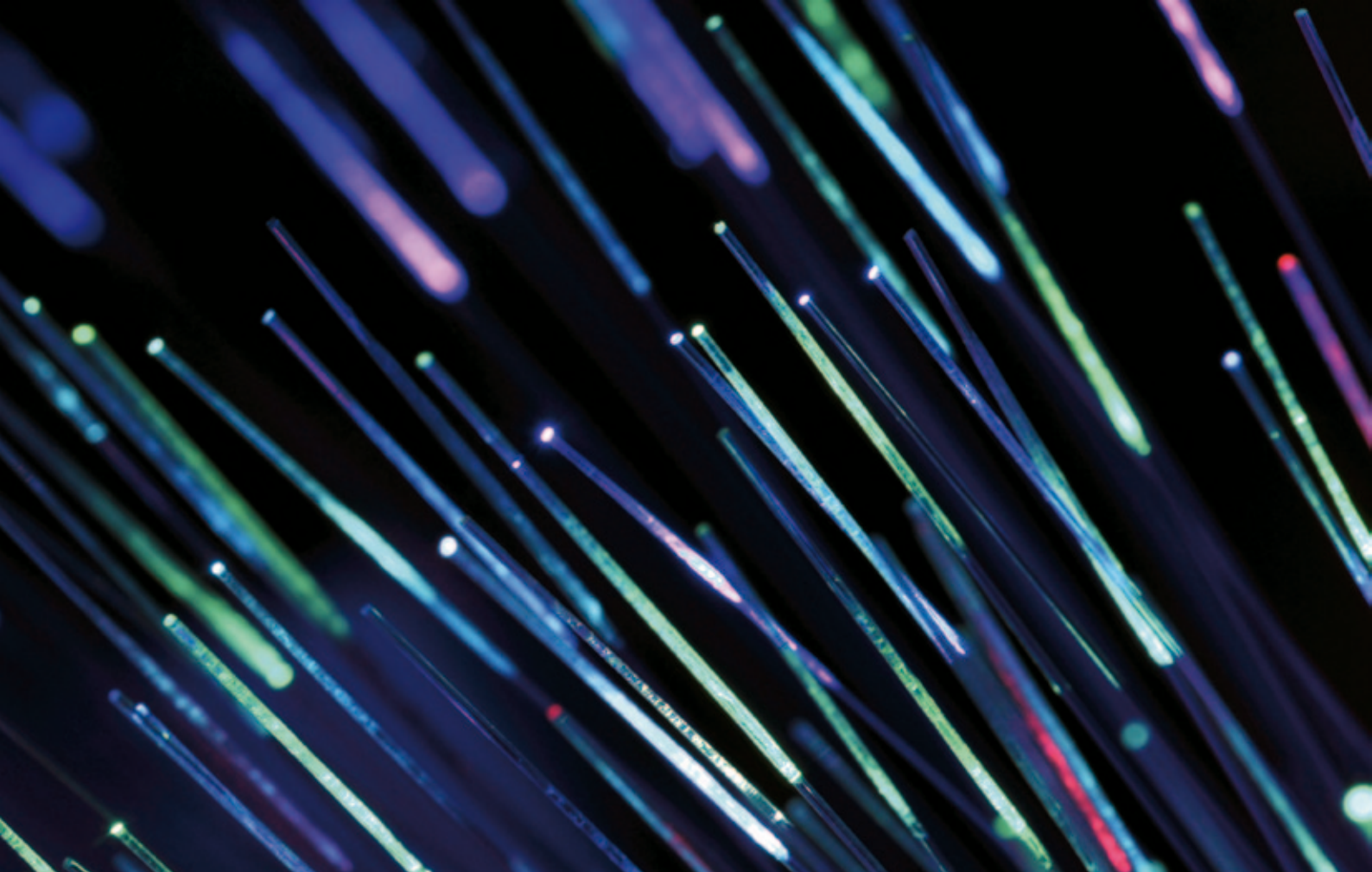




# Kuantum Optiği, Elektromanyetik Etkili Saydamlık ve Tek Foton Üretimi



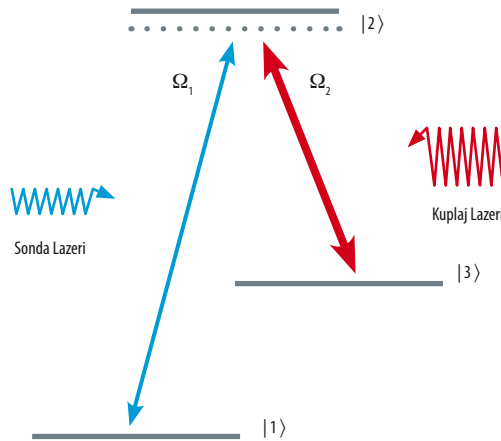
Lazeri diğer ışık kaynaklarına göre farklı yapan ve yetenekli hale getiren özellikler; yaydığı ışığın eşevrel ve tek-renkli olup çok düşük sapma (açılma) açısına ve yüksek ışık şiddetine sahip olmasıdır. Bu özellikleriyle lazer ışığı ve atom etkileşmesi, güneş, florasan ampul gibi sıradan ışık kaynaklarının yaydığı ışıkla atom etkileşimine kıyasla oldukça farklı sonuçlar verir. Örneğin atomun lazer ışığı ile etkileşmesiyle çoklu foton uyarılması denilen, bir atomun aynı anda birden fazla fotonla etkileşmesi olasılığının çok fazla arttığı görülür. Dahası Rabi salınımları adı verilen ve atomun ilgili enerji düzeylerine ait elektronlarının bu seviyeler arasında periyodik bir salınım yaptığı gözlenir. Burada asıl ilginç olan durum lazerin oluşmasına neden olan Einstein'ın atom-lazer ışığı etkileşmesinde atomun enerji düzeylerine ait geçiş denklemlerinin yetersiz kalmasıdır. Bu durum atom-lazer etkileşmesi konusunda yeni bir sayfa açılmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, Theodore Maiman'ın Hughes Araştırma Laboratuvarı'nda ilk lazerin ışımaya başladığı 1960 yılını aynı zamanda *kuantum optiğinin* dönüm noktası olarak düşünebiliriz.

Atomun lazerle uyarılmasına *eşevrel uyarılma* adı verilir. Bu uyarılma şekli atomun enerji düzeylerinde *eşevrel etkiler* denilen (Rabi Salınımları, Autler-Townes Yarılması, Eşevrel Nüfus Tuzaklanması ve Elektromanyetik Etkili Saydamlık gibi) daha önce bilinmeyen yeni etkilerin gözlemlenmesine neden oldu.

Elektromanyetik Etkili Saydamlık (EES) *maddesel bir ortamı oluşturan atomların enerji düzeyine karşılık gelen dalga boyunda, eşevrel ve tek-renkli ışığın etkisi altında ortamın soğurma ve kırılma etkisinin değiştirilebilmesi* olarak ifade edilebilir. Böyle bir etkiyi gözlemlememizi sağlayacak ışık kaynağı eşevrel ışık salan lazere dir. Kuplaj lazeri denilen güçlü ve rezonans bir lazer ışığı, atomun bir enerji seviyesine uygulandığında atomu yine bu seviyeye komşu olan ve sonda lazeri dediğimiz lazer ışığına karşı geçirgen hale getirir. Bir diğer deyişle, atom kuplaj lazeri yokken sonda lazerinin ışığını soğururken güçlü kuplaj lazerinin varlığında sonda lazerinin ışığına geçirgen davranmaya başlar. Kısaca *EES etkisi altında, ortamın yüksek şiddette bir rezonans ışığa maruz kalmasıyla yine bu enerji düzeyiyle bağlantılı başka bir enerji düzeyine karşılık gelen dalgaboyundaki ışığa karşı saydam olması gözlemlenmektedir*. EES olayının detaylı açıklaması kuantum mekaniği ile yapılır:

İki sinüsel dalganın birinin tepe noktasının diğerinin çukur noktasına karşılık gelecek birbirini söndürmesi şeklinde açıklayabileceğimiz *yıkıcı girişim etkisi ile atomun ilgili enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıkları birbirini yok eder ve ortamın gelen ışığa karşı soğurması ortadan kalkar*. Enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıklarının yapıcı veya yıkıcı girişime neden olacak şekilde düzenlenmesi *kuantum girişimi* olarak adlandırılır. Bu etkinin gözlenmesi ancak eşevrel ışık kaynağı olan lazerin geliştirilmesinden sonra gündeme gelebilmiştir. Kuantum girişimi etkisi atomun ışıkla olan etkileşimi konusunda EES de dahil olmak üzere pek çok yeni araştırma ve uygulama alanına yol açmıştır. EES değişik atomik enerji düzenlerinde olabilir.

Atom-lazer ışığı etkileşiminden ortaya çıkan bu yeni özellikler önemli uygulama alanlarına öncülük edebilecek nitelikte bilgiler içermektedir. Örneğin bu bilgiler ışığında yapılan deneysel çalışmalarda, maddesel ortamın optik özelliklerinin



Lambda (A) düzeninde EES'nin atom-eşevrel ışık etkileşim gösterimi. Lambda (A) düzeninde  $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$  enerji düzeyine uygulanan rezonans sonda ışığı (sonda lazeri) normalde atom tarafından soğurulurken,  $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$  düzeyine uygulanan güçlü eşevrel ışık (kuplaj lazeri) uygulandığında, atom tarafından soğurulmamaktadır.

değiştirilmesiyle çok yeni ve kolaylıkla ulaşılamayan dalgaboylarında yeni lazer benzeri ışık kaynakları elde etmek mümkün olabilmektedir. Genellikle lazerler görünür bölge (400nm-700nm) civarında dalgaboylarında ışın verir. Bu bölgelerin dışında lazer ışığı elde etmek, başta çok hassas atomik spektroskopi ve litografi gibi alanlar için son derece önemlidir.

EES'nin en göze çarpan sonucu ışığın ortamdaki hızının azaltılması olmuştur. Işığın boşluktaki hızı 300.000 km/sn'dir. Bu hız cam ve su gibi kırınım katsayısı daha yüksek saydam ortamlarda yaklaşık olarak 200.000 km/sn değerine düşer. *Oysa bugün ışığın hızını neredeyse bir bisiklet hızına indirmek olası mıdır diye bir soru karşısında hiç çe-*



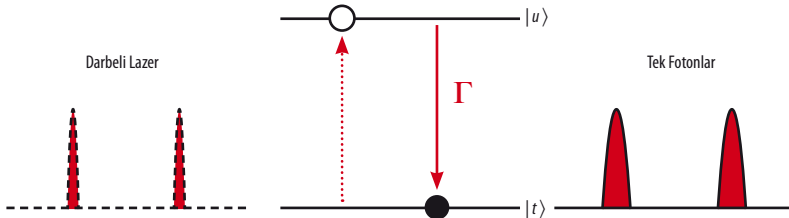
İbrahim Küçükçakara, 1965 Yılında Adana'da doğdu. 1998 yılında University Of Wales (UK) Lazer Spektroskopisi alanında yüksek lisans ve 2002 yılında Imperial College Of Science, Technology and Medicine (UK) da deneysel kuantum optiği konusunda doktora yaptı. 2005 yılında Mersin Üniversitesi Fizik Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaya başladı. Halen Koç Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yer alan Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı'nda misafir araştırmacı olarak çalışmaktadır.

*kinmeden evet diyebiliyoruz.* Yavaş ışık denilen bu gösterimlerde ışık hızının 17 m/s'ye kadar düştüğü görülür. Burada önemli bir nokta, kırınım katsayısını kullanarak ışığın yayılma hızı düşürülürken ışığın bu kırıcı ortam tarafından soğurulmasıdır. İşte kuantum girişimi etkilerinin en önemli uygulamalarından birisi olan EES ile bu sorunu aşmak ve yavaş ışığı elde ederken aynı zamanda ortamı, içinden geçen ışık için neredeyse saf bir şekilde saydam yapmak mümkündür.

Yavaş ışığı elde etmenin tek yolu EES kullanmak değildir. Önemli olan ortamda frekansa aşırı derecede bağlı bir kırınım katsayısının bulunmasıdır. Böyle ortamları değişik soğurma bantları kullanarak elde etmek de mümkündür. Örneğin ışık liflerinde de başarılı yavaş ışık gösterimleri olmuştur. Işığın yavaşlatılması ileride kuantum bilgisayarlar da ihtiyaç duyulacak kuantum hafıza aygıtları gibi birçok aygıt için önemlidir.

## Tek Foton Üretici

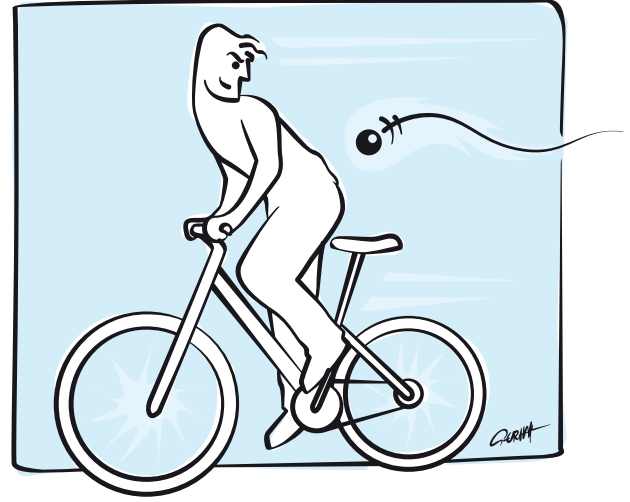
Belli bir frekansta salınan elektromanyetik dalganın enerjisinin foton denilen enerji birimlerine sahip olduğu ilk olarak 1905 yılında Einstein'ın fotoelektrik etkiye getirdiği açıklama ile anlaşılmuştur. Bu kavram kuantum optiğini klasik optikten ayıran temel özelliklerin başında gelir. Elektron gibi bazı diğer parçacıklardan farklı olarak fotonlar *Boson* özelliği gösterirler. Bunun bir sonucu olarak fotonlar *Pauli Dışlama ilkesine* uymayıp aynı enerji değerinde bir arada bulunmayı tercih ederler. Günlük hayatımızda karşılaştığımız ışık kaynakları da belli bir spektral aralıkta birçok fotonun üretilmesi ile elde edilir - fotonları tek tek üreten bir üretici doğada bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bir *tek foton üreticini* ancak yapay olarak elde etmek mümkündür.



Tek foton üretici şematiği. Darbeli lazerin bir uyarıcı darbese atomu, temel enerji seviyesinden ( $|l\rangle$ ) uyarılmış enerji seviyesine ( $|u\rangle$ ) taşır. Atomun temel enerji seviyesine kendiliğinden ışımaya geri dönmesiyle tek bir foton üretilir.

Tek foton üretici tek bir atomun darbese bir lazer ile uyarılmasını temel alır. Her lazer darbese atomun temel enerji seviyesinden uyarılmış enerji seviyesine geçişini sağlar. *Kendiliğinden ışımaya* etkisi sayesinde atom bir foton yayarak temel enerji seviyesine geri döner. Böylece her uyarıcı lazer

darbesi ile tek foton üretilir. Tek foton üretici için gerekli en önemli koşul atomların tek tek tuzaklanabilmesidir. Günümüzde gelişmiş optik tuzaklama yöntemleri tek atomların uzun süreler boyunca incelenmesini mümkün kılar. Ayrıca tek iyon, tek kuantum nokta veya tek molekül gibi tuzaklanması daha kolay olan yapılar da tek foton üretici uygulamaları için tercih edilir. Son 10 yıldır bu yapılar kullanılarak değişik tek foton üreticileri geliştirildi ve tek foton üretici kuantum optik araştırmalarında ihtiyaç duyulan temel bir ışık kaynağı olarak literatürdeki yerini aldı. Bu çalışmalarla elde edilen sonuçlar arasında kuantum mekaniksel rassal sayı üretimi, kuantum anahtar dağıtımı ve kuantum dolaşıklık olayı sayılabilir.



Elektromanyetik etkili saydamlık ile ışığın maddedeki yayılım hızı 17 m/sn (61 km/saat)'ye kadar düşürülebilir. İyi bir bisiklet sporcusu böyle yavaşlatılmış ışıkta daha hızlı gidebilir.

## Mikro Nano Boyutlarda Lazerler

Optik mikrokovuklar, ışığı çok küçük hacimlerdeki rezonanslarda hapsederler. Bu yapıların sahip oldukları simetrik geometri, rezonanslarda saklanan ışığın uzun süre dışarıya kaçmadan saklanmasına neden olur. Bu sayede yüksek optik genlikler elde edilir. Elde edilen bu yüksek optik genlikler atom-foton etkileşmesinin incelenmesi için ideal bir çalışma ortamı sağlar.

En temel optik mikrokovuk, yüksek yansıtma özellikli iki aynanın yan yana getirilmesi ile elde edilen Fabry-Perot rezonatörüdür. Çembersel simetriye sahip halka, daire, küre veya toroid geometrileri de ideal optik mikrokovuk yapılarıdır. Bu



Alper Kiraz, 1998'de Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2000-2002'de Kaliforniya Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı. 2004'te Koç Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yardımcı doçent ünvanı ile öğretim üyeliği görevine başladı. 2009'da aynı bölümde doçent ünvanını aldı. 2004'ten beri direktörlüğünü yaptığı Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı'nda su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamların incelenmesi, tek moleküllerin spektroskopisi/görüntülenmesi ve optik cımbızlama alanlarında çalışmalarını sürdürmektedir. 2003-2004 arasında Alexander von Humboldt bursiyeri olarak görev aldı, 2006'da fizik alanında TÜBA-GEBİP Ödülü'nü, 2008'de fizik alanında TÜBİTAK Teşvik Ödülü'nü ve 2009'da FAPED Araştırma Ödülü'nü kazandı.

	Fabry-Perot	Fısıldayan galeri	Fotonik kristal
Yüksek Q	<p>Q: 2.000 V: 5 (<math>\lambda/n</math>)<sup>3</sup></p>	<p>Q: 12.000 V: 6 (<math>\lambda/n</math>)<sup>3</sup></p> <p>Q<sub>fil-V</sub>: 7.000 Q<sub>Poly</sub>: 1.3x10<sup>5</sup></p>	<p>Q: 13.000 V: 1.2 (<math>\lambda/n</math>)<sup>3</sup></p>
Çok yüksek Q	<p>F: 4.8x10<sup>5</sup> V: 1,690 <math>\mu</math>m<sup>3</sup></p>	<p>Q: 8x10<sup>9</sup> V: 3,000 <math>\mu</math>m<sup>3</sup></p>	<p>Q: 10<sup>8</sup></p>

Optik mikrovuk, ışığı çok küçük hacimlerde durağan dalgalarda hapsedir. Mikrosütun veya Fabry-Perot mikrovuklarında yansıtıcı özelliği çok fazla olan iki aynanın arasındaki durağan dalgalar kullanılır. Küresel simetriye sahip mikrodaire, mikrohalka, mikrotoroid veya mikroküre yapılarında çepere yakın bölgede durağan dalgalar elde edilir. Fotonik kristal kusur kavitesinde ise düzgül bir örgüye sahip delikli kristal yapıdaki bir kusur etrafında durağan dalga elde edilir.

yapılarda ışık çepere yakın bölgede dolaşan fısıldayan galeri modlarında (kiplerinde) saklanır. Bunların yanında fotonik kristal kusur kaviteleri veya silindirik geometriye sahip mikrosütun yapıları da optik mikrovuk olarak kullanılırlar. Yarıiletken kristallerin optik analogu olan fotonik kristallerde ışığın yayılımının mümkün olmadığı yasak enerji bandları bulunur. Fotonik kristal yapıdaki bir kusurun etrafında yasak enerji bandına denk gelen optik rezonans frekanslarında ışığı hapsedmek mümkündür.

Yol açtıkları yüksek atom-foton etkileşmesi nedeniyle optik mikrovuklar mikro ve nano boyutlarda lazerlerin üretilmesinde kullanılırlar. Bu lazerler çok küçük eşik pompalama gücüne sahiptir. Hatta bir optik mikrovuğun içinde bulunan tek bir atomu kullanarak lazer ışması elde etmek mümkündür. Bu sınırda her pompalama gücünde lazer ışması elde edilir -eşik pompalama gücü bulunmamaktadır. Optik mikrovuklar mikro ve nano boyutlarda lazerlerin geliştirilmesinin yanında temel kuantum optiği çalışmalarında önemli uygulamalar bulurlar. Geleceğin kuantum bilgisayarlarının bir mikrovuğun içindeki atom-foton etkileşimini kullanarak işlem yapabileceği düşünülmektedir. Optik mikrovuklar ile proteinler gibi biyolojik makromoleküllerin çok hassas bir şekilde -tek molekül mertebesinde- algılanması da mümkündür.

## Sonuç

Yirminci yüzyılın başında yeni deneysel ve kuramsal bulguların etkisiyle hızla gelişmeye başlayan kuantum mekaniği bilgileri önce elektronları kontrol etmemizi sağlamak için kullanıldı. Bu gelişmenin ilk örneği, katıhal fiziğinin en önemli uygulamalarının günlük hayata hızla etki etmesine ve elektronik cihazların ve bilgisayarların yaşamın ayrılmaz bir parçası olmasında önemli bir görev üstlendi. Bunu izleyen dönemde atom-ışık etkileşmesinin önemli kısımlarının anlaşılmasıyla atomun ışığı soğurması ve yayımlamasının yanında uyarılmış ışımaya da yapabileceği anlaşıldı. 1960 yılında ilk lazerin ışıltmasıyla birlikte neredeyse aynı zamanda atom ve lazer ışığının etkileşmesi başta spektroskopi, kuantum optiği gibi pek çok alanda çok hızlı gelişmelere neden oldu. Bu gelişmeler atom-eşevrel ışık etkileşmesinde *kuantum girişimi* etkilerinin gözlemlenmesini ve bu yolla atomun enerji düzeylerinin kontrol edilebilmesini sağladı. Sonuç olarak elektronları kontrol etmenin yollarını bu şekilde keşfettik şimdi fotonları ve atomları kontrol ederek kuantum optiğini keşfediyoruz!

### Kaynaklar

K. J. Boller, A. Imamoglu, ve S. E. Harris, "Observation of Electromagnetically Induced Transparency", *Phys. Rev. Lett.* 66, 20, 2593 (1991).  
J. P. Marangos, "Electromagnetically induced transparency", *J. Mod. Opt.*, 45, 471, (1998).  
L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas", *Nature* 397, 594-598 (1999).

B. Lounis and M. Orrit, "Single-photon sources", *Reports on Progress in Physics* 68, 1129-1179 (2005).  
R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 1983.  
K. J. Vahala, "Optical Microcavities", *Nature* 424, 839 (2003).  
F. Dubin, C. Russo, H. G. Barros, A. Stute, C. Becher, P. O. Schmidt, and R. Blatt, "Quantum to classical transition in a single-ion laser", *Nature Physics* DOI: 10.1038/NPHYS1627 (2010).