

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 26 İlerleyen Dalgalar ve Duran Dalgalar

Bugün, dalgalar üzerine genel bir tartışmayla başlayacağız; bu, gelecek hafta tartışacağımız elektromanyetik dalgalara bir giriş olacak.

Pratik bir denklemlle başlıyorum:  $Y$  eşittir  $\frac{1}{3} X$ .

Sizin için bunu çiziyorum; burası  $Y$ ' dir ve burası  $X$ ; bu ise başlangıçtan geçen düz bir çizgidir:  $Y$  eşit  $\frac{1}{3} X$ .

Şimdi bu doğrunun hareket etmesini istediğimi var sayın.

Bu doğrunun 6 m/s'lik bir hızla, artı  $X$  yönünde hareket etmesini istiyorum.

Şimdi tek yapacağım şey, bu denklemdeki  $X$  'i,  $X - 6t$  ile yer değiştirmektir.

Eksi işaretine dikkat edin. Bu durumda, artı  $X$  yönünde gideceğim.

Böylece bu denklem,  $Y$  eşit  $1$  bölü  $3$  çarpı  $X - 6t$ 'ye eşit olur.

$t=1$  olduğunda, ona bakın.  $t=0$  olduğunda, zaten bu doğruya sahipsiniz.

$t=1$  de, şimdi  $Y$  eşit  $\frac{1}{3} X - 2$ 'ye sahipsiniz.

Bu demektir ki, onu burada  $- 2$  de kesecek ve orada  $+ 6$  da kesecek. İlk doğruya paralel bir doğru. Bu doğru şimdi  $t = 1$ , bu doğru ise  $t = 0$  'dır.

Ve bu, 6 m/s'lik bir hızla bu yönde hareket etmiştir.

Böylece bu bize şunu anlatıyor: Eğer bir şeyi daima artı X yönünde V hızı ile hareket ettirmek istersek; tek yapacağımız, denkleminizdeki X 'i  $X - V t$  ile yer değiştirmektir; yok eğer eksi X yönünde hareket ettirmek istersek, o zaman da X 'i  $X+V t$  ile yer değiştiririz. Yapmamız gereken tam olarak budur.

Şimdi, bunu gerçek bir dalga olan, şöyle bir şeyle değiştireyim.

Şimdi Y eşit  $2 \sin 3X$  'e sahibim.

Bu bir dalgadır. O hareket etmiyor; henüz etmiyor.

Böylece X'in bir fonksiyonu olarak Y'nin grafiğini çizebilirim; bu grafik, bunun gibi bir şey olur.

Bu sıfırdır, böylece sinüs sıfır olduğunda, bu pi bölü 3'tür, ve bu 180 derecedir ve o gene sıfırdır; bu  $2\pi$  bölü 3'tür, o tekrar sıfır olur.

Dalgaboyu olarak adlandıracağımız lamda, bu durumda buradan buraya, bu  $2\pi$  bölü 3'tür, bu da buradan oraya gider.

Sık sık karşılaşacağınız bir K sembolü tanımlayacağım; bunu dalga sayısı olarak adlandıracağız. Bu K, basitçe,  $2\pi$  bölü lamda olarak tanımlanır.

Buradaki özel durumumuzda  $K = 3$ 'tür. Burada K budur.

Bu sayıyı bilerseniz, dalga boyunun ne olduğunu derhal söyleyebilirsiniz.

Şimdi, bu dalgayı hareket ettirmek istiyorum. İlerleyen bir dalgaya sahip olmak istiyorum.

Onu artı X yönünde 6 m/s hızla hareket ettirmek istiyorum.

Artık reçete çok basittir: tek yapacağım, bu X ile  $X - 6t$ 'yi yer değiştirmek.

Böylece, Y eşittir  $2 \sin [3(X-6t)]$  bağıntısını elde ederim.

Şimdi bu eğriye, bu eşitliğe bakarsanız, ve onu  $t_0$  'dan biraz sonraki bir zamanda çizerseniz -- bu henüz  $t_0$  -- onun gerçekten artı X yönünde hareket etmiş olduğunu görürsünüz.

O, 6 m/s'lik bir hızla hareket etmektedir.

Böylece bu denklem, ona baktığınızda, salınımın tüm karakteristiklerini taşımaktadır.

Genliğe sahiptir. Bu 2, genliktir. Bu  $-2$ 'dir, bu da genliktir.

Bu bilgi, K, dalgaboyu üzerindeki bilgiyle uyuşur ve bu bilgi size hızın ne olduğunu söyler.

Ve bu eksi işareti, ki önemlidir, size onun eksi X yönünde değil de artı X yönünde gitmekte olduğunu söyler.

İlerleyen böyle bir dalga yapabilir miyiz?

Evet, gerçekte bunu çok kolay bir şekilde yapabiliriz.

Burada dönen bir tekerleğe sahip olduğumu varsayın -- omega açısal frekansı ile dönsün ve bir R yarıçapına sahip olsun, ve burada sahip olduğum aynı genliği elde edebilmek için onun büyüklüğüne 2 diyelim.

Ona bir ip bağlıyorum ve ipi biraz geriyorum, öyle ki tekeri döndürdüğümde bir dalga yaratabiliyorum. Evet, ip buraya bağlı; tekeri döndürdüğüm zaman, dalga belli bir hızla, diyelim ki V hızıyla, ip üzerinde ilerleyecektir.

Böylece ilerleyen bir dalga üretebilirim.

Bir titreşim periyodu -- eğer siz ip üzerinde burada olsaydınız, yukarıya giderdiniz, aşağıya giderdiniz, yukarıya giderdiniz, aşağıya giderdiniz, dalga geçtiğinde, yapacağınız tamamıyla bu olurdu -- evet, bir tam titreşimin periyodu, açıkça, bu omega bölü 2 pi 'dir.

Ürettiğiniz lamda dalgaboyu -- buradan buraya lamdadır --, şey, onun ilerleme hızını bilerseniz ve büyük T saniye, bir titreşim, hareket etmiş olduğunu bilerseniz; bu, bir lamda mesafesidir.

Böylece bu,  $V$  çarpı büyük  $T$ 'dir.

Fakat bu, aynı zamanda  $V$  bölü  $F$ 'dir; burada  $F$ , Hertz cinsinden frekanstır.

Ve böylece  $F$  frekansı, hız bölü  $\lambda$  olarak da verilir.

Böylece bu denklemi biraz farklı bir yapıda yazabilirim:  $Y$ , eşit  $2$  çarpı sinüs,  $3$ 'ü içeriye geçirip argümanı  $3X-18t$  olarak elde ederim.

Bu  $18$ , omegadır. Bu, omega  $t$  'dir. Tüm zaman bilgisi, buradadır.

Omega, periyot  $T$ , her şey buranın içindedir.

Tüm uzaysal bilgi ise burasıdır. Bu  $K$ 'dır.  $\lambda$  hakkında bilgi burada.

Böylece omegayı bilirim, ve de  $K$ 'yi bilirim; bu durumda, hızı da bilirim; ki hız, omega bölü  $K$  'dir.

Böylece her şey bunun içindedir; omega bölü  $3$ , bana  $6$  m/s 'lik hızımı geri verir.

Dolayısıyla, bir kez bu denkleme sahip oldunuz mu, size dalga hakkında her soruyu sorabilirim ve siz de onu cevaplayabilmelisiniz.

Dalgaboyu, frekans, hertz cinsinden, saniye başına radyan cinsinden, hız, her şey.

“Bunları bizimle niçin tartışıyorsunuz?” diye sorabilirsiniz. Gelecek hafta elektromanyetik dalgaları ele alacağız. Elektromagnetik dalgalarda,  $\lambda$  dalarını göreceksiniz, omegaları göreceksiniz, büyük  $T$  'leri göreceksiniz, frekansı göreceksiniz,  $K$  'leri göreceksiniz; velhasıl burada gördüğünüz her şeyi gelecek hafta göreceksiniz.

Bir tek farkla; bu  $Y$  yerdeğiştirmesi, santimetre veya metre cinsinden olmayacak, fakat o bir elektrik alanı olacak, ilerleyen bir elektrik alanı, volt bölü metre.

Veya ilerleyen bir manyetik alan, Tesla.

Bunun dışında, tüm bu nicelikler tam olarak aynı şekilde geri dönecek.

Şimdi sizinle önce duran dalgayı tartışmak istiyorum; çünkü duran dalgalar önemli olacak.

Bu, bir ilerleyen dalgaydı.

Şimdi daha merak uyandırıcı bir şey geliyor; bir duran dalga.

Bu yönde ilerleyen bir dalgaya sahip olduğumu varsayın; ona  $Y_1$  diyeceğim;  $Y_1$  eşit  $Y_0$  genliği çarpı sinüs ( $K X - \omega t$ ).

Dikkat ederseniz, burada tanıdığımız tüm semboller var.

Burada  $K$  var, burada  $\omega$  var, ve burada genlik.

Eksi işareti, onun artı yönde gittiğini söylüyor, [ $wışışt$ ],.

Fakat başka bir dalgaya daha sahibim.

Ve bu dalga tam olarak birincisine özdeş; genlik açısından, dalgaboyu açısından, frekans açısından özdeş; fakat bu yönde hareket ediyor.

Böylece bu  $Y_2$  dalgası, eşit  $Y_0$  çarpı sinüs ( $KX + \omega t$ )'dir.

Bu artı işareti, onun bu yönde gittiğini söylüyor.

Ve bu bir ip ise, net sonuç ikisinin toplamıdır. Böylece onların toplamına sahibim.

Böylece  $Y$  eşittir  $Y_1 + Y_2$ .

Şimdi bazı trigonometrik işlemler yapmak zorundayım, ama bunu size bırakıyorum -- bunu siz yapın; bu lise konusu -- ikisini toplarsanız, şunu bulursunuz:  $2Y_0$  – genliğin iki katına çıktığına dikkat edin – kere  $\sin(KX)$  kere  $\cos(\omega t)$ .

Bu, onların ikisinin toplamıdır. Ve bu ilerleyen dalgadan çok farklıdır.

Artık hiçbir yerde  $K X - \omega t$  görmüyorsunuz.

$KX$  burada, ayrı olarak sinüsün altında ve  $\omega t$  ayrı olarak kosinüsün altında.

Tüm zamanlama bilgisi, uzaysal bilgiden ayrılmış durumdadır.

Öyleyse, bunun gibi bir “duran dalga” nasıl görünür?

Aslında buraya bir parantez koyalım. Haydi, böyle bir duran dalganın bir çizimini yapalım.

Burada Y’ler olsun ve burada X’ler. Şimdilik sadece sinüs (KX) ’e bakalım.

X sıfır ise, sinüs daima sıfırdır; böylece bu nokta asla hareket etmeyecektir.

Fakat  $KX = 180$  derece olursa, o gene daima sıfırdır. Böylece lamda bölü 2 noktası asla hareket etmeyecektir.

X lamdadır, bu 360 derece olduğu zaman, o asla hareket etmeyecektir.

– lamda / 2, asla hareket etmeyecektir. Böylece o neye benzeyecek?

Aslında bunun gibi bir şey göreceksiniz; t’nin sıfır, böylece kosinüs ( $\omega t$ ) ’nin 1 olduğu anı ele alalım.

Böylece bunun gibi bir eğriye sahip olacağız: bu, bunun gibi  $2Y_0$ ’a kadar çıkar – demek ki burası benim  $2Y_0$ ’ımdır.

Bu noktalar asla hareket etmeyecek, onlar daima hareketsiz duracaktır.

İlerleyen bir dalgaya benzeyen hiçbir şey yoktur.

Eğer o ilerleyen bir dalga ise, bu noktalar dalganın geçip gittiğini görecektir; onlar aşağı yukarı gidecektir; onlar asla bunu yapmayacaktır.

Bu noktalar durgun durur. Bu noktaların bir adı var.

Biz onları “**düğüm**ler” olarak adlandırırız.

Şimdi biraz daha sonrasına bakalım.  $t = T/4$  ( çeyrek periyod) anına bakalım.

Şimdi, cosinüs sıfırdır.

Böylece ip üzerinde sıfır olmayan bir tek nokta bile yoktur. Böylece ip bunun gibi görünür.

Eğer siz ipin resmini çekseydiniz, onun salınım yapıyor olduğunu asla bilemezsiniz.

O sadece düz bir çizgi olurdu.

Şimdi, biraz sonraya bakarsak,  $t =$  periyodun yarısına eşit olduğu duruma bakarsak, o zaman cosinüs  $-1$ 'dir.

Şimdi eğri buna benzeyecektir.

O ne anlama gelir?

Sadece burada ne olduğuna bakarsak, olacak olan budur.

Bu ip sadece bunu yapıyor ve durağan noktalar var. Hiçbir şey böyle gitmiyor; hiçbir şey böyle gitmiyor.

Bu noktanın aşağı yukarı, aşağı yukarı, aşağı yukarı hareket ettiğini görüyorsunuz; bu aynısını yapacak ve bu düğümler hiçbir şey yapmayacak.

Böylece, bir duran dalga işte buna benzeyecektir; duran dalga adı, sanırım ona çok uygundur, çok betimleyicidir; çünkü o gerçekten duruyor, hareket etmiyor.

En azından,  $X$  doğrultusunda hareket etmiyor.

Bir duran dalga oluşturabilir miyiz? Evet, oluşturabiliriz; bunu bugün oluşturacağım.

Bir duran dalga, bir ipi bu şekilde sallayarak veya döndürerek oluşturulabilir.

İşte burada bir ipim var; onu orada bu duvara bağlıyorum ve aşağı yukarı hareket ettiriyorum.

Böylece bir dalga başlar – sadece bunu yapıyorum, dönen disk gibi – dalga hareket eder, sonra duvardan yansır. Yani giden bir dalgam var ve geri gelen bir dalgam var; böylece şimdi birbiri içinden geçen iki dalgaya sahibim.





Burada bir tam dalgaboyu gördüğünüzü söyleyebilirsiniz.

$F_2$  frekansı,  $F_1$ 'in iki katı olacaktır. Ve  $F_3$ ,  $F_1$ 'in 3 katı olacak.

N'ninci harmoniği bilmek isterseniz,  $\lambda_{N} = 2L/N$  'dir..

N yerine 1 koyarsanız, birinci harmonik için dalgaboyunu bulursunuz.

N yerine 2 koyarsanız, ikinci harmonik için dalgaboyunu bulursunuz. Ve saire..

N'ninci harmonik için frekans, N çarpı V bölü 2L 'dir.

Böylece rezonansa sahip olduğumuz frekansların ve dalgaboylarının tam serisini burada görüyorsunuz.

Geçen sefer tartıştığımız LRC sisteminden farklı olarak, orada bir tek rezonans frekansına sahiptiniz, şimdi sonsuz sayıda rezonans frekansına sahipsiniz ve onlar eşit aralıklı, çok ayırık değerlerdedir.

Bunu size bir keman teli ile göstermek istiyorum; çok özel bir keman teli; o burada bir yerde; kocaman bir şey. Birinizin yardımına ihtiyacım var.

Daha önce bana yardım etmiştin; gene yardım etmeyi düşünür müsün?

Telin bir ucu işte orada, onu sen tutacaksın; inan ya da inanma, bir “düğüm” olacaksın. Onu daha iyi tut, iki elinle – hayır, çok daha iyi.

Biraz sonra göreceksin, niçin – hayır, hayır, hayır, çok daha sıkı tut.

Şimdi oldu. Ve biraz daha geriye yürü, biraz daha yürü. Evet, bu iyidir, onu tut.

Beyaz bir eldiven takacağım, bunun bir nedeni var; çünkü ortalığı kararttığımızda, dalgayı üreten elimin neredeyse hiç hareket etmediğine kendinizi inandırabilmeniz için, elimi görebilmenizi istiyorum.

Pratik amaçlar için, o bir düğüm noktasıdır; ve şu anda bu mükemmel rezonans olayını elde edeceğiz.

Ortalığı iyice karartacağım, öyle ki UV (UltraViole) kendi işini yapacak ve siz teli daha iyi görebileceksiniz; teli daha iyi gösterebilmenin tek yolu bu. Tamam.

Ne olursa olsun, teli sakın bırakma; bunu yaparsan, benim canımı acıtırsın.

Tabii ki, ilk önce ben bırakırsam, o zaman [pıfft], ben senin canını acıtırım; ki böyle bir planım yok.

Tamam, birazcık daha geriye gitmeye çalışalım.

İlk önce temel frekansı bulmaya çalışalım.

Elimle tam doğru frekansı uyararak onu bulmaya çalışacağım.

İşte oldu. Sanırım onu elde ettim. Bu temel frekanstır.

Bakın, burada elim ne kadar az hareket ediyor.

Ve orta kısımda çok büyük bir genlik göreceksiniz.

Böylece bu yansıyan dalgalar; bir dalga ona gider, bana geri gelir, ona geri gider, birçok kez yansımayı sürdürür; onlar birbirlerini yapıcı bir şekilde desteklerler; işte rezonans budur.

Ve şimdi ikinci harmoniği bulmaya çalışacağım -- böylece tam ortada bir düğüm noktası göreceksiniz.

Aslında onu sizin görmemiz, benim görmemden daha kolaydır.

O bulmak her zaman kolay değil – hayır, hayır, hayır, frekansım çok düşük, yukarıya gitmeliyim.

Sanırım şimdi onu elde ettim. Bu, o mudur?

Evet ortada ayrı bir düğüm noktası mı? Yüksek sesle konuşun, lütfen.

Hah, bu daha iyi. Şimdi sizi duyabiliyorum, teşekkür ederim.

Şimdi 3 tane düğüm noktası var.

Arkadaşım orada bir düğüm noktası, ben burada bir düğüm noktasıyım; ayrıca tam ortada da bir tane var.

1'i çıkarırsanız,  $3 - 1 = 2$ 'dir; bu durumda, o ikinci harmoniktir.

Şimdi de çok yüksek bir rezonans frekansı üretmeyi deneyeceğim; ve sonra siz düğümleri sayacaksınız, ondan 1 çıkaracaksınız; böylece benim hangi harmoniği ürettiğimi bileceksiniz.

Deneyeceğim, – ama taa oralarda bir rezonans elde etmek hiç kolay değil.

Hayır, rezonanstan uzaktayım. Hayır.

Evet! Evet! Evet! Evet! Evet! Evet! Evet! Evet! Elde ettim, elde ettim, elde ettim!  
Saymaya başlayın. Saymaya devam edin.

Oooo, bu, süper-yüksek bir harmonik! Ne kadar çok saydınız?

[ kalabalık cevap veriyor] 10, 10 mu duydum?

[ kalabalık cevap veriyor] 20 mi duyuyorum?

Aslında, ben yaklaşık 27 saydım, fakat bu tamamdır. Tamam, size çok teşekkür ederim. Bana yaptığınız yardım çok büyüktü.

İşte, **duran dalgalar**.

Şekilleri görüyorsunuz. Duran dalgalar için çok karakteristik olan hareket tarzını gördünüz..

Kemanın bir teline dokunduğumda veya ona yayı sürttüğümde, ya da piyanoda bir çekici tele vurduğumda, tel frekansların tüm cümlesine maruz kalır.

Ve tel, şimdi, hangi frekanslarda titreşmek istediğine karar verir.

Ve böylece o bu rezonans frekanslarını seçer.

Eğer tel 400 hertz'lik bir temel frekansa sahipse, 400 'de rezonansa başlar; fakat aynı anda 800 hertz'te de, 1200 hertz'te de çok mutlu olacaktır.

Böylece tel, –ona pat diye vurursam veya onu çekip bırakırsam, ya da ona dokunursam – genelde bir tek frekanstan daha çok frekansta eş-zamanlı bir şekilde titreşecektir.

Temel frekans ve birkaç daha yüksek harmonik.

Diğerleri, yayı sürttüğümde oluşan tüm diğer frekanslar, rezonans-dışıdır; onları göz ardı ediyorum.

Telli bir çalgı tasarlarsanız, temel sorun aslında şudur:

Özel bir temel frekans isterseniz – diyelim ki sizin temel frekansınız 440 ‘tır; bu verilmiş bir sayıdır. Böylece  $N, 1$ ’dir

Şimdi  $V$ ’yi ustalıkla ayarlayabilirsiniz; çünkü  $V$  teldeki gerilime bağlıdır ve sahip olduğunuz telin cinsine.

Teldeki hız, kare-kök gerilim bölü telin birim uzunluğunun kütlesi’dir -- 8.03 dersini alırsanız, bunun için bir kanıt bile göreceksiniz.

Keman için 4 – gitar için 6 – teli ele alırsınız ve onları çok farklı malzemelerden yapınız -- birim uzunluktaki kütleleri farklı – ve bu size farklı hızlar verir – gerilimleriyle de oynayabilirsiniz –; böylece 4 teliniz de 4 farklı temel frekansa sahip olur.

Kemanda, onlar aynı uzunlukta olabilir. Kemanı çalmak için şimdi ne yapacaksınız?

Geriye kalan, sadece  $L$ ’dir; bu, sizin değiştirebileceğiniz tek şeydir ve bir kemancının da yaptığı tek şey budur.

Parmağını teller üzerinde ileri geri götürerek onları daha kısa yapmak, perdeyi arttırmak, frekansı yükseltmek, onları daha uzun yapmak, frekansı düşürmek.

Bir gitarla da aynısını yaparsınız; bir kontrabas ve bir viyolonselle de.

Böylece bir müzik aleti çaldığınızda, daima yaptığımız şey,  $L$ ’yi değiştirmektir; böylece üretmek istediğiniz tüm bu frekansları elde edebilirsiniz.

Çalgınızı kutusundan çıkardığınızda, artık onun akortta olmadığını fark edersiniz; akordu azıcık bozulmuştur.

Aslında ne yaparsınız, V'yi birazcık değiştirebilirsiniz, -- oh, böyle, küçük kulakları bükerek – tellerdeki gerilmeyi değiştirebilirsiniz.

Kemancıların kemanlarını akort ederken yaptıkları işte budur; tam doğru frekansı elde etmek için tel üzerindeki gerilimi değiştirirler. Çalmak ise, L'yi değiştirmek anlamına gelir.

Piyano farklıdır; o, gerçekten bir lükstür.

Bir piyano 88 tuşa sahiptir, teller dizisinin her birinin uzunluğu sabittir; böylece bu konuda endişelenmezsiniz.

O büyük bir lükstür; dolayısıyla, piyano çalmanın keman çalmaktan çok daha kolay olduğunu düşünebilirsiniz; çünkü çalarken tel boylarını değiştirmek zorunda değilsiniz; teller tam doğru uzunlukta olur.

Evet, tabii ki bu doğrudur; fakat buna karşılık da önünüzde 88 tuş var ! Ara sıra yanlış bir tuşa basabileceğinizi düşünün, bunu yapmak istemezsiniz herhalde.

Bir tel titreşiyorken, havayı iter, havayı çeker ve dolayısıyla basınç dalgaları üretir.

400 hertz'te titreşen bir telim varsa, o basınç dalgası yaratır – basınç, yukarı, aşağı, yukarı, aşağı, yukarı, aşağı, saniyede 400 kez gidip gelir ve senin kulak zarına ulaşır; kulak zarın saniyede 400 kez titreşmeye başlar, ileri geri gidip gelir ve beyniniz de “ben ses duydum” der. Onun çalışma şekli budur.

Önce tel, sonra hava, basınç dalgaları ve sonra kulak zarınız ve en sonunda beyinleriniz, eğer beyniniz varsa...

Şimdi, bunların bir kısmını size göstermeden önce, sizinle tellere sahip olmayan çalgıları tartışmak istiyorum; onların tümüne tahta nefesli çalgılar diyeceğim; bu, onların hepsi için uygun bir isim olmasa da.

Şimdilik onları tahta nefesliler olarak adlandıracağım.

Burada içi hava ile dolu bir kutuya sahip olduğumu var sayın.

Tamamiyle kapalı bir kutu; L uzunluğuna sahip.

Buraya bir hoparlör koyuyorum ve belli frekansta bir ses üretiliyor.

Bu durumda basınç dalgaları ilerleyecek, çarpıp geri gelecekler ve böylece yansımış ilerleyen dalgaları elde edeceğim.

Kutunun içinde elde edeceğim şey, şimdi, duran hava dalgalarıdır.

Duran rezonansa giren kutu değildir; fakat havanın kendisidir.

Ütilen frekanslar, -- sistem bu frekanslarda rezonanstadır -- tam olarak aynı denklem ile verilir.

V'nin geçersiz olması dışında – V şimdi sesin hızı olup, oda sıcaklığında, yaklaşık 300 m/s'dir.

Her ne zaman bir tahta nefesli çalgı tasarlarsanız, bu tartışılmazdır.

V'yi değiştiremezsiniz; onu ancak bir telli çalgı yapımcısıysanız değiştirebilirsiniz.

Diyeceksiniz ki, “Vay be, sesin kapalı bir kutu içinde yer aldığı bir çalgıya sahipsem, çok fazla bir şey duyamam”. Evet, bu doğrudur.

Sesin bir şekilde dışarıya çıkmasına izin vermelisiniz.

Ve şaşırtıcı olan şey şudur: eğer bu ucu açarsanız ve bu ucu da açarsanız; şimdi her iki tarafı da açık olan bu kutu, hala tam olarak bu frekanslarda rezonansa girecektir.

Bunun esasını öğrenmek için, 8.03 dersini almalısınız.

Bir ucu açık bir ucu kapalı kutuya ses kovuğu (ses kavitesi) dersem, ses kovuğunda da rezonans frekansları vardır.

Rezonans frekansları dizisi, gene de bundan farklıdır. Çok önemli değil, ama farklıdır.

Fakat tam bir rezonans frekansları dizisi elde edersiniz.

Sesin bir gaz içindeki  $V$  hızı, sıcaklık bölü molekül ağırlığının kare-köküdür – böylece sıcaklığa çok az bir bağlılık var.

Evet, odadaki sıcaklığa pek bir şey yapamazsınız -- genelde, oda sıcaklığıdır – ve havaya gelince, moleküler ağırlığı yaklaşık 30 olan oksijen ve azot ile birliktesiniz, buna da yapabileceğiniz fazla bir şey yoktur.

Fakat tahta nefesli çalgı çalmayı bilen her biriniz bilir ki, soğuk bir odadan sıcak bir odaya giderseniz, çalgınızın akordu bozulur.

İşte bunun nedeni, sıcaklığın değişmesidir. Böylece  $V$  değişir, dolayısıyla temel frekanslarınız değişir.

Ne yapacağınızı biliyor musunuz? Bu insanlar ne yapacaklarını biliyorlar.

Onlar kovuğu biraz daha uzatmanın ya da biraz daha kısaltmanın yolunu biliyorlar.

Çok fazla değil, fakat birazcık, çalacak kadar.

Bunu yaparak, ihtiyaçları olan aynı temel frekansı geri elde etmek için  $V$  deki hafif farkı  $L$  ile telâfi ederler.

Böylece artık tahta nefesli bir çalgıya sahipsiniz.

Düşük frekanslı tahta nefesli çalgılar büyük olacaktır.

Ve yüksek frekanslı tahta nefesli çalgılar daha küçük olacaktır; bu sır  $L$  de yatar;  $V$  ile oynayamazsınız,  $V$  tanrı vergisidir.

Ve şimdi bir çalgıyı nasıl çalabilirim?

Şey,  $L$ 'yi değiştirerek; yapabileceğinizin hepsi budur.

Bir trombonunuz varsa, bunu yapıyorsunuzdur,  $L$ 'yi değiştirmekte olduğunuz açıktır; kovuğu daha uzun ya da daha kısa yaparsınız. Bu kolay.

Flütünüz varsa, flütte delikler olduğunu bilirsiniz. Eğer tüm delikler kapatılırsa, flüt bu kadar uzundur.



Fakat parmaklarınızı deliklerden çekerseniz, o daha kısa olur.

Böylece parmaklarınızın hepsini deliklerden çektiğinizde, yüksek bir frekansa sahip olursunuz – flüt sadece bu kadar uzundur. Eğer flütün üzerine parmaklarınızın tamamını koyarsanız, o bu kadar uzun olur, ve böylece bu frekans daha düşüktür.

Bir trompette aynı mantık geçerlidir. Delikleri açıp kapayan kapaçlar (valf'lar) vardır.

Bir çalgı içerisine hava üflerseniz, o bir tele dokunma gibidir, teli bir yay ile uyarma gibidir; bu hava kovuğuna bütün frekans spektrumunu boşaltıyorsunuz demektir.

Bırakın, nerede rezonansa gelmek istediğini hava kovuğu karar versin.

Hoşlandığı birilerini seçecektir; temel frekansı ve belki ikinci ve üçüncü harmoniği.

Bu anlamda, hava üflemek, bir telli çalgıya yay çekmek gibidir.

Fakat hava üflemek, her zaman düşünebileceğiniz kadar kolay değildir.

Bir trompet içine hava üflemeyi denediniz mi hiç?

Hiçbir şey olmaz. Sadece üfleyin, [puuf f f f], ve hiçbir şey duymazsınız.

Şunu yapmalısınız: [ppppppp].

Bunun gibi bir şey.

Tuhaf bir ses çıkar; ondan güzel bir ses elde etmek için, çalgının içine tam doğru şekilde nasıl üflenmesini bilmelisiniz.

Birçok kez denedim, o gerçekten kolay değil.

Basitçe “hava üflemek” denir, fakat onu rezonansa getirebilmek için, dudaklarınızı nasıl tutacağınızı ve kovuğu nasıl uyaracağınızı gerçekten bilmek zorundasınız.

Tahta nefesli çalgıların temel frekansı ile uzunluğu arasındaki kolay bağıntıyı size gösterebilirim.

Bu, bire-bir bir korelasyondur – Web'te var, oradan indirebilirsiniz; bunu kopyalamak zorunda değilsiniz – ve bunu orada görüyorsunuz,...oh, bu sadece açık-açık bir sistem içindir, kapalı- açık bir sistem için değil. Sayı farklı olabilir.

Böylece eğer çok yüksek frekanslarla ilgilenirseniz, o zaman sadece bir santimetre uzunluğunda olan açık-açık bir sistem 17000 hertzlik bir temel frekans verir, ki onu çoğunuz duyabilir; çünkü hala gençsiniz, büyük ihtimalle 20 kilohertz'e kadar duyabilirsiniz.

İkinci harmoniği duyamazsınız, bu sizin için çok yüksektir.

10 santimetre uzunluğunda olan, açık-açık bir çalgıda, 1700 hertzlik temel frekansı kolayca duyarsınız; 3400 hertz'lik ikinci harmoniği de, sorun değil, üçüncü harmonik, dördüncü harmonik, bunlar da sorun değil.

Çok düşük frekanslara gittiğinizde, uhhh, 20 ile 30 hertz bölgesinde temel frekanslar üreten org boruları, devasa boyutludurlar.

Ve -- genelde, bu geçerlidir.

Düşük frekanslara ayarlı tahta nefesli bir çalgınız varsa, o büyük boyutludur.

Ve yüksek frekanslar için, örneğin, bir flüt, evet, o küçüktür.

Bir bakıma, bu telli çalgılar için de geçerlidir.

Düşük frekanslar üreten bir kontrabas, evet, o büyük bir çalgıdır.

Fakat yüksek frekanslar üreten keman, çok daha kısa bir çalgıdır..

Böylece bu mantıkla, onların ikisinin de nedeni L'dir.

Temel frekans cinsinden can alıcı olan, kuşkusuz, L'dir.

Artık bir flütteki temel düşünceyi size gösterebilirim – bu bir flüttür.

Flüt, bu boyda.

Düşük frekans. Daha yüksek frekans, çünkü o daha kısadır.

Çok daha yüksek frekans, çünkü o daha da kısa.

Hepsi bu.

Trombon.

O kendini ispatlıyor, değil mi?

Onu uzat, onu daha kısalt . Bunu deneyeceğim.

Trombon.

Nefesli org.

80 santimetre uzunluk..

Açık ve açık, her iki taraf.

80 santimetre, 170 den biraz daha büyük bir temel frekans verebilir.

Ve o bana ikinci harmoniği de verecek, ve üçüncü bir harmoniği de; hava akışının ne kadar hızlı olduğuna bağlı olarak. Ve sizin bir harmonikten daha fazlasını duyacağınız anlar olacak.

Onun etrafında salınmayı deneyeceğim.

Temel frekansı yakalamak benim için kolay değil; fakat bunu da deneyeceğim.

Bu ikinci harmonik.

Üçüncü harmonik.

dördüncü harmonik.

beşinci harmonik.

dört.

Temel -- ??, eveeet, bu temel frekans !.

Bu 212 hertz olan temel frekanstır.

425 hertz.

637, 637.

Teşekkür ederim, teşekkür ederim, teşekkür ederim.

Eğer bir akort çatalına vurursanız veya bir tele basarsanız, yalıtılmış halde, hiçbir şey duymazsınız, hemen hemen hiçbir şey.

Burada bir akort çatalım var, ona vurursam, hiçbir şey duymazsınız, ben de hiçbir şey duymam – hemen hemen hiçbir şey. Onu kulağıma çok yakın tutmadıkça.

Şimdi yapacağımız şey, telli çalgıyla, bu telleri hava ile dolu kutu üzerine takacağız.

Bir ses kovuğu. Ona “ses tahtası” diyorlar.

Ve şimdi içerdeki hava onunla titreşebilir – onun daima tam bir rezonansta olması zordur -- ve ayrıca, kutunun kendi yüzeyi de titreşmeye başlayabilir.

Böylece daha fazla hava yer değiştiriyor; ses de daha yüksek ve net çıkıyor

Siz enerji kazanmazsınız, fakat daha hızlı titreşen telden dışarıya enerji boşaltırsınız ve böylece kısa bir süre için daha yüksek ses elde edersiniz.

Ve bunu, ilk önce akort çatalı ile göstereceğim.

Onu şimdi çok iyi duyuyorum; siz daha uzak olduğunuz için, onu biraz daha az duyuyorsunuz.

Şimdi hiçbir şey duymuyoruz. Ve şimdi onu duyuyorsunuz.

Aslında, yıllar önce İsviçreden satın aldığım bu küçük müzik kutusu ile bunu çok daha iyi gösterebilirim.

Bu müzik kutusunu döndürürsem, o çok romantik bir melodiye sahip, ama siz hiçbir şey duymuyorsunuz.

Ben de birazcık duyuyorum. Onu şimdi bu kutu üzerine koyuyorum.

Ses tahtası fikri işte bu.

Bunlar kemanlarda vardır; piyanolarda vardır; kuşkusuz, bu ses tahtalarının tasarımı çok gizlidir, üreticiler onları nasıl yaptıklarını size anlatmayacaklardır, çünkü sesin kalitesi, tabii ki kısmen ses tahtasının tasarımında gizlidir.

Sesi size hem duyurabilirim hem de gösterebilirim.

Kalan zamanda amacım, size sesi aynı anda duyurmak ve göstermek.

Burada bir mikrofon var; o sizin kulak zarınız gibi bir şey. Ve 440 hertz ürettiğimi farz edin; bunu akort çatalı ile yapabilirim.

Böylece bu, mikrofondaki zarın, kulak zarınızın da diyebilirsiniz, titreşiminin genliğidir; bunu yükseltiyoruz ve yükselttikten sonraki akımı bir osiloskop üzerinde size gösteriyoruz. İşte bunun gibi bir sinyal göreceksiniz.

Bu 440 hertz ise; bu zaman ve bu kulak zarınızın yerdeğiştirmesidir – bizim durumumuzda, o mikrofondur; aslında o yükseltme işleminden sonraki akımdır – eğer bu 440 hertz ise, bu T zamanı yaklaşık 2.3 mili-saniye olacaktır.  $1 \text{ bölü } 440$ .

Bu, osiloskop için sorun değil. Bundan çok daha iyisini yapabiliriz.

Böylece zaman çözünümü bir sorun oluşturmaz.

Size mikrofonumuzun çıkışını orada göstereceğim, zamanın fonksiyonu olarak bu sinyali size göstereceğim.

.440 hertz için, tekdüze bir sinyal görüyorsunuz.

Ve akort çatalı ile tekdüze bir sinyal oluşturabilirim, o neredeyse saf bir sinüs eğrisidir.

Fakat şimdi, bir rastlantı eseri, dinleyicilerimiz arasında keman çalabilen biri var.

Bu kişi bize 440 hertz üretecek.

Fakat aynı zamanda, bir ikinci harmonik üretecek, ve belki üçüncü harmoniği ve belki dördüncüyü de.

Şimdi düşünün bir kere, sizin kulak zarınız bunu yapacak, fakat, aynı zamanda bunu da yapacak, çünkü bu biraz daha yüksek bir harmoniktir.

Net sonuç, kulak zarınızın bunu yapacağıdır. Size göstereceğim şey, işte budur.

Çeşitli çalgıları gördüğünüzde, temel frekansın üstünde bu çok karakteristik harmonikleri göreceğinizin farkına varacaksınız, her çalgı kendine özgü bir kokteyle sahiptir. Bu kokteyli duyduğunuzda, “oh, evet, bu bir saksafondur.” dersiniz, Veya “hayır bu bir kemandır.” Dersiniz; asla bir keman için saksofon hatasını yapmazsınız.

İşte bu, daha yüksek harmoniklerin kombinasyonundan dolayıdır.

Dinleyicilerimiz arasında böyle dört müzisyene sahip olduğumuz için çok şanslıyız.

Kemancı olan Tom – Tom nerede? Tom orada.

Umarım kemanını getirmişsindir. Oh, onu getirmişsin.

Ve sonra Emily – klarinetiyle, onu da gördüm, -- böyle gelebilersen Emily.

Aaron da var – Aaron bir fagota sahip. Siz asla bir fagota sahip olamayabilirsiniz.

Fagot, çok pes sesler üreten bir çalgıdır. Dolayısıyla bu çalgı çok büyük olacaktır.

Çok büyük – Aarondan daha büyük. Sadece bekle ve gör.

İşte güzeller güzeli; gerçekten çok güzel bir çalgı.

Bir flüt, yalnız bu büyükte.

Ah, buna bakın, güzel, büyük, fagot.

Ve de Fabian, saksofonuyla.

Burada durursanız, ilk olarak tekdüze olan kısmı yapacağım. Yapacağım şey, bir akort çatalı ile üretilen 440 hertz'lik sinyali size göstermek. Onu orada göreceğiz; fakat ışık durumunu iyice değiştirmeliyim.

Müzisyenler biraz karanlıkta kalacak; fakat siz onları hala görebileceksiniz.

Ve şimdi mikrofonu açacağım; sinyali göreceğiniz yer işte orası. Gürültü yaptığınızda, duyabilirsiniz, kendinizi duyar ve görürsünüz.

440. Tekdüze; daha yüksek harmonikler yok.

Şimdi Tom kemanından 440 hertz üretmeye çalışacak – veya 440'a yakın – o zaman daha yüksek harmonikleri araştırın -- kemanı karakteristik yapan bunlardır.

Dikkat ederseniz, ortalama aralık, tekrarlama, gerçekten 440 hertz'te olanla aynıdır; fakat harmoniklerin bu inanılmaz zenginliğini gördünüz.

Tom, ayrıca, mükemmel bir kemancıdır; dolayısıyla bunu göstermek için, sebat etti.

Herşey yolunda mı Tom?

Tamam. Devam et.

Müthiş, Tom.

Emily, rica etsem, 440 hertze yakın bir ses üretir misin?

Mikrofonun biraz daha yakınına gel.

Kemanla olan büyük farka dikkat edin.

Keman çok, çok daha yüksek harmoniklere sahip.

Onun çalgısı, belki bir tane, ya da temel frekans ve ikinci harmoniğe sahip olabilir.

Tekrar deneyebilir misin?

[Şimdi daha fazlasına sahibiz, şimdi daha fazlasına sahibiz.

Emily çalmakta ısrar etmedi; fakat ben ısrar ettim.

Evet Emily, lütfen? Etkileyici.

Şimdi de Aron, fagotuyla.

O özel bir sandalye ayarladı; çünkü diyor ki “bakınız, böylesine büyük bir çalgı ile, L’si çok büyük, ve ağır; başka türlü olmaz”. Açıkça, düşük frekanslar üreten bir fagot kemandan daha ağırdır.

Aeron, 440 hertze yakın bir ses çıkarabilir misin?

Acayip bir çalgı, değil mi?

Muhtemelen temel frekans ile ikinci harmoniğin tuhaf bir kombinasyonunu görüyorsunuz.

Aeron, uzmanlığını biraz göstermenin bir sakıncası var mı?

Bu mükemmel bir çalgıdır.

Onları çok sık görmüyoruz artık.

Etkileyici.

Son ve önemli husus; bir saksafonumuz da var: Fabian .

Şimdi, bu mikrofondan çok uzakta oturabilirsiniz; çünkü bu çalgı çok berbat bir gürültü çıkarır, çıkarmaz mı?

Bir hamle yap, ve 440 hertz’i dene, veya buna yaklaş.

O tamı tamına 440 olmak zorunda değil.

İlginç.



Ayrıca, birkaç tane daha yüksek harmonik görüyorsunuz, ama hangileri olduğunu anlamak zor.

Gerçekten yeni, ateşli bir şeyler çalmasının sakıncası var mı?

Eğer siz onu duymakla ilgilendiğimi düşünüyorsanız, yanılıyorsunuz; onu görmeyi istiyorum!

[alkış]

Hepsine teşekkür edin.

Çok teşekkür ediyorum.

Böylece son üç dakikada, sesin hızını sizinle biraz daha ayrıntılı olarak tartışmak istiyorum.

Hatırlarsanız, sesin hızı, sıcaklıkla ve molekül ağırlığının tersiyle, aslında bunların kare-köküyle, orantılıydı.

Gerçekte burada, yukarıda, başka birkaç şey daha vardır.

Fakat esas katkılar -- büyük katkılar bunlardır. Böylece, aslında “orantılıdır” demeliyim.

Havayı ele alırsak – daha önce tartıştığımız gibi, moleküler ağırlık 30’dur; bu, Tanrı vergisidir; bu konuda yapabileceğimiz pek bir şey yoktur.

Size şimdi moleküler ağırlığa olan bağımlılığı göstermek istiyorum.

Bunu yapmanın bir yolu, bu salondaki tüm havayı almak ve yerine helyum koymaktır.

Ve sonra aynı müzisyenleri buraya davet ederdim ve onlardan üflemeli çalgılarını çalmalarını isterdim.

L ‘ler sabittir; bu hususta yapabileceğimiz bir şey yok.

Böylece onların çalgıları salonu helyumla doldurduğumu bilmiyor; böylece değişen tek şey  $V$ 'dir.

Hız hemen hemen 3 çarpanı ile artacaktı; böylece temel frekans 3 kat daha yüksek olacaktı.

Ve harmonikler de 3 kat daha yüksek olacaktı.

Böylece çok daha yüksek frekanslar duyacaktınız.

Dolayısıyla çalgıları tanıyamazdınız bile. Bu hiç pratik olmazdı.

Bu salonun havasını boşaltamam ve onu helyum ile dolduramam.

Ama yapabileceğim şey, bu salonda çok sık yaptığım gibi, kendime eziyet edebilirim -- kendimi zora sokup sistemimin içine helyum koyabilirim.

Burada kendi ses kovuğum var. Ben, bir bakıma, bir üflemeli çalgı gibiyim.

Ve, ummm, eğer helyumu yutarsam, benim ses kovuğum helyum ürettiğimi bilmez.

Tam şimdi yaptığım gibi, sizinle konuştuğumda “ evet, bu tipik Walter Lewin.” diyeceksiniz. Benim temel frekanslarımı tanıyacaksınız, harmoniklerimi tanıyacaksınız; benim sesim için, bunlar tipiktir ve biriciktir.

Böylece beni tanıyacaksınız.

Fakat şu an sistemimi helyum ile dolduruyorum.  $V$  dışında, sistemimdeki hiçbir şey değişmiyor. Böylece frekans artacak.

Ve bu, fark edilebilir bir şeydir.

Ve aslında, çok muhtemelen “ Bu artık gerçekten Walter Lewin değil” diyeceksiniz. Helyumun bir sorunu var:

O da, helyumda oksijen olmamasıdır.

Ve bu da benim için çok fark edilebilir bir şeydir.

Artık, ciğerlerimi gerçekten tamamıyla helyum ile doldurmalıyım; ve böylece bir süre için oksijensiz kalacağım için, ummm, böylece bir taşla iki kuş vurabilirsiniz,

Tuhaf bir frekans işitebilirsiniz ve beni yerde görebilirsiniz.

Böylece gerçekten yere düşmemeye çalışacağım.

Tamam, başlıyoruz.

[gülüşmeler]

Ve gerçekten o artık Walter Lewin'in sesine benzemiyor, değil mi?

Cuma günü görüşürüz.

Her şey gönlünüzce olsun.