

Kuantum Mekanikinin Felsefî Sorunları

Kuantum teorisinin ve standart Kopenhag yorumunun tamamlanmasından altmış yıl geçtikten sonra kuantum teorisinin felsefî sorunları yeniden hararetle tartışılır hale geldi...Her ne kadar kuantum mekaniğinin yorumunda farklı görüşler bulunsun ve teori bazen sağduyu ile çelişir gözükse de, bütün mikroskopik fizik deneyleri ile uyuyor. Teoriyi en eleştirel biçimde sorgulayan fizikçiler bile bu konuda hemfikir...Öte yandan, profesyonel fizikçilerin çoğu kullandıkları standart kuantum mekaniği tekniklerinin yanı sıra "ortodoks" yorumu da kanıksamış durumdadır. Bu yorumun baş sorumlusu Niels Bohr "Bir insan kuantum fiziğini düşünürken hiç başının dönmediğini söylüyorsa, bu, konuyu hiç anlamadığını gösterir." diyerek, teorisinin şaşırtıcı yanlarına dikkat çekiyor.

Cihan Saçlıoğlu
B.Ü. Fizik Bölümü

Problemin Kökeni: İhtimal Dalgası Genlikleri

Kuantum mekaniğinin bir yandan dalgalarla, bir yandan da ihtimal hesabı ile ilgili olduğunu herhalde çok kişi duymuştur. Bu kavramlar klasik fizikte de vardı, fakat kuantum teorisinde beklenmedik bir şekilde birleştirildiler. Teorinin mantığı zorlayan yönleri temelde bu birleşmeden kaynaklanıyor.

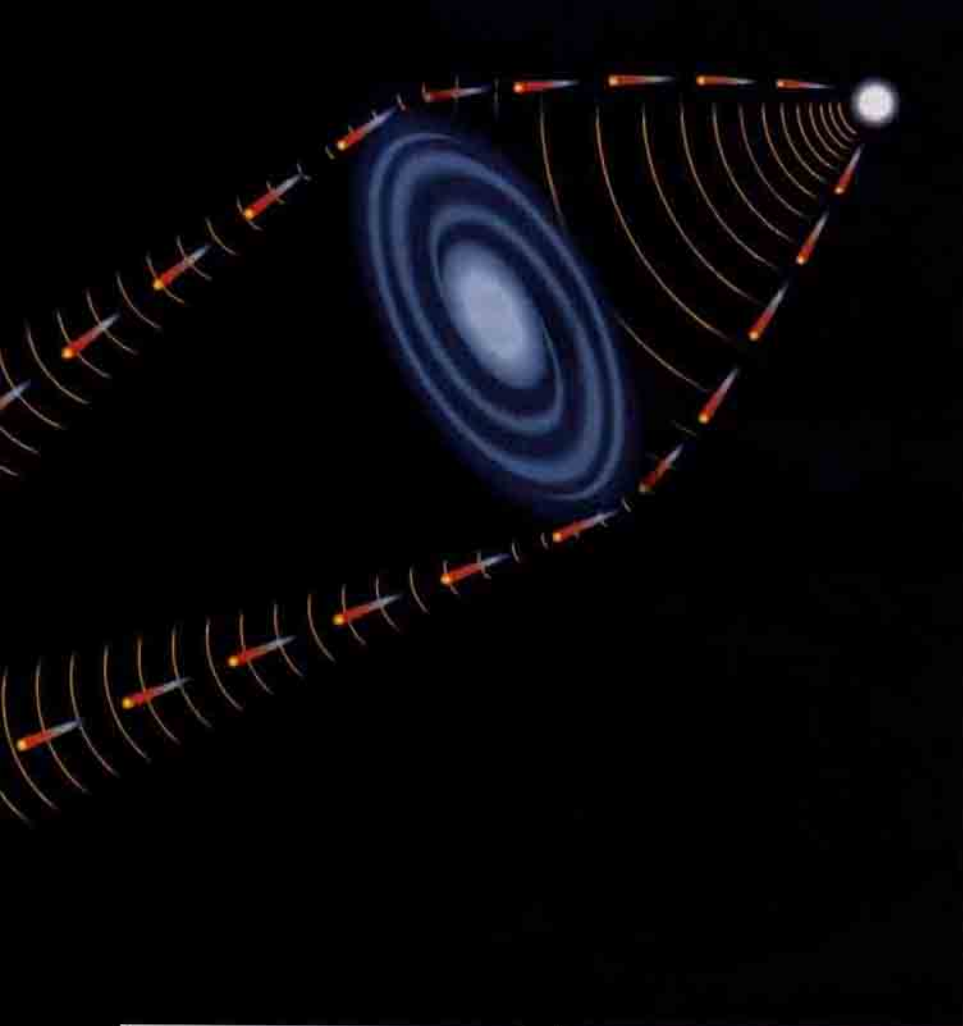
Klasik bir dalga genliğine $A(x,y,z,t)$ diyelim. Bu, uzayda (x,y,z) noktasında ve zamanda t anında ortamdaki basıncı (ses dalgaları için) veya elektromanyetik alan şiddetini (elektromanyetik dalgalar için) gösteriyor olabilir. Bu genlik bir kısmi diferansiyel denklem sağlar; denklem, dalgaların yayılma hızını da içerir. Klasik fizikteki birçok dalga denklemi lineerdir; bunun anlamı, denklemde A ve türevlerinin en fazla birinci kuvvetlerinin yer aldığıdır. Lineerliğin çok önemli bir sonucu *süperpozisyon ilkesinin* (Latince üstüste yerleştirmek) geçerli olmasıdır: A_1 ve A_2 ayrı ayrı denklemi sağlıyorsa, A_1+A_2 de sağlayacaktır. Hatta A_1 ve A_2 ayrı birer dal-

ga kaynağı (örneğin titreşen birer yük veya birer diapozon) sonucunda ortaya çıkıyorlarsa, iki kaynağın aynı anda faal olması A_1+A_2 dalga genliğini verecektir.

Klasik lineer dalgaların bir önemli özelliğine daha değinelim: Bu dalgaların taşıdığı enerji yoğunluğu (dalga uzaya yayıldığı için toplam enerji yerine hacim başına düşen enerjiden, yani yoğunluktan bahsetmek uygundur) A^2 ile orantılıdır. Süperpozisyon ilkesi ile bu sonuç birleştiğinde ortaya şaşırtıcı bir sonuç çıkar:

$(A_1+A_2)^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2$ olduğu için, toplam dalganın enerji yoğunluğu genelde A_1 ve A_2 'nin enerji yoğunluğu toplamından farklıdır. Örneğin olarak $A_1=A_2=A$ ve $A_1=-A_2=-A$ hallerini karşılaştıralım. Birinci durumda enerji tek dalganınkinin 4 katına çıkmakta ($A^2+A^2+2A^2$), öbüründe ise yerel olarak tamamen yok olmaktadır ($A^2+A^2-2A^2$).

Bunun meşhur bir örneği Young çift yarı deneyinde görülür. Alt ve üst yarıklardan ekrandaki P noktasına ulaşan ışık dalgaları (Şekil 1) P'de tepe noktaları üstüste gelecek şekilde buluşuyorlarsa buraya 4 kat enerji gelir ve aydınlık bir çizgi oluşur.



Şekil-1 Ekrandaki aydınlık bölgeler fotonların isabet ettiği yerleri gösteriyor.

Üst yarıktan çıkan dalganın tepe noktası P'de alt yarıktan gelenin dip noktasına rastlarsa, bu defa da hiç enerji gelmediğinden karanlık bir çizgi ortaya çıkacaktır. Bu girişim (interference) olayının okuyucularımızın çoğu tarafından bilindiğini varsaysak da, bunun olabilmesi için çok önemli bir şartı hatırlatmakta yarar var: İki yarıktan gelen iki dalga *koherent* olmalı, yani aralarında zaman içinde değişmeyen kararlı bir faz farkı bulunmalıdır. Tersini olursa, yani faz farkı zaman içinde gelişigüzel değişirse, P'de iki dalga bazen $4A^2$, bazen 0, bazen de bunların aralarında değerler ve-



birler. Bunların zaman ortalamaları da $2A^2$ olur ki, bu da iki dalganın enerjilerinin basit toplamına karşı gelir. Böyle dalgalara *inkoherent* veya *dekoherent* denir.

Şimdi bir de ihtimal hesabına dayanan klasik istatistiksel fiziğin bazı kavramlarını ele alalım. Burada termodinamik denge durumundaki (yani tekdüze bir yoğunluk, basınç, sıcaklık dağılımı v.s. şartlarında) birçok mikroskopik parçacığın davranışı ile ilgilenilir. Örneğin atmosferik basınç ve normal oda sıcaklığında ortaboy bir odada 10^{29} veya 10^{30} azot ve oksijen molekülü vardır ve bun-

lar gelişigüzel hızlarla hareket edip çarpışmaktadır. Moleküllerin uzayda dağılımları daha önce belirttiğimiz gibi tekdüzeliğe gayet yakındır. Hızları ise Maxwell-Boltzmann dağılımına uyar. Ortalama hız ses hızı civarındadır; bundan çok daha yavaş veya hızlı moleküller bulma ihtimali çabucak azalır. Kısacası bir azot molekülünü odanın belli bir (x,y,z) noktasında ve üç yönde (vx,vy,vz) hızlarında bulmanın bir *ihhtimal dağılımı* $P(x,y,z; vx,vy,vz)$ vardır. Bu ihtimaller basit şekilde toplanır. Sözgelimi belli bir parçacığın (hızı ne olursa olsun) odanın içinde olma ihtimali -tabii ki parçacık muhakkak oda içinde bir yerde olduğu için 1 değerindedir- odanın sol yarısında olma ihtimali ile sağ yarısında olma ihtimallerinin toplamına eşittir. Burada zımnen de olsa "objektif fiziksel gerçekliğin gözlemden bağımsız olduğunu", yani biz gözlesek de, gözlemesek de ilgilendiğimiz parçacığın iki taraftan belli birinde bulunduğunu, gözlemlerle sadece bu objektif gerçekten kendimizi haberdar edeceğimizi, fakat durumun "aslı" değiştiğimizi varsaymış oluyoruz.

Şimdi kuantum teorisine dönelim. Burada bilindiği gibi dalga-parçacık ayrımı ortadan kalkar. Işık dalgalarındaki $A(x,y,z)$ genliğinin aslında o noktada ışık parçacıkları (fotonlar) bulma ihtimali ile bir ilgisinin olduğu anlaşılır; buna karşılık elektronlar gibi "parçacıklar" da uygun şartlarda dalgalar gibi girişim olaylarına sebep olurlar. Bu girişime katılan genlik $\Psi(x,y,z,t)$ de elektronu bulma ihtimali hakkında bilgi taşır. Dalga-parçacık ayrımı artık ortadan kalktığı için bundan sonra A yerine hep Ψ sembolünü kullanacağız.

Artık kuantum mekaniğinin tuhaf-lıklarının kaynağını saptayabiliriz. $\Psi(x,y,z,t)$ klasik dalgalar gibi bir lineer dalga denklemi sağlamasına ve bu yüzden de süperpozisyon ilkesine uymasına rağmen "ele gelir" bir titreşimi temsil etmez; Ψ sadece bir *ihhtimal genliğidir*. Şimdi bunu açalım.

Ψ kuantum teorisinde kompleks sayı değerler alır. Nasıl $z=x+iy$ ($i^2=-1$) x ve y gibi reel ve sanal kısımlara sahipse, Ψ 'nin reel kısmı $Re\Psi$, sanal kısmı da $Im\Psi$ ile gösterilir. Her kompleks sayı gibi, Ψ 'nin de $Re\Psi-iIm\Psi$ şeklinde yazılan bir eşleniği Ψ^* vardır. Ψ 'nin reel ve sanal kısımları x ve y koordinatları gibi düşünülürse, bu iki boyutlu Ψ vektörümüzün "uzunluğunun karesi" $(Re\Psi)^2+$

$(\text{Im}\Psi)^2 = \Psi^*\Psi$ olacaktır. Bir parçacığı uzayda (x,y,z) noktasında bulma ihtimali işte bu $\Psi^*(x,y,z)\Psi(x,y,z)$ ifadesi ile orantılıdır. Bir çift yanklı girişim deneyinde ekranda görünen aydınlık saçaklar aslında orada parçacık bulunma ihtimalinin, yani $\Psi^*\Psi$ 'nin büyük olmasından kaynaklanır.

Peki, Young deneyini nasıl açıklayacağız? Bu deneyde tek bir foton frekansı, yani tek bir foton enerjisi kullanıldığı için $\Psi^*\Psi$ nerede büyükse oraya daha çok foton gelecek, her biri aynı miktarda enerji bırakacak ve aydınlık bir saçak oluşacaktır. Bu da eskiden yaptığımız gi-

bi A^2 'yi enerji dağılımı olarak yorumlamakla aynı sonucu verecektir.

Şimdi tuhaflık bunun neresinde diye sorabiliriz. Tuhaflık ihtimalle direkt ilgili olan $\Psi^*\Psi$ 'lerin değil, Ψ genliklerinin toplanmasında. Klasik dalgalarda gördüğümüz basınç, elektrik alan şiddeti, v.s. gibi yorumlanabilen genliklerin aksine, Ψ 'nin kendi başına bir yorumu yok. Öbür taraftan, bir dalga denklemi sağlayan, süperpoze edilen büyüklük ise ihtimal yoğunluğu olarak yorumlanabilen $\Psi^*\Psi$ değil, böyle bir yorum olmayan Ψ ! Klasik dalga fizikinde genliklerin toplanıp girişime yol açmaları da,

klasik istatistik mekanikte ihtimallerin girişimsiz olarak toplanmaları da bilinen şeyler. Burada yepyeni olan, ihtimal genliklerinin toplanıp bir cins "ihtimal girişimi" doğmaları.

Şimdi bu gözlemleri çift yankı deneyi çerçevesinde somutlaştıralım. Üst yanığı kapatırsak zamanla ekranda birer birer iz bırakan çok sayıda parçacık Şekil 2'de gösterilen dağılımı meydana getirirler. Bu dağılıma $P(\text{alt})$ diyelim. Aynı şekilde, alt yanığı kapatırsak $P(\text{üst})$ dağılımını buluruz. Bu dağılımların dikkatli incelendikleri zaman sürekli görünmediklerini, tek tek parçacıkların ekrana

Kuantum Teorisine Mucitlerinden İtirazlar

Cihan Saçlıoğlu

Fizik tarihinde bazen bir fikri ortaya atan insanların sonradan bunun getirdiği gelişmelerden memnun olmadıkları, veya orijinal fikirlerini başkaları tarafından benimsenmeyen bir çerçevede yorumlamakta ısrar ettikleri görülmüştür. Örnek olarak Newton'un girişim halkaları deneyini gerçekleştirmesine ve çeşitli renklerin dalga boyu oranlarını doğru olarak hesaplamasına rağmen dalga teorisini eleştirmesini, Faraday'ın kısmen kendi deneylerinden kaynaklanan Maxwell denklemlerini fazla matematiksel bulmasını, Maxwell'in ise denklemlerinden çıkan dalgaları illa da mekanik bir modelle açıklamak istemesini gösterebiliriz. Fakat Kuantum Mekanikine temel katkılar yapmış çok sayıda önemli fizikçinin sonradan teoriye çeşitli şekillerde cephe almaları özellikle dikkat çekicidir.

Enerji kuantumu fikrini 1900 senesinde ilk ortaya atan ve kendi adını taşıyan sabiti ölçerek fiziğe sokan Max Planck, Einstein'ın bu fikri bir doğru adım daha ileri götürerek fotonları ortaya atmasını 1913 senesinde bile hâlâ kabul edememişti. Teorideki sonraki gelişmelerle de fazla bir ilgisi olmadı.

Einstein'ın kuantum teorisinin şekillenmesine son derece önemli katkıları oldu: Foton kavramını ortaya attı. L. de Broglie'nin parçacık-dalga ikiliği fikrini destekledi, kuantum teorisi ile katıların özgül ısılarını hesapladı, Bose-Einstein özdeş parçacıklar istatistiğini geliştirdi, kuantum geçişlerine dayanan ve lazerlerin temel prensiplerini ortaya koyan bir makale yazdı ve hatta Max Born'a göre kuantum teorisinin ihtimaller cinsinden yorumunu bile ilk öneren kişi oldu. Buna rağmen 1928'den itibaren teorisinin aldığı son biçimi eleştirmeye başladı. Eleştirisi ilkönce teoride bir iç tutarsızlık bulmaya yönelikti; bu yöndeki eleştirileri özellikle Niels Bohr tarafından tatmin edici şekilde yanıtlanılmadığından. Bundan sonra kuantum teorisinin deneysel yönden başarısızlığı bulunmasa da veya bir iç tutarsızlığı olmasa da eksik bir teori olduğunu ve "objektif gerçeklik" felsefi görüşüne uyan başka bir

teori içinde yer alacağını iddia etti. Böyle yeni bir teori bulmaktaki gayretleri sonuç vermese de eleştirileri, özellikle de meşhur Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) makalesi, kuantum teorisinin şaşırtıcı yanlarını açıkça sergilemek bakımından çok yararlı oldu.

Louis de Broglie meşhur $E = h\nu$ (parçacık enerjisi eşittir Planck sabiti kere dalga frekansı) ve $p = h/\lambda$ (parçacık momentumu eşittir Planck sabiti bölü dalgaboyu) denklemlerine yeni bir yorum getirdi. Einstein ve Compton bu denklemleri "sağdan sola okuyarak" ν ve λ ile tarif edilen ışık dalgalarına E ve p gibi parçacık özellikleri atfetmişlerdi. L. de Broglie bu defa aynı denklemleri "soldan sağa okuyarak" bu defa enerji ve momentumu belli olan elektron gibi parçacıklara bir frekans ve dalgaboyuna sahip dalgalar bağladı. Davisson ve Germer'in deneyleri bu dalgaların girişime sebep olacak kadar gerçek olduğunu gösterdi. Bu dalgalar kuantum teorisinin Kopenhag yorumunda da yer aldığı halde, de Broglie farklı, "pilot dalga" dediği bir yorum ileri sürdü. Bunun ilk şekli Wolfgang Pauli ve başkaları tarafından şiddetle eleştirildi; fakat David Bohm 1950'lerde pilot dalga kavramını içeren, ama aynı zamanda yerel olmayan etkileşimler içeren bir teori geliştirebildi. Bu teori şu anda fizikçilerin büyük çoğunluğunca kabul görmüş değil.

Kuantum mekaniğinin temel dalga denklemini yazan Erwin Schrödinger de sonraki yorumları kabullenemeyenler arasındadır. Schrödinger Ψ 'nin uzayda gerçek anlamda yayılmış bir yoğunluğu (örneğin elektrik yükü) temsil ettiği görüşünde idi. Örnek olarak tek boyutlu bir "kutuya" konulmuş, yani $0 \leq x \leq L$ arasına hapsedilmiş bir parçacık için Schrödinger denklemini çözersek, aynen iki uç sabit tutulan bir teldaki dalga şekillerini buluruz: en alt enerjili dalga fonksiyonu iki uç arasına yarım bir dalga, bir sonraki tam bir dalga, daha üstü birbuçuk dalga görünümündedir. Schrödinger parçacığın noktasal olmayıp kutu içinde bu dağılımlara uygun bir şekilde "sıvıyağı" görüşünde idi. Kopenhag yorumunda ise yeri arandığı zaman par-

çacık her seferinde belli noktalarda bulunacak, bu noktaların toplamı $\Psi^*\Psi$ 'ye karşı gelecektir. Bohr ve diğer Kopenhag ekolü fizikçileri Schrödinger'e görüşünün özellikle birden fazla parçacık içeren problemlerde savunulamaz olduğunu kabul ettirdiler, zira iki parçacıklı bir problemde altı boyutlu bir uzay ortaya çıkıyor ve yük gibi gerçek bir fiziksel dağılımın böyle bir uzayda anlamı kalmıyordu. Sonuçta Schrödinger teoriden (gelişmesine katkıda bulunduğu pişman olduğunu söyleyecek kadar!) soğudu. Bundan sonra o da Einstein gibi teorisinin "mantıksızlığını" çarpıcı biçimde ortaya koyacak örnekler aramaya koyuldu. 1935'de ortaya koyduğu "Schrödinger'in kedisi" adı ile anılan düşünce deneyi bunların en ünlüsüdür.

Schrödinger'in Kedisi:

Sağlıklı bir kediyi hava alabilen bir kutunun içine koyalım. Kutuda bir zehirli gaz şişesi bulunsun ve bu gazın şişeden salınmasını sağlayacak mekanizma, bozunma yarı ömrü 1 saat olan bir radyoaktif parçacık ile kontrol edilsin. Bu mikroskobik parçacığın davranışını ancak kuantum mekaniği ile ifade edebiliriz, fakat şimdi makroskobik bir sistem olan kedinin kaderi de artık parçacığın davranışına bağlanmış oluyor. Schrödinger'in iddiasına göre 1 saat sonunda kedinin canlı ve ölü olma ihtimalleri eşit olduğundan, dalga fonksiyonu

$\Psi(\text{kedinin durumu}) = \Psi(\text{canlı kedi}) + \Psi(\text{ölü kedi})$ şeklinde olmalı. "Bertlemanın çorapları" hikâyesinin kuantum teorisinde ne şekil aldığını hatırlayalım: Yukardaki denkleminin anlamı da "ya bozunma oldu ve kedi öldü, ya da olmadı ve kedi hayatta" gibi objektif iki ihtimali ifade etmekten ibaret değil. Schrödinger'in analizi doğru ise, kuantum teorisi (birisi bakıp durumu bu iki seçeneğe birine indirgeyene kadar) kedinin iki durumunun yanyana bulunduğunu söylüyor. Schrödinger bu kadar mantığa zat bir teorisinin düzeltilmeye muhtaç olduğu sonucuna varıyor. Buna karşılık birçok fizikçi (Hawking, Gell-Mann ve başkaları) bu problemin yapay olduğu görüşündeler.

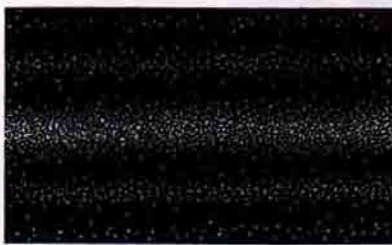


vurmalarından gelen bir granüler yapı gösterdiklerini vurgulayalım.

Şaşırtıcı olan, iki yarığı da açık bırakırsak elde edeceğimiz $P(\text{alt}+\text{üst})$ dağılımının $P(\text{alt})+P(\text{üst})$ olmamasıdır! $P(\text{alt}+\text{üst})$ dağılımı bilinen çift yarıklık-karanlık saçaklar dizisini vermektedir; bunun sebebi de $\Psi(\text{alt})$ ve $\Psi(\text{üst})$, yani alt ve üst yarıklardan ekrana ulaşan genlikler arasındaki girişimdir. Kabaca $P(\text{alt})=\Psi^*(\text{alt})\Psi(\text{alt})$ ve $P(\text{üst})=\Psi^*(\text{üst})\Psi(\text{üst})$ dersek, $P(\text{alt}+\text{üst})=(\Psi^*(\text{alt})+\Psi^*(\text{üst}))(\Psi(\text{alt})+\Psi(\text{üst}))$
 $=P(\text{alt})+P(\text{üst})+\Psi^*(\text{üst})\Psi(\text{alt})+\Psi^*(\text{alt})\Psi(\text{üst})$ (1) buluruz. Son iki terim -ki bunlar önce genliklerin toplanıp, sonra karelerin alınmasından gelmektedir- girişimin kaynağıdır ve bunların kendi başlarına birer ihtimal olarak yorumlanmaları mümkün değildir.



Şekil-2 a) Üst yarığın kapatılması ile elde edilen $P(\text{alt})$ dağılımı ekranda alt yarığın karşısına gelen noktalardan oluşur. $P(\text{üst})$ de, üst yarığın karşısına düşen benzer bir dağılımı verir.



Şekil-2 b) İki yarığın açık olması ile elde edilen $P(\text{alt} + \text{üst})$ dağılımında ekrandaki noktalar aydınlık ve karanlık saçaklar oluştururlar. $P(\text{alt} + \text{üst})$, $P(\text{alt})$ ve $P(\text{üst})$ 'ün toplamına eşit değildir.

Bu noktada "Ne yapalım, madem bu teori deneyle uyuyor, teoriyi öğrenip uygulamaktan başka çaremiz yok" diyerek konu üzerinde daha fazla kafa yormamaya karar verebiliriz. Birçok fizikçinin yaptığı budur, bunda da yanlış bir şey yoktur. Buna karşılık, aralarında kuantum teorisinin oluşmasına en temel katkıların bazıları yapmış Planck, Einstein, de Broglie ve Schrödinger de bulunan bir çok fizikçi, teorisinin deneysel başarılarını reddetmemekle beraber, son şekilden rahatsız olmuşlardır. Burada bu rahatsızlığın kökenlerini ortaya çıkarmaya çalışacağız.

Einstein önce kuantum mekaniğinin tutarsızlığını ispat etmeye uğraştı, fakat Bohr'un başını çektiği Kopenhag ekolü fizikçileri çeşitli itirazlarına tatmin edici cevaplar verdiler. Bunun üzerine Einstein eleştirilerini teorisinin "objektif gerçeklik veya realizm" kavramları ile çelişir gözükmesi ve relativite teorisinin ruhuna uymaz görünen "ani, hayaletvari, yerel olmayan etkileşmeler" içermesi noktalarında yoğunlaştırdı. Böylece teorisinin tutarlılığını ve deneysel yönden başarılı olduğunu kabul ediyor, fakat sağduyuya aykırılığından dolayı ancak geçici nitelikte bir teori olabileceğini iddia ediyordu.

Einstein'in itirazlarını çift yarıklık deneyi çerçevesinde tartışabiliriz. İki yarıklık birden açık olduğu zaman elde edilen sonuç, yani $P(\text{alt}+\text{üst})$ girişim saçaklarının, $P(\text{alt})+P(\text{üst})$ sonucunda eşit olmaması, "parçacık aslında biz baksak da bakmasak da ya alttan ya da üstten geçti" şeklindeki çok mantiki görünen "objektivist" veya "realist" felsefi tutumun kuantum mekaniğine, ve daha beteri, tabiatın davranışına ters düştüğünü göstermektedir. Kuantum mekaniği ile sağduyumuz arasında bir problem olabilir ama tabiatla kuantum mekaniği arasında bir problem görünmemektedir.

Şimdi bu eşitsizliğin nereden doğduğuna tekrar bakalım. Gördüğümüz gibi, bunun kaynağı (1) denkleminin sağ tarafındaki son iki terimdir. Bunlar parçacığın alttan ve üstten geçme ihtimal genlikleri arasında bir girişim ifade etmektedir. Fakat fiziki olarak birbirleri ile girişim

şeyler nedir? Akla şöyle bir cevap gelebilir: "Deneyde herhalde bir parçacık akışı vardır ve etkileşenler aynı anda biri üst, biri alt yarıktan geçen iki parçacıktır." Bu yanıtın yanlış olduğunu deneyi aşağıdaki gibi yaparak gösterebiliriz. Deney aletlerimizden 10,000 tane üretelim ve deneyi dünyanın tamamen farklı yerlerinde ve farklı zamanlarda tekrarlayalım, yalnız bunların her birinde sadece bir tek parçacık ekrana ulaşınca deney dursun. Her ekranda farklı ve gelişigüzel gibi görünen yerlerde bir tek noktasal iz göreceğiz; fakat bu ekranlar üstüste konulursa noktasal izlerin toplamı çift yarıklık girişim saçaklarını ortaya çıkaracak (buna benzer deneyler gerçekten yapılmıştır). Her deneyde birtek parçacık kullanıldığına göre, bir anlamda parçacığın kendisi ile girişim yaptığını kabullenmek zorundayız. Böylece iki yarıklık da açık olunca birtek parçacık için bile "hangisi olduğunu bilemesek de iki yarıktan birinden geçti" görüşü geçerli değil. Ayrıca Einstein'ı rahatsız eden "iki ayrı bölge arasında hayaletvari etkileşme" de iki yarıklık arasında gerçekleşmiş görünüyor. Okuyucunun aklına gelebilecek bir soruyu yanıtlayalım: Bu "etkileşme" ile fiziki bir sinyal gönderilmesine kuantum mekaniği izin vermiyor; yani relativite teorisine bir çelişki yok.

Kuantum Teorisinin ve Kopenhag Yorumunun Ana İlkeleri

Şu sırada dünyanın her yerinde standart bir kuantum mekaniği dersinde Niels Bohr'un lideri olduğu Kopenhag ekolünün aşağıda özetlenen ilkeleri öğretilmektedir:

(I) Makroskopik fiziksel sistemler klasik fizik kuramları ile, mikroskopik sistemler ise kuantum fiziği kanunları ile tasvir edilir. Genelde gözlemler için kullanılan deney aletleri makroskopik boyutta olduğu için, bunların klasik fiziğe uydukları kabul edilir.

Burada "mikroskopik" ve "makroskopik" bölgeler arasında kesin, kantitatif bir sınır belirlenmemiştir. Yalnız Bohr'un "correspondence" prensibi kuantum sayıları büyüdükçe kuantum davranışın klasik yasalarla gitgide daha iyi uyduğunu öne sürer.

(II) Bir mikroskopik sistemin her fiziksel durumuna (klasik mekanikte bir parçacığın durumu pozisyon ve momentumunun değerlerini vererek belirlenir) karşı gelen bir dalga fonksiyonu Ψ vardır. Bu dalga fonksiyonu

sonsuz boyutlu bir uzayda (Hilbert uzayı) bir vektör olarak düşünülebilir. Bu vektör yapısı daha önce gördüğümüz iki boyutlu (reel ve sanal eksenler) vektör özellikleri ile karıştırılmamalıdır.

(III) $P=\Psi^*(x,y,z)\Psi(x,y,z)$ parçacığın uzayda (x,y,z) noktasında bulunma ihtimali ile orantılıdır. Parçacık uzayda bir yerde bulunduğu için bütün ihtimaller toplanınca, yani P bütün uzay üzerinden entegre edilince sonuç 1 çıkmalıdır. Böyle bir Ψ dalga fonksiyonuna "normalize edilmiş" denir.

(IV) Klasik fizikteki enerji, momentum, açısal momentum gibi değişkenler kuantum fiziğinde (II)'de bahsedilen sonsuz boyutlu vektörler üzerine etki eden (sonsuz x sonsuz) matrisler halini alırlar. Deneylerde ölçülen enerji, açısal momentum v.s. değerleri bu matrislerin özdeğerleridir (eigenvalue).

Bir örnek olarak açısal momentumun z-bileşeni L_z 'ye karşı gelen sonsuz mat-

risi düşünelim. Bir ölçüm L_z 'nin m gibi belli bir değerini veriyorsa, fiziksel durum bu özdeğere karşı gelen bir Φ_m ile verilmektedir; Φ_m vektörü L_z 'nin bir özvektörüdür. Bu durumda lineer cebirdeki gibi

$$L_z \Phi_m = m \Phi_m \quad (2)$$

bir özdeğer denklemi geçerlidir.

(V) K enerji, açısal momentum v.s. gibi bir fiziksel değişkene karşı gelen sonsuz bir matrisi, Ψ_n bir öz dalga fonksiyonunu, k_n de K 'nin (sistem Ψ_n durumundayken) özdeğerini temsil etsin. Dalga fonksiyonlarının süperpoze edilebileceklerini daha önce görmüştük; bu ilkeyi kullanarak

$$\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2 + c_3 \Psi_3 + \dots \quad (3)$$

şeklinde yeni bir dalga fonksiyonu meydana getirebiliriz. Buradaki c_1, c_2, c_3, \dots kompleks katsayılardır. Ψ normalize edilmişse, sistem Ψ durumunda iken K değişkeninin değeri ölçüldüğünde k_n değerinin bulunması ihtimali $c_n^* c_n$ ile

verilir. Teknik bir nokta: Farklı n 'ler için Ψ_n 'lerin birbirlerine "dik" olduklarını varsayıyoruz.

(VI) Bir önceki maddedeki ölçüm k_n sonucunu verirse, bundan sonra dalga fonksiyonu Ψ_n haline gelmiştir; yeni çözümler artık kesinlikle k_n sonucunu verecektir. Dalga fonksiyonunun böyle bir ölçümle Ψ 'den Ψ_n 'e dönüşmesine "dalga fonksiyonunun yıkılması veya indirgenmesi" (collapse of the wave function) denilir.

(VII) Enerjiye karşı gelen H matrisinin dalga fonksiyonunun zaman (t) içinde değişimini belirlemek gibi özel bir rolü vardır. Bu

$$i\hbar (\partial\Psi/\partial t) = 2\pi H\Psi \quad (4)$$

şeklindeki Schrödinger denklemi ile ifade edilir. Burada $i^2=-1$, \hbar = Planck sabitidir. Daha önce belirtildiği gibi, denklemde Ψ gerçekten lineer olarak yer almaktadır ve bu, çözümlerin süperpozisyonunu mümkün kılar. İlkeleri böylece

Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) Makalesi, Bell Teoremi ve Aspect'in Deneyleri

Cihan Saçlıoğlu

1935'deki meşhur EPR makalesininin ana fikrini David Bohm'un değiştirdiği şekilde (EPRB) anlatalım. Bunun için ilk önce bir parçacığın yörüngesel hareketinden bağımsız olarak sahip olduğu "spin" açısal momentumu hakkında bazı noktaları açıklamalıyız:

(i) Deneysel olarak bir parçacığın spini ile ilgili sadece iki büyüklüğü tutarlı olarak ölçebiliriz: spinin herhangi bir eksen (z diyelim) boyunca izdüşümü S_z 'yi ve spin vektörünün boyunun uzunluğunun karesi $S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 = S^2$ 'yi. (Tabii burada bir deney bize hemen bir büyüklüğün karesini vermiyor ama bunu ölçümlerden dolaylı olarak bulabiliriz).

(ii) S_z için deneysel olarak $\hbar/2\pi$ 'nin yarım veya tam sayı katlarında değerler bulunur; bu yüzden artık $\hbar/2\pi$ katsayısını açıkça yazmayacağız.

(iii) S^2 de s yarım veya tamsayı olmak üzere $s(s+1)$ değerlerini alır. Bir yukardaki anlayışla, $(\hbar/2\pi)^2$ faktörünü açıkça belirtmedik. Bir π mezonu için $s=0$, bir elektron için $1/2$, bir foton için 1 değerlerindedir; $s=2$ veya $5/2$ ve daha yüksek spinli parçacıklar da vardır.

(iv) S_z ancak $s, s-1, s-2, \dots, 1-s, -s$ şeklindeki $(2s+1)$ değerden birini alabilir.

Burada şunu vurgulamalıyız. Yukardaki sonuçlar kuantum teorisi ile uyum içindedir, fakat Bu teoriyi hiç bilmeden yapılacak dikkatli deneyler de bu sonuçları verecekti; yani teoriyi kavramsal bir giriş olarak tartışmamıza katmış değiliz. Artık EPRB "deneyini" ele alabiliriz.

Spini olmayan, yani $s=0$ özelliğinde bir parçacık düşünelim; ayrıca bu iki eşit kütleli $s=1/2$ parçacığa bozunabilir. İlk parçacık hareketli olsun. O zaman momentum korunumu dolayısı ile iki $s=1/2$ parçacığın zıt yönlerde eşit hızla hareket edeceğini biliyoruz. Ayrıca z eksenini herhangi bir yönde seçersek, toplam S_z de korunduğu için, sola giden parçacığın S_z değeri $+1/2$ ise, öbürünün de $-1/2$ çıkacağını kesinlikle biliyoruz. Eksenin yönünü değiştirecek, yeni bir z eksenine göre de iki sonucun (+ -)

veya (- +) çıkması kaçınılmaz. Böylece sol tarafta bir ölçüm yaparsak, bundan etkilenemeyecek bir konumda olan sağdaki parçacığın S_z değerini de belirlemiş oluyoruz.

Aslında buraya kadar tuhaf birşey yok gibi görünebilir. Hatta J.S. Bell bunu "Prof. Bertlemann'ın çorapları" adlı bir "kissa" ile karşılaştırarak gündelik terimlere tercüme ediyor. Bu profesör dalgın birisi ve her nedense her sabah bir ayağına kırmızı, öbürüne mavi çorap giyiyor. Profesörün bir duvarın arkasından geldiğini düşünelim. Duvarın bittiği yerde ilk göreceğimiz ayağında kırmızı çorap varsa, diğerinde mavi olacağı (ve bunun tersi) kesin. Üstelik herhalde hepimizin paylaştığı bir "objektiflik" veya "realizm" varsayımı var: Profesörün ayaklarını göremesek bile, örneğin sol ayağındaki çorap renginin gözlemimizden bağımsız olarak

belirlenmiş olduğundan pek şüphe etmiyoruz. İlk bakışta yukarıda anlatılan deneyde de soldaki S_z değerini $+1/2$ (veya $-1/2$) bulunca, sağdakinin ölçüm bile yapmadan $-1/2(+1/2)$ olması gerektiği Prof. Bertlemann'ın çorapları hikayesinden farklı görünmüyor.

Farklılık z ekseninin yönü değiştirilince kendini gösteriyor. Her iki tarafa da parçacıkların hareket yönüne dik birer düzlemde üçer yön seçelim. Soldaki yönlere z_1, z_2, z_3 ; sağdakilere ise z_1', z_2', z_3' diyelim. Soldaki birin-



Einstein ve Bohr, derin düşüncede

sıraladıktan sonra, şimdi birkaç açıklama yapalım.

(A) -Kuantum fiziğinde bir "indeterminizm" unsuru bulunduğu biraz da Einstein'ın meşhur "Tanrı'nın zar atmadığına eminim" sözü ile genellikle bilinir hale gelmiştir. Bu indeterminizm, yani belli bir hareket denklemi kullanarak geçmişteki şartlardan gelecekteki

deneyler için kesin bir sonuç çıkartamamak, (VII) numarada değindiğimiz Schrödinger denkleminde gelmemektedir. Aksine, bu denklem tamamen deterministik yapıdadır. Dalga fonksiyonunun zaman içindeki bu sürekli evrimine R.Penrose (J.von Neumann'dan farklı bir terminoloji kullanarak) U-süreci adını veriyor. Deterministik olmayan ise

(VI)'da adı geçen "dalga fonksiyonunun indirgenmesi" sürecidir; Penrose bunu ise R-süreci diye adlandırır. Önemli bir nokta, U-sürecinin kuantum teorisinin vazgeçilmez bir temel taşı ol-

masına rağmen, R-sürecinin Kopenhag dışı yorumlarda gerekli olmadığıdır.

(B) Şu anda bağlantı aşıkardır olmasa da, Kopenhag yorumunda (I) numaralı maddede değindiğimiz "deney aletlerinin makroskopik ve klasik fiziğe tabi olmaları" da (A)'daki meselelerle ilgilidir ve başka yorumlarda biraz farklı şekilde ele alınmaktadır.

(C) Yukarıda anlatılan bütün teorik yapı, Kopenhag yorumunda tek bir kuantum sistemi (atom, elektron, çekirdek, v.s.) hakkında değil, birbirinin kopması olan bir özdeş sistemler koleksiyonu (ensemble) hakkında bilgi vermektedir. meselâ (V) madesindeki açılımda $\Psi = 3/5 \psi_1 + 4/5 \psi_2$, $c_3 = c_4 = c_5 = \dots = 0$ olsun. O zaman 1,000,000 sistemi Ψ durumuna koyar, sonra da herbirinde K değişkeninin değerini ölçersek, ortalama olarak 360,000 defa k_1 , 640,000 defa da k_2 değerini bulacağız, çünkü $(3/5)^2 \times 1,000,000 = 360,000$ 'dir.



Alain Aspect

John Bell



ci (ikinci, üçüncü) eksen sağdaki birinci (ikinci, üçüncü) eksene paralel olsun. z_1 ve z_2 , z_2 ve z_3 , z_1 ve z_3 arasındaki açılara sırası ile θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} diyelim.

Şimdi soldaki parçacığın S_z 'sini (z_1 , z_2 , z_3) yönlerinden birisi boyunca ölçerken, sağdaki-ninkini de bundan bağımsız olarak gelişigüzel seçtiğimiz (z_1' , z_2' , z_3') yönlerinden herhangi birisi boyunca ölçelim. Bu deneyi binlerce defa tekrarlırsak örneğin " z_1 yönünde $+1/2$, z_2' yönünde $+1/2$ sonucunun bulunma ihtimali" $P(z_1=+, z_2'=+)$ hakkında deneysel bir değer elde edebiliriz. Daha önce söylediklerimizden $P(z_1=+, z_1'=+) = P(z_2=+, z_2'=+) = P(z_3=+, z_3'=+) = 0$ ve $P(z_1=+, z_1'=-) = P(z_2=+, z_2'=-) = P(z_3=+, z_3'=-) = 1$ olması gerektiği bellidir.

"Objektif, yani gözlemden bağımsız gerçeklik" varsayımı doğru ise, deneyi binlerce defa tekrarlarlarken solda ve sağda çeşitli S_z değerlerinde bulunan parçacık oranlarını şöyle ifade edebiliriz: örneğin $f(+ - +; - + -)$; yani " z_1 yönünde $+1/2$, z_2 yönünde $-1/2$, z_3 yönünde $+1/2$ değerlerini bulma ihtimali", 0 ile 1 arasında belli bir sayıya eşit olmalı; $f(+ - +; + + -)$ ise muhakkak sıfır bulunmalı. Önce gördüğümüz

gibi S_{z_1} (+) ise, S_{z_1}' değerinin (+) olamaması açısal momentum korunumundan ve toplam S_z 'nin başta sıfır olmasından kaynaklanıyor. Aynı sebepten dolayı $f(- + +; + + -)$, $f(- - -; + + -)$, v.s. de sıfır olmak zorunda.

Artık şu ilişkileri yazabiliriz:

$$P(z_1=+, z_2'=+) = f(+ - +; - + -) + f(+ - -; - + +), \quad (1.a)$$

$$P(z_1=+, z_3'=+) = f(+ + -; - + -) + f(+ - -; - + +), \quad (1.b)$$

$$P(z_3=+, z_2'=+) = f(+ - -; - + -) + f(- + -; + + -). \quad (1.c)$$

Bütün f 'lerin pozitif olduğuna (oran oldukları için) ayrıca (1. a) ve (1. b) 'nin ikincisi, (1. a) ve (1. c)'nin birinci terimlerinin birbirlerine eşitliğine dikkat edelim. Öyleyse

$$P(z_1=+, z_2'=+) \leq P(z_1=+, z_3'=+) + P(z_3=+, z_2'=+) \quad (2)$$

sonucu çıkar. Bu meşhur Bell eşitsizliğinin bir özel halidir. Buraya kadar kuantum teorisine değil, sadece açısal momentum korunumu ve "objektif ihtimallerin toplanması" ilkelerini kullandık. Yapılacak iş, (2) neticesini deney ve kuantum teorisine karşılaştırmak. Alain Aspect grubunun deneylerinin sonuçları "sağduyu" açısından gayet şaşırtıcı. Bell eşitsizliği, yani (2), deneye uymuyor. Örneğin deneyde $\theta_{12} = 120^\circ$, $\theta_{13} = \theta_{23} = 60^\circ$ seçilirse (z_3 eksenini z_1 ve z_2 'nin tam arasında alınırsa), kuantum mekaniği ve deney (ölçme hassasiyeti dahilinde) $P_{12} = 3/8$, $P_{13} = P_{23} = 1/8$ değerlerinde anlaşılıyorlar. Öte yandan, 3 sayısı 1 + 1'den küçük olmadığına göre (2) denklemi bu değerlerce sağlanmıyor! Açısal momentum korunumu gibi gayet temel, deneyle doğrulanmış bir fizik ilkesinden vazgeçilemeyeceğine göre (zaten vazgeçersek Bell eşitsizliği de tamamen değişecek), çok temel gibi de görünse "gözlemden bağımsız fiziksel gerçeklik", yani "objektivite/realizm" varsayımımızdan vazgeçmemiz gerekiyor.

Aslında objektiviteyi bir başka çok sevimsiz bedel karşılığında kurtarmak mümkün; bunu sağlayan teori D. Bohm tarafından geliştiril-

di. Soldaki ve sağdaki parçacıkların hemen bozunma anında objektif spin durumlarına yerleşip etkileşmeyi kesmeleri yerine, (aralarındaki relativiteye göre sinyalleşmeye izin vermeyen mesafeye karşı) relativite dışı, yerel olmayan (non-local) etkileşmelerde bulunmalarına izin verilirse, deneye uyan bir sonuç elde etmek mümkün. Fakat böyle etkileşmeleri hatırlatan ilişkilerin kuantum teorisinde bulunması (kimse bu yolla ışık hızından daha hızlı mesaj gönderilebileceğini iddia etmiyor, o yüzden kuantum teorisinde bunlar gerçek bir etkileşme değil, fakat Bohm teorisinde gerçekten bu hale geliyorlar) başta Einstein'ı özellikle rahatsız eden ve EPR makalesini yazmaya yönelten unsurdur.

Özet olarak, deneyler tabiatın bizim sağduyumuza değil, kuantum mekaniğine uyduğunu gösteriyor. Bertlemann'ın çorapları hikayesine dönersek, bu, Profesör duvarın arkasında iken çoraplarının renklerinin gözlemden önce belirlenmediği; örneğin sol ayakta mavi ve kırmızı çorap bulma ihtimallerinin henüz bir sonuca ulaşmamış şekilde birlikte canlı bulunduğu, belirli bir rengin ancak gözlemcinin müdahalesi ile ortaya çıktığı şeklinde inanılmaz bir tasvire karşı geliyor.

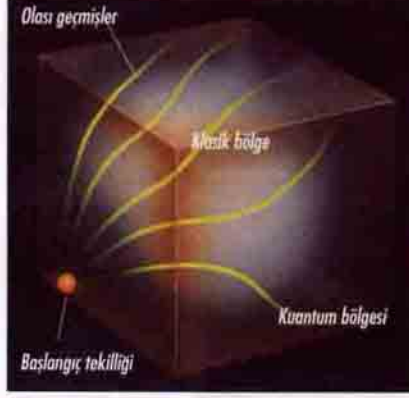
Belki bu noktada neden Bohr'un Prof. Bertlemann gibi makroskopik sistemleri kuantum teorisinin dışında tutmak istediğini daha iyi anlayabiliriz. tabii bu da klasik/kuantum tasvirler arasında çizginin nerede ve nasıl çekileceği cinsinden sorulara yol açıyor. Bunları yanıtlamaya çalışan H. Everett, M. Gell-Mann, J. Hartle ve R. Penrose gibi fizikçilerin ortaya koydukları "çözüm yolları" ise ya felsefi yönden daha da şaşırtıcı görüşler içeriyorlar, ya da kesin bir çözüm getirecek kadar geliştirilmiş değildir.

Çeşitli Yorumlar ve Bunların Eleştirileri

Kopenhag Yorumu:

Daha önce belirttiğimiz gibi, standart Kopenhag yorumunda gözlenen mikroskopik sistemler için kuantum teorisinin, makroskopik gözlem aletleri için ise klasik fiziğin geçerli olduğu varsayılır. Bu teori ve yorum uygulandığı bütün atomik, moleküler, çekirdek fiziği vs. gibi problemlerde deneyle tam bir uyum içinde. Buna karşılık, Bohr'un da açıkça "Objektif kuantum gerçekliği diye birşey yoktur, sadece bir kuantum tasviri vardır" şeklinde ifade ettiği görüşü pek tatmin edici bulmayan ünlü fizikçiler uzunca bir liste meydana getiriyor. Eleştiriler ayrıca genellikle iki nok-

ta üzerinde yoğunlaşmakta: (I) madde-sinde kullanılan mikroskopik-makroskopik sistemler ayrımı nasıl daha belirli hale getirilebilir? Makroskopik sistemler için uygun olan klasik fizik kanunları kuantum teorisinden nasıl çıkartılır? Klâsik ve kuantum teori arasında belirli



bir sınır noktası var mıdır, varsa nerededir? (VI) maddesindeki "dalga fonksiyonunun indirgenmesi" (R-süreci) mekanizması belirsizlikler içermekte, ayrıca da üzerinde epeyce durduğumuz "objektif gerçeklik" kavramının kuantum seviyesinde ortadan kalkmasına yol açmaktadır.

Everett Yorumu:

Hugh Everett'in 1957'de ortaya attığı bu yorumda temelde makroskopik-mikroskopik ayrımı yapılmadan herşeyin davranışı Schrödinger denklemini sağlayan bir dalga fonksiyonu ile, yani kuantum kanunları ile ifade edilmektedir. Böylece üzerinde gözlem yapılan atomik sistem de, gözlem sonuçlarını kaydedecek "makroskopik" aletler de, biz de kocaman bir dalga fonksiyonu

Kuantum Kozmolojileri

Tekin Dereli
ODTÜ Matematik Bölümü

Bir bilim dalı olarak kozmolojinin amacı evrenin büyük ölçekli yapısını gözlemlerle belirlemek, bu gözlem sonuçlarını bilinen fizik yasalarıyla açıklamaktır. Kapsamı geniş ve bilgi sınırlarımızı zorlayan bir konu olduğu açık. Nedenleri: 1) Gözlem ufkumuzun sınırlı oluşu. Evrenin pek küçük bir bölgesini gözlemleyebildiğimizden kuşku yok. 2) Bu kapsamda bile yeryüzünde bulunup, deneylerle kanatlanmış fizik yasalarını geçerlilik sınırlarının en ucundan da öteye genişletmek zorundayız. Konumuz olmayan gözlemsel kozmolojiyi bir yana bırakırsak kuramsal kozmolojinin ana uğraşı kısıtlı bir veri tabanından hareketle, olabildiğince az sayıda varsayım yaparak, olabildiğince çok gözlemlerle kanıtlanabilir öngörü elde edilebilir. Kozmolojinin temel varsayımları nelerdir? kısaca tartışalım.

1) Evren üç boyutlu bir metrik afin uzaydır.

2) Relativite teorisindeki nedensellik ilkesini sağlayan bir zaman değişkeni ile evrenin evrimi tarif edilebilir.

4) Evrendeki madde dağılımı "büyük" ölçekte homojen ve izotropiktir.

Biz bu son varsayıma "Kozmoloji İlkesi" adını vermekteyiz. Bu ilkeyi açıklamak gerek. Çünkü evren daha küçük ölçeklerde hiç de homojen bir yapıda değildir. Uzayda yıldızlar, yıldız takımları ve galaksiler gibi büyük boşluklarla ayrılmış çeşitli boy ve şekillerde kütle yoğunlaşmaları görülmektedir. Böylesine karmaşık bir madde dağılımını anlaşılır kılmak için idealleştirilmeye gidiyoruz: Evreni tüm uzaya düzgün olarak dağılmış hareketli nokta parçacıklardan oluşmuş kabul ediyoruz. Güneş site-

mimizdeki bir gözlemci, bu yaklaşımla uzayı hangi yönüne bakarsa baksın aynı dağılımı algılamaktadır. (izotropluk=yönden bağımsızlık). Güneş sistemimizin uzayda özel bir konumu olmadığını biliyoruz. Öyleyse izotropluk, uzayda herhangi bir diğer gözlemci için de doğru olmalıdır. Bu ise evrenin homojenliği demektir. Ancak dinamik bir evrenin homojenliğini tanımlamak, statik bir evrenin homojenliğinden çok daha zordur. Homojenliği kısaca, uzayın bir alt bölgesindeki madde dağılımının herhangi diğer benzer bir alt bölgesindeki dağılıma eşdeğer olması diye tanımlasaydık aklımıza hemen "ne zaman?" sorusu gelecekti. Örneğin, Güneş sistemimizde gözlenen madde dağılımının zaman içinde aynı kalmadığını bilmekteyiz. Bu durumda homojenlik tanımını şöyle yapacağız: Bir gözlemcinin evrensel gözlemlerinin tümünün oluşturduğu küme, diğer bir gözlemcinin evrensel gözlemlerinin kümesine eşdeğerdir. Bu tanımın en önemli sonucu, bir kozmik zaman ölçeğinin varlığını gerektirmesidir. Kozmolojik ilke ile beraber kozmik zamanın varlığını kabul ettiğimizde, dört boyutlu uzay zamanın metriği belirlenmiş olur. Bu metrik hem Newtonsal, hem de relativistik kozmoloji modellerinin inşasında kullanılabilir. Uzayın genişleme faktörü $R(t)$, modeli belirleyen alan denklemlerinin çözümüyle bulunacaktır. Ancak $R(t)$ 'nin kendisi gözlemlerle ölçülemez. Gözlenen parametreler R ve R 'nin türevlerinin bugün ölçülen değerleri cinsinden bulunurlar: R'/R Hubble parametresi ve $-RR''/R'^2$ ivme parametresi ilginçtir.

Genel relativite teorisinde gravitasyon alanlarının sağladığı Einstein denklemlerinin kozmolojik çözümleri dehe 1921'de Rus matematikçisi Alexander Friedman tarafından bulunmuştur. Friedman modelleri diye bilinen bu kozmolojik çözümlerin tümünde evren evrimine $t=0$ başlangıç anındaki gerçek bir uzay-zaman tekilliğinden başlamaktadır. Kapalı uzaylar, belli bir zaman sonunda büzülmeye başlayarak tekrar bir uzay-zaman tekilliğine ulaşacaklardır. Açık uzaylar ise, sonsuza kadar gen-

leşmelerini sürdüreceklerdir. Amerikalı astrofizikçi Edwin Hubble'in gözlemleri, 1930'larda düze çok yakın bir genişleyen evrende yaşadığımızı ortaya koydu. Friedmann ve Hubble'dan çok daha sonra 1970 yılında İngiliz fizikçileri Roger Penrose ve Stephen Hawking; uzay-zaman tekilliklerinin, madde dağılımı üzerine çok genel ve makul varsayımlar altında Einstein teorisinin kaçınılmaz bir sonucu olduklarını kanıtlamışlardır. Başlangıç tekilliğinde madde yoğunluğu sonsuza gitmektedir. Bu davranışın yorumu, evrenin bir başlangıç anında bir noktadan patlayarak genişlemeye başladığı ve çeşitli evrim fazlarından geçerek bugün gözlenen genişleyen evren fazına ulaştığıdır. Evrenin zaman içerisinde evrimi hangi fazlardan geçmiştir? Standart kozmogoni modeline göre erken evrim fazlarında evren ışınla doluyken daha sonra madde ile dolmuş ve daha yavaş genişlemeye başlamıştır. 1970'de gözlenen 2.7°K 'lik evrensel fon ışıması, bu senaryonun kanıtı olmuştur. Ancak senaryonun olası daha da erken fazlarında, temel parçacık fiziğinin öngörülerine uygun olarak bazı değişiklikler yapmak gerekmiştir. Son yıllarda, evrenin önce sir üstel genişleme fazından geçerek, bilinen Friedmann fazlarına ulaştığı kabul edilmektedir. Bu tür senaryolara enflasyonel modeller adı verilir. Böylece evrenin yapısını anlamaya yönelik, yani 10^{28} cm mertebesinde gözlemlerle uğraş veren astrofizik ve kozmoloji ile temel parçacıklar ve etkileşme kuvvetlerini anlamaya yönelik, yani 10^{-23} cm mertebesinde gözlemlerle uğraş veren yüksek enerji fiziği aynı bir konu üzerinde birleşmiş oluyorlar. Kuramsal kozmoloji modelleri evrenin evrim senaryolarını oluşturmak için parçacık fiziğinin son buluşlarından esinleniyor. Yüksek enerji fizikçileri ise, hızlandırıcı deneylerinde kanıtlanmaları yakın bir gelecekte olanaksız gözükken büyük birleştirme teorilerinin gözlemsel kanıtlarını kozmolojide arıyorlar. Parçacık fizikçilerinin araştırmaları pek çok ilginç soruyu gündeme getirdi.

içinde zaman evrimimizi (4) denkleminin göre yaşamaktayız. Bu, (3)'deki gibi ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 vs'nin süperpose edilmesinden elde edilmiş olabilir. Bir ölçüm yapıp belli bir sonuç çıkması artık dalga fonksiyonunun indirgenmesi, yani R-süreci ile ilgili değil. Bizim deney aletleri ile belli bir sonucu bulmamız dalga fonksiyonu içindeki terimlerden sadece birine, örneğin ψ_3 'e karşı geliyor. Bir başka terimdeki, örneğin ψ_2 'dekine karşı gelen sonucu bulan kendimizin kopyası gözlemciler ayrı bir dünyada hayatlarını sürdürüyorlar. Her gözlem böylece dalga fonksiyonunun yeni bir dallanmasına sebep oluyor ve bu büyük dalga fonksiyonu R-sürecine hiç uğramadan evrimine devam ediyor. Bu yoruma "çoğul dünyalar" yorumu da deniyor. örneğin bu

Schrödinger'in kedisi problemine uygulanınca (3) denkleminin bir terimi gözlemcinin kutuyu açıp ölü kediyi, bir başka terimi canlı kediyi görmesine karşı geliyor. Roger Penrose'un bir eleştirisi şu: Nasıl oluyor da { (canlı kedi) + (ölü kedi) } kombinezonunu da gören bir gözlemci ile karşılaşmıyoruz?

İlk bakışta çılgınca görünen bu Everett usulü kuantum mekaniğini herhangi bir eleştiri ile kesin bir şekilde çürütmek mümkün değil; buna karşılık yorum, bu hali ile benimsenmiş de değil. Everett yorumunu ciddiye almayanlar arasında "Bu teoriye gerçekten inanılmaz yüksek para karşılığında Rus ruleti oynamalılar, çünkü bu paralel dünyalardan birinde çok zengin olarak hayatta kalacakları kesin" diyenler de var.

J. Hartle ve M. Gell-Mann'ın Yaklaşımı:

Hartle ve Gell-Mann Kopenhag yorumunun yetersiz ve ancak yaklaşıtımlar olarak geçerli olabilecek nitelikte olduğunu iddia ediyorlar. Fikirleri kısmen şöyle özetlenebilir. Kuantum teorisi temelde doğru ise, bütün evrene de bir bütün ola-



1. Tek bir evren mi var?
2. Uzay-zaman topolojisi basit midir, değil midir?
3. Kaç uzay boyutu vardır?
4. Evrensel sabitler G ve c gerçekten "sabit" midirler?
5. Evrendeki maddenin tümünü algılamakta mıyız?

Şu anda yukarıdaki soruların yanıtları üzerinde fazla bir şey bilmiyoruz ve bu yazıda zaten bu konular üzerinde durmayacağız. Bizim asıl üzerinde duracağımız; kuantum mekaniği büyük patlama fikrine dayanan kozmogoni konusunda ne der? sorusudur. Bu soruya yanıt arayan modellere "kuantum kozmolojileri" adı verilmektedir. Bu modelleri inşa etmek için evrenin kendisi, evriminin ilk fazlarında kuantumlu bir sistem olarak ele alınmakta ve bir dalga fonksiyoneliyle (Fonksiyonel: fonksiyonların fonksiyonu) tarif edilmektedir. En basit kuantum kozmolojilerinde uzayın yarıçapı (yani, genişleme fonksiyonu $R(t)$) konum değişkeni, uzayın genişleme hızı (R'/R) ise momentum değişkeni gibi görünmektedir. Evrenin dalga fonksiyoneli belirlemek için Wheeler-De Witt denklemi adı verilen ve Schrödinger denkleminin benzer bir denklem çözülmektedir. Ancak Schrödinger dalga denkleminin farklı olarak, Wheeler-De Witt denkleminde bir evrim parametresi gözükmemektedir. Bunun getirdiği teknik zorluklar bir yana, bir de kuantum kozmolojisi fikrinden kaynaklanan yeni kavramsal sorunlar ortaya çıkmaktadır. Başlangıç tekilinin ve kara deliklerin varlığını gerektiren genel relativite teorisiyle, bu uç durumlarda geçerli olmasını beklediğimiz kuantum teorisinin nasıl bağdaşacağını bize söyleyecek kuantumlu gravitasyon teorisi adını vereceğimiz bir teori biliniyor olsaydı; bu teori kapsamında evrenin başlangıç tekilindeki davranışını da kara deliklerin kuantum ışmasını da açıklamakta bir sorunumuz kalmazdı. Ama tutarlı bir kuantumlu gravitasyon teorisi hala ortada yok.

Kuantum kozmolojileri, bilinmeyen ama ileride bulunacağından kuşku duyulmayan bir

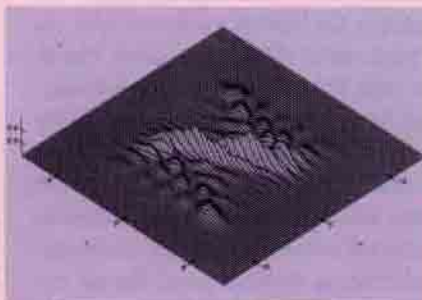
kuantumlu gravitasyon teorisinin hangi yeni niteliklere sahip olacağı konusunda ipucu verdikleri için önem taşıyorlar. Ayrıca kuantum mekaniğinin yeni yorumlarına zemin oluşturdukları için de çok ilgi toplamaktalar.

Kuantum mekaniğinin standart Kopenhag yorumunda gözlenen "mikroskopik" sistem, "makroskopik" bir ortam içinde bir alt sistem olarak ele alınır. Ölçüm süreci esas olarak gözlenen sistem ile çevresi arasındaki bir etkileşimle tanımlanır. Gözlenen içeride, gözlemci dışarıdadır. Halbuki bir kuantum kozmoloji modelinde kuantumlanan sistem evrenin kendisidir. Gözlemci evrenin bir parçası olarak ele alınmalıdır. Gözleyen ve gözlenen arasında doğal bir ayırım yapma imkanı yoktur. Bir gözlem yapıldığında tüm evrenin dalga fonksiyonu çöker mi? Bir geçişin olasılığı nedir? Kuantum mekaniğinin standart yorumunda bu tür sorulara yanıt, çok sayıda eşdeğer sistem üzerinde aynı ölçüm yapıldığı gözlem olasılığı istatistiksel frekans dağılımıyla verilir. Örnek. N özdeş para ile aynı anda yazı-tura atılarak yazı gelme olasılığının 1/2 bulunması gibi. Halbuki kuantum kozmolojisinde evren tek bir kapalı sistemdir. Özdeş evrenler bulunabilir mi? 1957'de doktora hocası John A. Wheeler'in bir fikrini geliştirerek kuantum mekaniğine yeni bir yorum getiren Hugh Everett'e göre, evet, bulunur. Everett'e göre ölçüm süreci kapalı sistem

olan evrenin bir alt bölgesinin diğer bir başka alt bölgesiyle etkileşiminden ibarettir. Evrenin bir parçası diğer bir parçasını gözlerse ne "görür"; bu evrensel bir dalga fonksiyonu tarafından belirlenecektir. 1970'de kuantumlu gravitasyon teorileri kapsamında Bryce S. De Witt'in canlandırdığı bu yorumda dalga fonksiyonu çökmesi söz konusu olamaz; geçişler yumuşaktır. Ayrıca her ölçüm sonucu gerçek bir evrene karşı gelir. Gözlem süreci, paralel evrenler arasından birini seçmeye eşdeğerdir. Şu an içinde bulunduğumuz evren, başlangıç anından bu yana yapılan gözlemler dizisiyle çatalana çatalana ulaştığımız bir son evrendir. Diğer seçenekler de bizimkine paralel gerçek evrenler olarak bir yerlerde bulunmaktadır.

Bu yorum, doğruları ne kadar yansıtmaktadır, bunun tartışmasına girmeyeceğiz. Bizim için ilginç olan, Everett, Wheeler ve De Witt'in ilk kez kapalı sistemlerin kuantum mekaniği konusuna eğilmiş olduklarıdır. 1990'da Nobel ödüllü fizikçi, kuarkların mucidi Murray Gell-Mann, yine bir genel relativiteci James Hartle ile birlikte kapalı sistemlerde iz integrali teknikleri kullanarak kuantum mekaniğinin yeni bir yorumuna ulaştılar. Kuantum kozmolojileri nasıl evrimleşir? Yani "zaman" nedir? Bir kuantum kozmolojisinden klasik kozmolojiye nasıl geçilir? Bu sorulara yanıtlar Gell-Mann, Hartle yorumunda aranmaktadır.

Kuantum kozmolojileri dışında, istatistik fizik kapsamında kapalı sistemlerin kuantum mekaniğini 1984'de Robert Griffiths ele almıştır. Griffiths'in yaklaşımı Fransız fizikçisi Roland Omnès tarafından 1990'larda kuantum mekaniğinin yeni bir yorumu düzeyine ulaştırılmıştır. Kuantum mekaniğinin dekoherent geçmişler yorumu adı verilen bu yorum, kuantum kozmolojileri kapsamında Gell-Mann, Hartle yorumuyla çalışmaktadır. Ancak genelde farklılıklar sözkonusudur. Omnès'in yorumunun Bohr'un kuantum felsefesiyle uyum içinde çıkması da çok anlamlı bir sonuçtur.



Bir kuantum kozmoloji modelinde klasik kozmolojiye geçiş

rak uygulanabilmeli. Özellikle de Büyük Patlama anında evren mikroskopik boyutlarda olduğuna göre, kuantum fiziği kullanılması gerekir. Evrenin bir "ilk an" dalga fonksiyonu olduğunu düşünürüz; bu fonksiyon zaman içinde Schrödinger'ininkine benzer bir denkleme göre evrimleşecektir. Gerçekten de Wheeler ve de Witt tarafından yazılmış böyle bir denklem var; prensip olarak da evrendeki her şey, yani başka galaksilerdeki atomlar, biz ve gözlem aletlerimiz, v.s. bunun içindedir. Şu halde Kopenhag ekolünün yaptığı gibi evreni "gözlenen mikroskopik sistem", "makroskopik gözlem aletleri ve gözlemciler" ve bu ikisinin dışında kalan, o an ilgilenilmeyen şeyler" diye ayırmak ancak bir yaklaşımla olarak geçerli olabilir, zira bütün bunlar birbirleri ile etkileşmektedir. Ayrıca sadece bir tane evren bulunduğu için, normal kuantum mekaniği uygulamalarında olduğu gibi aynı deneyi milyonlarca defa tekrarlayıp ortalama sonucu kuantum teorisinden elde edilmiş teorik değer ile karşılaştırmak söz konusu değil.

Okuyucu herhalde bu öğelerin Everett yorumunda da bulunduğunu farketmiştir; nitekim Gell-Mann ve Hartle bu yorumu faydalı ve ilgiye değer bulduklarını belirtiyorlar. Buna karşılık, Everett'in "çoğul dünyalar" tablosu yerine, "farklı ihtimallere karşı gelen birçok değişik geçmiş"ten söz etmeyi tercih ediyorlar. Matematiksel yöntem olarak da dalga fonksiyonları yerine Feynman'ın iz integralleri yaklaşımını kullanıyorlar. Mikroskopik sistemlerden makroskopik sistemlere geçerken klasik objektif ihtimallerin ortaya çıkışı ise, koherent olmayan toplamlarda girişim terimlerinin birbirlerini yok etmeleri ile açıklanıyor. Örneğin Schrödinger'in kedisi örneğinde "canlı ve/veya ölü kedinin moleküllerinin çevre ile etkileşmeleri iki senaryonun ihtimal genlikleri arasındaki girişim terimlerini ortadan kaldırır, böylece biz baksak da, bakmasak da kutunun içindeki kedi objektif anlamda ya ölü ya da canlıdır" deniliyor.

Gell-Mann ve Hartle kendi formülasyonlarının da kuantum teorisinin (ve özellikle de kullandıkları Everettvari yorumun) ortaya çıkardığı soruların henüz hepsine yanıt veremediğini itiraf ediyorlar.

Bohm-de Broglie Teorisi

Bu iki fizikçi 1950'lerde objektif gerçeklik ve determinizme uyan ve deneylerde de kuantum mekaniğinin başarılı sonuçlarını aynen verebilen bir teori geliştirdiler. Fakat bunun bedeli Einstein'ın is-

rarla karşı olduğu "uzay-zamanda etkileşmeyecek şekilde ayrı bölgeler arasında etkileşmeye izin vermek", yani kısacası yerel olmayan (non-local) etkileşmeler kullanmaktı. Ayrıca Hamilton mekaniğinde, klasik dalga teorisinde ve standart kuantum mekaniğinde bulunan "uzay ve momentum koordinatlarının aynı statüde ele alınmaları" ilkesi burada feda ediliyor ve uzay koordinatları daha temel bir konuma yerleştiriliyor. Teorinin relativiteye uyar hale nasıl getirilebileceği, örneğin nasıl Dirac'inkinin benzeri bir dalga denklemi yazılabileceği belli değil. J.S. Bell'in sempatisine rağmen teori genel olarak kabul görmüş değil.



Penrose'un Görüşleri

Roger Penrose henüz kuantum teorisi için yeni bir yorum veya yaklaşım getirdiğini iddia etmiyor. Daha çok yaptığı, yukarıda özetlenen görüşlerin zayıf gördüğü noktalarını ortaya çıkarmak ve bunların hiçbirinde kuantum mekaniği ile klasik fiziğin geçerli olduğu bölgelerin arasındaki sınırın açıkça belirlenmediğine dikkat çekmek. Penrose'un kendi beklentisi bu sınırın gravitasyonun kuantum seviyedeki etkileşmeleri ile çözüleceği yönünde. Burada dört temel etkileşme (gravitasyon, elektromanyetik, zayıf ve kuvvetli etkileşmeler) arasında sadece gravitasyonun kuantum alan teorisinin geliştirilememiş olduğunu belirtelim. Beklentilere göre kuantum gravitasyon etkilerinin kendilerini göstermeye başlayacakları Planck kütlesi $M_p = (hc/2\pi G)^{1/2}$ (c = ışık hızı, G = Newton gravitasyon sabiti, h = Planck sabiti) 10^{19} hidrojen atomu kütlesine veya 10^{-5} grama eşit ki, bu mikroskopik fizik için devasa bir büyüklük. Çok kabaca ifade edersek, Penrose iki kuantum durumu arasındaki enerji bu mertebede veya daha fazla ise, bunların genliklerinin kuantum anlamında süperpoze edilemeyeceklerini, bu durumda klasik "ihtimal toplama" kuralının geçerli olacağını düşünüyor. Ayrıca R-sürecinin tam anlaşılmasının

da kuantum gravitasyon teorisinin daha iyi anlaşılmasına bağlı olduğu fikrinde. Kısacası, Penrose kuantum teorisinin felsefi gibi görünen sorunlarının aşında felsefi tartışmalar ve yorumlarla değil, temel fiziğin gelişmesi ile açıklanacağına inanıyor.

Kuantum Mekaniği ve Bilinç

Bohr'un fiziğe soktuğu "gözlemcinin fiziksel olayı etkilemesi" fikrinden beri, bilincin kuantum fiziğinde özel bir yeri olduğu yönünde fikirler çeşitli şekillerde ortaya çıkıyor. Burada bunları detaylıca açıklamak yerine, listemizi eksik bırakmamak için kısaca anmakla yetineceğiz.

E. Wigner'in 1961'de iddia ettiğine göre, "bilinç sahibi canlılar" için içine sokulduğunda kuantum teorisinin değiştirilmesi gerekebilir. Wigner böyle sistemlerin kuantum mekaniğine lineer olmayan efektler getirerek belki R-sürecini doğurabileceği şeklinde görüşlere sahip. Bu görüşlerin benimsenmek bir yana, fizikçilerin büyük çoğunluğu (bu satırların yazarı da dahil olmak üzere!) tarafından pek anlaşılmadığını söylemek haksızlık olmaz.

J. Wheeler'in 1983'de önerdiği "katılımcı evren" görüşünde ise gene bilinçli gözlemcilerin çok özel bir önemi var. Buna göre, evren büyük patlamadan sonra bilinçli gözlemciler ortaya çıkana kadar bir cins Schrödinger denklemi ile U-sürecine göre evrimleşiyor; bu dönemde çeşitli kuantum genliklerinin süperpozisyonu geçerli, yani "objektif gerçeklik" henüz doğmuş değil. Ancak bu kuantum durumlarının birinde hayat ve bilinçli gözlemciler ortaya çıkıp etrafa baktıkları zaman R-süreci gerçekleşiyor ve evrenin dalga fonksiyonu gerçek bir seçeneğe indirgeniyor.

Bu hayalgücünü gitgide zorlayan yorumlardan sonra, Niels Bohr'un neden israrla makroskopik sistemleri kuantum teorisinin dışında tutmak istediği ve "kuantum geçekliliği" hakkında spekülasyonlara girmektense, teoriyi sadece deney sonuçlarını istatistiksel anlamda önceden bildirebilen bir yöntem olarak nitelediği belki daha iyi anlaşılabilir.

Kaynaklar
 Albert, D., "Bohm's Alternative to Quantum Mechanics", Scientific American, Mayıs 1994
 Bohr, N., Physics and the World, Harwood Academic Publishers, 1988.
 Gell-Mann, M., The Quark and the Jaguar, W.H. Freeman and Company, 1994.
 Halliwell, J., "Quantum Cosmology and the Creation of the Universe", Scientific American, Aralık 1991
 Horgan, J., "Quantum Philosophy", Scientific American, Temmuz 1992
 Mandl, F., Quantum Mechanics, J. Wiley and Sons, 1992.
 Penrose, R., The Emperor's New Mind, Oxford University Press, 1989.