

## Teori nedir?

Öğrenciler, çoğu kez, kuantum mekaniğinin karşılaştıkları diğer teorilere göre (örneğin, klasik mekanik, elektromanyetik teori) çok daha tuhaf olduğunu düşünürler. Ve tahminimce, diferansiyel operatörler ile temsil edilmiş konum ve momentum, kompleks dalgalar ile tanımlanmış parçacıklar, Schrödinger denklemi ile tanımlı dinamik, olasılık ile karakterize edilmiş ölçümler, vb. bulmak biraz tedirgin edicidir. Özellikle, kuantum mekaniğinin esasları, ilk bakışta, Newton mekaniğinin esaslarına (esasen sadece Newton'un 3 yasası) kıyasla oldukça tuhafmış gibi görünür. Fakat, Newton yasalarının sezgisel çekiciliğinin çoğu, yıllarca olan alışkanlıktan gelir. Ne yazık ki, kuantum mekaniğinin "tuhaflığı", büyük oranda alışkanlık eksikliğinden türemiş, çoğu kez konunun çok zor olduğu duygusuna yol açmıştır. Şüphesiz, konu kolay değil; olması da gerekmez – çünkü bu, doğanın en gelişmiş açıklamalarından biridir!. Ancak, temeller biraz zor görünse de, bunun sebebi sadece, alışlagelen fiziksel yapılar için yeni matematiksel modeller kullanıyor olma zorunluluğudur. Herşeyden önce, yerdeğistirmeleri, hızları ve benzerlerini sistematik bir yolla tarif etmek için vektörleri kullanmaya ilk başladığımızda, bu biraz tedirgin edici değil miydi? (O kadar öncesini hatırlayabiliyor musunuz?) Öyleyse, kuantum mekaniğinin, bir çok bakımdan, tıpkı diğerleri gibi bir teori olduğunu vurgulayarak başlamak isterim. Bunu yapmak için, genelde bir teorinin, ve özellikle kuantum mekaniğinin, ne olduğunun detaylara girmeden çok kaba bir tanımını vermeliyim. Elbette, şeytan – ve fizik – ayrıntıda gizlidir.

Aslında, bir fizik teorisi, etrafımızdaki dünyanın davranışını – özellikle deneylerin sonuçlarını – "açıklamak" ve/veya öngörmek için kullanılan kurallar (veya postülalar) kümesidir. Hangi deneyler açıklanabilir, bu deneylerdeki fiziksel ögeler nasıl karakterize edilecek, hangi bilgilerin önceden belirlenmesine ihtiyaç olacak, vb., bu teorinin kurallarının parçalarıdır. Söz açılmışken, unutulmamalıdır ki, bir teori asla "doğrudur" denilemez, ancak "deneylerle tutarlı" olur. Bir sonraki deneyin teoriyi yanlışlaması daima mümkündür. Belli bir takım sonuçların birden fazla teori ile açıklanabilecek olması olasıdır. Bunların hepsi, deneysel olarak ulaşabildiğimiz sonuçlar olduğu kadar, teoriler de bunu aratmazlar. Bununla birlikte, çoğunlukla, "en basit" postülalar ile en çok sonucu açıklayan, bir teori vardır. Genellikle bu teori, en iyi olan diye düşünülmektedir. Dolayısıyla, klasik mekanik, çok çeşitli makroskopik gözlemleri açıklamak için kullanılabilir iken, kuantum mekaniği hem bu sonuçları ve hem de klasik mekanik kullanılarak kolaylıkla açıklanamayan mikroölçekli fizikten (atomik fizik, nükleer fizik, vb.) başka bir sürü sonucu

da açıklayabilir.

“Teori” sözcüğünün birkaç yan anlamının olduğunu ve bunun kafa karıştırıcı olabileceğini vurgulamak iyi olur. Örneğin, kuantum mekaniği bir “teori”dir, fakat kuantum mekaniğinin hidrojen atomunu modellemek için, mesela, sabit bir Coulomb alanında hareket eden relativistik olmayan bir elektron olarak, kullanımı bir bakıma yine bir “teori” – hidrojen atomunun bir teorisi – olur. Açık bir şekilde, bu iki “teori” kavramının mantıksal duruşları, kuantum mekaniğinin *teorisi* çerçevesi içinde hidrojen atomunun çeşitli “teori”lerinin (örneğin, spin-yörünge bağlaşımı, özel görecelilik, sonlu boyutlu çekirdek, v.b. eklenerek) kurulabilmesi yönüyle, birbirinden biraz farklıdır. Biraz kafa karıştırıcı olan bu olguyu verdikten sonra, kuantum mekaniğine bir “teori” demeyi deneyeceğim (fakat başaramayabilirim), ve kuantum mekaniğinden geliştirilmiş (örneğin, hidrojen atomunun) çeşitli teorilere “modeller” diyeceğim.

Başarılı olan fizik teorilerinden bazıları nelerdir? Şüphesiz ki, pek çok var. Bazı örnekler: büyük uzunluk ölçeklerinde, zayıf gravitasyonel alanlarda ve düşük hızlarda geçerli olan maddenin ve etkileşimlerinin Newton teorisi (“klasik mekanik”); Maxwell’in elektromanyetik alan ve bunun “yükli” kaynaklar ile etkileşimi teorisi; Einstein’ın gravitasyon teorisi, ve tabii ki, kuantum mekaniği olarak adlandırdığımız, maddenin ve bunun küçük uzunluk ölçeklerinde etkileşimlerinin teorisi, ve bundan türeyen kuantum alan teorisi. Tüm bunların kafa karıştıran bir özelliği, teorilerin bize gerçekten birbiri üzerine binen hiyerarşilerle gelmesidir. Örneğin, elektrodinamiğin klasik Maxwell teorisini kullanarak, yüklerin bağlı durumları olarak, atomların bir “teorisi”ni oluşturabiliriz. Bu teoriler sonuçta hatalıdır (klasik oluşlarından). Genelde elektromanyetik olayların ve özelde atomların “doğru” bir teorisi, kuantum mekaniği teorisinin (daha iyisi : kuantum alan teorisi) Maxwell’in teorisi ile katıştırıldığı ve etkileşen yüklerin, atomların, vs. bir teorisini inşa etmek için kullanıldığı, kuantum elektrodinamiği yoluyla ortaya çıkar. Böylelikle, “kuantum mekaniği” olarak adlandırılan fiziksel “teori”yi tartışabilir ve bu teori tarafından tanımlanan çerçeveyi kullanarak çeşitli fiziksel olayların (örneğin, kristal katıların) “teori”lerini inşa edebiliriz. Bu olayların teorisi kuantum mekaniği yanlış olmaksızın yanlış olabilir, veya belki üst teorinin (kuantum mekaniğinin) başarısızlığından dolayı bu olaya tatminkar bir teori kurulamayabilir. Benzer yorumlar Einstein’ın görecelilik teorileri ve Einstein’ın göreceliliği bağlamında formüle edilen çeşitli fiziksel teoriler için de geçerlidir. Burada tekrar edersek, “teori” fikri ve bu teorinin sınırları içinden kurulan belirli bir model arasında kavramsal bir ayrım çiziyoruz.

Tüm bu genel, kulağa felsefi gelen ifadelerden sonra, işe koyulmanın zamanı geldi. “Deneylerin sonuçlarını ‘açıklamak’ ve/veya öngörmek için kullanılabilen kurallar” kümesine sahip olmak ne anlama geliyor? Tabii ki, yararlı teoriler mecburen biraz dallı budaklıdır, fakat çok kaba bir şekilde bakışla, jenerik bir teori oldukça basit bir yolla betimlenebilir.

Temel olarak, teori, *gözlenebilirler*, *durumlar* ve *dinamiki* tasvir etmenin bir yolu olarak görülebilir. Aşağıda bu üçünün herbirini irdeleyeceğiz. Bildiğiniz gibi, matematik, bir kaç yüzyıldır, fiziksel bir teori kurmanın seçilen aracı ve dili olmuştur. Netice itibariyle, bu derste başlangıç işi, bu üç temel öge için matematiksel bir gösterim vermek olacaktır.

## Gözlenebilirler

Deneyssel olarak erişilebilir dünyanın ölçülebilir yönleri *gözlenebilirler*dir. Her teori gözlenebilirler matematiksel bir temsil tayin etmemnin yollarını sağlamalıdır. Gözlenebilirleri belirterek, teorimizin kapsamı istenen fiziksel olay çeşitlerini belirleme yönünde epeyce bir mesafe katetmiş olacağız. Kuantum mekaniği, gözlenebilirler için evrensel temel bir kural varsayar : bunlar Hilbert uzayında kendine eşlenik operatörler olmalıdır. Bu kuralı gerçekleştirme biçimimiz fiziksel modelden fiziksel modele farklılık gösterebilir.

Örneğin, Newton mekaniğinin teorisini kullanarak bir “parçacık” için bazı önemli gözlenebilirlerin, konum, momentum, açısal momentum, enerji, vs. olduğu bir model kurabiliriz. Aslında, her zamanki “noktasal parçacık” (Newtonyen) modelimiz *bütün* gözlenebilirlerin, konumun ve momentumun fonksiyonları olarak görülebileceğini kabul eder, ki bunları *temel gözlenebilirler* olarak adlandırabiliriz. Matematiksel olarak, tek bir parçacık için temel gözlenebilirler Newton mekaniğinde 6 tane sayı,  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$  tarafından temsil edilir, yani, gözlenebilirler altı boyutlu *faz uzayında* fonksiyondurlar. Normalde, bu 6 sayı, matematiksel konuşacak olursak, esasında vektör çiftleri olarak görülürler. Bir “parçacık”ın davranışı gözlenebilirleri izlenerek kayıt edilir ve biz teorimizi bu değerlerin matematiksel temsillerini (mesela, vektörleri) kullanarak kurarız. Kütle, elektrik yükü ve zaman gibi diğer büyüklükler de bir bakıma “gözlemnebilir”dirler, fakat Newton mekaniğinde bu büyüklükler, sistemin davranışını kayıt etmek için ölçülen değerler şeklinde değil, çeşitli denklemlerde parametreler olarak görünürler. Bir başka deyişle, bir parçacığın konumunun değişme biçimini düşünürken, normal olarak “parçacık” modelimize zamanla başkalaşan kütle veya elektrik yükü dahil etmeyiz. Tabii ki, maddenin daha sofistike modelleri, kütle ve elektrik yükünün daha iyi veya daha “kötken” tasvirini vermeye teşebbüs edebilir, ki burada bu büyüklükler yukarıda tarif edildiği biçimde gözlenebilirler haline gelirler.

Bir başka örnek olarak, Maxwell’in teorisi ile tarif edilen elektromanyetik alanı göz önüne alın. Gözlemlenebilirler, tabii ki, elektrik ve manyetik alan şiddetleridir. Ayrıca, dalgaların kutuplanmaları, enerji yoğunluğu, momentum yoğunluğu, vs.’de vardır. Tüm elektromanyetik gözlenebilirler (Maxwell teorisinde), teorisinin temel gözlenebilirleri olan elektrik ve manyetik alan şiddetlerinden inşa edilmiştir. Matematiksel açıdan, bunlar vektör *alanlar* olarak temsil edilir. Bir başka ölçülebilir büyüklük  $c$  ışık hızıdır. New-

ton mekaniğindeki kütle ve yük gibi, bu büyüklük de Maxwell'in teorisinde bir parametre olarak görünür ve sistemin şekillenimi ile değişebilen bir şey değildir. Geliştirmekte olduğumuz bu dilde ışık hızı için "gözlenebilir" terimini kullanmayız.

Son örneğime gelince, "istatistiksel mekanik" olarak bilinen madde yığınının teorisini düşünün. Bu teorinin kuantum mekaniği ile bir takım benzerlikleri vardır. Şimdilik, bazı gözlenebilirlerin, serbest enerji, entropi, kritik üsler, vs. gibi şeyler olduğunu not edelim. Tüm bu büyüklükler, bir bakıma temel gözlenebilir olan, bölüşüm fonksiyonundan hesaplanabilir. Şüphesiz ki, istatistiksel mekanik normal olarak klasik ve/veya kuantum mekaniğinden inşa edilmiştir, ki şu halde bölüşüm fonksiyonunun kendisi de daha temel gözlenebilirlerden kurulmuş olur. Bu arada, sıcaklık, elbette, ölçülebilen bir büyüklüktür. Fakat istatistiksel fizikte kanonik bir topluluk için bir parametre rolü oynar, dolayısıyla bu vaziyette sıcaklık, tıpkı klasik elektrodinamikteki kütle ve elektrik yükü gibi bir parametre olarak el alınır.

Böylece, farklı fiziksel olayların farklı çeşitte gözlenebilirler gerektirdiğini ve farklı teorilerin bu gözlenebilirler için farklı gösterimler kullandığını görüyoruz. Bu dönemki iki ana amacımızdan biri kuantum mekaniğinin gözlenebilirleri nasıl temsil ettiğinin somut olarak anlaşılmasını temin etmektir.

Bütün örneklerimizde – aslında, teorilerin çoğunda – "zaman" olarak adlandırılan gözlenebilirin ayarlanabilir bir parametre olarak girdiğini not düşelim. Normal olarak, mesela, parçacığın enerjisini modellediğimiz bir tarzda, bir gözlenebilir olarak modellenmemiştir. Kuantum mekaniğinde zaman yukarıda tarif edildiği gibi bir gözlenebilir değildir.

## Durumlar

Bir fiziksel sistem çeşitli "şekillenimler"de bulunabilir, yani, gözlenebilirleri için çeşitli olası değerler sergileyebilir. Sistemin *durum*undan bahsederken, bu sistemin tüm gözlenebilirlerinin olası bütün ölçüm sonuçlarını tamamıyla niteleyebilen matematiksel bir objeye işaret ediyoruz. Bundan dolayı, durumun matematiksel gösterimi, gözlenebilirlerin temsiline derinlemesine bağlıdır. Daha önceki örneklerimizle "durum" mefhumunu açıklayalım.

Bir parçacığın Newton mekaniğinde, sistemin durumunu temel gözlenebilirleri (koordinatlar ve momentumlar) ölçerek belirleyebiliriz. Doğrusu, tüm diğer gözlenebilirler, bu gözlenebilirlerin (ve zamanın) fonksiyonlarıdır. Elektromanyetik teoride gelinen nokta oldukça benzerdir. Kaynağın bulunmayan elektrodinamikte, elektrik ve manyetik alanlar bir zamandaki bütün elektromanyetik gözlenebilirleri ve sistemin durumunu belirler. Bu iki örnekte de durum ve gözlenebilirler kavramları, gerçekten aynı şeylermiş gibi bir izlenim verecek şekilde, yakından birbirine sarmaşıktır. Fakat vaziyet her zaman böyle

değildir. İstatistiksel mekanikte durumu tanımlamanın daha ince bir yolu vardır. Net olmak için, bir parçacıklar sisteminin “klasik istatistiksel mekanik”ine odaklanalım. Klasik mekanik bakış açısıyla, altta yatan temel gözlenebilirler, sistemi (faz uzayında) oluşturan tüm parçacıkların koordinatları ve momentumları olarak görülebilir ve faz uzayında bir noktayı belirtmek sistemin durumunu belirler. Newton mekaniğinde yapıldığı gibi faz uzayındaki bir noktadan daha ziyade, istatistiksel mekanikte, durum faz uzayında bir olasılık dağılımı verilerek belirtilir (ki bu bir fonksiyondur). Bu olasılık dağılımından istatistiksel mekaniğin bütün gözlenebilirleri hesaplanabilir. Sistemin bir durumu verildiğinde, tüm gözlenebilirlerin belirlendiğini, ancak durumu belirtme yolumuzun oldukça farklı olabileceğini görüyoruz.

Durumlar ve gözlenebilirler arasındaki ayrımla daha iyi başa çıkmak için şöyle düşünebilirsiniz. Sistemin durumu, “hazırlanmış” olduğu yolu yansıtır, ki bu normal olarak kullanılan belli başlangıç koşullarının bir yansımasıdır. Belli (çeşitli ölçümler ve/veya filtreleme süreçleri ile gerçekleştirilen) bir hazırlama prosedürü verildiğinde, sistem, gözlenebilirlerinin davranışında yansıtıldığı gibi, belli bir – aslında tek bir – şekilde davranacaktır. Bir sistem için fiziksel bir model, esas olarak sistemi tasvir etmek için gereken gözlenebilirlerin tanımlanmasını içerir. Bu bir kez baştan yapılır. Sistemin durumları, sistemin “başlatılabileceği” çeşitli yolları temsil eder ve deneysel prosedürlerle ayarlanabilir.

## Dinamik

Bir sistemin gözlenebilirlerinin ölçülen değerleri genellikle zaman içinde değişir. Normalde, sistemin zaman evrimini tasvir etmenin bir yolunu, yani bir “dinamik kanun” veya bir “hareket yasası” içerecektir. Gözlemlenebilirler için zamandan bağımsız bir matematiksel model kullandığımızı kabul ederek, dinamiği, sistemin durumunun bir denklem sistemine göre (zaman içinde) sürekli bir değişimi olarak görebiliriz. Dinamiği formüle etmenin bu yolu, çoğu kez dinamiğin *Schrödinger resmi* olarak adlandırılır ve dinamik kanunun ünlü bir örneği Schrödinger denklemi ile verilir. İstatistiksel fizikte, sistemin durumu faz uzayında bir olasılık dağılımı tarafından belirlenir. Bu dağılım zaman içinde Liouville denklemine göre evrilir.

Klasik mekanikte ve elektrodinamikte, sistemin durumu, temel gözlenebilirlerin değerleri belirtildiği anda bilinir. Örneğin, Newtonyen bir parçacığın zamanın bir anında konumlarını ve hızlarını verirseniz, bu büyüklükler tüm zamanlar için dinamik bir kanun (yani, Newton’un ikinci yasası) tarafından tek bir şekilde belirlenecektir. Bundan dolayı, bu teorilerde dinamik, gözlenebilirlerin değerlerinin, bir denklem sistemine ( $F = ma$ , Maxwell denklemleri) göre zaman içinde bir evrimi olarak düşünülebilir. Dinamiğin, her teoride genellikle içerilen, bir önemli yanı, çok temel bir nedensellik mefhumudur. Schrödinger

resminde, sistemin durumu bir zamanda verildiğinde, dinamik kanun, herhangi başka bir zaman için durumu tek olarak belirlemelidir. Bunu olmuş sayarsak, belli bir zamandaki durumun, (teorinin tanımlanmasının bir parçası olan – dinamik kanun yoluyla) *herhangi bir zamandaki* tüm ölçüm sonuçlarını belirleyeceğini görürsünüz.

Özetlersek : Bir teori şunları gerektirir. (1) Gözlemlenebilirlerin matematiksel bir temsili; (2) Durumların matematiksel bir gösterimi ve verilen herhangi bir durumdan gözlenebilirlerin değerlerinin belirlenmesi için bir reçete – teorinin fiziksel çıktısı; (3) Zamanın bir fonksiyonu olarak fiziksel çıktının nasıl alınacağını söyleyen, dinamik bir kanunun tanımlanması. Bu dönem amacımız kuantum mekaniğinin (1), (2) ve (3)'ün nasıl üstesinden geldiğini ve bir takım fiziksel sistemlere modeller kurmak için nasıl kullandığını görmek olacaktır.

## **Bir uyarı**

Klasik mekanikten kaynaklanan, giderilmesi gereken, bir önyargı şu şekildedir. Klasik mekanikte, durumu bilmek bütün gözlenebilirlerin değerini bir zaman için sabitlemekle aynıdır. Dolayısıyla, bir Newtonyen parçacığın bir anda durumu biliyorsak, koordinatlarının, momentumlarının ve diğer tüm gözlenebilirlerinin değerlerini biliriz. Başka teoriler farklı şekilde kurulabilir ve bu tip bir sonuç geçerli olmak zorunda değildir. Örneğin, kuantum mekaniğinde (ve klasik istatistiksel mekanikte), sistemin durumu tüm gözlenebilirler için bir *olasılık dağılımı* sağlayacaktır. Bazı gözlenebilirler değerler tayin ederek durum tam olarak belirlenebilir/tanımlanabilir (“bir basit harmonik salıncımın enerjisi bir olasılıkla 5 erg'dir”), fakat bunun diğer gözlenebilirlerde istatistiksel bir belirsizlik bırakması muhtemeldir. Göreceğimiz gibi, örneğin, (kaba hatlarıyla konuşursak) bir parçacığın konumunu belirtmek, kuantum mekaniğinde bu parçacığın durumunu tam olarak belirleyecektir. Bu durum momentum için çok büyük bir istatistiksel belirsizliğe (çok “geniş” bir olasılık dağılımına) izin verecektir. Benzer şekilde, parçacığın enerjisini tanımlamak, genellikle, konum ve momentum değerlerinde istatistiksel bir belirsizliği ima edecektir.

## **Stern-Gerlach deneyi**

Şimdi, 1920'lerin başlarında Stern ve Gerlach tarafından yapılan bir deneyi anlatıyoruz. Bu bize, açıklamak için kuantum mekaniğine ihtiyaç duyan tipte bir hadisenin değerli bir kanıtını verir. Ayrıca, muhtemelen olası en basit kuantum mekaniksel modele bir örnek de sağlar. Büyük ihtimalle bildiğiniz gibi, bu deney parçacıkların *spini* diye (belki de yanlış şekilde) bilinen özelliklerini içerir, ki bu, parçacıklar tarafından sahip olunan özgün bir açısal momentumdur. Bununla birlikte, deneyin yapıldığı zamanlarda, ne

özgün spinin ne de kuantum mekaniğinin çok iyi anlaşılmadığını da not edin! Bu önemli deneyi çalışmadaki amacımız, muhtemelen en basit olası matematiksel kurguda kuantum mekaniğinin temel kurallarını tanıtmaktır.

Stern-Gerlach deneyi bir parçacık demetini her yerde aynı yönlü olan fakat şiddeti değişen bir manyetik alan bölgesinden geçirmeye dayanır. Bir  $\mu$  manyetik momenti ile bir  $\mathbf{B}$  manyetik alanı etkileşiminin klasik potansiyel enerjisinin  $-\mu \cdot \mathbf{B}$  olduğunu hatırlayın. Böylece, eğer manyetik alan uzayda değişken ise manyetik moment üzerine (torka karşılık olarak) uygulanan kuvvet sıfırdan farklıdır. Elde

$$\mathbf{F} = \nabla(\mu \cdot \mathbf{B})$$

var. Eğer manyetik alan yalnızca bir yönde değişiyorsa, o zaman, sabit  $\mathbf{B}$  yönüne göre manyetik momentin yönelimine bağlı olarak, kuvvet bu yöne paralel veya anti-paralel olacaktır. Böylece, manyetik momentin hissettiği kuvvet  $\mu$ 'nün  $\mathbf{B}$  yönündeki bileşenini ölçmemize imkan verir; sadece parçacıkların hangi yöne saptıklarını izlememiz gerekir. Şüphesiz ki, bu tamamen klasik bir mantıktı, dolayısıyla başlangıç olarak makroskopik cisimler için işe yaracağına güveniyoruz, fakat kuantum mekaniğin olarak da doğrulanabilir /açıklanabilir. Şimdilik sadece, bir manyetik momentin bir manyetik alanla etkileşiminin doğru kuantum modelinin aslında yukarıdaki potansiyel enerji fonksiyonunu kullanmadığını ve atom yeterince ağır olduğundan klasik mekaniğin bir tasvir kullanarak hareketinin iyi bir yaklaşıklıkla elde edilebileceğini not edelim. Burada, klasik, makro ölçekli mantığın, kuantum mekaniğin mikroskobik bir sistemin modellenmesi için nasıl önemli ipuçları verdiğine dair güzel bir örneğimiz var.

Stern ve Gerlach bir gümüş atomu demetini böyle bir düzenden geçirdi. Bu atomların (elektron spini sayesinde) bir manyetik momenti var ve bundan dolayı düzenden saparlar. Atomun manyetik momentinin, yük dağılımının hareketinden geliyor şeklindeki, klasik bir modeline dayanarak ve atomların rastgele yönelimli manyetik momentlerinin olduğunu farz ederek, homojen olmayan eksen boyunca manyetik momentin izdüşümlerinde sürekli bir yayılımı yansıtır biçimde, demetin sürekli bir sapmasının olması beklenir. Bunun yerine, gözlenen şey demetin iki parçaya ayrıldığıydı. Bu hadisenin açıklaması, atomun  $\mu$  manyetik moment vektörünün ve dolayısıyla manyetik momentinin, iç açısal momentum  $\mathbf{S}$  – “spin” – taşıyan bir elektronun varlığından kaynaklanmasındır. (Burada  $\mu$ ,  $\mathbf{S}$  ile orantılıdır.) Bu elektron hiçbir yörüngesel açısal momentumu olmayan bir atomik durumdadır, dolayısıyla atom etrafındaki hareketi manyetik momente katkı sağlamaz.\* Bu (başlangıçta tuhaf gelen) açıklamada, elektron, verilen herhangi bir yöne göre, iki “spin durumu”ndan birinde olabilir. Daha net olarak, bir elektronun spininin herhangi

---

\*Tabii ki gümüş atomunda 47 tane elektron var. Ancak, bunların 46 tanesi net açısal momentumu olmayan bir durumdadır ve böylece manyetik momente net bir katkısı yoktur.

bir eksene izdüşümü yalnızca iki değer alabilir ( $\pm\hbar/2$ ). Böyle parçacıkların “spin 1/2”, elektronun iç (durumdan bağımsız) bir özelliği, olduğu söylenir. Eğer herbir atom rastgele seçilirse, bu iki alternatifin yüzde 50-50 olasılıkla gerçekleşmesi beklenir, ve bu da gözlenen şeydir. Herbir yöne demetin bir yarısı saptırılır. Bir açısal momentumun bu kesikliliğini – doğrusu, iki değerli tabiatını – açıklamak, kabul edilen her teoremin yüzüye geldiği bir meydan okumadır. Fakat çok daha fazlası var...

Stern-Gerlach düzeneğini kullanarak, spin 1/2 bir parçacığın manyetik momentinin – denk olarak spin vektörünün – herhangi bir bileşenini, SG manyetik alan yönünü ilgilendiğimiz eksenle hizalayarak ve sonra parçacık demetini içinden geçirip parçacıkların o yönde spin “yukarı” veya “aşağı”ya karşılık gelen hangi yöne saptırıldığını görerek ölçebiliriz. Bu yüzden,  $\mathbf{S}$  spin vektörünün böyle bir deneydeki davranışını, atomun sahip olabileceği tüm diğer “serbestlik derecelerini” ihmal ederek, modellemeye çalışalım. Buradan hareketle atom, bir “spin 1/2 parçacık” olarak modellenir. Bir  $\mathbf{n}$  birim vektörü ile nitelenen bir eksen yönünde spini ölçen SG düzeneğini “ $SG_n$ ” olarak adlandıralım. Böylece,  $SG_n$  düzeneği  $\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$ 'i ölçer. Deneye dayanan gerçek  $\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$ 'i ölçtüğünüzde her zaman  $\pm\hbar/2$  bulacağınızdır. Bir spin 1/2 parçacık demetini  $SG_n$  düzeneğinden geçirelim ve, mesela,  $\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$ 'e göre sapan  $+\frac{\hbar}{2}$  değerli parçacıkları koruyalım. Bu *filtrelenmiş* demeti bir başka  $SG_n$ /filte cihazından geçirirsek demetin % 100'ünün aynı şekilde geçtiğini görürüz. Filtrelenmiş demetteki parçacıklar için “ $n$  yönünde spini kesinlik derecesinde belirledik” deriz. Bu vaziyeti (filtrelenmiş) demetteki bütün parçacıkların  $|\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}, +\rangle$  durumunda olduğunu söyleyerek modelleriz. Bir SG düzeneğinden geçirip sadece yukarıya veya aşağıya sapanları koruyarak, hepsi de aynı durumda olan birçok parçacık “hazırlanmış” olduğumuzu söyleyebiliriz.

$SG_z$  düzeneğinden bir demet geçirdiğimizi ve yalnızca bir spin izdüşümünü koruduğumuzu varsayalım. Şimdi  $|S_z, +\rangle$  durumunda hazırlanmış birçok elektronumuz var. Bu elektronların sahip olduğu  $S_x$  değerini saptamaya çalışalım. Bu demeti (tüm parçacıklar  $|S_z, +\rangle$  durumunda) başka bir  $SG_x$  Stern-Gerlach düzeneğinden geçirin. Parçacıklar şimdi  $x$  yönündeki manyetik momentlerinin (veya spin vektörlerinin) izdüşümlerine göre saptırılır. Bu deneyde bulacağınız şey demetin ikiye ayrılmasıdır. Bu çok mantıklıdır; zaten spinin herhangi bir bileşeninin seçilen bir eksen yönünde sadece iki izdüşümü olduğuna karar vermiştik.  $x$  ve  $z$  yönlerinin birbirinden farklı bir özelliği olmadığından her ikisi için de benzer davranışlar elde etmeliyiz.  $SG_z$  filtreli demette  $S_x$ 'i özel bir biçimde “hazırlanmış” değiliz, dolayısıyla ikiye ayrılan bir demet görmemiz büyük bir sürpriz değildir.

İncelememize şu şekilde devam edelim. Demetimizi  $SG_z$  içinden geçirdik ve “spin yukarı” parçacıkları koruduk. Sonra bu spin yukarı parçacıkları  $SG_x$  içinden geçirdik; bu  $SG_x$  ölçümünde  $\hbar/2$  vermiş olan demete odaklanalım. Bundan dolayı, kabaca  $SG_x$  düzeneğine giren parçacıkların yarısı korunur, ve hazırladığımız demette artık orijinal



parçacıkların  $1/4$ 'ü kalır. Bu filtreleme sürecinden sonra, eğer istersek,  $SG_x$  düzenekleriyle tekrarlanan filtreleme süreçlerinin bu demeti birarada tuttuğunu doğrulayabiliriz – bell ki parçacıkların durumu  $|S_x, +\rangle$  ile temsil edilebilir.\*

Şimdi, aşağıdaki özelliklere sahip olacak şekilde ölçülmüş bir elektron demetimiz var (1)  $S_z + \hbar/2$ 'dir (2)  $S_x + \hbar/2$ 'dir.<sup>†</sup> Yukarıda verilen bu (1) ve (2) ile, diğer tüm olasılıkları filtreleyip attığımız için, elektronların hepsinin belli  $S_z$  ve  $S_x$  değerlerinin olduğuna inanmak akla yakındır. Bu bakış açısının teyidi mümkün değildir. Geri dönüp  $S_z$ 'nin değerini kontrol ettiğimizi farz edelim.  $SG_z$ 'den  $+\hbar/2$  ile ve sonrasında  $SG_x$ 'ten  $+\hbar/2$  ile çıkan demeti alın ve tekrar  $SG_z$  içinden geçirin. Bütün demetin  $S_z$  için  $+\hbar/2$  değerine sahip olarak bulunacağımı bekleyebilirsiniz, fakat bunun yerine demetin ikiye ayrıldığını bulacaksınız!  $z$  yönünde spin aşağı bileşenleri güya filtreleyip ayıklamamıza rağmen oluyor.

Dolayısıyla, eğer  $S_z$ 'yi ölçüyor ve, mesela,  $\hbar/2$  buluyorsanız o zaman tekrar ölçtüğünüzde (başka hiçbir etkileşimin olmadığını kabul ederek) bir olasılıkla  $\hbar/2$  elde edersiniz. Eğer  $S_z$ 'yi ölçer ve, mesela,  $\hbar/2$  bulup sonra  $S_x$ 'i ölçtükten sonra  $S_z$ 'yi ölçerseniz o zaman son ölçüm yüzde 50-50 olasılıkla  $\pm\hbar/2$  olacaktır. Bu sizin dikkatiniz çekmeli : bu iki ölçümde  $S_z$  gözlenebilirliği için bulacağınız değerler  $S_z$  ölçümleri arasında  $S_x$ 'in değerini belirleyip belirmediğinize bağlıdır.

Gelinen bu noktada, elektronun,  $S_x$  ve  $S_z$  gibi, tüm gözlenebilirlerine belli değerler verildiği klasik resmi anlamlandırmak zordur. Bazen  $S_z$  ölçümünün  $S_z$  değerini bir şekilde “bozdu”ğu söylenir. Bu bakış açısı yanlış değildir, fakat neler döndüğünün noksansız bir tanımı değildir. Örneğin, göreceğimiz gibi, kuantum mekaniksel tahmin, ölçümleri yaptığımız yoldan açık bir biçimde bağımsızdır.  $SG$  cihazlarının nasıl çalışmış olduğunu bilmemize hiçbir yerde gerçekten ihtiyacımız yoktur. Üstelik,  $S_x$  ölçümünden dolayı  $S_z$ 'deki “bozulma”  $S_x$  ölçümünü ne kadar dikkatli yaptığımızın bir fonksiyonu değildir, yani, kimse bu garip davranıştan bir “deneysel hata”yı sorumlu tutamaz, ölçümler ideal olarak hatasız olabilir ve biz yine aynı sonucu buluruz. İşin aslı şu ki, ( $S_z$  ve  $S_x$  gibi) gözlenebilirlerin, sabit, ilgilenilen cisimde “varolan” değerler alıyor olarak düşünülmemesi gerekir. Bu felsefi olarak biraz yapış yapıştır (ve psikolojik olarak biraz rahatsız edicidir), fakat doğanın aslında nasıl işlediğinin bir tasviri olarak oldukça iyi görünüyor.

Eğer tüm bu olanlar size mükemmel şekilde mantıklı geliyorsa, o zaman herhalde bunu çok iyi anlamadınız. Maddeyle makro ölçekte deneyimiz doğanın bu şekilde işleyişi hakkında hiçbir ipucu vermiyor, o kadar.

\*Tabii ki, biri doğal olarak durumu  $|S_z, +; S_x, +\rangle$  biçiminde yazmayı tercih eder, ama bunun uygun olmadığını göreceğiz.

<sup>†</sup>Şimdi devam ederek, bu iki kez filtrelenmiş demeti alıp  $S_y$ 'yi ölçebiliriz; demetin yarısının  $y$  yönünde spin yukarıya ve diğer yarısının da spin aşağıya sahip olduğunu bulacaksınız (alıştırma). Fakat bunu bile dert etmeyelim.

Elektronlar (ve diğer temel parçacıklar) üzerlerine minicik açısai momentum okları iliştirilmiş klasik yörüngeleri izleyen ufacık toplar gibi değildirler, ve öyle olduğuna inanmak için de hiçbir (deneysel) neden yoktur. Bir parçacığın, bütün gözlenebilirleri için, ölçebileceğimiz, belirlenmiş değerlere sahip olması tamamıyla klasik bir önyargıdır. Őu şekilde düşünmeye çalışın : parçacık nedir? Parçacığın durumuyla değişmeyen, kütle, (toplam) spin, yük, vs. ve başka iç, “gerçek” özelliklere sahiptir. Deneye dayanarak, parçacığa, konum, enerji, yörüngesel açısai momentum, bir eksen yönünde spin bileşeni gibi diğer gözlenebilir özellikler tayin edilmek istenebilir. Fakat deneye göre, bu özellikler parçacığın durumu ile değişir ve (durumu değiştiren) ölçme sürecinden bağımsız olarak parçacıkta “varolan” olarak görülemez. Oysa en sonunda, bu tipte bir olayın kuantum mekaniksel açıklamasına göre, size bütün garanti edilen, çeşitli gözlenebilirleri için bir parçacığa olasılık dağılımları “tahsis” edebilecek olmanızdır. Bir sonraki görevimiz kuantum mekaniğinin kurallarını kullanarak spin 1/2 sisteminin kuantum mekaniksel modelini kurmaktır.