

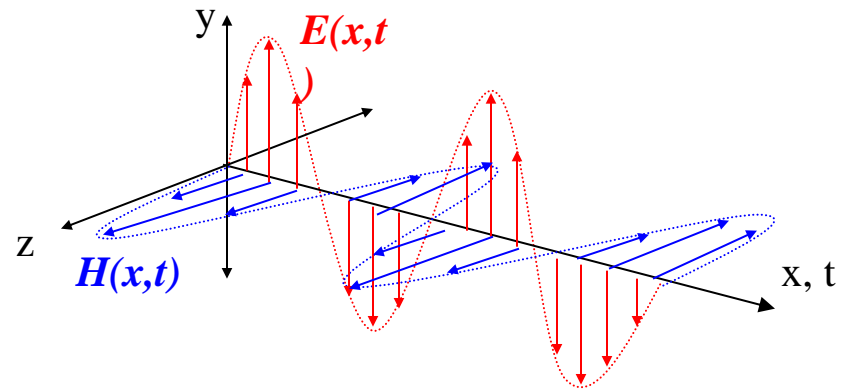
Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

FZM210 Dalgalar ve Optik

Prof. Dr. Hüseyin Sarı

Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü

Optik Dalgalar (2/2)

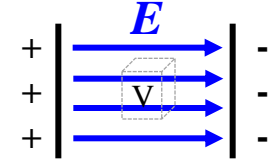


Işığın İlettiği Enerji-Poynting Vektör-1

Elektromanyetik dalganın (Işığın) en önemli özelliklerinden biri de enerji taşıyabilmesi (iletebilmesi)dir.

Bir **elektrik alanda** depo edilen Enerji Yoğunluğu (birim hacim başına enerji)

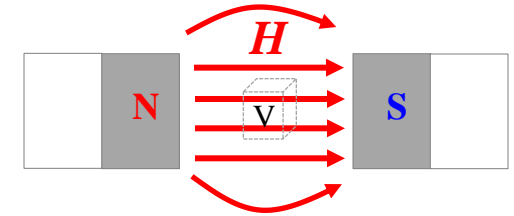
$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_o |\vec{E}|^2$$



$$u_E \equiv \frac{W}{V}$$

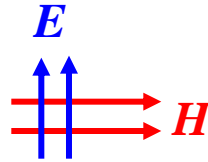
Bir **manyetik alanda** depo edilen Enerji Yoğunluğu (birim hacim başına enerji)

$$u_H = \frac{1}{2} \mu_o |\vec{H}|^2$$



Elektrik ve Manyetik alanda depo edilen **Toplam Enerji Yoğunluğu** (birim hacim başına enerji)

$$u_{EM} = \frac{1}{2} \epsilon_o |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu_o |\vec{H}|^2$$



Elektromanyetik alan sözkonusu ise **E** ve **H** ilişkili olduğu için: $|\vec{E}| = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} |\vec{H}|$

E veya **H** alanlar cinsinden enerji yoğunluğu:

$$u_{EM} = \epsilon_o |\vec{E}|^2 = \mu_o |\vec{H}|^2$$

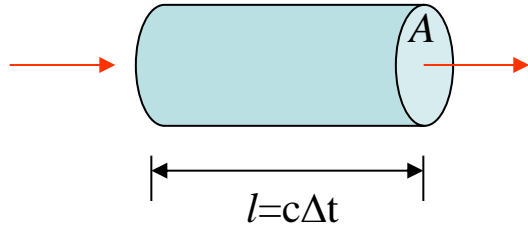
Işığın İlettiği Enerji-Poynting Vektör-2

Elektrik ve *Manyetik* alanda (EMD) depo edilen **Toplam Enerji Yoğunluğu**

$$u_{EM} = \epsilon_o |\vec{E}|^2 = \mu_o |\vec{H}|^2$$

Elektromanyetik enerji iletimini ifade edebilmek için birim yüzeyden birim zamanda iletilen enerjiyi simgeleyen S niceliği kullanılır Enerji akısı= $|S|$ =enerji/(alan-zaman)

Enerji akısının SI birim sisteminde birimi W/m² dir.



$$|\vec{S}| = \frac{u_{EM} (\Delta tc) A}{A \Delta t} = u_{EM} c = \epsilon_o |\vec{E}|^2 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}} = \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} |\vec{E}|^2$$

$$|\vec{S}| = \frac{|\vec{E}|^2}{\eta_o}$$

Enerji akısı (W/m²)

$$\frac{|\vec{E}_o|}{|\vec{H}_o|} = \left(\frac{\mu_o}{\epsilon_o}\right)^{1/2} \equiv \eta_o$$

Boş uzayın empedans değeri: $\eta_o = \left(\frac{\mu_o}{\epsilon_o}\right)^{1/2} \cong 120\pi \cong 377\Omega$

Işığın İlettiği Enerji-Poynting Vektör-3

\mathbf{S} vektörüne *Poynting Vektör* denir ve ışığın (EM dalganın) birim zamanda birim yüzeyden ilettiği enerji akısının ölçüsüdür. \mathbf{S} vektördür ve elektromanyetik dalgayı oluşturan \mathbf{E} ve \mathbf{H} alanları cinsinden vektörel olarak:

$$\vec{\mathbf{S}} = \vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}} \Rightarrow \vec{\mathbf{S}} = |\vec{\mathbf{E}}_o \times \vec{\mathbf{H}}_o| \hat{k}$$

$$|\vec{\mathbf{S}}| = \frac{|\vec{\mathbf{E}}|^2}{\eta_o} = \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} |\vec{\mathbf{E}}|^2 = c\epsilon_o |\vec{\mathbf{E}}|^2 \quad \frac{|\vec{\mathbf{E}}_o|}{|\vec{\mathbf{H}}_o|} = \left(\frac{\mu_o}{\epsilon_o}\right)^{1/2} \equiv \eta_o$$

Enerji aktarım yönü (\mathbf{S}), dalganın yayılma (\mathbf{k}) yönündedir.

Düzlem dalgalar için enerji akısı (Poynting vektör) $|\mathbf{S}|$ [enerji/(alan-zaman)]

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

Işık algılayıcılar (dedektörler), ışığın frekansı çok yüksek olduğu için ($\omega \approx 10^{15}$ Hz) bu hıza ayak uyduramazlar. Gerçekte dedektörlerin algıladığı, ışığın zaman ortalamasıdır.

$$\text{Enerji akısının zaman ortalaması} \quad \langle \vec{\mathbf{S}} \rangle = \frac{1}{2} (\vec{\mathbf{E}}_o \times \vec{\mathbf{H}}_o) = I \hat{k} \quad \langle \sin^2(kr - \omega t + \phi) \rangle = 1/2$$

Işığın İlettiği Enerji-Poynting Vektör-4

S vektörüne *Poynting Vektör* denir ve ışığın (EM dalganın) birim zamanda birim yüzeyden ilettiği enerjinin (enerji akısı) ölçüsüdür.

Işık algılayıcılar (dedektörler), ışığın frekansı çok yüksek olduğu için ($\omega \approx 10^{15}$ Hz) bu hıza ayak uyduramazlar. Gerçekte dedektörlerin algıladığı, ışığın zaman ortalamasıdır.

Enerji akısının zaman ortalaması $\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} (\vec{E}_o \times \vec{H}_o) = I \hat{k}$

$$\langle |\vec{S}| \rangle = \frac{1}{2} |\vec{E}_o| \cdot |\vec{H}_o| = \frac{|\vec{E}_o|^2}{2\eta_o} = \frac{|\vec{E}_o|^2}{2\mu_o c} \equiv I$$

eski ismi **Şiddet** (Intensity)
yeni ismi **Parlaklık** (Irradiance)

$$\langle |\vec{S}| \rangle = I = \epsilon_o c \langle |\vec{E}|^2 \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_o c \langle |\vec{E}_o|^2 \rangle$$

Işığın Kesikli (Kuantum) Doğası-1

Şimdiye kadar elektromanyetik dalgayı, yani ışığı, klasik olarak inceledik.

Klasik bakış açısından ışık:

Elektrik/Manyetik alan

\mathbf{E}, \mathbf{H}

Dalga vektörü

\mathbf{k}

Açısal frekans

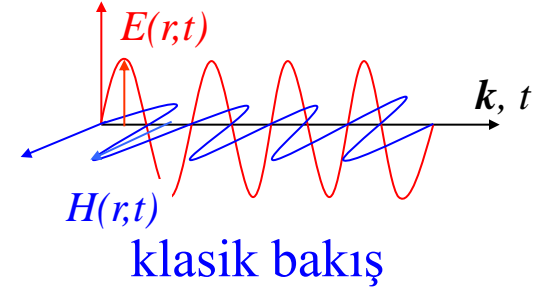
ω

Enerji

$|\vec{S}| \propto |\vec{E}|^2$

Parlaklık

$I = \langle |\vec{S}| \rangle$



Klasik yaklaşımda ışık enerji alanın karesi ile orantılıdır

Elektromanyetik alan kesiklidir (kuantalıdır) ve alan kesikliliğine (kuantasına) “foton” denir.

Kuantum bakış açısından ışık:

Durgun kütlesi

$m=0$

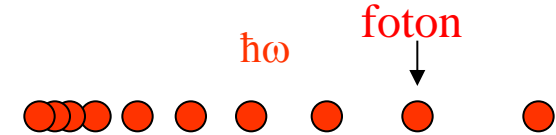
Momentum

$\mathbf{p}=\hbar\mathbf{k}$

Enerji=(Foton sayısı)x(foton enerjisi) $E = N\hbar\omega$

Parlaklık (parçacık akısı)

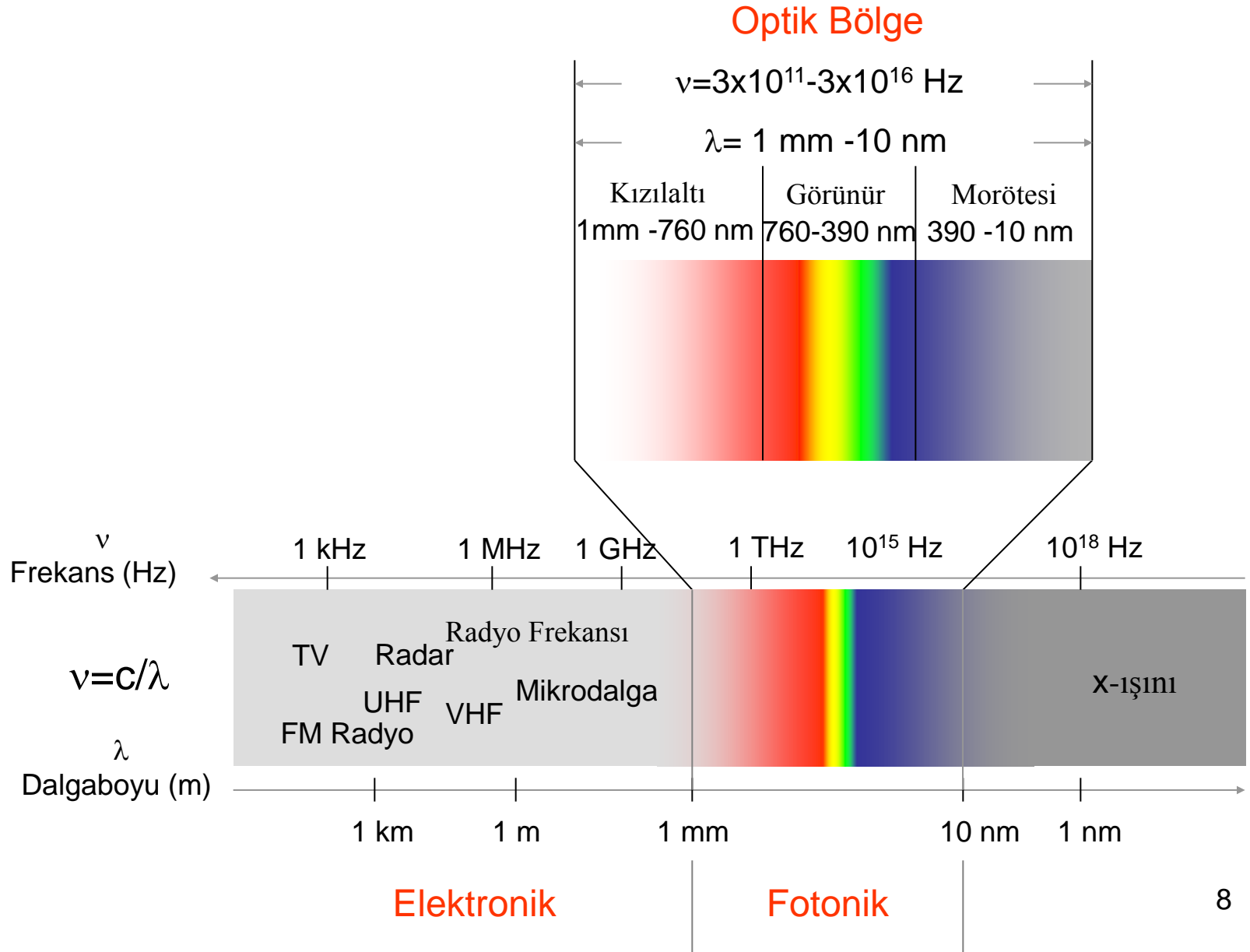
$I=\text{foton sayısı}/(\text{m}^2\text{-s})$



kesikli bakış

Kesikli (Kuantum) yaklaşımda ışığın enerjisi frekans ile orantılıdır.

Optik Bölge-Optoelektronik Teknolojisi



Kırılma İndisi-1

Boş Uzay



ϵ_0, μ_0

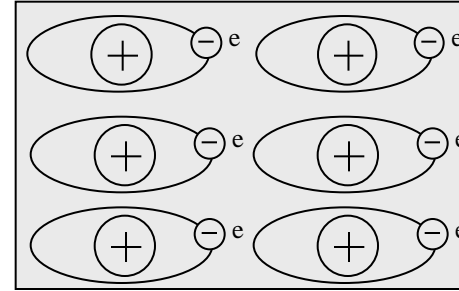
$$c \equiv \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\mathbf{E}(x,t) = \mathbf{E}_0 \sin(k \cdot x - \omega t + \phi)$$

Madde Ortamı



ϵ, μ

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

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

$$v \equiv \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} < c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\mathbf{E}(x,t) = \mathbf{E}_0 \sin(k_m \cdot x - \omega t + \phi)$$

Kırılma İndisi-Dielektrik Ortam-1

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad \text{Madde Ortamında Dalga Denklemi}$$

$$v_m = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} < c$$

Dalga denkleminin çözümü:

$$E(x, t) = E_o \sin(k_m \cdot x - \omega t + \phi) \quad \text{Elektrik alan}$$

$$H(x, t) = H_o \sin(k_m \cdot x - \omega t + \phi) \quad \text{Manyetik alan}$$

k_m : madde ortamında dalga vektörü

Madde ortamında ışığın hızı değiştiğinden dalgaboyu dolayısı ile dalga vektörü de değişime uğramıştır.

$$\lambda_o \cdot \nu = c \quad \Rightarrow \quad \lambda_m \cdot \nu = v_m$$

(Boşlukta) (Madde ortamında)

Kırılma İndisi-Dielektrik Ortam-2

Işığın madde ortamındaki hızı (v_m) boş uzaydaki hızı (c) ile karşılaştırılabilir. Bu hız, dalganın madde ortamındaki davranışına ilişkin birçok ifadeye yer aldığı için önemlidir.

Boş uzaydaki ışık hızı: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

Madde ortamında ışık hızı: $v_m = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$

Kırılma indisi (n) tanımı

$$n \equiv \frac{c}{v_m} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}\right)}{\left(\frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}\right)} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Kırılma indisi, ışığın boşluktaki hızının (c), madde içindeki hızına (v_m) oranıdır.

Örneğin, kırılma indisi $n=4.0$ olan bir ortamda ışık, boşluktaki yayılma hızının $\frac{1}{4}$ katı hızda ilerleyecektir.

Kırılma İndisi-Dielektrik Ortam-3

Bazı malzemelerin kırılma indisi değerleri (Kırılma indisi frekansa çok sıkı bağlıdır,

Madde	Kırılma İndisi $n \equiv \frac{c}{v_m}$
Boşluk	1,0000
Hava	1,0003
Su	1,333
Cam	1,5-1,7
Si	3,5
Ge	4,0
GaAs	3,6
AlAs	3,2
InP	3,5
InAs	3,8
InSb	4,2

Kırılma İndisi-Dielektrik Ortam-4

Madde ortamında ilerleyen dalganın dalga parametreleri kırılma indisi ile orantılı olarak değişikliğe uğrayacaktır.

$$\frac{c}{v_m} \equiv n$$
$$v_m = \frac{\omega}{k_m}$$
$$\lambda_m v = v_m$$

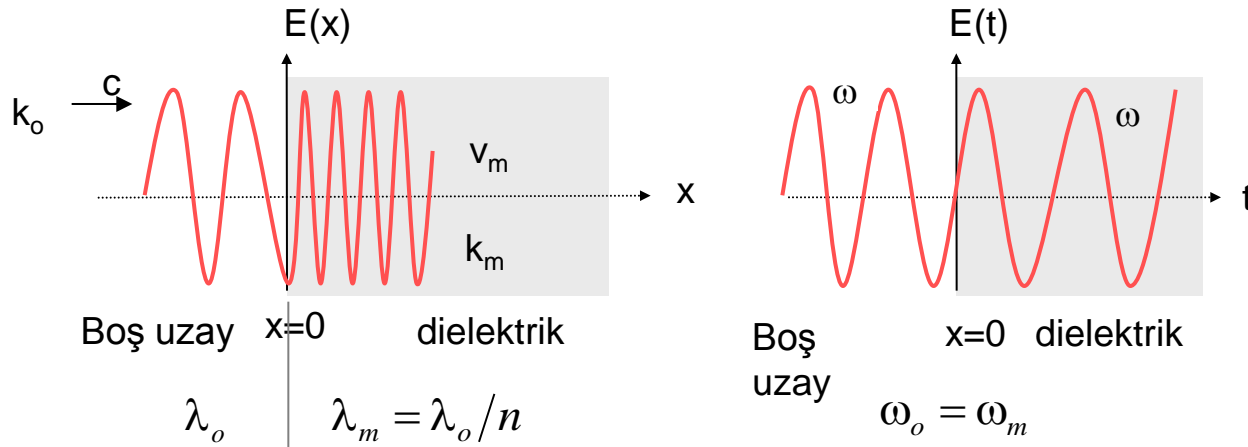
Dalgaboyu $\lambda_m = \frac{\lambda_o}{n}$ (Azalır)

Açısal frekans $\omega_m = \omega_o = 2\pi\nu$ (Değişmez!)

Dalga vektörü $k_m = \frac{2\pi}{\lambda_m} = n \frac{2\pi}{\lambda_o} = nk_o$ (Artar)

Dielektrik durum için dalga denkleminin çözümleri (+x yönünde ilerleyen dalga için)

$$E(x, t) = E_o \sin(k_m \cdot x - \omega t + \phi)$$

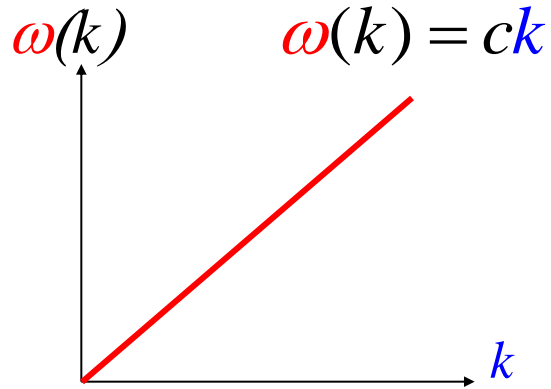


Dalgaboyu, madde ortamında kırılma indisi (n) kadar azalmıştır

Açısal frekans iki ortamda da aynı

Işık-Dağınım Bağıntısı

Boş Uzay

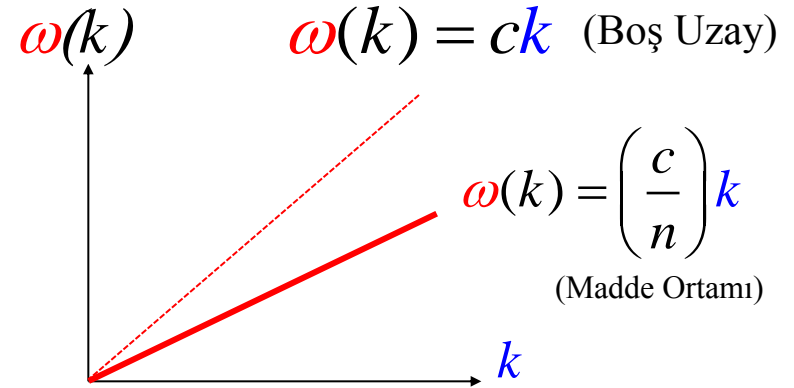


Dağınım bağıntısının eğimi dalğanın hızını verir (Dağınım Yok)

$$v = \frac{\omega}{k} = c$$

$$v_f = v_g = c$$

Madde Ortamı $n=sbt$



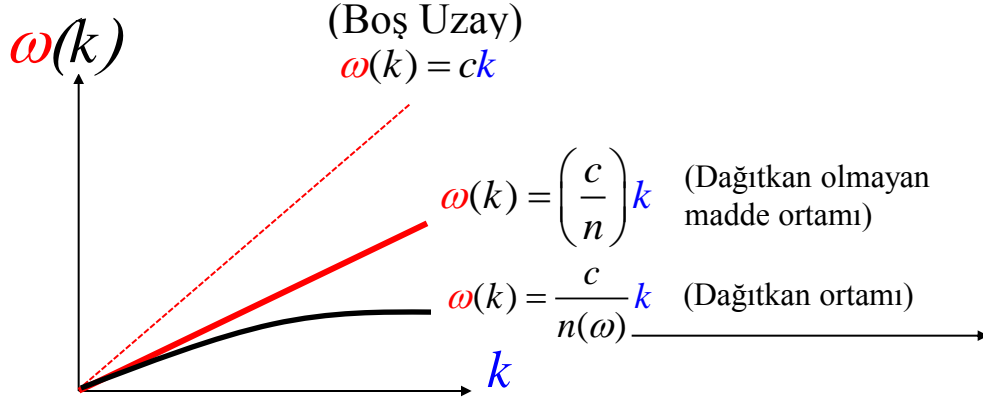
Dağınım bağıntısının eğimi dalğanın hızını verir (Dağınım Yok)

$$v = \frac{\omega}{nk} = \frac{c}{n}$$

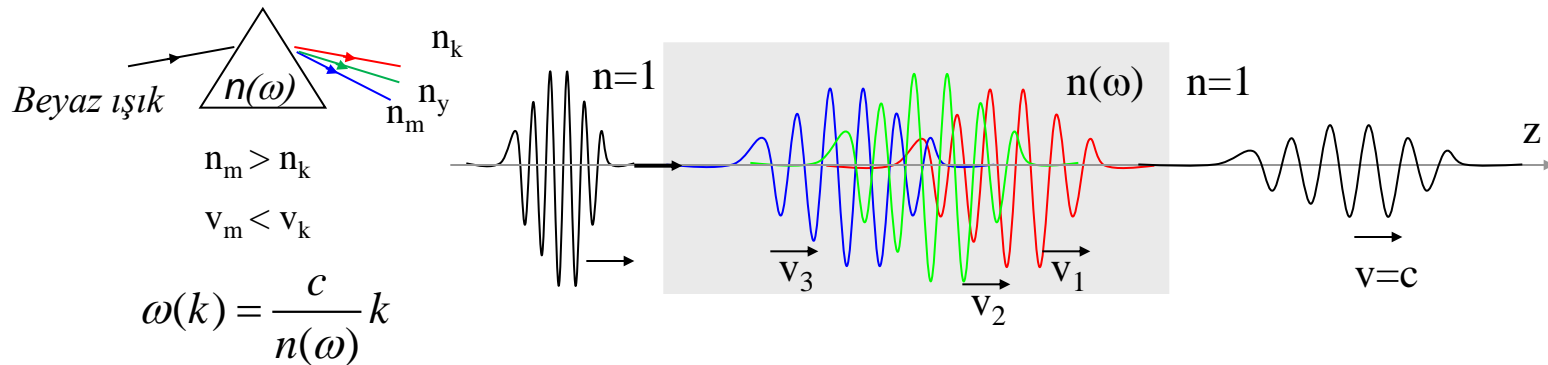
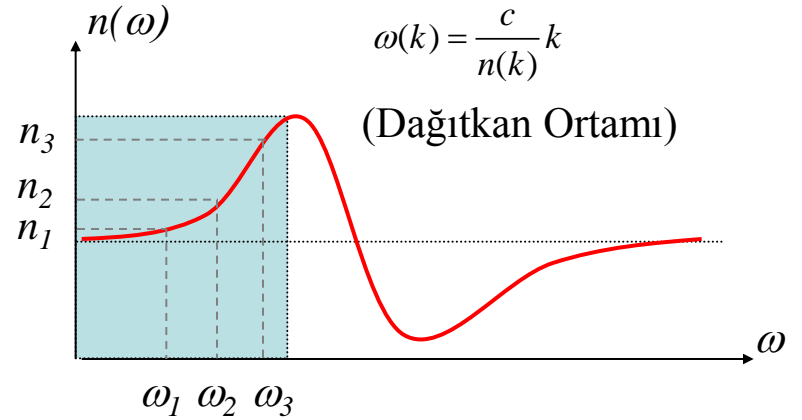
n frekansa bağılı değil, sabit ise
(*Dağıtkan olmayan Ortam*)

Işık-Dağılım Bağıntısı

Madde Ortamı (Dağıtkan Ortam)



Kırılma İndisinin Frekansa Bağlılığı



Dağıtkanlık-2

ω_0 'ın üstündeki frekanslarda madde ortamındaki hız ışık hızından büyük görünmektedir. Bu hız aslında faz hızı olup fiziksel değildir; bilgi iletme hızı olan grup hızı ışığın boşluktaki hızından küçüktür!

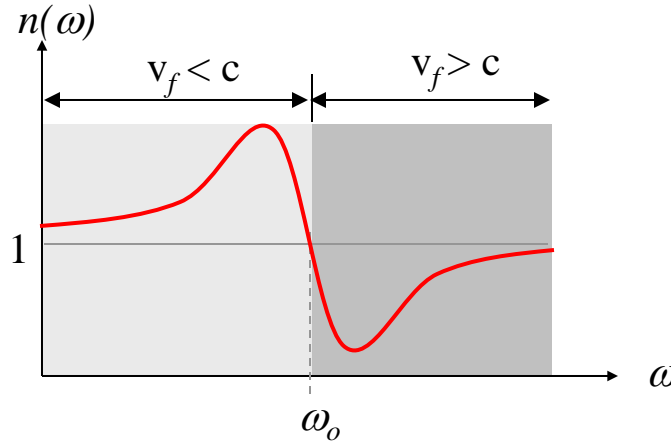
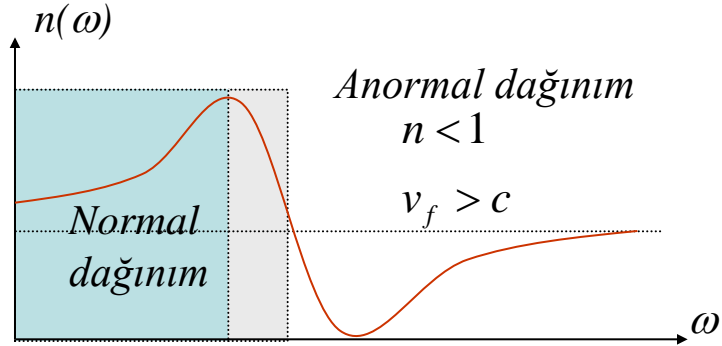
Faz Hızı:

$$v_f = \frac{c}{n}$$

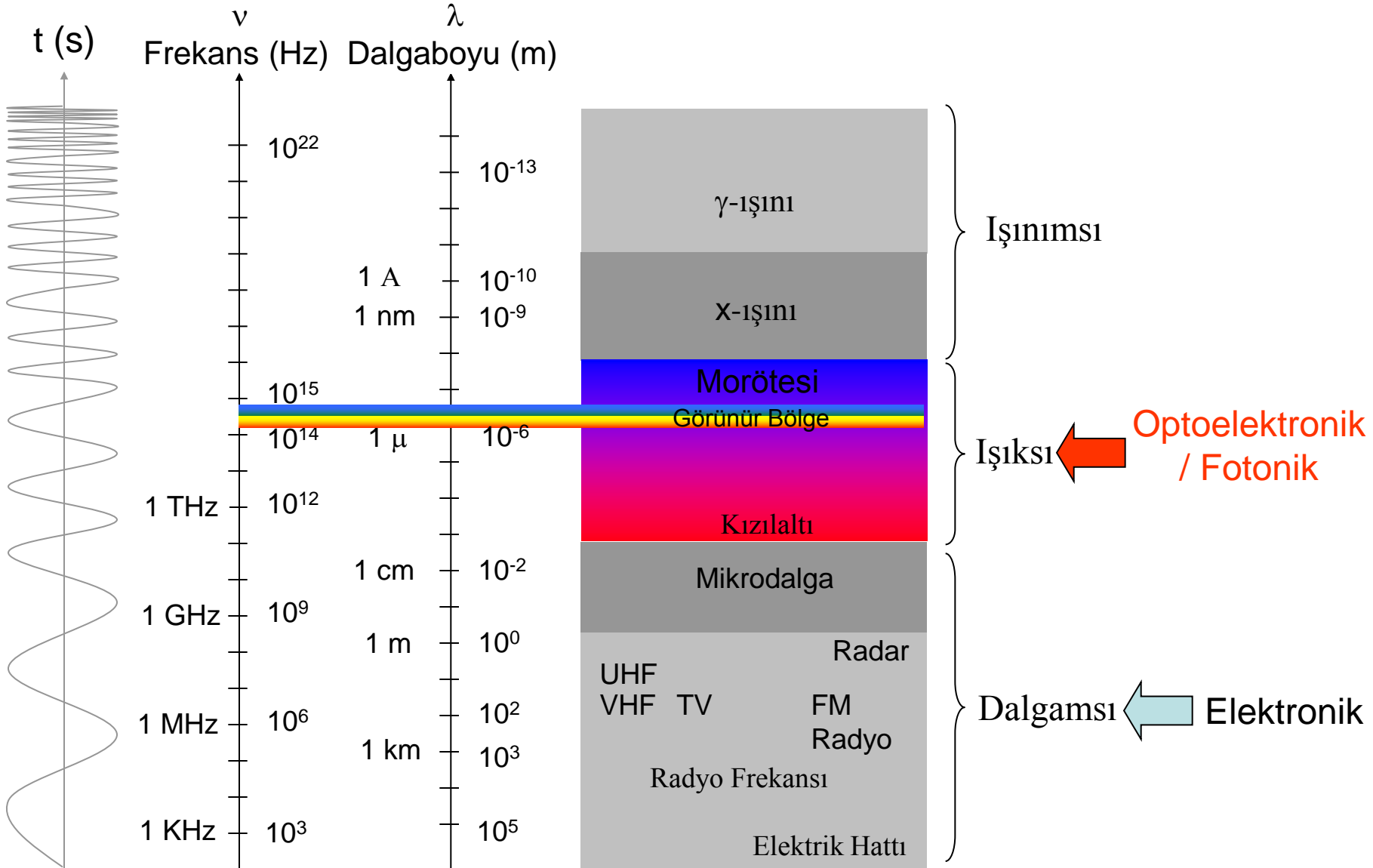
Grup Hızı:

$$v_g = \frac{\partial \omega(k)}{\partial k}$$

$$v_g = v_f \left(1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk}\right)$$



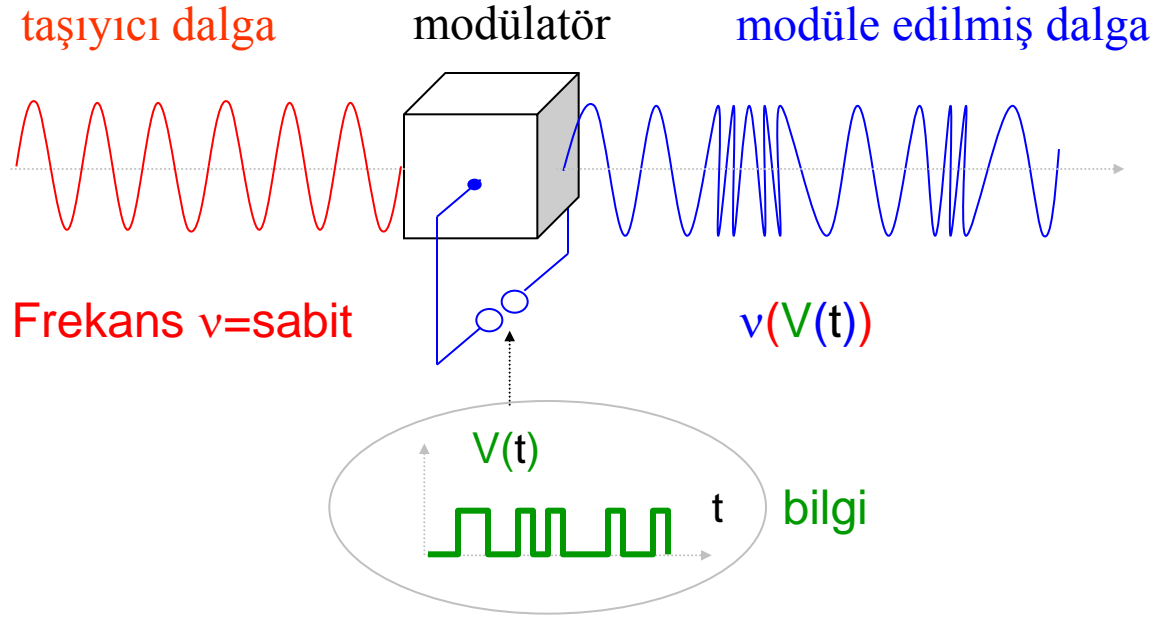
Elektromanyetik Dalgalar



Dalgalar ve İletişim

Modülasyon (iletişimde), bir dalganın değişik parametrelerini (örneğin genlik, frekans, faz gibi) kontrollü olarak (bilgi ile orantılı) değiştirerek bilgi yükleme işlemine denir.

Zayıf olan bilgi sinyalinin uzak mesafelere iletilmesi, güçlü olan bir taşıyıcı dalganın belli parametrelerini bilgi sinyali ile orantılı olarak değiştirilip (modülasyon) gönderilmesi ile mümkündür.



Örnek olarak, yukarıda verilen modülasyon şemasında, sabit parametreleri olan (frekans, genlik ve faz) güçlü bir taşıyıcı dalganın diğer parametreleri sabit tutularak sadece frekansı bilgi sinyali ile orantılı olarak değiştirilmiştir. Bu sayede bilgi, üstüne bilgi bindirilmiş güçlü sinyal aracılığı ile uzun mesafelere ortam şartlarından etkilenmeden iletebilmektedir.

Bir Uygulama: Optik İletişim

Dalgaları kullanarak bilgi nasıl iletilir?

