



MIT Açık Ders malzemeleri

<http://ocw.mit.edu>

8.01 Fizik I: Klasik Mekanik, Güz 1999

Bu materyallerden alıntı yapmak veya kullanım şartları hakkında bilgi almak için

<http://ocw.mit.edu/terms> ve <http://www.acikders.org.tr> sitesini ziyaret ediniz.

MIT Açık Ders malzemeleri

<http://ocw.mit.edu>

## 8.01 Fizik I: Klasik Mekanik, Güz 1999

### Transkript – Ders 31

Şimdiye kadar, sarkaçlar, yaylar, cetveller, hula çemberleri gibi birçok nesne için salınım hareketleri için periyotları hesapladık, analiz ettik.

Onları biraz ittik, denge konumlarından biraz uzaklaştırdık ve o durumda onlar kendi tercih ettikleri frekanslarda salınım hareketlerini yaptılar.

Bugün, sizlere eğer ben bir sistem üzerine kendi seçtiğim bir frekans ile bir kuvvet uygularsam ne olur, bunu anlatmak istiyorum.

Biz bunu zoruna salınımlar olarak adlandırıyoruz.

Daha önce yaptığımız gibi, bir yay sistemi alabilirim.

Bu  $x$  eşit sıfır ve bu  $x$ , ve bildiğimiz eksi  $kx$  şeklinde bir yay kuvvetimiz var.

Fakat şimdi burada  $m$  kütleli cisim var ve ona bir kuvvet uygulayacağım. Bu kuvvet  $F_0$ , bu kuvvetin genliğidir, çarpı  $\cos\omega t$  şeklindedir.

Kütleye frekansını kendi seçmiş olduğum sinüs şeklinde bir kuvvet uygulayacağım.

Bu frekans, sistemin salınım yapmak istediği frekans değildir.

Bu benim seçtiğim bir frekanstır. Ve onu değiştirebilirim.

Ve şimdi şu soruyu soruyorum: Cisim ne yapacaktır? Eh, Newton'un İkinci Kanunu var.

$m$  çarpı  $a$  eşittir eksi  $kx$  artı bu kuvvet,  $F_0\cos\omega t$ .

$a$ ,  $x$  iki noktaya eşittir. Böylece  $x$  iki nokta artı, bunu bu tarafa getiriyorum,  $k$  bölü  $m$  çarpı  $x$  eşit  $F_0$  bölü  $m$  çarpı  $\cos\omega t$  elde ederim.

Şimdi şu soruyu soruyorum: bu diferansiyel denklemin çözümü nedir? Daha önce gördüğümüzden oldukça farklı. Çünkü önceden burada sıfır var idi.

Şimdi burada bir zorlayıcı kuvvet var.

Eğer yeterince uzun süre beklerseniz, er ya da geç bu sistemin bu frekansta salınımına başlayacağı açıktır.

Başlangıçta biraz farklı olabilir.

Başlangıçta, kendi yapmak istediğini yapabilir. Fakat sonuçta, eğer sizleri kollarınızdan tutar ve ileri geri sallarsam, başlangıçta karşı çıkabilirsiniz, fakat er yada geç, size uygulamış olduğum frekans ile hareket etmek zorunda kalırsınız.

Ve o aşamaya geldiğimiz zaman, başlangıçta geçiş fazı olarak adlandırdığımız işlerin biraz karışık olduğu durumun aksine, bu durumu kararlı durum olarak adlandırırız.

O halde kararlı durumda, sistemin bir şekilde zorlayıcı etkinin frekansı ile aynı frekansta olması gerekir. Ve aynı A genliğine sahip olur.

Ve sizlerle bu A genliğini değerlendirmek istiyorum.

O halde bu benim, bu diferansiyel denkleme yazacağım deneme fonksiyonumdur.

$x$  nokta eşit  $A \sin \omega t$ .

$x$  iki nokta eşit  $A \cos \omega t$ .

Ve şimdi bunları burada yerine yazacağım. Böylece  $A \cos \omega t$  artı  $k$  bölü  $m$  çarpı  $A \cos \omega t$  eşit  $F_0$  bölü  $m$  çarpı  $\cos \omega t$  elde edeceğim.

Ve bu her zaman geçerli olmalıdır. Böylece  $\cos \omega t$  terimlerini yok edebilirim.

A lı terimleri bir araya getirebilirim. Bu durumda  $A$  çarpı  $k$  bölü  $m$  eksi  $\omega$  kare, eşit  $F_0$  bölü  $m$  elde ederim.

Şimdi, buradaki  $k$  bölü  $m$  değeri bizim aşına olduğumuz bir şeye benzemektedir.

Eğer sistemi kendi haline salınması için bırakırsak, onu denge konumundan uzaklaştırıp, bir zorlayıcı kuvvet uygulamazsak,  $\omega_0$  ın karesinin  $k$  bölü  $m$  ye eşit olduğunu biliyoruz.

Bu daha önce ele aldığımız frekanstır. Bu ise zorlama frekansı olup oldukça farklıdır.

Ve burada  $k$  bölü  $m$  yerine  $\omega_0$  kare yazacağım. Böylece bu durumda, yayın ucundaki cismin genliğini  $F_0$  bölü  $m$  bölü  $\omega_0$  ın karesi eksi  $\omega$  kare şeklinde elde ederim.

Ve bu genlik çok dikkat çekici özelliklere sahiptir.

Her şeyden önce, eğer sisteme  $\omega_0$  dan çok küçük olan bir  $\omega$  frekansı uygularsam,  $\omega_0$  'ı genellikle doğal frekans olarak adlandırırız.

Doğal frekans, sistemin kendi tercih ettiği frekans değeridir.

Eğer  $\omega$  değeri  $\omega_0$  dan çok çok küçük ise, Bu durumda  $\omega_0$  kare değeri  $k$  bölü  $m$  ' dir.

Ve bu durumda A genliğini  $F_0$  bölü  $m$  olarak elde edersiniz.

Eğer  $\omega$  değeri doğal frekanstan çok çok büyük ise, ya da  $\omega$  nın sonsuza gittiğini kabul edersek, bu durumda paydadaki ifade oldukça büyük olacak ve A genliği sıfıra gidecektir.

Fakat şimdi, eğer  $\omega$  değeri  $\omega_0$  değerine eşit olursa ne olur?

Bu durumda sistemin kafası atar. Ne olacağına bakın. Payda sıfır olur ve genlik sonsuza gider.

Ve bu durum bizim rezonans olarak adlandırdığımız durumdur.

Yani bu frekans değerini uygularsak, sistem tamamen deliye döner.

A genliğinin, frekans fonksiyonu olarak grafiğini çizebilirim.

$\omega$  dediğim zaman, dilediğinizde siz bunu her zaman Hertz e çevirebilirsiniz. Çünkü  $\omega$  eşit  $2\pi f$  dir. O halde elbette bunu, isterseniz Hertz biriminde isterseniz de radyan bölü saniye biriminde kullanabilirsiniz.

Eğer genliğin  $\omega$  frekansına göre grafiğini çizecek olursam, bu durumda düşük frekanslarda, burada,  $F_0$  bölü k değerleri var ki bu genliktir.

Rezonans frekansına ulaştığımda, sistemin doğal frekansı kontrolden çıkar ve sonsuza gider.  $\omega$  nın  $\omega_0$  dan daha büyük olduğu anlarda, genliğin negatif olduğuna dikkat edin.

Negatif genlik sizlere aniden 180 derecelik bir faz değişiminin olduğunu ifade eder. Böylece cisim dışarıdan uygulanan frekanstan 180 derece faz farkı ile hareket eder.

Bugün bunun üzerinde ayrıntıya girmeyeceğim. Fakat bu negatiftir. Böylece buradan başlar ve sonra  $\omega$  nın daha büyük değerlerinde sıfıra gider.

Böylece sistemin rezonans frekansı değerinde oldukça muhteşem bir şey olacaktır.

Pratikte, elbette ki genlik sonsuza gitmeyecektir. Bunun gitmemesinin sebebi, her zaman bir sürtünme olmasıdır. Her zaman sönmeler söz konusudur. Fakat çok yüksek genlik değerleri elde edersiniz ancak bu değerler sonsuz büyüklükte değildir.

O halde genliğin daha gerçekçi bir grafiğini çizmek için genliğin mutlak değerini alırsam, negatif değer elde ederiz ve 180 derece faz kayması olacak diye endişelenmemize gerek kalmaz.

Bu durumda buna benzer bir eğri elde edersiniz.

Ve F frekansdır ve bu durumda burada her şeyin kontrolden çıkmış olduğu andaki doğal frekans değerini elde edersiniz.

Ve sönme olup olmadığına bağlı olarak, bu eğri ya çok dar, yani çok yükseğe çıkar, ve daha sonra küçük bir sönme söz konusudur.

Ya da sistemde büyük bir sönme söz konusu ise, bu durumda eğri böyle bir şey olur.

Buna rezonans eğrisi diyoruz.

Ne kadar dar ise, o kadar az sönme var demektir.

Burada, hava rayı üzerinde, dışarıdan uygulayacağım seçtiğim bir frekans ile hareket ettirebileceğim bir cisimden oluşan bir sistemim var.

Burada bir yay var, cismin kütlesi  $m$  ve burada da başka bir yay var.

Orada görüldüğü gibi bunlar bir taraflarından sabitlenmişlerdir, dışarıdan bir kuvvet uygulayacağım, orada gördüğünüz gibi değişken bir kuvvetim var.

Ve şimdi sizlere ilk olarak onu rezonans frekansından oldukça küçük bir frekans ile zoruna salınım yaptıracağımı göstermek istiyorum.

Bu durumda genliğin çok büyük olmadığını göreceksiniz.

Daha sonra bunu rezonans frekansından daha büyük bir frekansla salındıracağım.

Ve yine genliğin çok küçük olduğunu göreceksiniz.

Ve çok yüksek frekans değerlerine gidersem, neredeyse duruyormuş gibi göreceksiniz. Ve daha sonra onu rezonans frekansı ile salındıracağım.

Ve rezonans frekans değeri yaklaşık 1 hertzdır. Eğer bu cismi aynen böyle kendi haline bırakırsam, şimdi doğal frekansı görmektesiniz. Bu yaklaşık 1 hertzdır.

Fakat şimdi ona dışarıdan bir kuvvet uygulayacağım. Bu yayı kontrol edebildiğimiz bir frekans değeri ile çekeceğiz. Başlayayım.

Burada, bu göstergede dışarıdan uygulanan frekansı görmektesiniz.

Oldukça düşük, 1 hertzin bile çok altında.

Ve sistemin vermiş olduğu tepkiye baktığınız zaman, eğer uzun süre beklerseniz, geçici etkiler bittiğinde, genliğin dış kuvvetin fazı ile birlikte hareket ettiğini göreceksiniz.

Burada pozitif genliğin olmasının nedeni budur. Fakat faz çok önemli değil.

Görüyorsunuz, birlikte hareket etmektedirler.

Çok küçük, yaklaşık olarak  $F_0$  bölü yayın  $k$  yay sabitidir.

Şimdi rezonans durumunun üzerindeki frekanslarda salındıracağım. Bu sistem burada yanılacaktır. Onun için bu oka artık dikkat etmeyin.

Rezonans durumunun oldukça üstünde. Yanılmaya başladığını görüyorsunuz.

Genliğe dikkat edin. Çok mütevazi, çok küçük.

Fakat bu eğriyi incelemiş olduk. İlk olarak burayı inceledik. Şimdi ise burayı inceliyoruz.

Bakınız, neredeyse hareket etmiyor. Neredeyse duruyor. Ve bu durumda onu yüksek frekansta sürüyorum.

Ve şimdi sizlere yaklaşık 1 hertz olan rezonansı göstereceğim.

Rezonans buralarda bir yerdedir. Ve bakın, oldukça büyük genlik.

Eğer dikkatli olmazsak, sisteme zarar da verebiliriz. Oldukça büyük genlik.

Şimdi bir frekans taraması yapacağım. Rezonans durumunun biraz dışarısına çıkıyorum.

Tekrar rezonans durumuna geliyorum.

Oldukça büyük bir genlik görüyorsunuz. Sistemi kapatsam iyi olur.

Böylece sistemi sürdürdüğüm zaman vereceği cevabı görüyorsunuz.

Sistemim biraz daha karışık olduğu zaman, örneğin eğer burada iki kütle var ise, yani bir yay daha eklemeliyim, yay sabiti  $k$  yay sabiti  $k$ .

Bu deneyi tekrarlayabilirim. Bunu yaptığım zaman, bu durumda iki rezonans frekans değeri bulurum. Ve eğer bu deneyi üç cisim ile yaparsam, üç rezonans frekansı bulurum. Eğer beş cisim ile yaparsam, beş rezonans frekansı bulurum.

Ve bu durumda, bu  $A$  genliğinin frekansa göre, ister hertz ister radyan bölü saniye cinsinden eğrisini çizecek olursam ve bu durumda eğer orada üç tane cismim varsa, böyle bir şey görürsünüz..

Ve kaç cisme sahip olduğunuza bağlı olarak, daha fazla rezonans değeri elde edersiniz. Ve bu rezonans değerleri tüm sistemi sürerek ve nerede olduklarını araştırarak bulunabilir.

Eğer bu kütlelerin sonsuz sayıda olduğu bir sistem kullanırsanız;

Biz onları kuplaj osilatörü olarak adlandırırız. Bu osilatörler yaylar vasıtasıyla birleştirilmişlerdir.

Ve sonsuz sayıda kuplaj osilatörü bir keman teline benzeyecektir; burada bir keman teli var.

Bunu sonsuz sayıda osilatörlerden oluşmuş şeklinde tanımlamamın sebebi her bir atomu, her bir molekülü komşuları ile bir yay ile birbirine bağlanmış ve sürülebilir olarak düşünebilmemdir. O halde teldeki osilatörler sonsuz sayıdadır.

Ve bu sistemi salladığım zaman, bu durumda çok sayıda rezonansın olmasını beklerim. Ve sizlerle şimdi incelemek istediğim şey budur.

Buradaki durumda, cisimler yay ile aynı yönde hareket ederler.

Bu yönü  $y$  yönü olarak adlandırıyorum ve bu yönü ise  $x$  yönü olarak adlandırıyorum. Böylece yay  $x$  yönünde, cisimler  $x$  yönünde ve salınımlar da  $x$  yönündeyse, biz bunlara boyuna salınımlar diyoruz.

Ayrıca enine salınımlar elde edebileceğiniz durumlar da vardır.

Enine salınımlarda hareket  $y$  yönünde, oysa salınımlar  $x$  doğrultusundadır.

Hatta enine salınımı bu sistemle de elde edebilirim.

Sistemi bu şekilde salındırabilirim. Çünkü, bu sistem ile bu hareketi yaparsam yaylar kesinlikle bu hareketi de yapacaklardır.

Ve şimdi bu keman telinin, piyano telinin salınım yapmasını istememin sebebi budur. Çünkü bu teli salındırmamın en mantıklı yoludur.

Ve eğer bu teli buradan aşağı yukarı sallarsak ve rezonans frekanslarını bulmak istersem, ne göreceğimi merak ediyorum.

Eğer düşük frekanslarda yaparsam, yay bana gülecektir ve yay hiç bir şey yapmaz.

Sadece sıkılacaktır ve bana cevap vermeyecektir.

Rezonans eğrisinin burasında bir yerdeyim.

Fakat daha sonra frekansı yavaş yavaş artırdığımda, salınım yapmak istediği ilk rezonans frekans değerini elde ederim.

Bu frekans değerini  $f_1$  olarak alıyorum.

Ve yaya baktığım zaman, birazdan göreceksiniz, yay bu şekilde titreşecektir.

Buraya kadar yükselecek ve buraya kadar da düşecektir.

Ve tüm yapacağı şey budur.

Bu ilk rezonanstır.

Ve bunu  $n$  eşit 1 olarak adlandırıyorum, genellikle birinci harmonik olarak adlandırılır.

Daha sonra daha yüksek frekanslara çıkıyorum. Hiçbir şey yapmayacaktır. Oldukça mutsuz. Ve sonra aniden, ikinci rezonansı elde ederim.

Bunu  $f_2$  olarak adlandırıyorum.

Ve ikinci rezonans böyle görünecektir. Yayın bu noktası hiç hareket etmeyecektir.

Yayın bu kısmı yukarı çıktığı zaman, bu kısmı aşağı inecektir.

Ve bunu  $n$  eşit 2 olarak adlandırıyorum.

Ve bu şekilde titreşecektir.

Ve hiç hareket etmeyen bu noktayı düğüm noktası olarak adlandırıyoruz.

Bu ikinci rezonansın biraz ötesine gidiyorum ve hiçbir şey olmuyor – yay oldukça üzgün, diğer rezonans değerini elde edene kadar çok az dalgalanıyor ve daha sonra  $f_3$  rezonansına geliyorum.

Birisi burada ve diğeri burada olan iki tane düğüm noktasının oluştuğunu göreceğim. Yay bu şekilde titreşecektir.

Buralar 180 derece faz farkı ile yukarı ve aşağı doğru hareket etmektedir. Ve bu iki uç kısım ise aynı fazda hareket etmektedir. Bu n eşittir 3 durumudur.

Ve böylece devam edebilir, düğüm noktaları ekleyebilirim. Ve bunlardan bazılarını birazdan size göstereceğim.

Oluşturacağım frekansları  $f_n$  olarak adlandırıyorum. Burada n tamsayıdır. Ve bu n değeri bir, iki, üç ya da dört olabilir. Ve  $f_1$  'e göre doğrusal olarak değişir.

Başka bir deyişle, eğer  $f_1$  100 hertz ise, bu durumda  $f_2$  200 hertz ve  $f_3$  300 hertz olacaktır.

n eşit 1 durumuna birinci harmonik diyoruz. Bazı kitaplarda bu temel harmonik olarak geçer. Ben birinci harmonik olarak adlandıracağım.

Ve n eşit 2 durumuna ikinci harmonik diyoruz. n üç durumu üçüncü harmoniktir.

O halde birbirinden eşit frekans değerlerinde ayrılmış olan bir ayrık frekanslar serisi elde edeceğiz.

$f_1$  yayın uzunluğuna, yaydaki gerilmeye, bunu  $T_{\text{gerilme}}$  olarak yazacağım, sakın periyot ile karıştırmayın, ve bu yayın kütlesine bağlıdır. Nasıl bağlı olduğunun ayrıntısına girmeksizin, bunlar birinci harmoniği belirleyen parametrelerdir.

Burada çok özel bir keman teli ya da piyano teli var. Her ne olarak adlandırırsanız adlandırın. Ve bu rezonans frekanslarını araştırarak oluşturabiliriz. Ve bunun için bir öğrencinin yardımına ihtiyacım var. Bana yardım etmek ister misin? O halde piyano telinin bir ucunu elinde tut.

Lütfen bırakma, Ben de bırakmayacağıma dair sana söz veriyorum.

Böylece ona belli bir gerilme veriyorum ve onu oldukça düşük frekansta titreştirmeye başlıyorum. Frekansın ne kadar düşük olduğuna bakın. Ve bu ipin ne kadar mutlu olduğuna bakın, hiçbir şey olmuyor. Sadece bana gülüyor, beni hiç dikkate almıyor, beni sevmiyor. Şimdi frekansı artıracam.

Ve şimdi ilk rezonansı elde ediyorum. Rezonansa yaklaşıyor.

İşte oluyor. Ve bu aynen tahta gördüğünüz şeklin aynısıdır. Oldukça net.



Burada salındırıyorum. Tam olarak birinci rezonanstayım.

Şimdi ikinci harmoniği elde etmeye çalışayım.

Eğer  $f_1$  frekansının biraz üzerine çıkarsam, bu durumda hiçbir şey olmayacak.

Benim için bunu görmek zor.

Bu ikinci harmonik mi yoksa üçüncü harmoniğimi elde ettik?

Üçüncü harmonik.

İkinci harmoniği elde edip edemeyeceğime bakalım.

Sanırım şimdi elde ettim değil mi? Tamam, işte ikinci harmoniği görmektesiniz.

Gerçekten, durmakta olan düğüm noktasını görüyor musunuz? Ve genlik çok büyük.

Bu rezonans frekansı için karakteristik bir özelliktir. Bunu normal mod frekansı veya doğal frekans olarak adlandırıyoruz. Hepsi de aynı şeydir.

Şimdi oluşturabileceğim mümkün olan en büyük harmoniği elde etmeye çalışayım. Ve bana bunun kaçınıcı harmonik olduğunu söyleyin. Yapmanız gereken tek şey ne kadar düğüm noktası olduğunu saymaktır. Bu ucu ve diğer ucu dikkate almayın ve bu elde ettiğiniz değere bir ekleyin. İşte bu oluşturacağım harmoniktir.

Sistem çok mutlu değil. Rezonansa geldiği zaman bir şekilde göreceksiniz.

Hayır, hayır, hayır, hayır.

Görüyorsunuz şimdi rezonansın dışındayım.

Benim için rezonansı elde etmek zor olacak, fakat oluşturacağım.

İşte oluşuyor, işte oluşuyor, rezonansı elde ettiğim konusunda hiç şüphe yok. Şimdi rezonans durumundayım. Ona bakın! Açıkça rezonans durumundayım. O halde kaç saydınız? Altıncı harmonik mi? Bana 12 gibi geldi. Fakat tamam, siz benden daha iyi sayarsınız. Tamam, çok teşekkür ederim.

Böylece sistemin dış etkiye nasıl cevap verdiğini gördünüz ve yay gibi karmaşık bir sistemde, normal modlar olarak adlandırdığımız bu rezonans frekanslarından çok sayıda vardır.

Şimdi, bir kemanınız var ise, dört teliniz var demektir.

Hepsinin uzunluğu aynı.

Tellerinin uzunluğu farklı olan piyano gibi müzik aletleri de bulunmaktadır.

Kemanın dört teli de aynı uzunluktadır.

Orada bir ayarla bu tellerin gerginliğini ayarlayabilirsiniz.

Kemanı çalmaya başlamadan önce, akort yaptığınız zaman, normalde teldeki gerginlik değiştirilir. Fakat bu dört tel farklı kütlelere sahiptir ve bu durum da onlara farklı frekanslar verir.

Şimdi, eğer kemanı çalarsanız, elbette çalma esnasında tellerin gerginliğini değiştiremezsiniz. Bu oldukça zor olur. Aletin çalınması sırasında tellerdeki gerginliğin değiştirilebildiği birçok müzik enstrümanı vardır ama, bu keman için geçerli değildir. Keman durumunda, onu çalırken sahip olduğunuz tek seçenek, onun telinin uzunluğunu kısaltmaktır. Yapacağınız şey parmağınızı telin üzerinde gezdirmektir.

Teli kısaltarak frekansı artırıyorsunuz ve teli uzatarak frekansı küçültüyorsunuz.

Şimdi, bir piyano teli yada keman teli gibi tele sahip olan müzik aletini nasıl tetiklersiniz? Onu rezonans frekansına süren hiçbir şey yoktur. O halde eğer bu keman telinden 440 hertz elde etmek istiyorsanız, bu durumda onu tam olarak 440 hertz ile sürmüyorsunuzdur.

Evet, bu doğru, ama bir yay alır ve bu yayı tele sürterseniz, bu durumda telin sadece bir frekans değil çok sayıda frekans çıkarmasına sebep olursunuz.

Fakat bu bir sürtme eylemidir. Aynı zamanda parmağımı da sürtebilirim. Ya da onu parmağımla çalabilirim. Ve yapmış olduğu şey rezonans durumu dışındaki bütün frekansları yok sayar ve sadece rezonansta olan bir frekansı seçer.

O halde bir yay ile ona sürtme, onun etkili bir şekilde bütün frekans spektrumuna maruz kalmasına sebep olmaktadır ve o istediği bir frekansı içlerinden seçecektir.

Aslında, eğer bir keman teline bir yay sürtüyorsanız, onu birinci, ikinci hatta üçüncü, hatta daha büyük harmoniklerde titreştiriyorsunuz.

Ve bu, çeşitli müzik aletleri arasında farklılığı oluşturur. Bu uyarmış olduğunuz çeşitli harmoniklerin kombinasyonuna, bileşimine bağlı olarak ona özel ses kalitesi sağlar.

Şimdi, eğer nefesli sazları ele alırsanız, o zaman durum oldukça farklıdır.

Burada bir ses kovuğu yani kavitesi var. Bu L uzunluklu bir kutu şeklinde olsun ve içinde de hava olur. Ve bu sistemin rezonans frekanslarına sahip olup olmadığını görmek istiyorum. Bu yüzden buraya bir farklı frekanslarda ses üretecek bir hoparlör koyuyorum. Ve rezonans durumlarını araştırıyorum. Ve rezonanslar vardır.

Fakat bu sistemin rezonansları, bu anlamda telin rezonanslarından farklıdır. Burada rezonansı oluşturacak olan kutu değil, fakat rezonans yapacak havanın kendisidir.

Hava bir yay gibi davranır. Aslında, bu anlamda, bizim yay sistemimizle oldukça paraleldir. Bu aynı zamanda boyuna bir salınımdır, oysa oradaki enine bir salınım idi.

O halde içeride basınç dalgaları oluşturuyorsunuz ve eğer bunu doğru frekansta yaparsanız, hava bir yay gibi davranır ve bu durumda rezonanslar elde edersiniz.

Bu durumda,  $n$  inci mod,  $n$  inci harmonik,  $n$  çarpı ses hızı bölü  $2L$  şeklinde verilir.

Ve  $v$  oda sıcaklığında yaklaşık olarak 340 metre bölü saniyedir, yani ses hızıdır.

Yine rezonansların  $n$  ile doğrusal değiştiğine dikkat edin.

Başka bir deyişle, eğer alet belli bir frekans üretir ise,  $L$  eşit 25 santimetre olsun.

Bu durumda  $f_1$  frekansını hesaplayabiliriz.

Ses hızının ne olduğunu biliyorsunuz, 340 metre bölü saniye, böylece  $n$  eşit 1 alırsanız ve bu durumda elde edeceğimiz frekans, 340 bölü  $2L$  yani 0.5 metre, ve bu bize 680 hertz verir.

O halde bu büyüklük size 680 hertz verecektir, fakat ikinci harmonik,  $f_2$  bunun iki katı olacaktır. Böylece 1360 hertz olacaktır. Ve saire.

Şimdi, her iki tarafta da kapalı olan bu sistem, çok iyi bir müzik aleti olmaz. Çünkü sesiniz dışarı çıkmayacaktır. Böylece ses kovuğunun her iki tarafı açık bırakılır. Örneğin bunun gibi. Bunun her iki tarafı da açıktır.

Ve sizler için bir sürpriz olsa da, eğer buraya küçük bir hoparlör koyarsanız, aynen burada yapmış olduğumuza benzer bir şekilde bu açık sistemde bile hava sütununu titreştirebiliriz. Ve bu durumda tahtaya yazmış olduğum frekans değerlerini elde ederiz.

Aynı zamanda, bir tarafı açık ve diğer tarafı kapalı olan müzik aletleri de bulunmaktadır. Böylece bu açık-açık sistem olarak adlandırılır ve bu da kapalı-açık olarak adlandırılır. Klarnet kapalı-açık bir müzik aletidir.

Burada da aynı zamanda rezonans frekansı değerleri elde edebiliriz. Buradaki değerler buradakiler ile tam olarak aynı olmayacaktır. Biraz farklı olur.

Şimdi ne kadar farklı olduğu önemli değildir, fakat biraz farklıdır. Fakat yine pek çok rezonans frekansı elde edersiniz. Böylece, eğer bu sistemi daha uzun yaparsam, bu durumda daha düşük frekanslar elde edeceğimi görürsünüz.

Uzunluğu bir metre yaparsam, bu kadar uzunlukta, bu durumda, bundan yaklaşık olarak 4 kat daha düşük olan  $f_1$  frekansını 170 hertz olarak elde ederim.

Ve bu durumda ikinci harmonik, 340 hertz olacaktır. Ve saire.

Böylece bir kilisede bir org gördüğünüz zaman, bu orgların borularının hepsinin farklı uzunluklarda olduğunu görürsünüz. Uzun olanlar çok düşük frekanslı sesleri ve kısa olanlar çok yüksek frekanslı sesleri verir. Ve bu aletlerin çalışma prensibi budur.

Burada sizlere daha önce göstermiş olduğum bir rüzgâr orgu var. Her iki tarafı açıktır, ve çok özel bir şekilde kıvrımlı olduğu için, rüzgarı böyle geçecek şekilde üflersem, rezonans elde edilecektir.

Yani, buradaki rüzgar tüm mümkün olan frekansları içermektedir. Aynen, kemanın üzerindeki yay gibi. Ve bu durumda istediği frekansları seçecektir. Fakat ,eğer rüzgarın hızını artırırsam, onun yüksek frekanslara ulaşmasını sağlayabilirim. Çok düşük rüzgar hızlarında, büyük olasılıkla küçük harmonikleri elde ederim Yüksek rüzgar hızlarında, büyük olasılıkla yüksek harmonikleri elde ederim.

Bunun her iki tarafıda açık olup, 75 santimetre uzunluğundadır.

Ve eğer birinci harmoniği elde edebilirsem, bu harmoniğin frekansı 240 hertz olacaktır. Muhtemelen en küçük harmoniği, ilk harmoniği elde edemeyebilirim, fakat deneyeceğim. Fakat kesinlikle daha yüksek harmonikleri elde etmek daha kolaydır. Ve hatta, aynen keman telinde olduğu gibi, sizlerin eş zamanlı olarak birden fazla frekansı dinlemenizi bile sağlayabilirim. Onu titreştirdiğiniz zaman, bu modların kombinasyonları şeklinde eş zamanlı olarak titreşecektir.

Bunu döndüreyim. İlk olarak yavaş hızla başlayacağım.

Bu 240 hertz olabilir.

Bu kesinlikle daha yüksek bir frekans.

Sanırım bu 240 hertz dir.

Bu en düşük, dolayısıyla birinci harmoniktir.

İki frekansı birlikte duyduğunuz anlar oldu mu?

İki ses duyuyorum.

Eğer bir flüt çalarsanız, şunu yaparsınız: Burada delikler oluşturursunuz, ve her iki deliği açık bıraktığınız zaman, bu durumda flütün etkin uzunluğu bu kadar olur ve yüksek ton elde edersiniz.

Eğer parmağınızı bu deliğe koyarsanız, bu durumda flütün etkin uzunluğu bu kadar olur ve daha düşük ton elde edersiniz.

Her iki deliği parmağınızla kapadığınız zaman, flütün etkin uzunluğu bu kadar olacaktır ve daha da düşük ton elde edeceksiniz.

Burada çok özel bir flüt var ve her iki tarafı da açık ve burada iki delik görüyorsunuz.

İlk olarak her ikisini de kapatacağız. Bu bize en düşük frekans değerini verir.

Böylece flütü çalıyorsunuz.

O halde enstrümanı kısa veya uzun yapmak işten bile değil.

Burada bu ucu açık ve burası ise kapalı olan başka bir enstrüman örneğim var.

Bu kendi versiyonum olan bir trombon. Burada bir piston var.

Bu böyle bir sistemdir, fakat bunu içeri ve dışarı doğru hareket ettirebilirim. Ve eğer içeriye doğru hareket ettirsem, bu durumda frekans yüksek olacaktır.

Ve burada tuttuğum zaman

Trombonun uzunluğu ile doğrudan alakalı olduğunu görüyorsunuz.

Ve eğer nasıl çalındığını öğrenirseniz, bir şarkı çalmayı deneyebilirsiniz. Ben deneyeceğim.

Teşekkür ederim.

Çevremizde her zaman rezonanslar vardır.

Araba kullandığınız zaman, aniden bir yerlerde bir tıkırtı duyduğunuzu fark etmişsinizdir. Bu aynanız olabilir, ya da başka bir şey olabilir, bir küllük olabilir, çünkü siz arabayı kullanırken, tekerlerin döndüğü frekans ile uyarılırsınız ve rezonans frekansı elde edilebilir.

Eğer biraz daha yavaş giderseniz, bu tıkırtı sesi durur, fakat başka bir tıkırtı sesi gelmeye başlar. Birinci tıkırtının durmasının sebebi, rezonans durumunun dışına çıkmanızdır. Fakat başka bir cismin rezonansını yakalayabilirsiniz.

Odanızda olan tüm cisimler farklı rezonans frekanslarını vardır. Bunlar ister tencere ya da tava yada buzdolabı olsun, ya da düşünebileceğiniz her şeyin rezonans frekansları vardır. Vücudunuz da rezonans frekanslara sahiptir.

Eğer sizleri ellerime alır ve sallamaya başlarsam ve bunu düşük frekansta yaparsam, hiçbir şey olmayacaktır. Fakat öyle bir frekans değeri vardır ki kollarınız bu şekilde hareket eder. Aynen fiziksel sarkaç gibi değil mi? Ve eğer bu frekansı yakalarsam, bu durumda oldukça kuvvetli bir tepki olacaktır ve böylece kollarınız, bacaklarınız, kafanız her şey farklı rezonans frekansında salınacaktır.

Çoğumuz duygusal rezonanslar deneyimini yaşamışsızdır. Küçük bir etki büyük bir tepkiye sebep olur. Aşık olma bir duygusal rezonans durumudur. Eğer birisi hassas bir sinire dokunursa bu bir rezonanstır.

Birisi size bir şey diyebilir ve bu sizin için çok hassas bir konu olabilir ve siz kendinizi kaybedersiniz. Tepkiniz son derece sert olacaktır. Benim görüşüme göre, bu da bir duygusal rezonans şeklidir.

Burada iki adet diyapazon var. Ve bu diyapazonlar öyle bir şekilde tasarlanmışlardır ki tek yapmam gereken şey onları birbirine vuracağım ve onlar kendi rezonans frekanslarını seçeceklerdir. Diyapozan, bunun gibi çok basittir.

Ona vuruyorum ve bu vurma sanki üzerine tüm frekans spektrumunun yüklenmesi gibidir. Ve diyapazon kendi istediği frekansı seçecektir ve bu onun titreşmek istediği frekans değeridir.

Onu daha yüksek frekanslarda, yüksek harmoniklerde uyarmam mümkündür. Fakat bu diapozunla bu biraz zordur. Bu ses 256 hertzdir.

Çatalın uçları saniyede 256 defa hareket etmektedirler. Ve bu 440 hertze sahiptir.

Ve hiçbir yüksek ses işitmiyorsunuz. Yüksek harmonikleri duymuyorsunuz.

Eğer, bir şarap kadehi kadar basit bir şeyi alacak olursam, bu kadeh birçok normal mod frekansına, birçok rezonans frekansına sahiptir. En düşük olanı uyarmak oldukça kolay ve bunu yapacağım. Ona parmağımı sürteceğim.

Sürtme olayı aynen bir teli bir yay ile titreştirme gibidir. Hepsi aynıdır. Onu bir çok frekansa maruz bırakıyorum. Hepsini yok sayıyor ve içlerinden sadece kendi istediği frekansı ,rezonans frekansını, normal modu, doğal frekansı seçiyor.

Ve cam kadeh düşük harmoniğinde ne yapacaktır? Birinci harmoniğinde, bir şekilde böyle titreşecektir ve bunu ağır çekimde bu derste birazdan sizlere göstereceğim.

Fakat ilk olarak frekansı dinlemenizi sağlayayım. Yaklaşık 470 hertz civarında.

Ellerimi temizlemek zorundayım. Çünkü parmaklarımda tebeşir tozu var ve bu tozlardan dolayı onu titreştiremeyebilirim. Gerçekten biraz sıvı ile temizlemem gerekir. Böylece ellerimde tebeşir tozu olmamalı. Tebeşir tozu oldukça kaygan.

Deneyeyim.

Oldukça açık.

Öğrenci olduğum günleri hatırlıyorum, akşam yemeği sonrası sohbetlerimiz olurdu.

Eğer sıkılırsak, hepimiz bunu yapardık. Sizlere söyleyeyim, bu oldukça fazla ses yapar. Yine söylüyorum, bunu sadece 470 hertz ile uyarmıyorum Bütün frekans değerleriyle uyarıyorum. Frekans spektrumunun bütün değerleri söz konusu ve o kendi istediğini seçmektedir. Bu durumda, seçtiği frekans 470 hertzdir.

Rezonanslar yıkıcı olabilir ve bayan şarkıcıların şarap kadehlerini aldıkları ve tam olarak benim yaptığım hareketi yaptıkları konusunda bir söylenti vardır.

Bu hareketi yaparlar. Çok dikkatli bir şekilde dinliyorlar, bu frekansı kendi sesleri ile oluşturuyorlar, seslerinin şiddetini artırıyorlar; söylenti kadehlerin kırıldığını söylemektedir ve kadehler kırılıyor.

Başka bir deyişle, cam kadehin genliği o kadar büyük oluyor ki bu durumda rezonans değerine o kadar yaklaşıyorsunuz ve o kadar fazla enerji bardağa gidiyor ve sesin şiddetinden dolayı kadeh kırılıyor. Sizlerle şarap kadehini kırmaya çalışacağım ve bunun kolay olmayacağını göreceksiniz.

Burada bir şarap kadehi var. Neredeyse oradaki kadeh ile aynı.

Ve bu şarap kadehini burada gördüğünüz hızlıca tekrarlanan elektronik flaş ışığı ile aydınlatabiliriz. Ve sizlere orada bu elektronik flaş ışığını ekranda göstereceğim.

Ve elektronik flaş kullanmamızın sebebi, şarap kadehini titreştirdiğimiz zaman şarap kadehinin hareketini görmenizi istememizdir. Tam olarak sesin frekansı ile aynı olmayan, biraz farklı bir frekans ile elektronik flaşa tabi tutacağız.

Böylece kadehin stroboskopik hareketlerini göreceksiniz.

Birazdan içeriği daha karanlık hale getireceğim. Fakat en azından çoğunu görmenizi istiyorum. Bu durumda 470 hertz oluşturabilirim ve bu frekans değeri rezonans frekansına oldukça yakındır.

Bizim kullanacağımız ses bu.

Sesin şiddetini artıracakız ve bundan sonra doğru rezonans değerine ulaşmaya çalışacağız. Belki bir kaç hertz yanılabiliriz. Tam olarak aynı frekans değerinde olmamız gerekir. Ve bu durumda kadehi kırıp kıramayacağımızı göreceğiz.

Şimdi, sizleri sesin çok şiddetli olacağı konusunda uyarmak istiyorum. Ve zaman geçtikçe ve bizler daha yüksek şiddetlere çıktıkça belki kulaklarınızı kapatmak isteyebilirsiniz. Aslında, kulaklarımı korumak için bunu kullanacağım. Ve hatta kadehin kırılması ihtimaline karşı, ki bu konuda şüpheliyim fakat kimse bilemez, bunu gözlerimi korumak için kullanacağım.

Pekala, içeriği karanlık haline getirelim.

Burada kadehi görmektesiniz. Çok fazla bir şey yapmıyor.

Ve şimdi sesin şiddetini artıracam. Şimdi kulaklarımı kapatacağım.

Bazı hareketleri görmeye başladık. Rezonans durumunda olduğumdan emin değilim.

Şiddetini artırıyoruz. Şimdi frekansı değiştiriyorum.

Oldukça yakın. Giderek yaklaşıyoruz.

Çok yakın.

Rezonansın oldukça yıkıcı olabileceğinden bahsettim ve tarihte bazı çarpıcı örnekler de var. Bir fırtına olduğu zaman, bir direkte olan trafik işaretlerinin böyle yapmaya başladığını görmüşsünüzdür. Bu oldukça garip çünkü rüzgar var. Rüzgar sanki tüm frekansları içeren bir frekans spektrumu gibi. Sanki, bir müzik aleti içine hava üfleme gibi.

Ve bu durumda trafik işareti bu frekanslar arasında sadece kendi istediğini seçmektedir ve daha sonra eğer rüzgar yeterince güçlü ise bu oldukça yıkıcı olabilir.

Ve en çarpıcı yıkıcı örnek Tacoma köprüsüdür. Bu köprü Amerikanın batı ucunda inşa edilmiştir ve öyküsü oldukça dramatiktir. Ve bu filmi sizlere göstereceğim.



Rüzgârın bir köprüye neler yapabileceğinizi göreceksiniz. Bu yüzden bu filmi başlatacağız, sonra ortamı karanlık hale getireceğiz.

FİLM SUNUCUSU: 1940 yılının 1 Temmuz günü, Delegasyon Washington eyaletinde toplandı. Hava oldukça güzel, olay son derece tarihi, konuşmalar ve giriş müziği ise tümüyle harikaydı. Bu Tacoma Narrows Köprüsü'nün büyük açılışıydı.

Başından beri, köprü, Seattle ve Tacoma arasındaki Puget boğazı boyunca güzelce uzanıyordu. Tacoma Narrows Köprüsü yeryüzündeki en uzun asma köprülerden biriydi.

Ve eğer birileri daha dikkatli olsalardı, muhtemelen yeryüzündeki en uzun asma köprülerden birisi olarak kalacaktı. Sorun başından beri oradaydı. Ama birçok kişi detaylara dikkat etmemiş, inşaat devam ederken belli bir evrede dikkat etmeye başladılar. Birileri rezonansın önemini unutmuş gibi görünüyor.

Tacoma Narrows köprüsü tarih boyunca rüzgârla çalışan arplar arasında en muhteşem olanı idi. Ne yazık ki, onun ilk performansı sadece yaklaşık dört ay kadar sürdü. Aynı zamanda, oldukça güzel bir köprü idi. Güzel, fakat biraz garip.

İnşaatı tamamlanmadan önce bile, insanlar bu garip davranışını gözlemlemişlerdi.

Çünkü çok küçük bir esintide bile, dalgalanmalar köprü boyunca görülmekteydi.

Bir süre sonra, Yerel Mizahçılardan biri ona "Dörtnala Gertie" adını verdi. Ve bu isim oldukça bilinen nedenlerden dolayı 1940 yılı Kasım ayının 7 sine kadar kaldı.

O zamanlar da şimdiki gibi Seattle ve Tacoma spor bilincine sahip şehirlerdi. Dört ay boyunca burada yapılan yerel bir spor türü, rüzgârlı bir günde köprüden araba sürmektir. Bazıları bir roller coastera binmek gibi olduğunu iddia ederken, bazıları da öndeki arabanın yok olduğunu görmekten heyecan duyarlardı. Bu köprü sporunun ne kadar popüler olduğu ya da ülke çapında ne ölçüde yayılmış olduğu kesin değildir.

7 Kasım 1940 tarihinde, rüzgâr nispeten orta seviyede idi, yaklaşık 40 mil bölü saatlik bir hızı vardı. Yeni bir mod oluştu. Dalgalanmadan ziyade, köprü bükülmeye başladı.

40 mil bölü saat rüzgar hızı çok kuvvetli bir hız değil, ancak köprünün şiddetle bükülmesini başlatmak için yeterince kuvvetli idi. Ve sabah 11:00'de, çöktü.

Şaşırtıcı- rezonansın ne yapabileceği şaşırtıcı.

Müzik aletlerinde, sesin havada hızı olan 340 metre bölü saniye olan hızına bağlı kalırız. Ve sizlerle konuştuğum zaman, burada belli bir büyüklüğe, belli bir şekle sahip olan bir ses kovuğum yani boşluğum var. Ve ben konuşurken, bunun boyut ve şekli her zaman değişir.

Ve bu, benim oldukça düşük bir ses çıkarmamı mümkün kılan veya oldukça yüksek ses çıkarmamı mümkün kılan, karakteristik bir ses yapar.



Ve nasıl konuşursam konuşayım, sizler hiç şüphe yok, bu Walter Lewin diyeceksiniz.

Oldukça net ve oldukça kolay tanınabilir. Her biriniz ve ben çok iyi tanınan seslere sahibiz. Eğer benim sistemimde sesin hızını değiştirebilirim, durum değişecektir.

Ve havadan çok farklı bir molekül ağırlığına sahip olan helyum sesin havadaki hızından çok daha yüksek bir hıza sahiptir. Yaklaşık 2.7 kat daha yüksek, 2.7 çarpı 340 metre bölü saniye.

Bu yüzden eğer sistemimi helyum ile doldurursam. Helyumun içinde oksijen olmaması durumunda, çok uzun yaşayamam, bu bir detaydır.

Eğer sistemimi helyum ile doldurursam, bu durumda, elbette, ses tellerim ve buradaki ses boşluğum bunu bilmediklerinden, onlar sizinle konuştuğum zaman normalde yaptıklarının aynısını yaparlar. Fakat, sesin hızı benim ses boşluğumda çok farklı olduğundan, oluşturacağı frekans oldukça yüksektir ve çok farklı ses çıkarırım.

Fakat bahsettiğim gibi problem helyumun içerisinde hiç oksijen olmamasıdır. Ve eğer çok az helyum içime çekersem, bir işe yaramaz ve pek fark edemezsiniz. Bu yüzden çok fazla miktarda helyumu içime çekmek zorundayım ve bunu deneyeceğim.

Fakat bunun için küçük bir bedel öderim. Ve bu küçük bedel ise bayılmaktır.

Bayılma seviyesinin uzağında kalabilmeye çalışacağım.

Helyum burada, ilk önce içirimdeki havayı dışarı vereceğim ve sonra helyumu içime çekeceğim. Ve Helyumu tekrar dışarı verir ve yine helyumu içime çekerim.

Ve bu esnada konuşamam, fakat bundan sonra içimin tam olarak helyum ile dolduğunu düşününce, sizlere birkaç kelime söyleyeceğim.

O halde basıncı benim istediğim seviyeye ayarlayalım.

Sizlere sesimin oldukça farklı olacağını söylemiştim.

Umarım bundan hoşlandınız, Gelecek derste görüşürüz.

Teşekkürler