

YAVAŞLAYAN IŞIK

Işığın yavaşlatıldığı, hatta durdurulduğu deneyler, özellikle optik iletişim sistemleri ve kara deliklerin benzerlerinin laboratuvar ortamında elde edilmesi gibi alanlarda önümüze yeni yollar açıyorlar.

Liseyi bitiren herkes ışık hızının (boşlukta 300 000 km/saniye) evrenin en kesin özelliklerinden biri olduğunu bilir. Ancak son yıllarda bu değer için çok altına inilebildiği de bir gerçek. Cambridge'deki Rowland Enstitüsü'nde çalışan fizikçiler, birtakım ışık demetlerini, önce ortalama bir uçağın hızının biraz üzerindeki değerlere değin yavaşlatmayı, bundan bir süre sonra ise, 60 km/saat'lik bir hıza kadar inmeyi başarmışlardı. Yapılan deneylerde ışık demetleri mutlak sıfırın (0 K = - 273 °C) yakınlıklarına kadar soğutulmuş, çok küçük gaz bulutlarının içinde tümüyle durdurulmuş, sonra da salınmışlardı.

Çalışma grubunun Rowland Enstitüsü'nde giriştiği ilk "ışığı yavaşlatma" deneyleri ortalama 27 saat sürüyordu. Bu deneylerde ışık iyice soğutulmuş atomlardan oluşan bir ortama gönderilir. Sıcaklık yeterince düşük olduğunda, bu atomlar bir "Bose-Einstein yoğunluğu"(condensate) oluştururlar. Atomlar bu çok ilginç sistemin içinde, tek bir kuantum durumunda yeniden biçimlenirler ve bir tür konserve halinde saklanırlar. Frekansları iyi ayarlanan bir lazer demeti bu yoğunlukta atomları yeni bir duruma yerleştirmeye katkıda bulunur. Atomlar bu yeni durumda, artık belli bir frekanstaki ışığı soğuramaz olurlar. Bu frekansta salınan bir ışık "atma"sı (pulse), için bulut şeffaflaşmış gibi davranır ve bu "ışıklı atma" buluttan çok yavaşça geçerek gider.

Saydam maddeler

Bir madde ışığı ne zaman geçirmez, ya da hangi koşullarda saydam davranır? Öyle ya, belki 5 cm kalınlığındaki bir cam ışığı az da olsa geçirir de, neden ondan çok daha ince olan, besinleri sarmakta yararlandığımız alüminyum folyo arkasındaki ışığı geçirmez? Şimdi bunun nedenini basit bir şekilde görmeye çalışalım.

Bilindiği gibi atomlar, merkezinde bir çekirdeğin ve onun çevresinde elektronların, yarıçapları farklı, belli yörüngelerde döndükleri küreler olarak modellenebilir. Her tür atomun (demir, bakır, vb.) değişik sayıda elektronu bulunur. Burada yeri gelmişken, atomun çekirdeğinin en dış yörüngede bulunan elektronlara göre durumunu daha iyi göz önüne getirebilmek için, bu dış yörüngenin bir stadyumun en dıştaki tribünü olduğunu varsayarsak, merkezdeki çekirdeğin, ancak orta yuvarlaktaki bir futbol topu kadar olduğunu, yani atomu oluşturan asıl kütlelerin işte bu merkezdeki toptan kaynaklandığını, çevredeki elektronlarınsa hem çekirdeğin kendi yarıçapına göre çok büyük yarıçaplı yörüngelerde (yani, çekirdekten görece olarak çok uzakta) döndüklerini, daha doğrusu belli olasılıklarla bulduklarını, hem de çekirdekten çok daha hafif olduklarını belirtelim.

Bu yörüngelere gelince, onların çekirdeğe uzaklıkları da, bu yörüngelerde bulunan elektronların enerjileri

de maddeden maddeye değişiklik gösterir. Yine bilindiği gibi, ışık genelde bir elektromanyetik dalgadır. Elektromanyetik dalgalar, en düşük frekanslı (dolayısıyla en uzun dalgaboylu) radyo dalgalarından, en yüksek frekanslı (dolayısıyla da en kısa dalgaboylu) gama ışınlarına dek uzanan çok geniş bir yelpazeye yayılırlar. Bu iki uç arasında da, frekans ekseninde ortalara yakın bir yerde, bu yelpazenin yalnızca çok küçük bir kesri kadar olan görünür bölge vardır. Gözümüz, yalnızca frekansı bu aralıkta değer taşıyan ışığı görebilir. Bu görünür ışığın hemen iki yanında, frekansı düşük tarafta kızılaltı (infrared), yüksek tarafta da morötesi (ultraviolet) denilen bölgeler bulunur. Ayrıca da, ışığın, görünür olsun ya da olmasın, adına foton denilen, çok küçük taneciklerden oluştuğunu ekleyelim.

Herhangi bir atoma bir foton geldiğinde, o atomdaki bir elektron bu fotonu soğurarak bulunduğu yörüngeden bir ya da birkaç yukarıdaki (yani enerjisi daha yüksek olan) bir başka yörüngeye uyarılabilir. Sonra bir süre (ki bu süre saniyenin, örneğin milyarda biri kadar olabilir) bu yörüngede kalan elektron geriye eski yörüngesine dönerken, biraz önce soğurduğu fotonu salar. Ancak, bunun için gerekli koşul gelen fotonun enerjisinin ancak o iki yörüngenin enerji düzeyleri arasındaki fark kadar olmasıdır.

Çok basit bir benzetme yapalım. Fabrikaların üretim bantları gibi bir

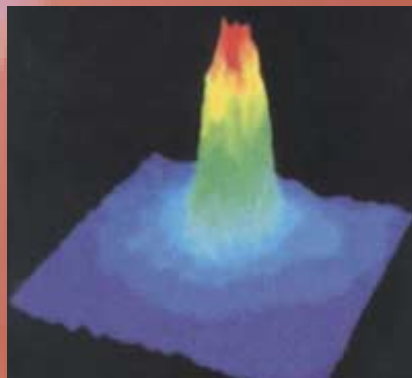
yürüyen kayışın önünde durduğumuz ve bu kayış üzerinde 5, 10, 20 milyon TL'lik çok sayıda kağıt paranın bize doğru gelip geçtiğini varsayalım. Bizim bu paraları alabilmemiz için gerekli koşul, ancak bu paraları, eşdeğer fiyatta mallar için kullanabilmemiz olsun. Diyelim, fiyatı tam olarak 5 milyonluk bir ürün almamız söz konusuysa, banttaki 5 milyonluktan, tam 10, ya da 20 milyonluk bir mal alacaksak 10 ya da 20 milyonluktan alabilmemize izin var. Bunlardan bir ikisinin toplamı kadar olan malları da alabiliyoruz (diyelim $5 + 10 = 15$ milyon TL). Ama almak istediğimiz, örneğin 17 milyonluk bir ürün için bunlardan yararlanamıyoruz. Çünkü eldeki 5, 10 ve 20'liklerden 17'yi tam olarak (para üstü beklemeden) sağlamıyoruz. O yüzden de paralar önümüzden geçip gidiyor. Burada örneğin 5 milyon TL, atomun birinci ve ikinci enerji düzeyleri arasındaki farkı, 10 ile 20 milyonluk banknotlar da sırasıyla, birinciyle ikinci ve birinciyle üçüncü düzeylerin enerji farklarını gösteriyor olsunlar. Eğer gelen ışık birden fazla frekanstan oluşuyorsa ve bunlardan biri içinden geçtiği o atomun enerji düzeyleri arasındaki farka eşitse, atom o frekansı yutar, yani bu atomun elektronları o frekanstaki fotonları kullanarak üst yörüngelere uyarılmış olurlar. Öteki frekanslar (eğer görünür ışıksa, renkler) maddenin içinden geçip giderler. Eğer tek renkli (yani tek frekanslı) bir ışık yollanmış ve bu frekans atomun değişik enerji düzeyleri arasındaki farka eşitse, madde bu ışığı yutar (yani kullanır), dışarıya da bir şey bırakmaz.

Bose Einstein Yoğuşumu

Işığın yavaşlatılması ve durdurulması, temel fiziğin yanısıra, pekçok uygulama için de önemli olduğundan, Bose-Einstein yoğuşumlarını araştırmak için yeni yöntemlere başvurulabilecek. Ayrıca da, optik iletişim, verilerin saklanması, bilginin kuantumsal olarak değerlendirilmesi, böylece de klasik bilgisayarlara oranla çok daha güçlü olan kuantum bilgisayarlarının geliştirilmesi alanlarında önümüze yeni yollar açılacak. Şimdi de kısaca Bose Einstein yoğuşumunu görelim.

Cisimlerin sıcaklığının, içlerindeki atomların devinin hızlarıyla orantılı olduğunu; daha sıcak olanların, atomlarının soğuk olanlarınkilere göre daha hızlı hareket ettiklerini biliyoruz. Bu cisim eğer bir katıysa, atomlar belli noktalar çevresinde, genişliği angströmlele, ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) ifade edilen atomik ölçekte titreşimler yapar. Maddenin bir gaz olması durumundaysa, atomlar sanki küçük birer top gibi her yöne doğru gider, kabın duvarlarıyla çarpışmalar yaparlar. Bunların hızları da değişkenlik gösterirler. Kimileri ötekilerden daha hızlıdır. Bu atomların ortalama hızlarından söz edilir ve bu ortalama da bizim dışarıdan ölçtüğümüz sıcaklıkla bağlantılıdır. Biz cismin sıcaklığını düşürdükçe (yani onu soğuk bir ortama koydukça) içerideki atomlar da yavaşlayacak, inebildiğimiz en düşük sıcaklıkta da ($0 \text{ K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$) duracaklardır. Mutlak sıfır denen yer işte burası. Son yıllarda laboratuvarlarda bu mutlak sıfır denen sıcaklığa giderek daha çok yaklaşıyor. Cornell ve Wiemann, (0 K) sıcaklığının milyarda bir derece kadar üzerine inmeyi başardılar.

Hintli fizikçi Satyendra Nath Bose 1920'li yıllarda, o sıralarda yeni bir görüş olan, ışığın (foton denen) taneciklerden oluştuğu düşüncesi üzerinde çalışıyor, ama bunu bilim çevrelerine pek benimsetemiyordu. O dönemde de tanınmış bir fizikçi olan Albert Einstein'dan yardım istedi. O da gazlardaki atomların davranışları konusunda yakından ilgilendi. Bunlar sıcaklık azaldıkça, hep birlikte aynı kuantum durumuna iniyorlar, yani aynı yerde birden fazla parçacık bulunmasını engelleyen 'Pauli Dışarlama İlkesi'ne uymuyorlardı. Daha



Bir Bose-Einstein yoğun maddesi, çok düşük sıcaklıklarda, kimi atomlar tek bir kuantum durumunda yoğunlaştığında oluşur (merkezdeki tepe değeri, orada çok büyük sayıda atomun bir yoğun madde oluşturmak üzere toplandığını gösteriyor). Bu görüntü ışığın, mutlak sıfırın yalnızca bir derecenin 500 milyarda biri kadar üzerindeki bir sıcaklığa dek soğutulmuş sodyum bulutu tarafından soğutulmasını temsil ediyor.

sonra bu kurallara 'Bose-Einstein istatistiği', böyle davranan parçacıklara, örneğin fotona da 'bozon' adı verildi. (Bunun tersi olan, yani Pauli ilkesine uyan kurallara 'Fermi-Dirac istatistiği', böyle davranan parçacıklara, örneğin elektrona da 'fermiyon' dendi). İşte bu en düşük sıcaklıkta olası en alt enerji düzeyine hep birlikte toplanan atomlara 'Bose-Einstein yoğuşumu' deniyor ve bu durum maddenin yeni bir biçimi olarak tanımlanıyor.

Şeffaf bir gaz

Işığın boşluktaki hızının, belli bir geçirgen ortamdaki hızına olan oranına o ortamın "kıırma indisi" denir. Kıırma indisi en yüksek maddelerden biri olan elmas, ışığın hızını ancak 2,4'te birine kadar düşürebilir. Başka bir deyişle, iki ışık demetinden birini boşlukta, ötekini elmas içinde yönlendirirsek, boşlukta giden 24 cm gittiği sırada, elmas içinde ilerleyen ancak 10 cm yol almış olur. Onmilyonlarda bire varan oranlarda yavaşlatmalar için, ilk olarak 1990'lı yılların başlarında Stanford Üniversitesi'nden Stephen Harris başkanlığındaki grup tarafından gözlenen bir olgu olan ve "etkileme (induction) yoluyla elektromanyetik geçirgenlik" denen, kuantum kökenli bir etkiye başvurmak gerekir. Etkileme yoluyla elde edilen bu geçirgenlik, belirlenmiş bir frekanstaki bir ışık demeti için, bir gaz bulutunu cam kadar geçirgen kılıyor. Bunu yapabilmek için yine frekansı çok iyi belirlenmiş bir lazer demetinin yardımına gerek var. Lazer yoluyla soğutmaya da kısaca açıklamaya çalışalım.

Aslında ilk bakışta bir maddeye ışık göndererek onu soğutmak insana garip gelebilir. Çünkü yüzümüze ışık tuttuğumuzda soğuduğumuzu değil, ısındığımızı hissediyoruz. Ancak burada olan şey, yüzümüze gelen fotonların vücudumuzca soğurulup sıcaklığa dönüşmeleri. Oysa lazer yoluyla soğutmada bunun tersi oluyor. Örneğin bir bilardo topu A , duran bir başka bilardo topu B 'ye çarpsa, A yavaşlar (ya da kütleleri eşitse durur), B ise hızlanır. Ama eğer A , B 'ye çarptıktan sonra geldiğinden büyük bir hızla geri yansır, B topunun hızı (B eğer çarpışmadan önce hareketliyse) azalmış demektir. Bizim atomlara yollanan lazer demeti örneğindeyse şöyle oluyor. Işığın (lazer demetindeki tek

frekanslı ışığın da) tek tek fotonlardan oluştuğunu biliyoruz. Evet bu fotonlar atomlardan çok daha küçükler, hatta fotonların durgun kütleleri yoktur. Ama yine de tıpkı çok sayıda ve hızla atılan ping pong toplarının bile, eğer hızları ve saniyede atılma sayıları yeterliyse, kendilerinden çok daha kütleli bir cismi, örneğin bir basketbol topunu yerinden oynatmaları, ya da giden bir basketbol topunu yavaşlatıp durdurabilme gibi, bu fotonlar da titreşim yapan atomları yavaşlatabilir. Sıcaklık da bu titreşimlerin genliğiyle orantılı olduğundan, yaptıkları titreşimler giderek küçülen atomlardan oluşan madde de soğumuş olacak. Burada anahtar nokta, gelen fotonların atomlarla etkileşiminin ardından, daha büyük bir hızla saçılmış olmaları (tıpkı A topunun B'ye çarptıktan sonra geriye doğru daha büyük bir hızla yansması gibi). Çünkü, o zaman bu enerji farkını atomlardan çalmış olacaklar, madde de böylece soğuyacaktır. Hatta bu yolla, maddeler mutlak sıfırın

(0 K) milyarda bir derece kadar üzerine soğutulabiliyorlar.

İkinci bir koşul da, bu lazerin ışığının frekansının, içinden geçeceği madenin atomlarının enerji düzeyleri arasındaki farkla uyumlu olması, çünkü eğer böyle olmazsa, atomlar bu ışığa tepki vermeyecek, ışık da soğurulmadan geçip gidecek. Ancak ne yazık ki, bu lazer demetinin yardımı atomların ısı titreşimlerinden olumsuz biçimde etkileniyor. Aslında bir atom bir ışık kaynağına yaklaştığında, frekansı hızıyla orantılı olarak artmış (yani maviye kaymış) fotonların geldiğini, bir şekilde “görür”. Tersine, atom uzaklaşırken de, fotonlar ona daha düşük frekanslıymış gibi, yani daha kırmızımsı olarak görünürler. Bu olgu Doppler etkisi olarak bilinmektedir (bize yaklaşan bir cankurtaranın düdüğünü, bizden uzaklaşanına göre daha tiz olarak duymamız). Bu yüzden, ısı titreşimler nedeniyle, yavaşlatılmak istenen lazer ya da ışık demetinin frekansı ne denli iyi ayarlanırsa

ayarlanırsa, olay sanki gaz bulutuna giren demetlerin frekansı iyi belirlenmiş gibi gerçekleşir.

Bu sapmayı en aza indirmek için, iyice soğutulmuş atomlar kullanılır, çünkü bunlar çok yavaş yer değiştirirler. Birtakım çalışma grupları yavaşlatılmış ışık demetlerini daha önce elde etmişlerdi, ama onlar ortam sıcaklığındaki atomları kullanıyorlardı, bu yüzden de ulaşılan yavaşlama sınırlı oluyordu. Rowland Enstitüsü'ndeki grupsa, bir manyetik alanda tuzaklanan ve mutlak sıfırın yalnızca bir derecenin milyonda biri kadar üzerindeki sıcaklığa dek soğutulmuş, sodyum atomlarından oluşan, ortası biraz daha kalın bir sosis biçimindeki (yaklaşık 0.2 mm uzunluk ve 0.05 mm çap) bir gaz bulutunda etkilene yoluyla elde edilen geçirgenlik için gerekli tüm koşulları yarattı.

Lazer demetlerini, manyetik alanları ve radyo dalgalarını birleştiren bir aygıt yardımıyla, sodyum atomlarını soğuttular. Sodyum sıcak bir fırından ve yaklaşık 2600 km/saatlik bir hızla, çok yoğun bir atom demeti biçiminde yayıldı. Bu demet daha sonra, insanın elini bile yakmayacak şiddette bir lazer demeti tarafından çok sert bir şekilde yavaşlatılarak 160 km/saat hızına düşürüldü. Bu ani frenlenme sırasında atomlar yerçekimi ivmesi olan g (9.8 m/s^2) nin yaklaşık 70 000 katı kadarlık bir ekisi ivmeye (yavaşlamaya) uğradılar. Soğutma işlemi daha sonra, atomları her yandan “yıkayan” ve onları mutlak sıfırın 50 milyonda bir derece üzerine kadar soğutan altı demet tarafından, “optik bir karışım”ın içinde sürdürüldü. Böylece, birkaç saniye içinde 10 milyar atom bu optik karışımında toplandı. Sonra lazer demetleri söndürüldü, laboratuvar tam bir karanlığa gömüldü ve elektromıknatıslar çalıştırılarak bunların manyetik alanlarının atom bulutunu tuzaklaması sağlandı. 38 saniye süreyle atomlar buharlaşma yoluyla soğutuldu. Yalnızca en soğukları, yani en yavaş olanları yerinde kalacağından, aralarından en hızlıları atıldı. Tam olarak ayarlanmış radyo dalgaları hızlı atomların atılmasını ivmelendirdiler. Bütün bu aşamalar (sıcak demetin üretiminden soğuk atomların bir bölgede sınırlanmasına dek) bir odacığın içinde oldu. Bu odadaki basınç ise atmosfer basıncının 10^{14} 'de biriydi (yani atmosferinkinin milyarda birinin, yüz binde biri).

Faz Hızı, Grup Hızı

Işıklı bir atma kısa süreli bir elektromanyetik titreşimden başka bir şey değildir. Tanım gereği olarak, faz hızı bu titreşimin bir noktasının

hızdır. Grup hızı (V_g) ise, bütün bu titreşen kümenin hep birlikte ilerlediği hızdır (Bkz. Şekil a). Faz ve grup hızları arasındaki fark, grup hızı c ile gösterilen ışığın hızını hiçbir zaman geçemezken, faz hızının belli koşullarda ışık hızından büyük olabilemesidir. Ama bu durum Einstein'ın özel görelilik kuramıyla çelişmez. Çünkü bir yerden başka bir yere bir bilginin aktarılması ancak grup hızında olasıdır. O yüzden grubun içindeki birtakım bileşenlerin hızlarının tek tek c'yi geçmelerinin bir önemi yoktur.

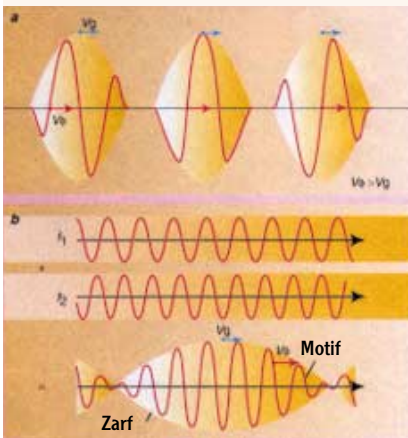
Işıklı bir atma hiçbir zaman tek bir frekansa oluşmaz, pek çok sinüs dalgasının toplamıdır. Atmanın şiddetinin en yüksek değeri, tüm bu sinüs dalgalarının aynı fazda (tepe noktaları üstüste rastlayacak şekilde) oldukları nok-

taya karşılık gelir. Bu dalgaların içinde ilerledikleri ortamın kırma indisi frekansla değişmediğinde, hem tüm bileşenler, hem de bunların aynı fazda oldukları nokta aynı hızda “yayırlar”. Bu durumda grup hızı faz hızıyla aynı değerdedir. Tersine, ortamın kırma indisi frekansla değiştiğinde ise, demetdeki bileşenler farklı hızda yer değiştirirler (kimileri hızlı, kimileri daha yavaş) ve böylece faz hızı (V_o) grup hızından (V_g) ayrılır.

Frekansları f_1 ve f_2 olan iki sinüs dalgası durumunda, bileşke dalga, biçimi yine sinüs şeklinde olan bir zarfın içine sıkışmış bir salınım olur (Bkz. Şekil b). Bu bileşke dalga “şekil” ve “zarf” denen sinüs biçiminde iki dalganın çarpımıdır.

“Şekil” adı verilen dalganın frekansı f_1 ve f_2 frekanslarının ortalamasıdır ($\frac{f_1 + f_2}{2}$). Faz hızına eşit olan hızı ise, bu ortalama frekans için, kırma indisine belirlenir. “Zarf” dalgasına gelince, onun frekansı f_1 ile f_2 arasındaki farkla orantılıdır. Bu iki frekansın eşitliği durumunda bileşke dalganın “düz” bir sinüs olduğu (frekansı sıfır olan bir zarf) düşünülürse, bunun nedeni anlaşılır. Sonuç olarak, grup hızı bu iki kırma indisi $n(f_1)$ ve $n(f_2)$ arasındaki farka, başka bir deyişle, kırma indisinin frekansla değişimine bağlıdır.

Frekansları birbirinden çok küçük farklarla ayrılan pek çok sayıda bileşenin biraraya geldiği durumlarda bu düşünme tarzı geçerliliğini korur. Faz hızı, kırma indisinin demetin ortalama frekansındaki değeriyle belirlenirken; grup hızı kırma indisinin değişimine bağlıdır. Gerçekten de, indisin frekansla artması durumunda, indisin değişim hızı yükseldikçe, grup hızı küçülür.

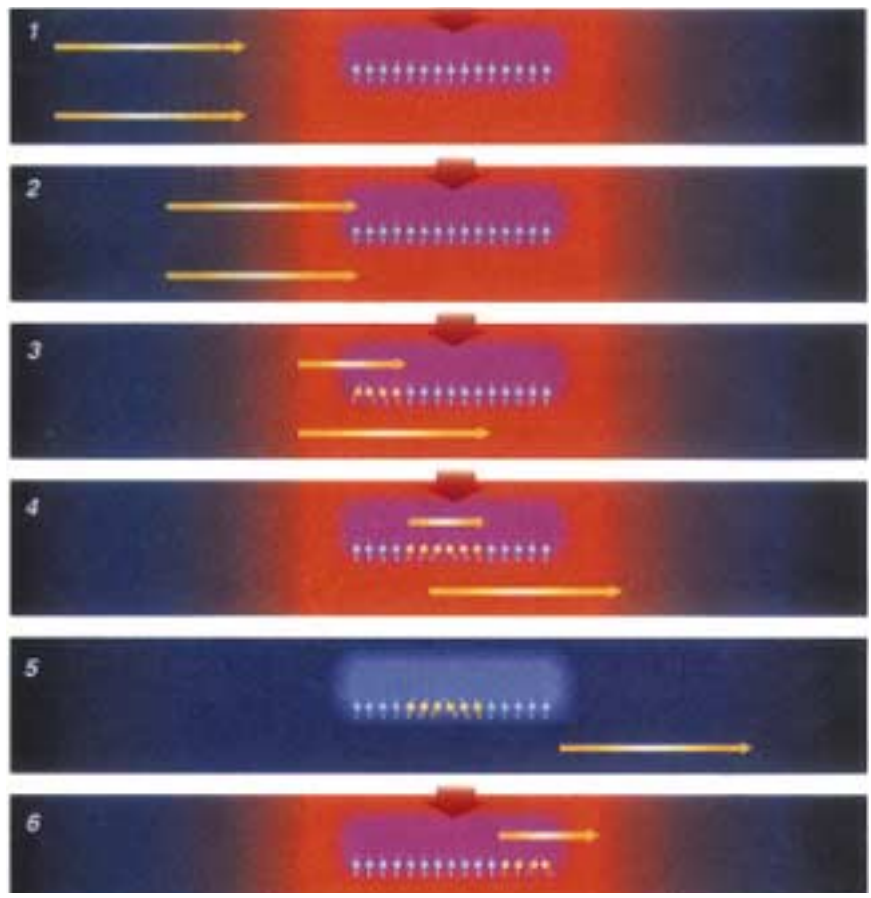


Bu bulut, bir kez derecenin milyarda 500'üne kadar soğutulunca, buharlaşmadan sonra geride kalan birkaç milyon atomun tümüyle eşzamanlı (senkronize) olarak davrandığı Bose-Einstein yoğunlaşmasını oluşturdu. Evrendeki en soğuk ortam böylece bir odacığın merkezinde ve bir manyetik alan tarafından asılı durumda tutulmaktaydı.

DeneySEL düzeneğin buluttan 1 cm kadar ötede bulunan geri kalanı, ortam sıcaklığındaydı. Odacığın duvarlarındaki ısı geçirmeyen pencereler soğumakta olan atomları gözleme olanağı veriyordu. Optik karışımındaki soğuk bir atom bulutu 5 milimetre çapındaki küçük ve parlak bir güneşe benziyordu.

Sosis biçimindeki atomlar bir kez yerlerine yerleştikten sonra onları bir lazer demetiyle yandan aydınlatıp, sonra da eksenini boyunca ışıklı bir atma yaparak ve bu atmanın buluttaki hızını saptamak için, atom bulutunun gerisine bir ışık algılayıcısı yerleştirilerek, bu demetin onu geçmesi için gereken zamanı ölçmek üzere yayılmasını beklediler. Hemen sonra da, bulutun uzunluğunu, onu alttan aydınlatan ve gölgesini bir kamera üzerine düşüren bir lazer demetiyle ölçtüler. Bu uzunluk geçiş zamanına bölününce bize ışıklı atmanın hızını veriyordu. Elde edilen geçiş süreleri birkaç mikrosaniyeden (10^{-6} s) birkaç milisaniyeye (10^{-3} s) dek değişiklik gösteriyordu ve bu değer ışık için birkaç kilometrelik fiber optik kabloda doluşmaya denkti.

Her ne kadar, bir atom pek çok uyarılmış durumdan herhangi birinde bulunabilirse de, biz ışığı yavaşlatmak amacıyla bunların yalnızca üçünden yararlanalım ve onları "0", "1" ve "2" diye adlandıralım. Yapılan hazırlıktan sonra, iyice soğutulmuş sodyum bulutu, herbiri enerjisi en düşük düzeyde olan, yani "0" temel durumunda bulunan atomlar içerir. Şimdi, değerlik elektronu (atomdan kopmayan elektron) en alçak yörüngesinde (orbital, alt yörünge), spini çekirdeğin spiniyle ters yönlüdür (yani eğer biri saat yönünde dönüyorsa, öteki saat yönünün tersine dönüyordur). Ayrıca da, atomun toplam manyetik momentini bulutu yerinde tutmak için kullanılan manyetik alana paralel ve ters yönlüdür. (Örneğin, *R* yarıçaplı çember şeklinde bir telden *I* akımı geçiyorsa, manyetik moment, akımla alanın çarpımına eşittir ($\mu = IA = I\pi R^2$) ve yönü de sağ el



Yoğunlaşmanın içinde: ışıklı atma daha atom bulutuna erişmeden (mor bölge), atomların spinleri aynı yöndeler (küçük oklar). Eşlikçi bir lazer demeti, bulutu ışıklı atmanınla aynı frekansta geçirmeye çalışıyor (1, 2). Bulut ışıklı atmayı yavaşlatır ve sıkıştırır (3), atomların durumu onun geçişi üzerine değişiyor ve bu ışıklı atmaya eşlik eden bir kutuplanma (polarization) dalgası oluşuyor. Atma bulutun içine tümüyle girdiğinde (4), eşlikçi lazer kesiliyor (5). Atmanın ışıklı bölümü yok oluyor, ama polariton atomlarda, yeniden oluşmak için gerekli tüm bilgiyi içeren bir iz bırakıyor. Biraz daha sonra (6), eşlikçi lazer yine çalıştırılıyor. Işıklı atma yeniden üretiliyor ve yayılmaya koyuluyor.

kuralıyla şöyle bulunur: Masanın üzerinde yatay duran porselen çay tabağımızın çevresine bir tel sarar ve içinden, üstten bakınca saat yönünde geçen bir akım geçirirsek, manyetik moment dikine, aşağıya masaya doğru olacaktır. "1" durumu "0" a çok benzer, ama elektronun ve çekirdeğin spinleri birbirine paraleldir (yani ikisi de aynı yönde döner), bu da atomun enerjisini çok az (yaklaşık 0.002 elektron volt (eV) kadar) artırmaya yarar. "2" durumunun enerjisi, "1" durumununkinin yaklaşık 300 000 katıdır ve değerlik elektronunu daha uzaktaki bir yörüngemsiye iterek elde edilir. Bu atomlar, "2" durumundan "1" ya da "0" durumuna geri düşerek, halka açık alanları aydınlatmada kullanılan sodyum lambalarının sarı rengiyle aynı frekansta bir ışık yayarlar.

Yavaşlatılmak istenen ışıklı atma, "0" durumundan "2" durumuna geçmek için gerekli olan (bu atmanın rengi sarıdır) frekansa ayarlanır. Eğer, böyle bir atma dikkat edilmeden, buluta yollansaydı, atomlar onu tümüyle soğuracaklar ve "0" durumundan "2" ye geçeceklerdi. Sonra hızla "1" durumuna geri düşecekler ve karşılık gelen sarı ışığı yayacaklar, ama bu işi uzay ve zamanda rastlantısal olarak (şans eseri) yapacaklardı. Bulut düzgün yayılan ve biraz perdelenmiş bir ışık yayacak ve

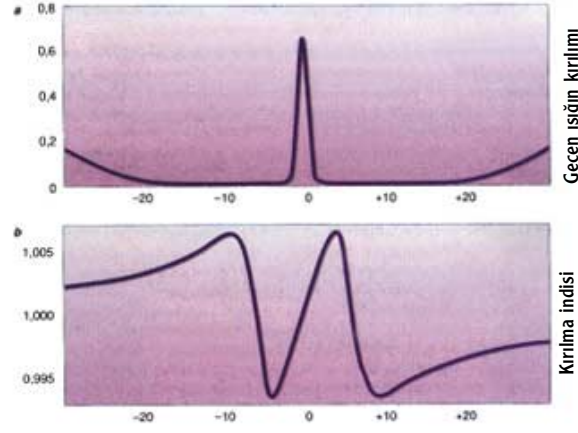
ışıklı atmanın üzerindeki bütün bilgi yitirilmiş olacaktır.

Lazer demeti "1" ile "2" durumları arasındaki geçişin frekansına ayarlanır. Atomlar, "0" durumunda olduklarında, onu soğuramazlar. "0"-"2" geçişine ayarlanmış ışıklı atma, buluta vardığında, lazerle birlikte davranarak, atomları "0" ve "1" durumlarının bir bileşimine yerleştirir. Bu koşullarda, her bir atom "aynı anda", hem "0" hem de "1" durumdadır. "0" tek başına atmanın, "1" ise lazerin ışığını soğuracaktır. Her iki durumda da, atomlar kendilerini "2" durumunda bulacaklar, daha sonra bu ışığı rastlantısal olarak yeniden yayacaklardır. Bununla birlikte, atomlara bu geçişlerin ikisi birden aynı anda dayatılmaya çalışıldığında, adına "kuantum girişimi" denen bir olgu nedeniyle, bunlar birbirlerini karşılıklı olarak yok edeceklerdir. "0" ve "1" durumlarının karışımına "karanlık durum" denir. Çünkü atomlar demetlerin hiçbir tarafından aydınlatılamazlar (yani "karanlıkta" kalırlar). Bulut artık ışıklı atmanın ışığı için geçirgen olur, çünkü bulutu oluşturan ve bu karanlık durumda kalan atomlar onu soğuramazlar, ışık da soğurulmayınca geçip gider. İki durumun üstüste binmesiyle elde edilen karanlık bileşim "0" ile "1" in tek tek, karışımındaki oranlarınca belirlenir. Bu oran, bulu-

tun her noktasında, ışıklı atmadan ve eşlikçi lazerden algılanan şiddetlerin oranına bağlıdır. Ancak sistem, bir kez karanlık bir durumda bulunduktan sonra, iki demetin birbirine oranı değiştiğinde bile, karanlıkta kalmak üzere kendini ayarlar. Bulutun belli bir noktasında, ışıklı atmadan algılanan şiddet arttığında, “1” durumunun “karışım” içindeki oranı da büyür. Aynı türden bir “kuantum girişimi” nedeniyle bulutun, frekansı tam “2” durumuna geçişe karşılık gelen ışık için kırma indisi, tam olarak (boşlukta olduğu gibi) 1’e eşittir. Ancak bununla birlikte, buna komşu olan frekans değerlerinde, kırma indisi 1’e tam eşit değildir.

Işığın Yavaşlatılması

Bilinen birçok madde ışığı yavaşlatır. Örneğin, suda giden bir ışık demeti, boşluktakinin dörtte birinden daha düşük bir hızda ilerler. Bununla birlikte, ışığın sıradan bir geçirgen maddede yavaşlaması sınırlıdır. Eğer “2” durumuna geçişe karşılık gelen frekansta kırma indisi tam olarak 1’e eşitse, bu frekansa ayarlanmış olan ışıklı atmamızın, acaba, ışığın boşluktaki hızında ilerlemesi gerekmez miydi? Hayır, çün-



Sodyum bulutunda eşlikçi lazer demetiyle yavaşlatılmış atmanın birlikte, etkilenme (induction) yoluyla sağladıkları optik özellikler dikkate değer yavaşlamalar elde etmeye olanak veriyorlar. Bulut keskin biçimde belli bir frekans için a- geçirgen hale geliyor ve kırma indisi de kısa bir frekans aralığında, b- sert şekilde değişiyor. Geçirgenlik ışıklı atmaya soğurmadan geçişine izin verirken, demetin hızı, indisin değişim hızı arttıkça büyüyor.

kü bulutun kırma indisi bu temel frekansa komşu olan değerlerde hızla değişir ve bir frekans aralığı olan ışıklı bir atma hiçbir zaman tek bir frekanstan oluşmaz.

Aslında, bir ışıklı atma, birbirine komşu frekanslarda salınan bir dizi sinüs biçiminde titreşimden oluşmuş biçimde düşünülebilir. Bu atmanın şiddetinin en büyük değeri, tüm bu titreşimlerin aynı fazda oldukları, yani hepsinin tepelerinin ve çukurlarının hep birlikte üstüste rastladıkları yere karşılık gelir (Bkz. Şekil 4). Adına “grup hızı” denen, bu ışıklı atmaya oluşturan sinüs dalgalarının hızına (yani “faz hızı”na) eşit değildir. Faz hızı boşlukta, tüm frekanslar için yaklaşık olarak 300 000 km/saniyedir. Bu durumda, hem atmaya oluşturan bütün sinüs biçimli dalga-

lar, hem de bunların aynı fazda oldukları nokta aynı hızda ilerler. Böylece, ışıklı atma da ışığın boşluktaki hızında yayılır, faz ve grup hızları da eşitlenir. Bununla birlikte, ortamın kırma indisi frekansla değiştiğinde, atmaya oluşturan farklı dalgalar birbirinden çok az farklı frekanslarda yer değiştirirler. Bu nedenle, atmanın şiddetinin tepe değerinin karşılık geldiği noktanın kayması da değişir. Aslında, kırma indisi frekansla ne hızla değişiyorsa, atmanın ilerlediği hız olan grup hızı da aynı gerdedir (Bkz. Sayfa 72’deki şekil).

Işğın bu şekilde yavaşlatılması, kırma indisi değeri 1’den büyük olan sıradan bir ortamda olan bitenden çok farklıdır. Herşeyden önce, grup hızı düşer, ama faz hızı pek az değişir, çünkü kırma indisi 1’e çok yakın bir değerde kalır (sıradan bir şeffaf ortamda, sinüs biçimindeki dalgaların bütün grup hızları azaldığından, grup hızı da düşer). Bizim durumumuzda, indis dar bir frekans aralığında sert bir biçimde değiştiğinden (Bkz. Şekil 5), grup hızı düşer. Ayrıca da, eşlikçi lazer açık olmadıkça, ortam bu özellikleri korumaz.

Işıklı bir atmanın hızı, şöyle 20 milyonda birine indirildiğinde, bir çok başka olgu da gözlenir. Bu atma, yoğunlaşma girmeden önce, yaklaşık 1 km uzunluğundadır ve havada saniyede 300 000 kilometrelik bir hızla yayılmaktadır (elbette, laboratuvarları 1 km uzunluğunda değildi, ama eğer lazerlerini bu uzaklığa yerleştirselelerdi, yayacağı demetler aşağı yukarı bu boyutlarda olacaktı). Atmanın ön yüzü, yuvarlak cam pencereyi geçer ve önce içi boş olan odaya, sonra da havada asılı şekilde duran sodyum atomlarının oluşturduğu yoğunlaşma girer. Bu minik bulutun içinde, ışık yaklaşık olarak saatte 54 kilometrelik bir hızda ilerler (sıkı bir bisiklet yarışçısı bile bu ışığı geçebilir!).

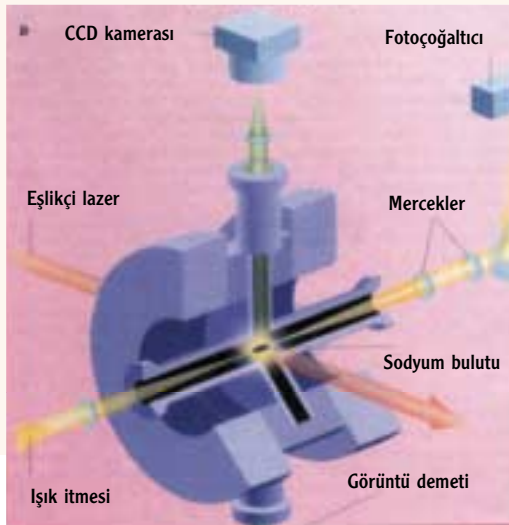
Işğın ön yüzü bulutun içinde çok yavaşça ilerlediğinden ve dalğanın arka bölümü de tam hızla geldiğinden, bu ışıklı atma sodyum bulutunun içinde, sanki bir akordeon gibi sıkışır. Boyu yaklaşık 20 milyon kez kısaldığından, bu dalga artık bir milimetrenin yirmide birinden daha uzun değildir. Bu şekilde sıkıştırılan atmanın son derece yoğunlaşması gerekmez miydi? Hayır, hiç de değil. Çünkü, ışğın şiddeti hep aynı ka-

Işığın Durdurmak

Işığın yavaşlatma deneyleri üç lazer demetiyle çok soğutulmuş, içi iyice boşaltılmış bir odacığa sıkıştırılmış (ve şekilde abartılı olarak büyük gösterilen) sodyum atomlarının oluşturdukları bir buluta dayalıdır. Eşlikçi demet bulutla etkileşir ve ışıklı atmaları üreten lazer ışığında bu bulutu geçirgen kılar. Bulutsa, bir kez geçirgen olduktan sonra, ışğın ancak iyice yavaşlamış olarak ilerlemesine olanak verir.

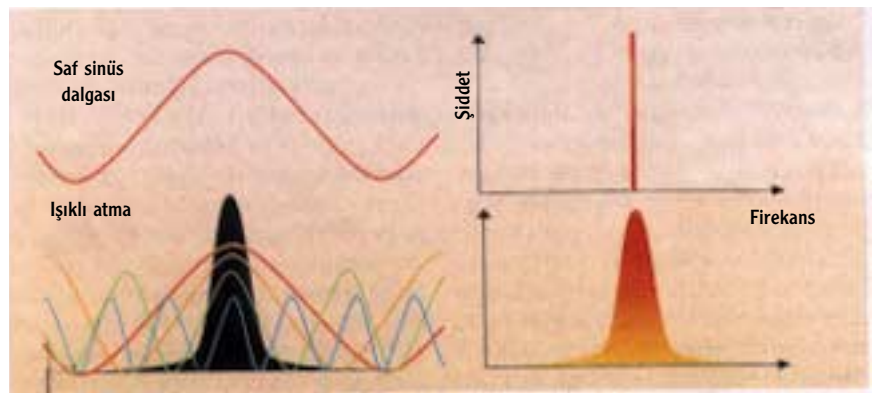
Bir fotoçoğaltıcı tüp ışıklı atmanın varış süresini ölçer. Görüntü demeti de, gölgesini bir kamera üzerine düşürerek, bulutun boyunu belirler. Birçok eleman şekilde gösterilmemiştir. Bunlar her atma için yeni bir bulutun yaratılmasını ve soğutulmasını sağlayan aygıt, yarattıkları manyetik alanla atomları yerlerinde tutan elektromagnetik alanlar ve ek birtakım optik gereçlerdir.

Işıklı atmaların yavaşlaması, bunların algılandıkları anlar çok duyarlı bir biçimde karşılaştırılarak gözlenir. Atmanın yoğunlaşma noktasında algılandığı an, zamanda sıfıra karşılık gelir. Atmaların yoğunlaşma nedeniyle yavaşlamaları algılayıcıya ulaşmakta uğradıkları gecikmeyle kanıtlanmış olur (soldaki eğrideki noktalar). Bir atmaya tümüyle durdurmak için, eşlikçi demet, bulutun içine girdiği anda kesilir. Atmanın durması için geçen bu zaman da (yaklaşık 35 mikrosaniye) uğradığı gecikmeye eklenir. Yavaşlatılmış bir atma aygıtından azalmış bir şiddetle çıkar, çünkü bulut tam anlamıyla geçirgen değildir. Ayrıca da, durdurulmuş bir atma, kendisinin destekleyen atomların kendi aralarındaki çarpışmalar ve sızıntılar nedeniyle yavaş yavaş bozulmaya uğrar.



lır. Daha ayrıntılı konuşursak, ışıklı atma boşlukta 50 000 fotondan oluşur, buluttaysa ışık enerjisi açısından, bir fotonun ancak 400'de biri kadardır (yine 20 milyonda bir). Peki, öbür fotonların enerjilerine ne oldu? Bu enerjinin bir bölümü bulutta harlandı ve sodyum atomlarına aktarıldı, ama asıl önemli bölümü eşlikçi demete verildi. Eşlikçi lazerin şiddeti ölçüldü ve bu enerji aktarımı gözlemlendi.

Bu deneylerde elde edilen ışığın hızı birçok parametreye bağlıdır. Atomun cinsi ve kullanılan uyarılmış durumlar seçildiğinde, eğer bu parametrelerin bazıları belirlenirse, iki değişken ayarlanabilir durumdadır. Bunlar atom bulutunun yoğunluğuyla eşlikçi lazerin şiddetidir. Bulutun yoğunluğundaki artış ışığın hızını düşürür, ama çok yoğun bu-



Işıklı bir atma, "saf" sinüs biçiminde bir dalganın tersine, içinde pek çok frekansı barındırır. Atmanın tepe değeri, bu atmayı oluşturan bütün frekansların birbiriyle aynı faza oldukları noktadır. Atma ne kadar ince ve yerelse, tayfı da o denli geniş demektir. Atmanın yer değiştirme hızı, sinüs biçimli dalgaların hızına, ancak eşzamanlı (senkronize) olarak yer değiştirdiklerinde, yani kırma indisi frekansla değişmediğinde eşit olur.

lutlarda atomları bir manyetik alana sıkıştırmak daha güç olduğundan, tuzaklardan kolayca kaçabilirler. Işıklı atmanın hızı, eşlikçi demetin şiddeti azaltılarak da düşürülebilir. Bununla birlikte, burada da işlem, bu demetin çok zayıf olması durumunda etkilenme yoluyla elde edilmiş geçirgenliğin yitirilmesi nedeniyle sınırlıdır. Bulut artık şeffaf olmaktan çıkar ve ışıklı atmayı soğurmayaya başlar.

Yine de, bu yavaşlatmanın en son hali olan, ışığın tümüyle durdurulması, atmayı soğurulma yoluyla toptan yitirmeden elde edilebilir. Yavaşlamış ve yoğunlaşmış olan atma, tümüyle yoğunlaşmış içinde, tam da bulutun göbeğinde bulunurken, eşlikçi lazer kapatılır. Işıklı atma durur ve artık ışık enerjisine sahip değildir. Atomlar üzerinde bırakılan iz ilk ışıklı atmayı yeniden oluşturmak için gerekli tüm bilgiyi içermektedir. Böylece, örneğin, atmanın şiddeti her noktada "0" ve "1" durumlarının oranlarıyla belirlenir. Özetle bu, yoğunlaşmış bulutun içine basılmış bulunan atmanın bir hologramıdır.

Yoğunlaşmış eşlikçi lazerle yeniden aydınlatıldığında, ışıklı atma bir daha görünür ve sanki hiçbir şey tarafından kesintiye uğratılmamış gibi, yeniden yayılmaya başlar. Ancak, ışık yalnızca 1 milisaniye (saniyenin binde biri) süresince saklanabilir (eğer tuzaklanmasaydı, bu sürede havada 300 km yol gidecekti). Işıklı atma ne kadar uzun süre saklanmış olarak kalırsa, o denli bozulur. Gaz atomları, yoğunlaşmış içinde bile, rastgele devinimlerle canlanmış olarak kalırlar. Bu devinimlerin sonucundaysa, kutuplaşmanın şekli bozulur. Ayrıca, atomlar arasındaki çarpışmalar, tek tek durumların birbiriyle üstüste binerek (superposition) oluşturdukları "karma" durumu da kötüye götürürler. 1 milisaniye sonunda, çıkan atma ilk demetten çok daha zayıftır, ama buna da bir çözüm yolu bulundu. Eşlikçi lazer yeniden açıldığında, eğer daha büyük bir değere getirilirse, çıkan atma daha parlak, ama daha kısa olur. Eğer eşlikçi lazer kısa aralıklarla pek çok kez açılır kapanırsa, atma birçok "parça" halinde yeniden yaratılır. Üzerinde yapılacak bu tür oyunlar saklanmış atmaların hangi duyarlılıkla denetlendiği konusunda bir fikir verirler.

Ercüment Akat
Yeditepe Üniversitesi Fizik Bölümü

Kaynak
Hau L. V. La Lumière Ralentie Pour La Science Eylül 2001.

Karadelikler ve Bilgisayarlar

Işığın yavaşlatılması ve durdurulması pek çok ilginç deneye kapı açar. Örneğin, bir Bose-Einstein yoğunlaşımına, hızı sesin bu yoğunlaşım içindeki hızına (yaklaşık olarak saniyede 1 santimetre) eşit bir ışıklı demet şırıngalanabilir. Bu koşullar altında, uçakların yarattığı "ses" dalgasınınine yakın frekansta giden bir ses dalgası ışıklı demete eşlik edecek ve bütün yoğunlaşım titreşmeye başlayacaktır. Buysa, yoğunlaşımın son derece akışkan özelliklerini (tıpkı üstün iletken metallerin dirençlerinin, çok düşük sıcaklıklarda sıfıra inmesi gibi, kimi sıvılar da çok düşük sıcaklıklarda "üstün akışkan" hale geçerler) incelemek için önümüze çıkan yeni bir fırsattır.

Bugün artık, dönmekte olan bir yoğunlaşımın burgaçlar yaratılabilir. Böyle bir burgaç geçmekte olan yavaş bir ışıklı atma, biraz da uzayda yol almakta olan ışık ışınlarının çok yoğun yıldızlar ya da (yine son derece yoğun kütleler olan) karadeliklerin yakınından geçerken yollarından sapmalarına benzer bir biçimde, gazın devinimiyle çekilecektir. Yavaş ışık sayesinde, bu olgular laboratuvar ortamında yaratılabilecek.

Yavaş ışık benzer bir biçimde, iki lazer demetinin birbiriyle etkileşimi üzerine kurulu olan ve doğrusal olmayan yeni bir optiği de ortaya atıyor. Optikteki doğrusal işlemeyen pek çok olgu, söz konusu ortamın kırma indisi elde edilen ışığın şiddetiyle değiştiği zaman ortaya çıkar. Bu da görüntü teknolojisinden iletişime dek birçok alanda, temel araştırmalar, uygulamaları da içeren geniş bir çalışma alanı açar. Günümüzde son derece yoğun demetleri gerektiren, doğrusal olmayan birtakım optiksel olguların elde edilmesi, yavaşlatılmış ışık sayesinde çok az sayıda foton aracılığıyla gerçekleştirilecek. Bu olguların gelecekte tümüyle optiksel olarak çalışacak İnternet ağında kullanılmak üzere çok duyarlı yönlendirme sistemlerinin kurulmasında yararlı olması beklenebilir.



Yavaşlatılmış ve tuzaklanmış ışık da, aynı şekilde, kuantum bilgisayarlarının oluşturulmasında işe yarayabilir. Kuantum bilgisayarlar, klasik olarak bilinen yolu kullanan, yani bilgiyi "0" ve "1" gibi "bit" le ($bit = \text{binary digit}$, yani ikili sayı) yoluyla gösteren alışılmış hesap makinelerinin yerine geçecek olan ve bilgileri "0" ile "1" durumlarının bir karışımı olan "kubit"lerle (k kuantum bit) ifade edecek olan aygıtlar. n sayıda "kubit"ten oluşan bir sistem, (aynı anda) birbirinden farklı 2^n durumu araştırarak ve buna koşut olan çok büyük sayıdaki işlemi gerçekleştirmedi kullanılabilecek. Bu bilgisayarlar, eğer bir gün kullanıma girerlerse, günümüz bilgisayarlarının oldukça uzun sürelerde çözebilecekleri matematik problemlerini kısa zamanda sonuca ulaştırabileceklerdir. Bugün incelenen sistemlerde, iki "kubit" ailesi bulunuyor. Bunlardan ilki uzayda sabit durumda. Bunlar örneğin, çekirdeklerinin spinleri değişik yönlerde olan ve birbiriyle çok çabuk etkileşen atom grupları. İkincilerse, bir yerden başka bir yere hızla yer değiştiren, ama bir kuantum bilgisayarının gerektirdiği biçimde etkileşmeleri güç olanlar (örneğin fotonlar). Örneğin, iki ışık demeti aynı gaz bulutunun içine sokulabilecekler ve bu olay bilgi işlem açısından içeri giren ışık demetlerindeki bilginin işleminden geçmesini tetikleyecek. Işığa bırakılan izin çıkıştaki yeni ışıklı atmalara dönüşmesiyle de sonuçların okunması sağlanmış olacak. Yavaşlatılmış ışık kuantum bilgisayarlarının kurulmasında en uygun ya da evrensel yol olmasa bile, en azından yeni araştırma alanları açmış olacak.