



# Ne Çok Büyük, Ne Çok Küçük Mezoskopik

Pascal "...ve, (insan) kendisini Doğa'nın sunduğu maddesel şekilde, Sonsuzluk ve Hiçlik uçurumları arasına iliştirilmiş görünce bu mucizevi hazinelere tanıklık ederek titreyecek..." derken Gulliver'in Lilliput ve Brobdingnag'ta yaşadığı şaşkınlık, merak ve korkuya mı işaret ediyordu bilemiyoruz. Fakat fizikçiler, Sonsuzluk ve Hiçlik uçurumları arasındaki bilinmeyen bölgede en az onlar kadar büyüleyici bir manzara ile karşılaştıklarında korku ile titremek ve suskun kalmak yerine, bu yeni 'evren'in kucağına bıraktılar kendilerini. Şimdi, Makroskopik ve Mikroskopik dünyaların kesişim noktasında yepyeni ufuklara uzanan bir kapı aralanıyor bilimadamlarının önünde. Mezoskopik fizik, sunduğu temel buluşlar ve vaadettiği teknolojik yeniliklerle, gelecek yüzyıla imzasını atmaya hazırlanıyor...

Erkan Tekman  
Bilkent Ün. Fizik Bölümü

**B**İLİM tarihinin köklü ve önemli dönüm noktalarından biri, evrenin iki değişik düzeyde algılanması ve çözümlenmesi düşüncesinin ortaya çıkışıdır. Daha ilk çağlarda insanoğlu, gözüyle görebildiği doğanın ardında (daha doğrusu içinde) göremediği, fakat dolaylı yollarla algılayabileceği ikinci bir doğanın varlığını duyumsamıştı. Doğa bilimlerinin gelişmesi ile bu ayrımın ne kadar yerinde olduğu ortaya çıktı.

Görünen büyükler dünyasının çoğu gizi, bilimin emin adımları karşısında ancak 19. yüzyıl sonlarına kadar dayanabildi. Artık insanlar, doğayı oldukça iyi anlayabiliyorlar, hatta bu bilgilerini bilimle elele yürüyen teknoloji sayesinde kullanılabilir ürünlere dönüştürme yollarını da bu-

luyorlardı. Sıra, kaçınılmaz olarak, çok daha az anlayabildiğimiz doğanın içine gelmişti. Yirminci yüzyılın doğuşu bu konuda da müjdelere getirdi: Kuantum mekaniği gelişmekteydi ve artık göremediğimiz küçükler dünyası da bilimin yetkinlik sınırları içine giriyordu.

Kuantum mekaniği yalnızca görünmeyen dünyayı insanların ayakları altına sermekle kalmadı, yüzyılların birikimi ile oluşmuş klasik mekaniğin pekçok öğretisini de -en azından küçükler dünyası sınırları içerisinde- yerle bir etti. Klasik fiziğin parçacık ve dalga diye ikiye ayırdığı enerji taşıyan etmenleri birbirine karıştırdı, bunların aslında aynı şeyler olduğunu gösterdi. Daha da ileri giderek aslında parçacık diye bir şey olmadığını, bizim çağlardır parçacık dediğimiz şey-



lerin dalganın özel bir durumu olduğunu öne sürdü. Dalgalar da bu karıştırdan paylarını aldılar. Klasik kuramın aksine, dalga enerjileri sürekli olarak değişmiyor, ancak kuantum denen temel birimin katları olabiliyordu. Kuantum fiziği, din adamlarını da klasik fizikçiler kadar endişelendirecek şekilde, evrende her şeyin belirginlik (determinizm) yerine olasılık kurallarına göre yer bulabildiğini yüzümüze vurdu. Kuantum mekaniğinin deneysel temelleri oldukça sağlam olduğundan bugün de geçerliliğini -hem de gitikçe güçlenerek- sürdürüyor. Yoksa bu derece kökten önmelerle yüklü bir kuram kısa sürede bilim tarihinin çöplüğünü boyardı.

Öte yandan klasik fiziğin günümüzde hâlâ geçerli bir bilim sayılması şaşırtıcı değil mi? Hayır, değil. Çünkü doğa gerçekten, eskilerin düşündüğü gibi, büyüklerin ve küçüklerin dünyası olarak tanımlanan iki parçadan oluşmakta. Büyükler dünyası, teknik deyim ile makroskopik evren, genelde klasik fizik kurallarına uygun işliyor ve günlük yaşamımızda kuantum etkilerini hesaba katmamız gerekmiyor. Gözle göremediğimiz küçükler dünyası, yani mikroskopik evren ise tümüyle kuantum fiziğinin emri altında. Mikro'dan makro'ya geçişte ise kuantum mekaniği aynen klasik kuramlara dönüşüyor. Bu gözlemin ardından fizikçiler onlarca yıl bu iki evrenden birini seçip çalışmalarını gönül rahatlığı ile bu evrene hükmeden fizik kurallarını kullanarak yaptılar.

Makroskopik ve mikroskopik evrenler arasında kalan bölge uzun süre pek kimsenin ilgisini çekmemişti. Kuantum fiziğinden klasik fiziğe düzgün ve sürekli bir geçiş çok da cazip bir araştırma konusu değildi. Fizikçiler bu geçiş bölgesinin tekdüzeliğinden ve tahmin edilebilirliğinden uzak durup makro ve mikro evrenlerde yeni atılımlar yapmayı tercih ettiler. Ta ki yirmi yıl öncesine kadar! Sharvin ve Sharvin'in temel bir kuantum olayı olan Aharonov-Bohm etkisini gözlemek amacıyla yaptıkları deney bu öngörünün ne kadar yanlış olduğunu ortaya çıkardı.

Aharonov-Bohm etkisi kuantum mekaniğin temel örneklerinden biri-

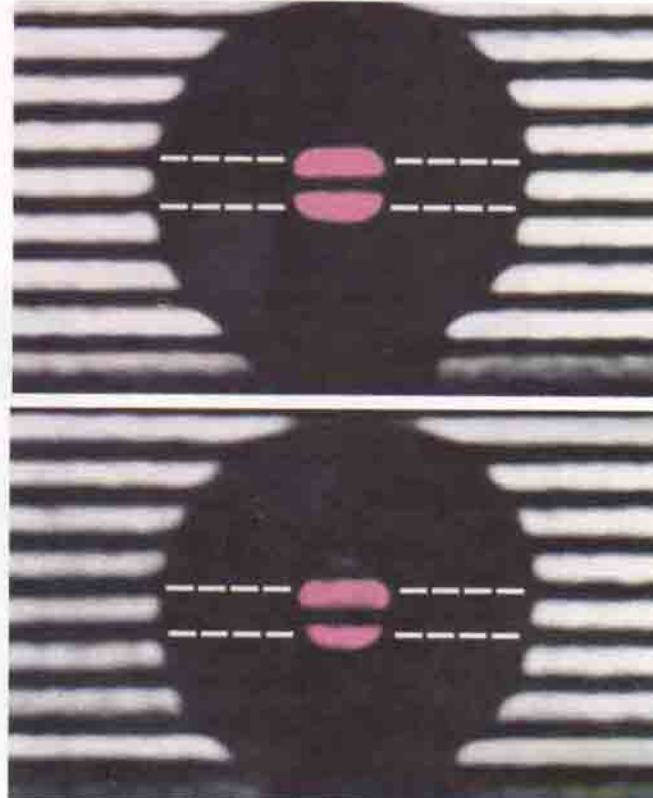
dir. Çok sıkı sarmış bir bobin kullanarak, yalnızca bobinin içine hapsolacak şekilde, bir manyetik akı oluşturduğumuzu varsayalım. Klasik olarak bu bobin etrafında dolanan bir elektron herhangi bir elektromanyetik kuvvet hissetmeyecek ve sonuçta manyetik akıdan kesinlikle etkilenmeyecektir. Oysa kuantum mekaniğine göre elektron dalga fonksiyonunun fazı bobinin sağından ya da soldan geçmesine bağlı olarak, manyetik akı ile orantılı bir şekilde artacak ya da azalacaktır. Bobinin iki yanından geçen dalgalar yeniden bir araya geldiklerinde farklı fazları nedeniyle bir girişim deseni oluşturacaklardır. İşte size şaşırtıcı bir kuantum etkisi daha: Elektronun davranışını, üzerine klasik olarak hiçbir kuvvet etkileden değiştirmek olası! 1959'da Aharonov ve Bohm'un kuramsal çalışması ile ortaya atılan bu girişim etkisi, bu iki fizikçinin adları ile anılmakta.

Aharonov-Bohm etkisi, kuramsal öngörünün ertesinde boşlukta elektron demetleri kullanılarak gözlemlendi. Parçacık-dalga ikiliğinin yeni bir sağlaması sayılan bu deneylerin ardından fizikçiler aynı olayı katı-hal yapıları ile gözlemeyi hedeflediler. 1975'de Sharvin ve Sharvin, çok ince iletken bir silindirin direncini manyetik alanın fonksiyonu olarak ölçtüklerinde görmeyi umdukları Aharonov-Bohm etkisi yerine son derece ilginç yeni sonuçlarla karşılaştılar. İzleyen yıllar, bu etkilerin nedenlerinin ve Aharonov-Bohm etkisinin neden görülemediğinin anlaşılması ile geçti. Mezoskopik fiziğin en harika kuramlarından biri olan zayıf yerelleşme kuramı işte bu dönemde, 1980'lerin başlarında ortaya atıldı. Zayıf yerelleşme kuramının Sharvin ve Sharvin deneyinin açıklanması ve ilgisiz gibi görünen, fakat bir süredir açıklama bekleyen diğer bazı deneysel sonuçların anlaşılması yolunda gösterdiği başarı bir anda yoğun madde fizikçilerinin ilgisini topladı.

Zayıf yerelleşme kuramını makroskopik ve mikrosko-

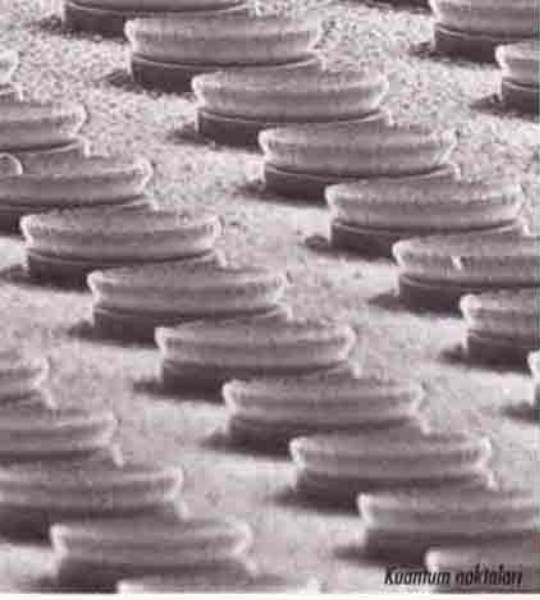
pik kuramlardan farklı kılan şey neydi? Zayıf yerelleşme, basitçe, düzensiz bir katıda elektronların iletim özelliklerini düzensizliklerden saçılmaları aracılığı ile açıklayan bir modeldir. Basit kavramlarla oluşturulan ilk betimlemelerde elektronları bir yandan klasik mekanikteki gibi nokta parçacıkları olarak düşünmek ve zaman içinde belli yörüngeler üzerinde hareket ettiklerini varsaymak, öte yandan da bir dalga özelliği olan fazlarını hesaba katmak ve girişim yapabileceklerini de düşünmek gerekiyordu. Yani elektronun aynı anda hem bir parçacık (klasik), hem de bir dalga (kuantum) gibi davrandığını kabullenmek!

Zayıf yerelleşme etkileri yalnızca makroskopik ile mikroskopik boyutlar arasında bir bölgede ortaya çıkıyordu kuramsal olarak. Daha büyük örneklerde kuantum özellikler tamamen yok oluyor ve klasik sonuçlara ulaşıyor; daha küçük örnekler ise tümüyle kuantum kurallarına uyuyorlar ve parçacıkların yerini artık dalgalar alıyordu. Oysa ortalar dünyası ne makroskopik ne de mikroskopik evrenlere benziyordu! Daha doğru bir deyişle, makro ve mikro özellikler bu orta evrende daha önceden



Elektron holografisi ile Aharonov-Bohm deneyi





Quantum noktaları

## Mezoskopik Teknolojisi

İsmet İ. Kaya  
Bilkent Ün. Fizik Bölümü

Mezoskopik deneylerinde kullanılan aygıtlar, ya yalıtkan bir örnek yüzeyinde metal ile oluşturulmuş, ya da yarıiletken malzemelerde iki-boyutlu elektron gazı kullanılarak elde edilmiş dar çizgiler, halkalar ve kollardan oluşur. Her iki yöntem de bir mikrondan çok daha ufak ölçeklerde ayrıntıları olan bir şeklin bir yüzey üzerine aktarılmasını gerektirir. Bu iş için, fotoğraf tab etmeye oldukça benzeyen, litografi tekniği kullanılmaktadır.

Litografi üç aşamada uygulanan bir tekniktir. Önce rezist adı verilen kimyasal ile kaplanan yüzeye istenen şeklin ışık, elektron ya da iyon demetleri kullanılarak işlenmesi; ardından rezistin kimyasal bir süreç sonunda aşındırılarak yüzey üzerinde bir maske oluşturulması; ve son olarak da kimyasal ya da fiziksel bir süreç yardımı ile mezoskopik yapının bu maske aracılığı ile yüzeye kazanması.

Mikroelektronik teknolojisinde, çok hızlı işlenebilmesi nedeniyle, optik litografi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemle rezist üzerine pozlanabilecek ayrıntılar, kırınım sınırı nedeniyle, ışığın dalga boyunun çok altına inemezler. Yani bu teknikte kullanılabilen ışığın (morötesi ışık) 0.2 mikrondan daha küçük bir bölgeye odaklanması imkansızdır. Oysa mezoskopik olguların gözlemlendiği boyutlar 0.1 mikron ya da daha küçüktür. Dalga boyu çok daha kısa olan X-ışınlarında da, çözümlenememiş teknolojik problemler nedeniyle, henüz beklenen büyüklüklere yaklaşamamıştır.

Şu anda 10 nm (yüzde bir mikron) limitine ulaşabilen tek yöntem elektron-demeti litografisidir. Elektronların üstünlüğü dalga boylarının çok kısa olmasıdır. Örneğin 10.000 volt gerilim ile hızlandırılan bir elektronun dalga boyu 0.1 angströmdür (yüzbinde bir mikron). Dolayısıyla, optik litografide karşılaşılan kırınım sınırı, elektronlar kullanıldığında ortadan kalkmaktadır. E-demeti litografisinde

tahmin edildiği gibi yavaşça karışıyorlar, tüm belirginlikleri ile birarada bulunabiliyorlardı. Aynı anda hem klasik, hem de kuantum! Bir yandan makroskopik, bir yandan mikroskopik! Ortalar dünyası açık bir şekilde fizikte özel yerini istiyordu. İsim yine Yunancadan geldi: mezoskopik. (Makro=büyük ile mikro=küçük arasında da olsa orta yakışırdı.) Sıra bu yeni fizik aleminin sırlarını keşfetmeye gelmişti. Bu konuda ne fizikçiler yaratıcı fikir yokluğu çekti-

ler, ne de bakir mezoskopik alanı onlara yeni problemler sunmakta cimri davrandı.

Öncelikle Aharonov-Bohm etkisini katı-hal yapıları ile gözlemek hedef alındı. Sharvin ve Sharvin deneyinin oldukça basit sayılabilecek tekniği, çeşitli sorunları da birlikte getiriyordu. Sharvin'lerin makroskopik denebilecek ölçekte bir örnek kullanarak mezoskopik bazı özellikleri bulabilmeleri her ne kadar ilginç olsa ve deneysel fizik açısından bir başarı sa-

ayrım gücünü belirleyen faktör, kullanılan rezist moleküllerinin büyüklüğü olmaktadır. Örneğin, en iyi ayrıntı elde edilen PMMA (polimetilmetakrilat) moleküllerinin büyüklüğü 10nm civarındadır. Daha iyi ayrıntılar elde etmek rezist kimyasının gelişmesine bağlıdır.

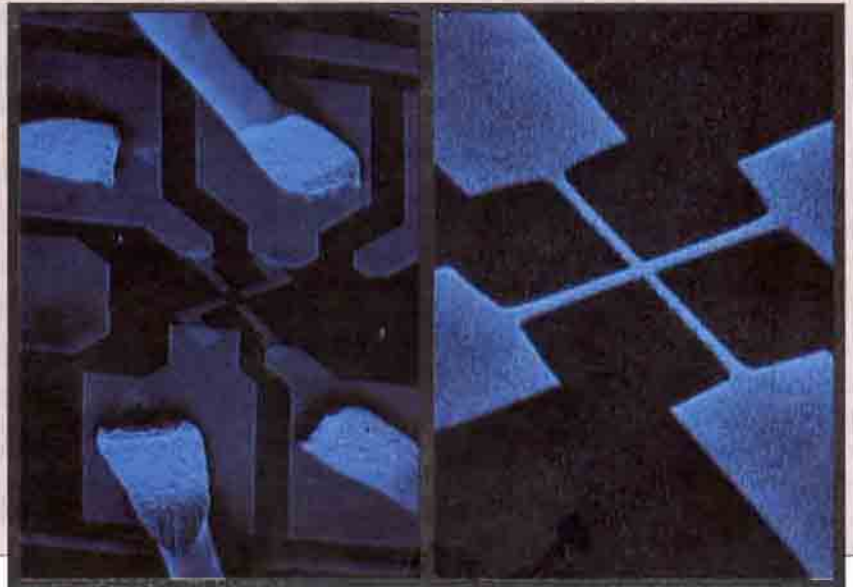
Tipik bir e-demeti litografi sisteminde bir elektron kaynağından (ısıtılmış bir tungsten flaman) saçılan elektronlar, uygulanan elektrik alanı ile (10-100 kV) hızlandırılırlar. Oluşan elektron demeti manyetik mercekle ve elektrostatik sapıncılar yardımıyla bir noktaya odaklanır. Bu noktanın büyüklüğü 1nm civarındadır. İki boyutlu herhangi bir şekil e-demetini nokta nokta hareket ettirerek ve demet açma/kapama denetiminin yardımıyla rezisti birkaç mikrosaniye pozlandırarak yüzeye aktarılır.

E-demeti sistemleri aslında taramalı elektron mikroskoplarında (TEM) kullanılanların hemen hemen aynısıdır. Elektron mikroskoplarında yüzeyden saçılan elektronların yoğunluğu bir detektör yardımıyla ölçülmekte ve bu yöntemle yüzeydeki detaylar incelenebilmektedir. Hazır e-demeti sistemleri birkaç milyon dolar gibi fiyatlarla satıldığı için, varolan taramalı elektron mikroskoplarını bu işe uygun hale dönüştürmek sıkça kullanılan yöntemdir. Bunun için TEM'e bazı elektronik donanımla bir bilgisayar arabirimi eklemek ve

sistemi denetleyen bir program yazmak yeterlidir.

Rezist üzerinde şeklin tanımlanması işlemin sadece bir aşamasıdır. Rezist geliştirildikten sonra bu şekli yüzeye aktarmak gerekmektedir. Bu da kimyasal veya plazma ile aşındırma ya da kaldırma teknikleri kullanılarak yapılır. Aşındırma işleminde yüzeydeki rezist geliştirildikten sonra yarıiletken malzemeye kimyasal olarak etki eden bir çözeltiye daldırılır. Rezistin bulunduğu yerlerde yüzey korunur, diğer yerlerde ise yarıiletken aşındırılmış olur. Kaldırmada ise geliştirilmiş rezist kaplı yüzey ince bir metal filmiyle kaplanır. Daha sonra tüm rezist çözülerek yüzeyden ayrılır ve beraberinde rezistin üzerindeki metal filmi de götürür. Geriye yalnızca rezist olmayan yerlerdeki metal, yüzeye yapışmış olarak kalır.

Sıcak-nokta transistörü diye adlandırdığımız aşağıda görülen yapı e-demeti litografi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Buradaki çapraz tellerin kalınlığı 0.2 mikrondur. Bu yapı çok küçük boyutlarda ve düşük sıcaklıklarda (-265 derece) metallerin doğrusal olmayan çapraz dirençlerinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Mezoskopik boyutlarda e-demeti litografisi yoluyla elde ettiğimiz ve edeceğimiz yapıları kullanarak bu yeni bilim dalına biz de katkılarda bulunmayı planlıyoruz.





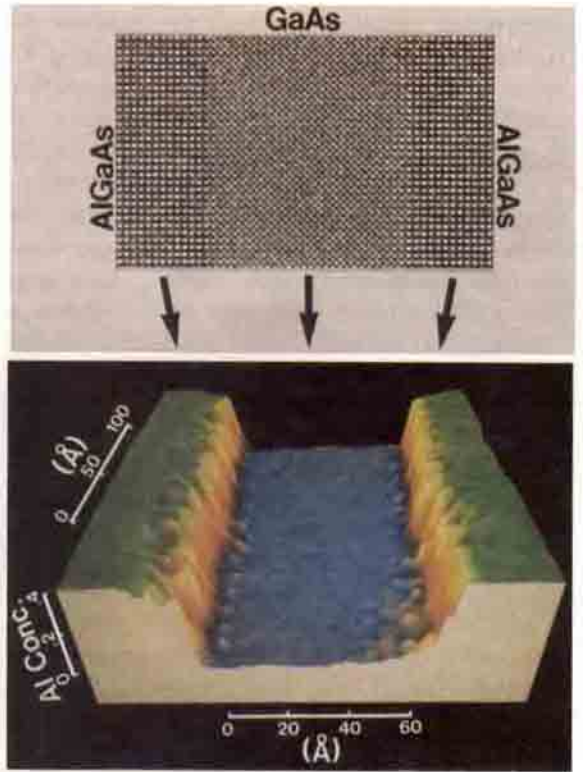
yılsa da, mezoskopik boyutlarda aynı yöntemi kullanarak güvenilir ve ayrıntılı sonuçlar elde etmek oldukça zordu. Bu sorunlardan kurtulmak için, uzun süredir kullanımda olan, mikroelektronik teknolojilerinden yararlanmak çok daha anlamlı bir çözüm olacaktı. Mezoskopik fizikçiler 1970'lerin sonlarından başlayarak litografi tekniklerini kullanmaya ve geliştirmeye başladılar. Aharonov-Bohm etkisinin katı-hal yapılarında gözlenmesi, yalıtkan yüzeyler üzerine çizilmiş mikron-altı boyutta ince metal filmlerden oluşan devreler kullanılarak mümkün olabildi.

Bu başarının ardından çeşitli yapılar üretilerek yeni deneyler yapıldı. Bazı deneylerle mezoskopik ile makroskopik ve mikroskopik dünyalar arasındaki derin farklılıklar iyice belirginleşiyordu. Bir örnek verelim: Makroskopik ölçekte birbirinin aynısı iki telin dirençlerinin de aynı olacağını biliyoruz. Kavramsal olarak aynı sonuç mikroskopik ölçekte de geçerli. Oysa mezoskopik boyuta indiğimizde birbirinin aynısı iki tel için farklı iki direnç elde ediliyordu. Dahası bu tellerin dirençleri, elektron yoğunluğunun ya da manyetik alan gücünün fonksiyonu olarak ölçüldüğünde her tel için parmak izi niteliğinde dalgalanmalar gözleniyordu. Evrensel iletkenlik dalgalanmaları olarak adlandırılan bu parmak izlerinin tel boyunca ilerleyen elektron dalgalarının oluşturduğu girişim etkilerinin bir sonucu olduğu kuramsal olarak gösterildi. Mezoskopik ölçekte fiziksel özellikler her tel için farklıydı ve, makroskopik ya da mikroskopik fizikte görmeye alışmadığımız, bu örneğe bağlı özellikler mezoskopik dünyaya özgü bir olguydu.

Bunun yanında kuantum mekaniğinin daha önceleri deneysel olarak sınanması mümkün olmamış bazı öngörülerini, mezoskopik yapılar yardımı ile kolaylıkla denenebiliyordu. Yine tellerden bir örnek verelim: Klasik fiziğe göre devremizde akım yolu dışında yapacağımız bir değişiklik (bir teli direncini ölçtüğümüz devreye tek bir noktadan değiştirmek gibi) direnci etkilemez. Oysa kuantum mekaniğine göre elektron dalgaları, akım yolu üzerinde olsun, olmasın tüm devreye ulaşabilmektedirler. Bu

nedenle akım yolu dışında yapılacak bir değişiklik kaçınılmaz olarak dalga fonksiyonunu ve dolayısıyla da devrenin direncini değiştirecektir (mezoskopikğin yerel olmama özelliğinin bir sonucu). Bu tip deneyler mezoskopik yapılar kullanarak gerçekleştirildi ve kuantum mekaniğine tamamen uygun sonuçlar elde edildi. 1980'lerin ortalarında mezoskopik fizik, artık hem deneysel çalışmalarının tartışılmaz duyarlılığı ve etkileyici sonuçları, hem de kuramsal modellerinin deneyi açıklamadaki başarısı ve etkileyici biçimleri sayesinde yadsınmaz bir saygınlığa ulaşmıştı.

Mezoskopik fiziğin önemi anlaşıldıktan sonra gittikçe artan sayıda fizikçi bu yeni alanda araştırma yapmaya başladı. Her yeni buluş en azından daha öncekiler kadar ilginç ve heyecanlandırıcı oluyordu. Bunlar arasında, en önemlilerinden ve mezoskopik fizikçileri en uzun süre uğraştıranlarından biri de, kalıcı akımlar problemi idi. Kulik'ın daha 1970'te, mezoskopikğin bilim dünyasına girmesinden onbeş yıl kadar önce, kuramsal olarak öngördüğü kalıcı akımlar, mezoskopik yapıların mikroskopik yapılara benzerliğini vurgulayan önemli örneklerden biridir. Bir atomda elektronlar belirli açısal momentum değerlerine sahip öz durumlarda bulunurlar. Açısal momentum bu ölçekte bir akıma karşılık gelir ve elektron durum değiştirmedikçe bu akım çekirdek etrafında döner. Gerçi bildiğimiz anlamda bir elektron akışı yoktur, fakat bu dönen akım oluşturduğu manyetik moment aracılığı ile kendisini belli eder. Bir Aharonov-Bohm halkasını büyükçe bir atoma benzetmek olası. Atomlarda olduğu gibi Aharonov-Bohm halkasında da, yalnızca kuantum dalga fonksiyonları yapının davranışını belirlemektedir. Sonuçta Aharonov-Bohm halkalarında da kalıcı akımlar oluşturmak söz konusu olmalıdır.



Kuantum kuyusu (Elektron mikroskobu görüntüsü)

Mezoskopikğin ilk zamanlarında sıkça değinilen kalıcı akımlar problemi, herkese oldukça şaşırtıcı geliyordu. Çünkü bu akımı oluşturmak ve sürekliliğini sağlamak için dışarıdan enerji vermek gerekmiyordu. Makroskopik boyutlarda görmeye alıştığımız kayıplar burada yoktu. Bu haliyle Aharonov-Bohm halkası sıfır-kayıplı bir üstüniletken halkayı andırıyordu. Uzun kuramsal çalışmalar sonunda yukarıda sözettiğimiz Aharonov-Bohm halkası-atom benzerliği ortaya çıkarıldı ve kalıcı akımlar şüpheye yer vermeyecek şekilde kabul görmeye başladılar. Bu olgunun deneysel gözlemi ise öngörülmesinden yirmi yıl kadar sonra, yalnızca birkaç yıl önce gerçekleşti.

Şu ana kadar bahsettiğimiz deneylerde kullanılan metal filmlerle oluşturulan mezoskopik yapılar, yapılabilecek deneylere oldukça ciddi bir sınırlama getiriyordu. Bunun nedeni, metal film büyütmenin bir tek-kristal yerine, çok-kristalli ve düzensiz bir yapı oluşturmasıydı. Bu düzensiz yapıda ilerleyen elektronlar, sık sık yapı bozuklukları, yabancı atomlar ve kristal titreşimleri ile çarpışarak saçılıyorlardı. Bu çarpışmalar bazen elektron dalga fonksiyonunun fazını tümünden yitirmesine yol açıyor ve dolayısıyla



mezoskopik etkilerin temelinde yatan kuantum mekanik girişim etkileri ortadan kalkıyordu. Daha önemlisi, metallerde yüksek elektron yoğunluğu nedeniyle kuantum mekanik dalga boyları çok ufak, hemen hemen atomlararası uzaklık düzeyindeydi. Bu da mezoskopikte oldukça önemli yer tutan kuantum-büyüklik etkilerinin gözlenebileceği kadar ufak ya-

pıların oluşturulmasını olanaksız kılıyordu. Kısacası, yalnızca doğanın sunduğu malzemeleri kullanarak çok fazla yol almak olası değildi.

Yarıiletken ve mikroelektronik teknolojisinin neredeyse on yıldır kullanmakta olduğu yapay malzemelere dayalı düşük-boyutlu yapılarla, hem çarpışmaların olumsuz etkisini oldukça azaltmak, hem de kuantum

mekanik dalga boylarını ayarlayarak büyüklük etkilerini ön plana çıkarmak olasıydı. Nitekim 1980'lerin ortasından başlayarak düşük-boyutlu yarıiletken yapıların kullanıldığı mezoskopik uygulamaları yaygınlaştı.

Yarıiletkenlerde elektronlar metallere göre farklı davranırlar: Elektronların alabilecekleri enerjiler sürekli değildir, elektronlarla tama-

## Kuantum Nokta Bağlantısı

Erkan Tekman  
Bilkent Ün. Fizik Bölümü

"Mezoskopik fizik ile ilgilenmeye Philips Elektronik'in Hollanda'daki araştırma laboratuvarında çalışırken başladım. O zamanlar kendimize sorduğumuz temel soru şuydu: Bir bilgisayar yongasının boyutu şu ankinden yüz kat daha ufak olsaydı neler olurdu? Bu teknolojik soru çok sayıda temel bilimsel buluşa yol açtı. Philips'teki ekibimiz Delft Teknik Üniversitesi'nden bir grup ile işbirliği yaparak 1987'de kısa ve dar bir telden (bir "nokta bağlantı") geçen akımın telin kesit alanı ufaltıldıkça basamaklar halinde azaldığını gösterdi. Bu tümüyle beklenmedik bir sonuçtu. Basamaklı azalma yalnızca telin genişliği elektronun kuantum mekanik dalga boyundan çok büyük olmadığında gerçekleşiyordu, bu yüzden bu yapıya "kuantum nokta bağlantısı" adını verdik. Daha sonra bu etkinin optik ve üstüniletkenlikte benzerlerinin olduğunu bulduk. Optik benzer birkaç yıl önce gözlemlendi. Üstüniletken benzer ise henüz laboratuvarında gözlenemedi. Şu anda tüm dünyada pek çok grup, bir "üstüniletken kuantum nokta bağlantısı" elde etmeye ve üstünakımda basamaklı azalmayı gözlemeye çalışıyorlar. Fakat henüz hiçbiri başarı sağlayamadı." Bunlar, mezoskopik fiziğe son yıllardaki popülerliğini kazandıran, kuantum nokta bağlantısı deneylerini gerçekleştiren gruptan Prof. Carlo Beenakker'in (Lorentz Enstitüsü, Leiden Üniversitesi, Hollanda) sözleri.

Klasik fizikte herhangi bir iletkenin direnci Ohm yasasından yola çıkarak hesaplanır. Örneğin, dikdörtgenler prizması şeklinde bir iletken için direnç, prizmanın uzunluğu ve malzemenin öz direnci ile doğru, kesit alanı ile ters orantılıdır:  $R = \rho l / A$ .

Çok küçük boyutta bir iletkenin direncini ölçmek için, devre bağlantılarını yaptığımız tellerin örnekten daha büyük olması gerekir. Tellerin bildiğimiz klasik kurallara

uygun rol oynamasını istiyoruz, aksi halde örnek yerine tellerin özelliklerini incelemiş oluruz. Bu durumda iki klasik iletken arasındaki bağlantının direncini ölçmek tek çıkar yol oluyor. Bağlantının makroskopik ölçekte küçük olmasını istiyoruz doğal olarak. Bu nedenle bu tip yapıları nokta bağlantı diyoruz.

Nokta bağlantının uzunluğu ve kesitinin boyutları elektron ortalama serbest yolundan (elektronun iki çarpışma arasında katettiği ortalama uzaklık) daha ufak ise direncini hesaplamak için öz direncini kullanamayız. Bunun yerine yarı-klasik bir yaklaşım kullanarak elektronun bağlandan geçerken yaptığı çarpışmaları (bir ya da birkaç tane) gözünde bulundurmak gerekir. Klasik olarak direncin bağlantı çevresinde yaklaşık ortalama serbest yol çapında bir bölgede oluştuğunu düşünürsek direnç ortalama serbest yoldan, yani öz dirençten bağımsız olur. Yarı-klasik yaklaşım tam sonucu verir:  $R = h\lambda^2 / 2\pi e^2 A$ . Burada  $\lambda$  elektronun kuantum mekanik dalga boyu,  $e$  elektron yükü ve  $h$  kuantum mekanikinin temel sabiti olan Planck sabitidir. İlk olarak Sharvin tarafından 1965'te ortaya atılan bu sonuç Sharvin direnci olarak anılır.

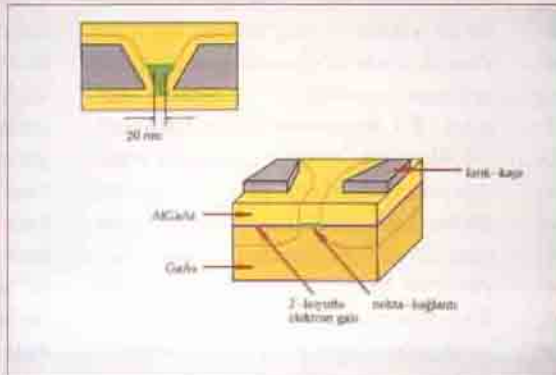
Sharvin modelinin önemli bir çıkarımı vardır: Nokta bağlantı çok kısa olduğundan elektronlar büyük olasılıkla kanaldan herhangi bir çarpışma yapmadan geçerler, yani bağlantının kendisi dirençsizdir. Ölçülen direnç bağlantının kendisine değil, iki yanındaki teller ile birleştiği eklemlere aittir. Buradan mezoskopik boyutlarda basit devre kısıllarının geçersiz olduğunu buluruz. Çünkü beklenimiz toplam direncin tel dirençleri ile (çok küçük, çünkü teller çok geniş) bağlantı

direncinin (sıfır) toplamı olması yönüyle bu bundan çok farklı bir sonuca, Sharvin direncine ulaşıyoruz.

Sharvin direncine yarı-klasik bir yaklaşım ile ulaştık. Çünkü bağlantı boyutları elektron serbest yolundan daha ufak olsa da, elektron dalga boyundan çok çok büyüktü. Yani elektron dalga özelliğini kullanmamız gerekmedi. Nokta bağlantıyı daha da küçültüp elektron dalga boyu boyutlarına indirirsek çok daha ilginç sonuçlarla karşılaşırız. Elektron özenerjileri bu yapıda bantlar halinde ortaya çıkar ve elektron enerjisi bu bantlardan yalnızca belli sayıdaki iletimde kullanılmasına yetecek kadardır. Bant sayısı ancak elektron enerjisini artırdığımızda ya da kanalı genişlettiğimizde yeni bir bant kullanılmaya başlanırsa artar.

Dalga fonksiyonlarını Landauer formülünde kullandığımızda kuantum nokta bağlantısının direncini buluruz:  $R = h / 2e^2 N$ . Bu sonuç Sharvin direncinden çok daha ilginçtir. Çünkü, kullanılan bant sayısı  $N$  bir tamsayıdır. Bu şekilde Sharvin direncinin alanla ölçeklenme özelliği kuantum durumunda tamamen ortadan kalkar, elektron enerjisini ya da kanal genişliğini değiştirdiğimizde basamaklı olarak değişen bir direnç buluruz. Bu olaya nokta bağlantıda direncin kuantalaşması diyoruz. Daha ilginç, bulduğumuz direnç temel fizik sabitleri cinsinden verilmektedir, yani  $h/2e^2$  bir direnç kuantumudur. Nokta bağlantı geometrisi ve malzemesi ile tek bağlantı elektron bant sayısı yoluyla.

Nokta bağlantı tipi iletkenler için üç direnç ifadesi bulduk: Ohm yasasından elde edilen klasik sonuç, Sharvin direnci ve tümüyle kuantum mekaniğinden elde edilen kuantalaşmış direnç. Bunlardan temel olanı kuantalaşmış dirençtir, daha büyük bağlantı boyutlarında bu ifadeden hareketle hem Sharvin direncini ve hem de klasik direnci elde etmek olasıdır. Yine beklenen sonuca ulaştık: Kuantum sonucunun geçerliliği ve makroskopik boyuta düzgün bir geçiş. Ara bölgede elde ettiğimiz buluntuların bu son ifadeden çok daha ilginç olduğuna sanırım hepimiz katılırsınız. İşte bu yüzden binlerce bilimadamı mezoskopik evrende sürdürüyorlar çalışmalarını...





men doldurulmuş değerlik bandı ile boş durumdaki iletkenlik bandı arasında elektron tarafından iletimde kullanılamayacak bir yasak enerji aralığı vardır. Değişik yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları da farklıdır. İki yarıiletken doğrudan birbirine değdirildiğinde, bu yasak enerji aralıkları termodinamik dengeyi sağlayacak şekilde birbirleri ile hizalanırlar. Elektronların iletkenlik bandı daha yüksek bir enerjide kalan yarıiletkende bulunmaları ek bir enerji gerektirecektir, yani bu yarıiletken bir potansiyel engeli haline gelmiştir. Bu şekilde değişik yarıiletkenler elektronlar için potansiyel kuyuları ve engelleri oluşturur. İncecik (birkaç on atom kalınlığında) yarıiletkenlerin iskambil kağıtları gibi üstüste dizilmesi ile elektronlar için değişik potansiyel şekilleri oluşturmak olasıdır. Bu da yasak enerji aralığı mühendisliğinin çalışma alanı. Artık fizikçiler doğada bulunan malzemelerle sınırlı değil, istedikleri özelliklere sahip yapay kristalleri laboratuvarlarda üretebiliyorlar.

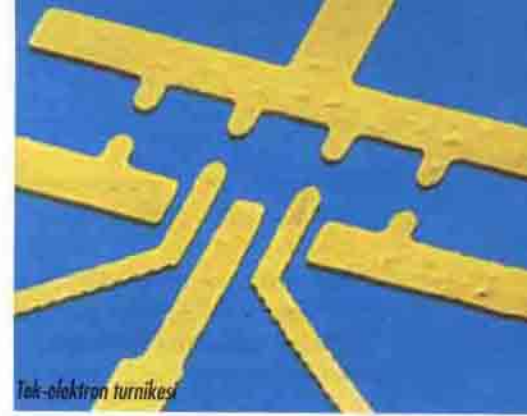
Bu tip yarıiletken yapıların en basiti ve en yaygın kullanılanı iki-boyutlu elektron gazıdır. İki farklı yarıiletkenin düzlemsel arayüzünde oluşan potansiyel kuyusu elektronları oldukça ince bir tabakaya hapseder. Uygun tasarlanmış bir iki-boyutlu elektron gazı yapısında elektronlar çok az çarpışma ile karşılaşarak uzun mesafeler katedebilir. Öte yandan elektronların dalga boyları yarıiletkenin katkılanma miktarı ile belirlendiğinden kuantum-büyükklük etkilerini ön plana çıkaracak tasarımlar yapmak oldukça kolaydır.

Bugün mezoskopik deneylerinde çoğunlukla kuantum kuyularından yararlanılıyor. Artık metal tellerin temel görevi, bu iki-boyutlu elektron

gazı içerisinde mezoskopik ölçekte devrelerin ve aygıtların oluşturulmasına yardımcı olmak. Negatif gerilim uygulanmış metal bir tel, iki-boyutlu elektron gazı üzerine yerleştirilirse (elektronlar elektrostatik itme nedeniyle telden uzak durmak isteyeceklerinden) elektron gazı içerisinde, telin tam altında elektrondan arındırılmış yalıtkan bir bölge oluşur. Bu yolla elektron gazı içinde, aynen metal filmlerde olduğu gibi mezoskopik devreler ve aygıtlar oluşturmak mümkündür. Bu teknik, bir öncekine göre daha karmaşık ve zor da olsa, sunduğu yeni imkanlar nedeniyle son derece güçlüdür. Bu tip çalışmalar doruk noktasına 1988'de kuantalaşmış direnç deneyleri ile ulaşılar. Elektron gazını kırık-kapı adı verilen yöntemle bir doğru boyunca arındırıp -iki taraftaki serbest bölgeler arasında- elektron dalga boyu mertebesinde dar bir açıklık bırakırsak bir kuantum nokta bağlantısı elde ederiz. kuantum nokta bağlantısının direnci iletime katkıda bulunan enerji bandı sayısı ile belirlenir ve kuantalaşmış durumdadır. Bu ilginç özelliğin deneyle gözlenmesi ve ayrıntılı kuramsal açıklaması, mezoskopik fizik çevrelerinde büyük heyecan ile karşılandı. Çünkü, bu deney sayesinde mezoskopik fizik temel direklerinden sayılan Landauer formülünün sınanması mümkün olabildi.

Biliyoruz ki, elektron dalgaları mikroskopik ölçekte anlamlıdır. Öte yandan bir direnç ölçümü için örneği kaynak, voltmetre vb. makroskopik büyüklükteki elektronik aletlere bağlamak gerekmektedir. Böyle bir ölçümün kuramsal incelenmesi mikroskopik çokluklarla (dalga fonksiyonu) makroskopik çokluklar (gerilim farkı, akım, vb.) arasında bir bağlantı

kurulmasını gerektirir. Bu bağlantı, mezoskopik fiziğin doğuşundan çok önce, 1957'de Landauer tarafından önerildi. Landauer'in adıyla anılan basit bir formülle ifade edilebilen bu bağlantı, kuantum nokta bağlantıları üretilene kadar çok duyarlı bir şekilde



Tek-elektron turnikesi

de deneylerle karşılaştırılmamış ve güvenilirliği hep şüpheli görülmüştü. Mezoskopik deneyler Landauer formülü ile elde edilen sonucu verdiklerinde, kuşkusuz önemli bir kuramsal boşluk da sağlam bir şekilde doldurulmuş oldu.

Hassas litografi yöntemleri ve iki-boyutlu elektron gazı kullanarak değişik mezoskopik yapılar oluşturmayı başaran deneyler, gün geçtikçe daha iddialı projeler üretmeye başladılar. Bunların en önemlilerinden birisi kuantum noktalarıdır. Elektron gazında bir bölgeyi çepeçevre arındırarak elektronları sıfır-boyutlu bir bölgeye hapsedebilirsiniz. Sıfır-boyutlu bu adacık kuantum noktası diye anılır. Bir kuantum noktası, normalde çevresinden yalıtılmış durumdadır. Fakat çeperlerindeki potansiyel eşiği biraz alçaltılırsa çok ilginç bir şey gözlenir: Klasik olarak elektronun nokta dışına çıkması mümkün değildir, çünkü potansiyel eşiği enerjisinden daha yüksektir. Oysa kuantum mekaniğine göre elektron, çok ufak bir olasılıkla da olsa, dışarıya sızabilir. Bunu yaparken potansiyel tepesini tırmanarak aşmak yerine sanki bir tünel oluşturarak dışarı geçer. Bu olaya kuantum mekanik tünelleme etkisi diyoruz.

Bir kuantum noktası elektronların tünelleyebileceği birer engelle iki elektron havuzuna bağlanırsa mezoskopik fiziğin yine oldukça ilginç bir başka olgusunu elde ederiz. Elektron havuzlarından kuantum noktasına tünelleyen tek bir elektron bile, Coulomb etkileşimi nedeniyle, sistemin enerjisini artıracaktır. Bunun sonucu olarak, ufak enerjili elektronların tünellemesi engellenir. Ancak adacıkla havuzlar arasına sonlu bir gerilim uygulandığında tünelleme olayını başlatmak mümkün olur. Bu olaya tünellemenin Coulomb engellenmesi denmektedir. Daha da önemlisi, gerilim tünelleme eşiğini geçtiğinde elektronlar bir musluğun damlamasını an-



Zenon atomlarıyla oluşturulmuş havuzda elektron dalgaları (TTM görüntüsü)



diracak şekilde teker teker tünellemeye başlarlar. Tek-elektron tünellemesi denilen bu olay 1969'da çok farklı bir yapıda, metal granülleri içeren bir yalıtıcıdan inelastik elektron tünellemesi gözlenirken bulundu. 1980'lerin sonlarına kadar metal temelli litografi ile üretilen tek-elektron aygıtları, son beş yıldır düşük boyutlu yaniletken yapılar kullanılarak elde ediliyor ve bu sayede çok daha ayrıntılı deneyler yapılabiliyor. Özellikle Likharev'in çalışmaları sonucu, önerilen çok sayıda tek-elektron aygıtı birer birer üretilerek gelecek yüzyılda mikroelektronik teknolojisi-

nin emrine girmeye hazırlanıyorlar.

Mezoskopik fiziğin teknoloji ile ilişkisi yalnızca tek-elektronik ile sınırlı kalmıyor. Son hedef, malzemeleri atom ya da molekül düzeyinde kontrollü bir şekilde değiştirmekte kullanılacak gereçlerin yapılması. Bu yeni teknolojinin kendi başına bir adı dahi var: Nanoteknoloji. Nanometre

(milyonda bir milimetre) boyutunda çalışacak piller, anahtarlar, transistörler şimdiden tasarlanmakta ve çok özel laboratuvar koşullarında çalışanları üretilmekte. Nanobilim ve nanoteknoloji yalnızca fiziğin bir alt-dalı değil. Bilimadamları molekül düzeyinde kontrollü işlemler yapmayı başarabildiklerinde, malzeme bilimin-

## Bilgisayarda Mezoskopik

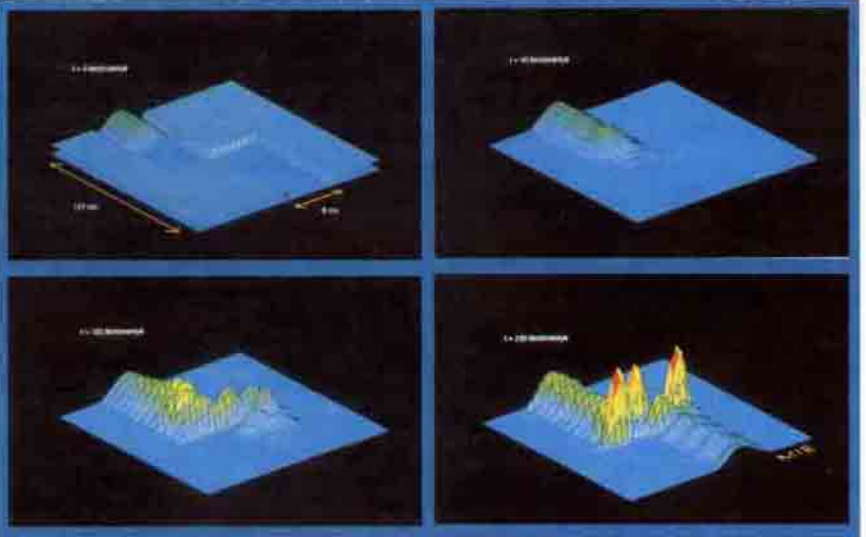
M. İhsan Ecemiş  
Bilkent Ün. Fizik Bölümü

"... Alice içindekini tatmaya cesaret etti, tadınca da pek güzel buldu. Onun için hemen içip bitirdi. 'Bana garip birşeyler oluyor!' dedi. 'Sanki bir dürbün gibi kısalıyorum.' " Alice, harikalar diyarında bu sözleri söylerken sihirli şuruptan biraz daha fazla içip de mezoskopik boyutlara kadar küçülüp bir kuantum telinin içine girebilseydi acaba neler görecekti? Günümüzde, bilgisayar benzetişleriyle (simülasyon) bu sorunun cevabını arıyoruz.

Eğer bir kuantum teli kadar küçükseniz artık klasik mekaniğin temeli olan Newton yasalarına uymak zorunda değilsiniz. Bir parçacık yerine -denizdekiler gibi- dalga özelliği gösterdiğinizden kuantum mekaniğinin yapıtaşı olan Schrödinger denklemine göre hareket etmelisiniz. Bu denklemde elektronlar parçacık yerine birer dalga fonksiyonu olarak alınıyor ve dalgalar gibi hareket ediyorlar. Dalga fonksiyonunun genliğinin büyük olduğu yerlerde elektronların bulunma olasılığı yüksek, küçük olduğu yerlerde ise bu olasılık düşük oluyor.

Schrödinger denklemi ile incelenebilecek en basit mezoskopik geometrilerden biri kırık geometrisidir. İki kuantum telinin biraz kaydırılmış olarak uç uca eklenmiş haline benzeyen kırık şekli, geçtiğimiz yıllarda yurtdışında bir grup tarafından araştırma laboratuvarlarında üretilmiş fakat elektronik özellikleri henüz tam olarak saptanmamıştır. Deneylerin henüz yapılmadığı, analitik yöntemlerin ise yanıt vermekten çok uzak olduğu bu gibi basit ve pratik problemlerde bilgisayarın, deney ile kuram arasındaki yolun orta yerindeki olağan rolünü oynamasının tam zamanıdır.

Yeni geliştirmiş olduğumuz bir yöntem, böyle bir sistemin bilgisayar benzetişiminin

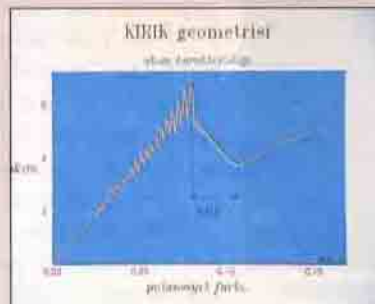


kişisel bilgisayarlarla bile yapılmasını mümkün kılmıştır. Yukarıdaki şekilde belli bir enerjideki elektron demetinin kırık geometrisine gönderilişinin zamana bağlı benzetişimini görüyorsunuz. İlk resimde dalga fonksiyonunun yanı sıra kırığın kanala benzeyen potansiyeli de gösterilmiştir. Böyle bir sisteme potansiyel farkı uygulamakla, kuantum tellerinden birini yukarıya kaldırmış gibi olursunuz. Kanalın içinden su gibi akan elektronlar, siz potansiyel farkını arttırıp yokluğu dikleştirildikçe, daha hızlı akıp daha çok elektrik akımı taşıyorlar. Fakat potansiyel farkını arttırmaya devam ederseniz beklenmedik bir şeyle karşılaşacaksınız: Sistemden geçen akım azalıyor! Buna sebep, akarken daha çok hızlanan elektronların kırık bölgesine geldiklerinde adeta önlerine çıkan virajı alamayıp kırık bölgesini geçememeleridir. kuantumun açıklaması ise elektronların dalga özelliklerinden dolayı yıkıcı girişime uğrayıp kırıkta bir çeşit rezonans durumu oluşturmaları. Böyle potansiyel farkı arttığı halde akımın azalması olayına negatif-diferansiyel-direnç adını veriyoruz. Potansiyel farkını arttırmaya devam ettiğimizde akımın tekrar

artma eğiliminde olduğunu görüyoruz. Elektronik özellik olarak çok önemli olan bu negatif direnç bölgesinin yerini ve genişliğini ayarlamak ise kırığın geometrisini değiştirmekle mümkün olabiliyor.

Benzetişimize, elektronların -aynı yüklerinden dolayı- birbirlerini itmelerine yol açan Coulomb etkileşimini de kattığımızda geometrimizin önemi daha da artıyor. Kırığın karşılıklı iki köşesine çarparak bu bölgeden kaçamayan -adeta hapsolan- bir elektron, arkadan gelen elektronları iterek onların da kırıktan geçmelerine engel olabilir. Bu durumda akım oldukça azalır. Fakat potansiyel farkını arttırdığımızda, enerjisi daha fazla olan bir elektron bu elektronu iterek hapsediği yerden kurtarıp akımda çok ani bir artışa yol açabilir. "Ani" kelimesi en çok birkaç yüz femtosaniyeye (saniyenin milyon kere milyarda biri) karşılık gelmektedir ki böylesine yavaş bir etkiye bu kadar hızlı bir tepki, gelecekte mezoskopik boyutlardaki elektronik aletlerin ulaşabilecekleri hızları bize en iyi şekilde göstermektedir.

1948'de transistörün icadıyla gerçekleşen teknoloji devriminin bir ikincisi, önümüzdeki on-on beş yıllık zaman sonunda mezoskopik yapıların araştırma laboratuvarlarından çıkıp günlük hayatımıza girmesiyle olacaktır. Bilgisayarlar sayesinde daha hızlı bilgisayarlar... Mezoskopik harikalar diyarının kapılarını aralayan fizikçilerle, onlara yardım eden bilgisayarlar, elektronik dünyasının gelecekte ulaşacağı akıl almaz hız ve boyutları müjdelirken, aralarındaki karşılıklı desteği de en iyi şekilde gözler önüne sermektedirler.

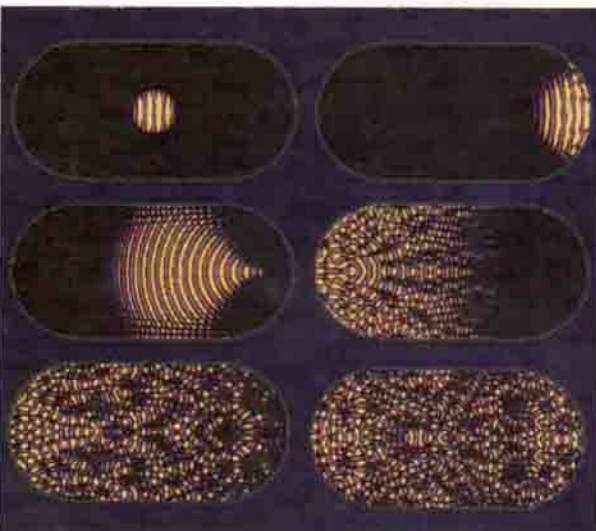




den biyoloji ve tıbbı, kimyadan bilgisayar mühendisliğine pekçok bilim ve mühendislik dalı bu yeni araçları kullanarak yepyeni teknikler geliştirebilecekler. 21. yüzyılın en önemli bilimsel atılımlarından birisi belki de insanlığın atom ve molekülleri teker teker kontrolü altına alması olacak.

Nanoteknolojinin şu ana kadar gerçekleştirilen en önemli atılımlarından biri, tek bir atomun hareketi ile çalışan elektrik anahtarı. Eigler ve arkadaşlarının yıllar süren çalışmaları sonucunda ortaya çıkardıkları bu ilginç anahtar Taramalı Tünelleme Mikroskobu'nu (TTM) kullanıyor. Taramalı tünelleme mikroskobunun bilim dünyasına girişi 1983'te olmuş; Binnig ve Rohrer tek tek atomları ayırdedebilen bu mikroskobu buluşları nedeniyle 1986'da Nobel Fizik Ödülü'nü almışlardı. Taramalı tünelleme mikroskobunun ilk zamanlarından başlayarak, bu aleti yalnızca bir mikroskop olarak görmenin yanlış olduğu, aynı zamanda çok küçük boyutlarda çalışabilen bir yüzey değiştirme aracı olarak da kullanılabileceği düşünülmekteydi.

1990 yılında Eigler ve çalışma arkadaşları, o ana kadar bilim dünyasının imkansız bulduğu bir olayı gerçekleştirdiler. Atomları, adeta oynarcasına, tek tek istenilen yerlere dizmek, bu yolla şekiller çizmek, onların deneyinden önce hayal bile edilemezdi. Taramalı tünelleme mikroskobunu kullanarak nikel yüzeyine bağlanmış zenon atomlarını kontrollü olarak hareket ettirmeyi Eigler ve grubu başardılar.



Mezoskopik yapılarda kaotik kuantum dalgaları (bilgisayar benzetisi)

Olay bu kadarla da kalmadı. Aynı grup 1991 yılında, dünyanın en küçük elektrik aygıtını da yaptı. Metal yüzeyi üzerinde bulunan bir zenon atomuna mikroskobun iğnesi, arada 0.5 nanometrelik bir aralık olacak şekilde yaklaştırıldı. Bu durumda iğne ile metal arasına pozitif bir gerilim uygulayınca zenon metal yüzeyinden ayrılarak iğnenin ucuna yapıştıyordu. Zenon atomunun yerinin değişmesiyle birlikte metalle iğne arasındaki elektrik akımı da değişiyordu. İğne ile metal arasına bu kez negatif bir gerilim uygulayınca zenon atomu tekrar metal yüzeyine dönüyor ve elektrik akımı da eski değerini alıyordu. Bu, atomsal boyutta bir devre anahtarından başka bir şey değildi! Atom ya metal yüzeyine ya da iğneye yapıştırılarak akımın iki farklı değer alması sağlanıyordu.

Teknolojik kullanımı yanında, bilimsel yararları da çok bu yöntemin. Örneğin atomları bir halka çevresine dizerek oluşturulan bir havuzdaki elektron dalga fonksiyonları bu yöntemle gözlemlendi. Bu sayede kuantum mekanik ders kitaplarında örnek olarak kullanılan yapıları oluşturmak ve kuantum mekaniğini ilk kez doğrudan gözlemlenebilir duruma getirmek, artık deneysel fiziğin sunabileceği olanaklar arasına girdi.

Fizikçilerin mezoskopik dünyadaki gezintileri son hızla devam ediyor. Gün geçmiyor ki bilimsel bir toplantı ya da dergide mezoskopik alanında yeni bir buluş duyurulmasın. Öyle ki, artık bu konularla uğraşanlar kendilerini fizikçi diye değil de mezoskopik fizikçi diye adlandırıyor. Bu araştırmalar bir yandan kuantum mekaniğini daha iyi anlamamıza yardım ederken, bir yandan da gelecek yüzyılda kullanacağımız yeni teknolojileri oluşturmaya yöneliyorlar. Mezoskopik fiziğin bugünlere gelmesinde öncülük yapan araştırmacıların bu konudaki görüşleri şöyle:

"Mezoskopik fizikte çalışmaktan hoşlanıyorum, çünkü bu alan düşlerimize ve yaratıcılığımıza için hemen hemen sınırsız bir oyun alanı sunuyor. kuantum mekaniğinin bulunmasından bu yana ilk kez ilgilendiğimiz etkileri güçlendirecek yapılar tasarlayabiliyoruz. Mezoskopik fizik bildiğim tüm diğer dallardan daha fazla kuram ve deneyin içiçe girdiği ve elele çalıştığı bir alan; ve bir süre daha böyle kalacağına inanıyorum. Bence bu alan genç araştırmacılara bensesiz olanaklar sunuyor."

Markus Büttiker

"1992'den beri mezoskopik fizikteki araştırmaya çalışmamı Hollanda'da, Leiden Üniversitesi'nde sürdürmekteyim. Beni ve öğrencilerimi bu alana çeken şey mezoskopik dünyanın hem günlük hayatımızın makroskopik dünyasından, hem de atom ve moleküllerin mikroskopik dünyasından umulmadık şekilde farklı olması. Mezoskopik dünyada ilerlediğimiz yolun bizi geleceğin bilgisayarının yeni çalışma prensiplerine ulaştıracağını umuyoruz. şu anda ise, bu yolun kendisi merakımızı tatmin için bol bol problemler sunuyor bize."

Carlo Beenakker

"Mezoskopik fizik, atom ve moleküllerin kuantum mekaniğini laboratuvarlarda ürettiğimiz aygıtlarla yeniden keşettiğimiz mezoskopik fiziği de kapsıyor. Ufak aygıtlar yapma isteği bize bu temel soruları sunmanın yanında mezoskopik fiziğin büyüleyici dünyasına girebilmemiz için gerekli deneyleri yapabilmemizi sağlayan araçları da sağlıyor. Mezoskopik fizikle uğraşan çoğu araştırmacı kısa zamanda bu alanın bizi yeni elektronik aygıtlara ulaştıracağını sanıyor. Ne yazık ki bu o kadar kolay olmayacak. Aygıtları daha ufaltıkça yapım süreçleri sırasında çok daha zor denetlenen bir duruma gelmeleri kaçınılmaz. Ayrıca bu aygıtların çok sayıda bir arada bulunacakları tümleşik devreler ise şu anda kullanılanlar kadar güvenilir ve denetlenebilir olmalılar. Kısacası, her minyatürleştirme atılımı daha pahalı üretim ve test yöntemleri gerektiriyor. Bu parasal zorluklar minyatürleştirmeyi yavaşlatacak etkeler, fizik ya da tasarımdaki güçlükler değil! Bu ilerlemenin duracağı anlamına gelmiyor, fakat devre boyutlarını küçültme yanında yeni ve daha çok olanaklar barındıran bir yöntem bulmamız gereğine işaret ediyor."

Rolf Landauer

Gözünüzü mezoskopik fizikten ayırmayın! Bu alanın insanlığa sunacağı -bilgi olsun, teknik olsun- daha çok şeyler var...

Kaynaklar

"Nanoscale and Ultrastat Devices", Physics Today, Şubat 1990

"Optics of Nanostructures", Physics Today, Haziran 1993

Nitzsche, B.L., Lee, P.A., Webb, R.A. "Mesoscopic Phenomena in Solids", Amsterdam, 1991

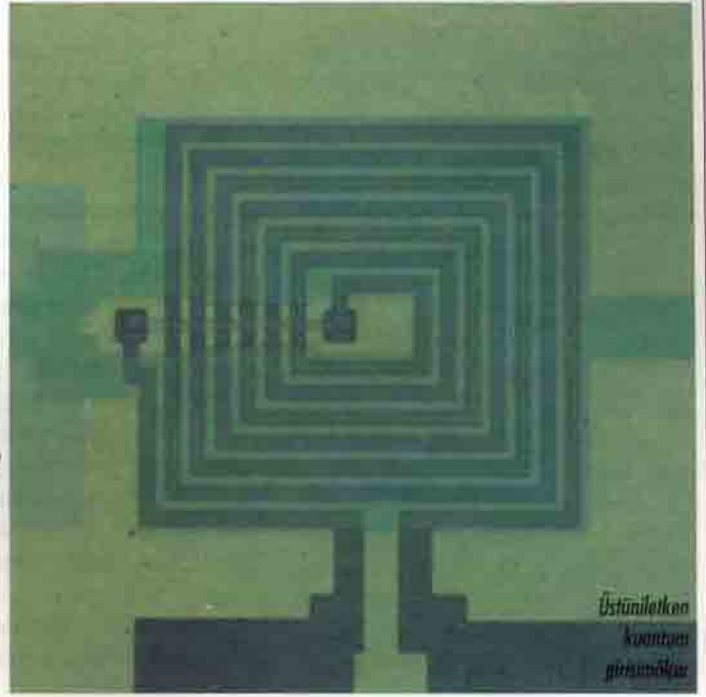
Reed, M., Kirk, W., "Nanostructures and Mesoscopic Systems", San Diego, 1991



# Mezoskopikte İki Kilometre Taşı

Igor O. Kulik  
Düşük Sıcaklıklar Enstitüsü, Ukrayna  
Bilkent Ün. Fizik Bölümü

*Yaklaşık yirmibeş yıldır yoğun madde fiziğinin çeşitli alanlarında araştırmalarını yürüten Igor O. Kulik, mezoskopik fiziğin bazı önemli problemlerine de katkıda bulunmuştur. Bu problemlerden, mezoskopik yapılarda kalıcı akımlar ve tek-elektron tünellemesi olayları hem vaadettikleri teknolojik uygulamalar, hem de içerdikleri kavramsal yenilikler nedeniyle özellikle son yıllarda çok sayıda araştırmaya konu oluyorlar...*



## Mezoskopik Kalıcı Akımlar

Çevresinden yalıtılmış iletken bir halkada, bir kaynağa gereksinim duymadan, sonsuza dek bir akım akabilir mi? Sağduyumuz bunun mümkün olamayacağını söylüyor bize: Herhangi bir sabit akım, sürücü bir kuvvet (gerilim farkı) gerektirir; ancak bu sayede çarpışmalar ile yitirdiği enerjiyi yenileyebilir. Tabii ki iletken yerine bir üstüniletken kullanırsak (üstüniletkenlerde çarpışmalar yoluyla bir enerji kaybı olmadığı için) bir kalıcı akım bulabiliriz, bunu kuramsal ve deneysel olarak biliyoruz. Şaşırtıcı, fakat mezoskopik boyutlarda üstüniletken olmayan halkalar için de kayıpsız akım olasıdır!

1970'de Aharonov-Bohm etkisinin mikroelektronik yapılarda gözlenmesi olasılığını araştırırken beklenmedik şekilde kalıcı akım sonuçları ile karşı karşıya buldum kendimi. Bulgularımı Chenogolovka'da bir Landau "çay" seminerinde açıkladığımda, bazı ünlü fizikçiler de dahil olmak üzere, kuşku ile karşılandım. Bazılar "Doğru değil, çünkü doğru olmaz!" diyerek itiraz ediyorlardı. Sonuçlarının doğruluğundan hiç kuşulanmadım, ve neyse ki bir süre

sonra kalıcı akımların varlığını yadsıyan kimse kalmadı. Fakat hâlâ kafalarda "Neden? Nasıl olabilir?" soruları doluyordu.

1980'lerin ortasında Imry, Büttiker ve Landauer manyetik alana yerleştirilmiş düzensiz bir AB halkası ile çözümlerini çok iyi bildiğimiz periyodik potansiyel problemi arasında bire-bir benzerlik olduğunu kanıtlayarak kalıcı akımlar olayına açıklık getirdiler. Prof. Markus Büttiker (Cenevre Üniversitesi, Kuramsal Fizik Bölümü) bu önemli katkıların öyküsünü şöyle anlatıyor: "Sonradan mezoskopik fizik diye adlandırılan alana girişim 1980 sonbaharında Rolf Landauer'in ofisinde kısa bir bilimsel tartışma ile oldu. Landauer tahtaya tek bir noktada bir potansiyel eğiği olan, geri kalan kısmında elektronların serbestçe hareket edebileceği bir halka çizerek sordu: Bu halkayı zamanda doğrusal artan bir manyetik alan içine yerleştirsek nasıl davranır? Bu soruyu o strada uğraytığım solitonların istatistik mekanik problemi terkedecek kadar ilginç buldum. Bir ay çok sıkı çalışarak problemi çözdüm, ama sonuç oldukça karmaşıktı. Landauer fazla etkilenmedi. Sonuçlar bir yıl masamın çekmecelerinde unutuldu. Sonra yeniden bu probleme döndüğümde üstüniletken halkalarla olan benzerliği farkettim. Bir yıl daha geçti ve kendimizi Landauer'le birlikte Joseph Imry'nin yüksek manyetik alanda Corbino diskleri üzerine bir seminerinde bulduk. Bu konuşmadan sonra, üçümüz gücünü kullanarak kısa sürede düzensiz mezoskopik halkalarda kalıcı akımları tartışan bir makale hazırladık. Bu çalışma ufak yapılarda örnek-bağımlı özellikler üzerindeki araştırmaların başlangıcını oluşturdu. Bundan

sonraki on yıl konuda pek çok kuramsal çalışmaya da birlikte getirdi ve onları deneyler izledi."

Kalıcı akımların deneysel olarak gözlenmesi işe daha uzun süre aldı. Ancak 1991'de kalıcı akımların yarattığı manyetik moment doğrudan gözlenebildi ve kuşkuyla yer vermeyecek şekilde kalıcı akımlar mezoskopik fizik konularında yerini aldı.

Kalıcı akımlar olayının fiziğine gelince: İletken bir AB halkasını manyetik alana yerleştirdiğimizde varsayalım. Elektron dalga fonksiyonlarının manyetik alan nedeniyle kazandıkları faz, bir açıl momentum oluşturacak, bu da halka çevresinde bir akım akmasına neden olacaktır. Bu akım, bildiğimiz akımların aksine bir gerilim farkı yardımıyla oluşmaktadır, yani dışarıdan enerji verilmeden ortaya çıkmaktadır. Akımın oluşması anlaşılabilir bir şekilde, bu akımın kalıcı olması hala sağduyuya ters geliyor. Normalde akımın çarpışmalarla azalmasını ve dış manyetik alanın halkaya sürekli enerji pompalamasını bekleriz. Oysa bahasettiğimiz akım, bir kez akmaya başladığında, dışarıdan enerjiye gereksinim duymaz. Bu kalıcılığı anlamak için yeniden kuantum mekanikine başvurmak gerekiyor.

Klasik mekanik, atomların kararlı yapıları olduklarını açıklayamaz. Artı yüklü çekirdek etrafındaki yörüngelerde dolaşan elektronlar, ısınmada bulunmak ve sonunda çekirdeğe düşmek zorundadırlar klasik olarak. Ancak kuantum mekanik parçacıkların rasgele enerji değerlerine sahip olamayacaklarını ve yalnızca belirli özenerjilere karşılık gelen kuantum durumlarında bulunabileceklerini gösterdikten sonra atomların kararlılığı anlaşılabilir. Elektron iki özenerji arasında bir enerjiye sahip olamayacağından, ısıma yoluyla enerjisini yavaş yavaş azaltamıyordu. Ancak bir özenerjiden diğerine atlaması mümkündür.

Mezoskopik boyutta iletken halkaları da birer atom olarak düşünebiliriz. Gerçi bunlar, bildiğimiz





atomlarla karşılaştırıldıklarında son derece büyüktür. Fakat, bu halkalar da, aynı atomlar gibi kuantum mekaniği ilkelerine uygun hareket ederler. Bir AB halkasında yalnızca belirli öz durumlarının olası olduğunu düşünürsek, elektronların ancak bir özenerjiden diğerine geçiş yapabilecekleri sonucuna varırız. Yani, manyetik alan etkisi ile oluşan akım halka boyunca çarpışmalar etkisi ile rasgele dağılmaz. Bir anlamda kuantum etkileri ile bu akım halkaya zamkla tutturulmuş gibidir, onu değiştirebilecek tek etken manyetik alanın değiştirilmesidir. Halka istediği kadar çok çarpışma merkezi içersin, kuantum mekaniği dalga fonksiyonlarından söz etmek anlamlı olduğu sürece bu akımlar buluruz ve kalıcıdır!

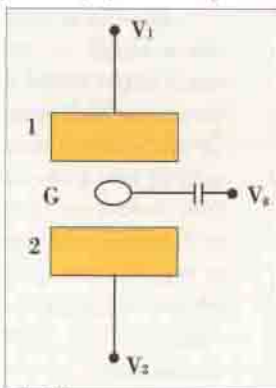
AB halkaları ve kalıcı akımların temel fizik açısından önemleri yanında teknolojik katkıları da olası. Çok geniş bir spektrumda manyetik alanı AB halkaları yardımı ile (hem de akı kuantumu derecesinde bir yaklaşıklıkla) ölçmek olası. Şöyle ki, kalıcı akımlar manyetik alandaki çok ufak değişikliklerle önemli miktarda değişebiliyorlar. Zaten şimdilerde üstüniletken halkalar hassas manyetik alan ölçümlerinde kullanılmaktalar. Bu aygıtlar üstüniletken kuantum girişimölçerleri (SQUID) olarak anılıyorlar. Üstüniletken kardeşleri SQUID'lerin yanında yakında "normal iletken kuantum girişimölçerleri" görürsek şaşırmayalım. Tabii ki NQUID'lerin temel fiziğe katkılarını ve mikroelektronik uygulamalarını görmek için daha çok çalışmamız gerekiyor.

## Tek-Elektron Tünellemesi

Genelikle transistörlerde her zaman makroskopik büyüklükte bir akım yaratabilecek çoklukta (yüz milyonlarca) elektron ile ilgilendiriz. Şimdi transistörün boyutlarını ve bu sayede tünelleme olayına katılan elektron sayısını ufaltığımızı düşünelim. Soru: Tünelleme olayında değişiklik olur mu? Yanıt Evettir ve bizi mezoskopik fiziğin yeni bir alanına, elektronların birer birer tünelleme yaptığı tek-elektron tünellemesi olayına ulaştırır.

Tek-elektron tünellemesi, 1969 yılında gerçekleştirilen iki deney ile bilim dünyasına gözlerini açtı. Bu deneylerden birini Ford Araştırma Laboratuvarı'ndan Dr. Robert Jaklevic gerçekleştirmişti. Jaklevic o çalışmaları ile ilgili olarak şunları söylüyor:

"Elektrik akımı taşıyan bildiğimiz elektronik aygıtlar var: teller, dirençler, diyotlar, transistörler vb. Bu devre elemanlarını yüklemek için çok sayıda elektron gerekli. Yıllar önce, 1969'da, biz ve bir başka grup elektronların çok ufak iletken parçacıklar içeren bir devreden belli bir eşik geriliminin altında akamadığını bulduk. Gerilim bu eşik üstünde artırıldığında ise akım basamaklar halinde artıyordu. Bildiğimiz



Tek elektron transistörü geometrisi

devre elemanları bu özelliğe sahip değillerdi! Daha sonra bunun küçük parçacıkların yüklenmesi sonucu olduğunu öğrendik ve Coulomb engellenmesi terimi ortaya çıktı. Coulomb merdiveni mezoskopik fiziğin çarpıcı ve mükemmel bir örneğiydi ve elektron yükünün doğrudan gözlenmesine olanak sağlıyordu. Günümüzde Coulomb engellenmesi olayına dayanarak yapılan elektronik aygıtlar küçük boyutları ve düşük enerji harcamaları ile geleceğin bilgisayarına temel oluşturmak konusunda iddialı bir konumdadır. Gerçi bunlar henüz deneysel laboratuvar aygıtları ve çözümleri gereken çeşitli sorunları var, fakat gelişmeler sürece ve gelecek yüzyılın elektronik teknolojisinin bir parçası da tek-elektron olacaktır."

İki iletken elektrod arasında çok küçük bir metal adacık yerleştirilim. Elektronun 1'den 2'ye geçmesi için iki olası senaryo vardır: 1'den 2'ye doğrudan tünelleme ve önce 1'den G'ye, sonra da G'den 2'ye ardışık tünelleme. İkinci yolun gerçekleşme olasılığının daha fazla olduğu kolaylıkla görülebilir. Bu, bir taşla iki kuş vurmaya (ardışık) benzer. Bununla birlikte ardışık tünelleme için elektron yükünün sonlu olmasından kaynaklanan bir engel vardır.

Tek bir elektronun tünelleyerek G'ye ulaşması sonucu oluşan yüklenme enerjisinin arttırır. Bu yüklenme enerjisi adacığın boyutu küçüldükçe daha da büyür. Örneğin, mikron boyutunda bir adacık için yüklenme enerjisi birkaç milivoltluk bir gerilime karşılık gelir ki, bu değer ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Görülüyor ki ardışık tünellemenin gerçekleşebilmesi için elektrona en azından yüklenme enerjisi kadar ek enerji sağlamak, yani iki elektrod arasına en azından belli bir gerilim farkı uygulamak gerekmektedir. Yüklenme nedeniyle tünellemenin ancak belirli gerilim farkının üzerinde oluşması olayına tünellemenin Coulomb engellenmesi denir. Kuramsal hesaplar Coulomb engellenmesinin elektronların tek tek tünellemesi gereğinden ortaya çıktığını gösterir, kesirli elektron tünellemesi olası değildir! Bu olay iyice sıkılmamış bir musluğun damlamasını andırır; damla belli bir büyüklüğe erişmeden musluktan ayrılmaz ve damlalar hep aynı büyüklüktedirler. Daha da ilginç Co-



Tek-elektron transistörünün kuantum enerji spektrumu

lomb engellenmesi aşıldıktan sonra akım, gerilimin doğrusal bir fonksiyonu olarak artmaz, basamaklar halinde değişir. Bu basamaklardan her biri G adacığına yeni bir elektron tünellemesine karşılık gelir ve sonuçta oluşan akım-gerilim eğrisi Coulomb merdiveni olarak anılır.

G adacığına dışarıdan  $V_g$  gerilimi uygulayarak yüklenme enerjisinin etkisini değiştirmek mümkün olabilir. Bu şekilde elde edeceğimiz üç bağlantılı aygıt tek-elektron transistörü (TET) olarak adlandırılır. Dışarıdan uygulanan gerilim iki elektrod arasındaki akımı kontrol ettiği gibi G adacığı üzerinde birleşmiş yükü de belirler. Bu yük  $e/2, 3e/2, 5e/2, \dots$  değerlerini aldığı anda yüklenme enerjisinin etkisi tümüyle yok olur ve 1 ile 2 arasındaki bağlantı son derece geçirgen bir hal alır. Farklı yük değerleri için ise Coulomb engellenmesi

nedeniyle bağlantı yalıtkan haldedir. Kısacası TET tek bir elektron değişimi ile "açık" ve "kapalı" konumları arasında gidip gelmektedir.

G adacığına uygulanan  $V_g$  gerilimini  $f$  frekansında bir sinyal ile modüle ettiğimizde yine oldukça ilginç mezoskopik olaylardan turnike etkisini elde ederiz. Modülasyon genliği uygun ayarlandığında TET her saniyede  $f$  kez "açık" konumuna gelir, bu sırada tek bir elektron transistörden geçer ve aynı anda TET tekrar "kapalı" konumuna döner. Aynı bir kuyruktaki insanların bir turnikeden sabit hızla teker teker geçmeleri gibi!

Tek-elektronik aygıtlarının, günlük yaşamda kullanılan elektronik cihazlarda yerlerini alabilmeleri için daha pek çok sorunun üstesinden gelmek gerekiyor. Şu anda ancak çok düşük sıcaklıklarda çalışan TET'ler yapmak olası. Sıcaklık arttıkça artan ısı gücü, kabul edilebilir ortamlarda, tek-elektron etkilerinin tamamen yok olmasına yol açıyor. Oda sıcaklığında çalışan TET yapabilmek için bugünkü mikroelektronik teknolojilerinden on kat daha ufak yapımların geliştirilmesi gerekir. Sorunlar bununla da bitmiyor, bu kadar ufak adacıklarda artık elektronları parçacık olarak kabullenmek olası değil. Elektronların dalga özellikleri ile yüklenme enerjilerini birlikte ele alacak kuramsal çalışmalar da henüz çok gelişmiş değil. Kısacası tek-elektronun ticari elektronik tekniklerine katılması için daha katılamadığımız çalışmaların zaman içinde bu engellerin üstesinden gelmeleri kaçınılmaz.