Elektromanyetik dalgalar

Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

- Maxwell denklemleri

Gauss kanunu $$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q_{encl}}{\varepsilon_0}$$

Manyetizmada Gauss kanunu $$\oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

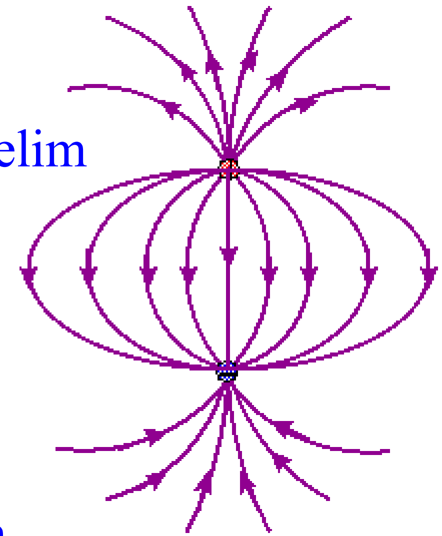
Farady kanunu $$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}\oint \vec{B}\cdot d\overleftarrow{A}$$

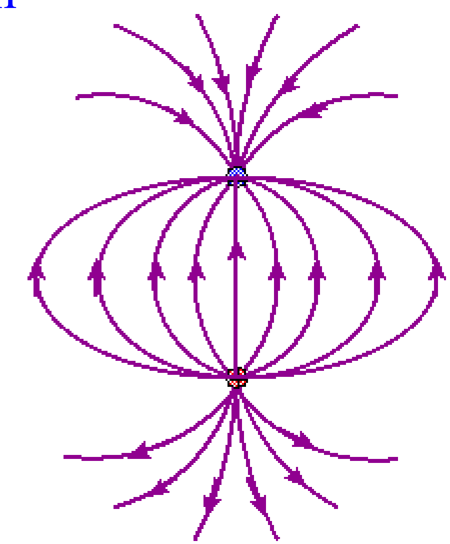
Ampere kanunu $$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 (I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt})_{encl} = \mu_0 (I + \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\oint \vec{E}\cdot d\vec{A})_{encl}$$

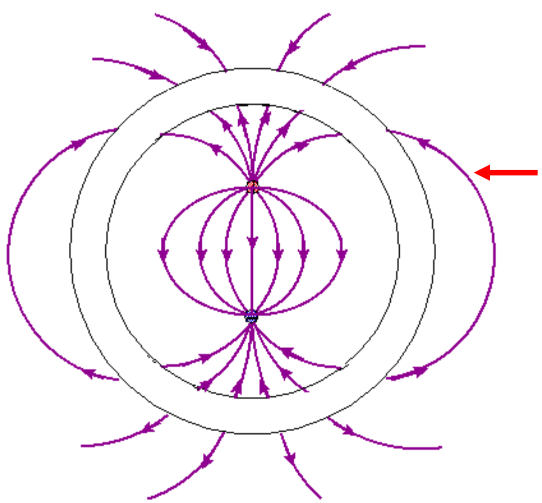
Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

❑ Salınım yapan elektrik dipol

Başlangıçta şekilde gösterildiği gibi bir elektrik
dipol tarafından üretilen sabit bir elektrik alanı düşünelim
(a) Pozitif (negatif) yük üstte (altta)
(b) Negatif (pozitif) yük üstte (altta)
Şimdi bu iki yükün aşağı yukarı hareket ettiklerini
ve her yarım periyotta bir ,birbirleriyle pozisyon
değiştirdiklerini hayal edelim.Bununla birlikte alttaki
şekilde gösterildiği gibi iki durum arasında bir konum
vardır:







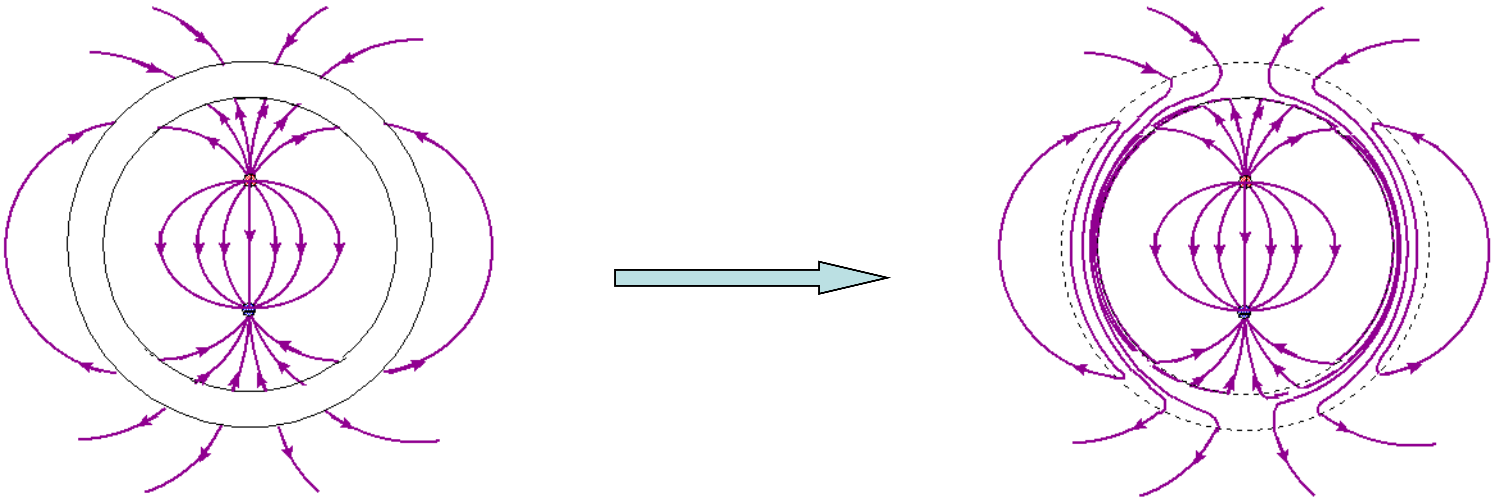
Boş alandaki elektrik
alan nedir?

Maxwell denklemleri ve EM dalgaları

- Salınım yapan elektrik dipol

Değişim yayılımının, hemen öncelikli olarak yeni pozisyona ulaştığını düşünmediğimiz için boşluk bu arada alanda ne olması gerektiğini temsil eder.

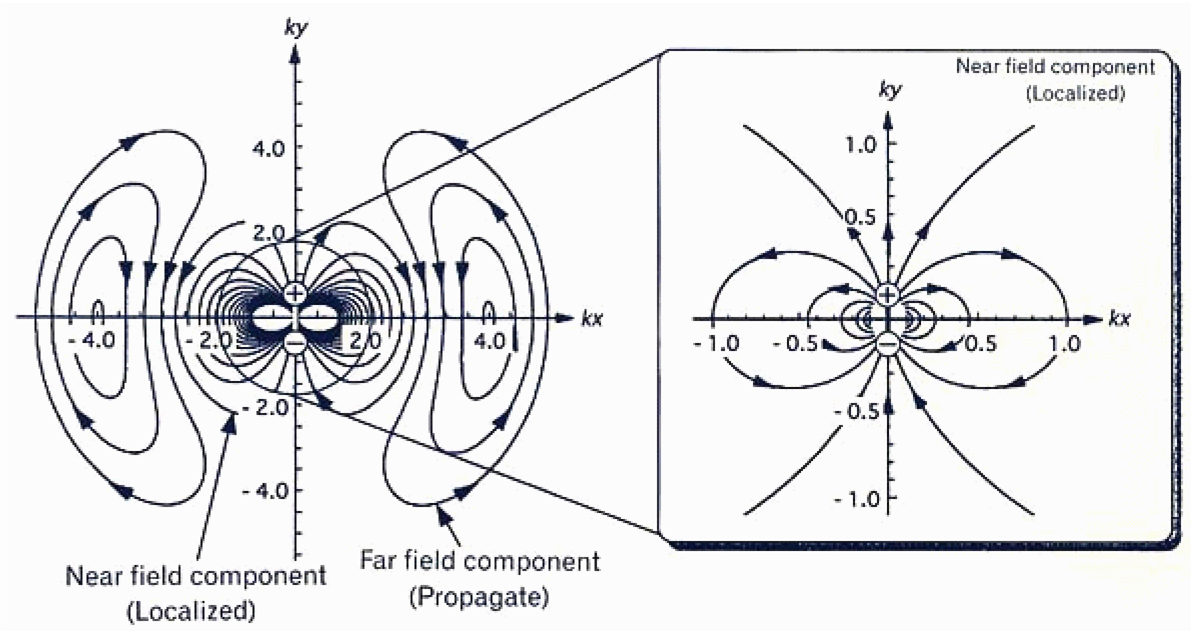
E alan çizgilerinin karşıya geçemediklerini ve onların yüklerden hariç devam etmeleri gerektiğini öğrendik.Bu yüzden akla uygun ihtimal sağdaki resimde gösterildiği gibidir.



Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

- Salınım yapan elektriksel dipol

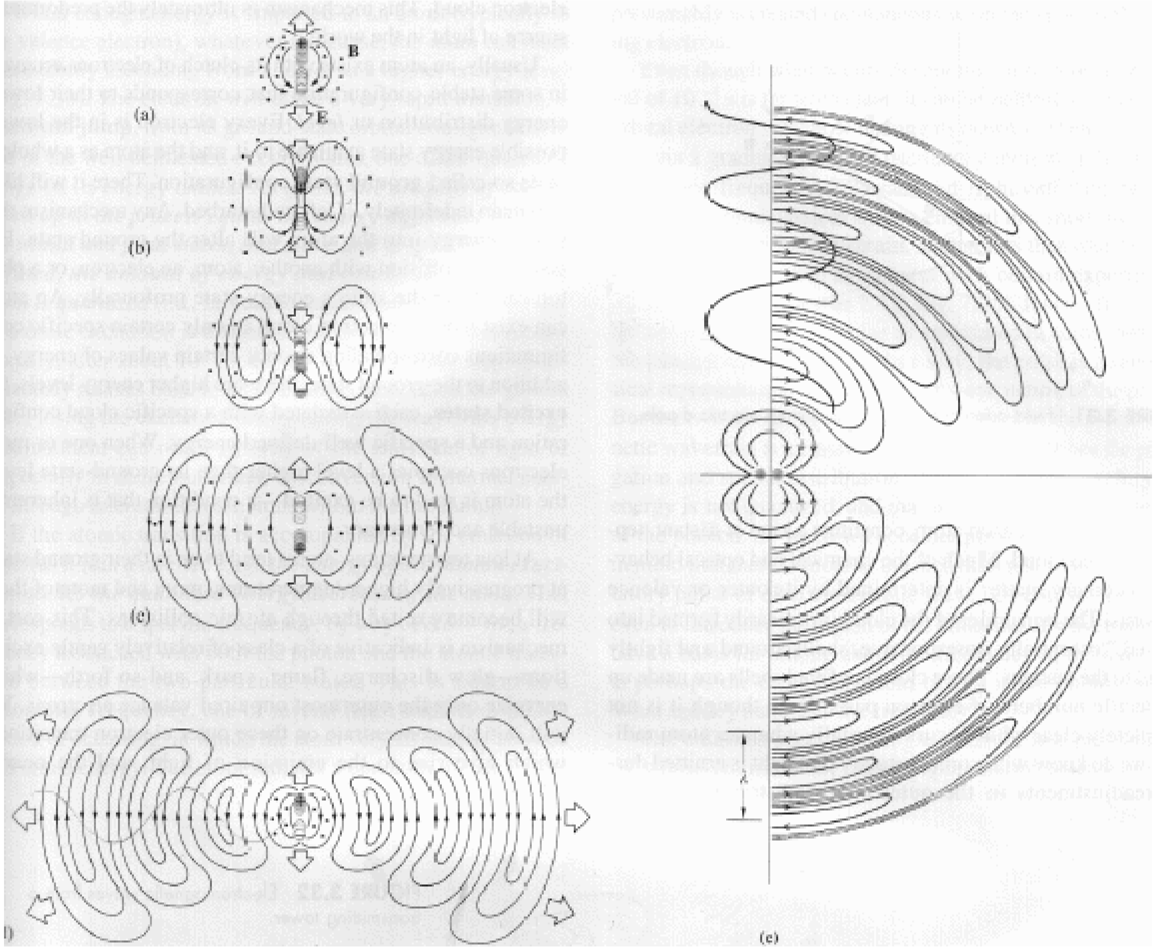
Şekilde gösterildiği gibi alanın tam hesaplamaya dayalı durumunda ne olur? Ayrıca manyetik alanda şekillenmiştir. Elektrik akımı olduğunda, manyetik alan üretilir. Akım düz bir telde ise dairesel manyetik alan meydana gelir. Bunun büyüklüğü akımdan uzaklıkla ters orantılıdır.



Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

- Salınım yapan elektrik dipol

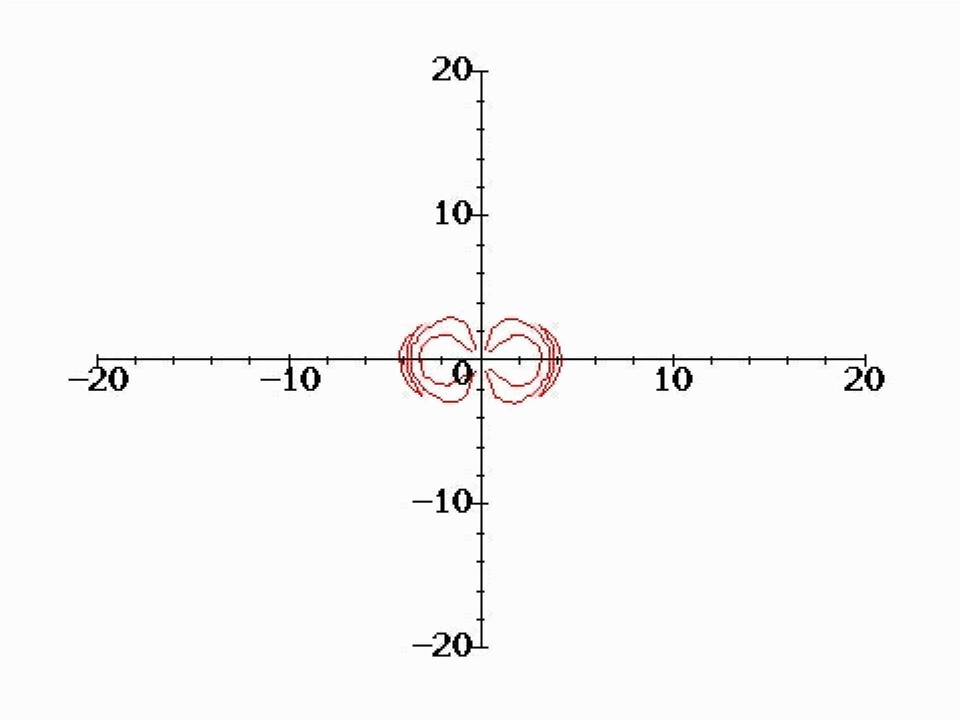
Şekilde gösterildiği gibi alanın tam hesaplamaya dayalı durumunda ne olur?



Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

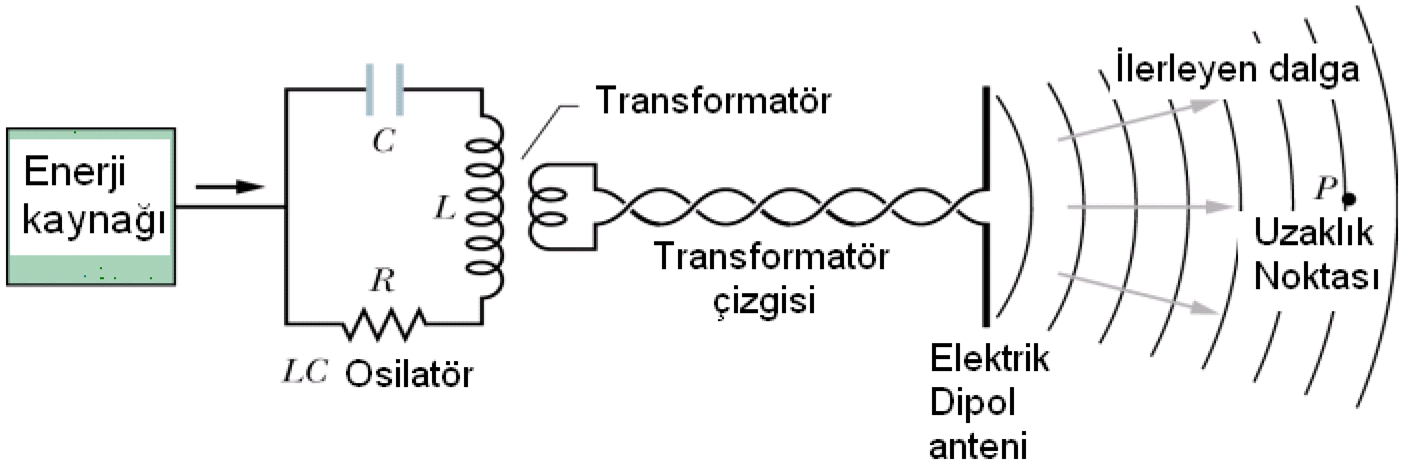
- Salınım yapan elektrik dipol

Bu,zamanın fonksiyonu olarak salınım yapan bir elektrik dipolün EM dalga radyasyonunun animasyonudur.



Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

- Salınım yapan elektriksel dipol



Maxwell denklemleri ve EM dalgalar

❑ Salınım yapan elektrik dipol

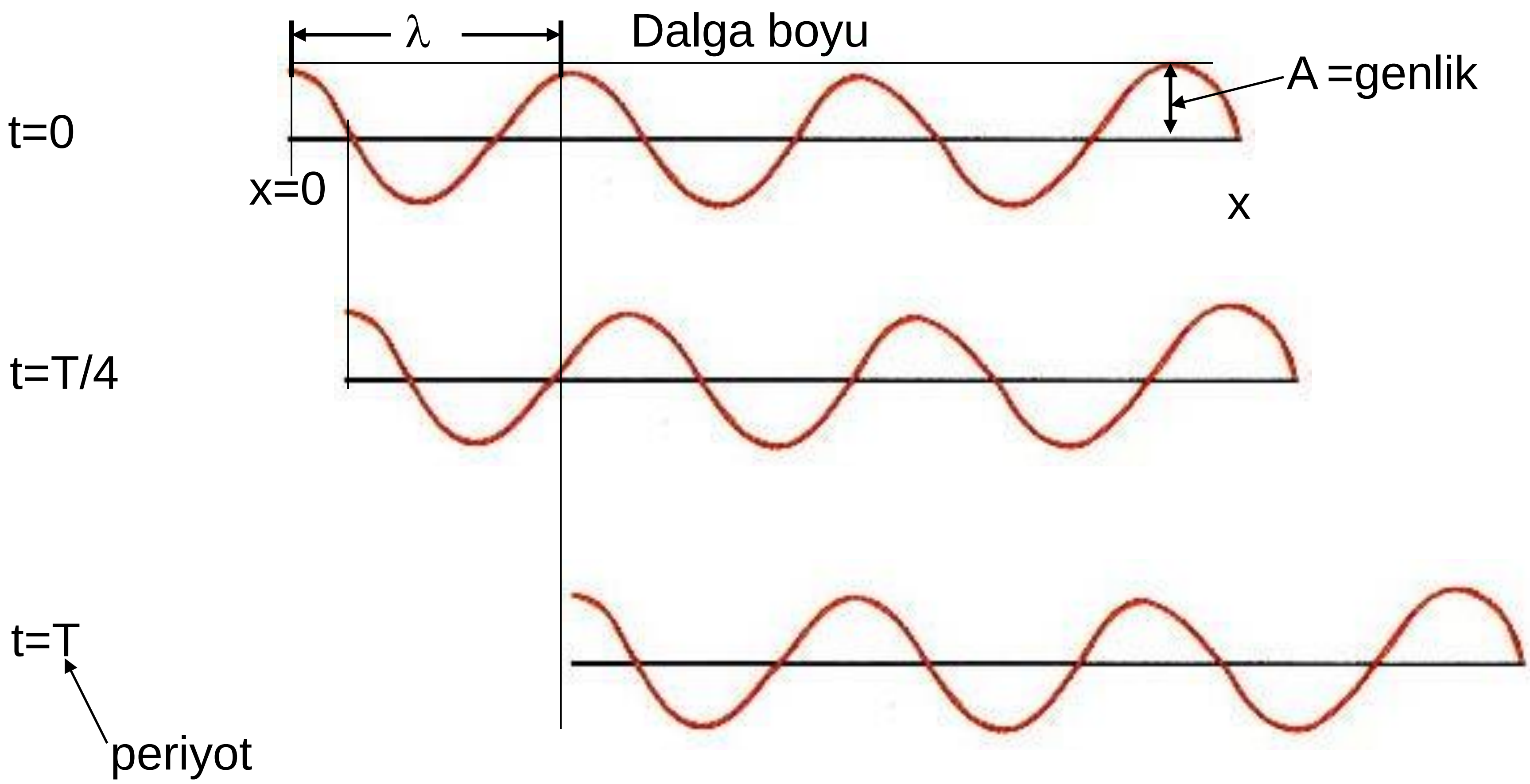
Bu örneğin yorumunun nitel bir özeti:

1) E ve B alanları daima birbiriyle dik açı yapar.
2) Alanların yayılması,(*i.e.*Titreşen dipolden uzaklara yolculuklarının Yönleri) Uzayda herhangi bir verilen pozisyonu işaret eden alanların yönüne diktir.
3) Dipolden uzakta bir yerde, elektrik alan her hangi bir yükle alakası olmayan kapalı ilmekler şeklinde görünür. Bu, kesinlikle, her zaman herhangi bir B alanı için doğrudur. Böylece, dipolden uzaklarda,yüklerden bağımsız gezen E ve B alanları buluruz. Bunlar dipolden uzaklarda oluşur ve uzay boyunca yayılır.

Genelde bununla ,hızlanan elektrik yüklerin elektromanyetik dalgaların kaynağını verdiği ispatlanabilir.

Mekaniksel dalga çeşitleri

- Periyodik dalga
  - •Bir dalgada ortam parçacıkları periyodik harekete maruz kaldıklarında, dalga oluştuğu için dalga periyodik olarak isimlendirilir.



Bir dalganın matematiksel tanımı

- Dalga fonksiyonu
  - Dalga fonksiyonu zamanın fonksiyonu olarak bir dalgada parçacıkların yer değiştirmesi yada E/B alanının değişimi olarak tanımlanır. $y = y(x,t)$; y, x,t ye bağlı değişir.
  - Bir sinüzoidal dalga dalga fonksiyonu ile tasvir edilir:

$$y(x,t) = A\cos[\boxed{\omega}(t - x/\boxed{v})]$$

+x yönünde hareket eden sinüzoidal dalga

Dalga hızı, ortadaki parçacıkların değil

$$= A\cos[\omega(x/v - t)]$$

Açısal frekans

$$\omega = 2\pi f$$

$$= A\cos 2\pi f(x/v - t)$$

$$= A\cos 2\pi(x/\boxed{\lambda} - t/\boxed{T})$$

periyot $f = 1/T$

$f\lambda = v$ Dalga Boyu

$$y(x,t) = A\cos[\omega(t + v/x)]$$

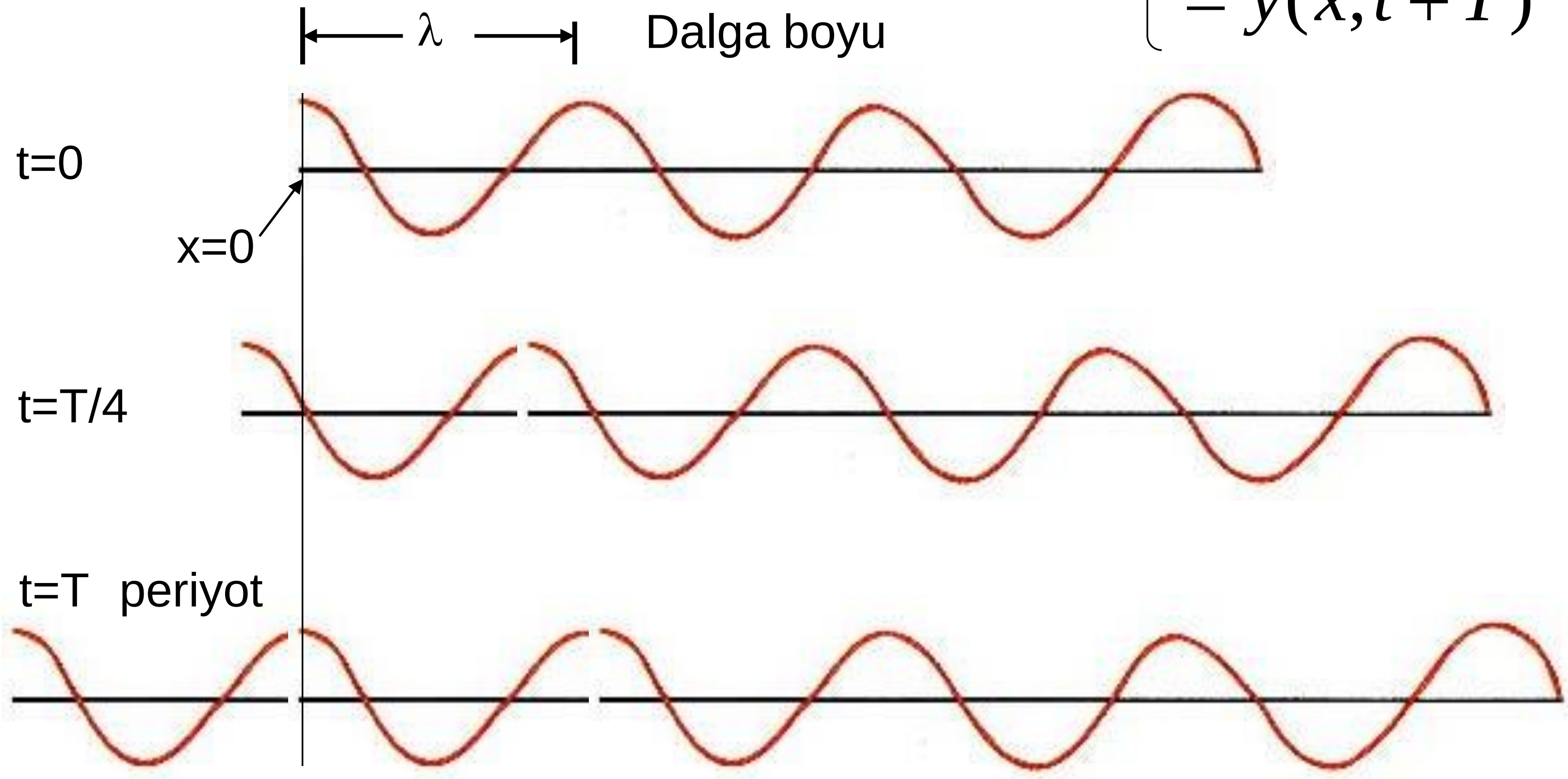
x yönünde hareket eden sinüzoidal dalga v->-v

-Faz hızı

Bir dalganın matematiksel tanımı

- Dalga fonksiyonu

$$y(x,t) = A\cos 2\pi(x/\lambda - t/T)\ \begin{cases} = y(x+\lambda, t) \\ = y(x, t+T) \end{cases}$$



Bir dalganın matematiksel tanımı

- Dalga sayısı ve faz hızı

Dalga hızı: $$k = 2\pi / \lambda$$

$$y(x,t) = A\cos(\underbrace{kx - \omega t}_{\text{phase}})$$

Dalga hızı fazda bir nokta boyunca hareket etmek zorunda olduğumuz hızdır.
Böylece sabit bir faz için,

$$kx - \omega t = \text{Sabit}$$

$$dx/dt = \omega / k = v$$ Faz hızı

Bir dalganın matematiksel tanımı

- Sinüzoidal dalgada parçacık hızı ve ivmesi

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$v_y(x,t) = \partial y(x,t)/\partial t = \omega A\sin(kx - \omega t)$$ Hız

$$a_y(x,t) = \partial^2 y(x,t)/\partial t^2 = -\omega^2 A\cos(kx - \omega t)$$

$$= -\omega^2 y(x,t)$$ İvme

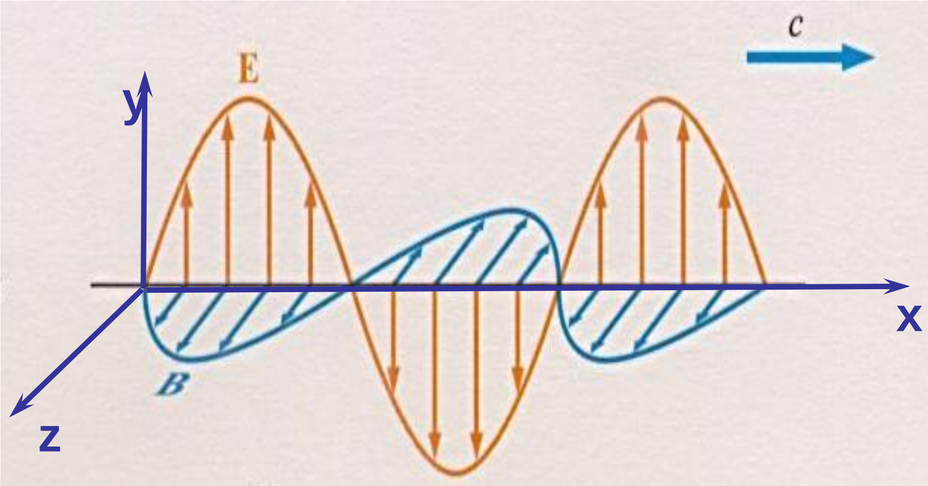
Ayrıca $\partial^2 y(x,t)/\partial x^2 = -k^2 A\cos(kx - \omega t) = -k^2 y(x,t)$

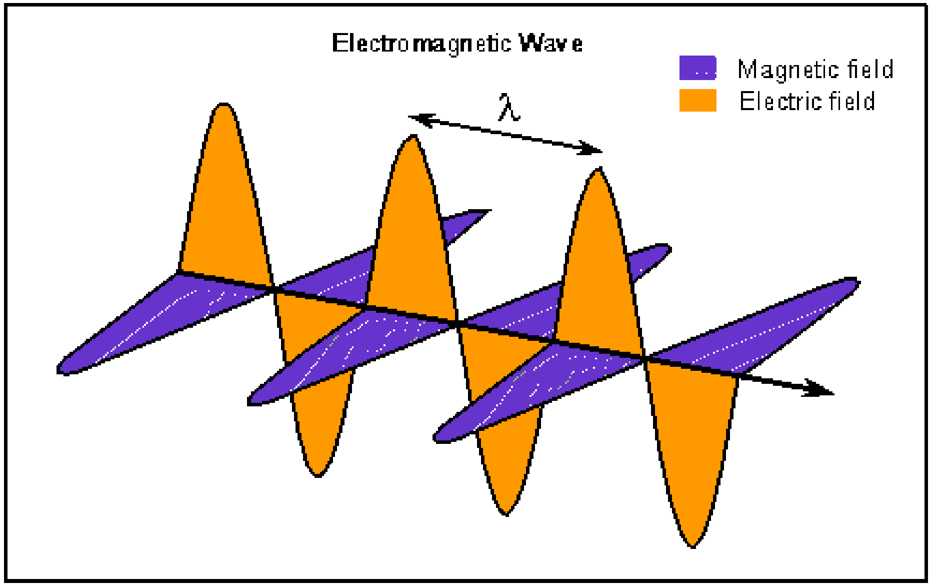
$$\boxed{\begin{aligned}\partial^2 y(x,t)/\partial x^2 &= (k^2/\omega^2)\partial^2 y(x,t)/\partial t^2 \\ &= \partial^2 y(x,t)/v^2 \partial t^2\end{aligned}}$$

Dalga eşitliği

Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlem EM dalgalar

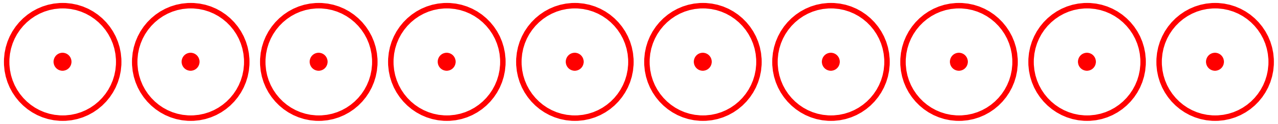




Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı -nitel tanımı

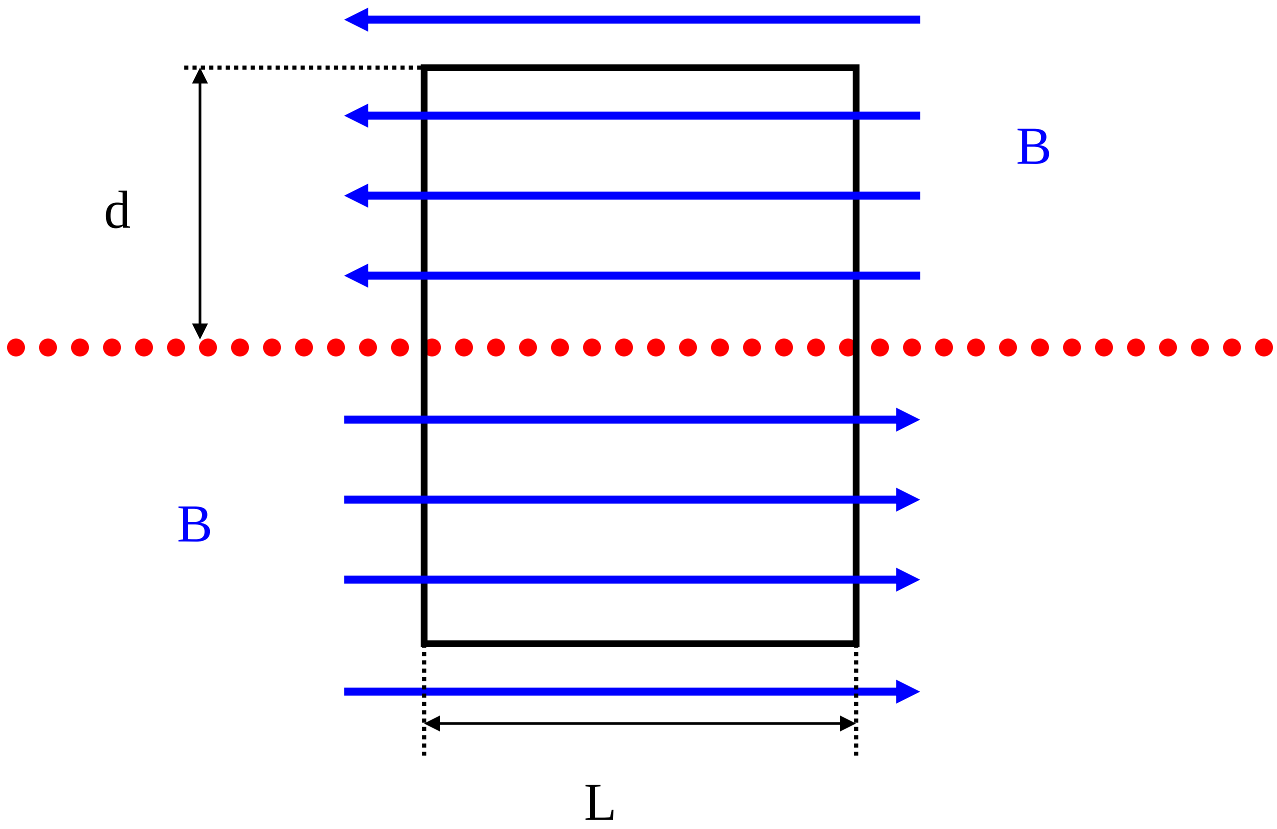
Size doğru akan akımlı ekrana dik bir levha düşünelim.
Aynı yakın aralıklarla birlikte dizilmiş Bir çok paralel
ucuca teller gibi bir levha gözümüzde canlandıralım.



Bu akımdan dolayı manyetik alan bir dikdörtgene uygulanan Ampere kanunu kullanılarak bulunabilir bu yüzden dikdörtgenin üst ve altı akım levhasından eşit uzaklıkta zıt yöndedirler.

Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı -nitel tanımı



Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı -nitel tanımı

Karesel şekle Ampere kanunu uygulandığında,sadece üst ve alttan katkı vardır ,çünkü yanların katkısı sıfırdır. $(\because \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0)$ Üstten ve alttan katkı $2BL$ dir.Levha üzerindeki akım yoğunluğu I A/m ile ifade edilirse , dikdörtgenle kuşatılmış toplam akım IL dir.

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{encl} \rightarrow B = \mu_0 I/2$$

B alan şiddetini levhadan d uzaklığından bağımsız olduğuna dikkat edelim.

Şimdi $t=0$ anında aniden levha içinden akım geçirilirse manyetik alanın nasıl gelişeceğini düşünelim. Burada yeterince kapatılmış levhayı düşünürüz. Ampere kanununu kullanarak bulunan manyetik alan örneği tercihen hızlı bir şekilde kurulur. Bundan başka bir v hızında her iki yönde hareket eden levhadan yayılan manyetik alanı düşünelim , böylece bir zaman sonra levhadan vt uzaklığındaki alan magnetostatik durum için önceden bulunanla aynıdır , ve vt nin ötesinde anlık manyetik olmayan durum vardır.

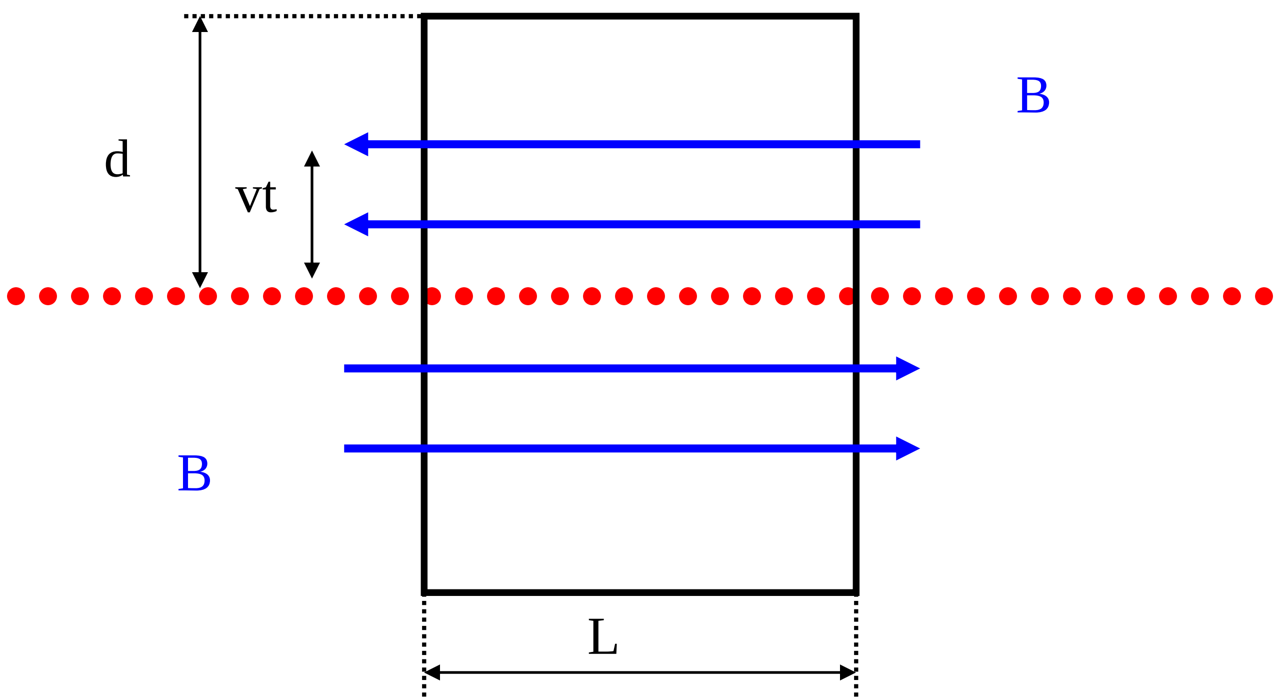
Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı -nitel tanımı

$d < vt$ için B alanında önceki sonuç hala geçerlidir fakat $d > vt$ için ,

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0.$ bununla birlikte tamamen kapalı akım vardır!

Maxwell'in 4.eşitliği ile çalışmaya kendimizi zorlarsak, dikdörtgen şekilden geçen değişken bir elektrik alan olmalıdır.



Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı -nitel tanımı

Maxwell in 4. eşitliği:

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{encl} + \mu_0\varepsilon_0 \boxed{\frac{d}{dt}\left(\int \vec{E}\cdot d\vec{A}\right)}$$

Değişken elektrik alan kaynağı

Şimdi bu elektrik alana bir göz atalım. Bu , (dikdörtgen) şeklin düzlemine dik bir bileşene sahip olmalıdır (*i.e.*, manyetik alana dik diğer bileşenler katkı sağlamadığından ,onları dikkate almayalım).Maxwell'in 4.eşitliğini uygulamak için hazırız:

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0\,;\, I_{encl} = LI \rightarrow \mu_0\varepsilon_0 d/dt\left(\int \vec{E}\cdot d\vec{A}\right) = -LI$$

v hızıyla ilerleyen, B alanının cephesi dışa doğru hareket ettiği sürece,üste ve alta ulaşmayacaktır, Kontur(çevre) boyunca E alanı zamanla lineer olarak artar , fakat artış , cephe üst ve alta ulaştığı anda sıfıra düşer.

Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı- nitel tanımı

E alanının davranışını başarılı bir şekilde tanımlanan bu en basit yol, her noktada manyetik alana dik olan E büyüklüğünde bir elektrik alana sahip olandır , manyetik alan vardır bundan dolayı ayrıca bir elektrik alan v hızında dışa doğru yayılır.

t zamanından sonra, Dikdörtgen kontur(çevre) den geçen E alan akısı yüzeyin elektrik alan katıdır, E(2vtL), ve değişim oranı 2EvL olacaktır :

Önceki analizden, biliyoruz ki:

$$\varepsilon_0 E(2\upsilon L) = -LI$$

$$B = \mu_0 I / 2 = \mu_0 \varepsilon_0 \upsilon E$$

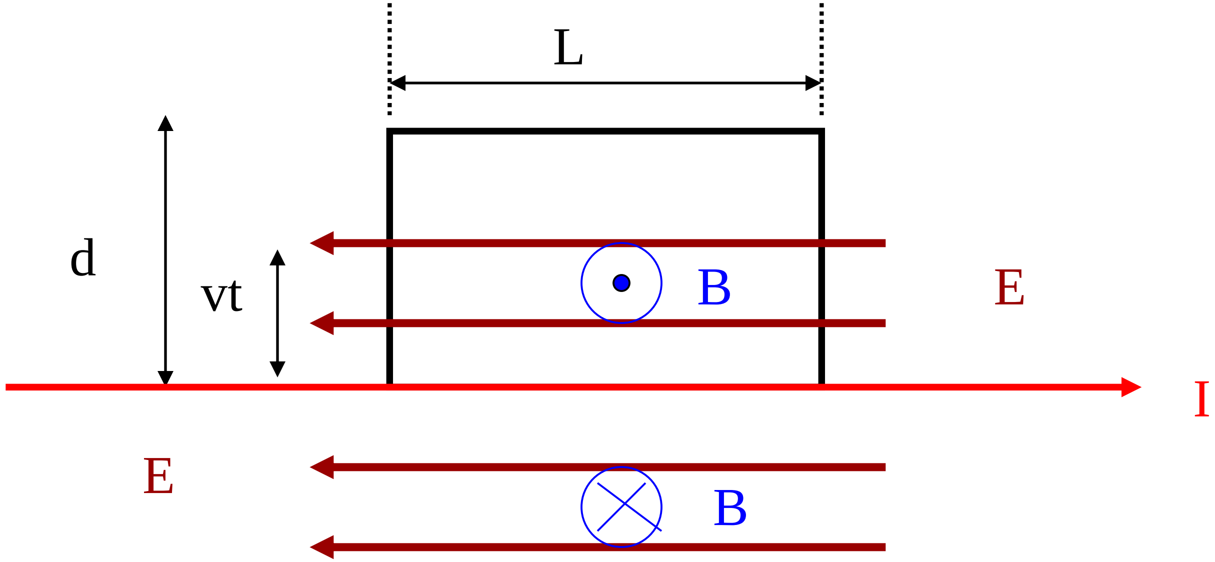
Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Düzlemsel EM dalganın yarı nitel tanımı

Şimdi Maxwell in 3.eşitliğini kullanalım: $\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -d/dt\left(\int \vec{B}\cdot d\vec{A}\right)$

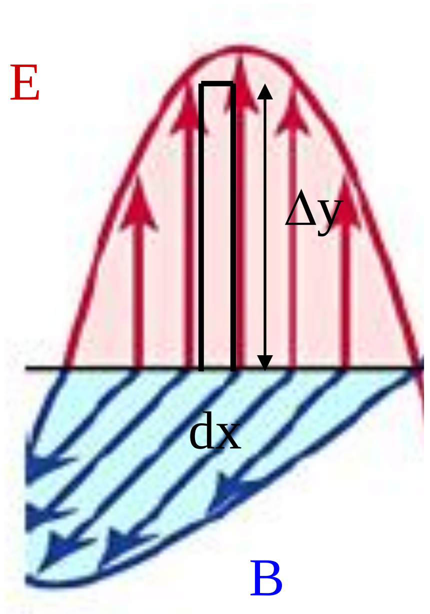
E alanına paralel kenarlara sahip bir dikdörtgen kontura, bu eşitliği uygularız
bir kenar akım levhasının aldığı vt yolundan oluşur,
Diğeri daha uzaktadır bu yüzden yalnızca integrale katkı
bir kenardan EL kadar gelir. Dikdörtgen B akısının alanı bir Lv oranındaki
artıştan geçer bunun için B alanı dışa doğru yayılır. Daha sonra

$EL = \upsilon LB \rightarrow E = \upsilon B.$ $\quad B = \mu_0 \varepsilon_0 \upsilon E$ and $E = \upsilon B \rightarrow \upsilon = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = c!$



Düzlemsel EM dalgalar ve Işık hızı

- Boşlukta Düzlemsel EM dalganın nitel -tanımı



Maxwell eşitliği Q=0,I=0 iken(boşlukta) :

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = 0 \qquad ; \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \; ; \oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

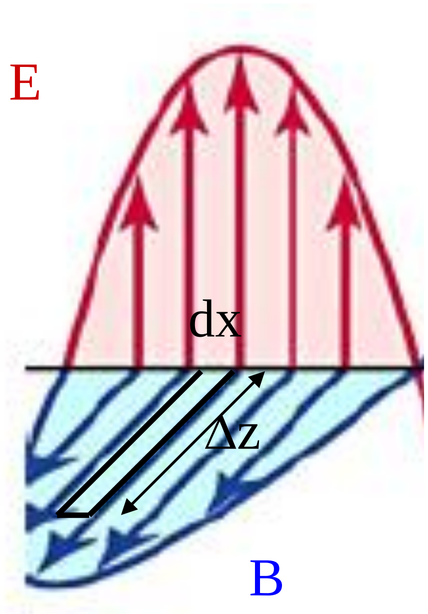
Şekilde gösterilen dikdörtgen yola Faraday kanununu (3rd eşitlik) uygulayalım. E alanı yola dik olduğundan üst ve alttan yola katkı olmaz.

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = (E+dE)\Delta y - E\Delta y = dE\Delta y \; ; \; \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt}dx\Delta y$$

$$dE\Delta y = -\frac{dB}{dt}dx\Delta y \rightarrow \frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt} \rightarrow \boxed{\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}}$$

Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Boşlukta Düzlemsel EM dalganın nitel -tanımı



Maxwell eşitliği Q=0,I=0 iken(boşlukta) :

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A}=0 \qquad ; \oint \vec{B}\cdot d\vec{A}=0$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s}=-\frac{d\Phi_B}{dt} \; ; \oint \vec{B}\cdot d\vec{s}=\mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

Şekilde gösterilen dikdörtgen yola Faraday kanununu (4. eşitlik) uygulayalım. B alanı şekle dik olduğu için kısa kenarlardan katkı yoktur.

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s}=B\Delta z-(B+dB)\Delta z=-dB\Delta z \; ; \; \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}=\mu_0\varepsilon_0\frac{dB}{dt}dx\Delta z$$

$$-dB\Delta z=\mu_0\varepsilon_0\frac{dE}{dt}dx\Delta z \rightarrow \frac{dB}{dx}=-\mu_0\varepsilon_0\frac{dE}{dt} \rightarrow \boxed{\frac{\partial B}{\partial x}=-\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}}$$

Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Boşlukta Düzlemsel EM dalganın nitel -tanımı

t ye göre 2. diferansiyel eşitliğin türevi alınır:

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial^2 B}{\partial t \partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Daha sonra x e göre 1.diferansiyel denklemin türevi alınır:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 B}{\partial t \partial x}$$

$$\Rightarrow$$

$$-\frac{\partial^2 B}{\partial t \partial x} = \boxed{\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}}$$

Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Boşlukta Düzlemsel EM dalganın nitel -tanımı

x ye göre 2. diferansiyel eşitliğin türevi alınır :

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t \partial x}$$

Daha sonra t e göre 1.diferansiyel denklemin türevi alınır :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial^2 E}{\partial t \partial x} = \boxed{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}}$$

Her iki durumda $\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}$, ile υ^2 yi yer değiştirirsek , iki diferansiyel eşitlik

υ hızı ile hareket eden bir dalgayı tanımlayan eşitlikler haline gelir.

Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Boşlukta Düzlemsel EM dalganın nitel -tanımı

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \qquad \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2}$$

Sinüs dalgası olarak düşünülen bu eşitlikleri çözelim:

$$E = E_y = E_0 \sin(kx - \omega t) \text{ and } B = B_z \sin(kx - \omega t)$$

Bu eşitlikleri diferansiyel eşitliklere yazalım :

$$kE_0 \cos(kx - \omega t) = \omega B_0 \cos(kx - \omega t) \rightarrow \frac{E_0}{B_0} = \frac{\omega}{k} = \upsilon$$

$$kB_0 \cos(kx - \omega t) = \mu_0 \varepsilon_0 \omega E_0 \cos(kx - \omega t) \rightarrow \frac{B_0}{E_0} = \frac{\mu_0 \varepsilon_0 \omega}{k} = \mu_0 \varepsilon_0 \upsilon$$

$$\boxed{\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = c} \qquad E_0 = cB_0$$

Boşluktaki ışık hızı!

Düzlemsel EM dalgalar ve ışık hızı

- Madde de EM dalga

Maxwell eşitlikleri madde içinde boşluktakinden farklıdır
μ_0 ve ε_0 $\mu = \kappa_m\mu_0$ ve $\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$'a dönüştürülür:

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{\kappa_m\kappa}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa_m\kappa}}$$

Dielektriklerin çoğu için rölatif geçirgenlik κ_m ,
yalıtkan Ferromagnetik maddelerin haricinde bire yakındır :

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{\kappa_m\kappa}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa_m\kappa}}$$

$$\frac{c}{\upsilon} = n = \sqrt{\kappa_m\kappa} \cong \sqrt{\kappa}$$

Kırılma indisi

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

- Boşlukta toplam enerji yoğunluğu

$$u = \boxed{\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2} + \boxed{\frac{1}{2\mu_0} B^2}$$

Elektrik alanda depolanan enerji yoğunluğu

Manyetik alanda depolanan enerji yoğunluğu

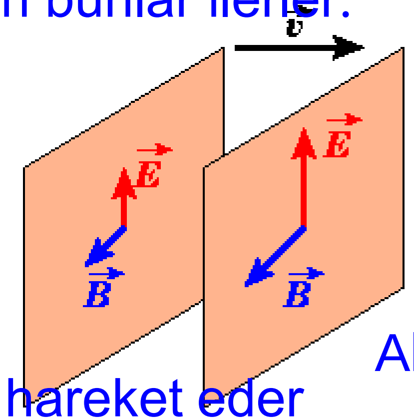
$$B = E/c = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E$$

$$u = \varepsilon_0 E^2$$

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

❑ Elektromanyetik momentum akışı ve Poynting vektörü

- E ve B alanları bölgeler içinde zamanla ilerler ki burada gerçekte alan yoktur ve bunlar u enerji yoğunluğu taşır bunun için bunlar ilerler.



- Enerji transferi,birim alan başına birim zamanda transfer edilen enerji terimleri ile tanımlanır.

Alan A

- Dalga cephesi dx=vdt=cdt den dolayı dt zamanında hareket eder ve dalga cephesi Adx hacmini süpürür. Böylece bu hacimdeki enerji boşlukta:

$$dU = udV = (\varepsilon_0 E^2)(Acdt)$$

- Bu enerji dt zamanında A alanından geçer. Böylece birim alanda birim zaman başına enerji akışı boşlukta:

$$S = \frac{1}{A}\frac{dU}{dt} = \varepsilon_0 c E^2$$

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

- Elektromanyetik momentum akışı ve Poynting vektörü

•B ve E terimlerinde bu niceliği tekrara yazabiliriz:

$$S = \frac{1}{A}\frac{dU}{dt} = \varepsilon_0 c E^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

Birim J/(s m^2) yada W/m^2

• Ayrıca enerji akışının hem yönü hem de büyüklüğünü tanımlayan aşağıdaki ifade elde ederiz:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$$

Poynting vektörü

• Her hangi kapalı yüzey dışına birim zamandaki toplam enerji akışı aşağıdaki gibi verilir:

$$P = \oint \vec{S}\cdot d\vec{A}$$

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

❑ Elektromanyetik momentum akışı ve Poynting vektörü

- Sinüzoidal dalga şiddeti = Belirlenen S nin ortalama değeri :

$$\text{For } \vec{E}(x,t) = E_0 \sin(kx-\omega t)\,\hat{j},\ \vec{B}(x,t) = B_0 \sin(kx-\omega t)\hat{k},$$

$$\vec{S}(x,t) = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}(x,t)\times\vec{B}(x,t) = \frac{E_0B_0}{\mu_0}\sin^2(kx-\omega t)\,\hat{j}\times\hat{k} = \frac{E_0B_0}{\mu_0}\sin^2(kx-\omega t)\,\hat{i}$$

- S nin ortalama değerini belirleyelim :

$$\vec{S}(x,t) = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}(x,t)\times\vec{B}(x,t) = \frac{E_0B_0}{\mu_0}\sin^2(kx-\omega t)\,\hat{i}$$

$$\to S_x(x,t) = \frac{E_0B_0}{\mu_0}\sin^2(kx-\omega t) = \frac{E_0B_0}{2\mu_0}[1-\cos 2(kx-\omega t)]$$

$$\to I \equiv S_{av} = \frac{E_0B_0}{2\mu_0} = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_0^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c E_0^2$$

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

❑ Elektromanyetik momentum akışı ve radyasyon basıncı

•Bu ayrıca genliğin eş momentum yoğunluğu ile p momentumu taşıyan elektromanyetik dalgalarla gösterilebilir:

$$\frac{dp}{dV}=\frac{EB}{\mu_0 c^2}=\frac{S}{c^2}$$

• Benzer olarak bir eş momentum akış oranı elde edilir:

$$\frac{dp}{dV}=\frac{EB}{\mu_0 c^2}=\frac{S}{c^2}, dV=Acdt\rightarrow\frac{1}{A}\frac{dp}{dt}=\frac{S}{c}=\frac{EB}{\mu_0 c}$$

• Birim alan başına transfer edilen ortalama momentum değeri ile $S_{av}=I$ S nin yer değiştirmesi ile elde edilir.

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

❑ Elektromanyetik momentum akışı ve radyasyon basıncı

•Bir elektromanyetik dalga bir yüzey tarafından tam olarak soğrulur . Ayrıca dalganın momentumu yüzeye transfer edilir. Momentumda yüzeye transfer edilen oran yüzey üzerindeki kuvvete eşittir. Dalgadan(radyasyon) dolayı birim alan başına ortalama kuvvet soğrulan A alanı tarafından bölünen dp/dt ortalama değeridir.

$$p_{av} = \frac{S_{av}}{c} = \frac{I}{c}$$

Radyasyon basıncı, soğrulan dalganın tümü

• Dalga tamamen yansırsa, momentum değişimi:

$$p_{av} = \frac{2S_{av}}{c} = \frac{2I}{c}$$

Radyasyon basıncı, yansıyan dalganın tümü

Direk güneş ışığı için I değeri, bu ,yeryüzü atmosferinden geçmeden önce, yaklaşık olarak 1.4 kW/m^2 dir :

$$p_{av} = \frac{S_{av}}{c} = \frac{I}{c} = \frac{1.4\times10^{3}\ \mathrm{W/m^2}}{3.0\times10^{8}\ \mathrm{m/s}} = 4.7\times10^{-6}\ \mathrm{Pa}$$

Elektromanyetik dalgalarda enerji ve momentum

- Elektromanyetik spektrum