

AYLIK POPÜLER BİLİM DERGİSİ

# BİLİM ve TEKNİK



# YENİ UFUKLAR

# BİLGİSAYAR

EYLÜL 2002 SAYISININ ÜCRETSİZ EKİDİR

HAZIRLAYAN : AYŞENUR TOPÇUOĞLU  
Bilim ve Teknik Dergisi Araştırma Grubu

# SİLİKON NEYİM



Bilgisayar dünyasında uzun süreden bu yana, Moore Yasası'nın geçerliliğini kaybedeceği konusu gündemde. Bilgisayar işlemcisi sektöründeki en önemli isimlerden biri olan Intel'in kurucularından Gordon Moore, 1965 yılında, bir bilgisayar çipinin üzerine yerleştirilen transistör sayısının her 18 ayda bir iki katına çıkması gerektiğini öngörmüştü. Bugüne kadarsa bu gelişme gerçekten gözlemlendi. Pentium'un son geliştirdiği bilgisayar çipinin üzerinde 55 milyon transistör var. Ancak problem şu ki, bir çip üzerine daha fazla transistör yerleştirmek, devreler arasında çok daha küçük boşluklar olması anlamına geliyor. Moore Yasası'nın geçerliliğini koruyabilmesi için, bilimadamlarının bir an önce bu boşlukları 150 nanometre'ye (nm) indirmesi gerekiyor. Halen kullanılan Pentium 4'lerde bu boşlukların boyutu 180 nm. 2005 yılındaysa boşlukların 100 nm. bariyerini aşması gerekiyor. Ancak bu bariyerin aşılabilmesi, şu anda çözümleri bilinmeyen bazı temel soruların yanıt-

lanmasını gerektiriyor. Bu çözümler bir an önce bulunmazsa, 1965 yılından bu yana geçerliliğini koruyan Moore Yasası ciddi bir tehlike içine girecek.

Silikon tabanlı mikroelektronik bilgisayarlar, ilk ortaya çıktıklarında bir devrim yaratmışlardı. Daha sonra gelişen entegre devreler gibi bir çok teknolojiye, bu devrimin ilerlemesine ivme kazandırdı. Ancak bu teknolojilerin eninde sonunda fiziksel limitlerine ulaşacakları, apaçık ortada. Örneğin voltaj elektrodlarını akım taşıyan elektronlardan ayıran gate-oxide(SiO<sub>2</sub>)'nin, maksimum 10 yıl içinde en üst fiziksel limitine ulaşacağı söyleniyor. Silikonun sahip olduğu elektrik yükünü koruyabilmesi içinse, çiplerin boyutları küçüldükçe silikonun içine giren yabancı maddelerin artması gerekiyor. Ancak şöyle bir sorun var ki, belli bir sınırın altında, bu "kir"ler elektriksel bakımdan pasif bölgeler oluşturacak şekilde birbirleriyle çakışıyorlar. Bugünlerde bu sınıra yaklaş-tığımıza inanılıyor. Bu durumda elekt-

ronların "tünelleme" gibi bazı kuantum etkilerine eğilimli olması durumu doğuyor. Kuantum fizikçiler yaklaşık 80 yıldan bu yana, elektronların oldukça küçük engellerden geçebildiklerini biliyorlar. Bugün, elektronların bir çip boyunca akışını kontrol eden bu kapılar 2nm'den daha küçük hale gelmiş durumda. Yani silikon çiplerin üzerine devreler yapılandırılabilirliği, neredeyse sınırlarını aşmak üzere. Tüm bu sorunların tartışılması için düzenlenen bilgisayar mühendisliği alanındaki son konferanslardan birinde, Moore Yasası'nın 2006 yılından itibaren işlemez hale geleceği net olarak ortaya kondu. Ayrıca bu problemlere silikonun sınırları içinde bir çözüm bulunabilecek olsa bile, ortaya çıkacak maliyetlerin satışları engelleyecek kadar yüksek olduğu sonucuna varıldı. 1995 yılında formüle edilen 2. Moore Yasası'na göre bilgisayar sektöründe sermaye için gereken maliyetler, kâr için olandan çok daha hızlı artıyor.

Tüm bunlar sizin için bir anlam ifa-



# İZE YETMİYOR?



de etmiyor olabilir. Kendi kendinize "Benim bilgisayarımın çipinin üzerindeki transistör sayısı bana yetiyor da artıyor. Moore Yasası'ndan bana ne!" diyor olabilirsiniz. Gerçekten de sizin, bizim gibi kullanıcıların aslında her 18 ayda bir iki katına çıkacak bir güce gereksinimi yok. Ancak, Moore Yasası'nın doğal sonuçlarını göz ardı etmemek gerek. Geçen yıl 2000 dolara satılan bir bilgisayarı, bu yıl 1000 dolara satın alabiliyor olmamız da, Moore Yasası'nın geçerliliğini korumasının bir sonucu. Bir başka deyişle Moore Yasası, bilgisayar endüstrisinin dinamikliğini ve akışkanlığını korumasını sağlıyor. Bu da demek oluyor ki, Moore Yasası çöktüğü an, bilgisayar endüstrisi yalnızca teknolojik bakımdan değil, ekonomik olarak da işlemez hale gelecek.

Ayrıca tıp, biyoloji, kozmoloji, ileri fizik ve meteoroloji gibi bazı özel alanlar var ki, bilgisayarların performansının ikiye katlanması bunlar için yaşamsal önem taşıyor. Örneğin kanser ya da AIDS için bulunacak tedavi

yöntemleri, doğal afetlerin önceden doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi ya da dünya dışında başka bir gezegende yaşam olup olmadığının anlaşılabilmesi gibi konular, Moore Yasası'nın sürekliliğine bağlı.

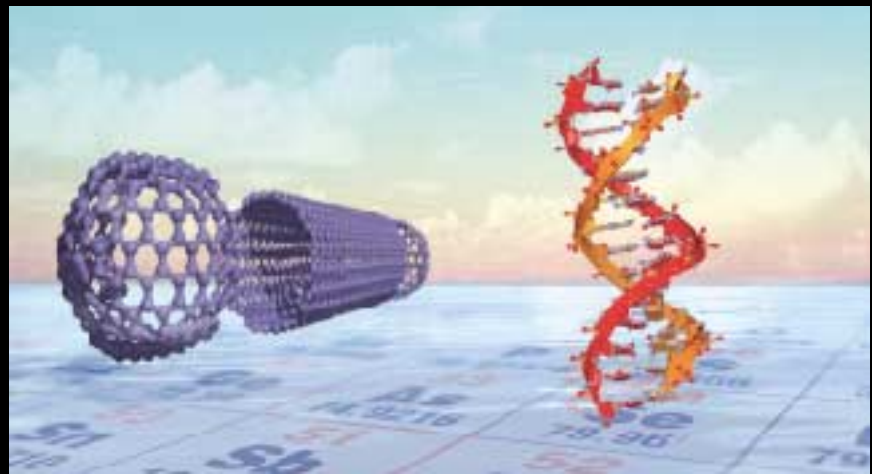
Bir silikon çipinin üzerine yapıştırılmış milyonlarca transistör, bir bilgisayarın kalbini oluşturuyor. Bu çipleri moleküler düzeydeki kentlere, üzerlerindeki transistörleri de bu kentlerdeki konutlara benzetebiliriz. Nasıl ki bir kentteki konutların sayısı artıp gitgide birbirlerine yaklaştıkça olaya farklı mimarların ve planlamacıların el atması gerekirse, kapasitelerinin sınırlarını zorlayan silikon çipler nedeniyle zor durumda kalan bilgisayarlar da kendilerine uzanacak yeni bir ele muhtaç. Beklenen yardımsa, geleneksel yöntemlere alternatif arayışı içinde olan araştırmalardan geliyor.

1990 yılından bu yana bilgisayar bilimciler, fizikçiler, biyomühendisler ve kimyacılar, geleceğin işlemcileri ve bellek çipleri için alternatif malzemelerin arayışında. Bu konuda bugüne değin yapılan çalışmalarda üç ana kategori öne çıkıyor: DNA Bilgisayarlar, Kuantum Bilgisayarlar ve Nanotüp Bilgisayarlar. DNA bilgisayarlar alanında yapılan çalışmaların temeli, genetik materyalimiz DNA molekülünün zincirlerini kullanarak hesaplama işlemlerini gerçekleştirmeye dayanıyor. Kuantum bilgisayarlar, bildiğimiz fizik kurallarına göre çalışan elektronik devreleri saha dışına ata-

rak, oyuna kuantum mekaniğinin kurallarına göre oynayacak yeni oyuncular sokma peşinde. Karbon nanotüplerse, mükemmel moleküler yapıları sayesinde, hesaplama işlemlerinin geleceği için umut vaat ediyor.

Bu araştırmaların çoğu, hâlâ emekleme döneminde. Ancak birçok ilginç kuramı fiziksel olarak olanaklı hale getiren örnekler de, azımsanacak gibi değil. Bu olumlu çalışmaların başarısından güç alanlar, 2050 yılında bilgisayarlarımızın saniyede 500 trilyon baytın ötesinde bir işlem kapasitesine erişmiş olacağı görüşünde. Bu da Ray Kurzweil'in öne sürdüğü gibi, bilgisayarların bizden daha zeki olması anlamına geliyor. Neyse ki, bilgisayarların kapasitelerinin ve hızlarının artmasının, insan beynindeki kapasiteyi de artıracığı yolunda görüşler de var. Geleceğin bilgisayarları masamızda durmaya başladığında, bugünün bilgisayarları için sıradan kabul edilen özellikleri de insanlar devralabilir. Biyolojik olmayan yollarla bellek kapasitemizi bir kaç katına çıkarabiliriz, hatta öğrenmek zorunda kalmadan bilgisayardaki bilgileri doğrudan beynimize yükleyebiliriz.

Sayfaları çevirmeden önce, biraz sakinleşip arkanıza yaslanmanızda fayda var. Bilgisayar alanındaki yeni ufuklar, geleceğin bilgisayarlarının hesaplama yapmak için kullanacakları yöntemler, kapasiteleri ve bunların doğuracağı sonuçlarla ilgili öğrenecekleriniz, başınızı döndürebilir.



# GELECEĞİN HIZLI BİLGİSAYARLARI, GEN DNA BİLGİ

Bazılarına göre, artık bilgisayarlarla ilgili son haberler, İntel'in piyasaya sürdüğü yeni işlemciler ve silikon çiplerle ilgili duyduklarımızı unutmamanın zamanı geldi. Çünkü onlar, bilişim alanında geleceğin en büyük umudunun, genetik bilgilerimizi saklayan DNA molekülünde gizli olduğu düşüncesinde. Bilimadamları, bildiğimiz silikon tabanlı bilgisayarların ulaşabileceği hızın bir üst sınırı olduğu keşfedileli beri, hesaplama problemlerini çözebilecekleri alternatif ortamların arayışı içindeler. Bu arayışın onları yönelttiği durakların en önemlilerinden biriyse, DNA bilgisayarlar.

Bir DNA bilgisayar, en basit anlamıyla, birleşimleri belli bir problemin çözümünü verecek şekilde özel olarak biraraya getirilmiş DNA dizileri topluluğu. En büyük vadediyse, çok ileri düzeyde paralel işlem yapabilme kapasitesi. DNA, canlılarda genetik materyal olmasını sağlayan pek çok özelliği sayesinde, matematiksel sistemlerdeki bilginin şifrelenmesi için de uygun bir ortam. Bildiğimiz bilgisayarlarda bilgiler nasıl 1 ve 0'larla şifreleniyorsa, bir DNA dizisi de genetik bilgiyi A (Adenin), T (Timin), C (Sitozin) ve G (Guanin) harfleriyle gösterilen ve aynı zamanda nükleotit olarak bilinen 4 farklı bazla şifreliyor.

## DNA'nın Matematiği Pekiyi!

Biyoloji ve matematiğin birbirine hiç benzemediğini mi düşünüyorsunuz? Ne yazık ki, size çok yanıltığınızı söylemek zorundayız. Çünkü biyolojik ve matematiksel işlemler, çok önemli ortak özelliklere sahip. Bir canlının sahip olduğu son

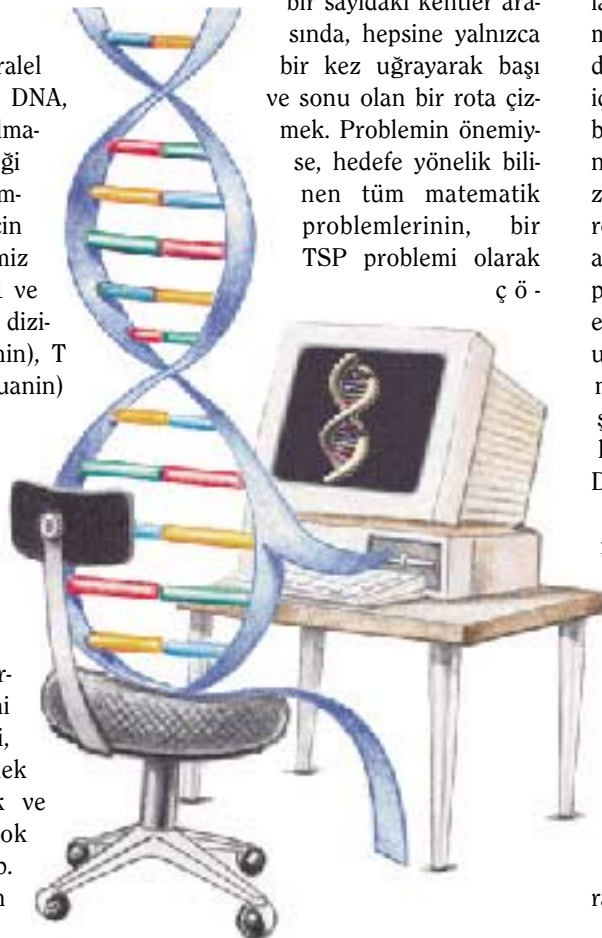
derece karmaşık yapı, DNA dizilerinde şifrelenmiş genetik bilginin üzerine uygulanan basit işlemlerin sonucunda oluşuyor. Tüm karmaşık matematik problemleri de, aslında benzer basit işlemlerin birleşimi. DNA bilgisayarlarının öyküsü de 1994'de Leonard M. Adleman'ın bu benzerliği kullanarak, aslında pek de önemli olmayan bir hesaplama problemini, DNA'yı kullanarak çözmeyi denemesiyle başlıyor. Bir insanın birkaç dakikada ya da basit bir masaüstü bilgisayarı göz açıp kapayıncaya kadar geçecek sürede çözebileceği bu problemi DNA kullanarak çözmek, Adleman'ın tam 7 gününü almış. Çözdüğü problem, Gezgin Satıcı Problemi (Travelling Salesman Problem-TSP). Problemin amacı, herhangi

bir sayıdaki kentler arasında, hepsine yalnızca bir kez uğrayarak başı ve sonu olan bir rota çizmek. Problemin önemi ise, hedefe yönelik bilinen tüm matematik problemlerinin, bir TSP problemi olarak çö-

zülünebilecek olması. Şehir sayısı arttıkça, çözüm de karmaşıklaşıyor. Çok fazla kent sayısı içeren problemleri çözmek, bildiğimiz en gelişmiş süper bilgisayarlar için bile hâlâ oldukça zor.

Adleman'ın DNA'yı kullanarak bu problemi çözmek için kullandığı temel düşünce, veriyi DNA moleküllerinin içine saklayıp, daha sonra bunları laboratuvar teknikleriyle düzenleyerek üzerine belli işlemler uygulamaktır. Öncelikle 7 adet DNA zinciri seçerek, bunların herbirini bir şehri temsil etmek için kullandı. Gelişigüzel seçilen zincirlerin tümü, 20 baz uzunluğundaydı. Şehirlerin arasındaki yollar içinse, yarısı bu 20 bazdan 10'unun, diğer yarısıysa diğer 10'unun tamamlayıcısı bazlardan oluşan 20 bazlık tamamlayıcı diziler kullandı. Adleman daha sonra tüm bu DNA zincirlerini, içinde su, DNA ligaz ve tuzdan oluşan bir çözeltinin bulunduğu bir test tüpünün içine koydu. Tüpün içindeki DNA zincirleri kısa süre içinde, olası tüm rotaları verecek şekilde birleştiler. Bu aşamadan sonra Adleman yalnızca problemin çözümü olacak rotayı elde etmek için, çeşitli kimyasal teknikler uyguladı. Bunun sonucunda test tüpünün içindeki fazla sıvıyı ve DNA'yı boşaltarak, 7 kentlik Gezgin Satıcı Problemi'nin çözümünü şifreleyen saf DNA'yı elde etti.

Adleman'ın sunumu yalnızca 7 şehri içeriyorsa da, kolay gibi görünen bu çözüm bir çok açıdan oldukça önemli. Öncelikle, bildik geleneksel hesaplama yöntemleriyle çözülmesi çok güç ya da imkansız olan bir grup problemin, DNA kullanılarak çözülmesinin olanaklarını ortaya koydu. Ayrıca Adleman DNA'yı bir veri yapısı olarak kullanarak bu yapının hesaplama işlemlerinde, oldukça paralel bir şekilde çalışabileceğini gös-





ETİK MATERYALİMİZDE GİZLİ

# İSAYARLAR



terdi. Laboratuvarında geçen 7 gün sonunda ulaştığı sonuçta, DNA molekülü kullanarak yapılan hesaplamaların ilk örneği idi.

## Genetik Mucize

Biyolojik olsun ya da olmasın, bir bilgisayarın hızı iki faktörle belirleniyor: paralel işlem yapabilme gücü ve bellek kapasitesi. DNA bilgisayarların en heyecan verici özelliği, paralel işlem yeteneğinin çok yüksek oluşu. Silikon tabanlı bilgisayarlar, işlemleri sıralı olarak gerçekleştirme, yani ancak birini bitirdikten sonra diğerine geçebilme özelliğinde. Kuşkusuz, paralel işlem yapabilen bazı çok işlemcili bilgisayarlar da yok değil. Ancak bunların temel yapısı da, talimatların sırayla ele alınması üzerine kurulu. DNA bilgisayarlar, hedefe ulaşmak için en uygun olanakları seçebilme ve paralel işlem yapabilme özelliğine sahip. Test tüpünün içindeki DNA molekülü üzerinde işlem yapan enzimler sıralı ola-

## DNA Hakkında Kısa Kısa...

- DNA'nın (Deoksiribonükleik Asit)'nin merdivene benzeyen çift sarmal yapısı, 1953 yılında James Watson ve Francis Crick tarafından keşfedildi. Merdivenin basamakları, Adenin (A), Timin (T), Sitozin (C) ve Guanin (G) isimli bazların bileşimlerinden oluşan bağlarla birbirine bağlı. Bu bağ çiftleri, merdivenin kenarlıklarına benzetilebilecek bir şeker-fosfat iskeletinin üzerine sıralanmış olarak duruyor.

- İnsandaki bir DNA molekülünün uzunluğu, açıldığında 1,7 metre. Yani hücrelerinizdeki tüm DNA moleküllerini açarak bir araya getirdiğinizde ortaya çıkan uzunluk, Ay'a 6000 kez gitmeniz için yeterli.

- DNA, tüm canlı hücrelerde bilginin saklandığı temel ortam. Milyarlarca yıldan bu yana, yaşam için gerekli verileri saklayıp, vücut içinde gerekli yerlere gönderiyor. Bu özelliği nedeniyle, insan yapımı bilgisayarların prototipi olarak kabul ediliyor.

- 10 trilyon DNA molekülü, kabaca tek bir bilye büyüklüğünde bir yer kaplıyor. Tüm bu moleküller veriyi aynı anda işleyebildiklerinden, teorik olarak DNA kullanarak bu küçücük alanda aynı anda 10 trilyon hesaplamayı birarada yapabilirsiniz. Bu işlem sayısı, şu anda var olan en hızlı süperbilgisayarın bile altından kalkabileceğinden çok daha fazla.

rak fonksiyon göstermiyor, yani o anda yalnızca bir DNA üzerinde işlem yapmıyor. Bunun yerine, enzimin birçok kopyası birçok DNA üzerinde aynı anda çalışıyor. Bu da DNA bilgisayarların birçok paralel işlemi birarada gerçekleştirebilmesini sağlıyor.

DNA'nın işlemleri gerçekleştirme hızı da göz ardı edilecek gibi değil. Bakterilerde DNA'nın kopyalanma hızı saniyede 500 baz çifti. Her bir baz çifti iki bitlik bilgiyi temsil ettiğinden, bu hız saniyede 1000 bit anlamına geliyor. Ayrıca kopyalama enzimlerinin birçok kopyası birden paralel olarak çalıştığından, replikasyon enzimleri birinciyi kopyalamayı bitirmeden kopyalanan ikinci DNA zinciri üzerinde çalışmaya başlayabiliyor. Böylece, hız doğrudan 2000 bit/saniye'ye çıkıyor. Her bir replikasyon tamamlandıktan sonra, DNA zincirlerinin sayısı katlı olarak artıyor. Eklenen her dizileyle birlikte 1000 bit/saniye oranında artan veri işleme hızı, DNA bilgisayarların 10 kopyalama sonunda 1Mbit/saniye hızına, 30 kopyalama sonundaysa 1000 Gbit (milyar bit)/saniye hızına ulaşması anlamına geliyor. Bu hız, şu anda var olan en hızlı sabit disklerin sağladığının bile ötesinde.

DNA bilgisayarlar daha az yerde daha çok bilgi saklayabildiklerinden, bellek kapasiteleri de oldukça yüksek. DNA dizisi üzerindeki nükleotitler, bir DNA molekülü boyunca aralarında 0,35 nm. boşluk kalacak şekilde diziliyor. Bu da DNA'ların cm başına yaklaşık 7 Mbit gibi kayda değer bir veri yoğunluğuna sahip olmasını sağlıyor. İki boyutlu baktığımızda, bir nm<sup>2</sup> başına bir baz düştüğünü varsayarsak, cm<sup>2</sup> başına düşen veri yoğunluğu yaklaşık yarım milyon Gbit oluyor. Yüksek performanslı tipik bir sabit diskinkiyse 3Gbit/cm<sup>2</sup>. Yani DNA'nınki bunun 100.000 katından daha fazla.

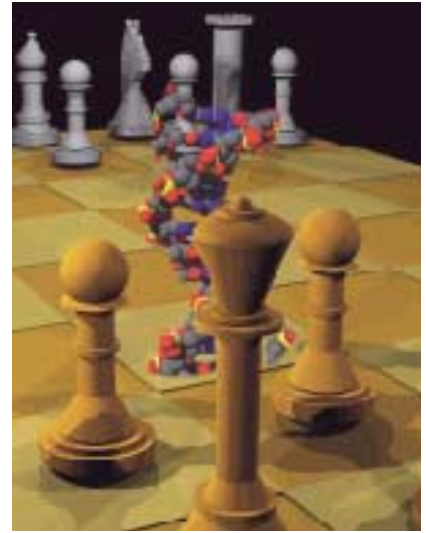
DNA bilgisayarlarının bir diğer önemli özelliği ise, DNA moleküllerinin çift sıralı bir yapıda olması. A-T ve C-G bazları, baz çiftleri oluşturacak biçimde birbirlerine bağlanıyor. Bu nedenle her DNA dizisinin, doğal bir tamamlayıcısı var. Birbirlerini tamamlayıcı bu iki dizi biraraya gelerek, çift sıralı sarmal DNA yapısını oluşturuyor. Çift sıralı olma özelliği, DNA'yı tek ve kendine özgü, özel bir veri yapısı haline getiriyor. DNA bilgisayarların oluşturulmasında, bu özellik pek çok bakımdan yarar sağlıyor. Özellikle hata düzeltimi, bunlar arasında en önemlisi. DNA'lardaki hatalar birçok faktöre bağlı olarak ortaya çıkıyor. DNA enzimleri bazen kolayca hata yapıp, kesilmemeleri gereken bir yerde kesile-

biliyor; G bazını koyması gereken bir yere T bazını koyabiliyor. Ayrıca Güneş'ten gelen ısı enerjisi ve mor ötesi ışınlar da, zaman zaman DNA'larda bozukluklara yol açabiliyor. Ancak çift sıralı bir DNA'nın dizilerinden birinde bir bozukluk olsa bile, onarıcı enzimler tamamlayıcı diğer diziyi örnek alarak bozuk DNA dizisini onarıyor. Bu da DNA bilgisayarlardaki hata oranının çok düşük olmasını sağlıyor. Örneğin bir DNA kopyalanmasında kopyalanan 109 adet baz için, yalnızca bir hata oluyor.

DNA bilgisayarlarının tek yararı, sağladıkları hızlı ve paralel işlem yapabilme kapasitesi değil. DNA bilgisayarlar, malzemenin temizliği ve kolay bulunabilirliği gibi olumlu yanları da be-

raberinde getiriyor. DNA işlemcileri bildiğimiz mikroişlemcilerde kullanılan pahalı ve genellikle zehirli materyallerin aksine ucuz, temiz ve doğada zaten var olan biyomateryalleri kullanıyor. DNA'yı doğada her yerde kolaylıkla bulabileceğinizden, madenlerle uğraşmanıza gerek kalmıyor. Tek yapmanız gereken, organizmadan gereksinim olan kısımları almak.

## Şah ve Mat!



DNA ile yapılan çalışmaların olumlu sonuçlarından güç alan Princeton Üniversitesi'nden iki araştırma grubu, bu yılın başında "İki at, bir satranç tahtasının üzerine, birbirleriyle hiç karşılaşmayacak biçimde kaç farklı şekilde yerleştirilebilir?" problemini DNA'nın kimyasal kuzeni RNA'yı kullanarak çözmeyi denedi. Deneyi basitleştirmek için, 8x8 kareden oluşan satranç tahtasını 3x3 kareye küçülttüler. Farklı RNA dizileri kullanarak, satranç tahtası üzerindeki atların konumlarını gösterecek bileşimler oluşturdu. Daha sonraysa, bir enzim yoluyla, RNA dizisi boyunca belirli bazların bileşimlerini arayıp, problemin doğru yanıtlarına karşılık gelenleri ayırdılar. Görevli enzimler kısa süre içinde, yanıtların çoğuyla geri döndüler. Bu deney, RNA'nın hesap makinesi olarak kullanılabilme potansiyelini ortaya koydu.

Aynı zamanlarda Wisconsin Üniversitesi'nden bir ekipse aynı problemi, farklı bir yaklaşımla ve DNA'nın kendisini kullanarak çözmeyi başardı. Bu deneyin asıl önemi, ortam olarak Adleman'ın kullandığı çözülmüş molekül-

## Hatasız DNA Olmaz

DNA molekülü bir çok özelliği nedeniyle hesaplama işlemlerinin daha hızlı ve paralel bir şekilde yapılmasını vaadediyorsa da, DNA bilgisayarların gerçekleştirilmesi için aşılması gereken bazı sorunlar da yok değil. Bunlardan en önemlisi, DNA hesaplamalarındaki her bir sürecin hızının hâlâ net olarak belirlenemiyor olması. 1994'de yaptığı deneyin sonucunu elde edebilmesi 7 gün süren Adleman, tüm bir hesaplamanın tamamlanması için gerekli sürenin hesaplanmanın büyüklüğüne bağlı olarak artacağını, ancak kesin olarak ne kadar süreceğini kestirmenin henüz olanaksız olduğunu belirtiyor. Bugüne kadar yapılan deneyler, DNA kullanarak çözülmek istenen problemin karmaşıklığı arttıkça, DNA üzerinde daha fazla ayırma ve tanıma adımlarının gerçekleştirilmesi gerektiğini gösteriyor. Bu sorunun üstesinden gelmek için üzerinde çalışılan çözüm yoluysa, DNA nano-yapılarının kendi kopyalarını yapabiliyor olmaları özelliğini kullanmaktan geçiyor.

DNA bilgisayarların önündeki bir başka engelse, DNA moleküllerinin parçalanabilir yapıda olması. Altı ay süren bir hesaplama işleminin sonunda, DNA kullanılarak oluşturulan sistem su haline dönüşüyor. DNA moleküllerinin kırılabilir olması, bilgisayarınızın bir parçası olan DNA molekülünün zamanla parçalanabileceği anlamına geliyor. DNA'nın bozulabilir özellikte olmasıysa, çözümlerin içinde bekledikçe DNA'nın zarar görmesi ve DNA bilgisayarınızın zamanla çözülmeye ya da erimeye başlaması riskini doğuruyor. DNA moleküllerinin yeniden kullanılabilirliği üzerinde yapılan çalışmalarsa, zarar gören DNA'yı tamir etmenin ve yeniden işe yarar hale getirmenin kolay bir iş olmadığını gösteriyor.

DNA bilgisayar modeli, her bir DNA molekülünün ayrı bir işlemci gibi görev yaptığı, paralelliği son derece yüksek bir bilgisayar. Ancak bu işlemcilerin bilgiyi birbirlerine ilemeleri konusunda pek de başarılı değil. Silikon tabanlı çok

işlemcili bilgisayarlarda, bilgiyi bir işlemciden diğerine ileten taşıyıcılar var. DNA bilgisayarlardaysa bilginin bir molekülden diğerine nasıl iletileceği sorunu, henüz çözülmüş değil. Bugüne kadar oluşturulmuş DNA algoritmaları, hesaplamaları başarılı bir şekilde gerçekleştiriyor. Ancak DNA molekülleri, bu algoritmalar sonucunda elde ettikleri bilgiyi birbirlerine iletmiyorlar. DNA moleküllerinin bilgisayar uygulamaları alanındaki esnekliklerini sınırlayan bu sorunun çözülmesi için yapılan çalışmalarsa, halen sürmekte.

DNA bilgisayarların geliştirilebilmesi için aşılması gereken bir başka engel de, pek çok faktöre bağlı olarak ortaya çıkabilen DNA hataları. Özellikle DNA dizilerinin uygun eşleriyle birleşmeleri süreci boyunca oluşan bu hataların yoğunluğu sıcaklık, çözeltideki tuz bileşeni ve dizideki G ve C'lerin T ve A'lara oranına bağlı olarak değişiyor. İdeal durumda, DNA birleşme süreci boyunca yalnızca mükemmel eşlemeleri gerçekleştiriyor. Ancak yine de zaman zaman bir DNA molekülü, bir ya da iki bazı yanlış eşleyebiliyor. Bu da istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden oluyor. Genelde rastlanan hataların oranı,  $10^{-6}$  ve  $10^{-4}$  arasında değişiyor. Bu da yaklaşık yüzbin adet baz eşlenmesinde, yalnızca bir hatalı eşleme anlamına geliyor. Bu oran, kısa şifreleme gerektiren küçük hesaplama problemlerinin çözülmesi söz konusu olduğunda, göz ardı edilebilecek bir hata oranı. Ancak çözülecek problem büyüdükçe ve DNA kullanarak yapılması gereken şifreleme uzadıkça, bu oran artarak %1'e kadar varabiliyor. Neyse ki bu DNA hatalarının üstesinden gelebilmek için uygulanabilecek bazı çözümler var. En etkin çözümlerden biri, en hatasız zincirleri seçmek ve veriyi şifrelemek için bunları kullanmak. Ayrıca araştırmacılar şablon olarak kullanılacak hacimleri azaltmanın da, bu hataları tamamen ortadan kaldırılabileceği görüşünde.



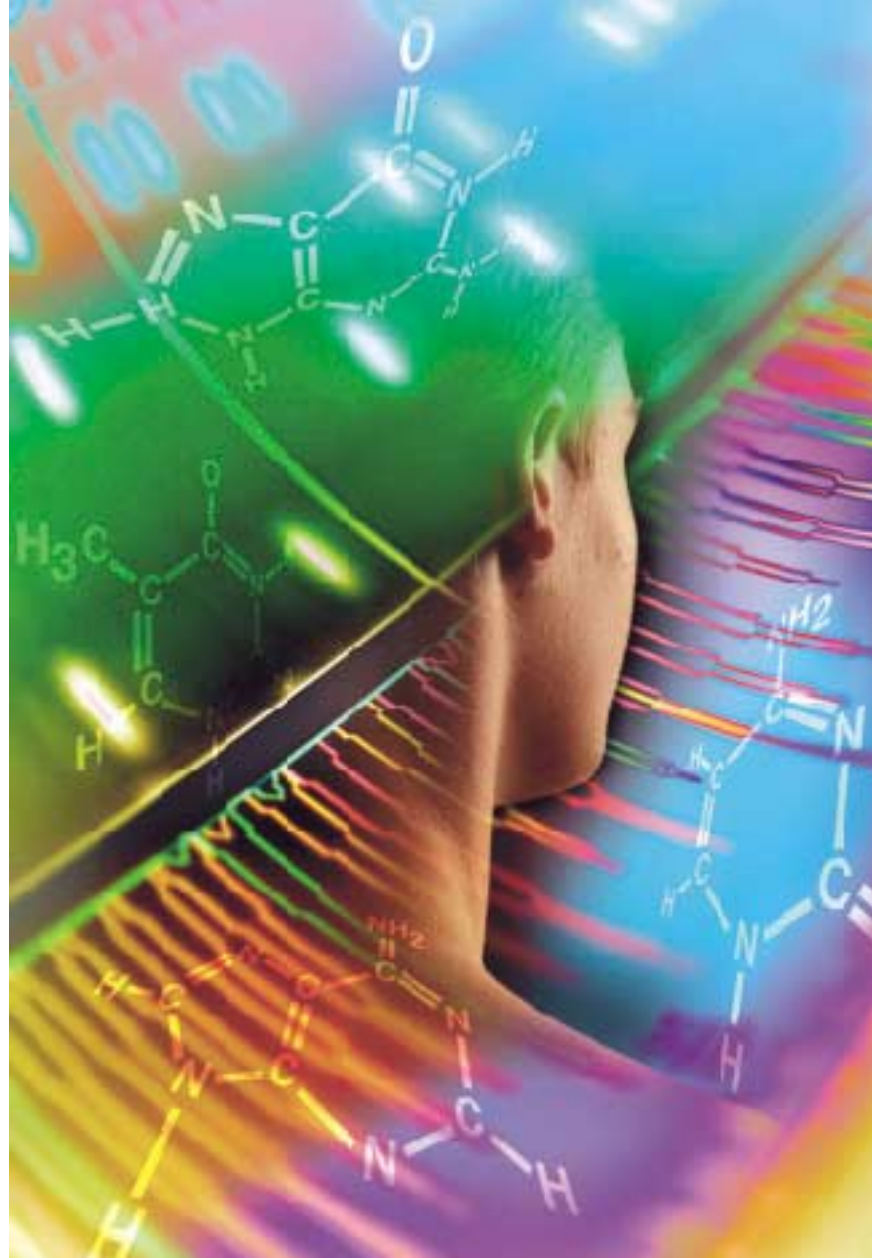
ler yerine, katı bir destek üzerine kurulu bir sistem kullanarak problemi çözmüş olması. Sistemin katı bir yapıda olması, dış cihazlara, elektronik bileşenlerde olduğu gibi, daha doğrudan bir bağlantı olanağı sağlıyor.

## Bize Benzeyen Bilgisayarlar

DNA bilgisayar dendiğinde birçok kişinin aklına, merkezi işlemcilerin içinde test tüplerinin dizildiği, bildiğimiz masaüstü bilgisayarların benzeri bir görünüm ve doğrudan DNA molekülünün ucuna bağlanan bir klavye gelebilir. Ancak şu anda varolan örnekler bu görünümünden oldukça uzak. Henüz emekleme döneminde olan çalışmaların tümü, hâlâ deneysel aşamada ve laboratuvar ortamında. Neyse ki, özellikle katı ortam üzerinde yapılan son deneylerin başarısı, gözümüzde canlandırdığımız DNA bilgisayarlarının, eninde sonunda gerçek olacağı müjdesini veriyor. Ancak, DNA molekülünün barındırdığı bazı sorunlar nedeniyle, masalarımızda DNA bilgisayarlarımızın durmaya başlaması için gerekli süre pek de az değil gibi görünüyor. DNA bilgisayarlarının gelişmesi, öncelikle bu sorunların aşılmasına bağlı. Ancak ilk çalışmaların 1994 yılında yapıldığını göz önüne alırsak, DNA bilgisayarlar henüz 8 yaşında. Bu gençliğine rağmen bugün geldiği nokta bile, oldukça yüksek bir potansiyel vaat ediyor. Ayrıca, yarışa oldukça önden başlamış durumda. İlk elektronik bilgisayar olan ENIAC bir oda büyüklüğündeyken, Adleman'ın yaptığı ilk DNA bilgisayar yalnızca 100 mikrolitrelik bir test tüpü boyutundaydı.

DNA bilgisayarlarının, gelecekte tıp, biyoloji araştırmaları ve sinir ağları gibi çeşitli alanlarda kullanılması bekleniyor. Sözcük işleme gibi basit işlemlerde kullanılmayacak DNA bilgisayarlar, ileri düzeydeki ve kolay kontrol edilemeyen karmaşık problemlerin çözümünde çok önemli bir rol oynayacak gibi görünüyor. Bu nedenle, özellikle şifreleme ve şifre kırma alanları için çok büyük umutlar vaat ediyor.

DNA bilgisayarı çalışmalarının bir başka önemli özelliği ise, yapılan araş-



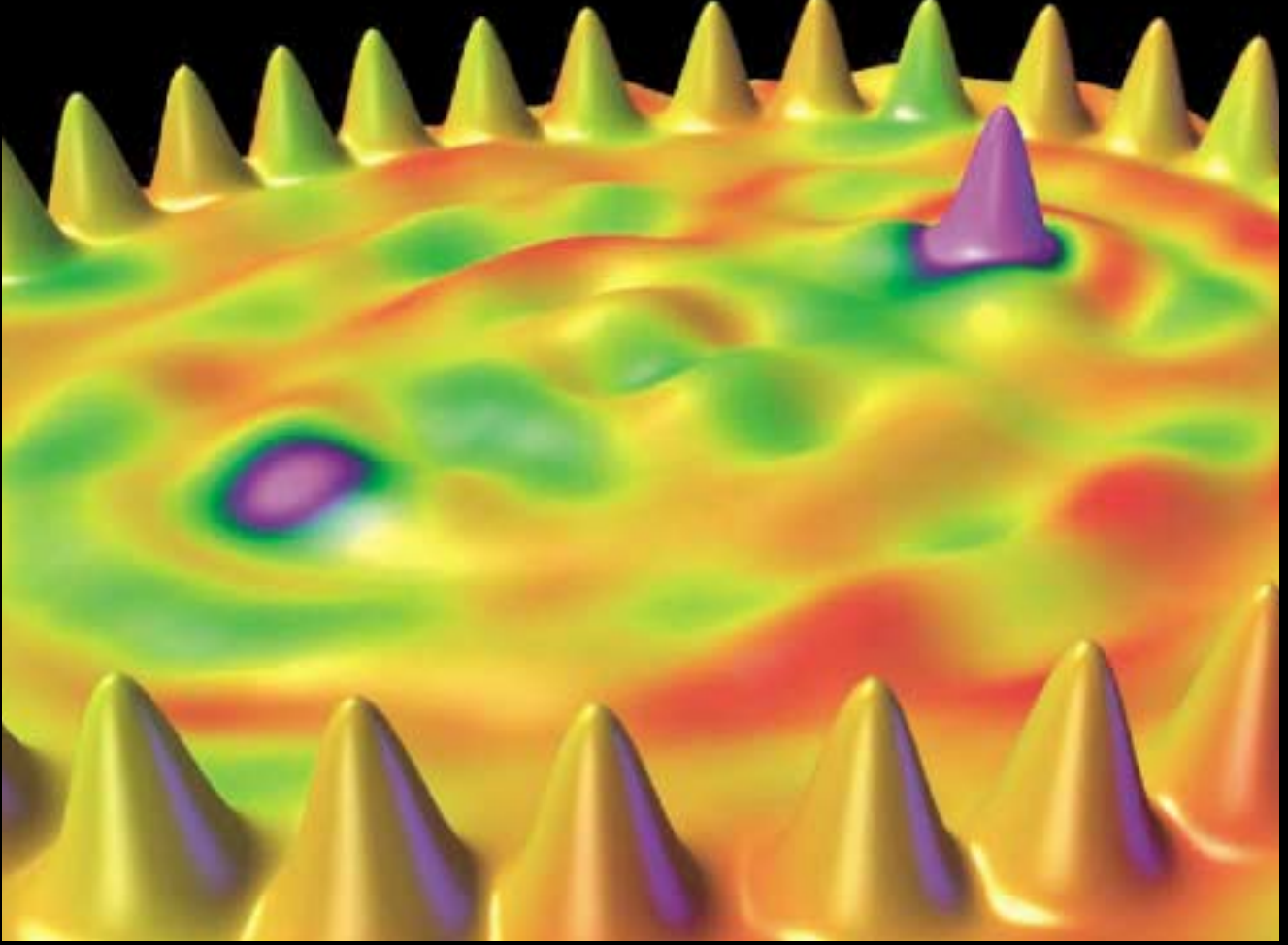
tırmaların kendi bedenimiz içinde sahip olduğumuz bilgisayarın, yani insan beyninin, nasıl çalıştığıyla ilgili bilgilerimizi de artıracak olması. Bilimadamları daha hızlı DNA bilgisayarlar üretmek için insan DNA'sının ve bey-



ninin derinliklerine indikçe, yapay zekâ, kendi kendini oluşturan moleküler nanoteknoloji ve vücut içine yerleştirilen çipler gibi alanların da daha hızlı ilerlemesi bekleniyor.

DNA bilgisayarlar, insanların bilgisayarlarla ilişkisinin boyutunu da değiştirebilir. Kullandığımız bilgisayar zaten vücudunuz içinde işlemekte olan mekanizmaya göre çalışıyorsa, sizin bilgisayarlarınızla ilişkiniz de şimdikinden farklı olabilir. İçinizdeki ve karşınızdaki aynı olduğunda, olayın boyutu tamamen değişebilir. Bu farklılığın ne boyutta olacağını şimdiden kestirmekse, oldukça güç. DNA bilgisayarımızla anlaşış anlaşamayacağımızı, ancak zamanı geldiğinde öğrenebileceğiz.

# KUBİTLER



Hesap yaparken bilgisayar çipleri yerine atomları kullanan kuantum bilgisayarlar için, dünyadaki büyük üniversitelerin tümü çalışmalarını sürdürüyor. IBM ve Hewlett Packard gibi şirketler de, işin içine balıklama dalmış durumda. Kuantum bilgisayarların getireceği avantajların yanısıra, yaratacağı riskler konusunda da oldukça kuşkucu olan A.B.D. yönetimiye, en donanımlı kuantum bilgisayar laboratuvarlarına sahip.

Kuantum bilgisayarların öyküsü, fizikçilerin atomların birer doğal küçük hesap makinesi olduğunu fark etmesiyle başlıyor. Bir pusulanın ibresininki gibi, atomların da doğal bir yönü var. Bu yöne spin (dönme) deniyor. Spinin yönü yukarıya ya da aşağıya doğru olabilir. Bu durum, bilgisayarlarda halen kullanılmakta olan, tüm bilgilerin 1'lerden ve 0'lardan oluşan dizilerle göste-

rildiği teknolojiyle tam da birbirine uyuyor. Atomun yukarıya doğru olan spini 1'i, aşağıya doğru olan spiniyse 0 olarak kabul edilebilir. Bu durumda spini yukarıya ya da aşağıya hareket ettirmek, küçük bir transistörü açık ya da kapalı konuma, bir başka deyişle 1 ya da 0'a getirmekle aynı şey.

## Bit Değil, Kubit!

Aslında size ilginç gelebilir ama, bugün masanızda duran bilgisayarınızın çalışma şekli, 18.000 vakum tüpüyle

### Bit'e Dikkat!

Bilgisayar belleklerinin ve sabit disklerin kapasiteleri, bit denilen ikili bilgi birimleriyle ifade ediliyor. Bit ve byte sözcükleri birbirlerine çok benziyorsa da, aslında iki ayrı birimi temsil ediyorlar.  
1 byte = 8 bit

donatılmış, kablolarının toplam uzunluğu 500 mil olan 30 tonluk atalarından pek de farklı değil. Bilgisayarlar daha küçük ve görevlerini daha hızlı yerine getirir hale gelmiş olsalar bile, görevleri hâlâ aynı: 0 ve 1'ler şeklindeki ikili şifreleme mantığına göre çalışan bitleri düzenleyip farklı bir biçimde yorumlayarak, hesaplama sonuçları haline getirmek. Bit, bilgisayarınızda 0 ve 1'lerle temsil edilen temel bilgi birimi. Klasik bitlerin tümü, sabit diskiniz üzerindeki mıknatıslaştırma ya da bir kapasitör üzerindeki yük gibi makroskobik bir fiziksel sistem yoluyla algılanıyor. Bildiğiniz klasik bilgisayarlar ve kuantum bilgisayarlar arasındaki temel fark da buradan doğuyor. Klasik bilgisayarlar, fiziğin bildik kurallarına tamamen uyuyor. Kuantum bilgisayarsa kuantum mekaniğine özgü fiziksel kuralları çalışır hale getirerek, bilgiyi



# SAHNEDE!

işlemenin yeni bir biçimini yaratıyor.

Kuantum bilgisayarlar, kuantum bit, ya da kısaca kubit, olarak adlandırılan bir bilgi birimi kullanıyor. Bir bilgisayar belleği ve işlemcisi olarak görev yapacak şekilde birlikte çalışan atomları temsil eden kubitler, kuantum bir yapıya sahip. Bu özellikleri nedeniyle de ikili şifreleme mantığında değiller. Kubit'in bu özelliği, klasik fizik kanunlarından tamamen farklı olan kuantum mekaniği kanunlarına olan bağlılığından kaynaklanıyor. Bir kubit, klasik bit gibi yalnızca 1 ve 0 mantıksal konumlarında bulunmuyor. Bunların yanısıra bu klasik pozisyonların üst üste gelmelerine (superposition) karşılık gelen durumlarda da bulunabiliyor. Bir başka deyişle bir kubit aynı anda hem 1, hem de 0 olabiliyor.

Kubitlerin üst üste binebilme özellikleri, kuantum bilgisayarların oldukça ileri bir paralel işlem kapasitesine sahip olmasını sağlıyor. Bu paralellik, kuantum bilgisayarların bir milyon adet hesaplamayı aynı anda yapabilmesini sağlıyor. Masanızdaki kişisel bilgisayarlarınızsa, aynı anda yalnızca bir tane hesaplama yapabiliyor. Örneğin 8 bitlik dijital bir bilgisayar, herhangi bir anda  $2^8 = 256$  ayrı konumun yalnızca birinde bulunabiliyor. 8 kubitlik bir kuantum bilgisayarsa ay-

nı anda 0'dan 256'ya kadar olan tüm değerler olabiliyor. Böylece kuramsal olarak aynı anda 256 ayrı hesaplama işlemi üzerinde çalışabiliyor. Bu örnek çok kubitli sistemlere genişletildiğinde, klasik bilgisayarların sunduğunun çok ötesinde, katlı olarak artan bir hesaplama potansiyeline ulaşıyor. Böylece hesaplamaların tamamlanması için gereken süre, ciddi biçimde azalıyor. 300 kubitlik bir hesaplama, klasik bilgisayardaki  $2^{300}$  bitlik hesaplama karşılık geliyor. 130 basamaklı bir sayının çarpanlarına ayrılması, bildiğimiz klasik bilgisayarların yüzlercesinin aylarca çalışmasını gerektiriyor. Kuantum bilgisayarlarsa böyle bir işlemin sonucunu birkaç saniyede bulabiliyor. 400 basamaklı bir sayının faktörize işlemiyle klasik bilgisayarlarla 10<sup>9</sup> yıl sürüyorken, kuantum bilgisayarlarla yalnızca dakikalar alıyor.

## Atomların Dansı

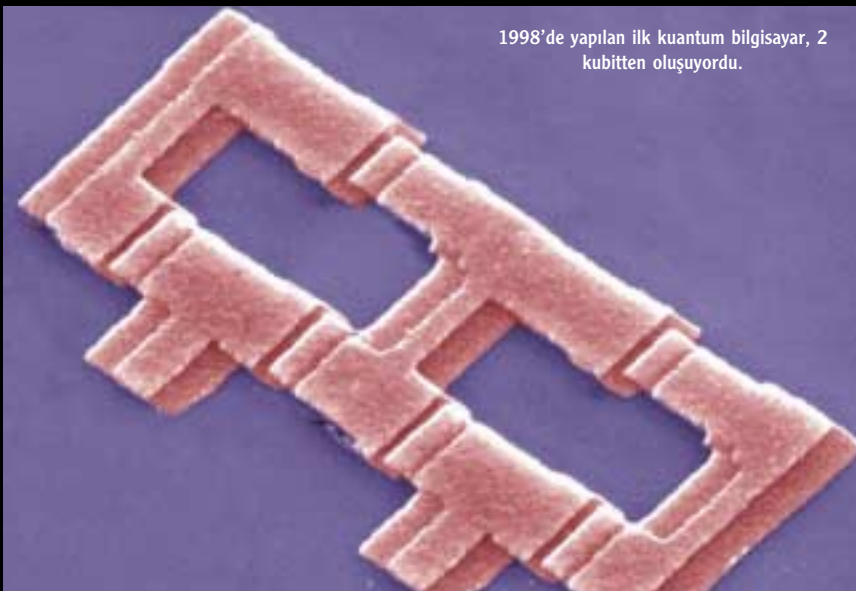
18 Nisan 1998'de MIT'den Neil Gershenfeld ve IBM'den Isaac Chuang'ın oluşturdukları ilk kuantum bilgisayar, 2 kubitte oluşuyordu. Bir bilgisayardan daha çok, küçücük bir tost makinesi görünümündeki bu araç, çüce boyutlarına karşın, belli algoritmaların sunumunu başarılı bir şekilde

gerçekleştirebildi. Gershenfeld ve Chuang, karbon ve hidrojen atomlarından oluşan sıvı kloroformla doldurdukları bir test tüpünü, kontrollü manyetik atımlar yayan bir manyetik bobinle zayıflatılar. Kloroform'daki atomlar doğa tarafından öngörülen örüntüye uygun olacak biçimde, spinleriyle dans ettiler. Bu aşamadan sonraysa, genellikle beyin taramaları için kullanılan, NMR (Nuclear Magnetic Resonance) makinesini devreye soktular. NMR, dans etmekte olan atomlardan bazılarını dürtükleyerek, diğer atomların spinlerini etkilediler. Böylece karbon atomlarının spinleri, üzerlerine doğrudan bir temas olmaksızın, kuantum bilgisayar görevini yapacak şekilde programlanmış oldu. Atomların dansı, manyetik alanda az da olsa bir değişiklik oluşmasına neden olur. İki araştırmacı, bu değişikliği ölçerek, kuantum hesaplamalarının sonucunu okudu.

Bir yıl sonra aynı ikili, bilgisayarlarını 3 kubitlik bir sürüme yükseltti. Sunum yine önceki algoritmalar üzerinden yapıldı. 15 Ağustos 2000'deyse Isaac Chuang, IBM, Stanford Üniversitesi ve Calgary Üniversitesi'nden oluşan ekiplerle, 5 kubitlik bilgisayarı yaptıklarını duyurdu. Bu da NMR tabanlı bir kuantum bilgisayardı. Ancak bu kez florin atomları kullanılmıştı ve düzen saptama yeteneği daha da gelişmişti. Bu, kuantum bilgisayarların şifre kırma kapasitesi için çok önemli bir özellikti. 19 Aralık 2001'de Chuang'ın ekibi yaptıkları 7 kubitlik bir kuantum bilgisayar sunumuyla, yeni bir önemli adım attı. Yaklaşım, bir yıl önceki 5 kubitlik bilgisayarda kullanılanla aynıydı. Ancak bu defaki kuantum bilgisayarı, 5 florin atomu ve 2 karbon atomundan oluşuyordu.

## Kuantumun Tuhaflikları İşe Yarıyor

Kuantum bilgisayarlar, kubitler üzerine bir dizi kuantum devresi uygulayarak bilgiyi işliyor. Kuantum devreleri, tek bir kubit ya da bir çift kubit



1998'de yapılan ilk kuantum bilgisayar, 2 kubitte oluşuyordu.

üzerinde iş yapan çevrim birimleri. Bu devreler, belli durumdaki kubitlerin üzerindeki karmaşık dönüştürme işlemlerini gerçekleştiriyor. Kubitler ölçülüyor ve bu ölçüm en son hesaplama işlevini görüyor. Klasik ve kuantum bilgisayarın hesaplama yöntemleri arasındaki bu benzerlik, klasik bir bilgisayarın kuantum bir bilgisayarı taklit edebileceği izlenimini veriyor olabilir. Bir başka deyişle, kuantum bir bilgisayarın yapacağı her şeyi klasik bir bilgisayarın da yapabileceğini düşünebilirsiniz. O halde ne diye boşuna uğraşıyorlar? Ancak asıl durum böyle değil.

Klasik bir bilgisayar, kuantum bir bilgisayarın son derece kolaylıkla yapabileceği bazı işlemleri bile gerçekleştirmedi oldukça yetersiz kalıyor. Hesap hızı açısından sıradan bir bilgisayarın, bir kuantum bilgisayarı taklit edebilmesi olanaksız. Çünkü kuantum bitleri arasındaki bağlantılar, bir başka deyişle değişkenlerin birbirleriyle olan bağlantıları, klasik bitler arasındakilerden çok farklı. Kuantum bir sistemde, girişlerin her birine bir kuantum durumu atanıyor. Bu özellik, aramanın hızında ve etkinliğinde ciddi bir artış sağlıyor. Çünkü dizin, deneyin başındaki olası tüm durumların üst üste gelmiş hali olarak kuruluyor. Bu da tüm girişlerin kuantum durumlarının, birbirleriyle bağlantılı olduğu anlamına geliyor. Böylece, aramadan belli girişler elendikçe, hedefin bulunma olasılığı, girişlerin birbirleriyle bağlantılı olmadığı klasik yaklaşımdakine göre, çok daha hızlı olarak artıyor. Diyelim ki, bildiğiniz bir telefon numarasının kime ait olduğunu bulmak amacıyla, telefon numaralarını içeren bir veritabanını inceliyorsunuz. Klasik yaklaşımda, kontrol etmeniz gereken giriş sayısı, tüm dizinde yer alan verilerin yani telefon numaralarının sayısına eşit. Verilerin arasındaki bağlantıları göz önüne alarak 1997 yılında Lov Grover tarafından geliştirilen bir algoritmayla, bir kuantum bilgisayarın tarayacağı giriş sayısının, toplam giriş sayısının kareköküne eşit olduğunu gösterdi.

Kuantum mekaniğinin dolanıklık (entanglement) olarak bilinen bir başka özelliği de kuantum bilgisayarlar için hayati önem taşıyor. Kuantum mekaniğine göre, iki atoma bir dış kuvvet uygularsanız, uyguladığınız bu kuvvet ikisinin birbirine karışmasına neden



Kuantum bilgisayarlardaki kubitler, aynı anda hem 1, hem de 0 olabiliyor.

oluyor. Birbirlerinden milyarlarca ışık yılı uzakta evrenin bir yerlerinde olsalar bile, bu iki atom birbirlerine dolanık olarak kalıyor. Bu iki atom üzerine herhangi bir kuvvet uygulamadığınız sürece, tüm yönlerde spin hareketini sürdürüyor. Ama bir kez kuvvet uyguladıktan ve birbirleriyle dolanık hale gelmesine neden olduğunuz an, atomlardan biri, spin yönlerinden birini seçerek kararlı bir duruma geçiyor. Bu durumda bu atomla dolanık durumda bulunan ikinci atomsa, zıt yönlü spini seçiyor. Aslında bir tür iletişim biçimi olan bu özellik, bilimadamlarının kubitlere doğrudan bakmadan, spin yönlerini bilmelerini sağlıyor. Birbirine karışmış atomlardan birinin spin yönü yukarıya doğruysa, diğer uçtakinin aşağıya doğru olduğu hemen anlaşılabilir. Bu özellik kullanılarak, kubitlere dışarıdan bir kuvvet uygulanarak hesaplama süreci durduruluyor ve ve

kubitler tek bir yanıtta karar vermeye zorlanıyor. Bu durum anlık olarak gerçekleştiğinden, ışık hızına meydan okuyor gibi görünüyor. Bu nedenle dolanıklıkla ilgili kuramlar, bilimadamlarının kuantum bilgisayarlardaki hesaplama hızının artırılabilmesinin bir yolu olduğunu öngörmelerini sağladı. Bugünün bilgisayarlarının hızları, bir tek elektronun bir kablo boyunca ne kadar hızlı hareket edebileceğiyle sınırlandırıldığı bir noktadalar. Dolanıklık özelliği sayesinde, kuantum bilgisayarlarda bu sınır aşılabılır.

## Aman Rahatsız Etmeyin!

Dolanıklık özelliğinin, hesaplama hızları alanında getireceği avantajların yanı sıra, yarattığı bazı sorunlar da var. Dolanıklık özelliğini kullanmak için atomların üzerine bir kuvvet uygulandığında, kubitler belli bir spin yönünde karar kılıp, üst üste binme özelliklerini kaybediyorlar. Bir başka deyişle, kubitler rahatsız edildiklerinde kuantum doğalarını yitirip, dijital hale geliyorlar. Yabancı tek bir fotonun varlığı bile, ortalığın karışması için yeterli. Böyle bir durumda, dalga tepeleri çakışıyor ve geleneksel 1 ve 0'larla başbaşa kalıyorsunuz. Bunun yaşanmaması için, kuantum bilgisayarlarda kullanılacak anahtarların (switch) kesinlikle rahatsız edilemez olması gerekiyor. Çünkü bir kuantum bilgisayarın doğru biçimde işleyebilmesi, temelde hiç bir dış etki olmadan bir çok kubit arasın-

## Kuantum, Kendi Söküğünü Dikiyor

Kuantum mekaniğinin bir diğer ilkesi olan kuantum girişimi, belli uygulamalarda, karışmış (dolanık) sistemlerin yapışıklığını korumakla ilgili sorunların üstesinden gelmek için kullanılabilir. Bu keşif henüz yeni ortaya çıkmış olsa da, veritabanı araştırmaları için önemli vaatlerde bulunuyor.

Bu fikir, temelini aslında lise yıllarında öğrendiğimiz, tanıdık bir deneyden alıyor: Dar bir kaynaktan yayılan ışık ışınlarını, paralel yarıklar arasından geçirme deneyi. Bu deney sonunda ışık ışınları, belli ve farkedilir bir örüntü oluşturacak biçimde girişim yaparlar. Tek foton ve elektronları kullanarak atomaltı düzeyde yapılan benzer bir deney de, aynı sonucu ortaya çıkarır. ABD'deki Rochester Üniversitesi'nden bir grup, trilyonlarca giriş içeren bir veritabanından, tek bir aramayla istenen kaydı bulabilecek bir araç geliştirmek için, bu davranışı kullandılar. Araç bilgivi, ses dalgaları etkisiyle titreşen telluryum dioksit'ten yapılmış bir kristalin içinde saklıyor. Ses

dalgaları, kristalin bazı kısımlarını sıkıştırırken, diğerlerini genişletiyor. Böylece verileri şifrelemek için kullanılacak bir dalga frekansı yaratıyor. Veriyi aramak için, lazer ışığı iki kola ayrıştırılıyor ve kristale doğru hedefleniyor. Kollardan biri, tayf oluşturmak amacıyla bir prizmanın içinden geçiyor. Daha sonra iki kol yeniden birleşiyor ve ilk baştaki orjinal ışık demetiyle karşılaştırılıyor. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen girişim deseni, aramakta olan veriye karşılık gelen dalga boyunu tanımlamak için okunuyor. Rochester'lı ekip yaptıkları deneyde, titreşen kristalden 50 farklı frekansta ışık geçirdiler. Daha sonra da değişikliğe uğrayan frekansını kullanarak, aranılan veriyi buldular. Örneğin 20. frekansın değişikliğe uğraması, aranan bilginin veritabanında 20. konumda olduğu anlamına geliyor. Bu yaklaşımın en cezbedici yanıysa, ışığı kontrol etmenin kubitleri kontrol etmekten çok daha kolay olması.



da gerçekleşecek etkileşime dayanıyor.

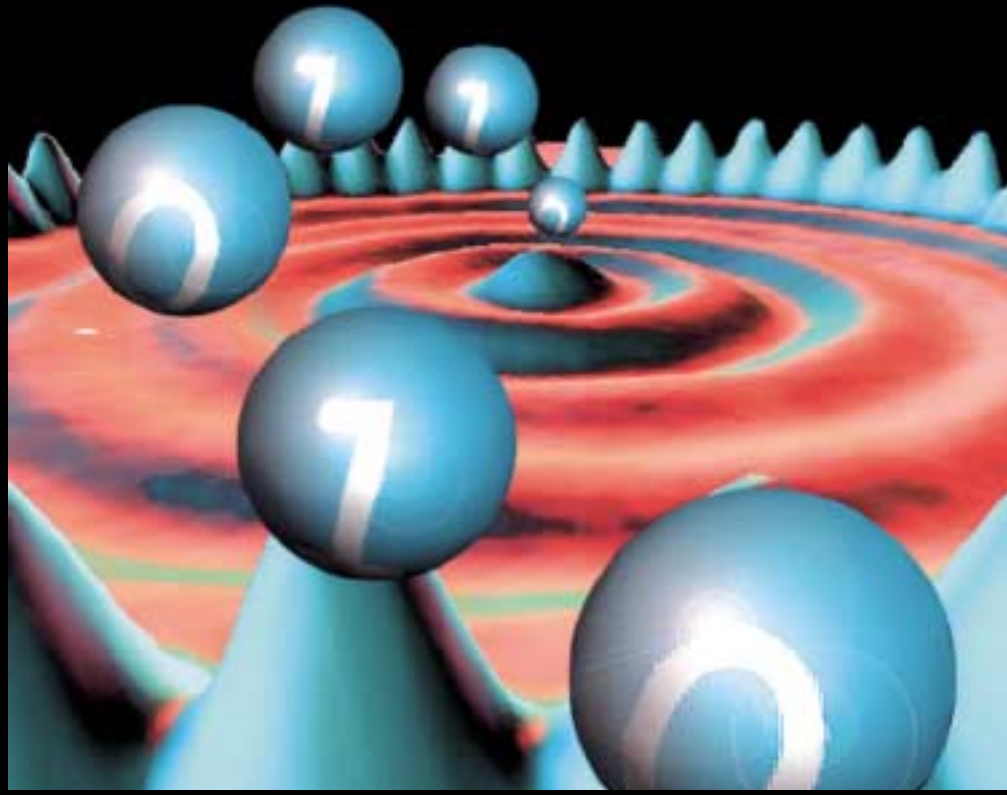
Kuantum bilgisayarların bu özelliği, hesaplamayı gerçekleştiren atomların çevrelerinden tamamen izole edilmiş olmalarını gerektiriyor. Çünkü başka bir atom ya da foton gibi bir parçacıkla yaşanacak en ufak bir etkileşim, parçacığın bir spin yönü seçmesine neden olarak, hesaplama sonucunun zarar görmesine neden oluyor. Ancak, kuantum bilgisayarların dışarıdan etkilenmemesinin nasıl sağlanacağı sorusu, henüz yanıtlanabilmiş değil. Bunun için gerekli teknoloji, bugünün olanaklarının ötesinde.

## Doğa Hesap Yapmayı Biliyor

Bir zamanlar transistör nasıl vakum tüplerinin yerini aldıysa, kuantum bilgisayarlar da bir gün silikon çiplerin yerini alacak. Ancak, günümüz koşulları kuantum bilgisayar araştırmaları için hâlâ yetersiz. Kuantum bilgisayarlar alanındaki pek çok araştırma, hâlâ yalnızca teorik düzeyde. Günümüzdeki en gelişkin kuantum bilgisayarlara, 7 kubitten öteye gidebilmiş değil. Kullanılabilir kuantum bilgisayarlar içinse çok daha fazlası gerekiyor.

Ancak yine de son yıllarda kubitler alanında yaşanan önemli pek çok gelişmeyi göz ardı etmemek gerek. Henüz ortaya çıkarılmış tam bir kuantum bilgisayar yoksa da, hata düzeltimi ve algoritma yapılandırılması gibi gerekli pek çok mekanizma oluşturulmuş durumda. Dijital süreçlerdeki gibi yalnızca iki durumlu değil de çok durumlu olduklarından, kuantum bilgisayarlar, hata düzeltimi ve hesapların güvenilirliği gibi konularda analog bilgisayarlar da yaşanan bazı sorunları yaşayacaklar. Fizikçiler, kubitlerle ne tür bir hata düzeltimi yönteminin çalışacağı ve genel kuantum hesaplamaları konularını hâlâ tartışıyor. Bu sorunların aşılıp dijital hesaplama olanaklarının ötesine geçilip geçilemeyeceği ise, hâlâ belirsiz.

Bu sorunların dışında başka pratik bazı problemler de var. Öncelikle NMR spektrometreleri büyük, karmaşık, pahalı ve çok düşük sıcaklıklarda çalışabilen araçlar. Ayrıca çok daha büyük kubit dizilerinin geliştirilebilmesi için, karmaşık moleküller ya da polimerler bulunması gerekiyor. Bura-



daki en büyük çıkmaz, çoğu polimerin temelini karbon olması ve bu polimerlerin, spini olmayan Karbon12 bulunduruyor olmaları. Masalarımızın üzerinde birer tane kuantum bilgisayar durması için aşılması gereken sorunlardan biri de maliyet. Gershenfeld ve Chuang'ın yaptıkları 2 kubitlik ilk kuantum bilgisayarın maliyeti, 1 Mil-

### Kuantum Bilgisayar Dünyasında Son Dakika!

Geçtiğimiz ay, Max Planck Enstitüsü'nden Axel Kuhn, Markus Hennrich ve Gerhard Rempe, kuantum bilgisayarlar alanında çok temel bir ilerlemeye imza attılar. Bir fotonun, durumundan herhangi bir şey kaybetmeksizin, hem yayılabildiği hem de soğurulabildiği bir aracın sunumunu gerçekleştirdiler. Bu araç, kuantum bilgilerin bir bellekten diğerine iletilebilmesi olanağının yolunu açıyor.

yon dolar. Bugüne kadar yapılan çalışmalar da, bu maliyeti azaltma yolunda pek başarılı olabilmiş değil.

Çoğu kişi, kuantum bilgisayarları dört gözle bekliyorsa da, bu durum herkes için geçerli değil. Kuantum bilgisayarlar şimdiden özellikle bilgisayar güvenliği alanında çalışanların kâbusu haline gelmiş durumda. Çünkü kuantum bilgisayarlar, bu kişilerin kriptoloji (şifreleme) alanında geliştirdikleri tüm yöntemlerin üzerine bir çizik atma potansiyeline sahip. Kriptoloji, bildiğimiz bilgisayarlarla çözülmesi neredeyse imkansız, aşırı derecede zor çarpanlara bölme işlemine dayalı problemlere dayanıyor. Ancak, kuantum bilgisayarlar aynı anda sonsuz saldırı

olanağı sağladıklarından, bu tür problemleri çözmeleri çok kolay. Bu açıdan bakıldığında, kuantum bilgisayarlar ciddi bir saldırı aracı potansiyeli olarak beliriyor. Kredi kartından havale işlemleri, ticari işlemler, askeri mesajlar, devlet haberleşmesi gibi kritik işlemlerin tümünün güvenliği, kriptolojiye bağlı. Kuantum bilgisayarı olan biriyse, tüm bu işlemlerin güvenliğini bir kaç saniye içinde yıkabilme olanağına kavuşmuş olacak. Bu nedenle kuantum bilgisayarlar yararlı olabilme kadar, zararlı olma potansiyeli de taşıyor.

Kuantum bilgisayarların gerçekleşip gerçekleşmeyeceğiyle ilgili tartışmalara, her gün bir yenisi ekleniyor. Bazıları bunun imkansız olduğunu savunurken, bazıları da yaratacağı tehlikeler nedeniyle kuantum bilgisayarları karşısına almış durumda. Kuantum bilgisayarlar alanında yıllardır çalışmakta olanlar bile, yeni kubit dizilerinin eklenip eklenemeyeceği konusunda emin değil. Ancak kuantum bilgisayarlara sonuna kadar inananlar da var. Bu alanın öncülerinden Neil Gershenfeld'e göre, kuantum bilgisayarlar yakın bir gelecekte yaşamımızın bir parçası olacak. Çünkü Gershenfeld, doğanın zaten nasıl hesap yapılacağını bildiği, ancak bizlerin henüz ona doğru soruları nasıl sormamız gerektiğini bilmediğimiz görüşünde. Gerçekten kullanılabilir bir kuantum bilgisayarı üretilebilecek mi sorusuna net bir yanıt verebilmekse, bugün için olanaksız. Zaten kuantum dünyasını yöneten de "belirsizlik ilkesi" değil mi?..

# NANOTÜP

Onuncu yaşgünlerini kutlayan nanotüpler, laboratuvarlardan çıkıp bilgisayarınızdaki yerlerini almaya hazırlanıyor. Nanotüp alanındaki gelişmeler sayesinde, artık kimyacıların ve fizikçilerin üzerlerinde oynayabilecekleri, periyodik tablonun yeni bir nanoteknoloji versiyonu var. Nanotüp cihazların prototipleri, renkli, düz ekran televizyonlardan, gelişkin aydınlatma sistemleri ve X-ışını makinelerine kadar pek çok alanda denendi. Ancak, asıl umut vaadettikleri alan, geleceğin bilgisayarları.

Karbon atomları karmaşık, uzun zincirli moleküller oluşturacak biçimde birbirlerine bağlanabiliyor ve bunu yaparken her bir karbon atomunun, kendisine başka atomların da bağlanmasına izin verecek şekilde boş yeri kalıyor. Bu özellik, tüm elementler arasında karbona özgü karakteristik bir özellik.

Fullerene, özel bir karbon çeşidi. Bilgisayar çipleri alanında yeni uygulamaları olacağı düşünülüyor. Çip üreticileri, ince bir silikon tabanın üzerine daha fazla transistör yerleştirmenin yollarını arayadursunlar, IBM altından bir taban üzerine nanotüpler yerleştirerek yaptığı ilk transistörü tamamladı bile. Bu çalışmasıyla IBM, bugünün silikon çiplerinden binlerce kat küçük bilgisayar çiplerine giden yolun kapısını da açmış oldu.

Nanotüpler, asıl etkilerini bilgisayarların hız ve bellek kapasitelerinin artmasında göstereceklerse de, şu anda pazarın bu teknolojiye ilgisi yüksek değil. Şimdilik fullerene nanotüpleri kullanan diğer ürünler, pazarın daha gözdesi durumunda. Nanotüp tabanlı düz ekran üretmek için çalışmalarını sürdüren iki düzineden fazla şirket var. Samsung, 2003 yılının başında bu yaklaşımla üretmekte olduğu

81 cm'lik televizyonu pazara sürmeyi planlıyor.

Bugünün bilgisayarları, metalik iletkenler ve metal olmayan yarıiletkenlerden oluşuyor. Nanotüplerse aynı anda hem iletken, hem de yarıiletken olarak görev yapabiliyor. Bu ikili yapı, geleceğin bilgisayarlarının etkinliği için düşünebileceğimizden çok daha önemli bir temel olabilir.

IBM yaptığı çalışmada her biri yal-

## Büyük Lokma Ye...

Geleceğin bilgisayarlarının nasıl bir şey olacakları, işlemcilerinin hızları ya da belleklerinin kapasiteleri gibi konularda söylenenler size çok mu uçuk geliyor yoksa? Bunların asla gerçekleşmeyecek, ancak bilim kurgu filmlerinde rastlanabilecek türden "fantezi" bilgisayarlar olduğunu düşünüyor olabilirsiniz. İnsanlığın böylesine gelişkin bilgisayarlara aslında hiç bir zaman gereksinim duymayacak sanıyorsunuz belki de. O halde bilgisayar dünyasındaki kişilerin, zaman içinde söyledikleri sözlerle şöyle bir göz atın. Gerçekten çok eğlenceli!

"Bence yaklaşık beş bilgisayarlık bir dünya pazarı var." 1943, **Thomas Watson**, IBM Başkanı.

"Gelecekte bilgisayarların ağırlığı 1,5 tondan daha az olabilir." 1949, **Popular Mechanics**.

"Bu ülkenin dört bir yanını gezip, en önemli kişilerle konuştum ve vardığım sonuç şu: Emin olun ki veri işleme, bu yılın sonuna kadar bile varlığını sürdüremeyecek, gelip geçici ve anlamsız bir modadan başka bir şey değil." 1957, **Prentice Hall**'ın İş Dünyası konulu kitaplarının editörü.

"Peki ama, bu ne gibi bir işe yarayabilir ki?"

1968, **Mikroçipler konusunda yorum yapan bir IBM mühendisi**.

"Atari'ye gittik ve dedik ki: 'Elimizde harika bir şey var. Bazı parçaları şimdiden hazır. Bize maddi destek sağlarsanız, gerisini de tamamlayacağız. İsterseniz yaptığımız şeyi tüm haklarıyla size de verebiliriz. Bize belli bir maaş ödemeniz yeterli. Sizin için de çalışabiliriz. Tek istediğimiz, bir an önce bu şeyin yapımını tamamlamak.' Aldığımız yanıtta şuydu: 'Hayır!'. Daha sonra aynı öneriyi götürdüğümüz Hewlett-Packard yetkililerinden 'Size ihtiyacımız yok. Üstelik, daha üniversite mezunu bile değilsiniz.' yanıtını aldık." 1976, **Apple'in kurucularından Steve Jobs**, Steve Wozniak'la birlikte geliştirdikleri ilk kişisel bilgisayarın hikayesini anlatıyor.

"Bir insanın evinde bir bilgisayarı olmasını istemesini gerektirecek hiç bir neden yok." 1977, **Digital Equipment şirketinin kurucusu ve başkanı Ken Olson**.

"640K herkes için fazlasıyla yeterli." 1981, **Bill Gates**.



# MUCİZESİ

nızca birkaç nanometre çapında (metrenin milyarda biri) tek bir karbon nanotüpünü, iki tür transistör oluşturacak şekilde düzenleyip ince bir altın elektrodun üzerine yerleştirdi. Bugünkü bilgisayar çiplerindeki transistörlerden yüzlerce kez daha küçük bu transistörler, elektrik sinyallerini anlamlı 1 ve 0'lara dönüştüren bir mantık devresi olarak çalıştı. Bu şimdilik tamamıyla bir laboratuvar sunumu olsa da, karbon nanotüp transistörler, ileride endüstriyel uygulama için sunduğu vaatlerle geleceğin ultra hızlı ve küçük bilgisayarlarının yapıtaşları olarak silikon kristallerinin yerini alacak gibi görünüyor. Karbon nanotüpler, geleceğin nanoelektronikini oluşturmaya aday. Keşiflerinden bu yana geçen 10 yıl içinde, artık laboratuvardan çıkıptechnoloji alanında etkin kullanıma da hazırlar.

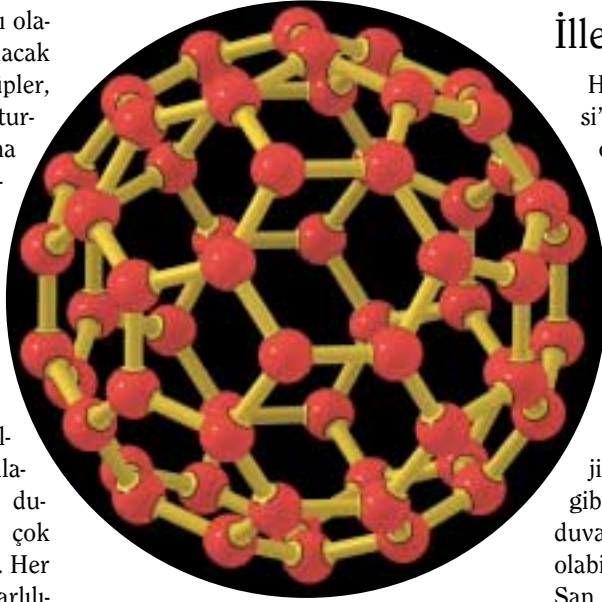
## Karbon Nanotüpler

Kurşun kaleminizdeki grafit, balpeteği deseninde sıralanmış karbon atomlarının biraraya gelmesiyle oluşuyor. Peteğin katmanları birbirlerinin üzerine yığılmış durumda. Grafitin her bir katmanı, çok kararlı, güçlü ve esnek bir yapıda. Her bir katman, kendi başına da kararlılığını koruyabildiğinden, komşu katmanlara çok zayıf bağlarla bağlanıyor. Tüm tabakaların çok güçlü ve esnek olmasına karşın, tabakaların birbirlerine bağlı olarak kolayca kayabilmelerini sağlamak amacıyla kurşun kalemde kullanılan grafit zayıf. Karbon liflerdeki grafit katmanlarıysa, çok daha büyükler ve uzun ve ince spiral bir örüntüye sahipler. Bu lif uçaklarda, tenis raketlerinde, yarış bisikletlerinde ve yarış arabalarının süspansiyonları gibi yerlerde kullanılan son derece hafif, güçlü, bir o kadar da pahalı yapılar oluşturuyor.

Ancak çok daha güçlü katmanlar oluşturmak da mümkün. Petek şeklindeki örüntüyü kendi üzerinde döndü-

rerek sardığınızı ve kenarlarını birleştirdiğinizi düşünün. Böylece bir grafit tüpü, yani karbon nanotüp oluşturmuş oluyorsunuz. Bu nanotüpler, bilinen en güçlü fiberler. Tek bir nanotüp, birim alanda taşıyabildiği yük göz önüne alındığında, çelikten 10<sup>100</sup> kat daha güçlü.

Karbon nanotüplerin tek marifetleri, sahip oldukları güç değil. Barındırdıkları elektriksel özellikler de oldukça ilginç. Bilgisayarlarındaki çiplerde kullanılan silikon gibi yarı-iletken-



Fullerene adı verilen futbol topu biçimindeki karbon molekülleri, nanotüp bilgisayarlar alanında yeni bir devrim başlattı.

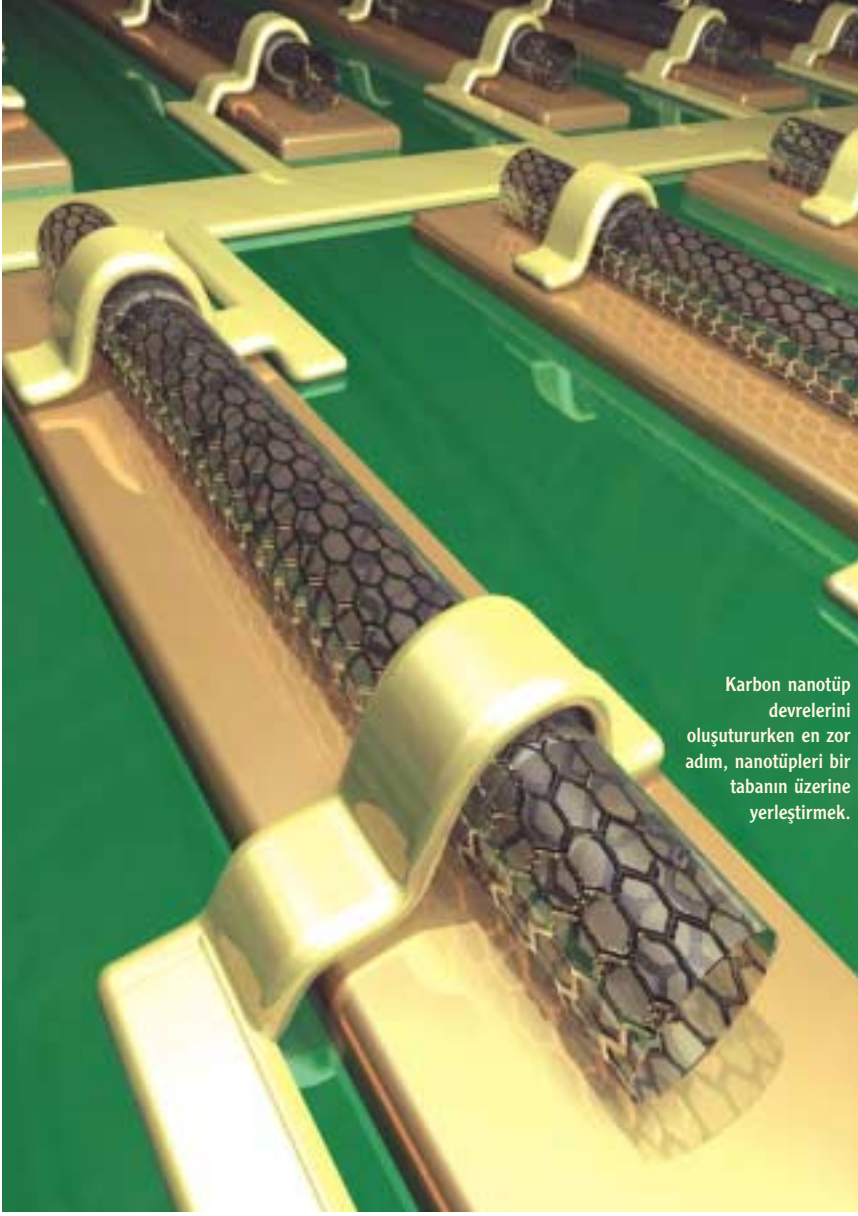
lerde, elektronlar sınırlı bir hareket kapasitesine sahip. Kablolarda kullanılan bakır gibi malzemelerdeyse elektronlar, çok daha kolay hareket edebiliyor. Bir grafit katmanı, bu ikisinin arasında bir karakter sergiliyor. Yani yarı-metal özellikte. Çünkü bir grafit katmanı nanotüp oluşturacak biçimde sarıldığında, tüpün nasıl çevrildiğine bağlı olarak nanotüp yarı iletken ya da metal olabiliyor. Bu, nanotüplerin petek şeklindeki özel desenlerinin sağladığı bir ayrıcalık. Bu özellikleri sayesinde karbon nanotüpler, elektrikli araçlar için çok temel

bir bileşen halini alıyor. Karbon nanotüpler, iki karbon elektrodu arasında elektrik akışı olduğunda oluşan tortulardan ortaya çıkıyor. Nanotüpteki her bir karbon atomu, doğası gereği, içi boş boruların kafes biçimli çeperlerinde düzgün bir sıra oluşturuyorlar. Nanotüplerin genelde rastlanmayan ve oldukça kullanışlı özelliklerinin kaynağı da, bu moleküler mükemmellik.

## Minyatür Dedin mi, İlle de Japon!

Houston'daki Rice Üniversitesi'ndeki araştırmacıların, fullerene olarak adlandırılan futbol topu biçimindeki karbon moleküllerini keşfetmesiyle, teorik fizikçiler bu karbon yapısının aynısının tüp biçimli bir çeşidinin de olabileceğini ve bu moleküllerin ileri derecede elektrik iletkenliği gibi bir çok çekici özelliği bulunabileceğini öngördü. 1990 yılında Japon bilimadamı Sumio Iijima, Rusların Matruşka bebekleri gibi birbirlerinin içine geçmiş çok duvarlı karbon nanomoleküllerinin olabilirliğini gösterdi. 1993 yılındaysa San Jose'deki IBM araştırma grubuyla yaptığı çalışma sonucunda, duvarlarının kalınlığı yalnızca bir atom kadar olan daha üstün bir nanotüp üretildi.

Daha önceki bir araştırmacının sonuçları, nanotüplerin elektrik alan etkisiyle uçlarından elektron yadıklarını göstermişti. Tüm iletkenler, yeterince yüksek bir voltaj uygulandığında elektron yayma özelliğinde. Nanotüplerse mükemmel moleküler yapıları sayesinde, bunu çok daha az bir voltajla da gerçekleştiriyor. Karbon nanotüplerin yapısı, çok küçük ve etkin elektron yayıcıları yapmak için ideal. Bu özellikleri, bir piksel gibi çok küçük hedeflere bile doğrudan elektron demetleri gönderebilmelerini sağlıyor.



Karbon nanotüp devrelerini oluştururken en zor adım, nanotüpleri bir tabanın üzerine yerleştirmek.

gelişkin DRAM yaklaşık 1GB veri saklayabiliyor. Kalıcı nanotüp belleklerse, yüzlerce GB kapasitesinde olacak. Nantero'daki araştırmacılar, iki yıl içinde bilgisayar pazarında devrim yaratacak gelişkin nanotüp bilgisayar belleği üretimini tamamlamış olmayı umuyor.

## Eskisini Kenara Atmadan

Nanotüpler bu gelişkin bellek kapasitelerini, Nantero'dan Tom Rueckes'in basit ama çok zekice bir tasarımına borçlu. Bu tasarım, bir taban üstündeki dik bir sıranın üzerindeki paralel nanotip dizilerinden oluşuyor. Bu yapıdaki çapraz dizilerin her bir kesişim noktası, bir bitlik belleği temsil ediyor. Uygulanan bir elektrik kuvveti, üst dizideki bir tüpü sıkıştırarak alttaki bir tüpe yeterince yaklaştırdığında, iki tüp fiziksel olarak birbirine bağlanıyor ve aralarında bir akım geçişi oluşuyor. Bu akım geçişi, uygulanan güç kesilse de devam ediyor. Bir başka deyişle, uygulanan güç ortadan kalksa bile, anahtar sürekli olarak açık konumda kalıyor. Bu yapıdaki her bir bitlik bellek alanı çok az bir yer kapladığından, bir santimetre boyutundaki bir çip üzerine trilyonlarca bitlik kalıcı bir bellek yerleştirilebiliyor. Amaç, olabildiğince kısa süre içinde bu laboratuvar tasarımının teknolojik uygulamalarını olanaklı kılmak. Bu yapının bileşenlerinin şu anda çalışıyor olduğunu belirten Rueckes'in asıl amacı, nanotüp belleğini bildiğimiz teknolojiyle entegre biçimde çalışır hale getirmek.

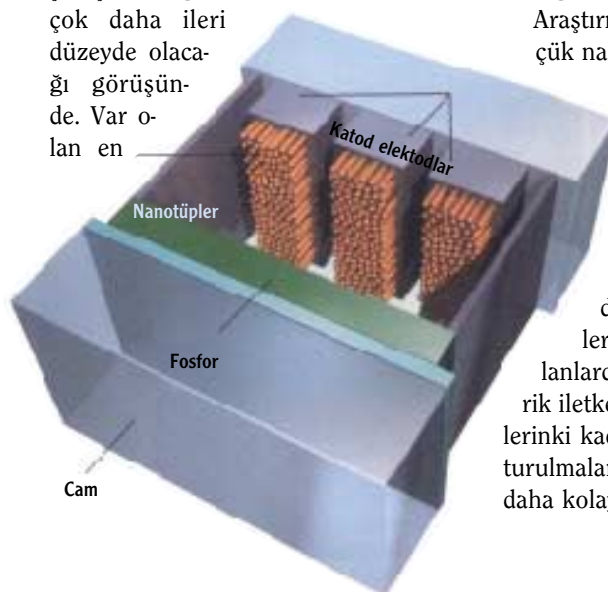
Araştırmacılar şimdilerde, ultra küçük nano kablolar ve karbon dışındaki başka materyallerle de üretebilecekleri nanotüplerin peşinde. Asıl yapmak istedikleri, karbonun yerine silikon ve diğer alışılmış yarı-iletkenleri koyabilmek. Ancak üzerinde çalışılan bu yeni nanotüpler ve kablolar, karbonla yapılanlardan çok daha büyük. Elektrik iletkenlikleri de karbon nanotüplerinkine kadar güçlü değil. Ancak oluşturulmaları ve düzenlenmeleri, çok daha kolay.

## Beklemeye Son!

Araştırmacılar, nanotüpleri kullanarak "kalıcı" bilgisayar belleği üretebilecekleri görüşünde. Bilginin manyetik bir disk üzerinde saklandığı "uçucu" bellek türlerinde, bilgisayarınızın işletim sistemlerini ve programlarını çalıştırmak için kullandığı bilgi yalnızca bilgisayarınız açık oldukça korunuyor. Bunlar DRAM (Dynamic Random Access Memory) olarak bilinen, kısa süreli elektronik bellekler. Bilgisayarınızı her açıp kapattığınızda, makineniz sakladığı bilgiyi sabit diskinizden alıp yeniden elektronik bellek üzerine yazıyor. Bilgisayarınızı açarken bir süre beklemenizin gerekmesi de, bu yeniden yazma işleminden kaynaklanıyor. Yani bilgisayarınızı her kapattığınızda, elektronik bellek üzerindeki bilgiler buharlaşıyor. Kalıcı bilgisayar belleklerindeyse, sistem bilgisi bilgisayar kapatıldığında da bellekte kalıyor. Böylece bilgisayarınızı açarken beklemeniz gereken süre,

otomatik olarak ortadan kalkıyor.

Massachusetts'deki Nantero isimli bir firma, nanotüpleri kullanarak kalıcı bilgisayar belleği üretme çalışmalarını sürdürüyor. Bu çalışmalar başarılı olursa, bilgisayarınız parmağınızı düğmeye bastığınız an açılacak. Bunun yanısıra Nantero yapacakları yeni çiplerin bugünün sabit diskleriyle karşılaştırıldığında, çok daha ileri düzeyde olacağı görüşünde. Var olan en



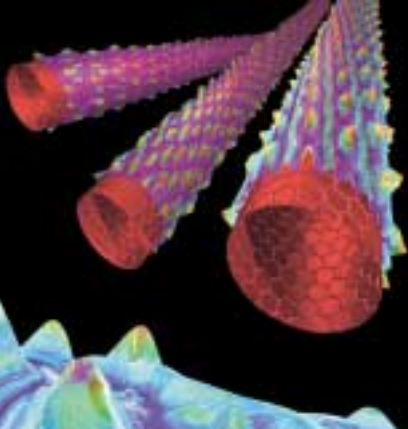


## Yeni Bir Dönem

Nanotüpler alanının öncülerinden Charles Lieber, geçtiğimiz yıl nanokabloların kullanımı üzerine bir rapor sundu. Daha sonra da Harvard'daki araştırma grubuyla birlikte, silikon ve gallium nanokablolarıyla yaptıkları mantık devrelerini tamamladı. Bilgisayar tasarımında daha özgür olmayı sağlayan bu nanokablolar, son yıllarını karbon nanotüpler alanında çalışmaya adanmışlar için oldukça cesaret verici. Nanotüpler ve nanokablolar elele vererek, şu anda kullanılmayan bu malzemelerin gerçek cihazlarda kullanımının önünü açabilir.

Bu tür bir kalıcı bellek, insanların bilgisayarlarını açarken beklemek zorunda oldukları süreyi yok ederek, bilgisayar kullanma biçimlerini kökten değiştirebilir. Ama bu tür bir belleğin en önemli özelliği, yeterli kapasiteye ulaştığında manyetik sabit diskleri bir kenara atabilecek olması. Bilgisayar alanında silikonun ötesine geçmek için uygulanan diğer yaklaşımlardan temel farkıysa, varolan yarı-iletken malzemelerle beraber kullanılabilir olması. Önümüzdeki on yıl içinde, nanotüpleri bildiğimiz silikon teknolojisine entegre etmek mümkün olabilir. Bu özelliği nedeniyle, Varolan teknikleri silip süpürecek yeni teknolojiler konusunda oldukça endişeli çip üreticilerinin nanotüp bilgisayarlarımıza daha sıcak bakmasının nedeni de bu.

Ancak, nanotüplerin bilgisayar bileşenleri arasında yerini alması için, hâlâ yanıtlanması gereken sorular



Nanotüplerin mükemmel moleküler yapıları nedeniyle sahip oldukları dalga fonksiyonları, çok küçük hedeflere bile doğrudan elektron demetleri gönderebilmelerini sağlıyor.

## Veri Saklayan Plastikler

Mikroçip üreticileri silikondan uzaklaşmanın yollarını aradursun, elektronik endüstrisindeki en önemli gelişmeler tamamen farklı bir materyalden gelebilir: plastik! Dünyadaki çoğu laboratuvar, iletken polimerleri kullanarak daha ucuz ve esnek elektronik bileşenlerin oluşturulabilmesi üzerinde çalışıyor. Verileri silikon yerine polimerlerde saklayan çipler, MP3 çalarlarda ve dijital kameralarda kullanılan "flaş bellek" çiplerinin kapasitelerinin artmasını ve maliyetlerinin azalmasını sağlayabilir.

Polimer mikroelektroniklerin üretim maliyetleri, silikonunkine karşılaştırıldığında çok daha az. Elektronik devreleri silikon bir levhanın üzerine yapıştırmak için, büyük yatırım ve pahalı ekipmana gereksinim var. Sıvı polimer devreleri bir yüzey üzerine serpmek içinse, herhangi bir püskürtmeli yazıcı bile yeterli. Polimer belleğin getirdiği bir başka avantajı, kalıcı bellek üretimi sağlıyor olması. Bilgisayarınızı kapattığınızda bile bilgileri saklayan polimer kalıcı bellekler, diğer alternatif teknolojilerle üretilen benzerlerine göre çok daha fazla bir bilgi saklama kapasitesine sahip.

Polimer bellekler bilgiyi, silikon araçlardan çok daha farklı bir yaklaşımla saklıyor. Polimer çiplerde veriler, bir hücrede saklanan yük miktarı kadar 1 ve 0 şifrelemek yerine, polimerin elektriksel direncine dayalı olarak saklanıyor. California Üniversitesi ve Rus Bilimler Akademisi'nden lisanslı teknolojileri kullanarak yürütülen çalışmalarda, her bir bellek hücresi, iki elektrod arasında bir polimer yerleştirilerek oluşturuluyor. Bu bellek hücresine uygulanan bir elektrik alan, polimerin direncini azaltarak, akımı iletme kapasitesinin artmasını sağlıyor. Polimer bu durumunu, direncini orijinal haline çevirecek zıt bir kutup uygulanana kadar koruyor. Farklı iletkenlik durumları, bilgi bitlerini temsil ediyor. Polimer bellek hücrelerinin boyutları, sıradan

silikon hücrelerinin dörtte biri kadar. Ayrıca silikon araçların aksine, polimer hücreler üç boyutlu yapılar oluşturacak biçimde yığılmaya uygun. Bu mimari, bellek hücrelerinin şimdikilerden çok daha fazla bir kapasiteye sahip olmalarını sağlıyor. Araştırmacılar bu teknolojiye dayanarak hazırlanmış 32 gigabit kapasiteli bellek çiplerini, 2004 yılında piyasaya sürebilecekleri görüşünde.

Ancak polimer teknolojisini ticari bir ürüne dönüştürmek, pek de kolay olacak gibi görünmüyor.

Bellek teknolojileri alanındaki yarış, kapasitenin yanı sıra hız, enerji tüketimi ve güvenilirlik kulvarlarında da sürüyor. Polimer belleklerle, varolan silikon teknolojisinin tüm olanaklarıyla baş etmekte biraz zorlanıyor. Bu tür yeni bellek materyalleri silikonun yüksek performansıyla yarışabilir hale gelinceye kadar, hücresel uygulamalarla sınırlı kalmaya mahkum. Önemli kullanım alanlarından biri, maliyetin performanstan daha önemli bir kriter olduğu, kullanıldıktan sonra atılan "disposable" elektronikler. Bell Laboratuvarları'ndan bir grup araştırmacı, polimer belleklerin kişilerin tanınmasını sağlayan etiketlerde kullanılması çalışmalarını sürdürüyor. Bu polimer bellekler, silikon standartlarına göre hâlâ oldukça yavaş. Umulan kapasiteyse, bir kilobitinin yalnızca birkaç katı. Ancak bu esnek ve düşük maliyetli bellek araçları, birkaç kez kullanıldıktan sonra atılan tanımlama etiketleri için oldukça cazip.

Polimer belleklerin varolan silikon altyapısına entegre edilmesiyle, yakın gelecekte yaşanabilecek pek çok ilerleme var. Polimer bellek teknolojisi alanında yaşanacak gelişmeler, tamamen plastik bileşenlerden oluşan bilgisayarlarımıza giden yolu açabilir. Bunun gerçekleşmesi için onlarca yıl gerekiyorsa da, araştırmacılar polimerlerin sınırlarını zorladıkça bugününün uzak ufukları yakınlaşabilir. Ne de olsa, polimer bellek devrimi artık başladı!

ni değiştirmekle kalmayıp, elektronik dünyasını da kökten değiştirme potansiyelinde.

### Kaynaklar

- Rotman, D., "The Nanotube Computer", Technology Review, Mart 2002, s. 36-45.  
"Polymer Memory", www.technologyreview.com  
Mullins, J., "Quantum Superbrains", New Scientist, 8 Temmuz 2002, s. 24-29.  
Yingwei, Y., "DNA Computers vs. Conventional Electronic Computers", Stuttgart Üniversitesi, Temmuz 2002.  
<http://www.qubyte.org/>  
<http://www.vanderbilt.edu/lsp/TL166/>  
<http://www.technologyreview.com/articles/nannanele.asp>  
<http://www.phys.psu.edu/~crespi/research/carbon.1d/public/>  
<http://www.iota.org/Winter00/dna.html>  
<http://dna2z.com/dnacpu/>  
<http://www.princeton.edu/~fl/frs.html>  
<http://www2.hmc.edu/~belgin/dnacomp.html>  
[http://www.elsop.com/wrc/humor/fut\\_comp.htm](http://www.elsop.com/wrc/humor/fut_comp.htm)  
<http://www.liacs.nl/home/pier/webPagesDNA/>  
[http://www.mitre.org/research/nanotech/hapgood\\_on\\_dna.html](http://www.mitre.org/research/nanotech/hapgood_on_dna.html)  
<http://www.cs.caltech.edu/~westside/quantum-intro.html>  
<http://physicsweb.org/article/news/6/3/14>  
<http://qso.lanl.gov/~gottesma/QComputers.html>