

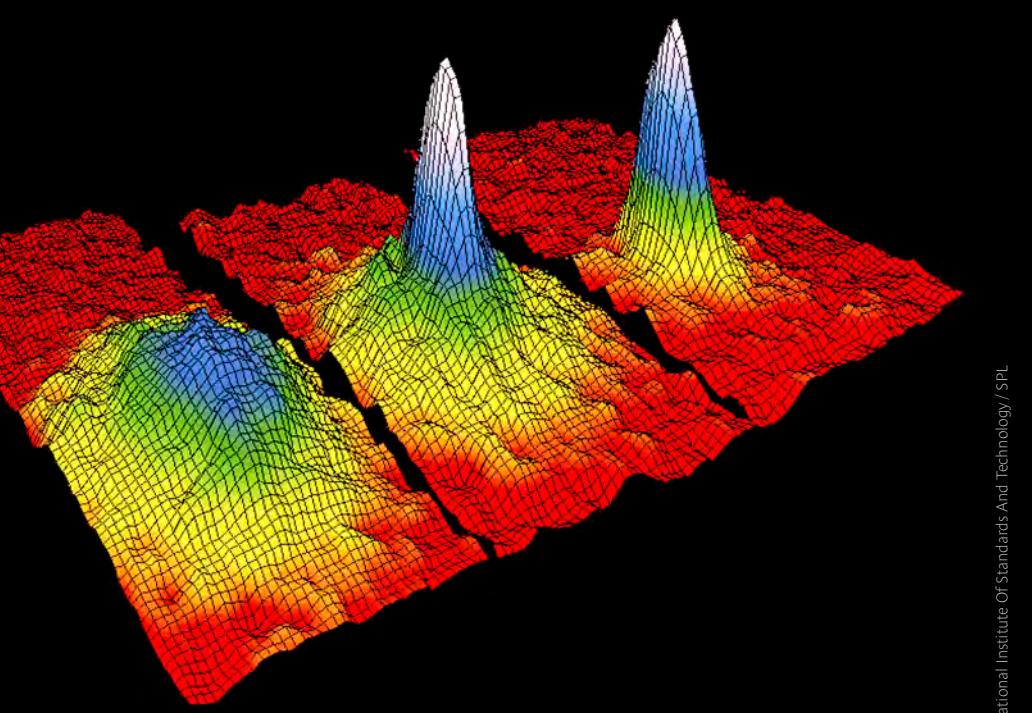
Mutlak Sıfıra Yolculuk

Lazerle Soğutma Yöntemlerinin Gelişim Hikâyesi

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Bir gazın lazer ışınlarıyla soğutulabilmesi, ilk bakışta şaşırtıcı gelir. Sonuçta lazerler, yoğun ışık demetleridir. Bir gazın üzerine lazer ışığı düşürüldüğünde enerji kaybedip soğumasını değil, enerji kazanıp ısınmasını beklersiniz. Ancak özel olarak hazırlanmış düzeneklerde lazer ışınları kullanılarak gazların sıcaklığını neredeyse mutlak sıfıra kadar düşürmek de mümkün.

Lazerle soğutma tekniklerinin geliştirilmesiyle atom fiziğinde yeni bir çağ başladı. En hassas atom saatlerinin geliştirilmesi, Bose-Einstein yoğunluklarının elde edilmesi, lazerle soğutma teknikleri sayesinde mümkün oldu. Onlarca yıla yayılan deneysel ve kuramsal çalışmalar defalarca Nobel ödülleriyle onurlandırıldı.



National Institute Of Standards And Technology / SPL

Rubidyum atomlarından oluşan bir gazdaki hız dağılımını gösteren bu grafiklerde Bose-Einstein yoğunluklarının oluşumu görülüyor. Sıcaklık düştükçe grafiğin ortasında belirmeye başlayan tepecik, gaz bulutundaki atomların aynı kuantum durumuna yığılmaya başladığını gösteriyor.

Işık, Fotonlar, Enerji ve Momentum

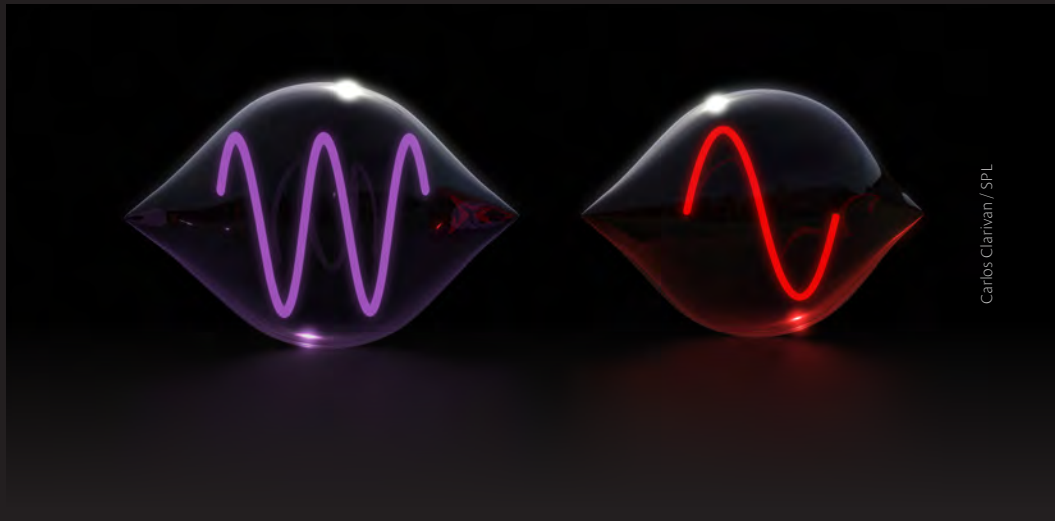
Albert Einstein 1905 yılında ışık ışınlarının, daha sonraları foton olarak adlandırılacak, enerji paketleri içerdiğini öne sürmüştü. Einstein'ın, fotoelektrik olay (ışık ışınlarının atomlardan elektron koparması) ile ilgili deneysel verileri açıklamak için öne sürdüğü bu düşünce, kuantum fiziğinin gelişim aşamalarındaki ilk kuramsal çalışma oldu.

Bir atom, bir ışık ışınından foton soğurarak enerji kazanabilir. Örneğin, frekansı ν olan bir ışık

ışını ile bir atomun etkileştiğini düşünelim. Işındaki fotonların her biri, h Planck sabiti olmak üzere, $h\nu$ büyüklüğünde enerji taşır. Atom, ışık ışınından bir foton soğurduğunda atomun enerjisi

$h\nu$ kadar artar. Bu sırada bir elektron bulunduğu enerji seviyesinden daha yüksek enerjili bir seviyeye geçer. Atomlardaki enerji seviyeleri (orbitaller) süreksiz olduğu için elektronun ışık ışınından foton yakalayabilmesi için fotonların enerjisinin, orbitallerin enerjileri arasındaki farka eşit olması gerekir. Uyarılan atom, sahip olduğu fazladan enerjiyi bir süre sonra yeniden foton ya da fotonlar hâlinde geri yayar.

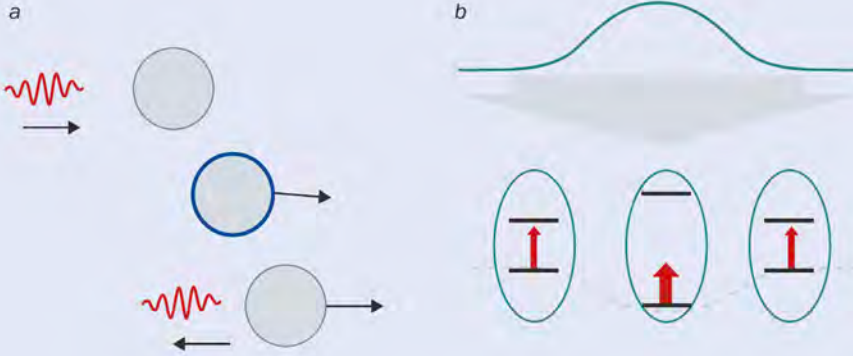
Fotonlar sadece enerji değil, momentum da taşır. Bir fotonun enerjisi (E) ile momentumu (p) arasında, c ışık hızı olmak üzere, $E=pc$ ilişkisi vardır. Dolayısıyla foton soğuran ya da yayan bir atomun sadece enerjisi değil, momentumu da değişir.



Carlos Clarivan / SPL

Işık, foton olarak adlandırılan enerji paketlerinden oluşur.

Işık Kuvvetleri

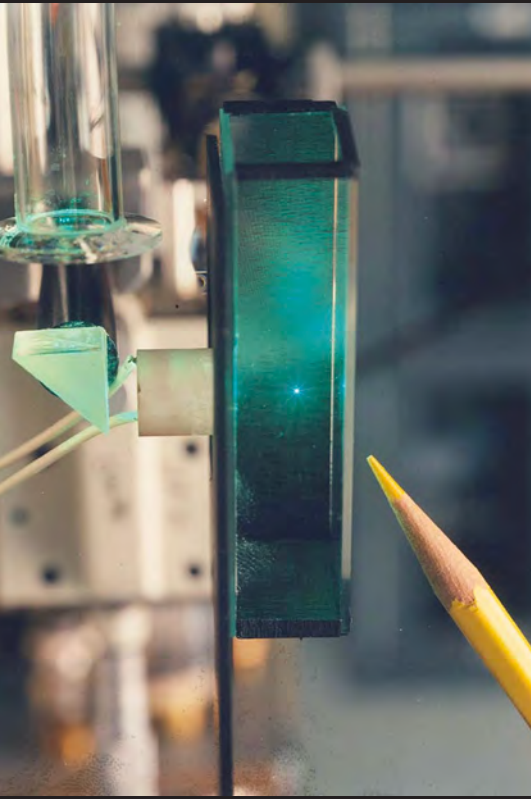


Işık ile atomlar arasında iki ayrı kuvvetten bahsedilebilir: saçılma kuvveti (a) ve dipol kuvveti (b). Saçılma kuvveti, atomların foton soğurması ya da yaymasının sonucudur. Durağan bir atom, bir foton soğurduğunda, momentumun korunumu yasası uyarınca, fotonun momentumu yönünde hız kazanır. Belirli bir yöndeki bir ışık ışınından soğurulan çok sayıda fotonun tamamı, atomun momentumunu aynı yönde değiştirir. Bu etkiler zamanla giderek birikir. Atom, kazandığı enerjiyi bir foton ile geri yaydığında da momentumu değişir. Ancak atomlar, fotonları rastgele yönlerde yaydığı için zaman içinde yayılan çok sayıda fotonun toplam momentumu sıfıra yakınsar. Dolayısıyla yayılan fotonlar, atomun momentumunda önemli bir değişime yol açmaz. Bir atomun belirli bir yöndeki bir lazer ışınından çok sayıda foton soğurup geri yaymasının net sonucu, atomun lazer ışını yönünde bir itme kazanmasıdır. Dipol kuvvetini ise iki biçimde anlayabiliriz. Birincisi, elektronların uyarılmasına yol açmayacak frekanslı bir ışık ışını ile etkileşimler, atomun enerji seviyelerinde kaymalara (ışık kayması) yol açar. Bu etki, ışık yoğunluğu daha yüksek olduğu için ışının merkezinde daha güçlüdür. Fotonların enerjisinin uyarılma için gerekli enerjiden daha düşük olması hâlinde atomlar ışının merkezine doğru çekilir. İkincisi, ışık ışınlarının taşıdığı elektrik alanı, pozitif yüklü atom çekirdeklerini ve negatif yüklü elektronları farklı yönlerde iterek bir dipol (çift kutup) ortaya çıkmasına yol açar. Bu durum, fotonların enerjisinin uyarılma için gerekli olandan daha düşük olması hâlinde, atomların ışının merkezine doğru çekilmesine neden olur.

Optik “Cımbızlar”: Parçacıkları Işıkla Yönlendirmek

Fotonların parçacıkları yönlendirebilmek için kullanılabileceği düşüncesi, Einstein’ın 1917’de fotonların da momentum taşıdığını fark etmesine kadar geri gider. Bu konuyla ilgili ilk deneylerse 1933 yılında Otto Frisch tarafından yapıldı. Frisch, sodyum-buhar lambasıyla ürettiği ışık ışınlarını kullanarak bir sodyum atom demetini 1 mm civarında saptırdı. Deneyler, ışık ışınlarının madde parçacıklarını yönlendirmek için kullanılabileceği düşüncesini doğrulasa da gözlemlenen etki çok küçüktü.

Lazerlerin 1960’larda icat edilmesinden sonraysa ışıkla madde parçacıklarını yönlendirme çalışmaları yeniden ivme kazandı. Bell Laboratuvarı çalışanlarından Arthur Ashkin, çeşitli kuramsal hesaplardan yararlanarak lazer ışınlarının mikroskopik nesneler üzerinde azımsanamayacak kuvvetler uygulayabileceğini fark etmişti. Bir argon lazeriyle su içindeki polistiren boncuklar üzerinde deneyler yapmaya başladı. Lazerin boncukları itebildiğini ve kabın duvarlarına tutturduğunu gözlemledi.



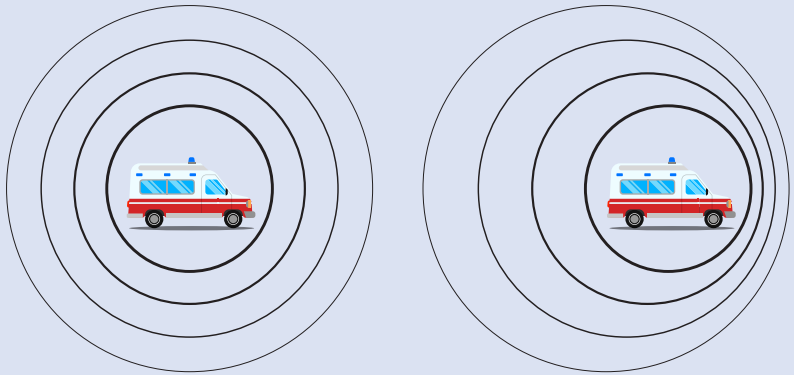
Nokia Bell Labs, Nokia Corporation ve AT&T Arşivi

Bell Laboratuvarlarında 1971 yılında çekilmiş bu fotoğrafta 25 mikron çapında bir cam küre lazer ışını tarafından havaya kaldırılmış hâlde görülüyor. Üçgen biçimli prizma, lazer ışığını kürenin alt kısmına odaklıyor.

Ashkin, 1970’te yayımladığı ilk makalesinde lazerlerin boncukları ivmelendirmenin yanı sıra “kıskaca da alabildiğini” yazıyordu. Deneyler, boncukların birbirine zıt yönlerde hareket eden lazer ışınlarının arasındaki bir bölgeye sıkıştırılabildiğini gösteriyordu. Ashkin, ilerleyen yıllarda Bell Laboratuvarındaki arkadaşlarıyla birlikte çalışmalara devam etti. Araştırmacılar, ışık ışınlarıyla küçük nesnelerin havaya kaldırıldığı deneylere imza attı. Daha da önemlisi Ashkin ve arkadaşları, ufak nesnelerin odaklanmış lazer

Doppler Kayması

Doppler kayması, bir dalga kaynağı ve bir gözlemcinin birbirlerine göre hareket etmesi sebebiyle, kaynaktan yayılan dalganın frekansı (ya da dalga boyu) ile gözlemci tarafından gözlemlenen dalganın frekansının birbirinden farklı olması durumudur. Doppler kaymasına günlük hayatta da sıklıkla tanık oluruz. Örneğin bir ambulans sireni, sabit bir frekansla ses yayar. Ancak ambulans bize yaklaşırken siren sesini giderek daha sık, bizden uzaklaşırken ise giderek daha seyrek duyarız. Başka bir deyişle ambulans bize yaklaşırken algıladığımız siren sesi daha yüksek frekanslı; ambulans bizden uzaklaşırken algıladığımız siren sesi ise daha düşük frekanslıdır. Bu durumun nedeni ambulansın bize göre hareket hâlinde olmasıdır. Ambulans bize yaklaşırken ambulansın yaydığı ses dalgalarının tepe noktaları, giderek daha yakın bir konumdan yayılır. Dolayısıyla bize ulaşan ses dalgalarının tepe noktaları arasındaki mesafe (dalga boyu) kısılır; ses dalgalarının tepe noktalarının ulaşma sıklığı (frekansı) artar. Ambulans bizden uzaklaşırsa tam tersi olur.



Doppler kayması

Söz konusu ışık dalgaları olduğunda da aynı durum geçerlidir. Işık kaynağı bize doğru yaklaşıyorsa gözlemlediğimiz ışığın frekansı ve enerjisi kaynaktan yayılan ışığın frekansından ve enerjisinden daha büyük; ışık kaynağı bizden uzaklaşıyorsa gözlemlenen ışığın frekansı ve enerjisi kaynaktan yayılan ışığın frekansından ve enerjisinden daha küçük olur.

Işıkla ilgili Doppler kaymasını ifade etmek için sıklıkla “maviye kayma” ve “kırmızıya kayma” terimleri kullanılır. Mavi renkli ışık daha yüksek frekanslı; kırmızı renkli ışık daha düşük frekanslıdır. Dolayısıyla bir ışığın renginin maviye kayması, kaynak ve gözlemcinin birbirine yaklaşması nedeniyle gözlemlenen ışığın kaynaktan yayılan ışıktan daha yüksek frekanslı olması; ışığın renginin kırmızıya kayması ise kaynak ve gözlemcinin birbirinden uzaklaşması nedeniyle gözlemlenen ışığın kaynaktan yayılan ışıktan daha düşük frekanslı olması anlamına gelir.

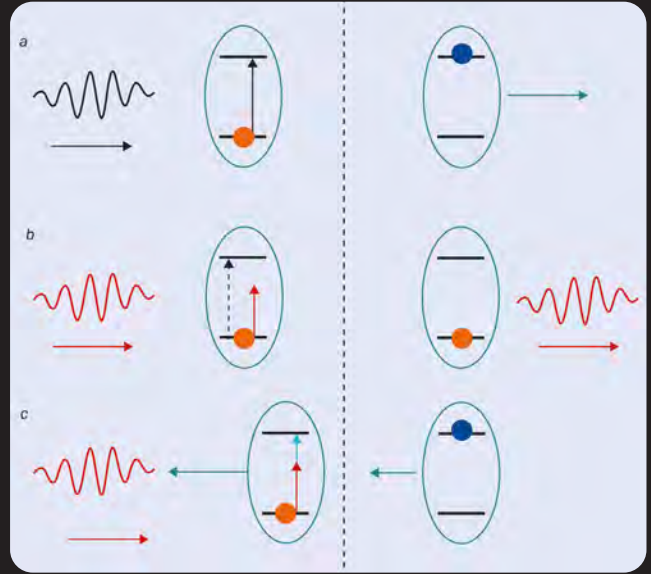
ışınlarının merkezinde kapana sıkıştırılabileceğini gösterdi. Bu yöntem, ilerleyen yıllarda “optik cımbızlama” olarak adlandırıldı. Optik cımbızlar, özellikle biyolojide pek çok uygulama alanı buldu. Ashkin, 2018’de optik cımbızların keşfine ve biyolojik sistemlerdeki uygulamalarına katkılarından dolayı Nobel ödülüyle onurlandırıldı.

Lazerle Soğutma

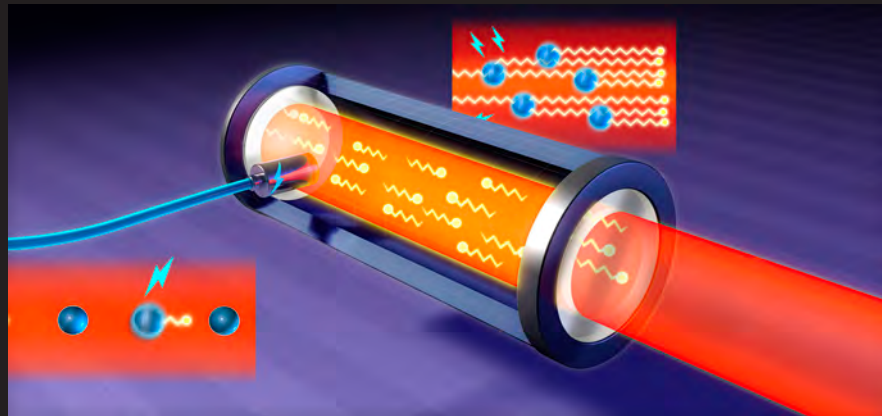
Ashkin’in çalışmaları, mikroskopik maddelere odaklanmıştı. Biri Stanford Üniversitesinden, diğeri Washington Üniversitesinden iki ayrı araştırma grubu ise 1970’lerin ortalarında lazerlerin uyguladığı kuvvetlerin daha da küçük maddeler üzerindeki etkileri üzerine kafa yormaya başladı. Stanford Üniversitesinden Theodor Hänsch ve Arthur Schawlow nötr atomlar; Washington Üniversitesinden Hans Dehmelt ve Dave Wineland ise iyonlar

üzerine çalışmalar yaptı. Her ne kadar bu iki sistem ilk bakışta farklı gibi gözükse de lazer kuvvetlerinin atomlar ve iyonlar üzerindeki etkileri benzerdi. Her iki araştırma grubu da lazerlerin nötr atomlardan ya da iyonlardan oluşan gazları soğutmak için kullanılabileceğini fark etmişti.

Lazerle soğutma mekanizması özetle şöyle ilerler: Bir lazer ışınının frekansı bir atomun iki enerji seviyesi arasındaki farkın bir miktar altına ayarlanmışsa (kırmızıya “ayarsız” lazer) ışık kaynağına göre durağan hâldeki atomlar, enerjisi yeterli büyüklükte olmadığı için lazerden foton yakalayamaz. Işık kaynağından uzaklaşan atomlar içinse



(a) Durağan bir atomun, lazer ışınından foton yakalayabilmesi için fotonun enerjisinin atomun enerji seviyeleri arasındaki farka eşit olması gerekir. Fotonu soğuran atom, momentum kazanır. (b) Lazer ışınının kırmızıya ayarsız olması (fotonun enerjisinin atomun enerji seviyeleri arasındaki farktan küçük olması) durumunda durağan bir atom, foton soğuramaz. (c) Lazer ışınına doğru hareket eden bir atom, kırmızıya ayarsız bir lazer ışınından foton soğurabilir. Foton soğuran atomun momentumu azalır.



Lazer

kırmızıya kayma nedeniyle, fotonların enerjisi daha da düşüktür. Dolayısıyla bu atomlar da lazer ışınıyla etkileşemez. Işık kaynağına doğru hareket eden atomlar içinse maviye kayma nedeniyle, fotonların enerjisi artar. Bu atomlar kırmızıya ayarsız lazer ışınlarından foton yakalayabilir. Foton soğuran atomların enerjisi artar, ancak hareket yönleri birbirine zıt olduğu için momentumları azalır. Uyarılan atomlar sahip olduğu fazla enerjiyi bir süre sonra yeniden geri yayar. Rastgele bir yönde yayılan fotonun enerjisi (laboratuvar referans sisteminde), lazer ışığının frekansından büyük olur. Dolayısıyla lazer ışığından

foton yakalayıp yayma süreci, atomun enerjisinin zamanla azalmasına yol açar. Sıcaklık, bir sistemdeki ortalama enerjinin bir ölçüsüdür. Dolayısıyla sistemdeki parçacıkların enerjisi foton soğurup yayma yoluyla zamanla azaldıkça sistemin ortalama enerjisi ve dolayısıyla sıcaklığı azalır. Böylece bir gaz bulutunun üzerine tutulan güçlü lazer ışığının etkisiyle soğuması mümkün olur.

Lazer ışınının frekansı, atomun iki enerji seviyesi arasındaki farkın bir miktar üstüne ayarlandığında ise (maviye ayarsız lazer) ancak ışık kaynağından uzaklaşmakta olan (lazer ışığının kırmızıya kaydığı) parçacıklar foton yakalayabilir. Bu parçacıklar da bir süre sonra kazandıkları fazla enerjiyi geri yayar. Ancak yayılan fotonların frekansı, lazerinkinden düşük olur. Bu durum, gaz bulutunun zamanla ısınmasına yol açar.

Özetle, lazerin kırmızıya ayarsız olması durumunda sadece lazer ışığının maviye kaydığı atomlar foton yakalayabilir ve bu durum, gaz bulutunun soğumasına yol açar. Lazer ışığının maviye ayarsız olduğu durumda ise sadece lazer ışığının kırmızıya kaydığı parçacıklar foton yakalayabilir ve bu durum, gaz bulutunun ısınmasına yol açar.

İyonların Lazerle Soğutulması

Wineland, 1975'in sonunda ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsünde (NIST) çalışmaya başladı. Asıl görevi sezyum atom saati araştırmalarına destek vermektir, ancak lazerle soğutma üzerinde de çalışmalar yapma fırsatı buldu.

Wineland, bir kapanın içindeki iyonları lazerle soğutma üzerine çalışmaya karar vermişti. Böyle bir deneyi gerçeğe dönüştürmek için üç şeye ihtiyaç vardı: 1) iyon kapanı, 2) kapanın içinde sadece üzerinde deneyler yapılacak iyonların bulunmasını sağlayacak bir vakum sistemi, 3) kapandaki iyonları soğutacak bir lazer sistemi. O dönemler Wineland, lazerler hakkında fazla bir şey bilmiyordu. Deneyleri gerçeğe dönüştürmek için yine NIST'de çalışan Bob Drullinger ile iş birliği yaptı.

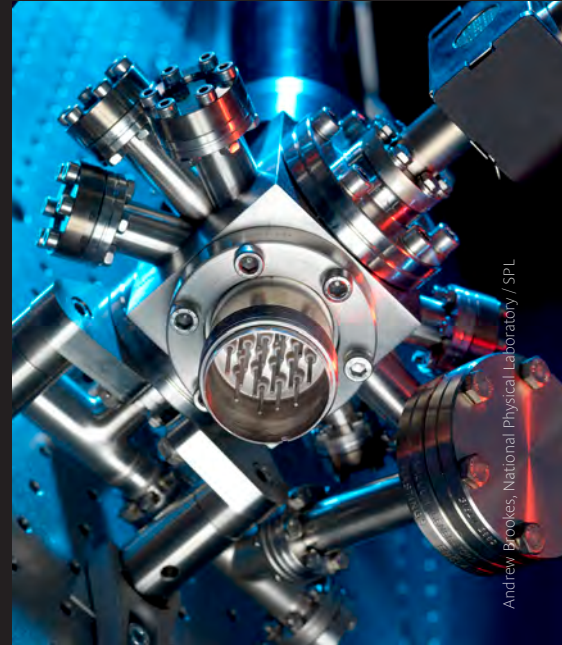
Drullinger, 1977'de yaklaşık altı haftalık bir çabanın sonucunda iyonların lazerle soğutulmasının incelenebileceği bir deney düzeneğini bir araya getirdi. İyon kapanının içinde yaklaşık 50.000 magnezyum iyonu vardı. Araştırmacılar, iyonların rastgele hareketlerinin kapanın elektrotlarında sebep olduğu akımı ölçerek gaz bulutunun sıcaklığı hakkında fikir edinmeyi planlıyordu.



Amerikalı fizikçi David Wineland, NIST'deki laboratuvarında

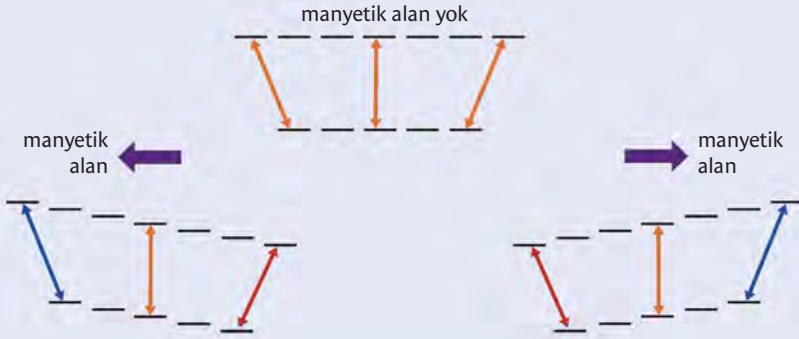
İyonların sıcaklığı ne kadar yüksekse rastgele hareketlerin sebep olduğu "gürültülü" akım da o kadar yüksek olmalıydı. Dolayısıyla akımın zamanla artması ısınmaya; zamanla azalmasıysa soğumaya işaret edecekti.

Wineland ve Drullinger ilk olarak morötesi lazerin frekansını, durağan iyonların soğurabileceğinden biraz



Stronsiyum iyon kapanı. Bu kapan bir stronsiyum optik saatinin bileşenlerinden.

Zeeman Kayması



Zeeman etkisi, bir atomun enerji seviyelerinin harici manyetik alan etkisiyle kaymasını ifade eder. Örneğin bir sodyum atomunun 5 adet 3d orbitalinin ve 7 adet 4f orbitalinin enerjileri, harici bir manyetik alanın yokluğunda aynıdır. Bu orbitaller arasındaki geçişlerin tamamı, aynı miktarda enerji gerektirir. Harici bir manyetik alan uygulandığında orbitallerin enerjileri, açısal momentum kuantum sayısına ve manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak farklı miktarlarda değişir. Bu durum 3d orbitalleri ile 4f orbitalleri arasındaki geçişlerin, açısal momentum kuantum sayılarına ve manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak farklı miktarda enerji gerektirmesine yol açar.

daha düşüğe ayarladı. Bekledikleri gibi elektrotlardaki akımın belirgin bir biçimde azaldığını gözlemlediler. Araştırmacılar, gözlemlenen etkinin lazerlerden kaynaklandığından emin olmak için aynı deneyi, bir kez de lazerin frekansını durağan iyonların soğurabileceğinden biraz daha yükseğe ayarlayarak tekrarladı. Bu kez de elektrotlardaki akımın belirgin bir biçimde arttığı gözlemlendi. Her ne kadar gaz bulutunun sıcaklığının ne olduğu tespit edilemese de elde edilen deney sonuçları, “kırmızıya ayarsız” lazerlerle gaz bulutlarının soğutulabileceğini; “maviye ayarsız” lazerlerle ise gaz bulutlarının ısıtılabilmesini doğruladı. Wineland 2012’de Nobel Fizik Ödülü’nü kazandı.

Atomların Lazerle Soğutulması

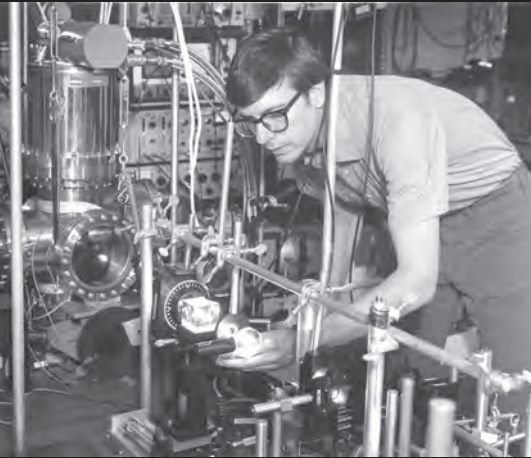
Wineland’ın NIST’nin Boulder’daki tesisinde iyonların lazerle soğutulması üzerine çalıştığı sıralarda, Bill Phillips MIT’de doktora öğrencisiydi. Doktora tezi konusu, manyetik rezonans üzerine olsa da lazerler üzerine de çalışmalar yapmıştı. Phillips 1980’lerin ortalarında NIST’nin Gaithersburg, Maryland’daki tesisinde çalışmaya başladı. Wineland gibi onun da asıl işi, lazerle soğutma üzerine araştırmalar yapmak değildi.

Elektrik akımını daha iyi ölçmek üzerine bir projede çalışmak üzere işe alınmıştı. Ancak işe girerken, ana görevinin dışında atom fiziği üzerine de araştırmalar yapmasına izin verilmesi için söz almıştı.

Phillips, atomların lazerle soğutulması üzerine çalışmayı planlıyordu. Esin kaynağı, Ashkin’in 1978’de yazdığı bir makaleydi. Ashkin, nötr atomların odaklanmış iki lazer ışını arasında kapana sıkıştırılabileceğini öne sürmüştü. Ancak bunu başarmak kolay değildi. Elektriksel olarak yüksüz olmaları nedeniyle nötr atomlara kolayca uygulanabilecek iki kuvvet vardır: saçılma kuvveti (foton soğurulması yoluyla momentum transferi) ve dipol kuvveti (ışığın elektrik alanının atomun yük dağılımını dengesizleştirmesiyle atomun ışının merkezine doğru çekilmesi). Bu kuvvetlerin her ikisi de görece zayıftır. Bu yüzden bir optik kapanla sıcak gaz bulutundaki atomları bir hacmin içine hapsedmek zordur.

Phillips, MIT’de doktora sonrası araştırmalarına devam ederken de sodyum atomlarının lazerle soğutulması üzerine çeşitli denemeler yapmış ve iki önemli sorun olduğunu fark etmişti. Birincisi sodyum atomu ışını “fırından” 1.000 m/s’ye varan bir hızla çıkıyordu ve bu çok büyük bir Doppler kaymasına yol açıyordu. Atomlar lazer ışınından foton soğurarak yavaşlamaya

başladığında ise Doppler kayması azalıyor ve atomlarla lazer arasındaki etkileşimler azalıyordu. Atomların hızı sadece birkaç m/s düştükten sonra soğuma duruyordu. İkincisi ise atomların gerçek yapısının, Doppler soğutması ile ilgili açıklamalarda varsayılandan daha karmaşık olmasıydı. Gerçek atomlarda çok sayıda enerji seviyesi vardır. Deneylerde kullanılan lazerler, bu enerji seviyelerinin belirli iki tanesi arasındaki enerji farkına ayarlanıyordu. Ancak deneyler sırasında elektronlar, lazer ışınından foton soğuramayacakları “karanlık” bir enerji seviyesine geçiş yapıyordu. Bu durum da yine soğuma sürecinin sonlanmasına yol açıyordu.

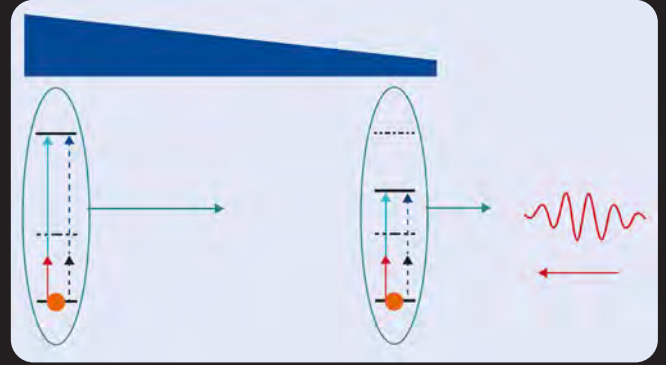


Bill Phillips 1990'larda, NIST'deki laboratuvarında kapana kısırılmış, ısıldayan bir sodyum atom bulutunu gözlemlerken

Phillips 1980'lerin ortalarında, sodyum atomlarını lazerle soğutmak için NIST'de bir laboratuvar kurdu. O sıralar başka araştırma grupları, Phillips'in daha önce tespit ettiği iki soruna

çeşitli çözümler öne sürmüştü. Çoklu enerji seviyeleri sorunu, ikinci bir lazer kullanılarak aşılabilir. Bu ikinci lazer, atomları içine düştükleri karanlık durumdan çıkararak yeniden soğutucu lazerle etkileşmeye başlamlarını sağlayacaktı. Doppler kaymasındaki değişimi çözmek içinse iki yol vardı: Birincisi soğutucu lazerde tek bir değil, çok sayıda frekansta ışık ışını olması (beyaz ışık soğutması). İkincisi, Doppler kaymasındaki değişime uygun biçimde soğutucu lazerin frekansının zamanla değiştirilmesi. Bu çözümler, hem pahalıydı hem de lazer kaynağının karmaşık biçimlerde modifiye edilmesini gerektiriyordu. Phillips, MIT'den tez danışmanı Hal Metcalf'a da danışarak her iki sorunu birden basit bir biçimde çözmeyi başardı: Lazerlerin frekansını Doppler kaymasındaki değişimlere uygun biçimde ayarlamak yerine atomların enerji seviyelerini Doppler kaymasındaki farklılara uygun bir biçimde ayarlamayı tercih etti.

Phillips'in çözümü, Zeeman etkisine dayanıyordu. Manyetik alan içerisinde bulunan atomların enerji seviyelerinde kaymalar olur. Manyetik alanın



Phillips ve Metcalf, Zeeman kaymasından yararlanarak tek frekanslı bir lazer ışınıyla farklı hızlarda hareket eden atomları soğutmanın bir yolunu buldu. Konik manyetik alanın büyüklüğü, kaynağa daha yakın bölgelerde daha büyük; kaynağa daha uzak bölgelerdeyse daha küçük. Bu durum, yüksek hızlı atomlardaki Zeeman kaymasını daha büyük; düşük hızlı atomlardaki Zeeman kaymasının daha küçük olmasına yol açıyor. Böylece, tek frekanslı bir lazerle farklı hızlarla hareket eden atomları soğutmak mümkün oluyor.

büyüklüğüne bağlı olarak bu kaymaların büyüklüğü de değişir. Phillips fırından çıkan atom ışını demetlerinin etrafında konik bir manyetik alan oluşturdu. Kaynağa daha yakın, atomların daha hızlı hareket ettiği (Doppler kaymasının daha büyük olduğu) bölgedeki manyetik alan daha büyük; kaynağa daha uzak, atomların daha yavaş hareket ettiği bölgedeki manyetik alan ise daha küçüktü. Manyetik alanın büyüklüğündeki bu değişim sayesinde tek bir lazerle çok farklı hızlarla hareket eden atomları soğutmak mümkün oldu. Üstelik manyetik alan, karanlık hâle geçen atomların ikinci bir lazerle yeniden soğutucu lazerle etkileşebilecek hâle getirilmesi ihtiyacını da ortadan kaldırdı.

Atomların Manyetik Kapanla Yakalanması

Phillips ve Metcalf'ın bir sonraki hedefi, atomları kapana kısırmak oldu. Bu amaç için de yeni Zeeman kaymasından faydalandılar. Araştırmacılar, soğutulan atomların içinde bulunduğu vakum haznesinin içine iki bobin yerleştirerek merkezden dışa doğru büyüklüğü giderek artan bir manyetik alan oluşturdu. Bu durum manyetik alanın merkezindeki Zeeman kaymalarının daha küçük; dış bölgelerindeki Zeeman kaymasının daha büyük olmasına yol açtı. Manyetik alanın merkezinden uzaklaşan atomların “iç enerjisi”, Zeeman kaymasının enerji seviyelerinde sebep olduğu kaymalara bağlı olarak artıyordu. Bu artış ise doğal olarak atomların hareket enerjisinin azalmasına ve yavaşlamalarına yol açıyordu. Merkezden dışarıya doğru yol alan atomlar eninde sonunda durup yön değiştiriyor ve manyetik alanın merkezine doğru hareket etmeye başlıyorlardı.

Phillips ve Metcalf nötr atomların manyetik kapanla bir hacmin içine hapsedilmesi üzerine ilk makalelerini 1985'te yayımladı. On iki sene sonra Phillips'e “atomların lazer ışığıyla soğutulması ve kapana kısırılması” üzerine çalışmalarından dolayı Nobel Fizik Ödülü verildi.

Optik Ağdalar

Ashkin, 1970'lerin sonlarında Bell Laboratuvarı'ndaki çalışma arkadaşlarıyla birlikte atom demetleri üzerinde deneyler yapmaya başlamıştı. John Bjorkholm ile birlikte yaptıkları çalışmada, atom demetleriyle lazer ışınlarını üst üste bindirerek atomların bir noktaya odaklanabileceğini ya da bir noktadan uzaklaştırılabileceğini göstermişlerdi. Lazer ışınının atomların enerji seviyelerinde sebep olduğu değişimler (ışık-kayması), lazer ışınının kırmızıya ayarsız olması durumunda atomların ışının içine çekilmesine; maviye ayarsız olması durumundaysa atomların dışarı itilmesine yol açıyordu. Ashkin, bu olgudan yararlanarak “tamamen optik” (Phillips'in deneylerinde olduğu gibi manyetik alanların kullanılmadığı) bir atom kapanı geliştirmek istiyordu. Bjorkholm ile birlikte bu amaca ulaşmak için çalışmaya başladı. Ancak kullandıkları deney düzeneğinin mikadan üretilmiş camları, yeteri kadar düşük basınçlı bir ortam

oluşmasına izin vermiyordu. Dışarıdan gelen atomlar ve moleküller, düzeneğin içine sızarak atom demetindeki atomlarla çarpışıyor ve kapana kısırılmaya çalışılan atomların dağılmasına yol açıyordu. Birkaç yıl süren çalışmaların başarıya ulaşamaması üzerine Bell Laboratuvarı yöntemi, Ashkin'den bu konuyu bırakıp başka şeylere yönelmesini istedi. Ancak o sıralarda Steve Chu'nun Bell Laboratuvarında çalışmaya başlamasıyla durum değişti.

Ashkin ve Chu birlikte atomların soğutulmasına ve kapana kısırılmasına uygun bir vakum sistemi geliştirdi. Ayrıca Doppler kaymasında değişimlerle baş edebilecek biçimde lazer frekansının ayarlanabildiği, sodyum atomlarını yavaşlatmak için kullanılacak bir düzenek kurdular. O güne kadar lazerle soğutma sistemlerinde tek bir soğutucu lazer kullanılıyor, sadece bu lazer ışınına zıt yönde hareket eden parçacıklar lazerle etkileşebiliyordu. Chu ise birbirine dik olarak konumlandırılmış üç çift



Optik ağdalarla birbirine dik olarak konumlandırılmış üç çift lazer bulunur. Atomlar hangi yönde hareket ederlerse etsinler soğutucu bir lazerle etkileşebilirler.

lazer kullanılmasını önerdi. Lazer çiftleri birbirlerine zıt noktalara yerleştirilecek ve birbirlerine zıt yönlerde ışın üreteceklerdi. Böylece atomların sadece tek bir yöne hareket ederken değil, hangi yöne hareket ederlerse etsinler kırmızıya ayarsız fotonları yakalayarak enerji kaybetmeleri mümkün olacaktı. Chu, böyle bir düzenekteki atomların hareketlerini, aşırı ağıdalı bir sıvının içinde yüzmeye çalışan bir yüzücünün hareketlerine benzeterek hayal ettikleri sisteme “optik ağda” adını verdi.

Araştırmacılar, optik ağdaları 1985’te gerçeğe dönüştürdü. Geliştirdikleri sistem o kadar ağıdalydı ki sodyum atomlarını bir saniyenin onda biri kadar üst üste binen ışınlarda tutmayı başarabiliyordu. Bu süre, günlük hayatımız açısından çok kısa olsa da atom fiziği açısından neredeyse sonsuz uzunluktadır.

Ashkin, Chu ve arkadaşları optik ağdanın içindeki atomların sayısını ve gaz bulutunun sıcaklığını ölçmeyi de başardı. Lazer ışınlarından foton soğurup yeniden yayan atomlar; ışıldayan, dağınık bir bulut olarak görülüyordu. Atomların yaydığı toplam ışık miktarı da ağdanın içindeki atomların sayısının tahmin edilmesine imkân veriyordu. Araştırmacılar, gaz bulutunun sıcaklığını ölçmek için ise “serbest bırak yeniden yakala” olarak adlandırılabilen bir yöntem kullanıyordu: Lazerler kısa bir süreliğine kapatılıp yeniden açılıyor, bu arada optik ağdanın

dışına kaçmayı başaran atomların sayısı ölçülerek gaz bulutunun sıcaklığı belirleniyordu. Analizler, optik ağda ile soğutulan sodyum atomu bulutunun sıcaklığının 240 mikrokelvine kadar düştüğünü gösteriyordu.

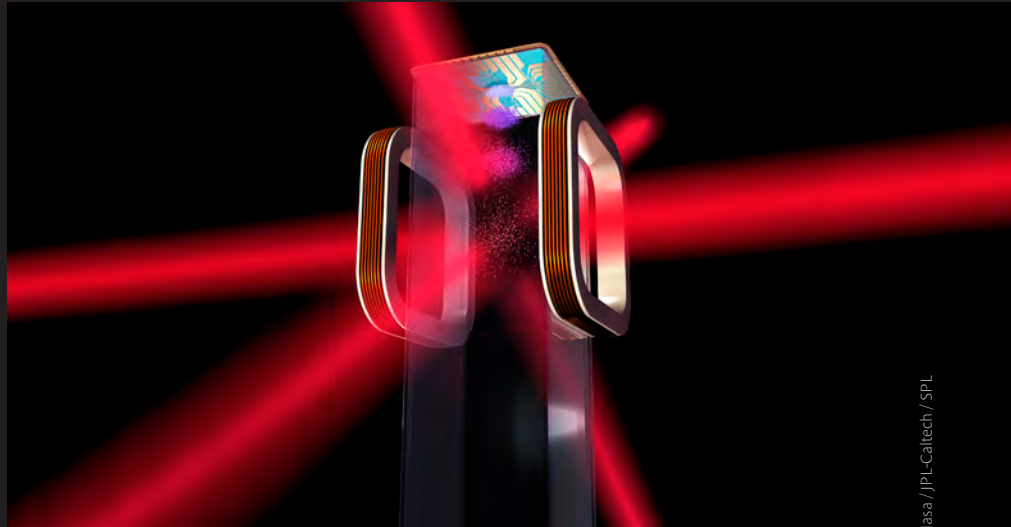
Optik ağdalar her ne kadar atomları soğutmakta gayet etkin olsa da Ashkin’in hayal ettiği gibi bir kapan değildi. Atomların hareketleri yavaşlasa da bir kez lazer ışınlarının sınırlarına ulaştıklarında kolayca dışarı kaçabiliyorlardı. Bir kapanın ise sistemin sınırlarına ulaşan parçacıkları yeniden içeriye doğru yönlendirmesi gerekir.

Bir kapan oluşturmanın en basit yolu, optik cımbızlarda olduğu gibi bir noktaya odaklanan lazer ışınları kullanmaktır. Lazer ışınının odaklanacağı bölgenin hacmi, sistemin tamamına kıyasla çok küçük kalacaktı. Ancak Ashkin, Bjorkholm ve Chu, vakum sistemi içindeki rastgele hareketleri sırasında

atomların yolunun eninde sonunda kapanın içine düşeceğini fark etmişti. Araştırmacılar, geliştirdikleri optik ağda sistemine atomları kapana kısıracak bir lazer daha eklediler. Sonuçta içinde birkaç yüz atom bulunan bir bulutun, kapanın içinde ışıldamaya başladığı görüldü. Kapana kısırılan atomların sayısını artırmak ise kolay değildi. Ya atomları daha çok soğutmanın bir yolunu bulmak ya da daha iyi bir kapan geliştirmek gerekiyordu.

Magneto-Optik Kapanlar

1980’lerin ilk yarısında Fransa’daki École Normale Supérieure’den (ENS) Claude Cohen-Tannoudji ve öğrencileri lazerle soğutmayı kuramsal açıdan inceliyordu. Lazerle gaz bulutlarını soğutmanın mümkün olabileceğinin anlaşılmasından sonra ilk olarak üç Sovyet fizikçi

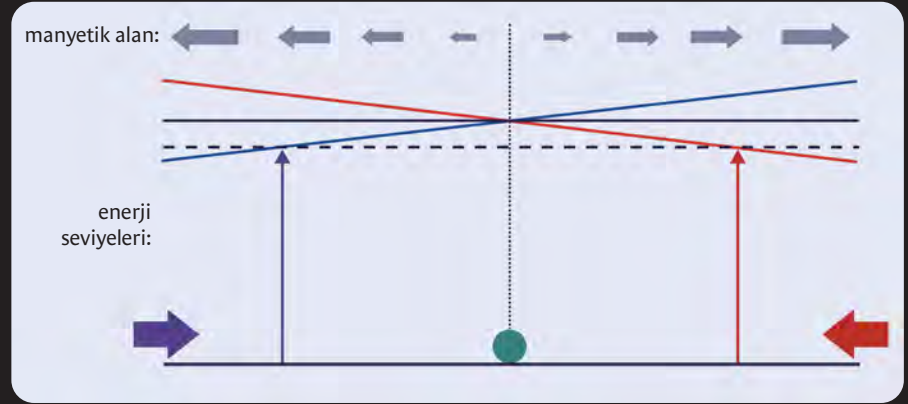


Magneto-optik kapan

Vladilen Letokhov, Vladimer Minoghin ve Boris Pavlik ardından da çeşitli başka araştırma grupları, ulaşılabilir minimum sıcaklığı belirlemek üzere kuramsal çalışmalar yapmıştı. Tüm araştırma gruplarının vardığı sonuçlar, Doppler soğutmasıyla bir gaz bulutunun sıcaklığının mutlak sıfırın birkaç yüz mikrok Kelvin üzerine kadar düşürülebileceğini gösteriyordu. Ashkin ve Chu'nun optik ağıdalarda ölçtüğü sıcaklık da bu tahminlerle uyumluydu. Cohen-Tannoudji'nin doktora öğrencisi Jean Dalibard ise bu sınırı daha da aşağılara çekmenin mümkün olup olmadığı üzerine kafa yoruyordu.

Doppler soğutmasıyla ulaşılabilir sıcaklığın bir alt sınırı olmasının nedeni, soğutucu lazer ışığı tarafından uyarılan atomların yaydığı fotonların tamamının ortamdan uzaklaşmaması, bir kısmının yeniden ortamı ısıtmasıdır. Dalibard, atomları mümkün olduğu kadar “karanlıkta tutarak” 1970’lerdeki kuramsal analizlerin iddia ettiğinden daha düşük bir alt sınıra ulaşmanın mümkün olabileceğini düşündü. Bu amaçla atomların daha önceki analizlerde göz önünde bulundurulmayan bir özelliğine odaklandı.

Standart Doppler soğutma kuramında atomlar, bir temel enerji seviyesinden bir de uyarılmış enerji seviyesinden oluşuyormuş gibi düşünülüyordu. Gerçekte ise atomların enerji seviyeleri,



Magneto-optik kapanlarda magnetik alanın büyüklüğü merkezden dışı doğru giderek büyür. Orbitallerin enerjilerinde, magnetik alanın büyüklüğüne ve orbitallerin açıl momentumuna bağlı olarak kaymalar yaşanır. Atomlar ancak Zeeman kayması, Doppler kayması ve lazer ışığı frekansının doğru kombinasyonunda olduğu noktalarda foton soğurabilir.

her biri farklı açıl momentum değerlerine sahip alt seviyelerden oluşur. Atom, bir manyetik alanın içerisinde bulunduğunda alt seviyelerin enerjisi artar ya da azalır (Zeeman etkisi). Enerjideki değişim, manyetik alanın büyüklüğüne, yönüne ve enerji seviyesinin açıl momentumuna bağlı olarak değişir. Süreci karmaşıktır. Bir başka etken ise ışık ışınlarının polarizasyonudur. Işık ışınının polarizasyonuna bağlı olarak uyarılma sırasında açıl momentum artar ya da azalır. Dolayısıyla elektronlar, herhangi iki alt enerji seviyesi arasında geçiş yapamaz. Bir elektronun, bir alt enerji seviyesinden bir başka alt enerji seviyesine uyarılabilmesi için seviyeler arasındaki açıl momentum farkının da ışık ışının polarizasyonuna bağlı olarak, belirli bir değer alması gerekir.

Dalibard, kuramsal analizinde hem atomların alt enerji seviyelerini hem de ışık ışınlarının

polarizasyonunu dikkate aldı ve sistemde bir merkezden dışarı doğru büyüyen bir manyetik alan olduğunu hayal etti. Böyle bir sistemde atomların lazer ışığından foton yakalayabilmesi için Doppler kaymasının, Zeeman kaymalarının ve lazer ışığının frekansının doğru kombinasyonda olması gerekiyordu. Sistemdeki manyetik alanın büyüklüğü, konuma bağlı olarak değiştiği için bu durum, atomların herhangi bir konumda lazer ışığı tarafından uyarılamayacağı, soğutucu lazer ışığıyla ancak belirli konumlardayken etkileşebilecekleri anlamına geliyordu. Dalibard, atomlar ile lazer ışığı arasındaki etkileşimleri bu şekilde sınırlandırarak ulaşılabilir minimum sıcaklık değerlerinin daha da aşağıya çekilebileceğini düşünmüştü. Ancak kuramsal hesapları tamamladığında böyle bir sistemle Doppler-altı soğutmanın mümkün olmadığını gördü. Hesaplar böyle bir sistemin “atom kapanı” olarak kullanılabileceğini

ancak daha önceleri ulaşılanlardan daha fazla bir soğutma sağlamayacağını gösteriyordu. Dalibard amacına ulaşamamıştı ancak yaptığı çalışmalar boşa gitmedi.

MIT'den Dave Pritchard 1986 yılında ENS'de bir seminer vermiş ve daha büyük hacimli kapanlar üretmek üzerine düşüncelerinden bahsetmişti. Pritchard seminerden sonra dinleyicilere daha iyi bir fikri olan var mı diye sordu. Cevap Dalibard'dan geldi. Pritchard ABD'ye döndükten sonra Dalibard'ın analizlerinden yararlanarak Chu ile birlikte ilk magneto-optik kapanı geliştirdi.

Magneto-optik kapanların geliştirilmesi, lazerle soğutma araştırmaları açısından çok önemli bir aşama oldu. Geliştirilen yöntem o kadar basitti ki sadece tek frekanslı bir lazer ve görece zayıf bir manyetik alanın varlığı, atomları kapana sıkıştırmak için yeterliydi. Daha önemlisi magneto-optik kapanların kapasitesi, daha önceki kapanlara kıyasla çok daha yüksekti. Ashkin ve Chu'nun geliştirdiği tamamen optik kapan birkaç yüz atomu, Phillips'in ilk manyetik kapanı birkaç bin atomu, magneto-optik kapan ise on milyonlarca atomu bir hacmin içine hapsedebiliyordu. Tüm bu etkenler, ucuz diyet lazerlerinin de geliştirilmesiyle beraber, aşırı düşük sıcaklıklardaki fizik araştırmalarının tüm dünya genelinde ivmelenmesine yol açtı.

Tahminleri Aşan Soğuma

Pritchard ve Chu'nun ilk magneto-optik kapanı ürettikleri sırada Phillips ve arkadaşları optik ağdalarla deneyler yapıyordu. Araştırmacılar, kapan içindeki gazın sıcaklığını ölçmek için yeni bir yöntem kullanmaya karar verdi. Sistemin etrafına, dışarı kaçan atomların varlığına işaret eden bir sonda sistemi kurdular. Optik ağda sistemi kapatıldığında atomlar etrafa dağılmaya başlıyor ve atomların sondaya ulaşması için geçen süre gaz bulutunun sıcaklığının belirlenmesine imkân veriyordu. Araştırmacılar, daha önceleri Bell Laboratuvarında kullanılan "serbest bırak yeniden yakala" yöntemine kıyasla daha düşük hata paylarına sahip olan bu yöntemle gaz bulutunun sıcaklığını ölçtüklerinde şaşırtıcı bir sonuçla karşılaştı. Kuramsal tahminlere göre Doppler soğuması ile ulaşılacak en düşük sıcaklık 240 mikrokelvindi. Ancak ölçümler, gazın sıcaklığının 40 mikrokelvin olduğunu gösteriyordu.

Kuramsal hesaplar, deneylere kıyasla daha idealize durumlara karşılık gelir. Bir deneyin kuramsal tahminlerden beklenenden daha iyi sonuç vermesi, beklenen bir durum değildir. Araştırmacılar, bir yanlışlık olmadığından emin olmak için lazerle soğutma

üzerine çalışmalar yapan diğer araştırma gruplarıyla iletişime geçti. Hem Steve Chu hem de Carl Wieman kısa süre sonra optik ağdaların teorisinin tahmin ettiğinden daha fazla soğutabildiğini doğruladı.

Sisyphus Soğuması

Optik ağdalar beklenenden daha fazla soğutmayı nasıl başarıyordu? Daha önceleri kullanılan kuramsal modellerde nasıl bir eksiklik olabilirdi?

Daha önceki kuramsal tahminleri aşan bir soğumanın nasıl gerçekleştiğinin açıklaması, Dalibard ve Cohen-Tannoudji tarafından yapıldı. Araştırmacılar, Dalibard'ın magneto-optik kapanların teorisini geliştirirken yaptığı gibi, gerçek atomların aynı enerjiye sahip birden fazla orbitale sahip olmasına odaklandı. Optik ağdaların beklentileri aşan bir soğutma yapabilmesini sağlayan ana etken ise ışık ışınlarının polarizasyonu (ışık ışınlarının taşıdığı elektrik alanının salınma doğrultusuyla) ilgiliydi. Birbirine zıt yönlerde hareket eden ışık ışınları üst üste bindiğinde karmaşık bir polarizasyon örüntüsü ortaya çıkıyor, bu durum da atomların durmaksızın farklı konfigürasyonlar arasında geçiş yapmasına yol açarak soğutmaya katkıda bulunuyordu.



Sisyphus soğuması sırasında, bir polarizasyon bölgesinden diğerine doğru yol alan bir atomun iç enerjisi artar, hareket enerjisi azalır. Atom, bir sonraki polarizasyon bölgesine geçtiğinde lazerle etkileşerek iç enerjisini azaltır. Ancak kaybettiği hareket enerjisini geri kazanamaz.



Fransız fizikçi Claude Cohen-Tannoudji

Dalibard ve Cohen-Tannoudji, kuramsal modellerinde atomların biri $-\frac{1}{2}$ ile diğeri $+\frac{1}{2}$ ile ifade edilen iki temel enerji seviyesine ve bir uyarılmış enerji seviyesine sahip olduğunu varsaydı. Doğrusal olarak polarize olmuş, birbirine zıt yönlerde hareket eden lazer ışınları ise üst üste bindiklerinde biri σ^+ ile diğeri σ^- ile sembolize edilen polarizasyon durumlarının art arda sıralandığı bir örüntü oluşturuyordu. Böyle bir sistemde σ^- bölgesinin içine giren bir atomun lazerle etkileşmesiyle elektron $-\frac{1}{2}$ orbitaline geçer. Işık kayması nedeniyle σ^- bölgesinin

içinde $-\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisi $+\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisinden daha düşüktür. Atom σ^+ bölgesine doğru yol aldıkça $-\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisi giderek artar, $+\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisi giderek azalır. Bu sırada, elektronun içinde bulunduğu $-\frac{1}{2}$ orbitalinin giderek enerji kazanması atomun hareket enerjisinin azalmasına yol açar. Atom σ^+ bölgesinin içine girdiğinde artık $+\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisi $-\frac{1}{2}$ orbitalinin enerjisinden daha düşüktür. Elektron lazerle etkileşerek $-\frac{1}{2}$ orbitalinden $+\frac{1}{2}$ orbitaline geçer. Bu sırada atom enerji kaybeder. Üstelik, atom σ^- bölgesinden σ^+ bölgesine doğru tırmanırken kaybettiği hareket enerjisini de geri kazanamaz. Bir polarizasyon bölgesinden diğer polarizasyon bölgesine geçmenin net sonucu, atomun toplam enerjisinin azalmasıdır. Aynı süreç atom bir sonraki polarizasyon bölgesine doğru yol alırken yinelenir.

Yunan mitolojisinde Sisyphus olarak adlandırılan bir karakter vardır. Sisyphus, kralı olduğu

Ephyra'ya gelen ziyaretçileri öldürmesi sebebiyle devasa bir kayayı yokuş yukarı itmekle cezalandırılır. Öyle ki zirveye her yaklaştığında kaya başlangıç noktasına geri kayacak, Sisyphus da kayayı sonsuza kadar itmeye devam edecektir. Dalibard ve Cohen-Tannoudji, optik ağıdalarındaki atomları Sisyphus'a, elektronları ise zirveye yaklaştığında yeniden aşağı inen devasa kayaya benzeterek, açıklamasını yaptıkları sürece Sisyphus soğuması adını verdi.

Dalibard ve Cohen-Tannoudji'nin geliştirdiği kuram, ulaşılabilecek minimum sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların hem manyetik alana hem de lazer frekansına bağımlılığı hakkında somut tahminler yapıyordu. Bu tahminler kısa süre içinde dünya genelinde lazerle soğutma üzerine deneysel çalışmalar yapan araştırma grupları tarafından doğrulandı. Cohen-Tannoudji ve Chu 1997 Nobel Fizik Ödülü'nü Phillips ile paylaştı.

Sisyphus etkisiyle, atomlar hiçbir yokuşu tırmanamayacak hâle gelinceye kadar enerji kaybeder. Bu durum, optik ağıdalar içindeki atomların eninde sonunda bir polarizasyon bölgesinin içine hapsolmesiyle sonuçlanır. Böylece hem atom bulutu soğutulmuş hem de içerisindeki atomlar bir daha çıkmayı başaramayacakları kuyuların içinde kapana kısıtılmış olur. Üstelik bu

kapanlar, iyonları hapsetmek için kullanılan manyetik kapanlar kadar sıklıdır.

1990'ların başlarına gelindiğinde hem iyonlar hem de atomlar kapanlar içerisinde kuantum doğalarının açığa çıkacağı kadar soğutulmaya başlanmıştı. Bu sistemler ilerleyen yıllarda kuantum hesaplama ile ilgili araştırmalarda önemli rol oynadı.

Sisyphus etkisindeki kuyuların kendileri de yeni araştırma alanlarına konu oldu. Üst üste binen lazer ışınlarının ortaya çıkardığı bu kuyular, periyodik olarak tekrar eden konumlarda ortaya çıkıyor ve optik ağlar olarak adlandırılan yapıları oluşturuyor, yapılarının kristalli katılara benzemesi ise optik ağları süperiletkenlik gibi yoğun madde fiziği ile ilgili konuları incelemek için uygun bir platform hâline getiriyordu. Ancak bu amaca ulaşabilmek için hem ağdaki atom sayısını artırmak hem de sıcaklığı Sisyphus soğutmasıyla ulaşılabilenden bile daha düşük değerlere indirmek gerekiyordu. Dolayısıyla hâlâ yeni soğutma yöntemlerine ihtiyaç vardı. Geliştirilen yöntemler, sadece bu analog sistemlerin oluşturulmasına imkân vermeyecek, aynı zamanda maddenin o zamanlara kadar sadece kuramsal olarak varlıkları tahmin edilmiş fazlarının ilk kez elde edilmesine imkân da verecekti.

Bosonlar ve Fermiyonlar

Parçacıklar, bosonlar ve fermiyonlar olarak iki gruba ayrılır. Bosonların toplam spinleri tam sayılar, fermiyonların toplam spinleri ise $\frac{1}{2}$ 'nin tek katlarıdır. Atomlardaki elektronların ve nükleonların tamamının spinini $\frac{1}{2}$ olduğu için toplam proton, nötron ve elektron sayısı tek sayı olan atomlar fermiyon; çift sayı olan atomlarsa bosondur. Örneğin 3 proton, 4 nötron ve 3 elektrondan oluşan lityum-7 izotopları boson; 3 proton, 3 nötron ve 3 elektrondan oluşan lityum-6 izotopları ise fermiyondur.



Hint fizikçi
Satyendra Bose

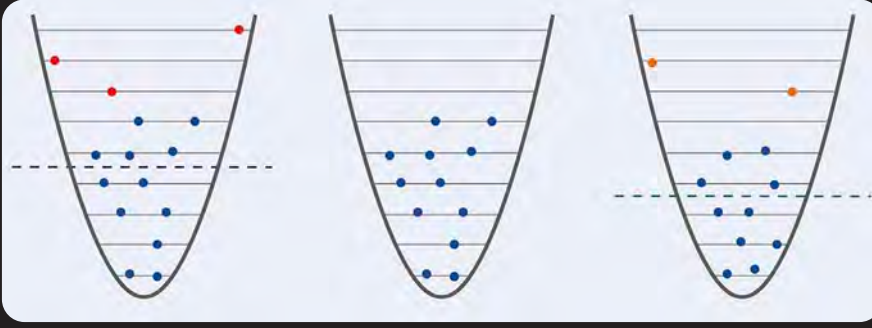
Fermiyon grubu parçacıklar, iki fermiyonun aynı kuantum durumunda bulunamayacağını söyleyen Pauli dışarlama ilkesine uyarlar. N tane fermiyondan oluşan bir sistemin sıcaklığı, mutlak sifıra yaklaşırken eninde sonunda en düşük enerjili N seviyenin her biri, bir fermiyon tarafından doldurulur. Bu noktadan sonra iki fermiyon aynı kuantum durumunda bulunamayacağı için sistemin daha fazla enerji kaybetmesi mümkün değildir. Böylece dejenere fermi gazı (DFG) olarak adlandırılan bir

faz ortaya çıkar. Söz konusu bosonlardan oluşan bir sistem olduğunda ise sıcaklık mutlak sifıra yaklaşırken, sistemdeki tüm parçacıklar aynı kuantum durumuna yığılır. Böylece bir Bose-Einstein yoğunluğu (BEC) oluşur.

Buharlaştırmalı Soğutma

1990'ların başlarında çeşitli araştırma grupları, BEC'leri elde etmek üzerine kafa yormaya başlamıştı. Ancak hâlâ aşılması gereken sorunlar vardı. Bir BEC'nin oluşacağı kritik sıcaklık yoğunluğa bağlı olarak değişir. Lazerle soğutma yöntemleriyle elde edilen atom bulutları o kadar düşük yoğunlukluysa ki BEC'lerin ortaya çıkabilmesi için

sıcaklığın nanokelvinlere kadar düşürülmesi gerekiyordu. Sisyphus soğutması ise ancak mikrokkelvinlere ulaşılmasına izin veriyordu. Ayrıca nanokelvin ölçeğindeki sıcaklıklara lazerlerle ulaşılması da mümkün değildir. Çünkü foton yayan bir atom, momentumun korunumu ilkesi uyarınca, yayılan fotonun momentumuna zıt yönde bir momentum kazanır. Dolayısıyla foton soğurma-yayma süreçleriyle atom bulutlarının sıcaklığını ancak belirli bir dereceye kadar düşürmek



Buharlaştırmalı soğutma bir gaz bulutundaki en yüksek enerjili atomların ayıklanması esasına dayanır. Böylece geriye kalan atomların ortalama enerjisi ve dolayısıyla sıcaklığı düşer.

mümkündür. BEC'lerin oluşması beklenen sıcaklıklarsa, “geri tepme sıcaklığı” olarak adlandırılan bu sınırın altındaydı. Dolayısıyla BEC'leri elde edebilmek için lazerle soğutma ancak bir noktaya kadar yararlı olabilirdi. Atom bulutlarının sıcaklığını, geri tepme sıcaklığının altına düşürebilmek için sıcaklığın mikrokkelvinlere düşürülmesinden sonra lazerlerin kapatılması gerekecekti.

BEC'lerin üretilmesine imkân verecek soğutma yöntemini MIT'den Daniel Kleppner ve arkadaşları geliştirdi. Araştırmacılar, tıpkı bir bardak sıcak çayın soğumasına benzediği için yeni yönteme “buharlaştırmalı soğuma” adını verdi.

Sıcak bir bardak çaydan buharlaşma yoluyla ayrılan moleküller, geride kalan moleküllere kıyasla daha yüksek enerjilidir. Bu yüzden buharlaşma yoluyla moleküller ortamdan uzaklaştıkça geriye kalan moleküllerin ortalama enerjisi ve dolayısıyla çayın sıcaklığı düşer. Kleppner ve arkadaşlarının

geliştirdiği yeni yöntem de bir atom bulutundan en yüksek enerjili atomların ayıklanmasına dayanıyordu.

Kleppner'in yönteminin başarılı olabilmesi için iki bileşene ihtiyaç vardı: birincisi, bir kapanın içindeki atom bulutundan en yüksek enerjili atomları seçip ayıklayabilmek, ikincisi, geriye kalan atomların birbiriyle çarpışma sıklığının sistemin yeniden dengeye gelebileceği kadar yüksek olması.

Yüksek enerjili atomları seçmenin bir yolu da radyo dalgalarından yararlanmaktır. Belirli bir dereceye kadar soğutulan atomlar ilk olarak magneto-optik kapandan bir pür manyetik kapana alınacaktı. Böyle bir kapanın en dış sınırlarına ulaşmayı başaran atomlar, doğal olarak en yüksek enerjili atomlar olacaktır. Kapanın en dış bölgelerine ulaşan atomlardaki Zeeman kayması ise manyetik alanın bu bölgede daha büyük olması nedeniyle, iç bölgelerindeki atomlara kıyasla büyük olacaktır. Dolayısıyla radyo dalgasının frekansını kapanın en

dış bölgelerine ulaşmayı başaran atomlara göre ayarlayarak, atom bulutundaki en yüksek enerjili atomları seçip sistemin dışına çıkarmak mümkün olabilirdi.

Hangi sistemlerdeki atomların çarpışma sıklığının daha yüksek olduğu ise 1990'ların başlarında iyi bilinmiyordu. Kuramsal hesaplar yoluyla hangi sistemlerin buharlaştırmalı soğutmaya daha uygun olduğunu hesaplamak çok zordu. Bu konu hakkında fikir verecek deneylerse o zamana kadar yapılmamıştı. Bu durum, ilk BEC'leri elde etmeye çalışan araştırmacıların farklı sistemlerle şansını denemesine yol açacaktı.

Bose-Einstein Yoğuşukları

BEC deneylerinin ilk aşaması lazer soğutmasıydı. Sıcaklık mikrokkelvinlere indikten sonra lazerler kapatılıp manyetik alanın büyüklüğü artırılarak magneto-optik kapan pür magnetik kapana dönüştürülüyordu. Bu aşamadan sonra ise önemli bir sorunla karşılaşılıyordu. Oluşturulan kapanın merkezindeki magnetik alanın büyüklüğü sıfırdı ve bu bölgeye ulaşan atomlar kolaylıkla kapandan kurtulabilecekleri bir kuantum durumuna geçebiliyorlardı. Buharlaştırmalı soğutma yoluyla BEC'lerin elde edilebilmesi için ilk olarak magnetik kapandaki bu sızıntı sorununa bir çözüm bulmak gerekiyordu.

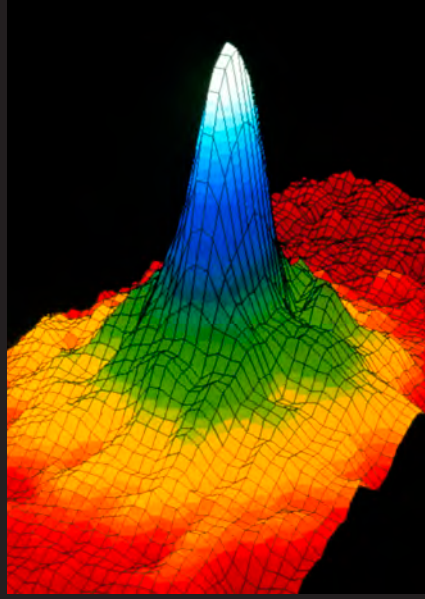


National Institute Of Standards And Technology (Nist) / SPL

Alman fizikçi Wolfgang Ketterle
MIT'deki laboratuvarında

Magnetik kapandaki sızıntı sorununa iki ayrı çözüm bulundu. MIT'den Wolfgang Ketterle ve arkadaşları maviye ayarsız bir lazer kullanarak atomları manyetik alanın merkezinden uzak tutmayı başardı. NIST'ye bağlı JILA'da çalışan Eric Cornell ve Carl Wieman ise manyetik alanın merkezini zaman içinde döngüsel bir biçimde kaydırma yoluna gitti. Kapandaki atomlar doğal olarak manyetik alanın merkezine doğru yöneliyorlardı ancak yeteri kadar hızlı bir biçimde değil.

BEC'lerin ilk örneklerini Cornell ve Weiman elde etti. Araştırmacılar, Haziran 1995'te gerçekleştirdikleri deneyler sırasında bir lazer ışını kullanarak ara ara soğuk atom bulutunun "fotoğraflarını" çekiyordu. Atomlar, foton soğurdıkları için lazer ışınında bir gölge bırakıyordu. Gölgenin



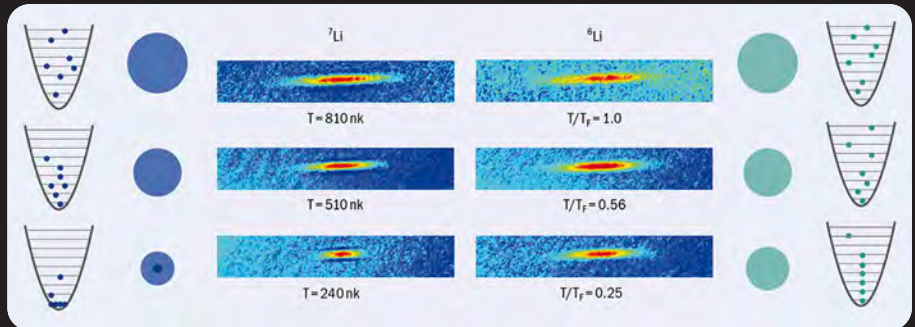
Gaz bulutundaki atomların hız dağılımını gösteren bu grafiğin ortasındaki tepecik, atomların aynı kuantum durumuna yığıldığının ve böylece bir Bose-Einstein yoğunluğunun ortaya çıktığının bir göstergesi.

derinliği, atom bulutunun yoğunluğu, atom bulutunun boyutları ise sıcaklığı hakkında bilgi veriyordu. Araştırmacılar, rubidyum atomları içeren bulutun sıcaklığını 170 nanokelvine düşürmeyi başardıklarında görüntülerin ortasında ufak, karanlık bir nokta oluştuğunu fark etti. Böylece o güne kadar sadece kuramsal olarak varlıkları tahmin edilen BEC'lerin ilk örneği üretilmiş oldu. Cornell, Weiman ve Ketterle 2001 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

Dejenere Fermi Gazları

Deborah Jin, ilk BEC'lerin elde edilmesinden sonra Eric Cornell'in grubunda doktora sonrası araştırmacı olarak çalışmaya başladı. Doktora sırasında süperiletkenler üzerinde çalışmalar yapmıştı. Ancak kısa süre içerisinde lazerler ve optik konularında da kendini geliştirdi. İlk BEC'lerin özelliklerinin incelendiği deneylere katkıda bulundu. Jin'in bir sonraki hedefi DFG'leri elde etmek oldu. 1997 yılında doktora öğrencisi Brian DeMarco ile birlikte çalışmalara başladılar.

DFG'lerin elde edilmesi BEC'lere kıyasla daha zordu. İlk olarak, bir DFG elde edebilmek için yüksek enerjili atomlar ayıklandıkça, geriye kalan atomların çarpışarak birbirine enerji aktarması ve böylece sistemin yeniden ısı dengeye gelmesi gerekiyordu. Ancak aşırı düşük sıcaklıklarda Pauli dışarlama ilkesi nedeniyle, fermiyonlar arasındaki çarpışmalar duruyordu. İkinci olarak, DFG'lerin varlığını tespit etmek BEC'lerde olduğu kadar kolay değildi. DFG'nin oluşumuyla beraber atom



Sıcaklık mutlak sıfıra yaklaşırken, bosonlardan oluşan bir sistemde tüm parçacıklar aynı kuantum durumuna yığılmaya başlar (solda). Fermiyonlardan oluşan bir sistemde ise en düşük enerjili seviyelerin her biri tek bir parçacık tarafından doldurulur (sağda).



Nobel Ödülü kazanmış
NIST çalışanı
üç Amerikalı fizikçi:
Dave Wineland,
Eric Cornell ve
Bill Phillips

bulutunun küçülmesinin durması bekleniyordu. Ancak görüntülere bakarak DFG'leri sıradan bir atom bulutundan ayırt etmek zordu.

Jin ve DeMarco, fermiyonik atom bulutunun ısı dengeye gelmesini kolaylaştırmak için atomları iki ayrı kuantum durumunda hazırladı. Isıl dengeye ulaşıldıktan sonra iki durumdan birinde bulunan atomlar, sistemden uzaklaştırılıyor, geriye kalanlar ise görüntüleniyordu. Araştırmacılar, elde ettikleri görüntülerde gerçekten de DFG olup olmadığını belirlemek için ise hem kuramsal modeller hem de atom dağılımındaki en ufak değişimleri bile tespit edebilen yeni bir görüntüleme sistemi geliştirdi.

Tüm zorluklara rağmen Jin ve DeMarco sadece 18 ay içinde fermiyonik potasyum atomlarıyla ilk DFG'yi üretmeyi başardı. Takip eden birkaç sene içinde ABD'den ve Fransa'dan çeşitli araştırma grupları da benzer çalışmalara imza attı.

Jin'in başarıları ilk DFG'nin üretilmesiyle sınırlı kalmadı. İlerleyen yıllarda, lazerler ve manyetik alanlar kullanarak dejenere atomlardan moleküller üretmeyi başardı ve "ultrasoğuk kimya" olarak adlandırılan yeni bir araştırma alanının doğmasına yol açtı. Şayet 2016 yılında, çok genç bir yaşta kanserden hayatını kaybetmeseydi, büyük bir olasılıkla Nobel ödüllü fizikçiler arasına adını yazdıracaktı.

Özet

Işık ışınlarının taşıdığı momentumun, maddeyi kontrol etmek için kullanılabileceği düşüncesi 1910'lara kadar gider. Ancak o yıllarda ışık ışınları madde üzerinde belirgin bir kuvvet uygulayacak kadar güçlü değildi. 1960'larda lazerlerin geliştirilmesinden sonra ilk olarak mikroskobik nesneleri hareket ettiren optik cımbızlar geliştirildi. Lazer ışınlarının atom bulutlarını soğutmak için kullanılabileceğinin

anlaşılmasından sonraysa fizikçiler giderek daha düşük sıcaklıkları incelemeye başladılar. Elektrik yüklü iyonları soğutmak, güçlü manyetik kuvvetlere maruz kalmaları nedeniyle daha kolay oldu. Önce kapanların içine hapsedilip sonra soğutuldular. Nötr atomları, maruz kaldıkları zayıf kuvvetlerle kapana kıştırılabilmek için ise önce soğutmak gerekti. Magneto-optik kapanların geliştirilmesiyle on milyonlarca atomun kapanlara hapsedilmeye başlanması, düşük sıcaklık fiziği araştırmalarında çok önemli bir aşama oldu. Sisyphus soğutması ve buharlaştırmalı soğutma, nanokelvin sıcaklıklara erişime izin verdi. Bose-Einstein yoğunluklarının ve dejenere fermi gazlarının üretilmesi bu sayede mümkün oldu. Maddenin bu yeni hâllerinin elde edilmesi, atom fiziği, yoğun madde fiziği ve kimyanın bir araya geldiği yeni araştırma alanları açtı. Günümüzde lazerle soğutulmuş iyonlar, kuantum bilgi bilimi araştırmalarında önemli rol oynuyor, en hassas atom saatlerinde zamanı ölçmek için lazerle soğutulmuş atomlar kullanılıyor. Lazerle soğutma sistemleri fizik araştırmalarında önemli rol oynamaya devam ediyor. ■

Kaynaklar

- Orzel, Chad, "Cold: how physicist learned to manipulate and move particles with laser cooling", Physics World, <https://physicsworld.com/a/cold-how-physicists-learned-to-manipulate-and-move-particles-with-laser-cooling/>, 1 Ağustos 2023.
- Orzel, Chad, "Colder: how physicist beat the theoretical limit for laser cooling and laid the foundations for a quantum revolution", Physics World, <https://physicsworld.com/a/colder-how-physicists-beat-the-theoretical-limit-for-laser-cooling-and-laid-the-foundations-for-a-quantum-revolution/>, 5 Eylül 2023.
- Orzel, Chad, "Coldest: how a letter to Einstein and advances in laser-cooling technology led physicist to new quantum states of matter", Physics World, <https://physicsworld.com/a/coldest-how-a-letter-to-einstein-and-advances-in-laser-cooling-technology-led-physicists-to-new-quantum-states-of-matter/>, 2 Ocak 2024.