

# Werner Heisenberg (1901-1976)



*Bilim tarihinde yüzyılımızın ilk çeyreği, devrimsel atılımların birbirini izlediği, fırtınalı bir dönemdir. Planck'ın kuantum, Einstein'ın rölativite kuramları ve Rutherford'un atom modeli, bu atılımların başlıcalarıdır. Bohr'un 1913'de ortaya koyduğu kuantum atom modeli, 1920'lerde özellikle genç fizikçilerin ilgi odağı olmuştur. Ne var ki bu model, bazı önemli noktalara ışık tutmakla birlikte, yeterince belirgin ve tutarlı olmaktan uzaktı. Üstelik, Bohr'un "kuantum yörüngeleri" dediği kavram için ortada deneysel kanıt da yoktu. Elektronların çekirdek çevresinde dönmesi, güneş sistemine bir benzetme olarak kalan bir varsayımdı. Modeli kimi yönleriyle yetersiz bulan genç fizikçilerin başında De Broglie, Pauli, Heisenberg, Schrödinger ve Dirac gibi, çalışmalarıyla daha sonra ünlenen seçkin isimler vardı. Bunlar arasında en büyük atılımın Heisenberg'den geldiği söylenebilir.*

**H**EISENBERG, yirmi dört yaşında iken oluşturduğu matris mekanik ve kendi adıyla bilinen belirsizlik ilkesiyle, atom fiziğine yeni bir kimlik kazandırarak 1932'de Nobel Ödülü'nü aldı. Fizikçi arkadaşları arasında sezgi gücüyle tanınan Heisenberg, daha okul yıllarındayken, ders kitaplarında yer alan görsel modellere kuşkuyla bakmış; Bohr modelini bile pek inandırıcı bulmamıştı. Özellikle modele dayanan varsayımlardan, görsel imgelerden kaçınıyordu. Atom, modellerde işlendiği gibi karmaşık değil; basit bir yapıda olmalıydı. Bohr ile karşılaşmış ve tartışmış, çok istediği bir şeydi.

Bu fırsat çıktığında delikanlı, Münich Üniversitesi'ndeki öğrenimini keserek Göttingen'e gitti. Bohr, bir sömestr için Göttingen Üniversitesi'ne konuk öğretim üyesi olarak çağırılmıştı. Atom fiziğinin önde gelen bir kurucusuyla tanışmak, kaçırılacak bir fırsat değildi. Heisenberg, dikkatli bir dinleyiciydi; ancak sırası geldiğinde doyurucu bulmadığı noktaları belirtmekten, dahası Bohr'u düpedüz eleştir-

mekten çekinmiyordu. Bohr, bu iddialı gencin olağanüstü yetenek ve coşkusunu farketmekte gecikmemiş; sömestr sonunda ona Kopenhag Teorik Fizik Enstitüsü'ne katılma önerisinde bulunmuştu. Üniversiteyi bitirir bitirmez, seçkin genç fizikçilerin toplandığı Enstitü'ye katılan Heisenberg'in sorguladığı temel nokta şuydu: Bohr modelinde öngörüldüğü gibi elektron, devindiği yörüngeyi nasıl "seçmekte"; dahası bir başka yörüngeye sıçramadan önce titreşim frekansını nasıl "belirlemektedir"? Bohr, bu varsayımını açıklamamıştı. Onun yaptığı, Planck'ın kuantum sabitini uygulamaktı. Bohr'a göre, atomun dengesini koruması, Planck sabitinin enerjisi sınırlama ve düzenleme etkisiyle gerçekleşmekteydi. Ancak bu yaklaşım, doyurucu bir açıklama getirmiyordu.

Elektronun çekirdek çevresinde devinen, sıradan bir parçacık olduğu savı da dayanaksızdı. Aslında Bohr'un atomik olgulara Planck sabitini uygulaması, yerinde bir yaklaşımdı; çünkü kuantum teorisi klasik mekanikten daha yeterli sonuç vermemekteydi. Ancak bu, teorinin birtakım sorunlar içermediği anlamına gelmiyordu.

Heisenberg, varsayımlar ve görsel modeller yerine, doğrudan deneysel verilere dayanan matematiksel bir dizge arayışı içindeydi. Özellikle kimi saptamaların göz önünde tutulması gerektiğine inanıyordu. Örneğin, atom içinde kaldığı sürece elektrona ilişkin, tahminlerin ötesinde fazla bir şey söyleyemeyiz. Ancak atom dışındaki davranışına ilişkin elimizde epey deneysel veri vardır. Bunun yanısıra, ivmeli devinen bir elektrik yükü olarak elektronun, elektro-manyetik radyasyon saldırdığı, salınan radyasyonun frekansının, deviniminin yinelenme frekansıyla daima aynı olduğu (Elektronun radyo antenindeki giriş-çıkış devinimi frekansının, salınan radyasyon frekansıyla aynı olması buna gösterilebilecek bir örnektir); bu durumda, elektronun, atom içinde de ivmeli devinen bir elektrik yükü olması koşuluyla, radyasyon saldırdığı, salınan radyasyon frekansının, deviniminin yinelenme frekansıyla aynı olduğu söylenebilir. Ne var ki, elektronun bir yörüngede devindiği varsayımına göre hesaplandığında, bu sav doğrulanmamıştır.

Bu türden kimi olumsuz sonuçlar, Bohr'u yörüngeler arasında "sıçrama" hi-



potezine götürmüştü. Buna göre, sıçramada yiten enerji, salınan radyasyonun frekansını belirlemekteydi. Tek elektronlu hidrojen atomunda bu sav doğrulanmaktaydı. Öte yandan "sıçrama" düşüncesi yörünge varsayımını içeriyordu; oysa ortada yörüngelerin varlığını gösteren hiç bir kanıt yoktu. Ancak, yukarıda örnek olarak aldığımız radyo anten olayı da yadsınmazdı. Ancak Bohr'un teorisine dayanan kimi öndeşmelerin bu olaya uyduğu bir durumdan söz edilebilir: Elektron çekirdekten uzakta, geniş bir yörüngede devindiğinde varsayılan sıçrama enerjisi sifira yakındır.

Atomun dış sınırında elektronun yörüngeyi tamamlama frekansı, beklenen sonuca uymakta; yani yörüngesel frekans, radyasyon frekansına eşit çıkmaktadır. Bohr, "karşılık" (correspondence) dediği yöntemiyle, atom dışından atom içi spektruma gidilebileceğini göstermişti. Heisenberg, yeterince akılcı bulmadığı bu yöntem yerine, bu gidişi daha mantıksal bir yöntemle gerçekleştirmeyi önermekteydi. Ona göre spektral kod, ancak böyle çözülebilirdi.

Heisenberg, çözüm için aradığı ipucunu klasik devinim yasalarında bulabileceğini düşünür. Bilindiği gibi, bir gezegenin aldığı yolu belirlemek için, gezegenin belli bir andaki konumunu belirleyen nicelikler, momentü (kütle x hız) çarpılır. Öyleyse atom düzeyinde bir frekans çöküntüsüyle, bir başka frekans çöküntüsünün çarpımının, bize aradığımızı vermesi olasıdır.

Ancak Heisenberg'in frekanslara ilişkin olarak ortaya koyduğu simgelerin kullanımı, değişik bir çarpım tablosu gerektirmekteydi. Heisenberg, farkında olmaksızın "matris cebir" denen bir sistemin kimi kurallarını yeniden keşfetmişti. Hocası Max Born'un yardımıyla aradığı teorisinin (kuantum mekaniği) matematiksel temeli ni oluşturmakta artık gecikmeyecekti.

Aslında oluşturulmakta olan yeni sistem, bir bakıma, klasik mekaniği andırmaktaydı. Klasik mekaniğin simgesel sözlüğü, "konum", "moment" ve devinime ilişkin diğer nicelikleri dile getirirken; yeni mekaniğin simgelerinin, atomik verileri temsil etmesi, aradaki farkı oluşturuyordu.

Matris cebir, klasik mekaniğin yetersiz kaldığı atomik problemlerin çözümüne elverişli bir yöntemdi. Ne var ki, başlangıçta Heisenberg, hayal kırıklığına uğramaktan kurtulamıyor; yeni yöntemle hidrojen spectrumunu hesaplamada başarısız oluyordu. Ancak çok geçmeden onu umutsuzluktan kurtaran bir gelişmeyi fark etti. Fizikçi arkadaşı Pauli'nin bulduğu



Erwin Schrödinger

"dışlama" (exclusion) ilkesi, geliştirmekte olduğu teoriye önemli destek sağlamaktaydı Pauli'nin çalışması, atomik spektraya ilişkin gözlemlere dayanıyordu. Bu gözlemler çoğunlukla birbirinden farklıydı. Pauli, bu gözlemlerin hepsi için geçerli bir açıklama arayışındaydı.

Bulduğu açıklayıcı ilke şuydu: Herhangi bir elementer parçacıklar sisteminde, örneğin atom kapsamındaki elektron topluluğunda, iki parçacık hiçbir zaman aynı biçimde devinmez ya da aynı enerji durumunda olmaz. Bu basit ilke yalnız elektronlar için değil; daha sonra keşfedilenlerle birlikte, atom-altı tüm parçacıklar için geçerliydi. Üstelik bu ilke, Bohr'un atom modelinde bir bakıma el yordamıyla yaptığı bir sınırlamayı (elektron davranışları üzerindeki sınırlamayı) da anlamlı kılıyordu.

"Pauli dışlama ilkesi" olarak bilinen buluş, Heisenberg'e teorisini tamamlama yolunu açmıştı. Artık, Bohr'un "karşılık" yöntemini, yetkin mantıksal bir dizgeye dönüştürebilirdi. Spektral kod, çözüm aşamasına ulaşmış; kuantum mekaniği doğmuş demektir. Tam bu sırada beklenmeyen, dahası şaşkınlık yaratan yeni bir gelişme ortaya çıktı: Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger, matris cebirine başvurmaksızın atomik spektrayı, dalga olayına uygulanabilen bir diferansiyel denklemle çözüyordu. Böylece, klasik fizik yasalarıyla çelişen kuantum kurallarına gerek kalmadan, atomun kesintili enerjisi açıklanabilmekteydi. Schrödinger'in dalga denklemi, "enerji bölümleri" düşüncesinin, fizikte yarattığı uyumsuzluğu gidermeye yeterli görünmekteydi.

Kuantum düşüncesi, fiziğin temel ilkelerinden biri olan neden-sonuç bağıntısını dışlamaktaydı; öyle ki, kesin öndeşlere olanak yoktu. Öndeşmeler ancak olasılık çerçevesinde yapılabildi. Oysa Schrödinger, dalga mekaniğiyle, bu tür sakinçalara yol açmaksızın, atom-altı düzeydeki tüm olguları açıklayabileceği inancındaydı. Örneğin, dalga mekaniği formülü, kara-cisim radyasyonuna ilişkin gözlem verilerine, Planck formülü ölçüsünde uygun düşmekteydi. Ona göre madde, dalgasal bir olaydı; "elementer parçacık" diye nitelenen şey, aslında, dalgaların birbirini pekiştirdiği küçük uzay bölgelerinden başka bir şey değildi. Sıçrama fikrine gerek yoktu.

Şimdi yanıtlanması gereken soru şuydu: dalga mekaniği gerçekten fiziği eski bütünlüğüne kavuşturuyor muydu? "Kuantum" kavramına artık gerek yok muydu? Bohr ve Heisenberg'e göre buna olanak yoktu; çünkü elektron, ister yörüngede

devinen bir parçacık olarak düşünülün, ister bir dalga titreşimi olarak algılandın, kesintilik gözardı edilemez, sıçrama varsayımından vazgeçilemezdi. Kaldı ki, dalga dilinde üstü örtük de olsa, sıçrama düşüncesinin var olduğu söylenebilirdi.

Öte yandan başta Max Planck ve de Broglie olmak üzere kimi fizikçiler, Schrödinger'i desteklemekteydi. Bu, de Broglie için doğaldı, çünkü atom fiziğinde dalga düşüncesi ondan kaynaklanmıştı. Oysa Max Planck, öncüsü olduğu kuantum teorisine ters düşen bir yaklaşıma arka çıkmaktaydı. Ne var ki Planck, yaratılıştan tutucu bir kişiydi; kurdugu teorisinin sonraki gelişmelerinde ortaya çıkan "aykırılık"ları, özellikle nedensellik ilkesinden uzaklaşmayı içine sindirememişti. Schrödinger'e, fiziği içine düştüğü bunalımdan kurtaran bir kahraman gözüyle bakıyordu.

Fizik dünyası bir ikileme karşı karşıyaydı. Bir yanda parçacık kavramına dayanan kuantum mekaniği, öte yanda parçacık kavramını dışlayan dalga mekaniği; aynı olgu kümesini açıklamaya yönelik birbirine ters düşen iki teori! Bu arada, Bohr'un esnek bir tutum içinde iki teoriyi bağdaştırma girişimi de ilginçtir. Belki de atomu ve bileşenlerini, ne salt parçacıklar ne de salt dalgasal birimler olarak düşünmek doğrudur. Belki de doğru olan, iki teorisinin de sınırlı bir geçerliliğe sahip olduğunu söylemektir. Dahası, alternatif açıklamalar getirmeleri, iki teorisinin bağdaşmazlığı olarak düşünülmemelidir.

Bohr bu tür olasılıklar üzerinde dururken Heisenberg, iki teori arasında bir uzlaşmaya olanak tanımıyordu. Ona göre atomun dalga yapısını gösteren herhangi bir



deneyel kanıt yoktu. Sıradan deneyleri-mize aykırı düşen elementer parçacıkları, somut maddesel değil; soyut nesnel olarak algılamak yerinde bir yaklaşımdır. Ancak, bu soyut nesnelere davranışlarını betimlemede birtakım varsayımlara değil, ölçülebilir deneyel sonuçlara bağlı kalmak gerekir. Heisenberg, önerdiği matris mekaniğin bu nitelikte bir dizge olduğu savındaydı. Belli bir fiziksel olgu ya parçacık, ya da dalga kavramıyla açıklanabilir; ikisiyle birlikte değil! Doğa, birbirine ters düşen iki kavrama aynı bağlamda elveren bir çelişki ya da karışıklık içinde olabilir miydi?

Sıkıntı bir ölçüde, yine Heisenberg'in ortaya koyduğu bir ilkeyle, "belirsizlik ilkesi"yle giderilir. Bu ilke, belli tanımlar arasındaki bir ilişkinin, matematiksel türden dile getirilmesidir. Kısaca şöyle demektedir: belli bir anda, konum ve momentumun birlikte ölçülmesinin, en az Planck sabiti kadar bir belirsizlik taşıması kaçınılmazdır.  $Dp \times Dq \geq h$ . Başka bir deyişle, konum ve moment birbirinden bağımsız değişkenler değildir; biri tam olarak belirlendiğinde diğeri belirsiz kalır.

Klasik fizikte ölçülen değişkenler, Planck sabitine ( $h$ ) göre çok büyük olduğundan, öyle bir belirsizlik söz konusu değildir. Oysa atom-altı düzeyde önemli bir sayı olan Planck sabiti ( $h$ ), bildiğimiz anlamda belirleme kesinliğine olanak vermemektedir. Tüm belirlemeler, istatistiksel türden ortalamalar olarak yapılabilir. Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, kuantum mekaniğinin genel bir dizge niteliği kazanmasında anahtar işlevi görür.

Şimdi sorulabilir: Konum ve moment değişkenlerinin eş-zaman ölçümünü olanaksız kılan şey nedir? Bu olayda Planck sabitinin rolü nedir? Daha da önemlisi, belirsizlik ilkesi bilgi arayışının sınırlaması anlamına mı gelmektedir?

Klasik fizikte konum, hız, frekans vb. değişkenler üzerindeki deney ve ölçümlerin, bu değişkenleri etkilemediği varsayımına dayanılır. Oysa bu varsayım, atom-altı düzey için geçerli değildir. Planck sabitinin çok önemli olduğu bu düzeyde, deneyel araç ve düzenlemelerin, ölçülen bu değişkenleri bir şekilde etkilemesi kaçınılmazdır. Orta-boy düzeyde bu etki önemsizdir. Atom-altı düzeyde ise en küçük etki bile çok önemlidir. Örneğin, bu düzeyde fotoğraf çekiminde salınan ışık, sonucu büyük ölçüde değiştirebilir. Bu, belirleme yöntemimizin etkisinin, belirlediğimiz nesne veya sürecin ayrılmaz bir parçası olması anlamına gelmektedir. Öy-

leyse, algıladığımız şey, algımız dışında salt nesnel bir gerçekliği yansıtmamaktadır. Peki bunun, araştırmaya bir sınır koyduğu söylenebilir mi? Bu soruyu yanıtlamak için, Heisenberg'in belirsizlik ilkesini iyi kavramak gerekir.

Atom-altı düzeyde ilişkilerini neden-son olarak belirlemeye çalıştığımız değişkenler (konum, momentum, vb.), birbiriyle karşılıklı dışlaşma içindedirler. Biri belirlendiğinde diğeri belirsizlik içine düşer. Bu yüzden, yetersiz belirlemeyle yetinmek koşuluyla, bir tür nedensel bağıntı kurulabilir. Bir deneyde konum tam saptanırken bir başka deneyde momentumun tam saptanması yoluna gidilebilir. Kuantum mekaniğinde olasılıklara yönelik istatistiksel belirleme yöntemi, matematiksel sembolizmin özünü oluşturmaktadır.



Paul A. M. Dirac

Atom fizikinde Heisenberg gibi, görsel model yaklaşımının karşısına çıkan bir başka genç fizikçi de, Paul A.M. Dirac'tı. Heisenberg ile Schrödinger'in birbirinden bağımsız atımlarına bir üçüncüsünü Dirac ekler. Kuantum mekaniğinde, klasik mekaniğin  $q$  ve  $p$  ile simgelediği konum ve momentum nicelikleri yerine, frekans çöküşleri konmuştu. Bu teoride, bildiğimiz aritmetik kurallarının tersine  $pxq$  ile  $qxp$ , aynı şeyler değildi. Çarpımda, çarpan ile çarpılanın sırası, sonucu değiştirmekteydi. Dirac, başlangıçta hemen herkesi şaşkırtan bu terslikte, klasik fizik yasalarıyla henüz belirsiz kalan atomik yasalar arasındaki temel farkın ipucunu buldu.  $pxq$  ile  $qxp$  çarpımları arasındaki fark biliniyorsa, ayrıca bu farkın tüm gözlemlerde değişmediği doğru kabul ediliyorsa, o zaman, klasik

mekanikteki herhangi bir denklem atomik bir denkleme kolayca dönüştürülebilir.

Bu temel noktaya parmak basan Dirac, aradığı matematiksel aracı, "Poisson parantezleri" denen teknikte buldu. Dirac, bu tekniği Heisenberg dizgesine uyguladığında, beklentisi doğrultusunda,  $pxq$  ile  $qxp$ 'nin farkını belirledi ve bu farkın değişmezliğini saptadı. Böylece Poisson parantezleri tekniği kullanılarak, herhangi bir klasik denklemin, kuantum mekaniğine ait eşdeğer bir denkleme dönüştürülebileceği gösterildi. Sonuçta ortaya çıkan, klasik mekaniğin yapısal bütünlüğünü kazanan yeni bir mekanikti.

Dirac'ın ulaştığı bu sonuca, çok geçmeden, değişik bir yoldan Max Born da ulaştı: Heisenberg ve Schrödinger mekaniği üzerindeki tartışmalarla çalkalanan fizik dünyası, bir üçüncü mekanikle yüzyüze geldi.

Ne var ki, görünüşteki tüm farklara karşın, temelde üç mekanik de eşdeğer nitelikteydi. Örneğin Dirac mekaniğinin de paylaştığı Heisenberg çarpım kuralının, Schrödinger mekaniğince de içerildiği söylenebilir. Bu yakınlığın Dirac'ın attığı yeni bir adımla daha da pekiştirdiğini görmekteyiz: Dirac, özel relativite kavramlarından yararlanarak Schrödinger dalga denklemini değişik bir biçimde ortaya koymayı başardı. Yeni denklem, elektronun "spin" denen bir özellik taşıdığını ifade ediyordu. Eldeki deneyel veriler de, böyle bir özelliğin varlığını kanıtlayıcı nitelikteydi. Ancak Dirac'ın oluşturduğu relativistik dalga mekaniği, önemli bir savı daha içeriyordu: elektron ve diğer elementer parçacıkların, karşıt bir parçacıkla ikiz bir çift olduğu. Ne var ki, "pozitron" denen pozitif elektron ile diğer bazı karşıt parçacıkların ne olduğu anlaşılınca, Dirac'ın bu hipotezi ciddiye alınmamıştı.

Şimdi "kuantum mekaniği" diye bildiğimiz teori, başlangıçta farklı yaklaşımlardan doğan bu üç gelişmeyi, eşdeğer "versiyon" olarak kapsamında tutmaktadır. Ancak, ulaştığı ileri gelişmişlik düzeyine karşın kuantum mekaniğinin bugün de bazı "kalıtsal" diyebileceğimiz güçlüklerden yeterince arınmış olmadığı da belirtilmelidir.

Giderek yoğunlaşan deneyel çalışmalarla toplanan verilerin, daha tutarlı ve kapsamlı bir teori gerektirdiği açıktır. Dirac'ın son konuşmalarından birinde belirttiği gibi, öylesi kuramsal bir atılım için, yeni bir Heisenberg'in gelmesini bekleyeceğiz.