



Bilim ve Teknik

Schrödinger
Denklemi'nin
100.Yılında

Kuantum Mekaniği

2. Bölüm

Dr. Mahir E. Ocak



“Benim mânevi mirasım
ilim ve aklıdır.”
Mustafa Kemal Atatürk

Bilim ve Teknik Dergisi
Nisan 2025 Sayısı
Özel Kitap Eki

İmtiyaz Sahibi
TÜBİTAK Adına Başkan
Prof. Dr. Orhan Aydın

Genel Yayın Yönetmeni ve
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Ömer Kôkçam

Dergiler Müdürü
Kübra Bal Çetinkaya

Yayın Yönetmeni
Dr. Özlem Kılıç Ekici

Editör
Dr. Tuba Sarıgül

Yayın Danışma Kurulu
Ömer Kôkçam
Fatma Başar
Kübra Bal Çetinkaya
Dr. E. Sümeyra Turalı Emre
Prof. Dr. Ersin Göğüş
Dr. Berat Z. Haznedaroğlu
Dr. Yeşim İmamoğlu
Prof. Dr. Raif Kandemir

Schrödinger Denklemi'nin Yüzüncü Yılında Kuantum Mekaniği (2. Bölüm)

Hazırlayan
Dr. Mahir E. Ocak

Çizim ve Grafik Tasarım
Hüseyin Diker

İçindekiler

3	Rölativistik Kuantum Mekanîği	3
3.1	Özel Görelilik Kuramı	4
3.2	Schrödinger Denklemi ve Özel Görelilik	7
3.3	Dirac Denklemi	8
3.4	Antimadde	10
3.5	Kuantum Alan Teorileri	13
3.6	Kuantum Elektrodinamiği	14
3.7	Kuantum Kromodinamiği ve Elektrozayıf Teori	18
3.8	Parçacık Fiziğinin Standart Modeli	18
4	Kuantum Teorisi ve Gerçeklik	23
4.1	Dalga Fonksiyonunun Bütüncül Doğası	25
4.2	Gizemli Kuantum Sıçramaları	30
4.3	U ve R Prosedürleri, Ölçüm Paradoksu	30
4.4	EPR Paradoksu	32

4.5	Bell Teoremi	37
4.6	Schrödinger'in Kedisi	40
4.7	Kuantum Mekaniğinin Ontolojileri	42
5	Kuantum Teknolojileri	49
5.1	Kuantum Bilgisayarlar	49
5.1.1	Schor algoritması	53
5.2	Kuantum Kriptografi	56
5.2.1	BB84 protokolü	58
	Son Söz	63
	Kaynaklar	64

Bölüm 3

Rölativistik Kuantum Mekaniği

Modern fizikteki en temel teorilerden biri özel göreliliktir. Albert Einstein tarafından geliştirilen teori, uzayzamanın yapısını tanımlar ve fiziksel olayların bir neden-sonuç ilişkisi içinde sıralanmasını sağlar. Herhangi bir teorinin özel görelilik kuramıyla uyumlu olması beklenir. Ancak Schrödinger denklemi özel görelilik kuramıyla uyumlu değildir.

Einstein'ın özel göreliliği 1905'te ortaya attığı ve 1925 yılında fizikçilerin tamamının özel görelilik kuramı hakkında bilgi sahibi olduğu düşünülürse Schrödinger'in neden özel görelilik kuramıyla uyumsuz bir teori geliştirdiği sorusu akıllara gelebilir. Schrödinger aslında en başından özel görelilik kuramıyla uyumlu bir teori geliştirmeye çabalamıştı. Ancak karşılaştığı çeşitli matematiksel zorlukları aşamayınca kuramını özel görelilik ile uyumlu hâle getirme işini sonraya bırakmıştı. Schrödinger'in aşmakta zorlandığı matematiksel zorlukların üstesinden gelen kişi Paul Dirac oldu. Üstelik Dirac'ın çalışmaları sadece kuantum teorisine yeni matematiksel gereçler eklenmesine neden olmadı, çok önemli fiziksel keşiflere ve kuramsal gelişmelere de yol açtı. Rölativistik kuantum mekaniği hem kuantum spinin hem de antiparçacıkların varlığını tahmin eder. Ayrıca kuantum alan teorilerinin gerekliliğini de gözler önüne serer. Bugün dört temel kuvvetin üçü rölativistik kuantum alan teorileriyle açıklanıyor.

3.1 Özel Görelilik Kuramı

Özel görelilik kuramının detaylı bir tartışması bu kitapçığın kapsamının çok ötesine geçer. Burada sadece ilerleyen kısımlarda ihtiyacımız olacak birkaç noktaya değineceğiz.

Özel görelilik kuramının bize öğrettiği şeylerden biri zamanın mutlak olmadığı, farklı referans sistemlerinde farklı hızlarla aktığıdır. Bu durumu anlamak için basit bir örnek ele alalım. Bir gözlemcinin iki olay arasındaki zaman farkını, örneğin bir arabanın aralarında 20 metre mesafe olan iki noktadan geçiş zamanları arasındaki farkı, ölçmek istediğini düşünelim. Gözlemci yolun kenarında hareketsizdir. Yol üzerinde iki ayrı nokta belirler. Araba birinci noktadan geçtiğinde elindeki kronometreyi çalıştırır, diğer noktadan geçtiğindeyse kronometreyi durdurur. Ölçüm iki olay arasında geçen zamanın, diyelim ki, iki saniye olduğunu gösterir. Şimdi de aynı olayı yola göre v hızıyla hareket eden bir gözlemciye göre ele alalım. Bu ikinci gözlemci iki olay arasındaki zaman farkını kaç saniye olarak ölçer? Bu soruya bir cevap bulmak için ilk olarak daha temel bir soru sormak gerekiyor: Bir olayın olduğu bilgisi bir gözlemciye hangi hızla ulaşır? Bu soruya verilecek cevapları ikiye ayırabiliriz: Bilgi sonsuz hızla ya da sonlu hızla ulaşır. Bilginin sonsuz hızla ulaşması durumu, özel görelilik öncesi fizikte olduğu gibi zamanın “mutlak” olduğu sonucuna yol açar. Eğer bilgi sonsuz hızla ulaşıyorsa bir olayın uzayın herhangi bir bölgesinde gerçekleşmesiyle uzayın başka bir bölgesinde gözlemlenmesi arasında herhangi bir zaman geçmeyecektir. Başka bir deyişle gözlemciler fiziksel olayları “anında” gözlemleyecektir. Bu durumda v hızıyla hareket eden gözlemci de iki olay arasındaki zaman farkını iki saniye olarak ölçecektir. Özel görelilik kuramının bize öğrettiğiye bunun yanlış olduğudur. Bilgi uzayda sonsuz değil sonlu bir hızla yayılır. Bu yüzden bir olayın uzayın bir bölgesinde gerçekleşmesiyle uzayın başka bir bölgesindeki gözlemci tarafından gözlemlenmesi arasında zaman farkı vardır. Dolayısıyla v hızıyla hareket eden gözlemci iki olay arasındaki zaman farkını iki saniye olarak ölçmez. Gözlemcinin hızının büyüklüğüne ve hareket yönüne bağlı olarak ölçülen zaman farkı değişir. Özetle, özel görelilik kuramı öncesi klasik fizikte zaman koordinatı uzay koordinatlarından ayrı bir yere sahiptir: Bir fiziksel olay farklı referans sistemlerinde ifade edildiğinde uzay koordinatları değişir. Zamanınsa mutlak olduğu, fiziksel olaylardan bağımsız olarak tüm gözlemciler için aynı hızla aktığı düşünülür. Özel görelilik kuramıysa zamanın mutlak olmadığını, farklı gözlemciler için farklı hızlarla aktığını, fiziksel olaylar farklı referans sistemlerinde ifade edildiğinde olayların zaman koordinatlarının da değişeceğini söyler.

Özel görelilik kuramında zaman ve uzay koordinatları arasında simetri vardır, zaman ve uzay birbirine dönüştürülebilir. Biri diğerine göre x yönünde v hızıyla hareket eden iki referans sistemi (bkz. Şekil 3.1) arasındaki koordinat dönüşümleri şunlardır:

$$\begin{aligned}t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\x' &= \frac{x - vt}{1 - v^2/c^2} \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

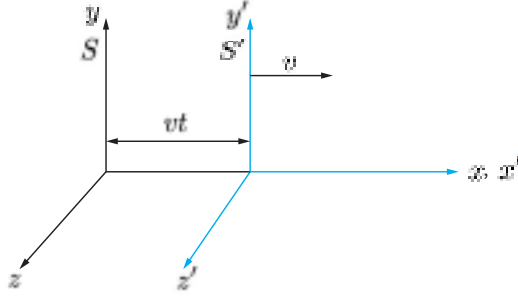
Lorentz dönüşümleri olarak adlandırılan bu eşitliklerde c ışık hızını ifade eder. Eşitlikler ayrıca işaretiyle etiketlenen koordinat sisteminin diğer referans sistemine göre v hızıyla hareket ettiği durum için yazılmıştır.

Başlangıçta sorduğumuz soruya geri dönersek... İkinci gözlemcinin iki olay arasındaki zaman farkını kaç saniye olarak ölçeceğini hesaplamak için yapmanız gereken, önce iki olayın durağan gözlemcinin referans sistemindeki koordinatlarını (örneğin $(t_1, x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0, 0)$ ve $(t_2, x_2, y_2, z_2) = (2, 20, 0, 0)$) Lorentz dönüşümünde yerine koyarak olayların hareketli gözlemcinin referans sistemindeki koordinatlarını bulmak, daha sonra da bulduğunuz iki zaman koordinatı arasındaki farkı hesaplamaktır. Bulacağınız sonuç, v hızının büyüklüğüne bağlı olarak değişecektir.

Lorentz dönüşümlerinden de görülebileceği gibi rölativistik etkiler daha çok yüksek hızlarda belirgindir: v/c oranının sıfıra yakınsadığı durumda Lorentz dönüşümleri özel görelilik kuramı öncesi klasik fizikteki Galilei dönüşümlerine yakınsar.

Lorentz dönüşümleriyle ilgili önemli bir noktaya dikkat çekelim. Her ne kadar iki olay arasında geçen zaman ölçümün hangi referans sisteminde yapıldığına bağlı olarak değişse de olayların sırası her zaman aynıdır. Eğer A olayı bir referans sisteminde B olayından önce gerçekleşmişse olayların “gözlemlenebildiği” tüm diğer referans sistemlerinde de A zamansal olarak B ’den önce gelecektir. Bu durum özellikle nedensellik ilkesi (sebebin sonuçtan önce gelmesi ilkesi) açısından önemlidir. Özel görelilik kuramıyla uyumlu bir kuramda, aralarında sebep-sonuç ilişkisi olan iki olaydan sebep daima zamansal olarak sonuçtan önce gelir.

Fizikte bilgi parçacıklar ya da alanlar yoluyla taşınır. Dolayısıyla bilginin sonlu bir hızla yayılması aynı zamanda hiçbir parçacık tarafından aşılamayacak bir sınır hızın



Şekil 3.1: İki referans sisteminden x', y', z', t' sistemi x, y, z, t sistemine göre v hızıyla hareket etmektedir. Fiziksel olayların referans sistemlerinden birindeki koordinatları biliniyorsa Lorentz dönüşümleri kullanılarak diğer referans sistemindeki koordinatları hesaplanabilir.

varlığını da gerektirir. Hiçbir parçacık bilginin yayılma hızından daha hızlı hareket edemez. Yukarıdaki Lorentz dönüşümlerinden de görülebileceği gibi hiçbir parçacığın aşamayacağı bu sınır hız, ışık hızı yani c 'dir. Hareket hızı v 'nin c 'den büyük olması durumunda kareköklerin içindeki ifadenin negatif olacağına dikkat edin.

Özel görelilik kuramının, bilginin uzayda sonlu bir hızla yayılmasıyla doğrudan ilişkili bir diğer sonucu etkileşimlerin “yerel” olmasıdır. Örneğin aralarında belirli bir mesafe bulunan iki elektrik yükünü ele alalım. Yüklerden birinin konumu değiştiğinde diğerine etki eden elektriksel kuvvetin değişmesi için öncelikle konum değişikliği bilgisinin diğer parçacığa ulaşması gerekir. Aralarında mesafe olan parçacıklar anlık olarak birbirleriyle etkileşemez. Etkileşimler uzayda sonlu bir hızla yayılır. Kuantum teorisinin etkileşimlerin yerel olmasını nasıl sağladığını ilerleyen bölümlerde göreceğiz.

Son olarak daha önce de karşımıza çıkan rölativistik enerji eşitliği

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

hakkında birkaç söz söyleyelim. Rölativite ile aşına olmayan okuyuculara bu eşitlik biraz değişik görünmüş olabilir. Hemen hemen herkesin çok iyi bildiği, iki enerji ifadesi vardır. Biri kütle enerjisini ifade eden $E = mc^2$ formülü, diğeri de kinetik

enerjiyi (K) ifade eden $K = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}$ formülü. Yukarıdaki rölativistik enerji eşitliği, bu iki formülün ikisini de içinde barındırır! Üniversite eğitimlerinin ilk yılında kalkülüs dersi almış okuyucular için bunun nasıl doğrulanabileceğini kısaca ifade edelim. Önce enerjiyi

$$E = mc^2 \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$$

olarak yeniden ifade edin. Daha sonra $\sqrt{1 + x}$ ifadesinin (bu durumda $x = \frac{v^2}{c^2}$) $x = 0$ etrafında Taylor açılımını¹ hesaplayarak eşitlikte yerine koyun. İlk terimin mc^2 , ikinci teriminse $mv^2/2$ olduğunu göreceksiniz. Üçüncü ve daha sonraki terimlerin tamamı, v/c oranının kuvvetlerini içerir. Hareket hızının ışık hızına kıyasla çok küçük kaldığı durumlarda bu terimlerin tamamı ihmal edilebilir derecede küçüktür. Dolayısıyla düşük hızlarda

$$E = mc^2 + \frac{mv^2}{2}$$

ifadesi rölativistik enerji için iyi bir yaklaşımdır. Ancak hareket hızı arttıkça rölativistik enerjinin doğru değeri ile yukarıdaki yaklaşık ifade arasındaki fark giderek büyür.

3.2 Schrödinger Denklemi ve Özel Görelilik

Schrödinger'in teorisi özel görelilik kuramıyla çeşitli bakımlardan uyumlu değildir. İlk olarak Schrödinger'in teorisinde, tıpkı özel görelilik öncesi klasik fizikte olduğu gibi, zaman uzay koordinatlarından ayrı tutulur. Bu durumu anlamanın basit yollarından biri sadece Schrödinger denklemine göz atmaktır (bkz. 2.1). Schrödinger denkleminde zamana göre birinci türev yer alırken uzay koordinatlarına göre ikinci türev yer alır. Bu diferansiyel işlemler arasında Lorentz dönüşümleriyle uyumlu bir simetri yoktur. Schrödinger'in teorisinde de zaman mutlak olarak ele alınır. Birden fazla parçacık içeren bir sistem için (örneğin helyum atomu için) bir Schrödinger denklemi yazılırken her bir parçacık için dalga fonksiyonuna üç uzay koordinatı eklenir. Söz konusu zaman olduğundaysa tüm sistem için tek bir zaman koordinatı vardır. Schrödinger'in teorisi

¹Bir $f(x)$ fonksiyonunun $x = 0$ etrafındaki Taylor açılımının ilk birkaç terimi şunlardır:

$$f(x) = f(0) + xf'(0) + \frac{1}{2}f''(0) + \dots$$

Bu eşitlikte f' , $f(x)$ fonksiyonunun x 'e göre birinci dereceden kısmi türevini ($\partial f / \partial x$), f'' ise $f(x)$ fonksiyonunun x 'e göre ikinci dereceden kısmi türevini ($\partial^2 f / \partial x^2$) ifade eder.

ile özel görelilik arasındaki bir başka uyumsuzluk ise ışık hızının aşılmasıyla ilgilidir. Özel görelilik kuramı ışıktan daha hızlı hareket etmenin imkânsız olduğunu söyler. Schrödinger denklemiyse hareket hızına bir sınır koymaz. Belirli bir konumdaki parçacığın dalga fonksiyonu alınır ve Schrödinger denklemi kullanılarak ilerleyen zamanlardaki dalga fonksiyonu hesaplanırsa parçacığın bir süre sonra ışık hızıyla bile ulaşamayacak noktalarda bulunmasının olasılıklar dâhilinde olduğu görülür.

3.3 Dirac Denklemi

Schrödinger denklemi rölativistik olmayan enerji eşitliğinin kuantizasyonu ile elde edilmişti. Rölativistik bir parçacık için benzer bir denklem türetmek için uygun bir başlangıç noktası da doğal olarak rölativistik enerji denklemidir:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

İlk olarak bu denkleme doğrudan kuantizasyon prosedürünü uyguladığımızı düşünelim. Enerji ve momentumu kendilerine karşılık gelen operatörlerle değiştirip eşitliğin her iki tarafına dalga fonksiyonunu yerleştirdiğimizde -indirgenmiş Planck sabiti $\hbar$ 'ın ve ışık hızı c 'nin değerlerinin 1 olduğu birimleri kullanarak - şu sonucu buluruz:

$$\left(m^2 + \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right) \Psi = 0$$

Bugün Klein-Gordon eşitliği olarak anılan bu eşitlik doğal olarak özel görelilik kuramı ile uyumludur. Hem zaman hem de uzay koordinatlarının aynı dereceden (ikinci dereceden) türevleri yer alır. Ayrıca denklem farklı referans sistemleri arasında koordinat dönüşümleri yapıldığında formunu korur. Klein-Gordon eşitliği, modern kuantum alan teorilerinde mezon türü kütleli, spinsiz parçacıkların durumunu tanımlamak için kullanılabilir. Ancak Schrödinger'in kuantum teorisini geliştirmeye çalıştığı günlerde henüz kuantum alan teorileri de doğal olarak ortada yoktu. Schrödinger, Klein-Gordon eşitliğini bugün kendi adıyla anılan denklemden önce türetmiş ancak rölativistik bir parçacığı tanımlayacak bir denklem elde etmeyi başaramamıştı. Zorluğun ne olduğunu ifade etmeden önce, ilk olarak yukarıdaki kuantizasyon prosedürünün uygulandığı klasik eşitlikte enerjinin değil enerjinin karesinin yer aldığına dikkat edelim. İkinci olarak bu klasik enerji eşitliğinde bir referans sisteminden diğerine geçildiğinde değişmeden kalan tek şeyin durgun kütle ve dolayısıyla durgun kütleyle karşılık gelen kütle enerjisi olduğuna dikkat edelim.

Dolayısıyla rölativistik enerji eşitliğini şu şekilde yeniden formüle etmek mantıklıdır:

$$m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

Bu denkleme standart kuantizasyon prosedürünü uyguladığımızda ise şu sonucu buluruz:

$$m\Psi = \sqrt{\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)}\Psi$$

Bu denklemle ilgili temel zorluk, eşitliğin sağ tarafındaki diferansiyel operatörün karekökünün nasıl hesaplanacağıdır.

Hiperkompleks sayıların, diferansiyel operatörlerin karekökünü ya da çarpanlarını hesaplamak için kullanılabileceğini gösteren çalışmalar 1800'lerin ortalarına kadar gider. Ancak bu bilgi 1925 yılında değil fizikçiler arasında, matematikçiler arasında bile pek yaygın değildi. Schrödinger de bulduğu ifadeye bir anlam verememişti. Dirac, 1928'de rölativistik elektron için dalga fonksiyonu denklemini türettiğinde de daha önceki matematiksel çalışmalardan habersizdi. Bugün kendi adıyla anılan eşitliği türetirken bir tür Clifford cebirini yeniden icat etti.

Clifford-Dirac cebirinde şu “birim sayılar” vardır²: $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ ve γ_3 Bu birim sayıların kendi aralarındaki çarpım kuralları şunlardır:

$$\gamma_0^2 = 1, \gamma_1^2 = -1, \gamma_2^2 = -1, \gamma_3^2 = -1$$

$$\gamma_i \gamma_j = -\gamma_j \gamma_i \quad (i \neq j)$$

Dirac bu birim sayılarla tanımlanan hiperkompleks cebiri kullanarak Klein-Gordon denklemindeki ifadeyi çarpanlarına ayırdı. İlk olarak

$$\not\partial = \gamma_0 \frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \frac{\partial}{\partial x} - \gamma_2 \frac{\partial}{\partial y} - \gamma_3 \frac{\partial}{\partial z}$$

tanımını yapalım. Bu durumda çarpanlarına ayırmayı şu şekilde gerçekleştirebiliriz:

$$m^2 + \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) = (\not\partial - im)(\not\partial + im)$$

Dirac denklemi ise şudur:

$$(\not\partial + im)\Psi = 0$$

²Clifford-Dirac cebirinde toplam 16 ayrı birim sayı vardır: 1, $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_0\gamma_1, \gamma_0\gamma_2, \gamma_0\gamma_3, \gamma_1\gamma_2, \gamma_1\gamma_3, \gamma_2\gamma_3, \gamma_0\gamma_1\gamma_2, \gamma_0\gamma_1\gamma_3, \gamma_0\gamma_2\gamma_3, \gamma_1\gamma_2\gamma_3, \gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$.

Bu denklemde dalga fonksiyonuna uygulanan operatör, Klein-Gordon denklemindeki ifadenin bir çarpanı olduğu için, Dirac denklemini çözen herhangi bir dalga fonksiyonu Klein-Gordon denklemini de çözer. İkinci çarpanı kullanarak bir “anti-Dirac” denklemi yazmak da mümkündür:

$$(\not{\partial} - im)\Psi = 0$$

Ancak böyle bir denklem negatif $-m$ durgun kütleli bir parçacığı tanımlardı.

Dirac denklemindeki birim sayılar matematiksel işlemlerde 4×4 'lük matrislerle temsil edilir. Dolayısıyla Dirac denkleminin çözümünü olan dalga fonksiyonları da dört bileşeni olan vektörlerdir (4×1 'lik matrislerdir).

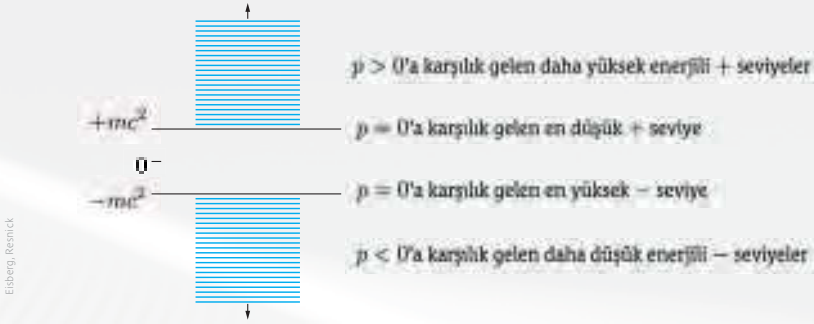
Dirac denkleminin matematiksel özellikleri nedeniyle dalga fonksiyonunun dört bileşeninin sadece ikisi birbirinden bağımsızdır. Söz konusu elektronlar gibi spini $\frac{1}{2}$ olan parçacıklarsa bu durum tam da ihtiyacınız olan şeydir (*bkz.* 2.9). Kuantum spin, rölativistik olmayan teoriye deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde etmek için “dışarıdan eklenir”. Rölativistik kuantum teorisiye spinin varlığını kuramsal olarak tahmin eder! Dirac denkleminin çözümü olan dalga fonksiyonları spinor olarak adlandırılır. Spinorların bileşenleri bir parçacığın uzay ve zamanın belirli bir noktasında ve belirli bir spin durumunda bulunma olasılığı hakkında bilgi taşır.

Dirac denklemi sadece elektronun spinini doğru biçimde tanımlamakla kalmaz. Elektronun bir manyetik alanla etkileşimini tanımlayan terimler eklendiğinde, denklemin, elektronun elektromanyetik alanla etkileşimini -rölativistik etkiler de dâhil olmak üzere- doğru biçimde tahmin ettiği görülür. Ayrıca teori, elektronun manyetik momentini büyük bir doğrulukla tahmin etmeyi başarır. Kuramsal hesaplarla deneysel veriler arasındaki oran sadece 1,001159652... kadardır. Dirac'ın teorisi ile deneysel veri arasındaki bu ufak fark da bugün kuantum elektrodinamiğiyle açıklanabiliyor.

3.4 Antimadde

Dirac denklemi her ne kadar elektronla ilgili çeşitli deneysel verileri başarıyla açıklasa da kuramda hâlâ bir sorun vardı. Hesaplar elektronların sahip olabileceği enerji değerlerinin bir “alt sınırı” olmadığını gösteriyordu (*bkz.* Şekil 3.2) ve bu durum kararsızlık anlamına geliyordu. Çünkü böyle bir durumda bir elektron çevresiyle etkileşerek hiç durmaksızın daha düşük enerjili seviyelere geçiş yapabilir ve bu sırada

etrafa enerji yayabilir. Sahip olabileceği enerji değerinin bir alt sınırı yoksa bir elektronun çevresine yayabileceği enerjinin de bir üst sınırı yoktur.



Şekil 3.2: Dirac denklemine göre bir serbest elektronun enerji seviyeleri

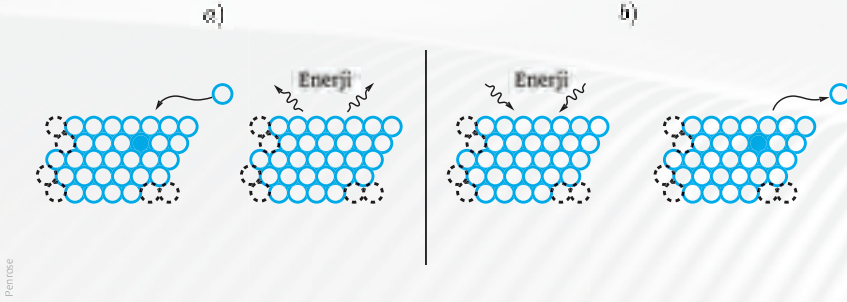
Dirac ilk olarak matematiksel yöntemlerle spektrum sorununa bir çözüm bulmaya çalıştı. Sorunun matematikle çözülemeyeceğine ikna olduktan sonraysa antimaddenin keşfine yol açacak bir hipotez ortaya attı. Dirac, negatif enerjili tüm seviyelerin zaten dolu olduğunu öne sürdü. Bugün bu elektronlarla dolu negatif enerji seviyeleri “Dirac denizi” olarak adlandırılıyor. Dirac’ın hipotezine göre bir elektronun durmaksızın enerji kaybetmemesinin nedeni, elektronların Pauli dışarlama ilkesine uyan fermiyonlar olmasıdır. Bir elektron enerji kaybederek zaten dolu olan negatif enerjili durumlara geçiş yapamaz.

Dirac’ın antimaddenin varlığını öne sürmesine yol açan şu düşüncesi oldu: Eğer negatif enerjili elektronlara yeteri kadar enerji verirsiniz bulunduğu denizden dışarı çıkarmayı (enerjisini pozitif yapmayı) başarabilirsiniz (*bkz.* Şekil 3.3). Bu durumda ortaya sıradan bir elektron çıkar. Negatif enerjili elektron denizindeyse geriye bir boşluk kalır. Bu boşluk pozitif enerjili (ve dolayısıyla pozitif kütleli) olarak görünür ve elektrik yükü elektronunkin zıddıdır.

Dirac başlangıçta elektron denizinden bir parçacık çıkması durumunda geriye kalan pozitif elektrik yüklü boşluğun bir proton olabileceğini düşünmüştü. Ancak kısa süre içinde boşluğun kütlelerinin elektronunkine eşit olması gerektiği anlaşıldı. Dirac, 1931 yılında elektron denizindeki boşlukların “antielektronlar” olması gerektiği sonucuna

vardı. Sadece bir yıl sonra Carl Anderson kozmik ışınlarda bugün pozitron olarak adlandırılan bu parçacıkları tespit etti.

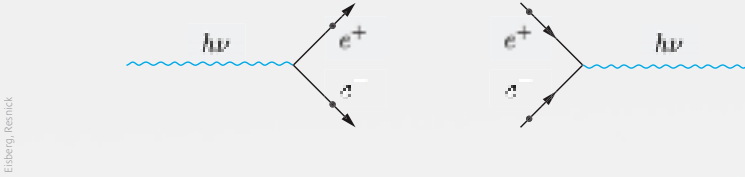
Pozitron, varlığı öne sürülen ve keşfedilen ilk antimadde parçacığıydı. Ancak antimadde kavramı sadece elektron ile sınırlı değildir. Protonların, nötronların, müonların ve bilinen diğer tüm madde parçacıklarının da antiparçacıkları vardır. Bir parçacık ile o parçacığın antiparçacığının kütleleri aynı, elektrik yükleri ve diğer tüm kuantum yükleriyle birbirinin zıddıdır.



Şekil 3.3: Dirac fiziksel boşluğun negatif enerjili elektronlarla dolu olduğunu öne sürdü. Bu elektron denizindeki bir boşluk antielektron (pozitron) olarak görülür. Bir elektron bu boşluğun içine düşebilir. Bu süreçte parçacıklar yok olurken kütleleri enerjiye dönüşür (a). Elektron denizinin içindeki bir parçacığa yeteri kadar enerji verilmesi durumunda ortaya sıradan bir elektron çıkar. Denizdeki elektron boşluğuysa pozitron olarak görünür (b).

Dirac denizi hipotezi, enerjiden elektronların ve pozitronların üretilebileceğinin yanı sıra elektronların ve pozitronların birbirini yok ederek enerjiye dönüşebileceğine de işaret eder. Eğer Dirac denizinde bir boşluk (bir pozitron) varsa bir elektron enerji yayarak bu boşluğa düşebilir. Bu süreçte elektron ve pozitron yok olurken parçacıkların kütlesi enerjiye dönüşür (bkz. Şekil 3.3).

Genel olarak bir madde parçacığı ve antiparçacığı birbirini yok ederek enerjiye dönüşebilir ya da enerji madde-antmadde çiftlerini üretebilir (bkz. Şekil 3.4). Dirac'ın antimadde kavramını öne sürmesinden önce de meşhur $E = mc^2$ formülünün, kütle ve enerjinin birbirine dönüşmesinin mümkün olduğu hakkında ipucu verdiği



Şekil 3.4: Enerji, madde ve antimadde çiftlerini üretebilir ya da madde ve antimadde birbirini yok ederek enerjiye dönüşebilir. Örneğin bir foton yok olurken bir elektron (e^-) ve bir pozitron (e^+) oluşabilir (solda) ya da bir elektron ve bir pozitron birbirini yok ederek bir foton üretebilir (sağda). Bu süreçlerde toplam enerji ve momentum korunur.

soylenenebilir. Ancak enerjinin doğrudan tek bir madde parçacığını üretmesi genel olarak bilinen korunum yasalarına uymaz ve dolayısıyla mümkün değildir. Örneğin bir foton bir elektrona dönüşemez çünkü fotonun elektrik yükü sıfır, elektronun elektrik yüküyse -1 'dir. Bir fotonun madde-antimadde çiftlerini üretmesiysse elektrik yükünün korunumu ya da diğer korunum yasalarıyla çelişmez. Ortaya çıkan iki parçacığın tüm yükleri birbirinin zıddı olduğu için madde-antimadde çiftlerinin toplam yükü sıfırdır. Enerjisinin ortaya çıkacak madde-antimadde çiftinin toplam kütle enerjisinden büyük olması durumunda bir fotonun madde-antimadde çifti üretmesi mümkündür.

3.5 Kuantum Alan Teorileri

Antimaddenin keşfi ve kütle ile enerjinin birbirine dönüşümünün mümkün olduğunun anlaşılması fiziksel kuramların gelişiminde önemli bir aşama oldu. Daha önceleri elektronlar gibi madde parçacıklarının baki olduğu düşüncesi hâkimdi. Fiziksel süreçler sırasında fotonlar oluşup yok olsa da madde parçacıklarının sürecin öncesinde ve sonrasında var olmaya devam ettiği düşünülüyordu. Schrödinger denklemi de bu düşünceye uygun biçimde formüle edilmiştir. Belirli bir sayıda parçacık için bir Schrödinger denklemi yazabilirsiniz. Denklem bu parçacıkların birbiriyle nasıl etkileşeceğini formüle eder. Etkileşim sırasında parçacıklar birbirine enerji aktarabilir. Ancak sistemdeki parçacık sayısı hiçbir zaman değişmez.

Schrödinger'in formülasyonunda madde parçacıklarının oluşmasına ya da yok olmasına yol açacak herhangi bir mekanizma yoktur.

Madde-antimadde çiftlerinin oluştuğu ya da yok olduğu; kütlenin enerjiye, enerjinin kütleye dönüştüğü fiziksel süreçlerin sabit sayıda parçacık için formüle edilmiş herhangi bir kuramla açıklanamayacağı açıktır. Bu tür süreçleri açıklayabilmek için farklı bir formülasyona ihtiyaç vardır. Kuantum alan teorileri bu ihtiyaca cevap verir.

Kuantum alan teorileri; kuantum teorisi, özel görelilik teorisi ve alan kavramını bir araya getiren teorilerdir. Bu kuramların temel bileşeni kuantum alanlardır. Elektronlar, protonlar ya da fotonlar kuantum alanların enerji kazanması (uyarılması) sonucunda ortaya çıkar, enerji kaybetmesi sonuncundaysa yok olur. Örneğin fotonların oluşması ya da yok olması sırasında kuantize edilmiş elektromanyetik alan enerji kazanır ya da kaybeder. Benzer biçimde elektronların, protonların ya da diğer madde parçacıklarının oluşması veya yok olması da elektron alanındaki ya da proton alanındaki enerji değişimlerinin sonucudur. Bir elektron; elektron alanının uyarılmasıyla ortaya çıkar, elektron alanının enerji kaybetmesiyle yok olur.

Madde parçacıklarının da fotonlar gibi kuantum alanlardaki uyarılmalar olarak ele alınabileceği düşüncesi, 1928-1930 yılları arasında Pascual Jordan, Eugene Wigner, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli ve Enrico Fermi'nin yaptığı çalışmaların sonucudur. Fermi bu düşünceden yola çıkarak 1932 yılında beta ışınmasına açıklama getirmişti: Beta ışınması sırasında çekirdekten dışarı atılan elektronlar hâlihazırda atom çekirdeğinde bulunmaz. Bu elektronlar bozunum sürecinde atom çekirdeğini çevreleyen elektron alanının uyarılmasıyla ortaya çıkar.

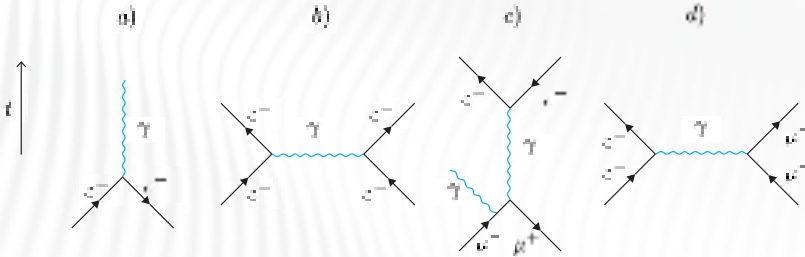
1920'lerde bilinen tek klasik alan teorisi elektromanyetik teoriydi. Doğal olarak, geliştirilen ilk kuantum alan teorisi de elektromanyetik etkileşimin kuantum teorisi olan kuantum elektrodinamiği oldu. İlerleyen yıllarda atom çekirdeğini bir arada tutan güçlü kuvvetin ve parçacıkları birbirine dönüştüren zayıf kuvvetin varlığının anlaşılmasından sonra bu kuvvetlerin de kuantum alan teorileri geliştirildi.

3.6 Kuantum Elektrodinamiği

Özel görelilik kuramıyla uyumlu ilk kuantum alan teorisi kuantum elektrodinamiğidir. Klasik fizikteki elektromanyetik teorinin kuantum fiziğindeki karşılığı olan kuram, elektrik yüklerinin birbiriyle etkileştiği herhangi bir süreç hakkında tahminler

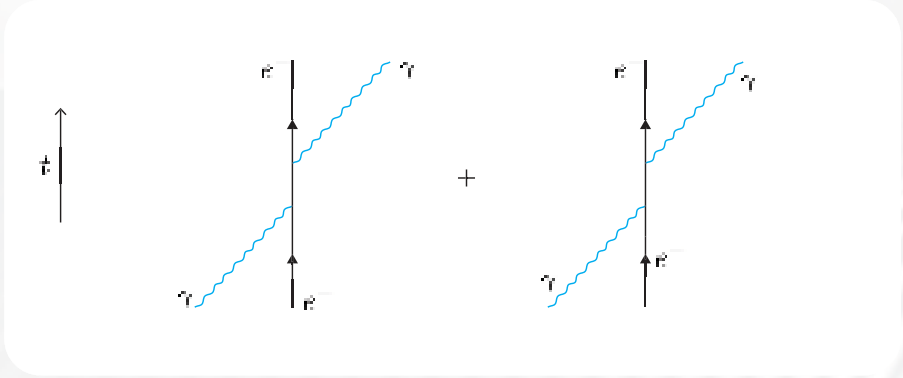
yapılmasına imkân verir. Kuantum elektrodinamiği, geçmişte pek çok zorlu testten başarıyla geçti ve bugün itibarıyla en hassas fiziksel teori ünvanını elinde bulunduruyor.

Kuantum elektrodinamiği kullanılarak hesaplanan temel nicelik, bir sistemin belirli bir başlangıç durumundan belirli bir son durumuna dönüşme olasılığıdır. Bu hesapları yapmak genel olarak zordur. Richard Feynman tarafından geliştirilen diyagramatik bir yöntem bu hesapları görselleştirir ve kolaylaştırır. İki boyutlu olarak çizilen bu diyagramlarda bir yön zamanı, diğer yön ise uzay boyutlarını gösterir. Diyagramlarda üç tür hareket vardır: elektrik yüklü parçacıklar (elektron, pozitron, müon, ...) uzayzamanda yol alır, fotonlar uzayzamanda yol alır ve elektrik yüklü parçacıklar foton yayar ya da soğurur. Diyagramlarda elektrik yükleri düz çizgilerle, fotonlar ise dalgalı çizgilerle temsil edilir. Çizgilerin kesişim noktalarıysa etkileşimleri temsil eder. Diyagramlardaki ucu açık çizgiler, sistemin başlangıç ve son durumundaki “gerçek” parçacıklardır. İki kesişim noktası arasında yer alan, süreçte ortaya çıkıp yok olan elektron, pozitron, foton gibi parçacıklarsa “sanal” parçacıklardır. Şekil 3.5’te Feynman diyagramlarının çeşitli örneklerini görebilirsiniz.



Şekil 3.5: Kuantum elektrodinamiğiyle ilgili çeşitli Feynman diyagramları. Bir elektron (e^-) ve bir pozitron (e^+) birbirini yok ederken bir foton (γ) ortaya çıkar (a); iki elektron sanal foton aracılığıyla etkileşerek saçılır (b); bir müon (μ^-) önce bir foton yayar, sonra ortaya çıkan sanal müon bir antimüonla (μ^+) etkileşerek yok olur, daha sonra ortaya çıkan sanal foton bir elektron-pozitron çifti üretir (c); bir elektron ve bir müon bir sanal foton aracılığıyla etkileşerek saçılır, sanal elektron daha sonra bir foton yayarak gerçek elektronu üretir (d).

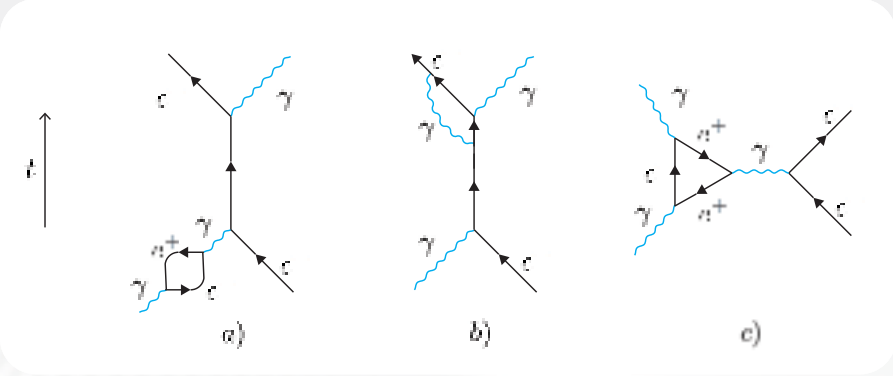
Şekil 3.5'teki diyagramlar kuantum elektrodinamiğinin temel özelliklerini taşır. Kuramdaki tüm etkileşimler noktasaldır (yereldir): Etkileşimler uzayzamanın belirli bir noktasında gerçekleşir. Uzayzamanın iki ayrı noktasındaki iki elektrik yükü doğrudan birbiriyle etkileşemez. Elektrik yükleri arasındaki etkileşimlere fotonlar aracılık eder. Kuantum elektrodinamiğinde fotonlar elektromanyetik kuvvetin “taşıyıcılarıdır”. Fotonlar aracılığıyla gerçekleşmeleri, özel görelilik kuramı ile uyumlu biçimde, etkileşimlerin yayılma hızını ışık hızıyla sınırlandırır.



Şekil 3.6: Compton saçılmasıyla ilgili Feynman diyagramlarının en basitleri

Kuantum elektrodinamiği kullanılarak hakkında hesaplar yapılabilecek bir süreci, örneğin Compton saçılmasını ele alalım. Compton saçılmasının başlangıcında ve sonunda bir elektron ve bir foton vardır: $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$. Parçacıklar etkileşerek birbirlerine enerji ve momentum aktarır. Kuantum elektrodinamiği kullanılarak böyle bir süreçte sistemin belirli bir başlangıç durumundan belirli bir son durumuna geçmesiyle ilgili hesaplar yapılabilir. Bu süreçle ilgili çizilebilecek Feynman diyagramlarının “en basit” ikisi Şekil 3.6’da verilenlerdir. Bu diyagramlar başlangıcı ve sonu belli bir sürecin takip edebileceği alternatif rotalardan ikisini betimler. İlk grafikte elektron önce fotonu soğurur, daha sonra bir foton yayar. İkinci grafikteyse elektron önce bir foton yayar, daha sonra fotonu soğurur. Compton saçılması üzerine yapılacak herhangi bir deneyde önce başlangıçtaki elektron ve fotonu hazırlar, sürecin sonundaysa dedektörlerle elektron ve fotonu tespit edersiniz. Bilinen, sistemin başlangıçtaki ve sondaki durumudur. Ancak ölçümlere bakarak sürecin alternatif rotalardan hangisi takip ettiğini belirlemenin bir yolu yoktur. Dolayısıyla süreç hakkında hesap yaparken olası tüm alternatif mekanizmaları dikkate almak gerekir.

Üstelik bu alternatif mekanizmaların sayısı sonsuzdur. Örneğin Compton saçılmasıyla ilgili daha karmaşık Feynman diyagramlarından bazıları Şekil 3.7’de verilenlerdir.



Şekil 3.7: Compton saçılmasına katkıda bulunan yüksek dereceli diyagramlardan bazıları

Şekil 3.7’deki Feynman diyagramlarından birincisinde gerçek foton önce bir sanal elektron-pozitron çifti üretir. Ortaya çıkan sanal madde-antimadde çifti daha sonra birbirini yok eder. Bu sırada ortaya çıkan sanal foton gerçek elektron tarafından soğurulur. Ortaya çıkan sanal elektron gerçek bir foton yayarak gerçek elektronu ortaya çıkarır. İkinci diyagramda, önce elektron fotonu soğurur. Ortaya çıkan sanal elektron bir sanal foton yayar. Ortaya çıkan ikinci sanal elektron bir gerçek foton yayar ve bu sırada bir başka sanal elektron ortaya çıkarır. Bu sanal elektronun birinci sanal elektronun yaydığı sanal fotonu soğurmasıyla gerçek elektron ortaya çıkar. Üçüncü diyagramda, önce gerçek foton bir sanal elektron-pozitron çifti üretir. Ortaya çıkan sanal pozitron gerçek elektron tarafından soğurulacak bir sanal foton yayar. Sanal fotonun yayılması sırasında ortaya çıkan sanal pozitronsa sanal elektron ile etkileşerek yok olur ve bu sırada gerçek bir foton ortaya çıkar. Feynman diyagramlarına giderek daha fazla sanal parçacık ekleyerek sonsuz sayıda farklı diyagram çizilebilir. Dolayısıyla Compton saçılmasına ya da herhangi bir kuantum elektrodinamiği sürecine katkıda bulunan alternatif mekanizmaların sayısı da sonsuzdur. Ancak bir mekanizmanın Feynman diyagramı ne kadar karmaşıklsa sürecin bütününe olan katkısı o kadar azdır. Bu yüzden kuantum elektrodinamiği hesaplarındaki genel yaklaşım, hesaplara en basit diyagramlarla başlayıp arzu edilen hassasiyete ulaşana kadar giderek daha karmaşık diyagramlarla devam etmektir.

3.7 Kuantum Kromodinamiği ve Elektrozayıf Teori

Kuantum mekaniğinin geliştirilmeye başlandığı dönemlerde sadece proton ve elektron keşfedilmiş, nötronların varlığıysa kuramsal olarak öne sürülmüştü. Aradan geçen zamanda hem daha önceleri bilinmeyen pek çok parçacık hem de bu parçacıkların arasında daha önceleri bilinmeyen etkileşimler keşfedildi. Bugün atom çekirdeğindeki nükleonları (protonları ve nötronları) bir arada tutan güçlü kuvvet ve radyoaktif bozunma süreçlerinde etkin olan zayıf kuvvet kuantum alan kuramlarıyla açıklanıyor. Güçlü kuvvetin kuantum teorisi, kuantum kromodinamiği olarak adlandırılıyor. Elektrozayıf teori olarak adlandırılan bir kuantum alan teorisiye elektromanyetik etkileşim ile zayıf etkileşimi tek bir çatı altında bir araya getiriyor.

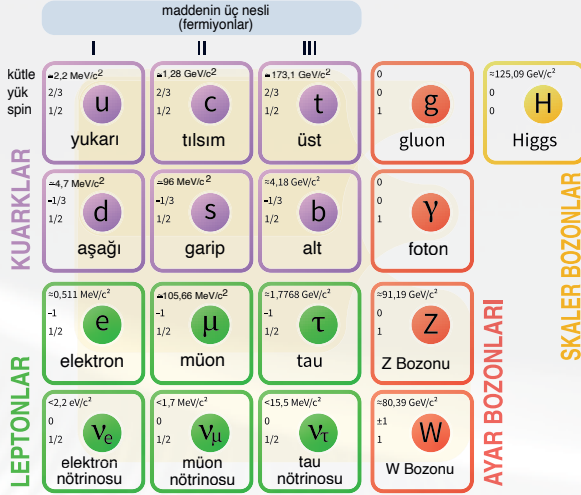
Hem kuantum kromodinamiğinin hem de elektrozayıf teorisinin gelişiminde kuantum elektrodinamiğinin model alındığı söylenebilir. Bu kuramlardaki etkileşimler de elektromanyetik teoride olduğu gibi Feynman diyagramlarıyla betimlenebilir. Feynman diyagramları kuramsal hesapların görselleştirilmesinde ve basitleştirilmesinde yararlı olur. Bu kuramlarla ilgili Feynman diyagramlarına göz atmadan önce parçacık fiziğinin standart modelinden bahsetmek yararlı olacaktır.

3.8 Parçacık Fiziğinin Standart Modeli

Modern fizikte bilinen tüm “temel” parçacıklar ile güçlü, zayıf ve elektromanyetik etkileşimi açıklayan kuantum kuramları “parçacık fiziğinin standart modeli”nde bir araya toplanır.

Standart modelde yer alan tüm parçacıklar (*bkz.* Şekil 3.8), madde parçacıkları ve kuvvet parçacıkları olarak iki ana gruba ayrılır. Madde parçacıkları fermiyon, kuvvet parçacıklarıysa bozondur. Standart modelde yer alan madde parçacıkları leptonlar ve kuarklar olarak iki ana gruba ayrılır. Leptonlar doğada serbest hâlde bulunabilen parçacıklardır. Bu parçacıkların en bilineni elektrondur. Diğer leptonlar ise müon, tau ve nötrinolardır. Standart modelde elektron, müon ve tau parçacıklarının her birine karşılık gelen bir nötrino parçacığı bulunur. Bu nötrinolar, zayıf etkileşimlerde adıyla anıldıkları lepton ile birlikte yer alır. Kuarklar olarak adlandırılan madde parçacıklarıysa doğada serbest hâlde bulunmaz. Ancak bu parçacıklar çeşitli kombinasyonlarla bir araya gelerek doğada serbest hâlde bulunabilen başka madde parçacıkları oluşturur. Güçlü kuvvet tarafından bir arada tutulan bu madde

Temel parçacıkların standart modeli



MisrMj@Wikimedia Commons

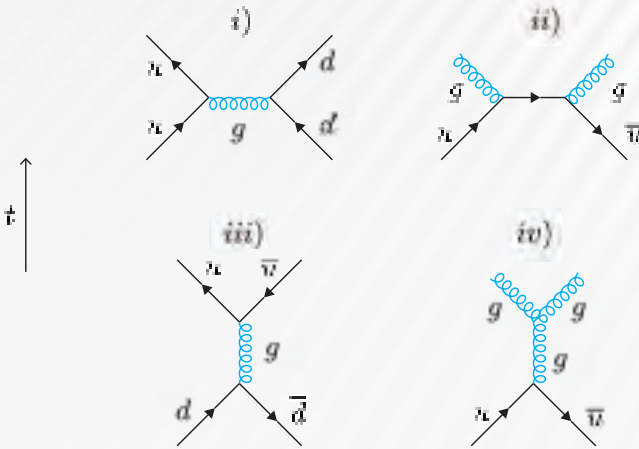
Şekil 3.8: Parçacık fiziğinin standart modelinde yer alan parçacıklar. Grafikte yer alan madde parçacıklarının (kuarklar ve leptonlar) tamamının antiparçacıkları da vardır. Madde parçacıkları fermiyon, madde parçacıkları arasındaki etkileşimlere aracılık eden kuvvet taşıyıcıları ise bozondur. Higgs bozonunun temel işlevi parçacıklara kütle kazandırmaaktır.

parçacıkları hadron olarak adlandırılır. Hadronlar da kendi içinde baryonlar ve mezonlar olarak ikiye ayrılır. Mezonlar bir kuarktan ve bir antikuarktan, baryonlar ise üç kuarktan (ya da üç antikuarktan) oluşur. Baryon grubu parçacıkların en bilinen örnekleri proton ve nötrondur. Standart modelde altı ayrı kuark yer alır. Bu kuarklar; yukarı kuark, aşağı kuark, üst kuark, alt kuark, tılsım kuark ve garip kuark olarak adlandırılır. Protonlar ve nötronlar yukarı kuark ve aşağı kuarktan oluşur. Bir protonun yapısında iki yukarı, bir aşağı kuark; bir nötronun yapısında ise bir yukarı, iki aşağı kuark vardır. Standart modeldeki madde parçacıkları üç “nesil” içinde gruplandırılır. Proton ve nötronları meydana getiren yukarı ve aşağı kuark ile elektron ve elektron nötrinosu birinci nesilde yer alır.

Bir parçacığın standart modelde yer alan üç etkileşimden herhangi biri aracılığıyla etkileşebilmesi için o etkileşimle ilgili bir “yük taşıması” gerekir. Söz konusu

elektromanyetik etkileşim olduğunda bu yük elektrik yüküdür. Söz konusu güçlü etkileşim olduğundaysa parçacıkların taşınması gereken yük “renk yükü” olarak adlandırılır. Renk yükünün üç türü vardır: kırmızı, sarı ve yeşil. Lepton grubu parçacıklar renk yükü taşımadıkları için güçlü etkileşimde yer almazlar. Güçlü etkileşim sadece kuarklar arasındadır. Söz konusu zayıf etkileşim olduğundaysa standart modelde yer alan tüm parçacıkların bir “çeşni” sahibi olduğu söylenir. Tüm parçacıklar zayıf kuvvet aracılığıyla etkileşebilirler.

Standart modelde yer alan kuvvet taşıyıcılarından foton elektromanyetik etkileşime, gluonlar güçlü etkileşime, W ve Z bozonlarıysa zayıf etkileşime aracılık eder. Gluonların sekiz ayrı türü, W bozonlarının ise W^+ ve W^- olarak adlandırılan iki ayrı türü vardır. Bu bozonların tamamının spini 1’dir. Standart modelde ayrıca Higgs parçacığı olarak adlandırılan ve spini 0 olan bir bozon daha yer alır. Higgs bozonunun temel işlevi parçacıklara kütle kazandırmaktır. Higgs bozonunun yer aldığı etkileşim diğer etkileşimlerde olduğu gibi çekme-itme tarzı bir etkiye sahip olmadığı için Higgs mekanizması genel olarak bir kuvvet olarak adlandırılmaz.

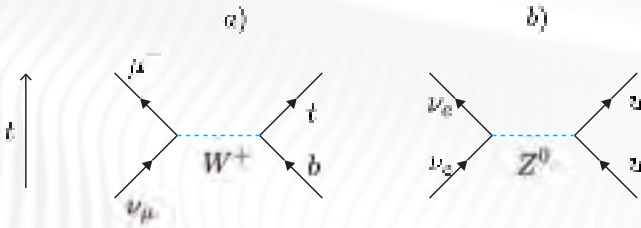


Şekil 3.9: Kuantum kromodinamiği ile ilgili çeşitli Feynman diyagramları

Kuantum kromodinamiğinde karşınıza çıkacak Feynman diyagramlarının çeşitli örneklerini Şekil 3.9’de görebilirsiniz. Bu diyagramlarının birincisinde bir yukarı kuark

(u) ve bir aşağı kuark (d) bir sanal gluon (g) aracılığıyla etkileşerek saçılır. İkinci diyagramda bir yukarı kuark bir gluon yayar, ortaya çıkan sanal yukarı kuark bir yukarı antikuarkla ($\bar{u}$) etkileşir. Yukarı kuark ve yukarı antikuark yok olurken bir gerçek gluon ortaya çıkar. Üçüncü diyagramda bir aşağı kuark ve bir aşağı antikuarkın ($\bar{d}$) yok olmasıyla oluşan sanal gluon bir yukarı kuark ve bir yukarı antikuark üretir. Dördüncü diyagramda bir yukarı kuark ve bir yukarı antikuarkın yok olmasıyla ortaya çıkan sanal gluon iki gerçek gluon üretir.

Standart modelde yer alan etkileşimler arasında parçacıkların türünün değişmesine sebep olan tek kuvvet zayıf etkileşimdir. Dolayısıyla parçacıkların bozunma sürecinde zayıf etkileşim rol oynar. Zayıf etkileşimin rol oynadığı süreçlerle ilgili Feynman diyagramlarının çeşitli örneklerini Şekil 3.10'da görebilirsiniz.

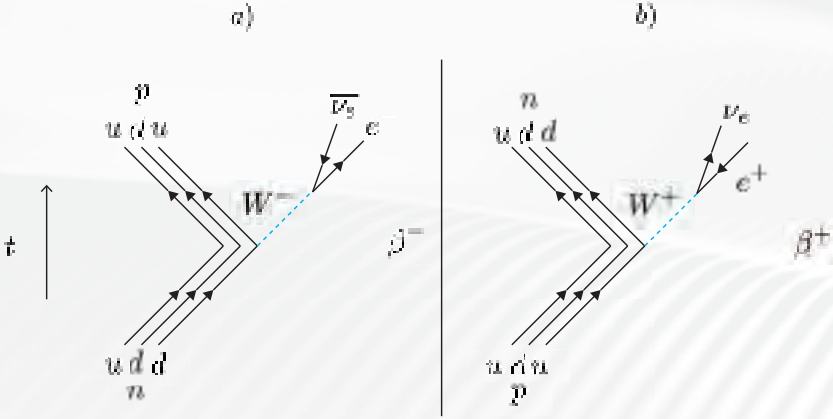


Şekil 3.10: Elektrozayıf kuramla ilgili çeşitli Feynman diyagramları: Bir müon nötrinosu (ν_μ) ve bir alt kuark (b) bir sanal W^+ bozonu aracılığıyla etkileşir. Müon nötrinosu ve alt kuark yok olurken bir müon (μ^-) ve bir üst kuark (t) ortaya çıkar (a); bir elektron nötrinosu (ν_e) ve bir yukarı kuark (u) sanal bir Z^0 bozonu aracılığıyla saçılır (b).

Zayıf etkileşim, parçacıkların türünü değiştiren tek etkileşim olarak bozunma süreçlerinde etkindir. Örneğin atom çekirdeklerinden dışarıya elektronların atılmasıyla sonuçlanan beta ışımasında (β^- ışıması) ve atom çekirdeklerinden dışarıya pozitron atılmasıyla sonuçlanan antibeta ışımasında (β^+ ışıması) zayıf etkileşim rol oynar.

Beta ışıması sürecinde (bkz. Şekil 3.11) iki aşağı kuark (d) ve bir yukarı kuarktan (u) oluşan bir nötron ($n = udd$), iki yukarı kuarktan (u) ve bir aşağı kuarktan (d) oluşan

bir protona ($p = uud$) dönüşür: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Bu sırada bir elektron (e^-) ve bir elektron antinötrinosu ($\bar{\nu}_e$) açığa çıkar. Bu süreçte W^- bozonu aracılık eder. Aşağı kuarkın yukarı kuarka dönüşümü sırasında ortaya çıkan sanal W^- bozonu, bir elektron ve bir elektron nötrinosu üretir.



Şekil 3.11: Beta ışıması ve antibeta ışıması süreçleriyle ilgili Feynman diyagramlarının en basitleri

Antibeta ışıması sürecinde (bkz. Şekil 3.11) ise bir nötron yok olurken bir proton, bir pozitron ve bir elektron nötrinosu açığa çıkar: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. Bu süreçte bir W^+ bosonu aracılık eder.

Beta ışımasına W^- bozonlarının, antibeta ışımasına W^+ bozonlarının aracılık etmesinin nedeni korunum yasalarıyla ilgilidir. Kuantum elektrodinamiği, kuantum kromodinamiği ve elektrozaıf teori ile ilgili Feynman diyagramlarının kesişim noktalarında (birden fazla parçacığın bir araya geldiği noktalarda) korunum yasaları geçerlidir. Etkileşimlerin meydana geldiği bu noktalarda momentum, enerji ve elektrik yükü korunur. Bu durum yukarıdaki beta ışıması ve antibeta ışıması ile ilgili diyagramlarda da geçerlidir. Elektron, pozitron, yukarı kuark, aşağı kuark, W^+ bozonu ve W^- bozonunun elektrik yükleri sırasıyla -1 , $+1$, $+2/3$, $-1/3$, $+1$ ve -1 'dir. Yukarıdaki iki diyagramın etkileşim noktalarında elektrik yükünün korunduğunu kolaylıkla doğrulayabilirsiniz.

Bölüm 4

Kuantum Teorisi ve Gerçeklik

Kuantum mekaniği hiç kuşkusuz modern fizikte önemli bir yer tutuyor. Geliştirilmeye başlanmasının üzerinden geçen yüz yılda sayısız testten başarıyla geçti. Bugün itibarıyla kuantum teorisinin tahminleriyle çelişen herhangi bir deneysel ya da gözlemsel veri bulunmuyor. Ancak buna rağmen kuantum mekaniği en çok eleştirilen fiziksel kuramların başında geliyor. Üstelik bu eleştiriler kuantum teorisini en iyi bilen, kuantum teorisinin geliştirilmesine önemli katkıda bulunmuş fizikçilerden geliyor. Örneğin Albert Einstein, 20. yüzyılın başlarında kuantum teorisinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuştu. Hatta kuantizasyonun sadece matematiksel bir yöntem değil doğanın bir gerçekliği olduğu düşüncesini ilk ortaya atan, fotoelektrik olaya getirdiği açıklamayla Einstein olmuştu. Ancak Schrödinger denkleminin geliştirilmesinden ve dolanıklık, dalga fonksiyonunun çökmesi gibi kavramların ortaya çıkmasından sonra kuantum teorisini eleştirmeye başladı. 1955'teki ölümüne kadar yaklaşık otuz sene kuantum teorisini çürütmeye uğraştı ancak başarısız oldu. Kuantum alan teorisine katkılarından dolayı Nobel Fizik Ödülü'nü kazanan Hollandalı fizikçi Gerard 't Hooft günümüzde kuantum teorisini daha "mantıklı" bir biçimde yeniden formüle etmeye çalışıyor. Nobel ödüllü matematiksel fizikçi Roger Penrose, kuantum teorisinde temel değişikliklere ihtiyaç olduğunu düşünüyor. Kuantum teorisini sorgulamak için öne sürülmüş, Schrödinger'in kedisi olarak adlandırılan meşhur düşünce deneyini ortaya koyan da kuantum mekaniğinin temelini atan Schrödinger'in kendisidir! Peki ama neden? Bugüne kadar geliştirilmiş en hassas teorileri içinde barındıran, yanlışlığuna işaret eden tek bir deney dahi bulunmayan bir kuram neden bu kadar çok eleştiriliyor

ve sorgulanıyor?

Bugün hâlâ tartışmalara konu olmasının en önemli nedenlerinden biri, kuantum teorisini gerçeklikle ilişkilendirmenin zorluğu. Kuantum teorisi gerçeklik hakkında ne söyler hatta kuantum teorisi gerçeklik hakkında herhangi bir şey söyler mi? Örneğin kuantum durumları gerçek midir? Yoksa gerçek olan sadece ölçüm sonuçları olarak karşımıza çıkan, çeşitli diferansiyel operatörlerin özdeğerlerine karşılık gelen nicelikler midir? Öncelikle şunu belirtelim ki fizikçilerin büyük çoğunluğu bu tür felsefi konulara pek kafa yormaz hatta kafa yorulmasını gereksiz bulurlar. Örneğin Stephen Hawking bu konu hakkında bir kez şu ifadelerde bulunmuştı:

“Ben bir teorinin gerçekliğe karşılık gelmesini talep etmem. Çünkü gerçekliğin ne olduğunu bilmiyorum. Gerçeklik turnusol kâğıdıyla test edilebilecek bir nitelik değildir. Beni ilgilendiren sadece teorinin ölçüm sonuçlarını tahmin etmesidir.”

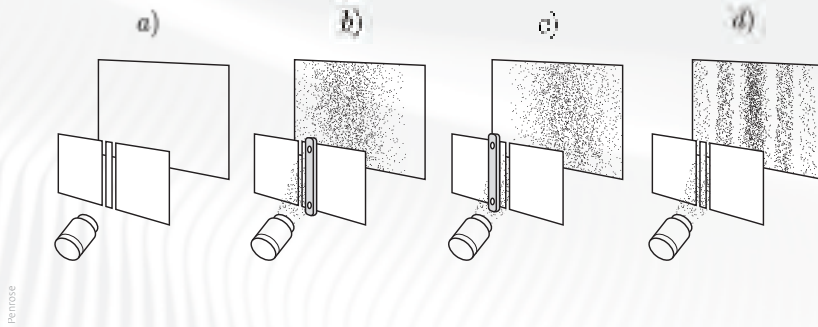
Kuantum teorisini en çok eleştirenlerse bu konulara en çok kafa yoranlar oluyor. Örneğin Roger Penrose, *The Road to Reality* kitabında bu konuda şu ifadeleri kullanıyor:

“Benim görüşüm ‘gerçeklik’ sorusunun kuantum mekaniğinde ele alınması gerektiğidir, özellikle de eğer birisi (pek çok fizikçinin görüldüğü gibi) kuantum formalizminin evrensel olarak tüm fiziğin bütününde geçerli olduğu görüşüne sahipse. Çünkü bu durumda, eğer kuantum gerçeklik yoksa, hiçbir ölçekte gerçeklik olmaz (Bu görüşte, tüm ölçekler kuantum ölçөгüdür.). Bana göre, gerçekliği bu biçimde tamamen inkâr etmek mantıklı değil. Sadece geçici ya da yaklaşık bile olsa bir gerçeklik kavramına ihtiyacımız var. Bir gerçeklik kavramı olmadan tüm nesnel evrenimiz ve dolayısıyla bütün bilim, düşünceli bakışlarımızın önünde buharlaşır.”

Felsefenin gerçeklikle ilgili dalı ontoloji olarak adlandırılır. Kuantum mekaniğinin ontolojileri ile ilgili çeşitli görüşleri özetlemeden önce konuyu daha iyi anlamamıza yardımcı olacak çeşitli kavramlardan, teoremlerden, deneylerden ve düşünce deneylerinden bahsedelim.

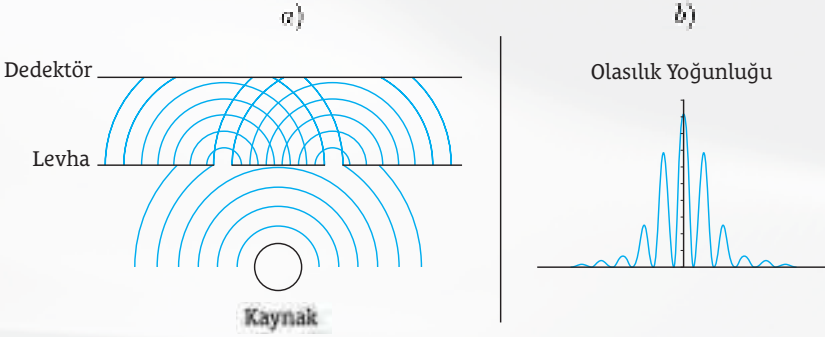
4.1 Dalga Fonksiyonunun Bütüncül Doğası

Kuantum mekaniğiyle ilgili hesapların temel nesnesi dalga fonksiyonudur. Bir sistem hakkında edinilebilecek tüm bilgiler dalga fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Dolayısıyla bir kuantum sisteminin kuantum teorisinde gerçeklik atfedilecek tek bir şey varsa onun da dalga fonksiyonu olduğu düşünülebilir. Ancak günümüzde fizikçilerin büyük çoğunluğu bu görüşü paylaşmaz. Bu durumun nedeni dalga fonksiyonunun sıra dışı doğasıdır. Dalga fonksiyonunun doğasını daha iyi anlamak için çeşitli deneylere ve düşünce deneylerine bir göz atalım.



Şekil 4.1: (a) Çift yarık deneyinin şeması. Deneyler sırasında elektronlar kaynaktan “tek tek” levhanın üzerine gönderilir. Levhanın arkasındaki ekran, üzerine düşen elektronları kaydeder. (b) Sağdaki yarık kapatıldığında ekranda ortaya çıkan örüntü. (c) Soldaki yarık kapatıldığında ekranda ortaya çıkan örüntü. (d) Her iki yarık da açık olduğunda ekranda bir girişim deseni ortaya çıkar.

İlk olarak elektronlar ile yapılan çift yarık deneyini ele alalım (bkz. Şekil 4.1). Bu deneyde elektronlar, üzerinde bir çift yarık bulunan bir levhanın üzerine gönderilir. Levhanın arkasındaysa üzerine gelen parçacıkları kaydeden bir dedektör vardır. Zaman ilerleyip, parçacıkların konumları dedektör tarafından kaydedildikçe bir girişim deseninin ortaya çıktığı gözlenir. Bu durumu kuantum mekaniğiyle şu şekilde açıklayabiliriz: Kaynaktan yayıldığı sırada elektronun dalga fonksiyonu, $\Psi(x, y, z, t)$, lokalizedir (ufak bir hacmin içinde sıfırdan farklıdır), zaman ilerledikçe dalga fonksiyonu uzaya yayılır. Dalga fonksiyonunun bir kısmı bir yarıktan bir kısmı da diğer



Şekil 4.2: Çift yarık deneyinin olasılık dağılımı

yarıktan geçer. Bu iki bileşen dedektöre ulaştığında girişim yapar, üst üste binerek birbirini güçlendirir ya da zayıflatır. Elektronun dedektörün belirli bir noktasında tespit edilme olasılığı $|\Psi|^2$ ile orantılıdır (bkz. Şekil 4.2). Tek bir elektronun tespit edildiği konuma bakılarak bu olasılık dağılımı gözlemlenemez. Ancak dedektörde kaydedilen elektronların sayısı arttıkça elektronların tespit edildikleri konumların bu olasılık dağılımıyla uyumlu olduğu görülür. Kaynaktan tek tek çıkan elektronların dedektörde ortaya çıkardığı girişim deseni, elektronun dalga karakterini ortaya çıkarır. İki yarığın sadece birinden geçen “parçacık” karakterli, lokalize elektronlarla ortaya çıkan girişim deseni açıklanamaz. Yarıklardan biri kapatıldığında dedektörde ortaya çıkan girişim deseni kaybolur (bkz. Şekil 4.1). Bu durumda da elektronun parçacık karakteri ortaya çıkar. Bu sonuçlara bakıldığında elektronun deney düzeneğinin dalga karakterini mi yoksa parçacık karakterini mi ortaya çıkaracak biçimde düzenlendiğini nereden bildiği, ne şekilde davranmaya nasıl karar verdiği sorusu akla gelebilir? Bu sorunun cevabıysa şudur: Elektron aslında deney düzeneğinin nasıl olduğunu ve ne şekilde davranması gerektiğini bilmez ancak “dalga fonksiyonu bilir”! Deney düzeneğinin nasıl olduğuna bağlı olarak dedektöre ulaşan dalga fonksiyonu değişir. Dalga fonksiyonunun ne olduğuna bağlı olarak da elektronun dedektörün farklı noktalarında ortaya çıkma olasılıkları değişir. Bu ve benzeri deneyler dalga fonksiyonunun önemli bir özelliğini de gözler önüne serer. Bu özellik dalga fonksiyonunun bütüncülüğüdür. Dedektöre ulaşan dalga fonksiyonunun değeri birden fazla (aslında sonsuz) noktada sıfırdan farklıdır. Ancak parçacık yine de sadece tek bir noktada tespit edilir. Bu zaten arzu edilen ve beklenen bir durumdur.

Kaynaktan çıkan tek bir elektron varken dedektörün iki ayrı noktasında iki ayrı elektron tespit edilmesi zaten beklenmez. Ancak ilginç olan nokta, dalga fonksiyonunun farklı kısımlarının birbirinin ne yaptığını “farkında” olmasıdır. Dedektörün belirli bir kısmına ulaşan dalga fonksiyonu “işlevini yerine getirip” elektronun kaydedilmesini sağladığında dalga fonksiyonunun diğer kısımları “elektronun zaten kaydedildiğinin farkındadır” ve dedektörde ikinci bir kayda neden olmaz. Dolayısıyla dalga fonksiyonunun sonsuz farklı noktada sıfırdan farklı olasılık yoğunluğu ifade etmesinin bir önemi yoktur. Dalga fonksiyonu süreçte bir bütün olarak davranır. Dalga fonksiyonunun günlük hayatta aşına olduğumuz herhangi bir dalgada rastlanmayan bu sıra dışı özelliğini daha iyi anlamak için “büyük ölçekli” bir düşünce deneyini ele alalım.



Şekil 4.3: Dalga fonksiyonunun doğasının yerel olmadığını örnekleyen farazi bir uzay deneyi. Kaynaktan yayılan fotonun dalga fonksiyonu ışın bölücünde iki parçaya ayrılır. Bu iki parça bir yıl sonra kaynağa bir ışık yılı mesafedeki farklı dedektörlere ulaşır. Parçacık her zaman dedektörlerin sadece birinde kaydedilir.

Üç fizikçi fotonlarla kuantum mekaniği üzerine bir deney yapmaya karar verirler. Fizikçilerin biri Dünya’da kalır, diğer ikisiyse Dünya’ya bir ışık yılı uzaklıktaki noktalara giderek iki ayrı noktada foton dedektörleri kurarlar (bkz. Şekil 4.3). Dünya’daki fizikçi deneyler sırasında periyodik olarak fotonlar üretir. Bu fotonlar ilk olarak bir ışın bölücünün üzerine yönlendirilir. Işın bölücünün içinden geçen doğrultuda bir dedektör, yansıttığı doğrultudaysa diğer dedektör vardır. Bu iki rotaya *A* ve *B* rotaları diyelim. Kaynaktan ilk çıktığında fotonun dalga fonksiyonu lokalizedir. Bir süre sonra fotonun kuantum durumu *A* rotasını takip eden bir foton ile *B* rotasını takip eden bir

fotonun süperpozisyonu hâline gelir. Yaklaşık bir yıl sonra süperpozisyonu meydana getiren iki bileşenden biri bir dedektöre, diğeri de öteki dedektöre ulaşır. Bu sırada dedektörleri kuran fizikçilerse ölçüm sonuçlarını kaydetmekle meşguldür. Tüm ölçümler tamamlandıktan sonra Dünya'ya doğru yola çıkarlar. Ölçümleri kaydeden fizikçiler, Dünya'ya döndükten sonra bir araya gelir ve verileri karşılaştırırlar. Sonuçta belirli bir anda kaynaktan yayılan fotonun ya bir dedektörde ya da diğeri dedektörde tespit edildiği, ayrıca fotonların yarısının bir dedektörde yarısının da diğeri dedektöre ulaştığı anlaşılır. Bu sonuçların şaşırtıcı olduğu söylenemez. Ancak şaşırtıcı olan nokta, dalga fonksiyonunun iki bileşeni arasında 1,4 ışık yılından daha fazla bir mesafe olmasına rağmen her durumda sadece bir bileşenin dedektörde foton kaydedilmesine sebep olması. Işık hızıyla yol alacak sinyallerle bilgi aktarımının 1,4 yıldan uzun süreceği koşullarda bile dalga fonksiyonunun iki bileşeninin birbiriyle “koordineli davranması”, bir bileşenin diğeri fotonu kaydettirdiğini “bilip” herhangi bir şey yapmamasıdır. Bu satırları okurken aklınızdan şöyle düşünceler geçmiş olabilir: Foton ışın bölücüye ulaştıktan sonra %50 olasılıkla *A* rotasını, %50 olasılıkla da *B* rotasını takip etmiştir. Fotonun %50 olasılıkla bir dedektörde, %50 olasılıkla da diğeri dedektörde tespit edilmesi de bu durumun doğal bir sonucudur. Eğer öyleyse dikkatlice okumaya devam edin.



Şekil 4.4: Kozmik ölçekte bir Mach-Zehnder girişimölçeri. İlk ışın bölücüde dalga fonksiyonu iki parçaya ayrılır. Bu parçalar aynalardan yansıyıp ikinci ışın bölücüden geçtikten sonra girişim yapar. Fotonlar iki dedektörün sadece birinde kaydedilir.

Şimdi de A ve B rotalarının sonundaki dedektörlerin aynalarla değiştirildiğini düşünelim. Öyle ki bu aynaların her ikisi de üzerlerine gelen dalga fonksiyonunu dördüncü bir noktaya odaklar. Bu noktada ikinci bir ışın bölücü vardır. Işın bölücünün üzerine bir yönden ya da diğer yönden gelen dalga fonksiyonu ya ışın bölücünün içinden geçer ya da yansır. Işın bölücünün ardında iki ayrı dedektör vardır. Böyle bir deney düzeneğinde (bkz. Şekil 4.4) tüm uzunlukları dikkatli bir biçimde ayarlayarak iki dedektörün birinde tamamen yıkıcı girişim, diğerindeyse yapıcı girişim gerçekleşmesini sağlamak mümkündür. Böyle bir durumda fotonlar her zaman yapıcı girişimin gerçekleştiği dedektörde kaydedilecektir. Bu sonuçları bir önceki versiyonda olduğu gibi parçacık gibi davranan fotonlarla açıklamaksa mümkün değildir. Eğer fotonlar ilk ışın bölücüde iki rotadan birini seçmiş olsalardı ortaya çıkacak sonuç açısından diğer rotanın bir önemi olmaz, fotonlar ikinci ışın bölücüye tek bir yönden ulaşır, ışın bölücüden geçtikten sonraysa ya bir yöne ya da diğer yöne giderdi. Böyle bir durumda sadece bir dedektörde değil her iki dedektörde de fotonlar kaydedilir. Dolayısıyla bu deney düzeneğinde fotonların sadece bir dedektörde ortaya çıkması, fotonların parçacık karakteriyle açıklanamaz. Sonuçları açıklamak için bu kez de fotonların dalga karakterinin ön plana çıkarılması gerekir. Astronomik ölçekte ifade edilen bu deneyler hayali gibi gelebilir. Ancak bu tarz deneyler, astronomik ölçeklerde olmasa da laboratuvar ortamında Mach-Zehnder girişimölçerleriyle yapılabilir. Deney sonuçları, dalga fonksiyonu kullanılarak yapılan hesapları istisnasız doğruluyor.

Her iki deneyde de ilk ışın bölücüde dalga fonksiyonu iki parçaya ayrılır. Fotonun parçacık karakteriyse sadece dedektörde tespit edilerek lokalize olduğunda ortaya çıkar. Bu deneylerdeki en ilginç noktaysa fotonun sanki ne tür bir ölçüm yapılacağını “seziyormuş” ve duruma göre ilk ışın bölücüden ayrılırken kendini “parçacık moduna” ya da “dalga moduna” alıyormuş gibi görünmesidir. Kuantum teorisinde fotonlara ya da diğer parçacıklara bu tür sezgiler atfedilmez. Yapılması gereken sadece dalga fonksiyonunun bütüncül karakterini kabul etmektir. Parçalara bölünse de dalga fonksiyonu tek bir parçacığı tanımlamaya ya da tek bir “şey” gibi davranmaya devam eder. Parçacığın bir noktada ortaya çıkması (bir dedektörde tespit edilmesi) aynı anda başka bir yerde ortaya çıkmasını (başka bir dedektörde tespit edilmesini) engeller. Kuantum dalga fonksiyonu bu bakımdan klasik dalgalardan farklıdır. Dalga fonksiyonunun farklı kısımları, uzayın farklı bölgelerinde birbirinden bağımsız olarak yol alan “yerel çalkantılar” olarak düşünülemez. Dalga fonksiyonları bütüncül karakterlidir.

4.2 Gizemli Kuantum Sıçramaları

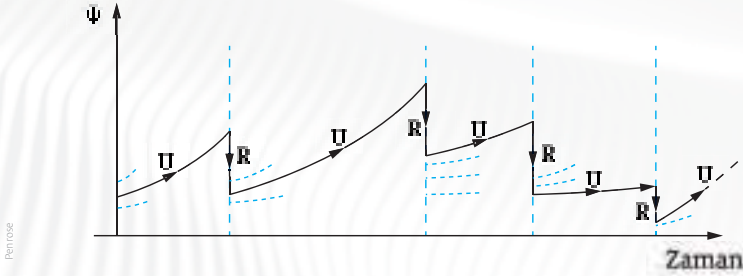
Kuantum teorisi ile ilgili kafa karıştırıcı noktalardan biri, ölçümlerin Schrödinger denklemi kullanılarak yapılan hesapları kesintiye uğratmasıdır. İki ölçüm arasındaki süreçte, dalga fonksiyonunun nasıl değiştiğini Schrödinger denklemini kullanarak hesaplayabilirsiniz. Bu süreç dalga/parçacık ikiliğinin dalga karakterini ortaya çıkarır ve dalga fonksiyonu uzaya yayılır. Schrödinger denkleminin lineer özelliği, parçacığın kuantum durumunun, ölçümlerin ortaya çıkarabileceği muhtemel sonuçların bir süperpozisyonunda bulunmasına imkân verir. Ölçümler ise dalga/parçacık ikiliğinin parçacık karakterini ortaya çıkarır. Dalga fonksiyonu ne kadar geniş bir uzaya yayılmış olursa olsun, parçacık anlık olarak uzayın sınırlı bir bölgesine lokalize olur. En önemlisi ölçümlerin ortaya çıkardığı fiziksel gerçekliğe karşılık gelen dalga fonksiyonu, ölçümden önce Schrödinger denklemi kullanılarak hesaplanan dalga fonksiyonundan farklıdır. Hiçbir ölçüm, parçacığın farklı kuantum durumlarının bir süperpozisyonunda olduğu sonucunu vermez. Aksine parçacığın ölçüm öncesindeki dalga fonksiyonunun içinde barındırdığı farklı durumların birinde olduğu bulunur. Ölçümden sonra sistemin nasıl gelişeceği hakkında Schrödinger denklemini kullanarak hesaplar yapmaya devam edebilmeniz için eski dalga fonksiyonunu bir tarafa bırakıp ölçüm sonucuna karşılık gelen yeni dalga fonksiyonunu kullanmanız gerekir. Ölçüm öncesi ve sonrası dalga fonksiyonları arasındaki bu süreksiz değişim, kuantum sıçraması olarak adlandırılır.

Kuantum sıçramaları bize dalga fonksiyonunun gerçekliği hakkında ne söyler? Pek çok fizikçinin dalga fonksiyonunun bir fiziksel gerçekliği tanımladığından kuşku duymasının nedeni; bu yerel olmayan, süreksiz ve anlık kuantum sıçramalarıdır. Schrödinger'in kendisi de kuantum sıçramalarından rahatsızdı. Bir konuşma sırasında Niels Bohr'a "Bu kahrolası kuantum sıçramalarından kurtulamayacaksak kuantum teorisiyle uğraşmaya başladığım için üzgünüm." demişti.

4.3 U ve R Prosedürleri, Ölçüm Paradoksu

Kuantum mekaniği hesaplarında kullanılan iki prosedüre biraz daha detaylı göz atalım. Bu prosedürlerden biri kısaca **U** olarak adlandıracağımız Schrödinger denklemi kullanılarak yapılan hesaplar, diğeri ise kısaca **R** olarak adlandıracağımız "dalga fonksiyonunun çökmesi" ya da "durum vektörünün indirgenmesi".

Bu iki prosedür matematiksel olarak uyumsuzdur (*bkz.* Şekil 4.5). U prosedürü bir diferansiyel denklemle (Schrödinger denklemi) ifade edilir. Bu denklem deterministtir. Dalga fonksiyonunun belirli bir zamanda ne olduğu biliniyorsa geçmişte ne olduğu ya da gelecekte ne olacağı hesaplanabilir. Tabii, bu zaman aralığında herhangi bir ölçüm olmaması kaydıyla! R prosedürüyse bir kuantum sıçramasını ifade eder. Determinist değil olasılıksaldır. Bir parçacığın dalga fonksiyonunun hangi kuantum durumuna çökeceği kesin olarak bilinemez. Ancak kuantum teorisi belirli bir özelliğe ait operatörün öz durumlarından birine çökeceğini söyler. Ayrıca dalga fonksiyonunun hangi öz duruma hangi olasılıkla çökeceğinin (hangi sonuçların hangi olasılıklarla ortaya çıkacağını) hesaplanması için kesin matematiksel kurallar sunar.



Şekil 4.5: Kuantum mekaniği birbiriyle matematiksel olarak uyumsuz iki prosedür içerir. Schrödinger denklemi kullanılarak yapılan hesapları ifade eden U prosedürü sürekli ve determinist, dalga fonksiyonunun çökmesini ifade eden R prosedürü, süreksiz ve olasılıksaldır. Ölçümlerin ortaya çıkardığı farklı sonuçlara bağlı olarak dalga fonksiyonu farklı biçimlerde gelişir.

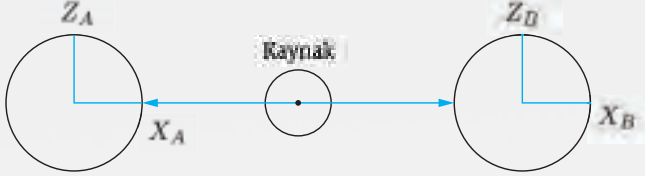
Şayet kuantum mekaniği sadece U prosedürünü içeriyor olsaydı her şeyi anlamlandırmak çok daha kolay olurdu. Ne bugün ne de geçmişte fizikçilerin U prosedüründeki matematiksel süreçleri kavramakta zorluk yaşadığı söylenemez. Determinist diferansiyel denklemler kullanılarak yapılan hesaplar zaten klasik fiziğin temelidir: Newton hareket denklemleri, Maxwell denklemleri, Lagrange hareket denklemleri, Hamilton hareket denklemleri, Hamilton-Jacobi denklemi... Schrödinger denklemi de uzayda yayılan bir dalganın hareketlerini betimler. Hatta bir nebze klasik elektromanyetik teorideki Maxwell denklemlerine benzediği bile söylenebilir. Şayet R

olmasaydı U prosedürünün fiziksel olarak gerçek bir dalga fonksiyonunun fiziksel olarak gerçek bir gelişim sürecini tanımladığını ifade etmek hiç de zor olmazdı. Ancak gözlemlenen fiziksel süreçleri açıklamak için bir de R prosedürüne ihtiyaç duyuluyor. Her bir ölçümden sonra U 'yu kesintiye uğratıp R 'yi uygulamak (sistemin durum vektörünü indirgemek) gerekiyor. Birbiriyle matematiksel olarak uyumsuz iki prosedürün $U, R, U, R, \dots$ biçiminde ardışık olarak ve tekrar tekrar uygulanarak fiziksel süreçler hakkında tahmin yapılması, kuantum fiziğinin klasik fizikte analoğu olmayan sıra dışı bir özelliğidir. Süregiden U süreçlerinin R ile kesintiye uğraması sıklıkla ölçüm problemi hatta bazen ölçüm paradoksu olarak adlandırılır.

Belki de U ile R 'yi uzlaştırmanın yolu, kuantum fiziğinin bugün var olandan daha iyi bir formülasyonunu bulmaktan geçiyor. Belki de hem U 'yu hem de R 'yi limit durumları olarak içeren tek bir matematiksel formülasyon bulunabilir. Günümüzde bu amaçla çalışmalar yapan bazı araştırmacılar olsa da fizikçilerin çoğu kuantum teorisinde bu tür temel değişikliklere ihtiyaç olmadığını, böyle bir çabanın başarıya ulaşamayacağını düşünüyor. Bu durumun nedeni, doğal olarak, kuantum teorisinin bugünkü formülasyonunun deneysel verileri tahmin etmedeki büyük başarısı. Eğer kuantum teorisinin daha iyi bir formülasyonunu bulmak gerçekten mümkünse bile, bugünkü formülasyonun da çok başarılı olduğunu kabul etmek ve gelecekte bir gün geliştirilebilecek o daha iyi kurama muhteşem bir yaklaşım olarak görmek gerekiyor. U ve R prosedürlerine kuantum teorisinin ontolojileri kısmında geri döneceğiz. Şimdilik paradokslardan bahsetmeye devam.

4.4 EPR Paradoksu

Albert Einstein dolanıklık, kuantum sıçramaları gibi kavramların ortaya çıkmasından sonra kuantum teorisini eleştirmeye başlamıştı. Bu eleştirilerde odaklandığı temel noktaysa gerçeklikti. Einstein'ın kuantum mekaniğinin olasılığa dayalı tahminler yapmasına bir itirazı yoktu. Sonuçta istatistiksel yöntemler klasik fizikte de önemli bir yer tutuyordu. Ancak kuantum teorisinin, klasik fizik gibi, “yerel gerçeklik” özelliğine sahip bir biçimde yeniden formüle edilmesi gerektiğini düşünüyordu. Einstein, bu düşüncesini desteklemek için, Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile birlikte yayımladığı bir makalede bugün EPR paradoksu olarak adlandırılan bir paradoks öne sürdü. Yerel gerçekliğin ne anlama geldiği ile Einstein ve arkadaşlarının kuantum teorisinin nasıl yeniden formüle edilmesi gerektiği hakkındaki düşüncelerini EPR paradoksu üzerinden ele alalım.

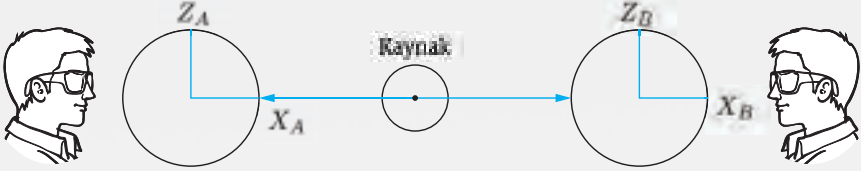


Şekil 4.6: EPR paradoksunun Bohm versiyonunda spinleri birbirine dolanık iki parçacık zıt yönlerde birbirinden uzaklaşır. Kuantum mekaniğine göre bir parçacık üzerinde yapılan spin ölçümü, diğer parçacığın spin durumunun da anlık olarak çökmesine yol açar. Paradoks, fiziksel özelliklerin gerçekliğini sorgular.

EPR paradoksunun David Bohm tarafından geliştirilmiş bir versiyonunda düşünce deneyi özetle şöyle ilerler: İki elektrondan oluşan spin durumu $(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ olan bir sistem hazırlanır. Önce toplam spinleri 0 ve spin durumları birbirine dolanık olan bu iki elektron zıt yönlerde yol alarak birbirinden uzaklaşır. Daha sonra elektronlardan birinin, diyelim ki birincisinin spinini ölçülür (bkz. Şekil 4.6). Durumu kuantum mekaniği açısından ele alalım. Ölçümden önce, iki elektronun spin durumu birbirine dolanık olduğu için, parçacığın belirli bir spinini yoktur. Ancak ölçüm, parçacığın spininin ya $|\uparrow\rangle$ ya da $|\downarrow\rangle$ durumuna çökmesine yol açar. Her ne kadar ölçümden önce belirli bir spin yoksa da ölçümden sonra spin belirli hâle gelir. Başka bir deyişle ölçüm, parçacığa bir özellik kazandırmıştır. Daha da önemlisi, birinci parçacık üzerinde yapılan ölçüm sadece birinci parçacığın değil ikinci elektronun da spin durumunun çökmesine yol açar. Eğer birinci elektronun spininin $|\uparrow\rangle$ olduğu bulunmuşsa ikinci elektronun spininin $|\downarrow\rangle$ durumuna, birinci elektronun spininin $|\downarrow\rangle$ olduğu bulunmuşsa ikinci elektronun spininin $|\uparrow\rangle$ durumuna çöktüğü kesindir. Elektronların biri üzerinde yapılan ölçüm sadece o elektronun değil çok uzaktaki başka bir elektronun da anlık olarak bir özellik kazanmasına yol açmıştır. Artık ikinci elektronun spinini üzerinde yapılacak bir ölçümün vereceği sonuç olasılığa dayalı değil kesindir (Her iki spin ölçümünün de aynı yönde yapıldığını varsayıyoruz.). Şimdi de ikinci parçacığın da spininin ölçüldüğünü ve bu ölçümün herhangi bir klasik sinyalle birinci parçacık üzerinde ölçüm yapıldığı bilgisinin ikinci parçacığın spininin ölçüldüğü noktaya ulaşamayacağı bir zamanda yapıldığını düşünelim. Bu durumu iki

ayrı ölçüm noktasına yakın iki ayrı gözlemci açısından ele alalım (*bkz.* Şekil 4.7). Birinci elektrona yakın olan gözlemci önce kendine yakın olan elektron üzerinde yapılan ölçümü gözlemler, uzun bir süre sonraysa ikinci elektron üzerinde de bir ölçüm yapıldığını öğrenir. Diğer ölçümün sonucunun kendi gözlemlediği ölçümünün tersi olduğunu öğrendiğinde şaşırır. Bu gözlemciye göre birinci elektron üzerinde yapılan ölçüm zamansal olarak ikinci elektron üzerinde yapılan ölçümden önce gelir. Birinci elektron üzerinde yapılan ölçümün sebep olduğu kuantum sıçraması her iki elektronun da spin durumunu belirlemiştir. Dolayısıyla ikinci elektron üzerinde yapılan ölçümün verdiği sonuç zaten birinci elektron üzerinde yapılan ölçüm tarafından önceden belirlenmiştir. İki ölçüm sonucu arasında bir sebep-sonuç ilişkisi vardır. Birinci elektron üzerinde yapılan ölçümde elde edilen sonuç, ikinci elektron üzerinde yapılan ölçümde elde edilen sonucun sebebidir. İkinci elektrona yakın olan gözlemciye olaylara farklı bir biçimde tanık olur. Bu gözlemci önce ikinci elektron üzerinde yapılan ölçümü gözlemler, uzun bir süre sonra birinci elektron üzerinde bir ölçüm yapıldığını öğrenir. Diğer ölçümün sonucunun kendi gözlemlediği ölçümünün tersi olduğunu öğrendiğinde şaşırır. Bu gözlemciye göre ikinci elektron üzerinde yapılan ölçüm zamansal olarak birinci elektron üzerinde yapılan ölçümden önce gelir. İkinci elektron üzerinde yapılan ölçümün sebep olduğu kuantum sıçraması her iki elektronun da spin durumunu belirlemiştir. Dolayısıyla birinci elektron üzerinde yapılan ölçümün verdiği sonuç zaten ikinci elektron üzerinde yapılan ölçüm tarafından önceden belirlenmiştir. İki ölçüm sonucu arasında bir sebep-sonuç ilişkisi vardır. İkinci elektron üzerinde yapılan ölçümde elde edilen sonuç, birinci elektron üzerinde yapılan ölçümde elde edilen sonucun sebebidir. Kısacası aynı fiziksel olaylar farklı referans sistemlerinde gözlemlendiğinde sebep ile sonuç yer değiştirmektedir ki bu durum sebebin zamansal olarak sonuçtan önce gelmesi gerektiğini söyleyen “nedensellik” ilkesiyle çelişir.

Bu düşünce deneyinde nedensellikle çelişen bir durumun ortaya çıkmasının sebebi, bir ölçümün uzayın uzak bir bölgesindeki parçacığın kuantum durumunu anlık olarak etkilemesidir. Özel görelilik kuramı, etkileşimlerin “yerel” olduğunu ve uzayda sonlu bir hızla yayıldıklarını söyler. Uzayın bir bölgesinde meydana gelen bir olay anlık olarak uzayın başka bir bölgesinde meydana gelen başka bir olayı etkileyemez. Bu düşünce deneyinde de iki ölçüm “uzaysal olarak birbirinden ayrıdır, biri diğerinin geçmişinde ya da geleceğinde değildir”. Dolayısıyla etkileşimlerin yerel olduğunu söyleyen, özel görelilik kuramına göre bir parçacık üzerinde yapılan ölçüm uzayın uzak bir bölgesindeki diğer parçacığı etkilememelidir.

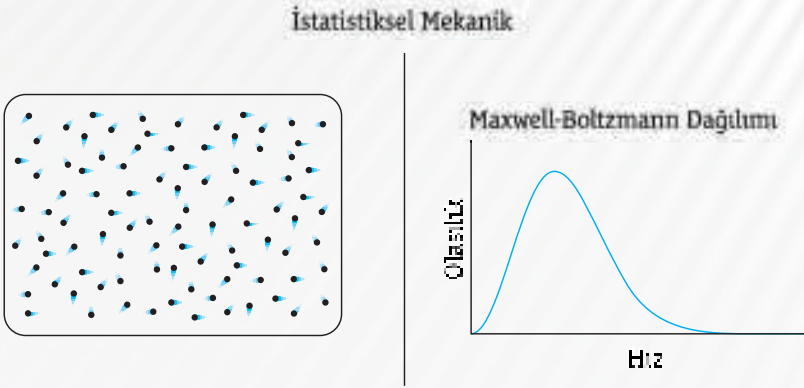


Şekil 4.7: EPR deneyi nedensellik ilkesiyle çelişir. Aralarında sebep-sonuç ilişkisi olan iki ölçümün zaman sıralaması farklı ölçüm noktalarına yakın gözlemciler açısından aynı değildir.

Einstein ve arkadaşlarının EPR paradoksunda odakladıkları asıl noktaysa “parçacıkların fiziksel özelliklerinin gerçekliği”, başka bir deyişle “parçacıkların üzerlerinde yapılan ölçümlerden bağımsız olarak belirli fiziksel özelliklere sahip olmasıydı”. Kuantum teorisi; EPR deneyinde dolanık hâldeki parçacıkların belirli özelliklerinin olmadığını, parçacıkların ölçüm yapıp dolanıklığın çözülmesiyle birbirinden bağımsız hâle geldiğini ve belirli özellikler kazandığını söylüyordu. Üstelik bir parçacık üzerinde yapılan bir ölçüm diğer parçacığın da belirli bir özellik kazanmasına yol açıyordu. Bir ölçüm sonucunun ölçüm cihazıyla parçacık arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olduğu söylenebilir. Ancak bir ölçüm cihazı etkileşemeyeceği kadar uzak bir parçacığın durumunu nasıl belirleyebilirdi? Einstein, Podolsky ve Rosen bu durum için makalelerinde “Gerçekliğin hiçbir mantıklı tanımı böyle bir şeye izin vermez.” diye yazmıştı. Araştırmacıların EPR paradoksunu öne sürerek vardığı sonuç, bir ölçüm cihazı etkileşmediği bir parçacığın bir özellik kazanmasına sebep olamayacağına göre, parçacıklarının ölçülen özelliklerinin tıpkı klasik fizikte olduğu gibi üzerlerinde yapılan ölçümden bağımsız olduğu yani gerçek olduğuydu. Einstein ve arkadaşları kuantum teorisinde eksiklikler olduğunu, kuantum teorisinin yerel gerçeklik özelliğine sahip olacak biçimde yeniden formüle edilmesi gerektiğini düşünüyorlardı. Peki ama nasıl?

Einstein, Podolsky ve Rosen kuantum teorisinin yerel gerçeklikle çelişmesinin nedeninin kuramda yer almayan “gizli değişkenler” olduğunu düşünüyorlardı. Gizli değişkenlerle kastedilenin ne olduğunu klasik istatistiksel mekanik üzerinden ele alalım. İstatistiksel mekanik çok sayıda parçacık içeren sistemlerin toplu özellikleriyle

ilgili fizik dalıdır. Bir sistemin durumunu tanımlamak için basınç, sıcaklık gibi istatistiksel değişkenler kullanılır. Kuramsal hesaplar bu istatistiksel değişkenlerin ortalama değerlerini tahmin eder ancak belirli bir anda yapılacak belirli bir ölçümün ne sonuç vereceğini kesin olarak söyleyemez. Örneğin kapalı bir hacmin içindeki bir gazın kabın duvarlarına uyguladığı basınç, kabın duvarlarına çarpan gaz taneciklerinin momentumlarına ve çarpma yönlerine bağlı olarak sürekli değişir. Eğer sistemin içerdiği tüm gaz taneciklerinin konumlarını ve momentumlarını bilmek mümkün olsaydı, gazın, kabın duvarlarına uyguladığı basıncın anlık değerini klasik mekanik kullanarak hesaplamak mümkün olurdu. Ancak bu bilgiye ulaşmak imkânsızdır. İstatistiksel mekanik kullanılarak yapılan hesaplarla anlık olarak değişen değerlerin ortalamasını verir. Sistem üzerinde yapılacak ölçümlerin vereceği sonuçlar, bu ortalama değer etrafında salınır. Söz konusu istatistiksel mekanik olduğunda bir sistemi oluşturan parçacıkların konumları ve momentumları gizli değişkenlerdir (bkz. Şekil 4.8). Kendileri kuramda yer almaz ancak ölçümlerin vereceği sonuçları belirleyen onlardır. Einstein, Podolsky ve Rosen kuantum mekaniğinin yerel gerçeklik ile çelişmesinin nedeninin kuramda yer almayan gizli değişkenler olduğunu düşünüyordu.



Şekil 4.8: Klasik istatistiksel mekanikte parçacıkların konumları ve momentumları gizli değişkenlerdir. Kendileri kuramda yer almasa da ölçüm sonuçlarının kesin değerini belirleyen onlardır. Isıl dengeye sahip bir sistemdeki parçacıkların hız dağılımı Maxwell-Boltzmann dağılımına uyar.

İlerleyen yıllarda Bohm, kuantum mekaniğini “yeniden yorumlayarak” bir gizli değişkenler teorisi geliştirecekti. Bohm’un kuramında dalga fonksiyonu, ölçüm sonuçları hakkında bilgi vermenin yanı sıra kuantum mekaniğine özgü bir kuvvetin kaynağıdır. Bu kuvvetin varlığı, kuantum mekaniğinin standart formülasyonunda parçacıkların potansiyel enerji engellerini sanal momentumla tünelleyerek geçmesi gibi mantığa aykırı gelen durumları daha anlaşılır bir biçimde açıklar. Ancak bu teori tam olarak Einstein ve arkadaşlarının hayal ettiği gibi değildi.

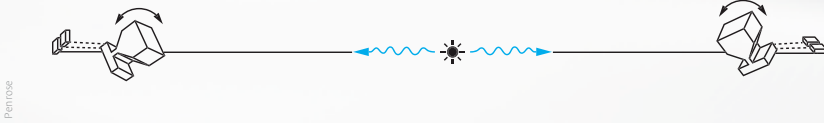
Bohm’un teorisine göre gizli değişkenler sistemdeki parçacıkların konumları ve momentumlarıdır. Bohm’un teorisi gerçeklik özelliğine sahiptir: Parçacıklar, üzerlerinde yapılan ölçümlerden bağımsız olarak belirli özelliklere sahiptir. Kuantum teorisinin olasılığa dayalı tahminler yapmasının nedeniyse parçacıkların konumlarını ve momentumlarını belirlemenin imkânsızlığından kaynaklanır. Bohm’un teorisinin “eksikliği” ise yerellekleme çelişmesidir. Bu çelişki, kuantum mekaniğine özgü kuvvetin kaynağı olan dalga fonksiyonunun parçacıkların aralarındaki mesafe ne olursa olsun anlık olarak etkileşmesine izin vermesinden kaynaklanır.

4.5 Bell Teoremi

John Steward Bell, 1950’lerde kuantum mekaniğinin klasik mekanik gibi yerel gerçeklik özelliğine sahip bir biçimde yeniden formüle edilmesinin mümkün olup olmadığı konusunu ele aldı. Yaptığı çalışmalar bugün kendi adıyla anılan, kimilerine göre “tüm zamanların en derin anlamlara sahip teoreminin” geliştirilmesiyle sonuçlandı.

Bell şöyle bir EPR deneyi (bkz. Şekil 4.9) hayal etti: Spinleri birbirine dolanık iki parçacık bir kaynaktan birbirine zıt yönlerde, diyelim ki bir ışık yılı kadar, uzaklaşır. Daha sonra iki parçacık üzerinde, bir parçacık üzerinde spin ölçümü yapıldığı bilgisinin hiçbir klasik sinyalle diğer parçacığa iletilemeyeceği zamanlarda, spin ölçümleri yapılır. Ayrıca spin ölçümlerinin hangi yönde yapılacağı önceden belli değildir. Birinci parçacık üzerindeki ölçümleri yapan deneyci, aralarında 90 derece bulunan iki ayrı yönden birini “kendi özgür iradesiyle” seçerek spin ölçümü yapar. Aynı durum ikinci ölçüm için de geçerlidir. Önemli bir nokta iki ayrı ölçümdeki yönlerin farklı olması ve aralarında belirli bir θ açısı bulunmasıdır (bkz. Şekil 4.10). Kuantum mekaniğine göre her iki ölçümün de muhtemel iki sonucu vardır: Parçacığın spini ölçüm yapılan yönde ya da bu yönün zıddı yöndedir. Ancak iki ayrı ölçümde kullanabilecek dört ayrı yön olduğu için farklı ölçümlerde elde edilecek sonuçlar

arasında birebir ilişki yoktur. Ölçüm sonuçlarının hangi olasılıkla birbiriyle uyumlu çıkacağı (her iki spinin de ölçüm yapılan yönde ya da bu yönün zıddı yönde çıkma olasılığı) θ açısına bağlı olarak değişir.

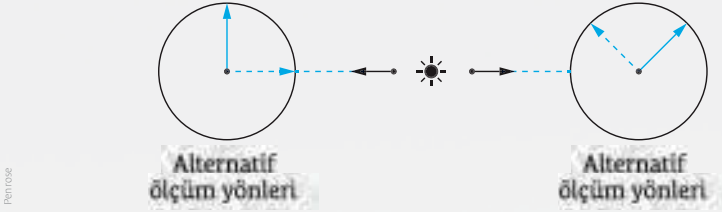


Şekil 4.9: Bell'in düşünce deneyinde spinleri birbirine dolanık ve toplam spinleri 0 olan bir çift parçacık zıt yönlerde birbirinden uzaklaştırılır. Daha sonra parçacıkların spinleri ölçülür. Spin ölçümlerinin hangi yönde yapılacağına deneyciler kendi özgür iradeleriyle karar verirler. İki ölçüm, özel görelilik kuramına göre uzaysal olarak birbirinden ayrıdır.

Bell makalesinde hem kuantum mekaniğinin doğru olması durumunda elde edilecek olasılıkları hem de parçacıkların ölçümden bağımsız spinlere (gerçek spinlere) sahip olması durumunda elde edilecek olasılıkları hesapladı ve bir eşitsizlik türetti. Yerel gerçeklik özelliğine sahip bir kuramın bu eşitsizlikleri sağlaması gerekir. Ancak kuantum mekaniği kullanılarak yapılan hesaplar eşitsizlikleri sağlamaz. Bell, makalesini kendi adıyla anılan teoremi ifade ederek sonlandırdı:

“İstatistiksel tahminleri değiştirmeden ölçümlerin sonuçlarını belirlemek amacıyla kuantum mekaniğine parametrelerin eklendiği bir kuramda, aralarında ne kadar mesafe olursa olsun bir ölçüm cihazının diğer ölçümün sonuçlarını etkileyebileceği bir mekanizma olmalıdır. Üstelik sinyal anlık olarak yol almalıdır dolayısıyla böyle bir kuram Lorentz değişimsiz [özel görelilik kuramı ile uyumlu] olamaz. Ancak kuantum mekaniğinin tahminlerinin geçerliliği sınırlıysa durum değişir.”

Kısacası Bell teoremi, kuantum mekaniğinin tüm sonuçlarının yerel gerçeklik özelliğine sahip bir kuramla elde edilemeyeceğini söyler. Eğer kuantum mekaniğinin tahminleri doğruysa gelecekte kuantum mekaniğinin yerini alabilecek daha gelişmiş bir kuram da yerel gerçeklik özelliğine sahip olamayacaktır. Bu durumda kuantum mekaniğinin herhangi bir yorumunda ya yerellikten ya gerçeklikten ya da her ikisinden de vazgeçilmesi gerekecektir.



Şekil 4.10: Bell teoremi deneylerinde spin ölçümleri için farklı yönler kullanılır. Bu durum, ölçüm sonuçları arasında birebir ilişki olmadığı anlamına gelir. Kuantum teorisi ölçüm sonuçlarının hangi derecede uyumlu ya da uyumsuz olacağı hakkında tahminler yapar.

Işık hızı saniyede 300.000 kilometre olduğu için Bell eşitsizlikleriyle ilgili deneyleri yapmak zordur. Parçacıkların birbiriyle ışık hızıyla iletişim kuramaması için ya zaman ölçümleri çok hassas bir biçimde yapılmalı ya da ölçüm cihazları arasındaki mesafe büyük olmalıdır. Ayrıca ölçümleri yapan dedektörler de mükemmel değildir. Bugüne kadar yapılan Bell eşitsizlikleri deneylerinin hiçbiri tam anlamıyla kusursuz değil. Yine de aradan geçen 60 yılda Bell eşitsizliklerini test etmek için yapılan tüm deneylerin kuantum teorisinin tahminlerini doğrular ve dolayısıyla kuantum teorisinin klasik mekaniğe benzer biçimde yerel gerçeklik özelliğine sahip olacak bir şekilde yeniden formüle edilmesinin mümkün olmadığını gösterir nitelikte olduğunu belirtelim.

Bell eşitsizlikleri deneyleriyle ilgili sorgulanan ilginç noktalardan biri de “özgür irade” varsayımı. Bell deneyleri, iki deneycinin kendi özgür iradeleriyle ölçüm yapacakları yönleri seçmesi esasına dayanıyor. Ancak özgür irade nedir, özgür irade diye bir şey var mıdır? Kuantum mekaniğini determinist bir biçimde yeniden formüle etmeye çalışan Gerard 't Hooft özgür irade diye bir şey olmadığını düşünüyor. “Kuantum Mekaniğinde Özgür İrade Varsayımı” başlıklı ifadesinde bu konu hakkında şu ifadeleri kullanıyor:

“Kendi irademizle üzerinde ölçüm yaptığımız parçacıkları etkilemeden cihazların kurulumunu değiştirebilir miyiz? Etrafımızdaki mikroskobik değişkenleri ve özellikle de incelemek istediğimiz parçacığı etkilemeden spinin z bileşenini ölçmekten cayıp x bileşenini ölçmeye karar verebilir miyiz? Makinelerimizi ve kendi karar verme sürecimizi makroskobik cihazlarla -örneğin yörüngelerinde hareket eden gezegenlerle-

değiştirdiğimizi varsayalım. Merkür, Plüton üzerinde ‘ölçüm yaparken’ kendi iradesiyle ve Plüton’un hareketini etkilemeden yörüngesindeki konumunu değiştirebilir mi? Tabii ki hayır. Merkür’ün yörüngesindeki konumunu değiştirdiğinin hayal edilebilmesi için -Plüton’un hareketi de dâhil olmak üzere- gezegenler sisteminin bütün geçmişi de değiştirilebilmelidir. Kısacası geçmiş ve tabii ki geleceği değiştirmeden bugünü değiştiremezsiniz. Sadece ölçüm cihazlarının bugünkü kurulumunu değiştirecek şekilde geçmiş değiştirilebilir mi? Bize yaklaşan parçacıkların dalga fonksiyonlarını değiştirmeden ölçüm cihazlarında değişiklik yapabilir miyiz? (...) ‘Özgür irade’, yani geçmişimizi değiştirmeden davranışlarımızı değiştirmek, imkânsızdır.”

4.6 Schrödinger’in Kedisi

Schrödinger’in kedisi, Erwin Schrödinger tarafından öne sürülmüş süperpozisyon durumları ve ölçüm paradoksuyla ilgili bir düşünce deneyidir.

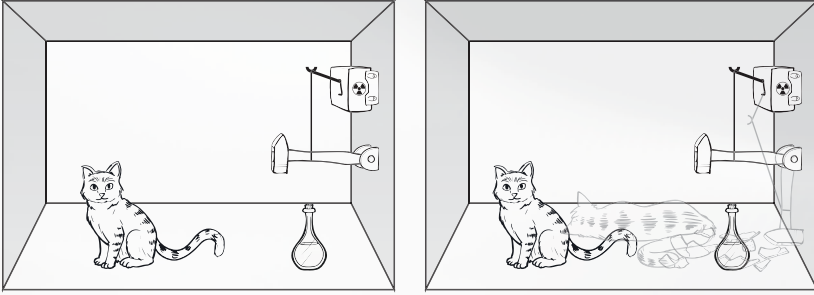
Schrödinger ve Einstein, EPR makalesinden sonra aralarında mektuplaşıyorlardı. Mektupların birinde Einstein, kuantum mekaniğine göre “kararsız hâldeki bir barut fiçisinin bir süre sonra patlamış ve patlamamış durumların bir süperpozisyonunda olacağını” yazmıştı. Schrödinger, Einstein’ın örneğini geliştirerek bugün kendi adıyla anılan düşünce deneyini öne sürdü. Schrödinger’in kendi ifadeleriyle düşünce deneyi şöyledir:

“Birisi tamamen gülünç durumlar bile tasarlayabilir. Bir kedi şu iğrenç cihazla birlikte (Kedinin cihaza doğrudan müdahalesine karşı önlem alınmış olmalıdır.) bir çelik haznenin içine konmuştur: Bir Geiger sayacının içinde çok düşük miktarda radyoaktif madde vardır. Madde miktarı o kadar azdır ki bir saat içinde belki bir atom bozunacaktır, belki de, eşit olasılıkla hiçbir atom bozunmayacaktır. Eğer bozunma gerçekleşirse sayaç tüpünde ortaya çıkan akım, içinde hidrosiyanik asit bulunan bir deney tüpünü parçalayacak bir balyozun serbest kalmasına yol açacaktır. Eğer biri bu sistemi bir saat boyunca kendi hâline bırakırsa kendi kendine şöyle derdi: Arada geçen zamanda hiçbir atom bozunmamışsa kedi hâlâ canlıdır. Tek bir atom bile bozunmuşsa kedi zehirlenmiştir. Tüm sistemin psi-fonksiyonu [dalga fonksiyonu] bu

durumu canlı kedi ve ölü kedinin (ifadeyi bağışlayın) eşit oranlarda karışımı ya da dağılımı olarak ifade ederdi. Bu orijinalinde atomlarla sınırlandırılmış belirsizliklerin duyularla gözlemlenebilir ve daha sonra doğrudan gözlemlerle çözümlenen bir belirsizliğe dönüştüğü durumların bir karakteristiğidir. Bu bizi 'bulanık bir modeli', safça, gerçekliğin bir temsili olarak kabul etmekten alıkoyar.”

Özetle Schrödinger'in düşünce deneyinde, içerisinde bir kedi ve öldürücü bir mekanizma bulunan kapalı bir sistem vardır (bkz. Şekil 4.11). Öldürücü mekanizmanın harekete geçmesiye olasılığa bağlıdır. Bir süre sonra kapalı sistem açıldığında, öldürücü mekanizmanın harekete geçmiş ya da geçmemiş olmasına bağlı olarak kedi ölü ya da diri olarak bulunur. Sorunlu olansa kuantum teorisinin deneyin başlangıcıyla sonu arasındaki süreci nasıl tanımladığıdır. Dalga fonksiyonunun gelişimini ifade eden **U** prosedürünü takip ettiğimizde bir süre sonra kedinin canlı ve ölü durumlarının bir süperpozisyonunda olduğunu hesaplarız. Düşünce deneyi kuantum teorisinin ifade ettiği bu ve benzeri süperpozisyon durumlarıyla günlük hayatta karşımıza çıkan klasik gerçeklik arasındaki ilişkiyi sorgular. Schrödinger, bir kedinin aynı anda hem ölü hem de diri olması gibi, günlük hayatımız açısından absürt durumları ifade edebilen dalga fonksiyonlarının fiziksel gerçekliğin temsili olamayacağını söyler.

Schrödinger'in düşünce deneyinin aslında ölçüm paradoksuyla ilgili olduğu söylenebilir. **U** prosedürünü takip ederek hesaplanan dalga fonksiyonuyla deney sonundaki gözlemin tespit ettiği dalga fonksiyonu farklıdır. Bu durum dalga fonksiyonunun çökmesi prosedürü yani **R** prosedürüyle ilgili şöyle sorular da akla getirir: Dalga fonksiyonunun çökmesi ne zaman ve nasıl gerçekleşir? Başka bir deyişle kuantum sistemdeki süperpozisyonların yok olması ve sistemin klasikleşmesi ne zaman ve nasıl gerçekleşir? Dalga fonksiyonunun çökmesi anlık olarak meydana gelen bir kuantum sıçraması mıdır yoksa dalga fonksiyonu -örneğin çevreyle yaşanan etkileşimler sonucunda- yavaş yavaş mı çöker? Eğer dalga fonksiyonunun indirgenmesi anlık bir kuantum sıçramasıysa kedi çelik hazne açılana kadar süperpozisyon durumunda kalmaya devam mı eder yoksa hazne açıldığında sistem çoktan klasikleşmiştir de biz sadece sistem hakkındaki bilgilerimizi mi güncelleriz? Her şeyin ötesinde **R** prosedürü bir fiziksel gerçekliğe mi karşılık gelir yoksa dalga fonksiyonunun çökmesi aslında hiç gerçekleşmeyen bir yanılsama mıdır? Bu ve benzeri sorulara kuantum teorisinin farklı yorumları farklı cevaplar verir. Schrödinger'in düşünce deneyiye sıklıkla kuantum mekaniğinin ontolojilerini birbiriyle karşılaştırmak, farklı ontolojilerin güçlü ve zayıf yönlerine dikkat çekmek için kullanılır.



Şekil 4.11: Schrödinger'in kedisi adlı düşünce deneyinin başlangıcında canlı bir kedi, içinde radyoaktif madde bulunan bir Geiger sayacı, içi zehir dolu bir şişe, şişeyi parçalayabilecek bir balyoz ve balyozu hareket geçirebilecek bir mekanizma vardır. Öldürücü mekanizmanın harekete geçip geçmeyeceği, Geiger sayacının radyoaktif bozunma tespit edip etmemesine bağlıdır (solda). Schrödinger denklemi, kedinin bir süre sonra ölü ve diri durumlarının bir süperpozisyonunda olacağını söyler (sağda).

4.7 Kuantum Mekanikinin Ontolojileri

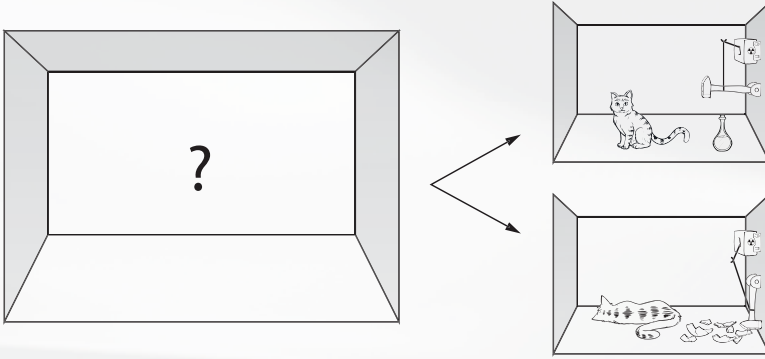
Kuantum mekaniği bize gerçeklik hakkında ne söyler? Dalga fonksiyonu gerçek midir? Dinamik değişkenler gerçek midir? U ve R prosedürleri fiziksel gerçekliği mi temsil eder? Kuantum mekaniğinin farklı yorumları bu ve benzeri sorulara farklı yanıtlar verir. Literatürde farklı isimlerle anılan çok sayıda düşünceye rastlamak mümkün. Burada kuantum teorisinin “geleneksel ontolojileri” olarak sınıflandırılabilir iki yoruma odaklanacağız. Bunlardan birincisi kuantum mekaniğinin gelişmeye başladığı dönemlerde, öncülüğünü Niels Bohr'un yaptığı bir grup fizikçi tarafından öne sürülen ve bugün kuantum mekaniğinin en yaygın kabul gören yorumu olan “Kopenhag yorumu”, ikincisiyse 1957 yılında Hugh Everett III tarafından ortaya konulan “paralel evrenler” hipotezi. Bu iki yorum, söz konusu gerçeklik olduğunda iki ayrı uçta yer alır.

Kopenhag yorumuna göre kuantum mekaniği gerçeklik hakkında “hiçbir şey söylemez”. Kuantum teorisi sadece deneylerde elde edilebilecek farklı sonuçların hangi olasılıklarla ortaya çıkacağını hesaplamaya yarayan matematiksel bir çerçevedir. Niels Bohr, dalga fonksiyonunun sadece deneyinin kuantum sistemi hakkındaki “bilgisini”

temsil ettiğini düşünürdü. Dolayısıyla **R** prosedürü ile temsil edilen dalga fonksiyonunun çökmesindeki “sıçrama” sadece deneycinin zihnindedir. Başka bir deyişle deneyci ölçüm yaparak sistem hakkındaki bilgisini artırır, sıçrama sistemin fiziğinde değil deneycinin bilgisindedir. Kopenhag yorumuna göre kuantum seviyesindeki hiçbir şeye gerçeklik atfedilmemelidir, gerçek olan sadece makroskobik ölçüm cihazlarında ortaya çıkan “klasik” gerçekliktir. Kopenhag yorumunun Eugene Wigner tarafından öne sürülmüş bir varyantıysa aşına olduğumuz “klasik dünyanın” makroskobik makinelerde değil gözlemcinin “bilincinde” ortaya çıktığını söyler.

Paralel evrenler hipoteziyse dalga fonksiyonunun gerçekliğin tam ifadesi olduğunu iddia eder. Bu hipoteze göre dalga fonksiyonunun çökmesi gerçek değildir. Dalga fonksiyonunun içerdiği tüm kuantum alternatifler süperpozisyon durumunda “var olmaya” devam eder. Bu devasa süperpozisyon durumu tüm evrenin dalga fonksiyonu tarafından tanımlanır. Bu görüşü savunanların düşüncesine göre deneycinin zihni de farklı kuantum durumlarının bir süperpozisyonundadır. Ölçüm sırasında farklı ölçüm sonuçlarına karşılık gelen alternatifler gözlemcinin farklı zihin durumlarıyla dolanık hâle gelir. Tüm sistemin dalga fonksiyonu farklı ölçüm sonuçlarını ve bu ölçüm sonuçlarını gözlemleyen deneycilerin kuantum durumlarının bir süperpozisyonudur. Bu görüşe göre süperpozisyondaki kuantum durumlarının her biri var olmaya devam eder ancak “ayrı evrenlerdedir”. Bu evrenlerin her birinde deneycinin farklı ölçüm sonuçlarını gözlemlemiş bir “kopyası” bulunur. Farklı evrenler arasında bir iletişim yoktur. Dolayısıyla deneycinin farklı evrenlerdeki kopyaları sadece tek bir sonucun ortaya çıktığını düşünür. Bu durum deneycinin dalga fonksiyonunun çöktüğü sanısına kapılmasına yol açar.

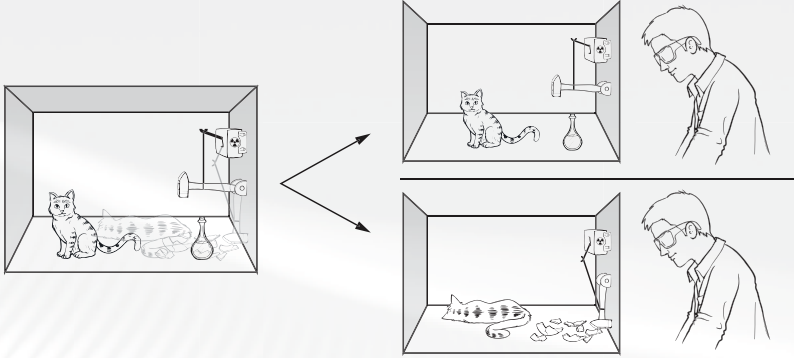
Kopenhag yorumu ve paralel evrenler hipotezi her ne kadar birbirlerine zıt görüşler olsa da bazı ortak noktaları da vardır. Her iki yorum da “gözlemlenen” gerçekliği açıklamak için bir gözlemcinin algısına ihtiyaç duyar. Her iki yorumda da dalga fonksiyonu bu gerçekliğe karşılık gelmez. Kopenhag yorumunda dalga fonksiyonu gözlemcinin algısının bir ürünüdür. Deneyci gözlemlerine uygun olarak zihninde bir dalga fonksiyonu oluşturur. Yeni deneyler yaptıkça zihnindeki dalga fonksiyonunu (bilgisini) sonuçlara uygun olarak günceller. Paralel evrenler hipotezindeyse dalga fonksiyonu tüm paralel evrenleri temsil eder. Gözlemlenen gerçeklik, dalga fonksiyonu tarafından temsil edilenin gözlemci tarafından algılanabilen bir “özetidir”. Her iki yorumda da dalga fonksiyonunun çökmesi, incelenen sistemdeki bir fiziksel gerçekliğe karşılık gelmez. Dalga fonksiyonunun çökmesi “zihinsel” bir durumdur.



Şekil 4.12: Niels Bohr’un Kopenhag yorumuna göre kutunun kapağı açılmadan önce kedinin durumu belirsizdir. Deneyci kutunun kapağını açıp kutunun içeri gözlemlediğinde kedinin durumu hakkındaki bilgisini günceller.

Schrödinger’in kedisini, Kopenhag yorumu ve paralel evrenler hipotezi açısından ele alalım. Kopenhag yorumuna göre dalga fonksiyonu olası sonuçları hesaplamak için kullanılan matematiksel bir araçtır. Bu aracı kullanarak yapılan hesaplarla muhtemel sonuçların ortaya çıkma olasılıklarını doğru biçimde tahmin eder. Dalga fonksiyonunun ölçümden önce kedinin ölü ve diri durumlarının bir süperpozisyonunda olduğunu ifade etmesinin fiziksel bir gerçekliği yoktur. Niels Bohr’a göre kutu açılıp kedinin ölü mü yoksa diri mi olduğuna bakılmadan önce kedinin durumu “belirsizdir”: Kedi ölü ya da diri olabilir (*bkz.* Şekil 4.12). Kopenhag yorumunun, Bohr ve arkadaşları tarafından geliştirilen “standart” versiyonunda ölçümün gerçekleşmesi ve dalga fonksiyonunun çökmesi için “bilinçli bir deneyci” gerekmez. “Davranışları klasik fizik yasalarına uyan herhangi bir nesne ‘ölçüm cihazı’, davranışları klasik fizik yasalarına uyan herhangi bir nesneyle etkileşim ise ‘ölçümdür’”. Ölçüm cihazları kuantum mekaniği yasalarına tabii değildir, üzerlerinde ölçüm yaptıkları parçacıklarla dolanık hâle gelmezler. Dolayısıyla kutudaki Geiger sayacı zaten ölçümü gerçekleştirerek klasik gerçekliği ortaya çıkarmıştır. Eğer sayaç bozunma tespit etmişse zehir yayılmış ve kedi ölmüştür eğer sayaç bozunma tespit etmemişse kedi hâlâ diridir. Gözlemci kutunun kapağını açtığında kedinin durumu hakkındaki bilgisini günceller. Bu açıklamayla ilgili eksikliklerden biri, her ne kadar doğru fiziksel sonucu verse de, sistemde ne olup bittiğine ve klasikliğin nasıl ortaya çıktığına bir açıklama getirmemesidir. Ayrıca Kopenhag yorumu, klasik dünya ile

kuantum dünyası arasına keyfi bir ayırım koyar. Protonlar, elektronlar gibi davranışları ancak kuantum mekaniğiyle açıklanabilen parçacıklardan oluşan ölçüm cihazı neden klasik olarak ele alınmalıdır, ölçüm cihazının içinde ne olmaktadır, ölçüm cihazı klasikliği nasıl ortaya çıkarmaktadır gibi sorulara cevap vermez.



Şekil 4.13: Kopenhag yorumunun Wigner varyantına göre gözlemci kutunun kapağını açana kadar kedi süperpozisyon durumunda kalmaya devam eder.

Kopenhag yorumunun ölçümün gerçekleşmesi için bilinçli bir canlının varlığını gerektiren varyantına göreysse Schrödinger'in kedisinin ölü ya da diri hâle gelmesi (Kedinin bilinçsiz olduğunu varsayıyoruz.) ancak gözlemci kutunun kapağını açtığı anda ve kediyi gözlemlediğinde gerçekleşir (bkz. Şekil 4.13). Kopenhag yorumunun bu varyantı daha çok eleştirilir. Örneğin Einstein'ın klasik gerçekliğin ortaya çıkması için bilinçli bir varlığın olması gerektiğini öne süren düşünceleri eleştirmek için "Birisini kafasını kaldırıp gökyüzüne bakmasaydı Ay yerinde olmayacak mıydı?" dediği söylenir. Roger Penrose da *The Road to Reality* kitabında bu konu hakkında şu ifadeleri kullanıyor:

"Bilinçli canlıların olmadığı, uzak, Dünya benzeri bir gezegen hayal edin. Herhangi bir yönde ışık yılları boyunca bilinçli bir canlı yoktur. Bu gezegendeki hava durumu neye benzer? Hava durumu örüntüleri, ortaya çıkacak örüntülerin daha önce olanların en ince ayrıntılarına bağlı olması bakımından, 'kaotik sistemler'dir. Gerçekten de, diyelim ki bir ay içinde, ufak kuantum etkileri o kadar büyüyebilir ki gezegendeki tüm hava

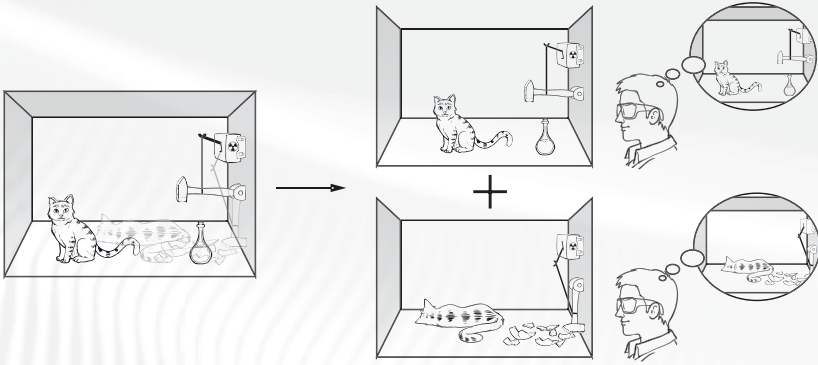
durumu onlara bağımlı hâle gelebilir. Böyle bir gezegen de bilincin yokluğu, [...], R'nin hiçbir zaman gerçekleşmeyeceğine işaret eder. Öyle ki hava durumu, gerçekte, bildiğimiz hava durumları gibi olmaması bakımından hakiki hava durumuna benzemez, sadece bir miktar kuantum süperpozisyon karmaşası olurdu. Fakat eğer bilinçli yolcular taşıyan bir uzay aracı ya da bilinçli bir varlığa sinyal gönderebilecek kapasitede bir sonda sensörlerini gezegene yöneltirse anında –ve yalnızca o anda—gezegenin havası sıradan bir hava olur ve sanki her daim sıradan hava olmuş gibidir. Bu durumla deneyimlerimiz arasında hakiki bir çelişki yoktur ancak bu 'Wigner gerçekliği' gerçek fiziksel bir evrenin davranışları için akla yatkın bir tasvir midir? Bana göre değil ama buna daha çok destek verenleri de (hemen hemen) anlayabilirim. ”

Paralel evrenler hipotezi, Schrödinger'in kedisi paradoksuna farklı bir yorum getirir (bkz. Şekil 4.14). Başlangıçta radyoaktif madde bozunmamış, Geiger sayacı bir ölçüm yapmamış, zehir açığa çıkmamış, kediye canlıdır. Önce radyoaktif madde, bozunmuş ve bozunmamış durumlarının bir süperpozisyonuna gelir. Daha sonra radyoaktif madde ve Geiger sayacının kuantum durumları birbirine dolanık hâle gelir, daha sonra da zehir dolu şişenin durumu dolanıklığın parçası olur... En sonunda gözlemci kutuyu açar ve gözlemcinin algı durumu da sistemin kuantum durumuyla dolanık hâle gelir. Özetle gözlemci kutuyu açtıktan sonra tüm sistemin kuantum durumu, a ve b karmaşık sayılar olmak üzere, şu şekildedir:

$$|\Psi\rangle = a \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{flask} \\ \text{Geiger} \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{flask} \\ \text{Geiger} \end{array} \right\rangle$$

Paralel evrenler hipotezi, süperpozisyonadaki her iki durumun da var olduğunu ve aralarında bir iletişim olmadığını söyler. Deneyin ortaya çıkardığı iki ayrı evrenden birinde canlı bir kedi, canlı kedinin çevresi ve o canlı kediyi algılamış bir gözlemci vardır. Deneyin ortaya çıkardığı iki ayrı evrenin diğerindeyse ölü bir kedi, ölü kedinin çevresi ve o ölü kediyi algılamış bir gözlemci vardır. Paralel evrenler hipotezine göre dalga fonksiyonunun çökmesi diye bir şey yoktur. İki ayrı evrendeki iki ayrı gözlemci ve kediler var olmaya, çevreleriyle etkileşmeye ve farklı alternatifleri barındıran yeni paralel evrenlere ayrılmaya devam eder. Paralel evrenler hipotezinin açıklama getirmediği noktalardan biri, neden ölü kedi ile canlı kedinin süperpozisyonunun (ya da makroskobik herhangi bir nesnenin farklı durumlarının süperpozisyonlarının)

“gözlemlediğimiz dünyada” ortaya çıkmadığıdır. Başka bir deyişle neden insan zihni ölü kedi ya da diri kedi algılamayı, ölü kedi ile diri kedinin süperpozisyonunu algılamaya “tercih eder”. Sadece matematiksel hesaplarla bu sorulara cevap bulunamaz. Bu ve benzeri sorulara cevap verebilmek için öncelikle “insan algılarının fiziksel bir teorisine” ihtiyaç var. Üstelik böyle bir teorinin sadece süperpozisyon durumlarının algılanamamasına değil kuantum teorisindeki olasılıkların hesaplanması kuralına (modülüsün karesi kuralına) da bir açıklama getirmesi gerekir. Şu an için böyle bir teori bulunmuyor.



Şekil 4.14: . Paralel evrenler hipotezine göre durum vektörünün indirgenmesi bir yanılsamadır. Ölü kedi, ölü kedinin çevresi ve ölü kedi gözlemleyen deneyci bir evrende; canlı kedi, canlı kedinin çevresi ve canlı kedi gözlemleyen deneyciyse başka bir evrende var olmaya devam eder.

Literatürde Kopenhag yorumu ve paralel evrenler hipotezi dışında da kuantum mekaniğinin ontolojileri üzerinde çeşitli düşüncelere rastlayabilirsiniz. “Tutarlı geçmişler”, “çevresel decoherence”, “pilot-dalga” hipotezi bunlardan bazıları. Konuya ilgi duyuyorsanız ve matematiğiniz fena değilse Roger Penrose’un kaynaklar kısmında referans verilen kitabını okumanızı öneririz.

Bölüm 5

Kuantum Teknolojileri

Kuantum mekaniği, geliştirilmeye başlanmasının üzerinden geçen yüz yılda pek çok fiziksel olguyu başarıyla açıkladı. Ortaya çıkan büyük bilgi birikimi doğal olarak yeni teknolojilerin geliştirilmesinde de yararlı oluyor. Hatta 20. yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin en az yarısının kuantum mekaniği bilgileri sayesinde mümkün olduğu söylenir. Bu kısımda hâlen bilimsel çalışmalara konu olan ve kuantum mekaniğinin günlük hayatta aşına olmadığımız süperpozisyon, dolanıklık gibi sıra dışı özelliklerinin nasıl pratik amaçlar için yararlı teknolojilerde kullanılabileceğini örneklendiren iki teknolojiye değineceğiz: kuantum bilgisayarlar ve kuantum kriptografi.

5.1 Kuantum Bilgisayarlar

Kuantum bilgisayarlar, çalışma ilkeleri klasik fizikle değil kuantum fiziği ile açıklanan bilgisayarlardır. Kuantum bilgisayarları klasik bilgisayarlardan ayıran en temel fark, bilginin kodlandığı ve işlendiği birimlerdir.

Klasik bilgisayarlarda bilginin depolandığı ve işlendiği birimler “bit” olarak adlandırılır. Bu isim “ikili rakam” anlamına gelen İngilizcedeki “binary digit” ifadesinden türetilmiş bir kısaltmadır. İsminden de anlaşılabileceği gibi bir bit iki ayrı değer alabilir. Bu değerler sıklıkla 0 ve 1 olarak ifade edilir. Klasik bilgisayarlarda tüm

Bitlerin değeri	Karşılık geldiği tam sayı
000	0
001	1
010	2
011	3
100	4
101	5
110	6
111	7

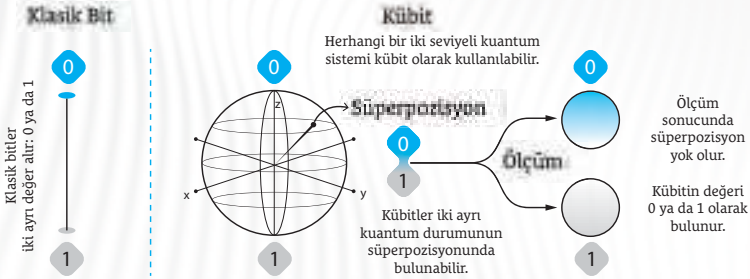
Tablo 5.1: Klasik bilgisayarda sayılar, harfler, semboller ve diğer tüm bilgiler 0 ve 1 değerini alabilen bitlerle kodlanır. Klasik bilgisayarlarda tam sayıları kodlamanın doğal yolu, sayıları ikilik tabanda ifade etmektir.

bilgiler bu iki değeri alabilen bitlerle kodlanır. Örneğin tam sayılarla yapılabilecek işlemleri ele alalım. Günlük hayatta sayıları onluk tabanda ifade etmeye alışığızdır ancak bitler sadece 0 ve 1 değerlerini alabildiği için bilgisayarda tam sayılarla işlem yapmanın doğal yolu, sayıları “ikilik tabanda” ifade etmektir. Örneğin bilgisayar sadece 3 bitle işlem yapabiliyorsa ifade edilebilecek tam sayıların sayısı, $2^3 = 8$ olduğu için, sekizle sınırlıdır: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. Üç bitin alabileceği bu sekiz ayrı değer, 0’dan 7’ye kadar olan tam sayıların ikilik tabandaki ifadeleriyle birebir eşleştirilebilir (bkz. Tablo 5.1). Örneğin 3 sayısı ikilik tabanda 11 olarak, 5 sayısı ise 101 olarak ifade edilir. Dolayısıyla üç bitle işlem yapan bir bilgisayarda 011, 3 sayısını; 101 ise 5 sayısını kodlamak için kullanılabilir. Negatif tam sayıları kodlamanın yoluysa bitlerden birini + ya da - işaretini ifade etmek için kullanmaktan geçer. Genellikle pozitif işareti kodlamak için 0, negatif işareti kodlamak içinse 1 kullanılır. Ondalıklı sayıların, harflerin, sembollerin, renklerin bitlerle kodlanmasıysa tam sayılarla kıyasla biraz daha karmaşıktır. Günlük hayatta kullandığımız depolama birimlerinin kapasitesini ifade etmek için genel olarak bayt birimi kullanılır. 1 bayt 8 bite eşittir. Örneğin 1 terabaytlık (10^{12} baytlık) bir harici disk 8×10^{12} biti hafızasında tutabilir.

Kuantum bilgisayarlarda bilginin depolandığı ve işlendiği birimler kübit olarak adlandırılır. Bu isim “kuantum bit” ifadesinin kısaltılmasıyla türetilmiştir. Kübitler, davranışları kuantum mekaniği ilkeleriyle açıklanan cihazlardır. Bir kübit genel olarak iki ayrı kuantum durumunun bir süperpozisyonunda bulunabilir. Örneğin klasik bilgisayarlardaki 0 ve 1 değerlerine karşılık gelen iki ayrı kuantum durumunu $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ ile ifade edersek bir kübit herhangi bir anda bu iki durumun bir

süperpozisyonunda olabilir (bkz. Şekil 5.1). Başka bir deyişle bir kübitin durumu genel olarak, a ve b iki karmaşık sayı olmak üzere, $a|0\rangle + b|1\rangle$ olarak ifade edilebilir. Kübit $a = 1, b = 0$ ise $|0\rangle$ durumunda; $a = 0, b = 1$ ise $|1\rangle$ durumundadır. Genel olarak a 'nın ve b 'nin sahip olabileceği sonsuz farklı değere karşılık gelen sonsuz farklı süperpozisyon durumu vardır (bkz. Şekil 5.2). Bu iki karmaşık sayının sağlaması gereken tek koşul normalizasyondur: $|a|^2 + |b|^2 = 1$.

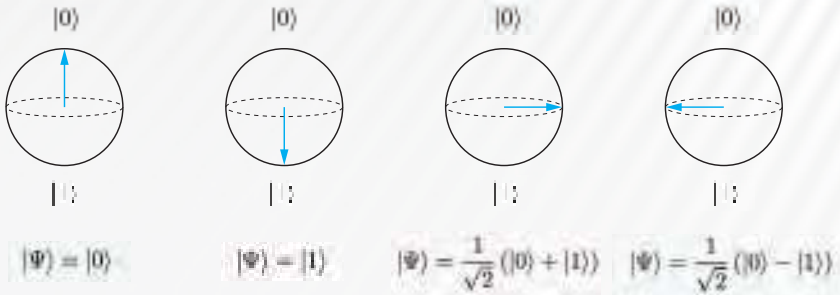
Davranışları kuantum mekaniğiyle açıklanan herhangi iki seviyeli sistem kübit olarak kullanılabilir. Örneğin elektronların spinleri, iki seviyeli kuantum sistemlerinin bir örneğidir. Bir elektronun spini ölçüldüğünde iki muhtemel sonuç vardır: Spin ya ölçüm yapılan yönde ($|\uparrow\rangle$) ya da ölçüm yapılan yönün zıddı yöndedir ($|\downarrow\rangle$). Bir elektronun herhangi bir andaki durumuysa bu iki sonucun herhangi bir süperpozisyonudur: $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$. Çok seviyeli sistemlerin de kübit olarak kullanılması mümkündür. Ancak işlemlerde yer almayacak seviyelerin sonuçları etkilemesine karşı önlem almak gerekir. Örneğin “iyon kapalı kuantum bilgisayarlarda” bilgi iyonların enerji seviyelerinde kodlanır. İyonun temel enerji seviyesi $|0\rangle$ durumunu, uyarılmış enerji seviyelerinden biri ise $|1\rangle$ durumunu ifade eder. Bu tür kuantum bilgisayarlarda atomların değil de iyonların tercih edilmesinin sebebi, elektrik yüklü olmaları nedeniyle daha kolay kontrol edilebilmeleridir.



Şekil 5.1: Klasik bitler sadece 0 ve 1 değerlerini alabilir (solda). Kuantum bitler (kübitler) ise süperpozisyon durumlarında da bulunabilir. Kübitler üzerinde yapılan ölçümler de ya 0 ya da 1 sonucunu verir. Ancak ölçüm sonuçları kesin olarak tahmin edilemez, olasılıksaldır.

Kübitlerin bitler ve dolayısıyla kuantum bilgisayarların klasik bilgisayar karşısındaki en önemli üstünlüğü, daha az sayıda birimde daha çok bilgi kodlayabilmeleri ve

işleyebilmeleridir. Örneğin kuantum bilgisayarın sadece 1 kübit içerdiğini varsayalım. Bu kübit herhangi bir anda $2^1 = 2$ ayrı durumun ($|0\rangle$ ve $|1\rangle$) bir süperpozisyonundadır: $a|0\rangle + b|1\rangle$. Kübitteki bilgiyi klasik bir bilgisayarda depolamak için iki karmaşık sayının bitlerde kodlanması gerekir. Bu noktada tek bir karmaşık sayının klasik bilgisayarda kodlanmasının çok sayıda bit gerektirdiğini unutmayalım. Eğer kuantum bilgisayar iki kübit içeriyorsa bu “iki kübitin kuantum durumu” $2^2 = 4$ ayrı kuantum durumunun ($|0\rangle|0\rangle$, $|0\rangle|1\rangle$, $|1\rangle|0\rangle$ ve $|1\rangle|1\rangle$) bir süperpozisyonudur: $a|0\rangle|0\rangle + b|0\rangle|1\rangle + c|1\rangle|0\rangle + d|1\rangle|1\rangle$. Bu iki kübitteki bilgiyi klasik bir bilgisayarda depolamak için dört karmaşık sayının bitlerde kodlanması gerekir. Eğer kuantum bilgisayar üç kübit içeriyorsa ... Genel olarak kuantum bilgisayar n tane kübit içeriyorsa bu n tane kübitin kuantum durumu 2^n ayrı kuantum durumunun bir süperpozisyonudur. Dolayısıyla n tane kübitte kodlanmış bir bilgiyi klasik bir bilgisayarda depolamak için 2^n tane karmaşık sayının bitlerde kodlanması gerekir. Örneğin 10 kübitten oluşan bir kuantum bilgisayarda kodlanmış bir bilgiyi klasik bir bilgisayarda depolamak için gerekli bitlerin sayısı milyonlar ölçeğindedir.



Şekil 5.2: Bir kübitin bulunabileceği çeşitli kuantum durumları

Daha az sayıda birimde daha fazla bilgi kodlayabilmeleri ve işleyebilmeleri kuantum bilgisayarların klasik bilgisayarlara kıyasla belirli görevleri çok daha hızlı bir biçimde yapabilmesine imkân tanır. Kuantum bilgisayarlar için geliştirilmiş, bu durumu örneklendiren algoritmaların başında Schor algoritması gelir.

5.1.1 Schor algoritması

Schor algoritması yarı asalların çarpanlarının bulunmasıyla ilgili bir algoritmadır. Asal sayılar 1'den ve kendisinden başka çarpanı olmayan pozitif tam sayılardır: 2, 3, 5, 7, 11, . . . gibi. Yarı asallar ise iki ayrı asal sayının çarpımı olarak ifade edilebilen sayılardır. Örneğin $15 = 3 \cdot 5$, $21 = 3 \cdot 7$ ve $77 = 7 \cdot 11$ yarı asal sayıların örneklerindendir.

Yarı asalların çarpanlarına ayrılması problemi, günümüzde özellikle internet güvenliği açısından önemlidir. İnternet üzerinden aktarılan gizli bilgileri şifrelemek için kullanılan algoritmaların başında gelen RSA algoritması yarı asalları çarpanlarına ayırıştırmanın zorluğuna dayanır. Ron Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman tarafından geliştirilmiş bu algoritmanın pratik uygulamalarında, alıcı gizli bilgilerin şifrelenmesi için kullanılmasını istediği “açık anahtar” hiçbir şifreleme olmadan internet üzerinden karşı tarafa iletir. Gönderici açık anahtar kullanarak şifreli bir metin oluşturur ve alıcıya iletir. Alıcı, başkalarından saklı tuttuğu “gizli anahtar” kullanarak şifreli metni çözer. Orijinal metni şifrelemek için kullanılan açık anahtar bir yarı asaldır. Şifreli metni çözmek için gerekli gizli anahtar elde etmek için yapılması gereken temel şeyse bu yarı asalı çarpanlarına ayırmaktır. Söz konusu 15, 21 gibi ufak yarı asallar olduğunda bunun çok zor bir problem olduğu söylenemez. Ancak klasik bilgisayarlarla bu problemi çözmek için kullanılabilecek verimli bir algoritma yoktur. Problemi çözmenin en basit yolu 2'den başlayarak bir çarpan bulana kadar tüm asal sayıların tek tek verilen yarı asalı bölüp bölmediğini kontrol etmektir. Söz konusu RSA algoritması uygulamalarında kullanılan yüzlerce basamaklı yarı asallar olduğunda günümüzün en güçlü klasik bilgisayarların bile asal çarpanları bulması yıllar sürer. Peter Shor'un 1994 yılında geliştirdiği bir algoritmayla kuantum bilgisayarların yarı asalları çarpanlara ayırmayı klasik bilgisayarlardan çok daha hızlı bir biçimde yapabileceğini gösteriyor. Günümüzdeki kuantum bilgisayarların kapasitesi yüzlerce basamaklı yarı asalları kısa sürede çarpanlarına ayırmak için yetersiz kalsa da 30 – 40 yıl içinde, bugün klasik bilgisayarların yüzlerce yılda bile çözemediği yarı asalları çarpanlarına ayırma problemlerini sadece saniyeler içinde çözebilecek kuantum bilgisayarların geliştirilebileceği öngörülüyor.

Shor algoritması özetle şöyledir:

1. Asal çarpanlarını bulmak istediğiniz n sayısından küçük bir x tam sayısı alın.

2. m bir tam sayı olmak üzere

$$x^p = m \cdot n + 1$$

ya da

$$x^p = 1 \pmod{n}$$

eşitliğini sağlayan p sayısını bulun.

3. Bu eşitlik

$$(x^{p/2} - 1)(x^{p/2} + 1) = m \cdot n$$

olarak yeniden ifade edilebilir. Dolayısıyla $(x^{p/2} - 1)$ ve $(x^{p/2} + 1)$ çarpanlarından biri ya da belki de ikisi n sayısının çarpanlarından “olabilir”.

Bu algoritma her durumda n yarı asalının çarpanlarından birini vermeyebilir. Birincisi, hesaplanan çarpanlar tam sayı olmayabilir. İkincisi, hesaplanan çarpanlardan biri aradığımız n sayısının tam katı olabilir. Böyle bir durumla karşılaştığında farklı bir x sayısı seçilerek hesapların tekrar edilmesi gerekir. Eninde sonunda n sayısının çarpanlarından birini ve sonra da kolaylıkla ikincisini hesaplamamızı sağlayacak bir x sayısı bulunacaktır.

Schor algoritmasındaki birinci ve üçüncü adımlar çok basittir. Söz konusu yüzlerce basamaklı yarı asalları çarpanlarına ayırmak olduğunda klasik bilgisayarlar ya da insan eliyle yapılacak hesaplar açısından zor olansa ikinci basamaktır.

İlk olarak Shor algoritmasının klasik bilgisayarlarda nasıl kullanılabileceğini küçük bir yarı asalın çarpanlarına ayrılması problemi üzerinden ele alalım. Çarpanlarını bulmaya çalıştığımız yarı asal 15, rastgele seçtiğimiz x sayısı ise 2 olsun. İkinci adımdaki eşitliği sağlayan p sayısını bulmak için $x = 2$ 'nin tam kuvvetlerini birinci kuvvetinden başlayarak sırayla hesaplarız:

$$2^1 = 0 \cdot 15 + 2 \rightarrow 2^1 = 2 \pmod{15}$$

$$2^2 = 0 \cdot 15 + 4 \rightarrow 2^2 = 4 \pmod{15}$$

$$2^3 = 0 \cdot 15 + 8 \rightarrow 2^3 = 8 \pmod{15}$$

$$2^4 = 1 \cdot 15 + 1 \rightarrow 2^4 = 1 \pmod{15}$$

Son eşitlikten görülebileceği gibi $p = 4$ sayısı ikinci basamaktaki eşitliği sağlar. Dolayısıyla üçüncü adama geçebiliriz. Bulduğumuz p sayısını kullanarak muhtemel iki çarpanı hesaplayalım:

$$x^{p/2} - 1 = x^{4/2} - 1 = 3$$

$$x^{p/2} + 1 = x^{4/2} + 1 = 5$$

Bulduğumuz iki sonucun her ikisi de 15 yarı asalının çarpanlarıdır. Eğer bulduğumuz sonuçlar tam sayı olmasaydı ya da sonuçlardan biri 15'in tam katı olsaydı farklı bir x sayısı seçerek hesapları tekrar etmemiz gerekcekti.

Klasik bir bilgisayarla Shor algoritmasını kullanarak p sayısını bulmak, özellikle de çarpanlarına ayrılacak sayı çok büyük olduğunda çok uzun sürer. Hatta söz konusu klasik bilgisayarlar olduğunda asal çarpanları bulmak için 1'den başlayarak tüm sayma sayılarını tek tek denemek bile Shor algoritmasından daha verimli bir yöntemdir.

Kuantum bilgisayarların Shor algoritmasının ikinci adımını nasıl gerçekleştirdiğini anlamak için önce modüler aritmetikle ilgili bir bilgiye ihtiyacımız var:

$$x^p = 1 \bmod n \text{ ve } x^q = k \bmod n \rightarrow x^{p+q} = k \bmod n$$

Dolayısıyla belirli x ve n değerleri için $x^p = 1 \bmod n$ eşitliğini sağlayan bir p sayısı bulmanın bir başka yolu, x sayısının kuvvetlerinin mod n 'deki değerlerinde herhangi bir k sayısının hangi sıklıkla ortaya çıktığını tespit etmektir. Örneğin $2^1, 2^5, 2^9, 2^{13}$ sayılarının tamamının mod 15'teki değeri 2'dir. Dolayısıyla aynı sonucu veren kuvvet değerleri arasındaki farkın 4 olmasına bakarak 2^4 'ün mod 15'teki değerinin 1 olduğu ve bulmaya çalıştığımız p sayısının da 4 olduğu sonucuna varabiliriz. Ancak söz konusu klasik bilgisayarlar olduğunda bu yöntemin de verimli olduğu söylenemez.

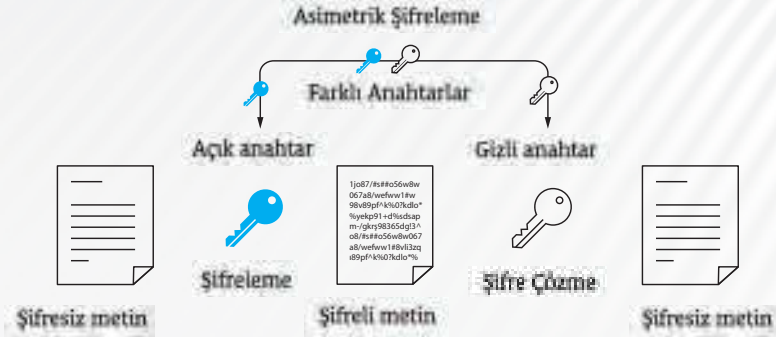
Kuantum bilgisayarların klasik bilgisayarlar karşısındaki avantajı, kuantum süperpozisyon ve kuantum dolanıklıktan yararlanarak çok sayıda hesaba eş zamanlı olarak yapabilmesidir. Bir kuantum bilgisayarla $x^p = 1 \bmod n$ eşitliğini sağlayan bir p sayısı bulmak için önce kubitler muhtemel tüm kuvvet değerlerinin (tüm q değerlerinin) bir süperpozisyonuna getirilir. Daha sonra $x^q = k \bmod n$ işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra kubitler muhtemel tüm sonuçların (tüm k değerlerinin) bir süperpozisyonunda olacaktır. Son olarak, aynı sonuçların tekrar etme sıklığını tespit etmek için "Fourier dönüşümü" adı verilen bir işlem gerçekleştirilir ve kubitler üzerinde ölçüm yapılır. Eğer başlangıçta seçilen x sayısı doğru sonuca ulaşmaya imkân vermezse başka bir x sayısı seçilerek işlemler tekrar edilir. Böylece tek seferde olmasa bile sadece birkaç denemede yarı asalların çarpanlarını bulmak mümkün olur.

Schor algoritması, kuantum bilgisayarların sadece yararlı amaçlar için değil zararlı amaçlar için de kullanılabileceğini gösterir. Gelecekte internet güvenliğini sağlamak

için kuantum bilgisayarlar karşısında bile dirençli yeni şifreleme yöntemlerine ihtiyaç olacak. Kuantum mekaniği bu ihtiyaca da karşılık verebilir.

5.2 Kuantum Kriptografi

Kriptografi en genel anlamıyla mesajları yetkisiz insanların anlayamayacağı biçimde şifreleme sanatıdır. Günümüzde kullanılan klasik kriptografi yöntemleri, şifreli mesajları çözmenin imkânsızlığına değil zorluğuna dayanır. Kuantum kriptografi yöntemlerinin mükemmel uygulamalarıysa yetkisiz insanlar tarafından çözülmesi mümkün olmayan şifreli metinlerin oluşturulmasına imkân verebilir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için ilk olarak klasik kriptografi sistemlerinin genel mantığından bahsedelim.

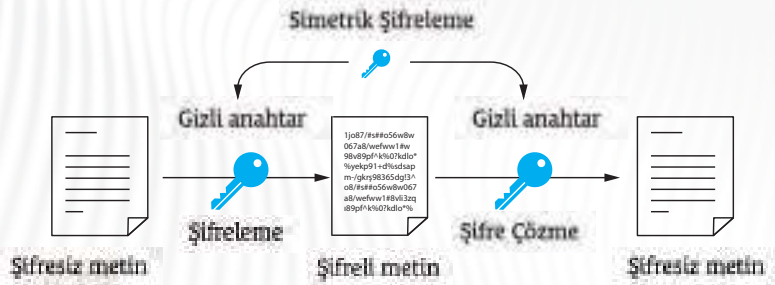


Şifreleme ve şifre çözme için farklı anahtarlar kullanılır.

Şekil 5.3: Asimetrik kriptografide bir metni şifrelemek ve şifrelenmiş metni çözmek için farklı anahtarlar kullanılır. Açık anahtar alıcı tarafından alenen göndericiye iletir. Herhangi birisinin açık anahtarı öğrenmesinde sakınca görülmez. Şifreli metinleri kolayca çözebilmek ancak alıcının herkesten sakladığı gizli anahtarın bilinmesiyle mümkündür.

Günümüzde internet güvenliğini sağlamak için kullanılan kriptografi yöntemleri, asimetrik ve simetrik yöntemler olarak ikiye ayrılır. Asimetrik sistemlerde, daha önce bahsettiğimiz RSA algoritmasında olduğu gibi, iki ayrı anahtar kullanılır (bkz. Şekil

5.3). Gönderilmek istenen mesaj, herkes tarafından bilinmesinde bir sakınca görülmeyen “açık anahtar” kullanılarak şifrelenir. Şifreli metnin çözülmesi içinse “gizli anahtar” kullanılır. Asimetrik sistemler hem tamamen güvenli değildir hem de karmaşık matematiksel işlemler içermeleri nedeniyle yavaştır. Simetrik sistemlerdeyse hem şifreleme hem de şifreyi çözme için aynı anahtar kullanılır (bkz. Şekil 5.4). Bu gruba giren algoritmaların başında “tek kullanımlık şifre” gelir. AT&T Laboratuvarlarında çalışan Gilbert Vernam tarafından öne sürülmüş bu algoritma tamamen güvenli olduğu kanıtlanmış tek kriptografi algoritmasıdır. Bu yöntemde gönderici ve alıcı mesajla “aynı uzunlukta” bir anahtar belirler. Şifreli metin, mesajdaki ve anahtardaki karşılıklı bitlerin birbiriyle toplanmasıyla oluşturulur. Alıcı açık metni elde etmek için şifreli metindeki bitlerden anahtardaki bitleri çıkarır. Anahtarın sadece alıcı ve gönderici tarafından bilinmesi ve bir anahtarın sadece bir kez kullanılması kaydıyla bu yöntem tamamen güvenlidir. Üstelik çok basit bir matematiksel işlem içerdiği için hızlıdır. Tek kullanımlık şifrenin uygulanması ile ilgili temel sorunsal şifreleme için kullanılacak anahtarın nasıl belirleneceğidir. Gönderici ve alıcının her iletişimden önce fiziksel olarak bir araya gelerek tek kullanımlık bir anahtar belirleyemeyecekleri açıktır. Şifreleme için kullanılacak anahtarın da internet üzerinden iletişim kurularak belirlenmesi gerekir.



Şifreleme ve şifre çözme için aynı anahtar kullanılır.

Şekil 5.4: Simetrik kriptografide bir metni şifrelemek ve şifreli metinleri çözmek için aynı anahtar kullanılır. Anahtarın sadece gönderici ve alıcı tarafından bilinmesi ve bir anahtarın sadece bir kez kullanılması kaydıyla bu sistem tamamen güvenlidir.

Günümüzde asimetrik kriptografi sistemlerinin temel işlevi, gönderilmek istenen mesajı şifrelemek için kullanılacak anahtarın oluşturulmasıdır. Gönderici ve alıcı, önce

asimetrik kriptografiyle iletişim kurarak bir anahtar belirler. Daha sonra bu anahtarı kullanarak simetrik kriptografi yoluyla iletişim kurarlar. Başlangıçta oluşturulan anahtar tek kullanımlıktır. Gönderici ve alıcı ilerleyen zamanlarda yeniden iletişim kurduklarında ilk olarak yeni bir anahtar belirler. Böylece mesajları dinleyen birisinin farklı tarihlerdeki mesajları karşılaştırarak şifrelemede kullanılan anahtarı ve dolayısıyla mesajları çözmesinin önüne geçilir. Ancak aktarılmak istenen metni şifrelemek için kullanılan anahtar asimetrik kriptografi yoluyla aktarıldığından bu sistemlerin güvenliği de doğal olarak asimetrik sistemleri kırmanın zorluğuna dayanır. Kuantum kriptografinin temel amacıysa şifreleme için kullanılacak anahtarın dağıtım sürecini mükemmelleştirmektir.

5.2.1 BB84 protokolü

Kuantum kriptografinin pratik uygulamalarıyla ilgili ilk protokol, Charles H. Bennett ve Gilles Brassard tarafından 1984'te geliştirildi. BB84 adıyla anılan bu protokol, kuantum kriptografi araştırmaları için hâlâ yaygın olarak kullanılıyor.

BB84 protokolünün genel mantığını, bit değerlerinin fotonların polarizasyon durumlarında (bkz. Şekil 5.5) kodlandığı bir sistem üzerinden açıklayalım. Bu protokolda bilgiyi kodlamak için iki ayrı baz kullanılır. Bu bazlardan birindeki polarizasyon durumlarını $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ sembolleriyle, diğindeki polarizasyon durumlarını da $|+\rangle$ ve $|-\rangle$ sembolleriyle gösterelim. İki ayrı bazdaki kuantum durumları arasındaki ilişki şudur:

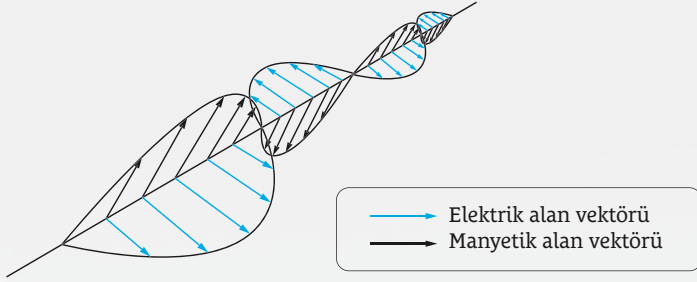
$$|+\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|-\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|0\rangle = \frac{|+\rangle + |-\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|1\rangle = \frac{|+\rangle - |-\rangle}{\sqrt{2}}$$

Bu polarizasyon durumlarından $|0\rangle$ ve $|+\rangle$ oluşturulacak anahtarda değeri “0” olan bitleri, $|1\rangle$ ve $|-\rangle$ ise oluşturulacak anahtarda değeri “1” olan bitleri kodlamak için kullanılabilir.



Şekil 5.5: Işık ışınları beraberinde elektrik ve manyetik alan taşır. Foton polarizasyonu elektrik ve manyetik alanların salınımıyla ilgilidir. Polarizasyonun doğrusal olması durumunda elektrik ve manyetik alanlar bir düzlemin içinde salınır.

BB84 protokolünün uygulanmasının ilk aşamasında bir “ham anahtar” oluşturmak amacıyla gönderici çok sayıda kübit hazırlayıp “tek tek” alıcıya gönderir. Gönderici iki ayrı bazdan birini seçer ve seçtiği bazdaki iki ayrı polarizasyon durumundan birinde bir kübit hazırlar. Ancak kübitin hangi bazda hazırlandığını gizli tutar. Alıcıysa rastgele seçtiği iki bazdan birinde kübit üzerinde ölçüm yapar. Eğer kübitin hazırlandığı ve ölçümün yapıldığı bazlar aynıysa alıcının bulduğu bit değeri göndericinin iletmek istediği bit değeriyle aynı olacaktır. Ancak kübitin hazırlandığı ve ölçümün yapıldığı bazlar farklıysa alıcının bulduğu ve göndericinin iletmek istediği bit değerleri aynı ya da farklı olabilir. Örneğin göndericinin 1 değerini iletmek amacıyla $|1\rangle$ durumunda bir kübit hazırladığı durumu düşünelim. Eğer alıcı polarizasyon ölçümünü $|0\rangle, |1\rangle$ bazında yapmayı seçerse gönderilmek istenen bit değerinin 1 olduğunu bulacağı kesindir. Ancak alıcı polarizasyon ölçümünü $|+\rangle, |-\rangle$ bazında yapmayı tercih ederse %50 olasılıkla fotonun polarizasyonunun $|+\rangle$ durumunda ve dolayısıyla gönderilmek istenen bit değerinin 0 olduğunu, %50 olasılıkla da fotonun polarizasyonunun $|-\rangle$ durumunda ve dolayısıyla gönderilmek istenen bit değerinin 1 olduğunu bulacaktır. Göndericinin ve alıcının hangi bazı seçtiğine bağlı olarak hangi sonuçların hangi olasılıkla ortaya çıkacağı aşağıdaki Tablo 5.2’de özetlendiği gibidir.

Protokolde iki ayrı baz kullanıldığı ve kuantum mekaniksel ölçümlerin sonuçları olasılığa dayalı olduğu için göndericinin iletmek istediği bit dizisiyle alıcının elde ettiği bit dizisi birbirinden farklı olacaktır. Alıcının %50 olasılıkla doğru bazı seçerek ölçüm

		Ölçüm $ 0\rangle, 1\rangle$ bazında yapılırsa		Ölçüm $ 0\rangle, 1\rangle$ bazında yapılırsa	
		$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ +\rangle$	$ -\rangle$
Kübit $ 0\rangle, 1\rangle$ bazında hazırlanır	$ 0\rangle$	1	0	0, 5	0, 5
	$ 1\rangle$	0	1	0, 5	0, 5
Kübit $ +\rangle, -\rangle$ bazında hazırlanır	$ +\rangle$	0, 5	0, 5	1	0
	$ -\rangle$	0, 5	0, 5	0	1

Tablo 5.2: Kübitin hazırlandığı ve ölçümün yapıldığı baza bağlı olarak çeşitli sonuçların ortaya çıkma olasılıkları

yapacağı düşünülürse birinci aşama tamamlandığında göndericinin ve alıcının elindeki ham anahtarlar arasında %25 uyumsuzluk olacaktır.

BB84 protokolünün ikinci aşamasında gönderici ve alıcı bit dizileri arasındaki uyumsuzluğu giderir. Gönderici aktardığı tüm bitleri hangi bazlarda hazırladığını, alıcıysa ölçümleri hangi bazlarda yaptığını tek tek açıklar. Bu sırada gönderilen bit değerleri elbette gizli tutulur. Kullanılan bazların farklı olduğu bitler atılır. Bu aşama sonunda ham anahtardan geriye kalan bit dizisine “elenmiş anahtar” denir. Alıcının doğru bazı seçme olasılığı %50 olduğu için elenmiş anahtarın uzunluğu ham anahtarının yarısı kadar olacaktır. Eğer veri aktarımı sırasında hiçbir dış müdahale olmamış, birisi aktarılan bilgileri ele geçirmeye çalışmamışsa bu aşamanın sonunda gönderici ve alıcının elindeki anahtarlar aynı olmalıdır. Ancak veri aktarımına bir dış müdahale olmuşsa durum değişir.

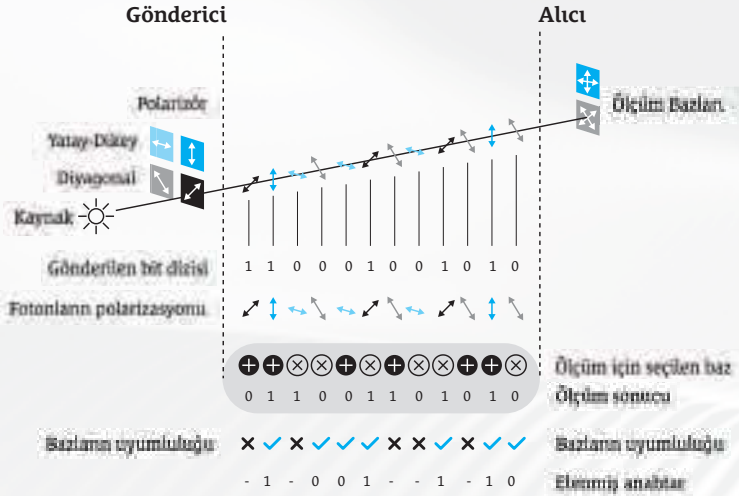
BB84 protokolünün üçüncü aşamasında gönderici ve alıcı veri aktarımına herhangi bir dış müdahale olup olmadığını tespit etmeye çalışır. İlk olarak bir dış müdahale olması durumunda olacaklara bir göz atalım. Aktarılmak istenen bit değerlerinin ne olduğunu öğrenmeye çalışan birisi, kübitler üzerinde ölçüm yapmalıdır. Bu durum iki soruna neden olur. Birincisi ölçümler fotonların yok olmasına, alıcıya hiçbir foton ulaşmamasına ve dolayısıyla bir dinleyicinin varlığının fark edilmesine yol açacaktır. Üstelik gönderilen sadece şifreleme için kullanılacak anahtar olduğu için dinleyicinin eline geçecek bilgilerin tamamı anlamsız olacaktır. Dinleyicinin gizli bilgileri ele geçirebilmesi için şifrelenmiş metnin aktarımı sonlanana kadar kendisini gizlemeyi

başarabilmesi gerekir. Dolayısıyla gönderici ve alıcının bir şifreleme anahtarı oluşturmaya izin vermelidir. Bu sorunu aşmanın yolu dinleyicinin, kendisinin de bulunduğu ölçüm sonuçlarına uygun kubitleri üretip alıcıya sanki göndericiden geliyormuş gibi göndermesidir. Dinleyici açısından ikinci sorunsu ölçüm sonuçlarının olasılığa dayalı olmasıdır. Bu sorunu aşmak birincisi kadar kolay değildir. Eğer dinleyici ölçümleri şans eseri doğru bazda yaparsa alıcıya gönderdiği bilgiler de doğru olacaktır. Ancak dinleyici ölçümleri yanlış bazda yaparsa elde ettiği sonuçların yaklaşık %50'si yanlış olacak bu yanlış sonuçları kendi ürettiği fotonlar vasıtasıyla alıcıya da aktaracaktır. Basit bir olasılık hesabı tüm kubitler ölçülüp yeniden üretildiği zaman dinleyicinin elde edeceği doğru bilgi oranının %50, elenmiş anahtardaki hata oranının %25 olacağını gösterir. İnternet üzerinden bilgi aktarımı her zaman mükemmel bir biçimde gerçekleşmez, ayrıca ölçüm cihazları da mükemmel değildir. Dolayısıyla aktarılan verilerde hata olması normal bir durumdur. Ancak %25'lik bir hata oranı modern standartlar açısından aşırı derecede yüksektir. Dolayısıyla bu kadar yüksek derecede bir hata oranı ancak aktarılan verilere bir dış müdahalede bulunulmasıyla ortaya çıkar.

BB84 protokolünün üçüncü aşamasında gönderici ve alıcı, ellerindeki elenmiş anahtarın “rastgele seçilmiş bir kısmını” karşılaştırarak seçili kısımdaki hata oranını belirler. Gönderici, hangi bit değerlerini iletmek istediğini, alıcıysa hangi bit değerlerini ölçtüğünü açıklar. Eğer karşılaştırılan verilerdeki hata oranı bir dinleyicinin varlığına işaret ederse iletişim sonlandırılır. Böylece gizli bilgilerin dinleyicinin eline geçmesi engellenir. Dinleyici hiçbir anlam ifade etmeyen bir şifreleme anahtarı dışında hiçbir şey elde edemez. Eğer hata oranı düşükse karşılaştırılan kısımlar atılır ve elenmiş anahtardan geriye kalan bitlerle şifreleme için kullanılacak anahtar oluşturulur. Bu aşamada taraflar, güvenliği artırmak için bazı “klasik” algoritmaları kullanarak ellerinde kalan bitleri çeşitli işlemlerden geçirmeyi tercih edebilir.

BB84 protokolüyle ilgili ilginç noktalardan biri, şifreleme için kullanılacak anahtarın ne gönderici tarafından ne de alıcı tarafından belirlenememesidir. Ortaya çıkan nihai anahtar, gönderici ve alıcının yaptığı rastgele seçimlerin sonucudur (*bkz.* Şekil 5.6).

BB84 protokolün başarılı olması için gerekli şeylerin başında aktarılacak istenen her bir bit değerinin sadece bir kubitte kodlanarak (tek bir fotonla) gönderilmesi gelir. Çünkü aynı bilginin birden fazla fotonla kodlanması durumunda bir dinleyici fazla fotonlardan birini kendine ayırabilir ve hatta ölçümü kodlamanın hangi bazda yapıldığı açıklanana kadar erteleyerek elde edeceği bilginin doğruluğunu garanti edebilir. Ayrıca protokolün güvenli bir biçimde kullanılabilmesi için göndericinin ve



Şekil 5.6: BB84 protokolünde bilgiyi kubitlerde kodlamak için iki ayrı baz kullanılır. Şifreleme için kullanılacak anahtar, gönderici ve alıcının yaptığı rastgele tercihlerle oluşturulur.

alıcının gerçekten de birbiriyle iletişim kurduklarından, iletişim kurdukları kişinin yetkisiz birisi olmadığından da emin olmaları gerekir. Bu durum ise kimlik doğrulaması için “klasik” protokollerin kullanılmasını gerektirir. İki tarafın birbirine, üzerinde yapılacak ölçümlerin sonuçları olasılığa dayalı kubitler göndererek birbirinin kimliğini doğrulaması mümkün değildir. Kimlik doğrulaması için kuantum kriptografiden yararlanmanın yollarından biri, “klasik simetrik kriptografi” ile yapılacak kimlik doğrulaması sırasında anahtar olarak bir önceki iletişimde kuantum kriptografiyle oluşturulmuş anahtarın bir kısmını kullanmak olabilir.

Güvenliğin artırılması ve kimlik doğrulaması için klasik protokollere ihtiyaç duyulmasından da anlaşılabilir gibi kuantum kriptografi tüm kriptografik amaçlar için tek başına yeterli değildir. Temel işlevi klasik simetrik kriptosistemlerde kullanılacak anahtarların oluşturulması olduğu için “kuantum anahtar dağıtımı” ifadesinin daha uygun bir terim olduğu söylenebilir.

Son Söz

Kuantum mekaniğinin geliştirilmesinin kuramsal fizikte bir devrim olduğuna şüphe yok. Peki bu devrim bitti mi? Pek çok fizikçiye göre bu sorunun cevabı hayır.

Günümüzde pek çok araştırmacı yeni kuantum teorileri geliştirmek için çabalamaya devam ediyor. Üzerine yoğun araştırmalar yapılan konuların başında bir kuantum kütle çekimi teorisi geliştirmek var. Diğer üç temel kuvveti açıklayan kuramların aksine bugüne kadar geliştirilmiş en iyi kütle çekim kuramı olan genel görelilik kuramı, klasik bir kuram ve kuantum teorisiyle açıkça uyumsuz. Kütle çekiminin bir kuantum teorisiyle açıklanabilecek bir olgu olup olmadığı tartışma konusu olsa da yaygın kanı böyle bir kuramın gerekli olduğu. Bugüne kadar öne sürülmüş, geliştirilme aşamasında olan çeşitli kuramlar da var. Ancak herhangi birinin doğru olduğuna işaret eden deneysel ya da gözlemsel bir veri bulunmuyor. Üzerine yoğun araştırmalar yapılan bir başka konuysa bugün kuantum alan teorileriyle açıklanan üç temel kuvveti içinde barındıran bir “büyük birleşik kuram” geliştirmek.

Elektromanyetik kuvvet, güçlü kuvvet ve zayıf kuvvetin kuantum teorilerini tek bir matematiksel çerçevede ifade edecek böyle bir kuram geliştirilebilirse bir sonraki adım kütle çekimini de içinde barındıran bir “her şeyin teorisi”ni geliştirmek olabilir. Aslında günümüzde de sicim teorisi ya da M-teori gibi bir her şeyin teorisi olma iddiasında olan kuramların bulunduğunu belirtelim. Ancak bu kuramlar da deneysel ve gözlemsel kanıttan yoksun.

Kısacası her ne kadar yaşı yüzü geçmiş olsa da kuantum teorisi günümüzde de kuramsal fiziğin geleceğini şekillendirmeye aday. Önümüzdeki yıllarda kuantum teorisiyle ilgili heyecan verici gelişmeler yaşanması hiç de şaşırtıcı olmaz.

Kaynaklar

- Eisberg, R. ve Resnick, R., *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*, John Wiley & Sons, 2. Basım, 1985.
- Gasiorowicz, S., *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, 2. Basım, 1995.
- Landau, L. ve Lifschitz, E., *Quantum Mechanics, Nonrelativistic Theory*, Butterworth & Heinemann, 3. Basım, 1976.
- Penrose, R., *The Road to Reality*, Knopf, 2005.
- Schroeder, D. V. ve Peskin, M. E., *An Introduction to Quantum Field Theory*, Westview Press, 1995.
- Shankar, R., *Principles of Quantum Mechanics*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2. Basım, 1994.



Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger (1887-1961), 1925'te kuantum mekaniğinin temelini atan ve bugün kendi adıyla anılan denklemi türetti. 1926'da ise kendisini uluslararası üne kavuşturan, atomaltı parçacıkların mekaniğiyle ilgili makalelerini yayınladı.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

Schrödinger'in denklemi, maddenin mikro ölçekteki davranışlarına açıklama getirdi. Kuantum mekaniği bilgileri, lazer, mikroçip yarı iletkenler ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi pek çok modern teknolojinin geliştirilmesine katkıda bulundu.

Evrene dair anlayışımızı şekillendiren kuantum bilimi, modern fiziğin merkezinde yer alır ve teknolojinin her alanına dokunur. Kuantum fiziği araştırmaları, madde ve enerjiyi en temel düzeyde inceleyerek doğanın ve evrenin yapı taşlarının özelliklerini ve davranışlarını daha iyi anlamamızı sağlar. Bu araştırmaların ortaya çıkardığı büyük bilgi birikimi, insanlık için faydalı teknolojik gelişmelere yön verir.

Kuantum fiziği ile ilgili birçok kavramı zihnimizde canlandırmak gerçekten zor olabilir. Matematik tam da bu sırada devreye girer. Kullanılan denklemler, hayal gücümüzün sınırlarını aşan fiziksel süreçler hakkında tahminler yapmaya yardımcı olur. Schrödinger denklemi de bu denklemlerin en önemlilerinden birisi.

Doğayı kavrayışımızda çok büyük değişikliklere yol açan Schrödinger Denklemi'nin yayınlanmasının 100. yılı dolayısıyla Birleşmiş Milletler 2025'i "Uluslararası Kuantum Bilimi ve Teknolojileri Yılı" olarak ilan etti.

Nesiller büyüten dergimizin Mart ve Nisan sayılarında iki bölüm hâlinde verdiğimiz Kuantum Mekanikliği özel kitap ekinin bu anlamlı yıla değer katacağını umuyor, tüm okurlarımıza yepyeni ufuklar açmasını diliyoruz.

Dr. Özlem Kılıç Ekici
Bilim ve Teknik Dergisi
Yayın Yönetmeni