

Atomları Görmek...

Eski Yunan'da Demokritos'a kadar uzanan bir geçmişe sahip olan atom kavramı, çağdaş anlamda 17. ve 18. yüzyıllarda elementler ve elementlerden oluşan gazların yapıları incelenirken ortaya çıkmış; ancak 19. yüzyılın sonuna kadar bu fikrin gerçekliği açıkça görülememiştir. Atomların gerçekliğini ve atomlar arasında etkileşimler olabileceğini öneren bilimadamlarından en önemlisi olan Avusturyalı fizikçi Ludwig Boltzmann; bu konudaki fikirlerini kabul ettirmekte çok büyük bir dirençle karşılaşmıştır. Özellikle, atom kavramına hiçbir zaman inanmamış olan Ernst Mach'ın karşı çıkışları sonucu Boltzmann; büyük bir yalnızlığa itilmiş ve trajik bir şekilde hayatına son vermiştir... Bugün artık atomların gerçekliği konusunda hiç bir kuşumuz olmadığı gibi, atom ve atom-altı parçacıklara ilişkin çağdaş fizikteki gelişmelerin ürünü olan teknolojiyi de günlük hayatımızda yine hiç bir kuşu duymadan kullanmaktayız. Üstelik bu teknoloji yardımıyla artık, atomları izlemek de mümkün hale gelmiştir. Özellikle son zamanlarda geliştirilen ve Tarama Prob'lu Mikroskoplar olarak sınıflandırılan yeni bir mikroskop ailesi sayesinde, ilgilenilen bir malzemenin yüzeyi üzerindeki atomlar tek tek görülebilmekte ve davranışları doğrudan incelenebilmektedir. Bu mikroskoplar bir yüzeyi, yalnızca bir atomun sığabileceği kadar küçük bir aralıktan bir "prob"la yaklaşılarak, maddenin özelliklerini diğer mikroskopların çok üzerinde bir duyarlılıkta çözümlenebilmektedirler.



GÖRÜNÜR ışığın dalgaboyundan daha küçük bir boyuta sahip olan nesnelere, çağdaş bilim ve teknolojinin ilgi alanlarından biridir. Biyologlar, protein ve DNA'nın tek bir molekülü üzerine çalışmakta; malzeme bilimcileri, kristallerde bulunan atomik seviyedeki çatlaklarla ilgilenmekte; mikroelektronik mühendisleri de, yalnızca onlarca atom kalınlığında devre baskıları oluşturmaktalar. Bu araştırmacılar çok yakın zamana dek, ele alınan örnekleri ancak elektron mikroskobu, x-ışını kırınımı gibi kaba sayılabilecek ve çoğu zaman da incelenen maddeyi bozabilecek yöntemlerle görüntüleyebiliyorlardı. Bildiğimiz ışık mikroskobu ise bu cihazlara oranla oldukça basit ve dolaysız olmakla birlikte, belli bir çözünürlük sınırına sahiptir. Ancak, yeni geliştirilen bir mikroskop ailesi, dolaysız ölçüm için yeni bir ufuk açmış durumdadır. Bu cihazlar, atomik ve moleküler şekillerin, manyetik ve moleküler özelliklerin ve hatta sıcaklık değişimlerinin haritalarını, bilinen yöntemlerden çok daha duyarlı bir şekilde çıkarmaktadırlar. Üstelik bu yöntemle, incelenen örneği yenileme gereği olmadığı gibi, örneğe herhangi bir hasar gelmesi de söz konusu değildir. Ulaşılan nokta ise gerçekten inanılmaz görünmektedir.

Yüz yılı aşkın bir süre önce, aynı

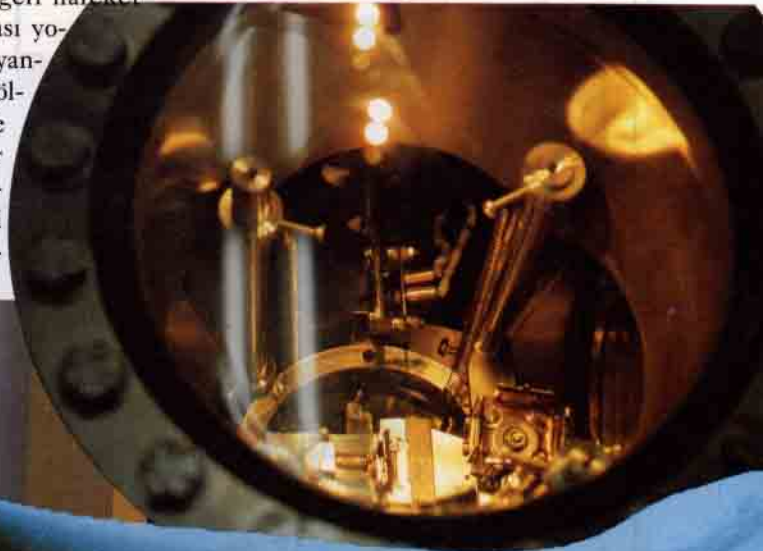
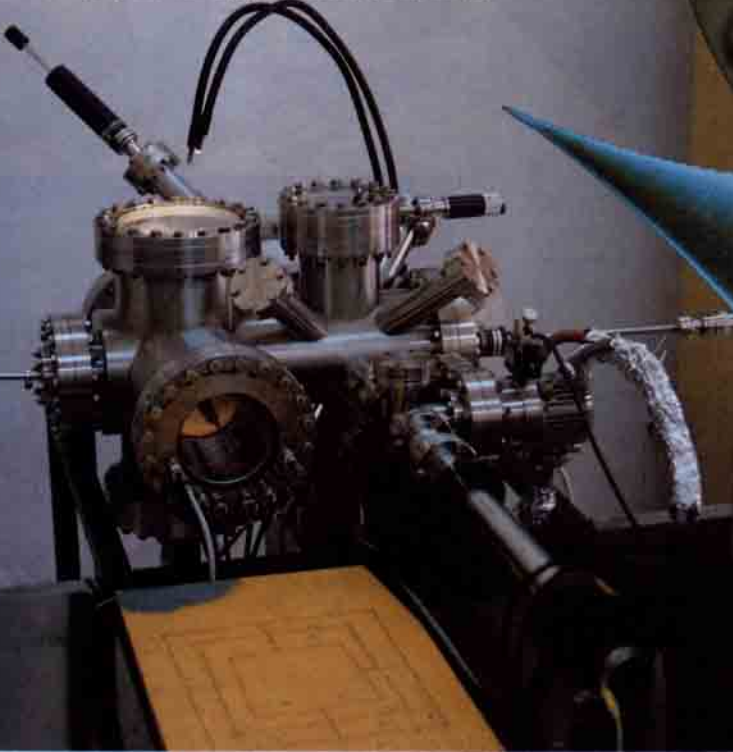
zamanda bir mercek üreticisi olan Alman fizikçi Ernst Abbe, ışık veya başka bir ışımının odaklanması ilkesine göre çalışan herhangi bir mikroskobun en temel çözünürlük sınırını şöyle tanımlamıştı: "kırınım yöntemleri, kullanılan dalgaboyunun ancak yarısı basamağında ayrıntı verebilir."

Taramalı Tünelleme Mikroskobu-TTM (Scanning Tunneling Microscope) olarak sınıflandırılan ve IBM Züriç Araştırma Laboratuvarı'ndan Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer'e 1986'da Nobel Ödülü kazandıran mikroskoplar bu sınırlamayı aşmaktadırlar. Bu mikroskoplarda geçerli olan ilke ilk kez 1956 yılında ABD ordusunda haritalama servisinde çalışan J. A. O'Keefe tarafından ortaya atıldı. O'Keefe, opak bir ekrandaki küçük bir deliğe ışık gönderilmesiyle ekranın hemen ardındaki nesnenin aydınlatılması ilkesiyle çalışan bir mikroskop önerdi. "Taramalı Yakın Bölge Mikroskobu" olarak adlandırılan bu cihaz ile, incelenen örneğin ileri geri hareket ettirilerek taranması yoluyla, geçen veya yansıyan ışık miktarı ölçülecekti. O'Keefe ayrıca böyle bir mikroskobun, Abbe'nin söylediği gibi gönderilen ışık



ğın dalga boyuyla değil, yalnızca deliğin boyutlarıyla sınırlı olacağına dikkati çekmiş; ancak nesneyi yeterli duyarlılıkta hareket ettirip konumunu belirleyecek teknolojinin olmadığına işaret etmişti. 1972 yılında Londra Üniversitesi'nden Eric Ash, çok uzun dalgaboylu ışımaya kullanarak, Abbe sınırlamasının aşılabileceğini O'Keefe yöntemiyle gösterdi. Ash; 3 cm dalgaboyundaki mikrodalga ışımalarını iğne deliği genişliğinde bir aralıktan geçirip kaydederek 150

BilKent'te geliştirilen, ultra yüksek vakuma uyumlu bir TTM.



Tungsten prob

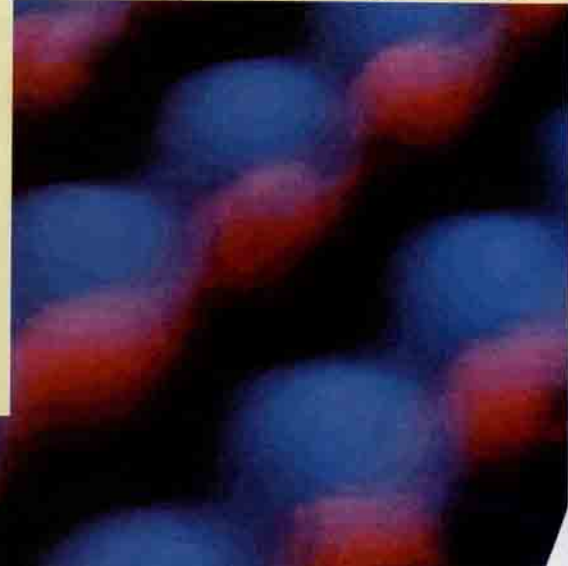
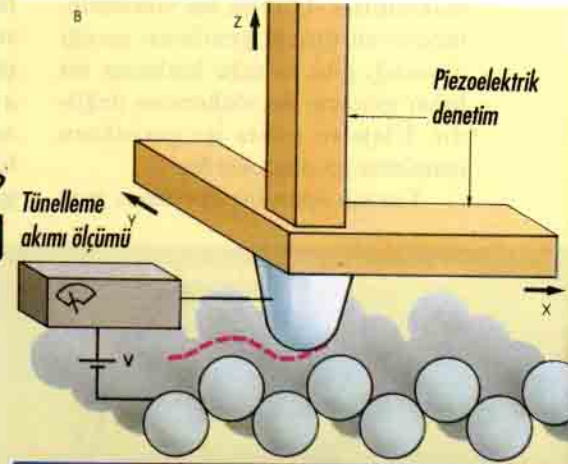
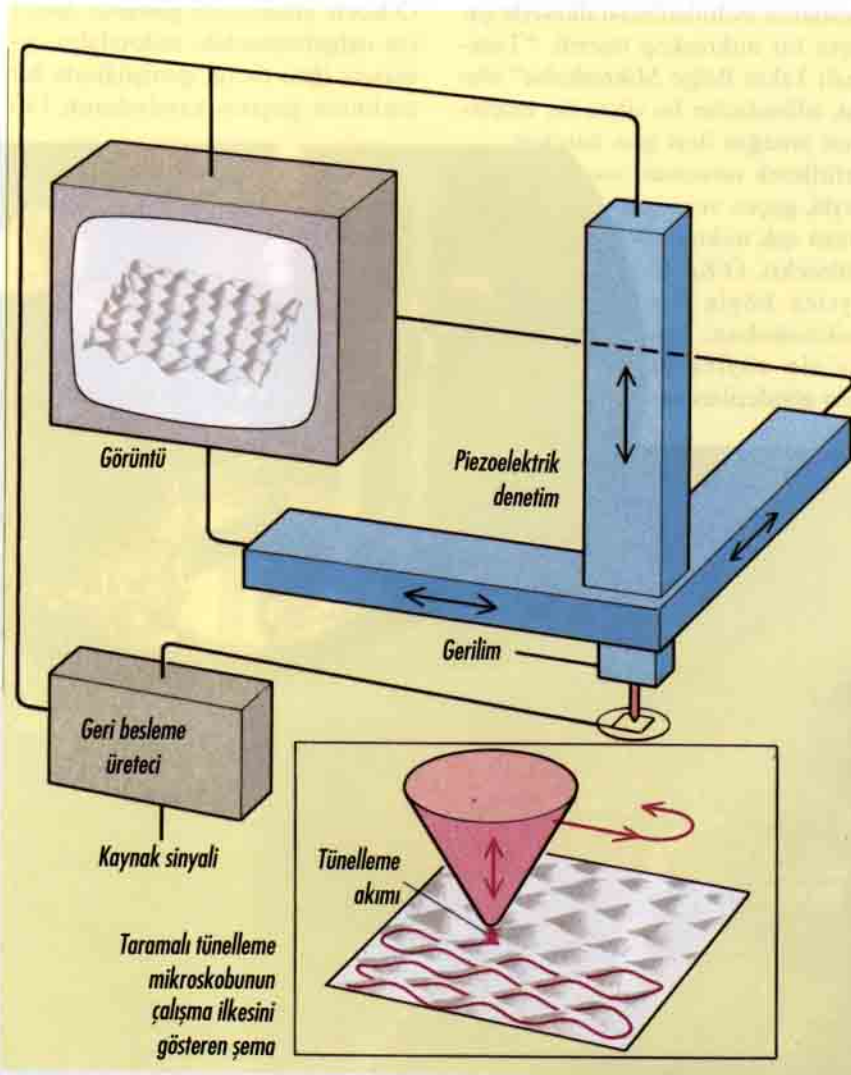
mikron (150×10^{-3} cm) çözünürlükte bir görüntü elde etti ki bu, kullanılan dalga boyunun ikiyüzde biriydi.

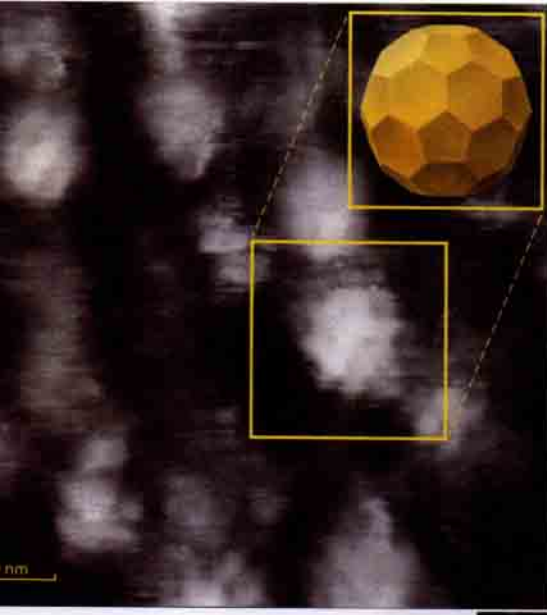
İncelenen örneğin konumunu, klasik ışık mikroskopundan daha fazla çözünürlük sağlayacak duyarlılık kontrol edebilecek yöntemler, o zamanlarda yeni gelişmeye başlamıştı. Eric Ash'in bu gösterisiyle aynı yıllarda Ulusal Standartlar Bürosu'ndan Russell D. Young, nesnelere 1×10^{-7} cm duyarlılıkla üç boyutta hareket ettirebilmeyi başardı. Bunun için, üzerine uygulanan elektrik gerilimi değiştirildiğinde boyutları da çok küçük bir miktar değişen piezoelektrik seramik malzemeler kullanılmıştı. Uygulanan bu piezoelektrik denetim, 1981'de, Taramalı Yakın Bölge Mikroskobu'nun ilk üstün örneğinin; Taramalı Tünelleme Mikroskobu'nun yolunu açmış oldu. TTM'de delik yerine, ucu



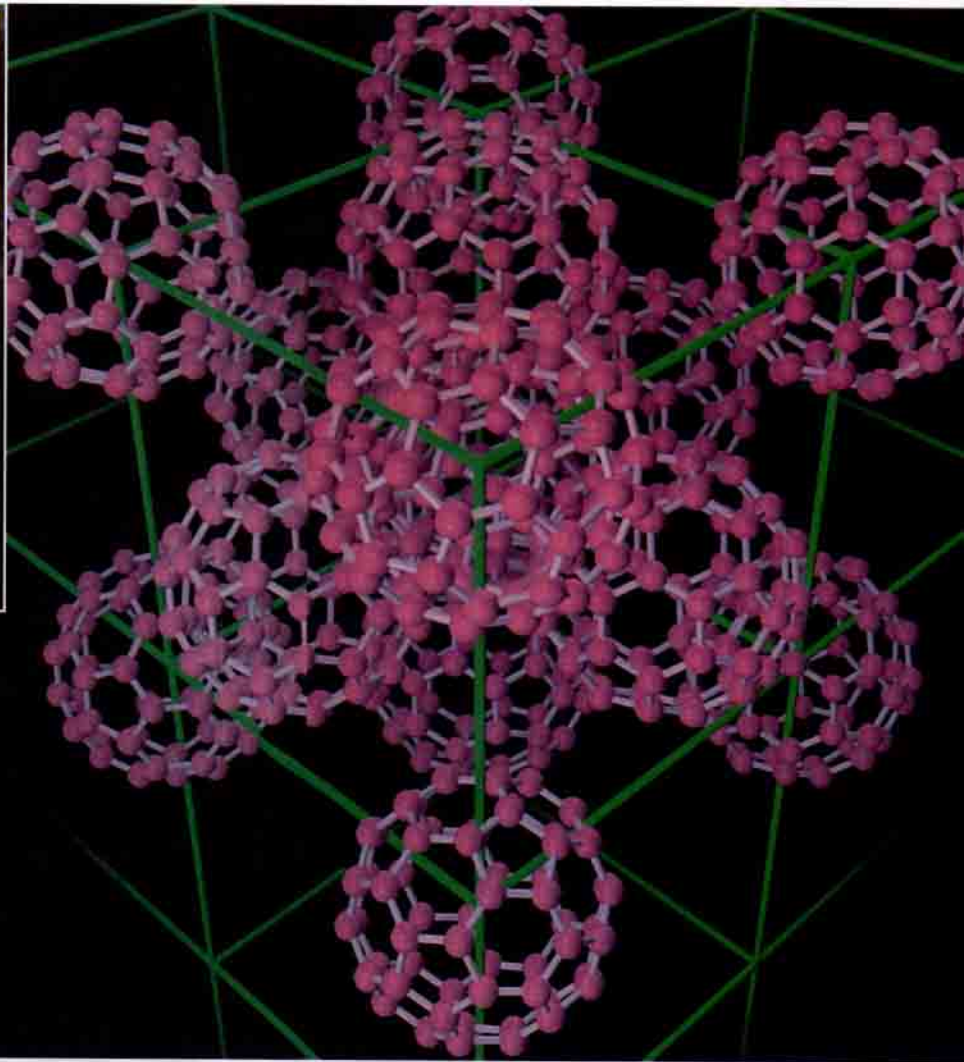
yanlızca bir tek atomdan oluşabilecek ve 2×10^{-8} cm kalınlığında olan bir tungsten prob kullanılır. Piezoelektrik malzeme, bu ucu, prob'daki atomla iletken örnekteki atomların elektron bulutlarının etkileşmelerine olanak sağlayacak kadar küçük bir aralıkta (yani; örnek yüzeyinin 1×10^{-7} cm ya da 2×10^{-7} cm üzerinde olacak şekilde) hareket ettirmektedir. Uca küçük bir gerilim uygulan-

dığında elektronlar tünel etkisiyle aradaki boşluğu atlayarak tünelleme akımı yaratırlar. Tünel etkisi, kuantum mekaniksel bir olgudur. Eğer iki iletken malzeme birbirlerine çok yakın bir şekilde yerleştirilirse, aralarında, atomlardan kaynaklanan sonlu bir potansiyel engeli oluşur. Bu iki iletken arasında bir akımın oluşması, iletkenlerde serbest olarak bulunabilen elektronların bu potansiyel engelinden tünel açarak diğer tarafa geçmesiyle gerçekleşir. Klasik fizik anlayışına göre, potansiyel engeline oranla daha düşük enerjiye sahip bir elektron, bu engeli aşamaz ve tam yansıma ile geri döner. Kuantum mekaniğine göre ise, parçacıkların dalga özelliği taşıması sözkonusudur. Bu özellik, belli bir enerjiye sahip elektron gibi parçacıkların bir kısmının, karşılaştıkları potansiyel engelinden geçmesine olanak verir. "Tünel olayı" olarak bilinen bu olgu, TTM'nin çalışma ilkesini oluşturmaktadır. TTM; incelenen örneğe çok yaklaştırıldığında yeterli ancak ölçülür bir şekilde etkileşime giren son derece du-





TTM, bir silikon kristali üzerinde beyaz lekeler halinde, hareketsiz durumdaki C₆₀ moleküllerinin direkt görüntülerini sağlamaktadır. H. Kroto ve R. Smalley'in C₆₀ molekülünün yapısı üzerindeki varsayımları TTM'nin bu görüntüleri sayesinde kanıtlanmıştır.



yarlı bir iletken prob'a sahiptir. Prob'un ucunda bulunan tek bir atoma ait elektron bulutlarının örneğe yaklaşma miktarı, küçük bir gerilim uygulandığında uç ve örnek arasında ne kadar akım geçebileceğini belirler. Bu akım arasındaki boşluğun uzunluğuna karşı son derece duyarlıdır. Aradaki boşluk, bir atomun boyutunun yarısı kadar (1×10^{-8} cm) arttığında akım yaklaşık onda birine düşer.

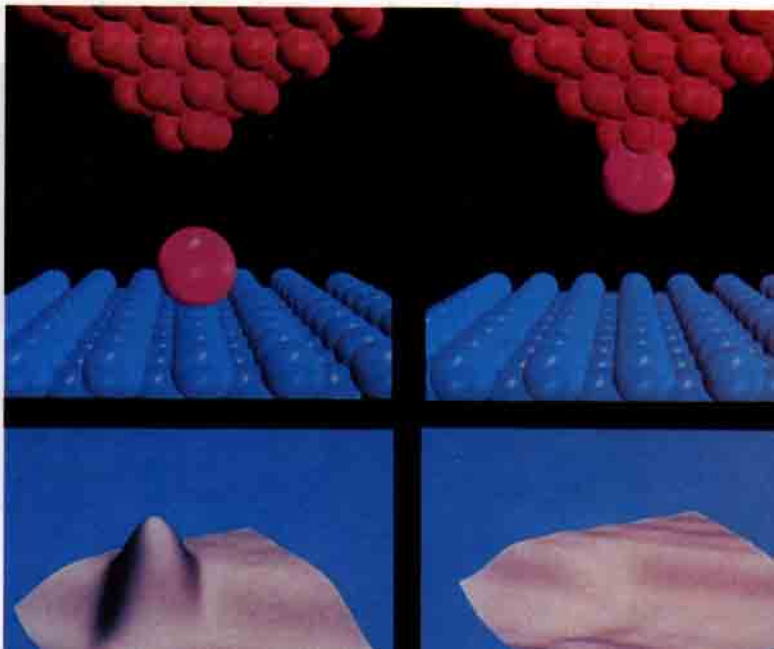


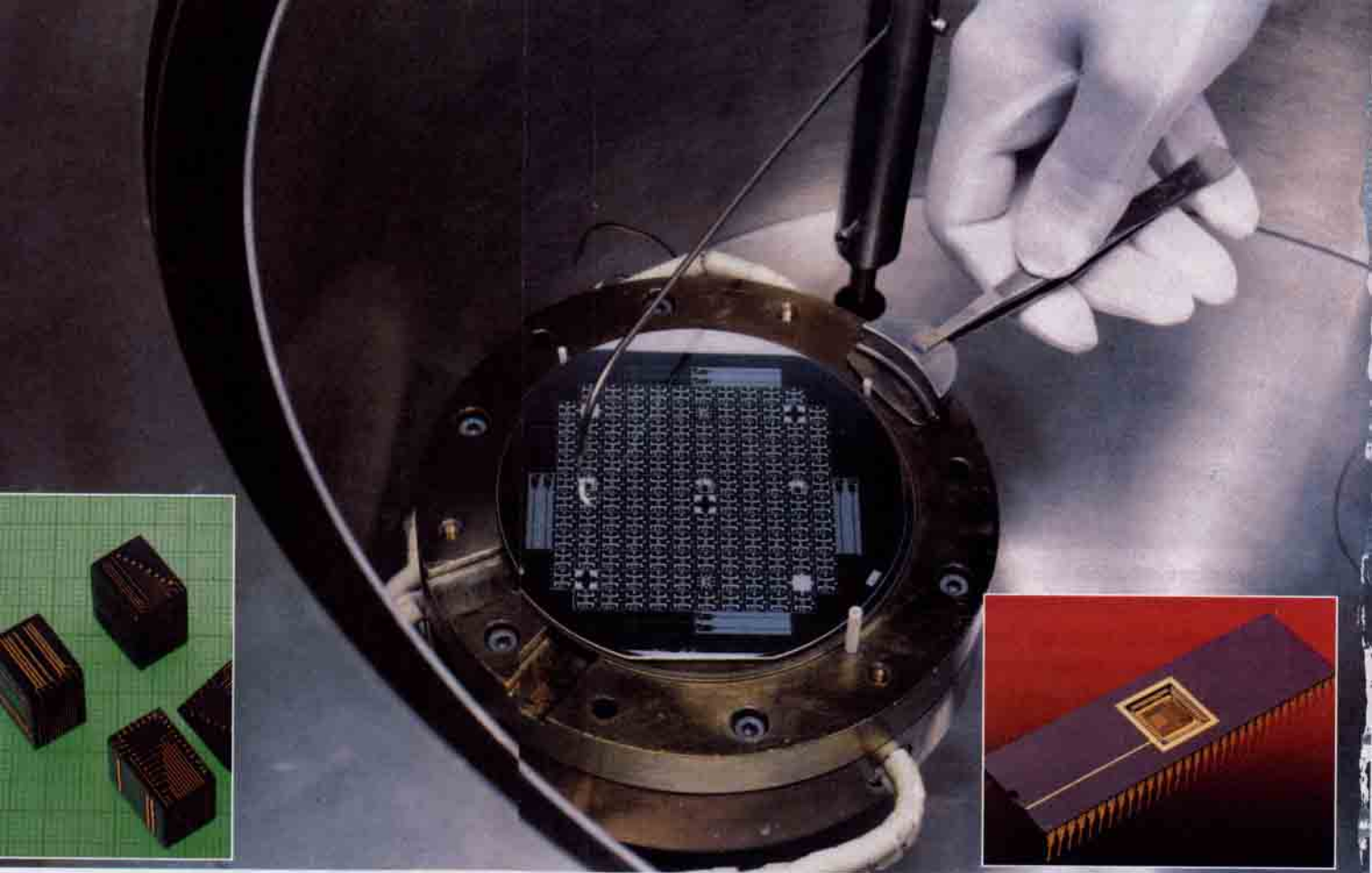
İncelenen örneğin bir düzlem üzerinde hareketini yönlendiren x ve y doğrultularındaki piezoelektrik denetimler, prob'u, örnek yüzeyi üzerinde ileri geri ve yatay paralel çizgiler biçiminde hareket ettirirler. İki paralel çizgi arasındaki aralık 1×10^{-7} cm'den çok küçüktür. Eğer prob, sabit bir yükseklikte tutulursa örnek hareket ettikçe akımın, yüzeydeki yükseltilere geldikçe artıp atomlar arasındaki boşluklara geldikçe azalması büyük bir hızla gerçekleşmektedir. Bu nedenle, yüzeyin şekline

göre prob'un yükselip alçalması sağlanmaktadır. Bir geri besleme mekanizması, akımı ölçerek bu akımı sabit tutacak biçimde prob'un konumunu denetleyen z yönündeki piezoelektriğin gerilimini ayarlamaktadır. Geçen akım, prob'la örnek arasındaki uzaklığa bağlı olduğundan, piezoelektriğe uygulanan gerilim de bu uzaklığı verir. z yönündeki piezoelektriğe uygulanan bu

gerilimdeki değişim, elektronik olarak yüzey kabartılarının haritasına dönüştürülmektedir. Eğer prob'un sivriligi, denetimlerin duyarlılığı ve tarama çizgileri arasındaki sıklık yeterliyse TTM görüntüleri, bir tek atomun çapı olan 2×10^{-8} cm'ye duyarlı olabilmektedir. Tünelenen elektronların kuantum mekaniksel dalgaboyunun yaklaşık 1×10^{-8} cm olduğu gözönüne alındığında, bu görüntülerin yüksek çözünürlükte oldukları da ortaya çıkar. Bunlar aslında yüzey şeklinin bilinen anlamdaki görüntüleri değildir; çünkü ku-

TTM ile oluşturulmuş bir atomik anahtarlama yöntemi. Kırmızı ile gösterilen TTM'nin ucu, mavi ile gösterilen nikel yüzeyi ve pembe ile gösterilen xenon atomudur. Anahtar; xenon atomu nikel yüzeyi üzerinde ise kapalı, TTM'nin ucunda ise açıktır. Şeklin alt kısmında gösterilen TTM görüntüleri ise xenon atomlarının nikel yüzeyi üzerinde olup olmadığını belirlemektedir.





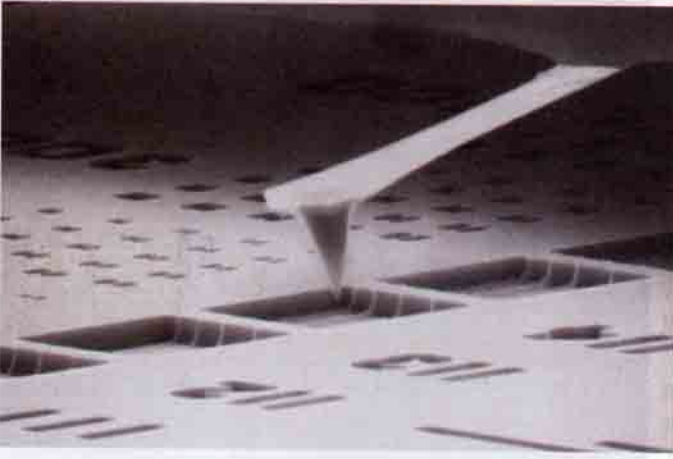
antum mekaniğinde Werner Heisenberg tarafından formüle edilen "Belirsizlik İlkesi" gereği, atomların ya da elektronların optik görüntülerini elde etmek mümkün değildir. TTM ile incelemede elde edilen veri, yüzeyin durumuna karşı yüksekliğini içeren eş-tünelleme olasılığının haritasıdır. Tünelleme olasılığı, yüzey şeklinde olduğu kadar yüzey atomlarının enerjilerinden de etkilenmektedir. Eğer incelenen örnek yalnızca tek bir elementten oluşmaktaysa tünelle-



l e m e
olasılığı hemen

hemen tümüyle yüzey şekliyle belirlenmektedir.

TTM, araştırmacılara piezoelektrik denetim yardımıyla, incelenen örneği atomik boyutlarda, yani nanometre ölçeğinde tarama kolaylığını sağlamaktadır. Örneğin iletken ya da yarı-iletken olması koşulu aranmasına karşın, bu k o ş u l



TTM'nin çalışma alanına önemli kısıtlamalar getirmemektedir. Üzeri oksit tabakasıyla kaplı örneklerle de ölçüm yapılabilmekte; hatta genelde yalıtkan olan biyolojik maddeler de iletken bir yüzey üzerine yerleştirilerek incelenebilmektedir.

TTM, yüzey atomlarıyla ilgili temel çalışma alanlarına ek olarak pratik uygulama alanlarına da sahiptir. TTM'nin havalı ortamda olduğu kadar, elektrolit çözeltilerde, sıvı helyumda, yağda, suda ve havası alınmış ortamlarda (vakum) da çalışabilme özelliği sayesinde, DNA'nın görüntülenmesi veya pil elektrodlarının çalışırken gözlenmesi gibi birçok uygulama alanı ortaya çıkmıştır.

TTM, aynı teknolojik özellikler yardımıyla geliştirilen ve Tarama Prob'lu Mikroskoplar adı verilen bir mikroskop ailesinin atası sayılmaktadır. Kuantum mekaniğinin uygulanabilir bir buluşu olan TTM ve diğer tarama prob'lu mikroskoplar, sonuç olarak maddenin atomik düzeyde incelenmesinde yepyeni bir dönemin habercisidirler.

İlhami Buğdaycı

Kaynaklar
Wickromasinghe, H.K. Scanned Probe Microscopes, Scientific American, Ekim 1989
Williams, E.D. Scanning Tunneling Microscopy, Physics For Scientist And Engineers, New York, 1991

Bilkent'teki Kristal Büyütme Çalışmalarında TTM'nin Yeri

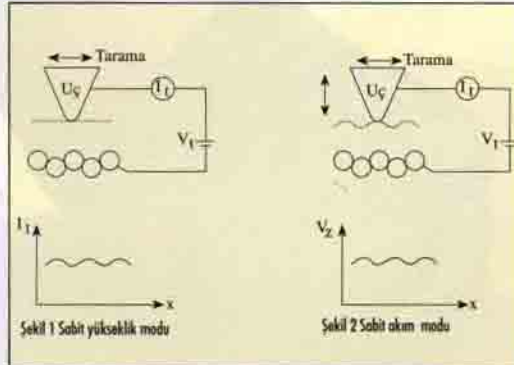
Recai Ellialtıoğlu
Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü

Havası boşaltılmış bir deney ortamında, yüzeyi özel yöntemlerle temizlenmiş silisyum kristali üzerine buharlaştırma yoluyla kondurulan silisyum atomları yeni katmanlar oluştururlar. Yüzeye tutunan atomlar kalan enerjileri sayesinde yüzeyde hareket ederek atom çiftlerini; bunlar da birleşerek çift atom dizeleri ve tek atom kalınlığında adalar meydana getirirler. Kristal büyütmenin epitaksiyel olması, yani zemindeki kristal örgü yapısı koruyacak biçimde yapılabilmesi, deney koşullarıyla oldukça yakından ilintilidir. Bu koşulların saptanması ise çeşitli deney parametrelerine bir dizi değer vererek elde edilen anlık yüzey görüntülerini incelemekle mümkün olabilir. Bu amaçla Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü İleri Araştırma Laboratuvarlarında geliştirilen ultra yüksek vakuma uyumlu bir Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM) sayesinde, silisyum kristali üzerinde silisyum, germanyum ve bunların değişik oranlardaki alaşımlarının epitaksiyel olarak büyüme kinetiği incelenmektedir. Bu kristallerin en iyi büyüme koşullarının araştırılması ve bu yolla oluşturulan yapay kristal katmanlar içeren özgün aygıtların gerçekleştirilmesi, ön görülen hedefler arasındadır.

Bilkent'te geliştirilen Taramalı Tünelleme Mikroskoplarından üçüncüsü, benzeri diğer mikroskoplar gibi altı ana parçadan oluşmaktadır. Çevresinden gelecek titreşimlerden yalıtılması için, yaylarla dört direğe asılı bir salıncağa yerleştirilmiştir. Sürekli salınımları önlemek için de dış gövdeye bağlı miktatsızları içine alan dört bakır kapan salıncağa tutturulmuştur. Örnek tutucusunun yer aldığı piezo kaydıraklar yardımıyla kaba yaklaştırma ve örnek yüzeyinde değişik bölgelerin seçilmesi mümkün olmaktadır. Diğer önemli bir parçası da içi ve dışı metal kaplı piezo tüp tarayıcıdır. Piezo tüp bir taraftan mikroskopun gövdesine bağlıdır; diğer tarafına ise uç elektrodu olarak kullanılan ve asitle aşındırma yoluyla sivriltilmiş bir tungsten tel tutturulmuştur. Mikroskopun çalışmasıyla ilgili çeşitli işlevleri yerine getiren bir elektronik denetleyici ile veri toplama ve analiz sistemi, diğer ana parçalar olarak sayılabilir.

ren bir elektronik denetleyici ile veri toplama ve analiz sistemi, diğer ana parçalar olarak sayılabilir.

Etkileşimli bir program yönetiminde ve bir servo devresi içeren elektronik sistem denetiminde uç ve örnek yüzeyine küçük bir gerilim farkı uygulanır ve yeterli tünel akımı elde edilinceye kadar uç ve örnek yüzeyi birbirine yaklaştırılır. Uca, incelenecek bölge üzerinde tarama yaptırılır; ucun hareketi, üçüncü boyut bilgisi de eklenerek bilgisayar belleğine kaydedilir. "Tünel olayı", elektronların bir potansiyel engelini aşmadan geçmeleriyle açıklanan kuantum mekaniksel bir olay olup, bu elektronların oluşturduğu tünel akımı, uç ile örnek yüzeyi arasındaki uzaklığın üstel bir fonksiyonudur. Akım uzaklığa çok duyarlıdır, dolayısıyla uca yüzey üzerinde tarama yaptırırken, yüzey engellerinden kaynaklanan uzaklık farkları (atomik boyut-



Şekil 1 Sabit yükseklik modu

Şekil 2 Sabit akım modu

larda da olsalar) nedeniyle ölçülebilir değişimlere uğrar. Bu akım değişimlerinin üçüncü boyut bilgisi olarak kullanıldığı ve Şekil 1'de şematik olarak gösterilen sabit yükseklik modunun yanısıra, TTM sabit akım modunda da çalışabilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi bu modda, ucun servo devresi yardımıyla yüzeye yaklaştırılıp uzaklaştırılmasıyla akım sabit tutulurken, ucun uzaklık yönündeki hareketini sağlayan piezo gerilim değerleri kullanılır. Daha sonra görüntü işleme sürecinden geçirilen veriler ekranda görüntülenir.

TTM'nin en önemli özelliklerinden biri; vakumda olduğu kadar, bir çok sıvı ve gaz ortamında da çalışabilmesidir. Özel tasarımlar gerektiren diğer türleri de yüksek sıcaklıkta ya da çok düşük sıcaklıklarda (-270 °C) çalışabilen özel amaçlı deneylerde kullanılırlar.

Silisyum yüzeyinde yer alan teraslar ve yüzeye tutunan atomların oluşturduğu atom çiftleri, çift atom dizeleri ve bunların oluşturduğu tek tabaka odacıklar. Ardışık teraslarda bulunan çift atom dizelerinin birbiriyle dik açı yapacak şekilde yerleşmiş olmaları, silisyum atomunun bağ yapısından kaynaklanmakta olup bu yöndeki kristal düzleminin bir özelliğidir.

şabilen özel amaçlı deneylerde kullanılırlar. TTM'nin bir başka önemli özelliği de spektroskopik modda çalıştığında örnek yüzeyinin yerel elektronik yapısı hakkında bilgi verebilmesidir. Bu teknik, bir yüzey üzerinde meydana gelen biyolojik proseslerin, kimyasal etkileşimlerin ve makromolekül yapılarının incelenmesinde oldukça önemlidir ve birçok araştırmacı tarafından bu amaçla kullanılmaktadır. Ayrıca, uca ani voltaj değişimleri uygulayarak bazı yabancı atomları yüzeyde istenilen yere kondurup kaldırmak (yani bilgi kaydedip silmek); ya da ucu yüzeye değdirip hareket ettirerek yüzeye istenilen deseni çizmek, çeşitli laboratuvarlarda denenmekte olan uygulamalardır. Benzer şekilde, altın yüzeyi üzerinde sabitlenmiş bir DNA molekülünde yer alan hastalıklı bir gendeki bozukluğu gidermek için TTM'den yararlanılabilecektir.

TTM'nin ardından, bazıları yine atomik çözünürlük sunabilen, ancak tünel akımı yerine uç ve örnek yüzeyi arasındaki başka fiziksel etkileşimleri kullanan yeni mikroskoplar geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri arasında Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Manyetik Kuvvet Mikroskobu (MFM), Taramalı Yakın Alan Optik Mikroskop (SNOM), Balistik Elektron Yayıma Mikroskobu (BEEM) ve Taramalı Sığa Mikroskobu (SCM) sayılabilir. Bugün fizikçilerin oldukça yaygın olarak kullandığı TTM ve ondan türeyen diğer mikroskoplar, belki de daha çok kimya, biyoloji, mühendislik ve tıpta kullanım alanı bulmaktadır. Binnig ve Rohrer'e Nobel Fizik Ödülü kazandıran TTM, bir avuca sığacak kadar küçük bir alet olmakla birlikte nanoskopik dünyaya dev bir adım atılmasını sağlamış, bilim ve teknolojiye yeni bir çığır açmıştır.