede, ışmaya eşlik eden entropinin, kara delik entropisindeki düşüşü dengelemek için yetip de artığını gösterdim. Hawking aynı şeyi benimle yaklaşık olarak aynı zamanda ispatlamıştı. Böylece 1971 yılında ben kara delik termodinamiğini geliştirirken kimsenin hayal edemediği ışma yayınım sürecinin, 1975'te genelleştirilmiş ikinci yasaya uyduğu anlaşıldı. Bu beni hayli tatmin etmişti. Genelleştirilmiş ikinci yasa, göz önünde olmayan bir konuda isabetli bir öngörüde bulunmuştu. Hawking ışması, kara delik ufuk alanının kuantum etkilerinden dolayı daralacağını ifade eden önceki sonucumu görsel olarak resmetmiş oldu.



şekil 3. En genel haliyle termodinamiğin genelleştirilmiş ikinci yasası. Hawking ışmasının entropisi, kara deliğin içine düşen cismin kaybolan entropisinin yanı sıra, kara delik entropisindeki her türden azalmayı dengelemelidir.

Bu makalede Hawking ışımasındaki tüm dalga boylarındaki foton dağılımlarının olasılıklarını hesapladım. Peki bunun anlamı ne ve neden önemli? Hawking ışımasının, sıcak cisimlere özgü olduğu üzere, termal olarak nitelendirildiğini hatırlayın. Ama bundan nasıl emin olunabilir? Termal ışımanın bir özelliği, enerjinin çeşitli dalga boyları arasında, ilk kez Planck tarafından 1900’de bulunan yasaya göre dağılmasıdır. Bu yasa, yaygın olarak kuantum kuramının doğuşunun işaretçisi olarak kabul edilir. Kuantum sabiti $\hbar$, ilk ortaya çıkışını orada yaptı. Bu bağlamda, Hawking ışıması sadece yaklaşık olarak termaldir. Bunun sebebi ışımanın, içinde doğduğu kara delik ortamından çıkmaya çalışırken oldukça eğri bir uzaydan geçmek zorunda olmasıdır. Uzaydaki bu bozulma, ışımanın bir kısmının geri sekerek kara deliğin içine dönmesine neden olur. Daha uzun dalga boyları buna daha meyillidir. Sonuç olarak, kara delikten uzakta ortaya çıkan enerjinin dalga boylarına göre dağılımı (fizikçilerin jargonuna göre *tayf*), termal ışımadaki dağılımın daha kısa dalga boylarını kayıran bir filtreden geçirilmiş haline benzer. Yani, Planck’in ünlü yasasına ancak yaklaşık olarak uyar.

Peki Hawking ışımasının gerçekten termal ışımadan türediğine nasıl emin olunabilir? Termal ışımanın *tayftan* bile daha kendine özgü bir diğer özelliği, her bir dalga boyundaki kuantum sayısını belirleyen olasılık yasasıdır. *Tayf* bize her bir dalga boyunda *ortalama* kaç adet kuantum bulunduğunu söyler. Olasılık dağılımı ise, tam tersine, belirli bir dalga boyunda örneğin iki kuantumun bulunmasının, beş adet bulunmasına göre ne kadar daha olası olduğunu belirler. Olasılık dağılımını, termodinamik problemleri için bilgi kuramına dayanan yaklaşıma öncülük eden merhum Amerikalı fizikçi Edwin Jaynes’in yöntemini kullanarak hesaplamıştım.

Jaynes’in yaklaşımında olasılık dağılımıyla bazı sorular için ilgileniriz, örneğin, bir ışımadaki her dalga boyundaki foton sayılarının olasılıkları gibi. Her makul olasılık seti “Shannon entropisi”nin belirli bir değerine neden olur. Shannon entropisi ismini aldığı modern bilgi kuramının babası, Amerikalı uygulamalı matematikçi Claude Shannon tarafından 1948’de ortaya atılmıştı. Jaynes’in 1958’de gösterdiği üzere, Shannon’un entropisi termodinamikteki entropiye karşılık gelir. Başta ne olasılıklar ne de

entropi değeri bilinir. Jaynes'in yöntemi ilk olarak belirli bir durum için doğruluğu bilinen gerçeklerin neler olduğuna karar verilmemizi gerektirir. Sonrasında Shannon entropisini en büyük yapan ve aynı zamanda sadece ve sadece durumla ilgili bilinen gerçeklere riayet eden dağılım, ilgili olasılık dağılımı olarak alınır. Jaynes'in ikna edici argümanına göre, bu olasılıklar mümkün olan "en az önyargılı" olanlardır; onlar problemle ilgili bilinen gerçeklerin dışında bilgilerin varlığına ilişkin önceden varsayım- da bulunmazlar. Bu anlamda, onlar doğru olasılıklardır.

Jaynes'in kuramını kara delik ışımasına uygularken, çeşitli dalga boylarında yayımlanan ortalama kuantum sayılarını, Hawking'in asıl hesaplarında verildiği şekliyle, bilinen gerçekler olarak aldım. Bunlar bahsettiğim filtreleme etkisinden dolayı, Planck'ın tayfının verdiği değerlerden farklılık gösteriyordu. Entropiyi azami düzeye getirerek olasılık dağılımını buldum. Termal ışımadan bekleneceği gibi, farklı dalga boylarına karşılık gelen olasılıkların bağımsız olduğunu buldum; bir dalga boyunda çok fazla kuantumun olması, farklı bir dalga boyundaki kuantum sayısına ilişkin beklentileri etkilemiyordu. Her dalga boyu için $\hbar$ kuantum bulunma olasılığının C ile orantılı olduğunu buldum. Buradaki C kara delik sıcaklığına ve uygun dalga boyu için filtre faktörüne bağlı bir sayıdır. şimdi, yukarıdaki gibi n 'nin kuvvet olduğu bir olasılık yasası, termal ışıma için tipik bir şeydir ( rneğin, gün ışığının her bir dalga boyu için bu doğrudur). Bu sayede, hesaplama Hawking ışımasının termal karakterini doğrulamış oldu.

Yıllar sonra, 1993'te, ders vermek için St. Louis'teki Washington  niversitesi'ni ziyarete gittiğimde, Jaynes'le tanışmak memnuniyet verici olmuştu. 1950'lerin sonralarında geliştirdiği yaklaşımının, çok farklı alanlarda hâlâ iyi bir şekilde çalışıyor olmasından gurur duymuş ama buna biraz olsun şaşırmamıştı. 1998'de  srail Bilim Akademisi'nin başkanı Jacob Ziv, Shannon'un  nc  makalesinin üzerinden yarım asır geçişini kutlamak için entropi ve onun dallandığı konular üzerine bir konferans düzenlemeyi tasarladı. Ben de konuşmacılardan biri olarak Jaynes'in davet edilmesini  nerdim. Ancak, Jaynes'in kısa süre önce dünyadan göçtüğünü öğrenmek hepimizi çok  zd .

Meslektaşlarım Parker ve Wald, benimle yaklaşık olarak aynı zamanda, kara delik ışıması için olasılık dağılımlarını hesapladı-

lar. Ama onlar, Hawking'in esas çalışmasında yaptığı gibi kuantum alan kuramının metotlarını kullanarak hesapları yapmışlardı. Alan kuramına dayanan yaklaşımın aksine, benim hesaplarım oldukça kısa ve derli topluydu. Biraz önce bahsettiğim makalemi, kara delik termodinamiği üzerine yazdığım daha önceki uzun makalelerimi yayımlayan, *Physical Review* dergisine gönderdikten sonra komik bir şey oldu. Makaleyi inceleyen hakem Wald'dı; bir mektubunda bana kendini tanıtmıştı (genellikle hakemlerin kimliği dergiler tarafından gizli tutulur). Bob bulduğum sonuca katılmıyordu. Yukarıda söylediğim gibi, n kuantumun ışımadaki belli bir dalga boyunda bulunma olasılığını tek bir terimle vermiştim. Bob, bunun yerine, terimin sonsuz bir toplam olduğunu hesaplamıştı. Alan kuramına dayanan yöntemleri daha güvenilir kabul ettiği için, benim sonucumun yanlış olması gerektiğini iddia etmişti. Uçak postasıyla –1975'te henüz e-mail yoktu– gönderdiğim cevapta, benim tek teriminin doğru değişkenle sonsuz bir toplam olarak açılmasıyla (*Calculus*'ün ilk dersinde öğrenilen kullanışlı bir prosedürdür bu), tam olarak onun karmaşık sonsuz toplamının elde edildiğini gösterdim! Mektubumu aldığı anda Bob'un yüzünü görmek çok hoş olurdu. Bilgi kuramına dayanan yöntem sadece az emek harcayarak sonuçları vermiyordu, aynı zamanda onları en derli toplu biçimde veriyordu. Bunun üzerine makalem derhal kabul edildi.

Ancak yöntemim çok da popüler olmayacaktı. Zamanın ruhu –*Zeitgeist*– alan kuramından yanaydı ve bence araştırmacılar diğer yaklaşımlarla elde edilmiş sonuçlar konusunda şüpheliydi, özellikle onları elde etmek için çok çabalamak zorunda kalındıysa. Şunu belirtmeliyim ki, ben kendi yaklaşımında tamamen tutarlıydım. Tüm bunların arkasındaki kara delik entropisi fikri, bütün olarak bilgi kuramına dayanan bir bakış açısından çıkmıştı. En başından beri kara delik entropisinin, bir kara delik içerisinde yitip giden maddeyle beraber kaybolan bilginin bir ölçüsünü verdiğini düşünüyordum. Bu yorum, entropinin, fiziğin diğer alanlarındaki anlamıyla aynı çizgidedir ve bugüne değin genel kabul görmüş durumdadır.

Hawking ışıması o ilk zamanlarda doğal olarak tüm ilgiyi üzerine toplamıştı; daha önce açıkladığım gibi, onun daha büyük bir çerçevenin parçası olduğunun kabul edilmesi yavaş yavaş

oldu. Örneğin, insanlar ışıma dışındaki diğer her şeyi göz ardı etmeye ve sadece Hawking sıcaklığı üzerinden konuşmaya hayli meyilliydiler. Bugünlerde ise genel eğilim, termodinamiğin bakış açısına göre uygun olduğu üzere, kara delik entropisinin mantıksal önceliğinin vurgulanmasına doğru kaydı. Yıllar içerisinde kara delik entropisine Bekenstein-Hawking entropisi denir oldu. Bu terimi ilk kez Penrose, 1979’da Einstein’ın doğumunun yüzüncü yıl dönümü şerefine çıkan bir kitaptaki etkili bir inceleme makalesinde kullanmıştı. Penrose şakayla karışık, entropinin formülündeki *BH* kısaltmasının hem “Black Hole” hem de “Bekenstein-Hawking” ifadelerini eşit derecede iyi karşıladığını söylemişti. Doğru ya da yanlış, ben fizikçiler arasında en çok kara delik entropisiyle bağlantılı olarak tanınıyorum. Bu ve 3. Bölümde anlatacağım entropi üzerindeki evrensel sınır, 2005’te fizik dalında İsrail Ödülü’ne layık görülmemeye gerekçe olarak atfedilen başarılarıydı. Ödül seremonisi, o zamanlar İsrail’in başbakanı olanı Ariel Sharon’un katılımıyla gerçekleşmişti.

Ünlü kitabında Hawking, kara delik ışınmasını keşfedişinin, benim kara delik termodinamiğini meşrulaştırmak amacıyla alan teoremini “istismar” edişime duyduğu öfkenin üzerine gerçekleştiğini anlatmıştı. Şüphesiz, başkasının öfkesiyle ilgili yapabileceğim bir şey yok ama kendi adımlarımı geniş perspektiften bakarak ele almak istiyorum. Alan kuramı 1970’te yayımlandı ve bilimsel geleneğe göre hemen oracıkta bilimsel mirasımızın bir parçası haline geldi. Kimse *yayımlanmış* bir sonuca kendi özgün yorumunu getirdiği için kabahatli kılınamaz. Bu yorumun yanlış olduğu da anlaşılabilir ama “istismar”dan söz etmek bilimsel bir meseleyi sıkıcı bir ihtilafa dönüştürmektir. Hawking keşfini yaparken, motivasyonunu bana olan öfkesinden veya rahatsızlığından almadı, kuantum alan kuramının bir kara delik etrafında nasıl çalıştığına ilişkin duyduğu meraktan aldı. Kara delik termodinamiğiyle ahenk içerisindeki sonuçları bulduğunda, bulgularını benim önceki çalışmamın perspektifine yerleştirmek için az bir çaba sarf etti. Bardeen ve Carter ile birlikte yazdıkları “Kara Delik Mekaniğinin İlkeleri” makalesinde fikirlerimin üzerine yağdırılan alay düşünlüğünde, bu özellikle rahatsız edici.

İki olgu, kara delik entropisi ve Hawking ışıması, yakından ilişkili olmalarına rağmen farklı fiziksel statülere sahiptirler.

Bildiğimiz kadarıyla, olay ufkunun entropisi (kara delik entropisi birkaç örnek arasından göze çarpar) oldukça benzersiz bir olgudur. Aksine, bugün Hawking'inkine benzer ışımların birçok farklı durumda karşımıza çıktığı biliniyor. Unruh, 1981'de, süper-sonik rejime giren bir akışkanda benzer bir olguya işaret eden ilk kişidir. Mükemmel akış biçiminden küçük sapmaları ifade eden denklemler, Hawking'in kara delik ışımasını oluşturmak için kullandığı alanı ifade eden denklemlerle akrabadır. Sonuç itibarıyla, kuramsal olarak akışkanın "fonon"lardan, yani sesin veya titreşimin kuantasından meydana gelen bir termal ışıma yapması beklenir. O zamandan beri Hawking ışımasının çok sayıda benzeri tanımlandı; ama şimdiye kadar sadece kuramsal olarak. Örneğin, uygun şekilde değişen kırınım indeksine sahip bir dielektrik⁵ malzeme Hawking'inkine benzeyen bir ışıma görülmelidir. Daha pek çok örnek, sayısız araştırmacı tarafından sergilenmişti, örneğin Yeni Zelanda'nın Wellington kentindeki Victoria Üniversitesi'nden Matt Visser bu alanın göze çarpan yorumcularındandır. Bu tür ışımlar henüz laboratuvar ortamında ölçülenmemiş olsa da, onların gerçek olduğuna şüphe yoktur. Yani Hawking ışıması daha çok genel bir olgudur, özel olarak kara deliklere bağlı değildir. Ayrıca yukarıda bahsedilen diğer örneklerle ilişkili, kara deliklerdeki Hawking ışımasında bulunan türde bir entropi yoktur.

Yukarıdakilerin tümü kuantum kütleçekimin, yani çağdaş kuramsal fiziğin belki de en büyük uğraşı olan disiplinin doğasının aydınlığa kavuşturulmasıyla oldukça ilgilidir. Kapsamlı araştırmalara ve çeşitli çalışmalarda bulunmuş olan umut vadeden ipuçlarına rağmen, kara delik entropisinin ardındaki temel mekanizma hâlâ bir bilinmezdir. Ama bazıları, kuantum kütleçekimin kara delik entropisinin altında yattığından şüpheleniyor (biraz önce gördüğümüz gibi, Hawking ışıması için bunun pek de gerekli olmamasına rağmen). Zaten uzun zaman önce Wheeler, kuantum kütleçekimin Planck-Wheeler uzunluğundan çok da büyük olmayan boyutlarda meydana gelen olguların açıklanmasında önem taşıması gerektiğini vurgulamıştı. Görmüş olduğumuz gibi, formüldeki Plank-Wheeler uzunluğu kara delik entropisi için önemlidir; kara delik ufkunun yaklaşık bir birimlik entropi katkı-

5 Yalıtkan -ç.n.

sı sağlayan parçasının boyutunu belirler. Ama son kuantum küttelekim kuramıyla ilgili birçok detay hâlâ muğlak ve fizikçiler arasında sıcak bir tartışma konusu olduğundan, kara delik entropisinin kuantum küttelekim bağlamında nasıl ortaya çıktığını hâlâ açık bir şekilde bilemiyoruz.

Kuantum küttelekime ilişkin en basit girişim aslında kuantum küttelekimin kendisine değil, “yarı-klasik küttelekim kuramı”na dayanır. Atomların yaptıkları ışıma üzerine gerçekleştirilen çalışmaların erken dönemlerinde, atom, kuantum kuramının gerektirdiği gibi ele alınırken, ışıma, klasik olarak ele alınıyordu. Buna atomik ışımanın yarı-klasik kuramı denir. Benzer şekilde, yarı-klasik küttelekim yaklaşımında küttelekim alanı klasik olarak ele alınırken, diğer alanlar (fotonları, elektronları ve protonları tanımlayanlar) kuantum alanlarıdır. Bu, tam olarak Hawking’in kara delik ışımasını keşfinde benimsediği yaklaşımdır. Işımayı, bir kara deliğin klasik küttelekim alanı içerisinde yayılan başka bir alana, kuantum metotlarını uygulayarak keşfetmiştir. Değindiğim gibi bu yaklaşım, kara deliklere ilişkin bazı kuantum özelliklerini ortaya çıkartabilir; örneğin, kara deliklerin Planck sabitiyle orantılı bir kuantum sıcaklığına sahip olması gibi.

Ancak birçok kimse yarı-klasik küttelekim kuramının temelde kısıtlı olduğundan şüphelenir, yani bize gerçeği söyleyebilir ama tüm gerçekleri değil. Bu şüpheyi kıskırtmak için, Hawking’in kendisinin 1976’da yaptığı bir gözlemden daha fazlası yapılamazdı. Hawking kara delik ışımasının tam olarak sıcak bir cismin yapacağına benzer olduğu gözleminden yola çıkarak bir paradoks ortaya attı. Normalde sıcak bir cisimden gelen termal ışımanın görünüşteki kaotik yapısının, onu yayımlayan hayli fazla sayıdaki atomdan kaynaklandığını düşünürüz. Kimse akkor halindeki bir közden yayılan ışığın, bağımsız atomların ayrı ayrı yaptıkları ışımaya bakılarak (tabii tüm atomları bir arada kaynaşırken takip edebilecek hesaplama gücüne sahip olsaydık) anlaşılabileceğinden şüphe duymaz. Şimdi, atomlar kuantum kuramının yasalarına göre ışıma yaparlar ve normalde yalıtılmış bir atom, saf kuantum durumu⁶ denilen duruma sahip bir foton yayımlar. Saf kuantum durumu, olasılık kavramının kuantum kuramı bağlamında katı bir

6 *Pure quantum state* –ç.n.

şekilde işlediği bir durumdur. Tüm bu sayısız fotonun durumlarını bir araya getirip, bir fotonun şu ya da bu saf durumunda bulunmasına olasılık değerleri atadığınızda, karışık kuantum durumu⁷ denen durumu elde edersiniz. Bu durumda olasılıklar iki türdür. Biri içseldir ve kuantum kuramındaki belirsizlik ilkesi bakımından gereklidir. Diğeri ise, bizim tam olarak hangi saf durumun dahil olduğunu belirlemekteki teknik yetersizliğimiz veya gönülsüzlüğümüzle ilgilidir. Bu yüzden akkor halindeki bir közden yayılan termal ışımaya karışık kuantum durumuna sahiptir ama bunun böyle oluşu birtakım sübjektif nedenlere dayanır.

Bir kara delikten yayılan ışımaya, Hawking’in yarı-klasik yaklaşımı tarafından açıklandığı üzere, karışık kuantum durumundadır, çünkü tam olarak termal bir karaktere sahiptir. Ama bu ışımanın tümü tek bir “atom”dan, yani –muhtemelen kendi başına bir kuantum sistemi olan– kara delikten gelir. Bu “atom” saf durumlardaki fotonlar veya başka tür kuantaya yayımlamalıdır. Şimdi, kuantum kuramının yasaları bir saf durumdan karışık duruma geçişi kesin bir biçimde yasakladığından, ışımanın nasıl olup da bir karışık durumla sonuçlandığını anlamak için ne yapacağımızı şaşırırız. Dışardan bakıldığında kara delik ışıması kuantum kuramının yasalarına uymuyormuş gibi görünür!

Hawking’in 1976’da vardığı sonuç buydu. Hawking, kara delikler bağlamında kuantum kütleçekimin bilindik kuantum kurallarıyla uyumsuzluk gösteren davranışlar içerdiğini ileri sürdü. Uyumsuzluk gösteren şey, teknik olarak, “birimsel evrim”in⁸, yani kuantum kuramına göre bir kuantum sisteminin durumunun zamana bağlı gelişme biçiminin bir ihlalidir. Birimsel evrimin özelliklerinden biri, son aşamada, bir kuantum sisteminin durumuna “yazılmış” olan tüm bilgiyi korumasıdır. Bu yüzden Hawking, bir “bilgi paradoksu” olduğu uyarısında bulundu. Etrafta bir kara delik varsa bilgi kayboluyormuş gibi görünüyordu. Bilginin kaybolması, şüphesiz, kara delik fiziği için yeni bir şey değildir. Bir kara delik oluştuğunda bilgiyi içerisinde saklar. Wheeler’ın söylediğine göre o, kara delik entropisi kavramının esas motivasyonuydu. Ama Hawking’in ortaya koyduğu yeni

7 *Mixed quantum state* –ç.n.

8 *Unitary evolution* –ç.n.

nokta, bir kara deliğin ışımayla foton, elektron ve diğer parçacıklar yayımlayarak tüm kütlesini, yükünü ve açısal momentumunu harcayıp sonunda “buharlaşması” gerektiğinden, geride hiçbir şeyin kalmayacağıydı. Böylece saklı bilgi tamamen kaybolmalıydı. Hawking’in de iddia ettiği üzere, bilgi, ışımanın içerisinde olamazdı çünkü termal ışıma belirli özellikleri olan bilgiden yoksundur; bir mesajı termal radyo ışımasıyla yayımlayamazsınız.

Birçok insan, özellikle parçacık fizikçileri, Hawking’in iddialarını kabul edilmesi güç buldu. Birimsellik parçacık fiziği için mukaddes bir kavramdır. O yüzden bu paradoksun arkasında, yasanın ihlalinden ziyade başka bir şey olduğunu iddia ettiler. Bunun aksine görelilik kuramı çalışan birçok kimse Hawking’in savlarını inandırıcı buldu. Onlar uzayzamanı, hiçbir bilginin içinden geçip gidemeyeceği tekil yüzeylerde –tekilliklerde– sonlanan bir şey olarak düşünmeye alışkındılar. Böyle bir tekilliğin her kara deliğin içerisinde bulunduğu düşünüldüğünden, bir kara delik içerisinde saklı bulunan bilginin kara delik ölmeden önce tekillikte yok olduğu rahatlıkla kabul edilebilir; yani bilgi tamamen kaybolur. Yıllar içerisinde iki düşünce okulu arasında geçen birçok sonuçsuz tartışmaya şahitlik ettim ve ikisinin de ayrı telden çaldığını fark ettim; kullandıkları diller oldukça uyumsuzdu. Daha sonra 2004’te genel görelilik topluluğunun    yılda bir gerçekleşen Dublin’deki buluşmasında Hawking, verdiği sürpriz derste iddiasının yanlış olduğunu ve her şeye karşın birimselliğin korunduğunu kabul ederek bunun nasıl meydana geldiğini genel görelilik diliyle izah etmeye çalıştı. O zaman bunu çok az insan anlamıştı. Aylar sonra makalesi dolaşıma girdiğinde dahi birçokları problemin nerede yattığının hâlâ bilinmediğini hissediyordu. Dolayısıyla Hawking’in mağlubiyetini kabulünden sonra dahi birimselliğin ihlal edildiğini düşünenlerin kampında itirazlar vardı. Net bir biçimde anlaşmazlık sürüp gitti çünkü tartışma kuantum k t le ekimin sınırları içerisinde y r t lm yordu.

Ancak kuantum k t le ekim tamamlanmış bir kuram değildir. Bugün nükleer kuvvet için kabul edilmiş bir kuantum kuramına (“kuantum kromodinamiği”) sahibiz. Bu kuram proton, nötron ve dolayısıyla çekirdeğin yapısını açıklar. Zayıf kuvvet için de bir kuantum kuramına (ismini Nobel  d ll  Steven Weinberg ve Abdus Salam’dan alan “Weinberg-Salam kuramı”) sahibiz. Bu

kuram hem sıradan çekirdeklerin radyoaktivitesini hem de temel parçacıkların radyoaktif bozunumlarını açıklar. Aslında Weinberg-Salam kuramı fotonların atomlar tarafından nasıl soğurulduğunu ve yayımlandığını açıklayan elektromanyetizmanın kuantum kuramını da içerir. Ama kütleçekim için yukarıdakiler gibi, genel olarak kabul gören bir kuantum kuramı yoktur. Aslında birkaç adet rağbet gören, ama birbirleriyle uyumsuz ve kendilerine has dillerinden ötürü ayrı liglerde bulunan kuantum kütleçekim adayları var.

Bu adaylardan biri, bugünlerde birçok parçacık fiziği kuramcısının başlıca uğraşını teşkil eden sicim kuramıdır. Sicim kuramı, genel göreliliğin esası olan eğri uzayzamanın temel bir gerçeklik olduğu fikrini reddeder. Ona daha temel varlıklardan, davranışları bildiğimiz uzayda hareket eden sicim parçalarınınkini andıran cisimlerden oluşmuş gözüyle bakar. Sicim kuramının tüm temel parçacık kuramları için bir temel vazifesi görebildiği iddia edildi. Daha ötesi, onun tutarlı bir şekilde kütleçekimin kuantum kuramı olduğu da söylendi. Özellikle, sicim kuramı uzmanları kara delik entropisini ifade eden formülü, kara deliğin yapısının kesin bir mikroskobik görünümü üzerinden açıkladıklarını iddia ettiler. Bu başarı, sicim kuramı taraftarları tarafından bilgi paradoksunun çözümü olarak görüldü, çünkü kara delikler kuantum kuramındaki atomun epey benzeri olarak sunuluyordu; yani kuantum kuramının yasalarına uyan daha küçük varlıklardan meydana geliyorlardı. Doğal olarak ışına yapan bir atom için bilgi paradoksu yoktu.

Sicim kuramı esas alınarak yapılan kara delik entropisi hesaplarının kabul gören formülle uyumu bizi aldatmamalı. Basına yansıyan aksine bu, kara delik entropisi formülünün Hawking'in hesaplamalarına başvurmada ilk açıklanışı değildir. Ben kabul edilmiş formülü elde etmenin belki bir düzüne farklı yolunu hatırlıyorum; bazıları çeşitli araştırmacılar tarafından uzun yıllar önce gösterilmişti. Kuşkusuz sicim kuramı argümanı bir kara deliğin içyapısının detaylı bir resmini veriyor ama ne bunun doğru olduğuna ne de sicim kuramının fiziğin temel düzeyde doğru bir tasviri olduğuna ilişkin elimizde bir delil var.

Sicim kuramının ilginç düzeni gündelik fizikten epeyce uzaktır. Öngörülleri açısından alan kuramından ayrıldığı tek yer,

Planck-Wheeler uzunluğundan (10^{-33} cm)  ok da büyük olmayan boyutlarda meydana gelen temel olaylardır. Bu, aşına olduğumuz ölçeklere göre o kadar küçüktür ki, fizikçiler için küçük ölçekteki olayları keşfetmenin standart aracı olan parçacık hızlandırıcısı deneylerinin ulaşabildiğinin dahi ötesindedir. Başka bir deyişle, bize sicim kuramı çerçevesinde kuantum k llecekimle ilgili bir şeyler söyleyecek hızlandırıcı deneyleri gerçekleştirmek büyük bir sorundur, çünkü kuantum k llecekim belki de asla ulaşılamayacak derecede küçük mesafelerde etkilidir. şu sıralar bu engelin aşılması ve sicim kuramının öngörülerinin doğrulanması veya daha geneli, deneysel olarak kuantum k llecekim araştırmaları için geniş çapta kabul gören iki strateji bulunuyor.

Bu stratejilerden biri yaygın bir görüşe dayanıyor; evrenin evriminin hayli erken zamanlarında sıcaklıklar ve temel parçacık enerjileri öylesine yüksekti ki, sicim kuramının karakteristik etkileri görünür olmalıydı. Bunun doğru olduğunu kabul etsek bile sorun, bu hassas bilgiyi kozmolojik gözlemlerden, örneğin, arada geçen hayli uzun zaman zarfında çok daha sıradan fizikten etkilenmiş olan ilkel ardaan ışması gözlemlerinden, nasıl  ıkartacağımızdır. Bu, etki itibariyle yoğun bir sis boyunca bakarak hafif bir kuantum k llecekim sinyalinin görmeye çalışmak gibi olacaktır. Ben bu konuda karamsarlığa meyilliyim.

İkinci strateji günümüzde popüler olan bir uzayzaman fiziği senaryosuna dayanıyor, “zar senaryosu” (“zar” membran⁹ kelimesinden gelir). Bu senaryo duyularımızla kavrayabildiğimiz    boyutlu uzayı, aslında bildiğimiz zaman boyutuna ek olarak dört veya daha fazla uzay boyutundan oluşan gerçek evrenin bir “kesiti” olarak tasavvur eder. Benzetme yapacak olursak, büyük bir k ğit yaprağının üzerinde yaşayıp, çalışan ve gerçek dünyanın    boyutlu olduğundan büyük ölçüde bihaber olan bir karınca kolonisini düşünün. Onların iki boyutlu fiziği –o derece gelişmiş olduklarını farz edersek– farkında oldukları şeylerin çoğu için geçerli bir açıklama sağlayacaktır, ama k ğidin üzerine düşen ışık gibi orada burada karşılaştıkları bazı olgular onlarda, dünyanın iki boyuttan fazlasına sahip olduğu izlenimini uyandıracaktır. Buradaki k ğit yaprağı, daha karmaşık bir evrenin içerisinde

9 *membrane* Türkçeye zar olarak çevrilir –y.n.

bulunan bir zarın karikatürüdür. Zar senaryosunda madde ve onun tabi olduğu, mesela elektromanyetizma gibi kuvvetlerin çoğu, daha yüksek boyutlu bir evrende ikamet eden zarın (bildiğimiz üç boyutlu uzayın) içerisine hapsolmuştur. Tüm kuvvetler arasında sadece kütleçekim evrenin daha yüksek boyutlu bir sakini ve dışardaki boyutlardan bizim zar-dünyamıza burnunu soktuğu söylenebilir.

Kütleçekimin diğer boyutlar içerisinde seyrelmesinin sonucu olarak, üzerinde yaşadığımız zar içerisindeki kütleçekim kuvveti, aksi durumda olacağından daha zayıftır. Bu, Planck-Wheeler uzunluğunu (kuantum kütleçekimin geçerli olduğu ölçek) hesaplarken, daha önce verdiğim formülde, ilk kez Cavendish tarafından laboratuvarla ölçülen G 'yi değil, doğru ve dolayısıyla daha büyük bir kütleçekim sabiti değeri kullanmamız gerektiği anlamına gelir. Yani zar senaryosunda Planck-Wheeler uzunluğu düşündüğümüzden büyüktür. Genel tahmin 10^{-17} cm olduğu yönündedir. Bu, hızlandırıcı deneyleri için kuantum kütleçekimi ulaşılabilir yapar. Örneğin, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı parçacıkları 10^{12} elektronvolt mertebesindeki enerjilere kadar hızlandırmak için tasarlandı ve bu enerji seviyesinde bir parçacık 10^{-17} cm'lik çözünürlükle yapı hakkın bilgi sağlayabilir. Bu ve buna benzer fikirler birçok fizikçinin Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın kara delikler ve hatta kuantum kara delikleri yaratmayı başaracağına ilişkin iyimser beklentileri için sebep teşkil eder. Bu insanlara göre, gerçek Hawking ışığının incelenmesi bile mümkün olmalıdır.

Zar senaryosu safça bir iyimserlik bile olsa, kuantum kütleçekimi test etmenin izlenebilir bir yolu olabilir, ilkel kara deliklerden yararlanan bir yol. Genel göreliliğe göre, bir Kerr-Newman kara deliğinin kütlesi keyfi derece büyük veya küçük olabilir. Gökadaların merkezindeki veya bizim gökadamızın içerdiği X ışını kaynaklarındaki astronomik kara delikler oldukça ağırdır; kütleleri bir milyar Güneş kütlelerini bulabilir. Tıpkı bir otomobil için kuantum etkileri geçersiz olduğundan dolayı kuantum kuramını onu tanımlamak için kullanmayacağınız gibi, gökadamızın merkezindeki bir kara deliği tanımlamak için de kuantum kütleçekimi kullanmazsınız. Ama birbirlerinden bağımsız olarak Wheeler ve Hawking tarafından 1970'lerin başlarında tartışıldığı gibi, daha mütevazı kütlelere sahip mikrosko-

bik kara delikler doğal olarak var olabilirler. şüphesiz bunlar günlük standartlara göre hâlâ oldukça ağır olacaklardır; öyle ki bir vinç dahi onlardan birini hareket ettirmeyi başaramazdı (vin- cin onu tutabildiğini farz etsek bile). Ama  te yandan öylesine k        ler ki, onlardan birini görmek için çok iyi bir mikrosko- pa ihtiya ınız olurdu (tabii birini g r lebilmeniz mümkünse). Kozmologlar doğada mikroskobik kara delikleri oluşturacak, özellikle evrenin erken zamanlarındaki, olası mekanizmaları tanımladılar. şimdi, kara delik sıcaklığının kara deliğin k   - mesiyle birlikte yükseldiğini hatırlayın. Yeterince k    k t leli bir kara delik epey sıcaktır ve eğer sıcaksa, Hawking ışması açığa çıkacaktır. Eğer mikroskobik kara delikler gerçekten evrende bir yerlerdeyseler, en nihayetinde deneycilerin elinden onların Hawking ışmasını, belki dolaylı yoldan da olsa, ince-lemek ve kuramsal tabloyu test etmek gelecektir.

Peki görecekleri şey ne olurdu? Hawking'in çizdiği tabloya göre, eğer saf ışma açığa çıkarırsa, kara delikle aynı sıcaklığa sahip bir sıcak cisminkinden hafif farklı olarak, d zg n¹⁰ (enerji- nin dalga boylarına düzgün şekilde dağıldığı) bir tayfa sahip olmalıdır. Bunun sebebi, Hawking ışmasının doğada termal karakterde olmasıdır. Hawking 1973-74 yıllarında ışma tahmin-lerini ortaya attığında, ben hen   Austin'de doktora sonrası araç- tırmacıydım. Kendi kendime sormuştum; bu ışmanın gerçek kökeni neydi? Değindiğim gibi, Hawking ve yakın zamana kadar- ki bütün takipçileri kara delikleri klasik olarak ele almışlardı. Peki kara delikler kuantum kuramı uyarınca ele alınsaydı tablo nasıl olurdu? Bu soruyu cevaplayacak genel kabul gören bir kuantum k tlecekim kuramı olmadığından sezgisel olarak, yani koşullara bağlı kanıt ve benzerliklerden yola çıkararak nihai doğru cevabı tahmin etmeye çalışarak ilerlemeye karar verdim. Kara delik ve atom arasındaki bir benzerliği kullandım.

Atom fiziğinden, bir atomun enerjisinin sadece belirli değer-ler alabileceğini biliyoruz. Bunlara enerji seviyeleri denir. Atom enerji seviyesinden bir aşağıya atladığında, seviyeler arasındaki enerji farkına bağlı olarak sadece belirli bir dalga boyuna sahip bir foton yayımlar. Bu yüzden bir atomun tayfı düzgün değil,

10 Kesiksiz anlamında kullanılıyor - .n.

kesiklidir. Bu tayf sadece belirli dalga boylarındaki ışımayı gösterir; aradaki dalga boyları kayıptır. Bu, birçok teknolojinin (halihazırda var olan lazerleri düşünün) ve fiziğin temelidir. Kuantum kara deliklerinin de böyle olduğu argümanını ortaya attım, çünkü kara delik ufkuyla atomun belirli nicelikleri arasında bir benzerlik olduğunu fark etmiştim. Christodoulou, indirgenemez kara delik kütesinin azaltılamayacağını gösterdiğinde, aynı zamanda indirgenemez kütleyle etkileden kara deliği çok yavaş bir şekilde değiştiren bazı süreçleri (esas itibarıyla bir parçacık, bir kara deliğin içerisine öyle bir şekilde gönderilmeliydi ki kara deliğin içerisine son derece yavaşça girsin) de tanımlamıştı. Daha önce değindiğim gibi, ufuk alanı indirgenemez kütle ile karesiyle orantılıdır. Bu nedenle ufuk alanı fizikçiler tarafından adyabatik değişmezlik¹¹ denilen bir özelliğe sahiptir, yani yavaş süreçlerde hiçbir değişime uğramaz. Atom fiziği ve aslında tüm kuantum fiziğinde adyabatik değişmezliğe sahip nicelikler daima kesikli bir tayfa sahiptirler. Bu, muhtemelen ilk kez Einstein'ın yakın arkadaşı olan Avusturyalı kuramsal fizikçi Paul Ehrenfest tarafından fark edildi ve modern kuantum kuramının kristalleştiği dönemde o, Einstein ve diğer pek çok fizikçi tarafından başarılı bir şekilde kullanıldı.

Benzerliğe dayanarak denge durumundaki bir kara deliğin ufuk alanının kesikli bir tayfa sahip olması gerektiği, yani alanın sadece belirli değerler alabileceği, sonucuna vardım. Tayfın, birbirlerinden eşit aralıklarla dağılmış ve kendisinden bir sonraki seviyeden Planck-Wheeler uzunluğunun karesi mertebesindeki bir nicelik ölçüsünde ayrılan enerji seviyelerinden meydana geleceğini hesapladım. Bunu, bir kara deliğin sadece belirli dalga boylarında fotonlar (ya da gravitonlar) yayımladığı, yani atom fiziğinin jargonuyla bir kara deliğin tıpkı bir atom gibi “çizgisel tayf” yayımladığı bulgusu takip etti. Açığa çıkan dalga boylarını tahmin edebildim; kara deliğin kütesine bağlıydılar. Bunun üzerine kısa bir makale yazdım. İddiam geleneksellikten öylesine uzaktı ki, makalemin *Physical Review Letters* tarafından geri çevrileceğini hissetmiştim. O sıralar ilk öğretim üyeliği pozisyonum için İsrail'e taşınmak üzere olduğumdan, hakemlerle savaşacak ruh halinde değildim ve böylece ben de makalemi, 1974'te

11 sistem ile çevre arasında hiçbir şekilde enerji akışı olmaması -y.n.

yayimlanacağı, hızlı bir İtalyan dergisi olan *Lettere al Nuovo Cimento*'ya gönderdim.

İddiamın geleneksellikten uzak doğası tepkisizlikle karşıla-
narak etkisini gösterdi. Makale on yıl boyunca unutuldu, ta ki o
zamanlar Rus Bilimler Akademisi'nin Lebedev Enstitüsü'nde
genç bir araştırmacı, bug nse Münih'teki Ludwig Maximilian
 niversitesi'nin kozmoloji ve parçacık fiziği kürsüsünün başı
olan Viatcheslav (Slava) Mukhanov makaledeki fikri daha ileri
taşıyana kadar. Özellikle bu tablo içerisinde, kara delik entropisi-
nin varlığının, değinmiş olduğum her bir alan seviyesinin birçok
kara delik durumuna karşılık gelmesini gerektirdiği şeklinde
yorumlanmasının elzem olduğuna işaret etti. Çok daha sonra,
1994'te, artık Kudüs'te çalıştığım sıralar bu soru  zerine Slava ile
elektronik posta alışverişi yapmıştım ve ona, kısa süre sonra ica-
bet edeceği, Kudüs'  ziyaret etme davetinde bulunmuştım. Kısa
sürede iyi arkadaş olduk, fikir üzerinde sıkı çalıştık ve gelecek yıl
kara deliğin "atomik" modelini tüm açıklığıyla ortaya koyan kısa
bir makale yayımladık. Makale *Physical Review Letters* tarafın-
dan (tahmin ettiniz!) reddedildi ama hemen akabinde yine fizikte-
ki yeni bulguların kısaca tanıtılması üzerine yoğunlaşan *Physics
Letters* tarafından kabul edildi. Genel olarak bu makale aracılığıy-
la kesikli kara delik alan seviyeleri fikri tanınır olur. Bir bakıma
fikir 1974'te  l  doğmuş ve gerçek bir olasılık olduğunun d ş -
n lmesi için yirmi yıl geçmesi gerekmişti.

Bir dizi araştırmacı, k t le ekimi kuantize etmek için kara
deliklerin geleneksel yöntemlerle incelenmesiyle, eşit aralıklı
alan tayfının ortaya çıktığını doğruladı. Buna isabetli bir şekilde
"kanonik" kuantum k t le ekim denir. Tamamen tutarlı bir yön-
tem olmamakla birlikte k t le ekim dışındaki alanları, örneğin
elektromanyetik alanı kuantize etmekte kullandığımız yöntemin
en yakın benzeri olmak gibi bir avantaja sahiptir. Çeşitli araştır-
macıların sonuçlarıyla bizim tahminlerimiz arasındaki bu devam-
lı uyuşma, Mukhanov ve benim kullandığım oldu a temel arg -
manlar düşünüldüğünde, memnuniyet vericidir. Kara delikler için
kesikli alan tayfı, kâşifi olan Pensilvanya Devlet  niversitesi'nden
Abhay Ashtekar tarafından "ilmek kuantum k t le ekim"¹² ismi

12 *Loop quantum gravity* - .n.

verilen kanonik yöntemin modern bir varyantından da ortaya çıkar. Ama ilmek kuantum kütleçekim yaklaşımıyla bizimki arasında, tayfın biçimine ilişkin detaylarda farklılıklar vardır. Sicim kuramı okulu alan tayfının kesikli olduğuna katılmıyor. Bir bakıma, bizimki gibi klasik genel görelilikten köken alan yaklaşımlar ile parçacık-sicim fiziği ruhuna sahip yaklaşımlar arasında kılıçlar çekilmiş durumda. DeneySEL bir keşif olmadığı sürece, bir hükme varılması uzun yıllar alabilir.

3. BÖLÜM

EVREN BİLGİDİR

1974 yazının ortasında, İsrail için oldukça maliyetli olan Yom Kippur savaşından bir yıldan kısa süre sonra, İsrail'in Beersheva kentindeki Ben-Gurion Üniversitesi'ne öğretim üyesi olarak katıldım. Savaşın etkilerinden biri ani olmuştu; hükümet karamesiyle bu genç üniversitedeki tüm inşaat çalışmaları askıya alınmıştı ve benim 1990'da Kudüs'e gitmek üzere ayrılışımdan yıllar sonrasına kadar eski temposuna erişemedi. Sonuç olarak, üniversitede bulunduğum sürenin büyük bölümünde ofis alanı kıtlığı vardı ve fizik bölümünün öğretim üyeleri küçük ofislerde ikiye ikiye oturuyordu. Gelecek on yıl veya daha uzun süre için oda arkadaşımın Birleşik Devletler'den yeni gelen bir diğer isim olan ve maddenin ışık ile etkileşimini inceleyen kuantum elektrodinamik alanında (o zaman için fiziğin en teknik alanlarından biriydi) uzman olan David Owen olduğu anlaşıldı.

David ve ben kısa sürede arkadaş olduk ve o yıllar boyunca ondan çokça fizik öğrendim. David basılı bir kâğıdı asla atmayan o insanlardan biriydi; aldığı kitaplar, broşürler, notlar, ilanlar ve diğer basılı şeyler sonsuza kadar masasının üstünde veya altında, kitaplığında ya da ikisinin arasındaki döşemede dururdu. Hoşlandığı tüm kitapları alır ve derhal "Owen'a ait" damgasıyla damgalardı. Zaman geçtikçe ofisimiz daha ve daha fazla basılı materyalle doluyordu. Beersheva bir çöl şehri olduğundan, mekân oldukça tozlu oluyordu ve görsel olarak temizlemek mümkün değildi. Ben düzenli bir masa ve makul düzeyde boş bir odayı tercih ediyordum ve bu yüzden kendimi orada sıkışmış hissediyordum.

Büyük bir aileyle birlikte küçük bir evde yaşayan bir adam hakkında bir Yahudi öyküsü vardır. Adam hahamına gider ve

rahatsız yaşam koşullarından yakındır. Haham ona tavsiyede bulunur: “Bir keçi satın al ve evde sizinle birlikte yaşasın.” Adam sorgulamaz ve keçiye satın alır. Bir hafta sonra haham adama, “şimdi keçiye avluya  ıkart,” der. Keçi dışarı çıkınca, aile birden evin epey geniş olduğunu hisseder. 1983’te fizik bölümüne ait alanın yeniden düzenlenmesiyle her  ğretim üyesine bütün bir ofis verildiğinde benim için de aynısı oldu. David koridorun ilerisindeki kendine ait odaya taşındı ve o tüm k ğitlerini taşıdıda çok geniş bir ofise sahip olduğumu hissettirdi.

Fizik bölümünde kıdemli  ğitmen olarak ilk pozisyonum bana sallantıdaymış gibi görünüyordu. Genel görelilik üzerine araştırma yapan ve kendi himayesinde bir genel görelilik grubu kurmaya niyetli fizik k rs  başkanı Moshe Carmeli tarafından işe alınmıştum. Ama çoğu katı hal ve nükleer fizik uzmanı olan bölümdeki diğer insanlar onunla aynı görüşte değildi. Bazıları benim tayinimi besbelli kaynakların boşa harcanması olarak görüyor ve bunu doğrudan söylemekten  ekinmiyorlardı. Carmeli, beni  srail’deki en köklü yüksek öğrenimin kurumu olan Technion’un rakip teklifi yerine Ben-Gurion  niversitesi’ni tercih etmeye ikna eden    yıllık bir atama teklifinde bulunmuştu. Ama resmî atama mektubu nihayet Brooklyn’e ( srail’e u madan birkaç gün önce ailemle birlikte orada kalıyorduk) ulaştııda atamanın sadece 2 yıllığına olduğu ortaya  ıktı. Yani bir çıkmaza d şm ştum.  srail  niversitelerinde kalıcı kadro genellikle  ğretim üyesinin en az    yıl orada kalmasıyla veriliyordu. Bunun anlamı, sözleşmem kadro göz önünde bulundurulmadan yenilenmek (tabii yenilenirse) durumunda kalacaktı. Bu yüzden üniversitede gayesi olan birçok  ğretim üyesinin de aşına olduğu üzere yeni pozisyonumda kendimi güvende hissetmedim. Carmeli’yle aramda epey erken zamanda gelişen sürtüşme de bu güvensizlik duygusunu gidermek açısından iyi olmadı.

Ama çalışmam iyi gitti.  srail’deki diğer üniversitelerden doktora öğrencileri çekmek benim için kolay oldu. Bizim bölüm  srail’in en iyi fizik bölümü olarak kabul edilmliyordu ve bu yüzden başka kurumlardan yüksek lisans derecesini alan öğrencilerin oraya gelmesi çok şey ifade ediyordu. Austin döneminde yazdıda makaleler de kara delik fiziği topluluğunda dikkatleri üzerine  ekliyordu.  srail’de genç bir  ğretim üyesinin bu ölçüde ilgi

çekmesi nadirdir. 27 yaşında bölümün en genç üyesiydim ve benden sonraki en genç olanlar benden yedi veya sekiz yaş büyüktü. Bu yüzden gelişimin üzerinden sadece iki sene geçtikten sonra doçentliğe yükseldiğim halde hâlâ kadrom yoktu. Aslında bu yükselme bende bir miktar mahcubiyete neden olmuştu. Yaşıma göre biraz genç gösteriyordum, bu yüzden soran yabancılara doçent olduğumu söylediğimde yalan söylediğimi düşünüyorlardı. Dahası bilime katkımın ya da kütleçekim kuramındaki uzmanlığımın bu payeye layık olacak ölçüde olduğunu hissetmiyordum. Her halükarda, yükselme maaşıma mütevazı bir zamla birlikte gelmişti sadece; o dönem İsrail’de büyük sıçrayış profesörlüğe yükselmeye karşılık geliyordu.

Beersheva’da araştırmalarım dallanmaya devam etti. İlk birkaç yılımda hâlâ kara delik termodinamiği üzerine çalışmalarımın son dokunuşlarını yapıyordum. Daha sonra manyetohidrodinamiğin görelî formu üzerinde çalışmaya başladım. Buradaki görelîlik ifadesi, şüphesiz, çok yüksek hızlar veya çok güçlü kütleçekim alanları içeren durumları ifade ediyor. Manyetohidrodinamik, manyetize olmuş plazmanın hareketlerini inceler; erimiş bakır gibi sıvılar veya yüksek sıcaklıktaki her türden gaz iyi birer iletkenler ve bunlara eklenmiş bir manyetik alanın etkisi altındadırlar. Evrende en görünür olan madde manyetize olmuş plazmadır, bu yüzden konu öncelikli bir öneme sahiptir. Ancak manyetohidrodinamik denklemleri şeytani düzeyde karmaşıktır. Belki de bu yüzden bu alanı meydan okuyucu buldum. İlk doktora öğrencim Eli Oron, İsrail Hava Kuvvetleri’nde bir yedek pilottu ve bu araştırmanın erken aşamalarında bana yardımcı oldu. Eli benden üzerinde çalışmak üzere bir problem istedi ve ben de manyetohidrodinamiğin bir taslağını çıkartarak bakması için belirli bir problem önerdim. O ise şüpheliydi ve bana, “eğer bu çok kolaysa, neden kendi başına çözmedin?” diye sordu. Bunu tamamen kendi başıma yapmak için fazla yoğun olduğumu anlamasını sağladım ve mücadeleyi kabul etmeye karar verdi.

Birlikte birçok iş yaptık ve konu üzerine iki uzun makale yazdık. İlk manyetohidrodinamiğin yeni korunumlu nicelikleri üzerineydi. Fizikte bir korunumlu nicelik, ilişkili olduğu sistem şiddetli değişiklikler geçirirse dahi değişime uğramayan niceliktir. Herkes enerjinin korunumu örneğini bilir. Ama buna benzer daha

pek çok nicelik vardır ve denklemler bütünüyle çözülemediği durumlarda sistemlerin davranışlarını anlamamızda bize çokça yardımları dokunur. Manyetohidrodinamikte denklemleri nadiren çözebildiğiniz için korunumlu niceliklere büyük talep vardır. Biz bunlardan birkaçını bulmayı başardık. Bunların arasından tacı taşıyan, Eli'nin kendi başına bulduğu yeni bir dolaşım korunum yasasıydı.¹

Lord Kelvin, hâlâ halktan biri olduğu zamanlarda, ilk dolaşım korunum yasasını keşfeden kişiydi. Bu, içsel sürtünmeyi, diğer bir deyişle vizkoziteyi, ihmal ettiğimizde, su ve benzeri her sıradan sıvıya uygulanabilirdi. Kelvin herhangi bir döngü içerisinde hareket eden sıvı akışının (teknik olarak döngü etrafındaki hızın integralinin), sıvı üzerindeyken döngünün şekli bozulsa (gerilse, bükülse vb) dahi değişmeyecek bir nicelik olduğunu buldu. Bu korunum yasası, bulunuşundan bu yana geçen bir buçuk asırlık süreçte, sıvı akışına ilişkin kavrayışımızı geliştirdi. Örneğin, girdaplar² (küvette oluşan anaförlerin, çöllerdeki toz şeytanlarının³ ve Amerika'nın ortabatisindeki eyaletlerdeki hortumların arkasında yatan olgu) hakkında bildiklerimizin çoğu Kelvin'in teoremine ve onun muadili olan von Helmholtz'un öngörülerine dayanıyor. Sonradan manyetohidrodinamik alanının oluşmasına yaptığı katkılardan dolayı Nobel ödülü alan, İsveçli fizikçi ve mühendis Hannes Alfven 1940 yılında manyetohidrodinamiği kullanarak manyetize olmuş plazmadaki manyetik akının korunumu yasasını keşfetmişti. Ayar kuramlarının dilinde, Alfven'in yasası aynı zamanda bir dolaşım korunum yasasıdır. Alfven'in yasası sıradan sıvılarda anlamını yitirirken, Kelvin'in yasası ise manyetize olmuş plazmalarda, manyetik kuvvet nedeniyle işlemez. Ancak Oron'un dolaşım yasası iki ortam için de geçerlidir; aslında sıradan sıvılar için Kelvin'in yasasıyla özdeş olduğundan, bu yasayı manyetik alana sahip her türlü sıvı için genelleştirdiği kabul edilebilir.

1977 yılında bir gün Eli ofisime geldi ve korunumlu bir dolaşım olduğunu tahmin ettiği bir ifadeyi bana gösterdi; dahası onu

1 *Circulation conservation law* -ç.n.

2 *Vortices* -ç.n.

3 *Halk dilinde dalaz* -ç.n.

ispatladığını iddia etti! Bu tip bir yeni korunum yasası olabileceği konusunda epey şüpheliydim (eğer bu kadar basitse, neden onu daha önce keşfeden olmadı?). Eli'nin onu kanıtlamak için gerekli olan tüm hesaplamaları yapmış olabileceği konusunda da şüpheliydim. Böylece her şeyi kontrol etmeye giriştim. Uzun saatlerimi hesaplamalara harcayarak geçirdiğim üç günün sonunda, Eli'nin hesaplamalarının kusursuz olduğunu kabul etmeye mecbur kaldım; gerçekten de yeni bir korunumlu dolaşım bulmuştu. Beni bundan da çok şaşırtan, Eli'nin sezgileriydi. Ancak deli biri hız ve manyetik alanın bu karmaşık bileşiminin korunumlu olduğunu tahmin edebilirdi. Ama Eli sessiz, dengeli ve neredeyse ağırkanlı bir genç adamdı; delilik dışında ne varsa sahipti.

Bundan başka, daha önce değindiğim Brans-Dicke tipi kütleçekim kuramları üzerine de çalıştım. Bu alana, New York'taki Colgate Üniversitesi'nden misafir olarak gelen Shimon Malin'in, parçacık kütlelerinin sabit sayılar olmadığı ve parçacıklar hareket ettikçe değiştiği kuramından bahsetmesiyle girdim. Bu olasılık merakımı uyandırmıştı; ilginçti ve deneysel olarak bilinen gerçeklerle doğrudan doğruya çelişmiyordu. Malin'in kendine has kuramından hoşlanmadığım için, fikri, alan kuramından faydalananak kendi başıma incelemeye karar verdim.

1976 yazının iki ayını, bu çalışmaya başladığım Princeton Üniversitesi'nde ziyarette geçirdim. Orada kendi kuramımla Brans ve Dicke'ninki arasındaki yakın bağlantıyı fark ettim ve "değişken kütle alanı kuramı"nın ne olduğu üzerine ilk makalemi yazdım. Ziyaretimin sonlarına doğru Wheeler yaz tatilinden döndü. Bu onun Princeton Üniversitesi'nden emekli olmasından hemen sonraydı ve Austin'deki Texas Üniversitesi'nde bir emeklilik sonrası pozisyonuna başlama sürecindeydi. Princeton'a çeşitli düzenlemeler yapmak için gelmişti ve evini çoktan kiraya verdiği için, o yaz benim de kaldığım, lisansüstü öğrencilerinin ikamet ettiği yüksek lisans okulunda kalıyordu. Birkaç gün benim odamda birlikte kahvaltı yaptığımızı hatırlıyorum. O sohbetlerden biri sırasında onun hem nükleer bomba hem de sonrasında hidrojen bombası geliştirme çalışmalarındaki rolüyle ilgili detayları öğrenmiştim. Bugün bunların tümünün kamuya açık bilgiler olduğunu zannediyorum ama bunları içeriden birinden dinlemek etkileyiciydi. Ayrıca üniversitenin baskısı olmadan Wheeler'la fizik

koşuyor olmak hoştu. Epey rahat ve vaktini istediğı gibi değ rle-
dirmekte serbest olduğı zamanlardı.

Kısa süre sonra, alışılmadık koşullar altında, Wheeler ile tek-
rar karşılaştım. 1977’de Ontario’nun Waterloo şehrinde gerçekle-
şecek olan uluslararası bir görelilik konferansına doğıru yolculuk
yapıyordum. Tam da Kanada’nın hava kontrolörlerinin greve
gittiğı zamanda. Kanada’ya giden uçağa binmek üzere Zürih’e
ayak bastığımda, uçuşta r tar olduğunu gördüm. Havalimanında
boş boş dolaşırken birden karşımda, alnında büyük bir bandajla
Wheeler’ı buldum. Onun da tam olarak benimle aynı yere gittiğı
ve benimle aynı uçuşta yer ayırttığı ortaya çıktı. Kafasında bandaj
vardı çünkü İsviçre’de yaptığı bir yürüyüş sırasında k  k k bir
kayalıktan düşüp kendini yaralamıştı. Grev nedeniyle u uşumuz
New York Eyaleti’ndeki Buffalo’ya yönlendirilmişti ve oradan
otobüsle alınarak Toronto’nun havalimanına götürüldük.
Konferans katılımcıları oradan diğer bir otobüsle Waterloo bölge-
sine getirildi. Bu alışılmışın dışında uzun bir yolculuk olmuştu
ama Wheeler, birlikte yolculuk etmek için büyüleyici bir insandır.
Esasen seyahat boyunca çalışır ama ondan ilginç anıların elde
edilebildiğı perde araları da olur.

Beersheva’ya dönüşümle, daha önce değindiğim doktora
 ğrencim Meisels’le birlikte değişken k t lelerle ilgili fikirlerimi
daha da geliştirdik. Kurama,  zerine yapılmış olan VMT (Variable
Masses Theory)⁴ kısa adını vermeyi öneren kişi oydu. O süreçte
Einstein’ın genel g reliliğinden farklı olan ama deneysel gerçek-
lerle doğrudan doğruya çatışmayan k t le ekim kuramlarının
inşasına dahil olmuş, hemen göze çarpmayan özellikteki mesele-
lere fazlasıyla aşinalık kazandım. şu benim için açıklığa kavuştu
ki, olağanüstü sezgilerinin rehberliğindeki Einstein, mümkün
olan en yalın ve her köşe başında bekleyen uygunsuz gerçeklerin
mahvına uğramamış kuramı elde etmişti. Genel göreliliğin rakip-
lerinin çoğu aslında deneysel gerçeklere yenik d şm şti. Yine de
VMT’nin hâlâ koşuda olduğunu anlıyorum.

Meisels ve benim elde ettiğimiz bazı sonuçlar zamanından
 nce geldi. Örneğin, VMT’nin Einstein’ın kuramından oldukça
farklı olmasına rağmen, birçok durumda güneş sistemimizdeki

4 Değişken K t leler Kuramı – .n.

olgulara ilişkin kuramsal tahminlerinin, evren genişledikçe genel göreliliğin tahminlerine daha ve daha fazla yaklaştığını bulduk. Bunun anlamı, kütleçekim Einstein'inkinden farklı bir kuramla düzgün bir şekilde ifade edilebiliyor olsa da, bizimki gibi yaşlı bir evrende yaşayanlar için bunu keşfetmek zor olacaktır. Bu yüzden 1978 tarihli makalelerimizden birine "Genel Göreliliksiz Genel Görelilik" (Wheeler'ın ders anlatma tarzına ilişkin bir kelime oyunu) ismini verdik. VMT büyük bir ilgiyle karşılanmadı. Yalnız 1995'te, Paris yakınlarındaki Institute de Hautes Etudes Scientifiques'ten kuramcı Thibault Damour ve Bozeman'daki Montana Devlet Üniversitesi'nden meslektaş Kenneth Nordtvedt tarafından bu tarz bir yakınsama (daha ve daha fazla yaklaşmak anlamında) olgusu yeniden keşfedildi ve değeri bilindi.

1978'in başlarında, Bilha ile evlenmemizden kısa süre sonra, sonunda üniversitede bir kadroya sahip oldum. Beersheva'daki özel adresime gönderilen resmî onay mektubu postada kaybolmuştu. Böylece yıllar sonra dahi hâlâ kadromla ilgili hiçbir kanıtın olmadığı şakasını yapardım. Birkaç ay sonra, yani üniversiteye gelişimden sadece dört yıl sonra, profesörlüğe yükseldim. Ben-Gurion Üniversitesi'ndeki geleceğime ilişkin belirsizlik buharlaşmıştı. Ama çoğunlukla olduğu gibi, tam da kaygılarınızın sizi terk ettiği anda daha önce sizi rahatsız etmeyen bir şeylerle ilgili mutsuz hissetmeye başlarsınız. Benim için bu, en iyi fizik bölümünde olduğumu hissetmememdi. Ben-Gurion Üniversitesi'nin Princeton gibi olmasını beklemiyordum elbette, ama İsrail şartlarında olabileceği kadar iyi bir yer olmamasından rahatsızlık duyuyordum. Ülkedeki diğer fizik bölümleri ya uluslararası düzeyde hayli saygın ya oldukça aktif ya da esas olarak iyi fizikçileri çekmeyi başarmıştı. Bu tarz insanlar Beersheva'da nadirdi. Bölüm ancak 1990 yılında, benim Kudüs'e gitmek üzere ayrılışımdan önceki birkaç sene önce, daha makul düzeyde gelişmeye başladı.

İlk oğlum Yehonadav'ın 1979 ilkbaharının ilk günündeki doğuşu, zihnimde daima İsrail Bilimler Akademisi tarafından Albert Einstein'ın doğumunun yüzüncü yılı şerefine Kudüs'te düzenlenen uluslararası konferansla ilişkili olacaktır. Bu konferansa bir dizi ünlü fizikçi katılmıştı: Nobel ödüllü Paul Dirac, Yang (daha önce değinmiştim) ve Murray Gell-Mann ile bunlara

ek olarak Abdus Salam ile birlikte zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin standart birleşik kuramının inşaa etmelerinden dolayı ikisi de o yıl Nobel  d l n  kazanacak olan Steven Weinberg ve Sheldon Glashow.

Bilha doğum yapmak üzere olduğu için, planım her sabah konferansa gitmek ve akşamları Beersheva'ya d nmekti. O hafta  arşamba günü konferansta kara delik termodinamiği ve onun dallarının gelişimini gözden geçirdiğim bir konuşma yapmıştım. O gün çok yorulduğum için, konferans organizat rl ğ n n konukseverliğinden istifade etmeye ve sadece o geceyi akademi binasından kısa yürüme mesafesindeki resmedilmeye değer "Hutzoth Hayotser" misafir evinde geçirmeye karar verdim. Ama akşamın erken saatlerinde misafir evine vardığımda, beni bekleyen bir not vardı; Bilha'nın doğum yapmak için hastaneye gittiğini söylüyordu. Otobüse atlayıp aceleyle Beersheva'ya gittim (tabii ki, o dönemde arabayı evde bırakıyordum). Doğumevine ulaştığımda az önce bir oğlan babası olduğum söylendi; doğum gece yarısına doğru olmuştu. Anne ve bebek iyiydi ve alışılagelmiş şekilde, birkaç gün doğumevinde kalacaklardı. Henüz evde yapacak fazla bir şey yoktu, bu yüzden ertesı sabah nispeten geç bir saatte konferansa geri döndüm. O sabah tüm ilgilinin konuşmacılardan ziyade bende toplandığını düşünüyorum. Bazıları, bıyık altından gülerek, bebeğe Albert dememizi önerdi. İlk oğlumuzu Yehonadav ismini verdik.

Konferanstan sonra, evde hassas bir bebeği çevreleyen binlerce angarya işle fazlasıyla meşgulken, bebek seyahat edecek kadar büyüdüğünde ilk akademik iznimi değerlendirmeyi ciddi olarak düşünmeye başladım. Tam da o sıralarda DeWitt, Santa Barbara'daki yeni kurulan Kuramsal Fizik Enstitüsü'nde (Birleşik Devletler'in Ulusal Bilim Vakfı tarafından fonlanan enstitü öyle başarılı oldu ki, bugün hâlâ çalışmasını sürdürüyor) kendi idaresi altında düzenlenecek bir kuantum k tlecekim  alıştayına davet etmek üzere benimle iletişime geçti.  alıştay 1980 yılının başlarında olacak ve altı ay sürecekti. Oraya yapacağım ziyareti, ertesinde Milwaukee'deki Parker'a yapacağım bir yaz ziyaretiyle ve Princeton'da, bu sefer Astrofizik Bölümü'nde, geçireceğim beş ayla birleştirerek tüm bir izin yılıma dahil etmeye karar verdim. O yıl birkaç kez her şeyi paketlenme işini büyük ölçüde kendisinin

yapacağı ayan beyan ortada olan Bilha, bu bölünmüş izin programını takdir etmemişti. Yine de, üçümüz 1980 Şubatında Santa Barbara'ya gitmek üzere ayrıldık. Tel-Aviv'deki uçakta Yakir Aharonov (kuantum mekaniğinin temelleri üzerine yaptığı çalışmalarıyla ünlü ve daha sonra Wolf Ödülü sahibi) ile karşılaştığımızı hatırlıyorum. Akademik izin yılının zamanlaması ilgisini çekmişti. Aşağı yukarı akademik yılın ortasına geldiğinden Şubat ayı kesinlikle başlamak için epey garip bir zamandı. Ama hava açısından bakıldığında idealdi; Santa Barbara'nın kışı oldukça yumuşaktır.

DeWitt'in çalıştayında kaldığım süre boyunca entropi üzerindeki evrensel sınır üzerine olan, daha önce değindiğim fikirlerimi formüle döktüm. Bu sınır, beni on beş yıl boyunca ara ara meşgul etmişti (bugün dahi bu önemli konuyla işimin bittiğini hissetmiyorum). Bu, çalıştayın erken zamanlarında olmuş olmalıydı çünkü oraya gelişimden birkaç hafta sonra yarı pişmiş fikirlerim üzerine bir seminer verdiğini hatırlıyorum. Termodinamiğin genelleştirilmiş ikinci yasasını içeren paradoksları çözümlemeye girişmeden epey önce bu fikirlere sahiptim. İnsanlar, bir kara deliğin küçük bir kütleye ama büyük bir entropiye sahip bir cismi yutmasıyla, ileri sürülen yasanın ihlal edileceğini iddia ettiğinde, belirli bir cisme keyfi büyüklükte entropi sıkıştırılamayacağına inanmak için nedenlerim olduğu karşılığını verdiğimi okuyucu hatırlayacaktır. Bu sadece elverişli bir iddia değildi.

Onu destekleyen örneklerim vardı ve bunları 1972-73 yılları arasında Austin'deyken tamamladığım kara delik termodinamiği üzerine olan iki uzun makalemde toplamıştım. Yedi veya sekiz yıl sonra bu konuya geri dönecektim; bu sefer Santa Barbara'da.

İlk olarak entropi sınırının önemini baştan sona açıklamalıyım. Herkes uygarlığımızın birçok türde bilginin ulaşılabilirliğine ağır bir biçimde bağlı olduğu gerçeğinin farkındadır. Bir hava yolculuğunu mümkün kılmak için ihtiyaç duyulan tüm şeyleri düşünün (rota üzerindeki hava koşulları, yakıt tüketim hızı, aradaki varış noktalarında biniş yapacak yolcuların listesi, havalimanlarındaki koşullar vb). Küresel köy⁵ gerçeğe dönüştü çünkü

5 Kanadalı yazar Marshall McLuhan tarafından ortaya atılan bu kavram, gelişen iletişim teknolojilerinin sonucunda dünyanın, her insanın ne kadar uzak noktalarda olursa olsun rahatça iletişim kurup, dünyadaki olaylardan

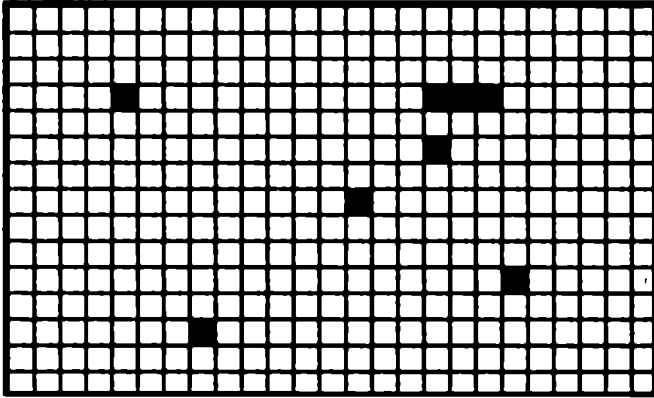
bilgiye erişmek bugünlerde çok kolay. Dolayısıyla şu sorular ortaya çıkar; Bilgiyi bir bilgisayar hafızasına veya CD'ye ne kadar yoğunlukta sıkıştırabilirsiniz, bilgiyi iki nokta arasında ne kadar hızlı taşıyabilirsiniz ve diyelim ki bilgisayar ekranında bir resim oluşturmak için ham bilgi ne kadar hızlı işlenebilir? Daima gelişmeyi sürdüren bu görevlerin teknolojik sınırları vardır. Bir yere kadar bu fizik değil, mühendisliktir. Ama o zaman şu sorulmak durumundadır; fiziğin kendisi belirli bir alana kaydedebileceğiniz bilgi miktarına sınır koyar mı? Cevap, evet olmalıdır. Bilgiyi saklamak için günümüzde kullanılan çipler atomlardan meydana gelir. Belirli bir alana ne kadar atom yerleştirebileceğinizin bir sınırı vardır ve bu yüzden atomlar olmadan bilgiyi saklamanın bir yolu bulunmadığı sürece, belirli bir alanın sınırlı (ama muhtemelen oldukça büyük) bilgi saklama kapasitesi olduğu açıktır. O zaman ilginç olan soru, eğer ki bilginin neye ve nasıl kaydedileceği belirtilmezse, belirli bir alanda ne kadar bilgi saklayabileceğinizin bir sınırı var mıdır ve eğer varsa bu sınırın büyüklüğü nedir?

Peki bunun entropiyle ne ilgisi var? Fizikçilerin, 1868'de ünlü İskoçyalı fizikçi James Clerk-Maxwell tarafından ileri sürülen ve herkesçe bilinen bir örnekten –Maxwell'in şeytani– öğrendikleri üzere, bir sistemle ilgili içeriden sızan bilgiyi elde edebilirsiniz, bu bilgiyi onun entropisini düşürmek için kullanabilirsiniz. Yıllar boyu birçok bilim insanının çalışması bu sonucu sağlamlaştırdı ve onu daha sağlam bir forma soktu; bir sistemin içine kaydedilen bilgi, sistemin sahip olabileceği maksimum entropiyle aynı koşullar altında halihazırda sahip olduğu entropi arasındaki fark kadardır. Burada bahsedilen bilgi her türden bilgi olabilir; sadece yazı ve resim gibi doğrudan kullanışlı olan bilgiler olması gerekmez, belki insanlar için kullanılabilir dahi olmayan bir bilgi türü de olabilir, sadece bir şeyle ilgili herhangi bir formda bilgidir. Her neyse, eğer bir sistemin sahip olabileceği bir maksimum entropi değeri varsa, içerisine kaydedebileceğimiz herhangi bir formdaki bilginin bu maksimum entropiyi kesinlikle geçemeyeceği açıktır. Böylece maksimum entropi değeri, bir sistemin bilgi kapasitesiyle ilgili merkezi bir soru haline gelir.

haberdar olabileceği küresel bir köy haline geleceğini ifade eder –ç.n.

Devam etmeden önce birimler meselesine tekrar girmek zorundayım. Kimyacılar ve hatta bazı fizikçiler entropiyi enerji bölü sıcaklık birimleriyle, örneğin, birim derecedeki erg cinsinden, ölçmeye alışırken, bilgisayar bilimciler, elektrik mühendisleri ve bilgi kuramcıları bilgiyi bitler (veya her biri yaklaşık 8 milyon bite karşılık gelen megabaytlar) cinsinden ölçerler. Entropi ve bilgi arasında nasıl bir denklik kurulabilir? Bu, elmalarla portakalları eşitlemeye benzemez mi? Hayır. Her fizik öğrencisinin bildiği gibi, bir gazın sıcaklığı moleküllerinin enerjisini belirler; ikisi orantılıdır ve tüm gazlar için orantı sabiti aynıdır. Bu, gerçek sıcaklığın birimini enerjininkiyle eşdeğer olacak şekilde yeniden tanımlamak için kullanılabilir. Aslında, diğerini bir kenara bırakırsak plazma fizikçileri uğraştıkları sıcak plazmanın sıcaklığını elektronvolt cinsinden, yani tipik bir enerji birimiyle ifade etmeye hayli zamandır alışkındır. Bunu yaptığınızda, entropi açıkça boyutsuzdur, yani saf bir sayıdır.

Peki bilgi? O da saf bir sayıdır. Bir cihazdaki iki durumlu bir anahtarın bir bitlik bilgi tuttuğu söylendiğinde gerçekte kastedilen, onun iki farklı duruma sahip olduğudur. Bir bilgisayarın bellek biriminin bir bayt (sekiz bit) tuttuğunu söylediğimizde, $2^8 = 256$ olası durumu kastederiz. Bilgi gerçekte durumları sayar; yani saf bir sayıdır. Böylece bilgi ve entropiyi karşılaştırmak bir çelişki doğurmaz.



Şekil 4. $15 \times 25 = 375$ pikselden oluşan bir dizi. Her biri parlak veya karanlık olabilir, yani dizi 2^{375} olası dizilime (duruma) sahiptir. Böylece maksimum entropisi ikili sistemde 375'tir. Yani dizi 375 bitlik bilgi tutabilir.

O zaman belirli bir alana, diyelim ki bir kutuya, girebilecek maksimum entropi ve dolayısıyla maksimum bilgi miktarı nedir? Bunu hesaplamanın bir yolu, kutunun içerisinde ne tür bir madde olduğunu belirlemek ve istatistiksel mekani in (termodinamiği maddenin mikroskobik yapısının detaylarına inerek açıklayan fizik bran ı) yöntemlerini kullanarak entropiyi hesaplamaktır. Bu işlem, kutuyu dolduran her bir tür madde için ayrı ayrı uygulanmalıdır ve hesaplama genellikle sadece sayısal yöntemlerle yapılabil i için, her şekilde kutu için ayrı ayrı uygulanmalıdır. Doğrusu daha sonra, 1982’de, açıklamak üzere olduğum fikri kontrol etmek için böyle birçok hesaplama ger ekle tirdim. Bu epey usandırıcıydı. O zamanlar kişisel bilgisayarlar yoktu ve tüm hesaplamaları programlanabilir bir hesap makinesinde yapıyordum. Programın bir durumu çözmesi birkaç saat alıyordu. Ders vermek ve başka şeylerle ilgilenmek zorunda olduğumdan, hesap makinesine kutunun boyutunu ve şeklini girip “ alı tır” tuşuna basardım ve ben diğer i lerimle u ra ırken sessizce  alı abilsin diye onu evrak  antamda ta ırdım. Zamanım olduğunda sonuçları kontrol ederdim. Bu yaklaşımdan   rendi im birçok iyi nokta oldu ama problemi incelemeye bu şekilde ba lamı  olsaydım hiçbir yere ula amazdım. Bunu yapmanın, Santa Barbara’da bulunduğum gibi, daha iyi bir yöntemi vardı.

Meselenin   z  şudur; belirli bir boyuta ve  ekle sahip ama i i herhangi bir maddeyle dolu bir kutunun, bir kara deliğin içine bıraktığını hayal edin. Kutunun kütlesi (enerjisi) bilindiği sürece, genel görelilik kullanılarak bu süreçte kara delik alanının (dolayısıyla entropinin) ne kadar artacağı hesaplanabilir. Bu, kutunun tam olarak nasıl d  t  ne ba lı olsa da, kutunun boyutu ve kütle-enerjisi tarafından belirlenen bir minimum değer bulunabilir. Şimdi, daha önce a ıkladı ım genelle tirilmi  ikinci yasa nedeniyle bu minimum değerin, kutunun tüm koşullarda sahip olabileceği maksimum entropiyi a ması gerekir. Diğer türlü, uygun bir şekilde hazırlanmış ve doldurulmuş kutular kara deliklerin içine atılarak tüm evrenin entropisinin azaltulabilmesi mümkün olur!

 ikinci yasaya olan inancımız  u an için o kadar güçlü ki, kutunun entropisinin, yarıçap R ve kütle-enerji E tarafından belirlenen kesin bir sınırı veya limiti ge emeyece ini mutlak surette söyleyebilirim:

$$S \leq \frac{2\pi ER}{\hbar c}$$

Kutunun içindekilerin doğası, bunlar ister kitap olsunlar isterse de CD veya donanım çipleri, maksimum entropiyi etkileyebilirler ama bu daima belirtilen sınıra kadar geçerlidir. Böylece bir sisteme yazılabilecek bit halindeki maksimum bilginin, kabaca, enerji ile doğrusal boyutun çarpımının ışık hızı ile Planck'ın kuantum sabitinin çarpımına bölümünü geçemeyeceği bilinir.

Bu, bir fizik yasası olarak oldukça basit görünüyor. Ama bu basitlik içersinde bir dünya saklı. Bilginin kaydedildiği disk, çip veya belleği ayrıntılı bir şekilde tarif etmemiz gerekiyor. Bana sadece boyutunu ve kütesini söyleyin ve bilim insanları veya mühendisler tarafından ne tür bilgi saklama numaraları icat edilirse edilsin geçerli olan koşulsuz limiti alın. Şüphesiz, sınır genellikle halihazırdaki kabileyetlerimizin muazzam ötesindedir. Örneğin, bu sınır uyarınca bir santimetre genişliğinde ve bir gram ağırlığındaki bir belleğin kapasitesi 10^{37} bit ile sınırlıdır! Bu tera-tera-tera-baytlık bellek, öngörülebilir gelecekte paranın satın alabileceği tüm ²bilgisayar belleklerinden (bugün hâlâ gigabaytlarla ölçülüyorlar; bir terabayt 1000 gigabayttır) çok daha büyüktür. Ama entropi üzerindeki sınır, tarif ettiğim belleğin asla tera-tera-tera-bayttan fazlasını tutamayacağını bize garanti eder; ne tür mucizevi teknolojiler tasarımın içine karışırsa karışsın. Fizik bunu yasaklar.

Sınırla ilgili şaşırtıcı şeylerden biri, kütleçekim fiziğiyle ilgili hiçbir şeye açıkça değinmiyor oluşudur. Formülde özel göreliliğin ışık hızı ve Planck kuantum sabiti bulunuyor ama Newton'ın kütleçekim sabiti G yok; sınırı elde etmek için kullanılabilen kara delik fiziği G 'yi içermesine rağmen. Böylece kütleçekim fiziği olmadan entropi üzerinde kütleçekimsel olmayan fizik için iyi çalışan bir sınır elde edilir. Ben bunu fiziğin birliğinin hoş bir örneği olarak görüyorum; bütün fizik bir ve parçalanamaz. Şimdi, sınır dünyevi fiziğe atıfta bulunduğundan, onu istatistiksel mekanikten yola çıkarak ispatlamanın bir yolu olmalıdır. Gerçekten bu türden bir genel ispat bulmak zor olacaktır. 1980'lerin sonunda Schiffer ve doktora sonrası araştırmacı Eduardo Guendelman ile birlikte ispatın bazı özel durumlarını elde ettik, ama genel ispatın yakınına bile yaklaşamadık.

Şimdiye kadar kimse istatistiksel fizikten yola çıkararak entropi sınırının genel bir ispatını veremedi. Oysa sınır, k t le ekim fizi inden kolay bir şekilde elde edilebiliyor! Bu sınır, belki de daha keskin olan diğer sınırlara atlamak için sıçrama tahtası vazifesi görebilir. Bu şekilde, eski   rencim Gour, henüz doktora sonrası araştırmaları sırasında, evrensel sınırdan yola çıkararak entropi üzerinde çok daha keskin bir sınırın var olduğu sonucuna ulaştı ve diğer insanların çalışmalarında hemen destek buldu. Gour'un sınırı da Newton'ın sabitinden bağımsızdır.

G r n   ne rağmen, entropi üzerindeki sınır k t le ekimle ilgili bazı bilgiler taşır. Bir kara delik saf k t le ekimsel bir cisimdir. Doğru, bir kara delik çöken maddeden meydana gelmiştir, ama bu maddenin belleği kara deliğin özellikleri arasında bulunmaz; bu, daha önce tartı tı ım "kara deliklerin saçı yoktur" kuralının özüdür. Şimdi, eğer biraz önce verdiğim sınır ifadesindeki, sistemin yarıçapı R yerine küresel bir kara delik için olan $2GM/c^2$ (M kara deliğin kütlesi) ifadesi, enerji E yerine de Einstein'ın formülündeki Mc^2 ifadesi yerleştirilirse, kara deliğin entropisi üzerindeki sınırın, kara deliğin alanının (yarıçapı $2GM/c^2$ ifadesinin karesi) Planck uzunluğunun $\sqrt{G\hbar/c^3}$ karesine bölümüyle oranlı olduğu bulunur. Bu, kara delik entropisine (S_{BH}) benzer; sayısal faktörlere dikkat ederek, kara deliğin entropisi üzerindeki sınırın tam olarak S_{BH} 'e karşılık geldiği bulunur! Böylece entropi sınırı, içeriği bilinmeyen sıradan bir kutuya uygulanabildiği gibi, saf k t le ekimsel kara deliklere de uygulanabilir.

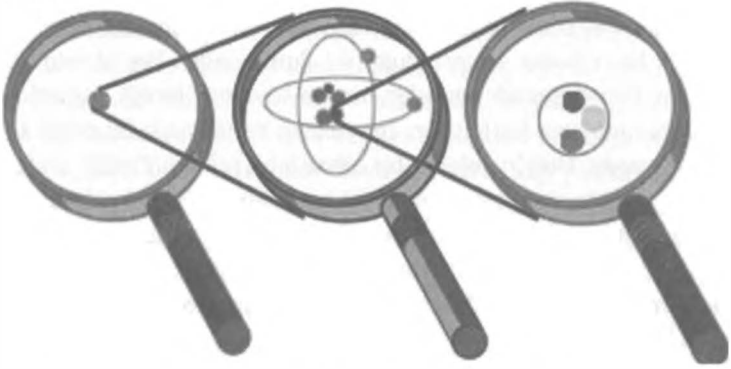
Ama entropi sınırı sıradan, k t le ekimsel olmayan fiziğin bir  zelli iyse, kara delikler ve k t le ekim onu nasıl bilebiliyor? Bilmeliler çünkü sınırı onlardan elde edebiliyoruz. Mesele  u ki, herkesin bildiği gibi k t le ekim tüm fiziksel şeyler tarafından üretilir; hem Newton hem de Einstein'a göre k t le ekim alanına biraz olsun katkısı olmayan maddesel bir şey yoktur. Şimdi, bilgi daima maddesel bir şeye kaydedilir, belki ı ı ın polarizasyonu kadar zayıf ama yine de maddesel bir şeye. Böylece bilgi k t le ekime katkı sağlamak zorundadır. Entropi maddesel şeylerin bir özelliği olarak da bilinir. Yani o da k t le ekime katkı sağlamalıdır. Bu yüzden k t le ekimin, bize kara delikler aracılığıyla entropi sınırını vermeye yetecek kadar bilgi ve entropi hakkında bilgi sahibi olduğu kuşku götürmez. Üstelik bunu fiziksel dünyanın

tüm seviyelerinde bilmelidir; büyük ihtimalle henüz gün ışığına çıkmamış olanlar da dahil.

Bu beni entropi veya bilgi kapasitesini veren diğer yöntemler karşısında entropi sınırının sahip olduğu güçlü bir avantaja değinmeye itiyor. Bir sistem ne kadar fazla içsel yapıya sahipse, o kadar fazla bilginin onun içerisinde saklanabileceğini herkes bilir. Örneğin, size bir sistemin 100 adet benzer cihazdan meydana geldiği söylendi ve bu cihazlardan her birinin iki farklı durumda bulunabileceğini fark ettiniz. Dış görünüşe bakılırsa bu sistemin içerisinde 100 bitlik bilgi saklayabilirsiniz. Ama sonradan rastlantı eseri her cihazın sahip olduğu iki durumundan her birinin de aslında, denediğinizde birinden birinin söylenebileceği, 16 farklı durumu olduğunu keşfettiniz. Bu yüzden her cihazda iki değil 32 durum vardır. Bunun anlamı, bir cihaz 5 bit (çünkü $2^5=32$) saklayabilir ve tüm sistem gerçekte 500 bit tutabilir. Eğer bunların da altında yatan daha fazla durum olduğunu keşfederseniz, ulaşabileceğiniz daha da fazla bilgiyi saklayabilirsiniz demektir. Bu maksimum entropiye de uygulanır; sistemin ne kadar derinine baktığınıza bağlıdır.

Fizik tarihi, fiziksel sistemlerde yeni yapı katmanlarının keşfedildiği birçok örneğin kaydını tutar. Antik Yunan filozoflarının olduğu kadar on dokuzuncu yüzyıl bilim insanlarının da görünmez olarak kabul ettiği atomun 1911’de bir çekirdek ve birkaç elektrondan meydana geldiği keşfedilmiştir. Daha sonra çekirdeğin de proton ve nötronlardan meydana geldiği keşfedildi (1932) ve proton ile nötronların da kuark üçlülerinden meydana geldiği ortaya çıktı (1964). Böylece istatistiksel mekaniğin yöntemlerinden yararlanarak belirli bir sistemin maksimum entropisi hesaplanırken, sonuçların, keşfedilen her yeni fizik katmanıyla birlikte yenilenmesi gerektirir. Asla nihai bilgi kapasitesinin bilindiğinden emin olunamaz. Ama entropi üzerindeki sınır bu probleme karşı bağımsızlığa sahiptir. Bazı gizemli yollarla fiziksel sistemlerin kaç adet altyapı katmanına sahip olduğunun farkındadır. Bu doğru olmasaydı, bir cisim bir kara deliğin içerisine bırakıldığında termodinamiğin genelleştirilmiş ikinci yasasının doğru çalışacağı asla garanti edilemezdi, çünkü yapının birçok katmanı olması bu cismin entropisinin potansiyel olarak büyük olmasına yol açar ve kara deliğin, alanındaki daha büyük bir genişlemeyle

bunu dengelemesine izin vermezdi. Sınır bize aynı zamanda fiziksel dünyada yalnızca sınırlı sayıda altyapı katmanını olduğunu söyler; kuarklar tekrar ve tekrar *ad infinitum*⁶ alt bölümlere ayrılmaz. Eğer bu yapılabilseydi, tüm cisimlerin gerçek entropisi sonsuz olurdu ve bir cismin bir kara deliğe düşüşü hususunda genelleştirilmiş ikinci yasa daima hatalı olurdu. Fizikçilere maddenin *ad infinitum* alt bölümlere ayrılamayacağını söyleyen birkaç başka yöntem daha olmasına rağmen, hiçbiri bu basitlikte değildir.



Şekil 5. Sıradan maddenin altyapısının 4 katmanının bir gösterimi: Atomlar, elektronlar, çekirdek ve protonlar, nötronlar ile onların kuark bileşenleri.

1981’de araştırma izninden döndükten kısa süre sonra “kara delikler ve gündelik fizik” üzerine, entropi sınırına ilişkin düşünceleri içeren bir denemeyi, Birleşmiş Devletler’deki Kütleçekim Araştırma Vakfı’nın her sene düzenlediği saygın bir yarışmaya gönderdim. İki sefer önce bu prestijli yarışmada ödül kazanmayı denemiştım, ancak sadece kibar bir “mansiyon ödülü” alabilmiş-tim. Kendime şunu dediğimi hatırlıyorum; bu sefer konu güzel, önemli gelişmelerle bağlantılı ve bir şey kazanmalıyım; eğer olmazsa, tekrar denemeyeceğim. Mayıs ayında vakfın direktöründen gelen mektup sevindiriciydi, yarışmada birincilik ödülünü kazandığımı bildiriyordu ve bir de çek içeriyordu. Daha sonra aynı yıl fizik alanında Landau Ödülü’ne layık görüldüm (kara delik termodinamiği için). Landau Ödülü çeşitli disiplinlerde

6 Sonsuza dek.

sadece İsraili bilim insanlarına verilen bir ödüldür; kendi üniversitemde onu kazanan ilk öğretim üyesiydim (altı yıl sonra kendisi de Ben-Gurion Üniversitesi'nde fizik profesörü olan kayınbiraderim Raymond Moreh de bu ödülü kazanacaktı). Kısa süre sonra ikinci oğlumuz Uriya doğdu.

Amerikalılar'ın bir deyişi var, "*it does not rain, but it pours*"⁷. O günlerde tam olarak bu oldu. 1982'nin sonlarında Ben-Gurion Üniversitesi tarafından bana bir kürsü verileceği ve kürsünün hangi konuya adanacağını belirlememin rica edildiği bildirildi. Enine boyuna düşünmeden "astrofizik" olsun dedim, çünkü o aylarda her zamankine göre daha çok astrofiziğe bulaşmışım. Böylece, 1983'te New Yorklu hayırsever Arnow ailesi tarafından Ben-Gurion Üniversitesi'nin Arnow Astrofizik Kürsüsü kurulmuş oldu. Dünyanın gidişatında şansın etkisi büyüktür. O zamanlar kütleçekimle daha fazla ilgileniyor olsaydım, Ben-Gurion Üniversitesi'nden istifamla birlikte ayrıldığım kürsü kütleçekim üzerine olabilirdi. Yeni kurumum olan Kudüs'teki İbrani Üniversitesi'nde, 1993'ten beri Polak Kuramsal Fizik Kürsüsü'nün sahibiyim.

1 Ocak 1985'te kızımız Rivka doğduktan sonra, ikinci akademik iznimi planlamaya başladım. Bilha "bu sefer tek bir yere gidelim!" dediği için ikinci iznim yalnızca Toronto'daki Kanada Kuramsal Astrofizik Enstitüsü'nde geçti. Ama bundan önce beşimiz üç aylığına Austin'e gittik. Wheeler bu zamanı kendi grubuyla geçirmem için beni davet etmişti. Görünüşe göre bilgi transferi üzerine yaptığım çalışmaları takip ediyormuş. 1986'nın Şubat ayında ofisinde görüldüğümde, beni selamladıktan sonra, "yarın 'bilgi ağırlık yapar mı?' başlıklı bir seminer vereceğini biliyor muydun?" demişti. Wheeler'ın tipik bir özelliği sizi şaşırtmasıdır. Seminer olacağını düşünmemiştim bile ve bir şeyler hazırlamak için hızlı bir çalışma yapmam gerekmişti. Konu, şüphesiz, entropi üzerindeki sınır ve onun bilgiyle ilişkisiydi. Wheeler bununla özellikle ilgileniyordu çünkü temel fiziğin bilgidен meydana geldiğine ilişkin büyüyen bir inanca sahipti. Ona göre tüm fiziksel yasalar yerlerini, fiziğe hükmeden ilke olarak bilgiye teslim ediyormuş gibi görünüyordu. Bu yüzden

7 İyi şeyler veya aksilikler bir kere geldi mi üst üste gelir –ç.n.

doğal olarak entropi sınırının tam olarak neyle ilgili olduğunu öğrenmek konusunda meraklıydı.

Seminerden sonra entropi sınırını haberleşme meselesine uygulamaya yoğunlaştım. Bilgi kuramcıları bir yerden bir yere bilgi transferine “haberleşme” der. Bazen bilgiyi ele alan kurama “haberleşme kuramı” denildiği de olur, çünkü bu alanın doğuşu sırasında Shannon gibi insanların aklındaki ilk soru, bilginin ne kadar hızlı transfer edilebileceğiydi. Probleme ilişkin ilk dokunuşumu, ilk iznimin Princeton’daki yarısında yapmıştım ve bir kaynaktan hedefe hareket eden bir bilgi paketini düşünerek haberleşme üzerinde basit bir sınır elde etmiştim. Paketteki bilgi içeriği entropi üzerindeki sınır tarafından kısıtlanmışken, paketin hızı ise görelilik kuramı tarafından en fazla ışık hızına erişecek şekilde kısıtlanmıştır. Bir araya getirilen iki limit, bilginin hedef tarafından alınma hızının sınırını belirler. Haberleşme hızı (saniye başına d ş en bit sayısı ile  l    r)  zerindeki bu sınırın, basitçe bilgi paketinin enerjisinin Planck’ın kuantum sabitine b l  m ne karşılık geldiği g r   r. Austin’de, Wheeler’ın düzenli kışkırtmaları altında, bu yeni sınır daha genel bir şekilde anlamaya çabalıyordum.

Haberleşmeye bakış yöntemim, o zamanlar, geleneksel bilgi kuramcılarınınkinden oldukça farklıydı. Onlar belirli bir haberleşme sistemini, diyelim ki fiber optik bağlantıyı, analiz etmekle ilgilenirler ve bilgi nasıl kodlanmalı ki bağlantı boyunca en hızlı ve mümkün olan en az hatayla aktarılabilsin diye sorarlar. Bense, enerji gibi belirli bir fiziksel kaynak verildiğinde, hangi yöntem veya kodlama tekniğiyle kullanılmış olursa olsun, maksimum haberleşme hızıyla ilgileniyordum. Orjinal entropi sınırında olduğu gibi, bu soru pratik değerlendirmelerin bir adım dışındadır ve fizik yasaları uyarınca ortaya çıkabilecek tüm durumları karşılamaya çalışır. Austin’deki daha detaylı çalışmamın sonuçları, mesajın enerjisinin Planck’ın kuantum sabitine b l  m n n bilginin iletilme hızı üzerinde mutlak bir sınır teşkil ettiğini doğruladı.

Bu sonuç yaygın kanıdan farklı görünüyordu. D.S. Lebedev ve Lev B. Levitin’in Moskova’daki 1962 tarihli çalışmasından bu yana bilindiği üzere, kuantum kuramına göre düzenli bir enerji akışının bilgi akışına eşlik ettiği bir hat boyunca haberleşme hızı, hattın gücü (saniye başına d ş en enerji) ve sıcaklığının belirli bir

fonksiyonudur. Burada sıcaklık, hep var olan ve bilgi akışını köstekleyen gürültü ile ilişkilidir. Düşük sıcaklıklar (neredeyse gürültüsüz hat) için, Lebedev ve Levitin maksimum haberleşme hızının (saniye başına düşen bit sayısı cinsinden) basitçe, gücün kare kökünün Planck'ın kuantum sabitine bölümü olduğunu buldular. Bu sonuç Londra'daki Kraliyet Üniversitesi'nden John Pendry tarafından 1983 yılında yeniden keşfedildi (bu konuda 1961 gibi erken bir tarihten beri çeşitli insanlar tarafından şüpheleniliyordu). Benim sonucum tamamen farklı görünüyordu. Belki de bu yüzden Austin'de yazdığım makale *Physical Review Letters* tarafından reddedildi.

Aslında, o zamanlar zaten benim için net olduğu üzere, bu farklılık makuldu; yalnızca düzenli bir sürattaki haberleşmeyi ele alan Levedev ve Levitin veya Pendry'nin aksine, ben hazırlığımı anlık haberleşmeyi⁸ dikkate alarak yapmıştım. Aslında birbiri ardına ulaşan bilgi paketlerinden meydana gelen düzenli bir bilgi akışı hayal etmiş olsaydım, sonucum yaygın kanıyı elde etmek için kullanılabilirdi. Toronto'daki araştırma ziyaretim sırasında makalenin yeni, uzun ve daha açık bir versiyonunu yazdım. Bu makale, 1987'de "Communication and Enerji" [Haberleşme ve Enerji] başlığıyla *Physical Review*'da göründü. Bilha yeni baskıyı gördüğünde bana, "sen haberleşme hakkında ne biliyorsun?" demişti.

Austin'deki o aylar Wheeler'ın bilim çemberine hoş bir dönüş olmuştı. O zamanlar fizik konuşmak için daha fazla zamanı vardı ve bu konuşmaların birçoğu bilginin –anlamına da vurgu yaparak– fizikteki rolüyle ilgiliydi. Bilgiyle ilgilenen fizikçiler ve bilgi kuramcıları onun nicel değerlendirmesini sıklıkla biçimsel olarak, anlamından veya değerinden bağımsız şekilde yaparlar. Mesela bir fiber optik haberleşme kanalı tasarlamak gibi pratik amaçlar için bu yeterlidir. Ama bu yaklaşım Wheeler için yeterli değildi. "Bilgi anlamıyla birlikte," der o, "evrenin yapıldığı malzemedir."

Wheeler ve ziyaretçileri –her zaman olduğu gibi onlardan çokça vardı– her gün kahve içmek için Austin'deki Pecan Street Cafe isimli bir mekâna giderlerdi. Wheeler oradaki bir tuvaletin

8 *Communication in bursts*. Sürekli yayına nazaran büyük miktarda verinin kısa zaman periyotlarında, kesikli olarak iletildiği iletişim şekli –ç.n.

duvarında bilinmeyen bir filozofa ait, bugünlerde ünlü olan bir duvar yazısı ke fetmi ti; “Zaman, Tanrı’nın her şeyin aynı anda olmasını engelleme yoludur”. Tabii ki zaman fiziğinin oldukça önemli bir niteliğidir. O, hemen her fizik kuramında ortaya çıkar. Bir parça özsaygısı olan her fizikçi kendi yoluyla zamanın gerçekte ne olduğunu (Politeknik’teki ilk denememi hatırlayın) anlamaya çalışmıştır. Bunun  zerine birçok şey yazılmıştır, ama konu kapanmış olmaktan hâlâ çok uzak diye düşünüyorum.

Wheeler yurtsever bir Amerikalıdır; Amerikan güvenlik ve asker  gücüne çok sayıda katkısı olmuştur. Politik anlamda muhafazak rdır ama aynı zamanda oldukça uluslararası bir bakış açısı-na da sahiptir. Yerkürenin neredeyse her yerinde bulunmuş ve birçok milliyetten  ğrencisi olmuştur. Farklı arka plana sahip ki şilerin başarıyla üstesinden geldiğ  i leri takdir etmekten hoşlanır ve böyle şeylerle geldiklerinde yardım etmekten de keyif alır. Örneğın, hayli zeki ama  niversite eğitimi bulunmayan Christodoulou’nun Princeton’daki yüksek lisans okuluna girmesini mümkün kılmı tı. Austin’deki ziyaretimden bu yana Wheeler’la birçok konferansta kar ıla mı  ve 1997’de Wolf  d l ’nü almak üzere İsrail’i ziyaret ettiğinde de onu görmüştüm.

Değindiğim gibi, Austin’den ve İsrail’deki kısa bir soluklanmadan sonra, o zamanlar Kanada Kuramsal Astrofizik Enstitüsü’nün (CITA) direktörü olan Scott Tremaine’in sağladığı hayli hoş araştırma atmosferinde bir yılını geçireceğim Toronto’ya u tuk. Orada  oğ nlukla gökadaların dinamiğiyile ilgili meseleler üzerine çalıştım. Ama aynı zamanda görelî k t le ekim kuramını, Milgrom’un kara madde hipotezine ihtiyacı ortadan kaldırmak üzere ortaya attığı fikirle (bunu 4. Bölüm’de geni  e açıklayacağım) uyumlu hale getirmek için, nasıl deği tirebileceğim sorusu üzerine de çalışıyordum. Bu ikisi dışında, astrofizik bilimine katkım seyrekti, en azından diğ r ilgi alanlarıma nazaran. Bu yüzden, 1988’de fizik dalında Rothschild  d l ’ne layık g r lmememe istinaden gelen bildirim yazısında, kara delik termodinamiğ  ve haberleşme kuramına ilişkin çalışmalarımın yanında astrofiziğ  de aynı şekilde değinildiğini görünce gururum ok anmı tı. Rothschild  d lleri, dört yılda bir pozitif ve beşeri bilimlerin çeşitli alanlarında  alı an İsrailli araştırmacılara verilen ödüllerdir. Benimkisi Ben-Gurion  niversitesi’nden bir  ğretim  yesi-

nin aldığı ilk (ve 2006'ya itibariyle hâlâ tek) Rothschild Ödülü'ydü. Modern İsrail devletinin kuruluşundan uzun yıllar önce kuramsal fiziği Filistin'e getiren ve ismi Kudüs'teki fizik enstitüsüne verilen Giulio Racah, Floransa'daki trajik ölümünden tam da birkaç sene önce, 1961 yılında, ilk Rothschild Fizik Ödülü'nü kazanan kişiydi.

Toronto'dan dönüşümüzden sonraki yıllar Kudüs'teki İbrani Üniversitesi'ne taşınmamın gölgesinde geçti. Ben-Gurion Üniversitesi, –yönetimin iddia ettiği üzere– üniversitenin varlığını tehdit eden ve insanların araştırmasına büyük zarar veren bir ekonomik dengesizlik dönemine girmişti. Bu dönemin en kötü kısmında neredeyse her Pazartesi ve Perşembe günü fakülte ve senato toplantılarının yapıldığını hatırlıyorum. Umumi sorumlulukların yerine getirilmediğine ilişkin serzenişlere maruz kalmadan kendinizi bunların dışında tutamazdınız; ama bu tarz bir karmaşanın ortasında düzenli bir şekilde çalışılamazdı. Bunun sonucu olarak, birkaç öğretim üyesi İsrail'deki başka üniversitelere gitmek üzere ayrıldı.

Ben de onlardan biriydim; o günlerde İbrani Üniversitesi'ndeki Racah Enstitüsü'nün başında olan Avraham Gal'den gelen bir tekliften faydalandım. Enstitüye Ağustos 1990'da vardım; Birleşik Devletler'e yaptığım kısa bir ziyaret sırasında Princeton'daki Wheeler'la konuşmadan önce değil. Ona benim yerimde olsa bu yer değişikliğini yapıp yapmayacağını sormuştum. Wheeler, kendi durumuyla zayıf bir benzerliğe dayanan bu tarz bir soruya keskin bir yanıt verecek kişi değildir. Ama bana söylediği, kendi kariyerinde yıldızının parlamasının Princeton'da olmasından kaynaklandığını hissettiği idi, herhangi bir yerde değil. Bunu, diğer faktörlere aldırıksızın olabilecek en yüksek nitelikteki yerde olunması gerektiği şeklinde yorumlamıştım. Sonrasında kararım-la barışık bir şekilde Kudüs'e hareket ettim.

İbrani Üniversitesi'ne 2 doktora öğrencimi de getirmiştım: Uri Ben-Ya'acov ve Eyal Maoz. Aynı zamanda Ben-Gurion Üniversitesi'nde kalmayı seçen bir üçüncüsü olan Ran Zamir'in de denetmenliğini yapmayı sürdürüyordum. Kara delik termodinamiği üzerine çalışan Uri 1970'lerin sonlarında benimle doktora başlamıştı. Doktora derecesini almaya hayli yakinken çalışmasını askıya aldı. Uri, öğrencilerim arasından en iyi kuramsal fizik tarzına sahip olanı olduğundan, onun ayrılışını

Özel bir kayıp olarak duyumsamıştım. Ama birkaç yıl sonra bitirme çalışmasına geri döndü. Eski araştırmasının vadesini doldurduğunu düşündüğümden ona, o zamanlar daha revaçta olan “kozmik sicimler” konusuna yönelmesini  nerdim. Bu konudaki çalışması oldukça iyi ilerledi ve adı geçen sicimler ile vorteksler arasındaki genel bağlantı üzerine iki derin makale çıkardı. Bu çalışmasının ortasında, derecesini alacağı Kudüs’e taşınmasına neden olmuştu.

Ran ve Eyal ile öncelikle gökadalara dinamiğiyle ilgili meseleler üzerine çalıştık; ekseriyetle dinamik sürtünme, yani bir yıldızın gökada boyunca ilerlerken yıldız kardeşleriyle girdiği sayısız kütleçekimsel etkileşimin bir sonucu olarak hissettiği sürüklenme  zerine. Bu etkiyi ilk kez Nobel  d l  sahibi merhum Hint-Amerikalı astrofizikçi Subrahmanyam Chandrasekhar 1943 yılında söz konusu yıldız üzerindeki tüm bu kısa ömürlü kuvvetleri birbirine ekleyerek hesaplamıştı. Ran ile birlikte dinamik sürtünmenin bir çiftin (birbiri etrafında çember çizen iki gök cisminin) evrimini nasıl etkilediğini inceledik. Bu incelemeyi, iki üyeden her biri için, arka planlarında bulunan gök cisimlerinin kütleçekimiyle ortaya çıkan sürüklenmeyi düşünerek yaptık. İki için kütleçekim etkisi çakıştığından, hesaplama, üstesinden gelmek için özel teknikleri gerekli kılan ilginç karmaşıklıklarla doluydu.

Eyal’le birlikte, dinamik sürtünmeyi, arka plandaki yoğunluk dalgalanmalarıyla sürtünme arasındaki ilişkinin sonucu olarak gözümüzde canlandırarak, genel olarak hesapladık. Bu tür bir *dalgalanma-dağılma* bağlantısı, fiziğin diğer branşlarında da bilinir ve evrensel olduğu kabul edilir. şarşırtıcı şekilde, Chandrasekhar’ın yöntemine göre geçerliliği daha geniş olan bir formül vereceği açık olduğu halde, bizden önce kimse bu bakış açısıyla dinamik sürtünmeyi tam olarak t retmemişti. Yıllar sonra Tremaine, meslektaşı Robert Nelson ile birlikte dalgalanmalara dayanan bakış açısıyla dinamik sürtünme üzerine kapsamlı bir çalışma yapacaktı. Makeleyi internetteki fizik arşivinde görünce, Scott’a, bu yaklaşımın Eyal ve benim tarafımdan bir makalede kullanılmış olduğunu belirten bir e-posta gönderdim ve o da bunu hemen onayladı.

Saygın bir  niversite olan İbrani  niversitesi, kendisinden çok daha geniş bir  niversite olan Ben-Gurion  niversitesi’ne göre ulus-

lararası bilim insanları için daha çok bir kavşak görevi görüyordu. Bu yönü benim için bir kazanımdı. Bu sayede doktora sonrası araştırmacılar için kaynak bulmak daha kolay oluyordu. Diğer yandan, Beersheva'da hatırladığıma göre Kudüs'te kendimi daha fazla ders saatinden sorumlu buldum. Bir konuyu, özellikle de teknikse, öğrenmenin onu öğretmek zorunda olmaktan daha iyi bir yolu olmadığı doğru olsa da, ağır ders yükü gerçekten insanın araştırma verimini kemirebilir. Araştırma için zaman boşaltmak adına, türlü angarya işi halletme yöntemimi optimize etmekte harikalar yaratmışım ama elde ettiğim rahatlama küçük çaplıydı. Bu problemi, basitçe dersleri gerektiği kadar iyi hazırlamayı çözün öğretim görevlileri biliyorum. Hepimizin bu yaklaşımı, dürüst olmadığından ötürü, reddedebileceğini düşünüyorum; herkes bu felsefeye göre davranıyordu yüksek öğrenim kurumlarına sahip olmanın ne anlamı kalırdı?

Üniversitelerdeki araştırmacıların araştırma zamanının ziyanı olarak gösterdikleri şey, çoğunlukla dersler değil ama komite çalışmalarıdır. Bunu erkenden Beersheva'da öğrenmişim; yeni öğretim üyesi olarak gelişimin hemen ardından fizik kürsüsü başkanı, beni çoktan beş farklı komiteye yazdırmıştı. O günlerde araştırmamı bir tek evde, mesai saati sonrasında yapabiliyordum ve bu bekâr olduğum için mümkündü. Bu seçenek evlenmemin neredeyse hemen ardından ortadan kalktı. Bu yüzden yıllar boyu, komitelerin dışında kalmaya çalışmak gibi basit bir stratejiyi benimsedim. Bu asla, modern istatistiksel mekanikğin büyük figürlerinden Norveç doğumlu fizikçi Lars Onsager kadar mükemmel şekilde yapılamaz. Onsager Kimya dalında Nobel Ödülü'nü (kinetik katsayıların simetrisiyle ilgili ünlü kuramı için) kazandıktan sonra Yale Üniversitesi'nde onu ziyarete gelen daha genç bir meslektaş, Onsager'in ofisinde sekiz saat boyunca tek bir kere dahi telefon çalmadan fizik tartışıklarını anlatmıştı! Onsager asla bir komitenin içerisinde olmamıştı.

Bazı komitelerin içerisine sürükleniyorsam da, onlardan asla hoşlanmayacağım. Her yerde olduğu gibi burada da her konu hakkında iki tür görüş duyarsınız; yanlış olanlar ve doğru ama başkası tarafından daha önce dile getirilmiş olanlar. İki durumda da bu görüşlerin taşıdığı bilgi asgari düzeydedir. Kendimi ise uykulu ve tartışmaya müdahil olma isteğinden yoksun halde bulurum. Kamu görevimi komiteler hususunda yerine getirmediğimi

itiraf ediyorum. Ama, İmmanuel Kant'ın ünlü koşulsuz buyru una⁹ kulak verilmelidir: Bir eylemi tüm insanlığın yerine getirmesini dürüstçe dileyebiliyorsanız, o eylem iyi bir eylemdir. Kimse tüm insanların komitelerde yer almasını diliyor olamaz.

1980'lerin sonlarında kara delik termodinamiği göreceli olarak düşük bir profile sahipti; az sayıda yeni şey ke fedilmi ti. Ama konu, 1990'ların başında Kudüs'e henüz yerle ti im sırada büyük bir canlanma yaşamaya ba ladı. Birkaç yıl boyunca tarti ma, daha önce bahsettiğim "bilgi paradoksu" hususunda hiddetlendi. Bu dönemin doruk noktasında, yine Santa Barbara'daki Kaliforniya  niversitesi'nde, Hawking'le kara delik fizi ine ve kuantum k t le ekime önemli katkılarda bulunan James (Jim) Hartle'yle sık sık etkileşimde bulunduğum bir akademik iznindeydim. Santa Barbara'da paradoksla bağlantılı birkaç makale yazdım; onlardan biri entropiyi oyunun içine sokuyordu. Bunlar, o sıralar sayısız fikrin sı radı ı denizdeki bir damla gibiydiler.



Şekil 6. Holografik entropi sınırının bir gösterimi. Herhangi bir sistemin entropi S , sistemi çevreleyen bir k reninin alanı A 'nın Planck-Wheeler uzunluğunun karesine bölümünün  eyre ini geçemez.

O yılların yenilenen tartışması paradoksu çözememiş olsa da, tüm alanı zenginleştiren birçok yeni fikre ortam hazırladı ve dahası sicim kuramı üzerinde etkili oldu diye düşünüyorum. Katı hal fiziği gibi kütleçekim kuramına uzak disiplinler dahi, paradoksu daha iyi anlamak için icat edilen kavramları (mesela, saf durumların karışık durumlara nasıl yol açtığını anlayanın yeni yolları gibi) ödünç aldılar.

1990'ların ortalarında ilgi, bilgi paradoksundan kara delik entropisi ile kara deliğin içsel yapısı arasındaki bağlantıya kaydı. İkinci meseleye sicim kuramıyla bağlantılı olarak daha önce değinmiştim. 1970'lerin başlarında zayıf kuvveti açıklamak için ayar kuramının¹⁰ uygulanmasına izin veren temel adımın mucidi olan Nobel Ödülü sahibi Hollandalı fizikçi Gerard 't Hooft, tam da o sıralarda parçacık fiziğine "holografi ilkesini"ni kazandırdı. Amerikalı parçacık fizikçisi Leonard Susskind'e de bir o kadar borçlu olan bu ilke, kısmen bir entropi sınırıdır. Bu ikinci yaklaşım, herhangi bir sistemin (mutlaka bir kara delik olması gerekmez) entropinin keyfi derecede büyük olamayacağını ve maksimum değer, sistemin etrafındaki herhangi bir kapalı yüzeyin alanı A 'nın Planck-Wheeler uzunluğunun karesine bölümünün çeyreği ile sınırlandırılmış olduğunu ileri sürer. Holografik entropi sınırını formül içerisinde gösterirsek;

$$2 \leq \frac{A}{4L_p^2}$$

Bu eşitsizlik size kara delik entropisi formülünü hatırlattı mı? Bu bir rastlantı değil. Holografik entropi sınırı, o formülün, kara deliklerden dünyadaki diğer tüm şeylere bir uzantısıdır. Bir elma veya hatta bir gökdelen gibi kütleçekimin toplam enerjiye katkısının çok küçük olduğu bir sistem için holografik enerji sınırının, daha önce tanımladığım evrensel entropi sınırından elde edilebileceğini görmek kolaydır. Bu eski entropi sınırı, geçek anlamda daha bilgilendiricidir. Ama bir nötron yıldızı veya evrenin bütünü gibi kütleçekimin baskın etki olduğu bir sistem için, holografik entropi sınırı en iyi bağımsız kural olarak görülür. Holografik ilke ve onunla bağlantılı çeşitli fikirler bugünlerde parçacık fizikçileri ve kütleçekim kuramcılarının tartışmalarının merkezindeki konulardır.

10 *Gauge Theory* -ç.n.

Sonunda k t le ekim fiziğinde ilginin sıcaklık veya ışımaya nazaran entropiye odaklanmasından dolayı memnunum. Değindiğim gibi, Hawking benzeri ışımaların fiziğın diğer pek çok alanında meydana geldiği biliniyor. Bu yüzden, Hawking ışıması özel olarak kara delikler veya kuantum k t le ekimle ilişkili değildir. Tersine, kara delik entropisi ve alanı arasındaki bağlantı, bugün, kuantum k t le ekimin ayar damgası¹¹ olarak tanınıyor. Dahası, değindiğim üzere entropi, holografi ilkesi aracılığıyla evrendeki her şeyin (anlaşıldığı üzere evrenin kendisinin de dahil) birleştirici bir manzarasını sunuyor. Kara delik termodinamiğinin zamanla geçirdiği bu dallanmalara sadece bir dereceye kadar dahil oldum. Konu, bir lisansüstü  ğrencisi olarak başladığım zamandaki basit resmin çok ötesine geçti. Belki de olması gerektiği gibi olmuştur. Fizikteki hiçbir büyük mesele tek bir insan tarafından bütünüyle kavranamaz. Ama bu konuya, henüz net ve tamamlanmamış bir dizi fikirden ibaret olduğu zamanlarda dahil olduğum için kendimi şanslı hissederim. Bu alanın doğuşundaki rolüm genel olarak tanındığı için de aynı derecede şanslıyım; bu 1997’de İsrail Bilimler Akademisi’ne se ilmemin gerekçesi olarak gösterildi.

11 Altın ve gümüş gibi değerli madenlerden yapılan eşyanın saflık derecesini gösteren resmî işaret (TDK) – .n.

4 . B Ö L Ü M

KÜTLEÇEKİMLE İLGİLİ MESELELER

Bilimsel kariyerimin büyük bölümünün ana akım fizikten sapmaları ilgilendirdiğine daha önce değinmiştim. Bu bölümde geleneksel olmayan fiziğin içerisinde geçen iki serüvenimi biraz detaylıca anlatacağım. Onlara daha önce izlediğim kronolojik anlatımdan ayrı olarak yaklaşmak daha iyi olur, çünkü her biri uzun yılları kapsamakta ve henüz tamamlanmış oldukları söylenemez.

Princeton'daki ilk akademik izin dönemim hem eski hem de oldukça modern bir alana girişimin işaretçisiydi: "Değişen doğa sabitleri". Fizik yasalarının tümü iki unsura sahiptir; denklemler ve doğa sabitleri. Doğa sabitleri, denklemlerin davranışlarını ayarlayan katsayıların rolüne bürünür. Ünlü bir örnek, iki kütle arasındaki kütleçekim kuvvetini veren Newton'ın denklemidir. Bu denklem, katsayı olarak, keşfedilen en eski doğa sabitlerinden biri olan Newton'ın sabiti G 'yi içerir. Yirminci yüzyıla kadar kimse G 'nin bir sabit olduğundan şüphe etmemişti. Ancak 1937'de Dirac, evren yaşlandıkça G 'nin aslında küçüldüğünü ortaya attı. Gösterdiği nedenler, yani kozmolojideki hayli büyük saf sayıların varlığı bizi burada ilgilendirmiyor. Dirac bu önerisiyle Pandora'nın kutusunu açtı ve bugün dahi oradan dışarı çıkanlarla mücadele etmeyi sürdürüyoruz. Erken dönem çalışmalarımı epey etkileyen Brans ve Dicke'nin 1961 tarihli kütleçekim kuramının, Dirac'ın çıplak fikrini geliştirme girişimi olduğuna değinmeliyim. Bu son kuramdaki anahtar nokta, G 'yi bir alanla ilişkilendirmek ve bu alanın nasıl evrildiğini bize söyleyen bir denklem bulmak durumunda olunmasıdır. Bunu, G 'nin sadece zamana bağlı değil, evrendeki konuma bağlı olarak da değişmesi takip eder. Uzun yıllar sonra, 1973'te, Dirac G 'ye canlılık aşılamak için kendi alan kuramını yazdı.

Dirac bir kez psikolojik bariyeri yıkınca, tüm doğa sabitlerinin değişkenliğinden şüphelenmek kabul edilebilir bir şey oldu. Ünü kuantum kuramından gelen Alman fizikçi Pascual Jordan, hemen G 'nin değişkenliği üzerine, aynı zamanda ikinci bir doğa sabiti olan “*ince yapı sabitinin*”¹ de değişkenliğini zorunlu kıran bir alan kuramı önerdi. Bu sonuncusu 1916’da Alman fizikçi Arnold Sommerfeld tarafından, kendi geliştirdiği, hidrojenin herkesçe bilinen atomik tayf kuramının peşi sıra tanıtılmıştı. Yüksek hassasiyette bakıldığında, hidrojenin tayfı, bir çizgi için hatalı olabilecek sıkı tayf çizgileri gösterir; bu hata ince yapıyı gösterir. Elektronun elektrik yükünün karesinin h ve c 'ye bölümü olarak tanımlanan Sommerfeld'in sabiti (yaklaşık olarak $1/137$ 'ye karşılık gelen saf bir sayıdır), ana çizgilerin daha geniş aralıklarına nazaran ince yapının ne kadar ince olduğu hakkında bize fikir verir. Ancak Jordan'ın fikri çok fazla etki yaratmadı.

Mesele, kozmolojinin modern kuramının birkaç temel tuğlasını döşeyecek olan renkli Rus fizikçi George Gamow'un 1967 tarihli önerisiyle doruk noktasına ulaştı. O zamanlar Dirac'ın değişen G ile büyük kozmolojik sayıları açıklayan programı çıkmaza girmişti. Gamow, “Dirac'ın zarif fikri”ni kurtarmak için evrenin yaşıyla doğru orantılı olarak değişenin, diğerine nazaran α olduğu hipotezini ortaya attı. Bunu, birçok insanın katıldığı, astronomik yöntemlerin yanı sıra jeokimyasal yöntemlerin de kullanıldığı yoğun bir çalışma dönemi izledi; Gamow'un önermesi sıkı bir teste tabi tutuldu. Bazı örneklerle değinirsek, –ileride Güneş nötrinoları üzerine çalışmalarıyla ünlenecek olan– astrofizikçi John Bahcall ve kuasarların kâşifi astronom Maarten Schmidt, 1967’de radyo bandında yayın yapan uzak mesafelerdeki gökada tayflarındaki ince yapının, söyleyebildikleri kadarıyla, ilgili elementlerin laboratuvar ortamında gözlenen tayflarıyla özdeş olduğunu gösterdiler. Şimdi, ince yapı, α tarafından kontrol edildiğinden, bu radyo gökadalara iki milyar yıl önceki haline² bakarak, bu sayının o zaman zarfında iki binde birden daha fazla değişmediği sonucuna vardılar. Bu, Gamow'un önerisine uymak için hayli yavaş bir değişimdi. Dahası kuantum elektrodinamiği

1 *Fine structure constant.* -ç.n.

2 Işığın seyahat süresi nedeniyle uzak cisimlerin ancak geçmişteki görüntülerini görebiliriz -ç.n.

üzerine çalışmalarıyla tanınan İngiliz-Amerikan fizikçi Freeman Dyson; oldukça yaşlı maden cevherlerinde bulunan, atomik ağırlıkları 187 olan renyum ve osmiyum izotoplarının bolluğunu, cevherin oluşumundan sonraki dört buçuk milyar yılda α değişiyor olsaydı nükleer radyoaktivite kuramının öngöreceği değerlerle karşılaştırdı. Dyson tekrar, α 'daki tüm değişimin, Gamow'un önermesinin gerektirdiğinden birkaç merteye yavaş olduğunu söyleyebildi. Gamow'un fikri ölmüştü.

Bu gelişmelerin değerli olan yanı, Dirac'ınki gibi fikirlerin ve benzerlerinin sadece felsefe olmamasıdır; çağdaş tekniklerle kontrol edilebilirler. Şüphesiz, o zamandan beri geçen yıllarda, sadece α 'nın değil, elektron ile protonun kütlelerinin oranının ve daha az bilinen diğer doğa sabitlerinin değişkenliğinin bilinen limitlerini geliştirmek için birçok astronomik gözlemler, jeo-kimyasal ölçümler ve laboratuvar ortamında fizik deneyleri gerçekleştirildi.

Akademik iznimin ikinci bölümünde α 'nın değişkenliği üzerine kafa yordum. O dönemin makaleleri, α 'daki değişimin (tabii eğer değişiyorsa) evrenin genişleme hızından birkaç merteye yavaş olduğunun gösterilmesine dayanarak, α 'nın aslında çok muhtemel olarak değişmediğini savunma eğilimindeydi ve bu beni rahatsız etmişti. Fizikçiler tek bir zaman ölçeğinin rol oynadığı basit problemlerde bu tarz argümanlara alışkındırlar. Ama düşündüm ki, α değişkenliğinin fiziğinin, problemimize ikinci bir zaman ölçeği getirmediğini kim garanti edebilir? α değişkenliğinin düzeyiyle ilgili keskin öngörüler yapan tam bir kuram elimizde olmadan, meselenin asla kapatılamayacağı sonucuna vardım. Bu bağlamda, Sir Arthur Eddington'ın 1931 tarihli *The Expanding Universe* [*Genişleyen Evren*] isimli kitabındaki isabetli sözleri aklıma geldi:

“Bir bilim insanı genellikle fikirlerini gözlemlere dayandırır, kuramlara değil (...) Uzmanlık alanını uygulamaya döken biriyle hiç karşılaşmadım (...) Gözlem yeterli değildir (...) kanıya varmada kuramın önemli bir payı vardır”.

Deneyler, keskin ama açık fikirli kuramsal öngörülerle karşılaştırılmadığı sürece, kendi başına α değişkenliği meselesini sonuna kadar açıklığa kavuşturma kabiliyetine sahip değildir.

Böylece hâlâ Princeton'dayken, ince yapının değişmesine izin verecek, ama çeşitli korunum yasaları gibi kutsal fizik ilkelerini ihlal etmeyecek bir kuram veya çerçeve geliştirmek üzere harekete geçtim. Jordan'ın ilk kuramına ilişkin bildiklerimden yararlanarak kendimi bazı işlerden kurtarabilirdim. Veya Dicke'nin, 1965 tarihli *The Theoretical Significance of Experimental Relativity* [Deneyisel Göreliliğin Kuramsal Önemi] isimli kitabının ek bölümünde bulunan değişken α kuramı taslağına ilişkin bilgileri kullanabilirdim. Her iki yaklaşım da Gamow'un atılımından önce gelmişti ve sonrasında toplanan verileri değerlendirmek için kuramsal bir örnek olarak kullanılabilirdi, ama onlara bu bağlamda değinildiğini gördüğümü hatırlamıyorum. Böylece sıfırdan işe koyuldum. Değişken α kuramının bir alan kuramı olması gerektiği benim için açtı; α artık bir sabit değil, değeri *nerede ve ne zaman* baktığımıza bağlı olan bir alan olmalıydı. Söz konusu olan sadece evrenin yaşına bağlı bir değişkenlik değil, konumdan konuma göre de bir değişkenlik olacaktı. Ana görev, α 'yı temsil eden alan için bir denklem yazmaktı.

Ben α değişkenliğinin, temel yüklerin (diyelim ki, elektronun yükü) değişkenliğini yansıttığını düşünmeyi seçtim. Bunun sebebi, α 'nın bu yükün karesiyle orantılı olmasıdır. Bu yüzden, elektrik yükünün uzayzamandaki kuvvetini düzenlemek için bir yük skaler alanı tanımladım. Kuytadaki ekinde Dicke, bu bakış açısından ayrı olarak, temel yüklerin sabit olduğunu ancak boşluğun, örneğin cam veya su benzeri bir ortammış gibi dielektrik özelliklere sahip olduğunu kabul eden, fiziksel olarak muadil bir yaklaşıma işaret etmişti. Öyleyse, α 'nın değişkenliği boş uzayın kırıcılığının değişkenliği anlamına gelecektir. Bu ikinci formülasyonun varlığı, α 'nın değişkenliğinin elektrik yükünün korunumu yasasını ihlal etmesine gerek olmadığını açıkça gösterir. Bir vaazda bulunacak olursam, elektrik yükünü bir ortama girerken izlediğimizde, etrafta ölçtüğümüz elektrik alan, sanki yükün kuvveti azalıyormuşçasına dalışa geçer. Gerçekte, gördüğümüz şey sadece malzemenin dielektrik etkisidir.

Belirli herhangi bir fiziksel kuram için korunum yasalarıyla uyumlu denklemler, bir eylem denkleminde³ (kuramdaki alan-

3 *Action* -ç.n.

lardan meydana gelen belirli bir integral) türetilerek elde edilir. Eylem denkleminde yola çıkarak çalışmak, kuramsal fizikçiler için tutulan bir prosedür haline geldi. Bunun sebebi, büyük ölçüde, kuramın uyması gerekebileceği çeşitli ilkeleri yürürlüğe sokmanın, denklemlerle başlamak yerine en baştan eylem denklemiyle çalışarak çok daha kolay olmasıdır. Bu yüzden sıfırdan yeni bir kuram oluştururken ana iş, uygun eylemi yazmaktır. Özel olarak bizim durumumuzda, eylem denkleminin biri maddeyi tanımlayan, ikincisi elektromanyetik alanı tanımlayan ve diğeri de yük alanının dinamiğiyle alakalı olan bölümlere sahip olması gerekiyordu. İkinci bölümü tam olarak Maxwell'in meşhur elektromanyetizma kuramında olduğu gibi bırakmayı seçtim. İlk iki bölüm arasındaki bağlantıyı, elektrik ve manyetik alandan meydana gelen elektromanyetik vektör potansiyeliyle yük alanını çarparak kurdum.

O günlerden birinde, Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde Bahcall tarafından düzenlenen astrofiziksel öğle yemeği seminerine gittim. Orada birçoklarıyla birlikte Dyson'ı da buldum. Bana neyle uğraştığımı sordu ve ben de kuramı geldiği noktaya kadar ona özetledim. Bunun üzerine α 'nın değişmesine izin vererek ayar değişmezliğini⁴ bozmanın kötü bir şey olacağını söyledi. Ayar değişmezliği, fiziksel parçacıklar arasındaki kuvvetleri tanımlayan denklemlerin ve eylem denkleminin sergilediği bir simetridir. Örneğin, Maxwell'in elektromanyetizmasında ayar değişmezi, ölçülebilen elektrik ve manyetik alana veya elektromanyetizmanın eylemin değerine etkimeden, elektromanyetik vektöre belirli bir miktar ekleme yapılabileceği (ayarın değiştirilebileceği) anlamına gelir. Ayar değişmezliği iyi fiziksel kuramlar için kritik öneme sahip bir bileşen olarak kabul edilir ve yük korunumunun temel sebebi olarak bilir. Elektromanyetik vektör potansiyeliyle yüklü alanı çarpma biçimim, elektromanyetizmanın ayar değişmezliğini bozmakla tehdit ediyordu. Geçmişe baktığımda, bence Dyson beni değişken α kuramlarıyla vaktimi boşa harcamamam konusunda uyarmaya çalışmıştı. Ama ben onun ikazını bir meydan okuma olarak aldım ve ayar değişmezliğini kurtarmaya çalışmak için sil baştan işe koyuldum.

4 *Gauge invariance* –ç.n.

1981'de Beersheva'ya d n   m zden kısa süre sonra bu i e gömüldüm. Bu problemi düzeltmenin basit bir mesele olduğu ortaya  ıktı. Elektromanyetik alanı elektromanyetik vektör potansiyeliyle, genellikle yapılandan hafif farklı bir yolla ilişkilendirmek gerekiyordu. Bu yol y k alanını da içeriyordu. O zaman eğer eylem denkleminin elektromanyetik kısmını Maxwell'in elektromanyetizma kuramından alırsam, yeni kuramımda ayar de i mezli i sağlanmış oluyordu. Ama bu, Maxwell'in standart elektromanyetizması değildi, onun geleneksel halinden hafif bir sapmaydı. Böyle olmasının sebebi, benim kuramsal  er evemde y k alanına kendine ait dinamikler kazandırıldığından, Maxwell'in kuramındakilere ek olarak fazladan bir serbestlik derecesine ihtiyaç olmasıydı.

Kuramın diğer kısımlarını oluştururken, ayar de i mezli i ve diğer simetriler gibi güvenilir fiziksel kuramlarda çoğunlukla bulunan kesin kurallara uyan, en genel α de i kenli i kuramını aradım. Bir kuramsal çerçevenin pe indeydim, belirli bir kuramın değil. Yük alanının kendi eylemine istinaden, bir skaler alan için genellikle kullanılan formu kullanmadım; basitçe bildiğimiz formdaki skaler alanı y k alanının logaritmasıyla de i tirerek, onu yeniden düzenledim. Kuramın, y k alanının genel  l  ini belirlemek yerine, sadece uzayzamandaki de i me şeklini belirleyebilmesi gerektiğini düşündüm. Sonuçta genel  l  ek, y k için seçilen birimlerin bir biçimidir; insan yapımıdır, fiziğin bir sonucu değildir. Şimdi, bir fonksiyonun logaritması, fonksiyonun genel  l  ini de i tirdi imizde, sadece bir sabit eklenerek de i ir. Eylemde logaritma diferansiyellendi i için,  l  ekteki bu tarz bir değişim herhangi bir değişim getirmez. Bunun anlamı, α 'nın değişken olduğu bu  er eve içerisindeki denklemlerin, yükün birimine ilişkin tercihten etkilenmeyece idir. Bu anlamda benim kuramım, söz konusu yeniden  l  eklendirmeye birlikte eylemlerinin değerleri değişen Dicke veya Jordan'ın kuramından ayrılıyordu. De inilen kuramlar doğrusu tamamen farklı elektromanyetizma modelleriydi.

Şüphesiz her şeyden önce olu turdu um çerçevenin, elektromanyetizmanın deneysel gerçekleriyle uyumlu olup olmadığını kontrol etmem gerekiyordu. Bartlett'in Princeton'daki deneyine istinaden, iletken malzemedен yapılmış yüklü bir kutunun içeri-

sinde elektrik alan gözlenemeyeceğine değinmiştim. Bu, Maxwell'in elektromanyetizma kuramının (özel olarak Coulomb'un elektriksel çekim yasasının) bir sonucudur ve Bartlett'in deneyi bunu destekler niteliktedir. Farklı yapısına rağmen kendi çerçevemin de içsel elektrik alanların var olamayacağını öngördüğünü buldum. Ama ilginç bir şekilde benim çerçevede Coulomb'un yasası tam olarak doğru değildir; noktasal bir yükten çok kısa mesafelerde elektrik alan, Coulomb'un öngördüğüne göre epey hızlı yükselir. Bunun gerçekleştiği mesafeler, uzunluk boyutlarında bir değişken tarafından belirlenir. Bu, ona doğru boyutları (birim anlamında, ölçü anlamında değil) vermek için yük alanının eylemine katmak zorunda olduğum bir değişkendi. Alandaki patlama düzeyindeki yükselme, deneysel olarak (örneğin, atom tayfındaki anormal davranışlarda) tespit edilemediği için, uzunluk değişkeninin çok küçük olması gerektiğini biliyordum. Onun Planck uzunluğuna yakın olabileceğini dahi düşündüm.

Ama ben bu işe ince yapı sabitinin genişleyen evrende ne hızda değiştiğini aydınlatmak için girmiştim. Bu yüzden çalışmamın ana itkisi, oluşturduğum çerçeveyi evrenimizin bir modeli içerisinde denemektir. Standart bir modelle çalıştım; adını Rus fizikçi ve meteorolog Aleksandr Friedmann, Amerikalı fizikçi Howard Percy Robertson ve İngiliz matematikçi Arthur Geoffrey Walker'dan alan Friedmann-Robertson-Walker (FRW) modeli. Bu modeldeki evren manzarası, daima başta sona düzenli –homojen– bir yapıdadır ve özel yönleri yoktur, yani izotropiktir. FRW iyi bir şekilde incelenmiş bir model olduğundan tek yapmam gereken, modeli arka plan olarak alarak değişken α kuramımdaki denklemleri çözmektir. Yük alanı denkleminin dikkate değer özelliklerinden biri, kaynağının, yani alanı ve onun değişkenliğini gerçekte üreten şeyin, uzaydaki elektrik ve manyetik enerji yoğunluklarının *farkı* olmasıdır. Soru, bu kaynağın ne kadarının bildiğimiz gibi evrende var olduğuydu. α 'nın ne hızda değiştiğini belirleyen buydu.

FRW modelinde evrenin Büyük Patlama anında ortaya çıkan ve o zamandan beri soğuyan termal elektromanyetik ışımayla dolu olduğu varsayılır. Bugün bu ışıma mikrodalga olarak gözlemlenir ve evrenin enerji bütçesinin hayli mütevazî bir bölümü-

nü oluşturur. Ama aslen evrenin enerjisinin çoğu bu ışıma da bulunur. Şimdi, elektromanyetik ışımanın enerjisi elektrik ve manyetik alan arasında daima eşit olarak dağılır. Bunun anlamı, elektromanyetik ışımanın yük alanı yaratmadığıdır. Elektromanyetik enerjinin hesaba katılması gereken bir sonraki önemli kaynağı atom çekirdeğidir; çoğunlukla elektrik enerjisi içerir. Atomun içerisindeki elektronlar da bir kaynaktır, ancak onların elektromanyetik enerjisi nükleer olandan mertebelerce aşağıdadır. Bu yüzden, atom çekirdeklerine has elektrik enerjisinin, α değişkenliğinin asıl kaynağı olduğuna karar verdim. Ama nükleer elektrik enerjisi kendi başına çekirdeğin toplam enerjisinin (Einstein'ın $E = mc^2$ formülü ile hesaplanır) küçük bir kısmını oluşturur ve Einstein'ın denklemleri uyarınca evreni genişlemeye iten şey, tüm çekirdeklerin toplam kütesinin enerjisidir. Bu iki gerçekten ötürü, önerdiğim çerçevede α değişkenliğinin neden evrenin genişleme hızından çok daha yavaş olduğu açıktır. Sayısal olarak evren, bir yılda 10^{10} 'da bir birim kadar genişlerken, α 'nın yılda 10^{14} ila 10^{16} 'da birkaç birim değiştiği öngörü lüyor. Tüm bunlar, çerçevenin uzunluk değişkeni Planck uzunluğundan daha büyük olduğu sürece doğrudur. Daha önce değindiğim deneysel sınırlar, öngörülen α değişkenliğini ekarte edecek kadar güçlü değildir. Böylece α 'nın sabit olduğunun deneysel olarak gösterildiğine ilişkin yaygın inanış hatalıydı. Vardığım sonuç, ince yapı sabitinin burnumuzun dibinde pekala değişebilirdiydi!

Bu ve α değişkenliğinin diğer yönleri üzerine 1982'de yayımladığım makale çok az ilgi çekti. Takip eden yıllarda konuyla ilgili, kuramsal öngörülerini tamamen göz ardı eden, birtakım başka deney ve gözlemler yapıldı. Örneğin, 1996'da Dyson ve Damour, Gana Cumhuriyeti'ndeki bir uranyum yatağında iki milyar yıldır aktif olan nadir bir doğal nükleer reaktör örneğinin bulunduğu meşhur Oklo olayında ortaya çıkartılan verileri yeniden analiz ettiler. Dyson ve Damour o süre boyunca α 'nın senede 10^{16} 'da bir birimden daha fazla değişmiş olamayacağı sonucuna vardılar. Dyson'a gönderdiğim e-postada ona 15 yıl önce Princeton'da yaptığımız sohbeti hatırlattım ve kendi ikazı üzerine doğan çerçevenin tahminlerine göre, α değişkenliğinin, o ve Damour tarafından çizilen sınıra zaten epey yakın olduğunu belirttim. Dyson

verdiği cevapta, doğa sabitlerinin değışimiyle ilgili, kuramdan bağımsız olarak, sadece deneyler aracılığıyla nelerin saptanabileceğiyle ilgilendiğini belirtti. Anlaşılan Eddington'ın sezgilerinden nasibini almamıştı. 2000 yılına gelene kadar atmosfer değışti. John Webb ve Avustralya'nın New South Wales Üniversitesi'ndeki grubu, Pensilvanya Devlet Üniversitesi, Washington Carnegie Enstitüsü, Cambridge Üniversitesi ve San Diego'daki California Üniversitesi'nden meslektaşlarıyla birlikte, α 'daki değışimin, on milyar yıllık zaman zarfında ortalaması alındığında, senede yaklaşık 10^{15} 'te bir birim seviyesinde olduğuna ilişkin bulgularını duyurdular. Ekip yüksek hassasiyetteki yeni bir yöntemden faydalanarak, zamanda milyarlarca yıl önceki halleriyle görüntülenen uzak kuasarların tayflarını analiz etti. Kuasarlarla yapılan önceki α değışkenliği araştırmalarında, bir elementin tayf çizgileri kendi başına dikkate alınmıştı. Yeni yöntem çeşitli elementlerin tayf bilgilerini bir araya getiriyordu ve verileri bu şekilde harmanlamanın doğurabileceği potansiyel hataların da üstesinden geldiği iddia ediliyordu.

Her ne kadar, kuasar spektrumlarına ilişkin yapılan diğer ölçümlerin α değışkenliğinin belirtilerini ortaya çıkarmada başarısız olmasıyla, Webb ve meslektaşlarının iddiaları tartışmaların içine gömülse de doğa sabitlerinin değışkenliği problemiyle ilgili yeni çalışmalara büyük bir ivme kazandırdı. Makalemi yazdığım-dan bu yana ilk kez α değışkenliği kuramları dikkate alınmış oldu. Bu sayede, 2001 yılında Webb ekibinin kuramcısı olan Cambridge Üniversitesi'nden John Barrow, Londra Kraliyet Üniversitesi'nden João Magueijo and Håvard Sandvik ile birlikte benim kuramımı Dicke'nin ikinci formunun dilinde yeniden biçimlendirdiler; onu açıkça yeniden keşfettiler. Benim çerçevemin bu alternatif formunda temel yük gerçekte sabit kalırken, boşluğun dielektrik özelliklerinin değıştiğini hatırlayalım. Fiziksel öngörüler bağlamında bu iki form özdeştir; eldeki problem için hangisi hesapları basitleştiriyorsa, o kullanılabilir. O zamandan beri geçen yıllarda, bu üçlü ve arada onlara katılan başkaları, BSBM ismini verdikleri bu kuramı, bir kısmına makalemde giriş yaptığım geniş çeşitlilikteki problemlere uyguladılar. Tabii onlar, evrenin genişlemesiyle α 'daki değışme hızını daha hassas bir şekilde öngörmek için detaylı kozmoloji modelleri geliştirdiler.

Cambridge-Kraliyet Üniversitesi ortaklığı α 'nın uzaydaki⁵ değişimini de araştırmaya girişti. Bununla ilgili ilginç bir hikâye var. Dicke, kitabının bahsi geçen ek bölümünde, herhangi bir kütleçekim içerisinde (Güneş'in veya bir gökadanınki gibi) α 'nın uzaydaki değişiminin, α 'nın gradyanının kütleçekim alanıyla (saf Newtoncu anlamda) orantılı olacak şekilde gerçekleşmesi gerektiğini tahmin etmişti. Bir skaler alanın gradyanı, skaler alanın bir noktadan bir noktaya değişim hızıdır ve bir vektördür, yani bir yöne sahiptir. Benim çerçevem Dicke'nin tahminini doğruladı ve Dicke'nin vurguladığı gibi, bu uzaysal değişkenlik, eşdeğerlik ilkesi⁶ açısından büyük öneme sahiptir. İlk kez Einstein tarafından genel göreliliğe giriş olarak açık bir şekilde formüle dökülen bu ilke, belirli bir kütleçekim alanında tüm cisimlerin tam olarak aynı şekilde düşeceği önermesiyle başlar. Hem Galileo hem de Newton bu özellik hakkında bilgi sahibiydi ve onu makul bir doğrulukla test etmişlerdi. Einstein'dan beri eşdeğerlik ilkesini, kütleçekimin, uzayzaman geometrisinin eğriliği olduğu fikriyle ilişkilendirmeyi öğrendik. Eşdeğerlik ilkesi tam olarak geçerliliğini sürdürmüyorsa, kuramsal fiziğin bu merkezi prensibinin onarılma zamanı gelmiş demektir. Böylece cisimlerin bir kütleçekim alanındaki düşüşünün evrenselliğini yüksek hassasiyetle kontrol etmek oldukça önemlidir. 1960'larda Dicke ve Princeton'daki çalışma arkadaşları, epey farklı bileşimlere sahip nesnelerin gerçekten aynı ivme ile düştüklerini 10^{11} 'de birlik hassasiyetle gösteren, yüksek doğruluğa sahip bir deney gerçekleştirdiler. Bugünün en iyi sınırı sadece 10 'un birkaç kuvveti kadar daha iyidir. Her halükarda, deneyler dikkate alındığından her şey eşdeğerlik ilkesini destekler niteliktedir.

Ancak Dicke'ye göre, eğer α uzayda kendi öngördüğü biçimde değişiyorsa, kütesinin kısmen de olsa elektromanyetik kökeni olan tüm cisimler –ki bu normal maddelerin tümü için geçerlidir– kütleçekim alanıyla aynı yönde anormal bir kuvvet hissedecektir. Tahta, taş, demir vb malzemeler farklı oranlarda elektromanyetik enerjiye sahip olduklarından, bu çeşitli malzemelerden yapılmış nesnelerin kütleçekim altında düşerken birbirlerinden hafifçe sapsmaları beklenir. Bu, eşdeğerlik ilkesi iflas ettiği için değil,

5 Konum kastediliyor –ç.n.

6 Equivalence principle –ç.n.

Dicke'nin eletromanyetik kökenli kuvveti ek bir kutleçekim kılıfına büründüğü için olur; bu kuvvet farklı nesneler için hafif farklılık gösterir. Dicke, eşdeğerlik ilkesini kontrol etmek için yapılan çok hassas deneylerin, α 'nın değişip değişmediği konusunda bize bilgi verebileceği sonucuna varmıştı! Doğrusu çerçevenin öngörülerini eşdeğerlik ilkesinin mevcut olan en iyi incelemesiyle karşılaştırdığımda, çerçevedeki uzunluk değişkeni Planck uzunluğunun binde biri kadar küçük olmadığı sürece, öngörülen değişimin testi geçmek için çok büyük olduğunu buldum. O zaman Planck uzunluğundan daha küçük bir uzunluğun mantıksız olduğunu düşündüm ve böylece çerçevenin genelliği göz önünde tutulduğunda zoraki olarak eşdeğerlik ilkesini destekleyen deneylerin, α 'nın uzaydaki veya zamandaki değişkenliğini ekarte ediyormuş gibi görüldüğü sonucuna vardım. Görüldüğü kadarıyla doğa kuramın izin verdiği opsiyonu kullanmıyordu.

Ama son yıllarda birçok araştırmacı tarafından α değişkenliğine ilişkin yeni kuramlar önerildi ve 2002'deki yeni bir makale için yaptığım bir hesap fikrimi değiştirmeme yol açtı. Webb'in grubu yeri göğü inleyen iddiasında bulunduktan hemen sonra sicim kuramcılarının vurguladığı üzere, alışılmış dört boyuttan daha fazlasına sahip olan uzayzaman için doğal olarak formüle edilmiş birçok fiziksel kuram, görünür dünyayı tanımlamak amacıyla taşıdığı çeşitli doğa sabitlerinin (α da bunlardan biri) aslında değişken olduğunu öngörüyordu. Birden herkesin gözünde α 'nın değişkenliği kesinlik kazandı. Diğer yandan görünen o ki, enerjilerin düşük olduğu ve kuramların gerçekçi fiziği ilgilendirmeye başladığı durumlarda, benim elektromanyetizmaya ilişkin çerçevem, bazı sicim kuramlarındaki elektromanyetik sektörün sınırlayıcı formu olarak da kendini gösterir. Benim uzunluk ölçeğim sicim değişkenlerinden türetilir ve bu görüşe göre, uzun zaman önce sandığımın aksine Planck uzunluğundan büyük olmasına gerek yoktur. Bu değişen görüş, eşdeğerlik ilkesi testleri ile çerçevenin öngörülerindeki görünürdeki çelişkiyi bertaraf etmeyi başardı.

Çelişkiler konusu açılmışken, Dyson ve Damour'un Oklo doğal reaktörüne ait verileri yeniden değerlendirerek ulaştığı sonuçlar ile Webb ekibi tarafından ortaya atılan pozitif sonuçlar arasındaki çelişkiye değinmek zorundayım. Dyson ve Damour'un α 'nın değişme hızına getirdikleri en iyi sınır, aslında Webb'in ekibinin gözlemlendi-

ğini iddia ettiği hızın altındaydı! Oysa bu resmen mümkün değildir. Ama Webb'in ekibinin incelediği kuasarların 6,8 ve hatta 10 milyar yıl önceki hallerinin görüldüğü hatırlanmalıdır. Oklo reaktörü ise 2 milyar yıldır aktiftir. Sık sık belirtildiği gibi, α 'nın evrenin yaşamının erken dönemlerindeki değişme hızı, yakın geçmişindekine nazaran daha büyüktüyse çelişki buharlaşabilir. Bundan epey ayrı olarak, geçenlerde Barrow ve öğrencisi Motta, iki hızın karşılaştırılmasının komplikasyonlarla dolu olduğunu gösterdiler. En başta, Oklo reaktörünün davranışının α 'daki kozmik değişimi gösterdiği yönünde doğal varsayım yanlış. α alanının zamandaki evrimi, dinamik denge durumuna⁷ ulaşmış kütleçekim sistemlerinin içerisinde sert bir şekilde yavaşlar. Oklo Dünya'dadır, Dünya ise büyük ölçüde denge durumuna ulaşmış Samanyolu gökadasındaki aynı şekilde denge durumunda bulunan güneş Sisteminin içerisinde. Tüm bildiğimiz, Webb ve meslektaşları tarafından keşfedilen, α 'nın çok eski dönemlerdeki görece hızlı değişimi, gökada kümelerinin arasındaki bölgelerde bugün hâlâ sürüyor olabilir. Ama güneş sistemi içerisinde neredeyse durmuş durumdadır. Bu sayede yukarıdaki çelişki ortadan kalkmış olur mu? Bunu zaman söyleyecek.

Şimdi başka bir hikâyeye geçeceğim. 1970'lerde VMT'nin geliştirilmesinde kazandığım uzmanlık, uzun hummalı çalışmalarımda bana iyi hizmet etti. Hikâye, 1981'in sonları veya 1982'nin erken dönemlerinde bir gün, Rehovoth'da bulunan Weizmann Bilim Enstitüsü'ndeki iyi arkadaşım Mordehai (Moti) Milgrom'un Beersheva'da beni telefonla arayıp bana göstereceği ilginç bir şeyi olduğunu söylemesiyle başladı. Daha sonra bana bu fikri duyan ilk bilim insanı olduğumu söyleyecekti. Moti 1980-81 yılları arasında Princeton'ın İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde kendi akademik iznindeyken, astronomide suçu sıklıkla *kara maddeye* (gökadaları ve evreni doldurduğuna yaygın bir şekilde inanılan ancak doğrudan asla gözlemlenememiş olan gizemli madde) yüklenen anormalliklerin, aslında fiziğin standart Newtoncu paradigmanın dışına çıkmasından kaynaklandığı fikrine ulaşmıştı.

Değindiğim gibi, Newton'ın kütleçekim kuramına göre, iki cisim arasındaki kütleçekim kuvvetinin aradaki mesafenin karesiyle ters orantılı olacak şekilde düşmesi gerekir; mesafeyi ikiye

7 *Relaxed state* –ç.n.

katlayın, kuvvet önceki değerinin çeyreği olacaktır. Kuvvet aynı zamanda iki kütlenin çarpımıyla doğru orantılıdır; bir kütleyi iki kat ağırlaştırın, kuvvet iki kat güçlenecektir. Yine değindiğim gibi, Einstein genel göreliliği sunarak bu basit yasayı değiştirdi. Ancak Newton'ın ve Einstein'ın kuramları pratik öngörülerini açısından nadiren ayrılığa düşer. Bir gezegenin güneşiyle arasındaki kuvvet iki kuramda çok az farklıdır; yıldızlar veya gökadalardaki kuvvetler, iki kuram tarafından güncel tüm deneylerin gerektirdiği doğruluk⁸ seviyesine kadar aynı şekilde tahmin edilir.

Bolca tasvir edilen fotojenik spiral gökadalarda, yıldızlar gökada düzleminde dairesel yörüngeler izleyerek dönerler. Bu dönme, gökadanın merkezi bölümlerinin kütleçekimsel çekişini dengeler ve yıldızların içeriye doğru sürüklenmelerini önler. Spiral gökadalardaki maddenin gerçekte gözlemlenen kütleçekim alanı hesaba katıldığında, Newton kuramı, gökadanın dış kısımlarında yıldızların yörünge hızlarının dışarı doğru azalması gerektiğini öngörür. Bu yüzden astronomlar spiral gökadalardan azalan “dönme eğrileri”ni⁹ (dönme hızının, gökadanın merkezinden olan uzaklığa göre çizilen grafiğine dönme eğrisi denir) desteklemesini beklediler. 1970'lerden itibaren çok sayıda gökadanın dönme eğrilerini, yıldızların iyice az olduğu ancak hidrojen gazının yörüngelerinin bulunduğu bölgelere kadar ölçmek mümkün oldu ve herkese sürpriz olacak şekilde dış kısımlardaki dönme eğrilerinin genellikle oldukça düz olduğu ortaya çıktı. Bu bulguyu açıklamanın en açık yolu, astronomların çoğunun benimsediği üzere, gökadalarda aslında görebildiğimizden çok daha fazla maddenin bulunduğu ve bu sayede kütleçekim alanının öngörülenden yüksek olup yıldız veya gaz bulutlarının hızlı dönüşünü dengeleyebildiğiydi.

Fazladan madde *kara* olmalıdır, çünkü gerçekten görünmezdir. Sadece ısıldamamakla kalmaz, aynı zamanda astronomların hidrojen bulutlarını “gördüğü” radyo dalgalarıyla da görünmez. Kara maddenin bileşimi bu güne değin bir sır olarak kaldı. Açık olan tek şey, kara maddenin gazların hareketine eşlik eden sürtünmeden (teknik olarak viskozite) muaf olduğudur. Bu böyledir, çünkü göka-

8 *Accuracy* –ç.n.

9 *Rotation curves* –ç.n.

daların yıldızsız kısımlarına kadar uzanan dönme eğrisinin düzlüğü, yukarıdaki kavrayışa göre, kara maddenin dağılımının yıldızlar ve hidrojen gazına nazaran daha dış kısımlara doğru uzandığını ifade eder. Astronomlar gökadalarn kara halesinden¹⁰ söz ederler. Eğer kara madde sürtünmeye tabi olsaydı, özellikle de oluşum aşamalarında gökadanın iç kısımlarına doğru hareket etme eğiliminde olurdu ve bu kadar yayılmış vaziyette kalamazdı. Tuhaf niteliklerine rağmen, kara haleler otuz yıldır astronomi düşünüsünün en tepesinde saltanatını sürmektedir.

Milgrom düz dönme eğrilerinin kara maddeyle açıklanmasına itiraz eden ilk kişi değildi. Ama sıklıkla kabahati kara maddeye yüklenen birçok olguyu bir araya getiren, verimli ve derli toplu bir formül öneren ilk kişiydi. Bu doğa görüşüne göre, maddenin ivmesinin büyüklüğünün belirli bir evrensel ivme ölçeği, $a = 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$, ile karşılaştırıldığında epey zayıf olduğu durumda, maddenin ivme vektörü a , artık Newton kuramının buyurduğu gibi çevresel kütleçekim vektör alanı g 'ye eşit değildir. Yeni bir bağıntıyla gösterilir ($|a|$ ifadesi a vektörünün büyüklüğünü ifade eder): $|a| = a_0 g$

Buradaki g , Newton kuramında olduğu gibi hesaplanır; örneğin bir küresel M kütesinden r uzaklığındaki GM/r^2 büyüklüğü GM/r^2 'dir. Moti, yukarıdaki denklemin özel bir durumuna karşılık geldiği bu paradigmaya "Düzenlenmiş Newton Dinamiği"¹¹ veya "MOND" ismini verdi.

Peki MOND düz dönme eğrilerinin gizemini çözmeye nasıl yardımcı olur? Newton'ın, basit denklemi $a=g$ ile hareketlerini detaylı bir şekilde açıkladığı güneş sistemi'nin, sağlam inşa edilmiş gerçekleriyle çelişmez mi? İlk olarak, yukarıdaki MOND denkleminin sadece $|a|$ 'nın a_0 'dan ciddi anlamda düşük olduğu durumlarda kullanıldığını tekrar etmeliyim. Güneş sisteminden ivmeler (özellikle merkezci) çok daha büyüktür; örneğin, Güneş etrafındaki yörüngesinde Dünya'nın ivmesi a_0 'a göre 100 milyon kez daha güçlüyken, Plüton'ununki ise 100.000 kez daha güçlüdür. Bu tarz durumlarda MOND bizi Newton'ın kuramını sahiplenmeye yöneltir. Samanyolu Gökadası'nın merkezine yakinken, yıldız-

10 *Dark halo* -ç.n.

11 *Modified Newtonian Dynamics* -ç.n.

ların ve gaz bulutlarının ivmeleri a_0 'dan birkaç kat büyüktür, böylece Newton fiziğinin orada kabaca doğru olmasını bekleriz.

Ama Samanyolu Gökadası'nın ve birçok benzer spiral gökadanın dış kısımlarındaki ivmeler a_0 'ın hayli altındadır, bu yüzden Milgrom'un yukarıdaki formülünü (veya bir şekilde a_0 'ın altında veya üstündeki ivme rejimlerini açıklayan daha detaylı olanını) kullanmamız gerekir. Şimdi, bir v hızıyla r yarıçapında bir daire çizen bir cismin merkezci ivmesi v^2/r 'dir. Newton'a göre g 'nin büyüklüğü için GM/r^2 ifadesini (buradaki M , gökadanın görülebilir kütesinin çoğunu oluşturan iç kısımlarının kütesidir) kullanabiliriz. Tüm bunları MOND formülünde yerine koyarsak, iki taraftaki $1/r^2$ faktörleri gider, böylece v 'nin r ile değişmesine gerek kalmaz. MOND, bu yüzden, gökadaların dış kısımlarındaki düz dönme eğrileriyle uyumludur ve bunu kara maddeyi yürürlüğe sokmaya ihtiyaç duymadan yapar. Bunun dönme eğrilerindeki düzlüğü gerçekten açıkladığını söyleyemeyiz, çünkü formül akılda bu uygulama varken tasarlanmıştır. Ama bu yerine koyma işleminden ayrıca $v^4 = Ga_0 M$ eşitliğini de öğrenmiş oluruz.

Bu halihazırda zaten bir öngörüdür; bir spiral gökadanın görülebilir kütle dönmeye eğrisinin düz kısmındaki dönme hızının dördüncü kuvvetiyle doğru orantılı olmak zorundadır.

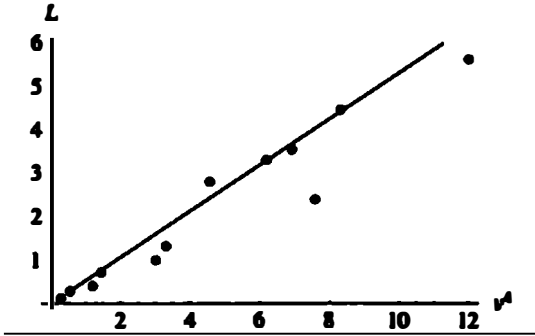
Bunun çalışıp çalışmadığını nasıl kontrol ederiz? Tipik bir spiral gökadada kütle önemli bölümü küçük yıldızlarda (Güneş'imizden daha küçüktürler) barınır. Bunlar daima kırmızımsıdır ve enerjilerinin çoğunu kızılaltı ışık formunda yayarlar. Öyleyse, istatistiksel olarak bir gökadanın kızılaltı ışıma gücü¹², kütleyle (gökadanın kızılaltı ışık yayan kaç adet küçük yıldız barındırdığını belirler) doğru orantılı olmalıdır. O halde MOND'un öngörüsü, spiral gökadaların kızılaltı ışıma gücünün aşağıdaki yasaya uyacağı yönündedir: $L \propto v^4/Ga_0$

Buradaki $\propto$ "orantılı" anlamına gelir. Aslında, Moti'nin MOND'u açıklayan makale üçlemesini *Astrophysical Journal*'a yolladığı 1982'nin başlarına kadar, bu türden bir yasanın hakikaten geçerli olduğuna ilişkin çoğalan kanıtlar vardı (Şekil 7'ye bakın); ilk kez 1977'de Brent Tully ve James Richard Fisher tarafından kısmen farklı terimlerle formüle dökülmüştü. Bugün

12 Luminosity –ç.n.

Tully-Fisher yasası, astronomide bilinen en keskin bağıntılardan biridir ve uzaktaki gökadalara olan mesafenin belirlenmesinde kullanılan güçlü bir metodun merkezindeki formüldür. MOND'un Tully-Fisher yasasına getirdiği açıklamanın sadeliği ve doğruluğunun kara madde tablosu içerisinde eşinin bulunması zordur.

MOND ayrıca dönme eğrilerinin detaylı şeklini açıklamada kara maddeye üstün gelir. Dönme eğrilerinin dış kısımlarda düz olduğuna değinmiştik. Ama iç ve orta kısımlarda eğriler yükselir ve çeşitli yumru ve kıvrımlar sergiler ki bunlar düz bölgeye dahi giriş yapabilir. Herhangi iki dönme eğrisi tamamen birbirinin aynısı değildir. MOND ışığın disk boyunca dağılımına dayanarak, bağımsız yumru ve kıvrımlarına kadar bir dönme eğrisinin şeklini tahmin eder. Tek ilave varsayım, ışık dağılımını kütle dağılımına dönüştüren faktördür. Dönme eğrilerinin ölçümü geliştikçe ve aynı gökadalara için ışık dağılımları yüksek doğrulukla ölçüldükçe, fiziksel olarak makul dönüşüm faktörünün seçilmesi konusunda MOND'un tahminlerinin genellikle isabetli olduğu netlik kazandı. Bir kara madde halesi için dönme eğrisini (gözlemlenen eğriyle iyi bir uyum içerisindedir) tahmin etmek için, araştırmacıların, ışıktan kütleye dönüşüm faktörünün değeri için bir varsayımda bulunması ve buna ek olarak en az iki değişkeni uyumlu şekilde ayarlaması gerekir. MOND gerçekten de çok daha ekonomik bir tasarıdır.



Şekil 7. Küçük Ayı kümesindeki bazı spiral gökadalara için Tully-Fisher yasası. Her nokta bir gökadanın gözlenen kızılaltı ışımaya gücünü (birimi Güneş'in ışımaya gücünün 10^{10} katı) gösterir. Işıma gücü dönme eğrisinin düz kısmında ölçülen dönme hızının dördüncü kuvvetine (birimi $10^8 \text{ km}^4/\text{s}^4$)

göre çizilmiştir. Verilerin alındığı yer: R.H. Sanders ve M.A.W. Verheijen, 1998, Astrophysical Journal, 503, 97-108. Düz çizgi, ışıktan kütleye dönüş faktörünün, Güneş kütlesi başına düşen Güneş'in ışıma gücünün 0,4'ü olduğu varsayıldığında, MOND'un tahminini gösterir.

MOND gökadalarda neden bu kadar iyi çalışır? Basit MOND formülünün arkasında yatan fizik nedir? Moti'nin bu konudaki duruşu daima ikircikli olmuştu. Önerdiği cevaplardan birine göre MOND ivmeler düşükken eylemsizliğin¹³, yani Newton'ın $a=g$ denkleminin sol kısmının yeniden düzenlenmiş bir halini yansıtıyordu. Düşündüğü diğer bir alternatif ise, $a=g$ denkleminin hâlâ doğru olmasına rağmen, çok zayıf kütleçekim alanları için Newtoncu paradigmadan sapan şeyin, kütleçekimin doğası olduğudur. Şüphesiz bu ikinci alternatifte g , Newton'ınki değil, yeniden düzenlenmiş bir kütleçekim alanıdır. Hangi görüş doğru olursa olsun, o erken dönemlerdeki konuşmalarımızdan birinde Moti bana MOND denklemiyle ilgili bazı problemler olduğunu söylemişti. Eğer onu tüm parçacıkların hareket yasası olarak kabul edersek, momentumun korunumu yasası ihlal ediliyordu. Moti bu problemten kaçınmak için MOND denklemini sadece bazı büyük kütleli cisimlerin oluşturduğu arka plan üzerinde hareket eden hafif parçacıklar (bir gökadanın alanı içerisinde hareket eden bir yıldız veya hidrojen bulutu diyelim) için kullanıyordu. Tully-Fisher yasasını bu şekilde elde etmiş ve dönme eğrilerinin şekillerini açıklamaya başlamıştı. MOND ile veriye uydurulan neredeyse tüm dönme eğrilerinde kullanılan strateji budur; Robert Sanders'ın Hollanda'daki Groningen Üniversitesi'ndeki grubunun yaptığı buna bir örnektir. Bu durumda sadece hafif cismin momentumunun korunması için bir sebep yoktur. Ama bu numaranın yetersiz kaldığı durumlar da vardı. Örneğin, Samanyolu ile Andromeda'daki komşusu büyük spiral gökada M31 gibi iki büyük kütleli gökada birbirleri etrafında yörüngeye girdiklerinde, ikisinin toplam momentumu korunmalıdır. Ama MOND denklemini baz alırsak bu olmaz. Dolayısıyla Moti biraz endişelenmişti.

Düzenlenmiş eylemsizlik yaklaşımının, kabul edilmiş fizik ilkelerini koruyarak, bu problemi genel anlamda çözmek için nasıl iyileştirilebileceğini o zamanlar görememiştim ve hâlâ da

13 *Inertia* -ç.n.

göremiyorum. Ama Newton'ın kütleçekimini yeniden düzenlemenin, onu tamir etmek için bir şansı olduğunu hissettim. MOND'a benzeyen bir şey elde etmek amacıyla VMT kuramını elden geçirerek bir miktar zaman harcadıktan sonra, doğrudan Newton'ın kütleçekim kuramını düzenlemeye girişmeye karar verdim. 1982'nin başlarında kütleçekim kuramı için, a_0 sabitinin bir değişken gibi davrandığı uygun bir eylem buldum. Kütleçekim alanı a_0 'a göre büyükken, eylem, Newton'ın (eğer kendi zamanında eylem formalizmi var olsaydı) kendi kuramı için yazacağı forma dönüyordu. Ama eylemden gelen alan denklemi, zayıf alanlar için Newton'ın kuramındakinden farklı oluyordu. Eylem içerisinde serbest bir fonksiyon ayarlayabilirdim, böylece küresel simetrisinin olduğu durumda, kütleçekim alanı tam olarak MOND denkleminin gerektirdiği gibi olacaktı. Daha az simetrisinin olduğu durumlarda, yeni kütleçekim alanı MOND denkleminin işaret ettiğinden biraz farklı olacaktı, ama çok da değil. Bu şekilde, momentumun korunumu problemini çözdüğümü biliyordum. Eğer bir kuramın denklemleri düzgün şekilde oluşturulmuş bir eylemden kaynağını alıyorsa, bu kuram tüm korunum yasalarına uyar. Bunu hemen kontrol ettim; her biri diğerlerinin –düzenlenmiş– kütleçekimi karşısında hareket eden keyfi sayıdaki kütlelerin toplam momentumu daima korunur.

Moti sonuçlardan cesaret kazanmıştı; ortaklığımız onun yeni denklemlerin bir dizi yeni uygulamasını bulmasıyla ileri taşındı. Örneğin, saf MOND denklemi tarafından ortaya konan diğer bir problemi gidermeyi başardı. Bir yıldızı hayal edin; içerisinde a_0 'dan mertebelerce yüksek ivmeler altında hareket eden çok sayıda atomik boyutta parçacıktan oluşmuş olsun. MOND'un kurallarına göre dahi, bu yıldız Newton dinamiğine tam olarak uymalıdır. Ama bu yıldız bir gökada diskinin dış kısımlarında dairesel hareket yaparken baktığımızda, merkezci ivmesinin Newton'ın kuramının öngördüğünden (karalılık maddenin olmadığını varsayarsak) çok daha büyük olduğunu buluruz; aslında yıldız bir bütün olarak MOND denklemine göre hareket eder. Burada net bir çelişki vardır. Ama eylem denklemine dayanan kurama göre, bir parçacık kümesinin kütle merkezi, dışarıdaki düzenlenmiş kütleçekim alanında (büyüklüğü ne olursa olsun) özellikle MOND denklemini göre ivmelenir ve bunun onu meydana getiren bağımsız parça-

cıkların ivmesiyle ilgisi yoktur. Moti bu sonuçlara, üçlemesinin nihayet 1983'te yayımlanan ilk bölümünde değindi. Sonrasında birlikte yazdığımız ve daha fazla sonuç içeren bir ek makalesi 1984'te yayımlandı. Moti bu fikirleri geliştirmeyi sürdürdü. Örneğin, büyük kütleli bir gökadanın ona eşlik eden büyük kütleli başka bir gökadaya uyguladığı kuvveti türetti ki bu, MOND formülüyle tutarlı bir şekilde yapılamıyordu. Sonraki yıllarda eylem denkleminin dayanan kurama AQUAL ismini verdim; bu kısaltma eylemin, Newton'ın kuramında olduğu gibi kütleçekim alanının karesine değil, daha karmaşık (ikinci dereceden olmayan¹⁴) bir formuna dayanarak inşa edildiğini vurguluyor.

Başlangıçta astronomların MOND düşüncesine karşı tepkisi onu alaya almak şeklinde oldu. Ana akım düşüncenin öyle dışındaydı ki, birçok tanınmış bilim insanı onunla vakit kaybedilmemesi gerektiği yönünde görüş belirtmişti. Ama MOND gözlemsel verilerle bastırılmadı. Işıma gücünün hız ile bağıntısına ilişkin tahminleri daha ve daha fazla destekçi buldu. Yıllar içinde MOND formülünün dönme eğrilerinin şeklini tahmin etmekteki başarısı netlik kazandı. MOND ile gökadalarda gözlemlenmiş çeşitli olgular arasında bir çelişki sergileme girişimleri suya düştü; çelişkinin var olduğu iddia edilen bazı durumlarda verinin veya onun yorumlanışının kusurlu olduğu anlaşıldı. Aslında MOND'a karşı olan bu tarz rasyonel ama sert muhalefet, bu yazıyı yazdığım sıralarda hâlâ devam ediyor. Bunların çoğu, şahit olduğum en keskin eleştirel yetilerden birine sahip olan Moti tarafından başarılı bir şekilde çürütüldü. 1985'te ikimiz birlikte Princeton Üniversitesi'nde düzenlenen kara madde üzerine uluslararası bir konferansta konuşma yapmak üzere davet aldık. Bu, sanırım MOND'un bir alay konusu olmaktan çıkıp ciddi bir konu olarak dikkate alındığının bir işaretiydi. Şüphesiz birçok insan çeşitli olgulara dayanarak itirazlarda bulundu. Yirmi yıl sonra geriye dönüp bakmanın avantajıyla görüyorum ki, o itirazların hiçbirisi bugün geçerli değildir. Bu, bana Schopenhauer'ın deyişini tekrar hatırlatır (2. Bölüm'e bakınız).

Ama MOND, tartışmasız kabul görececek seviyeye henüz erişmedi. Nedeni çift yönlü. MOND formülünün yaklaşık olarak dahi uyuşmadığı bazı astronomik sistemler var. Sıradan spiral gökada-

14 *Aquadratic* -ç.n.

lar, d    k yüzey parlaklı ına sahip gökadarlar ve eliptik gökadarlar MOND'la pekala uyuy rken, b y  k gökada kümeleri uyuy maz. Bir o unda, merkezi bölümler boyunca ivme a_0 'ın oldukça üzerindedir, bu yüzden MOND'a göre dahi, kümelerin Newton kuramı tarafından orta derecede iyi tanımlanması beklenir. Ama tüm bu kümeler ciddi ivme tutarsızlıkları sergiler. Bu yüzden MOND referans alınsa bile, insan kümelerin bir tür görünmez madde içerdiklerini varsaymaya zorlanır. Bu doğru olabilir, ama MOND'un ruhuna aykırıdır. MOND'un ana akımın dışındaki statüsünün diğer bir sebebi ise, dayandığı temeller bakımından basitlik ve açıklık anlamında diğer standart fiziksel kuramlarla rekabet edememesidir.

AQUAL dahi tam bir k t le ekim kuramı değildir. Einstein k t le ekim kuramının görelili formda nasıl formüle d k lebilece ini gösterdiğinden bu yana, AQUAL gibi hiçbir şekilde görelili olmayan bir kuram son söz olarak kabul edilemez. Aslında, fizikte tüm doğru fiziksel kuramların görelili bir versiyonunun olması gerektiği kabul edilir. Böylece daha Moti'yle olan 1984 tarihli makalemizde, AQUAL'ı basit bir şekilde görelili hale nasıl getirece ime ilişkin öneride bulunmu tum. AQUAL'daki k t le ekim potansiyelini bir skaler alanla de i tirdim ama AQUAL'ın gelecekselin dışındaki eylemini görelili formda yeniden yazarak korudum. G relili AQUAL'ın kozmoloji incelemeleri için yeterli olacağını umuyordum; kozmoloji incelemeye açık bir alandı çünkü kozmologlar da kara madde arayı ındaydılar. Ama AQUAL  ık-maza girdi. Skaler alandaki düzensizliklerin, gökadalarda MOND etkilerinin önemli olduğu kısımlarda ışık hızından daha hızlı – süperlüminal olarak– yayıldığını öngörüyordu. Einstein'ın özel g relili ine göre, süperlüminal yayılma, fiziksel bir olgudaki sebep sonuç ilişkisinin düzeninin tersine dönmesine neden olabilir ve bu da açıkça kabul edilemezdir. Bu yüzden, makale daha yayımlanırken kuram konusunda gözüm açıldı ve doğru görelili MOND kuramını aramaya adanmış yirmi yıllık bir serüvene atılmış oldum.

Zamanımın tümünde MOND üzerinde  alı madım; bunun hayli uza ındaydım! Ara tırmam beni, bir kısmına daha önce de indi im birçok başka konuya y nelitti ve zaman zaman görelili MOND problemine geri döndüm. Toronto'daki akademik iznim

sırasında görelî AQUAL problemini düzeltmeye odaklandım. Süperlüminal yayılmanın, skaler alanın AQUAL'dan miras aldığı eylem denkleminin geleneksel olmayan formundan kaynakladığını fark etmiştim. Böylece tüm fizikçiler tarafından skaler alan için kullanılan geleneksel eyleme geri döndüm. MOND'un davranışını düzeltmek için ikinci bir skaler alan tanıttım gerekiyordu; bu ikinci skaler alanın ilkiyle arasında doğrusal olmayan özel bir bağlaşım vardı. Alan kuramının uzmanları bu ikiliye aşınadılar; bir kompleks skaler alanın genliği ve fazı. Bu numara, hiç olmazsa, süperlüminal yayılmayı önledi. Ama PCG (bağlı fazlı kütleçekim)¹⁵ ismini verdiğim bu yeni kuram, kütleçekim kuramının güneş sistemindeki alışılmış testlerinden biriyle sorun yaşadı. O sıralar MOND konusunda mektuplaşmaya başladığım, Groningen'de kuramsal astrofizik profesörü olan arkadaşım ve meslektaşım Bob Sanders, PCG'den benden daha fazla hoşlandı ve yıllar boyunca onun gökadalardaki ve kozmolojideki sonuçlarını keşfetti. Moti ve ben, MOND, süperlüminal yayılma ve geçerli bir görelî MOND kuramı tasarlamının yollarını tartışmak üzere 1989'da Bob'u Groningen'de ziyaret ettik.

O zamana kadar görelî MOND'un yeni fikirlere gereksinim duyduğu bizim için netlik kazanıyordu. Hem görelî AQUAL hem de PCG, bir gökada veya gökada kümesi gibi kütleçekimin etkin olduğu bir sistemin yakınından geçen ışık ışınlarının, kütleçekimin neden olduğu çukurluktan dolayı bükülme miktarının, aynı kütle için genel göreliliğin tahminine göre daha fazla olduğunu öngörüyordu. Ama 1980'lerde aktif olarak incelenen "kütleçekimsel mercekler", bu sonuçla çelişiyordu. Kütleçekimsel merceklerin, kütleçekimleriyle yakınlarından geçen ışık ışınlarını, uzak arka plan kuasarlarını görüntülemeye yetecek ölçüde bükene gökada kümeleri olduğu zaten biliniyordu (bkz. Şekil 8). Işınlardaki bükülme, kümelerdeki görülebilir kütle için genel göreliliğin öngördüğünden fazlaydı. Astronomlar, eğer genel görelilik doğru kütleçekim kuramıysa, kümelerin kara madde içermesi gerektiği sonucuna vardılar. Bunun tam aksine, PCG ve görelî AQUAL, kara maddenin var olduğu varsayımında bulunmadığından basitçe gerçeklere uymuyordu.

15 *Phase Coupled Gravity* –ç.n.



Şekil 8. Sağdaki arka plan gökadasından gelen ışık ışınlarının geometrisini gösteren bir küttelekimsel mercek çizimi; ışınlar merkezdeki gökada kümesinin küttelekimi tarafından bükülür ve soldaki gözlemcinin gözünde gökadanın bir görüntüsü oluşur.

Problem, skaler alanın genel görelilikteki ışık bükülmesini, kara maddeye ihtiyaç duyulmaksızın merceklemeye etkisini açıklamaya yetecek ölçüde artırmakta başarısız olmasıydı. Bunun nedeni hem görelî AQUAL'da hem de PCG'de skaler alanın madde ve ışık ile olan bağlaşımının fizikçiler arasında *konformal bağlaşım*¹⁶ olarak bilinen tipte olmasıdır. Konformal bağlaşım, uzaydaki (daha net ifadeyle, uzayzamandaki) herhangi bir yön için aynı güçteki bağlaşımıdır. Görünen o ki, ışık ışınlarının genel göreliliğin öngördüğünden daha güçlü bir şekilde bükülmesi için, bahsi geçen bağlaşımın uzayzamanın bazı yönlerinde, diğerlerine nazaran, daha güçlü olması gerekir. 1992'de Kyoto'da küttelekim üzerine düzenlenen Marcel Grossmann konferansında verdiğim bir derste, sadece skaler alanın değil, skaler alanın gradyanının da bağlaşımına katılmasına izin vererek bunun yapılabileceğini önerdim. Örneğin, bir küresel gökada skaler alanın herhangi bir noktadaki gradyanı merkezden dışa doğru yönelmiş olacaktı. Peki bu tarz bir bağlaşım ışık ışınlarının bükülme miktarını daima artırır mı?

Yaklaşık olarak o zamanlar, 1992-1993 yılları arasında, Santa Barbara'daki ikinci akademik iznimdeydim. Çoğunlukla daha önce açıkladığım diğer araştırmalarım ile meşguldüm ama dönemin sonuna doğru, 1993 ilkbaharında Colorado'daki Aspen'e yaptığımız genel bir ziyaret sırasında, Bob ve ben küttelekimsel merceklemeye problemi üzerinde kafa kafaya vermeye karar verdik. Tüm aile Santa Barbara'dan bu ünlü tatil yerine ve Fizik Merkezi'nin yuvasına yaptığımız araba yolculuğunu anımsıyoruz; bunu yapmak bir haftamızı almıştı ve yol boyunca karşımıza

16 *Conformal coupling* -ç.n.

çıkan tüm milli parklarında durmuştuk. Aspen’de, güzel dağ manzarasına rağmen, Bob’la (o da ailesiyle gelmişti) tartışarak büyük zaman harcadım. Saf görelî AQUAL ve PCG’nin ötesine geçen geniş bir kuramlar yelpazesini ele aldık; tüm bu kuramlarda skaler alan, kendi gradyanının düzenlediği madde ve ışıkla bağlaşım yapıyordu. Fiziksel olmayan kuramları ayıklamak amacıyla, fiziksel davranışın iyi olması için gereksinim duyulan şeyleri, örneğin kütleçekimsel dalgaların süperlüminal olarak yayılama-yacağını kuramlara dayattık. Özellikle bu son gereksinim, skaler alanın gradyanı ile madde ve ışık arasındaki bağlaşımın hangi göstergeyle gerçekleştiğini belirliyordu. Ne yazık ki, bu göstergenin genel göreliliğe nazaran daha zayıf bir kütleçekimsel ışık bükülmesine neden olduğunu keşfettik! Aradığımız şey bu değildi. Merceklemeye problemi hâlâ bizimleydi.

Bob’la birlikte Aspen’de taslağını çıkardığımız ve e-posta üzerinden tamamladığımız makalede, eğer deneyler, kütleçekimsel merceklemenin genel göreliliğin kara maddesiz öngörülerine nazaran daha güçlü olduğunu onaylıyorsa, kara madde yerine düşünülen genişçe bir alternatif kütleçekim kuramları sınıfının konu dışı ilan edileceği sonucuna vardık. Makalemizi dikkatlice okuyan araştırmacılar MOND’un hâlâ somut olarak görelî olmadığına işaret edeceklerdi. Daha dikkatsiz veya bizim görüşlerimize karşı önyargılı olan okuyucular arasında, MOND’un göreliliğe uydurulamayacağı ve dolayısıyla fiziksel bir kuram olduğunun reddedilmesi gerektiği miti yükseldi. Bu mit literatürde ve 2000’lere kadarki konferanslarda epey yükselişe geçti.

Net olmak gerekirse, bulduğumuz problem sadece, skaler alanın konuma göre olan değişiminin zamana göre olan değişiminden daha fazla olduğu durumda meydana geliyordu. Ancak bütünüyle veya ağırlıklı olarak zaman yönünde olan bir gradyan (skaler alan büyük ölçüde zamanda değişir, konumdan konuma değişimi azdır), aslında ışığın bükülmesini artırır. Ama skaler alan, tam olarak sıradan kütleçekim alanı gibi, durgun bir gökada veya gökada kümesinin kütlesi tarafından üretildiği için, görelî AQUAL veya PCG’de onun zamanda değişmesinin basitçe hiçbir yolu yoktur. 1997’de Bob gözü pek bir önermede bulundu; bir vektör alanı, madde ve ışıkla bağlaşım anlamında, bir skaler alanın gradyanının rolünü almalıydı. Elektromanyetik vektör potan-

siyeline zaten değinmiştim. Onun gibi, g  relilikteki herhangi bir vekt  r alanı da d  rt bileşene sahiptir ve b  ylece d  rt boyutlu uzayzamanda belirli bir y  n   g  steriyormuş gibi yorumlanabilir. İki g  zlemciden   nce ilki, sonra da birincisine g  re hareket eden ikincisi bir d  rtl   vekt  re¹⁷ bakarken, vekt  r  n d  rt bileşeni belirli bir kurala g  re değişir. Bunun aksine, bir skaler alan t  m g  zlemcilere aynı g  r  n  r. Bob'un vekt  r   sabit olacaktı; zaman y  n  n   işaret eden ve t  m noktalarda sabit b  y  kl  ğe sahip bir vekt  r. Bob'a g  re ışık ışınlarının k  tlecekimsel b  k  lmesiyle bağlantılı olarak bu tip bir alanın kullanımı, Einstein'ın genel g  reliliğin biçimlendiği yıllardaki bir çalışmasına değin geriye gider. Bob, g  relili AQUAL tipi bir kuramın erevesi içerisinde kullanıldığında, vekt  r alanının k  tlecekimsel merceklemeye ilgili doğru b  y  kl  ğ   vereceğini ve dolayısıyla bu çetrefilli problemi çözeceğini g  sterdi. Bob'un deyişiyle bu *katmanlı* kuram, g  relili AQUAL'ın bazı başarılarını da benimseyebilirdi.

Ancak Bob'un işaret ettiği   zere, katmanlı kuramın bir   ncelikli erevesi¹⁸ vardı; bu,   zel g  relilikle epey uyumsuzluk g  steren bir şeydir.   ncelikli ereve, birbirlerine g  re hareket etmeyen ve bunlara g  re hareket eden diğer t  m g  zlemci dizilerinden gelen fiziksel etkilerden ayrı tutulan bir g  zlemci dizisi olarak d  ş  n  lebilir. Zamanın ruhu değiştiğinden ve   ncelikli ereve fikri artık istemsizce nefret edilen bir şey olarak g  r  lmekten çıktığından, bu   zellik   ld  r  c   değildi. Ama katmanlı kuram eřdeęiřkin¹⁹ değildir. Bunun anlamı, onu yazmak için kullanılan her bir koordinat seti için farklı bir forma sahip olduğudur. Einstein'ın genel g  reliliği tanıtmasından bu yana, eşdeğişkinliğin olmayışı g  relili bir fiziksel kuram için fena bir kusur olarak d  ş  n  l  r. Bob katmanlı kurama bir oyuncak kuram g  z  yle bakıyordu, g  relili MOND kuramını m  kemmelleştirme s  recinde bir basamak olarak.

1999'un ortalarında, vekt  r fikrini aldım ve onu ileri taşıdım. MOND bağlamında vekt  r alanlarına aşınaydım; daha Moti'nin 1985'te Weizmann Enstit  s  nde d  zenlediği g  kadalar konulu

17 *Four vector* –.n.

18 *Preferred frame* –.n.

19 *Covariant* –.n.

çalıştay sırasında, bir vektörle (geleneksel kütleçekimin dışına çıkan tek yeri burası) görelî MOND'u inşa etmeye çalışmışım. O zaman bunun çalışmayacağı sonucuna varmışım. Ama şimdi oyun farklıydı; skaler alan maddeye MOND davranışını aşılama baş sorumluyken, vektör alanı görünüşte sadece merceklemeye ilgili problemi yoluna koymak için vardı. Eşdeğişkin olmama problemi önlemek için vektör alanını dinamik hale getirmeye karar verdim; bu sayede artık zamanda sabit olarak kabul edilmek yerine, zamanda ve konumda nasıl değiştiğini bize söyleyen bir denklem tarafından belirlenecekti. Fiziğin diğer her yerinde olduğu gibi, eğer vektör alanının eylem denklemi düzgün bir şekilde yazılmışsa, denklemlerinin eşdeğişkinliği otomatik olarak ardından gelecekti.

Yeni kuram hem uzayzamanın metrik *tensörü* hem de bir *vektör* ve bir *skaler* alanla ilgili olduğu için, ona TeVeS demeye karar verdim. Skaler alan ile madde ve ışıma arasındaki bağlaşım vektör alanı vasıtasıyla oluyordu, tıpkı katmanlı kuramda olduğu gibi. Metrik için olan saf eylemi genel görelilikten aldım. Onun iyi test edilmiş fiziğinden fazla uzakta dolanmamak önemliydi. Skaler alanın eylemi hususunda ise PCG'nin yöntemine nazaran AQUAL'inkini takip ettim; hatırlanacağı gibi PCG, güneş sistemindeki kütleçekim kuramı testlerini geçmekte sorun yaşıyordu. Şüphesiz görelî AQUAL süperlüminal yayılmadan muzdaripti ve buna bir çare bulunması gerekiyordu. Bu yüzden, istenmeyen özellikleri ortadan kaldırmak için görelî AQUAL eylemini, yine vektör alanından yararlanarak, basit bir şekilde yeniden düzenledim. Sonuç olarak sıra vektör alanı için eylem inşa etmeye geldi. Kütleçekimsel merceklemeye için istenilen sonuçları göz önünde tutarak, ilk iş olarak bir kısıtlama, yani eylemde vektör alanını uzaydaki yönler nazaran daha çok zaman yönünü göstermeye zorlayan bir özellik tanımladım. Daha sonra elektromanyetizmadaki vektör potansiyelininkine hayli benzeyen bir eylem yazdım. Bu, öyle ya da böyle, tek seçenek değildi ama diğerlerinden kaçınmak için yüklüce nedenim vardı. Ancak getirdiğim kısıtlama yüzünden TeVeS ayar değişmezliğine sahip değildi. Eylem denkleminin parçalarını bir araya getirdikçe, Moti çeşitli özelliklerini eleştirecekti.

Eylem denkleminin şekil almasıyla netleşen bir şey varsa o da MOND davranışına sahip eşsiz bir kütleçekim kuramı elde etmeye yakın olmadıyım. Yol boyunca bir dizi tercih yapmak zorun-

da kalmıştım ve her birinde iki veya daha fazla kuramdan birini seçmiştim. Formalizmden fiziksel sonuçlar çıkartmak için hesaplamaların gerektirdiği çaba o kadar büyüktü ki, birkaç versiyona bakmaya gücüm yetmedi. Bu yüzden, TeVeS'in resmî bir versiyonunu formüle ederken kısmen keyfi kısmen de peşin hükümlere dayandırarak ilerledim. Ama kuramın keşfedilmeye değebilecek varyantları da vardır.

TeVeS'in türetilmiş versiyonlarından favorim olanının denklemlerini kullanarak kuramın sonuçlarını kontrol etmek için uzun zaman harcadım. Onu, MOND paradigmasını uygulamaya koymak ve doğru büyüklükte k t le ekimsel merceklenme üretmek amacıyla inşa etmiştim ama hâlâ bunları düzgünce yapıp yapmadığını detaylıca kontrolden ge irmeliydim. Dahası kuramın    alandan herhangi birinin süperlüminal olarak yayılmasına izin vermediğini doğrulamalıydim. Ayrıca TeVeS ile kozmolojik modeller oluşturulup oluşturulamayacağına da bakmalıydim; nihayetinde kozmoloji, MOND'un görelî formülasyonuna olan talebin ana motivasyonuydu. Son olarak, TeVeS'in gündelik koşullarda Newton'ın k t le ekimine indirgendiğini doğrulamakla kalmayıp Newton'dan sonra geliştirilen güneş sistemlerindeki en zorlu k t le ekim testlerini (ki bu testler Einstein'ın kuramının birçok rakibini on yıllardır alaşağı etmiştir) geçtiğinden de emin olmalıydim.

Bu çalışmaların büyük bölümünü 2003'te Kudüs'te gerçekleştirdim. Yazın sonlarına doğru kötü bir derin ven trombozu geçirdim; bu, seyahat eden bazı insanların uzun bir uçuş sonrasında yakalandığı, bacadaki kan damarlarının tıkanması durumudur. Ama ben son sekiz aydır hiç u mamıştım. Muhtemelen hepsi, akademik tatil boyunca gün içerisinde ofisimde TeVeS'in hesaplamalarıyla uğraşarak geçirdiğim uzun saatlerden kaynaklanıyordu. Bir günü hastanede geçirdim ve iki ay boyunca bacağım yukarıya bakacak şekilde evde oturmam söylendi. Bu bana hesaplamalar için epey zaman verdi ve yılın sonuna doğru TeVeS'in davranışlarının iyi olduğu netleşti. Başlıca güneş sistemi testlerini geçmişti, ona dayandırılan kozmoloji modelleri genel görelilikle yapılanlara hayli benzerdi, süperlüminal yayılma açığa çıkmıyordu ve zayıf ivmeler için MOND limitini içeriyordu.

Tüm bunların raporlanması, 2004 Mayıs'ında *Physical Review*'e ve eş zamanlı olarak online fizik arşivine gönderdiğim geniş bir makaleyi doğurdu. Makale ani bir ilgi topladı; sadece yorumda bulunan, bazı hesaplama hatalarını düzelteren ve açıklamalar isteyen meslektaşlarım tarafından değil, aynı zamanda kendilerine ait yarı pişmiş kuramlarıyla başımın etini yiyen çok sayıda amatör ve sözde yenilikçi tarafından da (iki buçuk yıl geçmesine rağmen bu hâlâ bir dereceye kadar devam ediyor). Bu makale TeVeS'i yeni durumlar için inceleyen önemli sayıda çalışmayı motive etti. Bob kendi versiyonu olan iki skaler alanlı bir tensör-vektör-kuramı yazdı. Dahası TeVeS başka benzerlerini motive etti. MOND'la uyumlu olduğunu iddia eden görelî kütleçekim kuramları marketi o zamandan beri öyle büyüdü ki, ben bile hepsine yetişemez hale geldim. Artık görelîliğe uygun hale getirilemediği için MOND'nin yanlış olduğu iddia edilemez. İroni şurada ki, bu fikrin çok fazla sayıdaki görelî uygulamasının sunacak bir şeyleri varmış gibi görünüyor.

Çağımızda astronomik gözlemler ve uzay deneyleri büyük adımlarla geliyor. TeVeS, rakipleri ve daha genel olarak MOND'un gözlemlenen gerçeklerle karşı sınanması ve tutarlı olup olmadıklarının anlaşılması veya gerçekten iyi iş çıkartmaları için nasıl düzenlenmeleri gerektiğinin bulunması uzun yıllar almamalıdır. Ben MOND ve TeVeS'i, tüm bilimsel kuramlar için olması gerektiği gibi, doğayı kavrama sürecimizdeki ilerlemenin adımları olarak görüyorum. Ama MOND fikri doğanın yeni bir paradigmasının başlangıcını işaretledi. Onun, Victor Hugo'nun aforizmasını karşıladığını görecektir kadar yaşamayı umuyorum;

“Zamanı gelmiş bir fikir kadar güçlü hiçbir şey yoktur”.

Benim değişken ince yapı sabiti çerçevemin kaderi ile TeVeS'inki arasındaki tezatlık oldukça keskin. İlk kuram dikkate alınmak için on sekiz yıl beklemek zorunda kaldı; TeVeS ise hemen geniş çaplı olarak tartışılmaya başlandı. İki kuramda da ilgili konu üzerine yıllarca düşünmek ve çalışmak, daha büyük bir kavrayışın, en fazla, bir yönüne katkıda bulunmama imkân tanıdı. Yıllar içinde TeVeS, pekala kütleçekime ve onun gökada ölçeğindeki ve daha büyük ölçeklerdeki davranışına ilişkin diğer fikirlerin (ki bunların sadece bir kısmı onunla genetik bağa sahiptir) oluşturduğu denizde batabilir. Bu, çoğu bilimsel çabanın kaderi-

dir. Bu olasılığı bunaltıcı bulan çaylak araştırmacılara büyük Newton'ın dahi bunun farkında olduğunu hatırlatmak gerek:

“Tüm doğayı açıklamak herhangi biri için ve hatta herhangi bir çağ için dahi çok zor bir iştir. Küçük bir kısmını emin olarak yapmak ve geri kalanını sonradan gelenlere bırakmak, her şeyi hiçbir şeyden emin olmadan, varsayımlarla açıklamaktan çok daha iyidir”.

Bu durumun estirdiği melankoli havası yersizdir oysa. Bin beş yüz yıl daha yaşlı olan Haham Tarfon'un, tüm insan faaliyetlerine ilişkin şu sözüne katılmalıyız:

“İşi bitirmek sizin göreviniz değildir ama vazgeçmekte de özgür değilsiniz”.

5. BÖLÜM

ÖNERİLER VE DERİN DÜŞÜNCELER

Yaşlı Yahudi bilge Yehuda ben Tema'ya atfedilen bir söze göre, “Birisi elli yaşına geldiğinde öğüt verme olgunluğuna erişmiştir”. Doğrusu son yıllarda önceye göre daha sıkça çeşitli konularda önerilerde bulunduğumu hissettim. Hevesli genç fizikçilerden en sık aldığım sorulardan biri hangi alana yönelmeleri gerektiğidir. Fizikte sıcak araştırma alanları birkaç yıllık süreçlerde gelişir. Yani eğer yöneldiğiniz alan çok yeni değilse, siz doktora derecenizi alana kadar o alanın ilginçliğini kaybetmesi ve durgunlaşması ihtimali vardır. Birçok genç insanın korktuğu bu durum, kariyer anlamında bir faciaya neden olabilir. Bu yüzden öğrencileri henüz ortaya çıkmış, iyi bir alana yöneltme gerekliliği duyuyorum.

Şüphesiz böyle alanlar var, ama herkes onların farkına o kadar erken varamıyor. Örneğin, 1970’te kara delik fiziği böyle bir alandı ve oraya doğru zamanda yöneldiğim için şanslı sayılırım. Princeton’dayken etrafımdaki insanlar, kuramsal fizik profesörleri ve öğrenciler, bunun iyi bir alan olduğuna emindiler. Ama herkes aynı fikirde değildi. Aslında, o zamanlar astronomlar genellikle kara deliklerin varlığına inanmıyorlardı. Meseleye tutucu yaklaşıyorlardı ve kara deliklerin sahip olduğu potansiyelin değerini anlamaları yavaş oldu. Yani eğer 1970’lerde bir astronomi öğrencisi olsaydınız, en yakın çalışma arkadaşlarınız tarafından size tavsiye edilen şey, tam bir zaman kaybı olan kara deliklerden uzak durmanız olurdu. Sonradan astronomlar konuyla oldukça ilgilenmeye başladılar. Hatta bu öyle bir çılgınlık halini aldı ki astronomideki yeni veya gizemli her olgu hemen kara deliklere atfedilmeye başlandı. İlgi böylece devam etti.

1980'ler boyunca kara delik araştırmalarının ana itki kaynağı astronomi oldu; onların fiziğine ilişkin çok fazla ilginç şey keşfe-dilemedi. 1990'larda kara delik fiziğinde bir yeniden doğuş yaşandı. Bu, 2. Bölümde açıkladığım ve birçok parçacık fizikçisi-ni rahatsız etmeye başlayan bilgi paradoksuyla ilgiliydi ki, daha sonradan başkalaşarak kara delik entropisi ve ufuk alanı arasındaki ilişkinin temel nedenlerini araştırmaya dönüştü. Bu yeniden doğuş, genel bir olgunun güzel bir örneğidir. İyi bir bilimsel alan Anka Kuşu gibidir; k l olana kadar yanabilir ama sonradan güçlü bir ateşle yeniden dirilir. Eğer içerisinde barındırdığı önemli kuramsal sorular teknik olarak zor oldukları için veya doğru soru-lar sorulmadığı için çözümsüz kalmışsa, bir alan yeniden dirilebi-lir. Gelecekte aktif olacak bir alana yönelmenin yollarından biri, geçici olarak ihmal edilmiş ama içerisinde çözülmemiş bazı önemli sorunlar barındıran bir alan belirlemektir.

Bazen yeniden doğuşu tetikleyen deneysel atılımlar olur. Örneğin, ben daha öğrenciyken kuantum kuramı tamamlanmış bir konu olarak kabul ediliyordu. Az sayıda fizikçi bu konuda  alış-malarını sürdürdü; bunlardan dikkate değer biri daha önce bahset-tiğim Aharonov. Kuantum optikteki yeni teknikler, kuantum kuramında bir zamanlar sadece "düşünce deneyleri"nin kapsamı-na girdiği düşünülen birçok soruyu incelemek için araçlar sağladı. Söz konusu olan soruların tipik örnekleri,  nl  Einstein-Podolsky-Rosen paradoksu ve aynı derece ünlü olan Schrödinger'in kedisi problemidir. Bunların ne olduklarını açıklamama izin verin.

1935 yılında Einstein, Polonya doğumlu meslektaşı Boris Podolsky ve Amerikalı-İsraili g relilik i Nathan Rosen, bir siste-min bir parçasında kuantum ölçümleri gerçekleştirildiğinde uzak-taki diğer parçasının durumunun da ortaya çıkarılabileceği olası-lığına işaret ettiler. İlke olarak parçalar arasındaki mesafenin önemi yoktur. Laboratuvarınızda incelediğiniz sistemin aslında çok uzun zaman önce ikiye ayrılmış bir bütünün yarısı olduğunu ve elinizdeki yarıma bakarken, şu an yüz ışık yılı uzakta olan diğer yarı hakkında da bilgi edindiğinizi düşünün! Bu olasılık özel göreliliğin, bilginin ışık hızından daha hızlı taşınamayacağı ilkesiyle çelişmez. Ama burada görelilik ilkesini güvence altına alan tutum hemen göze çarpmayan cinstendir ve kuantum fiziği-nin temel özelliklerini içerir; öyle ki iyi bir şekilde anlaşılabilme-

si için paradoksun ortaya atılmasının üzerinden seneler geçmesi gerekti. Alain Aspect'in başında olduğu Fransız kuantum optik grubunun 1980'lerde gerçekleştirdiği ustaca deneyler bu temel kavrayışı doğruladı.

1925'te bulduğu harika denklem atomların, moleküllerin ve atom çekirdeklerinin kuantum kuramının kalbinde yer alan Avusturya doğumlu fizikçi Erwin Schrödinger, 1935'te, bir cismin aynı anda iki farklı koşulda bulunuyormuş gibi görüldüğü belirli kuantum durumlarına getirilmesinin ilkesel olarak mümkün olduğunu vurgulamıştı. Bu durumu dramatize etmek için, bir kedinin aynı anda hem ölü hem de diri görüldüğü bir koşul oluşturduğunu hayal etti. Kuantum kuramının temel doktrinlerinden biri, bir sistemin “durumu”nun dalga fonksiyonu denilen belirli bir fonksiyon tarafından ifade edilebileceğidir. Bir sistem hakkında öğrenilmesi mümkün olan tüm bilgiler dalga fonksiyonundan elde edebilir. Schrödinger denklemi, bu dalga fonksiyonunun zamana karşı nasıl değiştiğini gösterir.

Kuantum kuramının diğer bir temel doktrini ise, eğer bir sistem birden fazla olası dalga fonksiyonuna sahip olabilirse (bu bütün sistemler için mümkündür), bunlardan herhangi ikisinin toplamı (ya da farkı) da sistem için izin verilen bir durumunu ifade eder. Böyle bir “durum kombinasyonu”na “kuantum üst üste binmesi”¹ denir. Canlı kediye ifade eden dalga fonksiyonu, ölü kediye ifade edene eklenerek Schrödinger'in “hem ölü hem diri” kedi dalga fonksiyonu oluşturulabilir. Schrödinger böyle bir durumu meydana getirebilecek ideal deneyin adımlarını açıkladı. Elbette daha önce belirttiğim gibi kuantum etkileri büyük yapılar için yok hükmündedir; böyle bir “kuantum kedi durumu” oluşturmak gerçek bir deney ortamında oldukça zor olurdu. Ancak günümüz literatürü “Schrödinger kedi deneyleri” adıyla anılan ve bir fotonun veya molekülün iki ayrık koşulda aynı anda görüntülediği deneylerin tasvirleriyle doludur.

Hem Einstein-Podolsky-Rosen paradoksunda hem de Schrödinger'in kedisinde durumların üst üste binmesi hali ilginç bir özelliği paylaşıyor: *Dolanıklık*². Schrödinger bu sözcüğü,

1 *Quantum Superposition* –ç.n.

2 *Entanglement* –ç.n.

kuantum dünyasının mutlak özü olarak kabul ettiği kavramı vurgulamak için uydurmuştu. Dolanıklık, ya bir sistemin iki parçasında ya da iki sistemin durumu veya dalga fonksiyonunda görülür. Teknik olarak bunun anlamı, sistemin bütününe dalga fonksiyonunun, her bir parçanın dalga fonksiyonunun çarpımından ibaret olmadığıdır. Daha fiziksel olarak ifade edilirse, her bir parçanın özellikleri kendisinden ne kadar uzakta olursa olsun öteki parçanın durumuna da bağlıdır. Sistemlerin diğer sistemler üzerinde Einstein'ın değişimiyle hayaletimsi bir etkisi vardır.

Son zamanlarda dolanıklık etkileyici uygulama alanları buldu. Bunlardan biri mesajların veya diğer gizli bilgilerin korunması üzerine. Suça bulanmış dünyamızda ekonomik veya fikişsel değeri olan mesajların güvenliğini sağlanması için şifrelenmesi gerekir. Şifreleme, mesajdaki harflerin sadece göndericinin ve alıcının bildiği, sabit bir şablona göre karıştırılması veya başka harflerle değiştirilmesi anlamına gelir. Ama bilgisayar bilimciler tarafından oldukça güvenli kabul edilen şifreleme stratejilerinin dahi kırılma şüphesi taşıdığı biliniyor. Mesaj içeriğinin tamamen koruma altına alınabilmesi için görünürdeki tek umut, *kuantum kriptografi* uygulamalarıdır. Bu metodun bir çeşidinde, temel bir mesaj, diyelim ki iki fotonun dolanık durumuna dahil ediliyor. Daha sonra bu durum optik fiberler aracılığıyla varacağı yere iletiliyor. Mesajın bilindik yöntemlerle şifrelenmesi gerekmiyor. Ancak eğer birisi bağlantının herhangi bir noktasında kulak kabartacak olursa, kuantum durumu aksi mümkün olmaksızın mesajı alan kişinin açıkça güvenlik ihlali yaşandığını anlayacağı şekilde hasar görüyor ve böylece alıcı onu reddetme imkânına sahip oluyor. Burada kuantum fiziği işe karıştığı için, yakalanmamak adına ne kadar dikkatli olursa olsun kimse iletişimi gizlice dinleyemez.

Bağlantı dinlenmeye karşı güvenlidir. Güvence telekomünikasyon şirketinden değil, kuantum fiziğinin yasalarından gelir. Kuantum kriptografinin bazı versiyonları şimdiden kullanımda. Kuantum kriptolojiden yararlanan bir güvenli ağ, Boston'daki birkaç üniversitenin laboratuvarlarını birbirine bağlıyor.

Dolanıklık, ikiden fazla sistemi veya bir sistemin parçalarını ilgilendirdiğinde oldukça karmaşık bir hal alabilir. Dolanıklığın nicel değerlendirmesini böyle daha genel bağlamda yapmak, karışık bir durumun dolanıklık içerip içermediğini tespit etmek

ve benzeri görevler hızla genişleyen *kuantum bilgi* disiplininde aktif bir alan oluşturuyor. Hem eski doktora öğrencim Gour (şimdilerde Kanada'daki Calgary Üniversitesi'nde öğretim üyesi) hem de birlikte çalıştığım eski doktora sonrası araştırmacı Jonathan Oppenheim (şu an Cambridge Üniversitesi'nde araştırmacı), araştırma alanlarını kütleçekim kuramından kuantum bilgiye kaydırdılar.

Kuantum kuramının uygulamalarından bir diğeri ise *kuantum hesaplama*³. Bizimki hesaplama aç bir dünya. Bazı hesaplama işleri en güçlü süper bilgisayarlar için bile oldukça ağırdır. ABD doğumlu yirminci yüzyılın belki de en ünlü fizikçisi, Nobel ödülü sahibi ve Wheeler'ın ilk doktora öğrencilerinden biri olan Richard Feynman'a göre, var olan hiçbir bilgisayar bir kuantum sisteminin zaman içindeki evriminin benzetimini tüm detaylarıyla yapamaz; sistem bunun yapılabilmesi için hayli karmaşıktır. Feynman daha sonra bu görüşünü biraz değiştirerek, kuantum kuramının yasalarına göre çalışan bir bilgisayarın, yani bir kuantum bilgisayarının, bir süper bilgisayardan çok daha hızlı hesap yapabileceği sonucuna vardı. Sahiden son on yıl içerisinde kuantum hesaplama, fizikçiler ve bilgisayar bilimcilerden oluşan geniş bir kadronun ellerinde olgunlaştı. Bazı kuantum bilgisayar tasarımlarında dolanıklık hayati önemdedir. Tümü laboratuvar protatipleri olan günümüz kuantum bilgisayarları şu an yalnızca temel hesaplamalar yapabiliyor. Geriye kalan, ilk kullanışlı kuantum bilgisayarına giden yolda karşılaşılan bir dizi teknik zorluğu aşmak, ki bunu söylemek yapmaktan daha kolaydır. Benim fikrime göre bu, hem uzun yılları kapsayan bir geleceği olan hem de hâlâ çokça fiziğe ihtiyaç duyan bir alan.

Eğer kuantum kuramını kullanarak hesaplama ve şifreleme yapabilir hale gelseydik, bu artık kuantum kuramını kullanarak yeni şeyler yapamayacağımız anlamına mı gelirdi? Şüphesiz belli bir dereceye kadar bu yapıldı. Biyoteknoloji uzmanları bir hastalık için en uygun moleküler yapıyı bularak yeni bir ilaç tasarlamaya giriştiklerinde, yeni bir madde yaratmak için kuantum kuramını kullanıyorlar. Ama benim kastettiğim ileri, hayali yeni bir dünyaya doğru bir adım. Örneğin, üçü de Avusturyalı fizikçiler

3 Buradaki hesaplama (computing) ifadesiyle bilgisayar temelli hesaplama kastediliyor –ç.n.

olan Gunther Krenn, Johann Summhammer ve Karl Svozil atomlardan oluşan nispeten kalın bir ışın demetinden yararlanarak, hiçbir atoma dokunmadan çok daha dar bir ışın demeti oluşturmayı sağlayan bir kuantum yöntemi ortaya koydular. Bu yöntemin inceliği, ışın demetindeki atomlar ile diğer bir ışın demetindeki nötronlar arasında bir üst üste binme durumu yaratmakta gizlidir. Sonraki aşamada nötronlar izlenerek, başlangıç için birbirleriyle aynı hizaya gelmiş (yani ince bir ışın demeti oluşturan) atomlar seçiliyor. Bu, atomlara doğrudan müdahalede bulunmadan veya onları bir şekilde etkilemeden yapılıyor. Atomlarla olan etkileşimlerin onlarda istenmeyen içsel değişimlere yol açtığı düşünüldüğünde, bu yöntemin avantajı oldukça açık. Bu yöntem, bütün olarak, kuantum kuramında yeni bir motifin uygulamasıdır: “Etkileşimsiz ölçüm”⁴. Bu tanımlama ilk kez, ikisi de Aharonov’un eski öğrencisi olan İsraili fizikçiler Avshalom Elitzur ve Lev Vaidman tarafından 1993 yılında yapıldı. Yani, yarının teknolojisinin kuantum yöntemleriyle inanılmaz şeyler yapabileceği oldukça açık. Öyle ki, Aharonov yirmi birinci yüzyıl için kuantum yüzyılı demiştir. Şu da açık ki, yaşını almış kuantum kuramı yeni şeyler keşfetmek için büyük bir potansiyele sahiptir.

Bilimde geleceği yönelmiş diğer bir yol ise, halihazırda var olan alanların sınırlarında bulunan meseleleri aramaktır. Fikirler bir alandan diğerine akabilir. Bugün herkes fiziğin belli bir alanındaki bir fikri alıp, diğerine kopyalama eğiliminde. Bu hep böyle değildi. Örneğin, ben kara delik termodinamiğinin ısı kuramı ve kütteleçkim kuramı gibi iki ayrı konunun evliliğiyle nasıl ortaya çıktığıyla ilgilendim. Birçokları bana bu iki alanın birbirleriyle alakasız olduğunu ve vaktimi bununla harcamam gerektiğini söyledi. Ama bir bağlantı vardı ve doğaya bakmanın farklı yolları arasında bağlantılar kurduğunuzda, tamamıyla özgün yeni fikirler elde edersiniz. Daha önceden de, bir kara deliğin kütteleçkim alanı içerisindeki farklı tipteki alanlara neler olduğunu düşünerek “saçsızlık” kuramlarımı kanıtlamaya çalıştığım zamanlarda, birçok insan temel parçacık motiflerini (baryonlar ve skaler alan veya vektör alanı) kütteleçkim kuramına ilişkin fikirlerle birleştirdiğim için bana şüpheyle bakmıştı. Bana söyledikleri basitçe şuydu: Genel görelilik genel göreliliktir, parçacık fiziği ise parçacık fiziği; ikisini birbirine kat-

4 *Interaction free measurement* –ç.n.

manın bir mantığı yoktur. Şurası açık ki işler değişti. Bugün, otuz yıl sonra, fizikte ön saflarda yer alan araştırmaların birçoğu alanlar arası kesişim bölgeleriyle ilgileniyor; kütleçekim ile kuantum kuramı, yoğun madde fiziği ile alan kuramı, optik ile kuantum kuramı, akışkanlar mekaniği ile kuantum kuramı vb.

Bundan dolayı, bugün çokça gündemde olan disiplinler arası alanlar, yeni yönler aramak için güzel yerlerdir. Bu alanların birçoğu iyi fonlanır ve daha geleneksel alanlara kıyasla bu alanlarda öğrencilerin şansı daha iyiymiş gibi görünür. Tabii bu evlilik fizik dışındaki alanlarla da olabilir. Schrödinger ‘*What is life?*’ [*Yaşam Nedir?*] isimli ünlü, kısa kitabında, kuantum mekaniğinin biyolojiyi nasıl etkilediğini inceler; biyolojik sistemlerin neden çok büyük olduğu, hücrelerin neden daha küçük olmadığı vb. Görünüşe bakılırsa tüm bu gerçekler fiziksel nedenlere sahip ve bunlardan bazıları kuantumla ilgili. Örneğin, eğer hücreler çok küçük olsaydı, bir kısmını kuantum kuramının gerektirdiği atomik dalgalanmalar onların gelişi güzel çalışmalarına neden olurdu. Bu durumun hayatta kalmaya niyetli olan bir organizma tarafından hoş görülemeyeceği açık. Diğer bir büyük kuantum fizikçisi ve Nobel ödülü sahibi Eugene Wigner ise, kuantum etkilerinin bilinç üzerindeki rolünü inceledi. Kuantum kuramındaki sıcak konulardan olan, doğanın, üst üste binmiş bir kuantum durumunda ortaya çıkan iki veya daha fazla koşuldan birini (örneğin, diri kedi ve ölü kedi), yani bizim aslında deneyimlediğimiz koşulu nasıl seçtiği meselesini ele alarak, bununla bilinç arasında bağlantı kurmaya çalıştı. Penrose aynı meseleyi ‘*The Emperor’s New Mind*’ [*Kralın Yeni Aklı*] isimli enfes popüler kitabında ele alır.

Evet, disiplinler arası çalışmalara eğilim çok yaygınlaştı, ancak insanlar bunda sanki biraz aşırıya kaçıyor; bazıları iki yarımın bir araya getirilmesinden çok da farkı olmayan disiplinler arası konular yaratıyor. İyi bir disiplinler arası konuyu karakterize eden özellik, çılgın ve ağırbaşlı fikirler arasındaki dengede yatıyor. Wheeler’ın çılgınca bir fikrin yeni şeyler bulmak için iyi bir yer olduğu şeklindeki yaklaşımına değinmiştim. Çılgın fikirlerden faydalanarak fizikte ilerleme kaydedebilirsiniz. Ancak bunun kontrolünü sağlamanız gerekir. Tüm çılgın fikirler doğru veya işe yarar değildir. Çılgın fikirlere ihtiyacımız var, ama çılgınlık ve kullanışlılık arasında bir denge kurulması şartıyla. Bu deneyimle,

genellikle de bir şeyleri yanlış yapmanın sonucunda öğrenilen bir sanat. Bu yüzden öğrenciler, ucuz ve geçici disiplinler arası akımlara karşı dikkatli olun!

Bana soruluyor; Sicim kuramı iyi bir kuram mıdır? Peki ya kozmoloji? Bugün ikisi de yoğun hareketlilik gösteren, aktif alanlar ve farklı şekillerde de olsa ikisi de oldukça iyi gelişmiş. Sicim kuramı parçacık fiziğinde özelleşmiş bir köşe haline gelmiş durumda. Bu alanda çalışanlar onun doğanın son kuramını, yani “her şeyin kuramı”nı, sunduğunu iddia ederler. Neredeyse her ay kuramla ilgili büyük başarılar ortaya atılır. Birkaç yıl önce büyük ses getiren gelişmelerden biri, bazı ayar kuramları için, özel bir tür uzayzaman olan karşı-deSitter uzayzamanına göre formüle edilmiş yapıların, bazı sicim kuramlarınıninkilerle eşdeğer olduğunun keşfedilmesiydi. Bu, doğrudan sicim kuramından yola çıkarak temel parçacıkların özelliklerinin hesaplanmasına giden yolun habercisiydi. Bundan önceki ses getiren gelişme ise, bazı sicim kuramı uygulayıcılarının, özel kara deliklerin içsel durumlarını sayarak, onların entropilerini hesaplamaktaki başarılarıydı. Aslında kara deliklerin durumları sayılmamıştı, sayılan daha çok sicim durumlarıydı ve devamında sonuçları küçük kara deliklerle bağdaştırmak için karmaşık bir argüman kullanılmıştı. Bir gelişmeyle sonraki arasında, alandaki son gelişmelerin yüceltildiği çalıştaylar ve bilimsel konferanslar olur. Sicim kuramcılarının atfedilebilecek en son şey alçakgönüllülüktür. Fizik tarihinde doğaya farklı bir yönden bakma iddiasında olmuş büyük ve ses getiren çıkışlar, sıklıkla fiyaskoyla sonuçlanmıştır. Bu alana hevesli öğrenciler, dikkatli olun!

Kozmoloji ise sicim kuramından oldukça farklı bir alandır (her ne kadar zamanın disiplinler arası ruhuna uygun olarak “sicim kozmolojisi” denen bir araştırma alanı olsa da). Sicim kuramının gençliği ve deneylerden kopukluğunun aksine kozmoloji, eski ve iyi test edilmiş bir disiplindir. Eski derken evren hakkında kafa yormuş antik uygarlıkları kastetmiyorum (onların bunu yaptıklarına şüphe yok); kastettiğim şey, fiziğe dayalı kozmolojinin yüzüncü yılını devirmek üzere olduğudur. Ayrıca kozmoloji, kuramı test etmeye yarayan ve spekülasyonlara can katan birçok deneysel gerçekle kutsanmış durumdadır. Bunlar çoğunlukla son yirmi yıllık dönemde ortaya çıktı; şüphesiz Edwin

Hubble'ın 1929'da evrenin genişlediğini keşfetmesi ve aynı derecede önemli olarak Arno Penzias, Robert Wilson, Dicke, Peebles, Peter Roll ve David Wilkinson'ın 1965 yılında evrenin mikrodalga ışımasıyla dolu olduğunu keşfetmelerini saymazsak. Kozmoloji bugün oldukça büyük bir araştırma alanıdır; bugüne kadar mikrodalga ardalan ışımasını incelemek üzere balonlar, uydular vb araçlar kullanılarak çeşit çeşit pahalı deneyler gerçekleştirildi ve dahası gerçekleştirilmek üzere hazırlanıyor. Böyle büyük araştırma alanlarında farklı yeteneklere ve zevklere sahip hevesli öğrenciler için bir yer daima vardır. Deneyciler şüpheyi yer bırakmadan sonuçlanacak yeni projeler planlamaları için, kuramcılar ise deneylerden yağan verileri detaylı olarak anlamlandırmak için rağbet görürler. Yani fırsatlar var. Ama kozmoloji topluluğunun çok büyük olmasının, genç üyelerin kendilerini göstermelerini zorlaştırabileceğini de hesaba katın. Benim gözümde modern kozmolojideki özgün ve uyarıcı fikirlerin, astronomi yönelimli çalışmalardan bekleneceği gibi, teknik anlamda emek isteyen, rutin görevlere oranı düşük. Bu, düşünsel olarak bilimdeki en uyarıcı fikirlerle yakın ilişki içerisinde çalışmaya hevesli birisi için bir bariyer görevi görebilir.

Yetiştirme aşamasındaki bir fizikçi hayatta ne yapacağını seçmeye çalışırken kaçınılmaz olarak fiziğin hem sezgisel hem de matematiksel bir disiplin olduğunu kabullenmek durumunda kalır. Galilei'nin zamanından beri dünyaya ilişkin fiziksel kavrayışımızın biçimlenmesinde iki yaklaşımın da önemli olduğu açıktır. Fiziğin gelişiminde matematiğin oynadığı rol de şüphe götürmez. Bugün fizikçiler ve matematikçiler oldukça farklı yollarla çalışmalarını yürütüyorlar. Fiziğin aslında matematik olduğunu düşünen ve çalışmalarını aksiyomdan teoreme, oradan da sonuca doğru gidecek şekilde yürüten insanlar tanıdım. Bu insanlar matematiksel kavrayışlarını mükemmelleştirerek, fizik yapma becerilerini geliştirdiklerini düşünürler. Muhtemelen öyle de olur, ama iki konu birbirinden ayırt edilmelidir. Fizik doğanın özelliklerini keşfetmekle ilgiliyken, matematik ise insan zihninin bir ürünüdür. Diyebiliriz ki, matematiksel yapılar fiziksel gerçekleri yansıtabilir çünkü insan zihni fiziksel dünyayla başa çıkmaya çalışarak gelişmiştir. Bu hesaba katıldığında dahi, matematiğin fiziksel dünyayı açıklamadaki kullanışlılığı daima şaşırtıcı bulunur. Wigner bundan, "matematiğin fizikteki akıl almaz

etkinliği” diye bahseder. Ama fiziksel dünyayı anlamak için sadece matematik yapamazsınız, fiziksel fikirlere ve sorulara ilişkin daima tercihleriniz olmalıdır. Ayrıca, son kertede fizik deneysel bir bilim dalıdır ve matematik deneyin rolünü üstlenemez.

Bir  rnek verecek olursam, lisansüstü  ğrencisi olduğum zamanlarda, parçacık fiziği, basitçe parçacık fiziğindeki olgulara uygulanan kuantum alan kuramıydı. Bugün  ne çıkan birçok parçacık fizik isine göre ise, parçacık fiziği sicim kuramıdır. şu an sicim kuramı bir fiziksel kuram için alışılagelmişin üzerinde matematik-seldir. Sicim kuramcılarının yaptığı konuşmalarda nadiren fiziksel sorularla ilgili bir bağlantıya rastlarım. Sicim kuramının deneysel çalışmalarla olan kopukluğuna zaten değinmiştim. Birçok genç sicim kuramcısının fiziksel sezgilerinin oldukça zayıf görünmesi şaşırtıcı değildir; onlar asla gündelik fiziksel problemlere karşı saldırıya geçemezler (ya da daha kötüsü bununla kesinlikle ilgilenmezler). Bu tutum, aldıkları aşırı derecede özelleşmiş eğitimle ilişkiliymiş gibi görünüyor; fizik derslerinin üzerine ileri düzey matematiğe yüklendikleri bir eğitimidir bu. Son bir veya iki yüzyıldır iyi bir fizik eğitimi demek, öğrencileri yeryüzünde, onun içerisinde veya üzerinde bulunan her türlü problemle saldırmak üzere yetiştirmek demektir. Bence sicim kuramının “her şeyin kuramı” olduğu yönündeki beni çok  zen ve doğru düşünen herkesin felakete doğru yönelmiş olduğunu göreceği genel yanılısma, daha kapsamlı bir eğitim anlayışının dışlanmasına yol açtı.

Ama fizikte matematiğe karşı olmakla itham edilmemek adına vurgulamalıyım ki, kutsanmış birkaç istisna haricinde kuramsal fizikçiler, onlara düşünmelerinde yardımcı olacak zamanın en ileri matematiği olmadan hiçbir yere gelemmez. Bu istisnalardan biri, daha önce sözünü ettiğim, ihtiyaç duyduğu tüm kuramsal kavramları matematiksel değil sezgisel bir yaklaşımla formüle dökmüş bir deneyci olan Faraday’dır. Faraday elektromanyetizmanın dört ilkesinden biri olan ve elektrik jeneratörlerinin (ve dolayısıyla günümüz teknolojisinin çoğunun)  alışma ilkesi olan indüklenme yasasını keşfetti. Maxwell elektromanyetizmanın dört ilkesini dört adet kısmi diferansiyel denklemle formüle edip elektromanyetizmayı bugün bildiğimiz formuna getirdiğinde, Faraday, kendi indüklenme yasası üzerinde  alışan Maxwell’in onu artık kendisinin anlayamayacağı bir hale getirmiş olduğu için yakındı! şimdi, Faraday’ın bir

miktar matematik bildiğinden şüphem yok; onun eksik olduğu konu, 1800'lü yılların ortalarında zamanın en ileri matematiği olan kısmi diferansiyel denklemlerdi. Bu yüzden yetişmekte olan fizikçiler matematikte iyi olmayı planlamalıdır. Aslında fizikte kullanılan matematiğin seviyesi sabit bir şekilde yükselmekte olduğu için, asgari düzeyde gereken matematik bilgisini ifade eden tanımlamalar kısa sürede zaman aşımına uğramaya mahkûmdur. Bu yüzden, fizik yapmak için açık bir şekilde ihtiyaç duyup duymadığınıza bakmaksızın matematik çalışın! O sadece faydalı değil, aynı zamanda başlı başına büyüleyici de.

Bilimin sezgisel yönlerine dönmemize izin verin. Sezgi kavramı literatürde sıklıkla neredeyse mistik denilebilecek terimlerle, mantığın ötesinde bir şey olarak tarif edilir. Ama ben bu tanımlamadan şüpheliyim; eğer bu doğru olsaydı büyük bilim insanlarının nasıl bu kadar üretken olabildiklerini anlamamızı sonsuza kadar engelleyebilirdi. İyi bir fizik sezgisine sahip insanların bu yeteneklerini çocukluk çağında, belki küvette oyuncaklarıyla, belki ateşle veya daha ileriki yaşlarında elektrikle oynarken kazandıklarına ilişkin bir kuramım var. Sezgilerinizi yaşamınızın erken dönemlerinde, cisimlerin nasıl hareket ettiğini veya birbirleriyle nasıl etkileşime girdiklerini izlerken kazanırsınız; sonrasında benzerlikler kurarak karşılaştığınız yeni durumların nasıl işlediğine ilişkin bir his edinirsiniz. Sezgiler doğuştan gelmez, yaşamın erken dönemlerinde öğrenilmiş olmaları gerekir. Bir öğrenci olarak tam donanımlı bir laboratuvarında düzenli deneyler yaparsınız, ama sezgiler zaten oradadır. Yani, ebeveynler çocuklarının sezgilerini geliştirebilmeleri için özgürce oynamalarına izin vermeliler (şüphesiz kendilerini veya evi ateşe vermediklerinden emin olmak kaydıyla). Bunun faydaları iyi fizikçiler üretmekle sınırlı kalmayacaktır elbette.

Fizikçilerin bazen alanlarında aşırı özelleştigiğine değinmiştim. Bu eğilimin bir öğrencinin fizik öğrenme sürecinde ilk kez doktora yönelik çalışmaları sırasında ortaya çıkması muhtemeldir. Lisansüstü eğitimimin erken dönemlerinde, bakış açımı geniş tutmam konusunda bana katkı sağlayan bir deneyimim olmuştu. Bir keresinde bir şey hakkında konuşmak üzere Wheeler'a gitmiştim ve ona bazı sonuçları açıkladığım sırada ağzımdan, "...görelilikçiler buna inanıyor..." sözcükleri dökülmüştü. Bunun üzerine beni durdurdu ve görelilikçi diye bir şeyin olmadığını ve

hepimizin fizikçi olduğumuzu söyledi. Şüphesiz görelilikçiler vardı; bunlar genel göreliliğin dışında hiçbir şey düşüneyen insanlardır. Ama onun işaret ettiği nokta, fizikçiler arasında böyle dar yaklaşımların olmaması gerektiğiydi. Bu ders içimin derinlerine işledi ve o zamandan beri daima fizik bilgimin kapsamını genişletme çabasında oldum. Bir doktora öğrencisi olarak genel görelilik konusunda eğitildim. Doktora çalışmalarım sona erdiğinde astrofizik, akışkanlar mekaniği, elektrodinamik ve istatistiksel fizik üzerine bugüne kadar süren kapsamlı okumalara giriştim. Bu geniş temeli asıl *uzmanlık alanımın* dışında olan astrofizik, manyetohidrodinamik, termodinamik ve bilgi kuramı gibi konularda yaptığım araştırmalarda ve yazdığım makalelerimde değerlendirdim. Dahası, gözüme ilginç görünen diğer alanları denemek konusunda da utangaç değildim.

Ben bilimsel faaliyetlerin bu şekilde geniş kapsamlı olarak yönlendirilmesini sağlıklı bir yaklaşım olarak görüyorum ve öğrencilerime de bunu aktarmaya çalışıyorum. Ne yazık ki, hepsi bunun avantajlarını görmüyor. Hem öğrenciler hem de tecrübeli fizikçiler onları hızlı çalışmaya mecbur eden akademik rekabetin gerginliğini yaşıyorlar. O anda üzerinde çalışmadıkları bir konuyu öğrenmek için zaman ayırmak, birçoklarına göre verimsiz bir zaman yatırımdır. Bu tutum uzmanlık alanlarının darlığına en büyük katkıyı sağlayan faktördür. Ama her yatırımda olduğu gibi meyveleri ileride toplamaya hazır olunmalıdır. Geniş kapsamlı bir fizik eğitime yapılan yatırımda da olan budur; araştırmanız faydalarını ancak yıllar sonra gösterecek olabilir. Öğrenciler şunu da akıllarında tutmalı ki, geniş kapsamlı bir araştırma geçmişi sadece doktora sonrası araştırma veya öğretim üyeliği için kadro bulma ihtimalinizi artırır. Bugüne kadar kimsenin bir akademik kadro veya terfi için adaylığına, araştırma alanının genişliğinden ötürü itiraz edildiğini duymadım. Ama araştırma alanının fazla dar olmasından dolayı eleştiri alan birçok adaya şahit oldum. Bu yüzden, geniş kapsamlı bir fizik eğitime kendi kıymetinden ötürü yatırım yapmaya isteksizseniz dahi, gelecekteki iş imkânlarınız için nasıl bir faydası olabileceğini düşünün.

Bilgisayarların ve bilgisayar hesaplamalarının önemi tüm doğa bilimlerinde olduğu gibi fizikte de artıyor. Bunun nedeni son derece açık. Bir bilgisayar yoğun hesaplama, cebirsel basitleştir-

me, veri tabanı araştırması ve örüntü sınıflandırılması gibi işleri bir insandan çok daha iyi ve az hatayla gerçekleştirebilir. Dahası insan eli ve aklıyla açıkça yapılması imkânsız olan büyüklükte işlerin de altından kalkabilir. Böylelikle bilgisayarlar bizi sonu gelmeyen uğraşlardan kurtarabilir. Yani öğrencilerin erken yaşta en basit yazı düzenleme işlerinden karmaşık sayısal simülasyonlara kadar bilgisayar temelli hesaplamanın tüm yönlerine aşına olması kuşku götürmez bir öneme sahiptir. Ancak dikkatli olun! Bilgisayarların kancasına takılıp yavaş yavaş fizik yapmayı bırakan ve tüm zamanını bilgisayar hesaplamalarına (veya daha kötüsü, bilgisayar oyunlarına) harcama başlayan insanlar var. Bazıları için ise bu ekonomik bir gerekliliktir çünkü bilgisayar temelli bilimsel hesaplama işleri, daha geleneksel yöntemlere dayanan araştırma işlerinden sayıca çok daha boldur.

Fizik yapmaya devam edebileceği halde daha kolay bir iş olduğu açık olan bilgisayar hesaplamalarına kayan insanların, zaman zaman bu değişimlerini yüceltme girişiminde bulundukları olmuştur. Sık sık dillendirilen bir görüş, bilgisayar hesaplamalarının üçüncü binyılda deneylerin yerini alacağı yönündedir; yani bilgisayar hesaplamaları yaptığınızda aslında deney yapıyor olacaksınız. Bu görüş, bugün bir makinenin içerisinde gerçekleştirilen simülasyonların, elle çözülemeyecek zorluktaki fizik denklemlerinin yaklaşık çözümlerini elde etmenin iyi ve etkili bir yolu olduğuna ilişkin gözlemlere dayanıyor. Bir simülasyon sonucu, sorgulanan kuramın deney sonuçlarıyla tutarlılığının kontrol edilmesi için bir araç olabilir. Ama simülasyonun deneyin yerini alamayacağı açık. Eğer kullanılan kuram yanlışsa, ne kadar fazla simülasyon yapılırsa yapılsın, kuramın rafa kaldırılmasında deneyin yerini alamayacaktır. İyi fiziğin testi hâlâ laboratuvarda veya evrende gerçekleştirilen deneylerle yapılır, bilgisayar çıktılarıyla değil. Açık olmam gerekirse, bilimsel hesaplamanın fizikteki düşünme eyleminin yerini alacağını düşünmüyorum.

Hesaplama bir dereceye kadar dille alakalıdır, matematik diliyle. Ancak insan dilinin geliştirilmesi de unutulmamalı. Yetişmekte olan fizikçiler İngilizceyi iyi bilmeliler. Sadece İngilizce diyorum çünkü geçtiğimiz onlarca yıllık dönemde İngilizce fizikte standart bir dil oldu. Bu her zaman böyle değildi. Ben yetişmekte aşamasında bir fizikçiymen, Rusça son derece

 nemliydi. Rusçada büyük ve iyi bir fizik literatürü var ve bunlardan bir kısmı hâlâ İngilizceye  evrilmemi  durumdadır. Rus fiziği  kinci Dünya Savaşı ve Glasnost arasındaki dönemde Batı fiziğinden büyük  l de bağımsız bir şekilde gelişti. Rus fizikçiler plazma fiziği, matematiksel fizik, parçacık fiziği, k t le ekim, astrofizik ve kozmoloji  zerine Batılı meslektaşlarıyla paralel olarak birçok çalışma gerçekleştirdiler ve Batıdan bağımsız olarak birçok ke fe imza attılar. Bu yüzden, bundan on be -yirmi yıl öncesinde olsaydık hevesli fizikçilere Rusça öğrenmelerini tavsiye ederdim. Ancak bu, kendimin dahi beceremediği büyük bir zaman yatırımı demektir. Bugün Doğu ve Batı arasındaki bariyerler yıkıldığından dolayı, bu daha az ivedi bir mesele.

Ama anadili İngilizce olmayan fizikçiler için İngilizce üzerinde tam kontrol kurabilme ihtiya ı tartışma götürmez. İngilizceyi sadece hızlı okuyabiliyor olmanız yetmez, onu pürüzsüz bir şekilde konu abilmeniz ve zarif bir biçimde yazabilmeniz de gereklidir. Dinlediğim birçok iyi ders, içeriğindeki fiziğin iyi olmamasından değil ama konuşmacının İngilizce  zerindeki h kimiyetinin zayıflığından ötürü mahvolmu tur. Eğer akıcı bir biçimde konu amıyorsanız, insanlar söylediğiniz şeylere dikkatlerini veremezler. Bilgiler yavaş ve muğlak bir şekilde geldiği için insanlar uyuya kalabilir. İngilizce yazmak birçok kişi için akıcı konuşmaktan daha az zorlayıcıdır. En azından birçok Avrupalı meslektaşım konu tuklarından daha iyi yazarlar. Tam da bu sebepten dolayı herkesi İngilizceyi sadece idare eder düzeyde değil, çok iyi bir şekilde yazabilmek için çalışmaya şiddetle davet ediyorum. Sadece fizik değil İngilizce klasikleri de okuyun, romanlar okuyun, oyunlar okuyun. Dildeki zariflik sadece iyi yazarları örnek olarak elde edebileceğiniz bir şeydir ve insanların dikkatini anlattığınız fizikte toplamanın iyi bir yoludur. Yanlış kullandığınız her sıfat dikkatleri dağıtır, monoton bir şekilde tekrar ettiğiniz her ifade bıkkınlık verir. İnsanların sonuna kadar dikkatlerini veremedikleri için fiziğinizi kaçırmasına neden olmayın.

Genellikle bana kariyerimi hangi faktörlerin etkilediği sorulur. Bir kariyeri neler etkiler?  lk olarak aile. Babam bir marangozdu, annemse bir ev hanımı.  kisinin de değerlerim ve inançlarım üzerinde g cl  etkileri oldu. Annem bana okul ya ına gelmeden önce okumayı ve toplamayı  ğretmi ti.  kisinin de yükseköğrenimi yoktu, ama biz çocuklarını çalışmamız ve  niversiteye gitmemiz

için teşvik ettiler. Beki de üniversiteden sonra ne yapıldığı konusunda net bir fikre sahip değillerdi. Onlara fizik eğitimine lisansüstü seviyede devam etmeyi düşündüğümü söylediğimde şüphesiz çok şaşırdılar. Fizik üzerine ileri düzeyde bir derecenin hayatımı kazanmama nasıl bir katkısı olacağı onlar için açık değildi. Onlara, özellikle de anneme, işlerin nasıl yürüdüğünü sabırla anlattım ve sonrasında daha ilerideki çalışmalarım için beni teşvik etmeyi sürdürdüler. Çok küçük yaşlardan itibaren serbestçe okumanın önemli bir şey olduğu bana öğretilmişti. Hayatımı şekillendirmemde bu inancın etkisi önemli oldu. Üniversitede son aşamaya geldiğinizde, mezuniyet töreninde size, çalışmalarının katiyen bitmediğinin aksine daha yeni başladığının söylenmesi hayli muhtemel bir şeydir. Bu benim için hiçbir zaman yeni bir bilgi olmadı. Ben öğrenmeyi insanoğlunun esas uğraşı olarak görüyorum. O, hayattaki diğer güzel şeyleri temin etmenin bir yolu değil, tersine kendi başına bir amaçtır; öğrenme ve zihinsel olarak gelişme özgürlüğümüzü garanti altına alan diğer şeylerle birlikte.

Hepimiz sırayla gelecek kuşağı etkiliyoruz. Çocuklarımız birbirlerinden oldukça farklı, şüphesiz benden de. Her biri erken yaşlarından itibaren bilimsel teşviklere maruz kaldılar. Onları, bilimle ve ünlü/ünsüz bilim insanlarıyla ilgili hikâyeler anlatarak etkim altına aldım, ama bunun olası mesleklerden sadece biri olduğunu ve bir insanın hayatını kazanmak için yapabileceği başka birçok şey olduğunu vurgulamayı da ihmal etmedim. En son istediğim şey, erken telkinlerde bulunarak onları bilim insanı olmaları için zorlamaktır. Çünkü hepimiz kendi geçmişimizin tutsağıyız. Artık genç olmadığımız bir yaşa geldiğimizde yeni akımlar, yeni uzmanlıklar ve yeni mesleklerle ilgili bütün olasılıkları görmekte sorun yaşarız. Genç insanlar böyle şeyleri çok daha açık bir şekilde görürler. Bütün çocuklarımız sonunda bir kariyer sahibi olurken, en azından geniş çeşitlilikteki olanakların farkında olacaklar; şüphesiz bu olanakların geçmişten günümüze nasıl şekillendiğinin de. Gözleri açık bir şekilde tercih yapabilecekler. Onlar bilimsel anlamda kültürlü insanlar, tıpkı tüm insanlığın olması gerektiğine inandığım ölçüde. Teknolojinin döndürdüğü dünyamızda, bilim kültürüne sahip olmayan insanlar gün geçtikçe daha fazla bihaber, daha az üretken ve belki de başkaları için bir yük haline gelecekler. Kimsenin artık bilimsel anlamda cahil olmaya gücü yetemez.

“İnsan yalnız ekmekle yaşamaz”⁵. Bu yüzden zamanımızın bir kısmını mesleğimizle doğrudan ilgisi olmayan, ancak yine de önemli olan konuları esas alan düşüncelere ayırmamız gerekiyor. Bu bizi genellikle felsefi rotalara yöneltir. Felsefe artık lisedeki felsefe hocamın tanımladığı gibi bütün bilimlerin oluşturduğu birliğin ortak ismi olmasa da bilim tarafından henüz ele alınmamış sorularla ilgilenmeye başlamak için hâlâ iyi bir nokta. Ya da bilim tarafından incelenmiş ama cevaplanamamış sorular için.

Determinizm iyi bir örnek; antik zamanlardan beri daima çokça tartışılmış bir mesele. Bilim bu tartışmalara bir ek yapabilir mi? Bunun için doğal olarak fiziğe odaklanalım. Klasik fizik açıktan açığa determinist bir yaklaşıma sahipken, modern fizik önce kuantum kuramının, sonra da kaos kuramının etkisiyle determinist bakış açısının dışına çıktı. Aslına bakarsanız, uygulamada kaosun anlamı, klasik fiziğin sınırları içerisinde dahi, büyük bir sistemin gelecekteki davranışlarının öngörülemezliğidir. Başlangıç durumuyla ilgili yaptığımız tahminlerdeki küçük hatalar bunu imkânsız kılar. Kaosa modern niteliğini kazandıran (bunun için 1991’de Kyoto ödülüne layık görülen), Massachusetts Teknoloji Üniversitesi’nden Edward Lorenz, bir kelebeğin kanat çırpışının başka bir kıtada bir kasırganın tetiklenmesinde büyük bir etken olabileceği yönündeki ünlü benzetmeyi yapmıştır. Böylelikle, kaos yaklaşımı determinizmi tam anlamıyla dışlamasa da (Lorenz’in “deterministik kaos”un babası olduğu söylenir), Laplace’ın dünyayı bir makinaya benzeten ve istediğimiz takdirde onun herhangi bir parçasına gelecekte ne olacağını hesaplayıp görebileceğimiz yönündeki –bilimin felsefeye görkemli bir mirası olan– ünlü fikri rafa kaldırılmak zorundadır. Bunun yanında, atom boyutunda diyebileceğimiz küçük sistemler ise kuantum kuramından dolayı tahmin edilemezdir.

Dolayısıyla, günümüzde temel olarak determinizm, sağlam örnekleri bulunmayan, saf bir felsefi doktrindir. Bütün bunlar fiziğin işlevsiz hale geldiğini söylemek için değildir. Fizikle tahminde bulunulabilir, ama eşsiz tahminlerde bulunulamaz. Mesele tam da burada; ortalama davranış –yani trilyonlarca atomdan meydana gelen bir gramlık maddenin ne yapacağına özgü bilgiler– tahmin

5 İncil’in Matta 4 kısmında geçen İsa’nın sözünden bir alıntı –ç.n.

edilebilirdir, ama tek bir atomun ne yapacağı değil. Bir yüzyıldan daha uzun zaman önce istatistiksel fiziğin yükselişi gerçekleşti, çünkü insanlar, birçok durum için belirli sonuçları yüksek doğrulukla elde etmenin imkânsız olduğunun farkına vardı. İnsanlar kesin şeyleri tahmin etme arayışından vazgeçip, bunun yerine sistemlerin ortalama davranışlarına ilişkin tahminlere yöneldiler. Bu nedenle determinizmin fiziğin temel ilkelerinden biri olmaktan çıkışı derin köklere dayanıyor. Ama felsefi soru hâlâ hayatta. Peki ya özgür irade? Acaba fiziğin belirli sonuçlarla ilgili keskin tahminler yapmaktaki başarısızlığı tarafından mı korunuyor?

Bu meselenin üzerine şimdi dine değinmek istiyorum. Bugün bilim camiasında daha çok ateizm (bazıları bilinemezcilik diyecek) rağbet görüyor. Farklı zamanlarda rağbet gören yaklaşım farklıydı; Newton'ın harika işlere imza attığı zamanın atmosferini düşünün. Sadece Newton da değil, Maxwell gibi parlak fizikçiler de dindar insanlardı. Ben fizikçi olmanın yanında bir Ortodoks Yahudi olduğumdan dolayı, din ve bilim arasındaki ilişkiyi sık sık kendime sorarım. Bu konuda bir uzman olmamama rağmen, pratik açısından bakıldığında dinin fiziksel evrenle ilgili söyleyecek çok az şeyi olduğu gözlemini yapmaya cüret ediyorum. Bu, apaçık bilinen bir gerçek değildir; bazı çevreler için şu an bu söylediğim, lanetlenmiş bir şeydir. Örneğin, astronomi veya fizikle ilgili teknik bir bilgiye ihtiyaç duyduğunuzda kutsal kitaplara gitmezsiniz, çünkü onların bu meseleler göz önüne alınarak yazılmadığı açıktır. Fiziksel dünyaya dokunduklarında dahi, bu kitaplar insanlarla ilgili daha genel ve ahlaki meseleleri kapsarlar. Bu nedenle mistik düşünüşe sahip birçok insanın yaptığı gibi kutsal kitaplarda fizik ve matematik aramak mantıksızdır.

Fizik bilimi fiziksel evreni anlamlandırmak için yapılan gözlemler ve denemelerle ilerler. Ama fizik bilimi size nasıl yaşayacağınız veya her ikisi de bir parça kötülük içeren iki yoldan hangisini seçeceğiniz gibi konularda bir şey söylemez. Biyoloji de öyle. İkisi de size dünyanın nasıl inşa edildiğini ve nasıl işlediğini söyler. Ama ahlaki kararları nasıl vereceğinizi söylemezler. Sorunlu dünyamızda yeniden yükselişe geçen astroloji bu yüzden anlamsızdır ve bu önermenin doğruluğu uzun zamandır kabul görüyor. Peygamber Yeremya der ki, "...Gök belirtilerinden yılmayın; Bu belirtilerden

uluslar yılsa bile...”.⁶ Varlığımızın ahlaki boyutuyla ilgili bize yardımcı olmak için felsefe, din, şiir ve folklor var.

Bazıları fiziği bir dine dönüştürmeyi önerdiler. Birçokları için astrofizikteki önemli keşifleri kadar *‘The Black Cloud’* [Kara Bulut] gibi ilginç bilim kurgu romanlarıyla da bilinen Britanyalı Sör Fred Hoyle yıllar önce fizik veya astronomiye dayanan modern bir dinin inşa edilmesi gerektiğini ortaya attı. Gençken bunu bir yerde okuduğumu hatırlıyorum. Bunun ne kullanışlı ne de yararlı bir şey olacağını düşünmüştüm, çünkü bu fikir, dinin aslında algımızın varoluşunun farklı bir düzlemiyle ilgilendiği ve bunu fizikten daha doğru bir şekilde yaptığı noktasını kaçıırıyordu. Doğrusu, Hoyle’un fikri çok az karşılık bulmuş gibi görünüyör.

Ahlaki kuralları doğadaki olaylardan çıkarabileceğimizi söyleyen daha eski bir “doğal din” fikri daha var ki, buna göre insan “doğayı kopya etmelidir”. Bu, kulağa fizikten veya biyolojiden yapılma bir din fikri gibi geliyor. Ancak doğada insan davranışları için model olarak almak istemeyebileceğiniz birçok şey de var. Yalnızca ormanda olan şeyleri düşünün; zayıf veya hasta hayvanlar için hayatta kalmak için güçlü ve sağlıklı olmaktan başka şans yoktur. Onlar ilk öldürülenlerdir. Bu ahlak için bir model sunabilir mi? Etik ve ahlaki değerler insana ait şeylerdir. Bunlar insan zihninin çalışma biçiminin ürünüdür. İnsan zihni evrimsel süreçten etkilenmiş olabilir. Bu yüzden, etik ve doğa birbirlerinden tamamen kopuk şeyler değildir; ikisinin arasında bir ilişki vardır, çünkü deyim yerindeyse ikisi birlikte büyümüşlerdir. Genellikle doğayla ilgili birçok şeyi anlarız çünkü biz doğanın içerisinde geliştik, ama ahlak bence tamamen deneyimlerimizden türettiğimiz bir şey değildir. Onu hayvanlar aleminde göremezsiniz. Hayvanlar belirli şekillerde davranmak için kendi nedenlerine sahiptir ama bunlar en iyi şekilde hayatta kalmakla ilgili şeylermiş gibi görünür, ahlak dediğimiz şeyle ilgiliymiş gibi değil. Böyle bir akıl yürütmeye dayanarak din ve etik anlayışımı fizikten ayrı tutarım.

Veda etmenin zamanı geldi. Söyleyebileceğim her şeyi söylediğim için değil. Epey gençken, aklımdan geçen her şeyin başkalarının da ilgisini çekmeyebileceğinde karar kıldım. Bu beni söyleyeceğim şeylerde hayli seçici yaptı. Eğer herkes bu şekilde davransaydı, hayat çok daha hoş olurdu.

6 İncil’in Yeremya 10 kısmından bir alıntı –ç.n.

Kara delikler fizikçilerin dünyasının en garip sakinleri arasında yer alır. Jacob Bekenstein bu kitapta, John A. Wheeler'ın bir kara deliğin içerisine bir fincan sıcak çay dökülse ne olacağına ilişkin sorusu üzerine, kara delik termodinamiğinin kendisi ve Stephen Hawking tarafından nasıl keşfedildiğinin hikâyesini anlatıyor. Dahası bu keşfin geçtiğimiz yirmi yılda kuramsal fiziği derinden etkilemiş olan gizemli bilgi paradoksu ve holografik sınır gibi sonuçlarını açıklıyor. Bu konular yazarın şahitlik ettiği ve bizzat parçası olduğu birçok fizik serüveninin sadece bir kısmını oluşturuyor. Yazar bu kitapta bu serüvenlerden bazılarının doğuşunu ve gelişimini anlatıyor.

“Kara delik kuramının devrimcisi...”

– *New York Times*

“Jacob Bekenstein’ın kara deliklerin entropisini keşfi, son on yılların en önemli gelişmeleri arasındadır.”

– Leonard Susskind



ISBN-978-605-69691-7-1

