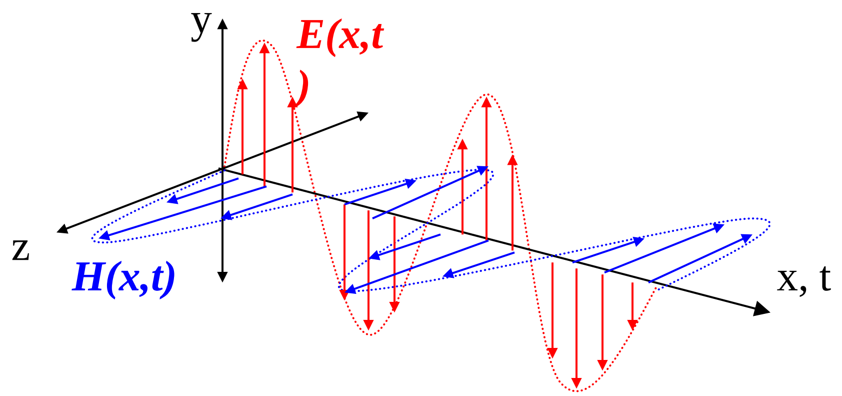
Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

FZM210 Dalgalar ve Optik

Prof. Dr. Hüseyin Sarı

Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü

Optik Dalgalar (1/2)



İçerik

- Maxwell Denklemleri
- Boşlukta Maxwell Denklemleri ve Çözümler
- Işığı Oluşturan Elektrik ve Manyetik Alanlar Arasındaki İlişki
- Işık ile İletilen Enerji
- Işığın Kesikliliği (Kuantum)

Bu bölümü bitirdiğinizde,

- Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik ve manyetik alanların klasik dalga denklemini sağladığı; dalganın boşluktaki yayılma hızının ışık hızına eşit olduğu,
- Işığın, elektrik ve manyetik alanlardan oluşan elektromanyetik bir dalga olduğu,
- Işığın enine bir dalga olduğu,
- Faz ve Grup Hızları
- Poynting vektör,

konularında bilgi sahibi olacaksınız.

Maxwell Denklemleri

J. C. Maxwell, elektrik ve manyetizmaya yönelik çalışmaları birleştirerek ışığın elektromanyetik tabiatlı olduğunu göstermiştir.

Maxwell denklemleri en genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir

Del operatörü :

$$\vec{\nabla} \equiv \hat{i}\frac{\partial}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial}{\partial z}$$

$$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}} = \frac{\rho}{\varepsilon_o}$$ Gauss Yasası- Elektrik

$$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{H}} = 0$$ Gauss Yasası- Manyetik

$$\vec{\nabla} \times \vec{\boldsymbol{E}} = -\mu_o \frac{\partial \vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t}$$ Faraday Yasası

$$\vec{\nabla} \times \vec{\boldsymbol{H}} = \vec{\boldsymbol{J}}$$ Amper Yasası

$$\vec{\nabla} \times \vec{\boldsymbol{H}} = \varepsilon_o \frac{\partial \vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t} + \vec{\boldsymbol{J}}$$ Maxwell'in katkısı ile Amper Yasası

Burada; ***E*** elektrik alan, ***H*** manyetik alan, ρ uzaysal yük yoğunluğu, ***J*** ise akım yoğunluğudur; ε_o boş uzayın elektrik, μ_o ise boş uzayın manyetik geçirgenliği (permittivity) olup sayısal değerleri:

$\varepsilon_o = 8.85\times10^{-12}$ F/m (Boş uzayın elektrik geçirgenliği)

$\mu_o = 4\pi\times10^{-9}$ H/m (Boş uzayın manyetik geçirgenliği)

Boşlukta Işık-1

Bu denklemler boşluk için yazılarak çözümleri bulunabilir.

Boşlukta, akım yoğunluğu **J**=0 ve yük yoğunluğu ρ=0 olacağından Maxwell denklemleri simetrik bir şekil alır.

	Genel		Boşluk
(1)	$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_o}$	$\Rightarrow$	$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}} = 0$
(2)	$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{H}} = 0$	$\Rightarrow$	$\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{H}} = 0$
(3)	$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = -\mu_o \dfrac{\partial \vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t}$	$\Rightarrow$	$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = -\mu_o \dfrac{\partial \vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t}$
(4)	$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{H}} = \varepsilon_o \dfrac{\partial \vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t} + \vec{\boldsymbol{J}}$	$\Rightarrow$	$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{H}} = \varepsilon_o \dfrac{\partial \vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t}$

E ve ***H*,** hem konumun hem de zamanın fonksiyonları olduğundan vektörel olarak en genel şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\vec{\boldsymbol{E}}(x,y,z;t) = E_x(x,y,z;t)\hat{i} + E_y(x,y,z;t)\hat{j} + E_z(x,y,z;t)\hat{k}$$

$$\vec{\boldsymbol{H}}(x,y,z;t) = H_x(x,y,z;t)\hat{i} + H_y(x,y,z;t)\hat{j} + H_z(x,y,z;t)\hat{k}$$

Burada 6 bileşen (3 ***E*** alan, 3 de ***H*** alan bileşeni) ve 4 değişken (3 konum (x,y,z) ve zaman (*t)*) vardır

Boşlukta Işık-2

Boşlukta Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik ve manyetik alanları nasıl eş zamanlı olarak çözeriz?

Öncelikle elektrik alan (***E***) için çözüm bulalım; 3. denklemin dönüsünü (curl) alıp, manyetik alan (curl***H***) yerine denklem (4)'yi koyarsak

$$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{H}} = \varepsilon_o \frac{\partial\vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t} \quad (4)$$

$$(3) \quad \vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = -\mu_o \frac{\partial\vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t} \;\Rightarrow\; \vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}}) = -\mu_o \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla}\times\vec{H})$$

$$\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}}) = -\mu_o \frac{\partial}{\partial t}\left[\varepsilon_o \frac{\partial\vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t}\right]$$

$$\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}}) = -\mu_o\varepsilon_o \frac{\partial^2\vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t^2}$$

Vektörel eşitlik $\quad \vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}}) = -\nabla^2\vec{\boldsymbol{E}} + \vec{\nabla}.(\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}}) \quad$ kullanıldığında

$$-\nabla^2\vec{\boldsymbol{E}} + \vec{\nabla}.(\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}}) = -\mu_o\varepsilon_o \frac{\partial^2\vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t^2}$$

Herhangi bir $\vec{\boldsymbol{A}}$ vektörü
$\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{A}}) = -\nabla^2\vec{\boldsymbol{A}} + \vec{\nabla}.(\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{A}})$
şeklinde yazılabilir

Boş uzayda ρ=0 olduğu için $\vec{\nabla}.\vec{\boldsymbol{E}} = 0$ (1. Maxwell Denklemi)

$$\boxed{\nabla^2\vec{\boldsymbol{E}} = \mu_o\varepsilon_o \frac{\partial^2\vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t^2}}$$

Boşlukta Işık-3

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_o \varepsilon_o \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik alan, klasik dalga denklemi şeklindedir.

Dalga Denklemi

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

v= dalganın hızı (faz)

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

Dalganın hızı: $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} \equiv c$

Dalganın ilerleme hızı:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi x10^{-7}).(8,85x10^{-13})}} = 2,99 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(Boş uzayda elektromanyetik dalganın (ışığın) yayılma hızı)

** Işık hızı diğer hızlar gibi v ile değil de c ile gösterilir. Bu gösterim, Latince "hızlı" anlamına gelen "celer" kelimesinden gelmektedir.*

E alanının sağladığı dalga denklemindeki hız, tam olarak deneysel olarak ölçülen ışığın boşluktaki hızına eşittir. Maxwell denklemlerini sağlayan ***H*** manyetik alanın da aynı sonucu verdiği gösterilebilir. Bu önemli sonuç, ışığın elektrik ve manyetik alanlardan oluşan elektromanyetik bir dalga olduğunu gösterir.

Boşlukta Işık-4

Elektrik ve manyetik alanın sağladığı diferansiyel denklemler:

$$\nabla^2 \vec{\boldsymbol{E}} = \mu_o \varepsilon_o \frac{\partial^2 \vec{\boldsymbol{E}}}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 \vec{\boldsymbol{H}} = \mu_o \varepsilon_o \frac{\partial^2 \vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t^2}$$

Bu denklemlerin her ikisi de $\nabla^2 u = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ dalga denklemi şeklindedir.

Dalganın hızı: $\frac{1}{v^2} = \frac{1}{c^2} = \varepsilon_o \mu_o$

Bu (dalga) denklemlerinin çözümleri nedir?

Basitlik olması açısından üç boyutta yazılan yukarıdaki dalga denklemini bir boyut (x-doğrultusunda ilerleyen dalga) için yazıp, çözmeye çalışalım.

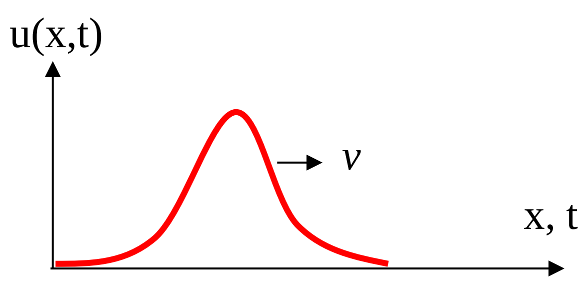
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

3 boyutta dalga denklemi
(dalga, herhangi bir ***r*** doğrultusunda ilerliyor)

u(x,y,z;t) => u(x;t)

$$\frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

1 boyutta dalga denklemi
(dalga, x doğrultusunda ilerliyor)



Burada, z dalganın ilerleyiş doğrultusunu, t zamanı, *v* ise dalganın yayılma hızını (faz hızını) göstermektedir.

Boşlukta Işık-5

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

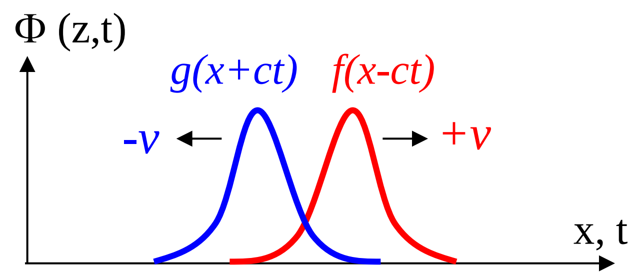
Bu diferansiyel (dalga) denklemin en genel çözümü:

$$u(x,t)=f(x-ct)+g(x+ct)$$

şeklinde verilir ve dalga denkleminin çözümünü sağlar.

f(x-ct) ve *g(x+ct)* şeklinde verilen çözümlerde *f* ve *g* fonksiyonlarının sadece argümanının (uzay(x) ve zaman(t) değişkenleri) özel şekilde olması (x±vt şeklinde) yeterlidir; dalganın şeklini belirleyen *f* ve *g*'nin nasıl olduğu önemli değildir! (Argümanı x±ct olan herhangi bir *f* veya *g* fonksiyonu dalga denklemini sağlayacaktır).

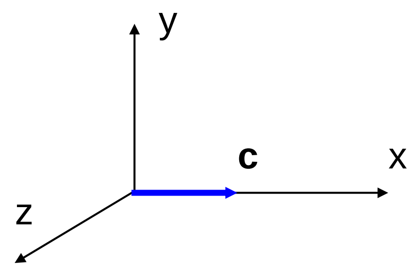
Çözümler, bu durumda **ilerleyen dalga** şeklinde olacaktır.



Fiziksel olarak *f(x-ct)* sağa (+x), *g(x+ct)* ise sola (-x) doğru giden dalgayı göstermektedir.

Boşlukta Işık-6

Klasik dalga denkleminin çözümüne ilişkin bildiklerimizi kullanarak Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik (ve manyetik) alanı bulabiliriz. Önce elektrik alan için çözümleri bulalım.



Yayılma doğrultusu +x-yönünde seçilirse dalga denkleminin çözümü

$$f(x-ct) \Rightarrow \vec{E}(x,t) = \vec{E}(x-ct)$$

şeklini alır. Dalga denklemini sağlayan elektrik alan vektörel bir nicelik

$$\vec{E}(x-ct) = \hat{i}E_x(x-ct) + \hat{j}E_y(x-ct) + \hat{k}E_z(x-ct)$$

olduğundan alanın her bileşenini bulmak gerekir.

Çözümü aranan elektrik alanın, Maxwell denklemlerini sağlaması gerektiğinden yukarıdaki alan bileşenleri Maxwell denklemlerinden bulunabilir.

Işık Neden Enine Bir Dalgadır?

(1) Maxwell denklemine göre $\vec{\nabla}.\vec{E} = 0$ $\Longrightarrow$ $\vec{\nabla}.\vec{E} = \dfrac{\partial E_x}{\partial x} + \dfrac{\partial E_y}{\partial y} + \dfrac{\partial E_z}{\partial z} = 0$

olması gerektiğinden her bileşenin türevinin ayrı ayrı sıfır olması gerekir.

$$\frac{\partial E_x(x-ct)}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial E_y(x-ct)}{\partial y} = 0 \qquad \frac{\partial E_z(x-ct)}{\partial z} = 0$$

$$\Downarrow \qquad\qquad \Downarrow \qquad\qquad \Downarrow$$

$$E_x = 0 \qquad E_y = keyfi \qquad E_z = keyfi$$

Elektrik alanın E_y ve E_z bileşenleri x değişkenini içermediğinden x'e göre türevleri sıfır olacaktır. Dolayısı ile alanın y ve z bileşenleri sıfırdan farklı, keyfi bir değer olabilir.

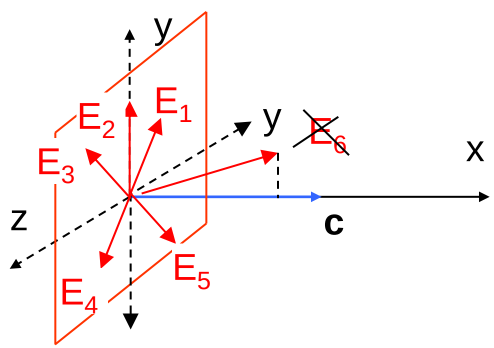
Sadece $E_x(x,t)$ bileşeni x'nin fonksiyonu olduğundan türevin her zaman sıfır olması koşulunun sağlaması için E_x bileşeninin sıfır olması gerekir.

Işık Neden Enine Bir Dalgadır-2?

Maxwell denklemlerinin bir sonucu olarak alan bileşenlerine getirilen bu kısıtlama ışığın (en genel olarak elektromanyetik dalgaların) önemli bir özelliğidir.

Önemli Sonuç: Maxwell denklemlerini sağlayan ***elektrik*** alanın yayılma doğrultusunda hiç bir bileşeni olmayacaktır; ***E*** alanı tümüyle yayılma doğrultusuna (burada x doğrultusu) dik düzlemde (burada yz-düzlemi) bulunacaktır.

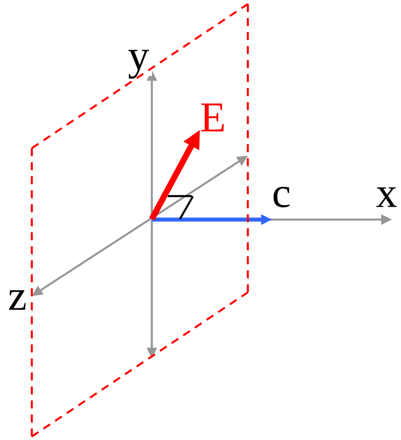
$$\frac{\partial E_x(x-ct)}{\partial x} = 0 \Rightarrow E_x = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{E}(x-ct) = \hat{j}E_y + \hat{k}E_z$$

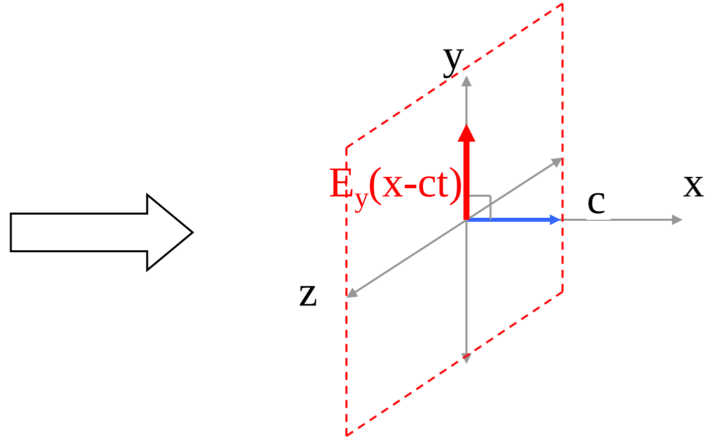


Elektrik alanın yayılma doğrultusuna dik düzlem içinde herhangi bir doğrultuda bileşeni (E_1-E_5) olabilir.

Maxwell denklemleri, elektrik alanın dalganın ilerleme doğrultusuna dik yönde enlemesine (transverse) titreşim yapacağını öngörmektedir. ***Yani ışık enlemesine bir dalgadır (TransverseElectric (TE))***

Basitlik açısından yine özel bir duruma bakalım. Elektrik alanın sadece y-doğrultusunda (E_y) olduğunu düşünelim ($E_z=0$) (uygun koordinat sistemi seçerek bu koşul her zaman sağlanabilir)



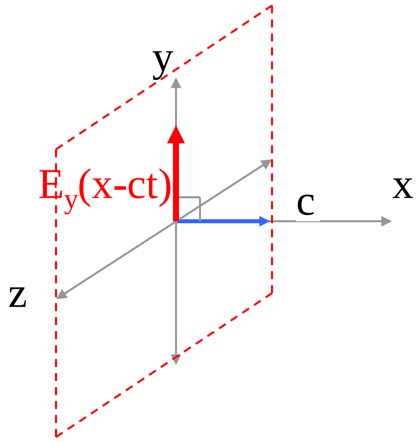


$$\vec{\boldsymbol{E}}(x-ct)=\hat{j}E_y+\hat{k}E_z \quad \Longrightarrow \quad \vec{\boldsymbol{E}}(x-ct)=\hat{j}E_y$$

Şimdiye kadar dalga denklemini sağlayan genel çözümün özelliklerini (dalga denkleminin çözümlerinden uzay ve zaman değişkenleri arasındaki ilişkiyi) ve vektörel bir nicelik olan elektrik alanın bileşenlerini (1. Maxwell denkleminden) bulmaya çalıştık.

Henüz dalganın şekli hakkında herhangi bir şey söylemedik. Dalganın sağlayacağı genel şartları belirledikten sonra şimdi dalganın (elektrik alanın) şeklini bulabilecek konumdayız.

Bu durumda yukarıdaki çözüm daha genel bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir



$$\vec{E}(x,t) = \hat{j}E_{oy}\sin\left[x - ct + \phi\right]$$

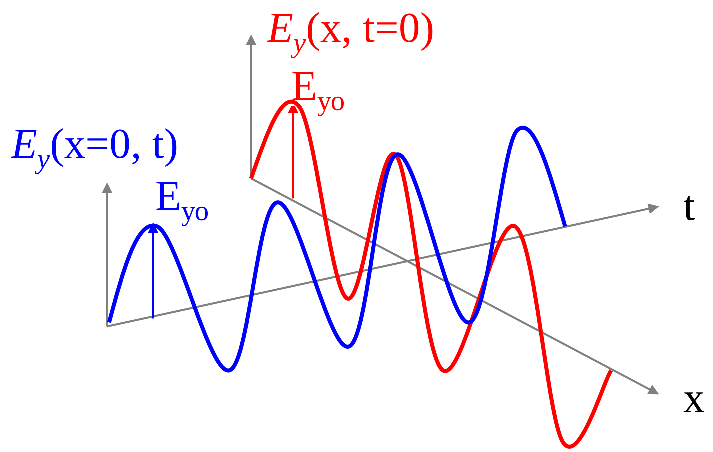
$$\vec{E}(x,t) = \hat{j}E_{oy}\sin\left[kx - \omega t + \phi\right]$$

Boşlukta Işık-Elektrik Alan Bileşeni

Artık dalga denklemine (ve Maxwell denklemlerine) aradığımız çözümü gözümüzde canlandırabilecek durumdayız.

$$\vec{\boldsymbol{E}}(x,t) = \hat{j}E_{oy}\sin\left[kx - \omega t + \phi\right]$$

Elektrik alan (E) hem zamanda hem de uzayda periyodik salınım yapmaktadır. Alanın uzaydaki (zamandaki) değişimini incelemek için zaman (uzay) değişkeni sabit tutularak dalganın konuma (zamana) göre değişimi incelenebilir.



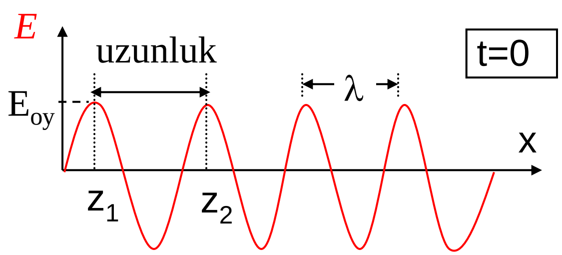
Elektrik alanın uzay ve zamandaki bu periyodik davranışı, uzay ve zamandaki periyotlarını belirleyen nicelikler tanımlanarak dalga hareketini bu nicelikler cinsinden daha derli toplu bir şekilde yazmak mümkün olacaktır.

Açısal Nicelikler

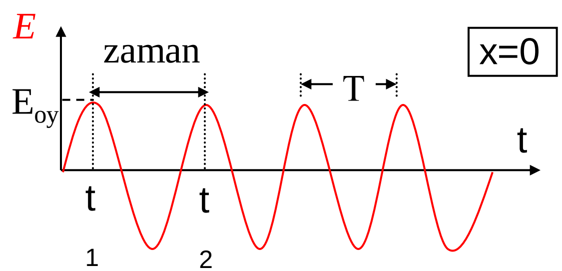
Tanımlanan bu yeni nicelikler cinsinden elektrik alan yeniden yazılabilir:

$$E(x,t) = E_{oy}\sin\left[kx - \omega t + \phi\right]$$

Uzaysal Değişim



Zamansal Değişim



$\dfrac{2\pi}{k} \equiv \lambda$	Dalgaboyu	$\longrightarrow$ $\lambda = cT$ $\longleftarrow$	$\dfrac{2\pi}{ck} \equiv T$	Periyot
$\dfrac{1}{\lambda} \equiv \bar{k}$	Dalga sayısı	$\longrightarrow$ $\bar{k} = c/\nu$ $\longleftarrow$	$\dfrac{1}{T} \equiv \nu$	Frekans
$\dfrac{2\pi}{\lambda} = 2\pi\bar{k} \equiv k$	Dalga vektörü	$\longrightarrow$ $k = \dfrac{1}{c}\omega$ $\longleftarrow$	$\dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \equiv \omega$	Açısal Frekans

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{(\varepsilon_o \mu_o)^{1/2}} \qquad c = \lambda\nu = \frac{\omega}{k}$$

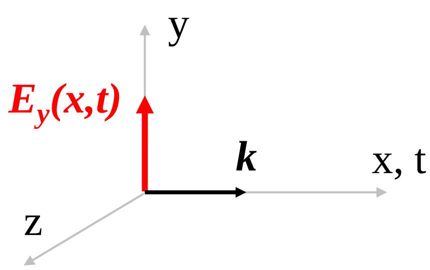
Manyetik Alan-1

H manyetik alan için neler söylenebilir? ***E*** *alanı ile ilişkisi nasıldır?*

Elektrik ve manyetik alan arasındaki ilişkiyi gösteren 3. Maxwell denkleminden elektrik alan biliniyorsa manyetik alan bulunabilir.

$$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = -\mu_o \frac{\partial\vec{\boldsymbol{H}}}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad \vec{\boldsymbol{H}} = -\frac{1}{\mu_o}\int\left(\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}}\right)\partial t$$

Basitlik açısından, +x yönünde ilerleyen ve elektrik alan bileşeni y-doğrultusunda olan dalgayı düşünelim $\vec{\boldsymbol{E}} = \hat{\boldsymbol{j}}\boldsymbol{E}_{oy}\sin(kx-\omega t+\phi)$



$$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = \begin{vmatrix} \hat{\boldsymbol{i}} & \hat{\boldsymbol{j}} & \hat{\boldsymbol{k}} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_y & 0 \end{vmatrix} = \hat{\boldsymbol{i}}(0-\frac{\partial}{\partial z}E_y) - \hat{\boldsymbol{j}}(0-0) + \hat{\boldsymbol{k}}(\frac{\partial}{\partial x}E_y - 0)$$

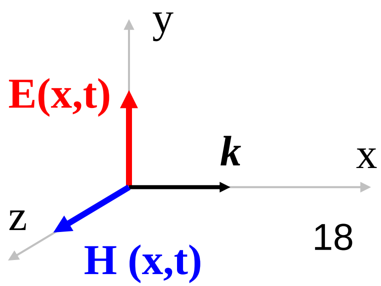
$$\vec{\nabla}\times\vec{\boldsymbol{E}} = \hat{\boldsymbol{k}}(\frac{\partial E_y}{\partial x}) = \hat{\boldsymbol{k}}\left[kE_{oy}\cos(kx-\omega t+\phi)\right]$$

$$\vec{\boldsymbol{H}} = -\frac{1}{\mu_o}\int\left[kE_{oy}\cos(kx-\omega t+\phi)\hat{k}\right]dt = \frac{k}{\omega}(\frac{E_{oy}}{\mu_o})\sin(kx-\omega t+\phi)\hat{k}$$

$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{(\varepsilon_o\mu_o)^{1/2}}$ olduğu hatırlanırsa manyetik alan (H)

$$\boxed{\vec{\boldsymbol{H}} = \hat{k}(\frac{\varepsilon_o}{\mu_o})^{1/2}E_{oy}\sin(kx-\omega t+\phi) = \hat{k}H_{oz}\sin(kx-\omega t+\phi)}$$

$H_{oz} \equiv (\varepsilon_o/\mu_o)^{1/2}E_{oy}$ Manyetik alan, +z-yönündedir.



Manyetik Alan-2

$$\vec{E} = E_o \sin(kx - \omega t + \phi)\,\hat{j}$$ Elektrik alan

$$\vec{H} = H_o \sin(kx - \omega t + \phi)\,\hat{k}$$ Manyetik alan

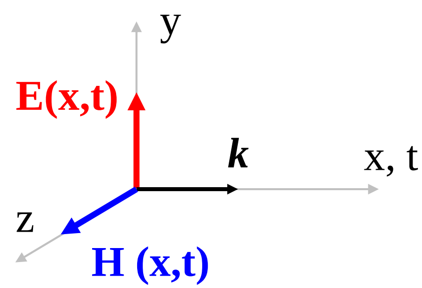
$$\left|\vec{H}_o\right| = \left(\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}\right)^{1/2}\left|\vec{E}_o\right|$$

Maxwell denklemlerinin çözümleri olan Elektrik ve Manyetik alanları karşılaştıralım:

Faz $\phi_{E_o} = \phi_{H_o}$ ⇨ ***Elektrik ve manyetik alanın fazları aynı*** (Elektrik alanın maksimum (minimum) olduğu yerde manyetik alanda (maksimum (minimum) olacaktır)

Genlik $\left|\vec{H}_o\right| = \left(\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}\right)^{1/2}\left|\vec{E}_o\right|$ ⇨ ***Yön*** (Elektrik alan (***E***) +y doğrultusunda ise Manyetik alan (***H***) +z doğrultusundadır) (Elektrik alanın herhangi bir doğrultuda olduğu durumda da manyetik alan her zaman elektrik alana dik olur)

$$\hat{k} \times \hat{E} = \hat{H}$$



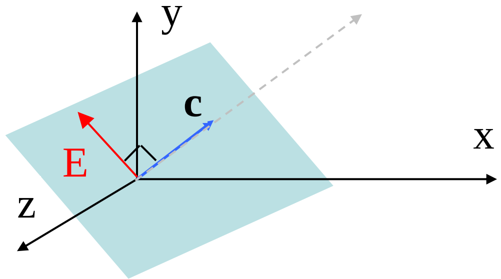
Alan genliklerinin büyüklükleri $\left|\vec{H}_o\right| = \left(\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}\right)^{1/2}\left|\vec{E}_o\right|$

Alan genliklerinin oranı ***boş uzayın empedansı*** olarak tanımlanır $\frac{\left|\vec{E}_o\right|}{\left|\vec{H}_o\right|} = \left(\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}\right)^{1/2} \equiv \eta_o$

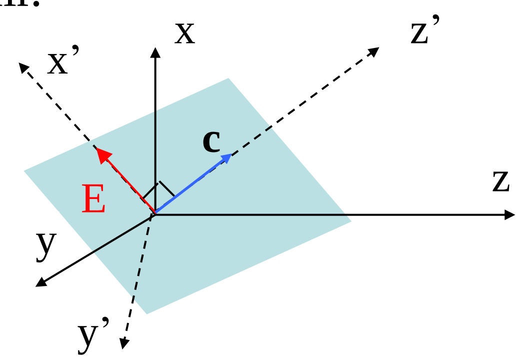
Boş uzayın empedans değeri $\eta_o = \left(\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}\right)^{1/2} \cong 120\pi \cong 377\Omega$

Iiık-Genel Durum

Şimdiye kadar, çözümün anlaşılır olabilmesi için özel durumlara baktık. Örneğin dalganın +z yönünde ilerlediğini, elektrik alanın +x doğrultusunda olduğu gibi. Yayılma doğrultusu özel bir doğrultu (z) değil de herhangi bir doğrultu (r) olursa benzer çözümler yine geçerlidir. Örneğin herhangi bir doğrultuda (r) ilerleyen dalgaya uygun koordinat sistemi (x'y'z') çakıştırılarak benzer sonuçlar bulunabilir.



Yayılma doğrultusu r

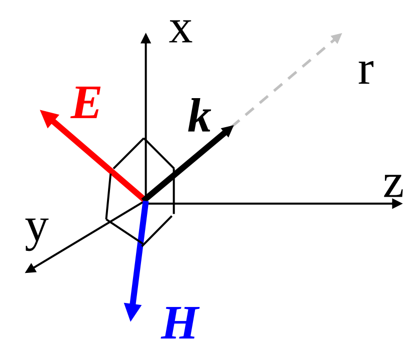


Yayılma doğrultusu z'

Bulunan sonuçlar genelleştirilirse: herhangi bir (r) doğrultusunda ilerleyen ışığın elektrik ve manyetik alanları vektörel olarak

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

$$\vec{H}(r,t) = \vec{H}_o \sin(\vec{k}.\vec{r} - \omega t + \phi)$$

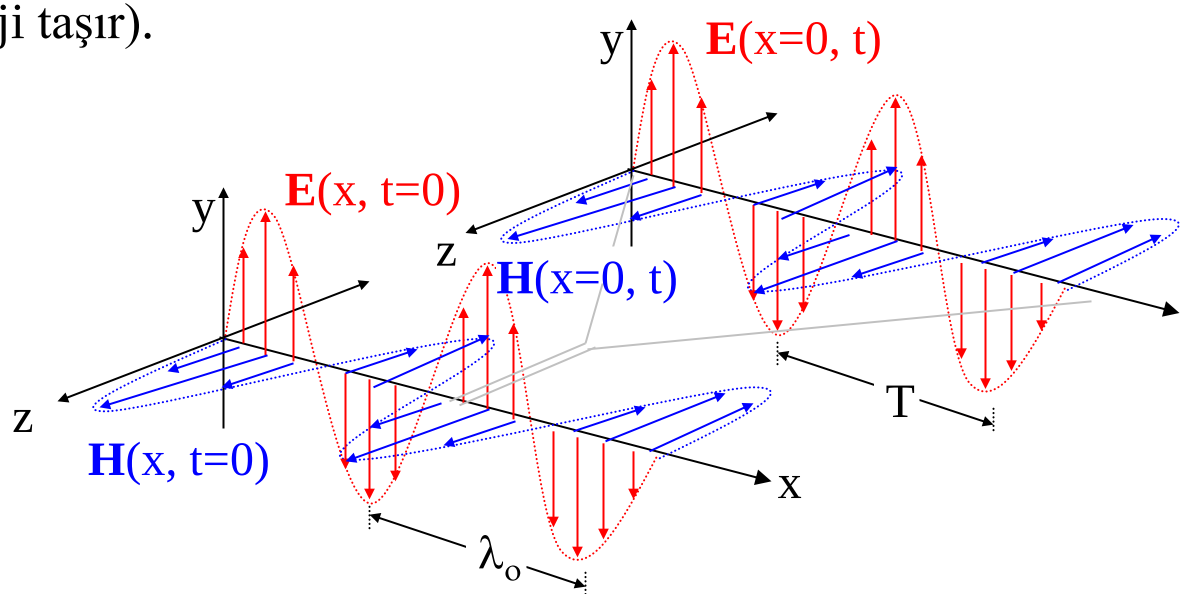


yazılabilir. Elektrik alan (***E***) ve manyetik alan (***H***) her zaman birbirine ve aynı zamanda da dalga vektörüne (***k***) diktirler.

$$\vec{E}_o \times \vec{H}_o \,//\, \vec{k}$$

Işığın Özellikleri

- Işık, elektrik (***E***) ve manyetik (***H***) alanlardan oluşan enine bir elektromanyetik dalgadır (TEM-TransverseElectricMagnetic).
- Elektrik ve manyetik alan bileşenleri her zaman birbirlerine diktir.
- Alanlar, aynı zamanda dalganın ilerleyiş yönünde olan ***k*** dalga vektörüne diktir.
- Alan bileşenleri hem zaman içinde hem de konuma bağlı olarak periyodik bir değişim gösterir; zaman içersindeki salınım ω, uzaysal salınım ise ***k*** ile temsil edilir.
- Elektrik alan ile manyetik alan arasında faz farkı yoktur, alanların oranı boş uzayın empedansına eşittir.
- Işığı oluşturan alan bileşenleri (***E*** ve ***H***) birbirinin kaynağıdır; birinin değişimi diğerini oluşturur ve tekrarlanan değişim sonucu dalga uzayda c hızı ile hareket eder (enerji taşır).



Işık Dalgasının Farklı Gösterimleri

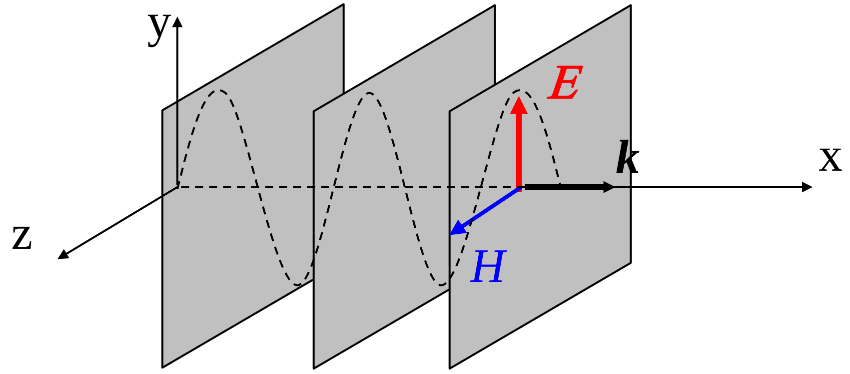
Elektrik ve manyetik alanlar için elde edilen düzlemsel dalga çözümlerini daha şık bir şekilde karmaşık gösterim kullanarak vektörel şekilde yazabiliriz. Karmaşık gösterim dalgalarla işlem yapmayı kolaylaştırır.

$$e^{\pm ix} = \cos x \pm i \sin x$$

$$\vec{E} = \vec{E}_o e^{i(\vec{\mathbf{k}}.\vec{\mathbf{r}} - \omega t + \phi)} \qquad \text{Elektrik alan}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_o e^{i(\vec{\mathbf{k}}.\vec{\mathbf{r}} - \omega t + \phi)} \qquad \text{Manyetik alan}$$

Burada *k*, dalga vektörü, *i* ise karmaşık sayıdır. Alan genlikleri E_o ve H_o en genel olarak karmaşık vektördür ve ışığın kutupluluk özelliğinin incelendiği Bölüm 5'de ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



Düzlemsel dalga