

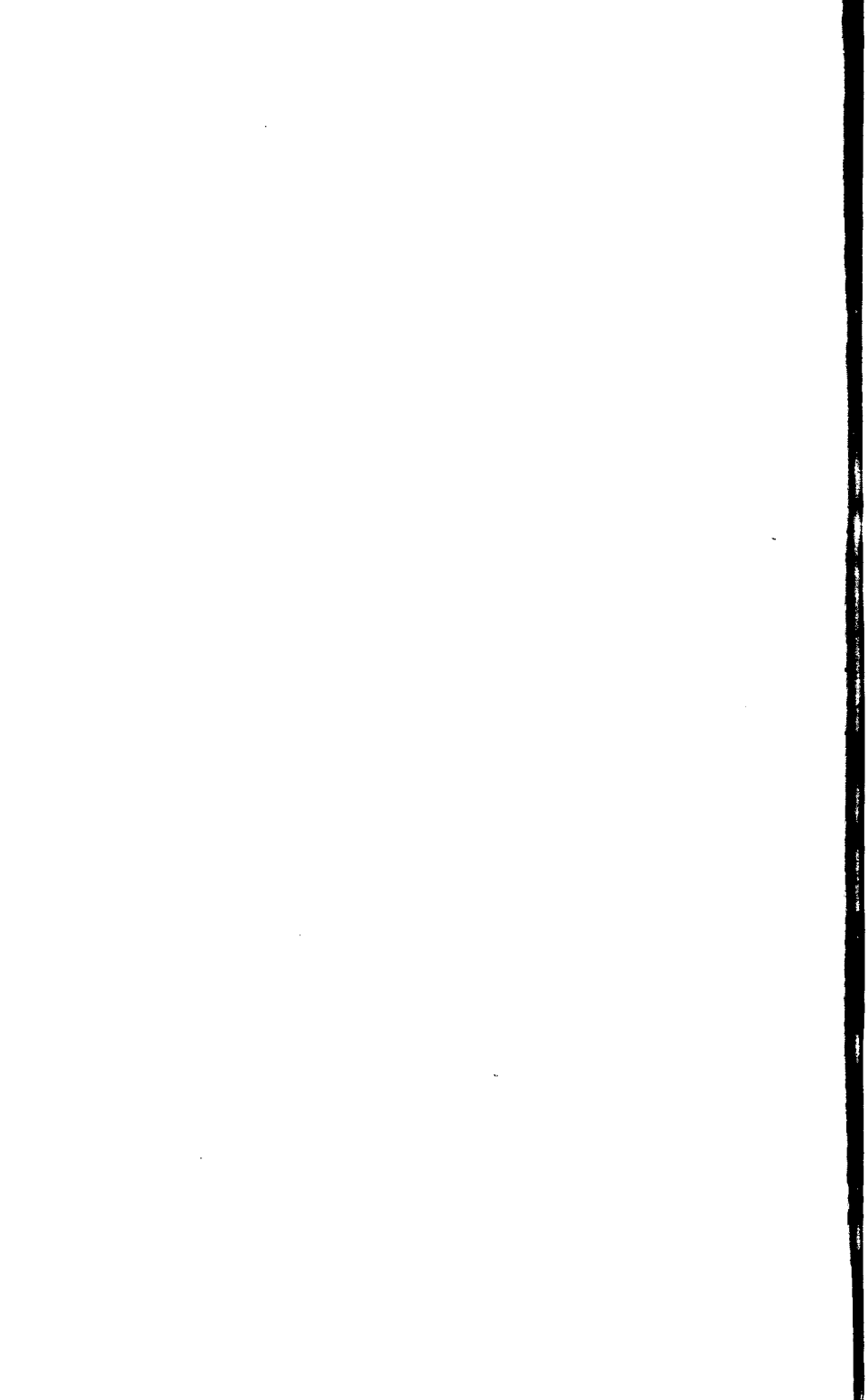
Oyunun Kurallarını Fizik Söyler

Eren Veysel ERSOY

$$|\Psi(\text{psi})\rangle = |\text{canlı}\rangle + |\text{ölü}\rangle$$



ODTÜ YAYINCILIK®



Oyunun Kurallarını Fizik Söyler

Eren Veysel ERSOY



ODTU YAYINCILIK

Oyunun Kurallarını Fizik Söyler
Eren Veysel ERSOY

ISBN: 978-605-4362-31-8



ODTÜ Geliştirme Vakfı
Yayıcılık ve İletişim A.Ş. Yayınları
ODTÜ Yayıcılık

© Tüm yayın hakları ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıcılık ve İletişim A.Ş.'nindir. Yayıcının izni olmaksızın, hiçbir biçimde ve hiçbir yolla, bu kitabın içeriğinin bir bölümü ya da tümü yeniden üretilemez ve dağıtılamaz.

Genel Yayın Yönetmeni
Levent GÖNÜL

Sayfa Düzeni ve Kapak Tasarımı
Emrullah ÖZ

1. Basım Nisan 2011
Aydoğdu Ofset Matbaacılık ve Amb. San. Tic. Ltd. Şti.

ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıcılık ve İletişim A.Ş.
İnönü Bulvarı, ODTÜ Yerleşkesi 06531 ANKARA
Tlf.: (312) 210 38 70 - 210 38 73
Faks: (312) 210 15 49
E-posta: odtuyayincilik@odtuyayincilik.com.tr
İnternet: www.odtuyayincilik.com.tr

Tüm sevdiklerime ve beni sevenlere...

Teşekkür

Öncelikle, kendisi idealist bir hukukçu olan, ben ve kardeşlerime ilkökul çağlarımızdan beri her fırsatta çantalar dolusu kitaplar hediye eden, *Grimm Kardeşler ve Andersen'den Masallar'dan* tutun da *Jules Verne'in Aya Seyahatine, Kaptan Nemo'dan* tutun da *La Fontaine'den Masallar'a* kadar sayamadığım yüzlerce kitabı okumamızı teşvik ederek bizlere çok geniş bir bakış açısıyla dünyayı görmemizi sağlayan babam hâkim *Hakkı ERSOY'a* ve öğretmenlik mesleğinin vermiş olduğu disiplinle bana ve kardeşlerime eğitimlerimiz süresince büyük destek vermiş olan annem Z. Maide ERSOY'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Lise öğrenimim sırasında matematik ve fizik alanında bizlere bir şeyler öğretebilmek adına büyük çaba sarf eden ve bu konularda çok sağlam temel bilgileri edinmemizi sağlayan saygıdeğer hocalarım Sayın *İsmail DÖNMEZ* ve Sayın *Ahmet ŞAHİN'e* ne kadar teşekkür etsem azdır, haklarını ödeyemem.

Üniversitede fizik mühendisliği okurken her konuda çok kahrımızı çeken, başta Sayın *Prof. Dr. Satılmış ATAĞ* olmak üzere tüm hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. *Kütlesiz bir parçacık* olarak üniversiteye başlamış olan biz öğrenciler, onların *bilgi bozonları* sayesinde kütle kazandık, yani bilgiye büründük. Tabi bu sırada hocalarımızın *sabır simetrilerinde kırılmalar(!)* olduğundan da hiç şüphem yok.

Ayrıca kitabı akademik ve bilimsel bir gözle değerlendiren, ve önerilerde bulunan Sayın *Prof. Dr. Şakir ERKOÇ'a* çok teşekkür ederim.

Kitabın yayınlanmasında büyük emeği geçen ve deyim yerindeyse "elimden tutan" ODTÜ Yayıncılık Genel Yayın Yönetmeni Sayın Levent Gönül'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu kitabı yazma sürecinde kitaplar ve dokümanlarla evi dağıtmama ve onca işi arasında biteviye fizikten ve kitaptan bahsetmeme anlayış gösteren, her zaman ve her yerde bana desteğini esirgemeyen, kendisi de fizik mühendisi olan sevgili eşim Çiğdem ERSOY ile fiziğe hiçbir ilgi duymamasına rağmen fizik tartışmalarının arasında kalan hukukçu kızım Bahar ERSOY'a sabırlarından dolayı teşekkür etmem gerekir.

Son olarak; bu kitabı yazmamda bana sürekli manevi destek olan, beni harekete geçiren, sayısız teşvik ve yüreklendirme seanslarını esirgemeyen, fizikçi olduğu kadar müzik sanatçısı da olan değerli meslektaşım Sayın Şehriban EBEM'e ve yazım tasarrım konusunda vermiş olduğu değerli ipuçları için Sayın Güleser AYKARA'ya teşekkürlerimi sunmak benim için bir boyun borcudur.

Saygılarımla...

Sunuş

Fizik mühendisliği diplomamı alalı yirmi sekiz yıl geçmesine ve yirmi altı yıldır bilgisayar sektöründe yöneticilikler de dahil olmak üzere, programcılıktan veritabanı ve sistem yöneticiliğine kadar idari ve teknik her alanda görev yapmış olmama rağmen, bu süre içerisinde fiziğe olan ilgim ve sevgim hiç azalmadı. Hatta bilgisayar sektöründe çok uç teknik görevlerde bulunmama rağmen yaptığım işleri elimde olmaksızın hep fizikle mukayese ederek fiziğin derinliği yanında sürdürdüğüm işlerin çok yüzeysel olduğunu görüp, keşke doğrudan fizikle ilgili bir işim olsaydı dediğim çok olmuştur. Bu noktada neden üniversitede kalıp kendime akademik bir yol çizmediğim gibi bir soru akla gelebilir. O zamanki akademik şartlar, fiziğin “f” sini görmek istemeyecek kadar kafamın yorgun olması, ücret politikaları, bilgisayar dünyasının hızla gelişmeye başlaması ve açıkça söylemek gerekirse *havası*, beni bilgisayar sektörüne iten en önemli nedenlerdir.

Ancak, tüm meslek hayatım boyunca asıl mesleğim olan fizik mühendisliği “*Sakin beni unutma, ben buradayım*” diye kulağıma hep fısıldamıştır. Ben de onu unutmamak ve ona olan borcumu bir nebze de olsa ödeyebilmek umuduyla, ama aynı zamanda ona layık olabilme endişesini de taşıyarak bu kitabı yazmaya her nasılsa cüret edebildim. Belki de sonsuz büyüklükteki fizik evreninde benim de bir *kırıntım* olsun istedim. Biliyorum, küçük bir kırıntının kütlesi bile, fizik hakkında yazdıklarımla kıyaslanınca çok büyük kalacaktır, isterseniz siz benim yazdıklarıma

kırıntı yerine *"kütlesiz bir parçacık"* diyebilirsiniz, hiç alınmam ve gücenmem.

Tüm fizik biliminin tek bir kitapta toplanmasının mümkün olamayacağını herhalde takdir edersiniz. Ancak, yaşadığımız evrenden haberdar olma, fark etme, genel bir bakış sağlama, fiziğin nereden gelip nereye gittiği, sorunları, çelişkileri, yetersizlikleri, başarıları, gelişim evreleri, hedefleri ile yaşantımızdaki yeri ve önemi gibi konuları bir fizik mühendisinin gözüyle fizik dünyasının içinde dolaşarak hissettirebilmek bu kitabın ana amacıdır. Ayrıca, fizikte ve doğal olarak matematikte daha da derinlere gitmek isteyenler için bazı kaynaklar ve konular ile birlikte literatürü takip edebilmeyi kolaylaştırmak üzere İngilizce eşanlamlılarının da verilmesine özen gösterilmiştir.

Ama laf aramızda, *"Ben ne yapıyorum? Okumayı pek sevmeyen bir toplumda hele ki bir fizik sohbetini kim okur?"* diye de çoğu kez düşünmedim değil. Acaba, klasik mekanikte tanımlandığı gibi, bir *"virtüel iş"*e mi soyunuyordum? Yoksa, *"cahil cesareti"* deyinimin ne kadar doğru bir söz olduğunu ispatlamaya mı kalkışıyordum? Belki de her ikisiydi!

Sonunda, kendisini tanımaktan büyük mutluluk duyduğum değerli meslektaşım Sayın Şehriban EBEM'in yoğun ikna çabaları sonucunda bu satırları karalamaya karar verdim. Ancak baştan söyleyeyim; çevresinde olup bitene ilgisiz, doğanın düzenini ve ne olduğunu merak etmeyen, okumayı sevmeyen, düşünmeyi ve öğrenmeyi aklının ucundan bile geçirmeyenlere göre değildir bu kitap. Bu kapsama girdiğini düşünenler, okuyarak ne kendilerine eziyet etsinler, ne de fiziğe!

İçindekiler

Teşekkür	v
Sunuş	vii
1. Giriş	1
5-Fen-B'den Gelen Nostaljik Esintiler	1
Gözlemler – Düşünceler	6
2. Fizik Denilince Ne Anlamalıyız?	9
Fizik Yaşamımızın Neresindedir?	12
Ayrılmaz İkili: Fizik ve Matematik	31
Fiziğin Diğer Mesleklerle İlişkisi: Fizik Gerçekten Bu Kadar Yaygın mı?	32
3. Fiziğin Doğuşu ve Gelişimi	38
4. Klasik Fizik Nedir? Niçin Yetersiz Kalmıştır?	46
5. Sağduyuya Aykırı Fizik: Kuantum Fiziği	59
Ayrı Dünyalar, Sınır Durumlar	60
Peki, Hangi Fiziği Kullanacağız?	61
Mikro Dünyanın Gözleri	64
Sürek Avı Değil, Süreksizlik Avı	64
Sağduyuyla Dalga Geçen Parçacıklar	65
Bu Tünel Başka Tünel	68
Fotonların Büyüleyici Dansı	70
Ele Avuca Sığmaz Parçacıkların İzinde	73
Açıların Gücü Adına: Y_{lm} 'ler	80
Kuyuya Düşmüş Tutsak Parçacıklar	84

Bir Heisenberg Filmi : Leyla ile Mecnun - Konum ile Momentum	85
Dalga Paketinin İçinde Acaba Ne Var?	87
Parçacıklar Makyaj Yapar mı?	88
Şans ve Olasılıklar Prensi: Niels Bohr	89
Yorumcuların Kralı: Max Born	91
Arkayı Dörtleyelim Beyler: Wolfgang Pauli	91
Elektronların ve Antimaddelerin Efendisi: P.A.M.Dirac	92
6. Fizikte Felsefi Ayrılıklar, Çelişkiler ve Düşünce Deneyleri.....	94
6.a. Klasik Fizikte Kesinbelirleyicilik ve Atomculuk	95
6.b. Kuantum Fizikinde Olasılıkçılık ve Bütünlükçülük	101
6.c. Çelişkiler (Paradokslar) ve Düşünce Deneyleri.....	108
Schrödinger'in Kedisi.....	108
Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoksu.....	110
7. Parçacık Fizik, Standart Model, Etkileşmeler ve Kuvvetler	113
7.a. Parçacık ve Parçacık Fizik Ne Anlama Gelir?	114
7.b. Standart Model	116
İstatistiğe Gönlül Vermiş Parçacıklar:	
Fermiyonlar ve Bozonlar	120
En Küçük Temel Parçacıklar: Leptonlar, Kuarklar ve Bozonlar.....	122
Kuark Mapushaneleri: Hadronlar (Hadrons)	124
(i) Ağır Abiler: Baryonlar (Baryons).....	124
(ii) Orta Sınıfın Parçacıkları: Mezonlar (Mesons).....	125
7.c. Etkileşmeler ve Kuvvetler	
(Interactions and Forces)	126
Güçlü Çekirdek Kuvveti (Strong Nuclear Force)	127
Elektromanyetik Kuvvet (Electromagnetic Force).....	128
Zayıf/Elektrozayıf Kuvvet	
(Weak/Electroweak Force).....	130
Kütleçekim Kuvveti (Gravitational Force).....	131
Büyük Birleşik Kuram ve Herşeyin Kuramı.....	132
Matematik Yöntemler ve Kavramlar	133

Tanrının Parçacığı.....	134
Kuantum Elektrodinamiğı	
(<i>Quantum Electrodynamics - QED</i>).....	137
Kuantum Kromodinamiğı	
(<i>Quantum Chromodynamics - QCD</i>)	139
Standart Model'in Eksiklikleri.....	140
8. SONUÇ: Oyunun Kurallarını Fizik Söyler.....	143
Sonsöz.....	147

Giriş

5-Fen-B'den Gelen Nostaljik Esintiler

Yıl 1975, sınıf 5-Fen-B, Giresun Lisesi fen bölümü ikinci sınıf öğrencisiyim. Her öğrenci gibi beni de yavaş yavaş üniversite sınavı endişesinin sarmakta olduğu ve acaba hangi mesleğe yönelmem gerektiği sorusunun kafamı kurcaladığı yıllar. O zamanlar sadece pilot liselerde okutulan yaklaşık altıyüz sayfalık PSSC fizik kitabını okuyoruz. Fizik derslerine ilgi duymakla beraber, o yaşların verdiği uçarılıkla ara sıra derslerde arkadaşlarla dalga geçmekteyiz. Bir gün hocamız dersi anlatırken, bugün dahi çok iyi hatırlıyorum, konu ışık dalgalarının girişim ve kırınımıydı, bizler herhalde yine derse ilgisiz davranıyor olmalıyız ki, dersi keserek benim de hayatıma yön verecek olan o önemli konuşmayı yaptı. Dedi ki; *“Arkadaşlar, yaşantınız boyunca merak edebileceğiniz her konuyu, canınızın çektiği zaman öğrenemezsiniz, işte fizik de bunlardan biridir. Örneğin altmış yaşına geldiğinizi ve o zamana kadar hiç tarih okumadığınızı düşünün, oldu ya İkinci Dünya Savaşını merak ettiniz, eğer okuma yazmanız varsa bir kütüphaneye gider okur öğrenirsiniz. Ancak, diyelim ki o yaşta termodinamiği veya kuantum mekaniğini mi merak ettiniz, işte o zaman yandınız, isteseniz de o sa-*

atten sonra öğrenemezsiniz. Çünkü bırakın merak ettiğiniz konunun fiziğini anlamayı, önce onu anlamanızı sağlayacak matematik altyapıya sahip olmanız gerekir". Sınıf, hocanın bu sözlerinden bayağı etkilenmiş görünüyordu. Bir kaç dakika sessizce kalakaldıktan sonra kendi kendime dedim ki; "Demek ki bizi fizik yasalarının sırrına götüren yol, bilgi taşlarını tek tek sırasıyla yerine koyarak ve matematik ile bu taşları birbirine yapıştırarak ulaşılabilen uzun ve meşakkatli bir yoldur, bu taşlardan birinin bile zamanında yerine gerektiği şekilde konulmaması fizik yasalarını anlamamızı kısmen veya tamamen engelleyebilir". Üniversiteden fizik mühendisi olarak mezun olalı yaklaşık otuz yıl geçmesine rağmen, işte ben de hiç bir zaman tamamlayamayacağımı bile bile, sonsuz sayıdaki bu taşları hala yerlerine uygun bir şekilde yerleştirmeye çalışıyorum.

Yukarıda bahsettiğim konuşmayla tüm yaşantımı şekillendiren, bir anlamda edineceğim mesleği seçmeme yol açan, deva bulmaz fizik virüsünü tek bir sözüyle kanıma işleyen kişi, saygıdeğer fizik hocamız Ahmet ŞAHİN'di. Aynı dönemde bizlere çok sağlam bir matematik altyapısı kazandıran efsane matematik hocamız Sayın İsmail DÖNMEZ'i de anmadan ve her ikisine de şükranlarımı sunmadan geçmem mümkün değildir. Onların bana kazandırmış olduğu temel bilgiler sayesinde, fizik mühendisliği bölümünün birinci sınıfında okurken analiz ve mekanik derslerini neredeyse hiç çalışmadan ikinci sınıfa geçebilmişim.

Çoğumuzun öğrencilik yıllarından hatırlayacağı gibi, fizik dersi denilince birçok öğrencinin içini bir tedirginlikle birlikte, acaba bu dersi başarabilecek miyim endişesi kaplar. Bu duyuyu, hem kendimde hem de birçok arkadaşımda gözlemişimdir. Öğrenciler genellikle orta öğretim yıllarından başlamak üzere arkadaşları ve/veya aileleri gibi yakın çevrelerinden fizik derslerinin zor olduğu, sayısız formüllerle boğuşmak gerektiği ve hatta fizikçilerin biraz da kaçık insanlar olduğu konusunda birçok önduyumlar alarak fizik konusunda daha baştan olumsuz önyargılara sahip olurlar. Bir de buna eğitimini fizik alanında tamamlamış üniversite mezunlarının iş bulma konusunda yaşadığı sorunlar ve güçlükler de eklenince, fizik iyice çekici olmaktan çıkmakta ve yukarıda bahsedilen önyargıların da etkisiyle öğ-

renciler fiziğe mesafeli durmaktadırlar. Bu durumda, çoğunlukla öğrenciler fiziği ileride meslek olarak seçmeyi düşünmek bir yana, bir an önce geçerli notu herhangi bir şekilde alarak bu dersten kurtulmaya çalışmaktadırlar. Böylece fizikten soğumaya neden olabilecek ilk önemli adım atılmış olur. Genellikle fizik dersini sevmeyen, sıradan ve masum bir öğrencinin doğal davranışı olarak yorumlanan bu durumun aslında bir toplum için ne kadar olumsuz bir tablo yarattığı ilk etapta ne yazık ki kolayca görülememektedir. Öğrencileri fizikten uzaklaştıracak ikinci faktör ise öğretmenlerin derse yaklaşım tarzlarıdır. Eğer bir öğretmen fiziğin günlük yaşantımızda nasıl ve nerelerde karşımıza çıktığını, fiziğin ve temel bilimlerin neden toplumlara ve insanlığa çok gerekli olduğunu öğrencilere hissettiremez, deneylere gereken ağırlığı vermez ve fiziğin özünden uzaklaşıp öğrenciyi formüllere boğarak dersleri sadece sıkıcı bir problem çözme saatine çeviren bir yaklaşım sergilerse, fiziğin büyüü öğrenci için hemen oracıkta kaybolmaya başlar. Bu iki olumsuz faktörün bir araya gelişi, bir veya iki öğrenci dışında tüm sınıfın fizik dünyasının dışına itilmesine neden olur.

Yukarıda bahsettiğim ikinci olumsuz faktör çerçevesinde ifade edebileceğim önemli bir hususu net bir şekilde söylemek istiyorum; *“Öğrencilerin fizik derslerinde çoğunu anlamadan boğuştukları, ezberlenmiş sayısız formüllerin doğada neye ve hangi olaya karşılık geldiğine dair bir kavrayışı büyük ölçüde geliştiremedikleri gerçeği, ne yazık ki orta öğretimle sınırlı değildir”*. Üniversitelerimizin fizik ve fizik mühendisliği eğitimi veren bölümlerinde de aynı sıkıntı ve eksiklikler sürmekte olup, hem öğrenciler hem de mezunlar arasında bu konular sıklıkla dile getirilmektedir.

Orta öğretim ve onun devamı olan üniversite seviyesinde süregelen bu tür sorunlar nedeniyle öğrencilerin fizik eğitimini seçmeme, seçmiş olanların da bu alanda kalmama olasılığı artmaktadır. Asıl ilginç olan ise, fizik bölümü mezunu üniversitelerinin büyük çoğunluğu için mezuniyetle birlikte fizik de bitmektedir. Fiziğe ilgi duyulmaması sonucunda doğal olarak bu bilim dalma talep azalacak ve ülkenin *nitelikli fizikçi havuzunda* daralma kaçınılmaz hale gelecektir. Bu durumda ülkeleri teknolojik

ve bilimsel alanda ileriye taşınması beklenen insan kaynağı potansiyeli yetersiz kalacak ve buna paralel olarak uluslararası başarılarla imza atabilecek fizikçilerin ortaya çıkabilme olasılığı da düşecektir.

Gelişmiş ülkeler göz önüne alındığında, bu ülkelerin temel bilimlere büyük önem ve destek verdikleri açıkça görülmektedir. Çünkü temel bilimlerin ileri teknolojilerin odak noktasıdır, itici güçüdür ve teknik gelişmelerin teorik temelini oluştururlar. Dünyada hiçbir buluş ve teknolojik gelişme yoktur ki teorik çıkış noktasını temel bilimlerden almamış olsun. Bu sistem, insanlık var oldukça da böyle devam edecektir, yani temel bilimlerin tüm teknolojik gelişmelerin lokomotifi olmayı sürdürecektir.

Acaba en temel bilimlerden biri olan fiziğe yeterince ilgi gösterilmemesi ve değer verilmemesi bir ülke için ne gibi bir dezavantaj oluşturur? Gelin bunun cevabını hep birlikte arayalım. Temel bilimlere (*fizik, kimya, matematik, biyoloji*) öğrencilerin heveslendirilmediği, teşvik edilmediği bir ülkede doğal olarak bu alanda çalışmayı, meslek edinmeyi ve ilerlemeyi idealist öğrenciler dışında hemen hiç kimse istemeyecektir. Çünkü tahsil hayatı oldukça zor, mezun olduktan sonra iş bulma sorunu olan ve toplum tarafından anlaşılamadığı için hak ettiği değer verilememiş bir mesleği seçmek ancak idealizmle açıklanabilir. Temel bilimlerin eğitimi almış, bu disiplinle yetişmiş ve bu düşünce tarzını özümsemiş olan herhangi bir kişinin analitik düşünme ve objektif değerlendirme ışığı altında analiz ve sentez yapabilme yeteneği oldukça gelişmiş olmasının yanında, olaylara bilimsel açıdan yaklaşma, sorgulama ve şüphecilik yönleri de artık kişiliğinin bir parçası olmuştur. Bu özellikleri kazanmış olan bir kişi dünyaya, evrene ve topluma daha esnek bakabilmekte, disiplinler arasındaki geçişleri daha hızlı ve kolay yapabilmektedir. Çünkü tüm evrene hangi gözle bakması gerektiğini öğrenmiştir. Fizik ve diğer temel bilimlere önem verilmediğinde, yukarıda bahsettiğimiz özelliklere sahip insanların sayısı sınırlı kalacak, bu sayının sınırlı kalması nedeniyle de pozitif bilimlerde ilerleme olasılığı azalacak ve buna bağlı olarak da teknolojik ilerlemeler yetersiz kalacaktır. Böyle toplumların, teknoloji ve bilimde

ileri gitmiş ülkelerin uydusu olmaktan başka seçenekleri kalmaz. Unutmayalım; 3G cep telefonları, MR cihazları gibi ileri teknoloji ürünlerini anında ülkeye getirip halka kullanırmak, teknoloji ve bilimde ilerlediğimiz anlamına asla gelmemektedir. Olsa olsa böyle bir ülkeye, ileri ülkelerin *teknoloji ürünleri pazarı* demek daha uygun olur.

Bu noktada çok önemli bir hususu vurgulamak istiyorum. Toplumda, teknolojik gelişmeleri sadece elektronik, bilgisayar, makine v.b. mühendislik dallarının sağladığı, fizik ve diğer temel bilimlerin sanki bunda rolü yokmuş gibi bir algılama vardır. İşte en büyük yanılğı buradadır. Yine tekrar edelim, *"Dünyada hiçbir buluş ve teknolojik gelişme yoktur ki teorik çıkış noktasını fizik ve diğer temel bilimlerden almamış olsun"*. Günümüzde bilim ve teknoloji üstünlüğünü elinde bulunduran ülkeler bu gerçeği fark etmiş oldukları için, diğer ülkeler karşısında büyük teknik avantaj elde etmişlerdir. Kendi teknolojisini geliştiremeyen toplumlar ise, ülke savunması gibi en hayati konularda bile dışa bağımlı kalmaktadır. Görüldüğü gibi, *temel bilimlere önem ve destek verilmesi, bu alanda çalışanların cesaretlendirilmesi, teşvik edilmesi bir toplum için lüks olmayıp aksine bir zorunluluktur*.

Doğanın, yani tüm evrenin çalışma düzeninin anlaşılması, yaşamı kolaylaştıran tüm akla gelebilen cihaz ve araçların icat edilmesi, silahların ve savunma sistemlerinin geliştirilmesi, nükleer santrallar, cep telefonları, otomobiller, uçaklar, gemiler, roketler, televizyon, radar, MR ve tomografi cihazları gibi burada sayamayacağımız akla gelebilecek her teknolojinin temelinde fizik yer almaktadır. Doğaldır ki fizik kuramlarını(*teorilerini*) adeta iğneyle kuyu kazarak fizikçiler geliştirirler ve insanlığın hizmetine sunarlar, ancak fizik sadece laboratuvarlarda deneylerle uğraşan veya teorik çalışmalar yapan fizikçilere ait olmayıp, dolmuş şoförü Ahmet beyin, ev hanımı Ayşe teyzenin, emekli Rıza amcanın da gündelik yaşamında iç içe yaşadığı bir olgudur. Bunun nasıl olduğunu ilerleyen bölümlerde daha net bir şekilde göreceğiz. Kısacası şimdiden diyebiliriz ki; *"Yaşam fiziğin içinde, fizik de yaşamın içindedir"*.

Gözlemler - Düşünceler

Fırsat buldukça fizikle ilgili yeni yayınları, etkinlikleri mümkün olduğunca takip etmeye çalışıyor ve bilgilerimi unutmamak için de ders kitaplarımı ara sıra da olsa gözden geçirmeye hala özen gösteriyorum. Bu arada doğal olarak kitapçılara da sık sık uğruyorum. Üniversitede okuduğumuz yıllarda orijinal fizik, kimya, matematik ve mühendislik kitapları, ithal ve pahalı olmasına rağmen kitapçılarda en başköşeleri süslerdi. Son yıllarda bu tür kitaplar yavaş yavaş çeşitliliğini kaybederek gerilere doğru çekildiler. Beni en çok üzen olay ise, son gittiğim büyük bir kitapçıda artık bahsettiğim türden kitapların olmadığını fark etmek veya en arkadaki kelepir kitaplar bölümünde birkaç adet ikinci ellerinin yerlerde sürünmesini görmek oldu. Artık öndeki gösterişli raflara ise KPDS, KPSS, LYS, LGS, ÖSS v.b. test kitaplarının büyük bir ihtişamla yerleştiğini görmek beni tam anlamıyla hayal kırıklığına uğratmaya yetmişti, ağlamaklı oldum, daldım eski günlere gittim. Son otuz yılda nereden nereye gelmiştik?

Bu durumu, istediğimiz kitap ve dokümanlara artık internetten 'pdf' formatında erişebildiğimiz için, artık bu tür kitapların bu nedenle ortada görünmediği şeklinde açıklamaya çalışanların olduğunu biliyorum. Ancak bu görüş, bir parça haklı tarafı olmasına rağmen, olayı tek başına açıklamaya yetmemektedir. Çünkü tüm testleri, test kitaplarını, aklınıza gelebilecek her türlü gazete ve kitabı da internetten bulabildiğiniz/okuyabildiğiniz halde, aynı zamanda fiziksel olarak da raflarda yer almaktadırlar.

Ben ise; temel bilimlere ilginin çok azaldığı, toplumun pozitif bilimlerden oldukça uzaklaştığı, kendi ders kitaplarını bile hakkıyla okumayan öğrencilerin başka kaynak gereksinimi duymadığı, test ve ezberciliğin en üst seviyeye çıktığı, kimya, fizik ve matematikten 1(bir) alan öğrencilerin bile sınıfta kalmasının *neredeyse yasaklandığı* bir ortamda bu sonuçlara ulaşıldığı kanısındayım. Vardığım bu sonucu doğrudan destekleyen önemli bir açıklama, o dönemin ÖSYM Başkanından gelmiştir. 14/06/2010 tarihli gazetelerde yer alan haberlere göre ÖSYM

Başkanı Sayın Ünal YARIMAĞAN, üniversite seçme sınavında sorulan $80 - (12 + 3 + 8) = ?$ sorusunu sınava giren bir buçuk milyon lise mezunu öğrenciden altıyüz bininin yapamadığını ifade etmiştir, yani on öğrenciden dördü bu soruyu yapamıyor. Bu sonucun pdf'lerle açıklanabilecek bir durumu yoktur, bu sözün bittiği yerdir. İkinci çarpıcı kanıt ise; Aralık 2010'da açıklanan ve OECD'nin dünyada 65 ülke arasında 2009 yılında yapmış olduğu PISA araştırmasının sonuçlarıyla gelmiştir. Bu araştırma, ilgili ülkelerdeki 15 yaş öğrencilerinin okuma, anlama, matematik ve fen alanlarındaki başarılarını ölçmektedir. Sonuçlara bakıldığında ise Türkiye'nin en sonlarda yer aldığını üzümlere görmekteyiz.

Özel dershanelerin liselere ve üniversitelere alternatif olduğu günümüzde, beşikten mezara kadar kursa giden, sınavlarla yapıp kalkan ve sınavsız bir yaşamı düşünemeyen bir toplum haline gelmemize rağmen, sadece matematik-fizik alanında değil, diğer her alanda da cehaletimiz sınır tanımamaktadır. Örneğin ben öyle öğrencilerle karşılaştım ki; lisede fizik okumalarına rağmen ısıyla sıcaklığı, çabukluk ile hızı, ağırlık ile kütleyi birbirinden ayıramıyorlar.¹ Bıraktım fiziği-matematiği, örneğin, televizyondaki yarışma programlarında ve gazete haberlerinde rastladığımız azımsanamayacak sayıdaki üniversitelilerin Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluş tarihini bilememeleri, Hitler'i hala yaşıyor sanmaları beni dehşete düşürmeye yetmektedir. Bu öğrenciler hayatlarında ne yapmışlardır, nerelerde yetişmişlerdir, ne öğrenmişlerdir, bunlar nasıl üniversitelidir, nasıl okumaktadırlar, nasıl mezun olmuşlardır? İnsanın inanası gelmiyor. Abartmıyorum, bizler bunları ilkokulda dahi biliyor olduğumuzdan, benim bu cahilliği aklım almamaktadır. Herhalde eğitimcilerin ve sosyologların, geline bu noktayı izah edecek akla uygun açıklamaları vardır.

İç karartıcı gözlemlerden sonra sizlere bazı iyi haberler de vereyim. Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

1. Not: Çoğu kişi otomobillerin hız göstergesinin gerçekten otomobilin hızını gösterdiğini sanmaktadır, ama fizik için hiç de öyle değildir! Fiziğe göre hız göstergesi sadece çabukluğu göstermektedir, hızı değil.

önderliğinde Ankara-Gölbaşı'nda kurulma çalışmaları sürdürülen Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin 2023'te tamamlanarak devreye alınmasıyla birlikte parçacık çarpıştırma deneylerinin artık ülkemizde de yapılmaya başlanacak olması oldukça sevindiricidir. Ayrıca, Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'ne (CERN) asil üye adaylık başvurumuzun da kabul edilmiş olması, bunca olumsuzluklar arasında pırıl pırıl parlamaktadır.

2

Fizik Denilince Ne Anlamalıyız?

Bilindiği veya tahmin edildiği üzere, fizik bilimi bir okyanus gibi geniş ve bir o kadar da derindir. Fizik okyanusuna suyun sığ olduğu kıyılardan girilmezse boğulmak an meselesidir. Ayrıca bir şekilde ayağımızı fiziğin sularına değdirdiğimizde yavaş yavaş yüzmeye başlasak bile, bu okyanusun ucunu bucağını keşfetmemiz uzun yıllar alır, nerede başlayıp nerede bittiğini ömrümüz boyunca hiç algılayamayabiliriz. Çünkü iyi yüzebilsek de, hangi yöne ve ne için yüzdüğümüzü bilemezsek, bu okyanus içinde bilinçsizce sağa sola kulaç atmaktan öteye gidemeyiz ve sonunda yoruluruz. Ben istiyorum ki, bu okyanusa önce kuşbakışı yukarıdan bir bakalım, sınırlarını (eğer varsa!) bir görelim, fırtınalı bölgelerini not edelim, en derin çukurlarını koyu lacivert ile boyayalım, kıtalar diyebileceğimiz en önemli kuramlarını ve bu kıtalar arasındaki en temel ana ulaşım rotalarını kırmızıyla çizelim, bizi bu sularda dolaştıran ünlü kaptanlarla tanışalım. Böyle yaparsak, suya dalmadan önce kimle *dans ettiğimiz(!)* konusunda bir öngörüye sahip olacağımızdan kuşku yoktur. Yukarıda yer alan “*iyi yüzebilsek de*” ifadesi, derslerde anlatılan fizik konularına ilişkin problemleri fazla zorlanmadan çözebilen öğrencileri vurgulamak için kullanılmıştır.

Fizik kavramı genellikle insanlarımızda karmaşık problemleri, içinden çıkılmaz sayısız formülleri, fizik dersi yüzünden sınıfta kalmaları, özel ders almaları ve hatta beli/bacağı ağrıyanların medet umduğu tıbbın bir dalı olan fizik tedaviyi çağrıştırmaktadır. Belki okuyucuya abartı gibi gelebilir ama benim bizzat yaşadığım bir olayı sizlere aktararak devam etmek istiyorum. Üniversite yıllarında birkaç arkadaşla birlikte o zaman bölümümüzde doçent olan, çok sevip saydığımız bir hocamızın evinde çay içip sohbet ederken birden kapı çalındı, saat gecenin 11'i, hoca kapıyı açtı, biz de merak ettiğimizden hep beraber kapıya seğirttik, bir de baktık ki üst katlardan birinde oturan yaşlı bir amca gelmiş hocamıza diyor ki; *"Evladım bizim hanımın beli çok ağrıyor, yerinden kalkamıyor senin fizikçi olduğunu duydum da acaba bir bakabilir misin?"* Hocamız hafif bir tebessümle amcaya fizik tedavi uzmanı olmadığını, mesleğinin çok farklı bir dal olduğunu izah etmeye çalıştıysa da amcanın yüzünde pek inanmış bir ifade oluşmadı, *"Komşuluk böyle günlerde belli olur, ne olurdu bir bakıversedydin"* diye hafifçe söylenerek gitti. Hocamızla birbirimize bakakalmıştık, çünkü sözün bittiği anı yaşıyorduk.

Belki inanamayacaksınız ama tamamıyla gerçektir; fiziğe yakışıklılık, güzellik, alımlılık, boy, pos anlamından başka bir anlam yükleyemeyen insanlarla bizzat karşılaştım.

Peki, fiziği nasıl algılamalıyız? Nasıl hayatımızın içinde olduğunu hissedeceğiz? Onu nasıl seveceğiz, ya da neden sevelim ki? Nerede başlar, nerede biter, neye yarar? Nasıl onu anlayacağız? Elle tutulur gözle görülür mü? gibi soruları ürkekçe fısıldayanları, meraklı gözlerle bakanları ve *"Bana ne kardeşim sizin fiziğinizden!"* diyenleri ben buradan rahatlıkla duyuyorum, görüyorum.

Bu kitapta matematikten mümkün olduğunca uzak durup, fizik dünyasında el ele dolaşarak fiziğin kapsamını, sınırlarını, dilini, gizemlerini, zorluklarını, güzelliklerini, çelişkilerini, derinliğini ve genişliğini birlikte keşfederek fiziğe olan bu ürkekliği, bu çekingenliği beraberce yenmeye çalışacağız.

Kitap bittiğinde kendi kendimize belki de şu soruyu soracağız; *"Sakın fizik dediğimiz şey, acaba hayata gözlerimizi açtığımız an-*

dan gözlerimizi dünyaya yumana kadar yaşadığımız, gördüğümüz, duyduğumuz şeylerin tümü olmasın?"

Takdir edeceğiniz gibi, bu kitapta fiziğin tümünden bahsetmemiz, formülleriyle oynamamız mümkün olmayacaktır, ancak okuyucu bu sohbetler sırasında farkında olmadan fiziğin jargonuyla (*kendine özgü dili*) tanışacak, bazı ünlü fizikçilerin ismini duyacak, birkaç fizik dalını fark edecek, fizikçilerin olaylara bakış tarzını ve neyi aradıklarını hissedecek, sonunda süzgecin üzerinde az da olsa fizik kırıntılarının parıldadığını görecektir. Burada özellikle vurgulamak istediğim nokta şudur; amacım fizik öğretmek değil, fiziği hissettirmektir. Zaten fiziği öğretmek, öğretebilmek benim de haddim değildir!

Meraklı olanlar fiziğin ne demek olduğunu kitaplardan, sözlüklerden, internetten araştırdıklarında; fiziğin bir ölçüm bilimi olduğu, maddeyi ve enerjiyi incelediği, kimya ile ortak alanları olduğu, eski Yunancada doğa anlamına gelen ve Aristoteles'in ünlü yapıtı "*PHYSIKE*"ye kadar uzanan bir doğa bilimi olup, doğayı araştırdığı şeklinde birçok açıklamaya rastlayacaklardır. Bu açıklamalar kendi içerisinde doğru olmalarına rağmen, rastladıkları hiçbir anlatım onlara fiziğin tam karşılığını veremeyecek ve hissettiremeyecektir. Bunun için sohbetimizde fiziğin basmakalıp tariflerini vermeyecek, okuyucunun kitap bittiğinde kendi kendine bir sonuca, bir algıya ulaşmasını, hissetmesini bekleyeceğim. Çünkü fizik; bölümün koridorlarında ve okulun bahçesinde dolaşmadan, binlerce formülle boğuşmadan, düşünmeden, problem çözmeden, tartışmadan, okumadan, geceleri uykusuz kalmadan, anfilerin ve laboratuvarların kendine özgü kokusunu içimize çekmeden, kitap defter açık yapılan sınavlarda bile sıfır almadan, sınav sonuçlarını endişeyle beklemeden, Einstein'a hayran olmadan, hoca istemezse kimsenin dersi geçemeyeceğini hissetmeden, matematik dağları altında ezilmeden anlaşılmaz, anlaşılamaz. Kendimden bir örnek vereyim; mezun olalı neredeyse otuz sene olmasına rağmen yılda bir veya iki kez hala rüyamda Jackson'ın EMT'sinden veya Goldstein'in Klasik Mekaniği'nden sınıfta kaldığımı görerek kâbuslar içerisinde yataktan fırlarım.

Fizik Yaşamımızın Neresindedir?

Şimdi biz, yukarıda *teğet geçtiğimiz eza ve cefayı fizikçilere bırakalım*, fiziğin keyfini çıkarmaya başlamak ve ne olduğunu sezinleyebilmek için, ilk olarak günlük yaşantımızda bizimle bütünleşmiş olan fiziği ve fizik yasalarını biraz hissetmeye çalışalım. Yeniden başlayanlar için bazı somut örnekler vermenin yararlı olacağını düşünerek ilk sorumu soruyorum: *“Televizyonla tanışmayanız var mı?”*. Herhalde bu çağda hiç televizyon seyretmemiş birini bulabilmek için çok özel bir çaba sarf etmek gerekecektir. Peki, televizyonun çalışma prensibi içerisinde fizik yasaları rol oynamakta mıdır? Evet, hem de birden çok fizik yasası işin içindedir. *“Nasıl?”* dediğinizi duyar gibiyim. Teknik detaylarına girmeden hemen söyleyeyim; birinci adım olarak televizyon vericilerinden yayılan görüntü ve ses sinyallerini uzayda ışık hızıyla hareket ederek bize ulaştıran elektromanyetik dalgaları anlamak ve onları uygun bir şekilde antenler aracılığıyla yakalayarak televizyon alıcısına yönlendirmek için fiziğin en önemli kuramlarından biri olan elektromanyetik kuramı (*Klasik Elektrodinamik*) çok iyi bilmek gerekmektedir. Matematik ifadesi epeyce karmaşık olan bu kuramı kim geliştirmiş ve insanlığın hizmetine sunmuştur? Cevap: James Clerk Maxwell adındaki çok ünlü, sıra dışı bir fizikçi. Maxwell’in ortaya koyduğu elektromanyetik kuram, elektromanyetik dalgaların davranışını anlamamızı ve onlara hükmetmemizi sağlamıştır. Bakın, bu fizik yasası temel alınarak geliştirilen hangi cihazlar yaşantımızda rol oynamaktadır. Televizyon alıcısı ve uzaktan kumandası, radyo, radar, cep telefonları, telsiz cihazları, bluetooth cihazları, çocuğumuzun uzaktan kumandalı oyuncak otomobili, tepeden tepeye birbirlerini görerek radyo/tv sinyallerini birbirine aktaran vericiler/alıcılar, mikrodalga vericileri/alıcıları, uydu haberleşme sistemleri, otomobillerin uzaktan kapılarını açıp kapatan kumanda cihazları, kablosuz modemler ve burada adını sayamayacağımız kadar çok sayıda ve çeşitlilikte olan tüm kablosuz haberleşme cihazları örnek olarak verilebilir. Hatta tüm kablolu bile. Bu noktada duralım ve soralım: *“Fizikçiler ve fizik yasaları hayatımızın içinde*

miymiş, bize bu kadar yakındalar mıymiş?" Tabi ki cevabımız kocaman bir "evet" olacaktır.

Buraya kadar dikkat ederseniz elektromanyetik dalgalar televizyon vericisinden TV alıcımıza kadar geldi ama daha görüntüyü oluşturan fizik yasasından bahsetmedik. Gelelim ikinci adım olarak televizyonda görüntünün oluşmasına. Antenden gelen sinyale uyumlu olarak televizyonun içindeki katot tüpünden fırlatılan elektronlar büyük bir hızla ekranın iç yüzeyine çarparlar, *fluorışıl* özellik taşıyan özel bir maddeyle kaplı olan ekranın iç yüzeyine çarpan elektronlar, enerjilerini iç yüzeyi kaplayan özel maddenin atomlarına aktarırlar, böylece enerjisi artan iç yüzeydeki maddenin atomlarının elektronları üst enerji seviyelerine çıkar, yani daha yüksek bir enerjiyle devinirler. Ancak, bu seviyedeki fazla enerjili elektronlara sahip olan atomlar kararsızdır ve enerjilerini bir yolla azaltarak daha alt enerji düzeylerine, yani kararlı duruma geri dönme eğilimi gösterirler. Bu fazla enerjilerini de ısıma yaparak azaltma yoluna giderler, yani belirli bir frekansta ışık salarlar. İşte televizyon ekranında gördüğümüz ışıklı noktalar bu atomlar tarafından salınan ışımalardır. Diğer bir deyişle ve fizikçi gözüyle ifade edersek, bunlar "*Ticari olmayan kuantum sıçramalarıdır!*". Bu olay, televizyonun elektronik devrelerini tasarlamış ve cihazı kullanılabilir hale getirmiş olan elektronikçilerin ilgi alanı dışında kalır, bu doğa olayını açıklamak ve belli bir fizik yasasına bağlamak tamamen fizikçilerin işidir. Örneğin bu ısıma olayının nasıl olduğunu fizikçiler kuantum mekaniği yasaları ile açıklarlar. Bu yasaları açıklamak için oldukça ileri düzey matematiğe gereksinim olduğundan ve en başta okuyucuya formüllere girmeme sözü verdiğimden dolayı bu açıklamalarla yetineceğiz. Bu noktada tekrar duralım ve soralım, "*Fizikçiler ve fizik yasaları hayatımızın içinde miymiş, bize bu kadar yakındalar mıymiş?"* Tabi ki cevabımız yine kocaman bir "evet" olacaktır.

Demek ki günlük yaşantımızda çok sıradan bir olay olan televizyon seyretmenin bile perde arkasında, fiziğin elektromanyetik alanlar kuramı ve kuantum kuramının getirdiği yasalar bulunmaktadır. Ayrıca buraya kadar anlatılanlardan rahatlıkla

şu sonucu çıkarabiliriz; tüm elektrik, elektronik dünyası ve kablolulu/kablosuz haberleşme faaliyetleri fizik yasaları uyarınca işler.

Yukarıda basitçe değinmeye çalıştığımız televizyon örneği çerçevesinde, kafa karışıklığına neden olmamak için bir hususu hemen vurgulayayım. Buradaki amacımızın televizyon alıcısının içindeki elektronik devreleri anlatmak olmadığına özellikle dikkatinizi çekmek isterim. Zaten bu yüzden görüntüyü, sesi oluşturan devrelerin tanımına ve nasıl çalıştıkları hususuna girmedik. Elektronik devrelerin çalışmasını yöneten fizik yasalarının temelini anlamak için fiziğin elektrik ve manyetizma, katıhal fiziği, yarıiletkenler fiziği, kuantum mekaniği ve daha derine dalmak isteyenler için ise kuantum elektrodinamiği gibi konularını bilmek ve anlamak gerekmektedir. Bu saydığımız fizik dallarını tümüyle öğrenmek sizin de tahmin edebileceğiniz gibi yıllar almaktadır. Burada kastettiğimiz temel fizik yasaları, elektrik ve elektronik mühendislerinin sürekli haşır neşir oldukları ve fizikçilerin de çok iyi bildiği elektrik/elektronik devrelerin, devre elemanlarının ve devre analizi kavramının çok çok ötesindedir. Kaldı ki transistörler, tünel diyotlar, entegreler gibi elektronüğün temelini oluşturan daha birçok elektronik eleman, kristal ve katıhal fizikçileri tarafından keşfedilmişlerdir ve zaman içinde fizikçiler bu önemli çalışmaları nedeniyle Nobel Fizik Ödülleri almışlardır. Elektronik dünyasının çok iyi bildiği transistörleri icat eden ve bu buluşlarıyla da Nobel Fizik Ödülü alan fizikçiler Bardeen, Shockley ve Brattain ile tünel diyotu icat ederek Fizik Nobel'i'ne layık görülen Japon fizikçi Leo Esaki'yi örnek olarak verebiliriz. Bu noktada şu soru akla gelebilir; acaba iyi bir elektronik bilgimiz varsa bir devre tasarlayıp biz de bir televizyon yapamaz mıyız? Elbette yapabilirsiniz, ama sadece doğanın yasalarını kullanarak çalışan bir cihaz yapmış olursunuz, doğanın temel yasalarının sırrına varmak içinse daha çok yolunuz var demektir.

Burada elektronikçilerin fizikçilerle birlikte cihaz yapımına kadar sürdürdükleri ortaklıkları bitmiş ve amaçlarına ulaşmışlardır. Fizikçiler ise, doğa yasalarını keşfetmek üzere bir takım yeni ve zor sorularla baş başa kalmışlardır, yani fizikçilerin da-

ha gidecekleri epey yolları vardır. Laf aramızda, kitabın sonlarına doğru elektrik ve elektronik dünyasının da aslında fizik olduğunu fark edeceksiniz, ama sakın bunu başka bir yerde açık açık söylemeyin! Bu yoruma itiraza hazır olanların, kuantum elektrodinamiği (*QED-Quantum Electrodynamics*) dünyasında küçücük bir gezinti yaptıktan sonra bana hak vereceklerine inanıyorum ve bu gezinti işini onlara bırakıyorum. Şimdi gelelim fizikçilerin baş başa kaldığı sorulâra? Fizikçiler için sorudan bol bir şey yoktur, sorular ve problemler çıg gibi üzerlerine gelir. Sadece TV örneğimizle ilgili olarak bile, televizyonun çalışması için gerekli olan elektriğin aslı nedir? Tellerde akım nasıl akar, akım dediğimiz şey nedir? Akım geçen telin ısınmaması için bir şeyler yapılabilir mi? Entegrelerin, transistörlerin iç tasarımları nasıl, hangi doğa yasaları dikkate alınarak yapılmaktadır? Direnci olmayan teller yapılamaz mı? Akım geçen telin çevresinde neden manyetik alan oluşuyor? Yalıtkan dediğimiz maddeler neden elektrik akımını iletemiyor? Çok büyük akım geçen tel neden eriyor? Elektromanyetik dalga nedir, nasıl üretiliyor, nasıl yayılıyor?² Neden? Neden? Neden?... Yüzlerce soru birbirini izleyebilir. Sadece TV örneğinde bile fizikçilere cevaplandırmaları gereken bunca soru sorulabiliyorsa, varın tüm evrenle ilgili olarak fizikçilere gelebilecek soruların derinliğini ve çeşitliliğini siz düşünün.

Yukarıda verdiğim televizyon örneğini biraz uzun tuttuğumun farkındayım, ancak istedim ki; fiziğin toplumda fonksiyonu iyi bilinen meslek dallarının hem doğrudan içinde bulunup hem de bu meslek dallarının sınırlarının bittiği yerin devamında ve hatta çok ötesinde sürdüğü hissedilsin. Bundan sonra vereceğim örneklerde bu kadar detaya girmemeye elimden geldiğince özen göstereceğim.

Kitap boyunca her ne kadar denklemlerden ve verilen örneklerdeki cihazların iç işleyişinden olabildiğince kaçınmaya gayret göstersem bile, bazen fiziğe özgü teknik terimlerden ka-

2. Classical Electrodynamics, J.D. Jackson, Sayfa:269, John Wiley & Sons, Inc.

Özellikle yeterli matematik altyapıya sahip okuyuculara "Plane Electromagnetic Waves and Wave Propagation" bölümünü (Bölüm-7) okumalarını öneriyorum.

çamayabilirim. Bunların tam olarak ne anlama geldiğine takılmadan okumaya devam edebilirsiniz, biliniz ki fizikte takılacağınız her nokta için ayrı bir kitap yazılabilir. Nasıl ki doktora gittiğinizde doktorun söylediği tıbbi kelimelerin çoğunu anlamıyor ama sonunda hastalığınızla ilgili bir algıya varıyorsanız, bunu da öyle düşünebilirsiniz. Buna benzer olarak, kitabın sonuna geldiğinizde fizikle ilgili bir fikre mutlaka sahip olacaksınız, belki de dünyaya bu zamana kadar hiç bu gözle bakmadığınızı fark edeceksiniz.

Fiziğin yaşantımızın tam göbeğinde bulunduğunu hissetti-ren örneklerden bazıları sağlık alanında da karşımıza çıkmaktadır. En basitinden başlarsak, tansiyon ölçen cihazın çalışma prensibi doğrudan fiziğin basınç konusuyla ilgilidir. Ateşimiz çıktığında dilimize veya koltukaltımıza koyup vücut sıcaklığımızı ölçtüğümüz (*ısıyı değil!*) termometrenin çalışma prensibi, kullandığımız buzdolabı, kalorifer sistemi gibi ısı ve sıcaklığı konu eden her doğa olayı fiziğin çok önemli bölümlerinden olan termodinamiğin konusudur. Bu arada termodinamik denilince bu konuya büyük emek vermiş ünlü fizikçi Ludwig Boltzman'ı selamlamadan geçmek ona vefasızlık olur.

Eskiden beri bilinen ve röntgen filmi çekimlerinde kullanılan "X" ışınları, gözle göremediğimiz yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Bu ışınları keşfeden Nobel ödüllü Alman fizikçi W. Conrad Rontgen'dir.

Vücudumuzdaki organların çalışma prensibi de fizikle çok yakından ilgilidir. Tüm organlarımızın çalışması biyoloji, fizik, kimya ve elektrokimya temeline dayalıdır. Örneğin kalbimiz, beynimiz ve kaslarımız elektrik pulslarıyla (*atmalar*) çalışmakta ve diğer organlarımızla elektriksel iletişim sağlamaktadır. Beynimiz göndereceği emirleri elektrik sinyalleriyle göndermektedir. Kalbimizin durumu hakkında doktorlara önemli bir ipucu sağlayan elektrokardiyografi (EKG), kalbin çalışmasını sağlayan elektriksel faaliyetlerin bir anlamda ekrana yansıtılmış veya kağıda dökülmüş grafiğidir. Beynimizin elektrik dalgalarının saptanması için kullanılan elektroensefalografi (EEG) yöntemi de, aynı şekilde beynin elektriksel işleyiş grafiğinin elde edilmesini

sağlar. İnsan vücudunun elektrik ve mekanik temellere dayalı çalıştığı gerçeğinden hareketle, *biyofizik* olarak adlandırılan ve hatta tıp fakültelerinde bile ders olarak okutulan bu fizik dalı ise vücudumuzdaki çeşitli organlarımızın faaliyetlerini fizik ve tıbbın ortak anlayışı çerçevesinde inceler.

Özellikle onkoloji alanındaki radyo terapi uygulamalarında ise *radasyasyon fiziği* temel olarak işin tam merkezindedir. Hastaya verilecek ışınının çeşidi, dozu, süresi v.b. parametrelere karar verilirken, tıp ve fizik el ele tutuşurlar. Çoğumuz işimiz düşme-se bile hastanelerde *nükleer tıp* yazan panoyu mutlaka görmüşsüzdür. Teşhis ve tedavi alanında tıbbın önemli bir dalı olan nükleer tıp, adından da rahatlıkla anlaşılacağı gibi fizikle epeyce içli dışlıdır.

Teşhis koymak amacıyla veya cerrahi müdahalelerde kullanılan tıbbi endoskopik araçlar ile göz kusurlarının düzeltilmesinde kullanılan tüm optik cihazların çalışma ilkesi, fiziğin optik yasalarıyla açıklanmaktadır.

Son yıllarda yaygınlaşan modern tıbbi teşhis cihazlarından biri olan ultrason (*ultrasound*) cihazları ise ses dalgalarıyla çalışmaktadır ve insanın duyabileceği frekanslardan daha yüksek frekanslı ses dalgalarını, incelenecek organa odaklar. Tıbbi teşhisler ise, bu dalgaların organlardan yansımalarının bir ekranda izlenmesiyle yapılmaktadır. Ses dalgalarının davranışı, fiziğin *titreşimler ve dalgalar* ile *akustik* konusu içerisinde incelenmektedir.

Burada tıpla ilgisi olmamasına rağmen, yeri gelmişken ses dalgalarını konu alan bir örneği hemen araya sıkıştıralım. Opera ve tiyatrolarda bir gösteriyi, bir oyunu izlerken sanatçılar mikrofona kullanmadan seslerini tüm salona rahatlıkla duyurabilmektedirler. Bunu başarabilmek üzere bu tip salonlar tasarlanırken fiziğin akustik yasalarından yararlanılır. Zaten sesin kendisi de bir *boyuna-dalga* (*longitudinal wave*)³ değil midir? Antik

3. Not: Fizikte enine dalgalar (*transverse waves*) da vardır. Örneğin radyo dalgaları gibi elektromanyetik dalgaların tümü enine dalgadır. Enine dalgalarda titreşim yönü, dalga yayılma doğrultusuna diktir. Boyuna dalgalarda ise titreşim yönü, yayılma doğrultusundadır.

çağlardan günümüze kadar gelen açık hava tiyatrolarında da mükemmel akustik özelliklerin bulunması, o çağlarda yaşayan medeniyetlerin bile fiziğin bu dalından bir şekilde haberdar olduklarının işaretidir. İşte gördüğünüz gibi, fizik sanat dünyamızda da bizimle beraberdir.

Tekrar tıba dönelim ve gelelim son yılların gözdesi MR çekimlerine. Uygulamalara bakılırsa herhalde ülkemizde MR çekirmeyen kalmamıştır! Bu ileri teşhis *ve kazanç(!)* yöntemi, tıp dünyasında MRI (*Magnetic Resonance Imaging-Manyetik Rezonans Görüntüleme*) olarak geçer. Bu teknolojinin temelinde fiziğin ünlü NMR (*Nuclear Magnetic Resonance-Nükleer Manyetik Rezonans*) kavramı yatmaktadır. MR çekimlerinde, kapalı alan korkusu olanlar için bir cehennem olan yuvarlak müknaşın içine doğru insanlar, fırına sürülen bir tepsi gibi sürülür. Teknolojisi çok karmaşık olan bu görüntüleme sisteminin çalışma prensibi kabaca, vücuttaki hücrelerde bulunan suyu oluşturan bileşenlerden biri olan hidrojen atomundaki protonun, çok güçlü bir manyetik alan ve ayrıca rezonansı sağlamak için uygulanan radyo frekans dalgaları ile terbiye edilmesidir diyelim. Konunun detayına girebilmek için vektör, spin, manyetik dipol moment, presesyon, durulma zamanı v.b. fiziksel kavramların iyi bilinmesi gerekir ki, sohbetin akıcılığını bozmamak için burada teknik ayrıntıya daha fazla girmeyelim. Amerikalı fizikçi Edward M. Purcell, NMR kuramını fizik dünyasına kazandırarak bu konuda Nobel ödülü almıştır. Ayrıca kendileri, Berkeley Fizik Programı'nın ikinci cildi olan "*Elektrik ve Manyetizma*"nın yazarıdır. Gördüğünüz gibi fizik ve fizikçiler yine her yerden fışkırmaktadır.

Peki, yine son zamanlarda reklamlarından geçilmeyen PET/CT (*Positron Emission Tomography/Computerized Tomography-Pozitron Yayma Tomografisi/Bilgisayarlı Tomografi*)'ye ne demeli? Bu teknik de tıpta son derece ileri görüntüleme ve teşhis yöntemlerinden biridir. Evet, evet doğru tahmin ettiniz bu teknolojinin de odak noktasında fizik ve fizikçiler vardır. Bu teknoloji içerisinde kullanılan pozitron, elektronun antimaddesidir (*karşıtmadde/karşıtparçacık*). Evrenin varoluşunu başlatan büyük

patlamadan sonra karşıtmaddeler aleyhine gelişen *simetri kırılması* (*symmetry breaking*) konusuyla bütünleşmiş olan karşıtmadde kavramı da bu tür ilginç konulardan biridir. Karşıtmadde gerçeğini fiziğe kazandıran büyük üstat İngiliz fizikçi P. M. Adrien Dirac'ı anmadan geçmek fiziğe ihanet olur.

İşte gördüğünüz gibi tıp âlemi de fizikle epeyce iç içedir. Tıp-fizik ilişkisiyle ilgili örnekler daha da çoğaltılabilir, ama şimdilik burada keselim diyorum.

Biraz da her gün yaşadığımız daha sıradan olaylara ve ardından yatan fiziğe çok hızlı bir şekilde göz gezdirelim. Belki kafamız biraz karışabilir, ancak bize süzgecin üzerinde kalacak algı kırıntıları da yetecektir.

Örneğin otomobil birden hızlandığında sırtımız koltuğa yapışır, işte size fiziğin pozitif ivmesi, ani fren yapılırken ön camdan çıkacakmış gibi oluruz, bu da fiziğin negatif ivmesidir. Her iki örnekte de fiziğin *eylemsizlik yasası* (*inertia*) devrededir ve yaşamımızın içindedir. Bu arada bilmeyenler için ivme kavramına biraz esprili de olsa "hızın hızı" diyelim.

Uçakların rotalarında sağa sola ve yukarı aşağı yalpalamadan düzgün uçabilmesini sağlamak üzere kullanılan jiroskopun çalışma ilkesi ise fiziğin *açı momentumunun* (*açısal momentum, angular momentum*) korunumu yasasını temel alır.

Yağmurlu günlerde yağ birikintileri içerisinde akan suyun üst kısmında veya sabun köpüğünün yüzeyinde oluşan o rengârenk ebru sanatı gibi ışıklar neyin nesidir? O ışıklar fiziğin *girişim* konusunun insanlarla yüz yüze gelmesidir.

Deniz kenarında sere serpe güneşlenirken derimizin kızarması ve hatta yanıklar oluşmasında ise elektromanyetik alanın enerji akışını temsil eden Poynting (*John Henry Poynting*) vektörü⁴ işe karışır. Cep telefonlarının zararlarından bahsederken vücudumuza elektromanyetik dalgalar tarafından aktarılan enerjinin zararlı olup olmadığı artık sıradan bir vatandaşın bile duyarlılık gösterdiği konular haline gelmiştir. Ama vatandaş nereden bilsin ki bu işlerin içinde doğrudan fiziğin olduğunu.

4. Classical Electrodynamics, J.D. Jackson, Sayfa:237, John Wiley & Sons, Inc.

Uçakta kulaklarımızın tıkanması basınç değişikliğiyle, gökkuşağının ortaya çıkması yağmur damlalarının ışığı kırmasıyla, binaların ayakta durması statik dengenin iyi ayarlanmasıyla, suyun kaynaması kısmi buhar basıncının dış atmosfer basıncına eşit olmasıyla, roketin delice bir hızla gökyüzüne yükselmesi momentumun korunumu ve kaçma hızıyla (*escape velocity*), yıldız kayması dediğimiz şey ise gariban bir göktaşının dünyanın çekim alanına kapılmasıyla açıklanır. Fizikçi gözüyle bakılınca; ağaçtan düşen elma, dünya gezegeninin çekim etkisindeki bir meyvenin (*kütle*) gezegen ile çarpışması anlamına gelir.

Herhalde hepimiz günde bir kez olsun aynaya bakıp saçımızı tarıyoruz, bazı insanlar gözlük kullanmakta, hatta sabah işe giderken arabamıza oturup dikiz aynalarımızı ayar etmekteyiz. Aslında fiziğin *geometrik optik* yüzüne günaydın demektedir.

Artık her yerde, her evde çocukların bile başından kalkmadığı bilgisayarlar konusuna girmeye bile gerek yok, sizler biliyorsunuz ki bilgisayarların donanım (*hardware*) kısmı tamamen elektroniğe (*bilgisayarın iç devreleri*) ve elektromekanığa (*örneğin hard diskler, yazıcılar v.b.*) karşılık gelmektedir. Elektrik ve elektroniğin aslında fiziğin bir alt dalı olduğunu daha önce belirtmiştik.

Gökyüzüne kafamızı kaldırıp baktığımızda gördüğümüz güneşin, gezegenlerin, yıldızların, ayın, uyduların, gökadalardan mükemmel bir uyum içinde nasıl hareket ettiğini klasik fizik anlamında insanlığa ilk izah eden büyük dahi İngiliz fizikçi Sir Isaac Newton'dur.

Zamanın sabit hızla akmadığını, önümüzden ışık hızına yakın bir hızla geçen çubuğun boyunun kıaldığını, kütlelerinin arttığını, enerjinin kütleye kütlelerin de enerjiye eşit olduğunu (*ünlü $E=mc^2$ denklemi*), uzayın eğrildiğini, özel ve genel göreliliği (*relativity-görelilik/görecelik/izafiyet*), hiçbir cismin hızının ışık hızına ulaşamayacağını, kuvvetli kütleçekim alanlarında saatlerin geri kalacağını, ışık hızına yakın hızlarda hareket eden saatlerin yavaşlayacağını, ışık ve tüm elektromanyetik dalgaların güneş tarafından saptırılacağını, herkes için aynı olan "*mutlak zaman*" diye bir kavramın olmadığını, zamanın gözlemleyene göre farklı

tanımlanacağını, hareketin farklı referans sistemlerinden farklı yorumlanması gerektiğini, hareketin eşzamanlı⁵ olamayacağını insanlığa açıklayarak dünyayı büyük şaşkınlığa sürükleyen Alman kökenli gelmiş geçmiş en büyük fizikçi ve en zeki insan sayılan Albert Einstein'dır. Bir virtüöz düzeyinde keman çalabilen ve matematik tanımlamalara girmeden önce sadece düşünce gücüyle kimsenin hayal bile edemediği doğa olaylarını, *örneğin uzay-zamanın eğrilmesini* öngörebilmiş olan bu dahi insanın yaşamını çok kapsamlı bir şekilde ele alan Walter Isaacson'ın yaklaşıklık altı yüz elli sayfalık eserini okumanızı ısrarla öneririm.⁶

Konuyu biraz uzatma ve akıcılığını bozma pahasına, fizik için çok önemli bir kavram olan hareketle ilgili bazı hususlara değinmeden geçemeyeceğim. Yukarıda bahsettiğimiz görelilik kelimesinin içindeki "göre" kısmına dikkat edelim. Bu ifade, içerisinde, neye göre, kime göre, hangi gözlemciye göre, hangi noktaya (referans çerçevesine) göre sorularını barındırır. Çünkü gözlemcilerin bir hareketi tanımlaması, referans seçilen noktaya göre farklı olmaktadır. Buna hemen ışık hızı içermeyen bir örnek verirse, konu daha iyi anlaşılacaktır; yan yana, aynı yöne, aynı hızla giden iki otobüsün yolcuları camdan birbirlerine baktıklarında otobüslerin ve birbirlerinin hareket etmiyor, sanki duruyorlarmış gibi göründüğünü söylerler. Bu deneyi hemen hepimiz yaşamışızdır. Ama yolun kenarında durmakta olan bir kişi ise otobüslerin ikisinin de yolcularla beraber büyük bir hızla yanından geçip gittiğini söyleyecektir. Peki, kim doğru söylüyor? Yolcular mı, yoksa yoldaki adam mı? Otobüsler duruyor mu yoksa hareket mi ediyorlar? Fizik için iki söylem de doğrudur, yeter ki otobüsün hareketini gözlediğimiz yeri doğru belirtelim. Fizikte hareket tanımlanırken, belli bir gözlem çerçevesine yani bir referans sistemine göre tanımlanır. Hal böyle olunca, hareketin tanımı hareketi gözlemlediğimiz yere göre değişir. İşin içinde ışık hızına göre çok çok küçük hızlar varsa (*örneğin otobüsle-*

5. Einstein, Fikir Mimarları-3, Bilim ile Felsefe Yazıları, Sayfa: 97, Çeviri: Prof.Dr. Nejat Bozkurt, SAY Yayınları

6. Einstein, Yaşamı ve Evreni, Walter Isaacson, Tudem Yayınları

rin hızı), hareketin tanımı *bağıl hızlar kavramı*, *Galile Dönüşümleri* ve *Newton Yasaları* ile rahatlıkla yapılabilir. Sadece hareketin *konum, hız ve ivme* gibi özelliklerinin incelenmesi, fiziğin *kinematik* dediğimiz konusuna karşılık gelir. Eğer hesaplamaların içine hareketin nederi olan kuvvetleri de katarsak işin içine *Newton Yasaları* girer ve fiziğin *dinamik* denilen yüzü ortaya çıkar. İncelediğimiz fiziksel bir sistemin içinde bulunan hareketli cisimler *ışık hızı veya ona çok yakın hızlarda hareket ediyorsa*, o zaman işler değişir, önümüze özel ve genel görelilik kavramları çıkar. Ancak bu durumda hareketin tanımı bu kadar kolay olmaz. Özel görelilik yasaları, birbirlerine göre ivmesiz ve ışık hızı civarında hareket eden referans sistemlerine özgüdür ve artık sistemler arasındaki uzay ve zaman koordinatlarının nasıl dönüştüğünü tanımlayabilmek için *Galile Dönüşümlerinin* yerini ışık hızını da içeren *Lo-rentz Dönüşümleri* alır. Genel görelilik yasaları ise, birbirine göre ivmeli hareket eden referans sistemlerinde işin içine kütleçekimini de katarak hareketi tanımlamak için devreye girerler. Özel ve genel görelilik kavramlarının ikisinin içinde de “*göre*” ifadesi bulunmaktadır, tek fark işin içine ışık hızının ve/veya kütleçekiminin girmesidir. *Ancak bu basit bir fark olmayıp, fiziğin felsefi anlamda değişmesine neden olacak kadar derin bir anlam taşır.* İşin özünü ifade etmek gerekirse; ışık hızının dikkate alındığı uzay-zamandaki (*Minkowski Uzayı*) hareketin fiziğini “*özel görelilik*” açıklar, buna bir de kütleçekim etkilerini katarsak, Einstein’ın o meşhur “*genel görelilik*” kavramına ulaşırız. Tabi ki bu kadar basit değil, çünkü kütleçekim etkilerinin ışık hızıyla birlikte ele alındığı genel görelilikte kütleçekimi nedeniyle *Minkowski uzay-zamanı* eğrilir. Uzay-zamanın neden ve nasıl eğrildiğinin matematiğine girmek isteyenler *Einstein, Riemann, Weyl ve Ricci tensörleriyle birlikte jeodeziklere* bakmalıdırlar. Tensör kavramını hatırlamak için, Goldstein’in bir klasik olan eserindeki “*Tensörler ve Diyadikler*” bölümüne göz atılabilir.⁷ Hazır konuya girmişken ben size ufak bir hatırlatma yapayım isterseniz. Tensörler, bir fiziksel niceliğin bileşenlerinin bir koordinat sisteminden diğerine

7. Klasik Mekanik, Herbert Goldstein, Sayfa: 177, İTÜ Yayınları

hangı kurallarla ve nasıl dönüŖeceđini söyleyen matematiksel araçlardır. Tıpkı vektör alanlarında olduğu gibi, fiziksel bir olayı incelediğimiz uzayın her bir noktasına bir tensör karşılık getirdiğimizde, bir tensör alanı tanımlamış oluruz. Üç boyutlu uzayda N'inci dereceden bir tensörün birbirine dik (*orthogonal/orthonormal*) 3^N adet bileşeni vardır, buna göre, sıfırncı dereceden tensörler bir skaleri, birinci dereceden tensörler ise vektörleri temsil ederler. Vektörler, tek sütundan veya tek satırdan oluşan matrislerdir. İkinci dereceden tensörler ise, iki boyutlu diziler şeklinde ifade edilen satır ve sütun matrisleridir. Daha karmaşık fiziksel olayları anlatabilmek için daha yüksek dereceli tensörler kullanılır. Örneğin, genel göreliliği açıklayabilmek için dört boyutlu uzay-zamanın nasıl eğrildiğini göstermemiz gerekir. Bunu ifade eden Riemann tensörü dördüncü dereceden bir tensör olduğundan, $4^4=4 \times 4 \times 4 \times 4=256$ bileşene sahiptir. Bu arada neden uzay-zaman dediğimi de açıklayayım, yanlış anlamayın bunu benim diyebilmem ne haddime, bunu ben demiyorum, Einstein'ın hocası ünlü Minkowski diyor, O'na göre “Uzay ve zaman birbirinden ayrıık kavramlar olmayıp, birbirinden ayrıılmaz fiziksel niceliklerdir”. Zamanın farklı referans sistemlerinden farklı yorumlanması, yani eşzamanlılığın (*simultaneousness*) olması fikri, “mutlak zaman” kavramının da olmadığını gösterir. Yani her (x,y,z)'nin kendine özgü bir “t” si vardır, bunun için zaman ve uzay birbirinden ayrıılamaz, uzay-zaman denmesinin altında bu gerçek yatar. Minkowski Uzayını, geometriden bildiğimiz Öklid Uzayının zamanı da içerecek şekilde düzenlenmesi olarak düşünebilirsiniz.⁸ Epeyce karmaşık matematik ifadeler içerdđiđi ve bu konuya gelene kadar öğrenmemiz gereken çok şey olduğu için, göreliliğin tam olarak ne demek olduğunun iza-hına burada girmemiz mümkün değildir. *Bakın, ilerledikçe giriş bölümünde saygıyla andığımız Ahmet şAHİN hocamız nasıl da haklı çıkmakta.*

8. Not: Öklid (Euclides) uzayı bildiğimiz düz uzaydır ve Riemann'ın dışbükey uzayıyla, Lobachevsky'nin içbükey uzayının limit durumudur. Daha ayrıntı isteyen okuyucular matematiğin “eğri uzaylar” konusuna bakmalıdırlar.

Anlattıklarım biraz karışık mı oldu? Bunu doğal karşılamak gerekir, çünkü ne de olsa fizik üzerine konuşuyoruz. Neyse ki, göreliliğin ne olduğunu anlama konusunda bizi umutlandıracak esprili bir açıklama yine de vardır. Birçoğumuz tarafından bilinen ama yine de değinmeden geçemeyeceğim bu muhteşem tanımlama yine Einstein ustadan gelmiştir: *“Kızgın bir sobanın üzerinde otururken geçen bir dakika, bir saat gibi, güzel bir kadının yanında geçen bir saat ise bir dakika gibi gelir. İşte izafiyet teorisi budur...”*. Büyük usta bu esprisiyle görelilikteki *“zaman genleşmesi”*ne (*time dilation*) çok zarif bir gönderme yapmaktadır. Zaman genleşmesinin halk arasında bilinen en popüler örneği, *“İkiz Paradoksu”* (*Twin Paradox*) denilen bir düşünce deneyidir. Bu deneye göre ikizlerden biri dünyada kalır, diğeri ise ışık hızına yakın bir hızda hareket eden uzay aracına biner, çok uzaklara gider ve tekrar dünyaya döndüğünde dünyada kalmış olan ikizini kendisinden daha yaşlanmış bulmayı bekler. Çünkü dünyadaki ikize göre hareket tanımlandığında, ışık hızı civarında seyahat eden uzay gemisinde zaman daha yavaş akar, saat daha yavaş işler, yani zaman genleşir. Zamandaki bu yavaşlamayı uzay gemisindekiler hissedemeyeceklerdir. Bunun nedeni, araçtaki tüm saatlerin aynı oranda yavaşlamasıdır. Ancak burada bir çelişki vardır, hareket görelî olduğundan, uzay aracındaki kardeş de kendinin durduğunu, diğerrinin(dünyadakinin) ışık hızıyla gittiğini söyleyebilir ve döndüğünde dünyadaki ikizini kendisinden daha genç bulacağını düşünür, çünkü bu durumda kendi zamanı daha hızlı, dünyadaki ikizinin zamanı ise hareketlilikten dolayı daha yavaş akmıştır. Görüldüğü gibi, hangi gözlemcinin mutlak hareketli, hangisinin mutlak hareketsiz olduğunu söyleyemeyiz. Hareketin tanımı gözleyene göre değişmektedir ve bu doğanın bir gerçeğidir. Şunu da belirtiyim; ışık hızıyla hareket eden ikizin doğrusal bir hareket yapmadığı, dünyaya geri dönebilmesi için eğri bir yörünge izlemesi gerektiği veya durup tekrar ters yöne hareket etmesi gerektiği, dolayısıyla düzgün doğrusal bir hareket yapmadığı gerekçesiyle bu çelişkiye itirazlar gelmektedir. Ayrıca, gözlemcilerin farklı olayları incelediği ve bu neden-

le de ikiz paradoksunun aslında bir çelişki olmadığı yönündeki açıklamalara da literatürde rastlamak mümkündür.⁹

Göresiz klasik mekaniğin devi Newton ile görelî hareketlerin ve kuantum olaylarının dahi senaristi Einstein, doğayı anlamamıza çok önemli katkılar yapmış olan fizikçilerin en başında gelmektedirler. Çünkü yapmış oldukları katkılar, fizik dünyasında çok derin felsefî değişimlere ve açılımlara neden olmuştur. Klasik fiziğin açıklayamadığı doğa olaylarını (örneğin fotoelektrik olay, atomlardaki belli enerji seviyelerinin izahı, morötesi felaketi, ısımanın doğasındaki kesikli enerji birimleri, madde-dalga ikililiği, belirsizlik ilkesi v.b.) anlamamızı sağlayan, kuantum fiziği kavramının ortaya atılması ve gelişmesinde önemli rol oynayan sıradışı fizikçiler M. Planck, E. Schrödinger, W. Heisenberg, W. Pauli, N. Bohr, Louis de Broglie, Wien, Lorentz, Ehrenfest ve M. Born'u da bu noktada büyük bir hayranlıkla anmamız gerektiğini düşünüyorum.

Farkındayım konu biraz dağıldı ama size doğanın bu ilginç yüzünü göstermeden geçemezdim. İsterseniz fiziğin yaşamımızdaki yerini vurgulayan örneklerle devam edelim. Aniden gözümüze gelen kuvvetli ışığa karşı gözümüzü kısmanın fizik yönünden açıklaması şudur; birim zamanda gözümüze gelen foton (ışık kuantumu) sayısını azaltmak için yapılmış istem dışı bir harekettir. Fotonlar enerji taşıdıkları için, yoğun foton bombardımanına uzun süre maruz kalmak, gözümüzün görme yeteneğini kaybetmemize bile neden olabilir. Neyse ki vücudumuz istem dışı hareketlerimiz aracılığıyla çok değerli bir organımız olan gözümüzü korumaktadır. Ama uygun bir şekilde kullanıldığında ise bu fotonlar lazerde olduğu gibi çok önemli görevler üstlenebilirler. Nasıl mı? Hemen bir örnek vereyim, fiziğin çok popüler kavramlarından olan LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Uyarılmış Işıma Yoluyla Işığın Şiddetlendirilmesi*) ışınları çok ince göz ameliyatlarında başarıyla kulla-

9. <http://evrenbilimi.blogcu.com/ozel-gorelilik-zaman-genlesmesi/3287610>, Mart-2011

nılmaktadır. Demek ki fizik bilgisiyle denetim altına alınan ışınlar, insana zarar vermek yerine faydalı olabilmektedir.

Sırası gelmişken çok zararlı gibi görünen ve toplumda tedirginlikle hatta korkuyla bakılan nükleer reaktörlerden de mutlaka bahsetmeliyiz. Çevrecilerin baskıları nedeniyle reaktörler konusuna genellikle ürkekçe yaklaşılmasına karşın, fizikçiler, reaktörün kalbinden yayılan mavimsi *Cherenkov* ışımalarını oldukça romantik bulurlar.¹⁰ Fizik bilgisiyle dizginlenen nükleer tepkimelerin nasıl da büyük bir enerji kaynağı olduğu ve insanlığın yararına kullanıldığında enerji sorununu çözebilecek en önemli alternatif kaynak olarak düşünüldüğü bilinmektedir. Doğaldır ki, nükleer çalışmalar ülkeleri, atom ve hidrojen bombası gibi bölünme/birleşme (*fission/fusion*) tepkimelerini temel alan nükleer silahlar yapmaya yöneltebilir. Konvansiyonel olmayan bu tip silahların üretiminin ve sayısının artırılması, hele de savaşlarda kullanılması olasılığı tüm dünyayı tedirgin etmektedir. Çünkü bu tür silahların kullanılması hem insanlığın hem de çevrenin sonu olacaktır. Çernobil faciasını hatırlarsak, bu patlamadan yıllar sonra bile reaktörün yakın bölgesine girilememiști ve yoğun radyasyona maruz kalmış insanların kansere yakalanarak hayatlarını bir bir kaybettikleri hala duyulmaktadır. Karadeniz bölgemizde de büyük olumsuz etki yapmış olan bu facianın izleri daha uzun yıllar devam edecektir. Nükleer enerjinin insanlığın yararına güvenli bir şekilde kullanılmasıyla tüm insanlığa hizmet edilmiş olur, aksi halde dünyanın mahvolması kaçınılmazdır. Konu buraya gelmişken, radyoaktivite konusuna yıllarını veren ve ardarda iki kez hem fizik hem de kimya Nobel ödüllerini almış olan Madam Curie ile nükleer fizik ve reaktör fiziği alanında otorite olan, nötrinolar, beta bozunması kuramı ve temel parçacık fiziğindeki Fermi-Dirac istatistiğini fizik dünyasına sunarak bilime çok önemli katkılar yapmış olan İtalyan fizikçi *Enrico Fermi*'yi anmadan geçemeyiz. *İşte, gündelik yaşantı-*

10. Not: Reaktörden yayılan yüklü parçacıklar, reaktörü soğutan suyun içerisinden hızla geçerken iyonize ettikleri ortam tarafından yayılan mavimsi ışık *Cherenkov* ışması olarak bilinir. Bu isim, 1958 Nobel Fizik ödülünü Frank ve Tamm ile paylaşan Rus fizikçi Pavel Alekseyevich Cherenkov'a ithafen verilmiştir.

mızda olsun, ülkelerin gelecekteki enerji politikalarının belirlenmesinde olsun yine fizik ve fizikçilerle beraberiz.

Popüler fizik konularının en önemlilerinden biri olan ve bilim-kurgu (*science fiction*) tarzında filmlere de konu edilen kara delikler (*black hole*), toplumda hayli ilgi çekmektedir. Yakınlarından geçen her şeyi (*bunlara güneş, yıldızlar ve dünya da dahildir*) yutabilen bu delikler, yani aslında süper yoğun kütleler, çekim güçleri çok yüksek olduğu için kendi yüzeylerinden ışığın bile kaçmasına izin vermezler, o yüzden bize kara görünürler (*daha doğrusu görünmezler*). O kadar yoğundurlar ki bir çay kaşığı dolduracak büyüklükte olabilmelerine rağmen güneşi yutabilirler. Karadelikler uzay-zamanın tekil (*singular*) noktalarıdır, yani bildiğimiz fizik yasalarının artık geçersiz olduğu uzay bölgeleridir. Bu olağanüstü doğa olayının kuramını insanlığa sunan İngiliz fizikçiler Stephen Hawking ve Roger Penrose'a da saygılarımızı sunmayı ihmal etmememiz gerekir.

Gün geçmiyor ki bilim ve teknikte baş döndürücü gelişmeler duyulsun. Nanoteknoloji de artık sık sık duyulmaya başlayan ve insanlığa büyük hizmetler vaat eden bir kavramdır. Son yıllarda üniversiteler de bu konuya gerekli ilgiyi göstermeye ve yavaş yavaş nanoteknoloji bölümleri açmaya başladılar. Mühendislikten tıbbı kadar her alanda sahne almaya başlayan nanoteknolojiden, genlere müdahale etmek, daha hızlı bilgisayarlar yapmak, mikro robotlar geliştirmek gibi bugün bile tam olarak öngöremediğimiz gelişmeler beklenmektedir.

Nano kelimesi Yunanca bir kelime olup ölçüm sistemi içerisinde milimetrenin milyonda birini ifade eder, yani metrenin de milyarda birini. Bu bize çok çok küçük bir *büyüklüğü(!)* anlatır. Biraz düşünersek, bu kadar küçük boyutların atomların ve moleküllerin dünyası olduğunu hemen fark ederiz. Peki, atom ve moleküllerin davranışı nasıl ve neyle açıklanabilmektedir? Biliyoruz ki kuantum fiziğiyle. Fiziğin her alanda var olduğunu anlatmak için başka bir söze gerek var mı?

Daha önce vermiş olduğum TV örneğinde, elektronik dünyasından bahsederken fiziğin elektronun sınırlarının bittiği yerin devamında ve hatta çok ötesinde de devam ettiğini vurgulamış-

son'un beraberce keşfettikleri "kozmetik mikrodalga arka alan ısıması"nda görmekteyiz. Bu kavram büyük patlamanın (*Big Bang*) en önemli delillerinden biri sayılmaktadır. Kısacası atomların, çekirdeklerin, kuarkların, gluonların, leptonların sonsuz küçük dünyasından tutun da evrenin sınırına kadar olan kozmik büyüklükler bile fiziğin ilgi alanının içindedir. Bir de konuya zaman boyutundan bakarsak, yaklaşık 14 milyar yıl önce evrenin büyük patlamayla birlikte yaratılışından bu yana geçen sürede sıfır noktasından bugüne nasıl geldiği aşamalarının tümü için fiziğin makul açıklamaları vardır. Ancak büyük patlamanın kendisinin, yani evrenin sıfır noktasının tanımının felsefi açıdan bir "*a priori*"¹¹ olarak değerlendirildiğini de söylemeliyim. Bunun dışında rahatlıkla diyebiliriz ki; fizik, sonsuz küçüklükten sonsuz büyüklüğe kadar tüm ölçeklerde ve evrenin yaratılışından bugüne kadar olan tüm zamanlarda kendini gösteren bir bilim dalıdır. Peki, şimdi beraberce soralım: "*Her konumda (ölçekte) ve her zamanda bulunmak demek, evrenin tümünde var olmak demek değil midir?*" Bu durum sanırım "*her yerde ve her zaman fizik*" gerçeğini bizlere artık açıkça hissettiriyor olmalı. Hatırlayacağınız gibi, bu kesime "*Fizik, Yaşamımızın Neresindedir?*" diye sorarak başlamıştık. Artık rahatlıkla cevaplayacağınızdan eminim. Sizce yaşamımızın neresindedir?

Bu bölümde fiziğin tüm konularına ve tüm fizikçilere değinebilmenin imkânsızlığını sanırım sizler de görmüş olmalısınız. Burada sadece fiziğin çok önemli köşe taşlarına çok yüzeysel biçimde değinebildik. Anmadan geçtiğimiz için, hayatta olan/olmayan efsane fizikçiler R. Feynman'ın, Murray Gell-Mann'ın, Weinberg'in, Bose'un, Rutherford'un, Sommerfeld'in, Yukawa'nın çok eskilerden Aristo, Arşimed, Kopernik, Kepler, Galile, Tycho Brahe, Gauss ve isimlerini sayamadığımız tüm ölümsüz bilim insanlarının her birinin ayrı bir köşeden bana kaşlarını çatarak baktığını görür gibiyim. Ama endişelenmesinler, beni

11. Not: Felsefede "*a priori*" ifadesi, bilimsel bir deneye dayanmayan, ölüm, Tanrı, evrenin başlangıcı gibi kavramları vurgulamak için kullanılır. Tersine, "*a posteriori*" ise, deney ile gözleme dayalı fikirler ve kavramları işaret eder.

affetsinler, konular ilerledikçe çoğunu mümkün olduğunca saygıyla anacağız.

Bir de çok zeki ve başarılı olmalarına rağmen hak ettiği derecede tanınmayan daha birçok fizikçi vardır. Bunların en ünlülerinden biri, biraz da garip bir kişiliğe sahip olan Nikola Tesla'dır. Elektrik ve manyetizma alanında oldukça ileri çalışmaları olmasına rağmen pek fazla tanınmaz. Ama ben size hemen bir örnek vereceğim ve bu fizikçiyi şıp diye anımsayacaksınız. MR çekimi yapılan merkezlerin tabelalarında yer alan ve örneğin 1,5 Tesla ile çekim yapıldığını belirten yazıları hatırladınız değil mi? Bu ifade cihazın kullandığı manyetik alanının değerini, gücünü belirtir ve tıpkı Gauss için olduğu gibi, Tesla'nın da anısına manyetik alanın değerini ifade eden birimlerinden biri olarak fizik dünyasında yerini almıştır ($1\text{Tesla}=10^4\text{Gauss}$). Ayrıca Tesla, *frenleme ışınımı* adıyla anılan ve Almanca orijinal adıyla *bremssstrahlung*¹² olarak bilinen bir ışıma çeşidini de fizik dünyasına tanıtan ilk bilim insanıdır.

Fizik dünyasını hissedebilmek için bu bölümde yaptığımız hızlı ve yüzeysel gezintide gördük ki; burada bahsi geçen/geçmeyen fiziğin daha birçok dalında fiziğe hizmet etmiş ve etmekte olan sayısız bilim insanı fiziğin gelişiminde rol almış olup, bu bilgileri daha da ileriye taşımak için binbir güçlüklerle idealist bir çaba sürdürmüşler ve hala daha da sürdürmektedirler.

Bu kesimi kapatırken sanırım fiziğin konularının derinliği ve genişliği konusunda bir fikre sahip olmuştunuzdur. İlerleyen konularda bu derinliğin daha da yoğun hissedileceğinden kuşku yoktur. *Fiziğin tümünü anlamamanın, evrenin tümünü anlamak olduğunu da yavaş yavaş fark ediyor (belki de çoktan fark ettiniz!) olmalısınız.*

Giriş bölümünde biraz da peşin olarak belirttiğimiz gibi görmüş olduk ki "Yaşam fiziğin içinde, fizik de yaşamın içindedir." Fizikçiler ise doğa ve evrenin büyüklü sırlarını keşfedip ortaya çıkararak insanlığa sunan elçilerdir.

12. **Bremssstrahlung Işınımı:** Elektron gibi yüksek enerjili parçacıkların, örneğin bir atom çekirdeğinin elektrik alanı içinde frenlenerek aniden çok kısa mesafe içinde negatif ivmeyle yavaşlatılması sonucu yayınladıkları ışınım.

Ayrılmaz İkili: Fizik ve Matematik

Fiziğin matematikle olan ilişkisine de değinerek *bu iki kafadar* hakkında da kısacık bir şeyler söylemek istiyorum. Fizikçilerin karşısına çıkan güçlüklerin en önemlilerinden birisi şudur: Bir fizikçi, bir matematikçi kadar matematik bilmeli ve matematiğe hakim olmalıdır. Çünkü fiziğin dili yüksek matematiktir. Fizikçilerin düşündüklerini, hayal ettikleri çözüm modellerini somutlaştırabilmelerinin tek yolu, düşüncelerini matematiği kullanarak ifade etmektir. Eğer bu yapılamıyorsa düşünceler soyut, temelsiz ve ispatsız kalır, ciddiye alınmaz, ayrıca bu kuramların, bu düşüncelerin deneylerle de sınanmaları gerekir.

Burada vereceğim iki küçük örnek ne demek istediğimi anlamanız için size bir ışık tutacaktır. Klasik fiziğin babası Newton, çalışmaları sırasında kafasında tasarladığı fiziksel düşünceleri bir formülasyonla kâğıda dökememeye başladığında matematik açısından tıkanmıştı. İşte bu noktada büyük dahi, matematik konusunda karşılaştığı bu güçlüğü, integral ve diferansiyel hesabı bularak aşmış ve yoluna devam etmiştir.¹³ Bunun ne büyük bir adım olduğunu düşünabiliyor musunuz? Hemen ikinci örneğe geçelim ve bu sefer de modern fiziğin babası Einstein'la ilgili bazı bilgiler vereyim. Einstein gelmiş geçmiş en büyük fizikçi ve en zeki insan sayılmasına rağmen, özel göreliliği formüle ederken Zürih Politeknik'ten hocası olan ünlü matematikçi Minkowski'den ve kafasındaki genel göreliliği matematik bir temele oturtmaya çalışırken de yine ünlü bir matematikçi olan arkadaşı Grossmann'dan Riemann ve Ricci tensörleri konusunda yardım almıştır. Einstein'ın, ölümüne çok az bir süre kaldığında kendini ziyarete gelen birkaç bilim insanı arkadaşına şu sözü söylediği rivayet edilir; *"Keşke biraz daha fazla matematik bilebilseydim"*.

Tüm bu anlatılanlardan sonra; teknolojinin ve tüm bilimlerin arkasındaki gerçek gücün aslında matematik olduğunu, matematiğin tüm

13. Not: Bu konuda ünlü Alman matematikçi ve filozof G.W. Leibniz'in hakkını yemeyelim. Üstat, sonsuz küçükler hesabını (infinitesimal calculus) ve dolayısıyla diferansiyel hesabı Newton'dan bağımsız olarak geliştirmiştir.

bilimlerin üzerinde pırıltılı bir taş gibi durduğunu ve önünde saygıyla eğilmemiz gerektiğini beynimizin en nadide bölümüne lütfen not edelim.

Fiziğin Diğer Mesleklerle İlişkisi: Fizik Gerçekten Bu Kadar Yaygın mı?

Olabilecek bazı alınganlıkları önlemek adına daha en baştan her mesleğin kutsal, saygın ve kendi içinde sonsuz derinliğe sahip bir alan olduğunu, kendine özgü bir kutsiyet taşıdığını, zaten bu yüzden de ayrı bir meslek olarak var olduklarını kabul ederek bu kesime başlayalım istiyorum. Fiziğin eski Yunan filozoflarınca doğayı anlamak, doğa felsefesini tanımlamak üzere başlatıldığını, hala günümüzde bile aynı hedefe yürüdüğünü ve sonsuza kadar da bu yürüyüşü sürdüreceğini göz önünde bulundurursak, doğada cereyan eden her “doğa olayının” kendiliğinden fiziğin içerisinde yer aldığını söylemek sanırım yanlış olmayacaktır. Bu düşüncenin uzantısı olarak; “hepimiz ve her şey” doğa içerisinde yer aldığımıza göre, doğanın büyük derinliğe sahip farklı olaylarıyla ilgilenmek üzere zaman içerisinde farklı meslekler ortaya çıkmıştır ve çıkmaya da devam edecektir. Böylece, içlerinde şiddetle itiraz edebilecekler bulunsa bile, okuyucuların çoğunun kolayca hissedebileceği gibi, bu farklı teknik alanların tümünün fizik bilimi tarafından kapsandığını rahatlıkla söyleyebiliriz. Bu açıklamalardan sonra fiziğin ne kadar yaygın, ne kadar kapsamlı olabileceğini ve yaşıntımızda nerelere kadar uzanabileceğini sanırım artık az çok hayal etmeye başlamış olmalısınız.

İsterseniz yukarıda söylediklerimi bazı örneklerle daha somut bir hale getirelim. Kuantum mekaniği kuramı, temel parçacıkların tek tek davranışlarını açıklamakla kalmayıp atomlar ve moleküller gibi daha kompleks bileşik yapıların da dünyasını başarılı bir şekilde tanımlamaktadır. İlk olarak, bu noktada kimyacıları ve biyologları epeyce kızdıracağımı bilerek sözü kuantum elektrodinamiği alanında Nobel Fizik Ödülü almış olan üstat Feynman’a bırakıyorum; “Böylece, kuantum mekaniği kimyanın te-

melindeki kuramın oluşmasını da sağladı. Demek ki temel kuramsal kimya aslında fiziktir.¹⁴ Kuantum mekaniği kuramı, kimyanın tümünü ve nesnelerin çeşitli özelliklerini açıklayabilmesinden dolayı çok başarılı oldu. Aşına olduğunuz olayların çoğunda ışıkla elektronun etkileşmesi vardır, örneğin kimya ile biyolojinin tümü. Bu kuramın kapsamadığı olaylar yalnızca kütle çekimi ve çekirdeklerle ilgili olanlardır; başka her şey bu kuramın kapsamı içindedir". Üstadın "ışık elektronun etkileşmesi" ifadesinin belki eksik anlaşılabileceği, kimya ve biyolojiyle bunun ne ilgisinin olabileceğinin anlaşılamaması endişesiyle ben hemen araya girerek, buradaki "ışık" sözcüğünden aslında ışığın kuantumu olan fotonun kastedildiğini hatırlatmak istiyorum. Çünkü kuantum elektrodinamiği, daha sonra parçacık fiziği bölümünde göreceğimiz gibi, *elektrozayıf etkileşmeleri* (*electroweak interactions*) anlatan bir *kuantum alan* kuramıdır. Bu kurama göre, etkileşmeleri yöneten *ayar bozonu* (*gauge boson*) ve *kuvvet taşıyıcısı* (*force carrier*) fotondur. Feynman demek istiyor ki; kimya ile biyolojinin temelindeki tüm reaksiyonların ve etkileşmelerin altında "*elektronların yeniden düzenlenişleri*" yatmaktadır, güçlü çekirdek kuvvetleri ve kütle çekimi bu işin dışındadır. Elektronların protonlara bağlanmasıyla atomların oluşması ve atomların birleşerek molekülleri oluşturması kimyacılar için yabancı kavramlar değildir. Örneğin bir elektronun bir atoma bağlanma/iyonlaşma durumu ve yeni moleküllerin oluşması gibi kimyasal olayların tümü bu kuramın önerdiği şekilde foton alışverişleri ile anlatılabilmektedir.

Örneğin elektronun proton ile etkileşmesi, bir anlamda elektronun ve protonun "de Broglie" dalgalarının etkileşmesi anlamına da gelir. Kuantum alan kuramı çerçevesinde düşündüğümüzde ise, bu etkileşmeyi yöneten parçacık, elektromanyetik alanın kuantumu olarak bilinen fotondur. Bu kuramla ışığın yansımaları, kırılması gibi konular açıklanırken de, fotonun ışığı yansıtan veya kıran ortamın elektronlarıyla etkileşimi temel alınır, yani optiğin tümüyle açıklanması da bu kuramla yapılabilir. Kimyacılar yine bana kızacak ama, elektronun göreceli

14. Kuantum Elektrodinamiği, KEDİ, Richard P. Feynman, Sayfa:15, 81, Nar Yayınları

hareket denklemini yazarak rölativistik kuantum mekaniğinin kurucusu olarak bilinen, elektronun antimaddesi olan pozitronu kuramsal olarak bulan, elektromanyetik alanı kuantumlayarak *kuantum alan* kuramını başlatan, kuantum elektrodinamiği kavramını bilim dünyasına kazandıran, fiziğin Nobel ödüllü duayeni Dirac'ın da görüşü bu doğrultudadır ve ona göre de kuramsal kimya kuantum mekaniği ile tamamen ifade edilebilmektedir.¹⁵ Yani kimyanın altında yatan kuram, aslında bir fizik kuramıdır.

Gelelim elektrik/elektronik dünyasının fizikle ilgisine. Bilindiği gibi elektrik ve elektronik dünyasının temelinde statik ve/veya hareketli elektrik yüklerinin davranışı yatar. İster elektrik mühendisliğinde olduğu gibi elektriği barajlardan ülkenin diğer yörelerine aktaralım, binaların aydınlatma sistemlerini kuralım, ister elektronik mühendisliğinde olduğu gibi en karmaşık mikroelektronik devreleri tasarlayalım, sonuçta yapılan iş, elektronun iletkenler içerisinde bir elektrik alanı etkisinde yapacağı harekete indirgenir, fizik bu olaylara böyle bakar. Yani, iş katıhal fiziğine ve dolayısıyla yukarıda bahsettiğimiz kuantum elektrodinamiğine indirgenir. Neden mi? Çünkü kuantum elektrodinamiği kuramına göre, elektronlar iletkenler içerisindeki hareketleri esnasında tüm yüklü parçacıklarla etkileşirler, yani foton alışverişinde bulunurlar. Bir elektronun yüklü parçacıklar yüzünden maruz kaldığı elektrostatik potansiyelin bize görünen makro etkisi, arka plandaki bu foton değiş tokuşlarının elektron üzerinde oluşturduğu toplam etkidir. Ancak hiçbir elektrik ve elektronik mühendisi işini yaparken, yani elektrik ve elektronikğin pratik uygulamalarını sürdürürken, doğanın bu en temel davranışını hissetmez, zaten gereği de yoktur. Tersine fizikçiler ise en azından temel elektrik ve elektronik, devre elemanları v.b. elektrik/elektronik konularını bilmeliler ki, doğanın elektriksel davranışını açıklayabilmek üzere daha derinlere inebilmek için bir önbilgiye sahip olabilsinler. Yoksa neyi araştıracaklarını bilmelerine imkân yoktur, önce basiti bilmeliler ki daha karmaşığa

15. Süpersimetri, Gordon Kane, Çeviri: Zekeriya Aydın, Sayfa: 58, Tübitak Yayınları

doğru yol alabilsinler. Zaten bilimsel ilerlemelerdeki tarihsel gelişmeler de hep bu yönde olmuştur, önce daha basitten daha karmaşık ve daha derinine doğru. Yani önce MR bulunup, daha sonra pil bulunmuş değil, önce kuantum alan, sonra Ohm yasası bulunmuş değil. Öncelikle kablolar, devre elemanları, piller, elektrik ve manyetik alanlar gibi elektrik/elektronik dünyasının daha elle tutulur, daha pratik ve temel konuları bilinmeli ki, onların çalışmasının temelindeki en ince noktalara daha sonra inilebilsin. Çok açık bir şekilde görüldüğü gibi elektrik/elektronik dünyasının da temelinde fizik yatmaktadır.

Günümüzün popüler mesleği bilgisayar mühendisliğine gelince, fazla söze gerek yok, yazılım (*software*) kısmı hariç olmak üzere tamamen elektronik/elektromekanik mühendisliği demektir. Elektrik ve elektronğin, fizik yasaları üzerine kurulu olduğunu zaten biraz önce konuşmuştuk.

En eski mesleklerden biri olan makine mühendisliğinin ilgi alanının çok büyük bir kısmı ise, fiziğin mekanik ve termodinamik yasalarının uygulanmasına karşılık gelmektedir, yani bunların endüstriyel uygulamalarıdır. Makine mühendislerinin çok iyi bildiği dönme momenti, açı momentumu, dönen ve ötelenen cisimlerin dinamiği, katı cisimlerin dinamiği, verimlilik, kayıplar, basınç v.b. konular zaten fiziğin mekanik adı verilen bölümünde yer alırlar. Isı transferleri, ısısal denge, sıcaklık dağılımları gibi konularda rol alan yasalar ise fiziğin termodinamik yasalarıdır. Böylece makine mühendisliğinin kullandığı yasaların da fizik yasaları olduğu görülmektedir. Bu mühendisler, fizik yasalarını uygulayarak gittikçe daha mükemmel, daha verimli makineler ile giderek daha da çeşitlenen modern ve ergonomik cihazlar geliştirmekte ve yaşamımızı kolaylaştırmaktadırlar.

Nanoteknolojinin ise, kuantum mekaniğinin ve parçacık fiziğinin ilgilendiği boyutlar göz önüne alındığında çok daha makro bir fiziksel alan içerisinde faaliyetini sürdürdüğünden daha önce ayrıntılarıyla bahsetmiştik. Nanoteknolojinin dilinin kuantum mekaniği olduğunu tekrar hatırlatırsak, fiziğin bu teknolojinin çekirdeği olduğunu vurgulamak için başka bir şey söylemeye gerek kalıyor mu? Artık ona siz karar verin.

Yine en eski mühendislik dallarından olan inşaat mühendisliği fiziğin statik denge, kuvvetler, basınç, titreşimlere dayanıklılık gibi temel makro konularıyla ilgilidir. Dolayısıyla yaptıkları iş fiziği ve onun mekanik yasalarını temel alır.

İzninizle Feynman ve Dirac gibi üstadlardan sonra ben de kendi naçizane görüşümü ifade edeyim. Bana göre, tüm bilimlerin baş tacı olan matematik hariç olmak üzere, neredeyse tüm mühendislikler (fizik mühendisliği de dahil, torpil yok!) ile kimya, biyoloji, astronomi, jeoloji, jeofizik, astrofizik, kozmoloji, metalurji, v.b. teknik disiplinler, aslında fiziğin bir veya birkaç alt bölümüne denk gelmektedir. Bir benzeşim yaparsak; modern matematik derslerindeki *Venn şemasında* gösterildiği gibi, bunları fizik biliminin birer alt kümesine, fiziği ise evrensel kümeye benzetebiliriz. Çünkü fizik tanım olarak tüm doğanın, tüm evrenin davranışını açıklamayı hedef edinmiş bir bilim dalıdır, yani diğer teknik dallarda olduğu gibi doğanın sadece kendini ilgilendiren belli olaylarıyla değil, tümüyle ilgilenir. Hal böyle olunca, çoğu mühendislik uygulamaları, doğanın en temelinde bulunan fizik üzerine kurulmuşlar ve fizik yasalarının insanlığın yararına olacak pratik uygulamalarını geliştiren dallar olarak ortaya çıkmışlardır. Onlar da, uçsuz bucaksız kendi alanlarında sürekli olarak gelişmekte, neredeyse her gün bizi bir yenilikle tanıştırmaktadırlar. Şaka bir yana, eğer bu meslekler ayrı uygulama dalları şeklinde fizikten ayrılmasalardı tüm yükü fizikçiler üstlenmek zorunda kalacaktı(!) ve doğal olarak bu yük- le baş edemeyeceklerdi.

Fizik biliminin uygulamalarının, çeşitli mühendislik alanlarına dağıtılmış olmasına rağmen fizikçiler, uygulama alanında ileri teknoloji içeren cihazların tasarımı, geliştirilmesi, mühendisliği ve üretimi için teknolojiye hala büyük destek vermelerinin yanı sıra, kendi asıl işlerini daha vurgulayıcı olarak öne çıkaran temel doğa olaylarını açıklayabilmek için de yoğun çaba içerisindedirler. Günümüzde kuramsal fizikçiler, doğayı tam olarak anlamak üzere kuramsal çalışmalarına devam ederlerken, deneysel fizikçiler de bu kuramların sınanmasını sağlamak üzere, ince

ve ileri teknoloji içeren deneylerin tasarımıyla ilgili çalışmalar yapmaktadırlar.

Son olarak, geldiğimiz bu noktada, asıl ilgi alanı insan vücudu ve insan sağlığına odaklı tıbbın fizikle ilgisi konusunda acaba ne söyleyebiliriz? Öyle ya, tıp da evrenimiz içinde var olan bir kavramdır. Daha önce konuştuğumuz gibi, organlarımızın çalışması elektriksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik özellikler içerir. Organların çalışmasının fiziksel açıdan modellenmesi ile ilgili olarak biyofiziğin rolünden daha önce bahsetmiştik. Dahası, tüm insan vücudu elektronlar, protonlar, atomlar, moleküller gibi kuantum özellikler gösteren yapılardan oluşmuştur, kısacası kuarklar ve leptonları simgeleyen fermiyonlardan. Ayrıca tıbbın biyoloji ve kimya/biyokimya ile olan sıkı bir ilişkisi vardır. Biyoloji ve kimyanın temelinde ise fiziğin bulunduğunu yukarıda detaylarıyla açıklamıştık. Biraz espri yapıp, matematikteki gibi *geçişme özelliğini(!)* kullanırsak, böylece tıbbın da fizikle bir ilişkisinin olduğu sonucuna varabiliriz. Bu anlattıklarımıza ilaveten, daha önce de örneklerini verdiğimiz gibi, tıp biliminin son yıllarda sıkça kullandığı çok ileri teknolojiye sahip cihazların, fiziğin uygulama alanları olan elektrik/elektronik, elektromekanik, endüstri ve makine mühendisliği gibi mühendislik uygulamalarının bir sonucu olduğunu görürüz. Teknoloji ilerledikçe, modern tıp son yıllarda fiziği ve onun yasalarıyla çalışan teknolojiyi gittikçe çok daha fazla kullanmaktadır. Optik cihazlar, lazer, röntgen, ultrason, MR ve PET/CT gibi çok ince fiziği içeren cihazların kullanımı, günümüzde artık sıradanlaşmıştır. Tıbbın kendine has olan klasik mesleki teşhis/tedavi fonksiyonları dışında ve kuşkusuz bu bahsettiğimiz konular çerçevesinde düşünürsek, fiziğin tıp âlemiyle hiç de uzak olmayan bir ilişkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

3

Fiziğin Doğuşu ve Gelişimi

Bu bölümde çok fazla ayrıntıya girmeden fiziğin doğuşu ve gelişimi konusunda biraz konuşalım istiyorum. Zaten daha derin bilgiye gereksinim duyanlar için yararlanılabilecek çok sayıda kaynak mevcuttur. Fiziğin zaman içerisindeki yolculuğu sırasında *balta girmemiş bilinmeyenler ormanında* açmış olduğu patikada sizlerle beraber ilerlerken otların arasında ayağımıza takılacak olan çok önemli, pırıltılı taşlara rastlayacağız. Ben söylemesem de, onların pırıltısını ilerleyen bölümlerde zaten sizler de kendiliğinizden fark edeceksiniz. Bunlar, dikkatle bakıldığında diğerlerinden farklı olup, patikada ne yana doğru yol almamız konusunda bizi yönlendirecek olan, fiziği fizik yapan işaretlerdir. Klasik elektromanyetik kuramdaki ünlü Maxwell denklemleri¹⁶ ile kuantum fiziğindeki Planck sabiti, bu gibi sıradışı taşlara örnek olarak verilebilir. Ne var ki bu kitap kapsamında rastlayacağımız bu kıymetli taşların çok fazla derinine inmemiz mümkün değildir. Çünkü bunların hamurunda daha önceki bölümlerde de vurguladığımız gibi yüksek matematik vardır. Biz

16. Elektrik ve Magnetizma, E.M. Purcell, Berkeley Fizik Prog. Cilt:2, Sayfa: 275, Karadeniz Teknik Üni. Yayınları

sadece şimdilik bu pırıltıların neler olduğunu fark edelim, var-
sın bunların matematiğiyle fizikçiler uğraşsın!

Burada da tekrar ifade edelim ki; bu bölümde, fiziğe emek
vermiş her bilim insanını ve fiziğin gelişimi içerisinde yer almış
olan her konuyu tek tek anmak mümkün değildir. Biz fizik tari-
hi içerisinde gezinirken ancak genel anlamda çok önemli olarak
bilinen fizikçiler ve konulara yüzeysel olarak şöyle hafif bir do-
kunacağız. Kendi görüşümü de samimi olarak ifade etmeliyim;
*"Benim anlayışıma göre, fiziğe emek vermiş her bilim insanı çok önem-
li olup hiçbirinin hakkını tam anlamıyla teslim etmemiz mümkün de-
ğildir. Çünkü bu fizikçilerin çoğunun bir elleri yağda, bir elleri balda
değildi, fizik aşkı ekonomik kaygılara galip gelmiş, sıkıntılı şartlar içe-
risinde yıllarca iğneyle kuyu kazmışlardır. Bugün ileri teknoloji saye-
sinde rahat yaşıyorsak, geldiğimiz bu noktada onların büyük emeği
vardır, dolayısıyla saygıyı ve teşekkürü sonuna kadar hak etmektedir-
ler. Bu, fiziğin tüm dalları ve konuları için geçerlidir. Hiçbir fizik ko-
nusu önemsiz değildir, her bir konu bize doğanın ayrı bir gizemini an-
latır, böylece her birinin katkısıyla toplam fizik anlayışımız bugünkü
haline gelebilmiştir"*.

Kronolojik bir yaklaşımla konuyu sürdürelim istiyorum, ya-
ni en eskilerden başlayıp günümüze doğru gelelim.

Doğanın gizemini ortaya çıkarmaya çalışan fizik biliminin,
ilk uygarlıkların Mezopotamya'ya yerleşmeye başladığı M.Ö. 4
binli yıllara kadar uzandığını ifade eden kaynaklara rastlamak
mümkündür. Tabi ki burada kastedilen fizik bugün anladığımız
anlamdaki fizik olmayıp, zaman ve mesafe ölçümleri gibi fiziğin
doğasında bulunan bazı temel niceliklerin ölçümüyle sınırlı olan
bir kavramdı. İnsanlığın ilk ortaya çıkışından itibaren insanlar
ve toplumlar farkında olmasalar bile zaten fizikle temas halin-
deydiler.

Felsefi anlamda doğanın ve fiziğin ilk ele alınışı, tarihin epey
gerisine, eski Yunan dönemine kadar gitmektedir. Doğa felsefe-
sinin ilk defa ele alınmaya başlandığı bu dönemde, Sokrates'in
öğrencisi olan Platon'dan dersler alan ve M.Ö. 384-322 tarihleri
arasında yaşadığı bilinen Yunanlı filozof Aristoteles (Aristo) dü-
şünceleriyle bu döneme damgasını vurmuştur. Fizik ve doğa fel-

sefesi üzerine kafa yoran ve hatta metafizik (*fizik ötesi*) düşüncenin önderliğini yapmış olan Aristo'nun fikirleri, M.Ö. 4. yüzyıldan M.S. 17. yüzyıla kadar uzunca bir dönemi kapsayarak yaklaşık iki bin yıl boyunca hüküm sürmüştür. Dahası, kilise bile Aristo'nun görüşlerini gönülden benimsemiştir. Aristo'ya göre, dünyadaki her şey hava, toprak, ateş ve sudan oluşmaktaydı. Tüm bunlara etki eden iki kuvvet vardı, bunlar, yerçekimini temsilen toprağın ve suyun batma eğilimi ile hava ve ateşin yükselme eğilimi olan uçuculuktur. Takdir edersiniz ki Aristo felsefesinin tüm ayrıntısına burada girebilmemiz olanaksızdır. Aristo'nun fizik ve doğa felsefesi üzerine düşüncelerinin ayrıntılarını merak eden okuyucular için, büyük filozofun Yunanca aslından (*Physike*) çevrilmiş olan "Fizik" adlı ünlü eserinin onlara fazlasıyla yeteceğini düşünüyorum.¹⁷ Aristo bu eserinde, devinim/hareket (*kinesis*), değişme (*metabole*), sonsuzluk (*apeiron*), yer (*topos*), boşluk (*kenon*), zaman (*khronos*) gibi temel fizik kavramlarını kendi yorumuyla değerlendirmektedir.

Unutmadan ekleyeyim; neredeyse aynı dönemlerde, yani M.Ö. 400'lerde Demokritus, maddenin artık daha fazla bölüne-meyecek kadar küçük birimlerden oluşması gerektiğini öne sürerek bu en küçük düşünsel parçalara eski Yunancada bölüne-meyen anlamına gelen *atomos* adını verdi ve böylelikle atom anlayışını tartışmaya açmış oldu. Bu fikirler bizi günümüzün modern parçacık fiziğine götüren ilk düşüncelerdir. Bu tür yaklaşımlar ve yorumlarla yavaş yavaş doğa ve fiziğin felsefesi üzerine düşünceler birbirini izlemeye başlamış oldu. 1800'lü yılların başında ise John Dalton, maddenin atomik yapısı fikrini ileri sürerek, Demokritus'un *atom* terimini yıllar sonra tekrar sahneye çıkaran kişi oldu.

Doğaldır ki, Aristo dönemindeki her öngörü, bugünkü fizik bilgimize göre değerlendirdiğimizde doğru değildi. Buna bir örnek vermek gerekirse, Aristo dönemindeki anlayışa göre; dünyanın merkezde olduğu bir sistemde gezegenler, güneş ve ay dairesel hareketlerle dünyanın etrafında dönmekteydiler. Yer

17. Fizik, Aristoteles, Yunanca Aslından Çeviren: Saffet Babür - YKY Yayınları

(dünya) merkezli bu sisteme *jeosantrik* sistem adı verilir. Daha sonra, Polonya'lı bir rahip olan Kopernik (*Copernicus*) durumun böyle olmadığını, merkezde güneşin bulunduğunu ve tüm gezegenlerin güneş etrafında döndüğünü açıkladı. Bu sisteme ise *heliosantrik*, yani güneş merkezli sistem denmektedir. Antik Yunan'da *helios* güneş anlamına gelir. Bu yeni bakış açısıyla, artık Aristo dönemindeki anlayışın yıkılacağına ilk işaretleri yavaş yavaş ortaya çıkmaya başlamıştır.

Ama fizik hep böyledir, bugüne kadar doğru olduğuna inanılan birçok düşünce zaman içerisinde yeni kuramlar tarafından yıkılıp gitmişlerdir. Hemen bir örnek vereyim; elektromanyetik dalgaların boşlukta yayılabilmesi için esir/eter (*ether*) denilen bir ortamın var olduğuna inanılıyordu. Esir ilk olarak 1678'de Huygens tarafından ortaya atıldı. Daha sonraları Maxwell, elektromanyetik kuramı açıkladığında görüldü ki, elektromanyetik dalgaların yayılması için herhangi bir ortama ihtiyaç yoktu, elektrik ve manyetik alanlar birbirlerini doğurarak boşlukta ışık hızıyla yayılmaktaydı. Esir kavramı da böylece terk edilmiş oldu.

Galile (*Galileo Galilei*) ise dünya dönüyor dediği ve Kopernik'i doğrudan desteklediği için, kiliseye karşı geldiği iddiasıyla engizisyon mahkemelerinde yargılanmış, hapisanelerde süründürülmüştür. Galile, Aristo dönemindeki felsefi anlayışın yanlışlarını ve yetersizliklerini görerek devinim, sarkaç, serbest düşme gibi konuların matematik bir temele oturtulması gerektiğini savunmuş ve bu yönde çalışmalar yapmış olan bir filozof, fizikçi, matematikçi ve astronomdur. Diğer bir deyişle Aristo'nun *nitel fiziğini*, sayılar ve formüllerle ifade edilen *nicel fiziğe* çevirmiştir. Klasik fizikte ışık hızına göre çok düşük hızlarla ivmesiz hareket eden referans sistemlerinin uzay-zaman koordinatlarının birbirine nasıl dönüşmesi gerektiğini tanımlamak için kullandığımız *Galile Dönüşümleri* (*Galilean Transformation*) bu noktada tekrar hatırlamak uygun olacaktır. Kusura bakmayın bu ifade epey fizikçe oldu, ama bu hatırlatma sadece fizikçilere, diğer okuyucular lütfen umutsuzluğa kapılmasınlar, okumaya devam etsinler. Galile'nin yaşam öyküsü ve başarıları üzerine

daha fazla bilgilenmek isteyen okuyuculara “Galileo Galilei” isimli eser hayli ilginç gelecektir.¹⁸

Galile ile yaklaşık aynı dönemlerde yaşamış olan ünlü matematikçi, astronom ve fizikçi Kepler ile yine aynı dönemde astronomi konusunda deneysel çalışmalar yapan, deneysel fizik alanında simge olmuş Danimarkalı ünlü fizikçi ve astronom Tycho Brahe’den bahsetmeden geçemeyiz. Kopernik’in açtığı yoldan devam eden Kepler, güneş sisteminin geometrik açıklamasını çok başarılı bir şekilde ifade edebilmiştir. Kepler’in ünlü $R^3/T^2=K$ ifadesine göre, güneşin etrafında dönen gezegenlerin güneşe olan uzaklıklarının küpünün, güneşin etrafında tam bir dönüş yapmaları için geçen sürenin karesine oranı sabittir. Gezegenlerin yörüngesinin elips şeklinde olduğunu, güneşin bu elipsin iki odağından birinde bulunduğunu ve güneşten gezegenlere uzanan doğrunun eşit zamanlarda eşit alanlar taradığını bilim dünyasına sunan Kepler olmuştur. Bu sonuçlarda, Kepler’in deneysel çalışmasının değil, büyük matematik dehasının rol oynadığı söylenir. Kepler’in ilginç öyküsünü okumak için yine çok güzel bir kitap olan “*Johannes Kepler*” adlı kitabı salık verebilirim.¹⁹ Kopernik, Galile ve Kepler, Rönesans döneminin astronomi, fizik ve matematik alanında en parlak bilim insanları olarak kabul edilmektedir. O dönemde bu bilim insanlarına destek veren ve doğanın davranışının matematik temellere oturtulması gerektiği fikrini savunanlardan biri olan ünlü Fransız felsefeci ve matematikçi Descartes’ı anmadan geçemeyiz.

Gelelim 17. yüzyılın en parlak, en göz alıcı fizik üstadı Newton’a. Klasik fiziğin en önemli ve en üretken şahsiyeti kabul edilen İngiliz bilim insanı Sir Isaac Newton’un “*Doğa Felsefesinin Matematik İlkeleri*” (*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*) adındaki klasik şaheseri 1687 yılında yayımlanmıştır. Bu eserde hareket yasaları, klasik mekaniğin temelleri, evrensel çekim ve Kepler’in ortaya attığı gezegenlerin hareketi ile ilgili davranışla-

18. Galileo Galilei, İlk Fizikçi, James MacLachlan, Çeviri: İnci Kalınyazgan, Tübitak Yayınları

19. Johannes Kepler, Yeni Gökbilim, James R. Voelkel, Çeviri: Nur Özlük, Tübitak Yayınları

rın daha incelikli tanımlaması yer almaktadır. Bu tarih, fizik bilimi için bir milat kabul edilmektedir. Kopernik, Kepler ve Galile'nin ileri sürmüş olduğu fikirlerle zaten epeyce sarsılmış olan Aristo fiziği anlayışı, Newton'un bu çalışmalarıyla tamamen yıkılmıştır. Newton'un yenilikçi yaklaşımının temelinde gözlemi, deneyi ve matematiği birleştirmiş olması yatmaktadır. Daha sonra ilerleyen bölümlerde ayrıntısına değineceğimiz ve Einstein gibi bir dâhinin de ölene kadar savunmuş olduğu fizikteki *deterministik yaklaşım* felsefesinin temelleri, Galile'nin başlattığı ve Newton'un son şeklini verdiği bu çalışmalarla atılmıştır. Ünlü felsefeci Politzer, gelinen bu noktayı şöyle yorumlar; “*Böylece katı mekanik bir gerekircilik (determinizm), durmak bilmez bir çarklar sistemi, Tanrısal zekanın gizemli eyleminin yerini alıyordu.*”²⁰ Bu fikirler Rönesansı etkilemiş olup, aynı zamanda kiliseye karşı açıkça bir başkaldırıydı. Ancak yine de Newton, tıpkı ünlü fizikçi Joule gibi, doğanın mekanik davranışını kesin bir matematik dille ifade edebilmesine rağmen, bu devasa düzene ilk başlama hareketini “*Tanrısal bir fiske*”nin verdiğini düşünüyordu. Deterministik sözcüğünün ne anlama geldiğine sözlüklerden baksanız da fizikteki karşılığını hissedebileniz zor olabilir, benim *uydurduğum(!)* bir tanıma göre şimdilik *kesinbelirleyicilik* diyelim ve bu felsefeyi anlatacağım bölümü bekleyelim. Laf aramızda, konuyu öğrendiğinizde benim uydurduğum tanımın çok da kötü olmadığını görüp bana hak vereceğinize eminim.

Bu çalışmalarla Newton; gezegenlerin, yıldızların, güneşin, dünyanın, ayın, galaksilerin yörüngelerinde nasıl hareket ettiklerini, cisimlerin neden yere düştüğünü, evrendeki tüm cisimlerin birbirine nasıl çekim kuvveti uyguladığını, neden dünyanın fırlayıp uzaya kaçmadığını, niçin otomobil ani fren yapınca ön cama yapıştığımızı, niçin kırmızı ışıktaki dururken arabamıza arkadan çarpıldığında boynumuzdaki diskin kaydığını, sabit bir kuvvetle bir süre itilen bir cismin neden hızlandığını/ivmelenmediğini, kuyruklu yıldızın neden gelip karşımızda durduğunu, neden denizlerde gelgit olaylarının olduğunu, neden halk ara-

20. Felsefenin Temel İlkeleri, Georges Politzer, Sayfa:175, Sol Yayınları

sında yıldız kayması olarak bilinen göktaşlarının yanarak atmosfere girdiğini, neden çarpışan bilardo toplarının düzgün bir geometrik yol izlediğini, neden viraja sertçe giren bir aracın savrulduğunu, neden güney yarımküredeki insanların tepe üstü boşluğa uçmadığını ve buna benzer hepimizin aklına gelebilecek elle tutulur-gözle görülür makro seviyedeki yüzlerce doğa olayını *Newton Yasaları* denilen üç adet yasa ile açıklamıştır. Kuantum fiziği günümüzde çok popüler olmasına rağmen, günlük hayatımızda elle tutulur-gözle görülür makro mekanik olayların açıklanmasında, klasik fizik ve *Newton Yasaları* hala başarıyla hükmünü sürdürmektedir. Ayrıca Newton'un optik konusuyla da yakından ilgili olduğunu söylememiz gerekir. 1704'de yayımlanan "*Işığın Yansıması, Kırılması, Sapması ve Renklerinin Bilimsel Bir İncelemesi*" (*OPTICS: or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*) adlı ünlü bir çalışması vardır. Hatırlıyorum, ilkokulda bile Newton'un beyaz ışığı prizmadan geçirerek yedi renge ayırdığını bize öğretmenlerimiz anlatırlardı. Sahi, bir de Newton Çarkı vardı değil mi? Bunu hatırlamayı da size bırakıyorum.

Klasik fiziğin bu en pırıltılı ustasını daha ayrıntılı merak edenler için bu konuda çok sayıda kaynak bulmak işten bile değildir. Newton'un neden önemli ve sıra dışı bir kişilik olduğunu kavrayabilmemiz için meraklılarına yine çok güzel bir kitap öneriyorum.²¹

Meraklısına hemencecik bir not düşelim; gezegenlerin güneş çevresinde neden eliptik yörüngelerde hareket ettiğini lise matematik bilgisini aşmayacak şekilde *Öklid Uzayı* geometrisini kullanarak Newton'dan 300 küsur yıl sonra kendi metotlarıyla ispatlayan biri daha var. Kim mi? Fizikçilerin çok iyi tanıdığı ünlü Feynman. İşte size üstadın bunu nasıl yaptığının çok ayrıntılı olarak anlatıldığı güzel bir kitap daha.²²

Şunu iyi bilmeliyiz ki klasik fizik, Rönesansın sonlarına doğru sahneye çıkan Galile ve Newton gibi dahiler sayesinde temel-

21. Isaac Newton, Bilimsel Devrim, Çeviren: Zekeriya AYDIN, Tübitak Yayınları

22. Feynman'ın Kayıp Dersi-Gezegenlerin Güneş Çevresindeki Hareketi, David L. Goodstein, Judith R. Goodstein, Çeviri: Zekeriya AYDIN, Tübitak Yayınları

lerine oturtulmuş, ruhunu ve kimliğini onların çabalarıyla kazanmıştır. Ne var ki, 19. yüzyıla gelindiğinde, fizik biliminde o zamana kadar edinilen bilgiler ışığında yapılan gözlemlere/de-neylere paralel olarak, bazı doğa olayları bilinen klasik fizik yöntemleriyle anlaşılamamaya başlandı. İsterseniz o zaman anlaşılamayan bu gizemli doğa olaylarına bazı örnekler verelim. Atomların tayfları (*spektrum, spectrum*) yani yaydıkları ışımlar neden belli frekanslardaki çizgilere karşılık geliyordu? Niçin bu frekanslar her atom için farklıydı? Üzerine belli frekanslarda ışık düşürülen metaller neden elektron fırlatıyordu? Siyah bir cisim ışıma yaptığında yaydığı enerji neden belli bir büyüklüğün tam katları şeklinde değerler alıyordu? Parçacık olarak bildiğimiz cisimler acaba aynı zamanda dalga mıydı? Bunun tersi de doğru muydu? Bu soruları daha da çoğaltabiliriz, ama bu gizemli sorulara ve cevaplarına, klasik fiziğin neden yetersiz kaldığını konuşacağımız bir sonraki konuda daha ayrıntılı bir şekilde değineceğiz.

İşte, doğanın bu tuhaf görüntülerini tanımlamak için başta Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac, Schrödinger, Planck, de Broglie, Born ve Pauli olmak üzere büyük fizik dehaları sahneye çıkmaya başladılar ve bu gizemli soruların ancak kuantum fiziği sayesinde cevaplanabileceğini gösterdiler. Kuantum fiziğinin nasıl bir şey olduğunu ileride daha ayrıntılı bir şekilde konuşacağız diyerek bu bölümü isterseniz şimdilik kapatalım.

4

Klasik Fizik Nedir? Niçin Yetersiz Kalmıştır?

Bu bölümden itibaren yine mümkün olduğunca formüllerden uzak durmaya çalışacak, ama dil olarak artık bir parça daha *fizikçe* konuşacağız. Bu demektir ki, fizik hamamına girenler biraz terleyecekler. Anlatılacak konuların, fiziğin çok içinde olmayan okuyuculara bile bir görüntü, bir anlayış kazandıracağını biliyor ve fiziğin çok ilginç olan farklı yüzlerini tanımak için okumaya devam etmelerini öneriyorum. Daha açık söylemek gerekirse, genellikle herkesin orta öğretimden aklında kaldığı gibi, fiziğin sadece eğik düzlemler, makaralar, ipteki gerilme kuvvetleri, 10 gram buzun erimesinin kaç kaloriye mal olacağı ve Arşimed'in hamamdan "*Buldum, buldum!*" diye fırlayarak dünyaya ilan ettiği suyun kaldırma kuvvetiyle sınırlı bir bilim olmadığıнын görülmesini istiyorum.

Klasik fiziğin temellerinin, Galile ve Kepler'in doğa olaylarına getirdikleri yeni bir bakış açısı doğrultusunda esas olarak 17. yüzyılda Newton'un çalışmalarıyla atıldığını önceki bölümde görmüştük. Newton Mekaniği iki yüz yılı aşkın bir süre makro seviyedeki fizik olaylarının açıklanmasında tartışmasız bir şekil-

de bilim dünyasına yol göstermiştir. Ancak 19. yüzyılda yavaş yavaş görülmeye başlandı ki Newton'un bu mükemmel yasaları, gözlemlenen bazı fizik olaylarını açıklayamıyor. Demek ki doğa, Newton'un geliştirdiği yasalarla sınırlı olmayıp çok daha derin görünüşler sergilemektedir. Neydi doğanın bu esrarengiz tarafı? Daha önce hafifçe değinmiştik, ama tekrar hatırlayalım. Örneğin fotoelektrik etki bunlardan biridir. Üzerine ışık düşürülen bazı metallerin elektron fırlatması olarak bilinen bu olay nasıl oluyordu? Genel olarak mikro dünyada, yani atomik ölçeklerde dönen olayların açıklaması, örneğin, atomların neden belli enerji seviyelerinde bulunduklarının izahı yapılamıyordu. Morötesi felaketi, ısımanın doğasında bulunan kesikli enerji birimleri gibi yeni karşılaşılan şaşırtıcı olaylar, o zamana kadar kabul edilmiş klasik fizik kavramlarıyla kesinlikle açıklanamıyordu. Hatta daha da tuhafı, dalga olduğundan hiç şüphe duyulmayan fiziksel görünüşlerin sanki katı bir cisimmiş gibi parçacık özelliklerinin de bulunduğu ve bunun tersinin de doğru olduğu, yani parçacıkların da dalga gibi davrandığı dehşetle fark edilmişti. Bunların hepsi klasik fiziğe (*yani yaklaşıkca 1900'lerin başına kadar bilinen fizik diyelim*) çok yabancıydı.

Olayları doğru değerlendirebilmek için, öncelikle klasik fiziğin ne olduğunu ve hangi ana konularla ilgilendiğini anlamaya çalışalım. Genel olarak mekanik, termodinamik, elektrik ve manyetizma, optik, titreşimler ve dalgalar, istatistik fizik gibi konuları içeren doğa olaylarının gizemini ve kurallarını o zamanın fizik anlayışına göre deşifre etmeye çalışmış olan fiziğe biz klasik fizik diyoruz. Doğaldır ki, o dönemlerin gözlemleri, deneylere yaklaşımları, teknolojisi bugüne göre daha az incelikliydi, bundan dolayı fizik, elle tutulur-gözle görülür yani daha makro düzeydeki büyük ölçekli olayları açıklamaya yetebiliyordu.

Fiziğe biraz uzak okuyucular için yararlı olabileceği düşüncesiyle, bu fizik dallarının bazılarının içeriği ve ilgi alanlarından biraz bahsetmek istiyorum.

Düşünebildiğiniz, çevrenizde gözlemlediğiniz, yaşamınız boyunca deneyimlediğiniz, hareketli veya hareketsiz olan, gözle

çok çok zor görülebilen mikro cisimlerden, uzaydaki dev gök cisimlerine kadar her türlü, katı-sıvı-gaz, elle tutulur-gözle görülür cisimlerin tek tek veya grupça hareketlerini, onları harekete geçiren/durduran kuvvetleri, aralarındaki etkileşimleri makro ölçeklerde inceleyen *mekanik* veya diğer adıyla *klasik mekanik*, fiziğin en önemli ana dallarından biridir. Işık hızına göre çok çok düşük hızlarla ilgilenmesi, Newton mekaniği ve yasalarına dayalı diferansiyel ve integral hesabı içeren matematik altyapıyı barındırması, büyük ölçekli kütlelerle uğraşması, klasik mekaniği karakterize eden genel özelliklerdir. Hatırlayacaksınız, klasik mekanik dünyasını gözümüzde canlandırabileceğimiz örneklerle bir önceki bölümde Newton'u anlatırken değinmiştik.

Termodinamik ise, içinde ısı ve sıcaklık kavramları geçen tüm doğa olaylarının açıklamasını yapan çok önemli bir fizik dalıdır. 'Isı nedir, nasıl iletilir, ısı ile sıcaklık arasında ne fark vardır, ısısal denge nedir, faz değişimleri ne demektir, entropi nasıl bir şeydir, evren gittikçe düzensiz bir hale mi geliyor, ısı enerji midir, mutlak sıcaklık nedir, cisimleri canımızın istediği kadar soğutabilir miyiz, gazların kinetik teorisi işimize yarar mı, buzdolabı hangi ilkeye göre çalışır, ondört milyar yıl önce meydana gelen büyük patlamadan sonra evrendeki ani sıcaklık değişimi nasıl olmuştur?' şeklinde yüzlerce soru sorulabilir. Bu soruların cevabını termodinamik yasaları vermektedir. Unutmadan uyarayım, termodinamiği anlamak için çok sıkı bir *istatistik fizik* bilgisine gereksiniminiz olacaktır. Görüyor musunuz fizik patikasında ilerledikçe yollar nasıl da dallanıp budaklanıyor, dikleşiyor. İlerleyen bölümlerde de göreceğimiz gibi, kuantum fiziğini anlamaya çalışırken de istatistik fizikten kurtuluşumuz yoktur. Şimdiden küçük bir örnek vermek gerekirse, parçacık fizikçilerinin aşına olduğu bozon ve fermiyonların davranışı, *Bose-Einstein* ve *Fermi-Dirac* dağılımları ile belirlenen istatistiklere uymaktadır.

Önceleri elektrik ve manyetizma olarak ayrı zannedilen, ancak sonraları birbirleriyle olan ayrılmaz sıkı ilişkileri yüzünden elektromanyetizma olarak aynı potada düşünölmeye başlanan bu fizik dalının konularım fizikle pek ilgili olmayan insanlar bi-

le az veya çok tahmin edebilir. Elektrik ile manyetizma kavramları arasındaki bağı Oersted, bir deney sırasında fark etti ve telden geçen akımın pusulayı saptırdığını gördü. Bu demek oluyordu ki, elektrik akımı telde akarken telin çevresinde bir manyetik alan oluşturunuyordu. Sonradan anlaşıldığı üzere, bir iletken telden yapılmış kapalı bir çerçeveyi değişken bir manyetik alan içerisinde hareket ettirirsek veya sabit bir manyetik alan içerisinde döndürürsek, telde bir elektrik akımı oluşur. Burada teknik bir nokta olan *manyetik akı değişimi* kavramına girmeyeceğim, ama biliniz ki işin aslı odur. Velhasıl görüldü ki, elektrik ve manyetik olaylar/alanlar birbirlerini doğuruyorlar. Daha sonra elektrik ve manyetik alanların birbirlerinin *görelî dönüşümleri* oldukları fark edildi. İşte boş uzayda hiçbir taşıyıcı ortama gereksinim duymadan ışık hızıyla yayılan elektromanyetik dalgalar da, yayılma doğrultusuna ve birbirlerine dik vektörlerle tanımlanan elektrik ve manyetik alanların birbirlerini ardışık olarak doğurmasıyla oluşur ve yayılırlar. Elektrik ve manyetizma konusuna hayatımızın hangi alanlarında rastladığımızı bilmem sizlere anlatmaya gerek var mı? İçinde elektrik ve mıknatıslık bulunan, aklınıza gelen her konu fiziğin bu çok önemli dalının ilgi alanını oluşturur. Maxwell'in ünlü denklemleriyle taçlanan ve fizik dünyasında *klasik elektrodinamik* veya *elektromanyetik kuram* olarak bilinen bu dal, daha sonra *kuantum alan kuramı* çerçevesinde yeniden yorumlanarak bilinen en son halini almıştır. Bu kurama göre elektromanyetik alanın ve etkileşmelerin kuantumu fotondur (*photon*), yani elektromanyetik etkileşmeleri yöneten kuvvet taşıyıcısı (*force carrier*) foton adı verilen bir ayar bozodur. Fizikçilerin çok iyi bildiği gibi, görünür ışık da bir elektromanyetik dalga olduğundan, onun en küçük enerji birimi yani kuantumu da fotondur. Bu konuya ileride daha ayrıntılı olarak değineceğiz.

Optik ise bildiğiniz gibi ışığın aynalar, mercekler, prizmalar, kırılma indisleri farklı ortamlar karşısında nasıl davrandığı ve nasıl bir yol izlediği ile ilgilenen fizik dalıdır. Işığın kırılması, yansması, sapması gibi herkes tarafından aşağı yukarı bilinen geometrik optik konuları ile gözlük, teleskop, dürbün, çukur-

tümsek-düz aynalar gibi aklınıza gelebilecek tüm optik elemanlar, elektrooptik, optoelektronik ve lazer optiği konuları fiziğin *optik* adı verilen dalı tarafından incelenir. Elektrooptik, askeri alanda termal sistemler, lazer sistemleri ve kızılötesi ışınlamalarla çalışan görüntü yoğunlaştırıcılı gece görüş cihazlarının tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Optoelektronik ise elektronik ile ışık arasındaki bağı kurar, yani ışığın doğasını elektroniklerle birleştirir. Son yıllarda yaygınlaşan fiber optik kabloların tasarımı optoelektronik temele dayanır. Lazer optiğine de ilginç bir örnek vermek gerekirse, bilim kurgu türü filmlerde rastladığımız, boşlukta üç boyutlu görüntü oluşturma tekniğini verebiliriz. Özel tasarlanmış kırınım (*diffraction*) ağırlarına lazer ışını düşürüldüğünde bu sihirli görüntüler ortaya çıkmaktadır. Verdiğimiz bu tür örneklerin sayısını daha da artırabiliriz, ancak bir fikir verebilmesi açısından bu kadarının bile yeteceğini düşünüyorum.

Klasik fiziğin başlıca konularından ve ilgi alanlarından bahsederken bir yanlış anlamaya meydan vermemek için şu uyarıyı yapmak gerekir. Klasik fiziğin fırtına gibi estiği dönemlerde tabi ki elektrooptik, optoelektronik, lazer optiği ve kuantum alan kuramı (*Quantum Field Theory*) kavramları yoktu, bu kavramlar fizik ilerledikçe ortaya çıkmışlardır. *Kuantum Alan Kuramı* ifadesi literatürde *Kuantumlu Alanlar Kuramı* olarak da karşımıza çıkmakta olup ikisi de aynı kavramı ifade etmektedir.

Şimdi gelelim klasik fiziğin açıklayamadığı, bir önceki konuda çok kısa değindiğimiz gizemli doğa olaylarının biraz daha ayrıntısına. Acaba klasik fizik hangi doğa olaylarını açıklayamıyordu? Nerelerde yetersiz kalmıştı? Neden susmuştu? Acaba fiziğin sınırlarına mı gelinmişti?

Ayrıntısına girmeden buna birkaç basit örnek vermek istiyorum. Atomlar ışıma yaptığında neden her atoma özgü belirli tayf çizgileri vardır? Atomlara dışarıdan enerji verilirse elektronlar neden üst enerji düzeylerine çıkar, hatta atomdan koparak (*iyonlaşma*) atomu terk eder? Nasıl oluyor da cisimler hem dalga hem de parçacık gibi davranıyorlar? Güneş nasıl ışımkatadır? Neden bazı elementler radyoaktiflik gösteriyor, radyoakti-

vite nedir? Bakır elektriği iletirken plastik neden iletmiyor? Süper iletkenler akıma neden direnç göstermiyor, akımı nasıl iletiyor? Elmas neden serttir? Yarı iletkenlerin iletim yeteneği neden sıcaklık arttıkça artıyor? Mıknatıslar ısıtıldıklarında neden özel liklerini kaybeder? Metallerin erime sıcaklıkları neden farklıdır? Klasik fiziğin açıklayamadığı bu tür soruların sayısını epeyce artırarak listeyi uzatmak mümkündür, ancak tümüne burada değinemeyiz.

Klasik fiziğin yetersizliklerini birazcık hissedebilmek adına bazı örnekleri mercek altına alalım diyorum. Örneğin fotoelektrik olayla başlayalım isterseniz. Nedir bu fotoelektrik olay? Einstein'ın fotoelektrik etkiyi açıklamasının kendisine Nobel Fizik Ödülü'nü getirdiğini söylersek konunun önemi biraz daha ortaya çıkar.

Metaller üzerine düşürülen çeşitli frekanslardaki ışınımın metallerden elektron kopardığı, ilk kez elektromanyetik alanlar konusunda çalışan Alman fizikçi Hertz tarafından fark edildi. Genel bir bilgi olması açısından, dalgaların saniyedeki titreşim sayısına frekans (*çizgisel frekans, sıklık*) dendiğini söyleyelim ve bir de ayrıca açısal frekans (*açı frekansı*) kavramının olduğunu ve fizik dünyasında çok sık kullanıldığını hatırlatalım. Radyo-TV yayınları ile cep telefonları dünyasında, kısacası telekomünikasyon ve iletişimin her alanında sıkça karşımıza çıkan ve Hertz'in adına ithaf edilen megahertz (MHz), kilohertz (KHz) gibi frekans birimlerini anlatan terimlerin nereden geldiğine burada özellikle dikkatinizi çekmek istedim. Şimdi içinizden "Allah Allah, biz bunları elektronik/elektrik ve haberleşme mühendislerinin işi zannediyorduk" dediğinizi duydum bile.

Fizik kitaplarında bulabileceğiniz fotoelektrik etkiyi/olayı açıklayan klasik şekillere/grafiklere burada girmeyeceğiz, bizim amacımız sohbet, fizik dersi çalışmak değil! Herhangi bir metalden elektronların koparılabilmesi, keyfi olarak istediğimiz ışığın istediğimiz metal üzerine düşürülmesiyle hemencecik olmaz. Yani el fenerinin ışığını bahçenin demir parmaklıklarına doğrultmakla olmaz. Metallerden elektron sökülmesi ancak ışığın belli bir frekansı geçmesinden sonra gerçekleşebilir. Elektronla-

rın metalden koparılmaya başlanabilmesi için her metalin üzerine düşürülen ışınımın izin verdiği minimum bir frekans vardır. Yani, bu frekans metale göre değişir. Metal neden belli bir frekans ve üzerindeki frekans değerlerine izin veriyor da, daha düşük frekanstaki ışıkların kendinden elektron koparmasına izin vermiyor? Haydi, şimdi bunu yapabilirseniz klasik fizik bilgileriyle açıklayın bakalım.

Dahası, varsayalım ki bir ışık kaynağımız var, biz de elektron koparsın diye bir metalin üzerine bu ışığı doğrulttuk, şansımız da yaver gitti ve metal bu ışığa kendisinden elektron koparma izni verdi diyelim. Baktık ki üç beş elektron kopuyor, heveslendik ve her nasılsa fırlayan elektronların hızlarını ölçerek belli bir değer bulduk diyelim. Birdenbire aklımıza şeytanca bir fikir gelebilir, madem elektronlarla oyun oynayabiliyoruz, eğlenceli olsun diye kopan elektronların hızlarını daha da artırabilir miyiz? Bunu başarabilirsek belki deney arkadaşımızla karşılıklı elektron savaşları yapabiliriz! Bu arada parlak bir öneri aklımıza gelebilir; *“Aynı ışık kaynağından bir tane daha bulup ikisini birden aynı anda metale doğrultursak kopan elektronlar daha hızlı fırlarlar, çünkü ışık şiddetini iki katına çıkarmış oluruz”* diye düşünebiliriz. Bize gayet mantıklı gelen bu düşünceye uyarak aynı özellikteki (fizikçede buna *özdeş-identical* deniliyor) iki ışık kaynağını beraberce metale doğrultup bekleriz ki metalden fırlayacak olan elektronların hızı bir öncekilerin iki katı olsun. Ama daha çok bekleriz! Birim zamanda fırlayan elektronların sayısının artmış olduğunu ama hızlarının hiç değişmediğini görürüz. Gördünüz mü klasik fiziğin gerektirdiği mantıkla yaklaştığımız bu olay bizi nasıl da yanılttı? Haydi, şimdi gelin de çıkın işin içinden!

Kuantum fiziği ise der ki; metal üzerine düşürülen ışığın şiddeti değiştirildiğinde, fırlayan elektronların hızları ve dolayısıyla kinetik enerjileri değişmez. Elektronların kinetik (*hareket*) enerjisi, ancak metal üzerine düşürülen ışığın frekansı değiştiğinde değişir. Bunu biraz açıklayalım, elektromanyetik ışımanın (*metale düşürülen ışığın*) kuantumu olan fotonların frekansları (*dolayısıyla enerjileri*) her ışık için farklıdır. Örneğin, kırmızı ışık için ayrı, mavi ışık için ayrı, X ışını için ayrı, günışığı için ayrıdır.

Frekansı ' f ' olan bir fotonun enerjisi $E = hf$ eşitliğiyle verilir. Çok basit gibi duran, ancak, kuantum fiziğinin başlamasına neden olan bu denklemdaki ' h ' ise, *siyah cisim ışıması*'nı açıklayarak kuantum fiziğini başlatan Planck'ın adına ithaf edilmiş olan *Planck Sabiti*'dir. Bu eşitliğe göre metal üzerine düşen ışığın frekansı ne kadar büyükse, metalin elektronlarına o kadar büyük enerji aktarılır. Metal elektronları ne kadar büyük enerjiyle dövtölürse, o kadar büyük bir hızla metalin yüzeyinden fırlarlar.

Çarpıcı bir örnek daha vermek için şöyle bir deney düşünelim; elimizde şiddeti ayarlanabilir bir ışık kaynağı olsun ve bu kaynaktan yayılan fotonları hem sayacak hem de şiddetlerini ölçebilecek bir sayaca doğru bu fotonları yönlendirelim. Kaynağımızı önce varsayalım ki 100 şiddetinde 1 dakika çalıştıralım, yani bayağı parlak 100'lük ampul gibi düşünebilirsiniz. Sürenin sonunda sayacın göstergesini okuduğumuzda, diyelim ki 1 dakikada 1000 tane foton çarptığını ve her bir fotonun enerjisinin de 250 birim olduğunu görmüş olalım. Şimdi ışık kaynağını gözle bile zor fark edilecek kadar kıstığımızı düşünelim, yani şiddetini neredeyse sıfıra yakın hale getirelim ve yine 1 dakika çalıştırdıktan sonra sayacı okuduğumuzda bu sefer örneğin 1 dakikada 1 foton çarptığını ve bu fotonun enerjisinin yine 250 birim olduğunu söyleyecektir. Bunu klasik fizik anlayışıyla açıklamamız mümkün değildir, çünkü klasik fizik bize diyecektir ki; madem kaynağın şiddeti çok azaltıldı, sayaçta okuduğunuz enerji değerinin de az çıkması gerekir. Ama biz artık biliyoruz ki, sayacın ölçtüğü fotonun enerjisinin farklı çıkabilmesi için ışık kaynağının frekansını (*rengini*) değiştirmemiz gerekir.

Hazır söz açılmışken klasik fiziğin çıkmaz sokaklarından biri olan *siyah cisim ışıması* (*black body radiation*) kavramına hemen girelim. Bu doğa olayı da klasik fizik yasalarıyla açıklanamayan fiziksel bir olgudur. Bu olayı ilk kez ünlü fizikçi Max Planck açıklayarak kuantum fiziği kavramının başlamasına öncülük etmiştir.

Tamamen kapalı bir kutu düşünelim ve bu kutuya iğneyle çok küçük bir delik açalım. Kutuya dışarıdan giren çok çok ince bir ışık demeti kutunun iç duvarlarında ardışık yansımalar ya-

parak soğurulacak ve tekrar dışarıya çıkma olasılığı sıfıra yakın olacaktır, yani bir daha kutudan çıkamayacaktır. Işığı tamamen soğuran ve yansıyarak gözümüze gelmesini engelleyen bu tür cisimlere siyah cisim denilmektedir. Diyeceksiniz ki, siyah bir ceket de ışığı soğurduğu için siyahtır ama yine de onu görebiliyoruz. Haklısınız ama fizik için tam siyah değildir, yine de ışığı çok az bir oranda yansıtır, yoksa siyah ceketinizi giymeye karar verdiğinizde elbise dolabınızda onu göremezdiniz. Yeri gelmişken bir bilgi daha vereyim, galaksiler arası uzayda var olduğu bilinen *karanlık madde (dark matter)* işte böyle tam kara maddelerden biridir. Çünkü ışığı hiç yansıtmadığı için onu doğrudan gözlemek mümkün olmamakta, ancak çekimsel etkilerinden dolayı onun orada olduğunu bilebilmekteyiz. CERN’de yapılmakta olan çarpışma deneylerinde elde edilecek sonuçların yorumlanması ile bu maddenin sırrının çözülmesi beklenmektedir. Dolayısıyla büyük patlamanın bir ürünü olarak ortaya çıkmış olan bu maddenin yapısının anlaşılması, fizik ve kozmoloji (*evren bilimi*) için büyük bir başarı olacaktır. Bir de popüler olduğu için bilimkurgu filmlere bile konu olan *kara delikler* vardır, bunlar da süper çekim kuvvetleri nedeniyle kendi yüzeylerinden ışığın bile kaçmasına izin vermezler ve bu yüzden gerçekten karadılar diyebiliriz. Ancak, fizik ve kozmolojinin büyük ustası Stephen Hawking, karadeliklerin o kadar da kara olmadığını kendi kitabında açıklamaktadır.²³ Neden öyle söylediğinin ayrıntısını ve *olay ufku* kavramını öğrenmek isteyenlere onun başka bir ünlü kitabını daha öneriyorum.²⁴ Ancak, önemle vurgulamak gerekir ki, *kara madde* ile *kara delikler* tamamen doğanın farklı yüzleridir, aynı şey değildirler, bu yüzden birbirlerine karıştırılmamalıdır.

Kısa bir genel bilgidten sonra tekrar bizim siyah cismimiz olan kutumuza dönelim. Her cisim ısıtıldığında ışıyım yayar, buna doğal olarak kutumuz da dahildir. Kutumuzu farklı sıcak-

23. Herşeyin Teorisi – Evrenin Başlangıcı ve Geleceği, Stephen Hawking, Sayfa:55, Şenocak Yayınları

24. Zamanın Kısa Tarihi-Büyük Patlamadan Karadeliklere, Stephen Hawking, Doğan Kitapçılık

lık değerlerini alacak şekilde kademeli bir şekilde ısıtarak, her bir sıcaklık değeri için bu küçük delikten dışarıya yayılan ışınının (*elektromanyetik dalga*) şiddetini ve dalgaboyunu ölçtüğümüzü ve bu değerlerle bir şiddet-dalgaboyu grafiği çizdiğimizi düşünelim. Her bir sıcaklığa ait ışıma enerjisinin maksimum değeri farklı dalgaboylarında oluşmaktadır. Sıcaklık arttıkça ışıma enerjisinin maksimum değerlerine karşılık gelen dalgaboyu küçülür. Grafikteki bu bariz kaymayı ünlü fizikçi Wien formüle etmiştir ve bu yasa *Wien Yasası* adıyla anılır, ancak, dalgaboyu büyüdükçe bu yasa yetersiz kalmaya başlar. Bu konuyla epey uğraşmış olan Rayleigh ve Jeans adlı fizikçilerin geliştirdiği *Rayleigh-Jeans Yasası* ise kısa dalga boylarına yani yüksek frekanslara doğru gidildikçe yetersiz kalmaktadır. Üstelik dalga boyu küçüldükçe (*yani frekans arttıkça*), yapılan ısımanın şiddetinin sonsuza gideceği görülmekteydi. Böyle bir şey olamazdı, bu sonuç gözlenen değerlerle kesinlikle uyuşmadığı ve klasik fizik yasalarıyla da anlaşılamadığı için, karşılaşılan bu duruma *morötesi felaket* (*ultraviolet catastrophe*) denildi.

Klasik fizik ve onun dayattığı anlayışla bu olayı açıklayamıyoruz. Peki, şimdi ne olacaktır, sorun nasıl çözülecektir? Tüm dalga boylarını kapsayan tutarlı bir model olabilir mi? İşte bu noktada Planck sahneye çıkarak, maddelerin ışıma yapma ve enerji soğurma olayının doğasında sürekliliğin olmadığını, yayılan ve soğurulan enerjinin kesikli değerler alabileceğini, böylece sonsuza ırsaksayan enerji değerlerinden kaçabileceğimizi gösterdi. Yani, ısıtılmış maddelerden yayılan ışıma enerjisi aklımıza gelen, istediğimiz her değeri alamamaktadır. Bu yoruma göre, ışık (*elektromanyetik dalga*) foton denilen küçük enerji paketçikleri (*birimleri*) şeklinde yayılmakta ve bu enerji paketçiklerinin her biri de genel gösterimiyle $E = nhf$ denklemine göre enerji değerleri alabilmektedir. Yukarıda fotoelektrik olayı anlatırken de karşınıza çıkan bu denklemdeki 'n' ifadesi $n=1,2,3...$ gibi tamsayı değerleri temsil etmektedir. Fotoelektrik olayı anlatırken demek ki biz $n=1$ seçerek sadece bir adet fotonun enerjisini göz önüne almışız demektir. Bir foton demetinde (*selinde*) birden fazla foton bulunduğu için, birim zamanda yayınlanan toplam ışıma enerji-

sinin değeri, tek bir fotonun taşıdığı enerjinin tam katları olmalıdır. Örneğin birim süre içerisinde 5×10^{10} adet foton yayınlanmışsa, n 'nin alacağı değer de bu olacaktır. Görüldüğü gibi yayılan enerji istediğimiz her değeri alamamaktadır, yani sürekli değildir, alabileceği değerler foton sayısı ve fotonun frekansı ile sınırlanmıştır. Süreklilik kavramını biraz açalım; biliyorsunuz geometrik anlamda sayı doğrusunu oluşturabilmemiz için sonsuz sayıdaki noktayı yan yana bitişik olarak dizmemiz gerekir. Sayı doğrusunu oluşturan ve sıfırdan büyük olmak üzere *tamsayı olsun veya olmasın* her bitişik noktadaki tüm pozitif değerleri n 'ye verebilseydik, sürekli bir şekilde kesintisiz (*kesiksiz*) olarak sonsuza kadar gidebilirdik ve denklemin sol tarafındaki enerji ifadesi pozitif reel sayılar kümesinin tüm değerlerini alabilirdi. Kesikli değerleri ise sayı doğrusu üzerinde yer alan tamsayılara benzetebiliriz, yani tüm sayı doğrusunu değil, kesik kesik sadece tamsayıların olduğu noktaları almamıza izin vardır. Aradaki yarım değerleri, örneğin $1/2$ veya $3/4$ 'ü almamıza izin yoktur. Bu aslında bize fotonun bölünemeyeceğini, yani doğada fotonu ikiye veya kesirli herhangi bir sayıya bölerek taşıdığı enerjinin yarısını/kesirini taşıyan *yarım/kesirli foton* bulunamayacağını anlatmaktadır. Işık, elektromanyetik bir ışımadır/alandır ve foton dediğimiz kesri olmayan bu en küçük enerji birimlerinden oluşmaktadır. İşte, fizik dünyasında, bir fiziksel niceliği hep onun tam katları şeklinde ifade ettiğimiz, fiziksel bir niceliğin bölünemeyen, kesri olmayan en küçük birimine "miktar" anlamına gelen "kuantum" denmesi, örneğin fotonun da elektromanyetik alanın kuantumu olması bu yüzdendir. Daha somut bir örnek olması açısından, elektronun elektrik yüklerinin kuantumu olduğunu belirtmekte yarar var, çünkü elektronun yükü bölünemez ve tüm yükler elektron yükünün tam katlarıdır. Eskiden böyle söylenirdi, ama konuyu anlamak adına hala böyle düşünmemizde bir zarar yoktur. Çünkü kuarkların keşfiyle birlikte elektron yükünün kesirli ifadelerinin kuark yüklerine karşılık geldiği görülmüştür.²⁵ Bu arada merak edenler için söyleyelim, Öztürkçede kuantum kelimesinin karşı-

25. Not: Parçacık Fiziği bölümünde Tablo-1'deki kuarklara bakınız.

lığı “*nicem*”dir. Daha sonra *Standart Model*’i anlatırken, fotonun elektromanyetik etkileşmeleri yöneten bir bozon olduğunu göreceğiz.

Sanılmasın ki kuantum dünyasında sadece kuantumlu yapıya sahip olan nicelikler fotonlar, elektrik yükleri, spinler ve ısıma enerjileridir. Kuantum mekaniğini temel alan bir anlatım diline sahip olan katıhal fiziğinde de *kesikli süreksizlikler* devam etmektedir. Kristal yapılarıdaki örgü titreşimlerinin enerjisi de kuantumlanmıştır ve bu örgü titreşim kuantumlarına “*fonon*” adı verilir. Plazma salınımlarının kuantumu “*plasmon*”, fonon-foton alan kuantumu “*polariton*” ve katılardaki elektron-fonon etkileşmesinin kuantumu ise “*polaron*” olarak bilinir.²⁶

Her neyse, tekrar konumuza dönecek olursak, bu sonuç bize ışımanın (*elektromanyetik dalga, ışık, radyasyon*) doğasında, klasik dönemlerdeki anlayışımıza uygun olan dalga özellikleri bulunduğu gibi, kesiklilik kavramından gelen tanecikli yapı özelliğinin de olduğunu göstermektedir. Buradaki tanecikli yapı anlayışına bizi sevkeden bulgular, ne kadar ışığın tanecik yapısına vurgu yapıyorsa, Young’ın çift yarık deneyinde göstermiş olduğu gibi, ışığın girişim (*interference*) yapması da bizi o kadar ışığın dalga yapısında olduğu sonucuna götürür. Işığın kırınım (*kırılma değil!*) ve girişim yapabilmesi, ışığın dalga yapısında olması gerektiğini söylerken; siyah cisim ışıması, fotoelektrik olay ve Compton’un saçılma deneyleri ise ışığın tanecikli yapıda olması gerektiğini vurgular. Burada detayına girmeyeceğimiz Compton deneyi, fotonların elektronlarla çarpışması sonucu, tıpkı klasik bilye taneciklerinin çarpışmasında olduğu gibi, çarpışma öncesi ve sonrasında momentum ile enerjinin korunumunu gösterir.

Şimdi ben Eren kulunuz olarak dilim döndüğü kadar klasik fiziğin yetersizliklerini gözler önüne sermeye çalıştım. İsterseniz bir de Nobelli fizik ustası *Penrose*’a kulak verelim ve neden klasik fiziğin yetersiz kaldığının temelindeki nedeni çok şık bir şekilde bize anlatsın.²⁷ “*Bu sorunun kaynağı, klasik fizikte altı değiş-*

26. Katıhal Fiziğine Giriş, Charles Kittel, Çeviri: T. Altanhan, M. Sağlam, Sayfa:117, 293, 302, 312, AÜFF Yayınları

27. Fiziğin Gizemi – Kralın Yeni Usu II, Roger Penrose, Sayfa: 99, Tübitak Yayınları

kenle (üç konum ve üç momentum) belirlenen parçacıklar ve sonsuz sayıda parametre gerektiren alanlar diye iki tür fiziksel nesnenin olmasıdır. Bu ikili, fizik yönünden gerçek bir tutarlılığa sahip değildir. Parçacıkların ve alanların dengede olmalarını gerektiren bir sistemde tüm enerji parçacıklardan alınıp alanlara verilir. Bu, enerjinin eş bölüşümü denilen bir olayın sonucudur ve denge durumunda enerji sistemin tüm özgürlük derecelerine eşit olarak dağıtılır. Alanlar sonsuz özgürlük dereceli olduklarından tüm enerji onlara gider ve zavallı parçacıkların payına bir şey düşmez.”

Ustadan sözü alıp, tekrar benim yukarıda anlattıklarım dönersek; ışık dalga mı, parçacık mı, tanecik mi? Acaba hem dalga, hem de parçacık mı? Belki de her ikisidir. Yoksa farklı deneylerde bize farklı yüzlerini mi gösteriyor? Eğer gerçekten parçacıksa nasıl girişim yapıyor, bizim bildiğimiz bir bilye girişim yapar mı? Kafam çok karıştı, acaba kitabı okumayı bıraksam mı? Yoksa fizikçiler bizimle kafa mı buluyorlar?

Okumaya devam etme sabrını gösterebilirseniz, *umarım(!)* bunların cevabını kuantum fiziğini konuşacağımız bir sonraki bölümde bulabileceksiniz. Buraya kadar gelmişsiniz, doğanın düzenini ve gizemini merak etmeseniz buraya kadar okuma sabrını göstermezsiniz, bence okumaya devam edin, sizi çok ilginç şeylerin bekliyor olduğuna hiç şüphem yok.

5

Sağduyuya Aykırı Fizik: Kuantum Fiziği

Bir önceki bölümde klasik fiziğin baş edemediği ve klasik düşünceye uzak olan bazı fiziksel doğa olaylarına örnekler verirken, kuantum ve kuantum fiziği kavramlarına vurgu yapmıştık. Bu bölümde, kuantum fiziğinin ne anlama geldiğini, kapsamını, sınırlarını, klasik fizikle ilişkisini, sıkı sıkıya bağlı olduğu *Standard Model*'i ve ne yazık ki onun da var olan yetersizlikleri hakkında konuşacağız.

Açık yüreklilikle en son söyleyeceğimizi en baştan söyleyelim; birincisi, kuantum mekaniği deneylerle uygun sonuçlar veren, yani mikro dünyanın dış görünüşüne uygun açıklamaları olan bir kuramdır, yani deney sonuçlarıyla denklemlerin öngörüsü uyumaktadır, ama bu kuram mikro dünyanın temelini anlatan kapsamlı ve köklü bir *mikro dünya kuramı* değildir. İkincisi ise, anlatacağım şeylerin son zamanlarda bol bol reklamı yapılan kuantum düşünce sistemi ve kuantum sıçramaları gibi ticari konularla yakından uzaktan ilgisi yoktur.

Hatırlarsanız, makroskopik evrenin büyük ölçekli fiziksel olaylarını açıklayan yasalar, klasik fizik yasalarıydı. Fakat bu yasalar, maddenin en temelinde bulunan incelikli yapısıyla ilgili fiziksel davranışları açıklayamıyordu. Kısaca söylemek gerekirse;

moleküller, atomlar, çekirdekler ve temel parçacıkların mikro dünyasında klasik fizik geçerli olmuyordu. Bu yasalar, mikro evreni tanımlayamadığı gibi, fizikçilerin *rölativistik hızlar* dediği ışık hızı civarındaki hızlarda hareket eden nesnelerin fiziğini de açıklayamıyordu. Rölativite, aslında kuantum fiziğinden ayrı gibi duran bir konudur. Ancak, büyük usta Dirac, özel görelilikle kuantum mekaniğini birlikte yorumlayarak *rölativistik kuantum mekaniği*'nin temellerini atmıştır.

Önce bir karmaşayı ortadan kaldırmakla işe başlayalım. Literatürde kuantum olaylarından bahsedilirken kuantum fiziği ve kuantum mekaniği ifadelerine sıkça rastlarız. Aklımıza bu ikisi arasında bir fark olup olmadığı sorusu gelebilir. Bu ikisi arasındaki ince farkı açıklamak için, Berkeley Fizik Programı'nın 4. cildi olan *Kuantum Fiziği*'nin yazarı, fizik profesörü Eywind H. Wichmann'a kulak verelim; "*Doğanın atomlar, çekirdekler ve temel parçacıklar diyarında bize gösterdiği yüzüne kuantum olayları diye baktığı için, bu dünyayı anlatan fiziğe kuantum fiziği diyoruz. Kuantum fiziğinin günümüzde geçerli temel matematik kuramı ise kuantum mekaniği diye bilinir*". Böyle bir tanım olmasına rağmen, literatürde kuantum fiziği ve kuantum mekaniği sözcükleri birbirinin yerine sıkça kullanılır, çünkü içinde kuantum ifadesi geçen her fiziksel olayın açıkça mikro dünyayı kastettiği ve matematiksiz fiziğin olamayacağı herkesçe bilinmektedir. Bu yüzden biz de alışkanlıkla bazen kuantum fiziği, bazen de kuantum mekaniği diyeceğiz, gönlünüzü ferah tutun, hangisini kullanırsanız kullanın bir sorun çıkmaz, ne demek istediğinizi fizikçiler anlar.

Ayrı Dünyalar, Sınır Durumlar

Aslında büyük ölçekli makro dünyayı açıklayan klasik fizikle, küçük ölçekli mikro dünyayı tanımlayan kuantum fiziğinin çok ayrı yerlerde birbirinden yalıtılmış bir şekilde durdukları fikrine kapılmamız pek doğru olmayıp, birbirleriyle çok yakın komşuluklarının olduğunu söylemeliyiz. Kuantum fiziğinin sınır durumları, klasik fiziğin alanına giren klasik mekaniğe veya klasik

elektromanyetik kurama indirgenir. Yani, kuantum mekaniğinin yasaları, makro sistemlere uygun sınır durumlarda uygulandığında, Bohr'un *karşılıklılık ilkesi* (*correspondence principle*) gereğince, elde edilen sonuçlar klasik fizikle hesaplanan sonuçlarla uyushmaktadır. Bu demektir ki; mikro dünyadan makro dünyaya geçerken, kuantum mekaniği yasaları artık klasik fiziğin yasalarına dönüşür, ancak bunun tersi doğru değildir. Bunun anlamı şudur; makro dünyanın fiziği olan klasik fizik, mikro dünyanın sınırlarına geldiğinde susar. Bu durum bizi Wichmann'ın da vurguladığı gibi, "*Aslında tüm fizik kuantum fiziğidir*" anlayışına götürür. *Sınır durum* kavramı, mikro dünyada davranışını incelediğimiz nesnelerin ve olayların, atomik boyutlarından uzaklaşıp büyüyerek biraz daha bize yakın, elle tutulur, gözle görülür hale gelmesi anlamını taşır. Sanırım bu kavramın, bizi klasik fiziğin sınırlarına dayadığını fark etmiş olmalısınız. Sınır şartların kullanılmasıyla kuantum mekaniğinden nasıl klasik mekaniğe geçiş yapıldığının bir örneğini görmek isteyen okuyucular, Tarasov'un kitabına göz atabilirler.²⁸

Peki, Hangi Fiziği Kullanacağız?

Bu noktada kafalar biraz karışabilir ve klasik fiziği tamamen terk edip etmeyeceğimiz konusunda okuyucuda soru işaretleri belirebilir. Hemen ardından "*Peki, günlük işlerimizi hangi fiziğe göre yürüteceğiz, örneğin bir yayın ucuna bağlı kütlenin salınım hareketini de kuantum fiziğiyle mi anlatacağız?*" şeklinde bir soru geleceğini bilerek bu fizikleri(!) nerelerde ve hangi şartlarda kullanabileceğimizi biraz daha yakından görmeye çalışalım.

Bir benzetme yaparsak ne demek istediğimizi belki biraz daha kolay anlaşılır hale getirebiliriz. "*Fiziksel bir olayı özel görelilik yasalarına göre mi inceleyeceğiz yoksa Newton mekaniği bize yetecek mi?*" sorusunun yanıtı ışık hızında gizlidir. İncelediğimiz olay içerisinde yer alan hareketli cisimlerin/sistemlerin hızının ışık

28. Basic Concepts of Quantum Mechanics, L. V. Tarasov, Sayfa: 250, Appendix-B, MIR Publishers Moscow

hızı ($3 \times 10^8 \text{ m/sn}$) ile karşılaştırılması, bu cevabı bulmamızı sağlar. Eğer hızlar ışık hızına göre çok düşükse Newton mekaniği bize yetecektir, aksi halde göreliliği işin içine sokmamız gerekir.

Şimdi bu örneğe paralel bir düşünce tarzı ile şu soruyu soralım, “Acaba kuantum mekaniğini kullanmaya karar verebilmek için ışık hızına benzer bir referans (başvuru) değeri var mıdır?” Evet vardır, bu değer Planck sabitidir. Önceki bölümde değindiğimiz fotoelektrik olay ve siyah cisim ışımasında karşımıza çıkan bu sabitten kuantum dünyasında dolaştığınız sürece kaçışınız yoktur, zaten kuantum sözcüğünün anlamı da bu sabit içinde gizlidir. Bu önemli sabitin değeri ise, $h = 6,626 \times 10^{-27} \text{ erg.sn} = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Joule.sn}$ 'dir. Dikkat edilirse bu sabitin boyutu enerji ile zamanın çarpımından oluşmaktadır, yani *açı momentumu* boyutundadır.²⁹ Planck sabitine *eylem kuantumu* da denilmektedir. Esprili bir deyişle söylersek, bir anlamda *süreksizliğin birimi*'dir. Eğer incelediğimiz sistemin doğal dinamik değişkenlerinden biri Planck sabitine yakın bir değer alıyorsa, sistem kuantum mekaniği yasalarına göre incelenebilir diyoruz. Fizikçiler çok iyi bilirler, ama fiziğe pek yakın olmayan okuyucular için *doğal dinamik değişkenler* ifadesi yabancı gelebilir. Koordinat, hız, momentum, enerji değerleri gibi, incelenen fiziksel sisteme özgü ölçülebilir parametrelere fizikçiler *fiziksel nicelik*, *değişken* veya *doğal dinamik değişken* diyorlar.

Klasik fizikte yüz tonluk bir uçağın hareketini tanımlamakla, tek bir kum taneciğinin fiziksel devinimini anlatmak aynı şeydir, ikisi için de aynı yasalar geçerlidir. Şimdi sorabiliriz, acaba dairesel bir yörüngedeki dönüşünü 1 saatte tamamlayan, tek bir kum taneciğinin yüzde biri büyüklüğündeki bir cismin hareketini kuantum mekaniğiyle izah edebilir miyiz? Öyle ya, kum taneciği çok küçüktür, yüzde biri ise çok çok daha küçük olduğu için kuantum dünyasında yorumlanabilir mi? Formüllere müm-

29. Not: $\dot{L} = W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d}$; boyut analizi yaparsak, $N.m = m.a.d = \text{kg.m/sn}^2.m = \text{kg.m}^2/\text{sn}^2 = \text{Joule} \rightarrow \text{kg.m}^2/\text{sn} = J.sn$ yazılabilir.

Açı momentumu $= \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) \Rightarrow$ boyut analizi yaparsak, $L = \text{kg.m.m/sn} = \text{kg.m}^2/\text{sn} = J.sn$ olarak verilir.

1 Joule = 10^7 erg, vektörel nicelikler koyu harflerle yazılmıştır.

kün olduğunca girmemeye özen göstererek sadece size hesapla bulunacak doğal dinamik değişkenlerden biri olan açı momentumunun değerinin 'h' den çok çok büyük çıkacağını söylersem, kum tanesinin yüzde birinin bile kuantum mekaniği kapsamında yorumlanamayacağını, klasik fiziğin hala bu ölçülerde bile geçerli olduğunu görmüş oluruz. Açıkça söylemek gerekirse, kum taneciğinin yüzde biri bile kuantum dünyasına epeyce büyük gelmiştir. Başka bir deyişle, bize mikro gelen, kuantum fiziğine makro gelmiştir. Bu demek oluyor ki, bizim mikro anlayışımız, fizik için aslında pek de mikro değilmiş!

Kuantum fiziğine yeni başlayacak olanlar için bu tür tartışmaların ve örneklerin çok güzel bir biçimde sunulduğu, pek fazla matematik ağırlığı olmayan bir anlatımın tercih edildiği, kuantum dünyasına giriş düzeyinde bir içeriğe sahip olan Wichmann'ın "*Kuantum Fiziği*" isimli eserine bir göz atmanızı öneririm.³⁰

Mikro dünyada geçerli olan fiziğe özgü olayları, kuantum mekaniğinin kullandığı matematik yöntemlerle açıklayabildiğimizi biraz önce ifade etmiştik. Bu matematik yöntemleri içeren kuramlar nelerdir dersiniz, temel olarak *Schrödinger'in dalga mekaniği kuramı* ile onun eşdeğeri olan *Heisenberg'in matris mekaniği kuramı* diye bir yanıt verebilirim. Bunlardan bahsedeceğiz ama derin matematiğine girmeden, girmeden. Bu kavramları anlayabilmek için okuyucunun karmaşık (kompleks) sayılar, karmaşık fonksiyonlar, vektörler, tensörler, diferansiyel ve integral hesap, matrisler, hermitik ve lineer diferansiyel operatörler, küresel ve silindirik fonksiyonlar, grup teorisi v.b. daha nice matematik konularında belli bir altyapıya sahip olmaları gerekir. Doğaldır ki fizikçiler saydığım bu matematik konularını ve burada saymadığım daha pek çoğunu oldukça iyi bilmektedir. Matematiğe uzak okuyuculara, kuantum mekaniğinin vazgeçilmezi, sonsuz boyutlu bir kompleks vektör uzayı olan *Hilbert Uzayını* veya parçacık fiziğinin gözbebeği olan kuarkların davranışını ta-

30. Kuantum Fiziği, Berkeley Fizik Prog. Cilt-4, Eywind H. Wichmann, Sayfa: 15, Hacettepe Üniversitesi Yayınları

nımlarken kuantum kromodinamiğinde kullandığımız özel üniter grubu ($SU(3)$ - *Special Unitary Group*) bu kitapta anlatabileceğimizi zannetmek boş bir hayal olur. Bakın, Ahmet ŞAHİN hocamız burada da haklı çıktı.

Mikro Dünyanın Gözleri

Konular ilerlerken matematik girdabının bizi nasıl da kendine çektiğini ve benim bu girdaba karşı koymak için nasıl savaştığımı ve zorlandığımı hissetmiş olmalısınız. Bu noktada yapacağımız en iyi şey, matematik kalesinin zapt edemediğimiz surlarından geri çekilip sohbete devam etmek olacaktır. Bu kesimde, kuantum mekaniğini tetiklemiş ve gelişmesine önemli katkılar sağlamış olan ünlü fizikçilerin kimler olduğunu ve nasıl katkılar yaptıklarını konuşalım isterseniz. Bana göre bu fizikçiler, o zamana kadar görülememiş mikro dünyanın varlığını ve çalışma düzenini yani kuantum dünyasını, *kendilerine has özel gözlükleriyle(!)* görebilmişlerdir. Bu bilim insanlarına ben *mikro dünyanın gözleri* diyorum. Bu anlatımlar çerçevesinde ilerledikçe, kuantum dünyasının sağduyuya aykırı olan ve bizi hayretler içinde bırakacak çarpıcı yüzüyle de yer yer karşılaşmış olacağız. Çünkü karşılaşacağımız örnekler, bizim günlük yaşantımızda hiç karşılaşmadığımız cinsten ve buna bağlı olarak algılamakta/düşünmekte zorluk çekeceğimiz doğa olaylarını içermektedir.

Sürek Avı Değil, Süreksizlik Avı

Planck ve Einstein ile başlayalım isterseniz, çünkü bu *hassas gözler*, kuantum fikrini tetikleyen gözlerdir. Klasik fiziğin açıklamakta yetersiz kaldığı fotoelektrik olaydan bahsederken gördüğümüz gibi, kuantum dünyasında fiziksel niceliklerin kesikli ve belli değerler aldığını, bu dünyada sürekliliğin olmadığını, örneğin ışık enerjisinin kesikli değerlerden oluştuğunu ve foton denilen ışık taneciklerinin ışığın en küçük parçası olduğunu artık

biliyoruz. Aslında fotoelektrik etki konusundaki deneysel çalışmaları, daha sonra Einstein'a Yahudi olduğu için düşman olan, Hitler'in saflarında yer almış fizikçi Philipp Lenard yapmış ve daha önce açıkladığım önemli bulguları elde etmişti. Planck, 1900 yılında siyah cismin ışımasını açıkladığında, bulmuş olduğu sonuçları ışığın temel doğasına uygulamayı düşünemedi ve bunu ışığın soğurulması ya da bir cisimden yayınlanması sürecini açıklayan bir hesaplama yöntemi olarak değerlendirdi. Hâlbuki iki olay arasında çok önemli ortak bir nokta vardı. Einstein bunu fark ederek, 1905 yılında yayımlanan makalesinde Planck'ın bulmuş olduğu bağıntıyı Lenard'ın deneysel bulgularıyla ilişkilendirdi. Işığın tanecikli yapıda olması gerektiğini ileri sürerek bu taneciklere *ışık kuantumları* adını verdi. Daha sonraları ışık kuantumlarına *foton* denilmeye başlanmıştır. Böylece kuantum fiziğinin, onun baş mimarları diyebileceğimiz Planck ve Einstein ile birlikte başladığını söyleyebiliriz. Çünkü onlar mikro dünyanın belki de en önemli özelliği olan "süreksizliği" avlamışlardı. Doğanın ince gizemini ortaya çıkaran bu iki fizik ustasının Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmeleri hiç de şaşırtıcı değildi. Planck, fiziğe yaptığı bu büyük katkıdan dolayı 1918 yılı Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Einstein'ın fotoelektrik olayı açıklamasından yıllar sonra 1922 yılının kasım ayında kendisine geriye dönük olarak 1921 Nobel Fizik Ödülü verilmiştir. Ünlü fizikçinin fotoelektrik konusunda çok çarpıcı sonuçlara ulaşmasının yanı sıra Brown hareketlerinin açıklanması, Bose-Einstein yoğunlaşması, özel ve genel görelilik gibi akıl almaz çalışmaları da fizik dünyasında devrim niteliği taşır. Ama biz konudan kopmamak için, şimdilik diğer konularda yapmış olduğu çalışmaları teğet geçip, kuantum fiziğine önemli katkıları olan diğer fizikçileri sizlere tanıtmaya devam edelim.

Sağduyuyla Dalga Geçen Parçacıklar

Louis de Broglie, önce tarih eğitimi almış, mezuniyetinden sonra ise fiziğin çekim alanına kapılmış olan bir Fransız soylusuy-

du. Einstein'ın öne sürdüğü "ışık dalgalarının tanecikli yapıya sahip olduğu" fikrinden yola çıkarak, 1924 yılında bu tarihçi-fizikçinin aklına "*Mademki dalgalar parçacıklar gibi davranabiliyor, neden parçacıklar da dalgalar gibi davranmasın?*" fikri geldi. O'na göre elektron, proton gibi parçacıkların dalga özelliği olmalıydı. Yaptığı çalışmalar sonucunda, Planck sabitini parçacığın momentumuna bölünce ortaya çıkan sonucun, bu parçacığa karşılık gelen dalganın boyunu verdiğini gördü ve bu niceliğe "*de Broglie dalga boyu*" denilerek Yunan alfabesinin bir harfi olan λ (Lambda) ile sembolleştirildi. Fizik dünyasındaki mekanik titreşimlere özgü dalga boyuyla ve klasik elektromanyetik dalgaların dalga boyuyla karıştırılmasın diye bu nicelik λ_d ile gösterilmektedir. Peki, bu nasıl bir dalgadır, şekli neye benzemektedir? Sizi daha fazla merakta bırakmadan söyleyeyim, de Broglie dalgası bir *düzlem dalgadır*.³¹ Daha sonra göreceğimiz gibi, Schrödinger denkleminde de yer alacak olan ve bir parçacığı temsil eden de Broglie dalgalarının maksimum hızı, ışık hızından küçük olmalıdır ve *grup hızı* ile hareket etmelidir, çünkü pozitif bir kütle değerine sahip olan parçacıklar özel göreliliğe göre ışık hızına çıkamazlar, ancak ışığın kendisi olan foton bu hızla hareket edebilir ki onun da durgun kütlesi (*rest mass*) zaten sıfırdır.³² Boşlukta fotonun grup ve faz hızı birbirine eşit olup "*c*" değerine sahiptir. Zannedilmesin ki, bu λ_d dalgaboyu kavramı sadece atomik ölçülerdeki parçacıklarda vardır. Aksine günlük yaşantımızda masa, sandalye, top, piyano, hatta kendi vücudumuz gibi aklınıza ne kadar nesne, cisim gelirse hepsinin bir dalga boyu vardır, çünkü kuantum fiziğine göre her nesne aynı zamanda dalga özelliği taşımakta, her dalga da parçacık özelliği taşımaktadır. Peki, bu büyük cisimlerin, örneğin 100 km/saat hızla giden bir otomobilin de Broglie dalgasını niye göremiyoruz diye-

31. Not: Yayılma doğrultusuna dik olan düzlem içerisinde sabit faz özelliği gösteren dalgalar düzlem dalgalarıdır.

32. Not: Fizikte dalgaların '*grup hızı*' ile '*faz hızı*' ayrı kavramlardır, faz hızı ışık hızından büyük olabilir.

Bkz. Titreşimler ve Dalgalar, F. Crawford, Berkeley Fizik Prog, Cilt:3, Sayfa: 191, Karadeniz Teknik Üni. Yayınları

ceksiniz. Göremezsiniz, çünkü hesap kitap yapıldığında bu dalgaboyu 10^{-39} metre basamaklarında çıkacağı için gözümüz bu kadar kısa dalgaboylarını göremez, tıpkı antene gelen radyo dalgalarını gözümüzle göremediğimiz gibi. Hele otomobil duruyorsa dalga boyunun hepten sonsuza gideceğine dikkat ediniz. İşte kuantum dünyasının şaşırtıcı gerçeklerinin en önemlilerinden biri olan dalga-parçacık ikililiği (*wave-particle duality*) kavramı buradan gelmektedir. Yani makro ve mikro dünyadaki her nesne hem parçacık hem de dalgadır, sadece biri değil. Gözlediğimiz deneysel şartlara göre nesneler bize ya dalga yüzünü, ya da parçacık yüzünü göstermektedir. Kimbilir, belki ileride bir otomobili tamamen dalga olarak görebileceğimiz bir deney şartı oluşturulabilir(!). Yanlış anlamayı önlemek için şunu tekrar vurgulayalım; *parçacığa eşlik eden bir dalga yoktur, parçacık ile dalga aynı şeydir, ne biri ne de öbürü. Ne kadar şaşırtıcı, ne kadar sağduyuya ve algımıza aykırı bir durum değil mi?* Tam kıvama gelmişken, kuantum elektrodinamiğini Tomonaga ve Schwinger ile birlikte geliştirerek 1965 yılı Nobel Fizik Ödülü'ne bu iki fizikçiyle birlikte layık görülen efsane fizikçi Richard Feynman'ı dinleyelim; *"Eğer yapabilirseniz kendinize sürekli olarak "Ama bu nasıl olabilir?" diye sormayın, çünkü çabanız boşunadır, şimdiye kadar hiç kimsenin kurtulamadığı bir çıkmaz sokağa girersiniz. Bunun neden böyle olabildiğini hiç kimse bilemiyor"*. Her ne kadar matematiğe girmekten kaçınmaya çalışsam da, dalga-parçacık özelliğinin çok açık bir gösterimini sunan, görsel olarak çok şık duran ve çok şey anlatan önemli iki denklemi vermeden geçemeyeceğim. Bu denklemler, Planck'ın, de Broglie'nin ve Einstein'ın tüm söylediklerini içerir. Birincisi, $p = (h/2\pi)k$ şeklinde ifade edilir. Burada " k ", dalganın yayılma yönünü gösteren ve büyüklüğü $2\pi/\lambda$ olan dalga vektörüne karşılık gelir. " p " ise, parçacığın momentum vektörüdür. Açıkça görüldüğü gibi, denklemin sağ tarafı dalga boyunu (λ) içermesinden dolayı cismin dalga yapısını, sol tarafı ise bir parçacığı tanımlayan en önemli fiziksel niceliklerden biri olan momentumu içermesinden dolayı cismin parçacık yapısını vurgulamaktadır, yani parçacık ile dalga bu denkleme göre birbirlerine eştir. İkincisi ise, dalga-parçacık yapısını daha net bi-

çimde gösteren " $hf=E=mc^2$ " eşitliğidir. Dikkat edecek olursak; eşitliğin sol tarafı frekansı içerdiğinden dalgayı, sağ tarafı ise kütleyi içerdiğinden dolayı parçacığı vurgulamaktadır. Başka söze ne hacet! Devam edecek olursak, daha önce gördüğümüz gibi, Einstein fotoelektrik olayı açıklarken ışığın foton denen tanecikli yapısına vurgu yapmıştı. Planck siyah cisim ışımasını açıklarken ve Compton saçılma (*scattering*) deneylerini yaparken de ışık bize tanecikli (*parçacık*) yüzünü göstermiştir. Ama, kırınım ve girişim deneylerinde ise tamamen dalga karakteri taşıyan yüzünü göstermektedir. Parçacık olarak bilinen elektron, Davisson ve Germer'in yaptıkları deneyde ince yarıklardan geçerken kırınım yapmakta ve bu deney şartları altında bize dalga karakterini göstermektedir. Daha sonra felsefesini tartışacağımız ünlü "*Kopenhag Yorumu*"nu savunan grubun lideri, kuantum mekaniğinin lokomotiflerinden Danimarkalı ünlü fizikçi Niels Bohr, bu ikili davranışı şöyle yorumlamaktadır; "*Bir varlığın dalga ve parçacık özellikleri aynı anda gözlenemez, yapılan ölçüm ve deneylerin özelliğine göre varlıkları ya dalga, ya da parçacık olarak gözleyebiliriz*". Konunun başlığını "*Sağduyuya Aykırı Fizik*" olarak seçmemiz demek ki boşuna değilmiş!

Bu Tünel Başka Tünel

Kuantum mekaniğinin uçuklukta(!) ve sağduyuya aykırılıkta sınır tanımadığını göstermek için, aklıma gelen ilginç bir örneği daha sizlerle paylaşayım. Örneğin üç katlı beton bir ev düşünelim ve elimizdeki pingpong topunu evin duvarına fırlattığımızı varsayalım. Hangimiz bu topun evin bir duvarından girip diğer karşı duvarından çıkıp gidebileceğini düşünebilir? Kuantum mekaniğine göre bu mümkün olabilmektedir. Nasıl mı? Kuantum mekaniğinin WKB (*Wentzel-Kramers-Brillouin*) yaklaşımıyla, yani kuantum mekaniğinin *tünelleme etkisi* (*tunnelling effect*) denilen özellikten yararlanarak. Bu üç fizikçi, kuantum mekaniğine özgü böyle bir doğa olayını kendi adlarıyla anılan matematik yöntemlerle ifade etmişlerdir. Bu yaklaşıma göre, bir parça-

cık kendi enerjisinden çok daha büyük bir enerjiye sahip olan bir enerji engelinin (*duvarının*) içinden dalga özelliği sayesinde sızıp geçebilir. Klasik fizikteki pingpong topu örneğinde ise bu kesinlikle mümkün değildir. Fizikçiler WKB yaklaşımından bilirler ki, eğer parçacığın enerjisinden büyük bir potansiyel engeli sonsuz büyük değilse ve *yavaş değişen* bir karaktere sahipse, parçacıklar böyle bir engeli aşabilir. Radyoaktif çekirdeklerin alfa bozunmaları (*alpha decay*) tünelleme etkisiyle açıklanmaktadır. Bu arada alfanın ne olduğu bilgisini vereyim, alfa parçacıkları (+2) yüklü helyum atomlarıdır, yani atom 2 elektronunu kaybetmiştir. Klasik dünyada hiçbir zaman gerçekleşmeyecek olan bu olaylar, kuantum dünyasında gerçekleşebilmektedir. Ne yapalım, doğa böyle çalışıyor ve klasik fiziğin sustuğu yerlerde kuantum fiziği konuşuyor.

Bu kavramı temel alarak yarıiletkenler (*semiconductor*) fiziği üzerine çalışmalar yapan Japon fizikçi Leo Esaki, germanyum-silisyum yarıiletkenlerini kullanarak elektronik dünyasının her alanında sıklıkla kullanılan ve çok hızlı çalışan bir devre elemanı olan *tünel diyot'u* (*tunnel diode*) keşfetmiştir. *Katılarda Elektron Tünellemesi* üzerine yaptığı çalışmaların sonucunda, Japon fizikçi 1973 yılı Nobel Fizik Ödülünü almıştır. Bu diyotlarda elektron kendisinden daha büyük olan potansiyel engelini sağduyuya aykırı şekilde aşarak devreyi tamamlamaktadır. Tünelleme olayının günlük yaşantımızda karşımıza nerelerde çıktığına ilişkin birkaç örnek daha vereyim. Yarıiletkenler ve süperiletkenler konusunda *soğuk elektron yayımı* olayını da açıklayan tünellemeden, bilgisayar verilerinin yedeklenmesinde kullanılan *flash memory* tasarlanırken bile yararlanılmaktadır. Yaygın kullanım alanlarından biri de elektron tünelleme mikroskoplarıdır ki, klasik mikroskopların optik sapmaları ve dalga boyu kısıtlamaları ancak böyle aşılabilmektedir. Biyoloji ve tıpta ise enzimlerin tepkime oranlarını artırmaya yönelik işlemlerde kullanılmaktadır. Tünelleme olayının matematiğine girmek isteyenler için bir internet adresi veriyorum.³³

33. http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunneling, Haziran-2010

Fotonların Büyüleyici Dansı

Haydi biraz daha hayrete düşelim, kuantum dünyasının ne denli akıl almaz bir dünya olduğunu göstermesi bakımından, Young'ın yapmış olduğu çift yarık deneyine biraz daha yakından bakalım. Bu deneyi lise fiziği okumuş olan her öğrenci mutlaka duymuştur diye umuyorum (yoksa çok mu iyimserim?). Bu deneyde, ışık geçirmez bir engel üzerine iki küçük yarık açılmış olup, engelin bir tarafından bu yarıklara doğru bir ışık kaynağından gelen tek renkli ışığı (fotonları) yönlendirerek, engelin arkasındaki bir perde/ekran üzerinde aydınlık ve karanlık bölgelerden oluşan ışığın girişim deseni incelenir. Daha önce bahsettiğimiz fotoelektrik olaydan bildiğimiz gibi, yarıklara kadar parçacık özelliğiyle gelmiş olması gereken fotonlar, bu noktada klasik dalgalar gibi davranıp, kırınarak (*kırılma değil!*) sanki bir dalgaymış gibi girişim deseni oluştururlar. Cisimlerin dalga-parçacık özelliğini anlatırken, deney şartlarına göre cisimler dalga veya parçacık olarak davranırlar dediğimi hatırlayınız. Doğadaki bu gerçeğe göre, fotonun canı engele kadar parçacık, yarıklarda ise dalga gibi davranmak istemiş olabilir(!). Aynı davranış biçimi sadece kütsüz foton için değil, elektron gibi kütsel parçacıklar için de doğrudur. Kendi dalga boyuyla kıyaslanabilir çok dar aralıklardan geçmeye zorlanan klasik dalgalarda olduğu gibi, bu dar aralıklar sanki dalgayı doğuran kaynaklarmış gibi davranır ve yarıkların arkasındaki bölgede bu iki dalga kaynağından (yarıklardan) yayılan dalgalar girişim yapar. Lisede de anlatıldığı gibi, girişim desenindeki aydınlık ve karanlık bölgelerin varlığını, aynı veya farklı fazlardaki ışığın yol farkından dolayı dalga tepeleri ile çukurlarının üst üste gelmeleriyle, yani birbirlerini güçlendirme veya yok etmeleriyle açıklayabiliriz.

Dalga-parçacık fikrini içimize sindirebildiysek(!), buraya kadar pek fazla sorun yoktur. Sorunlar ve sorular asıl şimdi başlıyor. Şimdi şöyle bir deney yapalım, bu çift yarıklı engele yeterince ayrı *"t"* zamanlarında birbirine karışmasın diye ışık kaynağının şiddetini çok çok azaltarak *tek tek fotonlar gönderdiğimizi düşünelim ve bunun deney boyunca hep böyle olduğunu varsayalım*, ya-

ni deneyimizi bir foton demeti ile değil, tek tek fotonları oldukça uzun zaman aralıklarıyla çift yarıklı engele göndererek yapıyoruz. Hemen şimdi sıralayacağım itirazların geleceğini biliyorum. Tek bir fotonu kontrollü olarak üretebiliyor muyuz? Tek bir fotonla deney yapılabilir mi? Deneyin tek fotonla yapılıp yapılmadığından nasıl emin oluyoruz? Çünkü bildiğimiz bir ampul gibi sıradan ışık kaynakları saniyede trilyonlar basamağında foton üretir, tek bir fotonu nasıl ayırabiliyoruz? Ben de böyle düşünüyordum, ama literatürde bunun son yıllarda ideale oldukça yakın bir şekilde yapılabilmesine ilişkin açıklamalar olduğunu gördüm, özellikle Rochester Üniversitesi Optik Enstitüsü'nden Dr. Svetlana Lukishova'nın yaptığı "Tek Foton Girişimi" (*Single Photon Interference*) adlı laboratuvar çalışması bana çok ilginç geldi.³⁴ Ayrıca bu çalışmada, atıfta bulunulan ciddi referansları da bulabilirsiniz.

İsterseniz şimdi bazı ilginç fiziksel bulguları tartışalım. Fotonun hangi yarıktan geçtiğini tespit etmek için, önce bir yarığı kapatıp diğerinin hemen arkasına detektör (foton algılayıcı) koyarsak detektör tıklar, demek ki foton bu yarıktan geçmiştir. Bu işlemi diğer yarığın için tekrarlırsak, fotonun bu sefer öbür yarıktan geçtiğini görürüz, demek ki fotonun hangi yoldan gittiğini tespit edebiliyoruz. İki yarığın açıkken, iki yarığın da arkasına koyduğumuz detektörlerden gelişigüzel olarak bazen biri, bazen de diğeri tıklar, yani fotonların bazıları birinci yarıktan, bazıları ise ikinci yarıktan geçmeyi tercih ediyorlar. İşin daha ilginç yönü, iki yarığın açıkken detektörleri perdenin arkasından kaldırdığımızda ve tek foton gönderdiğimizde bile girişim desenini görebiliyoruz, detektörleri getirip tekrar yerlerine koyduğumuzda girişim deseni kayboluyor ama fotonların yarıklardan geçtiğini gösteren tıklamaları duyabiliyoruz. Kafalar biraz karıştı değil mi? Şimdi konuyu aşağıdaki sorularla toparlayalım (belki de hepten dağılacaz!).

34. a) Fiziğin Gizemi – Kralın Yeni Usu II, Roger Penrose, Sayfa: 106-107, Tübitak Yayınları,

b) http://www.optics.rochester.edu/workgroups/lukishova/QuantumOptics-Lab/homepage/lab_2_manual_oct_08.pdf, Ocak-2011

c) Atom ve Elma, Sebastien Balibar, Sayfa:75, ODTÜ Yayıncılık

- Foton, iki yarık açıkken, hangisinden geçeceğine nasıl karar veriyor? Neden farklı fotonlar farklı yarıklara yöneliyorlar?
- Foton, perdenin arkasına detektörlerin koyulduğunu nereden biliyor ki, detektörler oradayken iki yarık açık olsa dahi girişim yapmıyor? Detektörleri oradan kaldırıncaya girişim deseni geri geliyor, bu nasıl olabilir? Foton, kendini algılamaya çalışan detektörlerle sanki oyun oynuyor gibi.
- Haydi, fotonun dalga-parçacık yapısını içimize sindirdiğimizi(!) varsayalım, iki yarık açıkken arkaya detektör koyulduğunda, iki yarığa doğru gönderilen tek bir foton girişim yapabiliyor? Kimle ve neyle yapıyor? Tek foton iki ayrı dalga gibi davranabilir mi? Acaba enerjileri $hf/2$ olan iki parçacığa ayrılarak her birisi farklı yarıklara yöneliyor da, kendi kendisiyle mi girişim yapıyor? Hâlbuki kesirli foton olamayacağını kuantum mekaniği bize daha önce söylemişti.
- Yarıklar açıkken detektörlerin tıklamasına bakılırsa, foton bir parçacık gibi davranıyor ama iki yarığı açıp detektörleri koymazsak girişim deseni yaptığına göre bu durumda demek ki dalga olarak davranıyor. Foton hangi deneyde nasıl davranacağına nasıl karar veriyor?
- Acaba Wichmann'ın dediği gibi, "Tek foton iki yarıktan da geçmiştir" deyip fazla kurcalamadan durumu kabullensek mi? Çünkü düşünmekle bu durumu algılamamız imkânsız gibi görünüyor. En iyisi bunu doğanın ve kuantum dünyasının bir olgusu olarak kabul etmemiz, deneylerle olasılıkçı öngörülerin birbirine uyup uymadığına bakmamız belki en geçerli yol olacaktır. Böyle durumları, kuantum mekaniği dünyasının doğasında var olan olasılıkçı iç mekanizmanın bir cilvesi olarak mı yorumlamamız gerekir?
- Aslında kuantum mekaniğinde fotonun veya herhangi bir parçacığın hangi yollardan hedefe hangi olasılıkla ulaşacağı; olasılık genlikleri, mutlak kareler, sistemin istatistik bağımlı/bağımsız olup olmama özelliklerine göre tanımlanan olasılıkların çarpılması ve/veya toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu yöntemleri burada anlatmayacağım, isteyenler herhangi bir kuantum fiziği kitabında bu konuları bulabilir. An-

cak, katı determinizmin yılmaz savunucusu Einstein, yaşamın sonuna kadar kuantum mekaniğinin olasılıkçı yapısını hiç kabullenememişti,

- Bu kuantum özellikler ve davranışlar sadece durgun kütlesi sıfır olan fotonlara (ışığa) özgü değildir. Bu deney elektronlar, protonlar gibi durgun kütleleri pozitif olan diğer parçacıklarla da yapılabilir ve yine aynı görüntülere ve sonuçlara ulaşılır.

Yukarıda karşılaştığımız kuantum dünyasına özgü *çalgınlıkların(!)* ve gözlemlerin ne anlama geldiğini kısa bir özetle toparlayacak olursak, doğanın neden böyle davrandığını tam olarak anlayamamak bile, bazı ipuçlarına ulaşabileceğimizi umuyorum.

Özetle; fotonun hangi yarıktan geçtiğini bilemediğimiz süreçte (*which-path information*), tek foton dahi olsa, bir girişim deseni elde ederiz. Dr. Lukishova'nın çalışmasında gösterildiği gibi, ışık dalgalarınca oluşturulan klasik girişim deseni çok sayıdaki tek tek fotonun oluşturduğu girişim deseninin toplamıdır. Eğer fotonun hangi yarıktan geçtiğini bulmaya çalışırsak, foton üzerinde bir ölçme yapmamız gerekir (örneğin, yarıkların arkasına detektör koymamız bir ölçme girişimidir). Ancak, bu durumda kuantum mekaniğinin dayattığı ve doğanın en gizemli olaylarından biri meydana gelir, yani fotonun dalga fonksiyonu çöker ve foton artık bir dalga gibi değil, aksine bir parçacık gibi davranmaya başlar. Bir parçacığın da kendisiyle girişim yapamayacağı açıktır ve böylece hiçbir girişim deseni gözlenmez. Fotonlar, üzerlerinde ölçüm yapılmadığı sürece dalga davranışı gösterirler, ölçüm yapıldığı anda parçacık gibi davranmaya başlarlar.

Ele Avuca Sığmaz Parçacıkların İzinde

Kuantum fiziğinin gelişimi içerisinde en büyük katkıyı yapan fizikçilerden biri olan Erwin Schrödinger, 1927 yılında *dalga mekaniği kuramını* geliştirmiş ve 1933 yılında da bu çalışmalarını sonucunda Nobel Fizik Ödülü'nü almıştır. Bu kuram içerisinde yer alan *Schrödinger dalga denklemleri*, kuantum dünyasında, örneğin

elektron gibi çok küçük parçacıkların belirli bir yerde bulunma olasılığını bulmamıza yardım eder. Yani Schrödinger, bu denklemlerle adeta ele avuca sığmaz gizemli parçacıkların izini sürmektedir. Buradaki “olasılığı” ifadesine özellikle dikkat edelim, demek ki parçacıkların nerede olduklarını belli bir anda kesin olarak söyleyemiyoruz, hâlbuki klasik fizikte örneğin bir uçağın yerini büyük bir kesinlikle söyleyebiliyorduk. İşte kuantum mekaniğinin şaşırtıcı ve klasik fiziğe yabancı gelen yüzlerinden biri daha karşımıza çıktı. Yani şimdi biz bir uçağın yerini (*koordinatlarını*) radarla tespit ettiğimizde şöyle diyebilir miyiz? “Uçak büyük olasılıkla Ankara üzerinde, ama İzmir üzerinde de bulunma olasılığı var” veya “aynı anda iki yerde de bulunuyor”³⁵ dersek anlamlı olur mu? Buna çocuklar bile güler, herhalde hava trafik kontrol görevlisini işten bile atarlar. Klasik fizikle kuantum fiziği arasındaki bu doğal çelişkileri ilerleyen konularda felsefi açıdan özel olarak ele alacağız.

Şimdi bu kesimde sıkı durun, Schrödinger dalga denklemlerinin ne dediğini fizik eğitimi almamış okuyucuların anlaması biraz zor olabilir, ancak okumaya devam ederlerse hiç olmazsa düşünce ufukları açılacak, şaşıracaklar, “Dünyada neler varmış be kardeşim” diyebilecekler ve belki de fizikçilere empati ile yaklaşabilecek çizgiye gelebileceklerdir. Ancak fizik eğitimi almış okuyucular için küçük bir hatırlatma olması bakımından, fizikçiler için kutsal konulardan biri olan Schrödinger dalga denklemlerinin anlamını vurgulamadan geçmemize imkân yoktur. Hele denklemlerde yer alan ve Yunanca ‘psi’ olarak okunan “ ψ fonksiyonu” dillere destandır. Fizikçiler, tabiri yerindeyse parçacıkları “gel psi psi” diye çağırarak, onların bulunma olasılığı yüksek olan yerlerden ses vermesini beklerler. Gerçek dünyada dalga denklemi neye karşılık gelmektedir? Mümkün olduğunca(!) formülasyondan kaçınacağım ve kuantum olaylarını sadece sözle hatırlatmaya çalışacağım. Schrödinger denklemindeki ψ fonksiyonunun aslında ne olduğu ve gerçek dünyada neye karşılık geldiği konusunda fizikçiler arasındaki görüş farkları nedeniyle

35. Fiziğin Gizemi – Kralın Yeni Usu II, Roger Penrose, Sayfa: 126, Tübitak Yayınları

fizik dünyasında büyük tartışmalar oldu ve sonunda büyük fizik üstadı Max Born bu soruna çok farklı bir yorum getirerek ortalığın durulmasını sağladı. Born'a göre, Schrödinger denklemindeki dalga fonksiyonu, parçacığın herhangi bir andaki konumunun olasılığı ile ilgiliydi. Bu demek oluyordu ki, bir parçacığın konumunu bir 't' anında kesin olarak bilemiyoruz ve ancak parçacığın bulunma olasılığının yüksek olabileceği bölgelerden bahsedebiliyoruz. İşte, ψ fonksiyonuna *olasılık dalgaları* da denmesi bu yüzdendir. Bu fonksiyonla bir kuantum parçacığının/sisteminin durumunu tanımlayabiliriz. Uzay ve zaman koordinatlarının bir fonksiyonu olan, *genlik* veya *olasılık genliği* adı da verilen $\psi(x,y,z,t)$ *fonksiyonu*, tek başına bir şey ifade etmez. Kompleks (*karmaşık*) bir fonksiyon olan ψ fonksiyonunun mutlak değerinin karesi fizikçilere anlamlı gelmektedir. Mutlak değer karesi demek ise, ψ 'nin kendisi ile kompleks eşleniğinin (*complex conjugate*) çarpımı demektir. Yani görsel olması için denklemlerle ifade etmeye çalışırsak, $|\psi(x,y,z,t)|^2 = \psi^* \cdot \psi = P(x,y,z,t)$ görünümünde olur, sözle söylediğimizi böylece denklemlerle göstermiş olduk. Peki, yeniden soralım, şimdi bu fiziksel dünyada ne anlama gelmektedir? Bu ifade fizikçiler için şu anlama gelir; herhangi bir 't' anında, uzayın $dV=dx dy dz$ ile ifade edebileceğimiz küçücük bir bölgesinde (*diferansiyel hacim elemanı*) parçacığın bulunma olasılığıdır ve buna *olasılık yoğunluğu* denilmektedir. Aslında *olasılık yoğunluğu ile orantılıdır* demek gerekir, ancak buradaki dalga fonksiyonunun 1'e normlandığını (*normalization*) varsaydığımız için, doğrudan mutlak değer kare ifadesini olasılık yoğunluğu şeklinde yorumladık. Fiziksel anlam olarak olasılık yoğunluğunun değeri, parçacığın bulunma olasılığının yüksek olduğu yerlerde büyüktür. Olasılık yoğunluğu fonksiyonunun, tüm uzay üzerinden integralinin alınması sonucunda bulunacak değer, en büyük olasılığa karşılık gelen değer olan 1'e eşit olacaktır. Çünkü parçacığı (*eğer başka evrenlere kaçmadıysa(!) ya da birdenbire yok olmadıysa*) kendi uzayımızda herhangi bir yerde mutlaka bulmamız gerekir. Parçacığın hareketine bağlı olarak olasılık yoğunluğu da parçacığın konumuna göre uzayda değişiklik gösterecektir. Olasılık yoğunluğunun

uzay koordinatlarına göre değişimine ise *olasılık akısı* adı verilmektedir. *Dikkat ettinizse hep olasılıklardan bahsediyoruz, çünkü kuantum dünyasının ve dolayısıyla kuantum fiziğinin doğasında olasılıklar vardır. Kuantum mekaniği hesaplamaları ve buna dayanan kuantum kuramı bir çeşit olasılıklar kuramıdır. Neyin, ne zaman ve nerede olacağını kesin olarak söylememiz bu kurama göre mümkün değildir, sadece olasılıklardan söz edebiliriz. Kuantum fiziği bu açıdan bana hep ünlü Roma'lı şair Horatius'un "carpe diem"*³⁶ söylemini hatırlatır.

Klasik mekanikte, nasıl ki verilen bir 't' anında bir cismin konumu, yeri, hızı gibi doğal dinamik değişkenlerini Newton denklemleriyle belirleyebiliyorsak; kuantum mekaniğinde de bir parçacığı temsil eden dalga fonksiyonunu kullanarak Schrödinger dalga denkleminin çözümleri aracılığıyla parçacığın enerjisi, momentumu v.b. fiziksel özelliklerini elde edebilmekteyiz, yani parçacığın bir (x,y,z,t) uzay-zamanında sergilediği kuantum davranışını tanımlayabilmekteyiz. Schrödinger denklemi, klasik fizikteki Newton'un ünlü $F=m.a$ denkleminin kuantum mekanikçesidir. Aslında yaptığımız iş kısaca, dalga denklemini yazıp, bu diferansiyel denklemi sağlayan çözümleri bulduktan sonra sınır şartlarını uygulayarak incelediğimiz kuantum sisteminin/parçacığının bilgilerine ulaşmaktan ibarettir. Peki dalga denklemini nasıl yazacağız? Hatırlayalım, klasik mekanikte bir sistemin toplam enerjisi, kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamından oluşuyordu. Yapacağımız tüm iş, bu toplam enerjiyi (*Hamiltonian*) klasik olarak yazmak ve bu terimlerde uygun yerlere kuantum mekaniğinde karşılık gelen işlemcileri (*operatörler*) yerleştirmektir, işte hepsi bu(!). Klasik mekanikteki değişkenlere kuantum mekaniğinde çizgisel işlemcilerin (*linear operators*) karşılık geldiğini hatırladınız değil mi? Bu noktada küçük bir hatırlatma yapayım; Schrödinger denklemindeki ψ fonksiyonu eğer bir fotonu tanımlıyorsa, denklem klasik Maxwell

36. *Carpe diem*; "Yaşadığın anın, bugünün tadını çıkar, belki yarın olmayabilir" tadında olasılığa vurgu yapan Latince bir ifadedir. Belki makro dünya için söylenmiştir, ama bence kuantum dünyasına da gönderme yapar.

denklemlerine dönüşür, eğer bir elektron gibi kütleli bir parçacığı temsil ediyorsa Dirac'ın elektron dalga denklemine dönüşür. Bir kuantum sisteminin hangi kuantum durumlarında olabileceğini ve *girilebilir kuantum durumlarının* ne anlama geldiğini daha ayrıntılı ve somut olarak hissetmek isteyen okuyucular için çok güzel bir kitap öneriyorum.³⁷ Anımsarsanız, klasik fiziğin bir dalı olan termodinamikten bahsederken, kuantum dünyasında da istatistik fizikten kurtuluşumuzun olmadığını ifade etmiştim.

Madem hızımızı aldık biraz daha devam edelim; Schrödinger denkleminde yer alacak olan ψ fonksiyonları zamanın her değeri için uzay koordinatlarına göre *kare integrali alınabilir* fonksiyonlar olmalı, yani yakınsak (*sonlu*) değerler vermeli, sonsuza ıraksamamalıdır. Bu nedenle fiziksel anlam taşıma koşulu, yani dalga fonksiyonunun karesinin integralinin alınabilir olması, problemin en can alıcı noktasıdır. Schrödinger denklemini sağlayan ve kare integrali alınabilir "*de Broglie dalgaları*"na bir parçacığı temsil etmelerinden dolayı, "*madde dalgaları*" da denilmektedir. Schrödinger denklemindeki ψ fonksiyonu, $H\psi(x)=E\psi(x)$ olarak verilen eşitliğe uyar. Aslında bu gösterim, Schrödinger denkleminin enerji operatörü (*Hamiltonian*) ile ifade edilmiş şeklidir. Bu eşitliğe fiziksel (*anlamlı*) çözümler sağlayan '*E*' (*enerji*) değerlerine, '*H*' diferansiyel işlemcisinin (*Hamiltonian*) enerji özdeğerleri (*eigenvalue*), bu çözümleri karşılayan dalga fonksiyonlarına da '*H*' işlemcisinin özfonksiyonları (*eigenfunction*) denir. *Eigenvalue* ve *eigenfunction* sözcüklerini sözlüklerden aramayın, ben söyleyeyim, bunlar Almanca-İngilizce karışımı sözcüklerdir ve orijinali olan Almancaya bağlı kalmak için böyle adlandırılırlar.

Schrödinger denkleminin zamandan bağımsız olasılık yoğunluğunu veren çözümleri durağan (*kararlı hal*) çözümlerdir, yani bu durumda parçacığın bulunma olasılığının yüksek veya düşük olduğu bölgelerin yeri zamanla değişmez, sabittir. Hemen açıklayalım; iki taraftan sonsuz yükseklikteki potansiyel

37. İstatistik Fizik, Prof. Dr. Fevzi APAYDIN, Sayfa: 44, Hacettepe Üniversitesi Yayınları

duvarıyla çevrilmiş, yani parçacığın dışarıya kaçmasına/sızmasına izin verilmeyen durumlarda parçacığın *de Broglie dalgası* duvarlardan yansıyıp kendisiyle girişim yaparak *duran dalga* desenini oluşturacak, olasılık yoğunluğu duvarlar arasındaki belirli bölgelerde maksimum/minimum değerleri alarak bu bölgelerde sabit kalacak ve iki duvar arasında parçacığı bulma olasılığımız tahmin edeceğimiz gibi 1 olacaktır. Durağan haller aynı zamanda bir kuantum sisteminin *rezonans* durumunda olduğunun ifadesidir. Durağan olmayan haller için olasılık yoğunluğu beklendiği gibi zamana göre salınımlı bir karakter gösterir. Durağan halleri gözünüzde canlandırmak istiyorsanız, Bueche'nin kitabı sizin işinizi rahatlıkla görecektir.³⁸

Schrödinger dalga denklemini fiziksel anlamda sağlayan dalga fonksiyonlarının sayısı sonsuz olup, oluşturdukları vektör uzayı da sonsuz boyutludur. Kısacası, herhangi bir parçacığı anlatabilmek için karmaşık bir vektör uzayı tanımlamamız gerekir, bu vektör uzayında parçacığın mümkün olabilecek her durumuna karşı gelmek üzere bir vektör tanımlanır. Daha önce adını kısaca andığımız ve matematik tanımını bu kitapta veremeyeceğimizi söylediğimiz *Hilbert Uzayını* hatırlayalım ve büyük matematikçiye hayranlığımızı ifade edelim. Şöyle diyebiliriz; Schrödinger dalga denklemi gibi çizgisel bir diferansiyel denklemin tüm çözüm kümesi, aslında bir vektör uzayını tanımlar. Bu bağlamda bir benzetme yaparsak; eğer bir parçacığı sonsuz sayıda dalga fonksiyonu temsil ediyorsa, o parçacık için sonsuz özgürlük dereceli bir hareket yapıyor diyebiliriz.

Bu kadar ayrıntıya girdikten sonra *beklenen değer* (*expectation value*) kavramını teğet geçerek hatırının kalacağını düşünerek, ondan da kısaca bahsedelim. Örneğin bir ' x^2 ' değişkeninin ortalamasını $\langle \psi | x^2 | \psi \rangle = \int \psi^* x^2 \psi dx$ olarak gösterebildiğimizden yola çıkarak, eşitliğin sağ tarafında görülen x^2 yerine örneğin kuantum mekaniğindeki ' p '³⁹ momentum diferansiyel operatörünü

38. Principles of Physics, Frederick J. Bueche, Sayfa: 610, McGraw-Hill International Editions

39. Not: Kuantum mekaniğinde fiziksel nicelikler diferansiyel operatörlerle ifade edilir.

koyup, eksi sonsuzla artı sonsuz arasında integralini alırsak, belli bir bölgedeki parçacığın momentumunun ortalama, yani beklenen değerini buluruz. Bu değer aslında dalga fonksiyonuna sorulan “Parçacığın momentumu nedir?” sorusunun dalga fonksiyonunca bize döndürülen cevabıdır. Burada dikkat edelim, kuantum mekaniğinde bir değişkenin ancak ortalama değerinin bir anlamı vardır, kendisinin bir anlamı yoktur. Örneğin parçacığın momentumunun ortalama değeri yerine kendisini kesinlikle bilebilseydik, bu durum Heisenberg belirsizlik ilkesiyle çelişirdi, çünkü hatırlayınız orada konumu ve momentumu sınırsız bir kesinlikle bilemeyeceğimiz ifade ediliyordu. Bu kavramlar, sonunda bizi Einstein’ın en yakın arkadaşlarından biri olan Ehrenfest’in teoremine götürür. Bu teorem der ki; “Kuantum mekaniği dünyasındaki değişkenlerin ortalama değerleri, bunlara karşılık gelen klasik fizikteki değişkenlerle tanımlanan hareket denklemlerini doğrular”.

Fizikçiler ve fiziği merak edenlerle kendi aramızda yaptığımız Schrödinger dalga denklemleri sohbetinden sonra bir hatırlatma yapmadan bu kesimi sonlandıramayız. Niels Bohr ve Max Born’un öğrencisi olan Werner Heisenberg, Schrödinger’in dalga mekaniği kuramına eşdeğer olan matris mekaniği kuramını geliştirmiştir. Nasıl ki, dalga mekaniği kuantum mekaniğinde bir parçacığın davranışlarını tanımlayabiliyorsa, matris mekaniği de aynı sonuçlara ulaşabilmektedir ve adından da anlaşılacağı üzere, hesaplamalar matrisler kullanılarak yapılmaktadır. Bu durumda Schrödinger’in geliştirmiş olduğu dalga mekaniğindeki operatörlere, Heisenberg’in kuramındaki matrisleri karşılık getirebiliriz.

Tamam, tamam, teslim oluyorum, size verdiğim sözü tutamadım, özür dilerim. Matematik girdabına sonunda az da olsa kendimizi kaptırdık, ancak bu konulara yıllarca uzak kalmış olabilecek fizikçilere bir küçük hatırlatma olsun diye bu konuya biraz gireceğimizi baştan söylemiştim. Fizikçiler için bu kadar matematiğe de girelim, değil mi ama? Bu tartışmanın, fiziğe uzak okuyucular için konuyu tam anlamasalar bile, fiziksel düşünce ufuklarının bir parça genişlemesi anlamına geleceğine eminim.

Açıların Gücü Adına: Y_{lm} 'ler

Yukarıda değindiğimiz ve biliyorum ki fiziğe biraz uzak olan okuyuculara hayli soyut gelebilecek ifadelerin gerçek dünyadaki yansımalarını biraz açarak durumu belki daha somut ve kafamızda canlandırabileceğimiz hale getirebiliriz(!). Kuantum mekaniğinde sistemler ve parçacıklar, ancak *kuantum durumları* (*quantum state*) denilen *mümkün olabilen haller* içerisinde bulunabilirler ve dört önemli nicelikle ifade edilirler. Bunlar n , l , m_l ve m_s gibi değişkenlerdir ve sırasıyla *baş kuantum sayısı* (*principal quantum number*), *yörünge kuantum sayısı* (*orbital quantum number*), *manyetik kuantum sayısı* (*magnetic quantum number*) ve *spin kuantum sayısıdır* (*spin quantum number*). Bu sayılar istediğimiz her değeri alamaz, ancak belirli değerleri alabilirler. Hangi değerleri alabileceklerine ilişkin bilgileri herhangi bir kuantum mekaniği kitabında veya internette rahatlıkla bulabilirsiniz.⁴⁰ Örneğin bir atom içerisinde hareket eden bir elektronu göz önüne aldığımızda, onun kuantum durumunu bu dört nicelikle belirtebiliriz. Bu durumda, elektronun dört özgürlük derecesine (*degrees of freedom*) sahip olduğu söylenir.⁴¹ Böylece bu sayılarla atomların ve parçacıkların kuantum özelliklerini belirleyerek, çekirdeklerin çevresinde belli bir kalınlığı ve şekli olan bir kabuk/bulut/yörünge içerisinde devinen elektronların bulunma olasılıklarının atomun hangi bölgelerinde yüksek, hangi bölgelerinde düşük olduğuna karar verebiliriz. Bohr'un yarı klasik hidrojen atomu yörüngesinden farklı olarak, elektronun izlediği keskin ve ince bir yörünge çizgisi yoktur, dolayısıyla biz ancak elektronun yüksek olasılıkla bulunabileceği bulutsu bölgelerden bahsedebiliriz. Bu kabukların şekilleri ve sayıları atomun sahip olduğu enerji düzeylerine göre değişir. Schrödinger denklemini çözüp sınır şartlarını yerine koyduğumuzda, *tutsak* parçacığın belli enerji değerlerini alabileceği, yani, $E_1, E_2, \dots, E_n$ gibi kesikli (kuan-

40. http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_number, Ocak-2011

41. Not: Bir parçacığın durumu sadece n , l , m_l ve m_s ile gösterilmez, duruma göre işin içine momentumlar, konumlar, dalga vektörleri, polarizasyon, spin ve parite gibi nicelikler de girer.

tumlu) enerji düzeylerinde bulunabileceğini biliyoruz. Örneğin bu parçacık bir elektron ise, bu elektron sahip olduğu enerji değerlerine bağlı olarak yörüngeler arasında geçişler yapabildiği için, her yörüngede sahip olduğu de Broglie dalga boyu da birbirinden farklı olmalıdır, çünkü her bir yörüngedeki enerjisi (dolayısıyla momentumu) birbirinden farklıdır. Elektronun bir yörüngeden(enerji seviyesinden) başka bir üst veya alt yörüngeye geçişi (*quantum transitions*), sadece atomda enerji değişikliğine neden olmaz, aynı zamanda elektron bulutunun yeni bir düzenlenişine ve dolayısıyla da yeni bir şekil almasına neden olur. Yukarıda değindiğimiz kesikli enerji değerleri aslında, atomun kaç tane enerji seviyesine sahip olabileceğini, diğer bir deyişle atomun çevresinde kaç farklı şekilde kabuk olduğunu söylemeye eşdeğerdir. Ama bu kabukların her biri, yukarıda bahsettiğim n , l , m_l ve m_s değerlerine göre birden fazla değişik şekil almaktadır, yani halka şeklinden tutun da küresel, elipse benzer, çubugumsu veya daha karmaşık şekiller alarak kılıktan kılığa girmektedir. Örneğin $l=0$ değeri için elektron bulutunun şekli küreseldir ve bu durumda bulunan elektronlara “*s*-elektronları” denir, çünkü bunlar “*s*” yörüngesinin (kabuğunun, bulutunun) elektronlarıdır. Atomların elektron konumlarını ifade ederken kullandığımız $1s^22p^6...$ gibi gösterimlerdeki *s, p, d, f* sembolleri doğrudan yörünge kuantum sayısı ‘*l*’ ile ilgilidir. Örneğin yukarıda da belirttiğim gibi, sırasıyla $l=0$ ’a ‘*s*’ yörüngesi karşılık gelmekte ve bu mantıkla artarak devam etmektedir. Dolayısıyla $l=3$ ’e ise ‘*f*’ yörüngesi karşılık gelir.

İşte bu elektron bulutlarının (kabuklarının) şeklini ve boyutlarını tespit edebilmek için, Schrödinger denklemi içinde küresel koordinat değişkenlerini içeren $\psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$ formunda bir dalga fonksiyonu kullanıyoruz. Küresel koordinatlar cinsinden Schrödinger denkleminin genel çözümü, spin göz ardı edildiğinde $\psi_{nlm}(r, \theta, \phi, t)$ şeklindedir. Acaba $\psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$ fonksiyonu bize ne anlatmak istiyor? Bunu şöyle yorumlayabiliriz: “ $|\psi_{nlm}(r, \theta, \phi)|^2 dV$ ” ifadesini göz önüne alırsak, bu ifade bize; n, l, m kuantum sayılarına sahip bir elektronun, atom içerisinde çekirdekten “*r*” kadar uzaklıktaki (r, θ, ϕ) noktası civarındaki dV diferansiyel hacim ele-

manı içerisinde bulunma olasılığını anlatır.⁴² Bir önceki kesimde ele avuca sığmaz parçacıkların izini sürerken parçacıkların bulunma olasılıklarının yüksek veya az olmasını beklediğimiz bölgelerden bahsetmiştik. İşte burada yaptığımız şey, kavramsal olarak yine aynı şeydir, yine olasılıklardan bahsediyoruz, ancak kartezyen koordinat sistemi yerine burada küresel koordinat sistemini kullanıyoruz.⁴³ Başka bir deyişle, elektronu avlamak için daha gelişmiş av malzemeleri kullanıyoruz.

Biraz daha devam edersek, konuya yabancı olmayan okuyucular, yavaş yavaş *küresel harmoniklere* doğru geldiğimizi hemen fark edeceklerdir. Aslında yaptığımız şey, Schrödinger denklemiindeki kartezyen koordinatları, küresel koordinatlar cinsinden yazmaktır. Bunu yaparken, dalga fonksiyonunu bir adet uzay(r) ve iki adet açı (θ, φ) değişkeni içeren iki fonksiyonun çarpımı olarak ifade ederiz, yani aynen $\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$ şeklinde. Denklem, beklediği üzere r 'ye bağlı çözümleri verdiği gibi, *açılara bağlı* olan çözümleri de verir. Yarıçapa bağlı çözümler, n ve l 'nin çeşitli değerlerine göre birden fazla fonksiyonla temsil edilirler (örneğin $R_{1,0}, R_{2,0}, R_{2,1}$ vb.). Açılara bağlı çözümler de aynı şekilde l ve m 'nin alabileceği çeşitli değerlere göre birden fazla harmonik fonksiyona karşılık gelir (örneğin $Y_{0,0}, Y_{1,0}, Y_{2,0}$ vb.). İşte açılara bağlı olan ve $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ şeklinde gösterdiğimiz bu dalga fonksiyonlarına "*küresel harmonikler*" diyoruz. Yukarıda bahsettiğimiz l ve m değerleri, $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ gösteriminin indisleridir. Bu indislerin alacağı değerlere göre ilk birkaç küresel harmoniğin nasıl bir görünümde olacağının matematik ifadesi, neredeyse tüm kuantum mekaniği kitaplarında yer alır.⁴⁴ Kuantum mekaniği kitaplarında karşılaştığımız, örneğin ψ_{100} gibi ifadeler de bu indislere karşılık gelen özel durumları(!) gösterir. Aslında bu gi-

42. Not: $dV = r^2 dr d\Omega$ ve $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ olduğunu, $d\Omega$ 'nın *diferansiyel katı açı* (solid angle) elemanı anlamına geldiğini ve Ω 'nın ise bir Yunan harfi olan *omega*'yı temsil ettiğini hatırlatayım.

43. Not: Fizikte, kartezyen(x, y, z) ve küresel koordinat sistemlerinin (r, θ, φ) yanı sıra, (ρ, φ, z) değişkenlerine bağlı olan silindirik koordinat sistemi de sıklıkla kullanılır. Kartezyen koordinatları 17. yüzyılda ünlü filozof Descartes geliştirdiği için onun adına ithafen bu koordinat sistemine kartezyen (*cartesian*) sistem adı verilmiştir.

44. Quantum Physics, Stephen Gasiorowicz, Sayfa: 175, A Wiley International Edition

bi özel durumların, bir önceki kesimde bahsettiğimiz $H\psi(x)=E\psi(x)$ eşitliğinden hatırlayacağınız *Hamiltonyenin* özfonksiyonları olduğunu belirteyim. Bunların atomun taban veya uyarılmış durumlarını gösterdiğini söylersem herhalde olay daha anlaşılır hale gelir. $R_{1,0}$ ve $Y_{0,0}$ formundaki fonksiyonlar da örneğin ψ_{100} gibi özfonksiyonların açılara ve yarıçapa bağlı parçaları oldukları için, onlar da özfonksiyonlardır. Schrödinger denklemindeki potansiyel fonksiyonunun, *Coulomb alanı* gibi küresel simetri gösterdiği en basit durumu göz önüne alırsak, dalga fonksiyonunun açılara bağlı bileşenlerinin bu potansiyel alanından bağımsız olduklarını söylemek için kâhin olmak gerekmez.

Şimdi bu kadar şeyi neden anlattığıma gelince; sonuç olarak, eğer r' ye bağlı çözümleri temsil eden fonksiyonların grafiğini çizerek olursak, çekirdeğe olan uzaklığa bağlı olarak belli " r " değerlerinde büyük genliklerin (*amplitude*) oluştuğunu görürüz. Bunun anlamı şudur; demek ki bu " r " değerlerinde elektronun bulunma olasılığı yüksektir. İşte bu " r "ler, çekirdekten farklı uzaklıklarda bulunan yörüngelerdir (*orbital*) ve elektron o yörüngelerde hareket etmektedir. Nasıl? Kafamıza yattı değil mi? Aynı mantıkla devam edersek, açılara bağlı çözümleri veren fonksiyonlar da bize elektronun hangi açılarda (yönlerde) bulunma olasılığının yüksek olduğunu ve hangi şekildeki bulutumsu yörüngede hareket ettiğini söyler. Böylece, elektronun hangi uzaklıkta ve hangi açılarda daha yüksek olasılıkla bulunduğunu ve hangi şekle sahip bir yörüngede devindiğini bulmuş oluyoruz. Dahası can sağlığı! Ama unutmayalım, hala daha belli bir " t " anında elektron için, "*işte şuradaki (x,y,z) veya (r,θ,φ) noktasındadır*" diyemiyoruz ve ancak onun bulunma olasılığının yüksek olduğu yerlerden bahsedebiliyoruz. Bir önceki kesimde değindiğimiz olasılık ve olasılık yoğunluğu kavramına benzer olarak; $\langle Y_{lm} | Y_{lm} \rangle = 1$ ifadesi, l ve m 'ye bağlı olarak tüm θ ve φ açıları üzerinden integral aldığımızda parçacığı bir açıda (*yönde*) mutlaka yakalayacağımız anlamına gelir. Bu gösterim, bir önceki kesimden hatırlayacağınız gibi olasılığı 1'e normalize etmek demektir.

Bu anlattıklarım sadece örneğimizdeki elektron için değil, *bağlı durumdaki* tüm kuantum parçacıklar için geçerlidir, çünkü kuantum dünyasının doğasında olasılıklar vardır. Bu arada meraklılarına bir noktayı hatırlatayım; yarıçapa, yani r' ye bağlı çözümler bizi *asosiye Laguerre*, açılara bağlı çözümler ise *asosiye Legendre* fonksiyonları ve polinomlarına (*associated Legendre functions and polynomials*) götürür ki, Allah muhafaza oraların ayrıntısına hiç girmeyelim.⁴⁵

Formüllere ayrıntılı olarak girmeme ve hatta tamamıyla matematikten mümkün olduğunca kaçınmaya çalıştığımдан, epey laf kalabalığı yapmak zorunda kaldığımın farkındayım. Ancak, gördüğünüz gibi doğayı ve dolayısıyla fiziği anlayabilmek için biraz(!) matematik gerekiyor. Eğer işin içine matematiği karıştırmazsanız, onun tek satırda söyleyebileceği şeyleri ifade etmek için, işte burada benim yaptığım gibi uzun uzun laf ebeliği yapmak zorunda kalırsınız.

Kuyuya Düşmüş Tutsak Parçacıklar

Sohbete (yoksa işkenceye mi?) biraz daha devam edelim. Örnek olarak, atom çekirdeği çevresinde devinen bir elektronu ele aldığımızda, elektron atomdan kopmuş olmadığı için atoma *bağlı durumdadır* (*bound states*). Yörüngeler, kabuklar, olasılık bulutları dediğimiz kavramlar aslında bir elektronun bağlı durumlarının bir kümesidir. Bu durumda elektron, atomun sınırlarından dışarı çıkamamış (*iyonlaşmamış*), özgür bir parçacık haline gelememiş ve hala çekirdek kuvvetlerinin etkisi altında hareket ediyor demektir. Bunu fizikçilerin ünlü potansiyel kuyusuna benzetebiliriz. Her tarafı yüksek potansiyel engeli (*duvarı*) ile kapatılmış ve bu engeller arasındaki parçacığın (*örneğin elektronun*) dışarıya kaçamayacağı durumu modelleyen yapıya kuantum mekaniğinde potansiyel kuyusu denir. Bunu aynen çekirdek kuvvetlerinin yarattığı çok yüksek çekici bir potansiyel etkisin-

45. Not: Edmond Nicolas Laguerre ve Adrien Marie Legendre ünlü Fransız matematikçilerdir.

den kurtulup dışarıya kaçamayan ve bir kabuksal yörüngede devinmeye zorlanan bir elektronun davranışına benzetebiliriz. Bu potansiyel kuyusunu, elektronun atomu terk etmesini önleyecek kadar güçlü olan bir elektrostatik çekim (*Coulomb field*) kuvveti olarak düşünebiliriz. İşte bu elektriksel çekim kuvveti, model olarak elektronun atomdan kaçmasını önleyen hayli derin bir potansiyel kuyusunu temsil etmektedir. Taban (*en düşük*) enerji durumunda kuyunun dibinde bulunan elektrona yeterli enerjiyi dışarıdan vererek bu kuyu içinde yukarılara doğru çıkması sağlanabilir ve hatta çok fazla enerji verirsek (*iyonlaşma enerjisi*) bu kuyudan tamamen kurtulabilir, yani atomu terk eder. Örneğin, hidrojen atomundan elektronu kurtarmak için elektrona dışarıdan vermemiz gereken enerji 13,6 eV'dur.⁴⁶ Kuantum fiziğinin doğal enerji birimlerinden olan elektronvolt, madde-enerji eşdeğerliği uyarınca parçacıkların kütlelerini ifade ederken de sıkça kullanılır. Örnek vermek gerekirse elektronun kütlesini 0,511 MeV (*milyon elektronvolt*) olarak verebiliriz. $E=mc^2$ kütle-enerji eşdeğerliğini ifade eden Einstein'ın ünlü eşitliğine göre aslında $m_e=0,511\text{Mev}/c^2$ denilmesi gerekmektedir, ancak burada kütle, kuantum mekaniğinde fizikçilerce sık başvurulan $c=1$, $\hbar/2\pi=1$ sistemine göre ifade edilmiştir, yani $c=1$ kabul edilmiştir.

Bir Heisenberg Filmi:

Leyla ile Mecnun - Konum ile Momentum

Heisenberg'in asıl ses getiren buluşu 1927'de gerçekleşti. İşte size kuantum fiziğinin şaşırtıcı ve algılarımıza ters gelen başka bir yönü daha! *Belirsizlik İlkesi* (*Uncertainty Principle*) denilen bu kavram bize der ki; *bir kuantum parçacığının kesin konumunu ve kesin momentumunu aynı anda bilmek olanaksızdır*. Konum ve momentumun kesin değerleri, Leyla ve Mecnun gibi asla bir araya

46. Not: Elektronvolt (eV), bir elektronu 1 voltluk potansiyel farkı altında hızlandırdığımızda, elektronun sahip olacağı kinetik enerjinin değeridir.

gelemezler. Bu ifadeyi isterseniz biraz açıklayalım; gözlemlerimizde parçacığın konumunu çok kesin bir şekilde ölçmeye çalışırsak, momentumu o ölçüde belirsizleşir, bunun tersi de doğrudur, eğer momentumunu çok ince ölçmeye kalkarsak parçacığın yeri de o oranda belirsizleşir. Buna benzer olarak klasik fizikteki dalga mekaniğinden de bildiğimiz gibi, farklı frekanslara sahip dalgaların üst üste gelmesiyle (*superposition*) oluşan bir dalga paketinin frekans aralığı ile dalga vektörü aralığının (*interval*) işe karıştığı belirsizlikler de doğanın bir özelliğidir. Buna göre, bir dalga paketinin uzay ve zamandaki açılımlarını (yayılım genişliği) tespit edebilmemiz için; açılı frekansı ile zaman arasında, dalga vektörü ile dalga paketinin genişliği arasında da böyle belirsizliklerin olduğunu bilmemiz gerekir. Belirsizlik ilkesine uygun olarak, biri kesinleşirken diğeri aynı oranda belirsizleşir. Örneklere devam edersek, parçacığın enerjisi ve gözlem süresi ile açılı koordinatları ve açılı momentumu değerlerinden biri ne kadar kesin ölçülmüşse, diğeri o derece belirsizdir. Birbirine bağlı olan böyle ikili değerlerin ölçüm hatalarının çarpımı Planck sabitine ya eşittir, ya da ondan büyüktür. Bu belirsizliğin nedeni ne deneycinin kullandığı yöntem, ne de ölçüm cihazlarının yeteneğine bağlıdır. Bu belirsizlik sadece ve sadece doğanın kuantum fiziği ölçeğinde gösterdiği bir davranış biçimidir. Başka bir deyişle doğanın yasası böyledir, tıpkı havaya attığımız taşın çekim etkisiyle yere düşmesi kadar doğal karşılamamız gereken bir olgudur.

Burada önemli bir hatırlatma yapmak istiyorum. Bir parçacığın dalga fonksiyonunu konum değişkenleriyle ifade edebileceğimiz gibi, momentum değişkenlerine bağlı olarak da tanımlayabileceğimizi ve buna *momentum uzayı* denildiğini tüm fizikçiler gayet iyi bilirler. Yukarıda Heisenberg'in belirsizlik ilkesine göre, konumu çok iyi bilirsek momentumu o derece kötü, aksi-ne momentumu çok iyi bilirsek, konumu son derece kötü tanımlayabilmekteyiz demiştik. Konumun çok iyi belirlenmesini anlamak için *Dirac- δ* fonksiyonunun belli bir " $x=x_0$ " değerinde keskin bir şekilde yükselip sonsuza giderek diğer yerlerde sıfır olmasını hatırlamak bize yeter. Bu bize şunu anlatır; "*İşte parçacık*

çok çok büyük bir olasılıkla bu " $x=x_0$ " bölgesindedir". Buna parçacığın yerleşmesi, yani belli bir uzay bölgesinde lokalize olması denmektedir. Ancak bu durumda momentum uzayında dalga fonksiyonu, x_0 'da olduğu gibi tek bir " p_0 " değerinde sonsuza gitmez, yani, daha yaygın değerler alır ki bunun da anlamı, "Bu durumda momentumun kesin olarak net ve tek bir değeri yoktur, oldukça belirsizdir" demektir. Konum uzayından momentum uzayına veya onun tersi olarak momentum uzayından konum uzayına geçiş yapmak için "Fourier Dönüşümleri"nin imdadımıza yetiştiğini ve Heisenberg'in belirsizlik bağıntısını vurguladığını unutmayalım.⁴⁷

Heisenberg, kuantum fiziğine yapmış olduğu çarpıcı katkılardan dolayı 1932 yılında Nobel Fizik Ödülü ile ödüllendirilmiştir.

Dalga Paketinin İçinde Acaba Ne Var?

Görüyorsunuz ben detaya girmekten kaçındıkça konular başka konuları çağırıştırıyor. Şimdi bu noktaya kadar gelip de Heisenberg belirsizlik ilkesiyle çok yakından ilişkili olan *dalga paketi* (wave packet) kavramından söz etmeden nasıl geçebiliriz? Konum ile momentum yukarıda anlattığım gibi birbirleriyle köşe kapmaca oynarken, öyle bir ara değere sahip olurlar ki, bu durumda hem konum hem de momentum değerleri biraz silikleşir. Başka bir deyişle bulanıklaşır/dağılır, ama biri tam belli iken diğeri tam belirsiz olmaz, yani ikisi de aynı oranda belirsiz ve aynı oranda kesindir. Ancak hafif sapmalarla birlikte ikisinin de alacakları değer, bize bir şeyler ifade etmeye yeter. Sanki aynı anda konum ve momentum değerlerini biliyormuşuz havası doğar, tıpkı klasik bir parçacığın konum ve momentumunu aynı anda bilebildiğimiz gibi. İşte bir dalganın, klasik anlamdaki bir parçacığın özelliklerine en yakın olduğu durum budur ve bu kuantum duru-

47. Not: Joseph Fourier, ünlü bir Fransız matematikçisidir. Mühendislik ve matematik okuyanlar onu Fourier Serileri, Fourier Analizleri ve Fourier Dönüşümleri'nden gayet iyi hatırlayacaklardır.

muna karşılık gelen kuantum mekanik yapıya *dalga paketi* denir. Aslında, uzayın çok dar bir bölgesine yerleşmiş (*localized*) bir dalga paketinin oluşabilmesi için, farklı frekanslara sahip dalgaların bu bölgede bir yolla üst üste gelmesi (*süperposition*) gerekir ve tüm kütleli parçacıklar gibi dalga paketleri de faz hızıyla değil grup hızıyla yayılırlar, yani ışık hızına ulaşamazlar (durgun kütlesi sıfır olan foton hariç). Bu bilgiler ışığında şimdi tekrar özetleyelim; *dalga paketinin konum, momentum değerlerini bir dereceye kadar biliyor olmamız ve bunların ışık hızına erişemiyor olmaları, bize klasik bir parçacığın özelliklerini hatırlatmadı mı? İşte, dalga paketine kuantum mekaniği dilinde parçacık denilmesi ve kuantum nesnelerin dalga-parçacık yapısında olduğu şeklindeki yorumlar bu yüzdendir.*

Parçacıklar Makyaj Yapar mı?

Tedirgin ederseniz yapar(!). Aslında bir gözlem/ölçüm yapılırken, gözlemlenecek olan nesnenin deyim yerindeyse rahatını biraz bozarız. Çünkü onu doğrudan gözleyemediğimiz için, üzerine ışık (*fotonlar*), çeşitli frekansta dalgalar veya çok hızlı parçacıklar göndeririz ki saçılma desenlerinden ve bize dönen çeşitli bilgilerden yararlanarak karşımızdaki nesnenin ne olduğunu anlayabilelim. Ancak bu gibi gözlem araçları gözlenecek nesneyi/sistemi bozar, çünkü gözleyeceğimiz nesne ile bir şekilde etkileşerek *onun saf halini değiştirirler*. Örneğin gözlemek istediğimiz parçacığa bir foton gönderdiğimizi düşünelim. Foton bu parçacığa çarparak onun konumunda ve momentumunda bir değişikliğe (bozulmaya) yol açar, böylece biz onun gözlemek istediğimiz saf ve doğal halini (örneğin orijinal konum ve momentumunu) elde edemeyiz, ancak biraz değişmiş, *makyajlı* halini gözlemleyebiliriz. Feynman'ın "*Fizik Yasaları Üzerine*" adlı eserinin "*Olasılık ve Belirsizlik, Kuantum Mekaniği Açısından Doğal*" isimli bölümünde, deney yaparken bir kuantum sistemini nasıl bozduğumuz, gözlemlerimizde bir özelliği elde ederken diğerinin nasıl elimizden kaçtığı ve buna bağlı olarak doğanın bizim-

le nasıl köşe kapmaca oynadığı çok güzel bir şekilde anlatılmaktadır.⁴⁸ Yani, *doğa bize sırlarının tümünü aynı anda vermiyor, bizden kaçırıyor. Acaba Tanrı, yarattığı varlıkların tam olarak bilinmesini istemiyor mu?*

Bu kitap fizik yasalarının genel özelliklerine vurgu yaptığı gibi, kuantum fiziğinin şaşırtıcı yönlerine de değinmektedir. Özellikle doğa olaylarının fiziğini herkesin anlayabileceği bir dilde anlatabilmesi, Feynman'ı diğer fizikçilerden ayırır. Feynman, sadece teorik fizik konusunda ünlü değildir, karmaşık fiziksel olayları basitleştirerek anlatabilme yeteneğine sahip oluşu ve bu yeteneğini verdiği konferanslarda sergilediği için de ünlüdür.

Heisenberg'e göre bir parçacığı gözlemleyene kadar onun ne bir konumu, ne de bir yörüngesi vardır, hatta varlığı (fiziksel gerçekliği) bile tartışılır. Yani biz gözleyene kadar parçacığın gerçekliğinden söz edilemez. Bu konulara ileride kuantum fiziği ile klasik fizik arasındaki felsefi farklılıkları konuşurken daha ayrıntılı değineceğiz. Bu yaklaşımlar ve yorumlar klasik fiziğin felsefesini temelden sarsmış olup, fizikçileri de anlayış olarak o zamanlar ikiye bölmüştü. Özellikle Einstein başta olmak üzere bazı fizikçiler, geline noktaı şiddetle eleştirerek "*Kesinliğin yerini şans, belirsizlik ve olasılık aldı*" şeklinde eleştirilerde bulunmuşlardır.

Şans ve Olasılıklar Prensi: Niels Bohr

Hani elektronların çekirdek etrafında, açı momentumlarının ' $h/2\pi$ 'nin tam katları olacak şekilde dairesel yörüngelerde döndüğünü söyleyen, kuantum fiziğine damgasını vuran ve kuantum mekaniğinin gelişmesinde hep ön saflarda yer alan unutulmaz ünlü fizikçi vardı ya, işte şimdi ondan bahsedeceğim. Evet, bildiniz, Niels Bohr'dan. Hidrojen atomunun gayet başarılı yarı klasik modelini oluşturan Bohr, elektronların belli yörüngelerde

48. Fizik Yasaları Üzerine, Richard Feynman, Sayfa: 148, Tübitak Yayınları

tıpkı bir klasik parçacıkmuş gibi döndüğünü düşünmüştü. Ama hemen eleştiriler geldi; eğer elektronlar çekirdek çevresinde belli dairesel yörüngelerde döneiyorsa, dairesel hareket ivmeli bir hareket olduğı için, ivmeli elektrik yüklerinin ışıma yapması özelliğı gereğince, bu ışımanın (*enerji yaymanın*) elektrona enerji kaybettirerek çekirdeğın üzerine düşmesine neden olacağı öne sürölüyordu. Bohr ise belli kuantum şartları oluşmadan elektronların ışıma yapamayacağı teziyle bu eleştirileri göğüsledi, ancak çok nükleonlu, çok elektronlu atomlarda bu model işleliyordu ve *keskin izli* yörünge kavramı geçerli olmuyordu. Bu sorun daha sonra Schrödinger'in dalga mekaniğı yorumuyla aşılmıştır. Ancak Bohr'un çalışmaları, atomların nasıl ışıma yaptığını anlatan tayf yapılarının yorumlanmasında temel rol oynamaktadır ve klasik fizikle açıklanamayan bu olaylar kuantum mekaniğıyle açıklanabilmektedir. Danimarka'nın gururu, Bohr atom modelinin mimarı, *Kopenhag Yorumu*'nun ateşli savunucusu ve lideri olan Niels Bohr, kuantum mekaniğinde olasılıkçı yaklaşımı sonuna kadar savunmuş ve ünlü Solvay Konferansları'nda Einstein ile çok şiddetli bilimsel tartışmalara girmiştir. Atomun yapısıyla ilgili çalışmaları ve kuantum mekaniğinin ilerlemesinde gösterdiği başarılar nedeniyle 1922 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görölen Bohr, Los Alamos'ta Amerika'nın atom bombası çalışmalarının sürdüröldüğü Manhattan Projesinde de çok özel fizikçilerle birlikte görev almıştır. Radyoaktif çekirdeklerin davranışları konusunda da önemli çalışmalar yapmış olan Bohr, kuantum fiziğı alanında nesnelerin hem dalga, hem de parçacık özelliklerini taşıdığını, ancak aynı anda bu iki özelliğı göremeyeceğimizi ve bu özelliklerin birbirini tamamladığı ilkesini (*bütönlük ilkesi*) öne süren kişidir. Bohr, atomun sırrını ortaya çıkaran unutulmaz fizikçiler J.J. Thompson ve Rutherford'la da bir süre beraber çalışmıştır. Elektronun manyetik dipol momentinin doğal birimi olan *Bohr Magnetonu* onun adıyla anılmaktadır.

Yorumcuların Kralı: Max Born

Schrödinger'in dalga denklemindeki dalga fonksiyonunun, parçacığın herhangi bir andaki konumunun olasılığına karşılık geldiğini ifade eden ve bu müthiş yorumuyla dalga fonksiyonuna fiziksel bir anlam kazandırarak ünlü Solvay Konferanslarındaki gerginliğin biraz olsun yatışmasını sağlayan Alman fizikçi Max Born, büyük matematikçi Hilbert'in asistanlığını yapmıştı. İleri matematik bilgisine sahip olan Born, matris mekaniği çalışmaları sırasında Heisenberg'e de büyük katkılarda bulunmuştur. Kuantum mekaniği alanında köklü çalışmaları ve dalga fonksiyonuna getirdiği *olasılık* yorumu nedeniyle 1954 yılında Nobel Fizik Ödülünü alan fizikçi, matris mekaniği, katı hal fiziği (*Solid State Physics*), görelî elektronlar, atom, akışkanlar mekaniği, atomaltı parçacıkların istatistik mekaniği gibi konularda önemli çalışmalarda bulunmuştur. Einstein'ı çok sevdiği halde, kuantum mekaniğinde olasılıkçı yaklaşımı reddeden büyük ustayı statükoculukla eleştirmekten de geri durmamıştır. Özel göreliliğin matematik çerçevesini oluşturması sırasında Einstein'a yardım eden ve Einstein'ın Zürih Politeknik'ten hocası olan Minkowski Uzaylarının (*Minkowski uzay-zamanı*) babası Rus asıllı ünlü matematikçi Hermann Minkowski, Max Born'a beraber çalışmaları için işbirliği teklif etmiştir. Bu bile, Born'un fizikçiliğinin yanında ne kadar usta bir matematikçi olduğunun da kanıtıdır. Ancak, Born'un matematikçiliği kuru kuruya bir matematikçilik değildi, matematiğin gösterdiği sembollerin fiziksel dünyada ne anlama geldiğini de yorumlayabilecek kadar derinlikli bir içgörüye sahipti.

Arkayı Dörtlegelim Beyler: Wolfgang Pauli

Kuantum fiziğine önemli katkıları olan Wolfgang Pauli'den bahsetmeden olmaz, çünkü ileride "*Standart Model*"den bahsederken ismini çok duyacağımız *fermion*'ların *Pauli'nin Dışarlama İlkesine* (*Pauli Exclusion Principle*) uyduklarını söylediğimizde ken-

disine yabancı kalmayalım. Kısaca belirtirsek, dışarlama ilkesine göre iki fermiyon (örneğin iki proton) aynı anda aynı kuantum durumunda bulunamaz. Kimya derslerinden çoğumuzun hatırladığı ve $1s^22p^6...$ şeklinde gösterilen atomların elektron konumlarının (*electronic configuration*) açıklanmasının temelinde doğrudan Pauli Dışarlama İlkesinin izleri vardır. Bu ilkeye göre, her yörüngeye istediğimiz sayıda elektron dizemeyiz, hangi yörüngeye kaç adet elektronun yerleşebileceğini bu ilke söyler. Born'un asistanlığını yapmış, Zürih Politeknik'te teorik fizik profesörlüğü kadrosunda çalışmış ve Princeton'da da dersler vermiş olan Pauli, spin istatistiği üzerine de önemli çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaları sırasında *spin matrislerini* tanımlamış ve *spinör*⁴⁹ kavramını bu alanda ilk defa fiziğe uygulamış olan fizikçidir. İtalyan asıllı ünlü fizikçi Enrico Fermi gibi nötrinolar konusunda da araştırmaları olan Pauli, kendi adıyla anılan Dışarlama İlkesi konusundaki çalışmasıyla 1945 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Kuantum mekaniğinin ağır toplarından olan Pauli, spin operatörlerinin ve görelili olmayan spin (*nonrelativistic spin*) sistemlerinin matematiği konusunda da fiziğe önemli katkılar sağlamıştır.

Elektronların ve Antimaddelerin Efendisi: P.A.M. Dirac

1933 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülen P.A.M. Dirac, kuantum mekaniğinin temellerini atan fizikçiler arasında çok önemli ve ayrıcalıklı bir yere sahiptir. Kuantum elektrodinamiği sözcüğünü ilk kez kullanan kişi olan Dirac'ın, elektronu görelili bir hareket denklemi içerisinde yorumladığı ünlü Dirac denklemi, onun ustalığının bir göstergesidir. Ayrıca kuantum mekaniğinde kuantum durumlarını tanımlamak için kullanılan *braket* gösterimi ve *Dirac- δ* (*delta*) fonksiyonu ile kuantum mekaniğinde derin bir iz bırakmıştır. Lütfen burada bir an duralım ve düşünelim! Kuantum ile özel görelilik gibi çok derin ve karmaşık

49. Spinör: İki elemanlı kompleks kolon vektörü.

iki dünyayı birleştirmenin, o felsefeye varmanın, nasıl bir insanüstü özellik gerektirdiğini hissedelim. Dahası, üstadın parçacık fiziği dünyasındaki *yük simetrisi*⁵⁰(*charge symmetry*) gerçeğini çarpıcı bir şekilde vurgulayan, elektronun antimaddesinin evrende bir yerlerde mutlaka bulunması gerektiğini, yaptığı kuramsal çalışmaların sonucunda açıklayan ve pozitronun bulunmasıyla da haklı çıkan kişi olduğunu hatırlatayım. Özellikle *dikkat edelim; Dirac burada, bilinen fizik yasalarını kullanarak çok ileri teknoloji içeren mühendislik harikası bir cihaz tasarlamıyor, doğanın işleyiş ilkelerini, felsefesini, yani Tanrı'nın koyduğu gizli, gizemli kuralları açıklıyor. Aslında tüm fizikçilerin yaptığı iş de bu değil midir?* Kuantum fiziğine irili ufaklı katkısı olan daha birçok fizikçi bulunmaktadır, ama hepsine tek tek bu kitapta yer ayırabilmek mümkün olmadığından onlara şükranlarımızı sunarak yolumuza devam edelim. Bu kesimde kıyısından köşesinden biraz fikir sahibi olduğumuz kuantum fiziği dünyası, yıllar içerisinde gelişimini daha da sürdürmüş, günümüzde bildiğimiz son halini almıştır. Ancak her şey tamamen anlaşılmış ve çözülmüş değildir, daha çok yolumuz var, hali hazırda bilinmeyen birçok şeyin olduğunu da söyleyelim. Fizik zaten en başta dediğimiz gibi, ister klasik ister kuantum fiziği olsun, uygun bilgi taşlarını yerlerine sırasıyla dizmek değil miydi? Ama Allah var, haklarını teslim edelim, yukarıda bahsettiğimiz ustalar ne çok taş dizmişler değil mi?

50. Not: Fizik dünyasında uzay ve zamana göre, bağlı, sürekli, ayrık, yerel ve global "simetriler" ile "dönüşüm" ve "grup" kavramları çok önemlidir. Özellikle parçacık fiziğinde yük, parite ve zaman simetrisi büyük önem taşır ve genellikle CPT simetrisi olarak anılır. Fiziksel koşullara göre bu simetrilerin bozulmasına "simetri kırılması" (*symmetry breaking*) adı verilir.

6

Fizikte Felsefi Ayrılıklar, Çelişkiler ve Düşünce Deneyleri

Önceki bölümlerde klasik fizik ve kuantum fiziğinin kavramsal olarak ne anlama geldiğini, kapsamlarını, konularını, şaşırtıcı yönlerini ve sınırlarını tartışmıştık. Bu bölümde ise, bu iki fizik anlayışının felsefi farklılıklarını, yani doğanın, evrenin davranışını açıklarken hangi pencereden baktıklarını, hangi düşünce tarzını izlediklerini, varsayımlarını ve öngörülerini konuşacağız. Aslında her iki yaklaşım da bilimin gereği olarak, kuramların öngördüğü sonuçların deneysel olarak doğrulanması yöntemini benimser, bu anlamda birbirlerinden farkları yoktur. Ancak, doğayı tanımlarken kullandıkları matematik altyapı farklıdır. Klasik fizikte fiziksel nicelikler fonksiyonlarla ifade edilirken, kuantum fiziğinde operatörlerle (*diferansiyel işlemciler*) tanımlanırlar. Bunlara örnek olarak enerji, momentum, konum v.b. işlemcileri verebiliriz. Bunların ayrıntısını merak edenler için bir internet adresi veriyorum.⁵¹ Aralarındaki felsefi ayrım

51. <http://fizer.erciyes.edu.tr/konfer2.htm>, Ağustos-2010

sadece kullandıkları matematik yöntemde değildir, fiziksel bir sisteme bakışlarında da çarpıcı bir farklılık sergilerler. İsterseniz şimdi bu dediklerimizin ne anlama geldiğini biraz daha ayrıntılı olarak anlatmaya çalışayım.

6.a. Klasik Fizikte Kesinbelirleyicilik ve Atomculuk

Klasik fizik felsefi açıdan doğaya iki pencereden bakar; *determinizm* (kesinbelirleyicilik) ve *atomculuk*. Üçüncü bölümde kısaca değindiğim ve ilerleyen konularda daha ayrıntılı olarak bahsedeceğimizi söylediğim “*determinizm*” kavramı, *klasik fiziğin efendisi* Newton’la başlamış ve tüm klasik fiziğe damgasını vurmuş olan bir anlayıştır. Bu anlayışa göre, doğadaki tüm fiziksel olaylar, kesin bir *neden-sonuç* ilişkisine bağlı olarak gelişir. Yani, hiçbir fizik olayının başlaması, gerçekleşme süreci ve sonlanması tesadüfî bir şekilde şansa veya olasılığa bağlı değildir. Bu demektir ki, bir fizik olayının başlamasına/durmasına bir “*neden*” sebep olmuştur, bunun “*sonucu*” olarak da bir olay başlamıştır/durmuştur ve tüm doğa olayları bu şekilde önceden belirlenmiş kesin doğa yasalarına göre yürür. Buna bir örnek vermek gerekirse; duran bir cisme hiçbir kuvvet uygulamazsak sonsuza kadar durmaya devam eder, bir kuvvet uygulanırsa cisim harekete geçer ve uygulanan kuvvet kaldırıldığında, eğer ortamda sürtünme varsa sürtünme kuvveti nedeniyle bir müddet sonra durur. Hareketin başlamasına neden olan *şey*, cisme uyguladığımız kuvvettir ve bu *nedenin* bir *sonucu* olarak cisim harekete geçer. Cismin durmasına neden olan *şey* ise harekete zıt yönde etki eden sürtünme kuvvetidir ve bir süre sonra cismin durmasına neden olur. Bu basit örnekte görüldüğü gibi, her fizik olayının bir *nedeni* ve ona bağlı olan bir *sonucu* vardır.

Unutmadan söz etmemiz gereken başka bir şey daha var, o da, “*Bir deneyi aynı koşullar altında ne kadar tekrar edersek edelim hep aynı sonucu buluruz*” düşüncesidir (ancak bunun kuantum mekaniğinde tam olarak böyle olmadığını Young deneyinden bahsederken görmüştük). Şimdi diyeceksiniz ki; makro dünyada

tavla oynarken de hangi sayının geleceğini öngöremiyoruz, sadece olasılıklardan bahsedebiliyoruz. Demek ki olasılıkçı yapı doğanın tümünde bulunmaktadır diyerek şimdilik fazla takılmadan geçelim, çünkü ileride buna değineceğiz. Devam edersek, bir örnek olarak suyun kaynamasını verebiliriz, dünyada nereye gidersek gidelim deniz seviyesinde su hep 100 derecede kaynar, hiçbirimiz “Şansımızı deneyelim, belki Japonya kıyılarında tesadüfen bugün suyu 80 derecede kaynatmayı başarabiliriz” demeyiz. Cisimlerin bir kuvvet etkisinde hareket etmesi/durması ve ısıtılan suyun kaynaması gibi fiziksel olaylarda önceden göremediğimiz bizi şaşırtacak bir davranış beklemeyiz, yani itilen cisim hareket edecek, ısıtılan su 100 derecede kaynayacaktır. Yani, kuvvet uygulanan cismin ve ısıtılan suyun başına nelerin geleceği önceden bilinmektedir, dolayısıyla şansa ve tesadüfe yer yoktur. Özdeş şartlar altında fiziksel olaylar evrenin her yerinde aynı şekilde cereyan eder.

Klasik fiziğin deterministik yaklaşımına göre; bir fiziksel sistemdeki niceliklerin başlangıç koşullarındaki değerleri biliniyorsa, bir “t” süresi sonra o sistemin başına gelecekler kesin olarak bilinirler. Bu kavrama “deterministik öngörü” denilmektedir. Örneğin bir kütlelin hareketini incelemeye başladığımız andaki konumu, momentumu, enerjisi gibi fiziksel niceliklerinin (gözlenebilirlerinin) değerlerini biliyorsak, tüm hareketi boyunca geçen süre içerisindeki herhangi bir “t” anında bu niceliklerin alacağı değerleri formüller yardımıyla öngörebiliriz. Eğer öyle olmasaydı, Mars’a göndereceğimiz bir roketin başına gelecekleri önceden nasıl bilebilirdik, uzay yolculuklarını nasıl başarıyla gerçekleştirebilirdik? Düşününün bir kere; roket belli bir yörüngeyi izleyerek Mars’a gidecek, gezegene inecek, yüzeyinden örnekler/veriler toplayacak, kalkıp tekrar dünyaya dönecek veya projeye göre güneş sisteminin dışına doğru yoluna devam edecek, eğer bu maceranın başlangıcından sonuna kadar olan her adımı kesinlikle öngörerek (hesaplayarak) planlayamıyorsak vay o roketin haline. Bu durumda roketin fırlatıldıktan sonra nereye nasıl gideceği ve başına neler geleceği bilinemez. Böyle bir roketin durumunu özetleyen “Sal-dım çayıra meolam kayıra” anlayışı klasik fiziğin deterministik an-

layışına uymaz. Başka bir örnek daha vereyim; hepimizin çok iyi bildiği bilardo toplarının başına ne geleceği; istakanın topa uyguladığı kuvvetin ne büyüklükte, hangi açıyla, ne kadar süre uygulandığı, topların başlangıç hızlarının ne olduğu, masanın sürtünme katsayısı gibi fiziksel niceliklerin başlangıç şartlarını dikkate alarak, momentumun korunumu gibi yasaların da uygulanmasıyla klasik fizik açısından büyük bir doğrulukla öngörülebilir. Tekrar vurgularsak; *klasik fiziğe göre, neden-sonuç ilişkisi dikkate alınarak hareket denklemlerinin doğru olarak çözülmesiyle fiziksel bir sistemin tüm nicelikleri büyük bir kesinlikle öngörülebilir, bilinebilir.* Üçüncü bölümde belirttiğim gibi, literatürde belirtgençilik, belirtimcilik, gerekircilik gibi çeşitli Türkçe karşılıklarını bulabileceğiniz *determinizm* tanımı için benim icat ettiğim(!) "*kesinbelirleyicilik*" sözcüğünü kullanmam pek de kötü değilmiş, değil mi?

Yukarıda, "*Hiçbir fizik olayının başlaması, gerçekleşme süreci ve sonlanması tesadüfi bir şekilde şansa veya olasılığa bağlı değildir*" derken, "*klasik fizikte hiç mi olasılık kavramı yer almaz?*" sorusu aklınıza takılabilir. Yani, "*Her uzay projesi başarıyla mı sonuçlanıyor, bazen roketler kontrolden çıkmıyor mu?*" diye sorduğunuzu hissediyorum. Klasik fiziğin anlayışına göre, *bir fiziksel süreçte yer alabilen ve öngörüü olumsuz etkileyen olasılıklar; gözlemcinin bilgisinin ölçüsü, konuyla ilgili olarak fizik dünyasının geldiği bilgi düzeyi ve kullanılan gözlem araçlarının hata oranları gibi faktörlerle doğrudan ilgilidir.* Bu açıdan bakılınca, yukarıda değindiğimiz tavla zarlarının olasılıkçı davranış göstermesinin deterministik anlayışa göre *suçlusu*(!), başlangıç şartlarının ve sistemin davranışında rol oynayan başka değişkenlerin (*onlar her neyse!*) değerlerinin kesin olarak gözlemci tarafından bilinmemesidir. Hemen bir örnek daha vereyim, günümüzün uçakları oldukça mükemmel ve teknoloji harikası araçlardır, ancak yine de düşebilmektedirler. Örneğin istatistiklerdeki "*Her bin uçaktan ancak ikisi düşüyor*" ifadesine klasik fizik açısından bakacak olursak; böyle olasılıkların/şanssızlıkların gerçekleşebilmesi için insanoğlu tarafından hala anlaşılamamış şeylerin var olduğu, bazı aerodinamik parametrelerin hesaba katılmadığı, uçak tasarlanırken yapılan simü-

lasyonlarda kullanılan bilgisayar programlarının yetersiz oluşu, pilotaj hataları, hesaba katılmayan meteorolojik şartlar gibi faktörler öne çıkacaktır, yani bu kazaların nedeni bu faktörlerin eksiksiz bir şekilde hesaba katılamamasıdır, yoksa determinizme göre hareket denklemlerinde bir sorun yoktur, onlar hareketi çok kesin olarak tanımlamaktadır.

Klasik fiziğin bir fizik olayına/sistemine bakışında bir başka temel özellik de *"atomcu anlayış"*tır. Bu anlayışa göre; *"Bir fizik sistemini tümüyle anlayabilmek için, onun en küçük parçasına ulaşarak önce onu çözmeliyiz ki, buradan hareketle tüm sistemi anlayabilmelim, çünkü tüm sistem, bu en küçük bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır"*.

Ne dediğimizi daha iyi anlamak için basit bir örnek verelim ve her gün çayımıza koyduğumuz tek bir küp şekeri dikkate alalım. Dikkatlice baktığımızda küp şekerin çok sayıda toz şekerin bir araya gelmesiyle oluştuğunu görürüz (veya öyle varsayalım). Şimdi sorumuz şu; bu küp şekerin ağırlığı nedir? Biliyorsanız ağırlık denilen fiziksel nicelik, bir kütleye yerçekiminin uyguladığı kuvvettir, yani ağırlığı bulmak için cismin kütlesiyle yerçekimi ivmesini çarpabiliriz. Bu noktada klasik fiziğin atomcu anlayışı der ki; toplam olarak tek bir küp şekerin ağırlığını bulabilmek için, küp şekeri oluşturan tek tek toz şekerlerin kütlelerini ayrı ayrı yerçekimi ivmesiyle çarpıp, sonunda her bir toz şeker için bulduğumuz bu ağırlık değerlerini toplarsak, küp şekerin toplam ağırlığını elde ederiz. Bu örnekte her bir toz şeker, küp şekeri oluşturan bileşenlerdir. Tabi ki günlük hayatımızda bir cismin ağırlığını bulmak için böyle bir işlem yapmıyoruz, ancak, klasik fiziğin bir fizik olayına/sistemine felsefi bakışı ve hareket noktası bu şekildedir.

Kullandığımız atom/atomcu gibi ifadeler bizi yanıltmasın, bu ifade illaki her fiziksel sistemin tek tek atomlarıyla uğraşacağız anlamına gelmemektedir. Atom denilmesindeki kasıt, bir fiziksel sistemin en küçük parçasını/bileşenini göz önüne alıyoruz anlamına gelir. Bunu daha iyi anlayabilmek için, kendi ekseini etrafında hızla dönen lunaparktaki kocaman bir döner salıncağı örnek alalım. Bu salıncağın hareket denklemlerini dikkate

aldığımızda, örneğin toplam açı momentumunu hesaplarken, dönen her bir sandalyenin ayrı ayrı toplam açı momentumuna bir katkısı olacaktır. Bu örnekteki sistem için *atom*, tek tek her bir sandalyedir. Yani en küçük bileşenler için hesaplanacak değerlerin tümü bize sistemin bütününe verecektir, bileşenlerden bütüne gidilecektir, işte klasik fiziğin atomcu anlayışı budur. Bunu sadece sistemin toplam ağırlığı veya toplam açı momentumunu hesaplamakla sınırlandırmayın, diğer fiziksel nicelikler için de durum böyledir. Aslında, maddenin en küçük parçasına (*şimdilik "gerçek atomlar" diyelim!*) ulaşarak onun davranışları üzerinden tüm doğayı tanımlama fikri, fiziğin başlangıcından beri hep düşünülegelen bir yaklaşımdır.

Yukarıda basit bir dille anlatmaya çalıştığım determinizm kavramını, şimdi biraz daha *fizikçe* tartışalım ve klasik mekanikteki *Hamilton* denklemlerini anımsayalım. Sadece klasik mekanik alanında değil, Schrödinger denklemi ile ilişkili olarak kuantum mekaniği çerçevesinde yorumlanacak bir sistemin bile toplam enerji ifadesini oluşturabilmek için kullandığımız *Hamilton fonksiyonu*, bir fiziksel sistemi en basit anlamda konum ve momentum değişkenlerine göre yorumlar. Yani bu fonksiyon, herhangi bir anda bir sistemin durumunu konum ve momentum değişkenleri cinsinden verir. Örneğin tek bir klasik parçacığı dikkate alırsak, herhangi bir "*t*" anında onun üç boyutlu uzay-zamandaki *durumu*, üç adet konum değişkeni ve üç adet momentum değişkeni olmak üzere toplam altı değişkenle temsil edilir ve zaman içerisinde bu parçacığın *tüm evrimi* bu değişkenlerin sürekli bir kümesi olarak izlenebilir. Bir klasik sistemin incelendiği süreç içerisinde konum ve momentum değişkenlerinin alacağı sayısal değerlerin kümesi, reel sayılar kümesinin *sürekli değerler* içeren bir alt kümesidir. Dolayısıyla, parçacığın/sistemin tüm hareketini birebir izleyebileceğimiz ve onun ileride başına gelecekleri öngörebileceğimiz bir *tanımlayıcı ortam* oluşturmuş oluruz. İşte bizim bu ortama "*faz uzayı*" (*phase space*) dediğimizi ve bu uzayın bileşenlerini istediğimiz kadar artırarak matematik anlamda genelleştirebileceğimizi hatırlatayım. *Hamilton* denklemleri, bu faz uzayında temsil edilen parçacığın her-

hangi bir “t” anındaki fiziksel tüm bilgilerini içerdiğinden, bundan sonraki anlarda bu niceliklerin (örneğin konumlar ve momentumlar) nasıl değerler alacağını, yani nasıl değişeceklerini, içerdikleri kısmi türevler yardımıyla bize söylerler. Faz uzayında bir “t” anında parçacığı temsil eden ve bizim örneğimizde altı adet değişkenle temsil edilen noktanın uzay-zamandaki ilerleyişini (ilerleme yönünü ve büyüklüğünü) bu uzayın her noktasına bir vektör karşılık getirerek izlemek büyük kolaylık sağlar, çünkü bir fiziksel niceliğin yönünü ve büyüklüğünü bize vektörler anlatır. Bu vektörler, konum ve momentum değişkenlerine bağlı vektör fonksiyonlarıdır (örneğin altı değişkenli $K(x,y,z,p_x,p_y,p_z)$ gibi). Faz uzayımızın her noktasına K gibi bir vektörün karşılık gelmesiyle, faz uzayımız oldu mu şimdi size bir “vektör alanı” (*vector field*).⁵² Buradaki “alan” sözcüğü bizi sakin yanıltmasın ve geometrideki iki boyutlu alanları aklımıza getirmesin. Fizikteki *alan* terimi, bir fiziksel niceliğin etkilediği uzay bölgesini, yani üç boyutlu bir bölgeyi ifade eder. Örneğin, bir elektrik yükünün, çevresindeki uzay bölgesinde yarattığı elektriksel etkiyi anlatan *elektrostatik alan* işte böyle bir alandır. Fizikçilerin çok aşına olduğu, yönü ve büyüklüğü zamanla değişebilen elektrik ve manyetik alanlar da işte buna benzer vektör alanlarıdır. Etkiledikleri uzay bölgesinin her noktasına yönü ve büyüklüğü zamanla değişebilen (veya sabit kalabilen) bir E ve B vektörü karşılık gelmektedir. Bir fiziksel parçacığın/sistemin tüm hareketi süresince başına ne geleceği, ilerde nasıl bir hareket yapacağı, değişkenlerinin ne değerler alacağı gibi kesin bilgilerin öngörülebilmesi determinizmin dayandığı en önemli temel kavramdır. Görüldüğü gibi, klasik fizik ve onun dayandığı determinizm anlayışı, doğadaki tüm fizik olaylarının kesin olarak tanımlanmış matematik modelli bir çerçevede süregeldiğini söylemektedir.

52. Not: Sonsuz sayıda nokta içeren alanların her noktasına karşılık gelen değerler bir vektör olabileceği gibi, bunlar reel sayı, kompleks sayı ve tensör de olabilirler. Alanların her noktasına bir sayı karşılık getirildiğinde ise “skaler alan” (*scalar field*) kavramıyla karşılaşırız. Skaler alanlara örnek olarak bir odadaki sıcaklık dağılımını veya bir sıvı içindeki basınç dağılımını verebiliriz.

Ancak, doğadaki işler tam olarak determinizmin arzu ettiği şekilde gitmemektedir. Burada ayrıntısına giremeyeceğimiz, kesin öngörülerimizin bulanıklaşmasına sebep olan “faz uzayında yayılma” denilen bir olgu nedeniyle, bir fiziksel sistem hakkında başlangıçta ne kadar kesin bilgilere sahip olursak olalım, yavaş yavaş bu netlik flulaşacak ve sistemin hareketi bir süre sonra öngörülemez olacaktır. Termodinamikteki *entropi* kavramını hatırlarsak, doğanın sürekli olarak tersinmez (*irreversible*) bir şekilde düzensizliğe ve karmaşaya (*chaos*) gittiği fikriyle bu anlattıklarım arasında oldukça yakın bir ilişkinin olduğu açıkça görülecektir. Acaba klasik mekanik doğanın davranışını tam olarak açıklayamıyor mu? Yoksa Wichmann’ın dediği gibi, “Doğada iki ayrı fizik yoktur, fiziğin tümü kuantum fiziğidir” ifadesine mi sarılsak?

Bir sonraki kesimde tartışacağımız kuantum fiziğinin, determinizm yaklaşımının öğeleri olan katı nedenselliğin ve kesin öngörülebilirliğin iplerini gevşetmesinin, determinizm anlayışını ölene kadar savunmuş olan Einstein’ı nasıl kızdırdığını hep birlikte göreceğiz.

6.b. Kuantum Fiziğinde Olasılıkçılık ve Bütünlükçülük

Bir önceki bölümde mademki faz uzayının ne olduğundan bahsettik, hazır yeri gelmişken kuantum mekaniğindeki “Hilbert Uzayı”ndan da söz edelim ve konumuza hiç de planlamadığım bir yerden girmiş olalım. Çünkü, kavramsal olarak klasik mekanikteki *faz uzayına* kuantum mekaniğinde *Hilbert Uzayı* karşılık gelir. Yukarıda söylediğimiz gibi, klasik mekanikte bir fiziksel sistemin herhangi bir andaki durumunu konum ve momentum değişkenleriyle belirtiyor, bunların oluşturduğu uzaya *faz uzayı* diyor ve bu uzayın her noktasına bir vektör karşılık getirerek bir vektör alanı/uzayı oluşturuyorduk. Şimdi aynı mantıkla düşünmeye devam edersek, kuantum mekaniğinde bir sistemin herhangi bir andaki durumu “durum vektörü” (*state vector*) ile verilir. Durum vektörleri Dirac’ın gösterimine uygun olarak örneğin

$|\Psi\rangle$ formunda veya çizgisel vektör uzaylarının özelliğinden dolayı, birden fazla durum vektörünün çizgisel birleştirimleriyle (*linear combination*) gösterilirler. Hilbert uzayının klasik faz uzayından farkı, onun sonsuz boyutlu kompleks (*karmaşık, karmal*) bir vektör uzayı (*vector space*) olmasıdır, çünkü kuantum mekaniğinde bir sistemi ancak sonsuz sayıda değişkenle ifade edebilmektediriz. Yani klasik mekanikteki faz uzayının her noktasına reel değerler karşılık gelirken, burada kompleks değerler karşılık gelmektedir. Koordinat sisteminde her değişkenin alacağı değerleri farklı eksenlerde göstermemiz gerektiği için, biraz soyut düşünmemizi gerektirmesine rağmen, sonsuz sayıda ve birbirine dik eksenler tanımlamamız gerekir. Diklik kavramı, eksenlerin arasında illaki 90 derece açı olacak demek değildir, tıpkı spin durumlarında olduğu gibi, genellikle eksenlerin tanımlanması için kullanılan birim vektörlerin yönlerindeki zıtlığı vurgular. Nasıl ki klasik mekanikte faz uzayının her noktası sistemin bir durumunu temsil ediyordu, benzer olarak, bir kuantum sisteminin tüm durumlarını temsil eden noktalar da Hilbert uzayında yer alırlar. Ancak bu noktalara karşılık gelen değerler kompleks değerlerdir, yani kompleks değerli durum vektörleridir (klasik faz uzayında da her noktayı bir vektöre eşlediğimizi, sadece konum ve momentum gibi değişkenlerle sınırlı kalmamızın gerekmediğini, matematik anlamda değişken sayısını istediğimiz kadar artırabileceğimizi hatırlayalım). Unutmadan eklemeliyim ki, hani Schrödinger dalga denklemlerinde yer alan Ψ fonksiyonu vardı ya, onun mutlak değeri olan $|\Psi|$ değeri ise durum vektörü olan $|\Psi\rangle$ 'nin boyudur. Dikkat edilirse; ister klasik isterse kuantum mekaniğindeki bir sistemin zamanla nasıl evrileceğini an be an izleme isteğimiz ve bunlarla ilgili faz uzayları tanımına yönelmemiz, bana göre bilinçaltımızda yatan deterministik algılamaya yatkın yönümüzün açığa çıkmasıdır. Schrödinger denklemi olarak bildiğimiz denklem de işte tam bunu sağlamaktadır, yani bu denklemi sağlayan bir dalga fonksiyonunun veya durum vektörünün zaman içindeki evrimini sürekli olarak izleyebiliriz. Bu anlamda kuantum mekaniğinin deterministik bileşenini Schrödinger denklemi oluşturmaktadır. Ancak bilindiği gi-

bi, kuantum mekaniğinin olasılıkçı (*probabilistic*) ve belirsizliklerle açık olan, yani deterministik olmayan bileşeni de vardır. Örneğin bir konum ölçümü yapıldığında, Heisenberg'in belirsizlik ilkesi gereğince ortaya belirsizlikler ve olasılıklar çıkacaktır. Gözlem veya ölçüm yapılmadan önce kuantum mekaniğinde bir sistemin durumu, farklı olası özdurumların süperpozisyonu, yani çizgisel üst üste gelmesi ile ifade edilir. Ölçüm yapılır yapılmaz, sistem bu olası özdurumlardan birine indirgenir. Anlaşılır olabilmesi için şöyle ifade etmek belki daha uygun olacaktır; “Kuantum mekaniğinde dalga fonksiyonu veya durum vektörü ile tanımlanan bir sisteme ait bir niceliğin alabileceği öngörülen birçok olası değer içerisinde, sadece ölçüm yaptığımızda elde ettiğimiz değeri gözleyebilmemize dalga fonksiyonu çökmesi (*wave function collapse*) veya durum vektörü indirgenmesi (*reduction of state vector*) denir”. Kuantum mekaniğinde bir parçacığın/bir sistemin tanımının doğru yapılabilmesi için bu iki bileşen (kesinbelirleyicilik ve olasılıkçılık) sürekli olarak devrededir ve birbirlerinin ayrılmaz parçalarıdır. Durumu kısaca özetlersek; kuantum mekaniğinde bir sistemin davranışını izlerken, Schrödinger denklemiyle sistemin deterministik (*kesinbelirlenebilen, öngörülebilir*) kısmını tanımlıyoruz, yani sistemin zaman içerisindeki evrilmesini öngörebiliyoruz. Ancak, bir deney ile sistemin bir niceliğini ölçmeden, teorik olarak belirlediğimiz birçok olasılık içinden bu fiziksel niceliğin hangi değeri alacağını öngöremiyoruz. Yani karşımıza çıkacak değer, ancak gözlem anında doğa tarafından belirlenmektedir ve birçok olasılık arasından sıyrılarak gün yüzüne çıkmaktadır. İşte ölçüm sonucu karşımıza çıkacak bu değer, Ehrenfest teoremine kısaca değindiğimiz bir önceki bölümde adı geçen “beklenen değer”dir. Hangi değerle karşılaşacağımız, ölçmeyi yaptığımız ana kadar bir sırdır, dolayısıyla işin bu kısmı belirsizlik ve olasılıkla yoğrulmuştur. İşte Einstein'ın ünlü “Tanrı zar atmaz” sözü, doğanın davranışındaki bu belirsizliğe ve bu olasılıkçılığa isyan etmesindendir. Bu söz üzerine Bohr, “Alla-haşkına Einstein, Tanrıya ne yapması gerektiğini söylemeyi bırak” diyerek karşılık vermiştir. “Kopenhag Yorumu”nu şiddetle savunanların başında gelen Bohr ve Heisenberg ise işi daha da ileri

götürerek “Kuantum mekaniğinde gözlem yapılana kadar, bir sistemin/parçacığın fiziksel gerçekliğinden bile söz edilemez” görüşünü ileri sürmüşlerdir, yani gözlem yoksa fiziksel gerçeklik de yoktur. Örneğin bu görüşe göre bir elektronun gözleminden önce gerçekten var olup olmadığı bile belirsizdir, hatta fiziksel olarak bir gerçekliğe dahi sahip değildir, yani yoktur. Bu görüş üzerine Einstein daha da köpürüp “Yani aya sırtınız dönükse ay gerçek değil midir, orada değil midir?” diyerek bu olasılıkçı görüşlere hayatının sonuna kadar şiddetle karşı çıkmıştır. Çünkü onun “fiziksel gerçeklik” (realism) anlayışına göre, herhangi bir varlığın gerçek olup olmaması yani fiziksel gerçekliği, onun gözlenip gözlenmemesinden bağımsız olmalıydı. Olasılığa bağlı olarak cereyan eder gibi görünen fizik olaylarını neden-sonuç ilişkisine bağlayan bir şeyler olmalıydı.

Einstein’ın realizm düşüncesinin temelini oluşturan “neden-sonuç ilişkisi” ve “bir fiziksel varlığın gerçekliğinin gözlemlerimizden bağımsız olması gerektiği” ne ek olarak, gerçekliğin tam olabilmesi için şiddetle savunduğu iki konu daha vardı, o da “yerellik” ve “ayrılabilirlik” prensibi idi. Ayrılabilirlik kavramına göre; uzay-zamanda farklı noktalarda bulunan fiziksel nesnelerin ayrı ayrı kendilerine özgü bir kimlikleri vardır, yani her birinin diğer nesnelerden bağımsız bir fiziksel gerçekliği vardır. Yerellik kavramı ise der ki; birbirinden bağımsız olarak uzay-zamanda ayrık olarak fiziksel bir gerçekliğe sahip olan bu nesnelerin birinin başına gelebilecek bir etkiden diğer nesnelerin haberdar olabilmesi için, bu etkiyi bildiren bir sinyalin en fazla ışık hızıyla yayılarak diğer nesnelere iletilmesi gerekir, bu daha hızlı olamaz, çünkü hiçbir nesne/sinyal ışık hızını aşamaz. Böylece bir nesnenin başına geleni diğerlerinin algılayabilmesi (fizikte buna “uzaktan etki” deniliyor) için belli bir süreye gereksinim vardır. Hâlbuki Kopenhag’cılara göre, kuantum mekaniğinde bir sistemi oluşturan nesnelerden biri üzerinde ölçüm/gözlem yapılırsa diğerleri de anında, sonsuz bir hızla bundan etkilenir, haberdar olur ve bu olguya “kuantum dolanıklığı/dolaşıklığı” (entanglement) adı verilir. Yani bir kuantum sistemini oluşturan parçalar birbirlerine uzak da olsalar birbirlerinden ayrı yorumlanamazlar, bir anlamda bir-

birlerine dolanmışlardır, bu özellik çok şaşırtıcı ama doğanın da gerçek bir olgusudur. Akıl ve mantık almıyor, ne kadar çarpıcı değil mi? Bu yüzden kuantum dolanıklığı olgusuna fizikçiler, Mermin'in de dediği gibi "*büyüye en yakın şey*" olarak bakarlar.

Einstein'ın inandığı şekilde işleyen bir uzaktan etki için ise hemen bir örnek vereyim; örneğin bir güç güneşi bir anda çekip şu anda bulunduğu konumdan alsa, güneşin oradan çekildiğine ilişkin bilgi, göreliliğe göre dünyaya ancak ışık hızıyla sekiz dakikada ulaşır, yani dünyanın bundan haberi ancak sekiz dakika sonra olur, haberdar olana kadar da aynı yörüngede hiçbir şey olmamışcasına hareketine devam eder. Çünkü Einstein göstermiştir ki, kütleçekim alanları da tıpkı elektromanyetik alanlar gibi ışık hızıyla, yani sonlu bir hızla yayılmaktadır. Bir karşılaştırma yapmak için Newton mekaniğinde iki kütle arasındaki çekim kuvvetini anlatan ünlü denklemi hatırlayalım, bu denkleme göre m_1 ve m_2 kütlelerini aralarında çok büyük bir " r " uzaklığı olacak şekilde bir anda konumlandırırsak anında karşılıklı çekim kuvvetini hissederler, denklemde birbirlerini algılamaları için bir sürenin geçeceğine ilişkin hiçbir bilgi yoktur, yani bu etki sonsuz bir hızla (*ışık hızından büyük!*) iki kütleyle de bildirilmiştir. Bu durum ise genel görelilikteki kütle çekim kavramına ve ışık hızının aşılamazlığı ilkesine terstir.

İşte, fiziksel gerçeklik, ayrılabilirlik, yerellik ve sonlu hızla sahip bir uzaktan etkinin bir araya gelmesiyle ancak Einstein'ın kafasındaki fiziksel dünyanın deterministik resmi çizilebiliyordu. Büyük usta, kuantum mekaniğinin de bunları sağlamadan rüştünü ispat edemeyeceğini söylüyordu. Bu yüzden kuantum mekaniği O'na göre tamamlanmış/tam bir kuram değildi, sadece gözlem anında ortaya çıkıveren bir gerçeklik tanımı ve anında uzaktan etki Einstein'a göre değildi.

Einstein bahsettiğim bu olasılıkçı yaklaşımlara itirazlarını bir taraftan sürdürürken, kendi gözlemleriyle ilgili sorunları da aşamıyordu. Örneğin bir atomun foton fırlatarak daha alt enerji düzeylerine inmesi veya bunun tersi olan üst düzeylere çıkması (*ışımali geçişler-radiative transitions*) olayında, fotonun ne zaman fırlatılacağı ve hangi yöne gideceğini belirlemenin kesin bir yo-

lu yoktu. Yoksa Heisenberg haklı mıydı? Heisenberg'e göre, "Bir fiziksel sistemin şu andaki tüm parametreleri eksiksiz olarak bilineme-yeceğinden, gelecekteki davranışı ancak belli olasılıklar çerçevesinde bi-linebilir". Bu gibi bazı örnekler, büyük ustanın determinizmle ilgili görüşünde de bulanıklık yaratıyordu, ama ona göre yine de her olayın uyması gereken kesin ve belirli kuralları olmalıydı. Bu düşünce tarzı, onun tüm ömrünü, bu kuralları arayarak ge-çirmesine neden olmuştur.

İşte kuantum dünyasının en temel yönü de, geleceğin ne ola-cağını tam olarak bilememe olgusudur, bunun nasıl olduğunu ve olasılık genliklerinin nasıl gözlem sırasında gerçek olasılıkla-ra dönüştüğünü bilmiyoruz, herhalde bu özelliği kuantum dün-yasının bir gerçeği olarak kabul etmemiz gerekir. Einstein ise ya-şamının sonuna kadar fiziksel gerçekliğe ve deterministik yoru-ma sıkı sıkıya bağlı kalmış, bu yüzden Bohr ile Heisenberg'in bayraklaştırdığı, daha sonra aralarına Born'un da katıldığı "Ko-penhag Yorumu" (Copenhagen Interpretation)⁵³ adı verilen olasılık-çı ve belirsizliğe prim veren görüşe karşı savaşımıştır. Bu savaşı-lar ünlü Solvay Konferansı'nda doruğa çıkmış, Schrödinger bile bu olasılıkçı ve belirsizliği doğal sayan *Kopenhag Yorumu* karşı-sında kendi denklemlerinden şüphelenmeye başlamıştır. Bir sü-re Einstein'ın görüşleriyle Kopenhag'cılar arasında bocalayan Schrödinger, sonunda deterministik görüşün yanında yer almış-tır. Ne var ki, Einstein ve aynı görüşü paylaşan fizikçilerin tüm çabaları, kuantum mekaniği yasalarının doğasında bulunan be-lirsizlik ve olasılık gibi iki temel öğeyi devreden çıkaramamıştır ve *Kopenhag Grubunun* savunduğu ilkeler günümüzde de geçer-liliğini korumaya hala devam etmektedir. Feynman bu durum için şöyle diyor; "Bu kadar büyük kesinliğe sahip bir bilim olarak fi-zik, bir olayın yalnızca olasılığını hesaplayabilen ama neyin kesinlikle olabileceğini söyleyemeyen bir duruma mı düşüyor? Evet, bu bir geri çekilme, maalesef doğa yalnızca olasılıkları hesaplamamıza izin veri-yor". Acaba Feynman'ın varmış olduğu sonucu, "bilim dünyası-nun çok şey bildiği, ama hala hiçbir şey bilmediği" şeklinde mi

53. http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation, Eylül-2010

yorumlamalıyız? Günümüzün çoğu fizikçisi kuantum mekaniğinin fiziksel gerçeklik kavramını sağlayamadığını, doğanın kesin bir tanımını yapamadığını, sadece olasılıkları hesaplamanın bir yöntemi olduğunu öne sürmektedir. Aksine, Penrose gibi düşünenlere göre ise, bir kuantum parçacığının konumunun fiziksel gerçekliği vardır ve bu onun " $|\Psi\rangle$ " kuantum durumudur.

Yukarıda söylediğim gibi, bu konuya doğaçlama olarak hiç planlamadığım bir şekilde başladık. Belki de en son söylemem gerekenleri en başta söylemiş oldum, ama bu çok önemli değil. Klasik fiziğin felsefi yapısını anlatırken onun *kesinbelirleyicilik ve atomculuk* üzerine inşa edildiğinden söz etmiştik. Şimdi aynı paralelde devam edersek, kuantum fiziğinin felsefi yaklaşımı ise *olasılıkçılık, bütünlükçülük* ve önceki bölümlerde değindiğimiz *fiziksel niceliklerin süreksizliği* kavramları üzerine oturur. Yukarıda bahsettiğim tüm olgular, kuantum fiziği dünyasının tamamen kendi yaratılış özelliğini gözler önüne sermektedir.

Peki, bütünlükçülük ne anlama gelmektedir? Şimdi onun ne olduğuna bakalım. Bütünlükçülük kavramı, klasik yaklaşımdaki atomculuk kavramının tam zıttıdır. Çünkü kuantum mekaniğinde bir sistemi bir bütün olarak tanımlayabilmek için, klasik atomcu modelde olduğu gibi, sistemin en küçük biriminden yola çıkarak tüm sistem için bir öngöründe bulunmak mümkün olmamaktadır. Yani sistemi oluşturan en küçük birimin davranışı ile, bu küçük birimlerden oluşan sistemin tamamı aynı davranışı göstermiyor. Örnek verecek olursak, bir su molekülünün toplam davranışı, onu oluşturan tek tek oksijen ve hidrojen atomlarının davranışlarının basit bir birleştirmesiyle açıklanamaz. Bir atomu oluşturan nükleonlar (*protonlar ile nötronlar*) ve elektronların tek tek davranışlarının basit bir birleştirmesiyle de bir atomun toplam davranışı açıklanamaz. Fransız fizikçi Sebastien Balibar bunu güzel bir benzetmeyle vurgulamıştır; "*Tek tek atomların özelliklerini anlamak, elmaları anlamak için yeterli değildir.*"⁵⁴ Dolayısı ile kuantum mekaniği, kuantum mekaniğine özgü sistem-

54. Atom ve Elma, Sebastien Balibar, Sayfa:126, ODTÜ Yayıncılık

lerin davranışını tanımlarken o sistemin bütününe bakar, tek tek en küçük parçalarına değil. İşte bütünlükçülük ilkesi kısaca budur.

Aslında buraya kadar klasik fizikle kuantum fiziğinin doğaya bakış açıları arasındaki felsefi farkları anlatırken farkında olmadan (ama kaçınılmaz biçimde!) Kopenhag Yorumuna da değinmiş olduk. Newton'la başlayıp Maxwell ve Einstein'a kadar uzanan determinizm yaklaşımına büyük darbe vuran olasılıkçı görüşün kalesini yıkmak adına zaman içerisinde birbiri ardına Kopenhag Yorumunu çürütmeyi/sınamayı hedefleyen bazı düşünce deneyleri ileri sürülmeye başlandı. Bir sonraki kesimde bu düşünce deneylerinden en önemli ikisine kısaca değinmeye çalışacağım.

6.c. Çelişkiler (Paradokslar) ve Düşünce Deneyleri

Olasılıkçı görüşün ve belirsizliğin sembolü olan Kopenhag Yorumu'nun ağır topları Bohr ve Heisenberg'in ileri sürdüğü ilkeleri *uçuk(!)* bulanların başında Einstein gelmekteydi. Einstein ve onun düşüncesini paylaşan fizikçiler, kendi görüşlerinin geçerli olduğunu kanıtlamak üzere ardı ardına düşünce deneyleri tasarlamaya başladılar. Bu düşünce deneylerinin en önemlilerinden ikisini örnek vermek istiyorum. Bu düşünce deneyleri aynı zamanda fizikte çelişkiler (*paradox*) olarak da yorumlanırlar.

Schrödinger'in Kedisi

Kuantum fiziğinin temel taşlarından biri olan Schrödinger de Einstein'ın en büyük destekçilerinden biri olmuştu ve olasılıkçı yaklaşımı çürütmek adına *Schrödinger'in Kedisi* adlı ünlü düşünce deneyini tasarlamıştı. Bu deneyle, kuantum mekaniği dünyasında gelişen bir olayın makro ölçekte yani günlük yaşamımızdaki bir sistemle etkileştiğinde nasıl bir fiziksel sonuç doğuracağına bakılacaktı.

Şimdi herkesin bildiği deney ortamını bir kez de ben anlatmış olayım. Bir kedi kapalı bir kutuya konur ve kutu açılmaya-

cak biçimde kapatılır. Kutunun içinde bir radyoaktif madde vardır ve daha önceki konuda bahsedildiği gibi bu radyoaktif maddenin tam olarak hangi “t” arında parçalanmaya başlayacağını bilmemizin yolu yoktur, sadece parçalanma olasılığı bilinebilir. Deney süresi içinde eğer bu parçalanma gerçekleşirse, ayrıntısına burada girmeyeceğim bir düzenek sayesinde, kutunun içinde bulunan bir siyanür şişesi kırılacak ve kedi zehirlenerek ölecektir. Parçalanma olmazsa kedi canlı kalacaktır. Örneğin yarım saat bekledikten sonra deneyi bitirip kutunun kapağını açtığımızda bir dış gözlemci olarak ne görmeyi bekliyoruz? Kedi ölü mü yoksa canlı mıdır? Ölü veya diri görme şansımız %50’dir. Hatırlayacağımız gibi, Kopenhag Yorumuna göre bir gözlem/ölçüm yapılmadan önce, bir fiziksel sistemin gözlemeyi umduğumuz bir niceliğinin fiziksel gerçekliğinden bahsedilemiyordu, ancak, bu niceliğin gözlemden önce alabileceği olasılıklı değerler kümesi vardı ve gözlem yapılır yapılmaz sistemi tanımlayan dalga fonksiyonunun çöküşüyle bu değerlerden ancak birini alabilirdi. Bu anlayışa göre, kutuyu açıp gözlemimizi yapmadan önce sistemi tanımlayan Ψ fonksiyonu, aynı anda kedinin hem ölü hem de canlı olması olasılığını içinde barındırmaktadır, yani kedi hem ölü hem de canlıdır. Hatırlayalım, bir durum vektörü sistemin tüm durumlarının çizgisel birleştirmesiyle ifade ediliyordu. Sembolik olarak yazmaya çalışırsak, karşılaşmayı beklediğimiz durum “ $|\Psi \text{ (psi)}\rangle = |\text{canlı}\rangle + |\text{ölü}\rangle$ ” birleştirmesinden oluşmalıdır. Buna göre gözlemimizi yapınca dalga fonksiyonu olası bir değere çökmeli ve kediye canlı veya cansız görmeliyiz. Hadi bunu anladık(!) diyelim, kutunun içine başlangıçta bir de iç gözlemci koysaydık, olayı bizden önce (dış gözlemciden önce) gözlemiş olacağı için dalga fonksiyonu onun için biz kutuyu açmadan önce çoktan çökmüş olacak ve iç gözlemci bizden önce kedinin yaşayıp yaşamadığını gözlemiş olacaktı.⁵⁵ Çünkü belki daha deney başladıktan sonra üçüncü dakikada parçalanma başlamış ve kedi ölmüş olabilir, bunu iç gözlemci üçüncü dakikada teşhis et-

55. Not: “İç gözlemci”ye literatürde “Wigner’in Arkadaşı” (*Wigner’s Friend*) olarak da rastlayabilirsiniz.

miş olacaktır. Hâlbuki dış gözlemci yarım saat sonra kapağı açacağı için kedinin başına ne geldiğini ancak o zaman görecektir, yani iç gözlemci ve dış gözlemciye göre farklı zamanlarda dalga fonksiyonu farklı değerlere çökebilir mi? Demek istiyorum ki, üçüncü dakikada ölmüş olan bir kedi için çöken dalga fonksiyonu, 27 dakika sonra kedinin canlı olduğunu dış gözlemciye gösterecek bir şekilde tekrar çökebilir mi? Peki o zaman dış gözlemci daha neyi bekliyor, 27 dakika önce fiziksel gerçeklik belli olmadı mı ki kutunun açılmasıyla olasılıklardan biri gerçekleşerek fiziksel gerçeklik ortaya çıksın? Sadece dış gözlemcinin olduğu, iç gözlemcinin bulunmadığı bir deneyde bile, kuantum mekaniğinin olasılıkçı yaklaşımına göre, kapak açılana kadar kutudaki kedinin hem canlı hem de ölü olduğuna sizce inanılabilir mi? Kopenhag'cılara göre ise; iç ve dış gözlemciler başlangıçta sistem hakkında farklı bilgilere sahip olduklarından, bu gözlemciler için tüm sistemi tanımlayan farklı dalga fonksiyonu tanımları mevcuttur. Schrödinger ise, bunun oldukça bulanık bir açıklama olduğunu söyleyerek ikna olmamıştır. Neyse ki kuantum dünyasındaki bu şaşırtıcı olgularla makro dünyamızda doğrudan karşılaşmıyoruz.

Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoksu

Ayrılabilirlik ile yerellik kavramını esas alarak tasarlanan bir düşünce deneyi olup, Einstein, Podolsky ve Rosen tarafından beraberce geliştirilmiştir. Aynı zamanda kuantum mekaniğinin, fiziksel gerçekliği sağlayarak tamamlanmış bir kuram olup olmadığının sınındığı bir düşünce deneyidir. Bu düşünceye göre, eğer bir kuantum sisteminin bir ögesine ait niceliği, ögede bir değişikliğe neden olmadan kesinlikle ölçebiliyorsak, yani makaysız(!) halini görebiliyorsak, o ögenin gerçek olduğunu söyleyebiliriz. Hatırlarsanız, Heisenberg'in belirsizlik ilkesini konuşurken, kuantum mekaniğine özgü bir sistemin bir ögesine ait herhangi bir niceliğin ölçümü sırasında onu tedirgin ederek, onun saf ve gerçek yapısını bozuyorduk. EPR'nin iddiası ise; *ölçelim ama bozmayalım* esasına dayanır, eğer bunu sağlayabilirsek,

örneğin bir parçacığın saf hali bozulmayacak ve bize gerçek yüzünü gösterecektir. Bunu nasıl yapabiliriz? Üstatlar şöyle bir deney düşündüler; başlangıçta tek bir parçacıktan oluşan bir sistem aniden bozunarak zıt yönlerde doğru yayılan iki ayrı parçacığa dönüşebilir ki bu zaten parçacık fiziğinde karşılaşılan bir durumdur. Örneğin bir foton aniden bir elektronla bir pozitrona bozunabilir. Elektronun yükünü ölçersek, pozitronun yükünü de zaten onu tedirgin etmeden bilebiliriz (ölçmüş oluruz), çünkü fiziğin en temel korunum yasalarından biri de yüklerin korunumudur.⁵⁶ Fotonun yükü sıfır olduğundan, bozunmadan sonra da toplam yükler sıfır olmalıdır. Bu işlem yüklerin ölçülmesiyle yapılabileceği gibi, konum ve momentum değerleri için de yapılabilir. Dolayısıyla pozitronun gerçek olup olmaması konusunda karar vermemiz için illa ki onu gözlemleyip dalga fonksiyonunun çökmesini beklememize gerek yoktur, buna göre, demek ki dalga fonksiyonunun çökmesiyle fiziksel gerçeklik kavramının bir ilgisi yoktur. Biz gözlem yapsak da yapmasak da pozitron oradadır ve bir gerçekliğe sahiptir. Haydi bakalım, aldı mı Kopenhag'lıları bir düşünce, ileri sürülen fikirler itiraz edilemeyecek kadar açık ve netti. Bu durum Bohr'un moralini çok bozmuştu ama yoğun çalışmalar sonunda yine de bir karşı tez ileri sürebilmişti. Bu tez şuydu; parçacıklar şu anda ayrı konumlarda birbirinden çok uzakta olsalar bile başlangıçta aynı kuantum olayının (bozunmanın) ürünüdürler ve tüm sistemi tanımlayan başlangıç dalga fonksiyonunun ayrılmaz bir parçasıdır, yani birbirlerine dolaşıktırlar görüşünü ileri sürerek topu kuantum dolaşıklığı/dolanıklığı kavramına atmıştır. Buna göre başlangıçta aynı kuantum sistemine ait bir parçacık için yapılan ölçüm sonucunda, gerçekliği sağlayan dalga fonksiyonu çökmeden önce diğer parçacığın gerçekliğinden hala bahsedilemez. Birine ait dalga fonksiyonunun çöktüğü (ölçüm yapıldığı) bilgisi diğerine ulaştığı anda onun gerçekliği başlar, yani ölçülecek olan fiziksel niceliğinin değeri belirlenmiş olur. Bu dolaşık parçacıklar ara-

56. Not: Literatürde bu tartışma, açı momentumunun ve dolayısıyla toplam spinin korunması ilkesi üzerinden yürütülür.

sındaki uzaklık ışık yılları basamağında da olsa, birinde yapılan ölçüm diğerini anında etkilemektedir. Uzaktan etki kavramına göre birinin etkilendiği bilgisini taşıyan şey her neyse, ışık hızından daha da hızlı gidip diğerine haber mi vermektedir? Peki, bu durum görellilikle çelişmiyor mu? Işık hızı aşılabılır mı? Telaşlanmayın görelliliğe bir şey olmuyor, bu sorun iki parçacık arasında bilgi taşıma amaçlı hiçbir sinyalin gönderilmediğinin kabulüyle aşılmış oldu. Ancak bu görüşler Einstein'ı ve onun gibi düşünenleri hiçbir zaman tam olarak tatmin etmemiştir. Ama ne var ki, "Yerellik" olgusunun kuantum mekaniği dünyasında yerinin olmadığını artık biliyoruz. Bu sonuca göre *yerellik* kavramı kuantum dünyasında geçersizdir, yerelliğin bittiği yerde başlayan *kuantum dolanıklığı* ise doğanın gerçek ve büyültü bir özelliğidir.

Fiziğin her bir konusu sonsuza ıraksadığı için, kitabın hacminde oluşabilecek sonsuzlukları önlemek amacıyla bu tartışmayı *normalize ederek(!)* sonlandırmak istiyorum. Bu konuları ilginç bularak biraz daha "zoom" yapmak isteyenler, David Bohm'un "Gizli Değişkenler" (*Hidden Variables*)⁵⁷ yorumu ile John Stewart Bell'in "Bell Eşitsizliği" (*Bell's Inequality*)⁵⁸ adlı çalışmalarını inceleyebilirler.

57. <http://tkpi.org/library/david-bohm-bibliography>, Ocak-2011, (Bohm'a ait çalışmaların referanslarını içerir)

58. http://en.wikipedia.org/wiki/Bell's_theorem, Ocak-2011

Parçacık Fiziği, Standart Model, Etkileşmeler ve Kuvvetler

Şimdi isterseniz hep beraber fiziğin en derinlerine inerek, maddenin en küçük yapı taşlarını ve onların birbirleriyle nasıl etkileştiklerini konuşalım. Bu etkileşmeler bazında fiziğin tüm evreni nasıl derleyip toparladığını ve olayları nasıl sınıflandırdığını göreceğiz. Bu çerçeveden bakınca, doğadaki her sürecin ve olayın perde arkasında fiziğin olduğunu zaten siz kendiniz göreceksiniz. Sanırım çoğumuz, örneğin elimizde tuttuğumuz bir cam veya tahta parçasının en küçük biriminin nasıl bir şey olduğu sorusunu bir şekilde aklımızdan geçirmişizdir. Doğanın bu en mikro yüzü ile maalesef gündelik yaşantımızda sıradan insanlar olarak karşılaşmamız mümkün değildir. Yaradılışın bu en akıl almaz, en muhteşem ve en büyüleyici yüzünü görebilme şansı, ancak parçacık fizikçilerine, atom ve çekirdek fizikçilerine ve katihal fizikçilerine bahsedilmiştir. Bu fizik dalları bazı konularda kaçınılmaz olarak birbirleriyle deyim yerindeyse hafifçe *girişim* yaparlar. Bunu çok doğal kabul etmeliyiz, 10^{-17} - 10^{-18} m.'ye kadar geçerliliği sınanmış olan kuantum mekaniğini kullanan

bu fizik dallarının bu kadar dar alanda dans ederken birbirlerinin ayağına hafifçe dokunmasını olağan karşılamalıyız.

7.a. Parçacık ve Parçacık Fiziği Ne Anlama Gelir?

En başta bu noktada bir hatırlatma yapmak gerekir kanısında-yım. Parçacık fiziği, daha önceki konularda tartıştığımız gibi klasik fizik ile kuantum fiziğini ayırt ettiğimiz anlamda felsefi açıdan apayrı bir fizik değildir, kuantum fiziğinin göreliliği ve kuantum alan yaklaşımını içeren daha derin bölgeleridir. Parçacık fiziğinin deneyleri yüksek enerjili parçacıkların çarpıştırılması esasına dayandığından, parçacıklar ışık hızına yakın hızlarda hareket ederler ve dolayısıyla parçacık fiziği bir “rölativistik kuantum alan” kuramıdır.

Bu zamana kadar bilerek gündeme getirmedim ama şimdi artık söylemek zorundayım. Schrödinger denklemlerini tartışırken, bu denklemlerin doğası gereği, ışık hızını dikkate almadığımız göresiz (*nonrelativistic*) parçacıkların hareketleriyle ilgilenmiş ve parçacıkların yaratılması/yok edilmesi konularını gözardı etmiştik. Hatırlarsanız, Schrödinger denklemi özünde göresizdir, daha sonra bazı görelî formları geliştirilmiştir.⁵⁹ Parçacık fizikçileri, “doğanın doğasında” bulunan görelî hareketleri ve yaratma-yok etme süreçlerini dikkate almak zorundadır. Bu “yaratma-yok etme” veya “yaratılma-yok olma” ne anlama gelir? Hemen bu noktada madde yaratma-yok etme sürecine bir örnek vereyim ve ne demek istediğimi somutlaştırayım; gama ışınları aslında fotonlardır ve bu ışınlar bir atomun elektrik alanı içinden geçerken bir elektron-pozitron çifti yaratılır, yani bir elektromanyetik ışınım türü olan yüksüz ve kütesiz gamadan iki adet kütleli ve zıt yüklü parçacık yaratılmıştır. Bunun tersi olan bir süreç ise; bir elektronla bir pozitronun çarpışarak yok olmaları ve onların yerine bir fotonun yaratılmasıdır. Bu süreç bir *yok etme/yok olma* (*annihilation*) sürecidir. Parçacık fiziği dünyasında parçacıklar genellikle rölativistik hızlarla hareket ettiklerinden,

59. Not: Dirac denklemi görelî formlara örnek verilebilir.

denklemler göreceli olarak ele alınmalıdır. Bu süreçleri dikkate alan parçacık fiziğinin dili, kuantum mekaniğinin çok daha ince ve derin konuları olan *kuantum elektrodinamiği* ve *kuantum kromodinamiğidir* (renk dinamiği). Bu iki “dinamik”, daha önce sözünü ettiğimiz *kuantum alan kuramı* çerçevesinde ele alınır. Kuantumlanan alanların kuantumu, yani kuvvet taşıyan parçacıklar, etkileşmelerin şiddetine göre adlandırılır (foton, gluon v.b.). Bir sonraki sayfada *Standart Modeli* anlatırken bunlara daha yakından bakacağız. Bu arada parçacık fiziğine (*Particle Physics*) yüksek enerji fiziği (*High Energy Physics*) de denildiğini yeri gelmişken hatırlatayım. Parçacık fiziği veya yüksek enerji fiziği, doğadaki en mikro ve en temel olan parçacıkların sırrına erişmeyi hedefleyen bir fizik dalıdır.

Öncelikle soralım, “parçacık” ve “temel parçacık” ifadesinden ne anlıyoruz? Temel parçacık/parçacıklar (*elementary/fundamental particles*) dediğimiz yapılar, maddeyi sürekli bölerek ulaşabileceğimiz, maddenin artık bölünemeyen en küçük parçalarıdır. *Parçacık* denildiğinde ise genellikle temel parçacıklara ek olarak, proton, nötron gibi atom çekirdeğini oluşturan nükleonlar, yüksüz atomlar ve moleküller gibi bileşik (*composite*) yapılar ile alfa parçacığı gibi iyonik atomları da içeren kuantum mekaniğine özgü daha genel mikro oluşumlar kastedilir. Hemen temel parçacıklara bazı örnekler verelim; elektron ve onun antimaddesi pozitron, zayıf etkileşmenin simgesi nötrinolar, güçlü etkileşen fermiyonlar diyebileceğimiz kuarklar, hatta durgun kütlesi sıfır olan fotonlar, daha alt kısımlara bölünemeyen en temel yapı taşları olarak örneklenebilirler. Önceleri temel parçacıklar olarak bilinen ve atom çekirdeğini oluşturan proton ve nötronun, çeşitli adlar altında sınıflandırılan ve adına “kuark” (*quark*) denilen daha temel üçlü yapılardan oluştuğu artık bilinmektedir. *Quark* ismi, İrlandalı edebiyatçı James Joyce’un “*Finnegans Wake*” adlı ünlü eserindeki ördeklerin çıkardığı seslerden esinlenen kuarkların kaşifi Gell-Mann tarafından önerilmiştir.⁶⁰ Bu durumda

60. Fundamentals of Physics, D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Sayfa: 32, J. Wiley & Sons Inc.

proton ve nötrona bu yüzden artık bir *temel parçacık* diyemesek de sadece *parçacık* diyebiliriz. Bu açıklamalar dikkate alındığında, periyodik cetveli oluşturan elementler tablosundaki atomlar ile atomların bir araya gelmesiyle oluşan moleküller bu anlamda temel parçacık olarak adlandırılmaz. Çünkü atomlar bir veya birden çok *nükleon* ve elektronlardan oluşurlar. Bunlara tek protonlu hidrojen ile 92 protonlu uranyum elementlerinin atomlarını örnek verebiliriz. Moleküllerden örnek vermek gerekirse; hepimizin bildiği ve suyun *su olma özelliğini* taşıyan en küçük birimi olan su molekülü, 2 adet hidrojen ve 1 adet oksijen atomunun bileşik bir yapısıdır.

Şimdi şöyle bir soru akla gelebilir; dünün bölünemez diye bilinen temel parçacıkları zamanla bölünebilir olmuşlardır, acaba örneğin nötrinolar, elektronlar veya kuarklar ilerideki bir tarihte bölünebilirler mi? Yapılan tüm kuramsal ve deneysel çalışmaların ışığında fizikçilerin ortak kanısı, artık galiba sona gelindiği ve bunların daha küçük parçalara bölünebilme olasılıklarının hemen hemen hiç olmadığıdır. İleride kuarklardan bahsederken neden fizikçilerin böyle düşündüğünü anlayacağız.

7.b. Standart Model

Parçacık fizikçileri ve parçacıklar, son zamanlarda olduğu gibi, ara sıra gazetelerde yer alan popüler CERN deneyleri nedeniyle saman alevi gibi gündeme gelir ve kaybolurlar. Bazı fizikçiler çeşitli kanallarda açık oturumlara davet edilir, çünkü o günün modası gereği reyting için buna gereksinim vardır. Sıradan vatandaşlar ise bu deneylerde ne yapıldığını, ne amaçlandığını, nereye varılmak istendiğini algılayamaz, büyük bir tedirginlikle Tanrı'nın işine karışıldığını, dünyanın yok olacağını, her nereden duyuyorlarsa kara deliklerin oluşup bizleri yutacağını ve büyük bir patlamanın gerçekleşeceğini düşünürler. Ama bilemezler ki parçacık fiziğinde kastedilen çok büyük çarpışma enerjilerinin, günlük yaşamımızda karşılaştığımız enerji değerleri yanında çok çok küçük kaldığını. Buna benzer çekinceler

nükleer santrallerin gündeme geldiği zamanlarda da gözlenmektedir. Bunları doğal karşılamak gerekir, çünkü insanoğlu bilmediği şeylerden korkar ve çekinir. *Paganizmin* yaşandığı dönemlerde de dolunaydan korkularak aya kurbanlar verilirdi, sonraki dönemlerde ayın ne olduğu anlaşıncaya bırakın korkmayı aksine aya ve mehtaba romantik anlamlar yüklenmiştir, kurban edilenler de kurban edildikleriyle kalmışlardır. Yıldırımın, gök gürültüsünün ve şimşegin ne olduğu anlaşıncaya kadar da benzer süreçler yaşanmıştır. Günümüzde bile, televizyon, uzaya gidip gelmeler ve ileri teknolojik cihazların kullanılması gibi konulara hala bir takım şüphe ve tedirginliklerle bakanların olduğunu biliyorum.

Biz şimdi asıl konumuza dönelim ve parçacıklar dünyasının nasıl bir dünya olduğuna bakalım. Parçacık fiziği dünyasının kapısını yavaşça aralayıp baktığımızda; hadronlar, mezonlar, leptonlar, gluonlar, kuarklar, bozonlar, fotonlar, fermiyonlar, nötrinolar, baryonlar, müonlar, hiperonlar, rezonanslar, virtüel parçacıklar, Z^0 bozonları, fotinolar, winolar v.b. daha yüzlerce sözcüğün ve parçacığın havalarda uçtuğunu görürüz. Bunlar nedir? Ne anlama gelirler? Nasıl etkileşirler? Bunlarla nasıl baş edeceğiz? Özellikleri nelerdir? Nasıl sınıflandırılırlar? İlk bakışta çok şaşırtıcı gelir insana, mikro dünyada uçuşan ve çeşitli özelliklere sahip bu ele avuca sığmaz parçacıklar neyin nesidir? Üstelik kendileri yetmezmiş gibi bir de bunların karşıt parçacıkları var, süper partnerleri var, renk yükleri var, yaşam süreleri var vesaire vesaire... Eğer bunları anlayabilirsek, tüm evrende işleyen doğa olaylarının tümünü kuşbakışı görebilecek ve çevremizde cereyan eden tüm fiziksel doğa olaylarına başka bir gözle bakabileceğiz. Özellikle etkileşmeleri (interactions) sınıflandırdığımızda göreceğiz ki; bize çok karmaşık gelen fiziksel olaylar gözümüzde çok duru, sade ve basit bir hale dönüşecektir. Bu işin altından kalkabilmek için, aşağıda vereceğim "Standart Model" in klasik bir tablosu ile işe başlamak gerektiğini düşünüyorum (Tablo-1).⁶¹ Bu tabloda temel

61. http://www.google.com.tr/images?hl=tr&rlz=1T4GGLR_trTR375TR376&q=bozonlar&um=1&ie=UTF-8&source=og&sa=N&tab=wi&biw=1259&bih=811, Kasım-2010

Maddenin Üç Nesli (Fermiyonlar)			
	I	II	III
kütle→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
yük→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
ad→	yukarı	üst	alt
Kuarklar	4.8 MeV	191 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d	s	b
	baş	acıyıp	alt
Leptonlar	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e	ν_μ	ν_τ
	elektron nötrino	müon nötrino	tau nötrino
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e	μ	τ
	elektron	müon	tau
Bozonlar (kuvvetler)			

Tablo-1: Standart Modele Göre Fermiyonlar ve Bozonlar

parçacıkların kütleleri, yükleri, spinleri ve adları yer almaktadır. Bu bölümde konuşacağımız kavramların temelini Tablo-1 oluşturacaktır ve tüm referanslarımızı bu tablodan alacağımızı peşinen söyleyeyim. Aslında bu tablo maddenin en temel yapı taşlarını ve onlar arasındaki etkileşimleri özetleyen bir kılavuздur. Bu kılavuz der ki; evrendeki tüm etkileşimler (şimdilik kütle çekimi hariç) fermiyonlarla bozonlar arasında oynanan bir oyundur. İşte ilk adımımızı attık ve her şeyi iki tür parçacığa indirgeyerek cam gibi durulaştırdık. Kütle çekimi dışında aklınıza gelebilecek her tür etkileşim fermiyonlarla bozonlara indirgenir veya başka bir deyişle kuarklara, leptonlara ve

*kuvvet taşıyıcılara.*⁶² Kütleçekimi ise şimdilik biraz daha ayrı ve farklı bir yerde durmaktadır, bunun neden böyle olduğuna ileride değineceğim. Gordon Kane'in dediği gibi; Standart Model, daha önce bahsettiğimiz şekilde tüm kimyanın, maddenin ne olduğunun, yıldızların davranışının, yani etrafımızda gördüğümüz her şeyin temel fiziksel kuramıdır.

Peki, tablodaki şeyler(!) nedir, in midir cin midir? Tabloyu nasıl yorumlayacağız? Her şey bu kadar basit mi? Eğer bu kadar basit idiyse neden bu kadar bekledik? Şaka bir yana, çok basit gibi gözükmesine rağmen işlerin bu noktaya gelebilmesi için fizikçiler kuantum mekaniğinin başladığı 1900'lü yılların başından beri günümüze kadar yüzyılı aşkın bir süredir büyük çaba sarf etmişlerdir ve hala daha bu çabaları yoğun bir şekilde sürmektedir, çünkü bilemediğimiz daha çok şey var. Bu işler "*Lepton yaz 3333'e gönder, cevabı cebinize gelsin*" türünden işler değildir, yoğun emek, zaman ve çalışma ister. Ancak fizikçiler zorlu uğraşlardan sonra yukarıda çok genel bir görüntüsünü verdiğimiz kuarklar, leptonlar ve bozonlardan oluşan temel yapılar üzerinde ortak bir anlayışa varmışlar ve parçacık fiziğini "*Standart Model*" dediğimiz bu temel üzerine oturtmuşlardır. Standart Model, temel parçacıkların fiziğini ve onların nasıl etkileştiklerini söyleyen bir kuramdır. Tabloda sağa doğru nesilden nesile doğru ilerledikçe parçacıkların kütlelerinin arttığına dikkat ediniz. Birinci nesil (kuşak, aile) diğerlerine göre daha kararlı ve daha hafif parçacıkları içerir. İkinci ve üçüncü nesiller ise daha ağır ve kararsız parçacıklardan oluşur. Evrendeki kararlı maddelerin tümü birinci nesildeki lepton ve kuarklardan meydana gelmiştir.

İsterseniz tabloyu yorumlayarak yolumuza devam edelim ve öncelikle fermiyon, bozon, kuark ve lepton kavramlarının ne anlama geldiğine bakalım. Parçacıkların sınıflandırılması, olayları anlamak bakımından bence çok önemli bir yer tutmaktadır. Özelliklere göre sınıflandırma, bir anlamda *neyin ne olduğunun* durulaştırılmasıdır.

62. Not: Kuvvet taşıyıcılara aynı zamanda "*mesajcı parçacıklar*" (*messenger particles*) adı da verilmektedir.

Burada bir uyarı yapmakta fayda var; kuarklar, leptonlar ve bozonlar bizim artık bölünmelerinden ümidimizi kestiğimiz, maddenin bölünemeyen en temel fiziksel yapılarıdır. Evrendeki tüm maddeler, kuarklar ve leptonların uygun bir şekilde bir araya gelmesi ile oluşmuşlardır. Protonlar, nötronlar, hadronlar (baryonlar ve mezonlar) gibi tüm bileşik yapılar da dahil olmak üzere bunlardan oluşurlar. Bozonlar da temel parçacık olmalarına rağmen rolleri biraz farklıdır. Bunların doğada nasıl görevlendirildiklerini ileride “etkileşmeler ve kuvvetler” adlı bölümde anlatacağım.

Doğaldır ki parçacık fiziğini tartışırken en ana özelliklerini göz önüne sermeye çalışacağım. Tahmin ettiğiniz gibi, parçacık fiziği de doğanın en mikro yüzü olmasına rağmen çok derin ve çok geniş bir alanı kapsamaktadır, dolayısıyla detaylara girerek hiçbir zaman çıkamayız, çünkü parçacıkların düşünemeyeceğiniz kadar ayrıntılı özellikleri vardır. Hele ki matematiğine hiç girmeyeceğiz, sadece nasıl bir şey olduklarını söyleyip teğet geçeceğiz.

İstatistiğe Gönül Vermiş Parçacıklar:

Fermiyonlar ve Bozonlar

Aklınıza gelen parçacıkların tümü kendilerine özgü davranışlarını doğada sergilerken istatistik anlamda iki tür özellik gösterirler. Bunların bazıları Fermi-Dirac istatistiğine uyan davranışlar gösterir ve biz bunlara Fermi ve Dirac’a ithafen *fermion* (*fermion*) deriz. Fermiyon isminin neden Dirac’ı çağrıştırmadığı akla mutlaka gelecektir. Bunun ilginç bir açıklaması vardır ve bu açıklamaya göre Dirac, büyük bir alçakgönüllülük göstererek bu tür parçacıklara fermiyon denilmesini kendi önermiştir. Fermiyonların iki özelliği vardır; birincisi daha önce değindiğimiz Paoli’nin dışarlama ilkesine uymalarıdır. Bir önceki bölümden hatırlayacağınız gibi aynı anda iki fermiyon aynı kuantum durumunda bulunamıyordu. İkinci özellikleri ise fermiyonların spinlerinin n tamsayılar olmak üzere “ $n+1/2$ ” kesikli değerlerini ya-

ni ($1/2, 3/2, \dots$) alabiliyor olmalarıdır.⁶³ Spin değerlerinin kesikli olması bize hemen Planck sabitinin işin içinde olması gerektiğini hatırlatmalıdır. Gerçekten de öyledir, bizim $1/2, 3/2$ gibi gördüğümüz spin değerlerinin hepsinin başında “ h -çizgi veya h -bar” dediğimiz “ $h/2\pi$ ” çarpanı vardır.

Yani, aslında ($h/2\pi \times 1/2, h/2\pi \times 3/2, \dots$) yazmalıyız, ancak daha önceki konularda değindiğimiz gibi, hesaplamalarda daha sade görünmesi bakımından “ $c=1, h/2\pi=1$ ” olarak kabul ettiğimizden, bu kesirli sayıları Planck sabitini kullanmadan yazıyoruz, ama sakın işin içinden keyfi olarak Planck sabitini çıkarabileceğimizi düşünmeyin. Bu sabit, tüm kuantum davranışların ruhunda gizlidir, onu oradan söküp atamazsınız. Burada da tekrar gördüğümüz gibi, kuantum dünyasındaki her nicelik kesikli ve süreksiz değerlerle ifade edilmektedir.

Öte yandan bazı parçacıklar ise Hintli fizikçi Bose ve Einstein’ın birlikte geliştirdikleri istatistikî bir davranış biçimine uyarlar ve Bose’a ithafen bu parçacıklara *bozon* (*boson*) adı verilmiştir. Bose’un istatistikî çalışmalarının temelindeki matematiğin, fizik açısından ne anlama geldiğini Einstein yorumlamıştır, hatırlarsanız, Philipp Lenard’ın fotoelektrik konusunda yaptığı çalışmaları da Einstein yorumlayarak son şeklini vermiş ve bu çalışmasıyla Nobel almıştı. İşte fiziğin özüne matematikten sıyrılarak bakabilmesi ünlü üstadın karakteristik özelliği idi. Eğer öyle olmasaydı, Einstein, *genel görelilik* gibi insan aklının ulaşabileceği en üst sınırı zorlayabilir miydi? Konumuza dönersek fermiyonların tersine, bozonlar *Pauli Dışarlama İlkesi*’ne uymazlar, yani aynı anda birden fazla bozon aynı kuantum durumunda bulunabilir. Ayrıca bozonların spinleri kesirli sayılardan değil, yine yukarıda bahsettiğimiz gibi başlarında “ $h/2\pi$ ” çarpanı olan tam sayılardan ($0,1, \dots$) oluşur. Bu modele göre, gerçek maddesel parçacıklar olan kuarklar ve leptonlar fermiyondur. İleride göreceğimiz gibi, bo-

63. Not: Spin, parçacıkların kendi eksenleri etrafındaki dönüşüne verilen isimdir. Bu dönüşün yönüne bağlı olarak spin vektörü de belirli bir yönü gösterir. Spin vektörünün belli bir yöne doğru yönelmesine “*spin kutuplanması*” (*spin polarization*) adı verilir.

zonlar da, fermiyonlar arasındaki etkileşmelerin temeli olan kuvvetlerin taşıyıcısı olan gerçek parçacıklardır.

En Küçük Temel Parçacıklar:

Leptonlar, Kuarklar ve Bozonlar

Tablomuzda görüldüğü gibi 6 tür lepton vardır. *Lepton* adı Yunanca *leptos* (*hafif, küçük*) sözcüğünden gelir. Yine Yunan alfabesindeki bir harfle gösterilen tau (τ) parçacığı biraz ağırdır ama lepton ismi taunun bulunmasından önce koyulduğu için artık idare edeceksiniz. Bu leptonlar; elektron, müon, tau, elektron nötrino(su), müon nötrino(su) ve tau nötrino(su) olmak üzere *zayıf etkileşme* yapan hafif parçacıklardır. Nötrino (*neutrino*) denmesinin nedeni, bu parçacıkların yüksüz (*neutral*) olmasıdır. Parçacık fiziğinde kütleleri enerji cinsinden söylemek adetten olduğu için, tablodaki eV, MeV, GeV gibi değerler enerji boyutunda olmalarına rağmen kütleleri gösterir ($E=mc^2$ 'yi unutmayalım).⁶⁴ Kuarklar ile leptonlar arasındaki kütle farkına baktığımızda, genelde kuark kütlelerinin lepton kütlelerinden daha ağır olduklarını görürüz. *Demek ki genel olarak leptonlara kütlece daha hafif ve zayıf etkileşme yapan parçacıklar gözüyle bakabiliriz. Leptonların, fermiyon olduğunu daha önce söylemiştim.*

Peki ama tablodaki kuarklar neyin nesidir? *Kuarklar, leptonlara kıyasla kütlece daha büyük olan ve kuvvetli etkileşmelere giren fermiyonlardır.* Kuarkların da yukarı (*up*), aşağı (*down*), büyüğü/tılsımlı (*charm*), acayip (*strange*), üst (*top*), alt (*bottom*) olmak üzere 6 çeşidi vardır ve bunların her birine bildiğimiz bir sözcük olan *çeşni* veya *tat* (*flavour*) denmektedir, yani kuarkların 6 çeşit *tadı* vardır. Örneğin protonlar, 2 yukarı ve 1 aşağı kuarktan oluşurlar, nötronlar ise 2 aşağı ve 1 yukarı kuarktan oluşmaktadır. Kuark kuramını ileri sürerek 1969 Nobel Fizik Ödülü'nü almış olan *Murray Gell-Mann'ın*, ördeklerin çıkardığı seslere benzeterek bu

64. Not: Aslında kütle için, örneğin MeV/c² dememiz gerekir, ancak işlemleri kolaylaştırmak bakımından $\hbar/2\pi = 1$, $c=1$ kabul edip, kütle için MeV veya GeV diyoruz.

parçacıklara “*quark*” adını verdiğini daha önce söylemiştik. Kendisine Nobel verilme bile, daha yüksek lisans öğrencisiyken kuarkların varlığını *Gell-Mann*’dan bağımsız olarak ileri sürmüş olan Feynman’ın öğrencisi *George Zweig*’ı bu bölümde anmadan geçemeyiz. Kuarkların *tatlarının*, *spinlerinin* ve *elektrik yüklerinin* yanı sıra kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere bir de *renk yükleri* (*color charge*) vardır. Ancak bu renkler bildiğimiz görüntüsel renkler değildir. Bunları, şimdilik soyut olarak kuarkları tanımlayabilmek üzere kuantum kromodinamiğin önerilen parçacık özellikleri olarak belleyelim. Belki yine de bu renklerin anlamını bir örnekle somutlaştırabiliriz; farklı renklere sahip üç kuark bir araya geldiğinde nötr bir renk yükünün ortaya çıkmasına neden olurlar. Hani kırmızı, yeşil ve mavi renkleri birleştirdiğimizde beyaz rengi elde ediyorduk ya, aynı onun gibi. Tüm kuarkların ve renk yüklerinin karşıtlarının bulunduğunu da bilgilerimize ilave edelim. Örneğin bir yeşil renk yükünün karşıtı *karşıt-yeşil* olarak adlandırılır ve üç renk yükünün karşıtları da birleştirildiğinde ortaya sıfır renk yükü çıkar. Aynı şekilde bir *yukarı kuarkın* karşıtparçacığı bir *anti-yukarı kuark*dır.

Kuarkları birbirinden ayırarak serbest bir parçacık şeklinde tek başlarına incelemek mümkün değildir. Çünkü kuarkları birbirinden uzaklaştırmaya başladığımızda onları bir arada tutan kuvvet büyümeye başlar, yani birbirlerinden ne kadar uzaklaştırsak aralarındaki çekici kuvvet o kadar büyür ve sonsuza gider. Bu demektir ki; biz kuarkları hiçbir zaman birbirlerinden ayıramayacağız. Bu duruma *kuark hapsi* veya *renk hapsi* denilmektedir, yani kuarklar kendileri için inşa edilmiş bu *hapishane*den(!) herhangi bir yolla kaçamamaktadırlar, yani sonsuza kadar hadronların parmaklıkları altında kalmak üzere müebbet mahkûmdurlar. Kuarkları birbirlerinden ayırıp tek tek incelemeyeceğimiz gerçeği, bizi artık bu parçacıkların bölünmesinin de büyük ölçüde mümkün olmadığı düşüncesine götürmektedir. Kuramsal öngörüler açısından kuarklar, ancak *asimptotik* olarak çok kısa çekirdek içi mesafelerde veya çok yüksek enerjilerde tıpkı serbest parçacıklar gibi davranırlar, kendilerine etkiyen hiçbir

kuvvet hissetmezler, yani artık özgürdürler..! Kuarklara özgü bu davranış biçimine “asimptotik özgürlük” (*asymptotic freedom*) adı verilir.⁶⁵

Bu en temel, bölünemez yapılara hafifçe değindikten sonra, biraz da bu temel yapılardan oluşan bileşik (*composite*) parçacıklara daha yakından bakalım.

Kuark Mapushaneleri: Hadronlar (Hadrons)

Çok detaylı ve derin konular olmasına rağmen hadron, baryon ve mezon gibi parçacık fiziğinin doğal yapılarına çok kısa bir şekilde değinelim derim. Aksi halde konuşmalarımız eksik kalacaktır. Hadronlar, kuarklardan oluşan ve kuvvetli etkileşmelere giren *bileşik* parçacıklardır. Yunanca *hadros* kelimesinden esinlenilerek adlandırılan hadron güçlü, kuvvetli anlamına gelmektedir. Hadronların iki türü vardır; (i) *baryonlar* ve (ii) *mezonlar*. Klasik hadronların uzantısı olarak, 3 adet kuark ile bir veya iki temel parçacığın birleşiminden oluşan hadronik yapılara ise genel adıyla *egzotik hadronlar* denmektedir. 4’lü kuark içeren yapılara tetraquark, 5’li kuark içeren yapılara ise pentaquark adı verilir.

(i) Ağır Abiler: Baryonlar (Baryons)

Baryonlar üç kuarktan oluşan parçacıklardır, kuvvetli etkileşmelere girerler ve Yunanca “*ağır*” sözcüğüne karşılık gelirler. Antibaryonlar ise üç adet antikuarktan oluşurlar. Kesirli spin değerleri alabilmeleri ve Pauli ilkesine uymaları sonucunda baryonlar fermiyonlar olarak yorumlanır. Proton, nötron, antiproton, lambda, omega gibi parçacıklar baryonlara örnek olarak verilebilir. Proton, çekirdeğin dışında ayrık ortamda kararlı (*stable*) yapıdadır, ancak nötronun kararlılığı sadece çekirdek içinde geçerlidir. Son zamanlarda Higgs parçacığını bulmak üzere

65. Not: *Asimptot*, matematikte bir eğrinin koordinat sisteminin eksenleriyle sonsuzda kesiştiği, yani aslında hiçbir zaman kesişmediği, ama eksenle eğrinin *neredeyse* aralarındaki mesafenin sıfır olduğu sınır durumu ifade eder. Buna benzer olarak, kuarklar arasındaki mesafenin ancak *neredeyse* sıfır olduğu asimptotik durumda kuarklar için özgürlükten bahsedilebilir. Tabii buna özgürlük denilirse...!

CERN’de yapılan yüksek enerjili çarpışma deneylerinde adı sıkça geçen büyük hadron çarpıştırıcısında (*LHC-Large Hadron Collider*) protonlar çarpıştırılmaktadır. Demek ki; hadronların alt grubu olan baryonların bir üyesi olan protonun çarpıştırılması gibi deneylere, neden hadron çarpışması dendiği böylece açıklığa kavuşmuş oldu değil mi? Bu arada bir açıklamada bulunayım; neden bu parçacıklar yüksek enerjiyle çarpıştırılmaktadır ve neden çarpıştırıcıların enerjisi her deneyde sürekli artırılmaya çalışılıyor? Parçacıklar ne kadar yüksek enerjiyle çarpıştırılırsa, deney sonucunda şimdiye kadar rastlayamadığımız alt parçacıkların ortaya çıkma olasılığı o kadar artıyor da ondan. Yani ne kadar enerji, o kadar çeşitli parçacık. Düşünce gücümüzü kullanırsak, çarpışma enerjilerini çok çok yükselttiğimiz takdirde, yapılacak deneylerde kuramsal olarak varolması beklenen parçacıkların çoğuna/tümüne ulaşabilmeyi başarabiliriz. Çünkü kütle-enerji eşdeğerliğine göre çarpışma enerjisi, çarpışmada ortaya çıkacak parçacıkların kütlelerini oluşturacaktır, çarpıştırıcılardaki bu enerji ne kadar büyükse o kadar çeşitli kütleli parçacık ortaya çıkmalıdır.⁶⁶

Bu arada, konuştuğumuz konuların ilerlemesi sonucu bazı şeyler açıklığa kavuşurken bazı kavramlar da karışmaya başlayabilir, aman dikkat edelim! Neden mi? Örneğin protonu ele alalım; proton kuarklardan (*up, up, down*) oluşan hem fermiyon, hem hadron, hem de baryondur. Bunların ne anlama geldiğini hazmetmek üzere, bu noktada biraz durup kafamızı toparlamakta fayda var diye düşünüyorum ve bu *kafa toparlama* işini size bırakıyorum.

(ii) Orta Sınıfın Parçacıkları: Mezonlar (Mesons)

Mezonlar, bir kuark ile bir antikuarktan oluşan, hem zayıf hem de kuvvetli etkileşmelere girebilen ve renk yükü sıfır olan

66. Not: CERN’deki LHC çarpıştırıcısı halka şeklindedir ve çevresi 27km. dir. Bu tür çarpıştırıcılar *circular veya ring-shaped* olarak adlandırılır. Amerika’daki Fermilab da çevresi 6,3km. olan bu tür bir çarpıştırıcıdır. Çarpışma yolu doğrusal olanlara örnek olarak, yine Amerika’daki SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*) örnek verilebilir. Buradaki doğrusal hızlandırıcının uzunluğu 2 mildir.

parçacıklardır. Pauli dışarlama ilkesine uymadıklarından ve tamsayı spin değerleri alabilmelerinden dolayı mezonlar bozondur (kafiyeli oldu değil mi?). En çok bilinenlerine örnek olarak pion (pi-mezon), kaon (k-mezon), rho-mezonunu verebiliriz. Örneğin pi-mezonlar bir adet *up* ve bir adet *antidown* kuarktan oluşurlar. Mezonlar kararlı yapıda değildirler (*unstable*), çok çabuk bozunurlar, yaşam süreleri 10^{-8} - 10^{-10} sn. basamaklarındadır. Mezonların doğada var olması gerektiğini ünlü Japon fizikçi Hideki Yukawa 1934 yılında kuramsal olarak öngörmüştür ve bu öngörüsünün deneysel olarak gözlenmesiyle birlikte (on beş yıl sabrettikten sonra) 1949 yılı Nobel ödülüne layık görülmüştür. Bu örnek, hemencecik, en kısa sürede, fazla çalışmadan ve bedavadan başarı arzusuyla yanıp tutuşanlara ithaf olunur, tabi tüm gururu da Yukawa'ya ait olmak üzere. Düşünün bir kere, sadece matematiği ve düşünce gücünüzü kullanarak *Tanrı'nın yarattığı ve o zamana kadar bilinmeyen bir şeyin doğada var olmasının gerektiğine* karar veriyorsunuz, kendinizden eminsiniz ve on beş yıl bekleyip öngörülerinizin doğru çıktığını görüyorsunuz. Tıpkı Dirac'ın, pozitronun varlığının gerekli olduğunu söylemesi gibi, değil mi? Şimdi ise sırada Higgs var. Ne müthiş bir şeydir, ne müthiş bir duygudur bu! Bu örnek, çoğu fizikçinin başına gelen bir olaydır, çünkü fizikçiler kuramlarının sınanabilmesi için bazen teknolojinin gelişmesini uzun süre beklemek zorunda kalırlar. Neyse konumuza tekrar dönersek, mezonlar leptonlardan daha ağır ama baryonlardan daha hafif olduklarından, orta seviyenin ön takısı olan Yunanca *mesos*'dan esinlenen Yukawa tarafından öncelikle *mesotron* olarak adlandırılmıştı, ancak sonradan bu sözcük *meson* olarak anılmaya başlanmıştır. Bu isim değişikliğinde Heisenberg'in parmağı olduğu söyleniyor!

7.c. Etkileşmeler ve Kuvvetler (Interactions and Forces)

Tablo-1'de Standart Model'in öngördüğü yapılardan fermiyon adı verilen kuarklar ve leptonlardan çok kısaca bahsettik, ama

en sağ sütunda gösterilen bozonlara değinmemiştik. İşte şimdi onlara bulaşmanın zamanı geldi.

Fizikçiler için *etkileşme*; bir veya birden fazla parçacığın/alanların herhangi bir yolla birbirlerini etkilemeleri anlamına gelir. Birleşmeler, bölünmeler, bozunmalar, çarpışma sonucu yeniden düzenlenmeler, kimyasal bağ yapmalar, ışımalar, çekirdek kaynaşmaları, elektriksel etkileşmeler, birbirine elektromanyetik veya kütle çekim kuvveti uygulamalar gibi fiziksel olaylar etkileşmelere örnek olarak verilebilir. Etkileşmenin gerçekleşebilmesi için, bir parçacığın diğer parçacığın kuvvet alanını hissetmesi gerekir.

Fizikçiler çevremizdeki doğaya ve hatta evrenin tümüne baktıklarında dört çeşit etkileşme türü ve bu etkileşmelerde rol alan dört çeşit temel kuvvet görürler. *Bu dört çeşit temel kuvvetle doğada gözlediğimiz her fizik olayını açıklamamız mümkündür.* Canlı veya cansız süreçlerce içerilen en makrodan en mikroya kadar düşünebildiğiniz her ortamdaki, her büyüklükteki ve her cinsteki tüm fiziksel olayları bu etkileşmelerin altında gruplayabiliriz. Bu etkileşmeler sırasında devrede olan bu dört çeşit kuvvet, sırasıyla; *güçlü çekirdek kuvvetleri, elektromanyetik kuvvetler, zayıf kuvvetler ve kütleçekim kuvvetleridir. Parçacıkların/alanların birbirleriyle etkileşmeleri bu kuvvetler aracılığıyla gerçekleşir. Standart Model içerisinde parçacıkların etkileşmelerini yöneten bu kuvvetler, kuantum alan kuramları ile tanımlanırlar. Şimdi bunların ne anlama geldiğine çok derine inmeden biraz daha yakından bakalım.*

- **Güçlü Çekirdek Kuvveti (Strong Nuclear Force):** Hadronların etkileşmelerinde rol oynayan kuvvetlerdir. Örneğin atom çekirdeğini oluşturan proton ile nötronu çekirdek içinde bir arada tutan kuvvet bu tür bir kuvvettir. Bu kuvvet aslında, hadronları oluşturan kuarklar arasındaki etkileşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Peki, bu etkileşme nasıl olmaktadır? Dedim ya, şimdi bozonlara (*alan ayar bozonları/kuvvet taşıyıcılar/mesajcı parçacıklar*) bulaşma zamanı geldi diye. Tablomuza baktığımızda en sağ sütunda yer alan ve adına *kuvvet taşıyıcılar (force carriers)* dediğimiz bozonlar, işte bu etkileş-

meleri gerçekleştiren ve parçacıklar arasında sürekli değiş tokuş edilerek parçacıkların birbirini etkilemesini sağlayan kuvvet taşıyıcılarıdır. Yani tüm etkileşme türleri için daha genel olarak söylersek; eğer bir parçacık diğerini etkileyecekse, ilgili bozonlar, bu etkileyici kuvveti karşılıklı olarak diğerine taşıyan/iletken(!) parçacıklardır. En sağ sütundaki bozonlara bu yüzden *kuvvet taşıyıcılar* denmektedir. Spini 1 olan bozonlar *vektör bozonlar*, spini 0 olanlar ise *skaler bozonlar* olarak da adlandırılır. İşte en sağ sütunda gördüğünüz *gluonlar*,⁶⁷ kuarklar ile antikuarların işe karıştığı güçlü etkileşmeleri yöneten bozonlardır ve nükleonların kendi iç yapılarının kararlılığını sağladıkları gibi, onları çekirdek içinde bir arada tutan, başka bir deyişle birbirlerine *yapıştıran* parçacıklardır. Aksi halde örneğin, çok protonlu bir atom çekirdeğindeki artı yüklü onca proton nasıl bir arada barınabilirdi, birbirlerini itmezler miydi? Bu kuvvetli elektrostatik itmeye karşı koyarak protonları bir arada tutabilen bu kuvvete *kalıntı güçlü kuvvet* (*residual strong force*) denilmektedir. Bu kuvvetin kaynağı ise kuarkların hadron içi etkileşmelerini yöneten gluonların gücünün bir kısmının protonun veya daha genel olarak söylersek nükleonların dışına taşmasıdır. Çekirdek içi etkileşmeler, gluonların devrede olduğu güçlü etkileşmelerdir ve bir *renk* ile *anti-renk* taşıyan gluonlar, bu güçlü etkileşmeler dışında kalan diğer etkileşme türlerinde rol almazlar. Güçlü etkileşmeler çok çok kısa uzaklıklarda etkindir ve bu mesafenin sonunda hızla sıfıra giderler, nükleonların bu etkileşmeyi hissedebilmeleri için aralarında en fazla 10^{-15} m. basamağında veya daha küçük bir mesafe olmalıdır. Çekirdek bölünme (*fission*) ve birleşmeleri (*fusion*) ile hadronların çok hızlı bozunmaları (*decay process*) güçlü etkileşmelere örnekler. Atom çekirdeğinden alfa parçacığı fırlatılması (bozunması) olayı, güçlü etkileşme sınıfından bir radyoaktif bozunmaya örnektir.

67. Not: *Gluon* sözcüğü İngilizcede yapıştırıcı/yapıştırmak anlamına gelen *glue* sözcüğünden türetilmiştir. Hadronları oluşturan kuarkların bir arada hadronlar içinde durabilmeleri, birbirleriyle *gluon* alışverişi yapmalarının sonucudur. Feynman, önceleri kuarklara "*parton*" denmesini önermişti.

- **Elektromanyetik Kuvvet (Electromagnetic Force):** Bildiğimiz elektrik ve manyetik alan kuvvetlerini birlikte içeren kuvvet türüdür. Aslında bu iki alan birbirlerinin göreceli dönüşümleri olduğundan birbirleriyle çok sıkı bir ilişki içindedirler. Gerçekte bu iki alan kuvveti tek bir elektromanyetik kuvvet olarak yorumlanır. Daha önce elektromanyetik alanın kuantumunun fotonlar olduğundan bahsetmiştik. Tablo-1'in en sağ sütununa bakarsak, yüksüz ve kütsüz bir bozon olan fotonu orada görürüz, yani elektromanyetik kuvvetlerin işe karıştığı fizik olaylarında etkileşmeleri yönetmek üzere kuvvet taşıyıcısı rolünü foton üstlenir. Güçlü etkileşmelerde gluonun oynadığı rol neyse, elektromanyetik etkileşmelerde de fotonun oynadığı rol odur. Yalnız burada yüklü parçacıklar arasında gluon alışverişi yerine foton alışverişi olur. Bu demektir ki, parçacıklar birbirini etkilemeye karar verdiğinde karşılıklı olarak foton alıp verirler. Kuarklara ve gluonlara göre daha zayıf etkileşmeler yapan elektron gibi, müon gibi elektrik yüklü parçacıklar arasındaki etkileşmeler elektromanyetik etkileşmelerdir. Şimdi diyeceksiniz ki; bir atomda bulunan elektronlar ile protonlar arasındaki etkileşme ne tür bir etkileşmedir? Hani protonlar hadrondu ve güçlü etkileşmelere giriyordu? Hadronlar arasındaki etkileşmeler güçlüdür, *ancak parçacıklar arasındaki uzaklığı gözden kaçırmayalım*, üstelik elektron da hadron olmayıp bir leptondur. Kuarkların birbirleriyle veya protonun nötronla çekirdek içi etkileşimi için karakteristik uzaklığın 10^{-15} m. basamaklarında olduğunu söylemiştik. Bir atomdaki protonlarla elektronlar arasındaki uzaklık⁶⁸ ise çok daha büyük olduğundan ve güçlü etkileşme kuvvetleri çok kısa uzaklıklarda etkin olup hızla sıfıra gittiklerinden, protonlarla elektronlar arasındaki uzaklıklarda geçerli değildirler. Dolayısıyla elektronların atom çekirdeklerine bağlanmasından sorumlu olan etkileşme türü elektromanyetik etkileşmedir. Elektromanyetik etkileşme kuvvetinin

68. Not: En basit atom olan hidrojen atomu için elektron-proton uzaklığı *Bohr yarıçapı* olarak adlandırılır ve bu mesafe $5,29 \times 10^{-11}$ m. dir.

erişim uzaklığı sonsuzdur, yani sonsuzda sıfıra gider. Güçlü etkileşimlerin sorumlu olduğu hızlı bozunma süreçlerine göre, elektromanyetik kuvvetlerin devrede olduğu etkileşmelerde daha yavaş hızda bozunma olayları gözlenmektedir. Elektromanyetik kuvvetler ve etkileşmeler yüksüz (nötr) atomların birbirlerine bağlanarak molekülleri oluşturmalarını ve moleküllerin bir arada kararlı halde durabilmelerini sağlar. Bildiğiniz gibi bağlanma etkisi, atomların elektronlarını değiş tokuş etmelerinden veya paylaşımlarından kaynaklanmaktadır. Radyoaktif gama bozunması da elektromanyetik etkileşim biçimidir. Elektromanyetik etkileşmelerin güçlü etkileşim karakteri taşıyamamasının altında, *ince yapı sabiti* olarak bilinen alfanın ($\alpha=1/137$) küçük oluşu yatmaktadır. Kısaca şöyle diyebiliriz; *çekirdekten ve kütle çekiminden kaynaklanan etkileşmelerin dışında kalan, günlük yaşantımızda çevremizde gördüğümüz çoğu olayın perde arkasında elektromanyetik etkileşmeler ve kuvvetler vardır. Elektrik yükleri ve akımlarının, manyetizmanın, görünür ışık ve tüm elektromanyetik dalgaların işe karıştığı her doğa olayı, fizik açısından bir elektromanyetik etkileşmedir.*

- **Zayıf/Elektrozayıf Kuvvet (Weak/Electroweak Force):** Adından da anlaşılacağı gibi zayıf etkileşmelerde sahneye çıkan, yine çok çok kısa mesafelerde (10^{-16} - 10^{-17} m.) etkili olan ve yavaş etkileşme hızına sahip olan kuvvettir. Tablo-1'e baktığımızda en sağ sütunda gördüğümüz W^+ , W^- ve Z^0 bozonları, zayıf etkileşme kuvvetini parçacıklar arasında taşıyan kuvvet taşıyıcılarıdır. Bu bozonlar, *kendiliğinden simetri kırılması (spontaneous symmetry breaking)* denilen bir süreç sonucunda Higgs mekanizması adı verilen bir yöntemle kütle kazanarak ortaya çıkarlar. Bu kuvvet taşıyıcılarına *ara ortam vektör bozonları* da denir. Steven Weinberg, Sheldon Glashow ve Abdus Salam, zayıf etkileşmelerle elektromanyetik etkileşmelerin birbirleriyle ilgisi olduğunu göstermişler ve bu iki kuvveti elektrozayıf etkileşmeler adı altında birleştirmişlerdir. Bunun sonucu olarak üç fizikçi beraberce 1979 yılı fizik No-

bel'ini almıştır. Elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerin birbirinden başlıca farkı şudur; zayıf kuvvetleri taşıyan W^+ , W^- ve Z^0 bozonları kütlelidir, elektromanyetik kuvvetleri taşıyan foton ise kütsesizdir. Zayıf etkileşmeler için radyoaktif çekirdeklerin beta bozunmasını örnek olarak verebiliriz. Daha doğrusu nötrinoların işe karıştığı her türlü etkileşme zayıf bir etkileşmedir. Elektromanyetik ve güçlü çekirdek etkileşmelerinden çok çok daha zayıf olan bu etkileşme türünün ne kadar zayıf olduğuna ilişkin isterseniz bir örnek vereyim. Elektron ile nötrinin 1 MeV'lik enerjile çarpışmasını yöneten etkileşme kuvveti, iki elektron arasındaki elektromanyetik kuvvetin 10^{-7} 'si kadardır.⁶⁹ Etkileşmelerindeki bu zayıflık nedeniyle nötrinolar, ışık yılı seviyesinde kalınlığa sahip bir kurşun blokla hiç etkileşmeden yoluna devam edebilir, yani bloğun bir tarafından girip diğer tarafından hiçbir şey olmamışcasına güle oynaya çıkıp gidebilir.

- **Kütleçekim Kuvveti (Gravitational Force):** Tüm temel parçacıklar da tıpkı güneş ve dünyamız gibi kütle çekim kuvvetinden etkilenirler. Ancak, temel parçacıklar dünyasında bir karşılaştırma yapıldığında, elektromanyetik etkileşme kuvvetinin yanında kütle çekim kuvvetini ihmal edebiliriz, yani parçacıkların kütlesi o kadar küçüktür ki, çekim etkisi elektromanyetik etkinin yanında anlamsız kalır. Aynı şeyi güçlü etkileşimler için de söyleyebiliriz. Güçlü etkileşmelerin kuvvetiyle kütle çekim kuvvetinin arasında 10^{38} katlık bir uçurum vardır. Hâlbuki yapılan çalışmalar göstermiştir ki, büyük patlamayı takip eden çok kısa bir zaman süresi içinde kütle çekim kuvvetleri, elektromanyetik kuvvetler ve güçlü etkileşim kuvvetleri büyüklük basamağı olarak birbirleriyle kıyaslanabilir durumdaydılar. Kütle çekim kuvvetinin erişim uzaklığı da tıpkı elektromanyetik etkileşimlerde olduğu gibi sonsuzda sifıra iner. Bu tür etkileşmelerin bozonunu Tablo-1'deki en sağ sütunda göremeyiz, çünkü hali hazırda deney-

69. İlk Üç Dakika, Steven Weinberg, Sayfa:132, Tübitak Yayınları

lerde gözlenememiştir. İşte bu yüzden, kütle çekim etkileşimleri diğerlerinden daha ayrı bir konumda bulunmaktadır ve *büyük birleşik kuramın* önündeki en büyük engel gibi durmaktadır. Ancak kütleler arasındaki çekim etkisini anlatan bu tür kuvvetlerin taşıyıcısı olarak adına *graviton* denilen parçacığın varlığı ileri sürülmektedir. Tıpkı gluonlar, fotonlar, W^+ , W^- ve Z^0 bozonlarının etkileşmelerde oynadıkları rolü, kütle çekiminden kaynaklanan etkileşmelerde gravitonların üstlendiği düşünülmektedir. Einstein'ın genel göreliliğinde ifade edildiği şekliyle kütle çekimi aslında geometrik bir açıklamadır. Sorun şuradan kaynaklanıyor; bilindiği gibi geometrinin doğasında süreklilik vardır, tersine kuantum alan kuramında ise kesikli kuantum anlayışı hâkimdir. Hal böyle olunca, süreklilik gösteren geometriyi kuantumlamak şimdilik büyük bir sorun olarak fizikçilerin önünde durmaktadır. Kütle çekiminin neden diğer etkileşmelerden ayrı durduğunun asıl nedeni budur.

Büyük Birleşik Kuram ve Herşeyin Kuramı

Fizikçiler aslında doğadaki olayları böyle dört ayrı etkileşme kuvvetiyle tanımlamak yerine, tüm doğayı tek bir etkileşme türü ve bunu yöneten tek bir kuvvetle daha sade bir platformda ifade etmek istemektedirler. Yani, bu dört kuvveti birleştirerek tek bir kuvvet yapmaya çalışmaktadırlar. Eğer bu başarılabilirse, kuvvet alanlarının etkilerini ileten kuantumlar olan foton, W^+ , W^- , Z^0 , gluon ve graviton gibi kuvvet taşıyıcıları, artık tek bir taşıyıcıya dönüşeceklerdir. Bunun için ilk adımı Weinberg ve Salam atmışlardır ve zayıf etkileşmeyle elektromanyetik etkileşmeyi elektrozaıf etkileşmeler adıyla tek çatı altında yorumlamayı başarmışlardır. Bu gelişme, diğer kuvvetlerin de birleştirilebileceğine dair bir umut ışığı yakmıştır ve günümüzde fizikçiler bu birleşme konusunda yoğun çaba göstermektedirler.

Parçacık fizikçilerinin öngörüsüne göre, bu dört kuvvetin ve etkileşimin birleştirilebilmesi için, nanoteknolojiyi konuştuğumuz bölümde belirttiğimiz 10^{-35} m.'lik Planck uzaklığı veya 10^{16}

TeV'lik çok yüksek bir enerji gerekmektedir.⁷⁰ Bu durumda etkileşme türleri birbirlerinden ayırt edilemez, tekdüze/birleşik (*unified*) hale gelir ve artık ortada tek bir etkileşme türü ile tek bir kuvvet taşıyıcısı kalır.

Güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin birleştirilmesine “büyük birleşme kuramı” adı verilir ve bu kurama dördüncü etkileşme kuvveti olarak kütle çekiminin de katılmasıyla ulaşılması beklenen daha kapsamlı kurama ise “her şeyin kuramı” (*theory of everything*) denilmektedir.

Einstein da son yıllarında *birleşik alan kuramı* (*unified field theory*) adıyla anılan buna benzer bir kuram üzerine çok kafa yormuş ama sonuçlandırmaya ömrü yetmemişti. Ancak o zamanlar Einstein, genel görelilikle elektromanyetizmayı aynı potada birleştirmeye çalışıyordu. Genel göreliliğin temelinde bulunan kütle çekiminden kaynaklanan kuvvetler ile elektromanyetik alanların neden olduğu etkileşme kuvvetlerini tek bir fiziksel yorum altında birleştirebilmek üstadın en büyük hayallerinden biriydi. Bu aynı zamanda, genel görelilikle kuantum fiziği dünyasını birleştirme anlamına geliyordu.

Matematik Yöntemler ve Kavramlar

En başta fizik kuramlarının matematiğine girmekten kaçınacağımızı söylemiştim. Ancak, belki merak edenler olabilir diye parçacık fiziğinin matematiğinin hangi temele oturduğunu, hangi yöntemleri kullandığını hissettirmek adına çok kısa bazı bilgiler vermeyi istiyorum. Matematik dünyasında $SU(n)$ olarak bilinen n 'inci dereceden özel üniter grup, determinantı 1 olan $(n \times n)$ tipi üniter matrislerin grubudur.⁷¹ Grup işlemleri, aslında matrislerin çarpımına dayanır. Özel üniter grup, $(n \times n)$ tipi üniter matrisleri içeren $U(n)$ üniter grubunun bir alt grubudur. $U(n)$ 'in kendi ise, genel lineer grupların bir alt grubudur. $SU(n)$ grupla-

70. Parçacık Fiziği-En Küçüğü Keşfetme Macerası, Sezen SEKMEN, Sayfa: 84, ODTÜ Yayınları

71. Not: Bir matrisin tersyüz eşleniği (*conjugate transpose*), kendisi ile çarpıldığında birim matris elde ediliyorsa bu matrise üniter (birim) matris denir.

rı parçacık fiziğinin Standart Model'i içerisinde geniş bir uygulama alanına sahiptir, özellikle elektrozayıf etkileşmeleri anlatan kuantum elektrodinamiğinde karşımıza $SU(2)$ olarak, güçlü etkileşmelerin kuramı olan kuantum kromodinamiğinde ise $SU(3)$ olarak çıkmaktadırlar. Hatırlarsanız, daha önce çok kısa olarak bahsettiğimiz simetriler, gruplar, dönüşümler gibi matematik konularının fizikte ve özellikle parçacık fiziğinde ne kadar önemli olduğu, böylece gördüğünüz gibi ortaya çıkmış oldu. Parçacık fiziğinde sıklıkla kullanılan bu simetri özellikleri, genellikle *ayar simetrileri* (*gauge symmetries*) olarak bilinir ve Standart Model'in öngördüğü dünyayı anlatmanın matematik dilidir.

Ayrıca kuantum elektrodinamiğinde ve kuantum kromodinamiğinde, parçacıkların davranışları Lagranjiyen (*Lagrangian*) denilen ve tensörleri içeren denklemlerle ifade edilir. Bu tensörler, *elektromanyetik tensör* ve *gluon alanı kuvvet tensörü* olarak adlandırılır. Bu denklemler de daha önce kuantum mekaniğini tartıştığımız bölümde konuştuğumuz Hamiltonyen (*Hamiltonian*) gibi enerji kökenli denklemlerdir. Hatırlayacağınız gibi, bir sistemin klasik Hamiltonyenini yazmak için kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamından yola çıkıyorduk. Bir sistemin Lagranjiyenini ifade etmek için ise, ilke olarak kinetik enerjisinden potansiyel enerjisini çıkarırız. Ben size çok küçük ip uçları verdim, ayrıntısına girmek isteyenlere Allah kolaylık versin der, hayatta başarılar dilerim..!⁷²

Tanrının Parçacığı

Son zamanlarda televizyon ve gazetelerin dilinden düşmeyen CERN'deki (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire-Avrupa Nükleer Araştırmalar Konseyi*) LHC'de (*Large Hadron Collider-Büyük Hadron Çarpıştırıcısı*) yapılan yüksek enerjili parçacık çarpıştırma deneylerine bu bölümde yer vermeden olmaz. Bu deneyler, yüksek enerji fiziği veya parçacık fiziği denilen fizik da-

72. Not: Bu çok önemli matematiksel araçlar, İrlandalı büyük matematikçi William Rowan Hamilton ile İtalyanlarla Fransızların paylaştığı ünlü matematikçi Joseph Louis Lagrange tarafından geliştirilmiştir.

linun ilgi alanına giren, atomaltı parçacıkların dünyasını ve maddenin en temel yapı taşlarını ortaya çıkarmaya yönelik çalışmalara ışık tutacak ve kuramları sınayacak olan deneylerdir. Burada bulunması beklenen Higgs parçacığının, parçacıklara kütle kazandıran bir bozon olduğu İngiliz fizikçi Peter Higgs tarafından kuramsal olarak ileri sürülmüştür. *Bu parçacık yüksüz ve spin-i sıfır olan skaler bir bozondur ve Higgs mekanizması aracılığıyla vektör bozonlarına kütle kazandırmaktadır.* Etkileşmeler konusunu tartışırken andığımız kuvvet taşıyıcılarına benzer olarak Higgs bozonuna, Higgs alanının kuvvet taşıyıcısı adı verilir ve bu parçacık aynı zamanda bu alanın kuantumudur.

Parçacık fiziği dünyasında herhangi bir fiziksel sistem en alt enerji düzeyindeyse, o sistemin vakum durumunda bulunduğu söylenir. Bu durumda çoğu sistem için, sistemi oluşturan alanların sıfır olduğu kabul edilirken, diğer yandan fizikçiler Higgs alanı içeren sistemler için bir hipotez ileri sürerler. Bu hipoteze göre, vakum durumunda bulunan bu tür sistemlerdeki Higgs alanının değeri sıfırdan farklı sabit bir değere karşılık gelir, yani boşlukta Higgs alanının bir genliği vardır. İşte bu değere sistemin *vakum beklenen değeri* (*vacuum expectation value*) denir. Çeşitli kaynaklardan bulabileceğiniz ve sistemin vakum durumunu anlatan “enerji-Higgs alanı” grafiği üç boyutta bir Meksika şapkasına benzediği için, bu şekle “*Mexican Hat*” adı verilir.

Vakum beklenen değerinin en iyi bilinen örneklerinden biri *Casimir Etkisi* (*Casimir Effect*) denilen bir etkidir. Mademki konu Casimir etkisine kadar geldi, birkaç cümleyle bu etkinin ne olduğundan bahsedelim. Hiçbir dış elektromanyetik alanın olmadığı bir vakum ortamında birbirlerine birkaç mikrometre uzaklıkta paralel duran, yüksüz metal plakalardan ibaret olan bir sistemimiz olduğunu düşünelim. Klasik fiziğe göre, dışarıdan uygulanan bir elektromanyetik alan yoksa, bu plakalar arasında bir alan ve buna bağlı olarak plakalara etkiyecek hiçbir kuvvet olmaz. Ancak kuantum elektrodinamiğine göre bu iki plaka arasında bir kuvvet alanına neden olan sanal fotonlar yüzünden plakalar arasında itme veya çekme gibi net bir kuvvet oluşur. İşte gördüğünüz gibi vakum durumunda bulunan bir sistemde,

vakum beklenen değeri nedeniyle sanal fotonlar adı verilen parçacıklar oluşur ve bunların neden olduğu etkiler yüzünden plakalara bir kuvvet uygulanır.

İşte fizik böyledir ve o kadar derindir ki, konu konuyu açar ve sizi bambaşka noktalara sürükler. Konuştuğumuz konuların sınırlarını çizmekte ve neyi, nereye kadar anlatmaya karar vermekte bir hayli zorlandığımı itiraf etmeliyim. Araya Casimir etkisini almamız, Higgs alanlarıyla yakın ilişkisi olduğu içindi, umarım bu sapmayı ne için yaptığımız anlaşılmıştır.

Her neyse, biz konumuza tekrar dönersek, deneylerin sonunda gözlenmesi beklenen bu parçacığa *Tanrının Parçacığı* denmesi, parçacığı parçacık yapan, parçacıklara kütlelerini kazandıran, bir nevi *ete kemiğe büründüren (yaratmaya benzetiliyor)* yeteneği yüzündendir. *Yani ortada maddesel gerçek bir parçacık yokken, gerçek bir madde meydana gelmesini sağlamaktadır.* Hatırlayacağınız gibi elektromanyetik ve zayıf etkileşmeler, elektrozayıf etkileşmeler adı altında birleştirilebilmişti ve elektrozayıf etkileşmelerin kuvvet taşıyıcıları (ayar bozonları) ise fotonlar, W^+ , W^- ve Z^0 bozonlarıydı. Tablo-1'e dikkat ederseniz, foton ve gluonların kütlelerinin sıfır olmasına karşın, zayıf etkileşme bozonlarının belli bir kütlesi vardır. Bu parçacıklar zayıf etkileşmeler sırasında kütlelerini nasıl kazanmaktadır?

Ayar bozonlarının nasıl kütle kazandığı *Higgs Mekanizması* olarak bilinen yöntemle açıklanır. Higgs alanı tüm uzay-zamanı dolayısıyla tüm evreni kaplayan bir arka alandır. Parçacıkların nasıl kütle kazandığını biraz daha akla uygun ve somut olarak hayal edebilmek için, kütsüz bir parçacığı ele alalım ve bu parçacığımız uzay-zamanda Higgs alanı içinde hareket etsin. İşte parçacığın bu hareketi Higgs alanı denilen bu arka alanda bozulmaya neden olur. Bu bozulmayı şöyle yorumlayabiliriz; parçacık Higgs alanı içinde hareket ederken, Higgs alanının kuantumu olan Higgs bozonları, parçacık etrafında toplanarak yoğunlaşırlar. İşte bu yoğunlaşma sonucu kütsüz parçacıklar kütleli hale gelirler. Fotonlar, gluonlar ve hatta gravitonların kütsüz parçacıklar olmasının arkasında, bu bozonla doğrudan etkileşmemeleri yatmaktadır.

Standart Model'in eksiklerinden biri olarak görülen, parçacıkların kütlelerini nasıl kazandıkları sorusuna, CERN'deki deneylerde Higgs parçacığının gözlenmesiyle cevap bulunacağı ümit edilmektedir.⁷³ Bulunacağı umulan bu parçacığın kütlesinin büyük olasılıkla 114-144 GeV aralığında olması beklenmektedir, yani ağır bir parçacık olmalıdır. Gördüğünüz gibi, Standart Model bu parçacığın kütlesini kesin olarak öngöremiyor.

Temel parçacıkların nasıl kütle kazandıklarının kuramsal olarak açıklanabilmesi, büyük patlamadan sonra gelişen fazlarda parçacıkların kütle kazanarak maddesel evrenin nasıl oluştuğuna da işaret eder. Büyük patlama sırasında akla hayale sığamayacak kadar büyük ısı, ışık ve basınç vardı ama masa, sandalye, demir, gezegenler, cam, ağaç, proton, elektron gibi maddesel parçalar yoktu. Biliyoruz ki, evrendeki canlı veya cansız tüm madde ve cisimler, kuarklar ve leptonlar dediğimiz fermiyonlardan oluşmaktadır. Higgs parçacığı eğer gözlenebilirse, maddesel parçacıkların nasıl kütle kazandıklarını açıklayan kuramsal çalışmaların ispatı yapılmış olacaktır.

Higgs bozonu kavramına karşı çıkan ve bu modelin sadece bir matematik araç olduğunu öne süren birçok bilim insanının olduğunu da bilelim. Eğer bu parçacık, deneylerde gözlenirse herkes rahatlayacak ve Standart Model yerini daha da sağlamlaştıracaktır. Ama ya gözlenemezse ne olur? O zaman, Standart Model'i rafa kaldıracak değişik bir bakış açısıyla yeni kuramlara doğru yelken açılacaktır.

Kuantum Elektrodinamiği (*Quantum Electrodynamics - QED*)

Kuantum fiziği başladığı yıllardan bu yana epeyce yol aldı. Yıllar içerisinde maddenin en bölünmez, en temel durumuna ulaşabilmek için fizikçiler bitmez tükenmez araştırmalar yaptı-

73. Not: İnternet dünyasında hepimizin kullandığı World Wide Web, yani "www", CERN'de görevli bir bilim insanı olan Tim Berners-Lee tarafından 1989'da geliştirilmiştir. Gördüğünüz gibi fizikte bir konu üzerine yapılan çalışmalar başka buluşları da tetikleyebiliyor.

lar ve hala bu araştırmalar sürmektedir. Çok pahalı olan ve çeşitli ülkelerden onlarca, yüzlerce fizikçinin katıldığı çok incelikli deneylere gereksinim duyulan günümüzün modern araştırmaları maddenin en temel yapısını araştırırken, genel olarak evrende var olan etkileşimleri de keşfettiler ve bu etkileşmelerin çeşitlerini ve doğasını anlamaya çalıştılar, hala da çalışmaktalar. Özellikle parçacık fiziği konusunu tartışırken karşılaştığımız bu etkileşme türlerinden, sadece ışığın (fotonların) maddeyle etkileşimini yani *elektrozayıf* etkileşmeyi anlatan “*Kuantum Elektrodinamiği*”ne çok kısaca değinmek istiyorum. Işık ile maddenin etkileşmesinden kasıt, ışık ile maddedeki elektronların etkileşmesidir, yani foton-elektron etkileşimidir. Özel görelilikle kuantum mekaniği felsefesinin birlikte yoğrulması sonucu ortaya çıkmış olan kuantum elektrodinamiği, başarılı bir “*kuantum alan*” kuramıdır. Hatırlayacağınız gibi, “*Fiziğin Diğer Mesleklerle İlişkisi*” adlı kesimde de kuantum elektrodinamiğinin bazı önemli özelliklerinden bahsetmiştik.

Kuantum elektrodinamiği konusunda Nobel Fizik Ödülü almış olan Feynman, bu fizik dalının kapsamını bakınız nasıl tarif ediyor. “*Kuram, kütle çekimi ve çekirdeklerin enerji düzeylerini değiştirmelerinden doğan radyoaktiflikten başka her olayı açıklayabilir. Peki, kütle çekimi ve radyoaktiflik (daha doğrusu çekirdek fiziği) dışında elde ne kalıyor? Otomobillerde benzinin yanması, köpükler ve kabarcıklar, tuz ve bakırın sertliği, çeliğin sağlamlığı vb... Dahası, biyologlar hayata ilişkin her şeyi ellerinden geldiği kadar kimyaya bağlamaya çabalamaktalar; kimyanın ardındaki kuram da, kuantum elektrodinamiğidir*”.⁷⁴

Burada Feynman’ın radyoaktiflik ve kütle çekimi gibi fiziksel olayları neden dışarıda tuttuğunu, Standart Model’i ve etkileşimleri konuşurken ifade etmiştik. Kısaca ben size tekrar hatırlatayım; radyoaktiflik, radyoaktif bir çekirdeğin alfa, beta parçacıkları ve gama ışıması yayarak farklı bir çekirdeğe bozunmasıdır. Parçacık etkileşimleri sınıflandırmasına göre bu tür olaylar sırasıyla güçlü, zayıf ve elektromanyetik etkileşimler sınıfına gi-

74. Kuantum Elektrodinamiği, KEDİ, Richard P. Feynman, Sayfa:17, Nar Yayınları

rerler. Yani, çekirdekten alfa parçacığının fırlatılması güçlü, beta fırlatılması zayıf, gama salınması ise elektromanyetik etkileşim olarak yorumlanır. Kuantum elektrodinamiği kuramı, elektromanyetik etkileşmeler sınıfında yer alan tüm fizik olaylarıyla ilgilendiği için, Feynman'ın gama salınması dışında kalan radyoaktifliği ve kütle çekimini kuramın dışında tutması bu yüzündendir. Standart Model'den bahsederken gördüğümüz gibi, elektromanyetik etkileşmelerin temelinde foton alışverişi yatmaktadır. Bu alışverişlerin nasıl yapıldığı ise ünlü Feynman diyagramları ile modellenir.⁷⁵ Kuantum elektrodinamiğinin kuramsal olarak öngördüğü sonuçlarla, yapılan deneyler arasındaki sapmayı Feynman; "4800 kilometreyi aşan New York-Los Angeles uzaklığını bir saç teli genişliği kadar hatayla ölçmek" ile aynı olarak açıklamaktadır.

Bu konuda bir görüş de Wichmann'dan alalım; "Kuantum elektrodinamiği, elektromanyetik ışınımın ve yeryüzündeki yoğun maddenin (katıhal) temel kuramıdır. Bu demektir ki, şimdi örneğin aşırı iletkenlik ve aşırı akışkanlık gibi olayları da açıklayabilen temel olguları biliyoruz".⁷⁶

Açıkça görüldüğü gibi, elektrik-elektronik-ışık-ısıma olaylarının tümü bu tanıma göre elektromanyetik etkileşmeler sınıfında değerlendirilmektedir.

Kuantum Kromodinamiği (Quantum Chromodynamics - QCD)

Kuantum kromodinamiği adı Yunanca renk anlamına gelen "chroma" dan esinlenilerek koyulmuştur. Anlamı renk dinamiği demektir, ama bu bizim gündelik yaşamımızdan bildiğimiz renkler değildir. Kuantum alan kuramının güçlü etkileşmelere uygulanmasında başrolü oynayan kuarklar ve gluonların sahne aldığı tiyatronun sanat yönetmeni kuantum kromodinamiğidir. Neden mi? Kuarklar gluon yayınladıklarında kendi renklerini

75. Işığın Öyküsü, Hüseyin Gazi Topdemir, Sayfa: 303, Tübitak Yayınları

76. Kuantum Fiziği, Eyvind H. Wichmann, Berkeley Fizik Programı, Cilt-4, Sayfa: 37, Hacettepe Üni. Yayınları

değiştirirler, örneğin kırmızıyken yeşil olurlar ve yayınlanan gluona, kırmızı ve antiyeşil renk yükünü taşımak düşer. Renk yüklerinin nasıl değişeceği ve her gluon yayımı/soğurulması işlemlerinde nasıl korunacağını bize ancak kuantum kromodinamiği anlatabilir. Kuantum kromodinamiğine renk dinamiği denmesinin altında yatan asıl neden budur. Daha önce *de kuvvetle vurguladığımız gibi, bu renklerin(!) günlük yaşantımızda gördüğümüz renkler olmadığını* tekrar hatırlatırım.

Standart Model'in Eksiklikleri

Standart Model, parçacıklar dünyasını araştıran, yani doğanın en ince ayrıntısıyla uğraşan parçacık fiziğinin, şimdiye kadar oldukça başarılı bir şekilde kullandığı bir araçtır, bir rehberdir. Maddenin en küçük yapı taşlarının ne olduğu ve bunların arasındaki etkileşmelerin nasıl cereyan ettiğini açıklayan kuramlara ilişkin deneylerde ulaşılan sonuçlar, Standart Model'in öngörleriyle uyum içerisinde. Demek ki parçacık fizikçilerinin kuramsal olarak düşündükleri şeyler doğrudur ve doğru yolda ilerliyorlar diyebiliriz.

Ancak doğanın akıl almaz derinliği ve genişliği yüzünden Standart Model tarafından öngörülemeyen bazı açık uçların varlığı da söz konusudur. Şimdilik cevaplanmasında sıkıntı çekilen konuların en önemlileri şöyle sıralanabilir:

- Kuarklarla leptonlar gerçekten temel parçacık mı, yoksa daha temel başka parçacıklardan mı oluşuyorlar? Bundan nasıl emin olabiliyoruz? Gerçi fizikçiler arasında, *"Eğer daha temel parçacıklar var olsaydı, bugüne kadar yapılan hesaplarda veya yüksek enerjili çarpışma deneylerinde az çok bunların ipuçlarına rastlanırdı"* şeklinde bir düşünce hâkimdir. Onlara göre galiba işin sonuna gelinmiştir, daha temel parçacıklara rastlama olasılığı neredeyse yoktur. Ama yine az da olsa bir sürpriz payı bırakmakta fayda var, çünkü doğa sürprizleri sever.
- Evrendeki tüm maddelerin, birinci kuşağın iki kuarkı ile bir leptonundan oluştuğunu söylemiştik. Madem görünür madde evren sadece birinci kuşağın iki kuark ve bir leptonun-

dan oluşuyor, diğer iki kuşağın fonksiyonu nedir? Tabloya dikkat ederseniz, elektron, müon ve tau parçacıkları, kütlelerinin farklı oluşu dışında aynı parçacıklardır. Aynı şekilde aşağı, acayip ve alt kuarklar arasında da kütle farkından başka bir fark göremezsiniz.

- Standart Model parçacık kütlelerini neden öngöremiyor? Biliyorsunuz Higgs parçacığının kütlesi de net olarak söylenemiyor.
- Kütle çekimi bu modelde nasıl yer alabilir? Gerçekten tüm alanlar birleştirilebilir mi? Kütle çekim kuvvetleriyle ilişkili olarak genel göreliliğin geometrisi bu modele monte edilebilir mi?
- Büyük patlamanın sonrasında maddelerle eşit bir dağılıma sahip olduğu öngörülen karşıt maddeler neden etrafımızda ve günlük yaşantımızda yer almaz? Neden kaybolmuşlardır? Nereye gitmişlerdir? Doğa tercihini neden maddeden yana kullanmıştır? Maddeyle karşıt madde arasında baştan bir simetri varsa, neden karşıt maddelerden yapılmış bir element, bir cisim yoktur?
- Evrende büyük miktarda bulunan ve ancak sebep olduğu kütle çekimi etkisiyle varlığından haberdar olabildiğimiz *karanlık madde'nin* yapısı nedir?
- Kütle çekiminin rol aldığı etkileşmeleri konuşurken gördüğümüz gibi, neden kütle çekimi güçlü etkileşmelerden bu kadar küçüktür? Arada niçin bu kadar büyük bir uçurum vardır? Etkileşme kuvvetleri arasındaki orantısız uçurumlara *hiyerarşi sorunu* adı verilir. Hiyerarşi sorununun kaynağı nedir?
- Fizikçiler, "*Elimizde neler var?*" ve "*bunlar nasıl davranır?*" ifadesiyle "*niçin böyle davranıyorlar?*" ifadesinin anlamları arasında büyük fark görürler. Standart Model, fizikçilere göre şimdilik "*ne*" ve "*nasıl*"a cevap vermekte olan bir modeldir. Hâlbuki evrenin temelinde yatan kurguyu anlayabilmemiz için "*niçin*" sorusunun cevabına gereksinimimiz vardır. Bu bir eksikliktir ve bu eksikliği tamamlamak üzere fizikçiler *Süpersimetri (SUSY)* ve *Sicim (String)* kuramları üzerinde çok

yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Bu kuramların, Standart Model'i epeyce ileriye taşınması beklenmektedir. Süpersimetrik evren kurgusunda, düşünebildiğiniz her parçacığın bir süpersimetrik eşi (*superpartner*) vardır. Yani her fermiyon, süper simetrik eş olan bir bozona, her bozon da yine bir süpersimetrik eş olan bir fermiyona sahiptir. Örneğin elektronun bir selektron'u, müonun bir smüon'u, gluonun bir gluino'su veya Z bozonunun bir Zino'su gibi. Süpersimetri kavramı, etkileşme kuvvetlerinin birleştirilebilmesi için parçacık fizikçilerine *hipotetik* bir altyapı sunmaktadır. Tabi ki bu arada, sicim kuramının geliştirilebilmesi için, süpersimetri yaklaşımının bir ön şart olduğunu belirtelim. Çok basit olarak açıklamak gerekirse sicim kuramının temelinde, daha önce noktasal olarak düşündüğümüz temel parçacıkların tıpkı titreşen bir sicim gibi davrandığı varsayılır. Ancak bu kuramın denklemleri on veya on bir boyutlu uzay-zamanı içermektedir. Gördüğünüz gibi çok da basit değilmiş! Ancak, temel parçacıklar neden üç nesilden oluşur? Kütle çekimi de dahil olmak üzere kuvvetler birleştirilebilir mi? Görelilik ve kuantum kuramı bu noktada işin içine katılabilir mi? gibi daha temel ve kavrayıcı sorulara sicim kuramının olumlu yanıt vermesi, parçacık fizikçilerince kuvvetle umulmaktadır. Süpersimetrik kuramla uğraşan fizikçilere artık esprili bir şekilde *sfizikçiler* deniyormuş ve biz daha bir adet Higgs parçacığını çözemedi onlar süpersimetrik model için en az beş tane daha Higgs bozonu öneriyorlarmış. *Süpersimetri ve Sicim Kuramının* daha ayrıntılı açıklamalarını merak edenler için, adı gibi süper bir kitap öneriyorum. Bu bilgilerin tümünü ve daha derinlerini bu kitapta bulabilirsiniz.⁷⁷

77. Süpersimetri, Gordon Kane, Çeviri: Zekeriya Aydın, Tübitak Yayınları

Sonuç: Oyunun Kurallarını Fizik Söyler

Buraya kadar neler konuştuk, hangi konulara değindik? İsterse-
niz bunu biraz toparlayalım. İlk olarak fiziğin nasıl bir şey oldu-
ęunu, tarihsel gelişimini, günlük yaşantımızda onunla nasıl ve
nerelerde karşılaştığımızı, kimlerin fiziğe emek verdiğini kısaca
gözden geçirdik. Daha sonra günlük yaşantımızda gözlemleye-
bildiğimiz klasik fizik olaylarıyla, doğrudan gözlemleyemediği-
miz mikro dünyanın kuantum davranışını tanımaya çalıştık.
Özellikle kuantum mekaniği kapsamına giren olayları anlamaya
alışırken, kuantum dünyasındaki düzenin ne kadar şaşırtıcı ol-
duğunu ve bu dünyanın sağduyumuza ne kadar uzak olduğu-
nu gördük. Biraz daha ilerledikçe, klasik fizikle kuantum fiziği
arasındaki dūřüne ve felsefe farklılıkları inceledik, bence asıl
önemli olan konu budur. Bunun çok özel bir konu olması, felse-
fi bir ağırlık taşıması, eğer özel bir ilgi yoksa üniversite eğitimi
sırasında bu konuların zaman darlığından ve ders yoğunluğu
yüzünden tartışılamaması nedeniyle, özellikle altıncı bölümün
fizik okumuş olanların bile ilgisini çektiğine inanıyorum. Son
olarak, evreni oluşturan en temel yapı taşlarını ve bunların nasıl
da gizemli şeyler olduklarını konuşarak fiziğin hangi yeni ku-
ramlara yelken açtığını gördük.

Doğaldır ki, fizik dünyasının tümüne değinmeye, değil bu kitap, kütüphaneler bile yetmez ve daha önce söylediğim gibi, okurken kafamıza takılan her soru için bile ayrı bir kitap yazılabilir. Zaten başta da ifade etmeye çalışmıştım, bu kitabın amacı fizik dersi vermek değildir, böyle bir iddiası kesinlikle olamaz. Burada amaçlanan, fizik dünyasında kısa bir gezinti yaparak fiziğin nereden gelip nereye gittiği, kapsamı, derinliği, genişliği, sınırları, ilgi alanları, yaşantımızdaki yeri ve önemi hakkında okuyucuya küçük bir fikir vermektir. *Daha doğrusu iç içe yaşadığımız ama varlığından pek haberdar olmadığımız fiziği hissettirmektir.*

Fizik sadece elle tutup gözle görebildiğimiz yakın çevremizdeki doğanın yasalarını değil, tüm evrenin çalışma yasasını anlatır. Moleküller, atomlar, atomaltı parçacıklar dünyasından tutun da, uzayda bizden milyonlarca ışık yılı ötede bulunan gökadalarda da hangi doğa kurallarının işlediğini, büyük patlamadan bugüne kadar tüm evrenin hangi yasalara göre evrildiğini araştırır ve ileriye dönük öngörülerde bulunur. Bu yasaları ortaya çıkarırken kullandığı dil yüksek matematiktir ve özellikle son yıllarda çok incelikle tasarlanmış, çok pahalı deneylerle kuramlarını sınar. *Bu çaba aslında bir anlamda yaradılışın gizemini anlamanın ve bir bakıma her şeyin sırrına ulaşmanın çabasıdır.* CERN’de yapılan çok yüksek enerjili parçacık çarpışma deneylerinde bulunması umulan Higgs parçacığına “Tanrının parçacığı” denmesi bu yüzden boşuna değildir. Eğer gözlenebilirse, büyük patlamadan bu yana evrendeki maddesel varlıkların bu parçacık sayesinde kütlelerini kazandıkları netleşecektir. Bir an düşünelim, fiziğin bu kadar ince noktalara gelebilmesi az iş midir?

Parçacık fiziği konusuna odaklanırsak; en mikro atomaltı temel yapılardan uzayın ışık yıllarıyla ölçülen en büyük kozmik uzaklıklarına kadar doğada bildiğimiz her olayı, dört tür etkileşme kuvvetiyle açıklayabildiğimizi artık biliyoruz. Fiziğin önündeki hedefin, bu kuvvetlerin tek çatı altında toplanması olduğunu da öğrenmiştik. Her doğa olayını açıklamak demek, evrenin tümünü avucumuzun içinde tutuyoruz demek değildir, daha gideceğimiz çok yol var. Ama fizik şimdiki haliyle kalsa bile, doğa olaylarına getirdiği bu yaklaşımla evreni duru bir şekilde

gözlerimizin önüne sermektedir. Çevremizde veya bizden çok uzaklarda olsun, en mikrosundan en makrosuna kadar aklımıza gelebilecek milyonlarca sayıda karmaşık fizik olayının, etkileşme kuvvetleri temelinde sadeleştirilmesi bence müthiş bir başarıdır ve bu başarı fiziğe emek veren tüm fizikçilere aittir.

Yukarıda bahsettiğimiz “doğadaki her olay” ifadesini dikkate alırsak, diğer tüm teknik meslek dallarının ilgi alanının kendiliğinden fiziğin bir alt kümesi olduğunu görürüz. Özellikle ikinci bölümde fiziğin ne olduğuna ve diğer mesleklerle ilişkisine değinmiştik. O bölümde de konuştuğumuz gibi, teknolojik gelişmelerin temelinde fiziğin kendiliğinden yer aldığını, fiziğin diğer teknik meslek dallarının tam göbeğinde bulunduğunu ve bu mesleklerin aslında fiziğin birer pratik alt uygulama alanları gibi düşünülebileceğini ifade etmiştim.

Mademki teknolojik gelişmeler doğanın ve dolayısıyla fizik yasalarının dikkate alınmasıyla yapılabilir, uygulanabilir, o zaman teknolojiye geri kalmamak için doğanın yasalarını insanlığa açıklayan bilim olan fiziği iyi anlamamız ve ona gereken önemi vermemiz gerekiyor.

Ha sahiden! Fizik yasalarını iyi öğrenmenin yegâne amacı sadece teknolojiye ileri gitmek midir, teknolojik rekabet midir? Yani fiziği öğrenmedeki hedefimiz yalnızca *kuru kuruya*(!) teknolojik gelişmelerle mi sınırlı kalacaktır? Belki öyle düşünenler çoğunlukta olabilir. Ancak; nasıl bir evrende, hangi doğa kurallarına bağlı olarak yaşıyor olduğumuzu fark etmek, onun heyecanını ve tadını hissetmek, yaradılışın o eşsiz ahengine ve derinliğine şahit olmak, benim için sanki teknolojik beklentilerimizin biraz daha önünde yer almaktadır. Çünkü, başka bir gaye gütmeksizin *fiziği fizik için yapmak* bile insanlığı alır bambaşka düşünce âlemlerine götürür. Bunun doğal sonucu olarak, fizikteki gelişmelerin zaten kendiliğinden teknolojiye yansması kaçınılmazdır.

Tüm bu söylediklerimizin ışığında yazımızı şöyle bitirebiliriz: *Doğanın yasalarını anlatan fizik ve onun sözcüsü olan fizikçiler oyunun kurallarını söyler, diğer oyuncular bu kurallara göre oynar...*

Sonsöz

Fizik dünyasında yapmış olduğumuz kısa gezintinin ne yazık ki sonuna gelmiş bulunuyoruz. Yoksa, içinizden “*İyi ki de bitti, zaten afaganlar basmıştı*” mı diyorsunuz? Böyle düşünenlerin olacağına adım gibi eminim. Ancak, bu satırlara kadar sabırla gelebilen okuyucuların da sanırım kendilerince haklı nedenleri vardır.

Fiziğin tarihsel gelişimini, sınırlarını, derinliğini, genişliğini, kavramlarını, zorluklarını, keyfini(!) beraberce keşfetmeye çalıştığımız bir yolculuk yaptık. Kendimi her zaman fizik gemisinin güvertesini paspaslayan gariban bir tayfa olarak gören ben, bu geminin omuzları sırmalı kaptanları ve çok tecrübeli gemicilerinin yanında nasıl da bu kitabı yazmaya cüret edebildiğime hala hayret etmekteyim. Belki benim kalkıştığım bu iş, en başta da söylediğim gibi, *cahil cesareti* deyiminin tam karşılığıydı. Eğer hatalarım olduysa (ki mutlaka olmuştur) gelmiş geçmiş ve hayatta olan tüm fizik ustalarının affına sığınayorum.

Ama yine de, her halükârda bu kitabın mutlaka bir işe yarayacağına eminim. Nasıl mı? Hemen açıklayayım; eğer bu kitapta anlatılanlar, okuyucuyu fizik, doğa ve evren hakkında azıcık düşündürmüş, fiziğin her zaman/her yerde olduğuna ikna etmişse, en az bir okuyucunun bile olsa fiziğe olan bakışında bir farklılık yaratmış, fiziğe sempati duymasına neden olmuş, fiziğin de en az diğer bilimler kadar değerli olduğunu ve büyük bir saygıyı hak ettiğini anlamasına yardımcı olmuşsa, bu kitap benim için amacına ulaşmış demektir.

Bu kitap fiziği seven, fiziğin ne olduğunu algılamaya başlayan/algılayan okuyucuların kitaplıklarında eminim kendine özgü, mütevazı bir yer bulacaktır. Ancak, mutlaka bunun tersi de olacak (*bence ezici bir farkla*), aynı frekansta buluşamadığımız okuyucular da kitabın sayfalarından çocuklarına kâğıt uçak veya leblebi-çekirdek külahı yapacaklardır. Varsın olsun, bu kitap *çekirdek fiziğine*(!) faydalı olamasa da, hiç olmazsa bu şekilde işe yarayacaktır.

Ben size demiştim, bu kitap bir şekilde işe yarar...

Dyunun Kurallarını Fizik Söyler

"Bizi fizik yasalarının sırrına
koyarak ve matematik ile bir
meşakkatli bir yoldur. Bu t
şekilde konulmaması fizik y
gelleylebilir."

Yukarıdaki ifadeyi haklı bulanlar, fiziğe amatörce ilgi duyanlar, meraklı öğrenciler, çevresinde ve tüm evrende olup bitenleri merak edenler, doğa yasalarının çok çarpıcı yönleriyle karşılaşmak isteyenler, fiziğe yabancı olmayan, ancak derli toplu kuşbakışı resmini/sınırlarını görmek isteyenler, sıcak bir sohbet havasında yazılmış bu kitapta kendilerine hitabeden bir şeyler bulacaklardır.

Yaşadığımız evrenden haberdar olma, fark etme, genel bir bakış sağlama, fiziğin nereden gelip nereye gittiği, sorunları, çelişkileri, yetersizlikleri, başarıları, gelişim evreleri, hedefleri ile yaşantımızdaki yeri ve önemi gibi konuları bir fizik mühendisinin gözüyle fizik dünyasının içinde dolaşarak hissettirebilmek bu kitabın ana amacıdır.

Kitap bittiğinde kendi kendimize belki de şu soruyu soracağız: "Sakin fizik dediğimiz şey, hayata gözlerimizi açtığımız andan, gözlerimizi dünyaya yumana kadar yaşadığımız, gördüğümüz, duyduğumuz şeylerin tümü olmasın?"

Eren Veyse ERSOY, tındıkların topia... anında... o maviyeşil günlerde, yani... Ağustos'unu... Giresun'da dünyaya geldi. Fizik mühendisliği eğitimini... sonras... bilgisayar sektöründe uzun yıllar teknik ve idari görevlerde... Ancak, platonik bir aşkla bağlı olduğu fiziği içinden bir türlü söküp atmayı başaramadığından, sevgisini ifade etmek üzere, ardında ona gizli bir mektup bırakmaya karar verdi. Elinizdeki bu kitap, işte o sevgiliye yazılan mektubun bir kopyasıdır. Kendisi aynen şöyle diyor: "Gizli dediğime bakmayın, fizik şüphesiz benden çok daha zeki olduğundan, belli ki bu mektubu bir yolla habersizce ele geçirmiş olmalı. Bunu, dudağının kenarına ilişen o belli belirsiz gülücükten anladım."



ISBN 978-605-4362-31-8

