

ve BEY(BEC) Vorteks Örgüsünün Fotonik Bantları

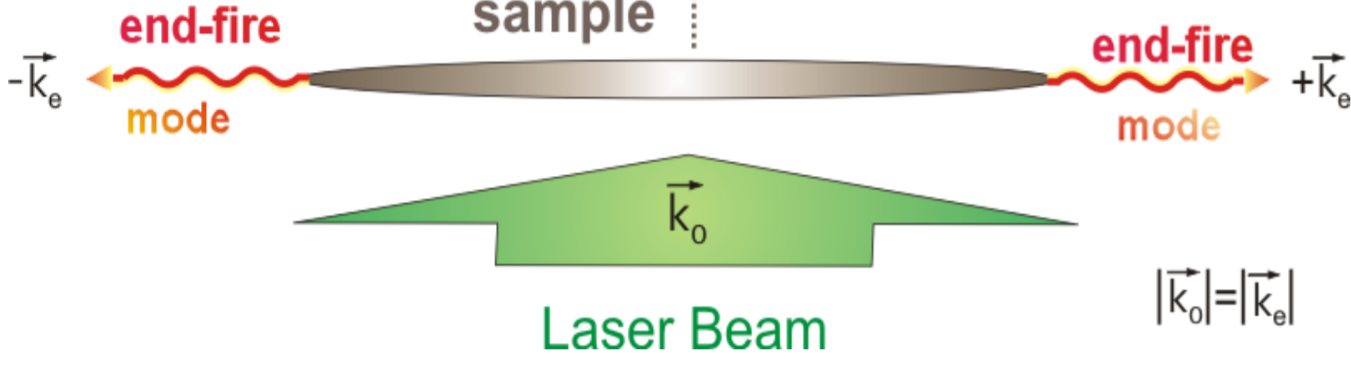
M. E. Taşgın^a, M. Ö. Okte^l^a, and Ö. E. Müstecaplıoğlu^b

^aBilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü, 06800 Bilkent, Ankara, Türkiye
^bKoç Üniversitesi, Fizik Bölümü, Rumelifeneri Yolu, Sarıyer 34450 İstanbul, Türkiye

Fotonların BEY'dan sıralı Super-ışımaya saçılmasıyla Dolashıklanması

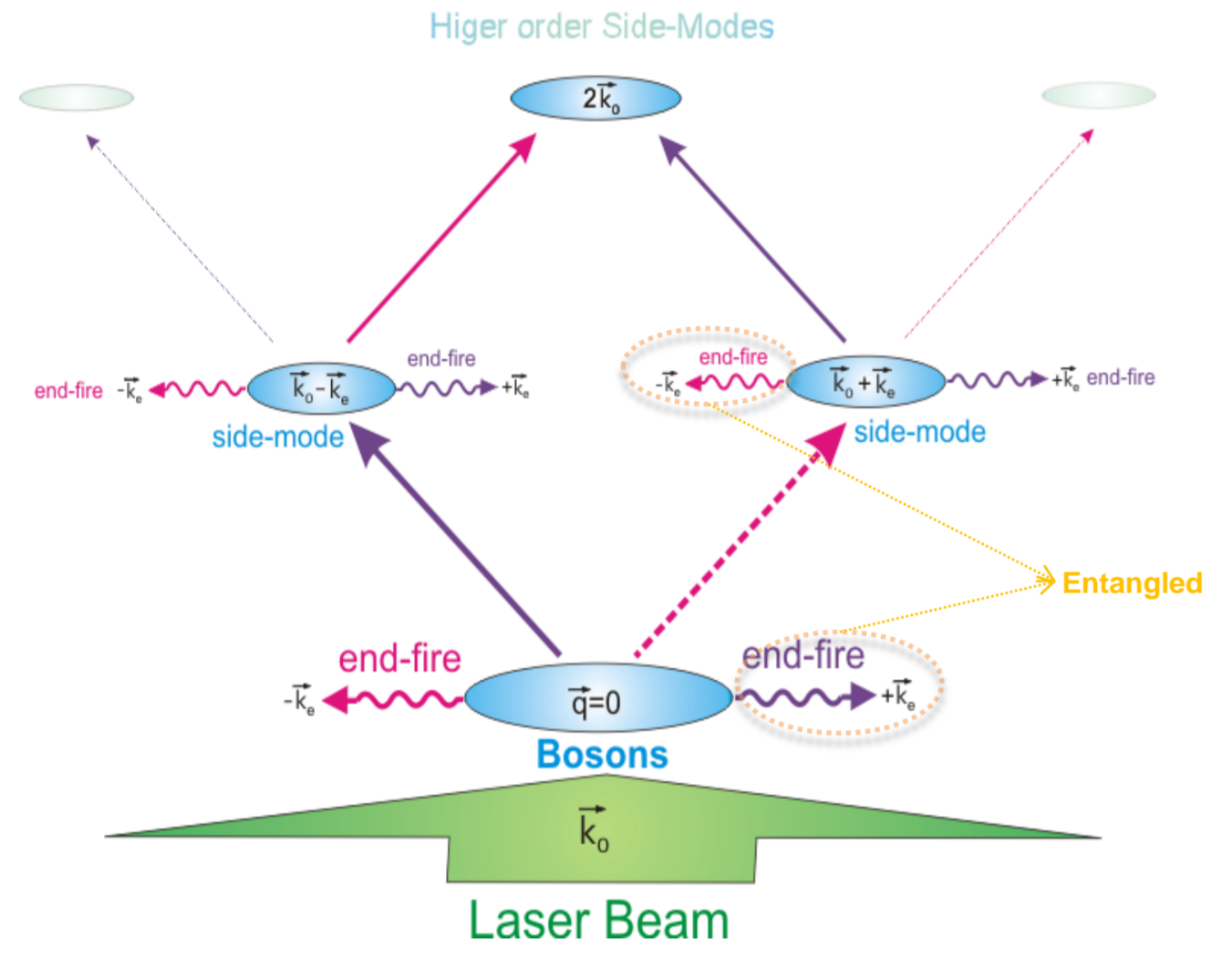
1. Super-ışımaya (SI)

- Super-ışımaya(SI), uyarılmış olan atom grubunun kolektif olarak spontene(kendiliğinden) ışımaya uğramasıdır.
- Atomlar yüksek güçlü lazer ışığına maruz bırakılarak, çok hızlı bir şekilde uyarılırlar.
- Çıkan ışımaya (\vec{k}) koherent (eşvrelili), iyi derecede yönlendirilmiş, ve lazer demetine (\vec{k}_0) diktir. Bu sebeplerden dolayı bunlara ise yan-mod(end-fire) modlar denir.
- SI'daki yönlülüğün tek sebebi örneğin(sample) uzun-ince olmasıdır.



2. Sıralı Super-ışımaya

- Eğer örnek bir Bose-Einstein Yoğuşması(BEY) ise, atomların saçılması da kolektiftir. Bunlara ise yan-mod(side-mode) denir. ($\vec{k}_0 \neq \vec{k}$)
- Uçtan-ateşli ışımaya sağa/sola doğru çıkarsa, yan-mod sola/sağa doğru çıkar (renklerle belirtilmiştir). $2(k_0 - k_x)$, $2k_0$, $2(k_0 + k_x)$
- Eğer lazer pompası yeteri kadar uzun açık kalırsa, 1. derece yan-modlar da super-ışımaya yapar. Bu daha yüksek derecedeki yan-modları oluşturur.



- Dolaşıklık ($k_0 - k_x$) yan-modu sayesinde aktarılır.
- Bu çalışmada, zıt yönlere yayılan iki uçtan-ateşli modun ($+k_x$ ve $-k_x$) dolaşıklığını inceliyoruz.

3. Hamilton

$$\hat{H} = \int d^3k \hbar\omega(k) \hat{a}(k)^\dagger \hat{a}(k) + \sum_q \hbar\omega_q \hat{c}_q^\dagger \hat{c}_q - \frac{g(k_0)}{\Delta} \sum_{q,q'} \int d^3k \rho_{q,q'}(k) \hbar g^*(k) \hat{c}_q^\dagger \hat{a}_{k_0}^\dagger \hat{a}_{k_0} \hat{c}_{q'}$$

- Pompa lazerini kuantum olarak ele alıyoruz. \hat{a}_{k_0}
- Uçtan-ateşli modların ($\pm k_x$) açılma dağılımını ihmal ediyoruz. \Rightarrow tek mod alıyoruz.
- Yan-modları da tek mod olarak alıyoruz.
- Üst derece yan-modları ($2k_0 \neq k_x$) ihmal ediyoruz.
- Ve dönen gözlemciye geçiyoruz.

$$\hat{H} = -\hbar \frac{g^2}{\Delta} (\hat{c}_+^\dagger \hat{a}_+^\dagger \hat{a}_0 \hat{c}_0 + \hat{c}_-^\dagger \hat{a}_-^\dagger \hat{a}_0 \hat{c}_0 + \hat{c}_2^\dagger \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_0 \hat{c}_- + \hat{c}_2^\dagger \hat{a}_2^\dagger \hat{a}_0 \hat{c}_+) + H.c.$$

$$\hat{a}_\pm \equiv \hat{a}_{\pm k_x}, \hat{a}_0 \equiv \hat{a}_{k_0}, \hat{c}_\pm \equiv \hat{c}_{(k_0 \pm k_x)}, \hat{c}_2 \equiv \hat{c}_{2k_0}$$

4. Dolaşıklık Parametresi

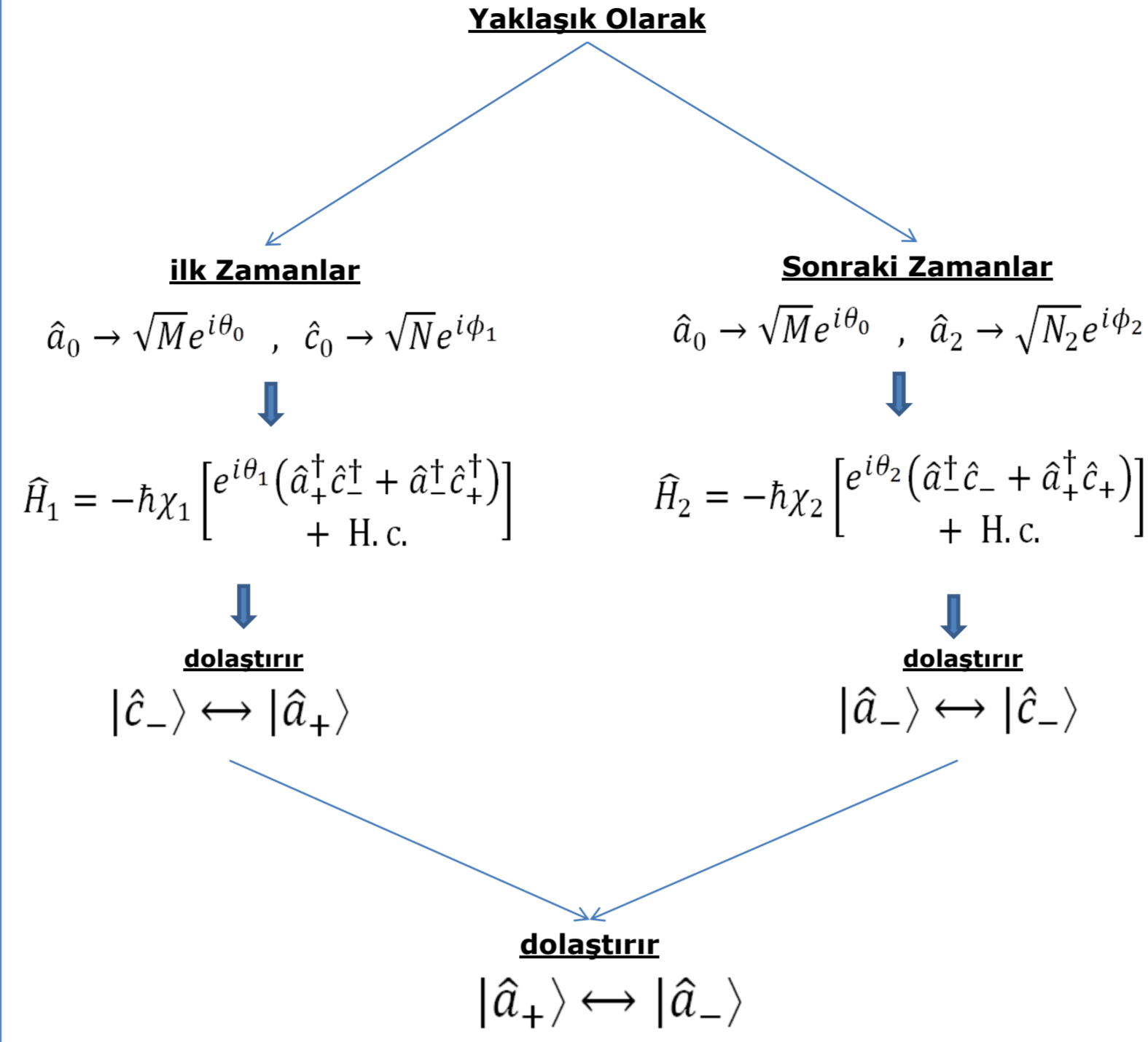
- Eğer yoğunluk matrisi ayırılmaz ise $\Rightarrow \langle \Delta \hat{u}^2 \rangle + \langle \Delta \hat{v}^2 \rangle \leq \left(c^2 + \frac{1}{c^2} \right)$
- Heisenberg belirsizliği $\Rightarrow \langle \Delta \hat{u}^2 \rangle + \langle \Delta \hat{v}^2 \rangle \geq \left| c^2 - \frac{1}{c^2} \right|$
- Dolaşıklık Parametresi: $\lambda(t) = \langle \Delta \hat{u}^2 \rangle + \langle \Delta \hat{v}^2 \rangle - \left(c^2 + \frac{1}{c^2} \right)$
- Yan-modlar arasındaki simetriden ($\hat{a}_+ \leftrightarrow \hat{a}_-$) dolayı $\Rightarrow c^2 = 1$
- Eğer $\lambda(t) < 0$ ise yan-modlar dolaşık.
- λ 'nın alabileceği en düşük değer -2'dir (Heisenberg !)

$$\hat{u} = |c| \hat{x}_1 + \hat{x}_2/c \quad \text{and} \quad \hat{v} = |c| \hat{p}_1 - \hat{p}_2/c$$

Einstein-Podolsky-Rosen(EPR) operatörleridir.

$$\hat{x}_{1,2} = (\hat{a}_\pm + \hat{a}_\pm^\dagger)/\sqrt{2} \quad \text{and} \quad \hat{p}_{1,2} = (\hat{a}_\pm - \hat{a}_\pm^\dagger)/i\sqrt{2}$$

5. Dolaşıklık Aktarımı



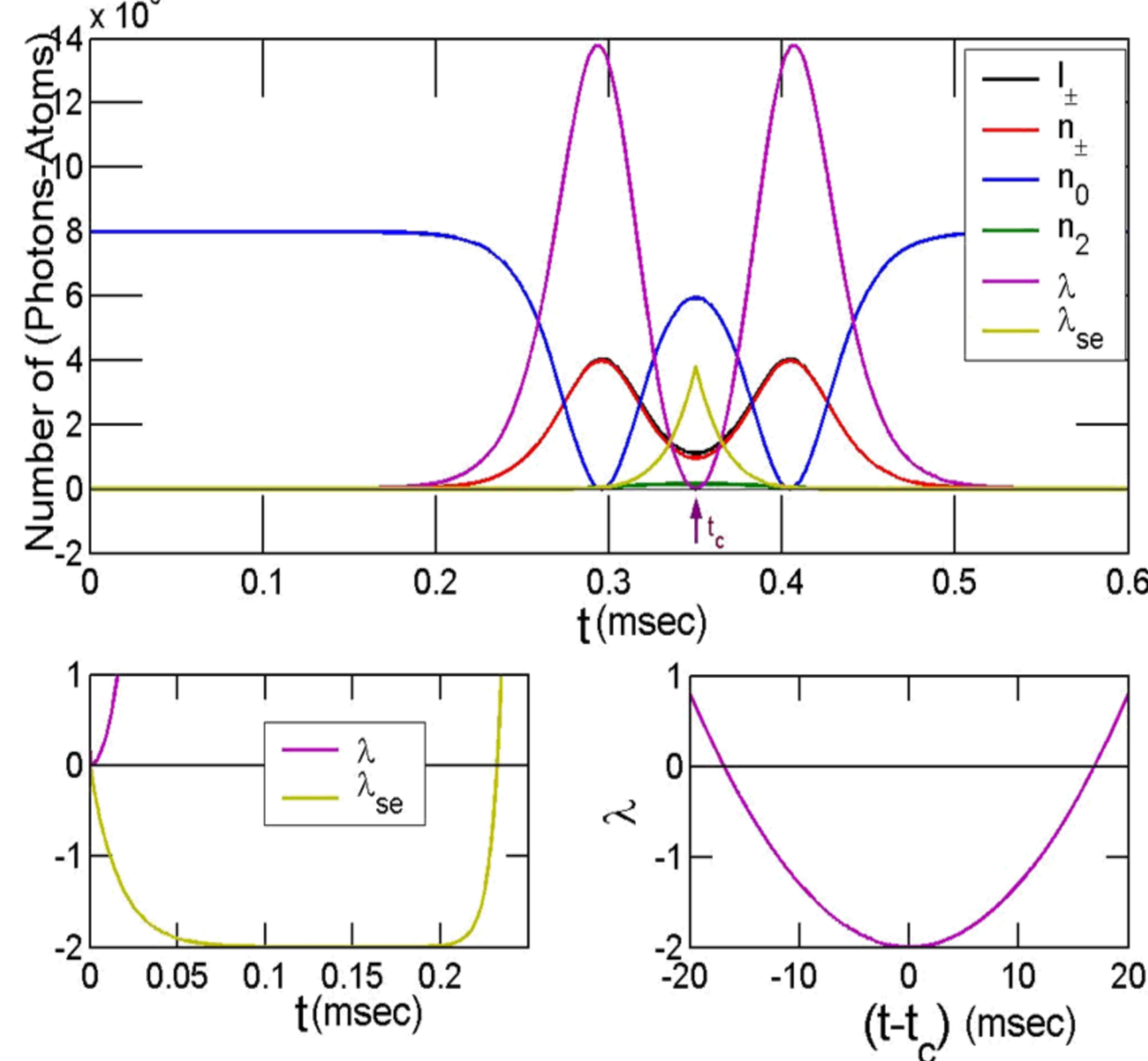
Anolitik Sonuç:

$$\lambda(t) = 2[2 \sinh^2(\chi_1 t_0) - \cos(\theta_1 + \theta_2) \sinh(2\chi_1 t_0) \sin(2\chi_2(t - t_0))]$$

- Eğer $\cos(\theta_1 + \theta_2) \cong 1 \Rightarrow \lambda < 0$
- λ başlarda $N \sim 10^6$ civarındayken, azalıp -2'ye ulaşıyor !!

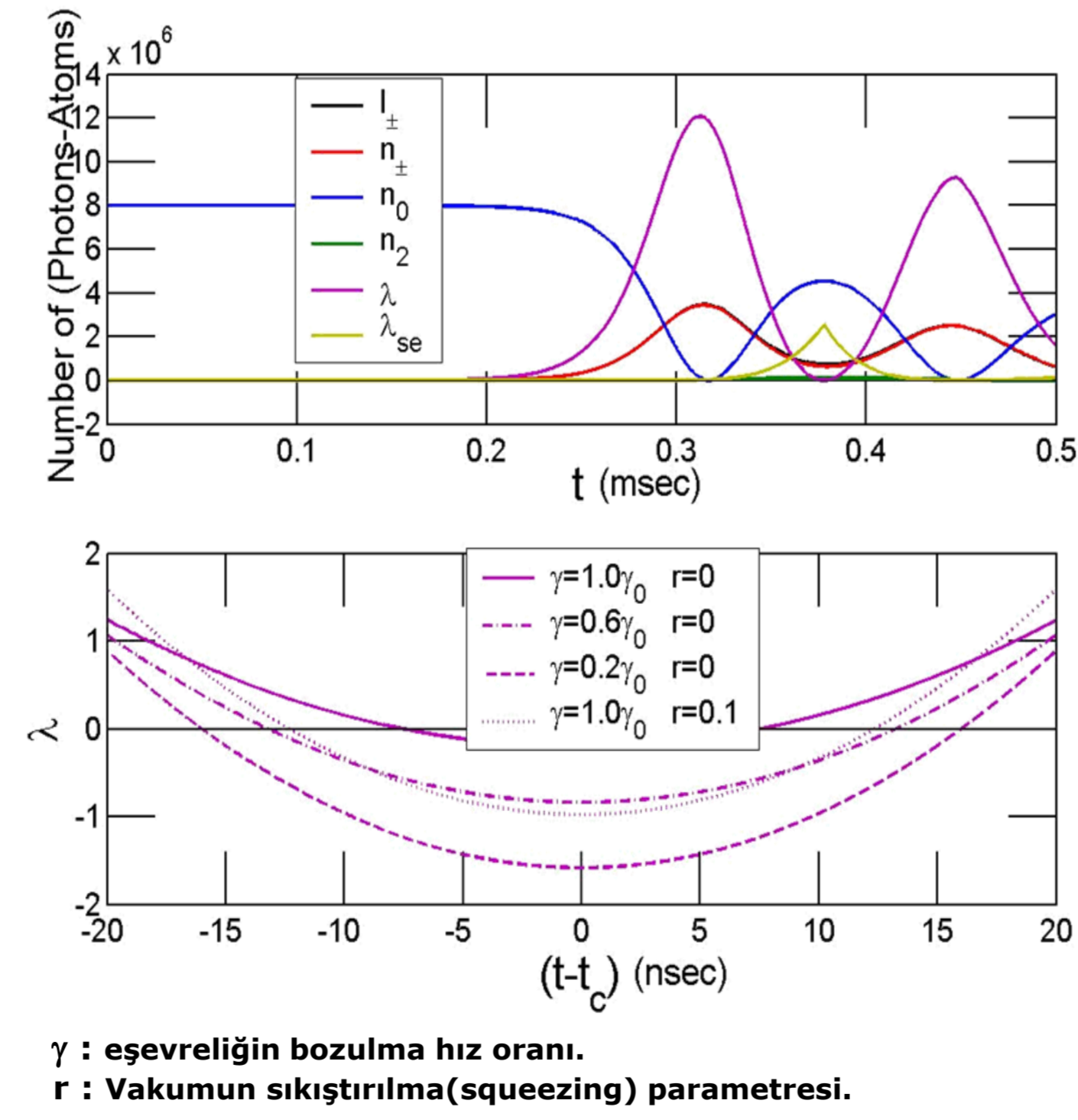
6. Simülasyon Sonuçları

A: Damping Yokken



- (yan-mod) \Leftrightarrow (uçtan-ateşli) arasındaki dolaşıklık : λ_{se} aktarılıyor
- (uçtan-ateşli) \Leftrightarrow (uçtan-ateşli) arasındaki dolaşıklık : λ
- λ minimum değerine ulaşiyor: Heisenberg limit: -2.
- Beklendiği üzere; dolaşıklık 2. derece SI meydana gelmeye başladıktan sonra kuruluyor. (n_2 dolmaya başladığı zaman)

B: Deneysel Parametrelerle



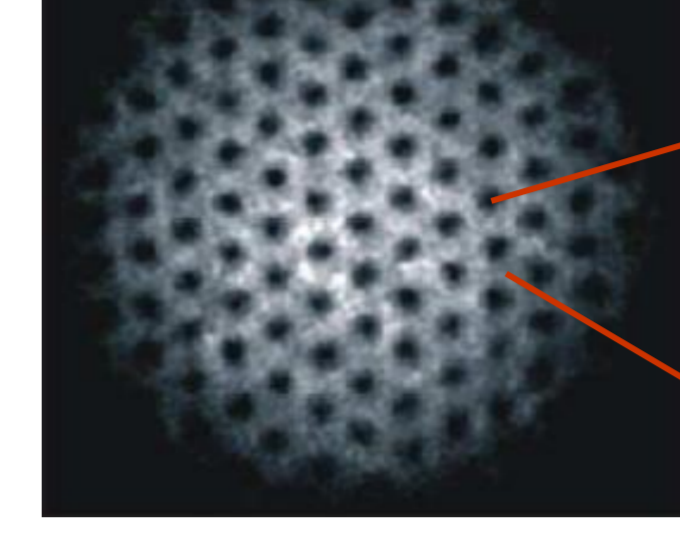
γ : eşvreliliğin bozulma hız oranı.
 r : Vakumun sıkıştırılma(squeezing) parametresi.

7. Sonuç

- Super-ışımaya yapan BEY'in, zıt yönde hareket eden, uçtan-ateşli foton modlarının ($\pm k_x$) dolaşık olduğu gösterilmiştir.
- Dolaşıklık, 1. ve 2. derece SI'ların arasındaki korelasyon aktarma mekanizmasından dolayı ortaya çıkmaktadır.
- Dolaşıklık, uçtan-ateşli modların başlangıç durumunu sıkıştırılmış(squeezed) vakum olarak, güçlendirilebilir.

BEY vorteks örgüsünün (Kompleks dielektrik fonksiyonlu) Fotonik Bantları [1]

1. Vorteks Örgüsü

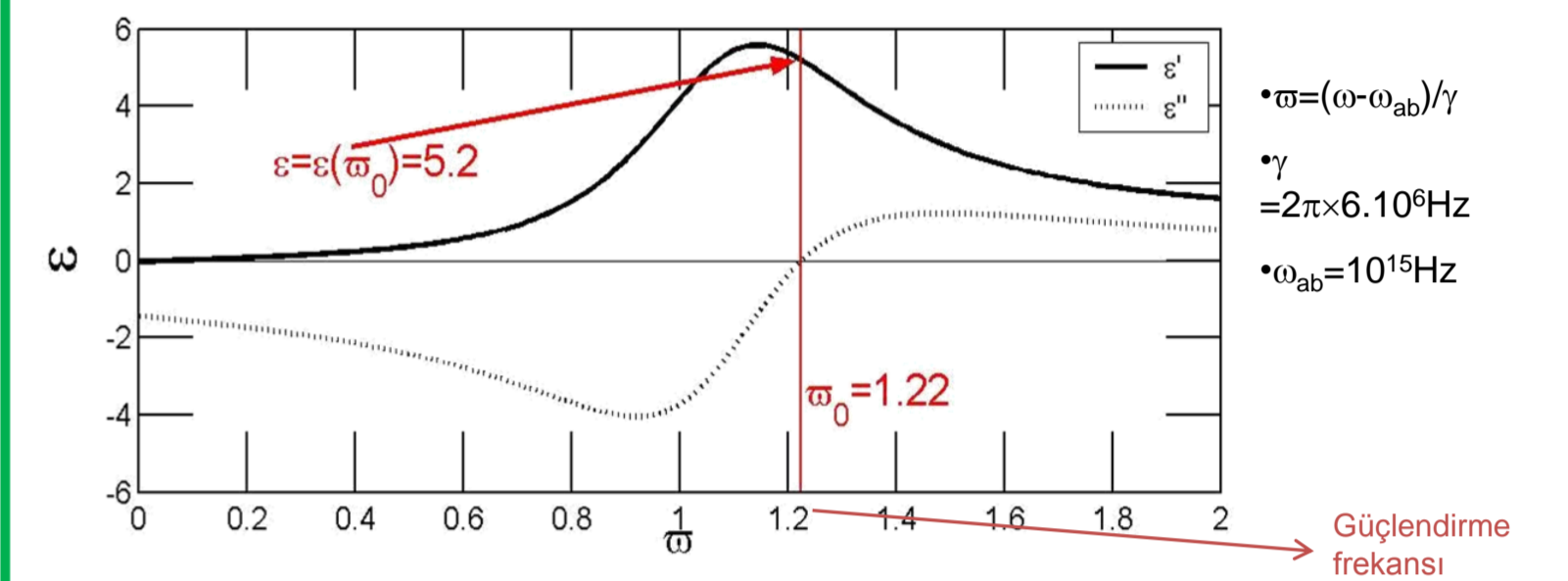


Vorteks çekirdeği

•Dönen bir Bose-Einstein Yoğuşmasının (BEY) içindeki vorteksler, 2-Boyutlu altgen (Abrikosov) örgü oluşturacak şekilde organize olurlar.

- İndeks-güçlendirme metodlarıyla yeterli indeks kontrastı sağlandığında, dönen BEY fotonik bant boşluklu(FBB) malzeme olarak kullanılabilir. [2]
- Sıradan FBB malzemelerden farklı olarak, dönme frekansı kullanılarak, vorteks örgüsünün örgü-sabiti ayarlanabilir.
- Parçacıklar arasındaki etkileşim kuvvetiyle oynanarak (feshbach rezonans metodu) örgü tipi bile ayarlanabilir.

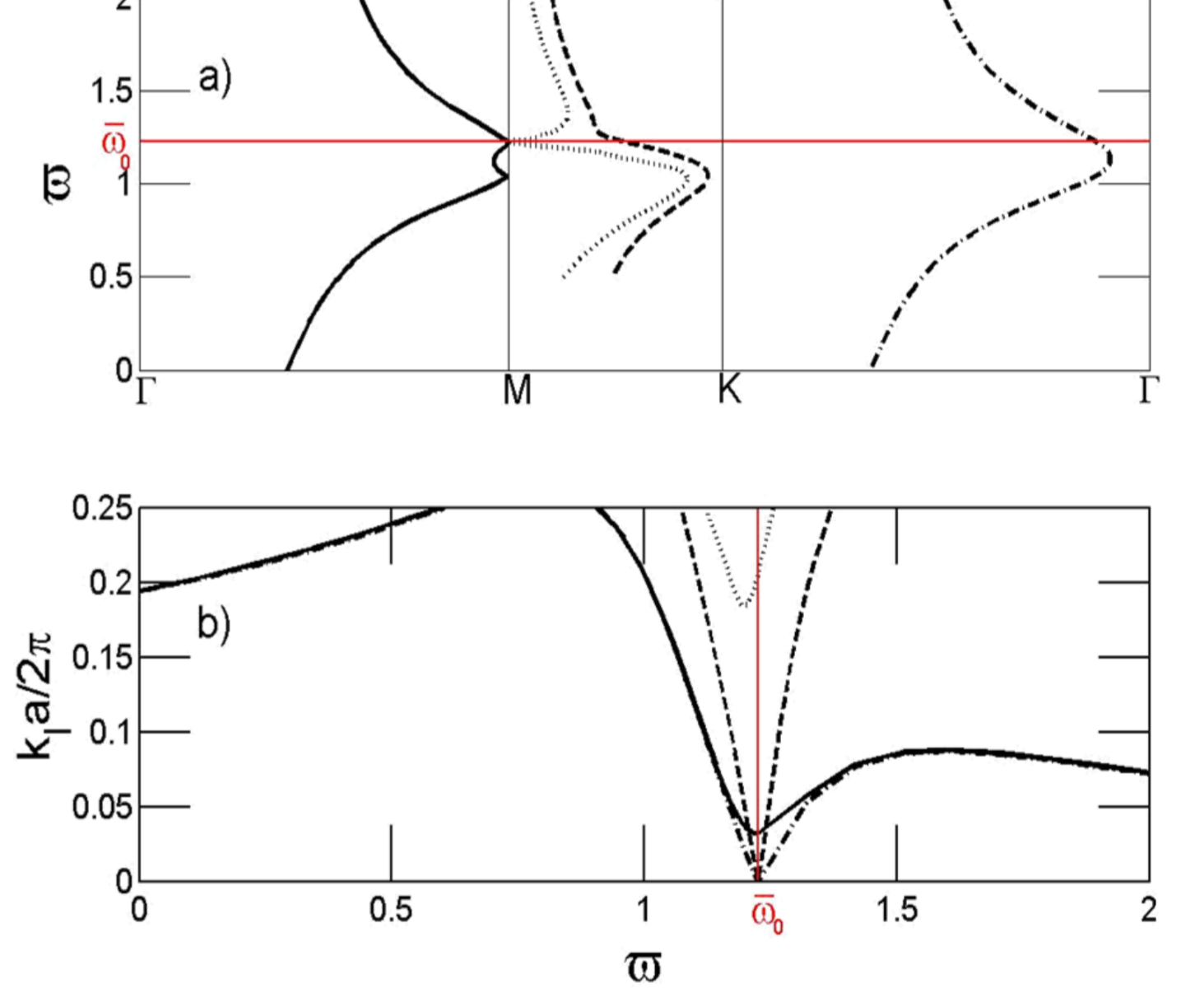
2. Kompleks dielektrik fonksiyonu



- İndeks güçlendirme metodlarında elde edilen dielektrik fonksiyonlar kompleksdir, frekansa kuvvetlice bağlıdır, hem emilim(absorption) hem de amplifikasyon(gain) rejimleri vardır.

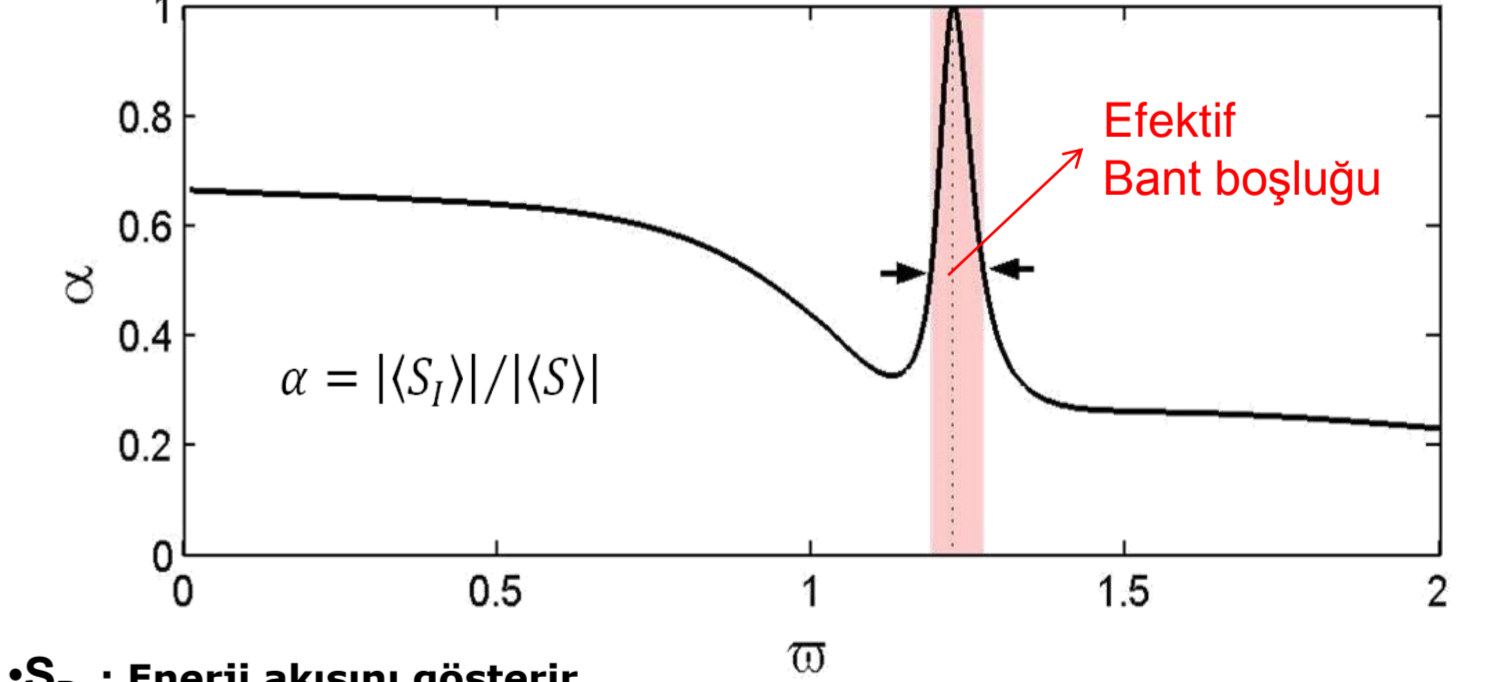
$$\epsilon(\vec{r}, \omega) = \epsilon_r(\vec{r}, \omega) + i\epsilon_i(\vec{r}, \omega)$$

3. Bant Yapısı



- Çözümler dalga-vektörünün imajiner kısmının (k_i) işaretini(\pm) ayırt edemez.
- $\omega = \omega_0$ iken, ϵ reeldir. k_i da sıfırdan-farklı olduğuna göre, bu frekansta bant boşluğu vardır. $\Rightarrow k_i > 0$
- Peki $\omega > \omega_0$ için durum nedir? k_i 'nin sıfırdan-farklı değeri aynı zamanda soğutulmadan(absorption) dolay da olabilir. $e^{-k_i r}$
- Peki $\omega < \omega_0$ ise durum nedir? Amplifikasyon vardır $\Rightarrow k_i$ negatif de olabilir!!
- Ayırt etmek için çarelerden biri; her frekans için yansıma-geçirme simülasyonunun yapılmasıdır.

4. Poynting Vektörü



- S_R : Enerji akısını gösterir.
- S_I : Reaktif(depolanmış) enerjiyi gösterir.
- $\omega = \omega_0$ 'ya yaklaştıkça
- $|S_I|$ düşüyor.
- Fakat $|S_R|$ oranı artıyor.
- α 'daki artış sadece bant boşluğu yüzünden olabilir.
- Bant boşluğunu α 'nın arttığı yer olarak tanımla (FWHM)

5. Sonuç

- BEY vorteks örgüsünün, (kompleks ve frekans-bağımlı dielektrik fonksiyonlu), bant yapısı hesaplandı.
- Absürd dielektrik fonksiyonlu Fotonik Kristallerin bant boşluğunu belirlemek için yeni bir metod bulduk. Bu sayede zaman alan yansıma-geçirme simülasyonlarına girmemiş olduk.
- İndeks-güçlendirme, EIT gibi konuların fotonik kristallere uygulanabilirliği düşünüldüğünde, bu metodun gelecekte çok yararlı olması beklenmektedir.

6. Referanslar

- [1] M.E. Taşgın, Ö.E. Müstecaplıoğlu, and M.Ö. Okte^l, Phys. Rev. A 75, 063627 (2007).
- [2] Ö.E. Müstecaplıoğlu and M.Ö. Okte^l, Phys. Rev. Lett. 94, 220404 (2005).