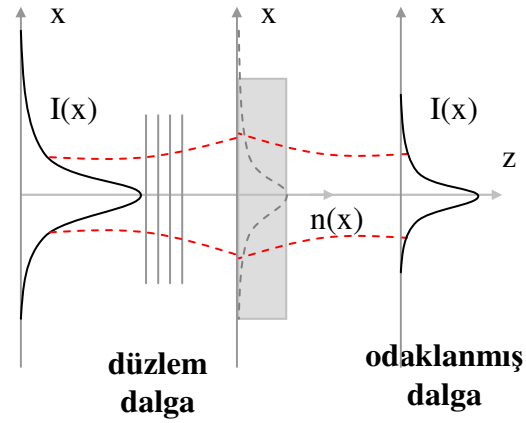


11. Ders

Doğrusal Olmayan Optik



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- Doğrusal olmayan optik,
- Optik doğrultma,
- Dalga harmanlama,
- Kendiliğinden odaklanma,
- Soliton

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

Onbirinci Ders: İçerik

- Doğrusal-Doğrusal Olmayana Karşı
- İkinci Harmonik
 - İkinci Harmonik Oluşumu
 - Optik Doğrultma
 - Üç Dalga Harmanlama
- Üçüncü Harmonik
 - Üçüncü Harmonik Oluşumu
 - Optik Kerr Etkisi
 - Dört Dalga Harmanlama
 - Kendiliğinden Faz Modülasyonu
 - Kendiliğinden Odaklanma
- Solitonlar
 - Uzaysal Soliton
 - Zamansal (Optik) Soliton

Doğrusal Olmayan Optik (NonLinear Optics)

Eğer uygulanan dış elektrik alanın (E) değeri yeterince büyükse (yüksek şiddetli ışık) kutuplanma vektörü doğrusal olmayan etkileri de içerecektir

$$\vec{P}(\vec{E}) = \vec{P}_o + \epsilon_o \chi^{(1)} \vec{E} + \epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots$$

doğrusal

doğrusal olmayan

- Doğrusallık ışığın DEĞİL, ortamın bir özelliğidir
- Doğrusal olmayan optik maddenin olmadığı (boş uzay) ortamda GÖZLENMEZ
- Işık, ortamın özelliğini değiştirerek bu ortamdan geçen ışığın özelliklerinin, hatta KENDİ özelliğinin değişmesine neden olur

Doğrusal-Doğrusal Olmayana Karşı

$$\vec{P}(\vec{E}) = \vec{P}_o + \underbrace{\epsilon_o \chi^{(1)} \vec{E}}_{\text{doğrusal}} + \underbrace{\epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots}_{\text{doğrusal olmayan}}$$

Doğrusal Ortam

- Kırılma indisi ve soğurma katsayısı ışığın şiddetinden bağımsızdır,
- Işığın frekansı ortamda değişmez, frekans sadece kaynağa bağlıdır,
- Üst üste binme ilkesi geçerlidir,
- Işık ile ışık kontrol edilemez (foton-foton etkileşmesi olmaz).

Doğrusal Olmayan Ortam

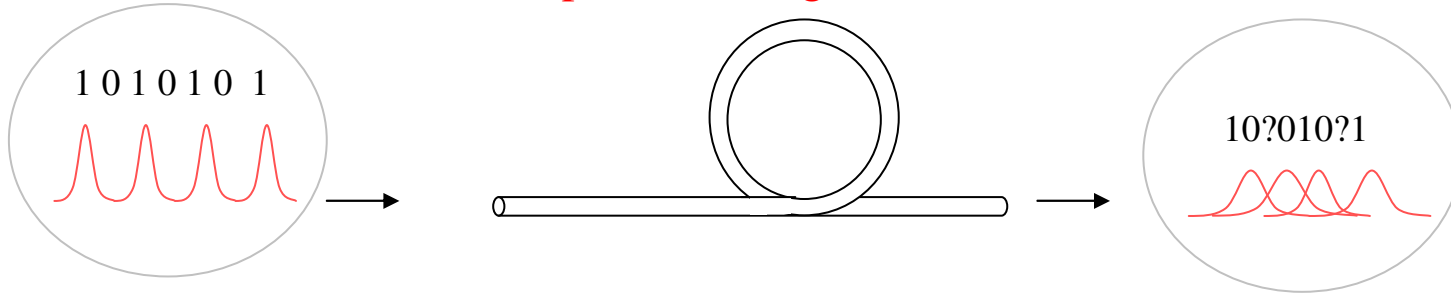
- Kırılma indisi ışığın şiddetine bağlı $n(I)$,
- Frekans değişir ($\omega \rightarrow 2\omega$; $\omega \rightarrow 3\omega$),
- Üst üste binme ilkesi geçerli değildir!
- Işık ile ışık kontrol edilebilir.

Doğrusal Olmayan Optik-Uygulamalar

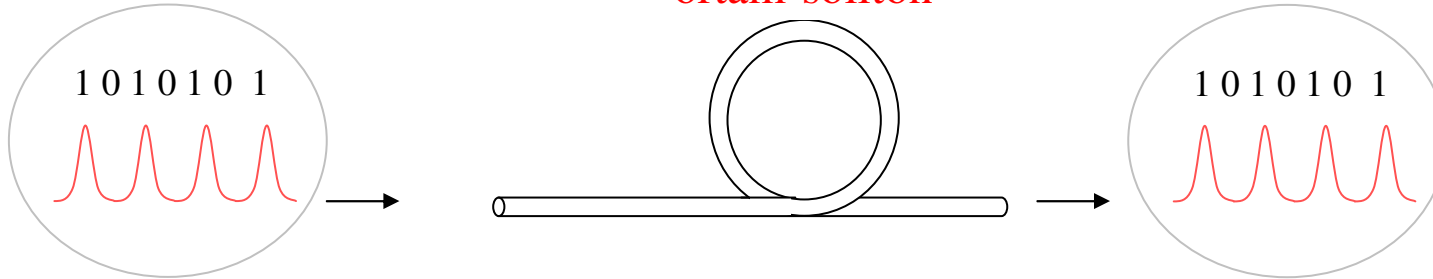
Doğrusal olmayan optiğin birçok uygulaması vardır ve bu uygulamalar her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamalar:

- Optik anahtarlama
- Hologram
- Lazer fiziği
- Optik iletişim

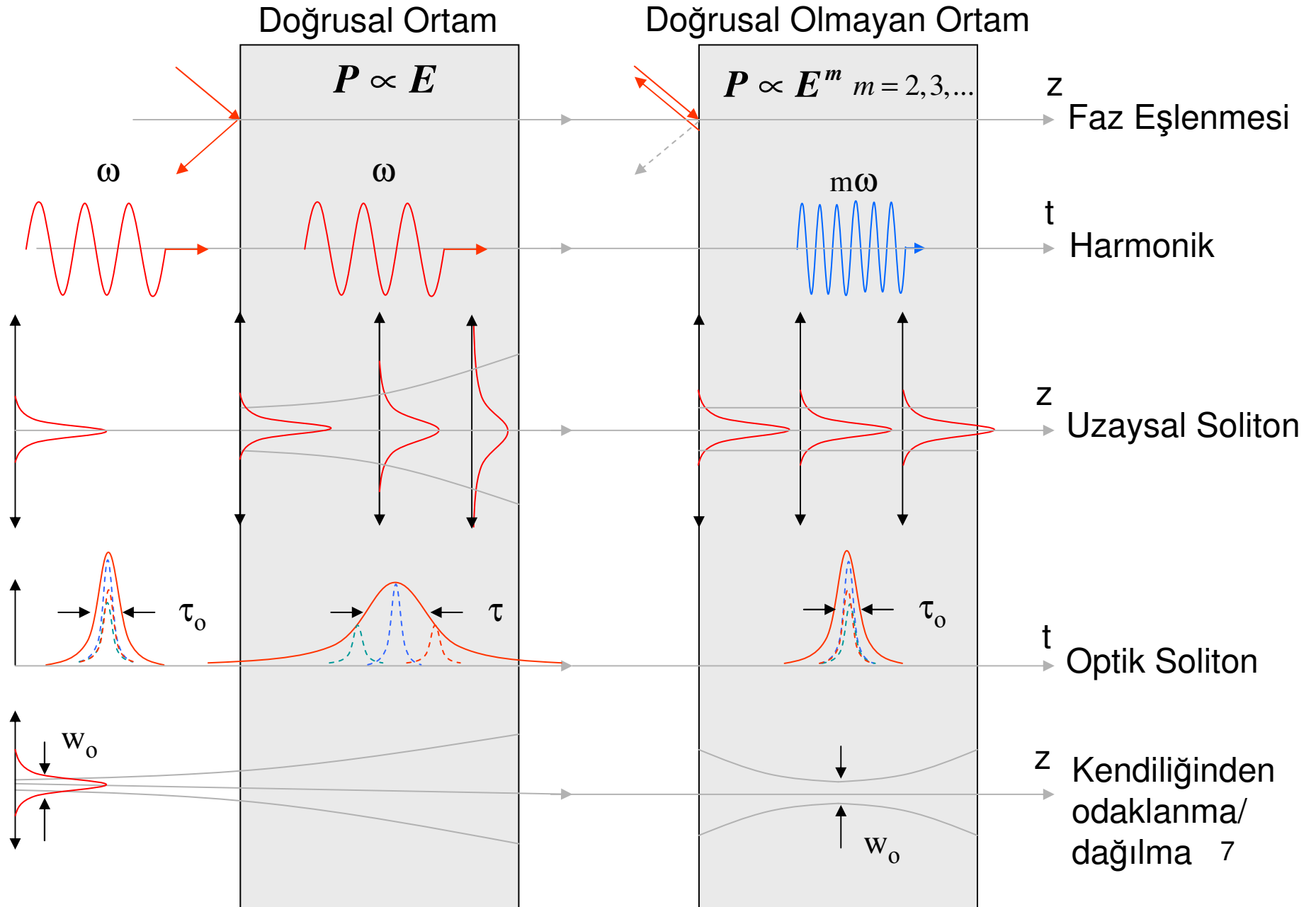
optik fiber-dağıtkan ortam



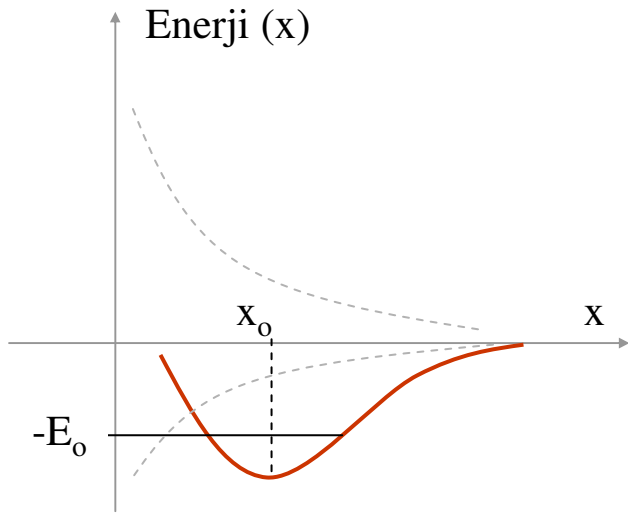
optik fiber-doğrusal olmayan ortam-soliton



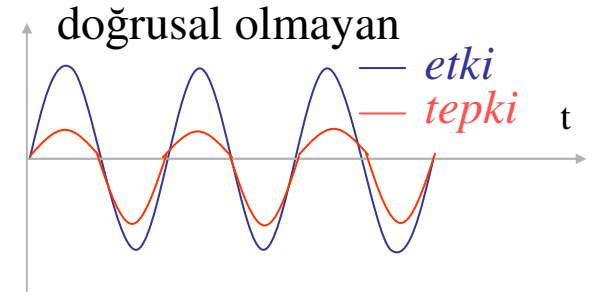
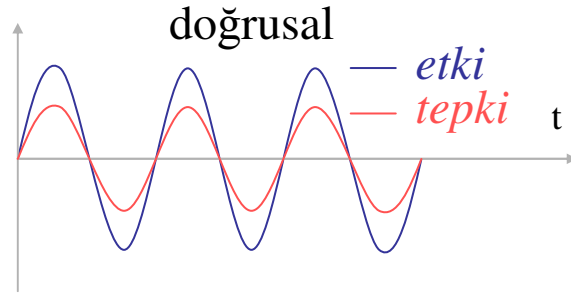
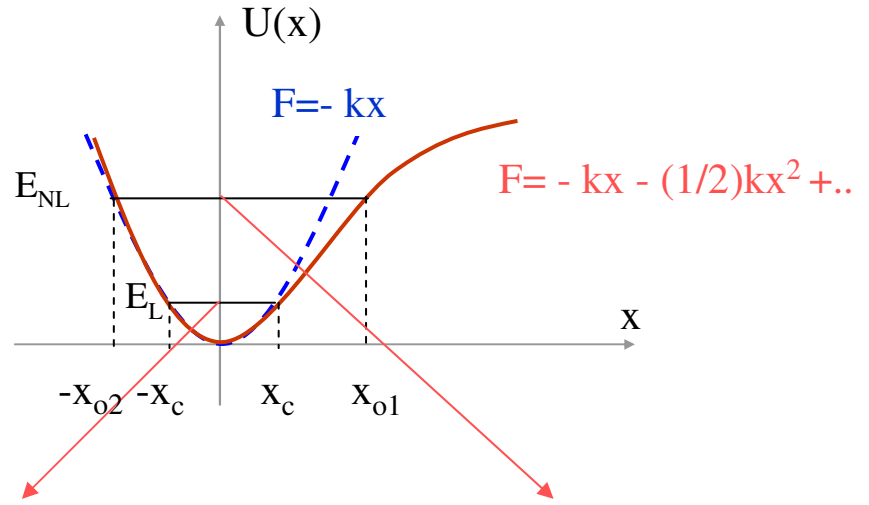
Doğrusal Olmayan Ortam



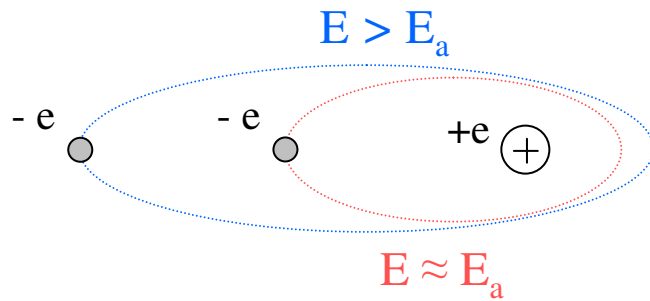
Doğrusal Olmayan Fizik



mekanik sistem:
dünya-güneş



Doğrusal olmayan optik: mikroskopik yaklaşım



atomlararası elektrik alan $E_a = 10^5 - 10^8$ V/m

Doğrusal olmayan etki hem dipollerden (μ) hem de $N(t)$ 'den kaynaklanabilir.

$$P = \mu N$$

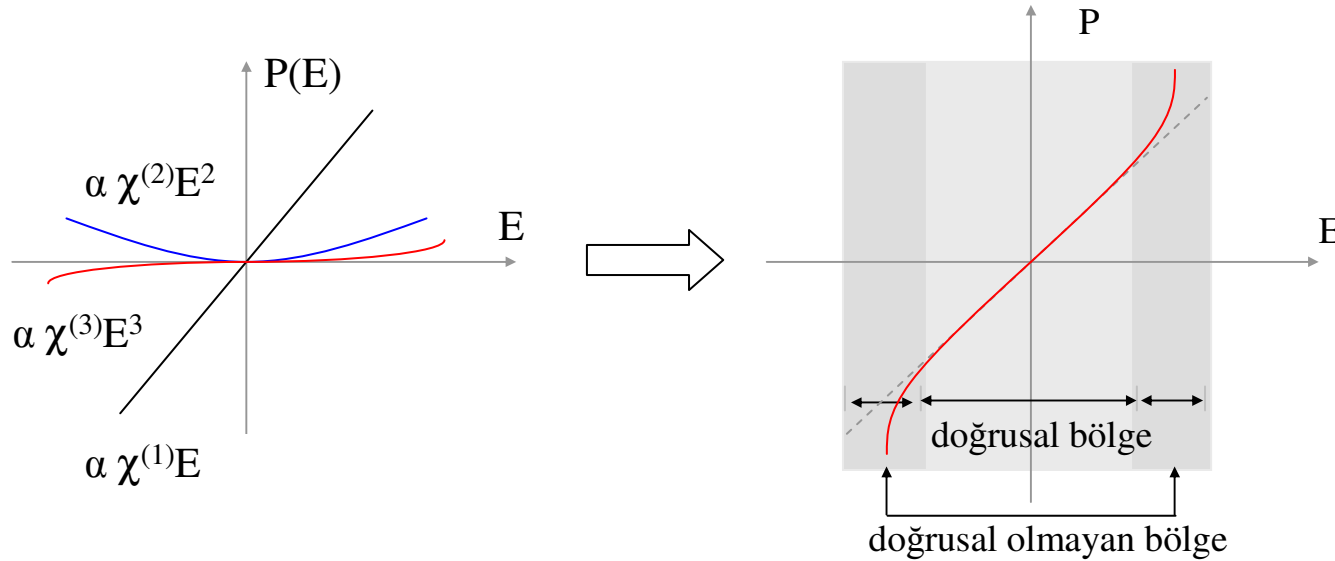
$\mu = qx(t)$ $N(t)$

Doğrusal Olmayan Optik

$$\vec{P}(\vec{E}) = \vec{P}_o + \underbrace{\epsilon_o \chi^{(1)} \vec{E}}_{\text{doğrusal}} + \underbrace{\epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2}_{\text{2. harmonik}} + \underbrace{\epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3}_{\text{3. harmonik}} + \dots$$

$$\chi^{(2)} = 10^{-24} - 10^{-21} \text{ A-s} / \text{V}^2 \quad \chi^{(3)} = 10^{-34} - 10^{-29} \text{ A-s} / \text{V}^2$$

1. dereceden elektrik duygunluk ($\chi^{(1)}$), 2. ve 3. duygunluktan ($\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$) çok büyük olduğu için normal ışık şiddetlerinde 2. ve 3. terimlerin etkisi ihmal edilir.

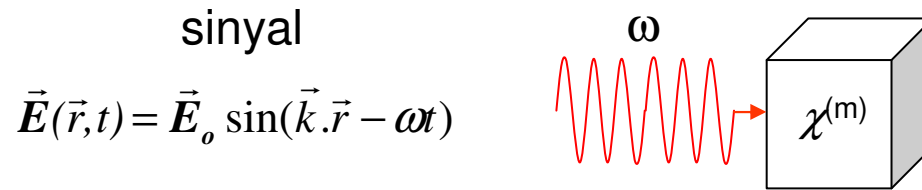


Yüksek şiddete sahip ışık kaynaklarının (lazerlerin) elde edilmesi ile 2. ve daha yüksek dereceden harmoniklerin uyarılması mümkün olmuştur.

Merkezi simetri $\Rightarrow \chi^{(2)} = 0$

Doğrusal Olmayan Optik-Genel Durum

Kutuplanma vektörü $\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots$



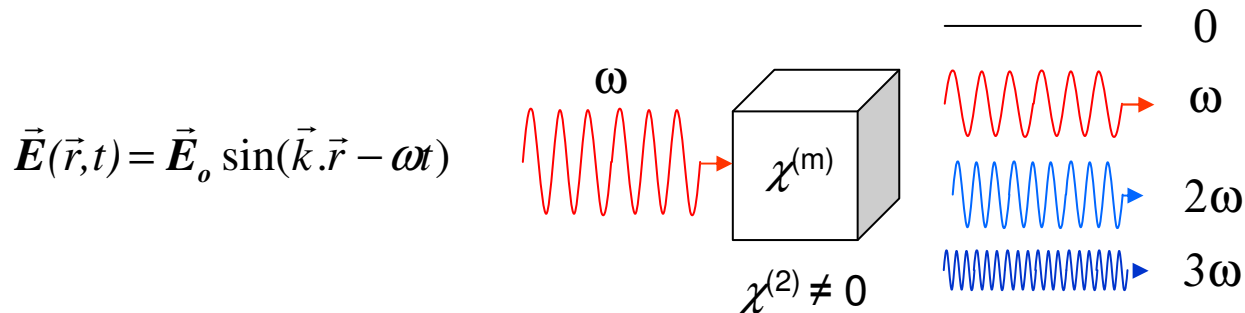
$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} [E_o \sin(\omega t)] + \epsilon_0 \chi^{(2)} [E_o \sin(\omega t)]^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} [E_o \sin(\omega t)]^3 + \dots$$

$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E_o \sin(\omega t) + \frac{\epsilon_0 \chi^{(2)} E_o^2}{2} [1 + \cos(2\omega t)] + \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)} E_o^3}{4} [3 \sin(\omega t) - \sin(3\omega t)]$$

doğrusal

2. harmonik

3. harmonik



Doğrusal Olmayan Ortamda Dalga Denklemi

Dalga Denklemi $\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_o \frac{\partial^2 \vec{P}(\vec{E})}{\partial t^2}$

$$\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_o \chi^{(1)} \vec{E} + \epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2 + \epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3 + \dots = \vec{P}_L + \vec{P}_{NL}$$

Doğrusal ortam $\vec{P}_{NL} = 0$

$$\vec{P}(\vec{E}) = \vec{P}_L$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_o \frac{\partial^2 \vec{P}_L(\vec{E})}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_o \epsilon_o \chi \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Kaynak

Doğrusal olmayan ortam $\vec{P}_{NL} \neq 0$

$$\vec{P}(\vec{E}) = \vec{P}_L + \vec{P}_{NL}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_o \frac{\partial^2 \vec{P}_{NL}(\vec{E})}{\partial t^2}$$

Kaynak S(mω)

Doğrusal olmayan ortamda farklı frekanslarda dalga üreten kaynak

Doğrusal Olmayan Kristaller

Kristaller

Merkezi simetrik (centrosymmetry)

Böyle kristaller terslenme (inverse) simetrisine sahiptirler ($r \rightarrow -r$)

$$P = \epsilon_o \chi^{(2)} (+E)^2 = \epsilon_o \chi^{(2)} E^2$$

$$-P = \epsilon_o \chi^{(2)} (-E)^2 = \epsilon_o \chi^{(2)} E^2$$

$$P = -P$$

olabilmesi için

$$\chi^{(2)} = 0$$



NaCl

Merkezi simetrik olmayan (noncentrosymmetry)

$$\chi^{(2)} \neq 0$$

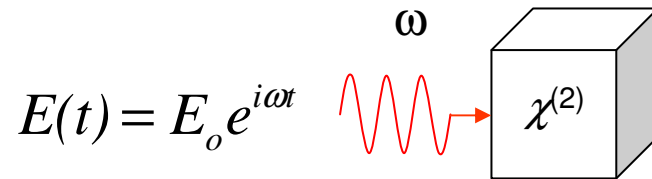


GaAs
ZnS
CdS

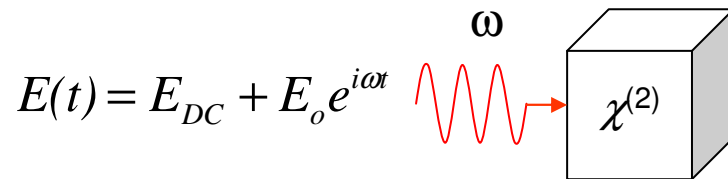
İkinci Harmonik ($\chi^{(2)} \neq 0$)

İkinci harmonik etkiyi inceleyelim:

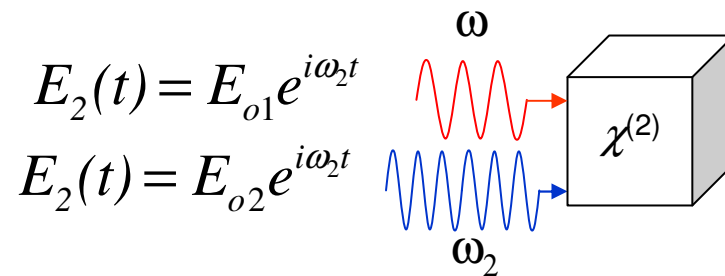
$$\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2$$



Optik Doğrultma

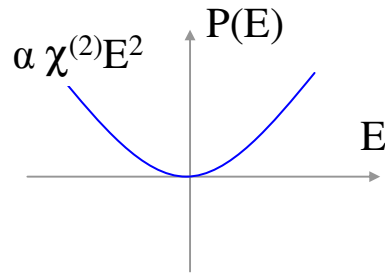


Elektro-Optik

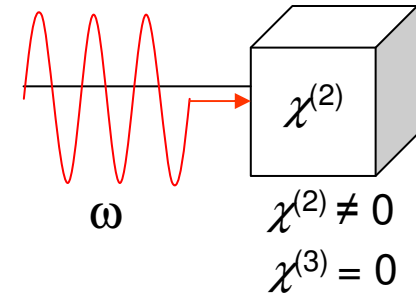


Üç Dalga Harmanlama

İkinci Harmonik ($\chi^{(2)} \neq 0$) - Optik Doğrultma



$$\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E}^2$$



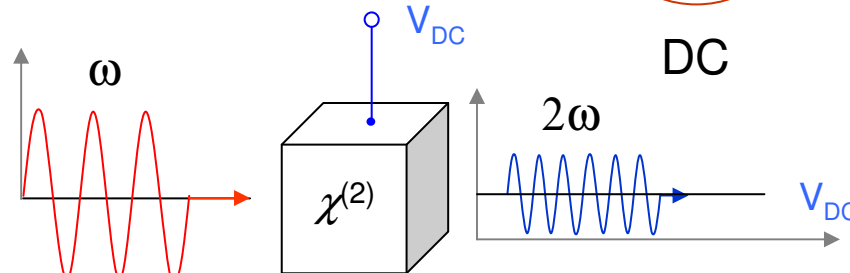
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_o \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$



$$\vec{P}(t) = \frac{\chi^{(2)} E_o^2}{2} - \frac{\chi^{(2)} E_o^2}{2} \cos(2\omega t)$$

DC

2. Harmonik

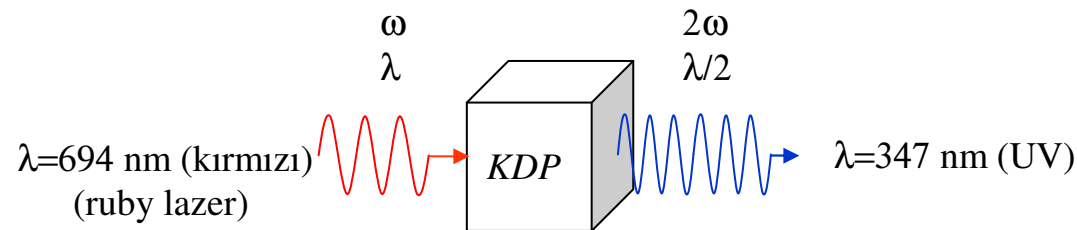


$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_o \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

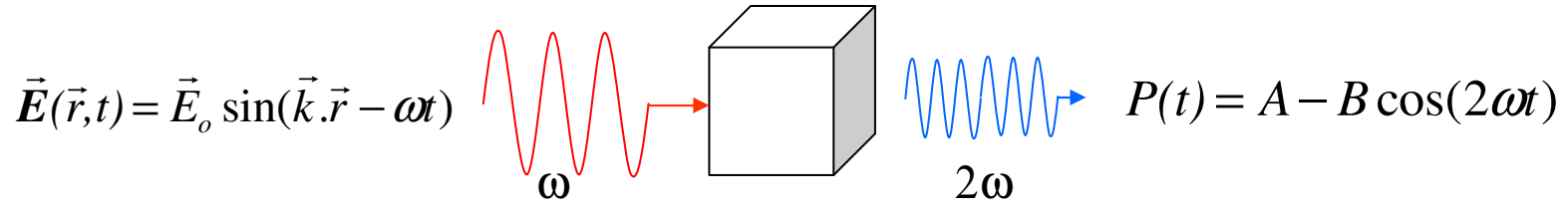
$$P(t) = A - B \cos(2\omega t)$$

Periyodik olarak değişen ışık doğrusal olmayan ortamda DC gerilim oluşturur.

Optik güç MW (tepe güç) $\rightarrow V_{DC} = \mu V$



İkinci Harmonik-devam



$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu_o \frac{\partial^2 \vec{P}_{NL}(\vec{E})}{\partial t^2} \leftarrow \text{Kaynak } S(2\omega)$$

$$S(2\omega) = 2\chi^{(2)} \mu_o \omega^2 E_o^2$$

$$I_{kaynak} \propto |S(2\omega)|^2$$

$$|S(2\omega)|^2 = |2\chi^{(2)} \mu_o \omega^2 E_o^2|^2$$

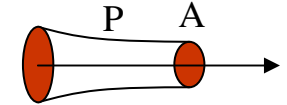
$$|S(2\omega)|^2 \propto [\chi^{(2)}]^2$$

$$|S(2\omega)|^2 \propto \frac{1}{\lambda_o^4}$$

$$|S(2\omega)|^2 \propto I^2$$

$$I = \frac{P}{A}$$

$$|S(2\omega)|^2 \propto \left(\frac{P}{A}\right)^2$$

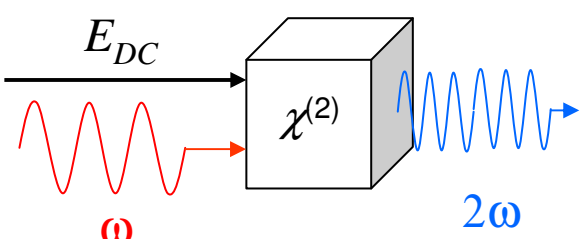


İkinci harmoniğin verimini arttırmak için:

Kesit alanı küçük, optik güç büyük (Kırınımdan dolayı ışık uzun mesafe boyunca gidince uzaysal olarak dağınıma uğrayacağından ışık şiddeti azalır. Dalgayı uzaysal olarak hapseden dalga kılavuzları ile bu iş yapılabilir).

İkinci Harmonik: Elektro-Optik Etki

İkinci dereceden optik ortama dış elektrik alan (DC) uygulandığında ortamda ilerleyen ışığın davranışı elektro-optik ile ikinci dereceden duygunluk arasındaki ilişkiyi verir.

$$E(t) = E_{DC} + E_o e^{i\omega t}$$


$$P_{NL}(0) = \frac{\epsilon_o \chi^{(2)}}{2} \left(2E_{DC}^2 + |E(\omega)|^2 \right)$$

$$P_{NL}(\omega) = 2\epsilon_o \chi^{(2)} E(0) E(\omega)$$

$$P_{NL}(2\omega) = \left(\frac{\epsilon_o \chi^{(2)}}{2} \right) E(\omega) E(\omega)$$

$$|E(\omega)|^2 \ll |E_{DC}|^2$$

Frekansın değişmediği terimi göz önüne alalım

$$P_{NL}(2\omega) \ll P_{NL}(\omega)$$

$$P_{NL}(\omega) = 2\epsilon_o \chi^{(2)} E(0) E(\omega)$$

$$P_{NL}(\omega) = \epsilon_o \Delta\chi E(\omega)$$

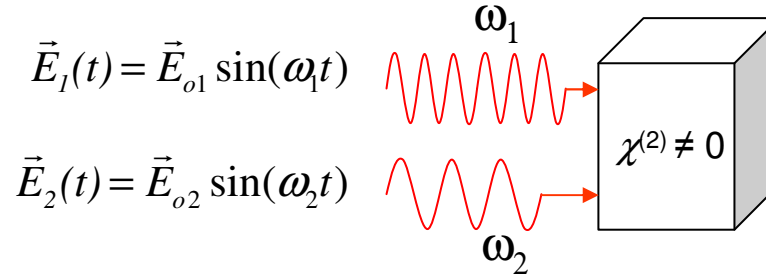
$$\Delta\chi = \frac{P_{NL}(\omega)}{E(\omega)} = 2\epsilon_o E(0) \quad \Delta n = \frac{\chi^{(2)}}{2} E(0)$$

Pockel katsayısı (r) ile 2. dereceden doğrusal olmayan elektrik Duygunluk (χ) arasındaki ilişki

$$r = -\frac{2\epsilon_o}{n^2} \chi^{(2)}$$

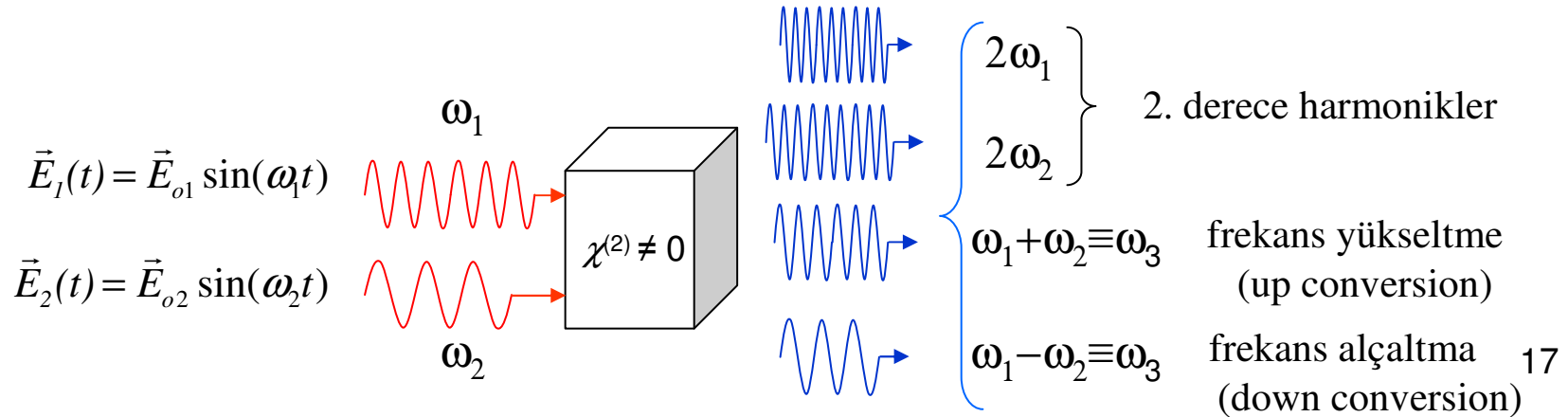
Üç Dalga Harmanlama (Three-Wave Mixing)

Frekansları farklı iki dalga (ω_1 ve ω_2) doğrusal olmayan ortamda buluşturulduğunda ilginç olaylar gözlenir. Farklı dalgaları buluşturma işlemine *üç dalga harmanlama* denir. Enerji ve momentum korunumu gereği iki dalga harmanlamada üçüncü bir dalgaya daha ihtiyaç olduğundan bu işlem üç dalga harmanlama olarak adlandırılır.



$$\vec{E}(t) = \vec{E}_{o1} \sin(\omega_1 t) + \vec{E}_{o2} \sin(\omega_2 t) \longrightarrow \vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_o \chi^{(2)} \vec{E}^2$$

$$\vec{P}(t) = \frac{\chi^{(2)} E_o^2}{2} + E_{o1}^2 \cos(2\omega_1 t) + E_{o2}^2 \cos(2\omega_2 t) + 2E_{o1} E_{o2} \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \sin(\omega_1 - \omega_2)t$$



Üç Dalga Harmanlama

$$\vec{P}(t) = \frac{\chi^{(2)} E_o^2}{2} + E_{o1}^2 \cos(2\omega_1 t) + E_{o2}^2 \cos(2\omega_2 t) + 2E_{o1}E_{o2} \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \sin(\omega_1 - \omega_2)t$$

Bu frekanslardan hangisi gözlenir?

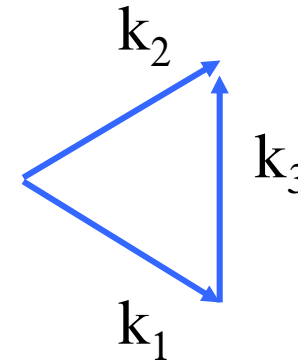
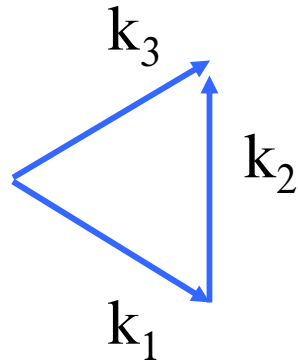
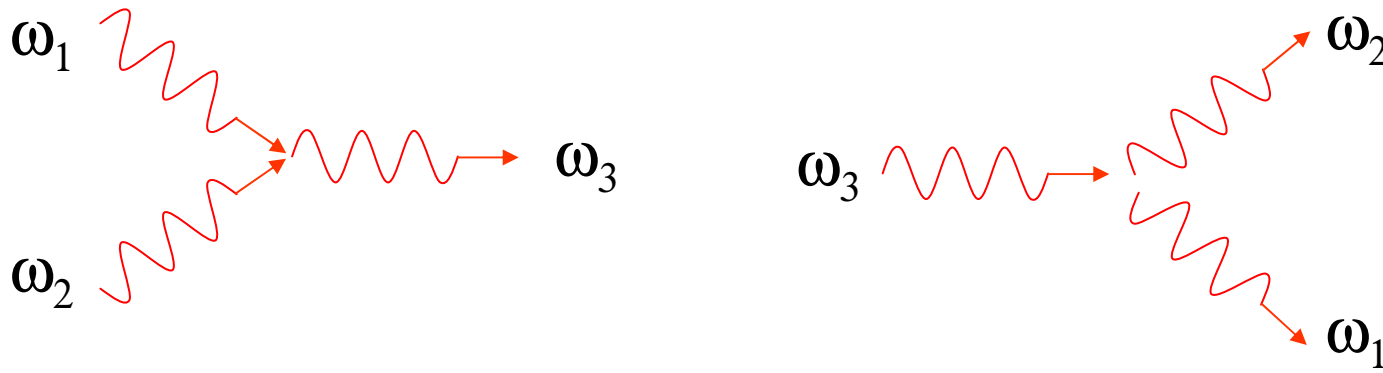
$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

Enerji korunumu

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$$

Momentum korunumu

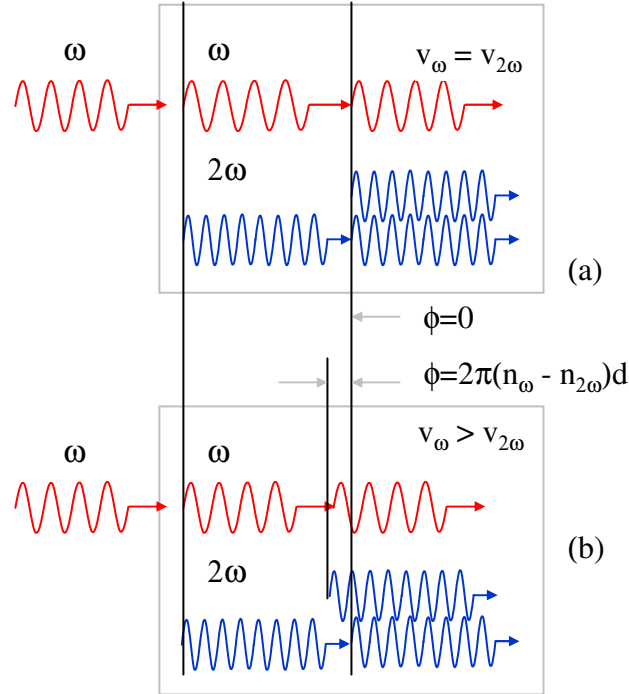
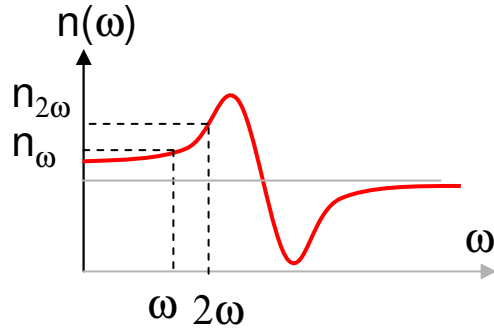
Aynı anda
sağlanması
gerekir



Faz Eşleme-1

İkinci harmonik üretiminde bütün frekanslar elde edilmez, hangi frekansın elde edileceği faz eşlemesinin sağlanmasına bağlıdır.

Ortam dağıtkan olduğundan (farklı frekanslar farklı hızlarda ilerleyeceğinden) ω_1 , ω_2 ve ω_3 frekanslı ışık farklı hızlarda ilerleyecektir.



$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$$

$$\frac{n_3 \omega_3}{c} = \frac{n_1 \omega_1}{c} + \frac{n_2 \omega_2}{c}$$

$$n_1(\omega_1) = n_2(\omega_2) = n_3(\omega_3) = n$$

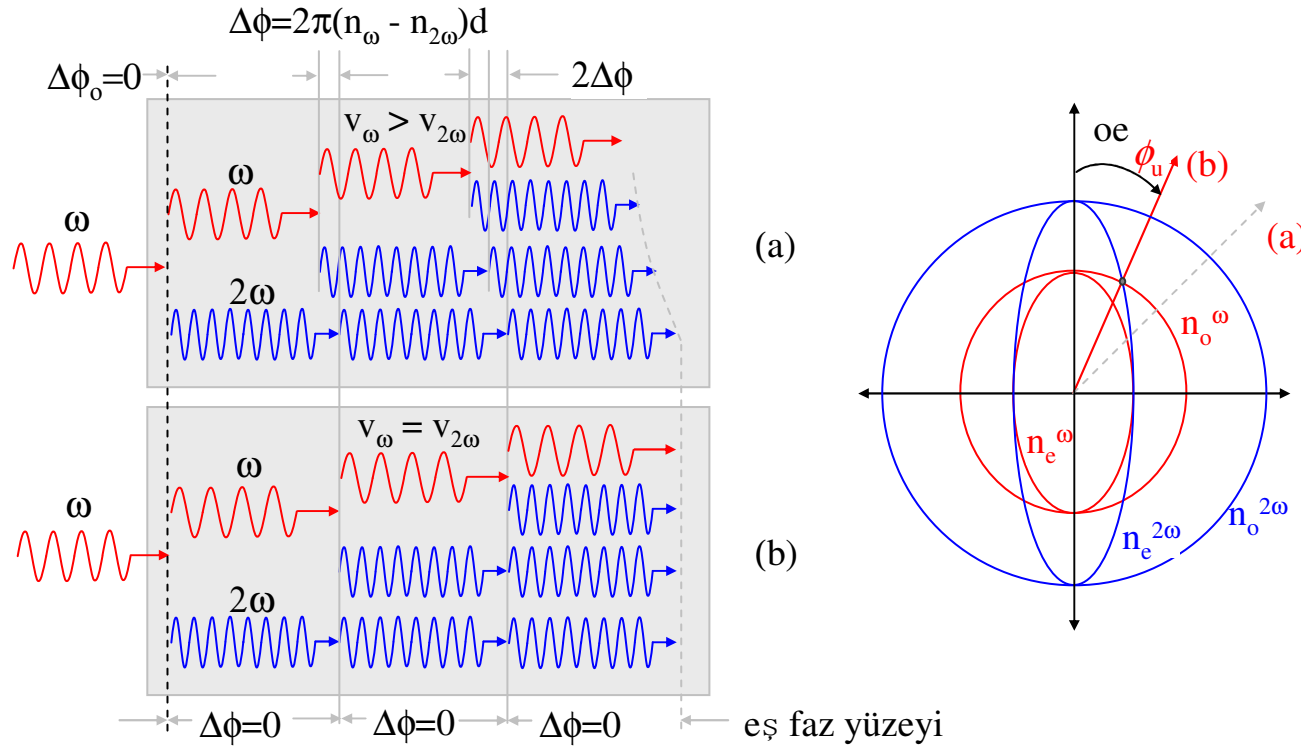
$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

2. Harmonik dalganın şiddeti

$$I_{2\omega} \propto |E(2\omega)|^2 = \left| \frac{\sin [k_o (n_\omega - n_{2\omega})d]}{(n_\omega - n_{2\omega})} \right|^2 \Rightarrow d_u = \frac{\lambda_o}{4|n_\omega - n_{2\omega}|}$$

Faz Eşleme-2

ω ve 2ω dalgalarından biri o-kutuplu (normal ışın) diğeri ise e-kutuplu (anormal ışın) olduğu için iki dalga arasında *Faz eşlemesi* çiftkırıcılı malzemeler kullanılarak sağlanabilir. Bunun için kırılma indisleri n_o^ω ve $n_e^{2\omega}$ tek eksenli bir kristal kullanılır ve kırılma indislerinin kesiştiği doğrultu seçilirse ω ve 2ω dalgaları arasında faz farkı oluşmayacaktır.



Ortamın dağıtık olduğu düşünülürse ω ve 2ω frekanslı dalgalar farklı hızlarda ilerleyecektir.

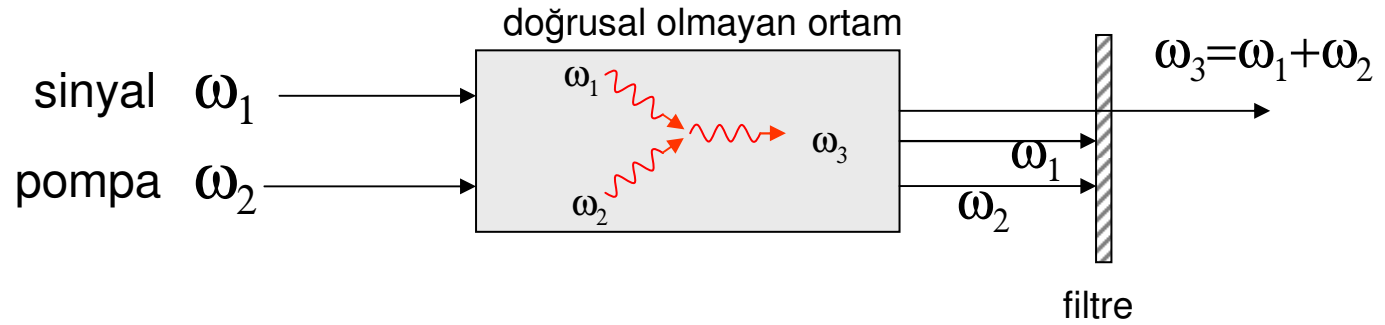
Parametrik İşlemler

ω_1 frekanslı bir dalga (sinyal) ω_2 frekanslı başka bir dalga (pompa) kullanılarak uyumlu (koherent) olarak güçlendirilebilir.

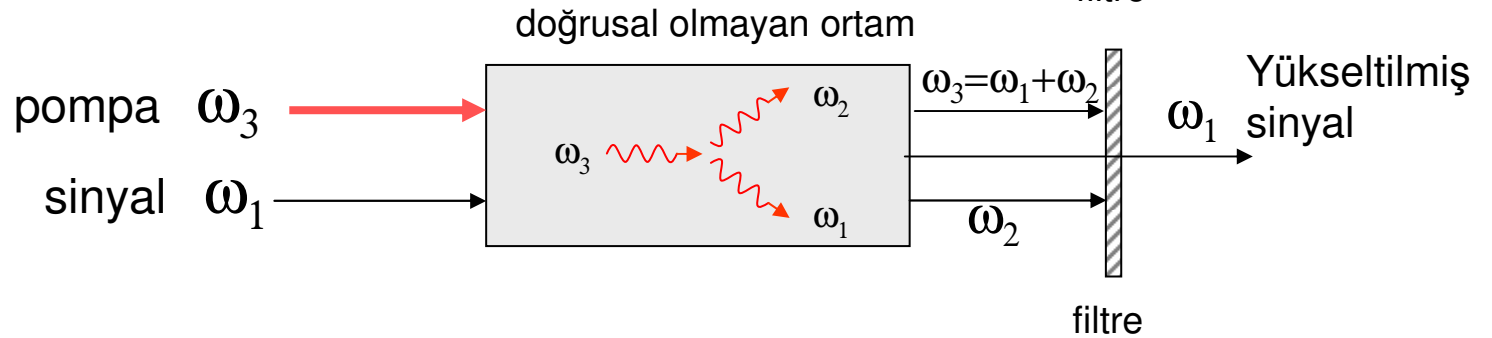
Soğurmanın olmadığı durumda dalga harmanlama işlemine *Parametrik İşlemler* denir.

Parametrik işlemler, normal şekilde elde edilemeyen bazı frekanslardaki lazer ışığı elde etmekte (uyumlu (koherent) ışık yükseltilerek) kullanılır.

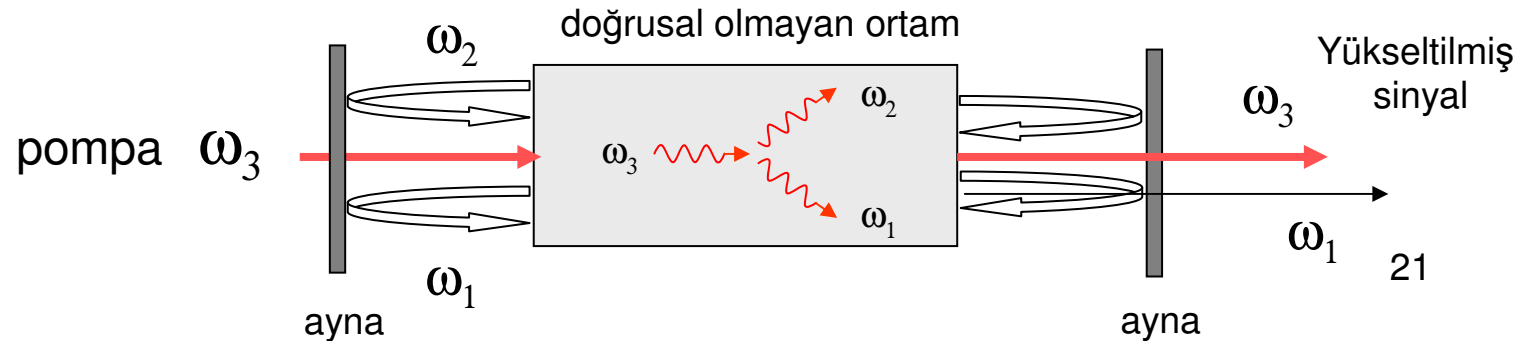
Frekans artırımı



Parametrik yükselteç

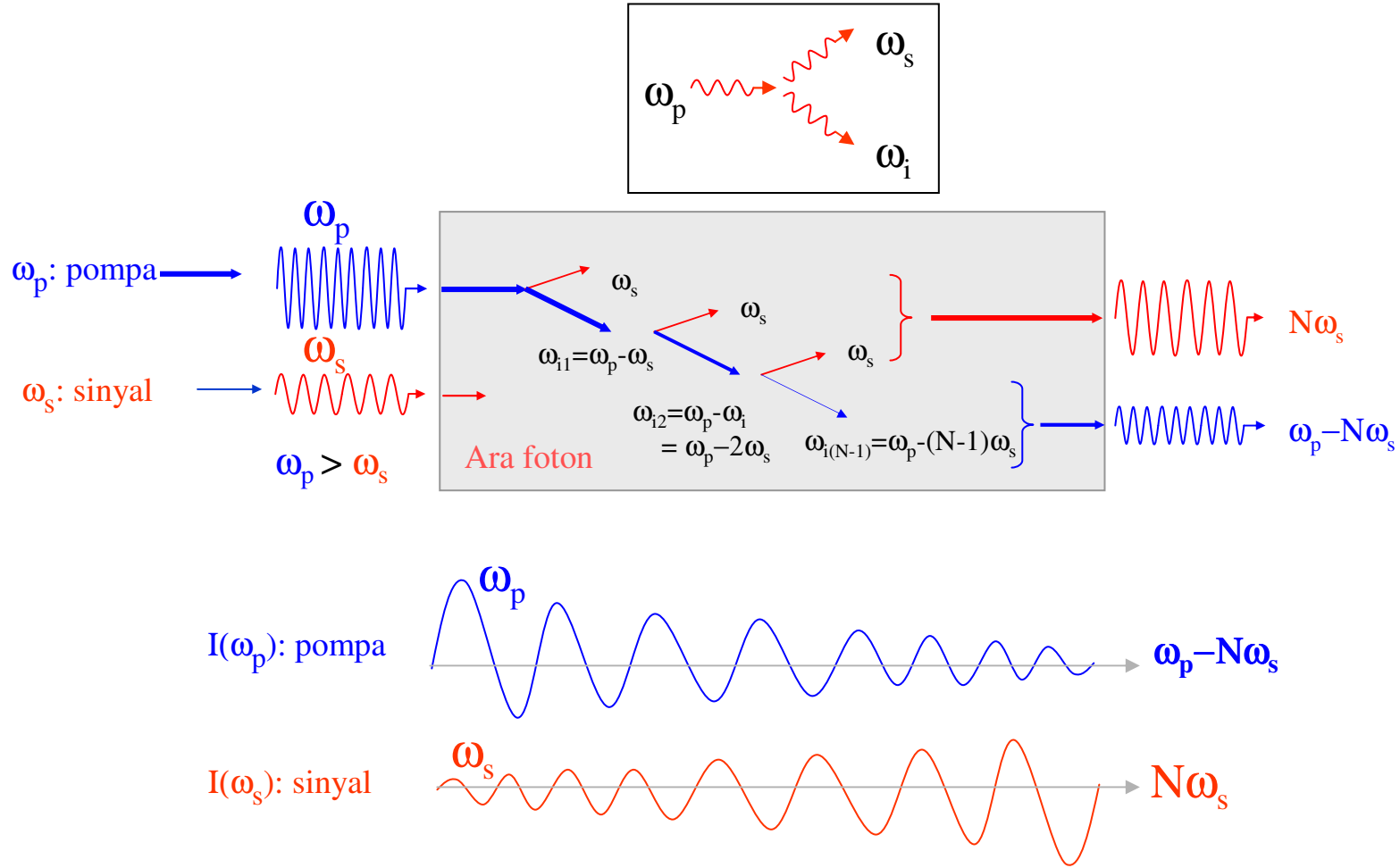


Parametrik salınım



Parametrik Yükselteç

Parametrik işlemlerle zayıf bir ışık (sinyal), güçlü bir ışık (pompa) ile doğrusal olmayan bir ortamda harmanlanarak optik enerjinin bir dalgadan diğer dalgaya aktarımı sağlanabilir, dolayısı ile zayıf optik sinyaller (uyumlu) güçlendirilebilir.



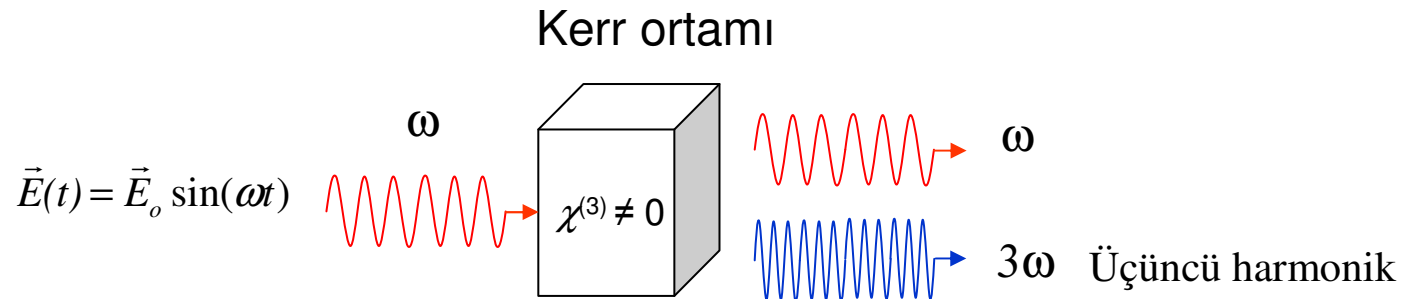
Üçüncü Harmonik Üretimi ($\chi^{(3)} \neq 0$)

Merkezi simetri $\longrightarrow \chi^{(2)} = 0 \quad \vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_0 \chi^{(3)} \vec{E}^3$

$\vec{E}(t) = \vec{E}_o \sin(\omega t) \longrightarrow P(t) = AP_{NL}(\omega) + BP_{NL}(3\omega)$

$P(\omega) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)} |E(\omega)|^2 E(\omega)$

$P(3\omega) = \chi^{(3)} E^3(\omega)$



Üçüncü Harmonik Üretimi-2

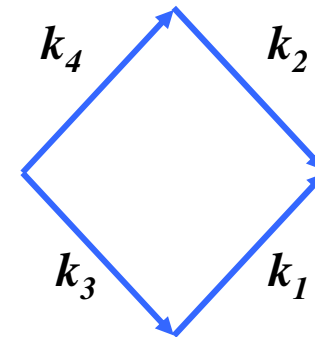
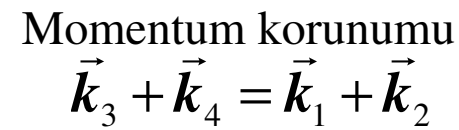
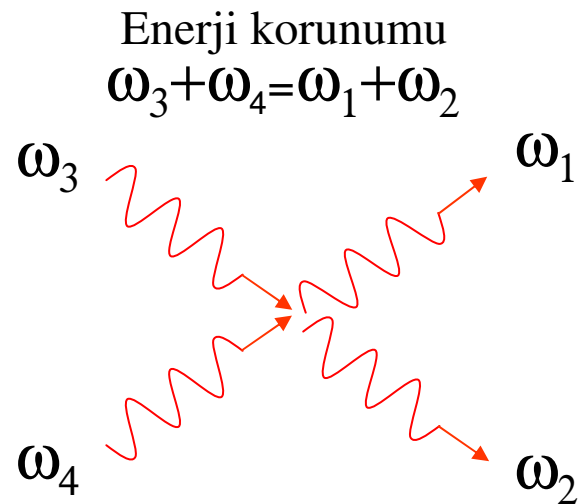
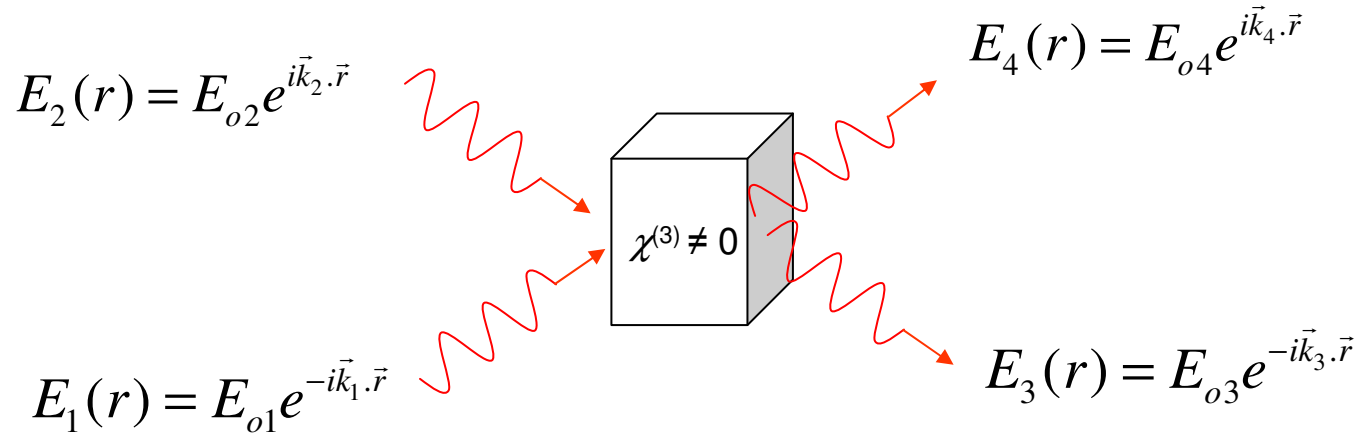
Frekansları $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ve dalga vektörleri k_1, k_2, k_3 olan üç dalganın üçüncü dereceden optik ortamda harmanlanması sonucunda birçok frekans bileşeni elde edilebilir. Bu frekans bileşenleri aynı anda gözlenmez, gözlenmesi için enerji ve momentum korunumunun aynı anda sağlanması gerekir.

$$\begin{array}{lll}
 E_1(\omega_1) = E_{o1} e^{i\omega_1 t} & \vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3 & \omega_1, \dots \\
 E_2(\omega_2) = E_{o2} e^{i\omega_2 t} & \begin{array}{c} \text{3D Box} \\ \chi^{(3)} \neq 0 \end{array} & 2\omega_1, \\
 E_3(\omega_3) = E_{o3} e^{i\omega_3 t} & & 3\omega_1 \\
 & & \pm\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3
 \end{array}$$

$$P_{NL}(t) = \frac{\epsilon_o \chi^{(3)}}{8} \sum_{q,r,l=\pm 1,\pm 2,\pm 3} E(\omega_q) E(\omega_r) E(\omega_l) e^{i(\omega_q + \omega_r + \omega_l)t}$$

Dört Dalga Harmanlama (Four-Wave Mixing)

Üçüncü dereceden doğrusal olmayan ortamda frekansları farklı üç dalga harmanlanarak dördüncü bir dalga elde edilebilir. Üç fotonun üçüncü dereceden optik ortamda etkileşebilmesi için (gerekli enerji ve momentum korunumunu sağlayacak) 4. fotona ihtiyaç vardır. Bu işleme *Dört Dalga Harmanlama* denir.



Optik Kerr Etkisi

$$\vec{P}(\vec{E}) = \epsilon_o \chi^{(3)} \vec{E}^3$$

1. terim

$$P(\omega) = \frac{3\epsilon_o \chi^{(3)}}{4} |E(\omega)|^2 E(\omega) \quad \longrightarrow \quad \frac{P(\omega)}{E(\omega)} = \epsilon_o \Delta\chi = \frac{3\epsilon_o \chi^{(3)}}{4} |E(\omega)|^2 = \frac{6\epsilon_o \chi^{(3)} \eta}{4} I$$

$$\Delta\chi = \frac{3\chi^{(3)} \eta}{2} I$$

$$n^2 = 1 + \chi$$

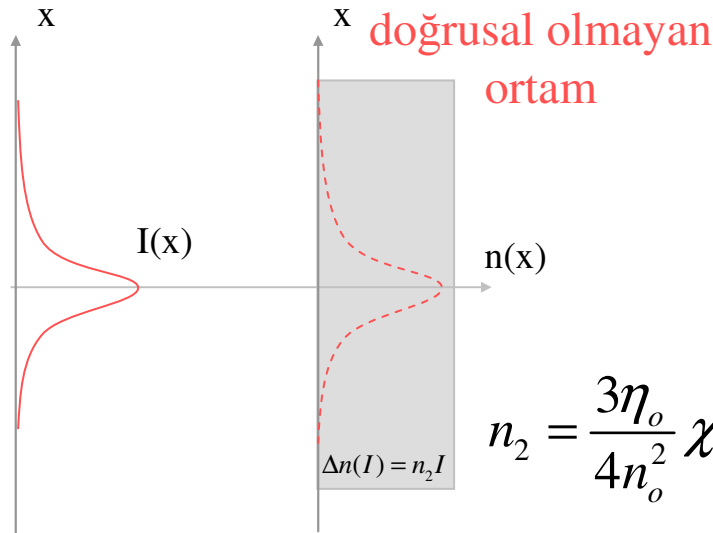
$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial \chi} \right) \Delta\chi = \frac{\Delta\chi}{2n_o}$$

$$\eta = \frac{\eta_o}{n_o} = \frac{1}{n_o} \left(\frac{\epsilon_o}{\mu_o} \right)^{1/2}$$

n_o = ortamın kırılma indisi

$$\Delta n = \frac{\Delta\chi}{2n_o} = \frac{3\eta_o}{4n_o^2} \chi^{(3)} I = n_2 I$$

$$n(I) = n_o + n_2 I$$



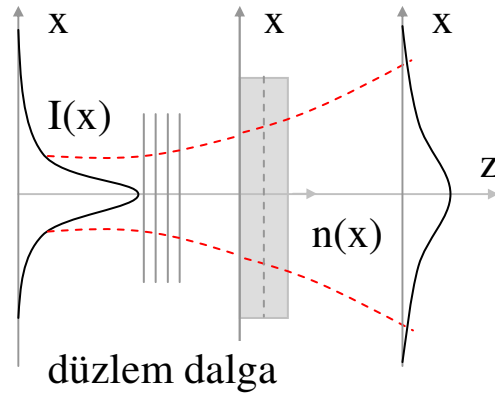
Kırılma indisi n ışığın şiddetine bağlı! Ortamda ilerleyen bir dalganın şiddetinin büyük ve küçük olduğu yerde dalga farklı kırılma indislerini göreceği için dalganın farklı yerleri arasında faz farkı oluşacaktır.

Kendiliğinden Odaklanma

Kerr etkisinin bir sonucu olarak uygun özellikteki malzeme ($n_2 > 0$) ışığı kırınımına uğratmak yerine odaklar. Bu etkiye “kendiliğinden odaklanma” denir.

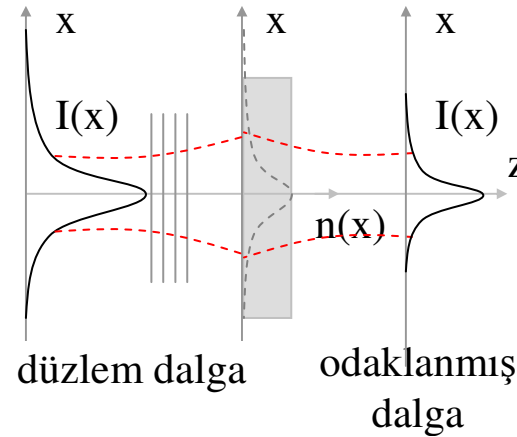
$$n(I) = n_o + n_2 I$$

Eğer yeterince şiddetli bir ışık demeti (I) doğrusal olmayan özellik gösteren ince bir malzemeden geçirilirse malzeme mercek gibi davranarak ışığı belli bir odak uzaklığında odaklar.



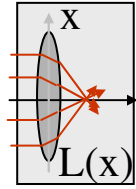
doğrusal ortam

$$n = n_o$$



doğrusal olmayan ortam

$$n(I) = n_o + n_2 I$$

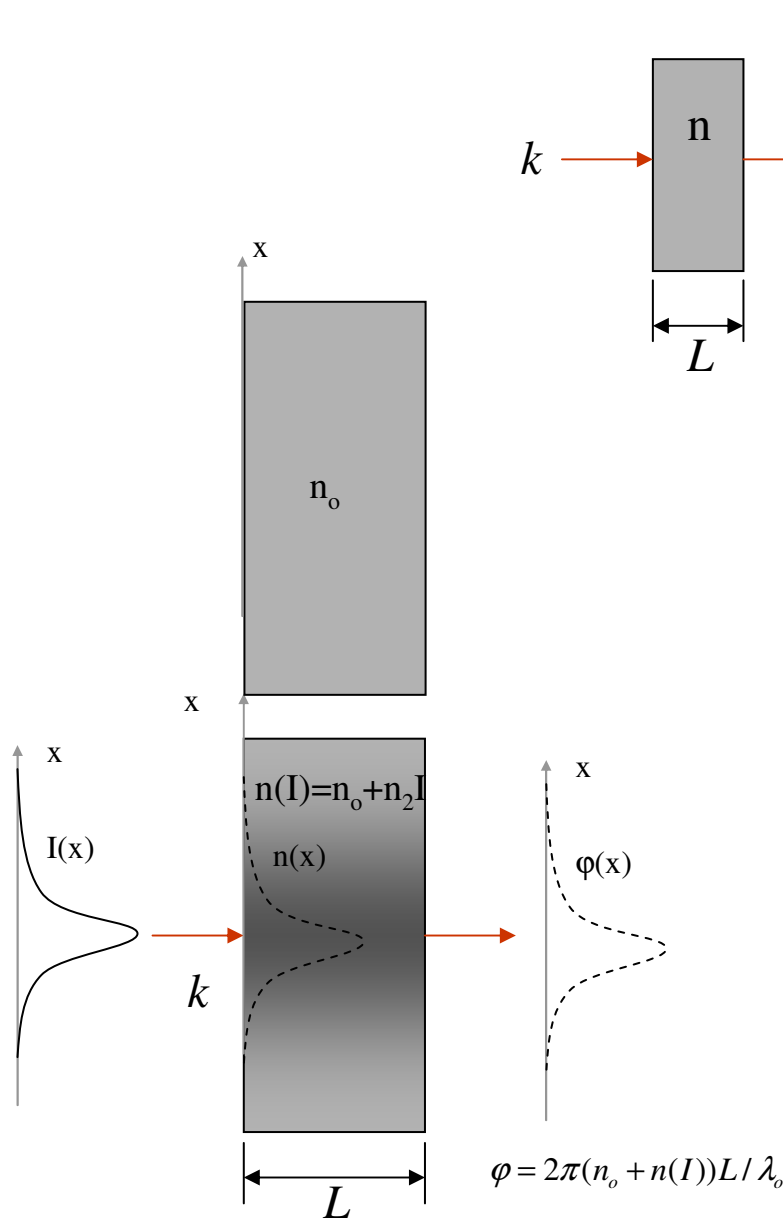


$$\varphi = kL = k_o nL(x)$$

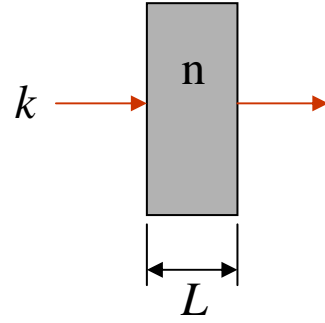
$n_2 < 0$ olduğu durumda ise kendiliğinden dağılma gözlenir.

Malzeme	n_2 (cm²/W)
cam	10^{-16} - 10^{-14}
organik malzeme	10^{-10} - 10^{-8}
yarıiletkenler	10^{-10} - 10^{-2}

Kendiliğinden Faz Modülasyonu



Faz yüzeyi



$$\varphi = kL = nk_0L = n\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)L$$

Faz ışığın şiddetinden bağımsızdır.

$$\varphi = kL = nk_0L = 2\pi(n_0 + n(I))L / \lambda_0$$

$$\varphi = 2\pi(n_0 + n_2P/A)L / \lambda_0$$

$$\varphi = 2\pi n_0L / \lambda_0 + 2\pi n_2(P/A)L / \lambda_0$$

$$\varphi = 2\pi(n_0 + n_2P/A)L / \lambda_0$$

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi n_2L / \lambda_0}{A}\right)P$$

Faz, ışığın şiddetine bağlıdır.

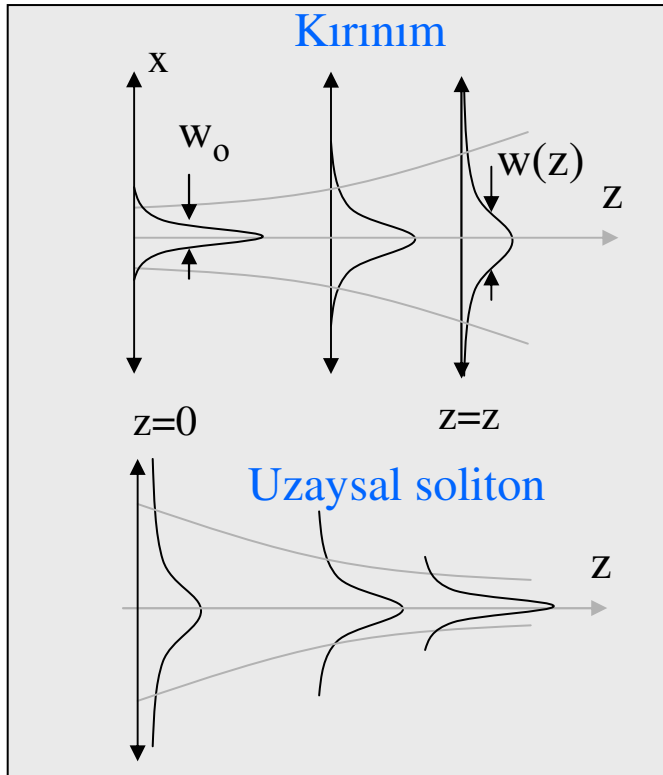
Soliton

Soliton, doğrusal ortamın etkilerinin (kırınım ve dağıtkanlık) doğrusal olmayan ortamın etkileri (Kerr Etkisi) ile azaltacak dalga şekline sahip optik dalgadır. Bu özelliğe sahip dalga, şekli değişmeden madde ortamında uzun mesafeler boyunca ilerleyebilir.

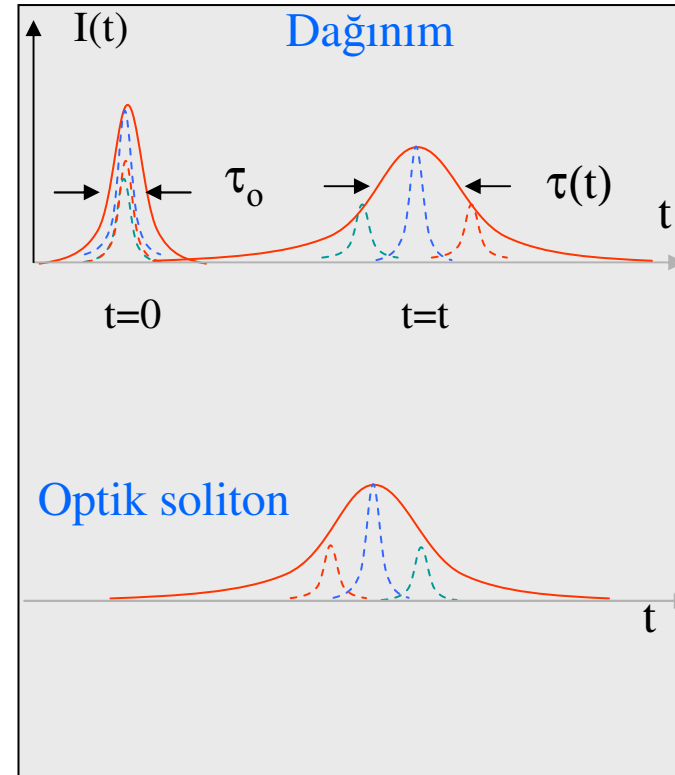
İki çeşit soliton vardır:

- Optik (zamansal) Solitonlar: Doğrusal olmayan etkinin dağıtkanlık etkisini azaltması.
- Uzaysal Solitonlar: Doğrusal olmayan etkinin kırınım etkisini azaltması.

Doğrusal ortamın iki etkisi: Kırınım ve Dağıtkanlık



*kırınım, doğrusal olmayan
etki ile bastırılır*

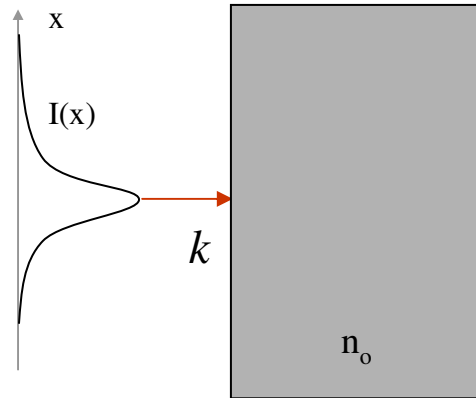


*dağıtkanlık, doğrusal olmayan
etki ile bastırılır*

Uzaysal Soliton-1

Yeterli uzun bir ortamda yüksek şiddette bir ışık demeti ilerlerse ortamın kırılma indisi Kerr etkisinden dolayı değişime uğrar.

Eğer ışık şiddetinin enlemesine dağılımı $I(x,y)$ dalga kılavuzu modlarından birinin formunda ise ışık şeklini koruyarak (kendi kendini sınırlandırarak) uzun mesafeler boyunca ilerler.



$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi n_2 L / \lambda_0}{A}\right)P$$

$$\left[\nabla^2 + n^2(I)k_0^2\right]E(x, y, z) = 0 \quad \text{Helmholtz Eşitliği}$$

$$E(x, z) = E_0(x, z)e^{-ikz}$$

$$\nabla^2 = \nabla_{\perp}^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial E(x, z)}{\partial z} \ll 1 \quad \frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial z^2} \ll 1 \quad \text{Paraksiyel yaklaşım}$$

$$\frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial x^2} - 2ik \frac{\partial E(x, z)}{\partial z} + k_0^2 \left[n^2(I) - n^2 \right] E(x, z) = 0$$

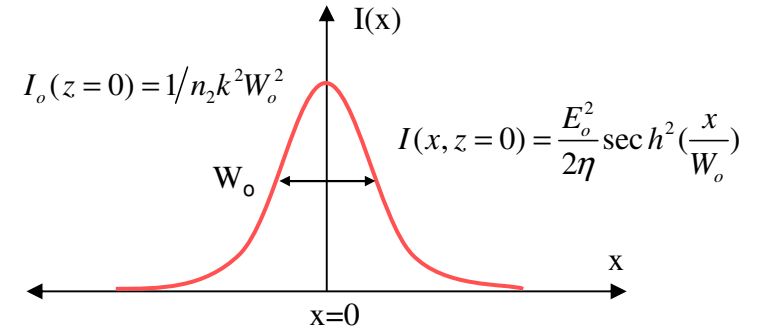
Uzaysal Soliton-2

$$n_2 I \ll n$$

$$\frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial x^2} + \frac{n_2}{\eta_0} k^2 |E(x, z)|^2 E(x, z) - 2ik \frac{\partial E(x, z)}{\partial z} = 0$$

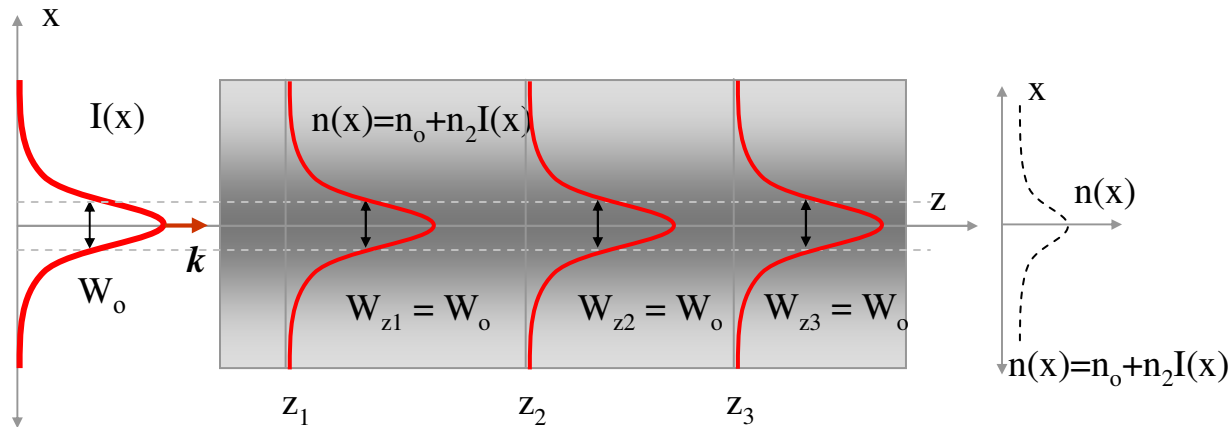
*Doğrusal olmayan
Schrödinger denklemi*

çözüm $E(x, z) = E_0(x, z) \operatorname{sech}\left(\frac{x}{W_0}\right) e^{-i(z/4z_0)}$



şiddet $I(x, z) = \frac{|E(x, z)|^2}{2\eta} = \frac{E_0^2(x, z)}{2\eta} \operatorname{sech}^2\left(\frac{x}{W_0}\right)$

$$\operatorname{sech}(x) = \frac{1}{\cosh(x)}$$

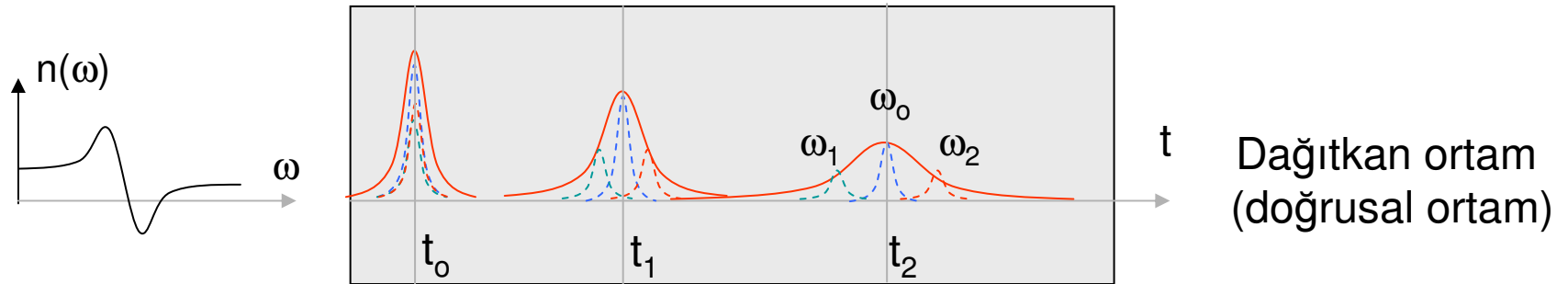
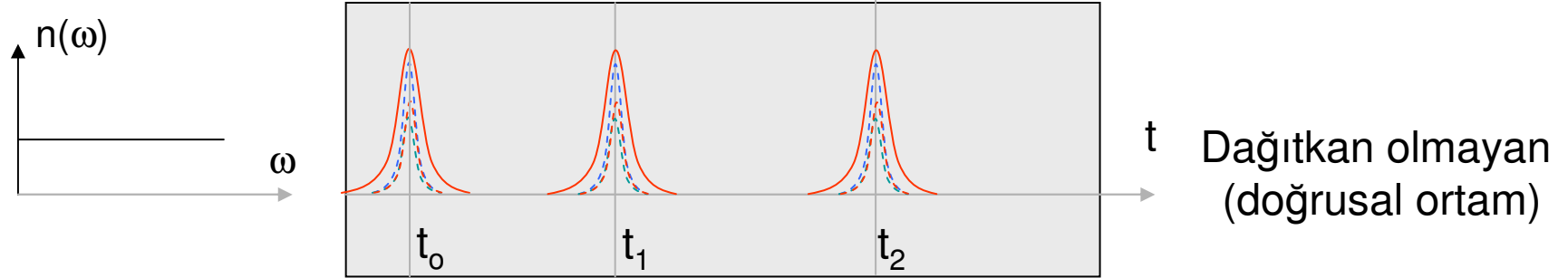


Dalga kılavuzu
 $n_1 < n_2$

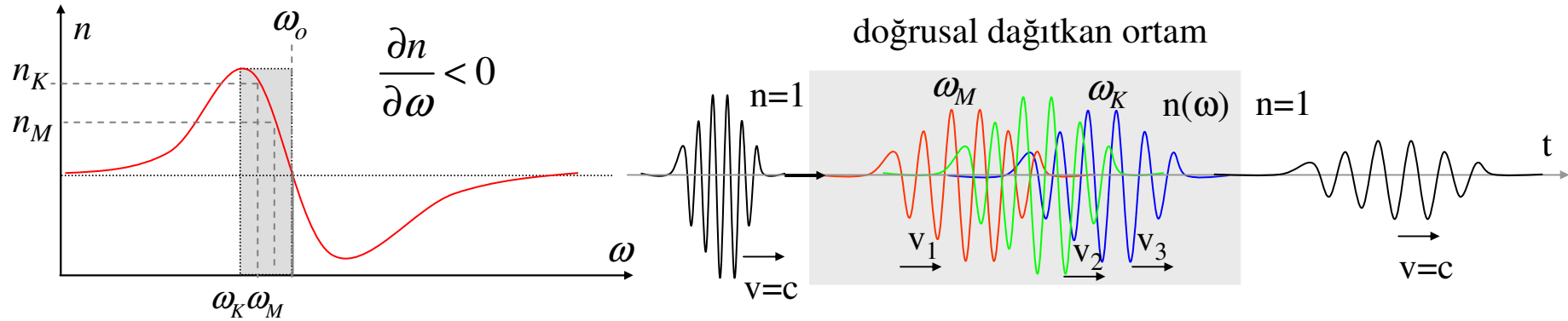


Zamansal (Optik) Soliton-1

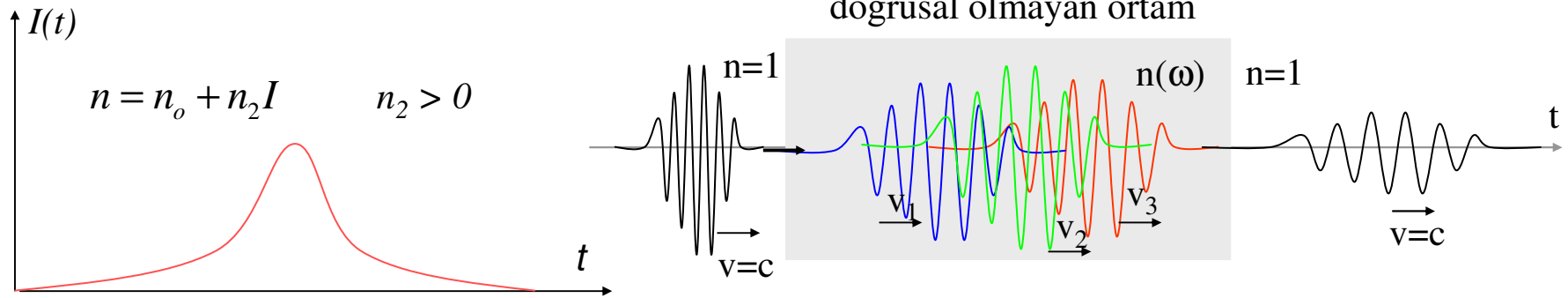
Dağıtkan ortamda ilerleyen bir atmanın farklı frekanslardaki bileşenleri farklı hızlarda ilerleyeceğinden atma bir süre ilerledikten sonra yayvanlaşacaktır.



Zamansal (Optik) Soliton-2



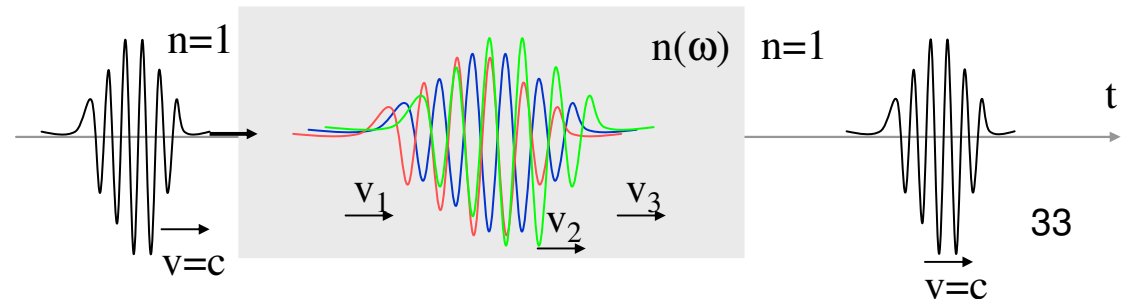
+



=

soliton

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi n_2 L / \lambda_0}{A}\right) P(x)$$

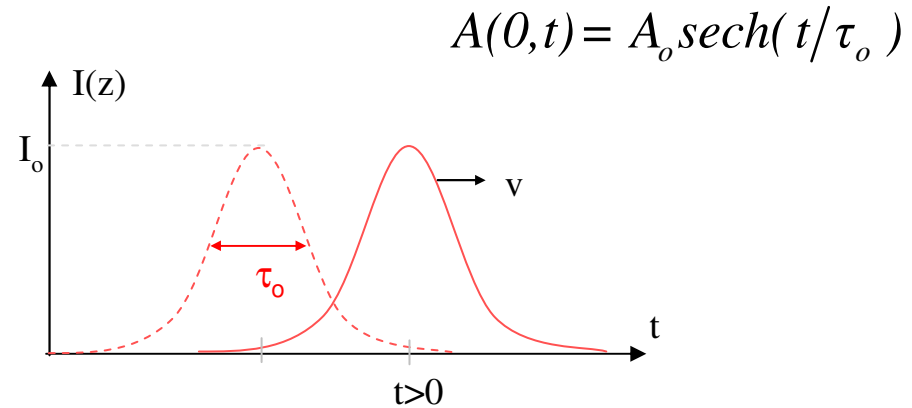


Zamansal (Optik) Soliton-3

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{n_2}{\eta_o} k^2 |E|^2 E - 2ik \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad \text{Doğrusal Olmayan Schrödinger Denklemi}$$

Çözüm $A(z,t) = A_o \operatorname{sech}\left(\frac{t - z/v}{\tau_o}\right) e^{i(z/4z_o)}$

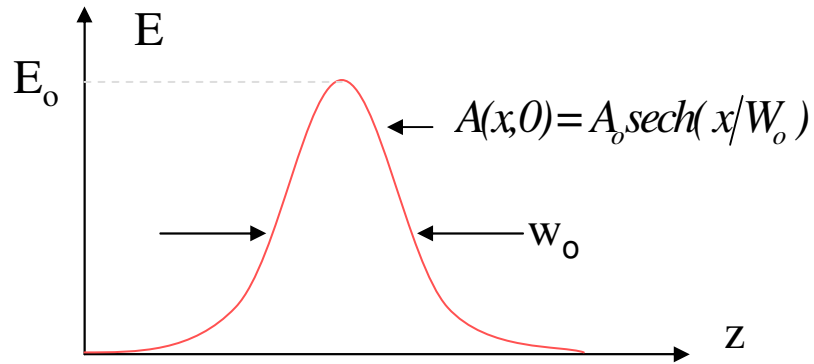
$$\operatorname{sech}(x) = \frac{1}{\cosh(x)}$$



Solitonlar

Uzaysal Soliton

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - 2ik \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{n_2}{\eta_0} k^2 |E|^2 E = 0$$

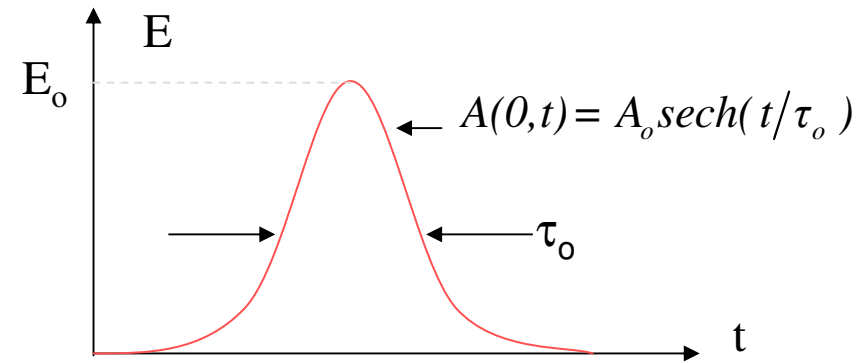


$$A(x,0) = A_0 \operatorname{sech}(x/W_0)$$

$$E(x,z) = E_0(x,z) \operatorname{sech}\left(\frac{x}{W_0}\right) e^{-i(z/4z_0)}$$

Zamansal Soliton

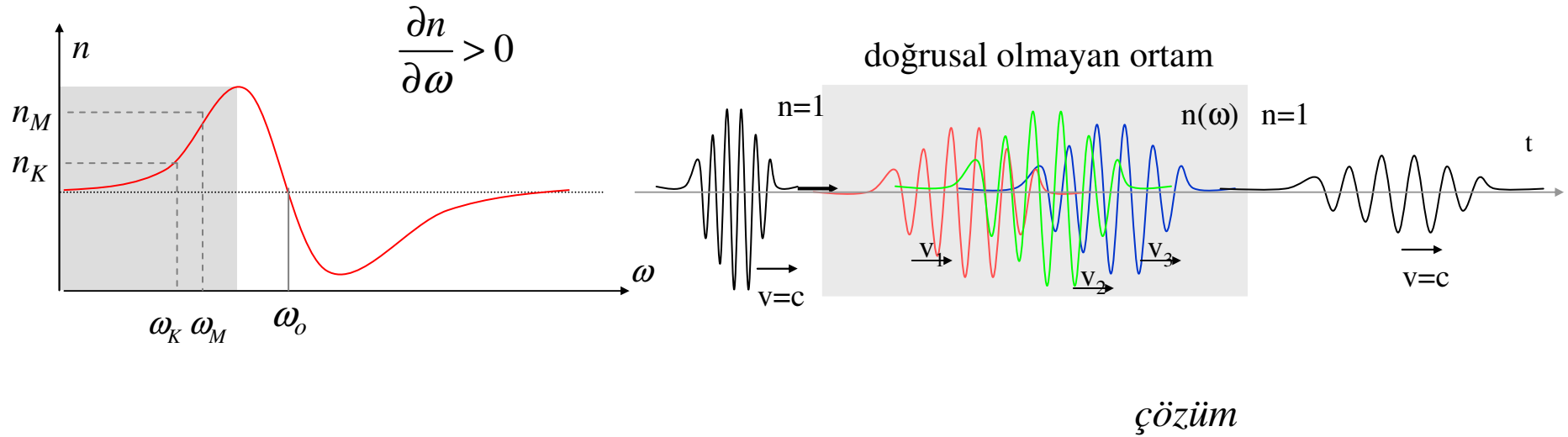
$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - 2ik \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{n_2}{\eta_0} k^2 |E|^2 E = 0$$



$$A(0,t) = A_0 \operatorname{sech}(t/\tau_0)$$

$$A(z,t) = A_0 \operatorname{sech}\left(\frac{t - z/v}{\tau_0}\right) e^{i(z/4z_0)}$$

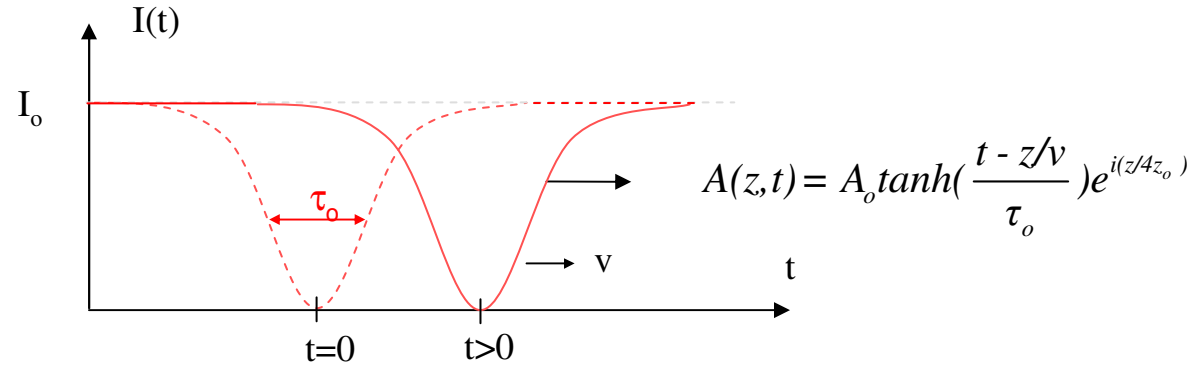
Karanlık (Dark) Solitonlar



$$n(I) = n_o + n_2 I \quad n_2 < 0$$

$$A(0, t) = A_o \operatorname{sech}(t/\tau_o)$$

$$\operatorname{sech}(x) = \frac{1}{\cosh(x)}$$



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{n_2}{\eta_o} k^2 |E|^2 E - 2ik \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad A(0, t) = A_o \operatorname{sech}(t/\tau_o)$$

Optiksel Faz Eşleniği-1

Dört dalga harmanlamasında bütün dalgalar aynı frekansa sahip ise (dejenere 4 dalga harmanlama):

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega$$

Ters yönlerde ilerleyen iki düzlem dalga

$$E_3(\mathbf{r}) = E_{o3} e^{-i\vec{k}_3 \cdot \vec{r}} \quad E_4(\mathbf{r}) = E_{o4} e^{i\vec{k}_4 \cdot \vec{r}}$$

$$\vec{k}_4 = -\vec{k}_3$$

$$E = a + ib$$

$$E^* = a - ib$$

$$E_2(\mathbf{r}) \propto E_{o3} E_{o4} E_1^*(\mathbf{r})$$

Faz eşleniği Sonda dalga

E_2, E_1 'in faz eşleniğine eşittir. Faz eşlenik dalga, sonda dalgaya eşit olup tek farkı ters doğrultuda hareket etmesidir.

Faz eşleniği, zaman terslenmesine eşittir.

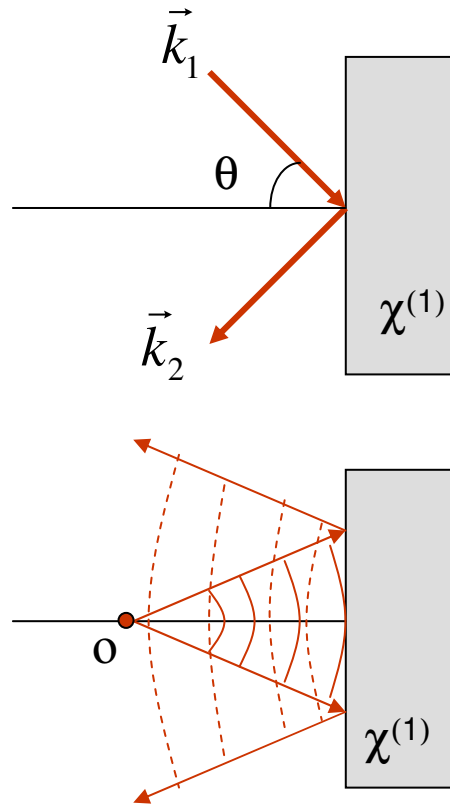
$$E_2 \propto E_1 e^{i\omega t} \quad E_2 \propto E_1^* = (E_1 e^{-i\omega t})^* = E_1 e^{i\omega t}$$

Optiksel Faz Eşleniği-2

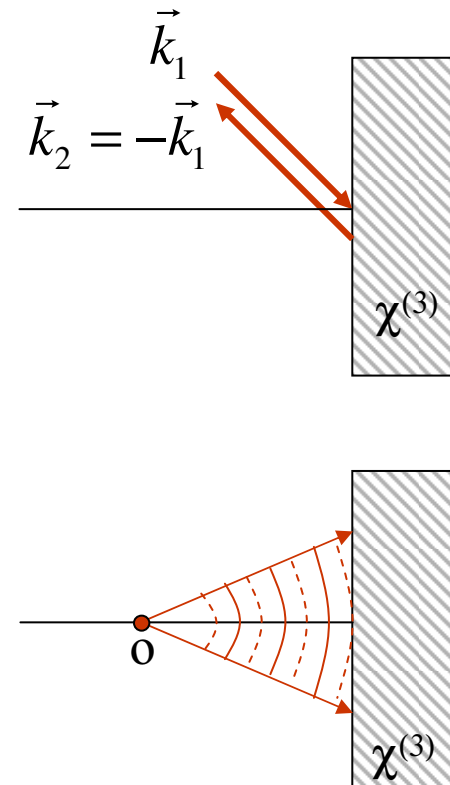
$$E_2(\mathbf{r}) \propto E_{o3}E_{o4}E_1^*(\mathbf{r}) \quad \vec{E}_1(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{E}_{o1}e^{-i\vec{k}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}}} \quad \vec{E}_2(\vec{\mathbf{r}}) = E_1^*e^{i\vec{k}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}}}$$

$E_2(\mathbf{r})$ alanı $E_1(\mathbf{r})$ alanının eşleniğine eşit; zamansal olarak terslenmesi:

Doğrusal Ortam



Doğrusal Olmayan Ortam $\chi^{(3)}$



Özet

Doğrusal olmayan ortamda ışığın frekansının değiştirilebildiği gibi zayıf sinyaller de uyumlu (koherent) olarak yükseltilebilir (parametrik işlemler). Işığın şiddeti yeterince büyükse ışık ortam içinde ilerlerken dağınmadan ziyade kendi kendini odaklayabilir. Özellikle optik iletişimde uygulama alanı olan solitonlar doğrusal olmayan optik ortamda uyarılabilir. Solitonlar, dalga şeklini koruyan özel forma sahip atmalardır.

UADMK - Açık Lisans Bilgisi

Bu ders malzemesi öğrenme ve öğretme yapanlar tarafından açık lisans kapsamında ücretsiz olarak kullanılabilir. Açık lisans bilgisi bölümü yani bu bölümdeki, bilgilerde değiştirme ve silme yapılmadan kullanım ve geliştirme gerçekleştirilmelidir. İçerikte geliştirme değiştirme yapıldığı takdirde katkılar bölümüne sadece ekleme yapılabilir. Açık lisans kapsamındaki malzemeler doğrudan ya da türevleri kullanılarak gelir getirici faaliyetlerde bulunulamaz. Belirtilen kapsam dışındaki kullanım açık lisans tanımına aykırı olduğundan kullanım yasadışı olarak kabul edilir, ilgili açık lisans sahiplerinin ve kamunun tazminat hakkı doğması söz konusudur.