



# Mikro evren için yeni paradigma: Kuantum Teorisi

Mikro evrenin gizlerine ulaşabilmemiz günümüzden ancak 80-90 yıl önce gerçekleşmiş. Bugün enformasyon-bilgi teknolojileri devrimi olarak haklı bir şekilde adlandırılan ve yaşamı dünya tarihindeki diğer devrimlerle (tarım ve sanayi devrimleri) kıyaslandığında bile inanılmaz ölçekte değiştiren devrimin temelinde yatan bilimsel devrim ise hiç kuşkusuz “Kuantum” devrimidir.

## 1. Giriş

**D**eney ve gözlemden yola çıkarak bir bilimsel bilgi derlemeye (bilimsel bilgi oluşturmaya) giden yolda en önemli unsur sezgidir. Sezgi, günlük yaşamımızdaki olaylar ve şeylerle ilgili basit deneyimlerimizden kaynaklanır. Gözlemlerimizi daha kapsamlı ve daha tutarlı bir şekilde açıklamaya çalıştıkça ya da gözlem alanı genişleyip çok daha farklı ve çeşitli olgularla karşılaştıkça açıklamalar basit durum saptamaları olmaktan çıkar ve kanun dediğimiz kodifiye kurallara dönüşür. Kanunların belirgin özelliği sezgiye dayalı doğrudan tanımlayıcı ifadelerden, yani sübjektif olarak aşikâr olandan giderek uzaklaşan niteliğidir.

Bunu doğal karşılamak gerekir. Çünkü günlük yaşamdan kazanılan deneyimler, kendi “uzunluk, zaman ve ağırlık” ölçeklerimiz ve alışılmış hızlarla (yani doğadaki hızlarla karşılaştırıldığında, çok yavaş) hareket eden şeylerle ya da çok özel koşullarla ilgilidir. Dolayısıyla çok sınırlı olgulara karşılık gelmektedir. Doğanın, bu ölçeklerin ve koşulların çok ötesine gidildiğinde de aynı şekilde davranmasını gerektirecek hiçbir neden yoktur. Salt akıl yürütmeye bu tür bir çıkarsama yapılabılır; ancak bu hiç kuşkusuz bilimsel bir yaklaşım değildir. Salt akıl yürüt-

meyle doğru doğa kanunlarına ulaşamayacağına en büyük kanıt, büyük Aristo'nun bu şekilde kurduğu sistemin (bir anlamda aydınlanmaya kadarki neredeyse 2000 yıl süren ortaçağ karanlığından da sorumlu sayılan) hazin akıbetidir.

Tek ve çok karakteristik bir örnek vermek gerekirse, gelişen teknoloji sayesinde ancak ulaşabildiğimiz en hızlı ulaşım (uçak) hızı olan 1000 km/saat mertebesindeki hızı günlük yaşamdaki en yüksek hız olarak algılayarak deneyim dağarına yerleştirmiş bir insanın bu tür bir deneyimle bunun bir milyon katı yüksekliğindeki ışık hızını (0,3 milyon km/saniye=1,08 milyar km/ saat) ve bu hızla ilişkili olabilecek doğa olayları ve onları tanımlayan kanunlar hakkında bir sezkiye sahip olması herhalde beklenemez. Kendi ölçeğimizde bize aşikâr gibi görünen olgular başka ölçekler ve koşullara düz mantıkla taşındığında çok büyük paradokslara yol açabilir. Kısaca, doğal olay ve olguların ancak çok küçük bir bölümü doğrudan günlük yaşamdan edinilmiş deneyim yoluyla anlaşılabilir. Doğaya ilişkin daha kapsamlı ve tutarlı bir bakış açısını ancak kendi ölçeklerimizi (kendimizi referans aldığımızda, her iki doğrultuda küçüğe ve büyüğe doğru) aşan hassas ve dikkatli deney ve gözlemlerle kazanabiliriz. O zaman da hiç beklenmeyen, tahmin edebildiğimizden çok farklı, hayal edebi-

Kanunların belirgin özelliği sezgiye dayalı doğrudan tanımlayıcı ifadelerden, yani sübjektif olarak aşikâr olandan giderek uzaklaşan niteliğidir.

leceklerimizin çok ötesinde şeyler görürüz. Bu çok farklı bir psikolojik deneyimdir. Böyle bir durumda yaşanan heyecan ve gerilim bilimkurgu romanlarında olduğu gibi gerçekten var olduğu bilinmeyen ya da var olmayan şeyleri hayal etmekten kaynaklanan gerilim değil, gerçekte var olan şeylerle ilk kez karşılaşmanın verdiği şaşkınlık içinde onu kavrayabilmek için yaşanan gerilimdir.

“Kuantum Teorisi” adını verdiğimiz mikro evrene ilişkin kanunlara giden yolun 20. yy. başlarında o günün teknolojik olanakları çerçevesinde ulaşılabilen en küçük mesafelerdeki bazı gözlem sonuçlarını açıklama girişimleri sırasında ışığın doğasına ilişkin olarak karşılaşılan paradokslarla ve bu paradoksları anlama ve giderme girişimleri ile başladığını söyleyebiliriz. Mikro evrenin gene o dönemde oldukça yeni sayılabilecek diğer bir ferdi olan elektronlara dönersek ışığın tersi yönde bir paradoksla karşılaşıldığına tanık oluyoruz.

Böylece ışıktan sonra elektronlar da (ve mikro evrenin tüm diğer parçacıkları için de; elektron burada bir prototip olarak ele alınıyor) klasik paradigma çerçevesinde alışlagelmiş birbirinden tamamen farklı iki tür davranışı koşullara bağlı olarak gösterebiliyorlardı. Işık ve elektron bir parçacık mı, yoksa bir dalga mı? Eldeki farklı veriler her ikisinin de mümkün olduğunu gösteriyordu. Tüm bu ikilemlerin ve şaşırtıcı tuhaflıkların kendi içinde tutarlı bir teori çerçevesinde anlaşılabilir ve bir çözüme kavuşmaları yaklaşık 25 yıl sürdü. 1900 yılında başlayan bu mikro evre-

ni anlama serüveni 1925 ve 1926 yıllarında kuantum mekaniği adı verilen yeni kuramın formülasyonunun tamamlanması ile “ilk fazını” tamamladı. Öykü burada bitmiyordu hiç kuşkusuz; zira mikro evren sürprizlerle doluydu. Hemen ele alınması gereken göreceli olarak basit problemler vardı. Einstein’ın 1905 yılında fotoelektrik olay problemi ile aynı anda yayımladığı gerçekten devrimsel “özel görelilik teorisi” ile bu yeni Kuantum Teorisi’nin uyumlaştırılması gerekiyordu ilk adım olarak. Yani ışık hızına yakın hızlarda hareket eden nesnelerin Kuantum Teorisi’nin kurulması gerekiyordu. Tek parçacık için geliştirilen bu teorinin özdeş parçacıkların toplu halde bir arada buldukları durumlar için genişletilmesi gerekiyordu vs, vs. Karşılaşılan her yeni problem çözüldükçe yeni problemler çıkıyordu karşımıza. Bu serüven hâlâ sürüyor ve aynı heyecanla sürüyor. Biz bu popüler makalede yalnızca birinci fazın, yani göreceli olmayan Kuantum Teorisi’nin kurulmasının tamamlandığı 1926 yılına kadar olan gelişmelerin tarihçesini anlatmakla yetindik.

## 2. Klasik fizik paradigması

Kuantum fiziğinin orijinlerini araştırırken, bunun öncesini yani klasik fiziğin gelişim evrelerini ve ulaştığı en son düzeyi iyice anlamak gerekir. Burada klasik fizikten kastettiğimiz 20. yy.ın başı itibarıyla doğaya ve işleyiş kurallarına ilişkin bilgi ve kuralların matematiksel ifadeleri olan kanunların tümüdür.

Tarihsel bakımdan ilk büyük fiziksel teori, Galileo’nun çok değerli öncül katkıları üzerine inşa edilmiş olan Newton’un teorisidir. Bu teori, uzaktan anlık etki ile etkileşen kütleli noktasal parçacıkların teorisiydi. Uzaktan etkiye bilinen en eski klasik örnek gene Newton tarafından geliştirilmiş genel çekim teorisidir. Dikkat edilmesi gereken önemli husus: Bu kanunların temelinde tüm kütleli nesnelerin matematiksel noktasal parçacıklar olarak temsil edilmesiyle yapılan çok keskin bir soyutlama-idealleştirme vardı. Örneğin, bu

Tarihsel bakımdan ilk büyük fiziksel teori, Galileo’nun çok değerli öncül katkıları üzerine inşa edilmiş olan Newton’un teorisidir. Bu teori, uzaktan anlık etki ile etkileşen kütleli noktasal parçacıkların teorisiydi.

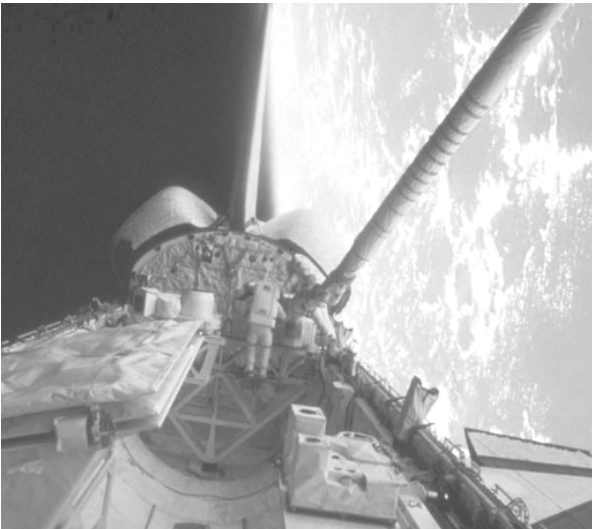
kanunlar astronomik olaylara uygulandığında Güneş ve gezegenler bile matematiksel noktasal parçacıklar gibi düşünülüyordu ve buna karşın son derece başarılı sonuçlar veriyordu.

Matematiksel olarak her bir serbestlik derecesi için zaman cinsinden ikinci dereceden lineer bir diferansiyel denklemle ifade edilen Newton teorisinin konumuz bağlamında belirtilmesi gereken diğer önemli temel özellikleri “nedensel (=causal)” ve “belirleyici (=deterministic)” oluşudur. Bu kavramların tanımlarını verirken,

Nedensel olmak, sistemin “durumu” belli bir anda biliniyorsa, izleyen her bir anda da tamamıyla biliniyor olmasıdır.

Belirleyici olmak ise sistemin “durumu” hakkındaki bilginin sistem hakkındaki tüm fiziksel özellik ve olayları kesinlikle belirliyor olması anlamındadır.

Dikkat edilirse felsefi bakımdan son derece önemli bu iki kavramın tanımlarında bir başka yeni kavram, “durum” kavramı karşımıza çıkıyor; şimdi bu kavramı tanımlayalım. Newton fiziğinde birbirleriyle anlık kuvvetlerle (ve uzaktan etki ile etkileşen noktasal parçacıklar için “durum” verilen bir anda sistemi oluşturan tüm parçacıkların nerede oldukları ve nasıl hareket ettiklerinin kesin bilgisidir. Daha teknik bir dille ifade edersek tüm parçacıkların konum ve momentumlarının bilgisidir. Böylece, verilen bir anda bu dinamik parametreler ve bu parçacıkların hangi kuvvetin etkisi altında hareket ettikleri biliniyorsa, o zaman fiziksel süreç tam olarak betimlenmiş demektir. Yani, izleyen her hangi bir anda sistemin durumunun kesin olarak bilinmesinin (öngörülmesinin) yanında, sistem hakkında soru-



labilecek tüm fiziksel soruların yanıtlarının da kesinlikle biliniyor olması (belirlenmiş olması) demektir.

20. yy.'ın başındaki ulaştığı en gelişmiş şekli itibarıyla Klasik Fizik'in gelişim tarihçesini kısaca özetlemek yararlı olacaktır. 17. yy.'ın son çeyreğinde Newton'un kanunları ile hayata geçirilen bu teori, dünyadaki tüm bilinen mekanik olaylara ve dünya dışındaki astronomik olaylara 200 yıl süreyle başarıyla uygulanmıştır. Ancak 19. yy.'ın ikinci yarısında yeni tür fiziksel olaylarla, elektrik ve magnetizma (manyetizma) ile karşılaşıldı. Bu olaylar üzerindeki araştırmalar Newton teorisi çerçevesinde tasavvur edilemeyecek özelliklere sahip yeni bir teorinin gelişmesine yol açtı. Bu yeni teori, Maxwell'in "Elektromanyetik alan teorisi"ydi. Bu teori de tıpkı Newton teorisi gibi nedensel ve belirleyici idi. Fakat onu Newton teorisinden çok farklı kılan bir özelliği "durumun" betimlenmesinde karşımıza çıkıyordu. Hatırlanacağı üzere, Newton teorisi çerçevesinde sonlu sayıda parçacıktan oluşan bir sistemin durumu bu parçacıkların konum ve momentumları ile belirleniyordu. Yani bu sonlu sayıda parametre içeren kesikli bir betimlemeydi. Elektromanyetik alan teorisinde ise "durum" sonlu sayıda parametre ile belirlenemez ve sonsuz sayıda parametre gerekmektedir. Zira durumun belirlenmesi için herhangi bir anda elektrik (E) ve manyetik (B) alanların tüm uzaydaki dağılımlarının ve yönlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu teorisinin nedensel oluşu {E, B} vektör alanlarının her hangi bir andaki dağılımları biliniyorsa bu dağılımların takip eden her hangi bir anda da kesinlikle öngörülebilmesi anlamına gelmektedir. Bu teorisinin belirle-

Başarı ile tamamlanan her bir uzay yolculuğu, uzay laboratuvarı, Hubble teleskopu vs. Newton teorisinin geçerliliğinin birer kanıtıdır. Radyo, TV, radar, gsm telefonlar vb. Maxwell teorisinin ne denli başarıyla işlediğinin kanıtlarıdır.

yici olması ise elektrik ve manyetik alan dağılımları hakkındaki bilginin elektromanyetik alan hakkında sorulabilecek tüm fiziksel soruların yanıtlarının kesinlikle veriliyor olması anlamındadır.

Özetlersek, 19. yy.'ın sonunda klasik bölgede her ikisi de nedensel ve belirleyici olan iki farklı tür teori var elimizde. Aralarındaki karakter farkı sistemin durumunun betimlenmesindeki radikal farktan kaynaklanıyordu. Bu iki teori mevcut halleri ile bir anlamda klasik davranışın iki uç noktasını temsil ediyordu. 20. yy.'ın başında klasik bölgedeki anlayışımızı ciddi şekilde geliştirip incelten ve Einstein'ın imzasını taşıyan iki yeni çok önemli gelişme daha oldu: özel ve genel görelilik teorileri. Bunlardan özellikle özel görelilik teorisinin Newton-Maxwell teorisi üzerinde çok ciddi geliştirici etkisi oldu. Böylece artık noktasal parçacıklar anlık (uzaktan etkileyen) kuvvetlerle etkileşmiyordu. Bu gelişmeyle elektromanyetik alan bir anlamda parçacıklarla aynı statüye yükseliyordu. Şöyle ki, noktasal parçacıklar arasındaki etkileşme kuvveti artık anlık değildi, dinamik bir nitelik taşıyordu ve uzay-zaman içinde aracı alan tarafından (sabit bir değere sahip olan ışık hızı ile) yayılarak taşınıyordu.

Böylece 20. yy.'ın başlarında klasik

bölgede ulaşılan en son nokta itibarıyla içinde parçacıklar ve alanlar bulunan ikili bir dünya görüşü taşıyan bir teori vardı ortada. Bu iki unsur, noktasal parçacık ve sürekli alan, birbirinden tamamen bağımsız ve birbirleri cinsinden açıklanamaz olgularıydı. Bu en gelişkin son haliyle bu teori klasik bölgedeki tüm olayları başarıyla açıklıyordu. Ancak gelecek bölümde anlatılacağı gibi atom ölçeğine taşındığında bu mükemmel ve görkemli teori ciddi sorunlarla karşılaştı; bu bölgede işlemedi. Bu bölgedeki sorunları çözme girişimleri sonucunda yeni fizik kanunları, yeni düşünce biçimleri ve yeni felsefi kavramlarla karşılaşıldı. Bunların bir kısmı bir sonraki bölümde ele alınacak. Bazıları ise bu sayıda çıkan diğer makalelerin konusunu oluşturuyor.

Bu bölümü bitirmeden klasik fizik ile ilgili çok önemli bir hususu belirtmek hakkaniyet bakımından önem taşıyor. Klasik bölgeden mikro evren taşıdığına uğradığı başarısızlık bu teorisinin artık hiç bir değeri kalmadığı ve dolayısı ile tarihin çöp tenekesine atılması gerektiği anlamına gelmiyor hiç kuşkusuz. Günlük yaşamımızdan bu teorisinin hâlâ geçerli olduğunu kanıtlayan düzinelerle örnek verilebilir. Başarı ile tamamlanan her bir uzay yolculuğu, uzay laboratuvarı, Hubble teleskopu vs. Newton teorisinin geçerliliğinin birer kanıtı. Radyo, TV, radar, gsm telefonlar vb. Maxwell teorisinin ne denli başarıyla işlediğinin kanıtları.

### 3. Mikro evren ve paradokslar-klasik paradigmanın iflasi

20. yy.'ın başı fizik bilimi için gerçek bir kriz ve kaos dönemi idi. Teknolojinin gelişiminin sağladığı yeni olanaklarla doğanın o güne değin ulaşılamamış bölgelerine ulaşıldıkça yeni paradokslar çıkıyordu karşımıza. Mikro evrene ilişkin yeni gözlemsel olgular tüm görkemine ve 200 yıllık hükümlerine karşı klasik paradigmayı çaresizlik içinde bırakıyordu.

1-) Atomun yapısı Rutherford'un yaptığı deneylerle 1911 yılında ilk kez olarak doğru şekilde anlaşılıyordu. Çok küçük bir bölgede yoğunlaşmış artı yüklü bir çekirdeğin çerçevesindeki çok küçük yörüngelerde dolaşan eksi yüklü küçücük elekt-



19. yy.'da yeni tür fiziksel olaylarla, elektrik ve magnetizma (manyetizma) ile karşılaşıldı. Bu yeni teori, Maxwell'in "Elektromanyetik alan teorisi"ydi.

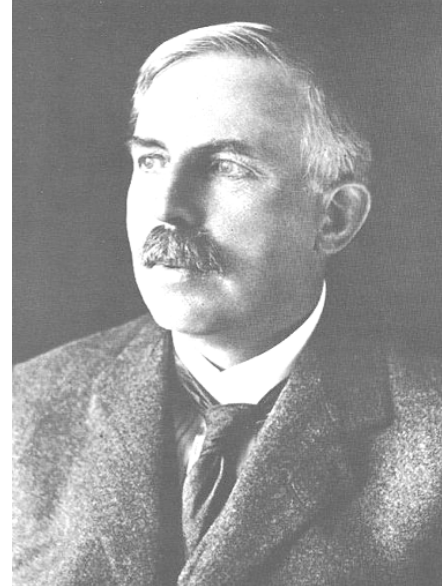
ronlardan oluşan minyatür bir güneş sistemi vardı ortada. Bu geometrik benzerliğe karşın ortada çok temel farklar da vardı. Bir kere bu iki sistem arasında ölçek olarak 20-25 mertebe ( $10^{-10}$  m. ölçeğinden, örneğin dünya için  $150 \times 10^6$  km. ölçeğine) fark vardı. Gerçi dünya üzerinde geliştirilmiş klasik fizik büyük mesafelere-dışa doğru başarı ile genişletilebilmişti. Ancak 10 mertebeyi kapsayan kısa mesafelere içe doğru genişlemenin de sorunsuz olacağına dair elde herhangi bir ipucu da yoktu. İkinci bir fark da gezegenlerin nötr nesnelere olmasına karşın atomlar (net elektrik yükü itibarı ile nötr) elektrik yüklü bileşenlerden (noktasal nesnelere) oluşuyordu. Minyatür gezegen sistemi yakıştırması da bu yüklü nesnelere geometrik yapısının evrensel kütle çekim yasasının tamamıyla aynı olan Coulomb kuvvetiyle (her ikisi de mesafeye göre ters kare karakterinde) etkileşmeleri nedeniyle klasik fizik kanunları uygulandığında gezegen sistemine benzer eliptik yörüngelere ulaşılmasından kaynaklanıyordu. Ancak bu yakıştırma modelde o gün itibarı ile bilimin geldiği en uç noktayı temsil eden Newton- Maxwell paradigması çerçevesinde çok ciddi bir sorun vardı. Pozitif yüklü çekirdeğin çevresindeki eliptik (kapalı) bir yörünge üzerinde ivmeli bir hareket yaptığını göre, elektronun Maxwell yasaları çerçevesinde sürekli olarak elektromanyetik dalgalar ışıması ve böylece sürekli olarak enerji kaybetmesi ve dolayısı ile sarmal bir hareket yaparak çekirdeğe yaklaşması ve ışıdığı enerjinin yoğunluğunun giderek artması ve (atomun  $10^{-10}$  m. mertebesindeki boyutları göz önüne alındığında) saniyenin çok çok küçük bir kesri içinde çekirdeğin üstüne düşmesi gerekirdi. Yani bu tür bir atomun varlığını sürdürmesi mümkün değildi; çok kısa sürede yok oluyordu. Demek ki bu modelde bir sorun vardı; zira doğadaki her madde içindeki atomlar kararlı nesnelere; öyle durup dururken yok oldukları yoktu. Doğadaki atomların kararlılığı klasik paradigma çerçevesinde anlaşılabilir bir özellik değildi. Atomların bu kararlılığı onların ışımaya yapamadığı anlamına gelmiyordu kuşkusuz. Işıma da yapıyorlardı. Ama klasik paradigma çerçevesinde açıklanamayan belirli kesikli frekanslarda ışık yayıyorlardı ve bu

frekans değerleri o günler için anlamsız görünen tuhaf kurallara bağlıydılar.

2-) O günlerde atomların mikro dünyasına ilişkin olarak karşılaşılan tek sorun atomların kararlılığı ve ışımaya spektrumu değildi; başka tür açıklanamayan olaylar da vardı. Bunların en ünlülerinden biri de siyah cisim ışıması olarak bilinen olaydı. Belli bir sıcaklıktaki bir kutunun duvarlarındaki "parçacıklarla" termal dengede bulunan elektromanyetik ışımaya enerji yoğunluğunun sıcaklığın fonksiyonu olarak bakıldığında gösterdiği tuhaflıkla ilgiliydi burada karşılaşılan sorun. Rayleigh ve Jeans, 1900 yılında o günün geçerli paradigması klasik fizik kanunları çerçevesinde sistemin tüm enerjisinin denge durumunda elektromanyetik alan tarafından "sınırsız" olarak emileceğini hesaplamışlardı. Ancak sonuçlarında o güne kadar rastlanmadık ve alışılmadık bir tuhaf-lık vardı: Enerji giderek artan frekanslarla dur durak bilmeden elektromanyetik alana yönelmekteydi. Gözlemlerde sonsuz bir enerji patlamasına rastlanmadığına göre, demek ki doğa kendisini bir şekilde böyle bir felaketten sakınabilmekteydi. Şöyle ki, gözlem sonuçları yüksek frekans bölgesinde enerji dağılımının sonsuz artmak yerine sifıra yaklaştığını gösteriyordu. Verilen bir sıcaklıkta çok özel bir frekansta (renkte) enerji en yüksek değere ulaşıyor ve daha yüksek ve daha düşük frekanslarda azalıyor ve sifıra gidiyordu. Ancak bir de bardağın dolu yarısı vardı; o da yapılan hesabın tümünden yanlış olmadığı idi. Düşük frekans bölgelerinde Rayleigh ve Jeans'in hesap sonuçları gözlem sonuçlarıyla uyumluydu.

Newton ve Maxwell gibi iki büyük sentezcinin adları ile özdeşleşen klasik

Doğadaki her madde içindeki atomlar kararlı nesnelere; öyle durup dururken yok oldukları yoktu. Doğadaki atomların kararlılığı klasik paradigma çerçevesinde anlaşılabilir bir özellik değildi.



*Atomun yapısı Rutherford'un yaptığı deneylerle 1911 yılında ilk kez olarak doğru şekilde anlaşılmıştı.*

paradigma belli ki bu sorunsal duruma çare bulamıyordu. Bu ve benzeri sorunlar nasıl çözülecekti.

Beklenen çözüm yapay da olsa çok gecikmeden geldi. Hemen o yıl (1900), Max Planck yüksek frekans sonsuzluktan kurtulmayı sağlayacak bir öneri/varsayım ortaya attı: Elektromanyetik alan salınımları, E enerjisi (parçacıksız özellik) ile f frekansı (dalga özelliği) arasında belli bir ilişki bulunan kuantumlardan oluşur:  $E=hf$ . Burada h (bugün) Planck sabiti olarak bilinen doğanın yeni (o gün için) bir temel sabiti idi. Değeri normal standartlarda çok küçüktü:  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  joule-saniye. Aslında Planck'ın yaptığı matematiksel uyum için yaptığı zorlama ve yapay bir varsayımıydı Bu varsayım ışımaya genişliğini gözlemlerle uyuşan bir biçimde hesaplamaya, yani yüksek frekanslardaki sonsuz enerji patlamasından kurtulmaya olanak sağlıyordu. Ama, aslında Planck bu yapay ancak çok cesur atılımı ile kuantum dünyasına ilk adımı atmış oluyordu.

3-) Gene de bu işin sosyolojik boyutunda bir tuhaf-lık vardı. Zira bu denli devrimsel yeni bir kavram, uzunca bir süre pek dikkat çekmedi ve bir yeni aktivite odağı oluşturmadı. Bu tuhaf ve son derece tutucu göz ardı etme süreci o güne kadar adı sanı duyulmamış ve o günün akademik camiası dışından Einstein adında

genç bir bilim adamı 1905 yılında yeni bir öneride bulununcaya kadar sürdü. Bu çalışması ile Einstein bir anlamda Planck'ın matematiksel varsayımının fiziksel olarak içini dolduruyordu. Einstein'ın kendisine verilen "tek" Nobel ödülünü borçlu olduğu bu son derece basit fakat çığır açan çalışması fotoelektrik olay adı verilen "metal yüzeyler üzerine düşen ışığın bu yüzeyden elektron sökmesi" olayıdır. Bu sürecin dalga teorisi çerçevesindeki anlaşılması çabaları başarısız olmuştur. Sonuçları açıklamanın yolu ışığın, en azından bu süreç çerçevesinde, tek tek sayılabilir ve belli değerlerde kesikli enerji taşıyan tanecikimsi nesnelere oluşmuş gibi yorumlanmasını gerekli kılıyordu. Bu önemli hipoteze yol açan gözlem sonuçlarını özetlersek,

Işığın frekansını değiştirmeden şiddetini (parlaklığı) artırdıkça yalnızca sökülen elektronların sayısı artıyordu, fakat hızları (dolayısı ile kinetik enerjileri) sabit kalıyordu.

Işığın şiddeti sabit tutulup frekansı (renk faktörü) artırıldıkça sökülen elektronların sayısında bir değişiklik olmuyor, ancak hızları (enerjileri) artıyordu.

Işığın şiddeti ne kadar değiştirilirse değiştirilsin, daha düşük değerleri için hiç bir elektron sökülmesine rastlanmayan bir kritik frekans değeri vardı.

O tarihte ışığın dalga karakteri hem deneysel (Young) hem de teorik (elektromanyetik alan salınımları; Maxwell, Hertz) olarak son derece iyi biliniyordu. Şiddet-parlaklık dalganın genliği-yüksekliği (nin karesi), dolayısı ile dalganın toplam enerjisi, renk ise frekansa (ya da dalga boyu) karşı gelen birbirinden bağımsız matematiksel-fiziksel niteliklerdi. Bunların birbirlerinden bağımsız olarak değiştirilmeleri ve kontrolleri o tarihte de iyi bilinen tekniklerdi. Işık dalga gibi davranıyordu, atomlardan dış tabakalarındaki (oldukça zayıf bağlı) elektronları koparmak bağlanma enerjisini karşılayacak enerjiyi ona aktarmakla mümkün olabileceğine göre ve dalganın enerjisi de genlikle orantılı olduğuna ve şiddete-parlaklığa karşı geldiğine göre, bu parametreyi yani parlaklığı değiştirerek onla orantılı enerjiye sahip elektron sökmek mümkün olmalıydı. Deneyle gözlenen ise, elektron-

Einstein'ın kendisine verilen "tek" Nobel ödülünü borçlu olduğu bu son derece basit fakat çığır açan çalışması fotoelektrik olay adı verilen "metal yüzeyler üzerine düşen ışığın bu yüzeyden elektron sökmesi" olayıdır.

ların sökülmesini ve hızlarını (enerjilerini) kontrol eden dalgamsı ışık parametresi frekans (renk)'ti, parlaklık (şiddet) olmadiğiydi.

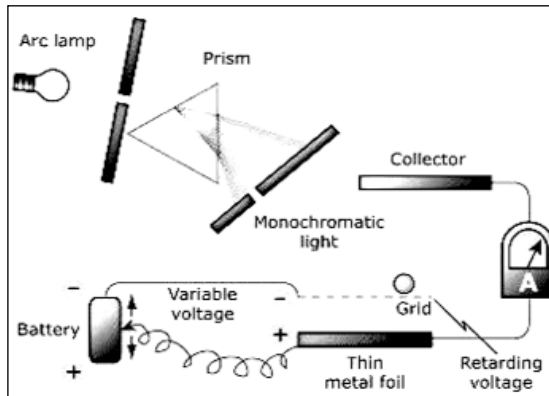
Ancak ışık, frekans ile orantılı enerjiye sahip foton adlı parçacıklar sağanağı olarak düşünülürse yukardaki gözlem sonuçları açıklanabiliyordu. Ancak, parlaklık ışığın toplam enerjisini temsil ettiğine göre, daha yüksek parlaklık aynı frekansta daha yüksek sayıda foton ya da aynı sayıda daha yüksek enerjili (frekanslı) foton anlamına da gelebilirdi. Bu bağlamda bakıldığında ilk iki deneysel sonuç bu iki seçenektan birisi arasında tercih yapabilmemize olanak sağlamıyordu. Bu bakımdan en belirleyici olan sonuç üçüncü sonuç. Şöyle ki, frekans belli bir değerin altında tutulup parlaklığı artırmak foton sayısını artırma yolu ile parlaklığı artırma anlamına geliyordu ki, sayıları ne denli çok olursa olsun bu demeti (dalgayı) oluşturan foton parçacıklarının herhangi birinin elektronların bağlanma enerjisini karşılayıp onu atomdan koparacak yükseklikte olmadığını söylüyordu; bu çok tipik bir parçacık davranışıydı. Yani deney

sonuçları birinci seçenekteki yorumu destekliyordu. Bu yeni yorum çerçevesinde şiddet-parlaklık (dalga genliği) foton sayısına, renk (frekans-dalga boyu) bireysel foton enerjilerine karşılık gelen bağımsız parametrelerdi. Parlaklığı azaltarak (dalga dilinde frekansı değiştirmeden dalga genliğini azaltarak) çok az sayıda bireysel foton (ideal limitte tek tek fotonlar) taşıyan ışık demetleri oluşturmak mümkündü. Kuantum etkilerinin en belirgin şekilde kendini göstereceği limit budur. Yüksek sayıda foton içeren çok şiddetli demetlerde kuantum etkileri birbirlerini yok ederek istatistik anlamda dalgasal girişim ya da kırınım desenleri ortaya çıkacaktır.

Dikkat edilirse bu fiziksel süreci tartışmaya epeyce yer ayırdık. Bu nedensiz değil. Zira, ışığın kesin deneylerle belirlenmiş dalga karakterine ilaveten bir de parçacık karakterine sahip olduğunun kesin olarak belirlendiği ilk deney budur ve bu sürecin anlaşılması ile bilim tarihinin en büyük devrimlerinden biri olan "Kuantum Teorisi"ne giden yolların kapıları açılmıştır.

4-) Tam bu noktada, yukarda vurgulanan önemi nedeni ile ışığın doğasına ilişkin anlayışımızdaki tarihsel evrilmeyi kısaca anımsamakta yarar görüyorum.

Bu tarihçede ilginç iniş ve çıkışlar görüyoruz. Örneğin, klasik paradigmanın en büyük mimarlarından Newton (17. yy.'ın son çeyreği) ışığın yağmur gibi veya bir (makinel) tüfekten atılan mermiler gibi bir tanecikler sağanağına benzer şekilde davrandığını varsayıyordu. Bunun tersine bir varsayım Newton'un çağdaşı Huygens tarafından benimsenmişti; ona göre ışık dalga tabiatındaydı. Bundan yaklaşık 100 yıl sonra 1801 yılında Young tarafından gerçekleştirilen ve kimilerinin bilim tarihinin en belirleyici deneylerinden biri olarak nitelenen deneyler sonucunda ışığın gerçekten de (örneğin sudaki) dalgalar gibi davrandığı yani dalga karakterinde olduğu kesinlikle saptandı. Elektromanyetik alan salınımları olarak ışık dalgalarının teorisi 19. yy.'ın ikinci yarısında Maxwell tarafından geliştirildi ve deneysel olarak Hertz tarafından doğrulandı Ancak 20. yy.'ın başlarındaki (deneysel) araştırmalar ışığın birçok yönden gerçekten parçacık gibi dav-



Fotoelektrik olay kısaca, ışığın metal yüzeyinden elektron koparmasıdır.

randığını gösterdi. Bu gelişmelerdeki belirleyici isimler Planck (1900) ve Einstein (1905)'dir. Gelinen nokta ışığın hem parçacıklardan hem de alan salınımlarından (dalga) oluştuğu noktasydı. Klasik bakımdan yadsınmayacak kadar birbirine ters olan bu iki kavram aynı nesne üzerinde birbirleriyle nasıl bağdaştırılacaktı.

Bu ikili yapının salt ışık için geçerli bir özellik olduğu epeyce uzun bir süre hüküm sürdü fizik dünyasında. Fotoelektrik olayla aynı anda geliştirilen Einstein'ın özel görelilik teorisinin de etkisi ile doğadaki çok özel durumu (parçacık gibi düşünüldüğünde kütsesiz ve hep ve kaynağın hareketinden bağımsız olarak saniyede 300.000 kilometre hızla hareket eden bir hilkat garibesi) pekişmiş olan ışığın bu yeni ilave "tuhaf" ve tekil özelliği de kabul edilebilirdi. Ancak ışığın bu bakımdan tek olmadığı ve maddesel (kütleli) parçacıkların da bu ikili yapıya sahip olduğu yani uygun koşullarda dalgalar gibi davrandıkları 1923'te Fransız fizikçisi de Broglie tarafından doktora tezinde ortaya atıldı. Bilim tarihi bakımından belirtilmesi gereken, De Broglie'nin esas olarak profesyonel bilim yaşamının başındaki bu doktora çalışması ile (Kuantum Teorisi konusundaki) Nobel ödülü alanlar kervanına katılmış olmasıdır. Buradan genç bilim adamları için çıkarılması gereken önemli ders, insanın bir tek önemli, ama gerçekten önemli, çalışma ile bilim tarihine geçebileceğidir. Önemli olan nicelik değil nitelikler. De Broglie'nin önerisi m kütleli ve dolayısı ile  $mv$  momentumuna sahip bir parçacığın bu momentumla ters orantılı bir dalga boyuna sahip bir dalga gibi de davranacağıydı. Bu bağıntı aşikâr olmayan bir biçimde (aşikâr değil; zira ışık kütsesiz ve yeni bağıntı kütleli parçacıklar için geliştiriliyor) ışık için geliştirilen Einstein-Planck "ikilik" bağıntısı ile de uyumluymdu. Hadi ışık için yaklaşık 250 yıl öncesine

Newton zamanına kadar uzanan inişli çıkışlı bir ikililik serüveni vardı; ancak maddesel parçacıklar için bu ilk kez oluyordu ve bu da de Broglie'nin bu masum görünüşlü önerisine devrimsel bir nitelik kazandırıyordu. Bir anlamda bu masum öneri klasik Newton-Maxwell paradigmasının çok temel bir unsuru olan birbirinden tamamen ayrı parçacık-alan ikili yapısına çok ciddi bir darbe vuruyordu. Bu teorik önerinin deneysel doğrulanması da kısa bir süre sonra gerçekleştirildi.

Bu amaçla mikro evrenin gene o dönemde oldukça yeni sayılabilecek diğer bir ferdi olan elektronlara dönersek, ilk keşfedildiklerinde (J. J. Thomson, 1896) tamamen parçacık özellikleri ile (tüfek mermileri gibi) karşımıza çıkmışlardı. Young'ın ışıkları yapmış olduğu deneyi 1928 yılında bu kez elektronlarla tekrarlayan Davisson ve Germer (ve bağımsız olarak G. Thomson-elektron kâşifinin oğlu) tane-cik yapısının yanı sıra elektronun dalga karakterine de sahip olduğunu gösterdiler.

5-) Danimarkalı fizikçi N. Bohr, 1913 yılında atomun yapısının Rutherford'un 1911'de yaptığı deneylerle anlaşılmasından 2 yıl sonra, yeni kuantum kavramını çok ustaca genişletip (yalnızca ışık parçacığının belli kesikli enerji değerlerine sahip öbek-topaklardan oluşmadığı, mikro evrendeki diğer dinamik değişkenler de, örneğin açısal momentum, belli bir sabitin [Planck sabiti-mutlu bir tesadüf olarak bu dinamik değişkenin boyutu Planck sabiti ile aynı] tam sayı katlarında kesikli değerlere sahip olduğu genellemesini yapmıştı) kullanarak atomun kararlılığını sağlayacak ve ışımada bulunan ışımaların neden belli kesikli değerlerdeki frekanslarda olmaları gerektiğini açıklayan bir atom modeli geliştirdi. Daha açık söylersek, Bohr çekirdek etrafındaki elektronun açısal momentumunun  $h$  (bölü 2  $\pi$ )'nin tam katı değerde olması gerektiğini öneriyordu; ama bunun için



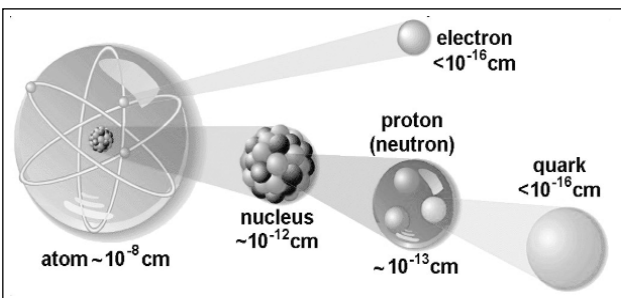
*Newton ışığın yağmur gibi veya bir (makineli) tüfekten atılan mermiler gibi bir tanecikler sağanağına benzer şekilde davrandığını varsayıyordu.*

herhangi bir gerekçe ya da ispat sunamıyordu. Bu masum ve son derece basit kural atomun kararlılığı ve ışımaya spektrumuna ilişkin tüm sorunları bir çırpıda çözüvermişti. Bu çarpıcı başarısına karşın bu basit modeli mikro evrenin nihai modeli olarak değerlendirmek hiç kuşkusuz mümkün değildi. Beklenen teori 1925-1926 yıllarında Heisenberg, Schrodinger ve Dirac'ın çok önemli katkıları ile geliştirilmiştir. Planck'ın 1900'deki varsayımından kapsamlı bir teoriye ulaşmak 25-30 yıl gibi bir süre almıştır. Bu dönem diğer önemli gelişmelerle (özel ve genel görelilik) bilim tarihinin belki de en önemli kesimini oluşturmaktadır.

Tüm bu keşifler günümüzden 80-100 yıl gibi oldukça uzun bir süre önce gerçekleştiği için, kronolojik sıraya pek fazla özen göstermeden tümünün yaklaşık aynı zamanlarda olduğu gibi bir anlatım kullanıyoruz bu tarihçelerde. Ancak ışığın parçacık karakterini ortaya koyan fotoelektrik deneyi ile elektronun dalga karakterini ortaya koyan (daha önce de Broglie tarafından ortaya atılan teorik iddiayı doğrulayan) kırınım deneyi arasında yaklaşık 30 yıllık bir aralık var. Ancak bu, Kuantum Teorisi'nin gelişiminin tamamlanması için harcana toplam süre göz önüne alındığında hiç de kısa bir süre değil ve detaylı kronolojik değerlendirmelerde göz ardı edilmemesi gerekiyor.

#### 4. Kuantum Teorisi

Klasik fiziğin atom ölçeğinde çalışmadığını ve bunların giderilmesine yönelik erken girişimlerden bazılarını yukarıda 3. bölümde özetlemiştik. Bu çalışmalar mikro evrendeki iki temel özelliği ortaya koyuyor.



Mikro evrendeki fiziksel özellikler belli birim değerlere ya da tam katlarına sahiptirler. Örneğin elektronun kütlesi ve elektrik yükü belli değerlere sahip; örneğin yarım elektron yok. Yarım ya da başka küsurlu elektronik yük biriminde elektrik yük taşıyan (serbest) nesne doğada yok.

Mikroskobik ölçekte fiziksel olaylar istatistik karaktere sahip. Bir başka deyişle, tek bir olayın sonucu, makroskobik ölçekte olduğu gibi, kesin bir şekilde öngörülemez; ancak topluca ele alındıklarında sonucu ortalama olarak öngörebiliriz.

Bu son derece önemli (istatistiksel) özellik Kuantum Teorisi'nin kalbini oluşturur ve açıklaması ünlü çift yarık deneyinin ayrıntılı analizi ile hem düşünsel hem de deneysel düzeyde kolayca gerçekleştirilebilir. Bu yazının genel okuyucuyu hedef alan popüler üslubu bu deneyin teknik özelliklerinin burada detaylı açıklamasına olanak vermiyor. Dolayısı ile biz bu konuda ayrıntılı bilgi edinmek isteyen okuyucuyu, Feynman'ın yukarıda bahsettiğim sözünü de ettiği ve olağanüstü ustalıkla yazılmış ünlü popüler kitabı *Fizik Yasaları Üzerine* adlı kitaba yönlendirmekle ve bu önemli sonucun yeni bir teori, "Kuantum Teorisi"nin oluşturulmasında nasıl belirleyici bir şekilde kullanıldığını özetlemekle yetineceğim.

Bu amaçla ilk olarak fiziğin olgusal ve deneysel bir bilim alanı olduğu gerçeğinden yola çıkarak ölçüm problemini ele alacağız. Mikro evrendeki ölçümün yukarıda bahsettiğim özellikler bağlamında taşıdığı ilginç tuhaflıkları kavrayabilmek için önce makroskobik ölçekte klasik fizik çerçevesinde ölçüm sürecine kısaca değinelim. Hemen belirtelim ki ölçme bir nesne hakkında bilgi edinme işlemidir; bunun için de bu nesneyle bir şekilde etkileşmemiz gerekir. Etkileşme varsa rahatsızlık-tedirgeme de var demektir.

Klasik ölçümlerin temel özelliği, rahatsız etmeyen-bozmayan ölçümler olmasıdır. Bu-

nun için çok temel bir varsayım (idealleştirme) yapılmaktadır: "Sıfıra götürülmese de etkileşme istenildiği kadar küçültülebilir." Ayrıca, bu işlem sonunda hâlâ ihmal edilebilecek kadar küçültülemeyen tedirgemeler kalıyorsa, klasik fizik nedensel ve belirleyici olduğundan, bunların etkilerini istenilen hassasiyette hesaplayıp bu hesap sonuçlarını ölçüm sonucunda bulduğumuz değerleri "düzeltmekte" kullanabiliriz.

Buradan çıkan çok önemli sonuç "istediğimiz fiziksel özellikleri, örneğin durum tanımına giren parametrelerin tümü ya da herhangi bir alt kümesini "aynı anda" ve istenilen hassasiyetle ölçebileceğimizdir; üstelik bu hassasiyet için bir limit de mevcut değildir. Zaten bunun böyle olması gerektiği klasik durum tanımından da açıklıkla görülmektedir. Durumun sistemi oluşturan tüm parçacıkların verilen bir andaki konumları ve momentumları bilgisi olduğu hatırlanırsa, durumun biliniyor olması tüm bu parametrelerin kesinlikle biliniyor olması demektir. Madem ki fizikte tek bilgi edinme yolu ölçümdür, o zaman tüm bu dinamik parametrelerin aynı zamanda (eşzamanlı) kesin olarak ölçülebildiği anlaşılmaktadır.

Kuantum bölgesine gidildiğinde hayat artık ne yazık ki bu kadar basit değildir. İlk olarak karşımıza çıkan zorluk artık etkileşmeleri dilediğimiz gibi küçültmeyeceğimizdir. Zira, yukarıda belirttiğimiz gibi atom ölçeğinde (tüm fiziksel özellikler gibi) elektrik yükleri sadece elektronik yük gibi bir sabitin tam katları olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektronik yükü azaltamayacağımıza göre ve etkileşme kuvvetleri elektrik yüküne bağlı olduğuna göre, demek ki etkileşme şiddetini ve dolayısı ile ölçme işleminin oluşturduğu tedirgemeyi (bozucu rahatsızlığı) klasik ölçümde olduğu gibi dilediğimiz gibi azaltmamız mümkün değildir. Ayrıca mikro evrende tekil olayların sonucunu kesinlikle öngörmemiz mümkün olmadığından, bu savuşturulamayan ölçüm

Bohr çekirdek etrafındaki elektronun açısal momentumunun  $h$  (bölü  $2\pi$ )'nin tam katı değerinde olması gerektiğini öneriyordu; ama bunun için herhangi bir gerekçe ya da ispat sunamıyordu.

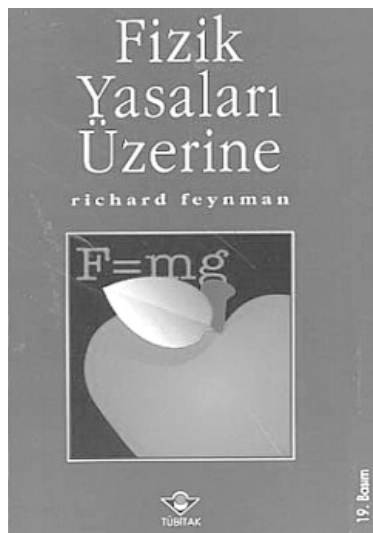
tedirginliklerinin ölçülen sistem üzerindeki etkisini kesinlikle öngörüp doğru sonuçta yaklaşma bağlamında bir düzeltme yapma olanağına da sahip değiliz. Demek ki mikro evrende ölçüm işlemi, ölçülen nesne üzerinde istenildiği kadar küçük olmayan ve kontrol edilemeyen değişiklikler oluşturur. Yani her ölçüm yaptığımızda ölçümden önceki durumdan farklı yeni bir durum yaratıyoruz.

Aşikâr ki bu, eş zamanlı ölçüm işlemini istisnai durumlar dışında, olanaksız kılacak yeni bir tuhaf özelliğidir mikro evrenin. Bu konuyu biraz daha teknik düzeyde tartışabilmek için ölçmek istediğimiz iki  $P$ ,  $Q$  özelliğini göz önüne alalım (bunlar momentum ve konum gibi dinamik değişkenler ya da bunlardan türetilmiş başka herhangi dinamik parametreler olabilir). Bunları önce " $P, Q$ " sırasında, sonra da " $Q, P$ " sırasında ölçtüğümüzü düşünelim. Klasik perspektiften bakıldığında bu iki işlemin sonucu aynı olacaktır. Ancak kuantum perspektifinden durum radikal bir şekilde farklıdır. İlk dikkat edilmesi gereken husus bu iki işlem sırasında farklı tedirgemelerin rol oynadığıdır. Dolayısı ile  $P$  ve  $Q$ 'nun bu işlemler sonucu bulduğumuz nümerik değerlere sahip olduğunu söyleyemeyiz. Bunu söyleyebilmemiz ancak  $P$  ve  $Q$ 'nun ölçüm sırasından bağımsız olarak bu değerlere sahip olmasıyla mümkün olabilirdi. Yani kuantum perspektifinden, istisnai durumlar dışında,

Önce  $P$  sonra  $Q$  deneyinde yalnızca  $Q$  belirli bir değere sahip olarak ortaya çıkar,

Önce  $Q$ , sonra  $P$  deneyinde ise,  $P$  belirli bir değere sahip olarak ortaya çıkar.

Bu ifadeler Kuantum Teorisi'nin en





önemli ve en karakteristik özelliklerinden biri olan “belirsizlik ilkesinin” öncülleri olan ifadelerdir, dolayısı ile biraz daha ayrıntılı tartışmayı hak edecek öneme sahiptir. Şöyle ki, P’yi ölçtüğümüzde bu yeni işlem bu yeni durumda da ciddi değişiklikler oluşturacak ve öncekinden (P ve Q arasındaki durum) daha farklı bir duruma ulaşılacaktır. Şimdi, hâlâ ilk ölçümde bulduğumuz değerde olup olmadığını görmek için P parametresinin değerini tekrar sorgularsak, ilk değerden farklı bir değere ulaşırız. Bu değer bu parametrenin alabileceği mümkün değerlerden biridir; bunlar yaptığımız işleme bağlı olarak değişebilen belli farklı olasılıklarla karşımıza çıkacaktır. Bu gerçekten de olması gereken şeydir. P’nin ikinci ölçümünde sistemin durumu, ilk ölçümünde elde ettiğimiz sonucu veren durumdan farklı bir durumdur (araya giren Q’nun ölçümü bu durum değişikliğine neden olmuştur).

Bu fiziksel sonuçları matematiksel bir çerçeveye taşımak istersek, P ve Q fiziksel özelliklerinin artık klasik fizikte olduğu gibi salt sayılarla temsil edilemeyeceğini görürüz. Zira, salt sayıların ölçüm sırasına bağlı olmak gibi bir özelliği yoktur. Öyle bir matematiksel çerçeve bulmamız gerekiyor ki fiziksel ölçüm işlemlerindeki sıralamaya bağlılık karşılık gelen matematiksel işlemdeki sıralamaya karşı gelsin.

“Kuantum Mekanikliği”nin kurucu babaları tarafından bulunan yeni matematiksel çerçeve, bu fiziksel özelliklerin, elemanlarının sırasının önemli olduğu bir cebir’in elemanları olarak temsil edilmeleriydi. Yani bu cebirsel sembollerden ikisinin çarpımı, iki fiziksel ölçümün ardışık olarak yapılması işlemine karşı geliyordu.

Özetlersek, artık ihmal edilemeyecek ölçüm tedirgemeleri nedeniyle mikro evrende ölçüm sırası son derece önemliydi, dolayısı ile bu fiziksel özelliklere karşı gelen cebirsel sembollerin çarpım sırası da önemli olmalıydı. Bu şekilde kuantum mekaniğindeki çok önemli yeniliklerden birine ulaşılmış oldu: Fiziksel parametreler komütatif olmayan operatörlerle temsil edilmeliydi.

Durum kavramına dönersek şunu görüyoruz. Deneyler mikro evrendeki fiziksel olayların istatistiksel doğasını ortaya

koyduğuna göre bu özelliğin kendisini durum tarifinde yansıtması gerekiyordu. Teknik ayrıntıya girmeden kısaca belirtsek durum bu yeni matematiksel çerçevede uygun bir matematiksel uzayda bu komütatif olmayan operatörlerin üzerine etkiyeceği bir vektörle temsil edilmektedir. Bu teorinin nedensel bir teori oluşu, durum vektörünün zaman içindeki evrimini betimleyen denklemden de belliydi. Schrödinger tarafından geliştirilen bu denklem, enerji operatörünün merkezi rol oynadığı zaman cinsinden birinci dereceden bir lineer bir diferansiyel denklemdi. Durum vektörü verilen bir anda biliniyorsa bu denklem uyarınca takip eden herhangi bir anda (bu başlangıç değeri cinsinden) kesin olarak belirlenebiliyordu. Ancak, bu durum vektörüne “Kopenhag Okulu” tarafından yüklenen yorum bağlamında bakıldığında yeni teori beklendiği üzere belirleyici değildi. Zira bu durum vektörü hakkındaki bilgi herhangi bir fiziksel özelliğin ancak ortalama değerinin bilinebilmesine olanak sağlıyordu; ancak herhangi tekil bir ölçümün sonucunun kesinlikle öngörülebilmemesine olanak sağlıyordu. Matematiksel istatistik bilimi diliyle ifade edersek, öngörülebilen sonuç pek çok kereler tekrarlanmış ölçümlerin sonucunda bulunacak değerlerin ortalama değeridir.

Sözlerimi bağlarken 1926’da ulaşılan şekliyle Kuantum Teorisi’nin özelliklerine bakıldığında, klasikten kuantuma geçişte en esaslı şekilde değişikliğe uğrayan kavramın “durum” kavramı olduğunu görüyoruz. Bu yeni çerçevede klasik durum tanımında yer alan parametrelerin ancak ya-

Mikroskobik ölçekte fiziksel olaylar istatistik karakter sahip. Bir başka deyişle, tek bir olayın sonucu, makroskobik ölçekte olduğu gibi, kesin bir şekilde öngörülemez; ancak topluca ele alındıklarında sonucu ortalama olarak öngörebiliriz.

rısı, ya konum parametreleri ya da momentum parametreleri kullanılmaktadır; ancak asla bu iki grup parametre, tümü birlikte kullanılmamaktadır. Bu son derce doğaldır; zira bunların tümünün aynı anda kesinlikle (istenen hassasiyette) ölçülmesi mümkün değildir. Birinci grubun (konumların) kesinlikle bilindiği durumda, momentumlar hakkındaki bilgimiz tümüyle belirsizdir; tersi durumda da konum bilgimiz tamamen belirsizdir. Yapabileceğimiz en iyi şey bunların tamamıyla gelişigüzel nitelikte olan olasılıklarından bahsetmektir.

## 5. Son söz

Modern bilimin oluşumu uygarlık tarihi perspektifinde bakıldığında çok yeni bir etkinlik. Copernicus’un güneş merkezli evren modelini 1543 yılında ortaya atmasıyla başlayan bilimsel devrim, 5000 yıllık yazılı tarih bağlamında bakıldığında daha dün gibi yeni bir olay. Hele buna ilk modern atalarımızın yeryüzünde yürümeye başladığı 500 bin yıllık perspektiften bakıldığında bu olayların ne denli kısa süre önce oluşan genç devrimler olduğunu daha iyice takdir edebiliriz. Klasik fiziğin Newton’un sentezi ile tamamlandığı tarihten (Principia Mathematica, 1686) günümüze geçen süre ise topu topu 323 yıl. Kuantum Teorisi’nin çok daha genç bir bilim dalı olduğu yukardaki tarihten iyice görülüyor. Mikro evrenin gizlerine ulaşabilmemiz günümüzden ancak 80-90 yıl önce gerçekleşmiş. Bugün enformasyon-bilgi teknolojileri devrimi olarak haklı bir şekilde adlandırılan ve yaşamı dünya tarihindeki diğer devrimlerle (tarım ve sanayi devrimleri) kıyaslandığında bile inanılmaz ölçekte değiştiren devrimin temelinde yatan bilimsel devrim ise hiç kuşkusuz “Kuantum” devrimidir.

Bu devrimin başlarında olmasa da son evrelerinde bilim dünyasının neferleri olarak yer alma şansına sahip olmak ve bu süreci mutfağında yer alarak yaşayanlardan biri olmak tüyler ürpertici bir deneyim. Bu duygu bile tek başına dünya nimetlerini tepmeyi gerektiren bilim adamlığını çok özel ve çok anlamlı kılıyor. Yetenekli gençler bilim dünyası sizleri bekliyor; zira hâlâ yanıt bekleyen evrene ilişkin yüzlerce soru ve çözülmemiş problem var.

