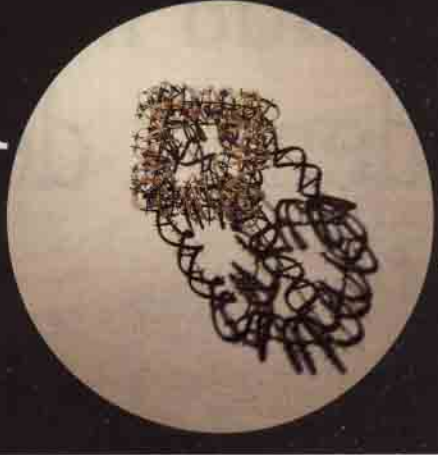


Organik Bir 'Yap Boz' DNA

Ned Seeman'a göre DNA yalnızca yaşamın büyük sırlarının bulunduğu bir ardiye değil, aynı zamanda, şimdiye kadar yaratılan en muazzam yapı oyuncağı.



Ned Seeman'ın ofisinde, tavan-
dan misinayla asılmış bir şeyler sarkı-
yordu. Yarım düzine plastik boru, sar-
mal bir DNA molekülünün çift helisi-
ni andıracak bir biçimde çiftlere ayrıl-
mıştı, ancak DNA hiçbir zaman böyle
değildi. Oluşturulan cismin plastik
sarmalları, basit bir doğrusal dizi oluş-
turmak yerine, birbirine dolanırken
yer yer ayrılıp yer yer buluşarak küpe
benzer daha karmaşık bir doku oluş-
turuyor. Odanın diğer tarafında, iki
pencerenin arasındaki bir masada, çu-
buk ve toplardan oluşan karmaşık bir
düzenek var. Bu, küçük bir çocuğun
Tinkertoy setiyle -setin yeterince bü-
yük ve çocuğun da yeterince sabırlı
olduğu varsayılırsa- oluşturabileceği
bir düzeneğe benziyor. Ancak bunun
New York Üniversitesi'nden bir kim-
ya profesörünün odasında olması ol-
dukça şaşırtıcı ve eğlenceli.

Ofisten sonra, Seeman'ın labora-
tuvarı insanı biraz hayal kırıklığına
uğrattıyor; içinde dünyanın her yerin-
deki binlerce moleküler biyoloji labo-
ratuvarında görülebileceklerden fark-
lı hiçbir şey yok. Bir yanda DNA sen-
tezi yapan bir alet, diğer yanda bir jel
elektroforez ünitesi ve köşede ise
tepkimelerin belirli sıcaklıklarda ger-
çekleşmesini sağlayan ısıtma blokları
duruyor. Hepsi DNA'yı ve tuttuğu
genleri araştırmada kullanılan stan-
dard aletler. Elbette bunda yadsına-
cak bir şey yok; gen haritalaması ve
genetik mühendisliği çok güncel ko-
nular. Ancak, Seeman'ın ofisi, burada
alışılmadık bir şeylerin dönüyor olabi-
leceği izlenimi veriyor. Gerçekten de

öyle. Araç-gereçlerden de anlaşıldığı
gibi, Seeman gerçekten DNA ile
meşgul, ancak yaptığı, genleri incele-
mek ya da işlemek değil. Bunun yeri-
ne, DNA'yı mikroskopik yapı projele-
rinde hammadde olarak kullanıyor.
Kimyasal tepkimeleri, kısa DNA par-
çalarını bir araya getirmek için kulla-
narak, 10 milyon tanesi uç uca eklen-
se bile uzunlukları toplamı bir karıştı
geçemeyecek küçük dokular meyda-
na getiriyor. Sarmal şekilde plastik
borulardan meydana gelen küp, Se-
eman'ın yapılarından bir tanesi; onla-
rı canlandırabilmek için daha iyi bir
yol, DNA'nın sarmal yapısını bir an
için göz ardı ederek her DNA'yı sade-
ce kısa bir çubuk olarak düşünmek.
Böylece, Seeman'ın araştırmasının
moleküler Tinkertoy'larla yapı kur-
maya denk olduğu anlaşıyor. Se-
eman'ın çalışması, Tinkertoy çubuk-
larını yere döküp onlarla neler yapa-
bileceklerini düşünmüş olanlar için
çok çekici. Bir köprü mü? Ya da bir ro-
ket gemisi mi? Yoksa virtüsten daha
küçük moleküler bir kafes mi? Her
ne kadar yaşam molekülü olan
DNA'yı bir yapı malzemesi olarak
kullanma fikri, çalışmanın tümüne
meraklı bir çekicilik katsa da aynı za-
manda hayali olma sıfatını da taşır.

Yıllardır, bilim adamları bir atom-
dan pek de büyük olmayan cisimler
tasarlamayı ve yapmayı hayal ediyor.
Kimilerine göre, bilim adamları bunu
başardıklarında, ortaya çıkacak muc-
zelerin listesi sonsuz olacak: Tek bir
molekülün içine bilgi depolayabilen
mikroskopik bilgisayarlar, kendilerini

milyarlarca kez çoğaltabilen makine-
ler, virüsleri yok etmek için hastanın
vücudunda dolaşan minyatür tıbbi ro-
botlar... Seeman'ın basit DNA düzen-
lemeleri, geleceğe ait bu tür uygula-
malardan oldukça uzak; ancak belki
de, bu uzak hedefe ulaşabilmek için
atılacak en önemli adım.

Seeman, yapı malzemesi olarak
kullandığı malzemenin garip görün-
düğünü kabul ediyor. Gerçekte,
DNA bir makarna yığını gibi görünür;
her makarna çubuğu, o yana, bu yana
bükülerek, çoğunlukla kendi üzerle-
rine kıvrılıp halka ya da sekiz şekli
oluştururlar. Seeman endişelenmeye
gerek olmadığını söylüyor. Bu makar-
na, pelte gibi fazla pişmiş değil ve
"kısa parçalar göreceli olarak daha di-
ri". Yapım sırasında kullandığı küçük
parçaların boyları enlerinin yaklaşık
olarak 3,5 katı -6-7 mm uzunlukta kı-
rılmış spagetti parçaları gibi- olduğu
için Seeman kıvrılabilirlik problemini
neredeyse tamamen yok sayıyor.

Bunun yanında, tutmak ve hatta
görmek için bile çok küçük yapıtaşla-
rı olan yapım projelerinde DNA kul-
lanımını uygun yapan bir özellik var:
DNA kendi kendine birleşiyor. Uy-
gun koşullar altında doğru DNA zin-
cirleri bir deney tüpüne koyulduğun-
da kendiliğinden birbirlerine tutuna-
caklardır. Gerçekten de, test tüpüne
konulan DNA miktarına bağlı olarak
milyonlarca ya da milyarlarca farklı
yapı kendiliğinden oluşuyor.
DNA'nın genetik şifreyi taşıyabilme
becerisinin temelinde, bu kendiliğin-
den birleşmenin getirdiği kolaylık
var; ancak Seeman'den önce kimse
bunu konstrüksiyona uygulamayı dü-
şünmemiştir.

Her biyoloji öğrencisinin bildiği
gibi, DNA doğal olarak ikili sarmal
şeklinde bir-birine fermuar gibi tu-
tunarak, sarmal bir merdiven biçimin-
de kıvrılmış olan iki uzun molekül.
Hücre bölünmesi sırasında ya da
DNA'nın kopyalanmasının gerektiği
özel durumlarda, bu çift sarmal fer-
muar açılarak iki zincire ayrılır; ancak
bu zincirler ilk fırsatta kendiliğinden
birbirlerine bağlanır. Bu karşılıklı çe-
kim, zincirlerin yapısından kaynakla-
nır. Her bir DNA zinciri baz olarak
adlandırılan birimlerden oluşan dizi-
ler içerir. A, T, G ve C (adenin, timin,
guanin ve sitozin) olarak adlandırılan

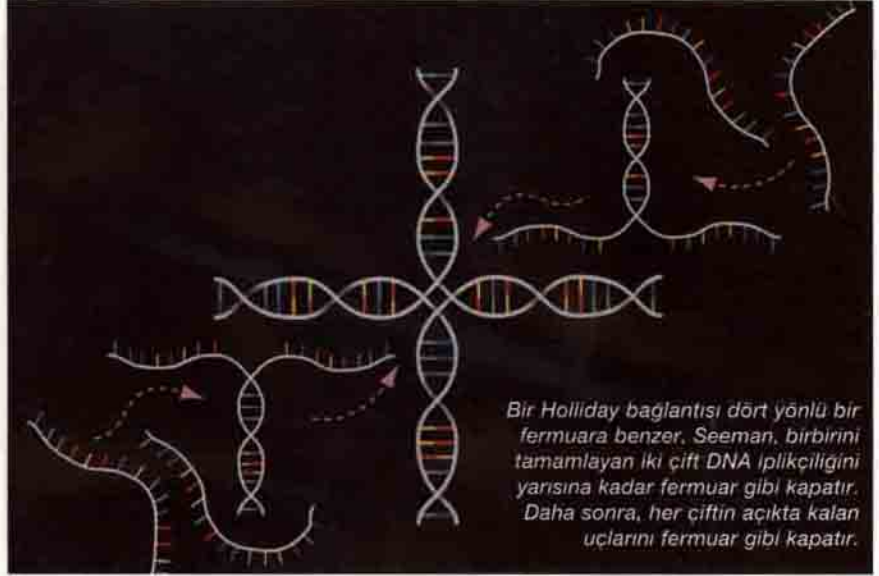
bu dört çeşit bazdan A ile T arasında ve G ile C arasında kimyasal bir çekim vardır.

Bu çekimin sonucu olarak, örneğin AGGA içeren bir DNA zinciri, tamamlayıcı zinciri olan TCCT'ye tutunur. Bunların hiçbirisi yeni bilgi değil elbette; bu konu 1950'nin başlarında James Watson ve Francis Crick'in çalışmalarının nobel ödülü kazanmasından beri biliniyor; ama Seeman'ın uyguladığı yöntem yeni. Bilim adamları, geleneksel olarak, birbirini tamamlayan DNA zincirleri arasındaki çekimi, sadece hücrelerin içinde doğal olarak bulunan uzun çift zincirlerin yaratılmasında bir yol olarak düşünüyorlardı. Seeman, bunun çok daha ilginç nesneler yapmada kullanılabileceğini fark etti.

Bu görüş, DNA'ya biraz uzaktan bakabilip, genetik şifreden daha fazlasını algılayabilecek birilerini gerektiren türden. Seeman bu tanıma uyuyor. DNA'yı moleküler Tinkertoy'lara dönüştürmeyi ilk düşündüğünde genlerden uzak bir bilim dalıyla ilgiliniyordu; kristal yapabilmenin yollarını arıyordu.

1970'lerin sonlarında, Seeman, Albany'deki New York Eyalet Üniversitesi'nde kristalograf olarak görev yapıyordu. Kısa DNA parçacıkları gibi ufak biyolojik molekülleri alarak, bunlardan kristal oluşturmayı düşünüyordu. Fikir, kristalize olmuş moleküller üzerine X-ışını göndermek ve diğer taraftan çıkan radyasyonu analiz ederek molekül yapılarını incelemektir. Bu tür X-ışını kristalografisi bir molekülün yapısını -bir atomun diğerlerine göre konumunu- tam olarak belirler; bu da bir molekülün işleyişinin anlaşılması için gereklidir. İlaç firmaları, örneğin proteinlerin ve vücuttaki diğer moleküllerin yapısını öğrenmek için büyük servetler harcarlar, çünkü bu şekilde, onların işlevlerini taklit edebilecek ya da yapılarıyla oynayabileceklerdir.

Seeman, DNA'yla ilgili bir molekül olan RNA üzerine uzmanlaştı ve çok sayıda RNA parçasının yapısını tanımlamayı başardı. Ancak bundan sonra ilerleme önemli bir engelle karşılaştı; Seeman bunu "İlgilendiğim kristallerin hiçbirini üretemedim." sözleriyle dile getiriyor. Düzensiz şekilli ve oymalı olan biyolojik moleküllerin düzgün ve eğilmeyecek bir



Bir Holliday bağlantısı dört yönlü bir fermuara benzer. Seeman, birbirini tamamlayan iki çift DNA iplikçiliğini yarisına kadar fermuar gibi kapatır. Daha sonra, her çiftin açıkta kalan uçlarını fermuar gibi kapatır.

kristal biçiminde dizilmesini sağlamak, zor ve dikkat gerektiren işlerden biri; bir araştırma grubunun tek bir karmaşık molekülü kristalize etmek için yıllarca uğraşması hiç de olağandışı değil. Bazen, araştırmacı zor bir molekül seçebilir ve onu asla kristal haline getiremeyebilir. Seeman'ın içinde bulunduğu durum da böyleydi ve bu da onu huzursuz ediyordu. Seeman bunu "Bir şeyler yapmalıydım, kristalleri olmayan bir kristalograf zor durumda demektir." diye ifade ediyor. Öyle ki, meslektaş Bruce Robinson, kristalografıyla ilgili olmayan bir konuda yardım istediğinde Seeman buna olumlu cevap verdi. Robinson, 2 DNA zincirinin bir araya gelmesi sonucunda oluşan dört kollu kesişimler olan Holliday bağlantılarıyla ilgileniyordu ve Seeman'dan Holliday bağlantısının fiziksel bir modelini yapmasını istemişti. 1979 yılının başlarındaki bu araştırma, Seeman'ı DNA ile uğraşmaya yöneltti.

Holliday bağlantısını tanımlamak gerekirse, işe öncelikle her biri 20 baz uzunluğundaki 4 DNA zinciriyle başlamak gerek. Şimdi iki zincir yarisına kadar fermuar gibi kapanmıştır; böylece her biri 10 baz uzunluğunda bir çift zincir oluşur. Aynı işlem kalan iki zincirle de tekrarlanır. İki tane T şeklinde düzenek elde edilir; her T'nin dikey çizgisi çift, üst çizgisi ise tek zincir halindedir. Her iki T'den birer tek zincirli kol alınır ve ikisi bir araya getirilerek, fermuar gibi kapatılır, aynı işlem sonra da kalan iki ucla tekrarlanır. Oluşan çift zincirlerin her biri

10 baz uzunluğunda olan dört kollu tek bir DNA molekülüdür. Dört zincirin bu şekilde birleştirilmesine Holliday bağlantısı adı veriliyor.

DNA üzerinde çalışanlar, bu yaşam molekülünün, hücrelerdeki çeşitli süreçler sırasında bu tür tipik olmayan şekiller aldığını iyi bilirler. Bunlar çoğu zaman spagetti parçaları gibi görünebilirler; ancak DNA ara sıra kendini Holliday bağlantısı şeklinde ya da daha ilginç yapılanmalarla yeniden düzenler. Bu şekillerin yarattığı olanakları Seeman'dan önce hiç kimse görememişti.

Seeman, Holliday bağlantısı modelleriyle uğraşırken, DNA zincirlerini oluşturan temel baz dizilişlerini değiştirerek, onları olduklarından daha farklı davranır hale getirebileceğini fark etti. İki özdeş zincir çiftinden yapılmış olan tipik bir Holliday bağlantısı hareketlidir; zincirlerin iki ucu fermuar gibi kapanarak bir araya gelirken diğer ikisi açılan fermuar gibi birbirinden ayrılacağı için kesişim noktaları hareket edebilir. Eğer kesişim yeterince ileri kayarsa, Holliday bağlantısı iki çift zincire ayrılır. Bununla birlikte, Seeman 4 tek zincirin eşleşme planını, Holliday bağlantısının yerini sabitleştirecek şekilde tasarlayabileceğini fark etti.

Kısa bir süre sonra, kendini 4 kollu bağlantılarla sınırlamasına gerek olmadığını farkına vardı. Kesişimleri sekiz kolda oluşturabilirdi. Doğada, 3 ya da 6 kollu DNA bağlantıları bulunmuyor olabildi ama bunu kendisi yapabildi.



Bu bağlantıların nasıl yapılacağını hesaplamak zihinsel açıdan zor, ama eğlenceliydi; ancak herhangi bir işe yarayacak mıydı? Seeman bunu bilmiyordu ama tüm bunları araştırmasının gerektiğini düşündü.

Ardından, düşünme ihtiyacı duyduğu zamanlarda genellikle yaptığı şeyi yaptı: "Kampüsteki pub'a gittim ve bir bira ısmarladım." Ve orada oturup birasını yudumlarken birden kafasında bir şimşek çıktı. Seeman sözlerine, "6 kollu bağlantıları düşünüyordum ve Escher'in 'Derinlik'i aklıma geldi." diyerek devam ediyor. Ünlü Escher çizimi, bir başı, bir kuyruğu ve yukarıyı, aşağıyı, sağı ve solu gösteren dört belirgin yüzgeci olan, stilize edilmiş üç boyutlu bir uçanbalığı gösteriyordu. Balık, Seeman'a 6 kollu bağlantıları çağrıştırdı. Kolun biri başa, biri kuyruğa, diğer dördü yüzgeçlere doğru; böylece, bağlantılarını Escher'in balığı çizdiği gibi düzenlemeyi düşündü. Her bağlantı, diğer 6 bağlantıyla temas halinde olacaktı; yukarıda ve aşağıda, önde ve arkada, sağda ve solda. Balıklar arasında boşluk bırakan Escher'den farklı olarak bağlantıları uç uca ekleyecekti ve bir gökdelenin çelik iskeletini andıran ve DNA'dan yapılmış ama daha küçük bir dokuya sahip olacaktı.

Bu düşünce, molekülleri kristal düzenine getirmekte zorlanan bir kristalograf için oldukça heyecan vericiydi. Eğer, bu tür bir DNA dokusu oluşturabilirse, bunu, molekülleri düzgün tutabilmek için bir yapı iskeleti olarak kullanabilir ve hemen her

moleküllü istediği gibi kristalize edebilirdi. Seeman, bu rüyayı inatla 16 yıldır gerçekleştirmeyi hayal ediyor ve "Sanırım sonunda hedefimize doğru yaklaşıyoruz" diyor.

Seeman'ın o gün kampüs pub'ında kendisi için belirlediği özel hedeften daha da önemlisi, bunun ifade ettiği düşünce değişikliği. Daha önceki, 4 kollu, 6 kollu ya da benzeri bağlantıları, tasarlaması ya da üzerinde çalışması ilginç ama daha fazla önemi olmayan izole nesneler olarak görüyordu. Birdenbire, akıllıca bir öngörüyle bu DNA parçacıklarını, daha karmaşık ve büyük yapılar oluşturmak için kullanılabilecek yapıtaşları olarak görmeye başladı. Bunun olumsuz yanı ise, öngörüsünün zamanına göre birkaç yıl ileride olmasıydı.

1980 yılında DNA üzerinde çalışmak için kullanılan malzemeler oldukça ilkel. Örneğin, DNA sentezini ele alın: Bir 6 kollu bağlantı meydana getirmek için Seeman'ın her biri en az 16 baz uzunluğunda -20 baz olsa daha iyi- 6 ayrı zincire ihtiyacı vardı. Ancak, bu fikrin pub'da aklına gelmesinden bir yıl sonra, sadece 12 bazlık bir DNA zinciri oluşturmak için, en yeni teknikleri kullanan mükemmel bir kimyager bile yaklaşık üç aya gereksinim duyacaktı. Sadece bir DNA Tinkertoy'u yapmak için her biri 16 bazlık 6 zincir kullanmak ise söz konusu bile olamazdı.

Şans eseri, gereken teknolojik gelişmeler tamamlanmak üzereydi. 1980'lerin başından başlayarak kimyagerler hızlı bir biçimde daha uzun

DNA zincirleri oluşturmak için yöntemler geliştirdi ve sonra bunu otomatikleştirdiler. Günümüzde ise ticari olarak pazarlanan makineler 100 bazdan uzun ısmarlama zincirler yapabiliyor. Örneğin, Seeman'ın bir DNA küpü yapmak için 100 bazlık bir zincire ihtiyacı olduğunda, sentez makinesine bağlanmış olan bilgisayara gerekli özellikleri giriyor ve 18 ya da 20 saat içinde istediği DNA küpüyle dolu test tüpünü alabiliyor.

Seeman, programının geçtiğimiz on beş yıl içinde moleküler biyolojideki birtakım gelişmelerden yararlandığını belirtiyor. DNA'nın hücre içindeki rolüne ilişkin bilgileri araştıran araştırmacılar, sadece DNA zincirlerini sentezlemek için değil, kesmeyi, yapıştırmayı, saflaştırmayı ve analiz etmeyi de gerçekleştirmek için teknikler geliştirdiler. Seeman bu teknikleri DNA ile yapılandırma işlemine uyarladı.

Seeman, 1980'lerde iddialı programını sürdürmek için zemin hazırladığını hatırlatıyor ve "Bu, DNA sentez cihazı almamızdan beş yıl önceydi" diyor. Seeman, tamamen yeni bir bilim dalında kendini yetiştirmek zorundaydı Düşüncelerini, 4 kollu bağlantılar ve dikdörtgenler gibi basit, iki boyutlu yapılar oluşturarak test etmeye başladı. Bunlar bile çok kolay değildi. Seeman bu durumu "Moleküler biyoloji tekniklerinden herhangi birini bile kullanmayı bilmiyordum" sözleriyle anlatıyor; "Yanlış yapmamayı öğrenmeniz gereken milyonlarca küçük şey var". Tepkimeleri çok yüksek ya da çok düşük sıcaklıklarda gerçekleştirmek, belirli bir enzimden çok az ya da çok fazla eklemek, enzimin çözeltide yanlış yoğunlukta olması... Bunların her biri başarısızlığa yol açabilirdi.

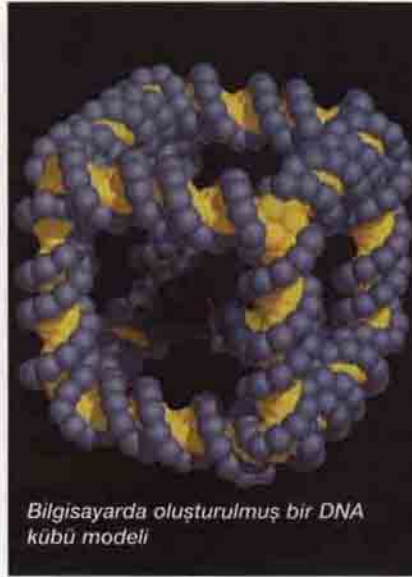
Seeman sonunda başardı ve 1988 yılında üç boyutlu moleküllere geçmek için yeterince öğrendiğine karar verdi. Bir küp yapabiliyordu. Bu adım DNA'lı yapı programının tanımlayıcı çalışmasıydı. Seeman, ilk defa olarak doğada bulunandan daha karmaşık bir şeyleri yan yana koydu. Seeman'ın laboratuvarlarında uzun ikili sarmalların birbirine eklenmesinden fazlası yapıyordu. Bu laboratuvarlar diğerlerinden ayıran da, burada karmaşık moleküllerin birleştiriliyor olu-

şuydu ve çok sayıda yeni DNA yapı teknolojilerinin gelişmesine yol açtı. Örneğin, Seeman, DNA'yı biçimlendirmek için hazırlanan bilgisayar yazılımlarını, amaçlarına uygun olmadığı için hiç kullanmazdı. Görüşlerini "Moleküler biyoloji için yeterli olan, bizim yaptığımız işlemler için genellikle yeterli değil" sözleriyle belirtiyor. Bunun yerine, tüm yapılarını önce tüpler ve renkli bağlantılardan oluşan bir DNA Erector setinde denedi.

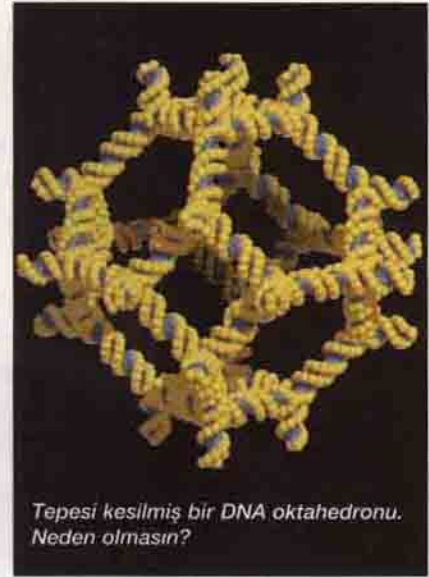
Seeman'ın küpünü yaparken kullandığı yol, 8 yaşındaki bir çocuğun Tinkertoy'larla oluşturduğundan farklıydı. Eşit boyda 12 DNA parçacığını alıp, onları bir küp oluşturacak biçimde bir araya getirmek kolay değil. Sorun köşeleri yapmaktaydı; DNA dünyasında, bir Tinkertoy setindeki delikli yuvarlak parçalar gibi bağlantılar yoktu. Teorik olarak, her biri 3 kollu bağlantı olan 8 köşeli bir kübü yapmak mümkün olabilirdi. Ancak, Seeman bu seçeneği hiç göz önüne almadı. Bu işlem 8 ayrı birleştirme adımı gerektirecekti ve Seeman'a göre bu 8 adım oldukça yetersizdi. Bunun yerine, Tinkertoy mantığına tamamen yabancı; ancak DNA için oldukça doğal olan bir yöntemi yeğledi.

Bu yöntem, uç noktalarının birbirine eklenerek bir halka oluşturduğu 2 adet 80 bazlık DNA zinciri ile başlıyor. Bu iki parça en sonunda kübün sağ ve sol yanları haline gelecek. Seeman her halkaya her biri 40 baz uzunluğunda olan ve büyük parçayla fermuar gibi birleşerek bir çift yarım küp -her köşeden birer kolun sarktığı kareler- oluşturan 4 tane DNA zinciri daha ekliyor. Son olarak, kolları uç uca ekleyerek 2 yarım küpü birleştiriyor. Sonuçta oluşan küpün, her biri 20 baz uzunluğunda çift DNA zinciri olan 12 kenarı ve 3 kollu bağlantı şeklinde 8 köşesi var.

Seeman, küpü yaptıktan üç yıl sonra, tepesi kesik bir oktahedron -alt ve üst kısmı kesilip atıldığı için, altı kare ve sekiz altıgen kenarı bulunan bir cisim- oluşturmak için daha karmaşık bir yöntem izledi. Bu karmaşık yapının çözeltide kaymasını ve istemediği yerlere bağlanmasını önlemek için, onun parçalarını bir teflon desteye tesbit etmesi gerekiyordu. Bu başarı ona, istediği takdirde daha karma-



Bilgisayarda oluşturulmuş bir DNA kübü modeli



Tepesi kesilmiş bir DNA oktahedronu. Neden olmasın?

şık nesneleri de oluşturabileceği konusunda güven verdi. "DNA'dan hemen her topolojik cismin nasıl oluşturulabileceğini bildiğimize inanıyoruz". Ancak Seeman'ın, DNA Tinkertoy'ları hazır olmadan önce, çözmesi gereken büyük bir problem daha var.

Yapım sırasında kullandığı kısa DNA iplikleri katı olduğu halde, bir araya geldikleri bağlantılarda bu görülmez; bağlantılar gevşektir. Bunun, Tinkertoy'lardaki olağan tahta bağlantılarının yerine lokum kullanılması gibi olduğunu söyleyen Seeman, bu yüzden, örneğin kübün köşesinin tam bir dik açı şeklinde kalamadığını belirtiyor. Bu da, kenarların hareket etmesine ve kübün, sanki söndürülmüş gibi çökmesine sebep oluyor.

Seeman, daha önceden de bağlantıların gevşek olduğunu zaten biliyordu, ama üç boyutlu cisimler de oluşturabileceğini kanıtlamak için yavaş yavaş devam etmeyi yeğledi. Ardından, oluşturduğu yapıları daha katı hale getirmenin yolunu aramaya başladı. Simdi, bunu bulduğunu düşünüyor.

Çözüm iki aşamalı. Seeman ilk olarak, temel yapıtaşları olan dikdörtgenleri üçgenlerle değiştirdi. Eğer bir dikdörtgenin köşeleri gevşekse kenarlar hareket edebilir; ama bir üçgende köşeler gevşek olsa bile, bu sorun yaratmaz. Fakat, eğer iki üçgen birleştirilirse, birleşme noktası katı olmadığı sürece birbirlerine göre bağıl olarak hareket edebilirler. Seeman bunun nasıl önleneceğini bildiğini düşünüyor. Bunun için, birbirine yakından bağlanmış iki Holliday bağ-

lantısı içeren, "çift kesişmeli molekül" (double-crossover molecule) olarak adlandırılan katı bir bağlantı tipi geliştirdi. Bu moleküller, Seeman bir düzineden daha fazla sayıda kısa parçacığı bir sırada birleştirirken, onların kendi üzerlerine sarkarak halka oluşturmasını önlemesini sağladı. Seeman, üçgen yapıları "çift kesişmeli molekül"lerden oluşan düz çizgilerle birleştirmenin, iki boyutlu sert yapılar oluşturmaya olanak sağlayacağına inanıyor.

Seeman, üçgenlerden oluşan bir dizi sert iskeletin üç boyutlu taslağını yaptı. Seeman, yapısal dayanıklılığını üçgenlere borçlu olan meşhur kubbenin mühendisine gönderme yaparak, "Bu tam bir Buckminster Fuller" diyor. Jeodezik kubbe gibi, "çift kesişmeli molekül"lerden yapılan üç boyutlu iskeletler de çok sağlam ve katı olabilir.

Şimdilerde Seeman, "Bu tür işler için zaman sınırı koyamazsınız." demesine rağmen, iki yıl içinde bitmiş olacağını ümit ederek, "çift kesişmeli molekül"leri üçgen şeklinde iki-boyutlu çerçeveler haline getirmeye çalışıyor. Ondan sonra üç-boyutlular üzerinde çalışmaya başlayacak; sonunda bu yapıları, biyolojik molekülleri kristalize etmekte kullanabileceği bir yol bulmayı ümit ediyor. Şansı yaver giderse, bu işi kampüs barındaki o günün 30. yıldönümünde bitirebilir. Bu da iyi olurdu; 30 yıl, Tinkertoylarla oynamak için çok uzun bir zaman.

Pool, R. *Discover*, Şubat 1997
Çeviri: Bezen Hindistan