

Felsefenin Kuantum Mekaniksel Temelleri

Bu derginin okurları yukardakinin tersine "Kuantum Mekaniğinin felsefî Temelleri (ya da) Problemleri" gibi başlıkları olan birçok makale mutlaka okumuşlardır; hatta bunların birini de şimdiki yazar hazırlamıştı. Böyle yazılardan, hatta fizik lisans eğitimi sırasında alınan derslerden şöyle bir izlenim edinilmesi doğaldır: 1) Planck sabiti h sifıra götürülürse, ortaya Newton- Maxwell denklemleri (ya da yüksek hızlar sözkonusuysa bunların Einstein tarafından genellenmiş halleri), yani klâsik fizik elde

edilir; bu çerçeve de gündelik gözlemlerimizden tanıdığımız dünyayı betimlemek için uygun ve yeterlidir. 2) Buna karşılık, atom ve atomaltı mesafeler, atomik kütle ve enerjiler ölçeğindeki olaylardan söz ediyorsak, klâsik fizik yetersiz kalır; karşımıza Belirsizlik İlkesi, tek bir parçacığın çift yarı deneyinde kendisiyle girişim yapabilmesi gibi tuhaf yeni kavramlar çıkar. 3) Bunlara biraz alıştıktan sonraysa Bell Teoremi, Einstein-Podolsky-Rosen "paradoksu", Schrödinger'in Kedisi, Everett'in Paralel Evrenler yorumu gibi çarpıcı birtakım örneklerle Kuantum Mekaniğinin gerçekten de gündelik düşünce tarzımızla ve felsefî kavramlarımızla derin bir şekilde çeliştiği, hatta deneylerle çok iyi uyuşsa da, bu yönleriyle kısmen tartışmalı olduğu gibi görüşle karşılaşılır. Aslında biraz sonra anlaşılabilceği gibi yazının adı "Felsefenin Kuantum Alan Kuramsal Temelleri" olmaydı; fakat bu seçim başlıktaki kelime oyununu bozmayı gerektirecekti.

YUKARIDAKİ MADDELER gerçekten çok şaşırtıcı yönleriyle bol bol tartışıldı ve bu tartışmalar sürüyor. Aslında bu şaşırtıcı özellikler, hemen her zaman kuantum dalga fonksiyonlarının koherent olduğu durumlarda ortaya çıkıyor. Dalgaların koherent olması çok kabaca bunların kaynaklarının birbirleriyle bir anlamda eşgüdümlü şekilde, inkoherent olmalarıyla tamamen birbirlerinden bağımsız ve gelişigüzel şekilde hareket etmelerine karşılık geliyor. Laboratuarda özel olarak hazırlanmadıkça, neredeyse bütün gündelik makroskopik ölçekli fiziksel olaylarda dalga fonksiyonları inkoherent şekilde toplanıyor ve girişim etkileri ortadan kayboluyor. "Klâsik dünyada" sağduyumuza ters gelen olgularla karşılaşmamamızın belki temel

nedeni de bu. Buna karşılık, kuantum fiziğinin başka temel ilkeleri kendilerini çok temel bir şekilde HER ZAMAN ortaya koyuyorlar. Biz de bu yazıda (2) ve (3) ile ilgili konular yerine, bu temel ve koherens durumundan bağımsız kuantum özellikleri üzerinde duracağız. Aslında vurgulamak istediğimiz, (1)'deki görüşün tam doğru olmadığı ve üzerinde yeteri kadar dikkatle düşünülmediği. Biçimsel olarak h sifıra gittiğinde karşımıza klâsik fizik denklemlerinin çıkması, gördüğümüz makroskopik dünyayı açıklamakta bu denklemlerin yeterli olduğu anlamına gelmiyor. Zaten elimizde h 'yi gerçek doğada sifıra götürebilmek olanağı yok. Gördüğümüz doğa olaylarının içinde h 'nin sıfır olmaması her zaman belirleyici bir rol oynuyor. Daha da ötesi, gözlediğimiz ve alıştığımız nere-

deyse tüm olayların, hatta bu olaylar ve nesnelere hakkında geliştirdiğimiz kavramların altında kuantum alanlar kuramının bazı temel unsurları bulunuyor. Bu olayları ve onlar hakkında belli şekillerde düşünmeyi o kadar kanıksamış durumdayız ki, olayların ve kavramlarımızın kuantum kökenlerini aklımıza bile getirmiyor; çıplak gözle gördüğümüz dünyayı açıklamak için klâsik fiziğin yeterli olduğu yanılgısını sürdürüyoruz. Aslında düşünce ve davranışlarımızı sadece kanıksadığımızı söylemek bile gerçek durumu tam yansıtmıyor. Bilinçli ya da bilinçsiz bir kanıksamanın da ötesinde, zaten büyük ölçüde böyle düşünmek ve davranmak zorundayız. Temelde madde kuantum mekaniksel yasalara göre işliyor, ve biz de aynı maddeden yapılmış, sonra da Darwinci evrimin doğal ayık-

lama süreciyle doğada tutunabilmiş canlılar; düşüncelerimiz ve yaşayış tarzımız da bu uyumdan kaynaklanıyor. En iyisi, ne demek istediğimizi örneklerle açıklamaya çalışalım. Bir soruyu cevaplamaya çalışırken bir başkası ile karşılaşarak, sonunda alıştığımız hemen her olay ya da hatta düşünce tarzının altında doğanın kuantum alan kuramıyla ifade edilen özelliklerinin yatışğını göreceğiz.

Plâton'un Evrenseller Fikri ve Sayı Kavramı

Felsefede Plâton'dan kaynaklanan, sonra da Skolâstik Felsefe'de de, hatta bugünkü felsefi tartışmalarda bile karşılaşılan "evrenseller" kavram ve sorunuyla başlayalım. Örneğin, neden tüm kediler birbirlerinden biraz farklı da olsa hepsini kedi olarak tanıyıp sınıflandırabiliyoruz? Plâton bir ideal biçimler evreninde ideal bir kedi fikrinin ya da temsilcisinin bulunduğunu, bizim de bir şekilde bu biçimden haberdar olduğumuzu ve her kedi gördüğümüzde bu biçimle bir karşılaştırma yaptığımızı söylüyor. Plâton'un açıklamasını bütünüyle benimsemesek de, maddesel dünyayı kediler, bulutlar, çakıltaşları gibi kategorilerle algıladığımız ve yorumladığımız bir gerçek.

Şimdi sayı fikrinin nereden geldiğine bakalım. Russell ve Frege'ye göre, gördüğümüz şeyleri sınıflandırabilmemiz, sayı kavramını oluşturmamızda temel bir rol oynuyor; aslında bu sınıflandırmanın altında da bir anlamda yukardaki "evrenseller" fikri yatıyor. Üç kedi, üç ceviz, üç kaşık gibi aynı Evrensellik sınıflarından alınmış tüm nesnelere düşününce, bunların aralarındaki ortak özelliğin "üçlük" olduğunu kavlıyor ve bir soyutlamayla üç sayısını elde ediyoruz.

Plâton'un sorusunun yanıtı, ve bununla ilgisini belirttiğimiz sayı kavramı, temelde kuantum fiziğine dayanıyor. Kedileri tanıyabilişmemiz ve sınıflandırabilişmemiz kedi DNA'sının kararlılığından ve dayanıklılığından geliyor. Buysa, DNA gibi moleküllerin kesikli enerji düzeylerine sahip olmalarına ve çevresel etkilerle bu enerji düzeylerinden birinden ötekine geçmenin çok zor olmasına; ayrıca yaşamın temelindeki DNA'dan kopyalanma süreçlerinin de belirli, her zaman ve

her yerde aynı şekilde cereyan eden kimyasal tepkimeler yoluyla gerçekleşmesine dayanıyor. Bu değişmez özelliklerin altındaysa evrendeki tüm karbon atomlarının diğer karbon atomlarıyla, oksijen atomlarının diğer oksijen atomları, ve tabii ki genel olarak bir kimyasal elementin tüm atomlarının birbirleriyle aynı olması yatıyor. Saydığımız diğer örneklerin de gene temelde atomların özdeşliğine dayandıklarını görmek güç değil. Meselâ, insan DNA'sından gelen beslenme gereksinimi, ağız büyüklüğü, elin özellikleri gibi şartlarıyla Doğa'da kaşık haline getirilmeye uygun metal, tahta ya da seramik gibi malzemelerin özellikleri bir araya gelince kaşıkların da neden birbirlerine benzemeleri gerektiği anlaşılıyor.



Atomların Özdeşliği

Peki, bir elementin tüm atomları nasıl oluyor da özdeş olabiliyor? Standart bilim tarihi anlatımlarında kara cisim ışınmasının, fotoelektrik olayının ve birkaç daha deneysel bulgunun klâsik fizik için açıklaması olanaksız bil-meceler ortaya koyduğu vurgulanır. Halbuki böyle deneyler yapılmışaydı bile, kimya bilimi bize atomların özdeş olduklarını Dalton'dan beri söylüyordu ve aralarında Niels Bohr'un da bulunduğu bazı fizikçiler, bu özdeşliğin klâsik kavramlarla açıklanamayacağı-nın farkındaydılar.

Açıklamanın ilk adımı J. J. Thomson'un elektronu bulması ve Rutherford'un atomun kütesinin sadece ikibin ilâ dört-beşbinde birinin elektronlarda, geri kalanınınsa çok yoğun bir

çekirdekte toplandığını deneysel olarak göstermesiyle atıldı. Bu yoğun çekirdeğin çapı atomunun yüzbinde biri kadardı. Bohr, Heisenberg, Pauli. Schrödinger ve Dirac gibi teorik fizikçiler 1920'lerin sonlarında tamamlayabildikleri kuantum mekaniğiyle bu özdeşliği kısmen açıklayabildiler. Bu kuramın çok genel bir özelliği, çekici bir merkezî kuvvet tarafından bağlanan herhangi bir parçacığın, herhangi bir enerjiye sahip olamayacağı, ancak kesikli ve belirli bir enerji yelpazesindeki enerjilerden birine yerleşmek zorunda olduğu sonucuydu. Bir benzetme yapabiliriz: L uzunluğunda bir tel, iki ucu da sabitlenerek gerilirse, üzerinde meydana gelebilecek titreşimlerin dalga boyları ancak $2L /$ (tamsayı) olabilir; bu titreşimlere karşılık bulacağımız enerjiler de aynı süreksizliği gösterecektir. Planck'tan beri de frekanslarla enerjilerin orantılı olduğunu biliyoruz, demek burada kesikli bir enerji spektrumu karşımıza çıkıyor.

Açıklamalarımızı olabildiğince basit tutmak amacıyla önce hidrojen atomu örneğine bakalım. Bu atomun çekirdeği, tek bir pozitif yüklü protondan ibaret; bunun etrafında da bir tek negatif yüklü elektron var. Daha önce belirttiğimiz gibi de protonun kütesi elektronunkinin kabaca 1836 katı, bu yüzden protonun sabit kalıp, sadece elektronun "hareket ettiğini" düşünebiliriz. Bu, tam yukarıda anlatılan "merkezî kuvvetle, bağlı parçacık" durumuna uyuyor ve Schrödinger denklemi çözümlerse, deneye uygun bir şekilde elektronun tamsayıların karelerinin tersiyle orantılı kesikli enerji değerleri alabileceği görülüyor; orantı katsayısıysa elektron ve proton küteslerinin ve elektrik yüklerine ve birkaç evrensel sabite bağlı. Bu katsayıdaki büyüklüklerin hep aynı kaldığını deneysel olarak biliyoruz; çünkü gözlenen tüm elektronlar aynı yüke, küteyle ve öz açısal momentuma sahip, protonlar da her zaman birbirlerinin aynı-sı. O zaman, evrendeki tüm hidrojen atomlarının aynı kesikli enerji düzeylerinde bulunacaklarını ve kimyasal süreçlerde de aynı şekilde davranacaklarını anlamış oluyoruz; bu doğal olarak diğer tüm atomlar ve onlardan türetilen - ki bunlara başlangıç noktamız olan kedi DNA'sı da dahil - moleküller için de geçerli.

Kuantum İstatistiği ve Pauli Dışlama İlkesi

Hidrojen gibi tek elektronlu atomlardan çok elektronlu atomlara, sonra da atomları birleştirerek elde edilen moleküllere geçerken çok önemli bir başka kuantum mekaniksel kural daha işin içine giriyor, bu da kuantum istatistiği ve Pauli'nin ünlü dışlama ilkesi. Buna göre evrendeki tüm temel parçacıklar iki sınıfa ayrılıyorlar: Bozonlar ve fermiyonlar. Bozonların spinleri, yani özdeş momentumları, $h/2\pi$ 'nin 0, 1, 2,... gibi tamsayı katları değerler taşıyor ve herhangi bir kuantum mekaniksel duruma istenildiği kadar çok aynı cinsten bozon konabiliyor. Elektronun üyesi olduğu fermiyonlar sınıfıysa, spinini $h/2\pi$ 'nin 1/2, 3/2, 5/2,... gibi yarım tamsayı katları olan parçacıklardan oluşuyor ve bunlardan biri bir kuantum durumuna yerleşmişse, bir başkası o durumu paylaşamıyor ve kendine başka "yer" aramak zorunda kalıyor. Burada bir kuantum durumunun enerji, yörüngesel açısal momentum ve bunun bir yöndeki bileşeni, spinin aynı yöndeki bileşeni gibi değerlerle belirlendiğini söyleyelim. Bu arada açısal momentumun da ancak kesikli belli değerler alabildiğini belirtelim. Örneğin, atomlarda en düşük enerjili temel duruma en çok iki elektron konabiliyor, çünkü bu durumda yörüngesel açısal momentum sıfır, ve sadece $+h/4\pi$ ya da $-h/4\pi$ spin değerli iki durum var. Elektron tam sayı spinli bir bozon olsaydı, bu temel enerji düzeyine sınırsız sayıda elektron koyabilecektik.

Bu arada esas konumuzdan biraz ayrılmak pahasına da olsa, kuantum özdeşlik kavramı hakkında bir iki söz edelim. Klâsik özdeşlik için bir örnek olarak aynı cinsten iki metal para alalım. Bunlar her ne kadar çıplak gözle ayırtedilemeyecek kadar birbirinin aynısı olursa olsun, aslında birbirleriyle tam özdeş olamazlar. Mikroskop altında bir inceleme mutlaka aralarında bir fark ortaya çıkartacaktır. Aslında buna bile gerek kalmadan, uzaydaki konumlarını ve hareketlerini dikkatle izlemek bile ikisini ayırdet-

meye yeter. Kuantum fiziğindeyse iki özdeş, yani kütle, spin, elektrik yükü gibi tüm ölçülebilecek özellikleri aynı olan iki parçacık için bu olanaklı değildir, çünkü Heisenberg'in ünlü Belirsizlik ilkesi ikisinin de uzaydaki yerlerini bir ölçüde bulanık hale getirir ve ikisi birbirlerine biraz yaklaşıp sonra ayrılırlarsa, hangisinin hangisi olduğuna karar verebilmek ilkesel olarak olanaksız hale gelir.

Simdi bu iki parayla yazı-tura oynatarak kuantum özdeşliğin klâsik özdeşlikten ne kadar farklı olduğunu görebiliriz. Klâsik durumda "iki yazı" ya da "iki tura" olasılıkları $1/2 \times 1/2 = 1/4$ 'e eşittir. "Bir yazı, bir tura" ihtimaliyse herbiri 1/4 olan "soldaki para yazı, sağdaki tura" ve "soldaki para tura, sağdaki yazı" olasılıklarının toplamı olan 1/2'dir. Bozon paralarda "sağdaki-soldaki" ayırımını yapmamız olanaksız olduğundan, elimizde eşit olasılıklı üç durum var: yazı-yazı, tura-tura, bir yazı, bir tura. Toplam olasılık da 1 olmak zorunda olduğundan, bu üç olasılık da 1/3'e eşit. Fermiyon paralar daysa durum daha da çarpıcı: Yazı-yazı ve tura-tura'ya dışlama ilkesi izin vermiyor, o halde tek mümkün netice bir yazı-bir turadan ibaret!

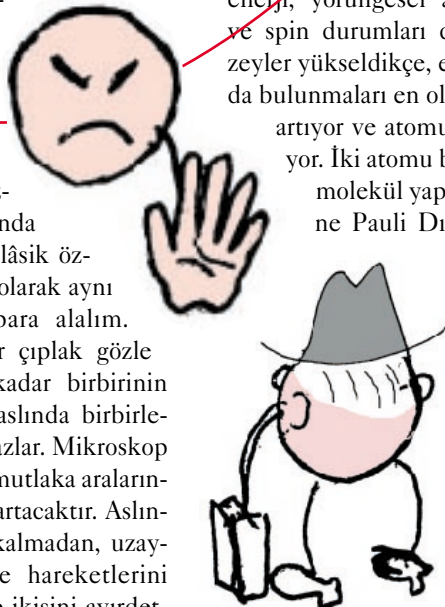
Artık Pauli Dışlama İlkesi'nin atom ve moleküllerin yapısında oynadığı role dönebiliriz. Çok elektronlu atomlarda önce en alt düzeye en fazla 2 (spinin iki durumu sayesinde) elektron konulabiliyor; sonraki düzeye gene 2, daha sonrakine 6, bir üstüneyse 2, sonra 6, sonra 10 gibi sayılar yerleştirilerek enerji, yörüngesel açısal momentum ve spin durumları dolduruluyor. Düzeyler yükseldikçe, elektronların uzayda bulunmaları en olası "yarıçaplar" da artıyor ve atomun boyutları büyüyor. İki atomu bir araya getirip bir molekül yapmak isteyince, gene Pauli Dışlama İlkesi'nden

kaynaklanan bir karşılıklı itme etkisi yüzünden iki atomu tam birbirinin içine sokmak mümkün olmuyor. Eşit yüklü elektronlar arasındaki itici elektrostatik

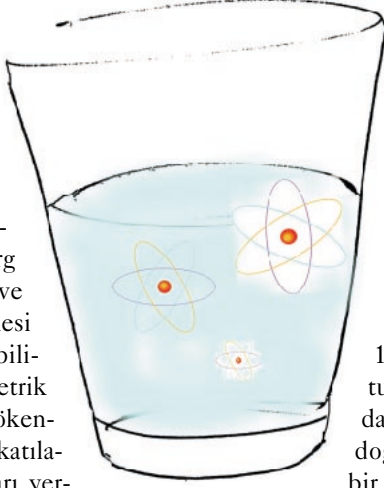
kuvvet de burada bir rol oynuyor, ama kısa mesafelerde esas belirleyici itici etki Pauli ilkesinden geliyor.

Boşluk, doluluk ve Pauli Dışlama İlkesi

Yukarda kısaca özetlediğimiz Pauli dışlama ilkesi ilk bakışta gündelik büyük ölçekli gündelik dünyayla ilişkili görünmeyebilir, ama aslında maddenin uzayda tuttuğu yer ya da hacimle ilgili tecrübe ve kavramlarımız bu ilkeye dayanıyor. "Boşluk" ve "doluluk" fikirlerimiz, bazı gündelik gözlemlerimizden geliyor: Bir bardağa su doldururken su seviyesi yükseliyor; doldurmaya devam edersek bardağın taşacağını biliyoruz. Daha dramatik bir örnek alırsak, Boğaz Köprüsü'nden atlayanlar suya çarpma sonunda (çok şanslı değilse!) ölüyorlar; çünkü gövdelerinin zarar görmemesi için gerekli olan hacimden su yeteri kadar çabuklukla boşalmıyor. Bu iki örnekte de, birbirlerine yakın iki su molekülünün en dış elektronlarının Pauli etkisiyle birbirlerini itmesi "doluluk" diye bildiğimiz durumu meydana getiriyor, yoksa aslında en katı maddelerde bile atomlar ve moleküller Güneş Sistemi'nden bile daha "boş". Atomun kütesinin onbinde birkaçı dışında tüm kütesini taşıyan çekirdeğin yarıçapı, atomunkinin yüzbinde biri kadar; yani kendimizi bir çekirdek olarak düşünürsek, en yakın elektronlar 150 km uzaklıktalar. Doğal olarak, Pauli Dışlama Etkisi'nin bir rol oynamadığı, sadece bir tek elektronu olan hidrojen atomunun bile neden belli bir büyüklüğü olduğunu, bu tek elektronun neden çekirdeğe yerleşerek çok daha küçük hacimli bir atom yaratmadığını sorabiliriz. Bunun cevabıysa Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi'nde yatıyor: Çekirdekteki artı yüklü proton, eksi yüklü elektronu kendine çekiyor, fakat elektronun hapsedileceği yer küçüldükçe, Belirsizlik İlkesi yüzünden "hızı" ve kinetik enerjisi artırıyor. Atomun çekirdekten yüzbin kat büyük boyutları, elektronun elektros-tatik çekim ve Belirsizlik İlkesi arasında kendine sağladığı dengeden kaynaklanıyor. Bu şekilde içleri "boş" bir çok atom bir sıvı meydana getirdiklerinde, Pauli ilkesi yüzünden birbirlerine de ancak dış elektronları "değecek" kadar yaklaşabiliyorlar ve bu sıvı böy-



lece bir bardağı doldurabiliyor. Suya çarpma sonucu ölen kişinin de ölüm sebebinin temelde tamamen kuantum mekaniksel karakterdeki Heisenberg Belirsizlik İlkesi ve Pauli Dışlama İlkesi olduğunu söyleyebiliriz. Bir takım geometrik kavramlarımızın kökenlerinde de sıvı ve katıların uzayda tuttıkları yerler ve girdikleri şekiller, yani bu ilkeler yatıyor. Temeldeyse bu ilkelere dosdoğru kuantum alanlar kuramından geldiklerini ilerde göreceğiz.



“rölativistik”, en son da “kuantum” terimlerini ele alarak kelime kelime yapalım, çünkü bunların herbirinin ayrı anlamları var ve birleşik olarak düşünüldükleri zaman bu özellikler yepyeni olaylara yol açıyor.

Alan Kuramları:

1900 yılından, yani kuantum fikrinin ortaya çıkışından önce de alan kuramları doğadaki olayların önemli bir bölümünü betimlemek

için kullanılıyordu ve kavramsal olarak bir anlamda fizikteki iki büyük bakış açısından birini oluşturuyordu. Bunlardan birine “parçacık”, öbürüne de “alan” ya da “dalga” görüşleri diyebiliriz. Birazdan göreceğimiz gibi, bilim tarihi boyunca iki görüşün de çok önemli savunucuları çıktı; deneysel bulgularsa bazen bir görüşün, bazen de diğerinin doğayı açıklamakta daha başarılı olduğunu kanıtlar gibi oldu. Kuantum kuramının parçacık-dalga ikiliğini bir anlamda bağdaştırdığını herhalde birçok okuyucumuz duymuştur, fakat bu bağdaşmanın ötesinde de hem soru işaretleri hâlâ var, hem de tarihte de olduğu gibi bugün de bazı fizikçiler parçacık, bazılarıysa alan betimlemesine belki de kişisel psikolojik nedenlerle özel bir eğilim gösteriyorlar. Tarih boyunca “alancılar” arasında Descartes, Huygens, Faraday, Maxwell, Schrödinger, Einstein ve Schwinger’i, “parçacıkçılar” arasındaysa Newton, Wigner, Feynman ve Wheeler’i sayabiliriz. Bu sınıflamanın biraz da keyfi olduğu ve tüm bu fizikçilerin karşıt görüşün başarılarını da genelde benimsediklerini, hatta bazen bir görüşe, bazen de öbürüne eğilim gösterdiklerini yanlış bir izlenim vermemek için belirtelim. Böyle karşıt gibi görünen, fakat birbirlerini tamamlayan ve her ikisi de kendi başına başarılar ve aynı zamanda sorunlar içeren görüşler karşısında alınabilecek en doğru tavır herhalde Niels Bohr’un şu bilgece sözleriyle ifade edilendir: “Basit bir doğrunun tersi yanlıştır; örneğin iki kere ikinin dört ettiği doğru, beş ettiği yanlıştır. Buna karşılık derin bir doğrunun tersi de derin bir anlamda doğru olabilir”.

Şimdi kabaca bu iki karşıt bakışı ana hatlarıyla özetleyelim. Parçacık görüşünde, boş bir uzay fonunda noktasal küçük kütleler birbirlerine “uzaktan etki” (Newton’un “action at a distance” fikri) yapabilen “kuvvetler” yoluyla etkileşerek uzayda yörüngeler çiziyorlar. Newton bile bu uzaktan etki kavramının pek sağduyuya uygun olmadığını itiraf ediyor, fakat “kaynağı hakkında bir hipotez ileri sürmediği” böyle bir kütleçekimsel kuvvetin var olduğunu söylüyor. Bu kuvvetin parçacıkların uzaklığının ters karesi ve kütlelerinin çarpımıyla orantılı olduğunu varsayarsa, gene kendi bulduğu İkinci ($F=ma$) ve Üçüncü (“etki eşittir tepki”) hareket yasalarını da kullanarak gezegenlerin Kepler yasalarını, yeryüzündeki tüm kütleçekimle ilgili olayları (ve başka kuvvetlerin matematiksel şekillerinin bilinmesi durumunda bunlarla ilgili olayların), Ay’ın hareketini ve gel-gitleri başarıyla açıklayabildiğini gösteriyor. Newton’un başarısı, aynı zamanda parçacık görüşünün de bir zaferi, çünkü daha önce Descartes’in önerdiği alan görüşüne uygun model, yukarıda sayılan olayları kantitatif olarak açıklayamıyor. Newton’un tersine, Descartes, “doğa boşluktan nefret eder” diyor ve gezegenlerin hareketlerini “esir (aether)” ile dolu bir ortam olarak düşündüğü uzayda oluşan anaforlarla betimlemeye çalışıyor. Tabii ki Descartes’in buradaki başarısızlığı alan yaklaşımından değil, sadece Descartes’in özel alan kuramının yanlışlığından kaynaklanıyordu.

Bilim tarihinde parçacık görüşünün bu kadar başarılı olduğu bir dönemde bile alan ve dalga kavramlarının tamamen ortadan kalkmadığını vurgulamamız gerekir. Bir kere, ihtiyaç duyulan kütleçekim gibi “uzaktan etki” kuvvetlerinin altında ne yattığı açıklanmadan bırakılıyordu. Ayrıca Newton bile mekanik değil de optikle ilgili olaylar incelenirse, dalga görüşünün gerekeceğinin farkındaydı. Farklı renkteki ışığın, farklı dalgaboylarına karşılık geldiğini söylemiş ve hatta bugün “Newton halkaları” denen deneyiyle girişim maksimum ve minimumları bulmuş, bu yolla da çeşitli renklerin dalgaboylarının birbirlerine oranlarını doğru olarak elde etmişti. Newton’un ışığın parçacıklardan ibaret olduğunu iddia ettiği, dalga yönünü tümüyle red-

dettiği iddiaları nedense popüler ve tekrarlanagelen bilim tarihi hatalarıdır; gerçekte Newton'un ışık kuramı neredeyse parçacık-dalga ikiliğini esas alan modern kuantum mekaniksel görüşe yakındır.

Alan görüşünün yaygın şekilde benimsenmeye başlamasıysa Faraday ve Maxwell'in, Coulomb, Oersted, Ampère ve başka fizikçilerin katkılarını hem deneysel, hem de kuramsal açıdan tamamlayarak klâsik elektromanyetik alan kuramını ortaya koymalarıyla gerçekleşti. Bu görüşe göre, artık iki elektrik yükü sadece birbirlerini görünce ortaya çıkıveren Newton'un "uzaktan etkisi" cinsinden bir kuvvetle etkileşmiyorlardı. Bir elektrik yükü ya da bir manyetik akım, etrafta başka bir yük ya da akım olmasa bile uzayın tüm noktalarında bir elektromanyetik alan yaratıyor, orada bulunan diğer yük ya da akımlar da bu alan aracılığıyla ilk yük ya da akımla etkileşiyorlardı. Ayrıca bu kuram elektromanyetik alanın uzayda ışık hızı ile giden dalgalarla yayılabileceğini gösteriyordu. Maxwell bundan, doğru olarak ışığın belli bir dalga boyu aralığındaki elektromanyetik dalgalarla ibaret olduğu sonucuna vardı.

Elektrik, manyetik ve optik olayları birleştirerek başarı ile açıklayan Maxwell kuramı kavramsal olarak neredeyse Newton'unkinin tersiydi. Newton'un boş uzay fonunda, noktasal parçacıklar temel fiziksel gerçekliği temsil ediyorlardı; bunlar arasında da uzaktan etki eden biraz esrarengiz kuvvetler vardı. Maxwell'in görüşünde ise uzayın her noktasında zamanla da değişebilen üç elektrik, üç manyetik alan bileşeni bulunuyordu. Daha önce fizikte ses gibi bilinen dalgalar hava ya da başka bir elâstik ortamda yayıldığı için, Maxwell de bulunduğu dalgaların içinde yayılabilmesi için uzayın her yerde Descartes'in esiri gibi bir maddeyle dolu olduğunu varsayıyordu. Böylece, bu defa da esir ortamı esas fiziksel gerçeklik haline gelmiş ve onun elektromanyetik dalgalanmalarının içine serpiştirilmiş yüklü ya da yüksüz noktasal parçacıklar biraz esrarengiz ve uyumsuz bir konuma düşmüşlerdi. Örneğin, bir dalganın enerji yoğunluğu sonluyken, noktasal bir parçacık için sonsuz enerji bulunuyor, bu yeni problemin çözümü de fizikte çok defa olduğu gibi geleceğe bırakılıyordu.

Birçok okuyucumuzun bildiği gibi, Michelson-Morley deneyi Maxwell'in düşündüğü anlamda bir esir olamayacağını ortaya koydu. Rüzgârsız bir havada üstü açık bir arabada sabit hızla gidersek, gözümüz kapalı olsa bile yüzümüze çarpan hava akımından hareket edenin biz olduğumuzu anlayabiliriz; çünkü hava esir gibi her yeri dolduran bir ortamdır ve böylece de kendisine göre mutlak hareketin ölçülebileceği bir referans sistemi sağlar; oysa Michelson-Morley deneyi, Dünya'nın hareketiyle ilgili bir "esir rüzgârının" olmadığını gösteriyordu.

Einstein'ın 1905'te üç ayrı devrim yapan üç 'Annalen der Physik' makalesinden birçok okuyucumuz herhalde haberdardır. Bunların biri Michelson-Morley deneyinin izin vermediği esiri ortadan kaldırıyor ve böylece de sabit hızla ve belli bir yönde hareket eden tüm referans sistemlerinin eşdeğer olduğunu, "mutlak" hareketsizliği belirleyen bir uzay koordinat sisteminin bulunmadığını söylüyordu. Sonradan özel görelilik kuramı adını alan bu fikirlere göre, zaman aralıkları da birbirine göre hareket eden sistemlerde farklı olabiliyor ve hiçbir fiziksel sinyal ışık hızından daha çabuk gönderilemiyordu. Artık Esir olmadığı için elektromanyetik dalgaları bir sürekli ortamın büzülüp genişmesine bağlayan mekanik model atılıyor, fizikçiler bu alanların boş uzayda kendi kendilerine dalgalanarak ışık hızıyla yayıldıklarını kabulleniyorlardı.

Einstein'ın fotoelektrik olayı ile ilgili makalesiyse klâsik elektromanyetik dalga kavramını başka bir şekilde altüst etti. Einstein, dalgadaki enerjinin uzaydaki dağılımının sürekli olmadığını, bunun yerine her biri Planck sabiti h ile f frekansının çarpımı kadar enerji taşıyan "foton" parçacıklarında yoğunlaştığını savlıyor, bir anlamda Newton'un taneciklerini geri getiren bu kuramla fotoelektrik olayını başarıyla açıklıyordu. $E = hf$ ilişkisini ilk ortaya atan Planck, Einstein'ın dehasına hayran olmasına karşın, foton fikrini hiçbir zaman benimseyemedi; çünkü bu defa da bu parçacıkların Maxwell kuramının sürekli elektrik ve manyetik alanlarıyla nasıl ilintilendirileceği belirsizleşmişti. Einstein, buna çözüm olarak elektrik alanının karesinin uzayda o noktada fotonları bulma olasılığıyla

orantılı olması durumunda bu ikilemden kurtulmanın mümkün olduğunu belirtti; fakat daha sonra Max Born, kuantum dalga fonksiyonunun karesi için de aynı olasılık yorumunu ortaya koyunca, Einstein da Planck gibi gelişmesine bu kadar önemli katkılar yaptığı kuantum kuramından soğudu. Bunun belki bir nedeni, bu arada klâsik alan kuramlarının en derini olan genel görelilik kuramını bulması ve kendini böylece tekrar alan görüşüne kaptırmasıydı. Non-lineerlik özelliğiyle Maxwell kuramından temel bir farklılık taşıyan bu yeni kuramda, alanların bir cins düğümlenme yoluyla belli bir noktada yoğunlaşabileceğini ve bu düğümlenme yüzünden de "çözölmeyecek" bir parçacık gibi davranabileceğini, kısacası parçacıkların, alanlardan elde edilebileceğini düşünüyordu; bu görüşü tamamen doğrulaması da destekleyen birçok sonuç, Einstein ve başkaları tarafından elde edildi. Böyle parçacıklara "soliton" deniliyor.

Relativistik Kuramlar: Nasıl yasalar Anayasa gibi daha temel bir çerçeveye uymak zorundaysalar, tüm fizik yasaları da Einstein'ın özel görelilik kuramıyla çelişmezler. Ancak hızlar ışık hızı c 'den çok daha küçükse, özel görelilik uygun ifadeler bir yaklaşımla Newton denklemlerine indirgenebilir. Aslında Maxwell kuramı için bu yaklaşım baştan olanaksızdır; çünkü elektromanyetik dalgalar, zaten her zaman ışık hızı ile yayılır.

Göreliliğin bu evrensel geçerliliği yanında, bu bölümde vurgulamamız gereken temel nokta ünlü $E=mc^2$ denkleminin, ya da p momentum olmak üzere daha genel şekliyle $E^2=p^2c^2+m^2c^4$ (bu denklem hareketsiz, yani $p=0$ durumundaki bir parçacık için ilk denkleme döner) ifadesinin "saf enerji" ve "katı ve kütleli parçacıkların" birbirlerine dönüşebileceklerini göstermesidir. Ayrıca E^2 'den E 'yi elde etmek için iki tarafın da karekökünü aldığımız zaman biri artı, biri de eksi işaretli iki enerji değerinin elde edildiğine dikkati çekelim. Eksi işaretli enerjinin de fiziksel bir anlamı olduğunu biraz sonra göreceğiz.

Kuantum Alan Kuramları: Daha önce, çekici bir potansiyelle hareketi uzayın bir bölgesine kısıtlanan bir parçacığın, ancak kesikli enerjiler alabileceğini Schrödinger denkleminin bir

sonucu olarak görmüştük. Ünlü “basit harmonik osilatör” potansiyeli, yani $V(x)=(kx^2)/2$ ise, $E_n=(n+1/2)hf$ şeklinde eşit aralıklı enerji değerlerine yol açar; burada f salınım frekansıdır. Planck da karacisim ışınması formülünü, içi boş cismin duvarlarında titreşerek ışınım yapan elektrik yüklü parçacıkların böyle enerji değerleri aldığını varsayarak çıkartmıştır.

Klâsik Maxwell alan kuramında uzayın her noktasında salınım yaparak yayılan elektrik ve manyetik alan dalgaları bulunduğunu belirtmiştik. Bu kuramın kuantum biçimindeyse kabaca uzayın her noktasında bir kuantum harmonik osilatörü bulunur. Alan, her yere yayılmış tek bir fiziksel sistem olduğu için, her noktada aynı dalga frekansı f geçerlidir; böylece her noktada enerjileri hf 'in tamsayı katları olan “alan tanecikleri”, yani fotonlar üretilebilir. Fotonların sayıca çok ve yoğun olduğu yerlerde, renkli bir fotoğrafın çok sayıda küçük renkli noktadan elde edilmesine benzer bir şekilde, sürekli gibi görünmeye başlayan elektrik ve manyetik alanlardan söz edebiliriz.

Kuantum mekaniğinde ilk defa karşımıza çıkan “dalga-parçacık” ikiliği, yani ışığın bazen parçacık özelliği göstermesi, buna karşılık da elektron gibi parçacıkların da aynen Young çift yarıç deneyindeki gibi girişim yaparak dalga davranışı sergilemesi, belki okuyucuya elektronların da bir kuantum alan kuramı olabileceği fikrini doğal gösterebilir. Bu da bizi tüm uzaya yayılmış bir “elektron kuantum alanının” bulunduğunu, bunun da her noktada kuantum osilatörlerinin var olacağını, nasıl kuantum elektromanyetik alan her noktada foton üretebiliyorsa, kuantum elektron alanının da elektron üretebileceğini düşünmeye götürür. Temel fiziksel gerçeklik tüm uzayda etkin olan bir elektron alanı olduğu için, her noktada üretilen elektronlar da yük, kütle, spin gibi özellikleri bakımından aynı olacaklardır.

Bu noktada neden fotonların her zaman aynı sıfır kütleyle, aynı $h/2\pi$ değerindeki spine ve aynı sıfır elektrik yüküne sahip oldukları da, elektronların neden özdeş oldukları da herhalde büyük ölçüde anlaşılmıştır: Fotonları kuantum elektromanyetik alan, elektronlarıysa kuantum elektron alanı tüm uzayda etki göstererek her yerde aynı

şekilde üretirler. Kısacası, bu bölümün başında ortaya attığımız fotonların kendi aralarında, elektronların kendi aralarında özdeş olmalarının nereden kaynaklandığı sorusunun temel açıklaması, doğada kuantum alanlarının bulunmasıdır.

Aslında bu önemli sonuca ulaşırken görelilik kuramını kullanmadığımız iddia edilebilir; ama bu tam doğru değildir. Kütsüz fotonların kuramı zaten baştan görelilik zorundadır. Elektronlardaysa, görelilik çok önemli yeni olgulara yol açar. Görelilikteki $E^2=p^2c^2+m^2c^4$ denkleminde E 'yi çözerken karekökten artı ve eksi iki işaret geldiğini hatırlayalım. Schrödinger denkleminin görelilik biçimini bulmaya çalışırken, Dirac bu negatif enerjili elektron çözümlerinden kurtulabilmek için çok radikal bir öneri ortaya attı. Doğada herşey gidebileceği en düşük enerji düzeylerine gitmek eğiliminde olduğundan, bu negatif enerji düzeyleri tüm elektronları yutacak bir dipsiz kuyu gibi davranacaklardı. Dirac'ın radikal önerisi elektronların Pauli Dışlama İlkesi'ne uymalarına dayanıyordu. Dirac, en dipteki (burada bir şekilde negatif enerjinin sonsuza gitmediği açıkça söylenmese de kabul ediliyordu) düzeylerden başlayarak tüm negatif düzeylerin $p=0$, yani $E=-mc^2$ tepe değerine kadar zaten dolu olduğunu, o yüzden bizim gördüğümüz normal elektronların $E=+mc^2$ değerinden başlayan pozitif enerjili düzeylerde yer alabildiklerini iddia ediyordu. Kuyu dolu olduğu için bunlar kuyuya düşmüyordu.

Dirac'ın bu görüşlerine göre “boşluk” ya da “vakum” aslında bir “negatif enerjili elektron denizi” oluyor, fakat bu ortam her yerde olduğundan ve biz de tüm ölçümlerimizi bu ortamı temel alarak yaptığımızdan, aynen içinde buldukları denizden haberdar olamayan balıklar gibi davranıyoruz. Yalnız arada bir örneğin enerjisi $2mc^2 + 2\varepsilon$ olan bir foton - $(mc^2 + \varepsilon)$ negatif enerjili bir elektron tarafından soğurulursa, bu aşağıdaki elektron “su yüzüne” çıkıp $mc^2 + \varepsilon$ pozitif enerjili bir normal elektrona dönüşebiliyor. Üstelik, sonsuz negatif enerjili ve negatif elektrik yüklü “vakum” diyegeldiğimiz denizde ortaya çıkan boş düzey, bu fona göre net yükü de, net enerjisi de pozitif olan yeni bir parçacık rolünü

oynuyor; bunlara pozitron ya da anti-elektron deniliyor. Yani bir foton ortadan kaybolmuş, yerine bir negatif yüklü ve pozitif enerjili (elektron), bir de pozitif yüklü ve gene pozitif enerjili (pozitron) iki parçacık gelmiş oluyor! Bunun tersi de mümkün: normal, negatif yüklü ve pozitif enerjili bir elektron bir denizdeki bir deliğe düşüp ortadan kaybolabilir, bu arada delik de dolduğu için ortadan bir pozitron da eksilmiş olur. Pozitif enerjili ilk konumundan deliğe düşen elektron da, enerjisinden bir foton göndererek kurtulmak zorundadır. Net olay, bir elektron-pozitron çiftinin birbirlerini yok ederek geriye bir foton bırakmaları gibi görünecektir. Böyle süreçler gerçekten de gözlemlendi ve Dirac'ın denklemi ve yorumu bir antimadde dünyasının varlığını ortaya çıkarmış oldu.

Bu noktada Wheeler ve Feynman'ın elektronların özdeşliğini kuantum alan kuramı kullanmadan açıklayabilmek için ortaya attıkları şaşırtıcı bir görüşü aktaralım. Wheeler yukarıda anlattığımız “bir fotonun bir elektron-pozitron çiftine dönüşmesi” ya da bunun tersi olan çiftin fotona dönüşmesi olaylarının başka bir şekilde de düşünülebileceğini söylüyor: Elektronla buluşup onu ve kendisini fotona dönüştüren pozitronun geçmişte yer aldığı başlangıç uzay-zaman noktasından buluşma uzay-zaman noktasına pozitif yük ve pozitif enerji taşımamasının, normal negatif yüklü fakat aynı zamanda negatif enerjili bir elektronun buluşma noktasından pozitronun ilk uzay-zaman noktasına doğru zamanda TERS yönde gitmesiyle eşdeğer olduğuna dikkat çekiyor. Bu durumda tek bir elektron pozitif enerjile zamanda ileri, negatif enerjile de zamanda geri giderek sonsuz zikzaklar yapabiliyor. Zamanda geri gittiği sırada biz onun pozitif enerjili bir pozitron olduğunu düşünüyoruz. Zikzaklar arasındaki belirli bir anda etrafımıza bakarsak göreceğimiz çok sayıda elektron-pozitron çiftleri aslında bir tek elektronun zamanda ileri-geri giderken o anda rasladığımız görüntülerinden ibaret. Feynman Nobel konuşmasında birgün Wheeler'ın kendisini arayıp “Feynman, neden tüm elektronların aynı özelliklere sahip olduğunu biliyorum. Hepsisi aynı elektron da ondan!” dediğini anlatıyor. Dalga değil de parçacık görüşüne bağlı

kalmak istenirse parçacıkların özdeşliğini açıklamak için bu yorum kullanılabilir gibi görünüyor; fakat çekiciliğine karşın, bu yolun burada değinmeyeceğimiz henüz çözülememiş başka zorlukları var. Biz gene alan kuramına dönelim.

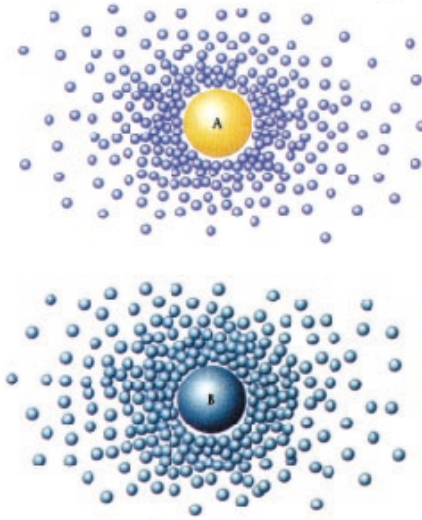
Kuantum mekaniğini ve göreliliği bir arada ele alırsak, Dirac denizi gibi detaylı bir açıklama kullanmadan bile vakumdan parçacık üretme olaylarının kaçınılmaz olacağını görebiliriz. Heisenberg Belirsizlik İlkesi'ne göre, bir parçacığın konumunu gitgide küçülen bir Δx hatası ile ölçmek istersek, momentumu p 'de $\Delta p = h/\Delta x$ gibi gitgide büyüyen bir belirsizlik ortaya çıkacak; bu da büyüyen bir ΔE 'ye yol açacak. Görelilikte enerji ve kütle birbirlerine dönüşebildiği için, bu ΔE 'nin değeri mc^2 'yi aşarsa, ortaya yeni bir parçacık daha çıkabilecek. Ayrıca $\Delta E \Delta t > h$ şeklinde bir başka Belirsizlik ilişkisi daha var; bu da enerji korunumunun ΔE kadar bozulmasına $\Delta t = h/\Delta E$ kadar kısa bir zaman aralığı için izin verilebileceği anlamına geliyor. Böylece rölativistik kuantum alanlar kuramlarında boşluktan sürekli olarak geçici, ya da daha standart terimiyle sanal parçacık-antiparçacık çiftleri ve sanal fotonlar çıkıyor ve bunlar tekrar boşluk içinde kayboluyor. Sanal olmayan parçacıkların etrafında da her zaman bir sanal parçacık bulutu bulunacağı görülüyor; bu bulut da (bazı sonsuzluklar renormalizasyon denen bir yöntemle gizlendikten sonra) manyetik moment gibi büyüklüklere hesaplanabilir düzeltmeler getiriyor; böyle hesaplar da deneylerle inanılmaz bir uyum içinde.

Spin-İstatistik Teoremi; Poincaré Grubunun Temsilleri

Spini ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$, yarım tam sayı) kere $h/2\pi$ değerlerinde olan elektron, proton gibi parçacıklara fermiyon dendiğini ve bunların Pauli Dışlama İlkesi'ne uyduklarını, yani iki özdeş fermiyonun aynı kuantum durumuna yerleştirilemeyeceğini söylemiştik. Spinleri ($0, 1, 2, \dots$, tam sayı) kere $h/2\pi$ gibi değerler taşıyan piyon, foton gibi parçacıklaraysa bozon denilir; bunlarsa aynı kuantum durumuna yerleşmeye eğilimlidir. Böylece fermiyonlar arasında bir itme, bozonlar arasındaysa bir

çekme etkisi doğar. İtme etkisinin maddenin uzayı doldurmasındaki rolüne değindik; bunun ötesinde beyaz cüce ve nötron yıldızlarının kütleçekiminin çekici etkisine direnerek çökmemelerini de Dışlama İlkesi sağlar. Bozonlardaki çekme etkisiyse lazerler, süperiletkenlik, süperakışkanlık gibi çarpıcı olaylara yol açar; bu olayları çarpıcı kılan, kuantum fiziğinin koherensle ilgili etkilerinin makroskopik ölçekte kendilerini gösterebilmeleridir.

Spinin yarım ya da tam sayı olmasıyla parçacığın fermiyon ya da bozon özellikleri göstermesi arasında deneysel olarak gözlenen ilişkinin genel bir teorik açıklaması 1934-1958 arasında Pauli ve Burgoyne'in makaleleri, Wigner'in Poincaré grubunun temsilleri hakkındaki çalışmalarıyla mümkün ol-



Boşlukta sanal A elektronu (üstte), zıt elektrik yüküne sahip sanal parçacıklar tarafından çevreleniyor, sanal bir kuark ise (altta) aynı renge sahip sanal kuarklar ve gluonlar tarafından sarılıyor.

du. Açıklamamıza Wigner'in görüşleriyle başlayalım. Matematikte grup adı verilen yapı simetri operasyonlarından oluşur. Poincaré grubu da koordinat sistemlerinin uzayda döndürülmesi, bir yerden başka bir yere taşınması ve bir koordinat sisteminin, ona göre sabit hızla düz bir yönde hareket eden bir başkasıyla değiştirilmesi operasyonlarından oluşur. Simetriyle kastedilen de fizik yasalarının tüm bu koordinat sistemlerinde aynı olması, bu operasyonlar altında değişmemesidir; bu değişmezlik zaten daha önce gördüğümüz gibi Einstein'in özel görelilik kuramıyla

la ortaya konmuştu. Wigner, grubun cebirinden her parçacık ya da bağlı olduğu alan için iki değişmez sayı olduğunu gösterdi: Parçacığın kütlesi ve spini. Gene cebirden kütleli sürekli her hangi bir pozitif değeri, fakat spinin sadece yukarıdaki tam sayı ya da yarım tam sayı değerleri alabileceği çıkıyordu. Ayrıca Poincaré grubundan tamsayı spinli parçacıkların $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ ilişkisine dayanan, buna karşılık elektron gibi yarım tamsayı spinlilerince $E = + (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$ ve $E = - (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$ ilişkilerine uyan denklemler sağlayacağı görülüyordu.

Artık bu bilgiler ışığında neden fermiyonların Pauli Dışlama İlkesi'ne gereksinim duyduklarını görebiliriz: Bu ilke olmasaydı ve istediğimiz kadar elektronu bozonlarla yapabildiğimiz gibi aynı düzeye koyabilseydik, negatif enerji düzeylerini doldurup pozitif enerjilere geçebilmek hiç mümkün olmayacaktı; tam bir dipsiz kuyuyla karşılaşacaktık. Öte yandan, bozonlara Dışlama İlkesi uygulandıyındaysa, ışık hızını aşan sinyaller gönderme olasılığı gibi kabul edilemeyecek bir başka sonuç ortaya çıkacaktı.

Kuantum fermiyon alanlarının Dışlama İlkesine, bozon alanlarının ise parçacıkların aynı durumda bulunmalarını sağlayan bir istatistiğe uymaları matematiksel şekilde şöyle ifade ediliyor: Aynı uzay-zaman noktaları (x,y,z,t) ve (x',y',z',t') 'de tarif edilmiş iki Alan operatörü (bunları uzay zamanın fonksiyonu olan devâsâ sonsuza sonsuz matrisler olarak düşünebiliriz) birbirleriyle önce biri sağda, öbürü solda olmak üzere, sonra da sıraları değiştirilerek çarpılıyor. Fermiyonlar için bu iki terimin arasına artı, bozonlar içinse eksi konulup ifadenin Planck sabitine orantılı bir fonksiyona eşitlenmesi gerekiyor. "Komütasyon bağıntısı" denen bu ilişkiler, hem kuramın kuantum özelliklerini, hem de artı ya da eksi işaretine göre fermiyon ya da bozon karakterini belirliyor. Aslında Heisenberg Belirsizlik İlkesi de konum ve momentum operatörleri arasında böyle bir ilişkiden çıkartılıyor; bu yüzden daha önce yoğun maddenin sıkıştırılmama özelliğinden söz ederken saydığımız iki nedeni bire indirebiliriz. Kuantum alanlar kuramında Heisenberg Belirsizlik İlkesi de, Dışlama İlkesi de Alan komütasyon bağıntılarının içinde.

Makroskopik Gündelik Dünya ve Kuantum Alan Kuramı

Temel fikirlerimizi kısaca tekrarlayalım ve özetleyelim: Makroskopik gündelik hayatta kuantum kuramının ünlü paradokslarıyla karşılaşmamamızın (laboratuarda özel olarak hazırlanmış, makroskopik sayıda temel parçacığın koherent şekilde davranmaya zorlandığı özel sistemler dışında) nedeni yalnızca Planck sabitinin bu ölçekte çok küçük kalması değil, çok sayıdaki temel parçacığın dalga fonksiyonlarının birbirlerine göre gelişigüzel fazları dolayısı ile net girişim yapamaması. Bu yüzden günlük makroskopik ölçekte gördüklerimizi açıklamak için klâsik fiziğin yeterli olduğu savı tam yanlış demesek de, önemli oranda yanlıcı.

Tüm kedilerin birbirlerine benzemesinden sayı kavramımızın kaynağına, oradan da bardağa su doldururken düzeyinin neden yükseldiğine kadar birçok kanıksadığımız olay ve düşünce kökeninde kuantum alan kuramının, onun da kökeninde Poincaré grubuyla ifade edilen uzay-zaman simetritlerinin bulunduğunu açıklamaya çalıştık. Bozon sınıfından fotonlar, aynı durumda bir arada bulunabildikleri için makroskopik klâsik elektromanyetik dalgaları meydana getirebiliyorlar, elektron gibi fermiyonlarsa birbirlerini dışlayıp iterek katı ve sıvı yoğun maddeyi oluşturuyorlar. Boşluk deyip geçtiğimiz ortamsa gördüğümüz gibi Descartes'dan beri bir dolu, bir boşaldı. Son görüntüsünde sanal parçacıklarla kaynaştığını anlattık; fakat boşluk hakkında burada değinemediğimiz, daha söylenecek çok şey var. Aslında beynimizin işleyişinde temel bir rol oynayan potasyum, sodyum ve klor iyonları alış-verişi de son çözümlemede tamamen kuantum alan kuramına indirgenebileceği için, düşüncelerimizin hepsi de kuantum alan kuramının özelliklerinden kaynaklanıyor diyebiliriz; fakat burada felsefenin en derin problemlerinden olan zihin ve madde ilişkisine fazla yaklaştığımız için hadimizi bilip duralım. Hiç değilse tüm insan beyinleri aynı kimyasal madde-

lerden yapıldığına ve aynı kimyasal süreçlerle işlediklerine göre, farklı insanların kavramlarının yakınlığının da, insanların bu ortak kavramlarla anlaşabilmelerinin de temelinde kuantum alan kuramının bulunduğunu söyleyebiliriz. Bu görüşlere ille de bir isim takmak gerekirse, belki "kuantum materyalizm" uygun olabilir.

Şimdi de düşünilemeyecek bir şeyi düşünmeye çalışalım: Planck sabiti gerçekten sıfır olsa Dünya nasıl görünürdü? Bu sorunun doğru yanıtı, herhalde klâsik fiziğin temel bazı tutarsızlıkları dolayısı ile aslında "işleyebilen" böyle bir dünyanın kurulamayacağı olmalı, ama bunları gözardı edip ilk akla gelen bir takım özellikleri sayalım. Hiç bir madde parçasının birbiriyle aynı ya da özdeş olmasını bekleyemeyiz; bu-



nun gerçekleşme olasılığı akıl almaya-
cak kadar küçük olurdu. Bunu anlamak için bazen küçük bir güneş sistemi gibi düşündüğümüz atomlarla gerçek Güneş Sistemi'ni karşılaştıralım. Atomların birbirleriyle aynı olmalarının kuantum alan kuramından geldiğini gördük; buna karşılık başka bir galakside Güneş Sistemi'nin tamamına aynısının bulunmasının olanaksız olduğu apaçık. Böyle bir sistemdeki "güneşin" ve "gezegenlerin" kütle, yarıçap, yörünge boyutları bakımlarından Güneş Sistemimizle çakışması olasılığı pratik olarak sıfır. Bunları bizimkilere benzetebilmemiz bile, gene büyük ölçüde kuantum süreçlerinin evrenselliğine dayanıyor: Örneğin bu yıldız da Güneş gibi termonükleer tepkimelerle ışıyor olacak, gezegenlerinin kimyasal

kompozisyonu bizimkilerden çok farklı olmayacak. Herşeyin gerçekten tamamen farklı ve şekilsiz olduğu bir evrende Platon'un evrenselleri ya da tanımlanabilir kategoriler, bunlardan türetilen sayı kavramı nasıl oluşabilirdi? Pauli Dışlama etkisi olmadan klâsik fizik yasalarından olan kütleçekimine karşı maddenin çöküp her yerde karadelikler oluşturması nasıl durdurulacaktı? Belki bir çekim merkezinin çevresinde yörüngede olan parçacıklar merkezkaç kuvvetiyle (ya da başka bir deyişle açısal momentum korunmasıyla) bu çökmeyi yavaşlatabilecek, fakat ışınlı enerji kaybederek sonunda merkeze düşeceklerdi; bu durumda belki evrende yalnızca elektrik yükleri, kütleleri ve açısal momentumlarıyla birbirlerinden ayrılan karadelikler kalacaktı.

Belirsizlik sözcüğünün yarattığı yanlış izlenimlere, Schrödinger'in Kedisi gibi paradoksların doğurduğu esrarenizlik havasına karşın, doğada gördüğümüz düzen ve kesinliklerin arkasında kuantum yasaları var. Klâsik fiziğin betimlediği dünyayı ciddiye alıp hayal etmeye kalkınca, aslında çok daha anlaşılabilir ve bize tamamen yabancı olduğunu görüyoruz.

Bugün Doğadaki dört etkileşmeden üçünün kuantum alan kuramını biliyor ve kullanıyoruz. Bu üç kuram çekirdeğin binde biri ölçüğündeki mesafelere kadar deneyle uyuyor ve gördüğümüz gibi çevremizde gözlediğimiz olguların çok büyük kısmını açıklamakta temel bir rol oynuyor. Henüz kuantum kuramı kurulamamış olan kütleçekim, çekirdeğin yüz milyar kere milyar daha altında bir ölçüğe işaret ediyor ve burada bildiğimiz kuantum alan kuramı çerçevesinin yeterli olmayacağı şimdiden anlaşılıyor. İlerde sicim kuramının ya da bunun (nasıl kurulacağı daha tam belli olmayan) M-kuramı adlı bir genellemesinin bu ölçekte geçerli olacağı, şimdiki başarılı alan kuramlarımızmsa bu nihai kuramın bir alçak enerji yaklaşıtı-
mı olacağı düşünülüyor.

Cihan Saçoğlu
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü
ve Feza Gürsey Enstitüsü