



MIT Açık Ders Malzemeleri

<http://ocw.mit.edu>

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

Lütfen aşağıdaki alıntı biçimini kullanınız:

Lewin, Walter, *8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002*  
(Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare).  
<http://ocw.mit.edu> (accessed MM DD, YYYY). License: Creative  
Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike.

Not: Alıntılarınızda lütfen bu materyalin gerçek tarihini kullanınız.

Bu materyalin alıntı olarak gösterilmesi veya kullanım koşullarımız hakkında daha fazla bilgi için, <http://ocw.mit.edu/terms> web sitesini ziyaret ediniz.

MIT Açık Ders Malzemeleri  
<http://ocw.mit.edu>

8.02 Elektrik ve Manyetizma, Bahar 2002

## Transkript – Ders 27

Elektromanyetik dalgalara geçmeden önce, sizinle birkaç mekanik rezonans daha tartışmak istiyorum.

Geçen Cuma telli ve üflemlerli çalgıların rezonansını tartışmıştık.

Fakat çevrenizde sık sık karşılaşacağınız ve muhtemelen bir rezonans frekansına baktığınızın farkına varmadığınız bir çok rezonans olayı vardır.

Trafik işaretlerinin, bazen uygun rüzgar hızlarında böyle bir eğilime sahip olduğuna dikkat etmiş olabilirsiniz.

Çok şiddetli bir genlik; bu bir rezonans yapısıdır.

Şüphesiz evde ya da bir motelde, bir musluğu açtıktan sonra, su belli bir şekilde akarken, birden bire, sıra dışı ve berbat bir ses duyarsınız.

Musluğu biraz daha kapatır ya da biraz daha açarsanız, bu ses ortadan kaybolur.

Bu, açık bir rezonans örneğidir.

Arabanızı sürerken ya da başkasının arabasında giderken, belli bir hızda bazı şeyler takırdamaya başlar. Çok sinir bozucudur.

Biraz daha hızlı sürdüğünüzde bu takırtı durur. Biraz daha yavaş sürdüğünüzde de durur.

Ya da daha da hızlı giderseniz, başka şeyler takırdamaya başlar. Arabada başka bir şeyin rezonansı söz konusu olur.

Ve kuşkusuz, bazı arabalar vardır ki, onların bazı yerleri, her hızda tıkırdar.

Fakat, her durumda, etrafımızda bir rezonans söz konusudur.

Ben öğrenciyken, sevmediğimiz bir akşam yemeği-sonrası konuşmacısı olduğunda, şarap bardaklarımızı çok hızlı bir şekilde bitirdiğimizi hatırlıyorum. -- O günlerde içmemize izin verilirdi --. Bunun ardından çok sinir bozucu bir şey yaptık.

Şarap bardaklarımızın temel frekansını ürettirdik. Parmağınızı alıp ıslatırsınız ve bardağın kenarını böyle ovalarsınız. Dinleyin.

İnanın, 100 öğrenci bunu yaparsa, bu çok sinir bozucu olur.

Fakat oldukça da etkilidir. Konuşmacı --- konuşmacı mesajı çok hızlı bir şekilde alır.

Bardağın yaptığı, temel frekansını çıkarmaktır; bu, en düşük frekanstır. Bardak gerçekten bunu yapar.

Bazı insanların şarkı söyleyerek bardağı kırabildikleri ile ilgili söylentiler vardır.

Bir dakika sonra bunu konuşacağız.

Ticari bir Memorex marka hatırlıyorum. Bir ses bandı.

Bardakları kırmalarıyla övünürler.-- Bazılarınız gerçekten bu piyasa malını görmüş olabilir. Size gösterebileceğim bu piyasa malıyla ilgili bir film var; çok dramatik bir hikaye.

Hikaye şöyledir: Biri konsere gider.

Bir bayan şarkıcı vardır; bardağı masaya koyar; sesini yükseltir; bardağın rezonans frekansına ulaşır ve [pşııvv] bardak kırılır.

Ve bu konserdeki beyefendi bunu kaydeder; kuşkusuz Memorex bandına.

Şimdi bunu, bu slaytı görelim. Tabii eğer slaytı bulursak...Evet ! Bunu, bu bardağı görüyorsunuz; daha iyi odaklayabilirsin John; teşekkür ederim.

Memorex.

Hikaye devam eder; adam eve gider ve bunu eşine anlatır.

Eşi buna inanamayacak kadar zekidir. Fakat adam teybi açar.

Ve konserdeki bardağın kırıldığı anda, evde kendi şarap bardakları vardır; hayret!, onlar da kırılır.

“Evdeki bardakların kırılma nedeni, çok özel bir malzemedен yapılmış olan bu bandın üstün kalitesidir” anlamına gelen bu fikir, bu ticari fikir, Memorex’in en büyük ticari taktiğiydi.

Bu malzeme, kutusunun üzerinde okumuş olabileceğiniz gibi, MRX2 denen çok özel bir kimyasal bileşiktir. İki X atomu, bir R atomu ve bir M atomu; daha sonra bunu oksitlersiniz. Dünyada hayal edebileceğiniz en iyi bandı elde edersiniz.

Ama, onlar küçük bir ayrıntıyı atlamışlar; o da şu: bir ses kayıt cihazı, her şeyden önce, asla ve asla bir bardağı kırmaya yetecek kadar ses üretmez.

Fakat, ikinci olarak, adamın evdeki bardakları, açıkçası konserdeki bardakla tam olarak aynı rezonans frekansına sahip değildir.

Öyleyse bu olay asla meydana gelmemiştir. Fakat tüm ticari reklamlarda olduğu gibi, bunun hile olduğunu biliyorsunuz ve kuşkusuz bu bir istisna değildir.

Bir kişinin, güçlü bir yükseltme yardımı olmaksızın ve hoparlörlerle üretilen muazzam ses şiddetlerinin yardımı olmaksızın bir bardağı gerçekten kırabilmesinin mümkün olup olmadığını daima sorgulamışım.

Her zaman bunu merak etmişimdir. Bunun yapılabileceği söyleniyor.

Ünlü şarkıcı Caruso, bunu yapabilmesiyle tanınırdı.

Bardağı ortaya koyar ve parmağıyla ovalardı; böylece rezonans frekansını öğrenirdi ve devam eder ve bingo

Dürüstçe konuşmak gerekirse, buna inanmıyorum.

Yükseltici ve hoparlörlerin olmaksızın, bunun bir insan tarafından yapılabileceğine inanmıyorum.

Birkaç yıl önce MIT'de Profesör Feld ile birlikte 8.01 dersini verdiğimde, bir bardağı gerçekten de kırabilecek bir şey tasarlama olanağını tartışmıştık

Bununla gerçekten büyük bir saygınlık kazanmıştı. Bir yüksek lisans öğrencisiyle çalışmış ve çoğu kez çalışan bir düzenek tasarlamayı başarmıştı.

Fakat fazla umuda kapılmayın; bu düzenek her zaman çalışmaz.

Burada, onunla aynı seriden olan, bir şarap bardağı var.

Profesör Feld'in bunu çalıştırdığı sıralarda, bu bardaklardan – iyi bir indirimle -- 500 tane satın almıştık; çünkü gelecek yıllarda bu gösteriyi yapabilmeyi sağlama almak istiyorduk.

İşte şarap bardağı burada ve işte hoparlör. Siz buraya gelmeden önce, 488 hertz olarak belirlediğimiz bu bardağın rezonans frekansına yakın bir ses üreteceğiz

Burada bardağı göreceksiniz ve bardağın hareketini, gerçekten, bardağın mükemmel olan o hareketini göreceksiniz. Sesin frekansından birazcık farklı bir frekansla yanıp sönen bir ışık, stroboskop ışığı kullanacağız; böylece bardağın yavaşça hareket ettiğini göreceksiniz.

Sonra hoparlörün sesini artıracamız ve şans eseri, eğer tam rezonans üzerindeyse, bardak gerçekten kırılabilir.

Düşük düzeyde duyacağınız ses, sanırım budur.

Sanırım stroboskop ışığını açtım.

Şimdi ortalığı karartacağım.. Sizi uyarayım; ses oldukça yüksek olacak.

Kulaklarımı kapatacağım, ve sizin de aynısını yapmanız gerekir.

Rezonansa yaklaşıp yaklaşmadığımı anlamak için, ilk olarak sesi artıracamız

Gördüğünüz bu yavaş hareketin nedeni stroboskop ışığıdır; demek ki bardakla tam olarak aynı frekansta değil.

Onu biraz değiştirebilirim. Tamam

Şimdi rezonansa çok yaklaştık. Bardak sese açık bir şekilde tepki vermektedir ve şimdi kulaklarımı kapatacak ve ses seviyesini yavaşça artıracam.

Bundan fazla artıramıyorum.

Çok sert bir bardak.

Çok sert bir bardaktı.

Sanırım, elektronik yardım olmaksızın, bir insanın bardağı kırabilmesinin inanılmaz olduğu konusunda benimle aynı fikirdesiniz artık.

Yıkıcı rezonansın en dramatik örneği, 1940 yılında Tacoma'daki köprünün çökmesidir. Bazılarınız bu dramatik filmi görmüşsünüzdür, bazılarınız görmemiş olabilir. Görmüş olsanız bile, tekrar görmeye değer.

Çok az bir rüzgâr var. Biraz daha fazla bir rüzgâr var. Şu üflemeli çalgılara tam benzer bir durum; hani tüm frekans spektrumunu bir üflemeli çalgıya boca edersiniz ve o rezonans frekansını seçip alır.

Bu köprü de, göreceğiniz gibi, kendi rezonans frekansını seçip alabilir.

Ve sonuçlar oldukça dramatik olur. Marcos, şu filmi başlatabilirsin.

Sene 1940 idi, burada, 11th, Washington Eyaleti'nde

1 Temmuz 1940'ta, şehir temsilcilerinden oluşan bir grup Washington Eyaletinde toplanmıştı.

Hava güzeldi; tarihi bir gün; nutuklar ve resmi geçit hep birlikte uyum içinde.

Bu, Tacoma Boğaz Köprüsü'nün (Tacoma Narrow Bridge) büyük açılışydı.

Seattle ve Tacoma arasındaki Puget Sound ırmağı üzerinde gerili olan köprüde trafik, başlangıçtan itibaren, sorunsuz bir şekilde işliyordu.

Olması gerektiği kadar iyiydi.

Tacoma Narrow köprüsü dünyadaki en uzun asma köprülerinden biriydi.

Ve eğer bir şey gözden kaçırılmamış olsaydı, muhtemelen en uzun köprülerden biri olarak da kalacaktı.

Sorun, pek çok insanın taa başından ayrıntılara fazla dikkat etmemiş olması değildi. Dikkat etmişlerdi.

Fakat hat boyunca bir yerde -- ve son tarafta apaçık – sanki birisi – üstteki şu kabloları bakın – rezonansın önemini unutmuş gibiydi.

Diğer şeylerin arasında, Tacoma Boğaz Köprüsü, tarihteki en muhteşem Aeolien arp rüzgarla ses veren arp oldu.

Ne yazık ki onun ilk konserinin, sadece yaklaşık dört ay kadar sürmesi mukadderdi.

Bu arada, o güzel bir köprüydü. Güzel, fakat biraz tuhaf. Daha yapımı bitmeden önce bile, garip davranışlar sergilediği gözlenmişti.

Bunlar, hafif bir esintide bile köprü boyunca oluşan küçük dalgalanmalardı.

Bir süre sonra, yerel mizahçılardan biri, ona “Gallop dansı yapan Gerty”, yani dörtnala giden adını vermişti. Ve oldukça açık nedenlerden dolayı, bu isim tutmuştu; en azından 7 Kasım 1940’a kadar.

Şimdi olduğu gibi, o zamanlar da Seattle ve Tacoma spora-düşkün şehirlerdi.

Dört aydır rüzgarlı günde köprü boyunca araba sürmek bölgesel bir spordu.

Bazıları bunun inişli-çıkışlı eğlence trenine, roller coaster’a, binmek gibi olduğunu söylerken, diğerleri de öndeki arabanın gözden kaybolmasını şaşırtıcı bulurdu..

Bu köprü sporunun ne kadar popüler olduğunu, ya da tüm ülke boyunca ne derecede yaygınlaşabileceğini herkes tahmin edebilir .

7 Kasım 1940'da, rüzgar orta kuvvetteydi, yaklaşık saate 40 mil. Yeni bir durum ortaya çıkmıştı. Dalgalanmadan ziyade, köprü bükülmeye başlamıştı.

Saate 40 mil hıza sahip rüzgar o kadar güçlü değildir, fakat köprünün şiddetli bir şekilde bükülmesi için yeterliydi.

Yerel bir lisenin fizik öğretmenini aradım; biraz sonra onu göreceğiz. O durumu açıklayabilir.

İşte geliyor.

Oğlunu tanıyorum; babası olduğunu söylemişti.

Başka hiçbir yıkıcı rezonans örneği, bundan daha etkileyici değildir.

Tamam.

Bu kadar eğlence yeter; artık elektromanyetik dalgalara girmeliyiz.

Orada gördüğünüz Maxwell denklemlerine geri dönüyoruz.

Maxwell, Ampere Yasasına eklediği ekstra terimle, yer değiştirme akımı terimiyle ün kazanmış; elektromanyetik dalgaların var olabileceğini önermiş; daha sonra Hertz tarafından keşfedilen radyo dalgalarının varlığını öngörmüştü. Bu, Maxwell kuramının büyük zaferiydi.

Fakat, bugün size göstereceğim gibi, bir başka büyük zafer daha dönemeçte duruyordu. Elektrik ve manyetik alanlar uzay boyunca hareket edebilirler ve Maxwell'in dört denklemini de sağlarlar.

Elektrik alan, değişen bir manyetik alandan kaynaklanır, manyetik alan da, değişen bir elektrik alanından. Biri, diğ erinin kaderinde yazılıdır; diğ eri de onun kinde.

Birlikte uzayda yayılırlar -- boşlukta bile yayılabilirler, hiç bir yükün ve akımın bulunmadığı boşlukta. Çok gizemli.



Dört Maxwell denklemini de sağlayan bir elektromanyetik dalganın olası bir çözümünü yazacağım; bu, aşağıya yazacağım böyle dalgaların grafiksel gösterimidir.

Ve biraz sonra bunu sizinle tartışacağım

Elektrik alan sadece X doğrultusundadır -- bu, genliktir, yani elektrik alanın en büyük değeri – o sadece X doğrultusundadır.

Cosinüs ( $K Z - \omega t$ ). Bu, frekans olup; bu negatif işaret onun + Z doğrultusunda yayıldığını söyler.

E ile ilişkili B manyetik alanı  $B_0$  'dır ve sadece Y doğrultusundadır; aynı kosinüs  $\omega t$  terimine sahiptir.

Bunu  $t=0$ 'da çizersem, o eğriyi hemen şurada, sağda, görüyorsunuz. Ve manyetik alan eğrisini de burada görüyorsunuz.

Manyetik alan sadece Y doğrultusunda ve elektrik alan sadece X doğrultusundadır.

Bu,  $\omega/K$  hızıyla artı Z doğrultusunda, birlikte hareket eden bir dalga paketidir.

Ve buradan buraya olan dalgaboyu,  $2\pi / K$  olur.

Bunlara **düzlem dalga** deriz; onlara düzlem dalga dememizin nedeni şudur: herhangi bir yerde Z'ye dik bir düzlem alırsanız, düzlemin neresinde olursanız olun, o anda, E ve B vektörleri düzlem üzerinde her yerde aynıdır.

Böylece bunu, Z eksenine dik bir düzlem olarak düşünün, bu tüm dalga katarı sizin yanınızdan geçer. Ve elektrik alan vektörünü bunun gibi görürsünüz, sıfır haline gelir, bunun gibi olur, sıfır haline gelir, bunun gibi olur....

Ve manyetik alan vektörü, maksimum, sıfır, bu yönde, ve saire....

Onlara düzlem dalga denmesinin nedeni, işte budur.

Bu denklemler, ancak şu iki koşul altında Maxwell denklemlerini sağlarlar:

Birinci koşul,  $B_0 = E_0/C$  olması; diğer koşul ise,  $C$  ile göstereceğim ışığın yayılma hızının  $\omega/K$  olmasıdır --  $C$  elektromanyetik ışınımın boşluktaki yayılma hızı olup, 1 bölü kare-kök içinde epsilon-sıfır çarpı mü-sıfır'a eşittir.

Eğer durum buysa, iki denklemim de Maxwell denklemlerini sağlayacaktır.

Maxwell'in zaferini hayal edin. Maxwell sadece manyetik dalgaların varlığını değil, aynı zamanda boşlukta bu hızla yayıldıklarını da öngörmüştü.

Ne inanılmaz bir zafer; Epsilon-sıfırın statik yoldan ölçülebileceğini ve Coulomb Yasasından çıkarılabileceğini bir düşünsenize.. Hem de  $dB/dT$  ve  $dE/dT$  ile hiç uğraşmadan... Ve ilerleyen dalgalarla da hiç uğraşmadan.

Epsilon SI birimlerinde yaklaşık  $8.85 \times 10^{-12}$ 'dir.

Mü de, aynı şekilde, statik olup; akım geçirilen iki tel arasındaki çekici kuvvetten ölçülebilir.

Ne  $dB/dt$  ile, ne  $dE/dt$  ile, ne de elektromanyetik dalgalarla uğraşmaksızın.

Mü SI birimlerinde yaklaşık 1.26 çarpı on üzeri eksi 6'dır.

Onları çarpıp ve şu denklemde yerine yazarsanız,  $C$ 'yi bulursunuz: 2.99 çarpı on üzeri 8 metre bölü saniye olarak.

İnanılmaz. Bu kuram için ne büyük bir başarı !.

Böylesine statik bu iki niceliğin, tüm uzayda ilerleyen dalgalarla,  $dB/dt$  ile ve  $dE/dt$  ile görünürde böylesine ilintisiz olarak, ışığın hızını nasıl öngörebildiklerine her zaman şaşırılmışımdır.

Varsayın ki, arabanızın lastiklerindeki basıncı ölçün ve akünüzün voltajını da ölçün diyorum ve sonra sizden arabanızın hızını tahmin etmenizi istiyorum.

Hemen hemen böyle bir şey. Tuhaf.

Fakat çalışıyor... Bu büyük bir zaferdi ve kuşkusuz, yer değiştirme akımını tam olarak doğruluyordu.

Bunun, bu koşulun gerçekten bir gereklilik olduğunu ve böylece bu denklemlerin Maxwell denklemlerini sağlayacağını siz ve ben kanıtlayacağız. Bunu birlikte kanıtlayacağız. %50'sini ben, diğer %50'sini 9 numaralı ödevde siz yapacaksınız.

Böylece bu faturayı % 50 - 50 ikiye ayırmış oluruz.

Yeni bir çizim yapacağım ve derslerde çok seyrek yaptığım bir şeyi yapacağım; zor olan matematiksel kısmın 8 dakikasını size vereceğim

Bundan nefret edeceksiniz. Yeni bir çizim yapacağım; o, şuradakilerden pek de farklı olmayacak. Böylece bu Z, bu X ve bu da Y olsun.

Ve  $t=0$ 'da elektrik alanını buraya şöyle çizeceğim

Böylece bu  $E_0$ 'dır, elektrik alan bu şiddette; şimdi Ampere Yasasını uygulayacağım -- Bu pazarlığın yarısı -- B.dL'nin kapalı halka integrali – burada görüyorsunuz – eşit, epsilon-sıfır çarpı mu-sıfır çarpı  $d(\phi)_E / dt$  'dir.

Boşluk ile uğraşıyoruz; bu yüzden kapp q olur ve dielektrik sabiti de 1'dir

I akımı gibi bir şey yok; çünkü boş uzaydayız; dolayısıyla bu terim tümünden yok

Ampere Yasası neyi gerektir?

Kapalı bir halkaya ihtiyacım var ve bu kapalı halkaya ilüştireceğim açık bir yüzeye.

YZ düzleminde kapalı bir halka seçeceğim. Bu benim kapalı halkam olacak. Buradaki, bu benim kapalı halkam olacak.

Bu uzunluk L'dir, ve bu kenarın uzunluğu -- ya da genişliği --  $\lambda/4$  'tür.

B.dL'nin kapalı halka integralini almalıyım; bunu en son yapacağım.

Sorun, elektrik alanının sabit olmamasıdır.

Burada elektrik alan sıfırdır ve burada bir maksimuma sahiptir ve tekrar bu şekilde düşer.

Böylece bir integral yapmak zorundayım. Burada bir dilim alacağım; bu dilim  $dZ$  genişliğinde. Ve bu çok dar dilimde elektrik alan yaklaşık olarak sabit.

Tam burada elektrik alan bu değere sahip. Fakat bu dilimin her yerinde aynı değer sahip; çünkü bu bir düzlem dalgadır, hatırlayın.

Ve böylece buraya paralel bir çizgi çizeceğim; bu dilimdeki her yerde elektrik alan tam olarak aynı değerdedir. Ve bu değer şu eşitlikle verilir.

Eğer  $t=0$ 'da  $Z$ 'nin ne olduğunu bana söylerseniz, bu değer ne olduğunu bilirim; bu değer işte odur. Öyleyse şimdi elektrik akısını hesaplamalıyım.

$\phi_E$  -- elektrik alan ile  $dA$  çarpımı arasına nokta koymak durumundayım. Akının,  $E$  ile  $dA$ 'nın nokta çarpımı olduğunu hatırlayın.

$dA$ 'yı yukarı doğru seçeceğim, çünkü  $E$  de yukarı yöndedir. Bu da işleri kolaylaştırır; bunu daha sonra hatırlamam gerekir.  $B \cdot dL$ 'nin kapalı halka integralini aldığımda, alt taraftan bakarak saat yönünde gitmeliyim, çünkü sağ-el kuralını hatırlıyorum.

Böylece tüm negatif işaretleri ve pozitif işaretleri tam doğru elde ederim.

Böylece  $dA$  ve  $E$  aynı yönde. Öyleyse bu küçük dilimin  $dA$ 'sı ne olur?

Bu,  $L$  çarpı  $dZ$ 'dir. Böylece  $L$  çarpı  $dZ$ 'yi elde edeceğim.

Bu dilimdeki yerel elektrik alan nedir? Evet; o, bu denklemdir.

Böylece,  $E_0$  çarpı  $\cos(KZ - \omega t)$  elde ederim.

Kuşkusuz  $X$  şapka gider; çünkü  $dA$  ve  $E$  aynı yöndedir; bunu hesaba katmıştım.

Fakat bunun,  $Z = 0$ 'dan  $\lambda/4$ 'e kadar integralini almalıyım; çünkü tüm bu yüzey boyunca integral almam gerekir. Öyleyse cevap -- cevap şudur.

Fakat  $\phi_E$  ile uğraşmıyorum.  $d\phi_E/dt$ 'yi bilmek zorundayım.

Bu sizi epey zora sokacak. Size söyledim, 8 dakika; baş ağrısı.

Bu fonksiyonunun zaman türevini alacağım; böylece  $d\phi_E/dt$  'yi bulacağım.

L ve  $E_0$ , integralin dışına çıkabilir; bu sorun değil, onlar sabit.

Cosinüs( $KZ - \omega t$ )'nin zaman türevini alırım; bir eksi omega çıkar; cosinüs eksi sinüs haline gelir.

Böylece  $-\sin(KZ - \omega t)$  elde ederim.

Ve bir integral almalyım –  $Dz$ 'm burada, 0 dan  $\lambda/4$ 'e integral.

Bu eksi, bu ekseyi götürür.

İntegral almalyım, fakat bunu  $t = 0$ 'da alacağım. Başka bir deyişle, bunlar gider, çünkü  $t = 0$ 'dır. Böylece yaklaşıyorum.

Buraya devam edeceğim; L çarpı  $E_0$  var; bir omegam var, ve şimdi  $\sin(KZ)dZ$  integralini almak zorundayım.

$KZ$ 'den  $K$ 'yı dışarıya almak zorundayım, ki o işte burada; sonra sinüs  $KZ$ 'nin integrali basitçe eksi cosinüs( $KZ$ ) olur ve bunu 0 ile  $\lambda/4$  arasında değerlendirmeliyim.

Cosinüs( $KZ$ )'nin 0 ile  $\lambda/4$  arasında integralini hesaplırsam -1 elde ederim

Eminim, bunu yalnız başınıza yapabilirsiniz. -1 ile çarpımı +1 eder.

Ve böylece yanıt, L çarpı  $E_0$  çarpı  $\omega/K$  olur; fakat boşlukta bunu C olarak adlandıracağız: bu elektromanyetik ışınımın hızıdır. Böylece bu,  $d\phi_E / dt$  'nin sonucudur.

Şimdi  $B \cdot dL$  kapalı halka integralini almalyız. Ve bu kolaydır.

Bu anda B burada maksimumdur, ki o  $B_0$ 'dır; sonra o burada 0'a düşer. Aynısını şurada görebilirsiniz.

Buradan başladığımı varsayın ve buraya, buraya, buraya gidiyorum, ve buraya.

Kapalı halka integrali. Eğer buradan buraya gidersem, B ile  $dL$  90 derece açı yapar.

B size geliyor,  $dL$  bunun gibi. Öyleyse buradan katkı yoktur.

Eğer buradan buraya giderseniz, şey, B doğru boyunca her yerde sıfırdır.

Öyleyse buradan buraya  $B \cdot dL$ 'nin integrali sıfır olur.

Bu bir düzlem dalgadır. Hatırlıyor musunuz?

B burada, şurada ve aynı zamanda burada ve şurada da sıfırdır.

Eğer buradan buraya giderseniz, B ve  $dL$  tekrar 90 derece açı yapar; bu yüzden hiçbir katkı olmaz; böylece sadece bu kısımdan dolayı bir katkı vardır.

Ve bu,  $B_0$  çarpı L'nin uzunluğudur.

Ve şimdi neden genişliği  $\lambda/4$  seçtiğimi anlıyorsunuz; böylece çok kolay bir sonuç elde ediyorum.

Dolayısıyla, şunu bulurum:  $B_0$  çarpı L, ki bu Amper Yasasının sol tarafıdır – aslında burada Amper'e kredi vermek insafsızlık olur – aslında tüm kredi Maxwell'edir, çünkü  $d\phi_E / dt$  terimini o eklemiştir.

Ve böylece bu, şimdi, epsilon-sıfır mü-sıfır –orada pay'da görüyorsunuz – çarpı burada bulduğumuz sonuç.

Oohhh, bu arada, bu  $E_0$ 'dır. Çarpı L, çarpı  $E_0$ , çarpı C. Ve L'yi yok ediyorum.

Size henüz önemli gelmese de, oldukça önemli bir sonuç görüyorsunuz.

Bunun nedeni, diğer yarısını sizin yapacak olmanızdır. Faraday Yasasını uygulayacaksınız benim için.

Ben sadece Ampere Yasasını uyguladım; 9. ödevde bu bağıntıyı kullanacaksınız; o, bunu ispatlamanızı sağlayacak.

Bir kere buna sahip olunca,  $B_0$  ve  $E_0/C$  'i yerlerine yazdığınızda, hemen ışığın hızının bu olacağını göreceksiniz.

Bu sizin ödeviniz. Böylece bunu bitirdim.

Sizin işiniz benimkinden kolay değil; ayrıca size bu çeyrek dalga numarasını kullanmanızı da öğütlerim.

Tamam... böylece gösterebilirsiniz ki, bu denklemlerin dört Maxwell denklemini de sağlaması için, gerekli bir koşuldur.

İlerleyen elektromanyetik dalgalar, daima aşağıdaki özelliklere sahiptir. Bu Web'te var; indirebilirsiniz.

E, V'ye diktir. Dikkat ederseniz, bu, benim seçtiğim bir şeydir.

E, V'ye diktir.

V, Z-yönündedir ve E de bunun gibidir; böylece bunu seçme nedenim, açıkça budur.

B de, V'ye diktir. Burada B, Y-yönündedir. Sadece Y-yönünde.

Aynı zamanda, Z-yönündeki V'ye diktir.

E, aynı zamanda B'ye diktir. Yaptığım şey, işte budur.

x-yönündeki E, Y-yönündeki B.

E ve B aynı fazdadır

Bu, şu demektir: Bu,  $\cos(KZ - \omega t)$  ise, bu da  $\cos(KZ - \omega t)$  olmak zorundadır. Onlar aynı anda sifıra gider ve aynı anda maksimuma ulaşırlar.

Gerekli olan bir koşul da şudur: E vektörel çarpım B, birim vektörü, V yönündedir.

Şuna bakın, yaptığım tam olarak bu işte. Eğer E'yi alır ve onu B ile vektörel çarparsanız, Z-yönüne doğru gidirsiniz.

Aslında, her ne zaman böyle çizimler yaparsanız; daima sağ-elli dediğimiz koordinat sistemini kullanın; bu sistemde, X şapka ile Y şapkanın vektörel çarpımı daima Z şapkadır. Bunu yapmazsanız, kendinizi bulanık suya atmış olursunuz.

Boşlukta olduğunuzda,  $E_0$  ve  $B_0$  arasında Faraday Yasasıyla kanıtlayacağınız bir ilişki vardır; bu, benim sonuçlarımla bir araya getirildiğinde, elektromanyetik ışınımın boşluktaki hızı, 1 bölü kara-kök epsilon-sıfır çarpı mü-sıfır çıkar.

Elektromanyetik ışınımın frekansını biliyorsanız, o zaman dalga boyunu bulursunuz. Burada sizin için hesapladığım birkaç örnek var.

1000 Hertz gibi düşük bir frekansla başlarsanız, 300 kilometrelik bir dalga boyu elde edersiniz; sonra radyo dalgaları, megahertz'lerde hala radyo dalgalarından söz ediyoruz. Fakat frekansı daha da fazla arttırdığınızda, tabii ki dalga boyu gittikçe azalacaktır; biz bunlara radar dalgaları, mikrodalgalar diyoruz.

Eğer  $10^{14}$ ,  $10^{15}$  Hertze çıkarsanız, kızılötesi, görünür ışık ve ultraviyole bölgelerine varırsınız; daha da yüksek frekanslarda, X-ışınlarına ve sonunda gamma ışınlarına ulaşırsınız.

Tüm bunlar elektromanyetik ailenin, elektromanyetik dalgaların üyeleridir.

Bu, üstünde küçük sıfırıyla Å, angstromu gösterir. Ve  $10^{-10}$  metre demektir.

Elektromanyetik dalgalar ailesinin üyelerine çeşitli isimler veririz, böylece belirli frekanslardan veya dalga boylarından bahsetmeksizin, onlardan söz edebiliriz.

Elektromanyetik dalgalar saniyede 300.000 km hızla yayıldıkları için, bir adımı bir nanosaniyede alırlar.

Bu salon, 30 metre aşağıda.

Işık, benden Prof. Bertozzi'ye bu yolu 0.1 mikrosaniyede alır.

Işık, radyo dalgaları bir saniyede aya ulaşır. Güneşten ışığın bize ulaşması sekiz dakika alır. En yakın yıldızlardan ışığın bize ulaşması beş yıl alacaktır.

Işık, en yakın büyük galaksiden dünyamıza ancak iki milyon yılda ulaşır.

Bu yüzden galaksiye baktığınızda, onun iki milyon yıl önceki halini görürsünüz.



Astronomide, metre çubuğu olarak, ışığın bir yılda aldığı yaklaşık  $10^{16}$  metre olan mesafeyi kullanırız.

Eğer 10 milyar ışık-yılı uzaklıktaki bir galaksiyi inceliyorsanız evrenin 10 milyar yıl önceki haline bakıyorsunuz demektir.

Böylece astronomide geçmiş dakikalara bakabilirsiniz, geçmiş yıllara, geçmiş milyon yıllara bakabilirsiniz ve hâttâ milyarlarca yıl gerilere de bakabilirsiniz.

Elektromanyetik ışınımın pek çok çeşidi, -- kuşkusuz ışık, radyo dalgaları, ve radar dalgaları -- yüzeylerden yansiyabilirler. Bu, en azından, bir dereceye kadar, yüzeye bağlıdır.

Ve mesafe belirlemenin arkasındaki temel fikir budur.

Bir uçağa, ya da yağmur fırtınasına, bir radar atması gönderdiğinizde, bu ışınımın bir kısmı size geri dönecektir. Hızı biliyorsunuz, öyleyse bu sizin mesafeyi ölçmenize olanak sağlar.

Eğer yüzeyin uzaklığı  $D$  ise ve kısa bir sinyal gönderirseniz, sinyal geri döner - buna yankı denir -- geri dönmesi ölçebileceğimiz belirli bir zaman alır; bu durumda sinyal iki kez bu uzaklığı kat etmiştir. Böylece bu, ışık hızı ile  $T$ 'nin çarpımıdır. Ölçeceğiniz şey, sinyali gönderip yansıyan sinyali tekrar alıncaya kadar geçen süredir; böylece uzaklığı hesaplayabilirsiniz.

Aya olan uzaklık bu şekilde ölçülebilir. Ay üzerinde beş köşe yansıtıcısı vardır.

Üçü oraya Amerikalılar tarafından bırakılmıştı; ikisi de Sovyetler tarafından -- o zamanlar Sovyetler Birliği idi.

Optik teleskoplar dünyadan bu yansıtıcılara kısa bir atma, bir lazer atması gönderebilir. Zaman, bu sinyalin zamanca uzunluğu, sadece çeyrek nano-saniyedir.

Sadece şunu hayal edin; ışık çeyrek nano-saniyede sadece 7 cm hareket eder.

Elde ettiğiniz dalganın cinsi, aslında bir düzlem dalgaya o kadar da çok benzemez.

Fakat, ne olursa olsun, bu atma aya gider, sonra bir kısmı geri döner, bu radarlardan -- radarlardan değil – köşe yansıtıcılardan geri yansır; o ışıktır. Lazer ışığı.

Her bir atmada yaklaşık  $2 \times 10^{17}$  foton vardır. Ve sadece her 10 atmadan biri geri dönmektedir. Yani çoğu geri gelmez.

Fakat bu yeterlidir. Bizim ile yansıtıcılar arasındaki doğru uzaklığı saptamak için onları toplarsınız; doğruluk yaklaşık 10 cm'dir.

Ve amaç aslında ayın gerçek yörüngesini elde etmektir.

Bu köşe yansıtıcılarından dünyada kurulmuş olanları size gösterebilirim; sonra size aya çeyrek nanosaniyelik atmaları, lazer sinyalinin gönderen bir optik gözlemevi de göstereceğim.

Bu, köşe yansıtıcılardan biridir.

Onlar öyle tasarlanırlar ki, ışık ona belli bir doğrultuda çarparsa, o da ışığı tam olarak aynı doğrultuda, 180 derece, geri yansır. Çok zekice bir tasarım.

Ve gelecek slaytta Texas'taki McDonald Gözlemevi'nin aya gönderdiği bir kısa atmayı, lazer ışığını göreceksiniz, ve burada gördüğünüz şey, basitçe dünya atmosferindeki tozun saçtığı bir ışıktır.

Sonra bunun çok az bir kısmı geri gelecektir. Fakat aya olan mesafeyi ölçmek için bu yeterlidir. Ayın üzerinde – John, bu slayt için, bu kadar yeter – evet, ayın üzerinde birçok kamera vardır.

Onlar keşifçiler tarafından oraya bırakılmıştır; çok küçük kameralardır.

Mercekleri, sadece 2 inç boyundadır. Ve onlar sürekli dünyayı gözlem altında tutarlar.

Asla düşünmeyeceğiniz bir şey, ama eğer ayda olsaydınız, ve dünyaya baksaydınız; dünya oradadır ve şu andan, diyelim ki bir saat sonra dünya hala orada olacaktır.

Şu andan 10 saat sonra da dünya orada olacak ve şu andan 10 yıl sonra da dünya hala orada olacaktır.

Aydan görüldüğü kadarıyla, dünya asla hareket etmez. Kuşkusuz, kendi eksenini etrafında dönecektir. Bunu göreceksiniz.

Dünyanın belli yerlerinin gecede, diğer yerlerinin gündüzde olduğunu da göreceksiniz; bu farklıdır, fakat o her zaman aynı yöndedir.

Böylece, bu kameraların, deyim yerindeyse, gözlerinin bizim üzerimizde olması çok kolaydır. Yapmanız gereken tek şey, onları bir yöne yöneltmek ve asla bu yönü değiştirmemektir.

Şimdi sizin ve benim ayda olduğumuzu ve dünyaya baktığımız hayal edin. Ve dünyayı, örneğin, burada gördünüz gibi görüyorsunuz.

İşte Kuzey Amerika ve şimdi dünyanın bu kısmı aydınlık ve buraları gecede.

Ve şu an, bu kameraların dünyanın fotoğrafını çekecekleri an olsun.

Dolayısıyla, burada çok fazla ışık görmeyi umarsınız ve burada gece olmasını. Burası New York.

New York'tan o kadar çok ışık gelmektedir ki gerçekten New York'u görebileceğinizi düşünebilirsiniz. Kameralar tarafından çekilen fotoğraflar size New York'u gösterebilir.

Ama, göremezsiniz; fakat çok dramatik başka bir şey göreceksiniz; bunu size göstermemin nedeni bu. -- Çünkü şimdi göreceğiniz fotoğraf, John gösterebilirsin -- dünyadaki iki gözlemevinin ikisinin de bu pulsları aya gönderdikleri andır.

Ve burada Arizona'dakini görüyorsunuz ve burada da diğerini, Kaliforniya'dakini.

Fakat New York'u görmüyorsunuz. Şaşırtıcı değil mi?

Aydasınız ve dünyada gerçekten hayat olduğunu biliyorsunuz. Biri size göz kırptıyor.

Göz kırpmayı görmüyorsunuz, fakat bu ışıkları görüyorsunuz. Çok dramatik bir poz.

Teşekkür ederim John, çok güzeldi.

Radio dalgaları, titreşen yükler tarafında üretilebilir.

Gelecek derste, bu konuda daha çok şey anlatacağım.

Anten denen tellerden alternatif akım geçirirsiniz; -- bu bir antendir -- ve böylece elektromanyetik dalgalar oluşturursunuz.

Radio istasyonları iyi-belirlenmiş frekanslarda yayın yaparlar.

Örneğin WEEI 850 kilohertzde 353 metre dalga boyunda yayın yapar. 850 kilohertz oldukça yüksek bir frekanstır.

Nasıl oluyor da bunları duyabiliyorum; bu müziği nasıl, konuşan bu kişiyi nasıl duyabiliyorum?

Bu sinyal – buna **taşıyıcı dalga** diyoruz -- modüle edilir.

Bu sinyalin şiddeti, ses frekansı ile modüle edilir; bu yüzden, buna **genlik modülasyonu** deriz.

Örneğin, bu sinyale zamanın fonksiyonu olarak bakarsanız, işte bu, o sinyalin ses modülasyonu olur.

Fakat yayımcı 850 kilohertz yayacaktır. Burada sinyal biraz daha şiddetli ya da zayıf olabilir. Ve bu 1000 hertz tonuysa, bu 1 milisaniye olmalıdır.

Alıcı ucunda siz radyonuzu ayarlarsınız; radyonuzun içinde bir yerde olan kondansatörünüzü değiştirirsiniz, bir LRC devreniz var, böylece tam olarak 850 kilohertz rezonansına ulaşabilirsiniz -- 840 kilohertzde rezonansta olmadığınız için, başka istasyonları duymazsınız -- gerçekten frekansı tam olarak bir istasyon üzerine ayarlarsanız, böylece bu sinyali alabilirsiniz.

Daha sonra sadece bu ses zarfını duymak için, modülasyonu çözecek bir şeyler yaparsınız; böylece konuşmayı, müziği duyarsınız. Fikir, bu.

Tam burada, 26-100 Nolu Salonumuzda bir vericimiz var; seçtiğimiz hemen hemen her frekanstaki sesi yayabilirim.

Sizin şerefinize şuna karar verdik: 1kilohertz'lik ses sinyalini 802 kilohertzde yayacağız. 802, sizin şerefinize seçilmiştir.

802 kiloHertz'te hiçbir radyo istasyonu yoktur. Dolayısıyla, bu yapılması gereken iyi bir şey. Hiç kimseyle girişmeyeceğiz.

Burada onu yayınlayacağız, burada bir radyomuz var, orada 802 kilohertz'deki sinyali arayacağız.

Önce bunu yapacağız; sonra bunun kadar hoş olmayan diğer şeyleri yaparız.

Marcos, doğru frekansları elde etme hususunda gerçek bir uzman. Bu konuda bana yardım etme sözü verdi; çok güzel.

Ooh, hemen başlamışsınız bile, şimdi 802 kilohertz'de bir sinyal veriyoruz ve istasyon – yani bizim radyomuz -- bunu alıyor.

Marcos, çocukları inandırmama izin ver lütfen. İşte, frekansı değiştirdiniz.

Evet. Ses sinyalini değiştirdi.

Böylece sizin bunu takdir etmenizi istiyorum; aslında onu -- fişi çıkararak -- bu antenden yayıyoruz.

şimdi radyo, 802 kiloHertz'teki elektromanyetik dalgaları görmüyor,

radyo şimdi alıyor, ürettiğimiz radyo dalgalarını.

Şimdi o kadar da güzel olmayan bir şey yapacağız.

Frekansımızı 850 kilohertz'e değiştirelim. Şimdi yaptığımız şey, WEEL spor kanalında parazit oluşturmaktır.

Bizim 1 kilohertz'lik sinyali duyabilirsiniz. [ses] fakat ne söylediklerini duyamazsınız.

Şu parazitliği yapmadan önce, ilkin WEEL'yi dinleyebilir miyiz?



Bu WEEI mi?

Şimdi hiç yasal olmayan bir şey yapıyoruz.

Aslında daha kötüsünü de yapabiliriz.

Radyoda ben de olabilirim.

Mikrofonumu kapatmam gerekecek, çünkü aksi halde sesin radyodan mı, yoksa mikrofondan mı geldiğini bilemezsiniz.

Merhaba, merhaba. Beni duyabiliyor musunuz?

Burası radyo WHTL; bu Cambridge bölgesinde korsan bir istasyondur; şimdi 850 kilohertzde yayın yapıyoruz.

Haftalık programlarımız, bilimdeki en son heyecan verici şeyler hakkında.

Tabii ki bunun tamamen yasadışı olduğunun farkındayız. Bu yüzden, bundan çok hoşlanıyoruz.

İlk programımıza gelecek pazartesi saat 10'da başlayacağız. Herhangi bir sorunuz varsa, çekinmeden Harvard Üniversitesi Fizik bölümüne sorabilirsiniz.

Gelecek derste görüşmek üzere.