
Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji

Prof. Dr. Mehmet ERBUDAK
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)



TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ

TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ FORUMU

Sıra No: 48

Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji

Prof. Dr. Mehmet ERBUDAK

© Mehmet Erbudak / Türkiye Bilimler Akademisi, 2007.

Bu kitabın tüm yayın hakları saklıdır. Yayıncının yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz, CD ya da manyetik bant haline getirilemez.

Türkiye Bilimler Akademisi Forumu Dizisi kapsamında hazırlanmış olan bu kitapta yer alan değerlendirme ve görüşler yazara aittir.

Birinci Basım: Mayıs 2007 (1000 adet)

YENİ REFORM Matbaacılık-Ankara. Tel: 0312 341 20 92

Erbudak, Mehmet

Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji/ Mehmet Erbudak. — Ankara: TÜBA, 2007
44 s.; 13,5 x 19,5 sm. — (TÜBA Akademi Forumu Dizisi 48)

ISBN: 978-9944-252-02-7

1. Nanoteknoloji

600

Türkiye Bilimler Akademisi

Piyade Sok. No: 27, 06650 Çankaya Ankara

Tel: 0.312.442 29 03 Faks: 0.312.442 23 58

e-posta: tuba@tuba.gov.tr

Akademi Forumu

Türkiye Bilimler Akademisi, devlet ve toplumla ilgili, yasayla belirlenmiş bağımsız ve yetkin danışmanlık görevi kapsamında, bilimsel ve toplumsal konularda özgür ve eleştirel bir tartışma platformu ve kültürü oluşturmaya, bunun için toplantılar düzenlemeye ve yayınlar yapmaya çaba göstermektedir.

Akademi Konferansları programı bu görev doğrultusunda tüm akademik dallarda önemli bilimsel gelişmelerin, geniş bir dinleyici kitlesini hedef alarak kamuya mal edilmesini; diğer yandan, ülke gündemindeki çeşitli sorunların bilimsel bir yaklaşımla ele alındığı, özgün katkılar içeren, farklı ve tartışmaya açık görüşlerin sunulduğu kamusal bir platform oluşturulmasını hedeflemektedir.

Bilim, düşün, sanat ve siyaset alanlarının öne çıkmış temsilcilerinin Akademi Konferansları programı kapsamında yaptıkları konuşmalar ülkemizde bilim ve tartışma kültürünün gelişmesine daha yaygın bir biçimde katkıda bulunmak amacıyla Akademi Forumu dizisi çerçevesinde yayınlanmaktadır. Bu yayın dizisi, aynı zamanda, gelecek kuşaklar için günümüz Türkiye'sinde bilim ve kültür yaşamının bir seyir defteri niteliğini taşıyacaktır.

İÇİNDEKİLER

Sunu	7
Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji	9
Özgeçmiş	38

SUNU

Prof. Dr. Mehmet Erbudak, 1 Mayıs 2006 günü İstanbul'da Türkiye Bilimler Akademisi Akademi Konferansları Programı çerçevesinde "Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji" başlıklı bir konferans vermiştir.

Prof. Erbudak konferansında nanoteknolojinin tanımlarını yapmış, bu güncel teknolojinin fiziksel esaslarını açıklamış ve nanoteknolojinin tıp, biyoloji, elektronik, bilgisayar teknolojileri, vb. alanlarda ve genelde, günümüz yaşamındaki uygulamalarına ilişkin aydınlatıcı örnekler vermiştir.

Prof. M. Erbudak'a konferansı için teşekkürlerimizi sunarım.

Saygılarımla,

Prof. Dr. Engin BERMEK
Akademi Başkan

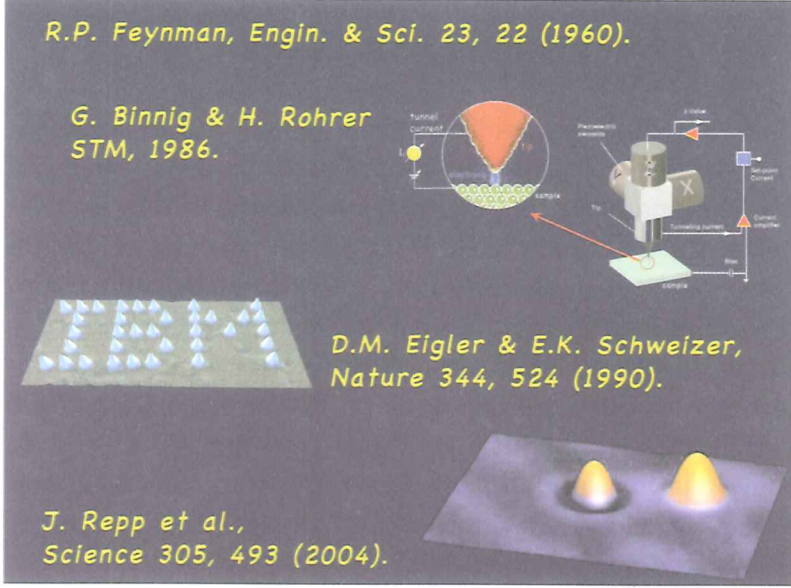
Fizikçi Gözüyle Nanoteknoloji

Sayın Akademi Üyeleri! Aslında akademi üyeleri o kadar çok ki, aklıma okullarda öğretilen set teorisi geldi. Bu salonda hem akademi üyeleri var, hem de arkadaşlarım var. Bu iki kümenin kesiştiği bölge ise hem arkadaş hem de akademi üyeleri olan kişiler. Bu ortak küme o kadar büyük bir grup oluşturuyor ki, buraya geldiğim zaman sanki bir arkadaş partisi bulmuş gibi oldum. Bu nedenle beni davet ettiğinizden dolayı çok çok teşekkür ederim.

10-15 bin yıldır gelişmekte olan uygarlığımızda değişik

yöntemlerle büyük, yüksek, görkemli yapılar inşa edilmektedir; uzaktan baktığınız zaman İstanbul silueti gibi. Bunlardan biri Urfa civarında Göbekli Tepe. Örneğin, Mısır'ın piramitleri el emeği ve zekâ ürünüdür. Modern bir gökdenin tasarımında ve gerçekleştirilmesinde ise akla gelen tüm teknik ve stratejik bilgilerin, tüm mühendislik dalları ve bilim alanlarının yardımı gerekmektedir. Bunun tam tersine, son 20 yıldır nasıl ufalabiliriz diye uğraşmaktayız. Bu uğraşının adına da 'nanoteknoloji' denilmektedir. Bu konuda konuşmak da çok zor. Bana bu fırsatı verdiğiniz için teşekkür ederim. Ben korkumdan dolayı zaten başlığı ona göre seçtim. Bu konunun uzmanı değilim, bilfiil meraklısıyım. Etrafımızda o kadar çok nanoteknoloji var ki, kumaşta bahsettiğiniz gibi. Herkes nanoteknoloji yapıyor, hepimiz nanoteknolojinin uzmanı sayılırız. Bu nedenle, ilk önce nanoteknolojinin tanımı üzerinde duracağım. Sonra nasıl doğduğu ve gelişmesi ile ilgili örnekler vereceğim; ufaltma yarışı böyle devam ederse, 'bizi nasıl bir devrim bekliyor' sorusuna değineceğim. Sonunda imalat yöntemleri hakkında kısaca bildiklerimi sunacağım. Nanoyapıların sağlığa etkisi kendi başına bir konu; buna hiç değinmeyeceğim. Kullandığım kelimeleri lütfen affedin, konuşurken Arapçadan tamamen uzaklaşamıyorum; yeni Türkçeye de dilim dönmüyor her zaman.

Nanoteknolojinin tanımını üç bölümde işleyebiliriz. 'Nano' kelimesini duyunca önce aklımıza küçük şeyler geliyor, çünkü 'nano' Yunancada cüce demek. Nasıl ki çok büyük için 'mega' kullanılıyor, örneğin megafon; çok küçük ve



Feynman'ın 1960 yıllarındaki öngörüsü, 1980'lerde Binnig ve Rohrer'in yöntemi ile gerçekleşti. Don Eigler, aynı yöntemden yararlanıp atomların yüzeylerde istenilen yere götürülebileceklerini kanıtladı. IBM'de çalışan Repp, bilgi biriminin yüzeydeki bir atom kadar ufalabileceğini gösterdi.

hızlı için de 'mikro' kelimesi var. Eskiler hatırlar, Fenerbahçe'de mikro Mustafa vardı. Richard Feynman 1959-1960'ta, tüm *Encyclopedia Britannica*'nın bir toplu iğne başına yazılabileceğini öngörmüştü.¹ Onun hesabına göre, 1 bilgi birimi kenar uzunluğu 8nm olan bir yere sığabiliyordu, bu da yaklaşık 250-300 atoma denk geliyor. Nanoteknoloji, Feynman'ın öngörüsü doğrultusunda, çok yer tutan bir takım parçaların ufaltılarak verimli bir istifleme

¹ R. P. Feynman, *Engin. & Sci.* 23, 22 (1960).

ile saklanabilmesi anlamına gelebilir. Kitap, ses veya film belgeleri için herhalde yararlı bir olanak.

Nanoteknoloji deyince ikinci akla gelen konu, bu parçaları hem böyle küçücük yapabilme, hem de onları gözleyebilme olanağı. Bu şekilde imalat ve sınama beraberce gerçekleşmiş olur. 1980'lerde bulunan tarama yöntemleri ile teker teker yüzeydeki atomlar görüntülenebiliyor; atomlar yaklaşık onda iki nm boyunda. Piezokristaller yardımıyla çok duyarlı olarak incecik bir uç ile yüzeyi tarayıp, atomları görüntülüyorsunuz. Heinrich Rohrer'in başarısı 1986 yılında fizik Nobel ödülüyle sonuçlanmıştı. Geçen Eylül'de Muğla'ya fizik toplantısına davet etmiştim kendisini. Don Eigler ise, yine aynı yöntemle, yüzeydeki atomları teker teker istediği yere götürüp koyabilmektedir.²

Gerçek nanobilimin temelini, parçacıklar ufalınca onların hareketlerini etkileyen yasaların ve etkileşmelerin temel dengelerinin değişimleri oluşturur. Parçacıklar büyükken aklımıza gelmeyen, klasik fizikte olmayan birtakım yeni etkileşmeler ortaya çıkabilir. Örneğin, geçen yıl Jascha Repp yüzeydeki atomları 100 V kadar bir gerilimle yükleyip, sonradan bu atomlarda birikmiş yükü görüntüleyebiliyordu.³ Bu deneyde bilgi birimi bir tek atomdan oluşuyor. Buradan gördüğümüz kadarıyla artık Feynman'ın söylemiş olduğu gibi bilgiyi 300-500 atomluk gruplarda değil,

² D. M. Eigler ve E.K. Schweizer, *Nature* **344**, 524 (1990).

³ J. Repp et al., *Science* **305**, 493 (2004).

bir tek atomda saklayabileceğiz. Maddeyi önceden karar verilen şekillere sokabilmek, bu şekilde yepyeni özellikler ortaya çıkarmak; **fizikçinin gözünde nanoteknoloji** bu işte! **Nanoteknolojinin kapsamı** çok geniş tutulabilir. Buna göre, yaklaşık her şey nanoteknolojinin ilgi alanıdır. Etrafımızda görebildiğimiz ve göremediğimiz her şey atom ve moleküllerden yapılmıştır. Atom ve molekülleri hedeflediğimiz şekilde yerlerinden oynatıp, parçaları önceden planlanmış özelliklere kavuşturmak nanoteknolojinin hedefidir. Nanoteknolojinin uğraşı alanları şöyle özetlenebilir:

- biyoloji, tıp
- çevre; enerji üretimi, depolanması; örneğin hidrojenin saklanması, taşınması ve yakılması
- bilgi iletişimi; en az kayıpla en yüksek hız, yoğunluk ve depolama
- malzeme bilgisi, fizik, kimya; nanoelektronik, fotonik, nanomanyetizma
- mühendislik
 - nanomekanik, akışkanlık, reoloji
 - nanotriboloji
 - nanoteller, karbon tüpleri
- imalat
 - nanolitografi
 - kendiliğinden düzenlenme
 - modelleme, matematik

Nanoteknolojinin doğuşunu doğada bulabiliriz. Doğamız milyonlarca yıldır nanoteknoloji üretmekte; ürettiği her

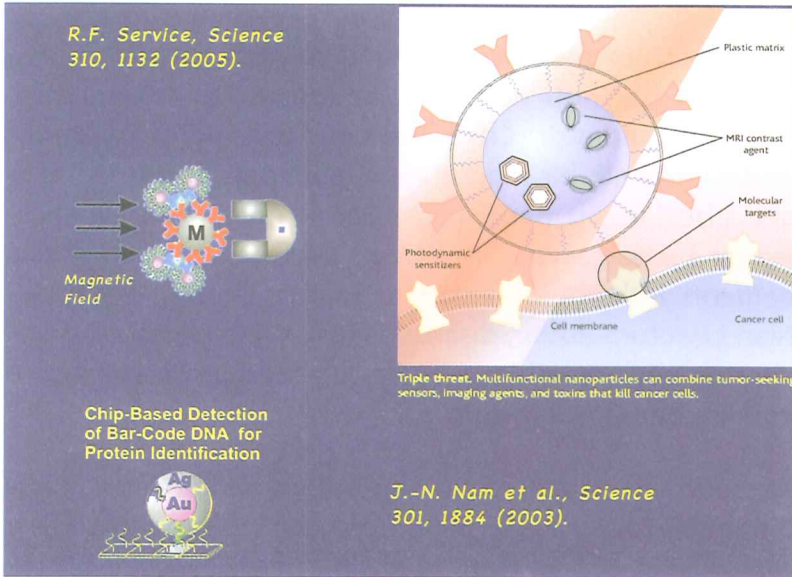
şeyde de atom boyutlarında duyarlılık ve kesinlik bulunmaktadır. Tüm canlılar hücrelerden oluşuyorlar. Hücreler protein, DNA, RNA gibi nanomakinalarla dolu. Her biri son atomuna kadar düzenli. O kadar düzenli ki, tek bir atomun bile yeri değişse alet bozulabiliyor. 20. yüzyılda bu biyolojik nanomakinalar üzerine çok çalışıldı. Bu nedenle, ilk gelişen bilim dalı **nanobiyoloji** oldu diyebiliriz. Böyle giderse insan yaşamının niteliğini ve uzunluluğunu belki de etkileyebileceğiz.

İnsanları en fazla kanser öldürüyor; kanserin 200'den fazla türü var. Bazıları çok habis. Kanserın tanınması, savaşı ve gelişmesinin izlenmesi onkologların baş uğraşısı. Kemoterapi, ışın tedavisi veya ameliyat kansere karşı bugün uygulanan müdahale çeşitlerini oluşturuyor. Her biri, kanserli hücrelerin yanı sıra, sağlamlarını da öldürüyor. Üstelik tedavilerin başarılarını anlamak için kanserin tekrar çıkıp çıkmadığını beklemekten başka çare yok. İşte bu nedenle, onkolojinin umudu moleküler düzeyde yapılabilecek savaştır. Kanserli hücrelerin aranıp bulunması, görün-tülenmesi ve öldürülmesi nanobiyolojinin hedefidir. Kanser için kullanılan ilaçlar akıllanmaktalar; gitmeleri gereken yerden sapmadan, orada ne yapmak gerektiğini bile-rek ve etrafa hasar vermeden çalışmaları öngörülüyor. Nanoteknoloji ile gerçekleştirilecek ilaçlar bu üç görevi aynı zamanda üstlenmeye yönelik. Bunlara kişiye özel, kombine işlevli ilaçlar adı veriliyor.⁴ Kombine ilaç, kocaman bir

⁴ R. F. Service, *Science* **310**, 1132 (2005).

molekül gibi hem tanı yapacak, hem kanserle savaşıacak, hem de savaştıktan sonra durumu gözleyecek birimlerden oluşuyor. Üstelik o kadar akıllı olmalı ki, gidip gerektiği yeri bulup orada etkili olsun. Şimdi kombine bir ilacın teker teker parçalarından örneklerle bakalım.

Resimde görülen duyarlı bir tanı yöntemi; altın taneciklerle veya manyetik parçacıklar kullanarak, örneğin bugünkü ELISA testinden bir milyon kez daha duyarlı çalışıyor. Bu parçacıklar aranan proteinlere, kanserli hücrelere yapışı-



Duyarlı tanı yöntemlerinde, altın atomlarının yanı sıra manyetik parçacıkların kullanılmaları önerilmektedir. Kanserle savaşı moleküler düzeyde gerçekleştirebilmek için nanoteknoloji değişik işlevleri birleştiren ilaçlar geliştirmeyi hedeflemektedir.

yor ve dışardan uygulanan kuvvetli bir manyetik alan yoluyla kolayca sağlıklı proteinlerden ayırt edilip sayılabiliyorlar.⁵

Nanotellerden yapılmış *field-effect transistor*'lardan (FET) oluşan bir gereç kanserli proteinleri femtomol duyarlılıkta algılayabiliyor. Şu an biz nanodan bahsediyoruz; nanodan sonra piko, pikodan sonra da femto geliyor; yani femto nanonun milyonda biri. Çok az miktarda kan kullanarak öncelikle prostat ve göğüs kanserlerinin ilk aşamalarında tanınması umuluyor.⁶

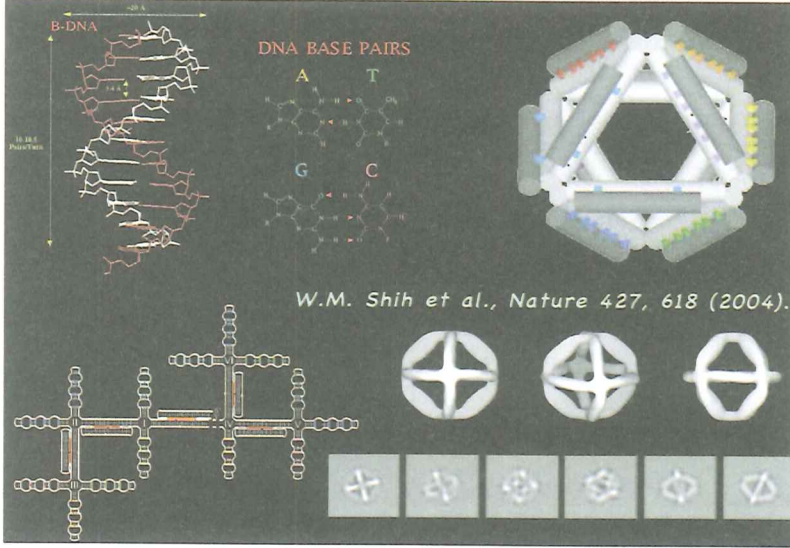
Domuzlar üzerinde yapılan bir deneyden bahsedeceğim. Lenflerin bağlantı noktaları (*nodes*) metastazların oluştukları ilk yerler. içi CdTe, dışı CdSe'den oluşan kuantum dotlar, organik bir madde ile kaplanıp suda erir bir hale getiriliyorlar. Bu nanoparçacıklar lenflere zerk edilince, lenfler bu parçacıkları itiveriyor, böylece kuantum dotlar bağlantı yerlerine birikiyorlar. Halojen lamba ile aydınlatılan kuantum dotlar, dışardan algılanabilen kızıl ışık çıkarıyorlar. Böylece lenflerin bağlantı yerleri biyopsi amacı ile kolayca bulunmuş oluyor.⁷

Kanserle savaş stratejisinin öngördüğü bir konu altın kaplı nanoparçacıklar ile ilgili. Bu parçacıklar hasta hücrelere yapışıyorlar. Deriye tutulan kızılberisi ışık, sağlıklı hücre-

⁵ J.-N. Nam et al., *Science* **301**, 1884 (2003).

⁶ G. Zhang et al., *Nat. Biotech.* **23**, 1294 (2005).

⁷ S. Kim, *Nat. Biotech.* **22**, 93 (2004).



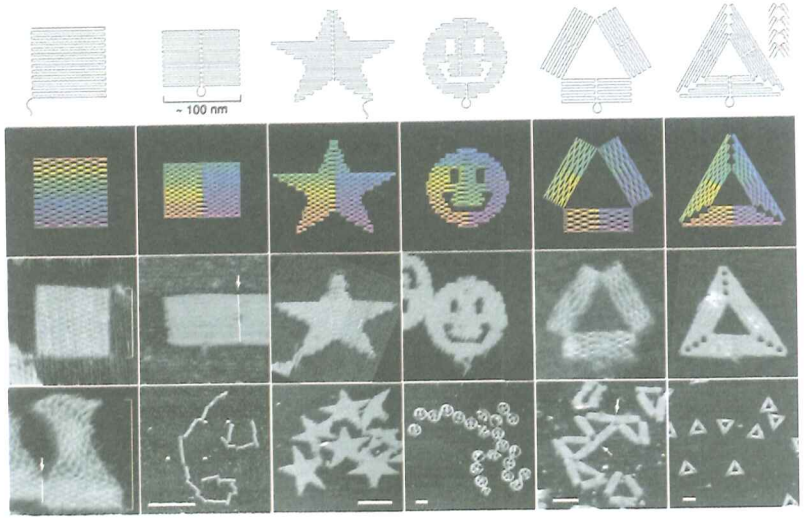
DNA molekülleri katlanıp geometrik şekillere kolayca sokulabilmektedir.

lerden geçip tümörlü hücrelere yapışmış nanoparçacıklar tarafından soğruluyor ve altının elektronlarını titreşime geçiriyor. Böylece 50°C'a ısınan altın, hasta hücrelerin pişip ölmelerini sağlıyor.⁸

DNA kalıtım maddemiz. Çifte helezonun her parçası birbirine yapışmış baz serisinden oluşuyor. Bazların sırası, hangi parçaların birbirlerini çekeceğini saptıyor. DNA'larla yapılan şekiller son yıllarda araştırma konusu oldu. Özel yerlerinden katlanan DNA zincirleri kolayca nanooktahedron şekline sokulabiliyor.⁹ Başka bir çalışmada ilk önce bir ka-

⁸ H. H. Richardson et al., *Nano Lett.* 6, 783 (2006).

⁹ W. M. Shih et al., *Nature* 427, 618 (2004).



Rothemund, uygun şablonlar kullanıp DNA moleküllerini istediği şekillere getirebilmektedir.

İp yapılıyor. Kalıbın içine boyları tam tamına kesilmiş, çift sayıda DNA parçaları konuyor. Bunların üzerlerine yerleştirilen upuzun bir DNA alttakilerine bağlanıp istenilen şekle giriyor; resimde görüldüğü gibi kare, dikdörtgen, yıldız şeklinde olabiliyorlar.¹⁰

Bu akıllı ilaçlar mikrometreden nanometreye kadar değişik boylara sahip. Onları vücut sıvısı içinde yönlendirip istenilen yere yollamak kolay değil; sıvı ortamda nanoparçacıkların hareketleri alışılmıştan çok daha değişik oluyor. Bu durum tüm mikroskobik organizma için de geçerlidir.

¹⁰ P. W. K. Rothemund, *Nature* **440**, 297 (2006).

Bildiğimiz yüzme hareketinde, vücudun periyodik oynamasıyla ileri yönde bir momentum kazanırız. Bu periyodik hareketin ilk yarısında kazandığımız ileri doğru hareket, eylemsizlikten dolayı ikinci yarıda bizi geri götürmez, kaybolur. Eylemsizlik olmasa idi, hareket bizi birinci periyotta ileri, ikinci periyotta da aynı miktarda geri götürürdü. Akışkanlarla uğraşan Osborne Reynolds'un sayısı R , eylemsizlik kuvvetinin lüzuci kuvvetlere olan oranıdır. **Lüzuci** deyimini ağdalı, yapışkan anlamını taşır. Akışkanlığın tersi, Türkçede kıvamlılık veya yabancı deyim ile viskos diyelim. Zaten viskos bal demek. Evet, ballılık durumu tam anlatıyor. Yüzen cisimler küçüldükçe eylemsizlik önem kaybeder, lüzuci kuvvetler artar ve Reynolds sayısı ufalır. Yüzme işlemi ve genelde yaşam, düşük Reynolds sayılarında çok değişiktir; parçacığı ileri götüren hareket '*time-reversal*' simetrisini bozan '*nonreciprocal*' bir hareket olmalıdır.¹¹ Ölçeklersek, insanın 1cm/dakika hızla bal içinde kulaç atmasına denk gelir.¹² Mikroskobik bir biyolojik madde, doğal hızı $v = 1\mu\text{m/s}$ ile yol alırken R on binde bir olur. Bu parçacıkların makroskobik dünya ile uyum sağlayabilmeleri için hızlarını artırmaları gerekir. Hızı 1mm/s yapabilmek için bir milyon kez daha çok enerji gerekir.¹³ Görüldüğü gibi, nanometrik dünyada eylemsizlik önemini yitiriyor, lüzuci olaylar önem kazanıyor, ilerlemek için özel me-

¹¹ E. M. Purcell, *Am. J. Phys* **45**, 3 (1977).

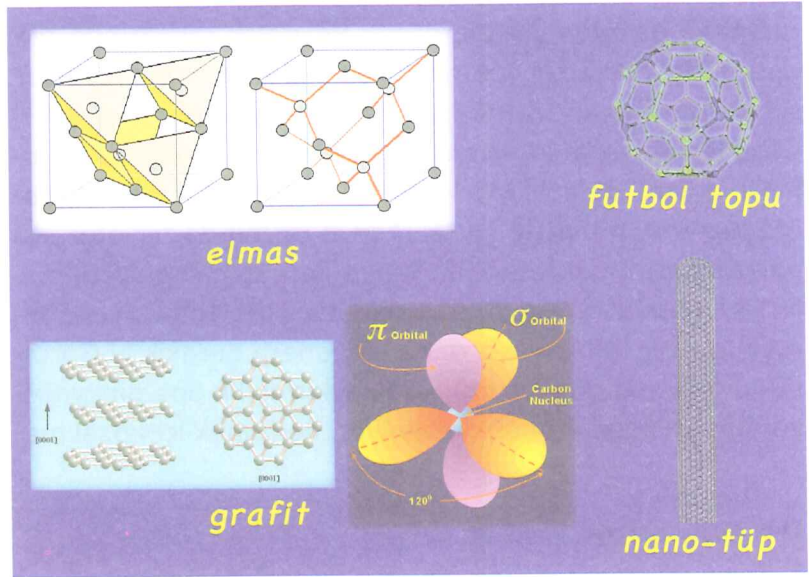
¹² Pushmepullyou ve microbot: <http://physics.technion.ac.il/~avron> ve A. Najafi ve R. Golestanian, *Phys. Rev. E* **69**, 62901 (2004).

¹³ S. Childress, *Mechanics of Swimming and Flying*, CUP, 1981.

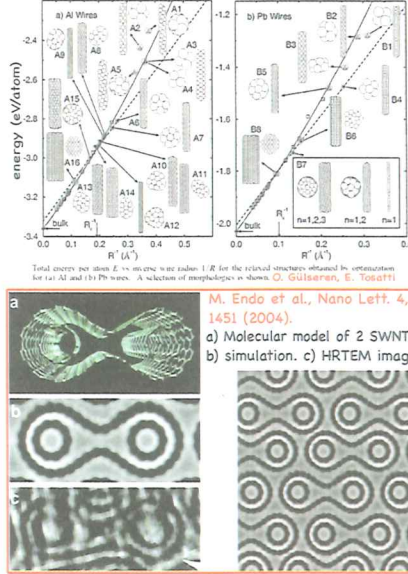
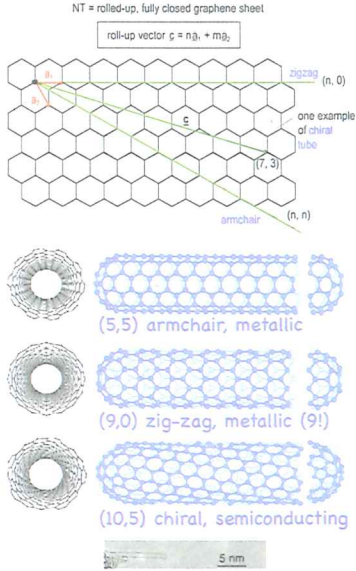
kanizmalar gerekiyor.

Bunun çok güzel bir örneği spermiler. Dün akşam Diyarbakır'da bir hekim arkadaş anlattı, mikron uzunluğundaki spermin hızı saniyede 2 mm imiş. "60 saniyede yaklaşık 12 cm yol alması gerekir," dedi. Demek ki spermilerin ölme nedenlerinden bir tanesi de bütün enerjilerini o 60 saniyelik yolculuk sonunda tümüyle yitirmeleri. Bu konuya da **nanokinetik** diyebiliriz istersek.

Nanokinetiğin yanında bir de **nanostatik** var. Bu konuda sayabileceğim karbon atomlarının değişik şekillerde bir-



Karbon atomlarının değişik yapılanmaları ile çok farklı özellikler gösteren maddeler ortaya çıkmaktadır.



Karbon nanotüpler, çapları çok küçük, boyları çok uzun borucuklardır. Bal peteği şeklinde sıralanmış atom tabakalarının kıvrılmış hali olarak düşünülebilirler; kıvrılma açısına göre iletken veya yarıiletken olabilirler.

leştirilmesi yoluyla ortaya çıkan elmas, grafit, fulleren ve nanotüpler gibi şekiller var.¹⁴

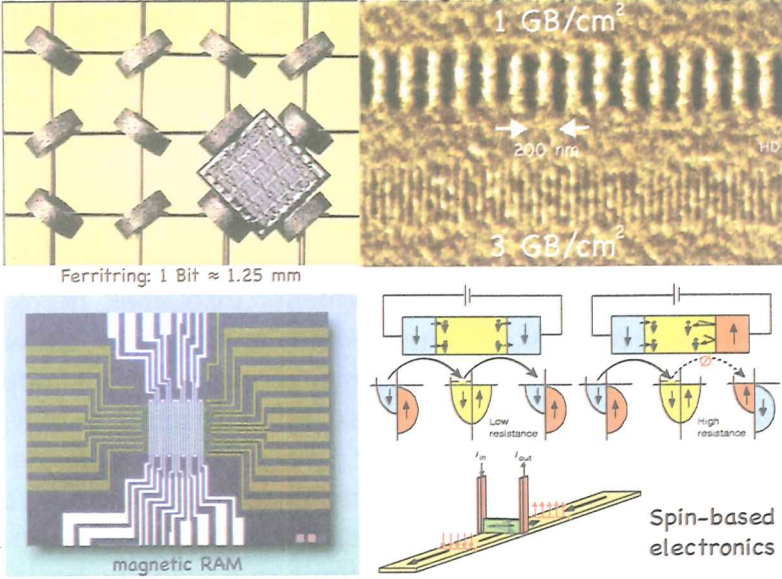
Son yıllarda grafin ile yapılan çalışmalar da yoğunlaştı. Bal peteği gibi altılı simetride yerleşmiş ve tek bir tabaka meydana getiren karbon atomlarına 'grafin' adı veriliyor. Grafin tabakasını yuvarlayıp, ince bir boru şekline soktuğumuz zaman **nanotüp** ortaya çıkmış oluyor. Nanotüpler

¹⁴ <http://www.science.org.au/nova/024/024key.htm>

10cm çapında ve 100m uzunluğunda bir bayrak direğinin oranlarına sahip. Mukavemeti çok yüksek birer yapı elemanını oluşturuyorlar. Bu konuda teorik çalışan Gülay Dereli ve Oğuz Gülseren aklıma geliyor. Nanotüpler asıl elektronikte ilginç özellikler gösteriyorlar; grafinden tüp oluşurken karbon atomlarının kaydırıldıkları yönün verevliğine bağlı olarak, ya metalik veya yarıiletken özellikler ortaya çıkıyor. Hatta değişik iki tüpün birleşmesiyle intermoleküler diyot yapmak da olası. Karbon nanotüpler FET olarak kullanılabilirler, oda sıcaklığında tek-elektron transistörü özelliklerini gösteriyorlar.¹⁵ Ayrıca, karbon nanotüpten yapılan bir uca uygulanan potansiyel, yüksek elektrik alanları oluşturduğu için nanotüp çok verimli bir elektron kaynağı görevini de yerine getirmektedir. Bu özellik bugün gösterge ve ekranlarda başarı ile kullanılmaktadır.

Gordon Moore'un 1965 yılında yaptığı bir saptama var: gelişen imalat teknolojisi bugüne kadar birim alan başına yer alan FET sayısını her 18 ayda iki misline çıkarmış. **Moore yasası** diye anılan bu saptama bir doğa kuralı gibi geçerliliğini korumakta. Benzer bir aygıt olan '*complementary metal oxide semiconductor*' - CMOS'lara dayalı teknoloji de bu kapsama giriyor. Böylece bilgiişlem hızı devamlı artmaktayken, saklanması gereken bilgi miktarının çoğalması da doğal bir sonuç oluyor.

¹⁵ J. B. Cui et al., *Nano Lett.* **2**, 117 (2002).



Birim hacime sığabilen bilgi miktarı her yıl iki kat artmakta, belleklerde kullanılan bilgi depolama yöntemleri de gelişmektedir. Spintroniks dalında, bilginin elektron yükleri yerine spinleri olarak saklanması yolları geliştirilir.

Her ne kadar CMOS teknolojisindeki küçülme baş döndürücü bir hızla gelişmekteyse de, manyetik belleklerin gelişmeleri daha da hızlı olmaktadır. Son 10 yılda manyetik belleklerde saklanabilen bilgi yoğunluğu 12 ay gibi kısa bir sürede iki misline çıkmıştır. Bugün bu yoğunluk cm karede 6Gbit'i aştı. CMOS teknolojisinde olduğu gibi, manyetik küçülme de artık fiziğin temel sınırlarını zorlamaktadır. '*Spin-based electronics*' veya kısaca '*spintronics*', bilgiyi elektrik yükü şeklinde değil, 'spin' olarak saklamaya dayanıyor. Bu konuda çalışan Gebze'de Bekir Aktaş var. Elektrik alanıyla çalışan gereçlerde pil bittiği zaman, sak-

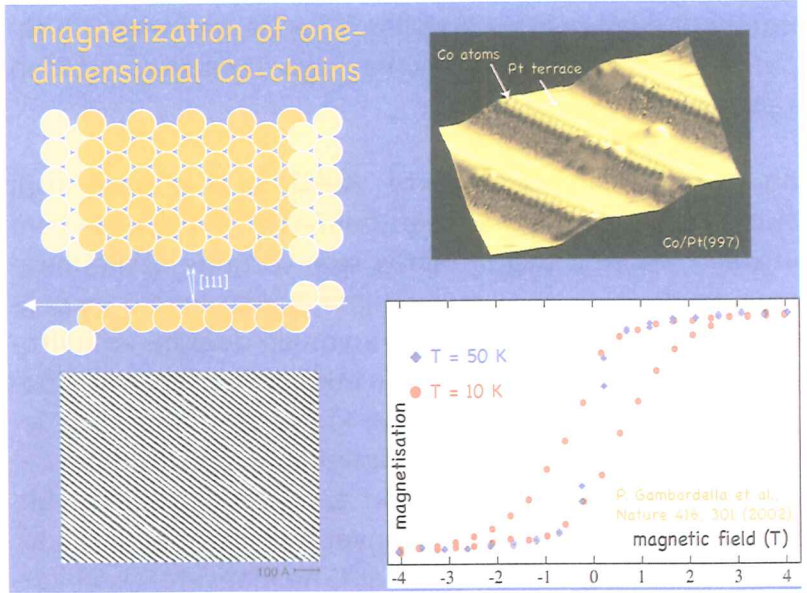
lanmış alanla beraber bilgi de yok oluyor. Halbuki spinler yardımıyla bilgiyi saklarsak, bütün ferromanyetik maddelerde olduğu gibi, dışarıdan uygulanan manyetik alan ortadan kalksa bile madde manyetizasyonunu kaybetmiyor, pil bitse bile bilgi kalıyor. Buna 'uçmayan bilgi' diyebiliriz.

Küçülmenin doğal bir sınırı olup olmadığını anlamak için **manyetik bilgi** depolamanın temelini incelemek gerek. Hard disk üzerindeki ferromanyetik alanlarda bilgi, birler ve sıfırlar olarak birbirlerine zıt manyetizasyonlar şeklinde saklanır; bu durum o bölgelerdeki elektron spinlerinin aynı yöne bakmalarıyla gerçekleşir. Spin yönlerinin değişmeden aynı şekilde kalabilmeleri ise 'anizotropi enerjisi K 'ya bağlıdır. Bu enerji, manyetizasyon yönünün bir anda kendi kendine değişmesini önler; değeri ise o bölgenin hacmi ile doğru orantılıdır. Bölgeler (domenler) küçüldükçe, anizotropi enerjisi de küçülür ve sonunda ısısal dalgalanmalar tesadüfî olarak manyetizasyon yönünü değiştirebilirler. Böylece domenler süperparamanyetik hale gelir, tüm manyetik bilgi kaybolur. Sayısal bir örneğe bakalım: Tek bir domende manyetizasyonun sıcaklığın neden olduğu dalgalanmalardan dolayı yön değiştirme süreci Arrhenius yasasına uyar: $t = t_0 \exp(nk/k_B T)$. k_B Boltzmann sabiti k 'dır, n de domen içindeki atom sayısını gösterir. Kobaltın anizotropi enerjisi atom başına 40meV kadardır. t 'yi yaklaşık 10 yıl kadar seçersek, n için 100 000 buluruz. Bugünkü hard disklerde bir tek manyetik bit için yaklaşık 1000 kez daha büyük domenler kullanılmaktadır. Başka bir deyimle, yakın bir zamanda olmasa da önümüzdeki 10 yılda na-

noteknolojinin gelişme koşullarını yerine getirmek için süpermanyetik sınırı zorlamamız veya tamamen ortadan kaldırmamız gerekecektir.

Bu, oda sıcaklığında olacaktır. Aşikâr strateji, anizotropi enerjisi yüksek yeni maddeler bulmaktır. Anizotropi hem kristalin yapısına uygun olarak spin-yörünge etkileşmesine, hem de yörüngesel manyetik moment olan m_L 'ye bağlıdır. m_L yerel atomik konfigürasyon ile değişip, anizotropinin manyetokristal bileşkesini etkiler. Alışılarmış 3 boyutlu maddelerde, elektrostatik kristal alan m_L 'nin değerini düşürür. Alçak boyutlu nanometrik maddelerde ise, elektron dalga fonksiyonlarının azalan simetrisi çok yüksek anizotropik yörüngesel manyetik momentler yaratabilirler. Bunlar da, anizotropi enerjisine manyetokristal katkısını çok artırabilirler. Komşu sayısı azalmış atomlardan oluşan küçük boyutlu yapılarda bu durum özellikle kuvvetlidir. Gözlenen m_L değerleri serbest atomlarınkine yaklaşır. imalatı zor, 5-10 atomluk, hatta tek atomlu alçak boyutlu yapılarda böyle bir durum beklenir.

Platin yüzeyi üzerinde büyütölmüş iki boyutlu kobalt öbeklerinin boyutları küçöldükçe, yörüngesel moment m_L ve manyetik anizotropi enerjisi K belirgin bir şekilde büyöür. 10-15 atomluk öbeğin $m_L = 0,3$ Bohr magneton olan değeri, 4'lü öbeklerde 0,5'e, 3'lölerde 0,8'e yükselir. Tek atomunki 1,1 olup kristaldeki değerden 7 kat yüksektir. K da aynı şekilde tek atom için 9,3meV gibi yüksek değerde-dir; bu değeri hexagonal kobaltınkinden 100 kez daha bü-



Yüzey fiziği tekniklerinden yararlanılarak 2 boyutlu kobalt atom zincirleri meydana getirilmiş, bu şekildeki kobaltın bir mıknatıs çubuğu gibi davrandığı gözlenmiştir.

yüktür. Fiziksel boyutlara dayanan bu değerlerin değişmesi, nanoyapılarda kobalt atomunun komşu sayısının azalmasına bağlıdır. Böylece, komşu atomların yarattığı elektrik alan ve ortaya çıkan kristal alanın etkilediği d-elektronlarının hibridizasyonları azalınca, m_L ve K değerleri yükselirler.¹⁶

Yüzeylerde nanometre büyüklüğündeki yapıları oluşturun-

¹⁶ P. Gambardella et al., *Nature* 416, 301 (2002).

mak için kendi kendilerine oluşma yöntemleri kullanılmaktadır. Temiz bir yüzeye yollanan bir atom, örneğin platin yüzeyine gelen kobalt atomu, eğer yeterince yüksek ısısal enerjiye sahipse hareket halinde olur, yüzeyde dolaşır ve yerleşmek için kendine en uygun potansiyel enerjiyi sağlayan yeri seçer. Bu nedenle bir terasın düz yüzeyinde kalmaz, basamak kenarlarını yeğler. Belirli bir sıcaklığın üstünde bu büyüme şekli çok kuvvetli olup, kobalt atomlarının tümünün basamak kenarlarında toplanmalarını sağlar; böylece bu yerlerde düzenli kobalt atom zincirleri oluşur. Zincirdeki atomlar tek boyutlu, birbirlerine koşut sıralanmış nanotelleri oluştururlar. Basamak aralığı platin yüzeyi hazırlanırken seçilerek tellerin mesafeleleri önceden belirlenir.

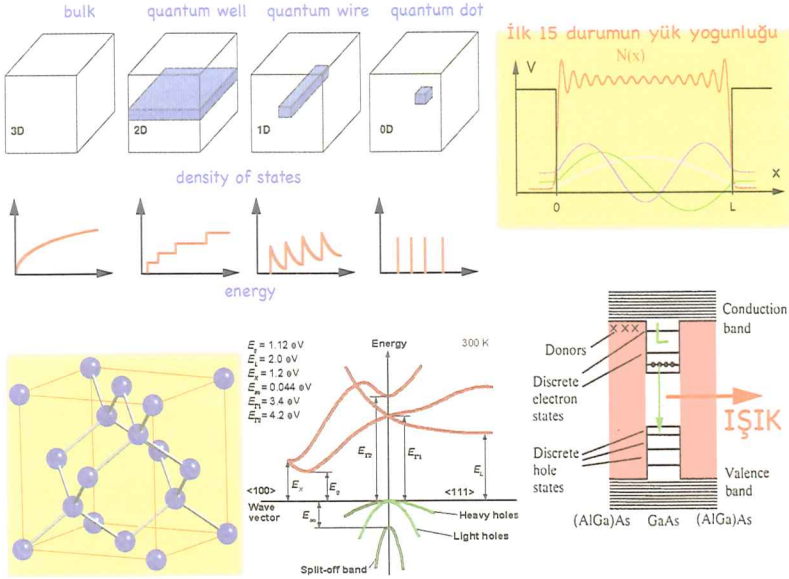
İki boyutlu kobalt tabakalarının düşük sıcaklıklarda süperparamanyetik olmalarına karşın, tek atomlu ve yaklaşık 80 atomluk kobalt zincirleri ferromanyetik histerez gösterirler. Anizotropi yaklaşık atom başına 2,1 meV değerindedir. Bu yapıyı dünyada bilinen en küçük, atom uzunluğundaki mıknatıs çubuğu olarak kabul edebiliriz. Böylece yaklaşık 100 atomdan oluşan bir bellek gerçekleştirilmiş olur.¹⁷

Yarıiletken maddelerin geliştirilmesi ve 1950'lerde transistörün keşfi, elektronik gereçlerde küçülmenin ilk adımı olarak kabul ediliyor. Tüp devrindeki büyük radyo, bilgisayar vs. tarihte kaldı. Her şey küçülüyor, hafifliyor ve hız-

¹⁷ J. V. Barth et al., *Nature* **437**, 671 (2005).

lanıyor. Böylece eskiden aklımıza gelmeyen aygıtlar gerçekleştirilebiliyor. Tüm elektronik devre elemanlarında ve devrelerde elektron yerine ışık kullanılabilseydi, 'bilgi alış-verişi' daha da çabuk ve ucuz olurdu. Aslında elektronların hızları düşük; üstelik hareketleri kabloların dirençlerinden dolayı enerji tüketmekte. Halbuki uzun zamandır kullanılan elyaf lar optik iletişimi daha verimli kılmaktadır. Bu gelişmenin temelinde yarıiletken lazerler yatmaktadır. Yıllardır bu lazerleri küçültmek, daha parlak ve verimli yapmak, değişik dalga boylarında ışık saçmalarını sağlamak için uğraşıyor. Boyların küçülmesiyle ortaya çıkan **kuantum dot lazeri** ise başarının temelinde yatıyor.

Yasak enerji aralığı, elektron dalgalarının kuantum özelliğinden doğar. Hareket eden elektronlar, periyodik dizilmiş iyonların etkisiyle enerji bantları içine sınırlı kalırlar. Bu bantlardaki elektronlar, **Bloch dalgası** denilen düz dalga ya benzer şekilde hareket ederler. iletim bandında hareketler serbest olup, enerji momentumun karesiyle değişir. Kristal yapının etkisiyle elektronik özelliklerde simetrikler oluşur ve ortaya çıkan özellikler yapıya bağımlı olarak değişirler. Yarıiletken '*light-emitting diode*' (LED), iletim bandındaki bir elektronun değerlik bandındaki bir boşluğa düşmesiyle ışık çıkarır. Yarıiletkenin yasak enerji aralığı çıkan ışığın foton enerjisini saptar. Örneğin GaInP'nin bant aralığı 1,9eV'dir; çıkan ışık kırmızı olur. Değişik renklerde LED yapmanın klasik yöntemi, bant aralığı hedeflenen renge eşdeğer olan yarıiletken alaşımların bulunmasından oluşur.



Elektronik durum yoğunluğunun maddenin boyutlarına göre değiştiği düşünülerek elektronlar dar bir enerji çukuruna sıkıştırılabilir, çukurun genişliği ile de ışık fotonlarının frekansları değiştirilebilir. Böylece değişik renklerde lazer etkisi yaratılabilir. 3 boyutlu kristalden çıkan ışığın rengi ise maddenin elektronik bant yapısına bağlıdır.

Yalın atomların elektronları kısıtlı hareket ederler; enerji düzeyleri de katı haldekine hiç benzemez. Tüm bantlar kuantizedir. Yarıiletken maddeler kullanarak yapay atomlar yaratılabilir. Bunun için boyutların atomunkı kadar küçülmesine gerek yoktur; 50-60 bin atomluk bir küre (10nm çapında) bu iş için yeterlidir. GaAs gibi bant aralığı dar bir maddeyi, AlGaAs gibi bant aralığı geniş iki yarıiletken arasına sıkıştırınca, aradığımız **kuantum dotu** ortaya çıkarmış oluruz. Çizgi halindeki enerji düzeyleri arasındaki enerji

farkları, kuantum dotun boyutları ile ters orantılıdır. Ancak boyutların 10nm'den daha küçük olması gerekir; yoksa oda sıcaklığında enerji düzeyleri birbirlerine ısı enerjisinden daha yakın olabilirler. İşte bu yapıların saçtığı ışık 3 boyutlu yarıiletkendeki gibi bant aralığına değil, yapay atomun enerji düzeyleri arasındaki farklara bağlıdır. Enerji düzeylerini de kuantum dotun boyutları ile değiştirebildiğimiz için çıkan ışığın rengini istediğimiz gibi seçebiliriz.

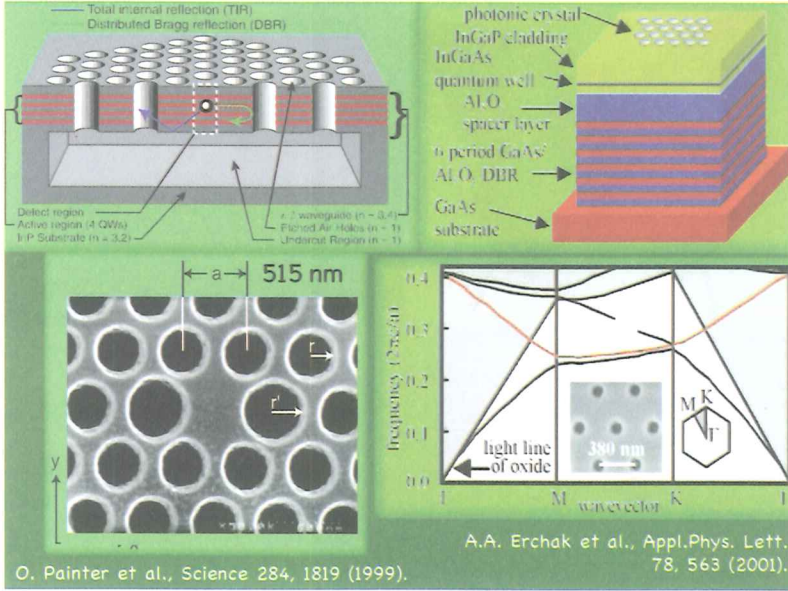
1970'lerde 'epitaxy' denilen molekülleri buharlaştırıp yüzeyde toplama yöntemi ile ilk kuantum dotlar yapıldı. AlGaAs'in kırılma katsayısı GaAs'inkinden daha düşük olduğu için, AlGaAs katmanları ışığın dağılmasına fırsat vermeden ona kılavuzluk ederler. Bu yıllarda epitaxy yöntemi ile dalga kılavuzları ve kuantum çukuru aygıtları geliştirilmeye başlandı. 1980'li yıllarda da lazer özellikleri üzerinde çalışıldı, kuantum telleri kullanılmaya başlandı. ilk **kuantum dot lazer** 1986'da Masahiro Asada tarafından Tokyo'da gerçekleştirildi. Lazerin çalışma koşulları: 1) *Population inversion*: uyarılmış durumdaki elektron sayıları, temel durumdakinden daha fazla ve 2) optik kazancın kayıplardan daha fazla olmaları gerek. Bu şekilde, 3) '*stimulated emission*', yani tetiklenmiş ışınım doğuyor. Böylece belirli enerjideki foton, aynı enerjide başka bir fotonun ışımasını sağlıyor. Bunu gerçekleştirmek için aynı boydaki kuantum noktalarını yoğun bir şekilde sıralamak, '*cavity*' oluşması için de iki başa birer ayna koymak gerek. Gerekli olan elektron-delik çiftleri, ışık veya elektriksel uyarı ile yaratılıyor.

Son elli yılda yarıiletken devre elemanları, elektron tüplerini tamamen işe yaramaz kılarak onların yerlerini aldılar. Böylece elektronik aygıtlar iyice küçülüp taşınabilir hale geldiler, güçlendiler ve hızlandılar. Parçaların küçülmesi ve hızlanması ile yeni olanaklar ortaya çıktı. Işık elektronlardan daha hızlı, üstelik bilgi depolama kapasitesi daha büyük. Acaba fotonlar elektronların yerine kullanılamaz mı? Optik devrelerle ışık hızıyla hesap yapılabilir mi? Elektronlarla gerçekleştirilen devrelere nasıl 'elektronik' deniliyorsa, fotonlarla yapılanlara da 'fotonik' adı veriliyor. Benzetme yanlış değil: elektronlar madde içinde kristal atomlarının periyodik potansiyeli etkisinde hareket ederler. Bir metal içinde hareket tamamen serbest iken, yarıiletkenlerde yasak bant aralığı ortaya çıkar; bu bant içinde elektronların hareketlerinden söz edilemez. **Fotonik kristal** ise aynı şekilde alçak ve yüksek kırılma katsayısı olan, düzenli sıralanmış maddelerden oluşur. Bu şekilde kırılma katsayısı periyodik olarak değişir. Yüksek katsayılı bölgelerin sıralanma aralığı eğer ışığın dalga boyunun yarısı ise, yansıyan ışık demetleri kırınım sonucu sönümlenir ve yok olurlar. Böylece fotonik kristalde bu dalga boyundaki ışık için yasak bir bant aralığı oluşur. Başka bir dalga boyu engelsiz yoluna devam ederken, bant aralığına denk gelen frekanstaki foton hareket edemez.

Yüksek kırılma katsayılı bir madde içine düzenli delikler delinerek elde edilen fotonik kristal mikrodalgalar için etkili olmuştur. 1987'lerde yapılan bu deneylerde deliklerin uzaklığı yaklaşık cm boyutlarındaydı. Bu dalga boylarında

çalışan fotonik kristal, Si ve SiO₂ maddelerinin periyodik sıralanmaları ile gerçekleştirilebilir. Bilgi iletişimi 1,3 ve 1,55µm'lik dalga boylarındaki ışıkla yapıldığı için, kullanılan fotonik kristallerin boyutları da o oranda küçük olmalıdır. Gelecek için büyük bir beklentimiz var: uygulayacak bir elektrik alanı fotonik maddenin optik özelliklerini değiştirebilse, kullanılan kristalin elektrik alanına göre geçirgenliği de değişir; fotonik kristalin ışığı tutmasını veya geçirmesini uyguladığımız elektrik alanı ile sağlayabiliriz. Bu şekilde, bir optik transistör gerçekleştirilmiş olur. Fotonik konusunda yakından tanıdığımız Ataç İmamoğlu var.

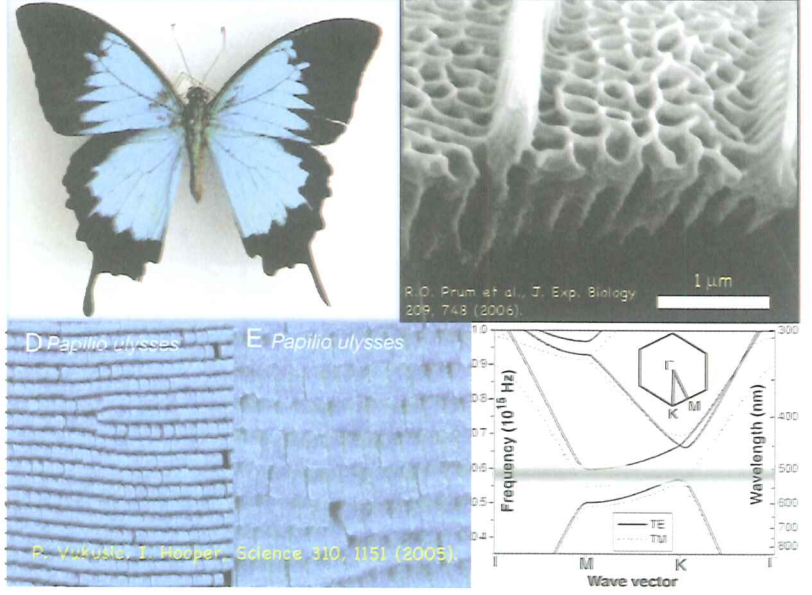
Sıkı tolerans gerektiren imalatla gerçekleştirilebilen iki değişik dalga kılavuzu nanofotonik'in konusuna giriyor: 1) Kuantum teli dalga kılavuzlarının çalışma ilkeleri kayıpsız iç yansımaya dayanır. Bu nedenle, kılavuz madde ve çevresinin kırılma katsayılarında büyük farklılıklar gerekir. Bu şekilde ışığa köşeyi bile döndürebiliriz ($n_{Si} = 3,45$; $n_{SiO_2} = 1,45$; $n_{hava} = 1$). Bunlar 300-500nm çapında uzun tellerden oluşuyorlar. Niteliklerini ise duvar alanındaki pürüzler sınırılıyor. 2) Fotonik kristaller. Yaklaşık dalga boyu periyodunda sıralanmış yüksek kırılma katsayılı parçacıklar fotonik bant aralığı yaratıyorlar; ışık bu dalga boyunda hareket edemiyor. iki boyutta altıgen bir örgüye sıralanmış boşluklar düşünelim. Deliklerden birini dolduralım. Buna '*defect cavity*' denebilir. Cavity'nin hacmi, yarı dalga boyunun kübünden daha azdır. Düzlemde hareket eden foton, deliklerden devamlı yansarak cavi-



InGaAs'ın yaydığı ışık, mercek kullanılmadan fotonik kristaller marifeti ile odaklanabilir.

ty bölgesine gelip tuzaklanacaktır. Düşey yöndeki hareketi, yarı dalga boyu kalınlıkta ve yüksek kırılma indisli madde kullanarak tam yansıma yoluyla sınırlarsak, cavity 3 boyutlu olur.¹⁸ Telekomünikasyon dalga boylarında kullanılan fotonik malzeme birkaç yüz nm büyüklüğünde, imalat duyarlılığı da nm boyutunda olmaktadır. Bu yapı bozukluğu bir nokta değil de bir çizgi halinde gerçekleşirse, ışık için bir dalga kılavuzu meydana gelmiş olur ve ışık istenilen yöne saptırılabilir.

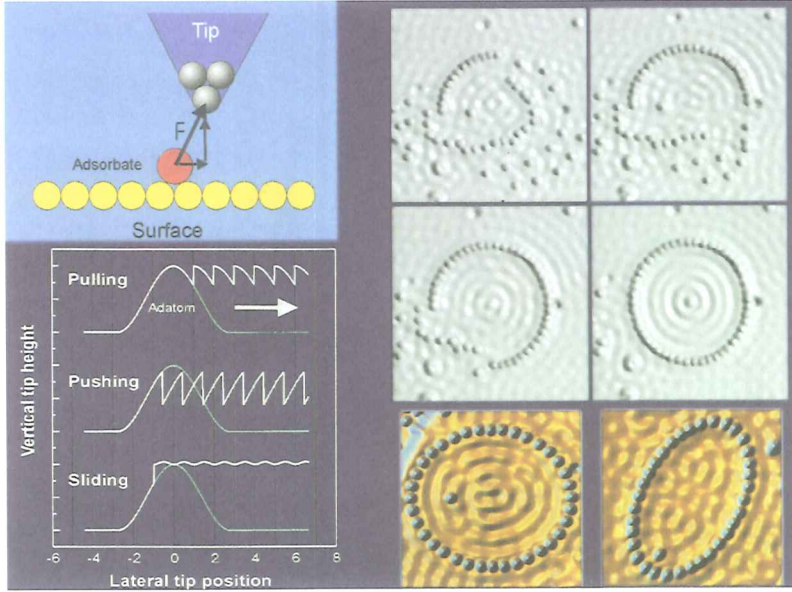
¹⁸ O. Painter et al., *Science* **284**, 1819 (1999).



Fotonik kristaller yoluyla biçimlenen ışığa doğada çok rastlanır. Afrika'da yaşayan bir kelebeğin kanat rengi bu duruma bir örnektir.

InGaAs maddesinden yapılmış bir LED'in tabanında, ışığı yansıtması için $\text{GaAs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ tabakalarından oluşan bir Bragg reflektörü yerleştirelim. Üst tarafında ise ışığı paralel bir demet halinde yaymak için bir mercek kullanılacağı yerde, çıkan ışığın dalga boyuna göre tasarlanmış fotonik bir kristal olsun.¹⁹ Bu yapı verimi yüksek modern bir LED'i oluşturur. Yakın zamanda edinilen bulgulara göre bu yapı tarzı birçok kelebeğin kanadında gözlenmekte, fotonik kristal güneş ışığını bir tek kanatta algıladığımız renkte

¹⁹ A. A. Erchak et al., *App. Phys. Lett.* 78, 563 (2001).



Sivri bir madde yardımı ile yüzey atomlarının yerleri değiştirilebilir. Demir atomlarının bir bakır yüzeyinde daire şeklinde sıralanması sonucu serbest elektronlar durağan dalgaya dönüşür.

yansıtmaktadır.²⁰ Son 20 yıldır teknolojinin en modern ürünlerinden biri olan fotonik maddelerin milyonlarca yıldır doğada bulunması ve bizim bunu ancak yeni kavramamız çok ilginç olduğu kadar düşündürücü de bir konudur.²¹

Nano parçacıkları oluşturmak için kullanılabilecek en temel 'imalat yöntemi' atomların teker teker istenilen ye-

²⁰ P. Vukusic ve I. Hooper, *Science* **310**, 1151 (2005).

²¹ R. O. Prum et al., *J. Exp. Biology* **209**, 748 (2006).

Maskede, ışığın dalga özelliğinden dolayı girişim olur ve duyarlılık azalır. Çözünürlülük, Rayleigh kriterine göre dalga boyunun mercek açıklığına olan oranına bağlıdır; artması için dalga boyunun küçülmesi ve mercek açıklığının büyümesi gerekir. Kullanılan ışık kaynaklarının dalga boyları, cıva buharı lambasında 436 ve 365nm, krypton fluoride eximer'da 248nm, Ar fluoride'da 193nm, fluorine eximer'da 157nm olarak bilinir. IBM şirketinin bu alandaki buluşu '*immersion*' optiğine dayanır; bu buluş, mercek ile Si örneğini suya batırıp, çözünürlülüğü 30nm'nin altına indiriyor (arı su $n = 1,47$). Bunun yanı sıra, merceklerin yapıldığı maddeler kısa dalga boylarını geçirmediği için, Schwarzschild optiği kullanarak yansıtan yüzeylerden oluşan yakınsak mercek tasarımları geliştirilmektedir.²⁴ Fotonik bant aralığına sahip kristallerde akıllı yöntemler kullanarak ve verimli olarak **kendi kendine düzenlenme** (*self-assembly, self-organization*) durumundan faydalanılabilir.²⁵ Aslında, düzenlenme doğada her boyutta gözlenmektedir,²⁶ **doğadaki düzenden** esinlenmemiz için etrafımızdaki süreçleri daha dikkatli incelememiz gerekir.

²⁴ <http://www.exitech.co.uk/Papers.asp>.

²⁵ Y. A. Vlasov et al., *Nature* **414**, 289 (2001); T. Flückiger et al., *Nano Lett.* **3**, 1717 (2003).

²⁶ G. M. Whitesides ve B. Gryzbowski, *Science* **295**, 2418 (2002).

PROF. DR. MEHMET ERBUDAK

Alman Lisesi'ni bitirdi (1964). Robert Kolej'de Elektrik Mühendisliği eğitiminin (1968) ardından Yale Üniversite-si'nde deneysel fizikçi olarak doktorasını yaptı (1972). Harvard ve MIT' de kısa süreyle çalıştı (1973). ODTÜ'de doçent (1979), ETH (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) ve Boğaziçi Üniversitesi'nde profesör (2005) olarak görev aldı.

Bir taraftan atomların yüzeylerde sıralanmalarını ölçüp, bu sıralanmalardaki simetrisi çözmeye çalışırken, diğer taraftan da yüzeylerin elektronik özelliklerini araştırmak ve bu şekilde makroskopik özelliklerle mikroskopik ayrıntılar arasında bir ilişki kurmak ilgi alanının odaklandığı uğraşılardandır. Yaklaşık on yıldır kuazikristallerin yapılarıyla da ilgilenmektedir. Bu yapıların ilginç yönleri, yapılarında bir öteleme olmaksızın atomlarının uzun erimli bir yönelme simetrisine uymalarıdır; birçoğu göze hoş gelen beşli veya onlu dönü simetrisine sahiptir. Bu gözlemler, alışlagelmiş kristalografi kavramlarına ters düştükleri için de birçok araştırmaya konu olmaktadır. Çalışmalarında kullandığı birçok yöntemi ve gerekli gereci kendisi geliştirmiştir.

Araştırma alanlarında ders vermekte, yüksek düzey öğrencilerinin yetişmelerine katkıda bulunmaktadır. Bu güne kadar yaklaşık 40 diploma, 25 doktora öğrencisi olmuştur.

Amatör olarak astronomi ile yelken ve basketbol sporu ile ilgilenmektedir. Evli olup, biri kız, diğeri oğlan iki çocuğı vardır.

AKADEMİ FORUMU DİZİSİ

- Talat Halman, *21. Yüzyılda Üniversite ve Kültür*, 3. baskı
- Halil Inalcık, *Tarih ve Akademi*, 3. baskı
- Kemal Kurdaş, *Türkiye Ekonomisindeki Çöküş ve Geleceğe Bir Bakış*
- Sema Tutar Pişkinsüt, *Türkiye’de İnsan Hakları ve Demokrasi*
- Karen Fogg, *Avrupa Birliği’nin Güncel Eğilimleri ve Türkiye*
- Bakır Çağlar, *İnsan Hakları Avrupa Sözleşmesi Hukukunda Türkiye*
- Attila Karaosmanoğlu, *Türkiye’de Yeniden Yapılanmayla İlgili Sorunlar*
- Stefanos Yerasimos, *Birinci Dünya Savaşı ve Ermeni Sorunu*, 2. baskı
- Gökhan S. Hotamışlıgil, *Yağ hücresi Gelişimi ve Enerji Metabolizmasının Moleküler Kontrol Mekanizmaları*
- Korkut Boratav, *Türk Ekonomisinin Son Durumu*
- M. Orhan Öztürk, *Sorma-Bilme Dürtüsü ve Girişim Duygusu Nasıl Yok Ediliyor?* 2. baskı
- Bozkurt Güvenç, *Osmanlı’dan Cumhuriyete Kültürümüzde Batı Etkileri*, 2. baskı
- Doğan Kuban, *Kırsal Kültürün Nesnellik Boyutları*
- Mehmet Özdoğan, *Güneydoğu Anadolu’nun Kültür Tarihindeki Yerine Farklı Bir Bakış*
- Ziya Aktaş, *Türkiye’de Bilgi Toplumuna Nasıl Erişiriz?* 2. baskı
- Stanford J. Shaw, *Bir Düşüncenin Gerçekleşmesi: Osmanlı Tarihi Çalışmalarım*
- M. Ali Alpar, *Uzay Ajansları*
- Nimet Özgüç, *Hatti Efsanesi Yılan Illuyanka’nın Tasvir Sanatında Yorumu*

- Ural Akbulut, *Tanzimattan Cumhuriyete Eğitim*
- Ünal Tekinalp, *Türk Hukukunun AB Hukukuna ve Avrupa Konvansiyonuna Uyumu Sorunu*, 2. baskı
- Erdal İnönü, *Bilimsel Devrim ve Stratejik Anlamı*, 2. baskı
- Ergun Özbudun, *2002 Seçimleri Işığında Türk Siyasetinde Eğilimler*
- Nusret Aras, *Üniversite Yasası Nasıl Olmalı?*
- Cihan Saçlıoğlu, *Felsefenin Kuantum Mekaniksel Temelleri*
- Ioanna Kuçuradi, *Felsefe ve İnsan Hakları*
- Türkan Saylan, *Yükseköğretim Öncesi Eğitimin Durumu ve Çözüm Önerileri*
- Kemal Kurdaş, *Türk Ekonomisindeki Çöküş ve Geleceğe Bir Bakış: İkinci Aşama 2001-2004*
- Ariel Rubinstein, *Vahşi Ormanda Denge*
- Fuat Sezgin, *İslam kültür Dünyasının Bilimler Tarihindeki Yeri*
- İlhan Tekeli, *Avrupa Birliği, Türkiye ve Demokrasi*
- Gürol Irzık, *Bilim Savaşları*
- İlber Ortaylı, *Filoloji ve Tarih*
- Bozkurt Güvenç, *Cumhuriyet Döneminde Eğitim*
- Hikmet Özdemir, *Arnold Tonybee'nin Ermeni Sorununa Bakışı*
- Hadi Özbal, *MÖ 3. Binyılda Anadolu'da Bronz*
- Türkkaya Ataöv, *'Aydın' Kime Demeli?*
- Osman Bahadır, *Erken Cumhuriyet ve Bilim*
- Kemal Derviş, *2000'li Yıllarda Türkiye'nin Büyüme Süreci ve Temel Sorunları*
- Ersin Arioğlu, *Toplumsal Değişimin Dinamikleri*
- Bülent Eczacıbaşı, *Türkiye'de Özel Sektör ve Kamu Yönetimi İlişkileri*
- Mehmet Öztürk, *Sağlıkta ve Tarımda GDO'lar: Biyoteknolojik İlaçlar, Transgenik Bitkiler*

- **Namık Kemal Pak**, *Türkiye-AB Bilim, Teknoloji ve Araştırma Politikaları*
- **Cem Behar**, *İstanbul'un Bir Mahallesinin Portresi:16.-19. Yüzyıllar*
- **Latif Mutlu**, *Yükseköğretime Giriş ve Üniversite Yönetimi*
- **Hasan Yazıcı**, *İlaç Çalışmalarına Eleştirel Bir Bakış*
- **Ali Ülger**, *Matematiğin Kısa Bir Tarihi*
- **Meral Serdaroğlu**, *Bilim Dervishi Feza Bey*

SATIN ALMAK İÇİN:

Ankara: Piyade Sokak No: 27, Çankaya 06650

Tel: 0 312 442 29 03 Fax: 0 312 442 23 58

İstanbul: İTÜ Maçka Kampüsü, Yabancı Diller Yüksek Okulu,

Eski Maden Fakültesi Binası, Maçka 34367

Tel ve fax: 0212 219 16 60

