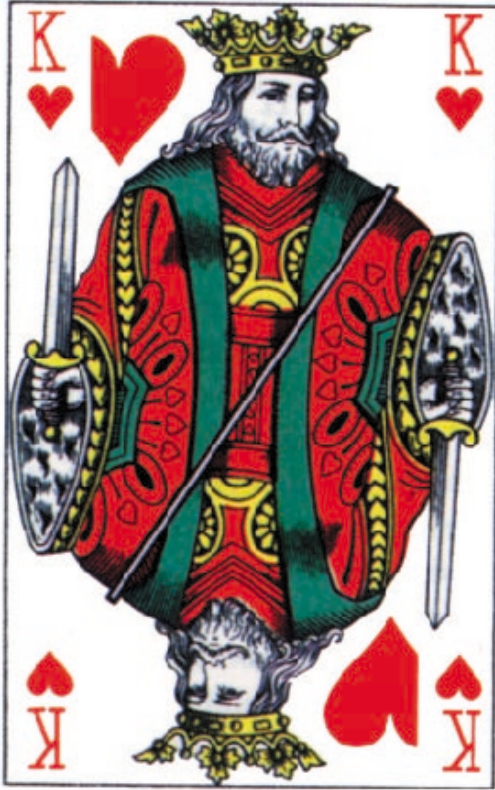


Kuantum Fiziğinin Garip Söylemleri

Üstüste Gelme

Kuantum kuramının belki de en garip (ve en çok itiraz alan) yönü bir sistemin aynı anda bir kaç farklı durumda bulunabilmesi. Parçacıklar doğal olarak böyle durumlara giriyorlar. Örneğin bir elektron tek bir noktada



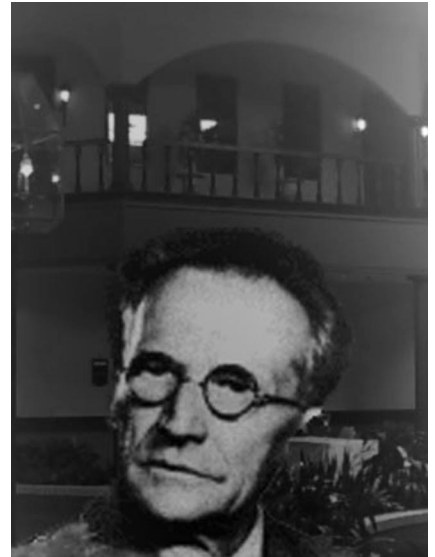
değil de değişik noktalarda aynı anda bulunabilir. Max Born 1926 yılında de Broglie dalgalarının fiziksel bir dalga olmadığını, bir olasılık dalgası olarak yorumlanması gerektiği düşüncesini ortaya attı. Buna göre parçacıklar de Broglie dalgasının bulunduğu her yerde bulunur, bunlar dalganın güçlü olduğu yerlerde yüksek olasılıkla, zayıf olduğu yerlerde de düşük olasılıkla bulunuyor. Böylece parçacığın konumu doğal bir belirsizlik taşır. Max Born bu çalışmasından ötürü 1954 yılında Nobel ödülünü kazandı.

Erwin Schrödinger, üstüste gelme ilkesinin yarattığı gariplikleri en açık biçimde ortaya koyan bir düşünce deneyi tasarladı. Schrödinger'in kedisini olarak bilinen bu deneyde bir kedi aynı anda hem diri hem de ölü olduğu bir duruma sokulabiliyordu. Hem mikroskopik ölçekte hem de bazı makroskopik cisimlerde var olduğu bilinen üstüste gelme olgusunun yorumu sürekli tartışma konusu olagelmıştır.

Schrödinger Denklemi

Bir kuantum sistemi hakkında bize her bilgiyi veren araç dalga fonksiyonu adı verilen bir fonksiyondur. Dalga fonksiyonunun uzaya ve zamana bağlı değişimini veren denklemi ilk bulan avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger'dir. Bu yüzden bu denklem Schrödinger denklemi adıyla anılır.

Schrödinger denklemine göre dalga fonksiyonunun zamana göre değişimini Hamiltonian adı verilen



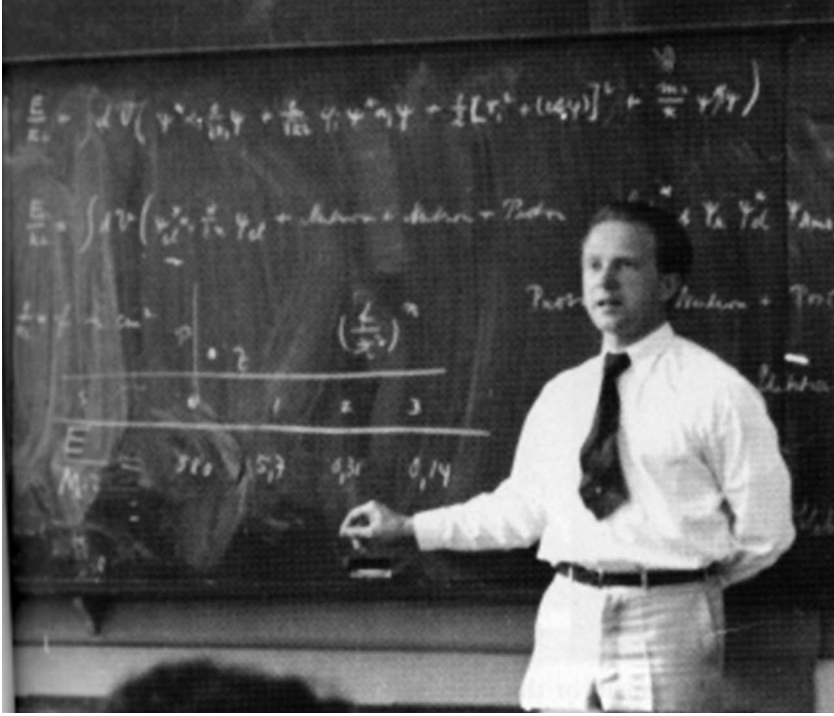
bir operatör kontrol eder. Hamiltonian operatörü (bazan enerji operatörü adıyla da anılır) sistemin enerjisi ile yakından ilgilidir. Kuantum sisteminin sahip olabileceği enerji değerlerini Hamilton operatörü belirler. Bunu veren denkleme de zamandan bağımsız Schrödinger denklemi adı verilir.

Schrödinger denkleminin çözümü olan dalga fonksiyonunun karesi kuantum sistemi ile ilgili olasılıkları verir.

Tünelleme

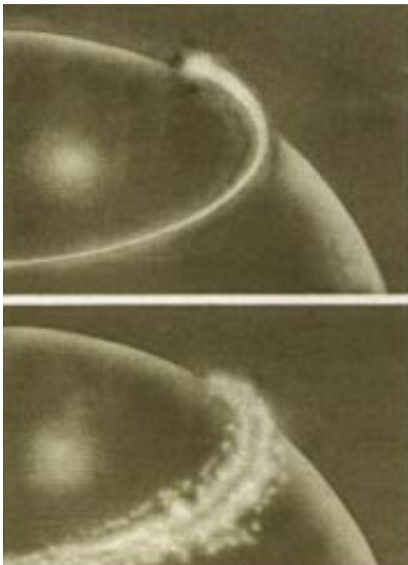
Klasik fiziğe göre herhangi bir cismin kinetik enerjisi negatif olmaz. Dolayısıyla duvara attığımız bir top duvarı delmeden öteki tarafa geçemez; çünkü duvarın getirmiş olduğu enerji engelini aşabilmek için klasik fiziğe göre duvarın içinden duvarı delmeden geçmek için negatif kinetik enerjiye sahip olma-

lıdır. Bu da klasik fiziğe aykırıdır. Kuantum kuramına göreyse bir enerji engelini aşmak için yeterli enerjisi olmayan bir kuantum parçacığı, yine de bu engeli aşabilir. Yani engelin öteki tarafında bulunma olasılığı sıfır değildir. Kuramının tahmin ettiği ve doğruluğu deneylerle kanıtlanmış olan ve radyoaktivite gibi olguları açıklayan bu etkiye tünelleme adı verilir.



Belirsizlik ilkesi

Kuantum kuramının belirsizlik ilkesi, bir parçacığın bazı farklı özelliklerinin ikisinin de kesin olarak belirlenemeyeceğini söyler. Örneğin bir parçacığın konumuyla momentumu (momentum bir cismin kütlesiyle hızının çarpımıdır) aynı anda tam olarak ölçülemez. Kuantum kuramına göre parçacığın bu iki özelliğindeki belirsizliklerin çarpımı en az Planck sabiti $h=6,626 \times 10^{-34}$ J.s kadardır. Konumu belli bir anda kesin olarak bilinen bir parçacığın momentumu sonsuz belirsizliktedir ve bu yüzden parçacık kısa sürede o noktadan ayrılır ve uzaya da-



ğılır. Benzer şekilde momentumu kesin olarak bilinen bir parçacığın konumu sonsuz belirsizliktedir, yani böyle bir parçacık uzayın her köşesinde bulunabilir. Bu nedenle doğada rastlanan parçacıkların bulunduğu kuantum durumlarında parçacıkların hem konum hem de momentumu bir miktar belirsiz olmak zorunda.

Alman fizikçi Werner Heisenberg, ünlü mikroskop örneğini bu ilkeyi açıklamak için geliştirdi. Bir parçacığın yerini "görerek" ölçmeye çalıştığınızı düşünün. Böyle bir ölçümde parçacığın üzerine ışık göndermek, dolayısıyla parçacıkla etkileşmek gerekir. Bu bile parçacığın konumunu tam olarak belirlemeye yetmez. Bu ölçümde en azından kullanılan ışığın dalgaboyu, λ , kadar bir hata yapılır. Bunun yanı sıra ışık parçacıkla etkileştiği için ölçüm, parçacığın hızında bir değişmeye de neden olur. Işık parçacığa çarpıp yansıdığı için en az bir fotonun momentumu parçacığa aktarılır. Parçacığın momentumu ölçümden önce tam olarak bilinse bile, konumun ölçülmesi parçacığın momentumunu h/λ kadar değiştirir. Bu nedenle, parçacığın yerini daha iyi belirlemek için daha kısa dalga boylu ışık kullansak bile, ölçümümüz momentumdaki belirsizliği artıracak, ama her durumda ikisinin belirsizlikleri çarpımı en az h kadar olacaktır.

De Broglie Dalgası



1923 yılında aristokrat bir aileden gelen Fransız fizikçi Louis de Broglie ışığın bazen dalga bazen de parçacık gibi davranmasından esinlenerek, diğer parçacıkların da dalga yönleri olabileceği savını ortaya attı. Buna göre momentumu p olan bir parçacığa dalgaboyu $\lambda=h/p$ olan bir dalga eşlik ediyor ve parçacığın özelliklerini tamamlıyordu. Nasıl bir gitar teli uzunluğuna bağlı olarak sadece belli frekanslarda titreşiyorsa, atomun çevresinde dolanan bir elektronun de Broglie dalgası da sadece belli dalgalı boyuna sahip olmalıydı. Bu çeşit bir dalga 1913 yılında Bohr'un hidrojen atomundaki elektronların enerji seviyelerini bulduğunda yaptığı varsayımları açıklıyordu. Makroskopik cisimlerin momentumları çok daha büyük olduğundan, de Broglie dalgasının dalgaboyu ölçülemeyecek kadar küçüktür. Bu nedenle makroskopik cisimlerin dalga özellikleri gözlemlenemez.

De Broglie'nin bu çalışması, kendisinin 1929 yılında aldığı dışında iki Nobel ödülü daha üretti. 1926'da Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger, de Broglie'nin çalışmasını genişleterek kuantum kuramının temel denklemini elde etti ve 1933'te Nobel ödülünü aldı. 1927 yılında birbirlerinden bağımsız olarak ABD'de Davisson ve Germer, İngiltere'de de Thomson, bir kristale gönderilen elektronların tıpkı dalgalar gibi kırınımına uğradıklarını gösterdiler. Davisson ve Thomson da 1937 yılında Nobel aldılar.

Kuantum Alan Kuramı

Kuantum kuramına göre, uyarılmış durumdaki bir atom en düşük enerjili duruma ne zaman olacağı tahmin edilemeyen bir anda dışarıya bir foton atarak geçer. 'Dışarıya atılan foton o andan önce neredeydi?' sorusunun yanıtıysa 'hiçbir yer'dir. Foton geçiş anında yaratılır.

Yine önceden bilinmeyen bir anda radyoaktif bir çekirdek beta bozunumuna uğrar; yani bir başka çekirdek, bir elektron ve bir nötrinoya bozunur. 'Bu andan önce electron ve nötrino neredeydiler?' sorusunun yanıtı yine 'hiçbir yer'dir. İkisi de bozunum anında yaratılır.

Bir atom bir fotonu soğurur ve uyarılmış bir duruma geçer. 'Soğurmadan sonra foton nerede?' sorusunun yanıtı yine 'hiçbir yer'. Foton artık yok.

Peki parçacıkların nasıl yaratılıp nasıl yok olduklarını açıklayan bir kuram var mı? Evet kuantum alan kuramı. Kuantum alan kuramı fotonlar, elektronlar, pozitronlar, protonlar, nötronlar, mezonlar ve diğer her tür parçacığın yaratılışı, yok edilmesi ve saçınması ile ilgili olasılıkları hesaplamak için kullanılan bir dil, bir tekniktir.

Kuantum alan kuramının ortaya çıkmasına yol açan soru atomların uyarılmış durumlarından dışarıya bir foton atarak en düşük enerjili duruma nasıl geçtiği ya da sıçradığıdır. Einstein bunun için 1916 yılında bir mekanizma önerdi fakat nicel bir sonuç bulmak için gerekli yöntemleri geliştiremedi. Daha sonraları bu problemi çözmek için özel görelilik kuramı ile kuantum kuramının bir araya getirilmesinin gerektiği anlaşıldı ve çabalar bu yöne yoğunlaştırıldı. Relativistik (göreliliği) kuantum kuramını kurma yönünde ilk önemli adım 1926 yılında İngiliz fizikçi Paul Dirac'tan geldi. Dirac, Schrödinger denklemine benzer ve günümüzde Dirac denklemi adıyla anılan relativistik bir denklem geliştirdi. Bu denklem negatif enerjili parçacıklar gibi bir takım anormal-

liklere yol açtı. Zamanla bütün bu problemlerin çözümünün farklı bir bakış açısı gerektirdiği anlaşıldı. Çözümün, alanların, örneğin Maxwell'in elektromanyetik alanının, kuantum kuramının kurulmasında yattığı ortaya çıktı. O ana kadar alanların ve parçacıkların birbirlerinden farklı ve bağımsız olgular olduklarına inanılıyordu. Kuantum alan kuramıyla birlikte, alanlarla parçacıkların aynı olgunun iki farklı görünümü olduğu kanıtlandı. Her temel parçacığı bir kuantum alanı temsil eder. Ya da başka bir deyişle her temel parçacık bir kuantum



Paul Dirac

alanının kuantumudur. Örneğin fotonlar elektromanyetik alanın, elektronlar bir Dirac alanının, nötrinolar bir başka Dirac alanının, gluonlar güçlü etkileşimi ileten kuantum alanının, Higgs parçacığı Higgs alanının temel kuantumudur. Ne kadar temel parçacık varsa o kadar da kuantum alanı vardır.

Kuantum alan kuramı maddenin doğasıyla ilgili bir çok temel sorunun çözümünü bulmuş olmasından dolayı kendine fizikte çok önemli bir yer edindi. Kuantum alan kuramı Dirac denkleminde ortaya çıkan negatif

enerjili parçacıkların aslında negatif enerjili olmadıklarını, onların pozitif enerjili antiparçacıklar olduklarını gösterdi. Neden iki temel parçacık türü (fermyonlar ve bozonlar) olduğunu, ve bu parçacıkların özellikleriyle spinleri arasındaki ilişkiyi açıklamayı başardı. Bütün temel parçacıkların; örneğin fotonların, elektronların, pozitronların, kuarkların, gluonların ve diğerlerinin nasıl ortaya çıkıp nasıl yok olduklarını açıkladı. Özdeş parçacıkların, örneğin iki elektronun, neden özdeş olduklarını (aynı kuantum alanının kuantumları oldukları için) gösterdi.

Kuantum elektrodinamiği elektrik yüklü temel parçacıkların, örneğin elektronların, etkileşmesinin kuramıdır. Etkileşimi ileten elektromanyetik alandır. Elektrozayıf etkileşimin alan kuramı elektrodinamikle zayıf etkileşimin birleştirilmiş kuramıdır. Bu birleştirilmiş kuramda etkileşimi ileten parçacıklar fotonlar ve W^+ , W^- ve Z^0 parçacıklarıdır. Güçlü etkileşimi açıklayan alan kuramı ise kuantum renk dinamiğidir. Bu kuramda temel parçacıklar kuarklar ve gluonlardır. Elektrozayıf etkileşimin kuantum alan kuramıyla kuantum renk dinamiğine birlikte standart model adı verilir.

Standart model şu ana kadar yapılmış olan temel parçacıklarla ilgili bütün deneyleri başarıyla açıklamış bulunuyor. Buna rağmen fizikçiler standart modeli yetersiz buluyorlar. Bunun nedeni bu kuramın temel parçacıkların kütlelerinin, yüklerinin ve diğer özelliklerinin neden ölçülen değerler olduğunu, neden bu değerlerin kuantize olduğunu, yani sadece belli değerler ve onların tam sayı katları olduklarını açıklayamıyor. Bir başka sorun ise kütle çekiminin kuantum kuramının hala kurulamamış olması.

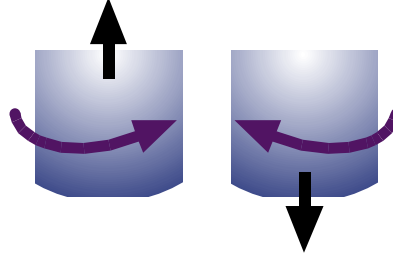
Fizikçiler bütün bu son derece ilginç ve bir kadar da zor problemleri çözmek için gece gündüz çalışıyorlar. Belki genç arkadaşlarımız da fizikçi olup bu problemleri çözmek isterler. Ne dersiniz?

Spin

Parçacıkların uzaydaki doğrusal hareketleri dışında kendi iç dinamikleriyle ilgili hareketleri de vardır. Bu parçacıkları noktasal değil de küçük kürecikler şeklinde düşünürsek, bu kürelerin kendi çevrelerinde dönme hareketi de etkileri gözlemlenebilen bir hareket şeklidir. Bu hareket için İngilizcede kendi etrafında dönme anlamına spin denir. Spin de bir açısal momentum türüdür. Fakat kuantum kuramı bazı parçacıkların (elektronlar gibi) spinlerinin gerçekten böyle bir dönme sonucu oluşmayacağını söylüyor. Buna rağmen dönme benzetmesi bir çok açıdan iyi bir açıklama biçimi gibi görünüyor.

Kuantum kuramına göre spini s olan bir parçacığın spin durumu sadece $(2s+1)$ değişik değer alabilir ya

da bu $(2s+1)$ durumun üstüste gelmesiyle oluşabilir. Elektron, proton ve nötronların spinleri $s=1/2$ dir. Yani bu parçacıklar uzaydaki hareketlerinin dışında 2 değişik durumda da bulunabilirler. Zayıf etkileşimi ileten W ve Z parçacıklarının spini 1'dir. Bunlar da 3 değişik durumda



bulunabilirler. Fotonlarda ışık hızında hareket ettikleri için spinleri 1 olmasına karşın sadece iki farklı spin

durumunda bulunabilirler. Bunların dışında bir kaç parçacıktan oluşmuş birleşik sistemlerin spini de hesaplanabilir. Örneğin helyum-4 atomunun spini 0 olarak hesaplanabiliyor.

Spini olan bir çok parçacık spinlerinin yönüne bağlı olarak uzayda manyetik alan oluştururlar. Bu anlamda bu tip parçacıkları küçük birer mıknatıs olarak da düşünmek mümkün. Eğer elektronlar bir manyetik alandan geçirilirse, kendi mıknatıslıklarının yönüne bağlı olarak değişik yönlerde sapmaları gerekir. 1921 yılında Stern ve Gerlach bu deneyi yaparak elektronların sadece iki değişik yöne saptıklarını, böylece bu parçacıkların sadece iki farklı spin durumunda bulunabildiklerini göstererek kuantum fiziğinin en güçlü kanıtlarından birini elde ettiler.

Fermiyonlar ve Bozonlar

Ne kadar benzer olsalar da tanıdıkça ikizleri birbirlerinden ayırmamızın yollarını bulabiliriz. Fakat aynı şeyi parçacıklar için söyleyemeyiz. Hiç bir şekilde iki özdeş parçacığı birbirinden ayırmak olanaklı değil. Kuantum kuramı bu ilkedan yola çıkarak, birden fazla özdeş parçacığın beraber olduğu sistemlerde bu parçacıkların çok farklı davrandığını gösteriyor.

Bu parçacıklardan bir kısmı sanki birbirlerinden nefret ediyorlarmış gibi kesinlikle aynı kuantum durumunda olmak istemezler. Bu tip parçacıkların kuantum durumlarına dağılımını ilk defa inceleyenler anısına bu parçacıkların Fermi-Dirac istatistiğine uyduğunu söylüyoruz. Bu nedenle bu parçacıklara fermiyon denir. Aynı spine sahip iki fermiyon, aynı yerde bulunamaz, aynı hızla gidemez (ve elektronlar için, bir atomun aynı orbitalinde bulunamaz). Bu kısıtlama, varlığını ilk keşfeden Wolfgang Pauli'nin anısına "Pauli dışlanma prensibi" adıyla anılır. Elektronlar, proton ve nötronlar, nötrinolar fermiyondur.

Diğer parçacıklar, yani fermiyon olmayanlar, için aynı kuantum duru-

Fermiyonlar							
Leptonlar				Kuarklar			
Parçacık	Simge	Kütle (MeV)	Elektrik Yükü	Parçacık	Simge	Kütle (MeV)	Elektrik Yükü
Elektron Nötrinosu	ν_e	$>0,00001$	0	Yukarı	u	310	+2/3
Elektron	e^-	0,511	-1	Aşağı	d	310	-1/3
Muon Nötrinosu	ν_μ	Bilinmiyor	0	Tılsımlı	c	1500	+2/3
Muon	μ^-	106,6	-1	Garip	s	505	-1/3
Tau Nötrinosu	ν_τ	Bilinmiyor	0	Üst	t	174000	+2/3
Tau	τ^-	1784	-1	Alt	b	5000	-1/3

Bozonlar					
Kuvvet	Erim	Taşıyıcı	Kütle (GeV)	Spin	Elektrik Yükü
Kütleçekimi	Sonsuz	Graviton	0	2	0
Elektromanyetik	Sonsuz	Foton	0	1	0
Zayıf	10^{-16} cm'den az	W^+	81	1	+1
		W^-	81	1	-1
		Z^0	93	1	0
Şiddetli	10^{-13} cm'den az	Gluonlar (8)	0	1	0

muna kaç parçacık girebileceği gibi bir kısıtlama yok. Bu diğer tip parçacıkların kuantum durumlarına dağılımını ilk defa inceleyen kişilerin anısına bu tip parçacıkların Bose-Einstein istatistiğine uyduğunu söylenir ve parçacıklara bozon denir.

Kuantum kuramının garipliklerinden biri daha bozonların davranışlarında ortaya çıkıyor ve bu parçacıklar birbirlerini aşırı seviyorlarmış gibi davranıyorlar, başka bir deyişle mümkün olduğu kadar aynı kuantum durumuna girmeye çalışıyorlar. Fotonlar ve helyum-4 izotopu bozonların en ünlü örnekleri. Lazerler ve süper akışkan helyum bozonluk-

tan ötürü oluşan olaylar. Bunların dışında doğa kuvvetlerinin iletilmesinde aracı olan, yani kuvvet taşıyan, parçacıkların (mezonlar, gravitonlar, W ve Z parçacıkları gibi) birer bozon olduğu ortaya çıkıyor.

Kuantum alanlar kuramı hangi parçacıkların bozon hangilerinin fermiyon olması gerektiği konusunda basit bir kural veriyor. Ünlü spin-istatistik teoremine göre spinleri buçuklu sayılar ($1/2, 3/2, \dots$) olan parçacıklar fermiyon, spinleri tamsayı olan parçacıklar ($0,1,2, \dots$) ise bozon oluyor.

Sadi Turgut
Yusuf Ipekoğlu