

Gelecek Yüzyılın Fiziğine Doğru

Kuantum Optik

Kuantum fiziğinin ortaya çıkışı optik ölçümlere dayanır. Fiziksel nesnelerin kuantum doğası ilk kez 1900 yılında, Max Planck'ın bir ısı kaynağından elde edilen ışık spektrumunu açıklamaya çalışırken enerjinin kuantize, bir başka deyişle parçalı yapıda olduğunu kabul etmesiyle açığa çıktı. 1905 yılında Albert Einstein ışık enerjisinin, daha sonraları foton adı verilen, küçük parçacıklar halinde yayıldığını varsayarak fotoelektrik etkiyi açıkladı. Bu, fiziksel nesnelerin kuantum doğasına ilişkin yeni bir delildi. Dalga-parçacık ikilemi de yine Einstein tarafından ilk kez ışık için ortaya atılmış ve sonradan 20. yüzyılın kuantum mekaniğinin tüm fiziksel nesnelerini kapsamına almıştır. Bu gelişmeleri Paul Dirac'ın 1927 yılında yayımlanan ünlü makalesi izledi. Dirac, matematiksel özen ve kesinlik içinde ışığı kuantize etmiş ve bu, kuantum elektrodinamiği ile (temel parçacıklar-yüksek enerji fiziği, yoğun madde fiziği, kozmoloji de dahil olmak üzere) modern kuantum fiziğinin esaslarını oluşturan kuantum alan teorisinin başlangıcını teşkil etmiştir. Aynı zamanda, uzak morötesinden uzak kızılötesine kadar uzanan geniş bir frekans sahasında ışıkların üretilmesine olanak tanıyan kaynakların yapımlarındaki hızlı gelişmeler, ışığın kuantum mahiyetine ve diğer maddeler ile etkileşmesine hatırı sayılır bir ilgi uyandırmıştır.

Alexander S. Shumovsky
Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü

YIRMINCI YÜZYIL fiziğinin başlangıcında ve gelişim sürecinde neden bilhassa optiğin bu denli önemli bir role sahip olduğu sorusunun zihinlerde oluşması gayet doğaldır. Bu soruya doyurucu bir cevabın verilebilmesi için öncelikle ışığın ne olduğunu tartışmamız gerekiyor.

Hepimiz biliriz ki, ışık yaşamımızın gerekli bir niteliği ve en yakın çevremizden en uzak yıldızlara, galaksilere kadar evren hakkında en önemli bilgi kaynağımızdır. Görme duyumuz diğer (işitme, koklama, duyma, tatma) duyularımızın yanında bize dış dünyadan bilgileri en açık ve etkileyici biçimde ulaştıran duyumuzdur. Işığın varlığı yaşamımızın temel bir özelliğidir ve ışık bizlere evren hakkında bilgi ulaştırır.

Işık fizikte maddenin "elektromanyetik alan" diye isimlendirilen özel bir şekli olarak ele alınır. "Alan" de-

diğimizde uzay-zamandaki her noktaya birtakım fiziksel nicelikler öngören bir kuralı kastediyoruz. Sözelimi, herhangi bir maddeyi ısıtma işleminde sıcaklık alanı bize sıcaklığın uzaydaki konumla ve zamanla nasıl değiştiğini veren bir kural olacaktır.

Burada, elektrik ve manyetizmanın başlangıçta fiziğin tamamen ayrı iki konusu olarak ortaya çıktığını hatırlatmakta yarar vardır. 1820 yılında Oersted, elektrik akımının bir pusula iğnesini sapıtabileceğini gördü. Ardından Amperé manyetik görüngülerin (fenomen-phenomenon) hareket halindeki elektrik yüklerinden doğduğunu ileri sürdü. 1831 yılında Faraday, hareketli bir mıknatıs sayesinde elektrik akımı elde edilebileceğini keşfetti. Bu arada Maxwell ve Lorentz klasik anlayışa son öldürücü darbeleri vurarak deneysel bulgular ayrıntılı ve sık matematiksel teorilerle birleştirdiler. Bundan böyle elektrik ve manyetizma iki ayrı konu olarak ele

alınamayacak, tek bir ana branşın iki yüzü olarak düşünülecekti. Ortada birbirine sökülemez, çözülemez bir sarmal biçiminde dolanmış iki görüngünün oluşturduğu tek bir yapı vardı. Bu yeni ve ortak fizik dalına elektromanyetizma adı verildi. Faraday ışığın da elektriksel bir niteliği bulunduğunu spekülasyonun harikulade ispatı içinse Maxwell'i beklemek gerekti. Çok geçmeden optik de (mercekleri, aynaları, prizmaları, girişim ve kırınım olaylarını inceleyen fizik dalı) elektromanyetizmaya dahil edildi. Hemen ardından anlaşıldı ki görünen ışık engin elektromanyetik spektrumun ancak ufak bir penceresiydi...

Maxwell'in klasik teorisinin çerçevesinde ışık, yayılmakta olan bir elektromanyetik dalgadan ibarettir. Bu yayılma hareketini belirleyen denklemler, mekanik dalgalar (deniz dalgaları gibi) için bilinen denklemlerle aynı ifadelerdir. Elektromanyetik dalgaların genel bir davranış biçimi olan sinüs eğrisidir ve alan genliği zamanın bir fonksiyonu olmaktadır. Her ışık algılayıcısı, ya da detektörü bu genliğin karesini ölçer. Genliğin karesi ise elektromanyetik alanın enerjisiyle orantılıdır. İnsan gözü de bir ışık detektörü olduğundan, "görüyorum" dediğimizde gözlerimizin aslında bir nesneden gelen ışık enerjisini kaydettiğini, başka bir deyişle üzerlerine düşen ışık enerjisini ölçtüğünü söylemiş oluyoruz.

Işık enerjisini ölçme konusunda daha ileri gitmeden önce şunu not etmekte yarar vardır; fizik deneysel bir bilimdir ve her deneysel bilim gibi temel bilgi kaynağı ölçmedir. O halde ölçmenin kendisinin ne olduğu üzerinde durmamız gerekiyor.

Bir metal çubuğun uzunluğunu ölçmek gibi basit bir problemi inceleyelim. Bu durumda, bir cetveli çubuk boyunca tutup çubuğun uzunluğunun kaç santimetre ve kaç milimetre geldiğine bakarız. Elimizde milimetrelerin ve santimetrelerin işaretlenmiş olduğu bir cetvel olduğunu farzedelim. Örneğimizde çubuk fiziksel bir nesne, fiziksel bir bilgi kaynağı olarak, cetvel ise fiziksel bir detektör olarak düşünülmelidir. Diyelim ki cetvel bize 3cm ve 4mm göstermiş olsun; ölçümümüzdeki "doğruluk" hakkında ne diyebiliriz? Herşeyden önce oldukça duyarız, kaba bir ölçüm aracı kullandığımızı söyleyebiliriz; öyle ki bu cetvelle 1mm' den küçük hiç bir mesafeyi ölçmek mümkün değildir. Ölçümdeki kesinlik detektörün özellikleri, yetenekleri ile sınırlıdır. Mesela çubuğun gerçek uzunluğu 3.4cm ile 3.5cm arasında bir değerdeseyse yapabileceğimizin en fazlası

çubuğun uzunluğunun 3.45cm ve 0.05cm olduğunu söyleyebilmektir. Çubuğun uzunluğunu 1mm'ye eşit bir belirsizlik ile bilmekteyiz. Daha kesin ölçüm sonuçları verebilecek detektörler kullanmak mümkün olsa da (Fransız Akademisi uzunluk standardı gibi), erişebileceğimiz duyarlıklar sınırlıdır. Dahası detektörün doğruluğundaki bu artış beraberinde yeni bir zorluk getirir.

Cetvel ve çubuk farklı maddelerden yapılmış olabilirler. Bunun sonucu olarak oda sıcaklığındaki küçük dalgalanmalar (fluctuations) ve sıcaklık dağılımındaki düzensizlikler cetvel ve çubuğun uzunluklarında farklı değişimlere yol açarlar. "Dalgalanmalar" diyerek, herhangi bir fiziksel parametrenin (örneğin sıcaklık) belirli bir değer etrafında kaotik olarak salınım yaptığını anlatmaya çalışıyoruz. Sonuç olarak ölçümümüzde yeni bir belirsizlik kaynağıyla karşılaşmış bulunuyoruz. Sıcaklıktan kaynaklanan bu belirsizliğe ısı gürültü ya da ısı parazit demek mümkündür. Sıcaklıktaki dalgalanmalar oda içindeki havada bulunan moleküllerin hareketlerine bağlıdır. Bu moleküller sayıca son derece fazla olduklarından (bir litre havada yaklaşık olarak bin milyar kere bin milyar kadar molekül bulunmaktadır...) bu dalgalanmaları stokastik (olasılıklara dayalı) bir oluşum olarak nitelendirebiliriz. Yukarıda kullandığımız "gürültü" terimi, ölçümlerde karşılaşılan stokastik belirsizliklerin kaynağı için geleneksel olarak kullanılagelen bir terimdir.

Her ne kadar fizikte pek çok gürültü kaynağı olsa da ısı gürültü en kötülerinden biridir. Fiziksel deney sanatı bu gürültülerle mücadele ederek ölçümlerin kesinliğini artırma çabalarında kendini gösterir.

Kuantum fiziğinde bunlara ek olarak çok önemli bir gürültü kaynağı daha görülür. Bu gürültünün doğası diğerlerinden farklı olarak, kuantum fiziğinin temel prensiplerinin dikkatlice gözden geçirilmesiyle anlaşılabilir.

Fizikte bir sistemi göz önüne aldığımız zaman onun fiziksel durumunu (state) tarif ederiz. Klasik fizik açısından bir sistemin istenilen bir andaki durumunu açıklayabilmek için, o sistemi oluşturan parçacıkların o andaki yerlerini ve hızlarını bilmek yeterlidir. Bu bilgiyi, mekaniğin kanunlarını uygulayarak sistemin zaman içerisindeki davranışlarını tahmin etmede kullanabiliriz. Klasik fiziğin çerçevesinde konum koordinatlarının ve momentumun büyüklükleri aynı anda ve kesin olarak tanımlanabilmektedir.

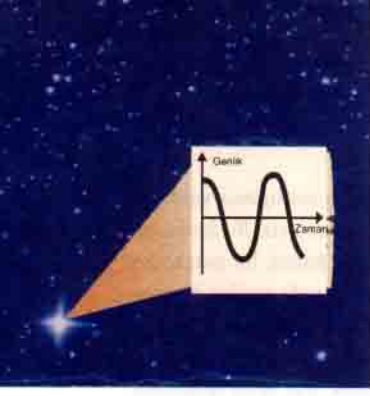
Kuantum fiziğinde ise herhangi bir sistemin durumunu durum fonksiyonu veya

dalga fonksiyonu adını verdiğimiz yardımcı bir nesne ile tanımlamaktayız. Bu fonksiyonun mutlak değerinin karesi, bir parçacığın verilen bir uzay noktasında verilen bir momentumla bulunma olasılığını vermektedir. Kuantum mekaniğinin bu istatistiksel yorumlanması 1926 yılında Max Born tarafından yapılmıştır. Born'un fikirleri doğrudan doğruya, de Broglie'nin ileri sürdüğü "dalga-parçacık ikilemi" prensibinin sonuçlarıdır. Bu prensibe göre, herhangi bir kuantum düzeyindeki parçacık ışık gibi bazı dalga özellikleri taşır. Söz gelimi elektronların girişimi deneysel olarak gözlemlenebilmiştir. Bununla birlikte ışık (klasik bakış açısıyla elektromanyetik dalga formu), küçük porsiyonlar halinde, fotonlar adını alan parçacıklar şeklinde kuantum sistemleri tarafından yaratılıp yok edilmektedir.

Sonuç olarak bir kuantum parçacığının konumu veya momentumu hakkında söyleyebileceğimiz, bu değişkenlerin verilen değerlerde olma olasılığından öteye geçemez. Başka bir deyişle burada bir çeşit "kuantum piyangosu" söz konusudur. Bir zarın yüzündeki nokta grupları gibi, herhangi bir fiziksel gözlenirin alabileceği değerler çeşitli olasılıklarla ortaya çıkar. Bu durumda da bir tür gürültüyle karşı karşıya kalır, ancak bu özel bir kuantum gürültüsü olup tüm fiziksel sistemlerin kaçınılmaz bir niteliğidir.

Kuantum gürültüsü bu kadar önemli olmasına karşın diğer gürültülerin çok altında bir seviyede kalmaktadır. Fakat ışık yardımıyla yapılan ölçümlerde durum tamamen tersine döner. Bu gibi durumlarda kuantum





gürültüsü diğer bütün gürültülerden daha büyük önem kazanmaktadır. Mesela, görünür

bölgede çalışan bir lazerin ürettiği ışık bir elektromanyetik alanın genişliğindeki ısı belirsizliği oda sıcaklığında kuantum belirsizliğinden on bin kez daha küçüktür. Denilebilir ki bu durumda ısı gürültüsü kuantum gürültüsüne kıyasla ihmal edilebilecek kadar ufaktır.

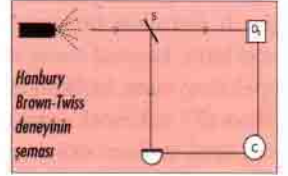
Sonuç olarak ışık, fiziksel ölçümler için çok elverişli, kesinliği yüksek, son derece duyarlı bir ölçüm aracıdır. Duyarlığı sadece

kuantum dalgalanmalarıyla sınırlanmıştır. Şimdi fiziğin ve bilhassa kuantum fiziğinin gelişiminde ışıkla yapılan ölçümlerin neden bu denli önemli bir rol oynadığı açıklığa kavuşmuş olmalıdır.

İlginçtir ki kuantum fiziğiyle olan erken bağlarına rağmen 20. yüzyılda optik uzunca bir süre kuantum fiziğinden ayrı bir çizgide gelişti. Fiziksel optik deneylerinin büyük bir bölümü klasik elektromanyetik dalga teorisine doğru olarak açıklanabilmektedir. Hatta lazerin işleyişi bile yarı-klasik bir anlayışla açıklanabilir. Lazerin aktif maddesi, ışığı yaratan atom veya molekül grubu, bir kuantum nesnesi olarak ele alınırken ışınım klasik olarak incelenebilir.

Optikteki yeni akım 1956 yılında R.

Hanbury Brown ve R. Twiss' in gerçekleştirdikleri bir deneyle başladı. Bir ışık kaynağından elde edilen ışık ışını yarı geçirgen "S" aynası vasıtasıyla iki eşdeğer ışına ayırmakta ve daha sonra bu iki ışın, ışığı elektrik akımına dönüştüren iki tane, birbirinden bağımsız detektörle algılanmaktadır.



Önceki tartışmalarımızdan bildiğimiz gibi her ışık detektörü (insan gözü veya fiziksel bir alet) ışık enerjisini ölçme yetisine sahiptir. Bu enerji, elektromanyetik alanın genişliğinin karesi ile orantılıdır. Ayrıca her

Lazerin Maddesel Benzeri Ekziton Bozer

Ataç İmamoğlu
Kaliforniya Üniversitesi

Doğada esas itibarıyla iki tür parçacık mevcuttur: Fermiyonlar ve bozonlar. İki eş parçacığın aynı anda aynı durumda (state) bulunmaması fermiyonlara özgü bir niteliklidir. Buna kuantum fiziğinde Pauli Dışlama İlkesi (Pauli Exclusion Principle) diyoruz. Bu prensip ilk olarak 1928 yılında Jordan ve Wigner tarafından ortaya atılmış ve 1940'da Wolfgang Pauli tarafından formüle edilmiştir. Bu prensibe göre eğer bir fermiyonun dalga fonksiyonunun sıfırdan farklı olduğu bir yerde, başka bir eş fermiyonun dalga fonksiyonu da sıfırdan farklı ise (yani dalga fonksiyonları karşıyorsa), bu iki eş fermiyon aynı kuantum durumuna sahip olamaz. Dalga fonksiyonlarının karşıması için ise aralarındaki mesafenin parçacıkların dalga karakterine karşılık gelen dalga boyundan daha az olması gerekir. Bu konuya ilerde yine döneceğiz. Pratik olarak, nötrino denilen kütsüz temel parçacıklar, elektronlar ve kütsüz olan tüm temel parçacıklar fermiyondur. Bozonlar ise, tek bir kuantum durumunda bulunabilecek parçacık sayısının sınırsız oluşuyla karakterize edilir. Gerçekten de, belirli şartlar altında bozonik parçacıklar tek bir durumda olmayı tercih etmektedir. Fotonlar bozonların en iyi bilinen örneklerindedir ve optik lazerler, işleyiş prensipleri bozonik özelliklere dayanan en önemli cihazlardır. Lazerler parlaklık, tutarlılık (coherence), ve yüksek yoğunluk (ışık şiddeti - intensity) gibi yararlı özelliklerini, tek bir durumda çok sayıda foton (bir milyon ve daha fazla) barınabilmesine borçludur. Buna karşılık fermiyonlar Pauli prensibi nedeniyle, lazer benzeri cihazların yapımında kullanılamaz.

Her ne kadar (kütsüz) fotonların aynı anda tek bir durumda bir arada bulunabilmeleri

kolayca anlaşılabilir gibi gözükse de, bozonik nitelikler sadece kütsüz parçacıklarla sınırlı kalmamaktadır. Söz gelimi biri elektron diğeri proton olan iki fermiyondan ibaret hidrojen atomu, dalgalı özelliklerinin ağır bastığı düşük sıcaklıklarda fotona benzer özellikler taşıyan bir bileşik bozon (composite boson) olmaktadır. Maddenin dalga özellikleri, de Broglie ısı dalga boyu

$$\lambda_T = h / p = h / \sqrt{3mk_B T}$$

denilen bir büyüklük ile belirlenmektedir. Bu ifade de h ve k_B sırasıyla Planck ve Boltzman sabitleridir. Parçacığın kütlesi m , ortalama momentumu ise p ile gösterilmiştir. T ise sıcaklığı belirtmektedir. Sıcaklık tarafından belirlenen bu dalga boyu, parçacıkların yoğunluğu (N) tarafından belirlenen parçacıklar arası mesafeden ($N^{-1/3}$) küçük ise, parçacıklar ister bozon ister fermiyon olsunlar aynı şekilde davranırlar. Oda sıcaklığında bulunan bir parçacık kümesi Boltzman istatistiği tarafından belirlenen bir karaktere sahiptir. Buna göre bir kuantum durumunun ortalama doldurulabilirliği birin çok altında değerler alır.

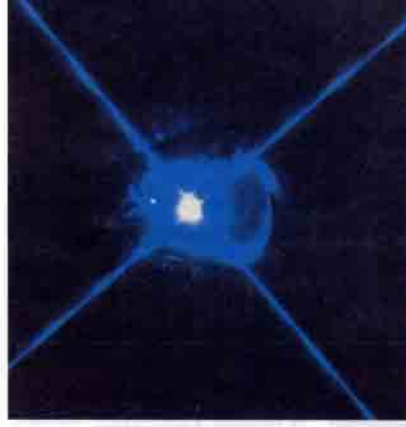
Düşük sıcaklıklarda ve yüksek yoğunluklarda, bu dalga boyu parçacıklar arası mesafeyi aşar. Bu limit içerisinde, parçacık kümesinin davranışı parçacıkların türü (dolayısıyla uyacakları kuantum istatistiksel yasalar) tarafından belirlenmektedir. Bu limitte bilhassa fermiyonik parçacıklar Pauli dışlama ilkesi uyarınca bir itici kuvvet hissedeceklerdir. Fermiyonlar birbirlerinden uzak durmaya gayret ederlerken farklı kuantum durumlarını doldururlar. Bozonik parçacıklar için ise bu etkileşim çekici bir kuvvet olarak hissedilir ve bazı kuantum durumlarının büyük miktarlarda doldurulmasına yol açar. İşte bozerde (lazerin maddesel benzeri) yararlanılan bu çekici kuvvettir.

Dünyanın çeşitli yerlerinde çalışmalarını yürütmekte olan bir kaç araştırma grubu, sözkonusu çekimsel etkileşim sayesinde ağır parçacıkların "uyarılmış ışınımı" (stimulated emission) laboratuvarında yaratma olasılığı peşine düşmüştür. Yukarıda belirtildiği gibi hidrojen ato-

muyla beraber, tüm atom türlerinin yaklaşık yarısı pratik olarak (verilen bir atomun proton, nötron, ve elektron sayıları toplamı bir çift sayıysa bu atom bir bileşik bozon olmaktadır) bozondur. Eğer sıcaklık yeterince düşürülür (10^{-6} Kelvin ve daha düşük) ve atomlar için bir oyuk (cavity) oluşturulursa, tüm atomlar oyukun tek bir modunu (mode) seçip doldurur ve bu şekilde bir "atom bozeri" oluştururlar.

Bir diğer yaklaşım ekzitonlardan (excitons) faydalanmaktadır: Yarı-iletkenlerde ışık soğutması işlemi bir elektron ve bir boşluk (hole) yaratır. Bunlar aralarındaki Coulomb çekimiyle bağlı bir çift oluştururlar. Ekziton adı verilen bu bileşik parçacık pek çok yönüyle hidrojen atomunu andırmaktadır. Bozon karakteri taşıyan ekzitonlar, yoğunlukları yeterince yüksek olduğu takdirde, ancak son sistem soğutucularla (sıcaklığı 10^{-2} Kelvinin altına düşürebilecek) erişilebilecek düşük sıcaklıklarda, kuantum istatistiksel etkiler göstereceklerdir. Ekzitonların kuantum istatistiksel etkiler sergilemek için atomlara göre daha ılımlı ve ineliblebilir sıcaklık seviyeleri talep etmeleri küçük kütleli oluşlarının bir sonucudur. Ekziton kütlesi iki serbest elektronun toplam kütesinden daha azdır ve benzer deneylerde kullanılan atomlardan (Na ve Cs) da 10^5 kez daha küçük bir kütleyle sahiptir.

Optik lazerin kuantum mekaniksel doğasına karşın, elektromanyetik alanlar için tutarlı (coherent) bir kaynak modern fiziğe yabancı bir kavram değildir. Öte yandan, Ekziton (ya da atom) bozeri madde için tutarlı bir kaynak sunmaktadır ve bu sebeple kuantum mekaniğinin köklerinden gelen, klasik olmayan temel bir önem taşımaktadır. 34 yıl önce bulunan optik lazerlerin, uygulama alanlarında bu gün kavuştuğu büyük çeşitliliği göz önünde bulundurarak, ekziton bozerlerinin elektronik teknolojisinde bir devrim yaratabileceğini söylemek mümkündür. Şimdiye kadar ekziton veya atom bozeri için hiç bir deneysel başarı kaydedilmemiş olsa da, sürdürülen yoğun araştırmalar çok fazla beklememiz gerekmeyeceğine işaret etmektedir.



ışık alanının dalgalandığını ve genliklerinin stokastik belirsizlik altında olduğunu da görmüştük. Bu belirsizliğin çoğu pratik ışık kaynaklarında çevresel etkenlerden kaynaklanmaktadır. Örneğin, kaynaktan ışın yapan atom veya moleküller birbirleriyle çarpışabilirler, her kaynaktaki atomik uyarılma sıklığı rasgele bir şekilde değişebilir, atomlar kontrol edilemez bir biçimde salınırlar ve bunlar genlikte rasgele değişikliklere sebep olurlar. Bu faktörler ışık kaynağının dikkatlice hazırlanması, tasarlanması sayesinde azaltılıp asgari seviyeye düşürülebilirler. Oysa ki, tüm bu faktörlerin yok edilmesi durumunda bile daha temel bir gürlüğe daima mevcut olacaktır: kuantum gürlüğü.

Kuantum Optiğin tanımını "Encyclopedia of Physics" (Fizik Ansiklopedisi) ne baş vurarak yapmanın zamanı gelmiş bulunuyor :

"Kuantum Optik; ışığın, daha genel olarak elektromanyetik alanın, kuantum istatistiksel özelliklerini inceleyen fizik dalıdır."

Bu tanımda geçen "kuantum istatistiksel özellikler" ile, herhangi bir şeyi gözleme olasılıkları dağılımı veya bir ölçümde algılanan sinyalin kuantum doğasına bağlı olarak bu ölçümdeki karakteristik belirsizlik kastedilmektedir.

Hanbury Brown - Twiss interferometresine dönelim. İki koldan gelen sinyalleri karşılaştırarak ışık enerjisindeki bağıl sapmayı ölçmekteyiz. Bu sapma, verilen bir foton enerjisini gözleme olasılığı dağılımının ortalama değerinden veya genişliğinden bir sapmadır.

Burada şunu belirtmemiz gerekiyor. Kuantum mekaniğinin ilk günlerinde, 1909'da, G. I. Taylor, optik bir girişim olayındaki kuantum etkilerini bulmayı denemiş, ancak olumsuz bir sonuçla karşılaşmıştı. Bu deneyde standart bir interferometre ile bir tek ışın çıktısı kullanılmış ve ortalama ışık şiddeti (yoğunluğu) ölçülmüştü. Halbuki kuantum dalgalanmalarını görebilmek için yapılması gereken, bir tek ışın içerisindeki yoğunluğun farklı kuantum değerlerini karşılaştırmaktır. Ve bu karşılaştırma doğru olarak Hanbury Brown - Twiss deneyinde yapılmıştır.

Hanbury Brown - Twiss deneyinde, bir ısı ışık kaynağı (sıradan bir elektrik ampulu gibi) için ışık şiddeti fonksiyonunda, şimdi foton demetleşmesi (photon bunching) olarak bilinen, bir artış görülmüştür. Bu, ısı kaynağı tarafından yaratılan ışıktaki geniş yoğunluk (şiddet) dalgalanmalarının bir so-

nucudur. Fiziksel açıdan bu olayın anlamı, fotonların gruplar oluşturma eğiliminin varlığıdır. Foton detektörünün ısı kaynaktan gelen fotonları birer birer saymak yerine gruplar halinde kaydettiğini söyleyebiliriz. Bu foton demetleşmesi görüngüsü kuantum mekaniği tarafından tanımlanır ve klasik fizikle çelişkili değildir.

1960'ların ortalarında Amerika ve Avrupa'da bir kaç deney grubu fotonların kuantum istatistiksel özelliklerini yeni lazer ışığı kaynaklarıyla incelediler. Foton demetleşmesinin, genliği mükemmel seviyede kararlı kılınmış lazer ışığı için mümkün olmadığını buldular. Başka bir ifadeyle lazer birbiriyle tamamen ilintisiz fotonlar üretmektedir. Fotonlar lazeri bölük bölük dizilmiş askerler gibi terkederler. Bu sonuç Roy Glauber' in 1963 yılında geliştirdiği kuantum teorisinin tahminleriyle uyum içerisinde ve ayrıca klasik fizikle de çelişmemektedir.

Glauber' in teorisine dayanarak son derece ilginç bir başka görüngü de tahmin edilebilmekteydi. Bu görüngü foton karşı-demetleşmesi (photon anti-bunching) olarak isimlendirilmiştir. Buna göre ışığın öyle özel bir kuantum hali bulunabilir ki, fotonların detektör tarafından ayrı ayrı algılanması olasılığı çiftler ya da gruplar olarak algılanmalarından daha fazla olur. Bu nitelikte ışık yaratabilen bir kaynak, standart bir lazerin üretebileceğinden daha düzenli fotonlar üretebilmelidir. Bu etki klasik olmayan bir etkidir ve klasik fiziğin çerçevesinde açıklanmasına engel olan temel bir ayırıklık mevcuttur. Klasik olarak bu etkiyi açıklamaya kalkışırsak, verilen sayıda klasik fotona sahip olma olasılığının sıfırdan küçük değerler aldığı kabul etmeliyiz. Fakat sıfırdan küçük olasılıklar anlaşılabilir. Matematik bilginiz herhangi bir olay için 0 ile 1 arasında olasılıklar öngörmektedir. Dolayısıyla foton karşı - demetleşmesi klasik benzeri olmayan tamamen kuantum mekaniksel bir etkidir. Daha evvel kullandığımız asker veya öğrenci grupları benzetmeleriyle bu yeni etkiyi açıklamak da oldukça güç bir iştir. Benzetmemizde özel bir mekanizmanın varlığını kabul etmeliyiz, öyle ki paydos zili çaldığında eğer bir öğrenci okulu terkederse diğerleri hemen ayrılmayıp bir müd-

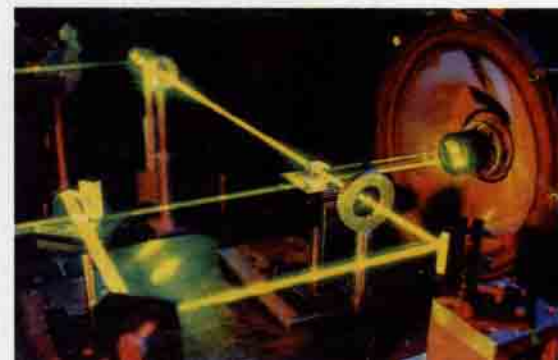
det beklesinler. Bu tür bir mekanizma ancak sistemin kuantum nitelikleriyle tanımlanabilir.

Bu tür kaynakların nasıl yapılabileceği ilk defa 1975 yılında H. Carmichael ve D. Walls' in "rezonans flüorışı" (resonance fluorescence) içerisinde yaratılan ışığın foton karşı-demetleşmesi göstereceğini tahmin etmesiyle gün ışığına çıkmış oldu. Rezonans flüorışının yüzyılımızın başlarında J. Wood tarafından sodyum buharında gözlemlenmiş, iyi bilinen bir optik görüngü olduğunu belirtelim. Bu terim dışarıdan gelen bir ışığın etkisine karşı bir atom kümesinin göstereceği tepkiyi ifade etmek için kullanılır. Karşılaşılan tepki ışık-atom etkileşiminin kuantum özellikleri yüzünden doğrusal (linear) olmayan biçimdedir: Eğer belirli frekansta bir alan etki ediyorsa, tepki olarak elde edilecek ışık içerisinde biri ışın pompasının frekansıyla aynı üç farklı frekans görülecektir. Farklı frekanslardaki fotonların yaratılması işlemleri arasındaki çekişmeden dolayı ışığın kuantum istatistiksel özellikleri epey değişmiştir ve bu sayede foton karşı-demetleşmesini gözlemleyebilmek mümkün olmuştur.

Rochester Üniversitesi'nden J. Kimble, M. Dagenais ve L. Mandel tarafından 1976 yılında gerçekleştirilen bir deney ile foton karşı-demetleşmesinin gözlemlenmesi fikri hayata kavuşmuş oldu. Bu, optik alanında gözlemlenen ilk klasik olmayan, saf kuantum etkiydi ve kuantum optik tarihinde yeni bir sayfa açıyordu. Fizikçiler klasik fiziğin bakış açısından prensip olarak görülmesi imkansız bir olaya kendi gözleriyle tanık oldular!

Bu görüngünün standart lazerin gürlüğü seviyesinin altında yoğunluk dalgalanmalarına sahip ışık üretebilecek kalitede yeni lazerler yapımında kullanılması çok gecikmedi. Nippon Telgraf ve Telefon Ortaklığında çalışmakta olan Y. Yamamoto bu sahadaki deneysel gelişmelerin öncülüğünü yaptı. Amacına ulaşmak için rezonans flüorışı yerine bir yarı iletken lazerde ışığı üreten elektronların özelliklerini kontrol etmeyi mümkün kılan özel bir mekanizmadan yararlandı.

Neredeyse aynı anda, yeni ve şaşırtıcı bir etki daha tahmin edildi. Bu da tamamen kuantum mekaniksel olup klasik fiziğin görüş alanının dışındaydı ve 1946 yılında N.



Bogolubov'un öne sürdüğü temel bir fikre dayanmaktaydı. Bu fikre göre fotonların yaratılması ve söğurulmesi işlemlerinin karışımı olan-bir işlem, alanın birikim (collective) hali denilen özel bir duruma yol açmaktaydı. Daha sonra bir kaç bilim adamı tarafından böyle bir durumun alan genliğindeki kuantum belirsizliğini azaltacağı yolunda bulgular elde edildi. Bu yeni etki klasik bir benzeri olmayan bir başka etkiydi ve



Klasik ve Kuantum Faz

Tuğrul Hakioglu
Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü

Suya atılan bir taşın yarattığı dalgaların nasıl yayıldığını hiç merak ettiniz mi? Peki ya iyi düşünülmeden yapılmış bir konser salonunda değişik noktalarından nasıl olup da farklı enstrümanların seslerinin farklı geldiğini? Bunun kuantum optiği ile ne ilişkisi var demeyin. Tüm bunlar fizik dilinde dalga hareketi dediğimiz olayın karakteristik bir özelliği olan girişimin (interference) günlük yaşamımızda da sık sık karşılaşılabileceğimiz birçok örneğinden sadece ikisi. Dalga hareketinin ve özellikle girişim olayının anlaşılmasında önemli rol oynayan bir kavram vardır: Faz. Faz günlük yaşamımızda bile farkında olmadan çok büyük etkisi olan dalgaların hareketinin adeta kimliğini belirleyecek kadar önemlidir. Bu köşede fazi bir fiziksel kavram olarak anlamaya çalışacağız. Bunun için iki farklı yorum gerekeceğiz. Bu yorumlardan ilki günlük yaşamımıza, düşünüş biçimimize daha yakın olan ve fazın dalga fiziğindeki anahtar rolünü temel alan klasik yorum olacaktır. İkinci yaklaşımda ise fazın mikro evrende (kuantum dünyasında) dalganın parçacık yapısı ile ilişkili olan kuantum yorumunu inceleyeceğiz. Bu iki yorum aslında kuantum mekaniğinde maddenin dalga ve parçacık kaynaklı iki farklı yorumu olmasından ileri gelmektedir. İlk defa A.H. Compton 1923'te ışığın kuantum yapısını ışık-elektron saçılma deneyinde gözlemlemiştir. Bu önemli deney 1905'de A.Einstein'in fotoelektrik olayının yorumu ve Max Planck'ın 1900'de ortaya attığı foton hipotezi ile birlikte ışığın parçacık karakterini perçinlemiştir. Buna rağmen ışık her zaman bir parçacık gibi davranmamaktadır. Örneğin Thomas Young'ın 1802'de gerçekleştirdiği saçılma ve girişim deneylerinden bu yana ışığın dalga karakterinde olduğu bilinmektedir. Klasik dünyamızda farkına varamadığımız dalga-parçacık ikiliği (duality) kuantum dünyasına ilk defa Niels Bohr tarafından tamamlanmış ikisi (complementarity principle) olarak sokulmuştur. Bohr'un kendi dilinden bu önemli ikilik şöyle açıklanıyordu: Dalga ve parçacık görüntüleri bir kuantum olayını anlamakta tamamlayıcı rol oynar. Hangi görüntünün söz konusu olduğu yapılan deneyin doğasına ve koşullarına bağlıdır.

kuantum dalgalanmalarının sıkıştırılması (squeezing of quantum fluctuations) olarak isimlendirildi.

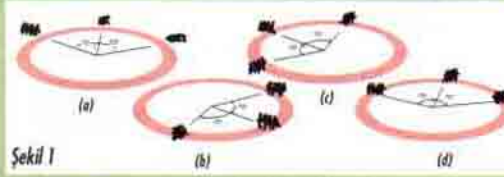
Optik ölçümlerdeki kuantum sınırlamaları, sıkıştırılmış ışığın azaltılmış kuantum dalgalanmalarını kullanarak zamana duyarlı ölçümlerin olanaklı kılınmasıyla ortadan kaldırıldılar. Sıkıştırılmış ışık ilk defa AT&T Bell laboratuvarlarında 1985 yılında R. E. Slusher tarafından gözlemlenebildi. Bunu diğer başarılı deneyler izledi. Bu tür bir ışığın fiziksel ölçümlerdeki yararı 1987 yılında Texas Üniver-

terinde olduğu bilinmektedir. Klasik dünyamızda farkına varamadığımız dalga-parçacık ikiliği (duality) kuantum dünyasına ilk defa Niels Bohr tarafından tamamlanmış ikisi (complementarity principle) olarak sokulmuştur.

Bu genel girişten sonra şimdi fazın klasik yorumuna ilişkin dalga karakterini inceleyeceğiz. Bunun için önce çok başlıca dönerek periyodik olaylara kısaca bakmamız gerekmektedir. Eğer bir fiziksel olay periyodik ise olayın zaman içerisindeki davranışı belli bir zaman aralığı geçtikten sonra aynı şekilde tekrar eder. Bu zaman aralığına periyot diyoruz. Şekil 1 de bir atlet 400 m uzunluğundaki bir yarış pistinde koşuyor. Atletin bir turu 50 saniyede tamamladığını varsayalım. Atletimizin iyi bir kondisyona sahip olduğunu ve daha sonraki turlarda da hızını sabit tutabildiğini düşünersek ikinci turu bitirmesi için gerekli olan zaman yine 50 saniye olacaktır. Yukarıdaki tanımımızdan yola çıkarak bu koşunun periyodunun 50 saniye olduğu hemen söylenebilir. Şimdi iki atletin beraber koşuşunu varsayalım. İkinci atlet birincisinden 10 saniye sonra koşmaya başlasın. Eğer iki atlet de aynı hızlarda koşuyorsa aralarında pistin merkezine göre tanımlanmış açı 72 derece olacaktır. Bu açıyı iki atlet arasındaki faz farkı olarak tanımlıyoruz. Atletler farklı hızlarda koşuyor olsalardı bu faz farkı zaman ile artıp azalabilecek, değişmez bir faz farkı değerinden bahsetmemiz olanaksız olacaktır. Burada işlediğimiz periyot ve faz farkı gibi kavramların tüm periyodik olaylar için geçerli olan genel bir çerçevede anlaşılması gerektiğini belirtmekte yarar var. Eğer bir elektromanyetik dalga uzayda yayılıyorsa belli bir noktada zamana bağlı fonksiyonu şekil 2a da görülen sinyale benzer. Şekil 2b de ise bu sinyalin belli bir faz farkına uğramış hali görülmekte. Diyelim ki bu faz farkı 15 derece olsun. Sinyallerin

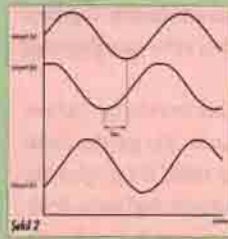
sitesi'nde J. Kimble'ın gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda kendini gösterdi. Kimble, ölçümlerindeki kesinliği bir kaç kez arttırabilmek amacıyla standart bir optik interferometrede sıkıştırılmış ışık kullanmıştı. Bu önemli deneysel sonuç, optik bir deney sayesinde gravitasyonel dalgaların algılanabileceğinin mümkün olduğunu su götürmez bir biçimde ortaya koymaktaydı.

Azaltılmış kuantum gürültüsü taşıyan ışığın yaratılmasındaki deneysel başarı, bu kalitede bir ışığın ihtiyacı hissedilen çeşitli uygulama alanlarından gelen taleplere cevap vermeye olanak tanıdı. Bunlardan en önemlilerinden biri de optik haberleşmeler-



Şekil 1

periyodlarının 1.6×10^{-13} saniye olduğunu varsayalım. Bu spektroskopide mavi-yeşil arası renkteki bir ışığın periyoduna karşılık gelmektedir. Elektromanyetik dalgaların boşluktaki hızlarının yaklaşık olarak saniyede 300 000 kilometre olduğunu düşünürsek bu iki mavi-yeşil arası ışık dalgasının birbirlerini 1.875×10^6 metre bir aralıkla kovaladıklarını söyleyebiliriz. Yani her iki dalganın genliklerinin aynı olduğu noktalar birbirlerinden bir metrenin 100 milyonda biri mertebesinde bir uzunluk ile ayrılmışlardır. Buna rağmen aralarındaki faz farkı iki sinyali birbirlerinden yeterince farklı duruma getirmeye yetmektedir. Bunu iki sinyalin arasındaki farkı bularak (yani birbirinden çıkartarak) gösterebiliriz. Bu işlemi yaptığımızda şekil 2c de görülen fonksiyonu buluruz. Eğer faz farkı sıfıra eşit olsaydı bu fonksiyon da sıfıra eşit olacaktı. Bu fonksiyonun genliği iki sinyal arasındaki faz farkını bulmamıza yardımcı olur. Bu anlattıklarımız geniş bir girişim olayının ana hatlarına sadık kalan basitleştirilmiş bir örnek olarak ele alınabilir. Girişim olayı dalga hareketine özgü bir kavramdır. Burada girişimin anlaşılabilmesi için faz kavramının oynadığı önemli rolü böylece görmüş oluyoruz. Gelelim girişimin günlük hayatta rastladığımız ilginç bir örneğine. Hepimiz denize taş atma oyununu severek oynamışızdır. Oynarken belki de çoğumuz burada işlemekte olduğumuz temel kavramlar ile ilgili bir deney yapmakta olduğunun farkına varmaz. Durgun ve derin bir suya atılan taş düzgün yayılan dairesel halkalar oluşturur. Eğer su yüzeyine aynı anda iki taş atılmışsa bu iki kaynaktan yayılan dalgalar yüzeyde birleşerek il-



Şekil 2

ki bularak (yani birbirinden çıkartarak) gösterebiliriz. Bu işlemi yaptığımızda şekil 2c de görülen fonksiyonu buluruz. Eğer faz farkı sıfıra eşit olsaydı bu fonksiyon da sıfıra eşit olacaktı. Bu fonksiyonun genliği iki sinyal arasındaki faz farkını bulmamıza yardımcı olur. Bu anlattıklarımız geniş bir girişim olayının ana hatlarına sadık kalan basitleştirilmiş bir örnek olarak ele alınabilir. Girişim olayı dalga hareketine özgü bir kavramdır. Burada girişimin anlaşılabilmesi için faz kavramının oynadığı önemli rolü böylece görmüş oluyoruz. Gelelim girişimin günlük hayatta rastladığımız ilginç bir örneğine. Hepimiz denize taş atma oyununu severek oynamışızdır. Oynarken belki de çoğumuz burada işlemekte olduğumuz temel kavramlar ile ilgili bir deney yapmakta olduğunun farkına varmaz. Durgun ve derin bir suya atılan taş düzgün yayılan dairesel halkalar oluşturur. Eğer su yüzeyine aynı anda iki taş atılmışsa bu iki kaynaktan yayılan dalgalar yüzeyde birleşerek il-

deki kuantum gürültüsünün düşürülmesidir.

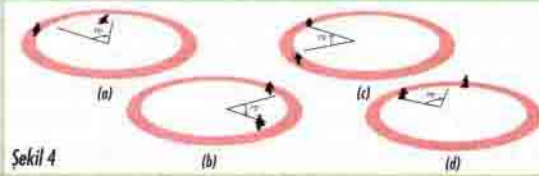
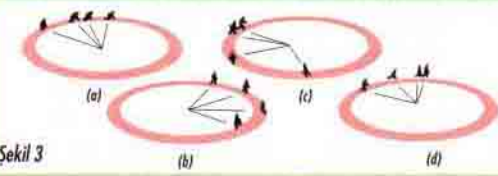
Bilgi iletiminde optik kabloların (fiberlerin), elektrik akımının geleneksel kullanımından çok daha etkili olduğu bilinmektedir. Yeni telefon hatları ve televizyon kabloları optik fiberlerden imal edilmektedir. Herhangi bir bilgi kanalının kalitesi bilgi kapasitesi denilen bir büyüklükle belirlenir. Bu büyüklük bilgiyi taşıyan elektromanyetik alanın salınım frekansı ile orantılıdır. Görünür ışığın frekansı elektrik akımının frekansından çok daha yüksektir. Bundan dolayı geleneksel



elektrik teline kıyasla optik fiber taşıyabilecek bilgi miktarını yüz binlerce katına çıkarabilir! Aynı zamanda bilgi kapasitesinin kanaldaki gürültülerin seviyesine de bağlı olduğunu belirtmeliyiz. Tam olarak ifade etmek gerekirse, verilen bir frekanstaki bilgi kapasitesi sinyalin gürültüye oranı denilen bir büyüklükle verilmektedir. Optik sinyaller için bu oran elektromanyetik dalganın genliğinin ortalama değerinin karesiyle doğru ve bu genliğin dalgalanmalarının ortalama değeriyle ters orantılıdır. Modern optik ileti-

şim sistemlerinde kullanılan lazer ışığı bu oranın paydası için sabit bir değer verirken, ışık genliğindeki kuantum dalgalanmalarının sıkıştırılmasıyla bu payda pek çok kez düşürülebilmektedir. Bu şekilde kanalın bilgi kapasitesi bir kaç kez artırılmış olur. Bir başka deyişle alışlagelmiş lazer ışması yerine sıkıştırılmış ışıktan faydalanmak yoluyla bir fiberden aktarılan bilgi miktarı milyonlarca kez artabilmektedir.

Bastırılmış kuantum gürültüsüne sahip ışığın diğer bir kullanım alanı da atomların, moleküllerin, ve katıların spektroskopik incelenmesi olarak karşımıza çıkar. Yeni kuantum ışığının süregelen spektroskopik öl-



ginç desenler oluşturur. Bu desenler iki dalganın farklı noktalardan kaynaklanmasının etkisi ile meydana gelen faz farkından oluşur. Demek bu örnekte de gördüğümüz gibi faz, girişimi oluşturan bir etkidir. Bu yazıda elektromanyetik dalgaların foton dediğimiz parçacıklardan oluştuğunu öğrendik. Fotonlar kuantum mekaniğinin kuralları çerçevesinde oluşturdukları dalganın enerji ve momentumunu taşır. Yukarıdaki atlet örneğinde olduğu gibi fotonları birbin peşi sıra belli bir periyotta koşan parçacıklar gibi görebiliriz. Yalnız burada dikkatli olmamız gerekmektedir. Çünkü fotonlar boşlukta sabit bir hızda hareket eder. Bu nedenle atlet örneğini fotonlara uygulamak söz konusu olduğu zaman foton hızından değil foton enerjisinden bahsedeceğiz. Klasik bir elektromanyetik dalgada ideal halde sonsuz parçacık bulunması gerekir. Bilinen gerçekler söz konusu olduğu zaman ise sonsuz, matematiksel bir sınırdır. Örneğin 100W gücünde bir oda lambası bir saniyede yaklaşık 10^{23} (yani on milyar kere bir milyar kere bir milyon) foton saçar. Bir lazerin çalışma prensibi ise kuantum mekaniğinin ilkelerine uygundur. Buna rağmen lazerde oluşan ışık klasik elektromanyetik dalgaya en çok benzeyen ışıktır. Örneğin 10W gücünde bir Argon lazeri 1.6×10^{15} saniyelik bir periyotta mavi-yeşil bir ışık oluşturur. Bu kısa zaman aralığında yaklaşık bir milyon foton yayar. Buna rağmen lazerin bir oda lambasından farklı olmasını sağlayan faza ilişkin bir özellik vardır. Şimdi bunu anlamaya çalışalım.

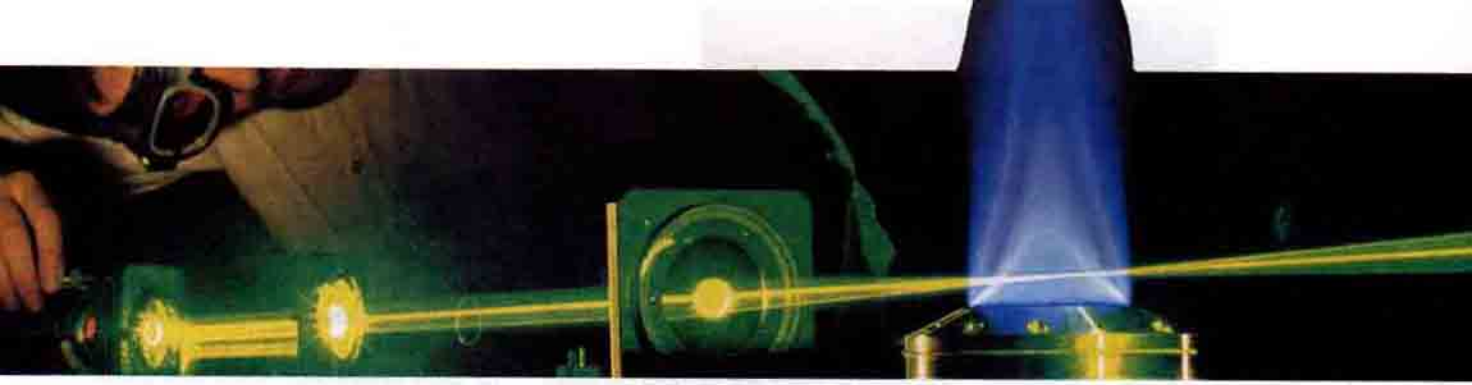
Alice birgün Harikalar Diyan'nda iken üzüntüsünden göz yaşlarını tutamaz ve çok ağlar. Gözyaşları birikerek bir havuz oluşturur. Sonunda Alice ve Harikalar Diyan'ın sevimli yaratıkları dengelerini koruyamayıp bu havuza düşerler. Canlarını kurtarıp havuzdan çıktıklarında ise hepsi sırsıklam olmuştur. Alice kuruyabilmek için herkesin katıldığı

bir yarış düzenler. Yarışın kuralları hemen hemen yok gibidir. Herkes istediği zaman koşmaya başlar, istediği hızda koşar ve istediği gibi yarış bırakır. Bir iki tur sonra kimin ne konumda olduğu belirsiz bir hale gelmiştir. Böylece kimin önce başladığı ve kimin önce bitirdiği konusunda kimse anlayamaz ve herkes bir ödül alır. Bir oda lambasından çıkan değişik enerjili fotonlar da şekil. 3 te görüldüğü gibi Alice ve arkadaşlarının yarışına benzer şekilde hareket eder. Bu nedenle fotonlar arasındaki faz farkı bir değişmez olmaktan çıkar ve tamamen istatistiksel davranır. Fazın aldığı değerler 0 ile 360 derece arasına yayılmış geniş bir olasılık fonksiyonu ile gösterilir. Şimdi aynı olasılık dağılımının bir lazerde nasıl olduğunu görelim. Önce lazerin yarattığı foton sayısının çok az olduğunu düşünelim. Bu bizi klasik dalga kavramından uzaklaştırıp olaya kuantum mekaniğisel olarak bakmamıza yardımcı olur. Bir lazerden çıkan fotonların arasındaki faz farkı yarış pistinde eşit hızlarda dönen atletlerin aralarındaki uzaklık gibi çok duyarlı bir biçimde belirlenebilmektedir. Bu durumu şekil.4 'te gösteriyoruz. Şimdi diyelim ki belirli bir sayıda fotondan oluşmuş gruplar belli bir enerjide yayılmışsın. Tüm gruplar arasındaki faz farkları eşit hızda koşan atletlerin durumunda olduğu gibi sabit olacaktır. Lazeri oda lambasından ayıran en önemli özellik ise bu faz farkındaki belirsizliğin yok denecek kadar az olmasıdır. Fotonların bu davranışına kolektif durum diyoruz. Lazerin güçlü bir kaynak olabilmesi bu kolektif durum sayesinde mümkün olabilmektedir. Bu kolektif durum sonucu ortaya çıkan faz olasılıkları belli bir ortalama değer etrafında dar bir alana dağılmıştır. Bu olasılık dağılımı tutarlı dağılım (coherent) dediğimiz olasılık dağılıma karşı gelir. Bu, oda lambası örneğinde karşımıza çıkan kaotik dağılımın tam tersi bir durumdur.

Kuantum mekaniğindeki belirsizlik ilkesinin doğal sonucu olarak faz ölçümündeki belirsizlik ile foton sayısı ölçümündeki belirsizlik ters orantılıdır. Klasik düşünüş biçimi-

miz ile bu belirsizlik ilkesinin anlaşılması mümkün değildir. Buna rağmen basit bir örnek, faz-foton sayısı belirsizlik ilkesini anlamamıza yardımcı olacaktır. Diyelim ki şekil.4 teki gruplarda bulunan foton sayılarını ölçmek istiyoruz. Bunu yapabilmek için ilk grup ile ilgili ölçümleri ikinci foton grubu gelmeye başlamadan bitirmek zorundayız. Bu deneyin sonucu olarak faz farkı hakkındaki bilgimiz fazın değerini tam olarak belirlemeye yemez. Çünkü fazı gruplar arasında tanımlamıştık. Foton sayısını ne kadar kesin ölçmek istersek faz da ortalama değerinden o kadar sapmış gibi davranır. Şimdi ise fazı doğru olarak ölçmeye çalışalım. Bunu sağlayabilmek için deney aralığını uzun tutarak fazla sayıda foton gruplarının detektörümüze gelmesini sağlamalıyız. Bu sefer kaybettiğimiz bilgi her foton grubunda kaç foton olduğudur. Demek ki fazı ne kadar iyi ölçmeye çalışırsak foton sayısında o kadar sapma gözlenmektedir. Böylece faz farkı ve foton sayısındaki ölçümler birbirleri ile ters orantılı belirsizlikler vermektedir. Bu olay konjuge değişkenlerin en tipik özelliklerinden biridir.

Kuantum mekaniğinin 1900'li yılların başlarından bugüne kadar süren evriminde fazı kuantum mekaniğisel olarak yorumlama çabası matematiksel olarak henüz tam başarılamamıştır. Buna rağmen kuantum fazı konusunda bilinenler özellikle kuantum optik kapsamındaki birçok konuda gelişmelere olanak sağlamıştır. Bunların arasında lineer (doğrusal) olmayan optik sistemler, tek atomlu lazer ile yapılan ölçümler, zayıf genlikli elektromanyetik dalgalarda polarizasyon olayının anlaşılması, faz ilişkilikleri (phase correlations), fazdaki kuantum gürültünün saptanması, oyuk (cavity) elektrodinamiği v.b. gibi birçok konuyu sayabiliriz.



çümlerin çözünürlük ve hassasiyetini artırmakla kalmayıp katıların içlerindeki gizemin daha önce hiç olmadığı kadar ayrıntılı ve doğrudan bir biçimde açığa çıkarılmasına imkan tanıdığına altı çizilmelidir. Yarı iletkenler ve süper iletkenler gibi pek çok maddenin özelliklerini anlayabilmek açısından bu, üzerinde önemle durulması gereken bir noktadır.

Işığın yeni kuantum durumlarının kullanımlarından hangisinin en yüksek pratik değer taşıdığı ve daha ne gibi faydalar edinebileceği şu anda yeterince açıklığa kavuşmuş olmasa da uygulama alanlarının zenginliği gelecek açısından umut vericidir. Bununla beraber kuantum optiğinin yeni fiziğin liderlik koltuğuna oturtan çok önemli bir nokta vardır. Kuantum optiğindeki ilerlemeler, özellikle iyice azaltılmış kuantum dalgalanımlarındaki ışıkların üretilmesi ve algılanabilmesi, modern optiği kuantum fiziğinin kendisi için verimli bir test alanı yapmaktadır. Her şeyden önce V. Braginsky'nin 1977 yılında Moskova Devlet Üniversitesi'nde ortaya koyduğu "tahripsiz kuantum ölçümleri" düşüncesinden bahsetmemiz yerinde olacaktır.

Kuantum fiziğinden bildiklerimize göre ölçülen her sinyal kuantum dalgalanımlarına sahiptir ve ölçme işlemi bu sinyal ile detektör arasındaki etkileşim olarak düşünülebilir. Bu etkileşim bir kuantum işlemidir ve ölçümün sonucuna ek bir belirsizlik daha ilave eder. Tahripsiz kuantum ölçümleri fikri, iyice azaltılmış gürültü içeren bir sinyalin kullanımı (sıkıştırılmış ışık gibi) ve gürültüyü bu ölçümde algılanmayan fiziksel

gözlenire yönlendirerek ölçüm işleminin geri etki gürültüsünden kaçınmaktan oluşmaktadır. Bu şekilde bir gözlenirin büyüklüğü ona hiç bir zarar vermeden ölçülebilmektedir, öyle ki, sonraki ölçümler ilkiyle aynı kesinlikte yapılabilir. Bu yaklaşım kuantum teorisinin temel bir sınavının yapılabilmesine olanak tanımıştır.

İyon tuzaklanması teknolojisindeki gelişmelerle kuantum optiksel deneylerde dramatik, çarpıcı ilerlemelerin ve yeni yolların önü açılmış oldu. Elektrostatik ve salınım yapan elektromanyetik alanların özel kombinasyonlarını kullanarak tek bir iyonu çok küçük bir uzay bölgesinde bir kaç dakika kadar tutmak mümkün olmaktadır. Atom-foton etkileşim işleminin karakteristik süresinden çok daha uzun olan bu zaman zarfında son derece yüksek kesinlik ile kuantum fiziğinin pek çok teorik öngörüsünü sınamak mümkün olmaktadır. Bu teorik tahminler arasında kuantum fiziğinin temel fikirleri de yer almaktadır ve bunlardan Niels Bohr'un "Tamamlayıcılık İlkesi" üzerinde durmak gerekmektedir. Bu önemli ve temel prensip klasik fizik ve kuantum fiziği arasındaki esas farklılığı ifade eder. Buna göre, bir kuantum sisteminin verilen belirli bir durumunu anlatan tüm kuantum gözlenirleri iki alternatif sınıf oluştururlar. Her bir sınıfın her bir gözleniri diğer grupta bir akis (conjugate) gözlenirine sahiptir (konum ile momentum ve enerji ile zaman gibi). Bu iki akis gözlemlenebilirlerinden yalnızca biri kesin, belirli bir değer alabilir ya da ikisi de kuantum belirsizlikleri içerisinde değerler kazanırlar. Bu iki sınıf birbirinin tamamlayıcıdır. Klasik fizikte böyle bir ayrım yoktur ve kuantum fiziğine aykırı olarak bir klasik sistemin her durumu akis gözlenirlerinden oluşmuş bir tam küme (complete set) ile anlatılabilir. Bunun özel bir halini bu yazıda bulunan "Klasik ve Kuantum Faz" adlı makalede bulabilirsiniz.

Kuantum optikte şu an inceleme altında olan bir diğer temel prensip de kuantum sıçramalarının varlığıdır. Klasik fizikte herhangi bir parçacığın hareketi gerçek uzayda bir yörünge ile karakterize edilirken kuantum dünyasında, parçacıklar yaratılır ve yok edilirler. Mesela, kuantum perspektifinden bakıldığında bir atomik enerji düzeyinin

uyarılması, bir elektronun atlardaki bir enerji düzeyinde yok edilip aynı anda uyarılması istenilen söz konusu düzeyde yaratılmasıyla anlatılır ve bu, elektronun alt düzeyden üste sıçraması gibi kurgulanabilir.

Tuzaklanmış atomlar üzerinde yürütülen çalışmalar belirli bir atomik düzeydeki elektron nüfusunun kuantum salınımlarının "sönüş ve diriliş" (collapse and revival) inin gözlemlenebilmesine de olanak verdi. Bu son derece ilginç kuantum etkisi bir atomun lazer ışını tarafından belirlenmiş ilk durumuna periyodik olarak dönme olasılığının davranışını betimlemektedir. Bu etki J. Eberly ile grubu tarafından Rochester Üniversitesi'nde tahmin edilmiş ve sonra Münih'te bulunan Max Planck Kuantum Optik Enstitüsü'nde H. Walter'in deneysel araştırma grubu tarafından keşfedilmiştir. Burada bir atom, hafızası olan orjinal bir sarkaç gibi davranmaktadır: Düzey nüfusu sönümlü bir salınımla dinginlik haline kadar sallanır ve bir süre sonra ilk durumunu hatırlayarak tekrar salınım hareketine başlar. Bu salınımlar tekrarlı olarak çalışırlar ve sistem kaotik bir davranış gösterir. Bu kaotizasyon bir dirilişten diğerine faz belirsizliğinin birikimiyle bağlantılıdır.

Şu anda kuantum optikte üzerinde çalışılan bol miktarda kuantum etkisi vardır. Fakat daha genel ve daha önemli bir konunun varlığı da dikkat çekicidir. Hiç bir klasik benzeri olmayan, tamamen kuantum doğasına sahip, doğrusal olmayan (nonlinear) işlemlerle ilgilenirken kuantum optik kesin olarak, doğrusal olmayan görüngülerin kuantum fiziği diyebileceğimiz yeni bir boyutun kapısını aralamıştır. İşte bu nedenle kuantum optik alanı modern fiziğin bu günkü çekirdeğini oluşturmaktadır. Dünyanın dört bir yanında pek çok araştırmacı ve bilim adamı bu konuda çalışmalarını sürdürmektedir. Bu grupların biri de Türkiye'de, Bilkent Üniversitesi'nde bulunmaktadır.

Özetle kuantum optik, kuantum fiziğinin temellerini sorgulamaktan iletişim için yeni ışık kaynaklarının üretimine kadar geniş bir yelpazede konular çeşnisi sunmaktadır.

Kaynaklar
Dereh, T., "21. Yüzyıl Yaşamı İçin Kuantum Fiziği", Bilim ve Teknik, Eylül 1994
"Nonlinear Optics", Special Issue, Physics Today, Mayıs 1994
Walls, D. F., "Quantum Optics", Nature 1988

