

SOĞUK ATOMLARLA NANOTEKNOLOJİ

O. Çağlar Akın*

Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes, 4,2 Kelvine (-269 °C) ulaşarak helyumun sıvılaştırılmasını ilk kez 1908 yılında başarmıştı. Bu buluş, kendi içinde, deneycilere yeni olanaklar sağlayacağı için çok değerliydi. Nitekim, artık 4 Kelvine inmek için elimizde sıvı helyum olacaktı. -77 °C gibi sıcaklıklara inmek için bilim adamları sıvı azot kullanıyorlardı. Artık, -270 °C'ye inmek için, biraz daha pahalı olmakla birlikte, sıvı helyum kullanılabilirdi. Bu ilk bakışta sadece sayılarda bir iyileştirme gibi görünebilir. Ancak, Kinetik Teori'den bu yana biliyoruz ki, atomların ve moleküllerin -273,15 °C'de (0 Kelvin) hareketleri, ötelenme, titreşim ve moleküllerin kendi çevrelerinde dönmeleri durur. Her tür hareketin durduğu bu sıcaklığa, bilim çevreleri, "mutlak sıfır" adını vermiştir. Mutlak sıfır yakınlarına kadar soğutulmuş nesnelere çok ilginç özellikler sergilemeye başlarlar.

Pahalı ve çok özel yöntemlerle bile, sıvı helyum ile ulaşılan derecelerin altına inmek giderek zorlaşmakta. H. K. Onnes'in buluşu, deneysel fizikte neden olduğu sayısız başarılı katkının yanı sıra, yine kendisinin 1911 yılında yaptığı, "bazı maddelerin kendine özgü bir sıcaklığın altında dirençlerinin sıfıra düşmesi" gözlemine de teknik taban oluşturdu. Cıvanın, ve genelde iyi iletken olmayan bazı maddelerin sıvı helyum sıcaklıklarında üstün iletken olduğu gözlemlendi. Çok geçmeden, 1913 yılında, bu çalışmalarından ötürü, H. K. Onnes, Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Bu ödülün verilmesinin üzerinden 84 yıl geçtikten sonra, Fizikte Nobel Ödülü, yine soğutma konusunda çalışan 3 fizikçiye, Fransız Prof. Dr. Claude Cohen-Tannoudji, ABD'li Dr. William Phillips ve Prof. Dr. Steven Chu'ya verildi. Önce de olduğu gi-

bi, daha düşük sıcaklıklar yine maddelerin bazı tuhaf, alışılmamış davranışlarını açığa vurmalarını sağlamıştı...

Işıkla Soğutma

Işık ışınlarının nesnelere ısıtması bize çok tanıdık geliyor, Güneşin ışınları ısıtıyor, hatta odaklanınca tutuşturuyor bile. Lazerler söz konusu olunca metal kesme, kaynak yapma ya da plazma ısıtma bilinen uygulamalar. Ancak ısıtma özellikleri bizi şaşırtmayan güçlü lazer ışınlarının, evrenin en soğuk gazlarının oluşturulmasında kullanılmaları ilk izlenimde beklenen bir olay değil. Bu konudaki ilk çalışmalar, soğutma düşüncesinden çok, spektroskopik çalışmalarda kesinliği artırma hedefine yönelik olarak, atomları yavaşlatmayı amaçlıyordu.

Işığın mekanik bir etkisinin olabileceği düşüncesi, 17. yüzyıla kadar uzanıyor. Johannes Kepler 1619'da kuyruklu yıldızların kuyruklarının neden hep Güneş'e ters yönde uzadığı sorusuna yanıt ararken, ışığın mekanik bir etkisi olabileceğini öne sürmüştü. Işık basıncı kavramına katkılar, 1873'te James Clerk Maxwell ve 1917'de Albert Einstein tarafından gerçekleştirildi. Einstein, fotonların atomlar tarafından soğurulması ya da ışıması durumunda atomun doğrusal momentumunda değişime olacağını gösterdi. Foton momentumunun önemli bir rol oynadığı ilk deney, X-ışınlarının elektronlarca saçıl-

dığı Compton Etkisi deneyi oldu. 1923'te ise, C. T. R. Wilson tarafından, bir gaz odasında elektronların ışık tarafından geriye saçılması gözlemlendi. Atomların fotonlar tarafından saçılması deneyi ise O. R. Frisch tarafından 1933'te gerçekleştirildi. Frekansı ayarlanabilir boya lazerlerinin 1966'da P. P. Sorokin ve F. P. Schäffer tarafından geliştirilmesiyle ışığın mekanik etkisinin daha derin bir şekilde araştırılması olasılığı doğdu. Yüksüz atomlar üzerinde ışığın etkisinin araştırıldığı ilk kuramsal çalışmalar, 1970'te ABD Bell Laboratuvarlarından A. Ashkin, ve Sovyetler Birliği'nden V. Letokhov tarafından yürütüldü. Ashkin ve Letokhov lazer ışınlarının odağında atomların tuzaklanmasını önerdiler ve canlı hücrelerin tuzaklandığı ilk 'optik cımbızları' yaptılar. Ancak gerçek anlamda atomların yavaşlatılmasına ilişkin ilk deneyler 1975'te T. W. Hänsch ve A. L. Shawlow tarafından yayımlanan iki sayfalık bir makaleye dayanıyordu. (Arthur Shawlow'a daha sonra, 1981 yılında, lazer spektroskopisine yaptığı katkılardan ötürü, Nobel Fizik Ödülü verilmiştir.)

Optics Communications'da yayınlanan bu makalenin, yepyeni bir araştırma alanı açacağını ilk bakışta öngörmek kolay değil. Bu makale, bilgisayar modelleri, karmaşık integraller ya da kısmi diferansiyel denklemler içermiyor. Aslında dayandığı iki kaynaktan biri; A. Ashkin tarafından kaleme alınan "Hareket halindeki bir atomun bir elektromanyetik alan içerisinde, saçılma kesit alanlarının kuantum mekaniksel hesaplanması" gözardı edilirse, matematiksel olarak sadece birkaç satırlık dört işlem kullanılıyor. Ancak fiziksel olarak öneri son derece özgün ve değerli. Temel olarak Doppler etkisinin üzerine kurulduğu için, daha sonra bu kurama dayanarak yapılan deneylere "Doppler Soğutması deneyleri" ismi verildi. Doppler Etkisi her gün gözlediğimiz, ama pek farkında olmadığımız bir et-



A. Schawlow (1921 Mount Vernon N.Y.-1999 Palo Alto, California) Charles Townes ile ilk Mazer'in yapımında çalıştı. Spektroskopide dünya çapında otorite olan Schawlow, 1981'de Nobel Fizik Ödülü'nü aldı.

ki. Sabit bir hızla hareket eden bir motorlu taşıtın sesini, yerdeki bir gözlemci, hareketin yönüne bağlı olarak farklı algılar. Eğer yaklaşıyorsa ses daha tiz (yüksek frekanslı), eğer uzaklaşıyorsa daha bas (düşük frekanslı) algılanır. Aynı fiziksel olay, galaksiler ölçeğindeki, ışık için “kırmızıya kayma” olayında da geçerlidir: bizden uzaklaşmakta olan galaksilerden ulaşan ışınların frekansını, ışınları yayan kaynağın karakteristik frekansından daha düşük olarak algularız.

A. Schawlow’un kurguladığı düzenekte, iki enerji düzeyli bir atom düşünülüyor. Bu atom, geçiş frekansının biraz altında frekansa ayarlanmış bir lazerle aydınlatılıyor. Eğer, atomun lazere doğru bir ötelenme hareketi varsa, Doppler etkisinden ötürü, lazer ışını rezonans frekansına yakın olarak algılıyor. Bu durumda atom, bir foton ve bu fotonun momentumunu soğurarak uyarılmış üst enerji seviyesine geçiyor, yanısıra biraz yavaşlıyor. Elektron kısa bir süre sonra kendiliğinden alt enerji düzeyine geçerken, atomun yaydığı foton herhangi bir yönde hareket edecektir. Dolayısıyla, istatistik olarak, yayılan fotonun atoma aktaracağı ortalama ötelenme hızı sıfırdır. Böylece, lazere doğru belirli bir hızla hareket eden atom yavaşlayacaktır. Oysa, zıt yönde hareket ediyorsa, yine Doppler etkisinden ötürü rezonanstaki uzaklaşır; basitçe etkileşmez. Atomun iki zıt yönde, bir lazer çiftiyle aydınlatılması kurgulandığında, atomların yavaşlaması ve gazın soğuması bekleniyordu; çünkü atom hangi yönde hareket etse, o yönden gelecek ışın tarafından yavaşlatılacaktı. Hänsh ve Shawlow bu yöntemin sınırını da hesapladılar, ve iki düzeyli atomda bu alt sınırı 240 mikro Kelvin ($1 \mu K = 10^{-6} K$) olarak belirlediler.

Buradaki zorluksa, atom yavaşladıkça Doppler kaymasıyla ulaşılan rezonans koşulundan da uzaklaşılmasıydı. Ancak V. Letokhov, “frekans civıltısı” ismini verdiği yöntemle, bu zorluğu aştı. Daha sonraki yıllarda, bu yöntemin, boya lazerlerine göre daha az elektronik kontrol gerektiren diyet lazerleriyle gerçekleştirilmesi de sağlandı.

Çevremizdeki maddenin üzerinizde bıraktığı ilk izlenimi bir düşünün; ilk anda sanki fazla hareket yok gibi görünüyor, değil mi? Gerçekten, maddeyi oluşturan atomlar ve moleküller çok hareketlidirler. Atom çekirdeklerinin çevresindeki elektronların ışık hızına yakın hareketle-



rini, ve atom-altı parçacıkların hareketlerini hiç göz önüne almasak bile, tek başına, ya da çevresindeki diğer atomlardan uzak, ve üzerinde ışık yardımıyla çeşitli ölçümleri hassas bir şekilde yapmaya olanak tanıyan yavaşlıkta bir atom ve moleküller grubu bulmak normal koşullarda olası değildir. Oda sıcaklığında hava molekülleri ortalama 4000 km/saat hız ile hareket ederler. Bu atom ve moleküller üzerinde spektroskopik gözlemler yapmak, bu hızla hareket ettikleri sürece, çok kesin sonuçlar vermeyecektir. Bu durumda atomları soğutmamız gerekiyor. Ama atomlar gaz evresindeyken soğutulunca önce sıvı, sonra da katı evreye geçiyorlar. Oysa biz, atomları yavaş, ama gaz evresinde istiyoruz. Çünkü, sıvı ve katılarda atomlar birbirlerine istemediğimiz kadar yaklaşarak birbirleriyle etkileşiyorlar. Öyleyse, biz de çok az gaz atomunu vakuma yerleştirir, böylece soğuturuz. Güzel, ama öyleyken bile, sözgelimi $-270^{\circ}C$ ’de bile, atomların hızları saatte 400 km’den fazladır. Sadece $-273,15^{\circ}C$ ’ye yaklaşıldıkça, yani mutlak sıfır çevresinde atomların hızları dikkate değer ölçüde düşecektir. Eğer hidrojen atomları için sıcaklık sadece 1 mikro Kelvin olsa bile, atomlar saniyede 25 cm, ya da saatte 1 km hızla hareket edecekler. Yani, çok düşük sıcaklıklara gereksinim duyuyoruz. Bu aşamada sorulması gereken soru şu: “Bu kadar düşük sıcaklıklara, üstelik de gaz fazında, nasıl ulaşacağız?”

Lazer Soğutması

Yuvarlanan bir kaya, kendi benzerine çarpıtığında, momentumunu ona aktarabilir ve kendisi durağanlaşabilir. Benzer

şekilde, bir foton da, kendi sahip olduğu momentumu bir atoma aktarabilir; yeter ki doğru enerjiye (renk, yani frekansa) sahip olsun. Daha düşük enerjili fotonlar, daha uzun dalga boyuna sahiptir. Yani kırmızı ışından alınan bir fotonun enerjisi, mavi ışından alınan fotonun enerjisinden düşüktür.

Eğer atom, ışına doğru hareket ediyorsa, ve ışının atom tarafından algılanması isteniyorsa, ışının durağan bir atom için gerekli olan frekanstan biraz daha düşük bir frekansa sahip olması gerekir. Uyarıldıktan sonra, yüz milyonda bir saniye gibi bir süre sonunda, bu uyarılmış atom, ışına yapacaktır. Atomun ısımasından sonra, bu foton akışından yeni bir foton tekrar soğutulabilecektir. Bu, uygun koşullar altında ve uygun bir lazerle, bir topu, kütleçekimi dünyadan yüz bin kat güçlü bir gezegende yukarı atmışçasına etki yapacaktır; ve ‘çok geçmeden’ yavaşlama olacaktır. Yavaşlatma etkisi, eğer her yönden uygun frekansa sahip fotonlar geliyorsa, atom hangi yöne hareket ederse o yönden gelen fotonlarca uygulanacaktır. Bu Doppler soğutması yöntemi, oldukça akıllıcaydı... Deneysel zorlukları aşmak için, SSCB’den V. Letokhov’un frekans civıltısı yöntemine seçenек olarak, ABD’den “Zeeman yavaşlatıcısı” yöntemi önerildi. Doppler soğutmasında, fotonların frekansları, atomların yavaşlamalarına koşut olarak değişmek üzere ayarlanmalıydı. Bu frekans civıltısı yönteminde, belli atom grupları hedef alınıyor, frekans değişmelerinin lazer ışınlarına uygulanmasıyla atomlar buketler halinde yavaşlatılabiliyordu (boya lazerleri ve diyet lazerlerinin frekansları görece geniş bir aralıkta ayarlanabilir). Zeeman yavaş-

latıcısı yöntemi, ABD Ticaret Bakanlığı Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nden (NIST), Dr. William D. Philips ve Herold Metcalf tarafından teklif edildi. Bu yöntem, atomların hareket yönü boyunca değişen bir sarım manyetik alanının kurulmasına dayanıyordu. Değişen bobin manyetik alanının gücü öyle ayarlanacaktı ki, atomlar yavaşladıkça manyetik alana bağlı olarak atomun enerji düzeyleri arasındaki açılma, Zeeman yarılması kaymaları, gerekli olan Doppler kaymasıyla eşlenik olacak şekilde ayarlanacaktı. (Bir atomdaki elektronların enerji düzeyleri Kuantum Kuramına göre yalnızca belli değerler alabilir. Ancak, elektronların kendi iç özellikleri olan spin'in -dönme- alabileceği belirli değerlere bağlı olarak bir elektronun enerji düzeyi, bir manyetik alan içerisinde farklı değerler alabilir. Tek bir enerji düzeyi bir kaç düzeye bölünür, bu olaya Zeeman Yarılması ismi verilmiştir. Bu enerji düzeyi kaymaları uygulanan manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir.) Bu yöntem A. Shawlow ve T. Hänsch'in ilk yönteminden daha kapsamlı düşünülmüştü. 1985'te, o zamanki ismiyle Ulusal Standartlar Bürosu'nda çalışan W. Philips ve çalışma arkadaşları, Philips'in, lisans üstü öğrencisiyken Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) hazırlanmış olduğu aygıtı uygun hale getirerek, ilk kez atomları manyetik tuzaklarda hapsedtiler. Philips'in deyişleyle o aygıtı sahip olmak çok önemliydi; çünkü başlangıç için bir taban hazırlamıştı.

Doppler Sınırı Altında

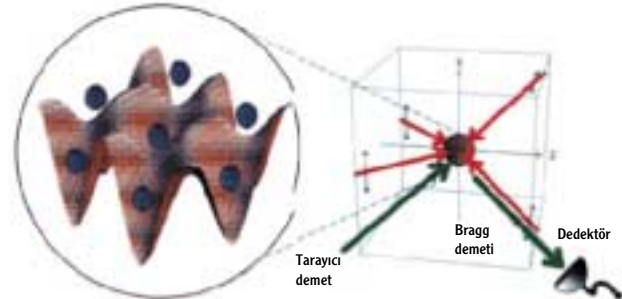
İdeal bir iki-enerji-düzeyleli atomun soğutulabileceği Doppler sınırı hesaplandığında 240 mikro Kelvin bulunuyordu, ki bu sıcaklık (yoksa soğukluk mu demeli?) Bell Laboratuvarlarında Steven Chu ve arkadaşları tarafından, büyük bir deneysel belirsizlikle de olsa, 1984'te ölçüldü. Raporlarında, her biri birbirine dik üç zıt çift lazer ışınının kesiştiği bezelye büyüklüğündeki hacimde ($0,2 \text{ cm}^3$), 100 bin sodyum atomunun, kuramın öngördüğü sınıra yakın, ancak ölçümde büyük belirsizlikler olmak üzere, 200 mikro Kelvin civarına kadar soğutulduğunu belirttiler. Lazerlerin oluşturduğu bu soğutma yapısına, bu ortamdaki bir atomun hareketi, yoğun bir pekmezin içine düşen bir parçanın yavaşlatılmasına benzediği için, "optik pekmezler" ismi verildi. Optik



NIST çalışanı Kris Helmerson magneto-optik olarak tuzaklanmış ve 1 milikelvin'e kadar soğutulmuş sodyum atomlarını (vakum çemberinin merkezindeki sarı nokta) gözlemliyor.

pekmezler, aslında atomları tam olarak hapsediyor değildi. Ancak onların üzerinde bir çeşit "akışmazlık" oluşturuyordu. Atomların bu bölgedeki hareketleri, akışmaz bir sıvıdaki parçacıkların Brown hareketine benziyordu. W. Philips ve grubu, merakla bu atomların hareketleri üzerine kuramsal çalışmalar yaparken, bu etkiye "pekmez tuzağı" adını taktılar. W. Philips'in grubu kuramsal, S. Chu'nun grubuysa deneysel çalışma yaparlarken aynı fiziksel olaya, benzer isimleri yakıştırmışlardı. Birkaç yıl sonra W. Philips ve grubu deneyi tekrarladılar ve benzer sonuçları buldular. Boulder, Colorado'da NIST'den Karl Weimann ve grubuysa atom yoğunluğunun santimetreküpde 1 milyar, gözlem süresinin 1 saniyeye yaklaşmasıyla yaklaşık sonuçlar elde etti. O zamanlar kimse bir şeylerin yanlış olabileceğini düşünmüyordu. Aksine, her şey kusursuzdu. W. Philips de doğa yasalarıyla çizilen sınıra yaklaşıldığını, 'her şeyin yolunda' olduğunu düşünenlerden biriydi. Fakat NIST grubu daha sonra lazer ışınlarından birinin daha güçlü olması durumunda aynı yönde bir atom grubunun göstermesi beklenen kaymanın gerçekleşmediğini gözlemledi. Ayrıca frekans kaymaları gereken birkaç kat altına düştüğünde, etkinin ortadan kalkması gerekirken, sistemin daha etkin olduğu gözlemlendi. Bir şeylerin ters gitmeye başladığı anlaşılı-

yordu. W. Philips, kuramda bir eksiklik olacağını düşünüyor ve yakınıyordu. Grup, atomların sıcaklıklarını, Metcalf'in önerdiği, lazerlerin kapatılmasından sonra atomların düşmesini izlenip ölçüleceği yöntemle deneyi tekrarladı. Fakat deney ilerledikçe anlaşıldı ki atomlar yerçekimi tarafından, sıcaklığı ölçecek sondaya ulaşmaktan alıkonuluyorlardı. Yani aslında atomlar sanılandan çok daha fazla yavaşlıyorlar, dolayısıyla Doppler sınırıyla öngörülenden daha düşük sıcaklıklara ulaşıyordu. Bu durum deneysel fizikçinin altın kuralı olan "Eğer bir işin ters gitme olasılığı varsa, kesinlikle ters gider" şeklindeki Murphy'nin Birinci Yasasını çağırıyordu; belki de bu kez bu yasa geçerli değildi, ve bir şekilde işler beklenmediği kadar iyi gitmişti... Hiç beklenmedik bir şekilde Doppler sınırı da geçilmişti. S. Chu, bu olayı; "Murphy yasasının pek nadir görülen ve kusursuz bir ihlali" olarak nitelemişti. W. Philips ve S. Chu, haftalar boyunca aygıtları kontrol etme, tekrar ayarlama, ve ölçümleri tekrar tekrar almayı sürdürdüler. En sonunda, sıcaklık ölçmek üzere atomları bulacak sondayı biraz daha aşağı indirdiler ve sıcaklığın 40 mikro Kelvin olarak ölçüldüğü ve Doppler sınırının aşıldığı kesinleşti. Philips ilk durum için "deney sonucunun gerekene göre beklenmesinden ötürü deney yanlış tasarlanmıştı. Aslında bu beklenti göz önüne alınırsa deney çok iyi tasarlanmıştı; tüm yapmamız gereken atomların sondaya ulaşmasını beklemektir" diyor. Ancak ilk deneyde atomlar hiç bir zaman sondaya ulaşamadı. Çünkü başından beri deneylerin üzerine kurulduğu kuram eksikti. Ancak bu kuram öylesine basit ve ikna ediciydi ki orijinal sıcaklığın beklenen 6 kat altında olması, Philips ve Metcalf'in gruplarını, sıcaklığı üç farklı yöntemle daha ölçmeye, altı ayı

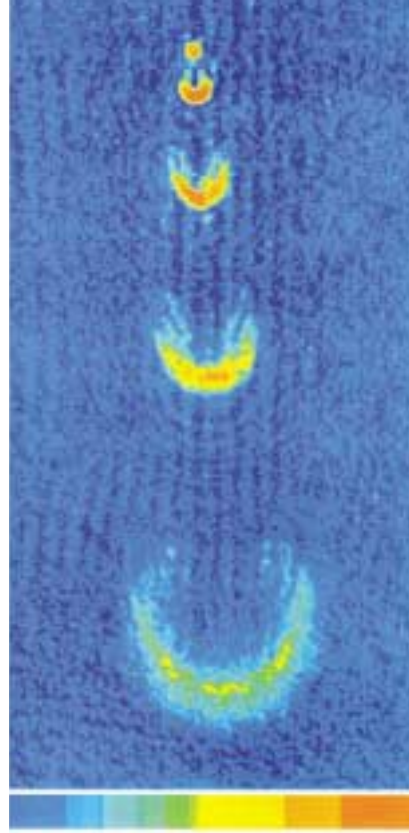


Atom-optik araştırmalarının ulaştığı son nokta; soğutulmuş atomları dört lazerle oluşturulan yapay bir kristal ağ örgüsü içerisinde düzenlemek... Lazer soğutmasıyla yeterince yavaşlatılmış atomlar yine lazerlerle oluşturulan yumurta kartonu şeklindeki potansiyel kuyusunda tuzaklanıyor. Bu yapıya rahatlıkla optik kristal ağları diyebiliriz. Atomların kristal yapısı Bragg girişimi deneyleriyle de kanıtlandı...

daha aygıtların kalibrasyonlarıyla geçirmeye ve diğer insanlardan yardım istemeye ikna etti. Yardım istenen kişilerin öğütleri “sonuçların yayınlanması” şeklindeydi ve öyle de yapıldı...

Yayınlar, insanlardan çeşitli tepkilerin gelmesine yol açtı. Bazı kişiler kuşkucuydu. “Bir yerlerde bir hata olmalı” gibi beylik sözlere sığınarak uğraşmaktan vazgeçiyorlardı. Ancak iki kişi böyle yapmamıştı. Laboratuvarlarına girerek deneyi tekrarlamış, sonuçların doğru olduğunu görmüş ve üzerinde çalışmaya başlamışlardı. Açıklama Stanford’daki Steven Chu’ nun grubundan ve Fransa’daki Claude Cohen-Tannoudji ve Jean Dalibard grubundan hemen hemen aynı zamanda gelmişti. Gerçekte sodyum atomları Zeeman yarılmasıyla farklı enerji düzeylerine ayrılır; lazer ışınları bu düzeylerdeki enerjiden daha düşük enerjiyle atomları uyartabilir ve yeni soğutma mekanizmalarına yol açabilir. Bunlara, kutuplanma farklılığı soğutması, ya da Philips’in kendi deneyinde vermiş olduğu şekliyle “Sisiphos Soğutması” adı verildi. Ne Odyssea’nın yazarı Homeros binlerce yıl önce kurgularken, ne de (1957 Nobel Edebiyat Ödülü sahibi) Albert Camus, insan yaşamını sorguladığı yapıtı “Sisiphos Söylenesi”ne konu ederken, bu mitolojik kişiliğin, bir fizik olayına da model olacağını bilemezlerdi kuşkusuz...

Philips, daha sonra Paris grubuyla ortak çalışmasında, yüksüz sezyum atomları için 2,5 mikro Kelvin’e ulaşıldığını belirledi. Doppler soğutması mekanizması temelinde diğer soğutma mekanizmaları için de geçerli olan, “geri saçılma” sınırına da yol açıyordu. Yani Sisiphos soğutması ve Doppler soğutması birlikte işlerken, Doppler soğutması ayrı bir sınır daha koyuyordu. Cohen-Tannoudji ve grubu daha sonra atomik “siyah kuantum durumları” nı kullandılar. Saçılma limitinin, hem Doppler soğutması hem de Sisiphos soğutması için bir sınır oluşturması, en yavaş atomların bile sürekli soğurma ve ışıma durumunda olmasından kaynaklanıyordu. Bu süreçler, gaza küçük ama yadsınamayacak hızlar veriyor, ve bu hareket ortamda belirli bir sıcaklık oluşturuyordu. Eğer bir şekilde, en soğuk gazların, optik pekmezlerin bu etkisini hissetmemesi sağlanabilirse, daha da düşük sıcaklıklara ulaşılabilirdi. Durağan bir atomun soğurma yapmadığı, ‘karanlık kuantum durumları’nın oluşturulduğu bir mekanizma biliniyordu. Zorluk, bu yöntemi lazer



MIT'nin ilk ilkel atom lazeri: eşyumu atomlar düşerken dağılıyor (1997)

soğutması mekanizmasıyla birleştirmekti. Cohen-Tannoudji ve grubu, 1988-1995 yılları arasında Doppler etkisinin kullanıldığı ve yapay olarak oluşturulan, hareketleri son derecede yavaşlatılmış atomları karanlık kuantum durumlarına iten bir yöntem geliştirdiler. Paris grubu, yöntemin bir, iki ve üç boyutta işe yaradığını gösterdi. Bütün deneylerde geri saçılma sınırı 4 mikro Kelvin olan helyum atomu kullanılıyordu. İlk deneyde iki zıt lazer ışını bir boyutlu hız dağılımı elde etmede kullanıldı ve geri saçılma sınırının yarısına inildi; ilk deney bile başarılı olmuştu. Dört lazerle iki boyutta deneyler sınırın onaltı kat altına, 0,25 mikro Kelvin’e ulaştı. Sonunda üç boyutlu yapı altı lazerle kuruldu ve 0,18 mikro Kelvin’e ulaşıldı. Bu koşullarda helyum atomunun hızı, saniyede 2 santimetreye düşüyordu. Bu derece düşük sıcaklıklara ulaşılmıyorsa, çok daha farklı alanlarda yeni fırsatların doğmasına yol açtı. Spektroskopideki duyarlı ölçümlerde, atomik saatlerin yüz kat daha duyarlı yapılmasında (bu öncelikle uzaklara yolculuk yapacak uzay araçları için önemli), atomik girişim-ölçerlerde, atom optik ve litografisinde, gazlarda ilk Bose-Einstein yoğunluklarının gözlenmesinde yeni olasılıklar belirdi. Gazların lazerle soğutulması deneyi, vaadettiklerinin yanısıra, gerçekleştirilebilir ölçeklerde olmasından ötürü, öncelik kazanan bir deneydir. Yüksek Enerji Fiziği deneylerinde kilometrelerce yarıçaplı dev sinkrotronların, ve uzaydaki yerçekimsiz ortam deneylerinin milyonlarca dolar büt-

çeyle yürütüldüğü göz önüne alınırsa, bir vakumda ve birkaç lazerle, masa üstünde yapılan, parasal olarak görece ucuz, atom fiziği ve kuantum mekaniği açınsından oldukça yoğun olan lazer soğutma deneyleri kuşkusuz çok daha avantajlı bir konumdaydı.

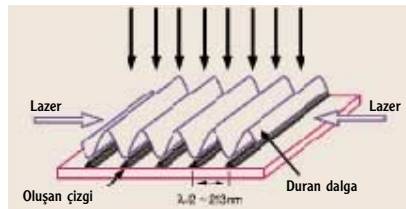
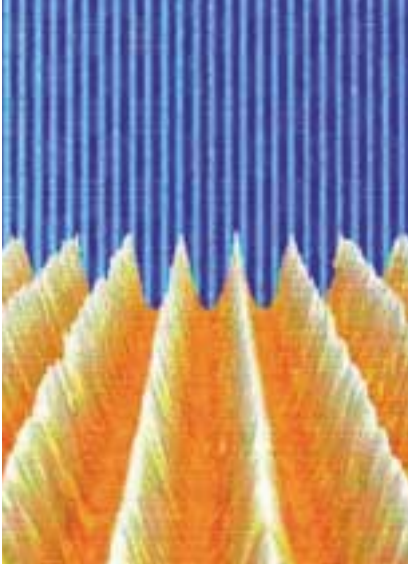
Gazların BEY’i

Yüzyılın başında sıvı helyum sıcaklıklarına inilmesiyle deneysel olarak üstün iletkenlik olayının gözlenmesine benzer şekilde, lazer soğutmasıyla da Bose-Einstein yoğunluğunun gazlarda gözlenmesi mümkün oldu. Gerçi bir diğer Fizik Nobel Ödülü’ne konu olan, sıvı helyumun çok düşük sıcaklıklarda Bose-Einstein yoğunluğunu göstererek üstün-sıvı’ya dönüşmesinin gözlenmesi üzerinden onlarca yıl geçmişti. Bose-Einstein yoğunluğunu, ayrıca yarı iletkenlerdeki exciton’larda da çok düşük sıcaklıklarda gözlenmişti. Ancak her iki durumda da, Bose-Einstein yoğunluğunu fazının yanısıra maddenin aynı zamanda sıvı veya katı evresinde bulunmasından ötürü, bu kuantum etkisi, çevresiyle etkileşmeyen atomlarda gözlenememişti.

1924 yılında Hintli fizikçi Satyendra Nath Bose, A. Einstein’a karacisim ışımasını, özdeş fotonların bir gazı olarak ele aldığı bir mektup gönderdi. Einstein, bu kuramı özdeş atom ve moleküller için genişlettiğinde, yeterince düşük sıcaklıklarda atomların topluca en düşük enerjili kuantum durumuna geçeceğini öne sürdü. Söz konusu olan Bose-Einstein Yoğunluğu (B.E.Y.) sadece bozonlar için geçerlidir. Diğer taraftan oda sıcaklığındaki yüksek hızlardan ötürü, atomlara eşlenen de Broglie madde dalgalarının boyu oldukça küçüktür. Ancak atomlar yavaşladıkça, de Broglie dalga boyları uzar, ve çok düşük bir sıcaklıkta dalga boyları örtüşmeye başlar. Atomlar artık birbirlerinden bağımsız parçacıklar gibi değil, aynı kuantum durumunda, eş uyumla hareket eden tek bir nesne gibi davranacaktır.

Yüksek sıcaklıklardaysa, tek tek atomların madde dalgaları birbirleriyle ilgisizdir. Madde dalgaları için bu ‘ilgisizlik’ durumundan ‘eş uyumluluk’ durumuna geçmek, ışık için, sıradan bir ışık kaynağından lazer ışımına geçmeye benzetilebilir.

Bose-Einstein Yoğunluğu’nun sadece bozonlarda gözlemlenebildiği tam olarak doğru değil. Bozonlar tam sayı spin sahibi parçacıklar, 0,1,2 gibi. Örneğin fotonlar 0 spinli parçacıklar, ve bir lazerde olu-



Bir lazer ışınının kendi üzerine yansıtılmasıyla oluşan bir duran dalganın bir atom demetini odaklayışı. Bu örnekte krom atomları sert bir katman oluşturacakları bir silikon yüzeyine yönlendirilmiş. Yüzeyle çarpmadan hemen önce duran dalgalar tarafından yönlendirilen krom atomları sert ve çok ince çizgiler oluşturmak üzere gruplanıyorlar. Atomik kuvvet tarama mikroskopuyla alınan görüntüde, 425,43 nanometre dalgaboylu, rezonansa çok yakın lazer ışınlarıyla elde edilmesi beklediği gibi, 212,78 nm aralıklı ve 10 nm kalınlığında krom atomları yüzeyde çizgiler oluşturuyor.



4,5 mikron çapında mikro kürelerin optik cımbızlarla düzenlenmesi

şan durum ise milyonlarca fotonun aynı enerji düzeyi, aynı momentum, çoğu zaman hatta aynı kutuplanma gibi özellikler ile birlikte davranması. Kısaca bozonlar sosyal parçacıklar. Oysa, 1/2, 3/2 gibi yarım spin sahibi fermiyonlar, örneğin elektronlar tam olarak aynı kuantum durumuna sahip olamıyorlar. Bu yüzden de bir atomda elektronlar, en alt enerji düzeyleri dolduktan sonra bir üst enerji düzeyine yerleşiyorlar. Kısaca fermiyonlar son derece sosyal parçacıklar. Ancak ortamın sıcaklığı yeterince düşürüldükten sonra, üst enerji düzeyindeki fermiyonlar gidebilecekleri en alt düzeylere yerleşmeye başlıyorlar. Sıcaklığı daha da düşürürsek ilginç davranışlarla karşılaşabiliyoruz, ki bu olayın örneği Helyum-3'te süperiletkenlerde ve bazı moleküllerde gözlemlendi (Bilim ve Teknik sayı 385 sayfa 10.) ; fermiyonlar Bose-Einstein Yoğuşması yapıyorlar. Peki, bu nasıl oluyordu? 1/2 spinli elektronlar çiftler oluşturuyorlar, ve böylece toplamda tam sayı spine sahip bozonlar gibi davranıyorlardı. Doğa ne kadar da pratik çözümlerle davranıyor değil mi?

21.YY'da Nanoelektronik

Bose-Einstein yoğuşmasının gazlarda da mümkün olması, beraberinde ilginç düşünceler getirdi. Yoğuşuk içerisindeki atomlar eş uyumluydu. Yani atomlar teker teker kendi kimliklerini kaybediyor, ama aynı kuantum durumunda birlikte dans ediyorlardı. Eş uyumluluk özelliği hemen aklımıza lazerleri getiriyor. Işık lazerlerinde milyarlarca foton aynı kuantum durumunda yer alır. Bu, bir lazeri sıradan bir ışık kaynağından ayıran temel özelliktir. Bazı atomlar da fotonlar gibi bozon oldukları için aynı kuantum durumuna yerleştirilebilir, böylece bir "atom bozeri", ya da daha çok bilinen ismiyle bir "atom -lazer" yapılabilir. Atom-lazerin çıktısı

bir ışık ışını olmayacak, ama onun yerine bir atom demeti olacaktır. Herhangi bir atom demetinden farklı olarak, bu demette atomlar birbirlerinden bağımsız hareket etmezler. Atomların dalga özelliği göstermesi de ayrıca gözlenebilecektir. Dalga özellikleri denilince, akla hemen girişim ve kırınım gelir. Artık orta dereceli okulların eğitim programlarına bile giren lazerlerle girişim deneylerinin benzerleri, atom-lazerlerle de yapılabilir. Nitekim 1995'te Colorado, Boulder'daki NIST grubunun gazlarda ilk Bose-Einstein Yoğuşmasını gözlemesinin üzerinden iki yıl geçmeden, 1997'de MIT Fizik Bölümü Elektronik Laboratuvarlarında bu yoğuşumun gerçekten eş uyumlu olduğu gösterildi. Bu deney insanların, yoğuşumun eş uyumlu olmayabileceği yönündeki kuşkularını ortadan kaldıran ilk ilkel atom lazeriydi. Bir BEY'den alınan iki parça, bağımsız olarak düşme ve genişlemeye bırakılmış, bu sırada soğurma yöntemleriyle alınan fotoğraflarda girişim desenleri gözlenmişti. Her bir parçada beşer milyon atom yer alıyordu. Bu olayı modellememiz gerekirse, gerçekten de günlük yaşam deneyimizle edindiğimiz 'sağduyu'muzu sarsan bir olay olduğu anlaşılacaktır. Bir apartmanın iki balkonundan aşağıya eş-zamanlı olarak beşer milyon bilye attığımızı düşünelim. Ve her defasında yere düşen bilyeler belli uzaklıklarla birbirinden ayrılmış ve her biri bin adet bilye içeren beş bin kolon oluşturursun. Bu olay elbette şaşırtıcı olacaktır. Ama şaşırtıcı olmasının ötesinde, fizikçi için, bilyelerin aralarında, onların eş uyumlu dalgalar gibi davranmasını sağlayan bir ilişki olduğu anlamını da taşır.

BEY'in eş uyumlu olması düşük sıcaklıkta yürütülen pek çok deneyin yanısıra, eğer gerekli iyileştirmeler sağlanabilirse atomların ışık ışınları gibi kullanılabilmesine yol açabilecektir. Bu düşünceden hareket eden ABD Ticaret Bakanlığı, NIST aracılığıyla atom-lazer çalışmalarını des-

telemeye devam etti. Ayrıca ABD Donanma Araştırma Ofisi ve NASA da bu çalışmalarını destekledi. Sonuçta, Nobel Ödüllü fizikçi Dr. W. Philips'in grubu, bu kez de 11 Mart 1999'da yönelimli atom lazerinin gösterildiğini rapor etti. 12 Mart 1999 tarihli raporlarında sürekliliğe çok yakın, ancak halen bazı iyileştirmelerin yapılmasını öngören atom-lazerin yapıldığını belirttiler. Bu son çalışma Ölçüm ve Standartlar Laboratuvarı, İleri Teknoloji Programı, Üretim Geliştirme Ortaklığı ve Baldrige Ulusal Kalite Programı tarafından da destekleniyordu. Bu kuruluşların atom-lazer çalışmalarını desteklemelerinin temel nedeni, pratik bir atom-lazerin yapılabilmesi durumunda çok kritik bir teknolojinin ekonomiye kazandırılacağı olacaktır; yüzey elemanlarının üretiminde endüstriye uygulanabilir nano-ölçek (1 nanometre= 10^{-9} metre). Şu sıralar uygulamaya yönelik çalışmaların yürütüldüğü bu teknoloji, mikro-elektronik (1 mikron= 10^{-6} m) çağını kapatıp nano-elektronik çağını açmak iddiasında.

A sınıfı bilimsel dergilerde Bose-Einstein Yoğuşumu ve uygulamaları üzerine her yıl 400'den fazla araştırma makalesi yayınlandığı düşünülürse, daha şimdiden, 1997 Nobel'inin gerçekten de, Ödül'ün özüne uygun olarak, insanlığa yararlı bir çalışmaya verildiği açıkça ortada... Bu konudaki araştırmalar için, "yapılabilecek her şeyi yaptılar", demekse bugün için olası değil; öyle görünüyor ki, doğa bizi şaşırtmayı sürdürdükçe de mümkün olmayacak...

*O.D.T.Ü. Fizik Bölümü.

Kaynaklar
<http://quantum-optics.physik.uni-konstanz.de/groups/atoptics/ATOptIntro.html>
<http://www.aip.org/physnews/preview/1997/alaser/text.html>
<http://physics.nist.gov/divisions/div842/gp4/atomoptics/intro.html>
<http://llc.hep.by/AtomOptics/optics.htm#introduction>
 Demtröder W., Laserspektroskopie Grundlagen und Techniken, Springer Verlag, 2000.
 Ketterle W., "Bose-Einstein Condensation", Physics World, Mart 1997
 Hänisch T.W., & Schawlow A.L., "Cooling of Gases by Laser Radiation", Optics Communications c.13, s.68, Ocak 1975.
 H.J. Metcalf, W. Philips, "Cooling and Trapping Atoms", Scientific American, s.36, Mart 1987.
 C.Cohen-Tannoudji, W.D. Philips, "New Mechanisms for Laser Cooling", Physics Today, s.33, Ekim 1990.
 Demtröder W., & Inguscio M., NATO-ASI-B, c.: 241, Plenum Press, 1990.
 Chu, S., "Laser Manipulation of Atoms & Particles", Science: c. 253, s.361, Ağustos 1991.
 David Appell, "Laser Cooling Traps The Nobel Prize", Laser Focus World, s.103, Ocak 1998.
 Kozuma M., et. al., Physical Review Letters, c.: 82, s.821, 1999.
 Hagley E. W., et. al., "A Well Collimated Quasi-Continuous Atom Laser", Science, 12 Mart, 1999.