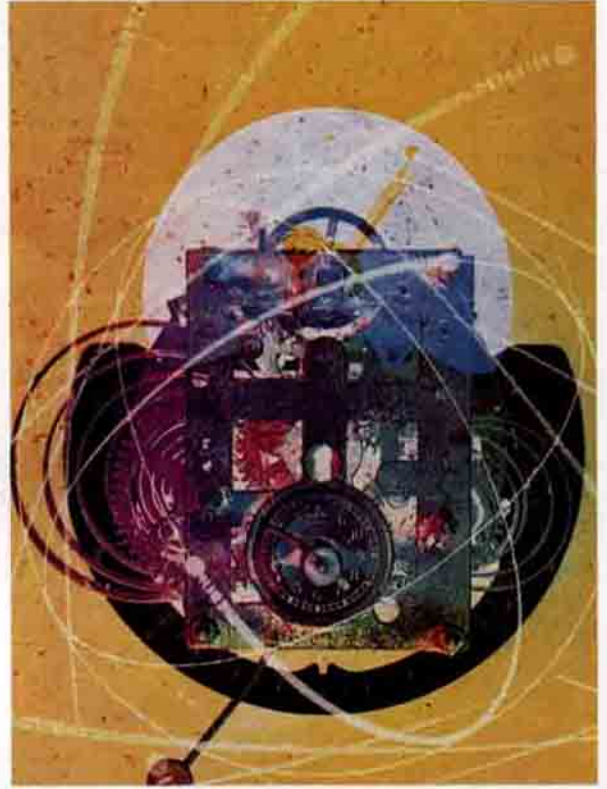


# Zamandan Daha Mükemmel!..

# Atom Saatleri

*Boulder'da bir laboratuvarında, bir fizikçi 300 milyon yıl boyunca bir saniye bile şaşmayacak bir saat yapıyor. Yan ofiste bir meslekdaşı ise 30 milyar yıl boyunca tam çalışabilecek başka bir saat üzerinde çalışıyor. Bunları bitirdiklerinde daha iyileri için yeniden çalışmaya başlayacaklar.*



**R**OBERT DRULLINGER, son atom saatini yapmadan önce, sökme safhası olarak adlandırabileceği bir dönem geçirmiş. ABD'de Boulder, Colorado'da Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) için çalışan Drullinger, 1950'de Fransız fizikçi Alfred Kastler'in Nobel ödüllü keşfi olan optik pompalama ile tanıştı. Optik pompalama, Drullinger'in atom saatinde zaman göstergesi olarak kullanabileceğini düşündüğü, atomları idare edecek bir ışık demeti kullanıyor. Ancak herşeyden önce doğru bir ışık demetini ihtiyacı vardı.

Lambaların ışığı düşündüğü için yeterince güçlü değildi. Sadece lazer bunu yapabiliirdi. Drullinger her lazerin değil, ancak arkanızı döndüğünüzde bile gece gündüz, aylarca ve yıllarca, bir saat dakikliğinde ışıyabilecek lazerlerin kullanılabilceğini söylüyor. Buna ilk adaylar, 1980'lerin başında, kompakt diskçalarlarda ticari olarak kullanılmaya başlanan, diyod lazer denen mikroskopik cihazlar. CD çalarlar pazara çıkınca, Drullinger ve iş arkadaşları gidip bir tane almışlar, parçalara bölüp diyod lazeri ayırmış, kalanını atmışlar ve yapacakları atom saatinde kullanmak üzere işe girişmişler. Drullinger birkaç yıl boyunca, lazer doğrudan satılmaya başlayana kadar böyle yapmaya devam edildiğini söylüyor.

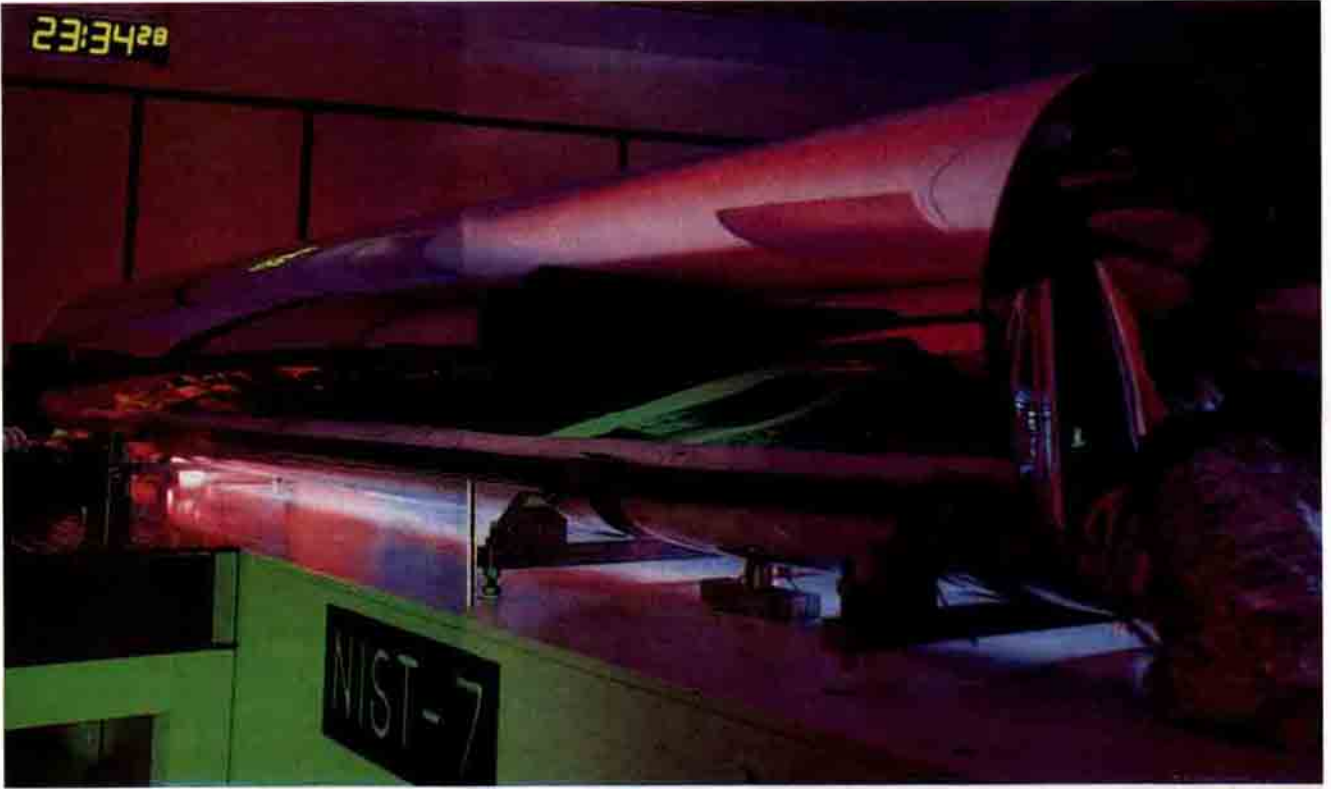
Kastler'in dehasından müzik seti teknolojisi gereçlerine kadar devam eden yolculuğun en son ifadesi dünyanın en iyi iki saatinden biri olan NIST-7. 3 metre uzunluktaki mucizevi gümüş silindirik saat, Rocky Dağları eteklerine kurulmuş bir NIST laboratuvarında duruyor ve batıya doğru bakıyor. Güneş o yönde saate paralel olarak hareket ediyor ve Güneş radyasyonunun Dünya manyetik alanındaki etkileşimi bile saatin hassasiyetini bozmuyor. Dahası, öyle mükemmelere yakın ki, en azından şu an için NIST-7 ölçülebilenin üzerinde.

Drullinger, NIST-7'nin, bir saniyenin ondördüncü ondalık hanesine kadar tam çalıştığı için, ancak bazı erişilmez ideal hedefler ve bazı mitolojik olgularla karşılaştırılabileceğini söylüyor. Başka bir deyişle, NIST-7 bir saniyenin geçişini kaydettiğinde, iyi bir kuvars kol saatinin yapabileceği gibi, bir saniyenin milyonda birini saymıyor. NIST-7'nin saniyeleri, ideal bir saniyenin trilyonda birinin yüzde birinden daha duyarlı; NIST-7 o kadar çalışsaydı, 3 milyon yılda, tek bir saniye bile şaşmayacaktı.

NIST-7, aynı zamanda kendi türünün son örneği olan bir dinosor. İyi bir saat olduğu düşünülüyor, ancak Drullinger'e göre bunun gibi bir tane daha yapmak için pek bir neden yok. Bundan sonra üretilecek saatlerin daha has-

sas olması gerekiyor. Drullinger, ideal saniyenin onaltıncı ondalık hanesinde birine kadar hassas olabilecek bir atom saati üzerinde çalışıyor (300 milyon yılda bir saniye hata); yan laboratuvarında David Wineland'in önderliğinde bir grup araştırmacı bir saniyenin onsekizinci ondalık hanesine kadar tam işleyeceğini umdukları, bir sonraki atom saati üzerinde çalışıyorlar. Bu da, saat ideal zaman göstergesinden bir saniye sapıncaya kadar en az 30 milyar yıl geçecek demek.

Wineland'ın bundan iki aşama sonraki saat üretimiyle birlikte NIST'in saat imalatçıları yeni bir kronometrik hassaslık talebiyle karşılaşabilirler, ancak bu gerçekleşecek gibi gözüküyor. NIST bilim adamları 1950'lerde (enstitü o zamanlar Ulusal Standartlar Bürosu, NBS, olarak biliniyordu) saat yapmaya başladıklarından beri, zaman göstergelerinin doğruluğu her yedi yılda bir onda bir oranında ilerledi (saniyede 0.0000001 saniyeye kadar doğru olan NBS'in ilk atom saatlerinden, saniyede 0.0000000000000001 saniyeye kadar doğru olan NIST-7'ye kadar). Araştırmacıların yeni bir saat geliştirmeleri en aşağı on yıl sürüyor, ancak yaptıkları herşey hemen ticari uygulama alanı buluyor. Örneğin, NIST-7'yi yapmaya başladıklarında, saat imalatçıları saniyeyi 14'üncü ondalık hane kadar doğru



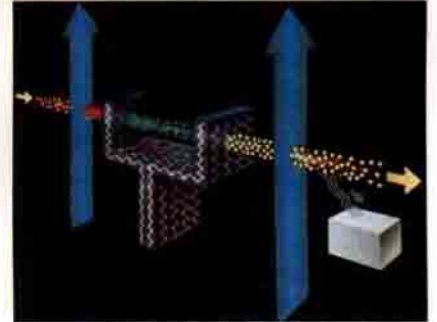
gösterecek bir saat için acil bir ihtiyaç duymuyorlardı. Buna rağmen, 1993'te saat tamamlandığında, saat imalatçıları saniyenin 12. ondalık hanesine kadar tam gösteren atom saatlerini 50 000 ABD dolarına satıyorlardı ve bunların ayarlanmaları için daha iyi çalışan bir saate ihtiyaçları vardı.

Şimdi NIST'in saat imalatçıları kronometrik doğruluğa yönelik talebin uzun vadeli olarak doyurulamayacağı düşüncesiyle çalışıyorlar. Bu gereksinim öncelikle bilim alanında ortaya çıkıyor, ancak ticari kullanıcılar da geri kalmıyorlar. Drullinger buna kullanıcıların hiyerarşisi diyor. İlk sıradakiler, talep ettikleri bakımından başı çekenler: milisaniye pulsarlar olarak bilinen yıldızların, olağanüstü dakik atış periyodlarını ölçen astrofizikçiler ve derin uzay roketlerine yol direktiflerini vermek için saatlere gerek duyan NASA. Bundan sonra daha kolay bir topluluk geliyor: Telekomünikasyon, küresel konumlandırma sistemleri, güvenlik ve savunmada çalışanlar. Hepsi saniyenin milyarda biri doğrulukta sinyal göndermek ya da almak istiyorlar.

Başka bir kesim ise, doğru zamanı ya da doğru frekansı yakalamanın kendileri için önemli olduğu büyük bir ticari kullanıcılar topluluğu. Örneğin, televizyon ve radyo istasyonları, elektromanyetik spektrum üzerinde belirlen-



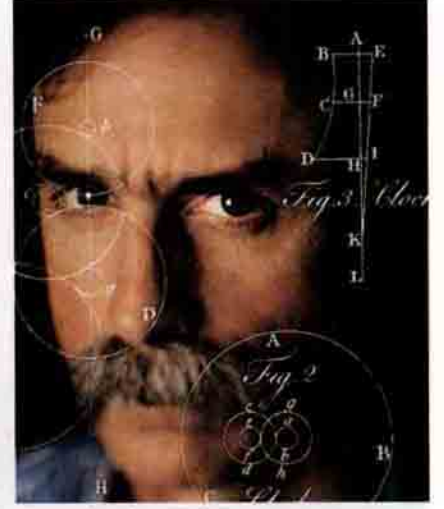
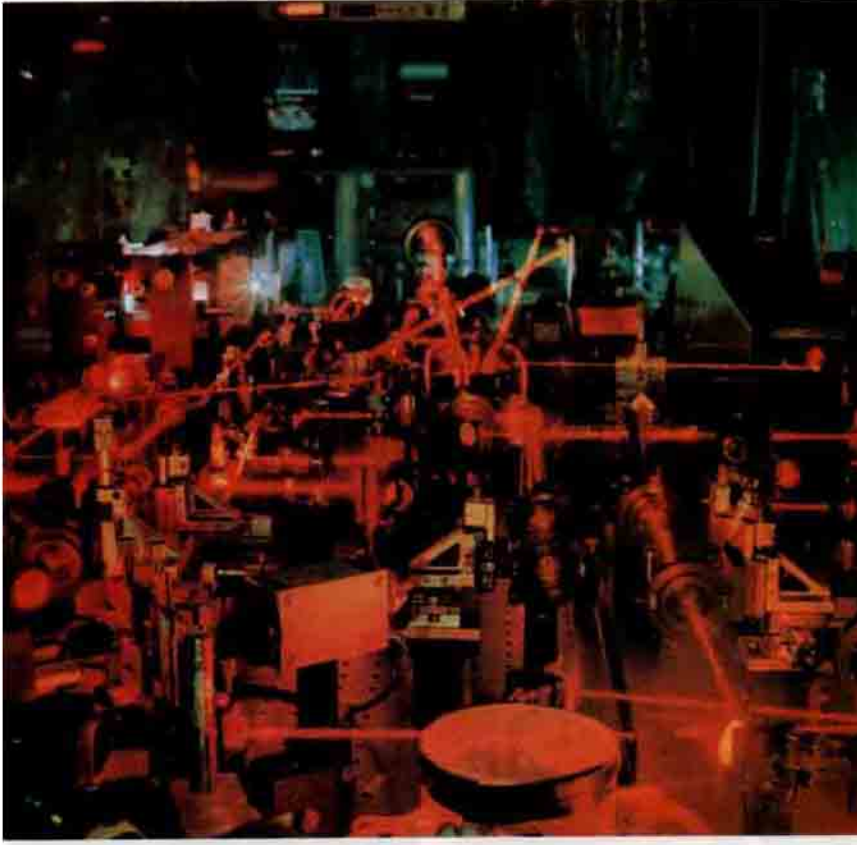
miş bir frekansta yayın yapmak zorundadırlar-örneğin saniyede 102,5 milyon salınımına karşılık gelen 102,5 megahertz-ve bu yüzden de saniye uzunluğunu kesin bir doğrulukta bilmek zorundalar. Aynı şekilde, iki bilgisayar aralarında iletişim sağlamak için, ne zaman dinlemeye başlayacaklarını ve ne zaman dinlemeyi durduracaklarını ve göndermeye başlayacaklarını bilmek zorundalar. Eğer bilgiyi, normal bir bilgisayardaki modem hızı olan saniyede 14 milyon devir hızında gönderirlerse, bunu saniyenin milyonda birine ayarlamaları daha iyi olabilirdi. Aslında, bir saati olan ve saatin kaç olduğunu öğ-



*NIST-7'nin içinde sezyum atomları, onları tek bir duruma sokan lazer içinden geçiyorlar. Daha sonra iki mikrodalga bölgesinden geçiyor ve durumlarını değiştirmeye başlıyorlar. İkinci bir lazer, durumlardan birini veya ötekini seçmeye zorluyor ve nihayet bir detektör kaç tanesinin durum değiştiğini sayıyor. NIST-7'nin yaratıcısı, Robert Drullinger.*

renmek isteyen, ya da iki saati olup aynı zamana ayarlama ihtiyacı duyan biri, bunları ayarlamak ve doğru kalmalarını sağlamak için daha iyi bir saate ihtiyaç duyar. Modern toplumun yapısı artık, düzenli olarak saniyenin milyarda birine eş-zamanlandırılmış sinyaller gönderen ve alan elektronik teknolojisiyle örülmektedir.

Bununla beraber, mükemmel hassaslıkta zaman göstergesine duyduğumuz doyurulmaz ihtiyaç biraz sorunlu gözüküyor, çünkü saatlerin karşılaştırılabileceği evrensel bir saniye mevcut değil. Saniyenin uzunluğu insanların anlaşması sonucu ortaya çıkmış.



David Wineland'in laboratuvarında, araştırmacılar civa iyonlarını gütmek için lazer demetleri kullanıyorlar.

1820'lerde Fransızlar saniyeyi "ortalama güneş gününün 86 400'de biri olarak tanımlamışlar. 86 400, 24 (saat), 60 (dakika) ve 60'ın (saniye) çarpımıyla elde ediliyor. Eğer ortalama güneş günü kesin bir kavram olsaydı bu tanımlama yararlı kalabilirdi. Ancak, Drullinger'in dediği gibi "Dünya çok kararlı bir topaç değil; hafifçe kıpırıyor, duraksıyor ve yalpalıyor." Ayrıca, her yıl saniyenin on milyarda birkaçı kadar yavaşlıyor. Bütün bunlar Dünya'nın dönüşünün modern standartlarda çok iyi bir saat olmadığını gösteriyor.

Herhangi bir saat, sadece periyodik tekrarlayan bir olayı izleyerek çalışan bir alettir; salınan ya da titreşen saat, bir parçaya- örneğin sarkaçlı saatin sarkacı ve bu salınımları sayan ve saat kollarını döndüren bir saat mekanizmasına sahiptir. Öyleyse, ideal bir saat, mükemmel düzgünlükle ve kararlılıkla salınan ve istediğiniz süre boyunca da böyle kalabilen bir osilatörü gerektirir. Dahası bu osilatör, bir saatten ötekine değişmeli, mükemmel bir şekilde kopya edilebilmelidir. Sarkaç ya da kol saatlerindeki kuvars kristallerde durum böyle değil. Kuvars kristaller, elektrik akımıyla uyarıldığında istenen belirli bir frekansta titreşir. Bu titreşim saatin osilatörü olarak görev yapar; ancak frekan-

sı-kristalin saniyedeki salınım sayısı-kuvarın kalınlığına bağlıdır. Öyleyse, iki kuvars saatin ayarları ancak saat imalatçısı kuvarsları aynı kalınlıkta kesebilirse aynı olabilir. Drullinger, bunun gibi, sarkaçlı saatlerde, bir sarkacın bir diğerinden daha uzun olabileceğini söylüyor.

Atomlara daha çok güvenilebilir, çünkü elektromanyetik enerjiyi salma ve soğurma frekansları kuantum mekaniği yasalarıyla kesinleştirilmiştir. Bu yüzden, 1967'den beri saniyenin resmi olarak uzunluğu atom standartlarına göre belirlenmektedir: bir saniye, sezyum 133 atomlarının belirli bir enerji seviyesi geçişine uğradıklarında yayılan ya da soğurulan ışımının 9 192 631 770 salınımının süresidir. Eğer, uygun şekilde kullanılırsa, herhangi bir sezyum 133 atomu, diyaazonun öz frekansında titreşmesi ve aynı frekansta ses dalgasını yayması gibi, bu frekansta enerjiyi açığa çıkaracak ya da soğuracaktır. Sezyum bulabilecek ve bir atom saatini bir araya getirecek yeteneği olan herhangi biri bunu yapabilir ve saatinin her sezyum atom saati ile aynı kuantum temposuna uyacağından emin olur.

Wineland'ın belirttiğine göre sezyumun sihirli bir yanı yok; üstünde çalışılması kolay olduğu için, hemen he-

men aynı özelliklere sahip yarım düzine iddialı aday arasından standart olarak seçilmiştir. Drullinger sonraki saat üretimleri için hala sezyum kullanıyor. Wineland ise bundan sonraki üretimler için cıvayı seçti.

Hem Drullinger hem de Wineland, aynı saat yapımı stratejisini kullanıyorlar. Bu da, rezonanstaki bir atomu rahatsız edecek her dış etkiyi sistematik olarak hesaba katmak. Atomun kuantum doğası, evrenin sunacağına yakın mükemmellikte kopya edilmiş osilatör sağlıyor. Atomun dışındaki dünya denkleme girdiğinde, hassasiyet düşüşe geçmeye başlıyor. Örneğin, atomlar birbirleriyle çarpışabilirler ya da kaçak elektromanyetik ışınım, ve manyetik alanlar bunları etkileyebilir, ve bütün bunlar da atomun içindeki hassas zaman mekanizmasını sarsabilir. Atomların kendi hareketleri bile, aldıkları mikrodalgaların görünen frekanslarını değiştirecektir. Doppler kayması denen bu etki, popüler olarak tren düdüğündeki frekans kayması şeklinde bilinmiyor. Eğer, atom size doğru hareket ediyorsa frekansı daha yüksek, sizden uzaklaşıyorsa da daha alçak bir değere itilecektir.

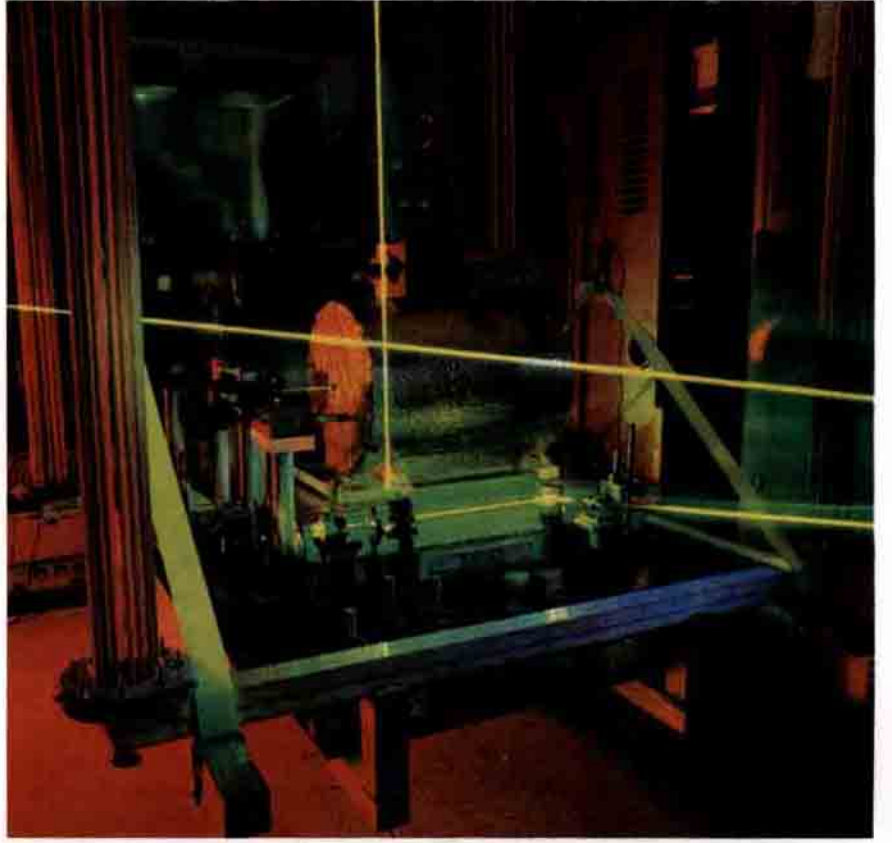
Bu yüzden, atom saati imalatçıları, gerektiği takdirde herbir bozucu etkiyi ayrı ayrı yok etmeye çalışıyorlar. Yapacakları işler için uzun ve etraflı bir listeleri var. Listedeki her maddenin yerine getirilmesiyle atom saatlerinin duyarlılığını artırıyorlar. Liste atomla başlıyor. Atomun salınım frekansı çok doğru ve dış etkilerden yalıtılmış olmalı. Bütün atomlar, elektromanyetik ışınımın ka-



*Lastik bantlarla asılı bu vakum sistemi dünyanın en kararlı optik lazerini taşıyor. James Bergquist. (üst resim)*

rakteristik frekanslarında enerji açığa çıkarıp soğururken, bu frekanslar kuantum mekaniği yasalarına göre, atomlar etrafında bir yörüngeden diğer yörüngeye sıçrayan elektronlara karşılık geliyorlar. Elektronlar bir yörüngeden diğerine çabucak atlıyorlar ve bunu daha çabuk yaptıklarında ışınım frekanslarının doğruluğu azalıyor; açığa çıkarıp soğurdıkları enerji biraz "bulanıklaşıyor" denebilir. Drullinger, bunun Heisenberg'in belirsizlik ilkesinden kaynaklandığını söylüyor. "Bir şeyi daha kısa zamanda yapmanız gerekiyorsa, onun hakkında daha az şey bilirsiniz. Bu değişim çok çabuk olduğu için, ne olduğuna dair kuşku bırakıyor. Sonuç ise bulanık bir enerji işareti."

Saat imalatçıları enerjilerini kesin olarak tanımlanmasını istiyorlar. Bu da, elektronların yeni bir enerji seviyesinde mümkün olduğunca uzun kalabilmeleri demek. Sezyum 133 atomları, sadece en dıştaki elektronun manyetik alanının doğrultusuna göre değişen, hiperfin durumları olarak bilinen iki enerji seviyesine sahipler. O elektronun manyetik alanı, atomun çekirdeğinin manyetik alanıyla aynı yöne ya da ters yöne doğru yönelebilir, ve bu iki olasılık da hiperfin (olağanüstü ince) durumu olarak biliniyor. Bir atomun hiperfin durumu kendiliğinden birinden bir diğerine değişmiyor; ancak biri, örneğin laboratuvarında bir fizikçi değiştirirse, değişebiliyorlar. Wineland ile çalışan Chris Monroe, eğer bir atomu ayırır ve bu iki olası durumdan birine koyarsanız orada onbinlerce yıl kalacağını söylüyor.



Elektron, bir durumdan diğerine atladığında hiperfin geçişi gerçekleşiyor. Bu, atom üzerinde sadece doğru elektromanyetik frekansla açılıp kapanabilen bir düğmeye benziyor. Sezyum, ancak saniyede 9 162 631 770 titreşimlik mikrodalgalarla karşılaştığında hiperfin durumları arasında atlayabiliyor, bu da, mikrodalga fırında üretilen frekansın hemen hemen üç katına denk geliyor.

Her sezyum atomunu, tek bir istasyonu bulmayı seven bir atomik radyo olarak düşünebilirsiniz. Atomlar 9 162 631 770 Hertz'de yayın yapan istasyonu duyduklarında bir hiperfin durumundan diğerine atlıyorlar.

Şimdi, atom saatinin gerçekleştirilmesi laboratuvar osilatörü denen bir mikrodalga üretici almak ve bunu, osilatörün doğru frekansta olup olmadığını anlamak için sıçramaları bir sinyal olarak kullanarak, sezyum atomundaki hiperfin geçişinin frekansına göre ayarlamaktır. Drullinger ve arkadaşları bunu, sezyum atomlarını mikrodalgalarla sorgulamak veya sondalamak şeklinde ifade ediyorlar. Mikrodalgalar sezyum atomlarının atlamalarını sağarlarsa, o zaman saat, mikrodalgaları o frekansta tutmak için çalışır ve ideal saniyeleri belirtmek için kullanır.

Bu teknolojinin başlangıcı 60 yıl önceye, efsanevi Kolombiyalı fizikçi I. I. Rabi'ye (1944'de Nobel ödülü kazandı) ve 1950'lerde Rabi'nin teknolojisini geliştiren, üzerinde çalışan Harvardlı fizikçi Norman Ramsey'e (1989'da Nobel ödülü aldı) dayanıyor. Bunun temelinde bir geri besleme çevrimi yatıyor. Çevrim, sezyum atomu demeti üreten basit bir aletle başlıyor. Bu atomlar, bütün atomları tek bir hiperfin durumuna getiren bir filtreden (mıknatıs ya da optik pompalama lazerler) geçiyorlar. (Hepsi aynı yerde olduğu sürece hangi durum olduğu önemli değil.) Daha sonra, atomlar, mikrodalga üreticinden gelen mikrodalgalarla yüzleştiriliyorlar. Eğer, mikrodalgaların frekansları sezyumunkine çok yakınsa atomlar seçilen hiperfin durumundan diğerine atlıyorlar. Mikrodalgaların frekansı saniyede 9 162 631 770 idealine yakınsa daha çok atom çelinerek, mikrodalgaları soğuruyor ve atomlar yeni duruma atlayabiliyorlar. Atlayan atom sayısı, mikrodalga üreticinde hassas ayar yapılarak artık daha fazla artınlamazsa bu, mikrodalga üreticinin frekansının o anda sezyum frekansına kilitlemesi demektir- üretç bu durumda saniyede 9 162 631 770 salınma ayarlanmıştır. Şimdi atom

saati ideal saniyelerin, en azından teknolojinin elverdiği ideal saniyelerin sınırlarını çiziyor olacaktır.

Her ne kadar basitleştirilmiş olsa da temel senaryo budur. Bekleyebileceğiniz gibi birtakım teknolojik ince-likler var. Örneğin, Drullinger'in açıkladığına göre, sezyum atomlarını mikrodalgalarla iki kere yüzleştiriyorlar. Mikrodalgalar, NIST-7'de 1,5 metre arayla duran iki ayrı bölgeye yöneliyorlar. Bu, sezyum atomlarının mikrodalgalarla, bir kere yüzleştirildikten sonra 1,5 metre ilerleyip sonra bir kez daha yüzleştirilmeleri demek. Atomların iki sorgulama arasında mümkün olduğunca uzun yol almasına izin vererek, saat imalatçıları mikrodalga frekansını atomun hiperfin frekansına tam olarak kilitlenmeye zorluyorlar.

Buradaki mantığı anlamak için, saatinizin (mikrodalga üretici) hızını daha iyi bir saate (atom) eş-zamanlandırmayı düşünün. Bunları bir kere aynı zamana ayarlamak yeterli olmayacaktır. Sadece aynı zamana ayarlı olmalarını değil, aynı hızla çalışmalarını da isteyeceksiniz. Ayarladıktan sonra bir süre ara verip-örneğin 24 saat- tekrar bakıp, ne kadar doğru çalıştıklarını görmeyiz gerekir. Eğer saatiniz biraz yavaş ya da hızlı çalışıyorsa 24 sa-

atten sonra yeniden eş-zamanlandırabilirsiniz ve hızı ayarlayıp yeniden çalışmalarını sağlayabilirsiniz. Eş-zamanlandırma ve kontrol etme arasındaki zaman arttıkça daha iyi yoldasınız demektir. Bu yüzden, saat imalatçıları bu iki mikrodalga bölgesi arasındaki uzaklığı ellerinden geldikince büyük tutuyorlar.

Drullinger'e göre başka bir şart da, hiçbir mikrodalga bölgesinin atomları tamamen bir durumdan bir diğerine atması. İlk mikrodalga sorgulamasında atomlar yeni duruma sadece itiliyorlar. Bu, Drullinger'e göre atomların kesinlikle bir veya öteki durumda olmadığı, fakat her ikisinin karışımında bulunduğu bir kuantum mekaniği acaplığı. İkinci mikrodalga yüzleştirilmesinde yeni duruma daha yakın bir yere itiliyorlar. Ancak ikinci lazer filtresine çarpmadan önce de son duruma doğru itiliyorlar. Sezyum frekansına kilitlenen mikrodalga frekansıyla, atom saati ideal saniyeye yakın bir zamanı gösteriyor. Bundan sonra düzeltmeler listesi başlıyor. Saat imalatçıları üzerindeki her parçanın saati nasıl etkilediğini anladıklarında, bütün bu belirsizlikleri gözönüne alarak saatin zamanıyla ideal zamanın hangi ondalık noktada ayrıldıklarını hesaplayabilirler.



**Tek bir enerji durumundaki sezyum atomları altı lazer demetinin merkezinde biraraya geliyorlar. Lazer, onları mikrodalga çukurunun içine atıyor. Eğer mikrodalga frekansı doğru ise yukarı çıkarken durumlarını değiştirmeye başlıyor ve dönüşte bunu tamamlıyorlar. Bir detektör durumlarının değişip değişmediğini kontrol ediyor.**

NIST-7'nin bir öncesi, örneğin NBS-6 ideal saniyeleri 13 ondalık haneye kadar gösteren manyetik filtrenin tek bir hiperfin durum seçtiği bir saattir. Filtre, sezyum atomlarının çok az eğrilikli bir yörüngede gitmelerine neden oluyordu. Hızlı atomlar yörüngeyi yavaş olanlara göre daha dışarıdan takip ettiği için mikrodalgalara, doğru frekansta olup olmadıkları sorulduğunda farklı cevaplar alınıyordu. Sonuç, 13. ondalık hanede oluşan hatalardı.

Böylece, Drullinger ve arkadaşları on yıl boyunca, miknatısları bir lazer demeti ve Kastler'in optik pompalaması ile değiştirerek, çalışan bir saat yapmayı öğrenmekle geçirmişler. Sonuçta çıkan saat NIST-7, NBS-6'dan on kat daha hassas ve ideal saniyelerle eşitliği ancak 14. ondalık hanede bozulmaya başlıyor.

15. ondalık haneye birlikte, atom saatlerindeki sınırlama faktörü olarak, sezyum atomlarının hareket ediyor olması ortaya çıkıyor. Atomlar iki mikrodalga bölgesi arasında saniyenin yüzde biri kadar bir zaman harcıyorlar. Bu saatinizi geceyarısı ayarladıktan sonra ancak saniyenin yüzde biri kadar bekleyip tekrar kontrol ediyorsunuz demek. Tekrar kontrol için bir saniye veya daha fazla bekleyseydiniz eşzamanlandırmanız daha hassas olacaktı. Atomlar daha yavaş hareket ettikçe mikrodalgalarla yapılan iki sorgulama arasındaki zaman daha uzundur ve mikrodalga frekansı atomik zamana daha iyi kilitlenebilir. Bunu 15. ondalık haneden öteye ayarlamak için Drullinger'in ve Wineland'in atomları yavaşlatmaları, hatta durdurmaları gerekiyor.

Bunu gerçekleştirmek için gereken teknoloji, Wineland ve Drullinger'in 1977'de üzerinde anlaştıkları lazer soğuması olarak biliniyor. Bu, atomları bir lazer demetindeki fotonlarla durdurmak için bir yol. Wineland ile çalışan James Bergquist, bu işlemin ping pong topları atarak bir bowling topunu durdurmaya benzediğini söylüyor.

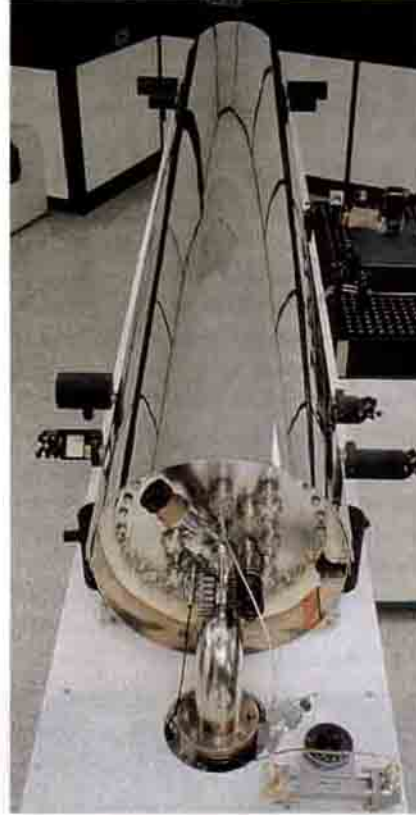
Drullinger'in yeni nesil atom saati, lazerleri, önce atomları durdurmak ve sonra da onları bir tenis topu gibi havaya atmak için kullanıyor. "Altı farklı lazer demeti arasında sıkışmış atomların oluşturduğu küçük bir topunuz var. Ancak onları o noktada ölçemiyorsunuz, çünkü ışıktan çok fazla etkileni-

yorlar. Ölçmek için onları bırakmalısınız. Bıraktığınızda tıpkı bir tenis topu gibi düşeceklerdir. Ancak bıraktığınız anda lazerle küçük bir itme yaratmanız gerekiyor. Böylece atomlar yukarı doğru saniyede birkaç metre yol alıyorlar. Şimdi, bir tenis topu düşünün. 1 metre kadar yukarı atıyorsunuz ve elinize geri düşüyor. Eğer bir kronometre ile bunu ölçerseniz bir saniye sürdüğünü görürsünüz. Şimdi atomları mikrodalgalara doğru attığımızı farzedin. Tepeye giderler, geri dönerler ve tekrar mikrodalgalardan geçerler. Mikrodalgalarla ilk karşılaştıkları anla ikincisi arasındaki zaman bir saniyedir." Bu NIST-7'dekine tekabül eden aralıktan 100 kat daha uzun olduğu için NIST-7'den 100 kat daha hassas bir saat oluyor.

Benzerlikten ötürü bu teknoloji fısıkyeli saat olarak adlandırılıyor. Rabi'nin yardımcılarından Jerrold Zacharias, bunu 1950'lerde MIT'te çalışırken düşünmüş. Fısıkye saatler atom saatlerinin hassasiyetini 16. ondalık haneye kadar alabiliyorlarmış. Andre Clairon liderliğindeki Fransız araştırmacılar, halen Paris Gözlemevi'nde çalışan bir prototip yapmışlar. Hem Fransız hem de NIST fizikçileri, Fransız saatinin NIST-7'den belki de daha iyi olduğunu söylüyorlar ve geliştirilebilmeye daha çok imkan verdiğini düşünüyorlar. Clairon ve meslekdaşları şimdi 16. ondalık haneye kadar hassas olabilecek ikinci bir saat yapıyorlar.

Fransızlar beş yıl önce başlamış olsalar da, Drullinger onlara yetişeceğini söylüyor. Drullinger, daha önce başladığı için Andre'nin yaptıklarını izlemek gibi bir avantajı olduğunu söylüyor. Lazer tekniği NIST-7'den daha karışık olsa da, bu sadece mühendislik işi.

Atom fısıkyeleri, zamanı 16. ondalık haneye kadar göstermede başı çekmeler de sezyum bir frekans standardı olarak kullanılabilir. Burada, daha sonraki nesil üretim için Wineland için içine giriyor. Planlara göre, tek bir atom frekansının üstüne kilitlenecek mikrodalga jeneratörü tarafından sorgulanan şekilde saatlerce ya da günlerce olağandışı olarak sabit duruyor. Bunun için Wineland'ın nötr atoma değil, bir iyonu ihtiyacı var; nötr atomlarınkinden bir elektron eksikliği ile, pozitif elektrik yüküne sahip bir atom. Drullinger'in sezyum atomu gibi, bir civa



iyonu mutlak sifıra çok yakın bir yere kadar lazer demetiyle soğutulabilir. Yeterince soğuduğunda, iyonun pozitif yükü, onun bir elektromanyetik alanda sakin bir şekilde yerinde tutulmasını sağlayacak. Bu da saat imalatçılarının, aslında fısıkyeli saatte problem olan, yerçekimine karşı koymak için bir yol bulmaya gerek duymadan, salınımları ölçebilmeleri demek.

Wineland ve meslekdaşları onbeş yıldır civa iyonu saati üzerinde çalışıyorlar ve sonunda saniyenin hassasiyetini 18. ondalık haneye çıkarabileceklerini düşünüyorlar. Daha önce sezyumu seçerken olduğu gibi, civayı da herhangi bir sihirli özelliği için değil, saat yapmak için ihtiyaç duydukları bütün kriterlere uyduğu için seçmişler. Örneğin, çift sayıda elektrona sahip. Böylece, bir tane kaybedip iyon olduğunda dışarda hiperfın geçişi yaratabilmek tek bir elektron kalıyor. Üstelik, bu geçiş, 9 milyar Hertz'lik sezyuma karşı 40 milyar hertz. Bu da dört kat daha fazla kesinlik demek.

Şimdiden Wineland ve meslekdaşlarının laboratuvarlarında civa saati yapmak için lazer demetlerinden, bilgisayarlardan, osilatörlerden ve alışılmadık elektronik parçalardan oluşan teçhizatları hazır. Civa iyonlarını sonunda hareketsiz kalacak şekilde ve

zaman göstergesi olarak kullanılacak iyonik kristaller haline gelinceye kadar soğutuyorlar.

Civanın son bir hassasiyet avantajı daha var. Hiperfın geçişine ek olarak, civanın katrilyon Hertz frekanslı başka bir durağan enerji geçişi var. Optik geçiş olarak bilinen katrilyon Hertzlik frekans, civa saatine ek bir hassasiyet kazandırıyor. Maalesef, sezyumda olduğu gibi bu frekansa kilitlenebilecek katrilyon Hertz'lik bir osilatör mevcut değil. Wineland ve arkadaşları böyle bir osilatör yaptıklarında, saniyedeki katrilyon vuruşları sayabilecekler.

Wineland öncelikle mümkün olan en yüksek frekansta çalışan osilatör bulacaklarını söylüyor; örneğin, saniyede 100 milyar. Sonra bunu iki katına çıkaracak bir alete bağlayacaklar ve sonra yine iki katına ve böylece katrilyona ulaşana kadar bunu tekrar edecekler. Ancak, temeli iyi kurulsa da bunun uygulanması zor.

Ek bir sorun da lazerlerin mükemmel olmaması. Frekanslarında az da olsa hatalar var. Bunu çözmek için lazerleri, lazer ışığını kilitleyecek kutucuklar olarak düşünülebilecek optik oyuklara uydurmak zorundalar. Bergquist, trampren adını verdiği tavana kalın lastiklerle bağlanmış vakum sistemi içinde bir optik oyuk yapmış. Wineland, Bergquist'in trampreninde dünyadaki en kararlı optik lazerlerin bulunduğunu söylüyor. Ama yine de, civanın optik geçişi için yeterli değil. Bunun için saat imalatçıları fiziksel boyutları bir hidrojen atomunun çekirdek çapının boyutunun binde biri duyarlılığında sabit kalacak bir oyuk yapmalılar.

Bu mümkün olsa da çok zor. Wineland ve meslekdaşları bunu gerçekleştirdiğinde 18. ondalık haneye kadar hassas bir saat yapabilecekler. Bu, modern toplumun ihtiyaçlarının çok ilerisinde bir şey. Hassasiyet için talep devam edecek ve saat imalatçıları ilerlemek zorundalar. Bundan sonra nereye kadar gidilebileceği sorusu geliyor. "Zaman göstergesinin hassasiyetin teorik bir sonu var mı?" sorusuna Drullinger şu cevabı veriyor.

"Modern bilimin bildiği bir son yok. Ve herhangi bir sınır göremiyoruz".