

# Asterosismoloji'ye Giriş

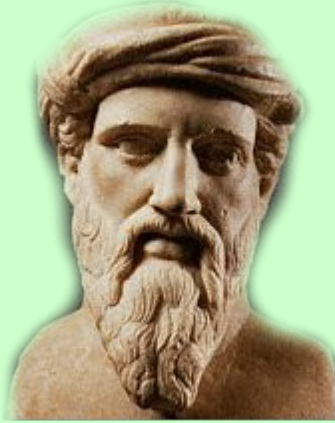
Prof. Dr. Özgür BAŞTÜRK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

# Bu Derste Ne Göreceğiz?

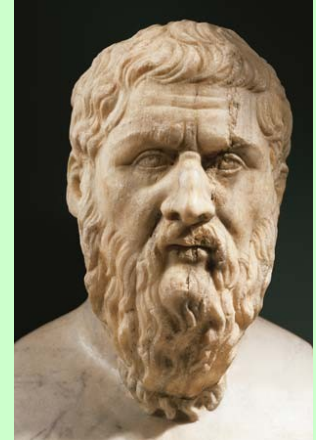
- ✓ Tarihçe
- ✓ Asterosismoloji (**Asteroseismology**) Nedir?
- ✓ Basınç ve Çekim Modları
- ✓ 1 Boyutlu Salınımlar
- ✓ 2 Boyutlu Salınımlar
- ✓ Yıldızlarda Zonklama Olgusu: 3 Boyutlu Salınımlar

# Tarihçe



Samos'lu Pisagor (M.Ö. 569-475): «Dünya boşluktaki bir küredir. Yıldızların günlük hareketleri ile Güneş'in, Ay'ın ve gezegenlerin bu yıldızlar arasındaki hareketleri ise bu cisimleri taşıyan kristal küre ve tekerleklerin dönme ve dolanma hareketlerinin sonucu gerçekleşir. Tanrılar ve Pisagor gibi "insan ötesi" varlıklar kristal kürelerin hareketlerini, Koestler (1959)'da adlandırıldığı şekliyle **"Kürelerin Müziği"** 'ni duyabilirler»

Eflatun (Plato) (M.Ö. 427-347): «Her gezegende onun hareketiyle uyumlu bir müzik çalan bir siren vardır ve bu siren diğerlerinininkiyle **harmoni** içerisindedir»

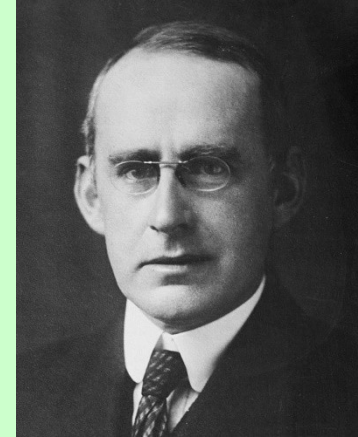


# Tarihçe



Johannes Kepler (1571-1630): «**Kürelerin Müziği**» kavramına o kadar inanmıştı ki gezegenlerin hareketlerini müziksel bağlamında anlamak için yıllarca çalıştı. Sonunda kendisi de ortaya bir müziğin çıkmadığını itiraf etmekle birlikte **gezegenlerin hareketlerinde bir harmoni** olduğu (harmonik oranlarla modüle bir şekilde hareket ettiklerini) fikrini korudu. Oldukça yoğun çalışmalarının başarısızlığa uğraması sonrası Kürelerin Müziği **fikrinden vazgeçen** Kepler, bugün Kepler Kanunları'nın birincisi olarak bildiğimiz gezegenlerin eliptik yörüngeler üzerinde hareket ettikleri sonucuna ulaştı.

Sir Arthur Eddington (1882-1944): «İlk bakışta Güneş ve yıldızların **iç katmanları Evren'in diğer bölgelerine göre daha ulaşılmaz** görünüyor. Teleskoplarımız uzayın derinliklerinde giderek daha uzağı görebilir ancak belirgin bariyerlerin arkasında gizli yerler (yıldızların iç bölgeleri) hakkında kesin bilgileri nasıl edinebiliriz? Yıldızların üst katmanlarını soyup iç katmanlarındaki şartları öğrenmemizi hangi araç sağlayabilir? Bu noktada **gözlemsel testten** yoksun bilimsel çıkarımlara güvenemeyiz!



# Asterosismoloji

- ✓ Eddington'ın yıldızların **üst katmanlarını** «soymak» için ihtiyaç duyduğu aracı bulmuş durumdayız!
- ✓ Asterosismoloji, **yıldızların yüzeylerindeki zonklamaları çalışarak iç yapıları** hakkında bilgi edinmemizi sağlar.
- ✓ Yıldızların içinde dışarıya çıkamayan **ses dalgaları** vardır. Bu ses dalgaları bazı yıldızların periyodik olarak ***büzülmesine ve genişlemesine, ısınmasına ve soğumasına*** neden olur.
- ✓ Bu hareketlerin sonuçlarını yüzeyde ***parlaklık değişimi*** olarak gözleriz. Bu şekilde parlaklığı değişen yıldızlara **zonklayan yıldızlar** diyoruz.

# «Zonklayan bir yıldız bir orkestra gibidir»



- ✓ Tüm enstrümanlar aynı frekansı çalarken **kemanı** nasıl oluyor da **ayırabiliyoruz**?
- ✓ Orkestradaki her bir enstrüman bazı **harmoniklere** (referans bir sinyal ya da dalga'nın tam katı frekansa sahip sinyal ya da dalga) güç verirken diğerlerini bastırmak üzere tasarlanmıştır!
- ✓ Hangi doğal tınlamaların (**salınım modlarının**) yayılacağını dolayısı ile hangi harmoniklerin bastırılıp hangilerinin öne çıkarılacağını enstrümanın şekli belirler
- ✓ Enstrümandan çıkan sese karakterini veren, harmoniklerin **frekans, genlik ve evrelerinin** bir kombinasyonudur.

# Biraz müzik...

Overtones, harmonics and Additive synthesis:

<https://www.youtube.com/watch?v=YsZKvLnf7wU>

# Ses Dalgaları

Ses dalgası bir basınç dalgasıdır. Gaz içerisinde onu sıkıştırarak ve seyrelterek yayılır. Isı kaybının olmadığı (adiyabatik) süreçlerde yayılma hızı

$$v_s = \sqrt{\Gamma_1 p / \rho} \quad (1)$$

İdeal gaz için

$$p = \rho k_B T / \mu m_u \quad (2)$$

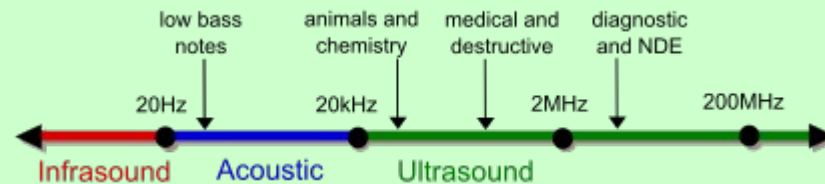
(2)'yi (1)'de yerine koyarsak;

$$v_s = \sqrt{\Gamma_1 k_B T / \mu m_u} \quad (3)$$

Ses hızı yayıldığı ortamın (gazın) sıcaklığı ve kimyasal yapısına bağlıdır  
Basıncıdaki değişime sıcaklık ve yoğunluk da eşlik eder!



# Ses Dalgaları ile “Görmek”



# Ses Dalgalarıyla Yıldızların Ne “Alakası” Var?

- ✓ Bir gazın içerisinde yayılan *sesin hızını* ölçebilirsiniz *gazın basıncı ve yoğunluğu* hakkında bilgi sahibi olabilirsiniz!
- ✓ **Hal denklemi** (ing. equation of state) olarak bilinen (3) numaralı denklemi kullanarak *sıcaklık* ve *kimyasal bileşimi* hakkında da bilgi sahibi olabilirsiniz!
- ✓ *Yıldızlar devasa gaz küreleridir* ve ses (basınç dalgaları) onların içinde de oluşmakta ve yol almaktadır.
- ✓ Öyleyse bu sesin *frekans, genlik ve evresini* çalışarak içinde bulunduğu gazın yani **yıldızın yapısı** hakkında fikir edinebiliriz!
- ✓ Asterosismolojinin amaçlarından biri yıldızın içindeki sesin hızını ölçerek yıldızın yapısına dair **temel parametreleri** elde etmektir!
- ✓ Bunun için *fotometrik ve spektroskopik gözlemler* yaparak ses dalgalarının *yüzeydeki frekans, genlik ve evrelerini* ölçeriz.
- ✓ Asterosismoloji **“Kürelerin Müziği”**’nin ta kendisidir!

# Kürelerin Müziği

## *“Music of the Spheres”*

- ✓ **İnsan kulağı 10 oktav** dahilindeki (16 Hz – 16000 Hz) sesleri duyabilir.
- ✓ **Yıldızlardaki ses dalgaları** ise tüm yıldızlar düşünüldüğünde **20 oktavlık** bir aralık içerisinde yer alır
- ✓ Yıldızlardaki en “tiz” ses dahi insan sesinin duyabileceği en pes “do” dan **15 oktav daha “pes”**, yani daha düşük frekansa sahiptir.
- ✓ Yıldızlardaki ses dalgalarının frekansları **insan sesinin algılayabileceği oktav aralığına transfer** edildiğinde, yıldızların “sesini duymamız” mümkün olur.
- ✓ Yıldızlardaki ses dalgaları müzik enstrümanlarında olduğu gibi bir **temel tonun** (fundamental tone) **harmonikleri** (tam frekans katları) ile birlikte çalınmasıyla **oluşmadığı** için hoş birer “armoni” ‘ye sahip değildir!
- ✓ Aşağıdaki linkteki “müziğin üretildiği enstrümanlar”: HR1217; HR3831; GD358;  $\theta$  Tuc; R Scuti ve Güneş yıldızlarıdır.

Kaynak: Stellar acoustics as input for music composition, Zoltán Kolláth & Jeno Keuler,

<https://www.konkoly.hu/staff/kollath/stellarmusic/>

<https://stellaround.org/ssoundspaces.html>

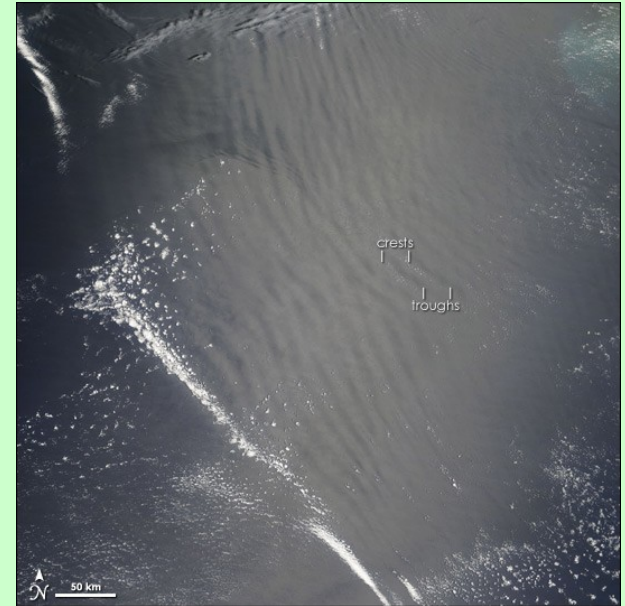
<https://science.nasa.gov/mission/hubble/multimedia/sonifications/>

# Basınç (p) ve Çekim (g) Modları

- ✓ Yıldız zonklamalarında **basınç değişimlerinin (p-modu)** yanı sıra yıldız katmanları arasındaki yoğunluk farklarından kaynaklanan **kaldırma kuvveti** (buoyancy) de önemlidir.
- ✓ Yoğunluk farkları nedeniyle **yayılan çekim dalgaları (g-modu)** (gravity waves) “akustik” değildir. Ancak yıldız zonklamalarında ses dalgaları kadar önemlidir.
- ✓ Bir akışkan aralarında yoğunluk farkı bulunan iki katmanın ara yüzeyinde hareket halindeyken çekim kuvveti onu denge konumuna çekmeye çalışır. Bu denge konumu civarında bir salınım hareketine neden olur.
- ✓ Yıldızların daha derin katmanlarını çalışmamıza izin veren bu dalgaların gözlenmesi daha zordur.



Glen Talbot, “Wave Clouds over Theresa”, Wisconsin, USA



Jeff Schmaltz MODIS Rapid Response Team, NASA-GSFC

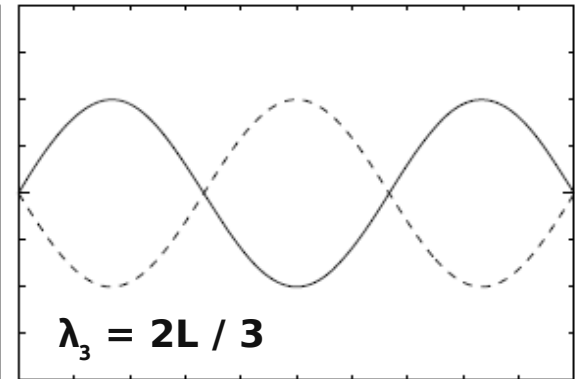
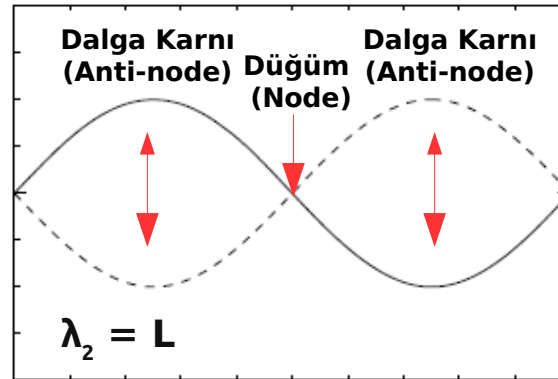
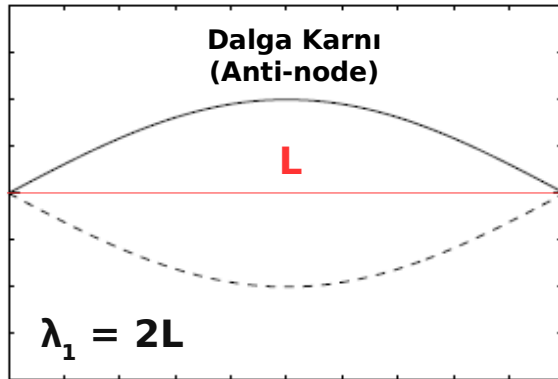
Video: Undulatus Asperatus/Gravity Waves Time Lapse:  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_0\\_A2xPCAr0](https://www.youtube.com/watch?v=_0_A2xPCAr0)

# 1 Boyutlu Salınımlar

1. harmonik

2. harmonik

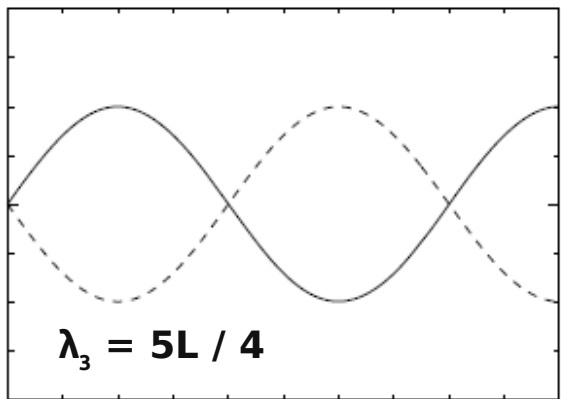
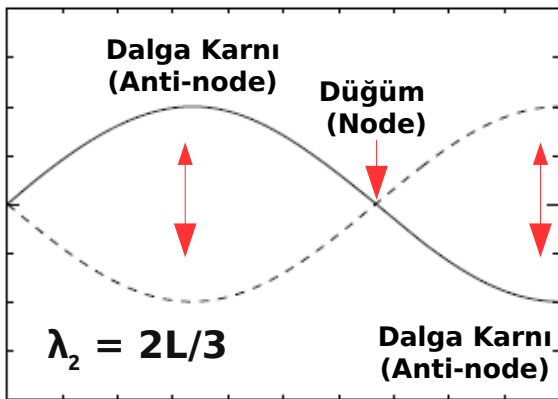
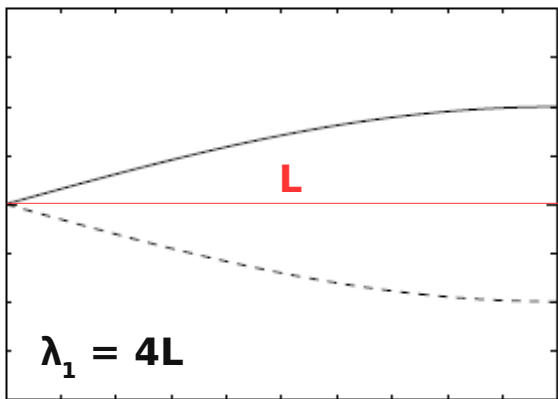
3. harmonik



Temel mod  
(fundamental mode)

Birinci üst ton  
(first overtone)

İkinci üst ton  
(second overtone)



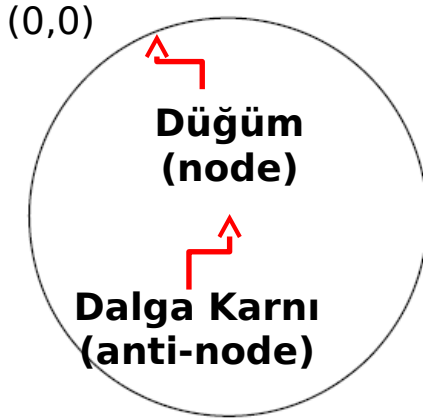
Temel mod  
(fundamental mode)

Birinci üst ton  
(first overtone)

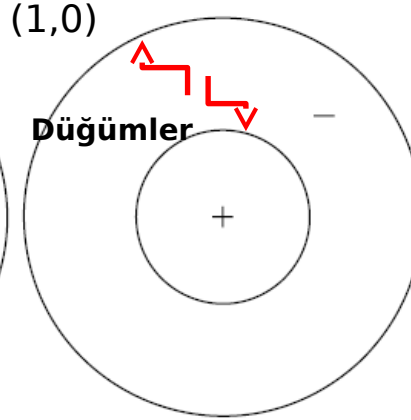
İkinci üst ton  
(second overtone)

# 2 Boyutlu Salınımlar

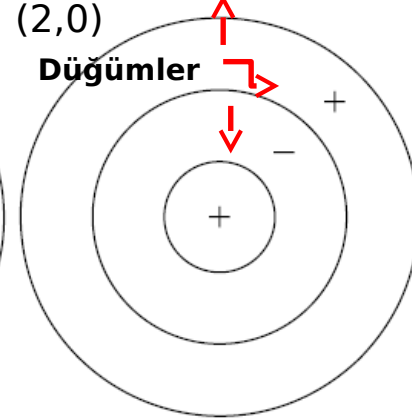
Temel mod  
(fundamental mode)



Birinci üst tone  
(first overtone)

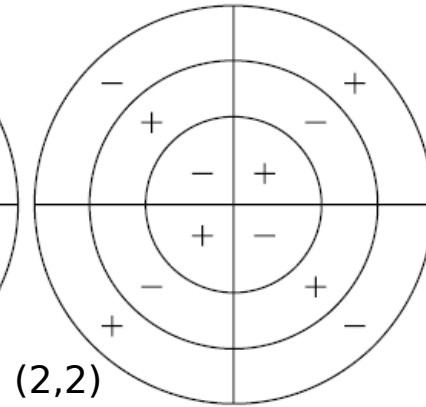
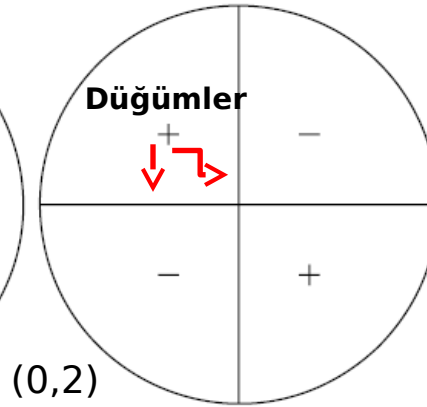
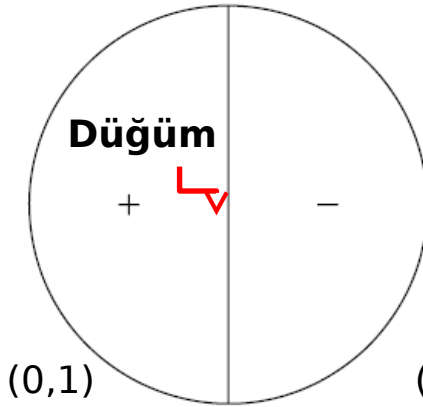


İkinci üst tone  
(second overtone)



**Radyal Modlar**

**Radyal Olmayan (non-radial) Modlar**

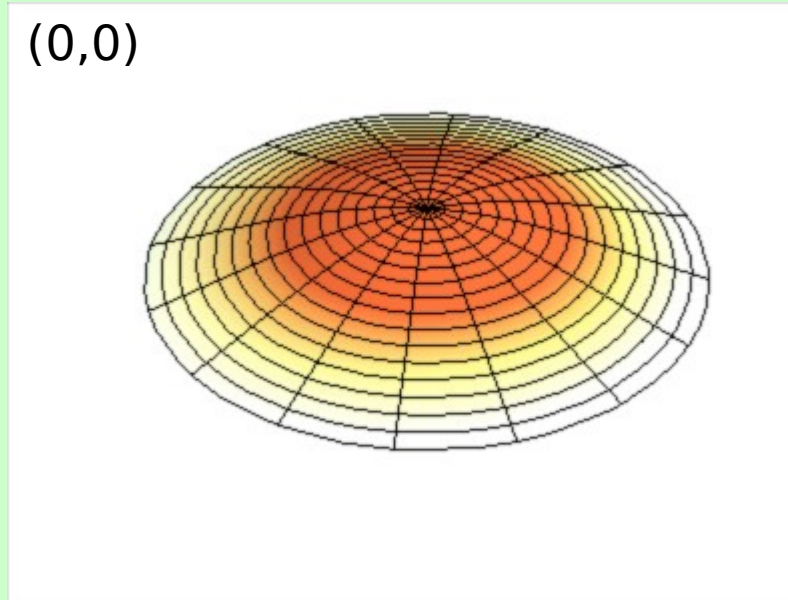


İkili mod  
(dipole mode)

Dörtlü mod  
(quadruple mode)

İkinci üst dörtlü mod  
(second overtone quadruple mode)

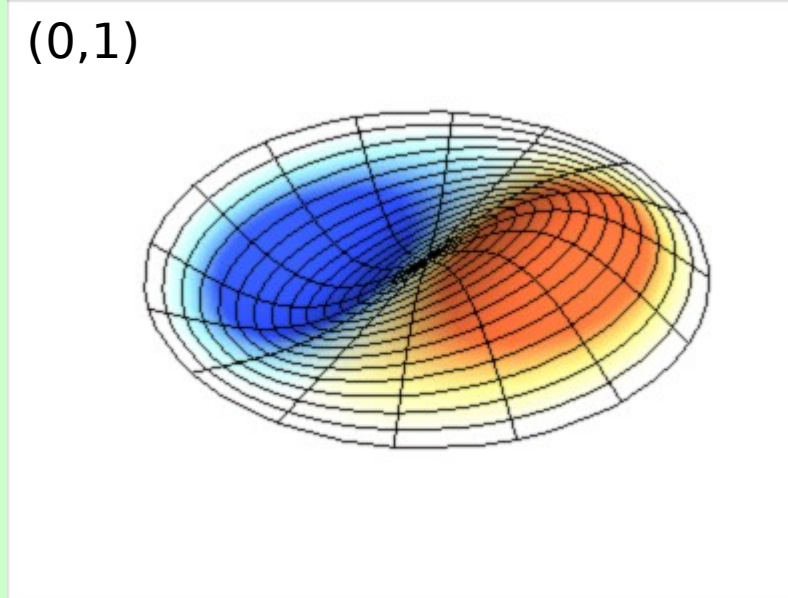
# 2 Boyutlu Salınımlar



© Dan Russell,  
<http://www.acs.psu.edu/drussell/>

- ✓ Tek **düğüm** (düğüm, hareketsiz kalan nokta, eğri ya da yüzeylere verdiğimiz isimdir) **en dıştaki çember**dir.
- ✓ Davul derisi yüzeyinin ortasına vurduğumuzda deri içeri ve dışarı tek yönde hareket eder. Sesi radyal doğrultuda dağılır ve ölür. Çıkan ses “thump!” şeklindedir.
- ✓ Kuantum sayıları (0,0)’dır!

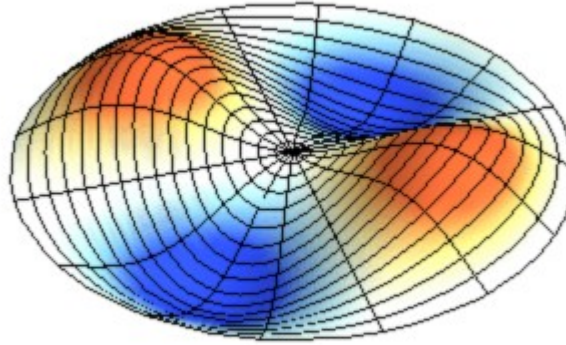
# 2 Boyutlu Salınımlar



- ✓ İki düğümden biri en dıştaki çemberdir. Diğeri yüzeyi diyagonal olarak bölen bir eğridir. Adının neden “ikili” (dipole) mode olduğu açık değil mi?
- ✓ Diyagonal düğümün sol tarafına vurduğumuzda deri içeri hareket ederken, diğer tarafı dışarı hareket eder. Bir taraf dışarı hava verirken, diğer taraf içeri çeker ve sesin yayılması daha az efektif olur, “ölmesi” daha uzun sürer. Çıkan ses daha tizdir (frekansı daha yüksek)!
- ✓ Kuantum sayıları (0,1)’dir!

# 2 Boyutlu Salınımlar

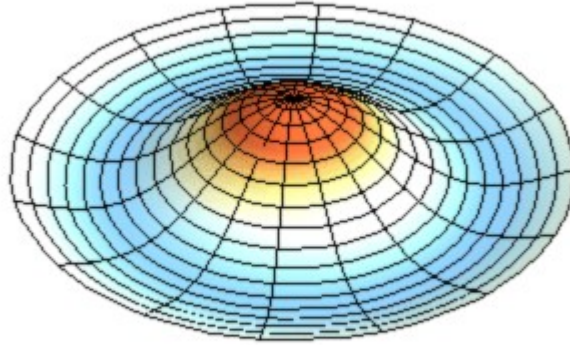
(0,2)



- ✓ Üç düğümden biri en dıştaki çemberdir. Diğer ikisi yüzeyi diyagonal olarak bölen iki eğridir. Neden “dörtlü” (quadruple) mod dendiği açık değil mi?
- ✓ Enerjinin sese dönüşümü önceki iki moda göre çok daha az efektiftir ve ses çok daha geç “ölür”. Bu nedenle sesin volümü düşük, tizliği (frekansı) ve süresi yüksek olur.
- ✓ Kuantum sayıları (0,2)’dir!

# 2 Boyutlu Salınımlar

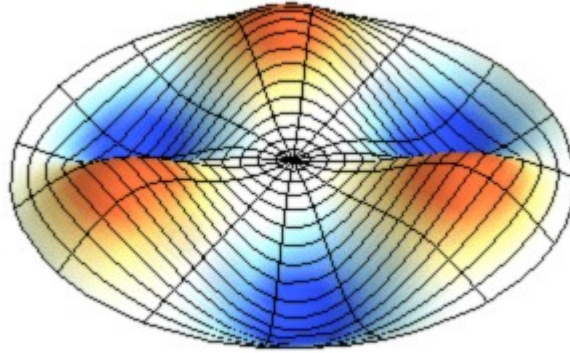
(1,0)



- ✓ İç içe iki çember düğümünden oluşur.
- ✓ Enerjinin sese dönüşümü daha komplike olmakla birlikte çıkan ses kısa sürelidir ve “thump” sesine katkı şeklindedir.
- ✓ Elde edilen sesin frekansı (0,1) modunun 2.295 katıdır.
- ✓ Kuantum sayıları (1,0)’dır!

# 2 Boyutlu Salınımlar

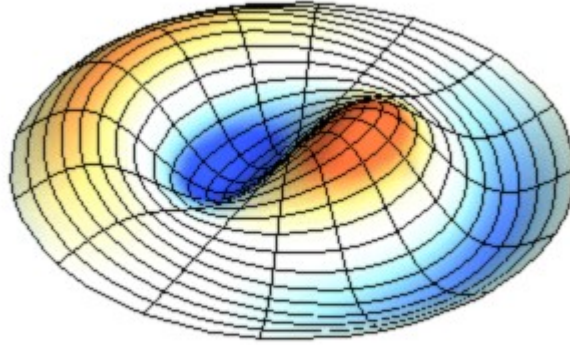
(0,3)



- Birbirini kesen 3 diyagonal ve dıştaki çember düğümünden oluşur.
- Enerjinin sese dönüşümü efektiflikten çok uzak, sesin “ölmesi” uzun süreli ve frekansı yüksektir (tiz).
- Kuantum numarası (0,3) ‘tür!

# 2 Boyutlu Salınımlar

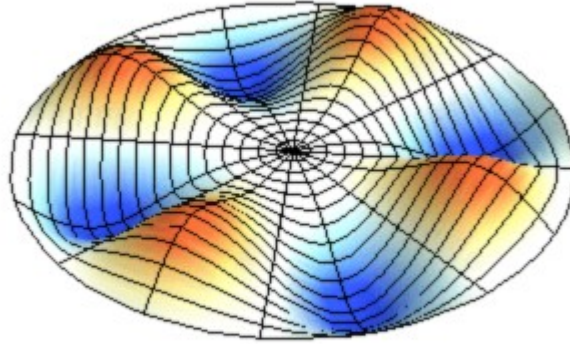
(1,1)



- ✓ İç içe iki çember ve bir diyagonal düğümde oluşur.
- ✓ Enerjinin sese dönüşümü efektiflikten yine çok uzaktır. Davulun sesinin kalitesine katkısı pek yoktur.

# 2 Boyutlu Salınımlar

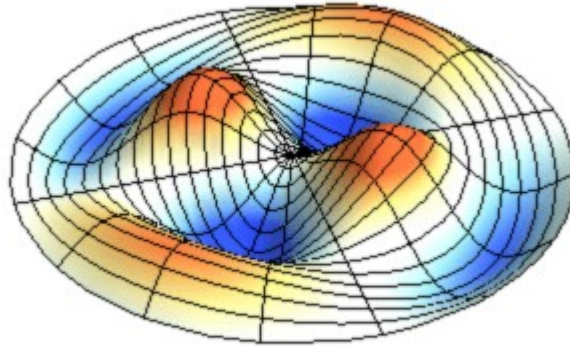
(0,4)



- Birbirini kesen 4 diyagonal ve en dıştaki çember düğümünden oluşur.
- Enerjinin sese dönüşümü efektiflikten yine çok uzak, davulun sesine katkısı daha tiz ve uzun sürede ölen ses şeklindedir.

# 2 Boyutlu Salınımlar

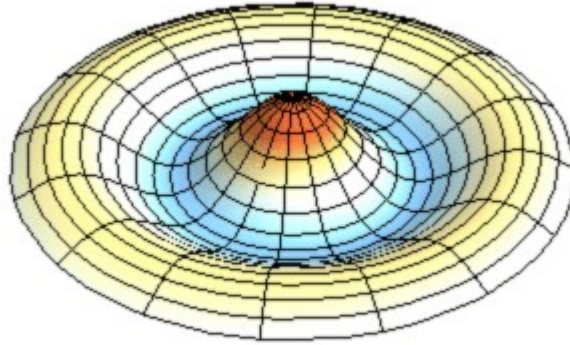
(1,2)



- ✓ Birbirini kesen 2 diyagonal ve iç içe iki çember düğümünden oluşur.
- ✓ Kuantum numarası (1,2) 'dir.

# 2 Boyutlu Salınımlar

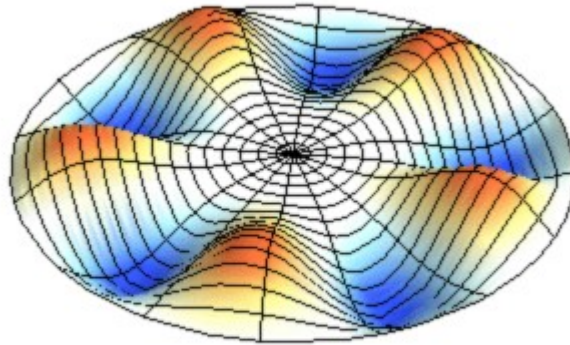
(2,0)



- ✓ İç içe üç çember düğümünden oluşur.
- ✓ Davul derisinin ortasına vurulduğunda “thump!” sesine katkı verirken, dış simitlere vurulduğunda sese pek katkısı olmaz. Ses çok çabuk ölür.
- ✓ Kuantum numarası (2,0) ‘dır.

# 2 Boyutlu Salınımlar

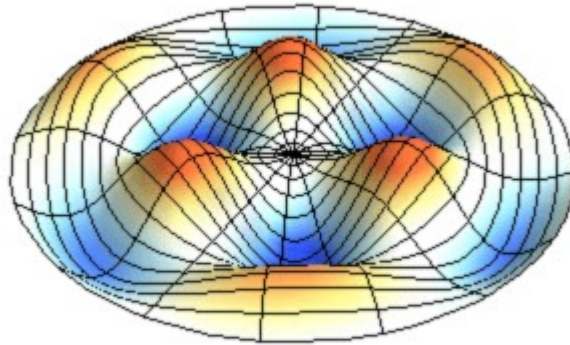
(0,5)



- ✓ Birbirini kesen 5 diyagonal ve dıştaki çember düğümünden oluşur
- ✓ Kuantum numarası (0,5) 'dir.

# 2 Boyutlu Salınımlar

(1,3)



- ✓ Birbirini kesen 3 diyagonal ve iç içe iki çember düğümünden oluşur
- ✓ Kuantum numarası (1,3) 'tür.

# 2 Boyutlu Salınımlar

## Mode Shapes of a Circular Membrane

Dr. Dan Russell



# 3 Boyutlu Salınımalar

- Bir yıldız küresel bir cisim olduğu için birbirine dik üç yönde düğüm olabilir! Bunlar merkeze uzaklık ( $r$ ), enlem ( $\theta$ ) ve boylam ( $\phi$ ) şeklinde adlandırılır. Enlem kutuptan aşağı doğru ölçülür.
- Merkeze aynı uzaklıktaki ( $r$ ) noktalar iç içe küre yüzeyleri şeklinde düğümler, sabit enlemler ( $\theta$ ) koni şeklinde düğümler, sabit boylamlar ( $\phi$ ) ise dairesel düzlemler şeklinde düğümler oluşturur.
- Küresel simetrik bir yıldızda hareket denkleminin çözümleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$\zeta_r(r, \theta, \varphi, t) = a(r) Y_l^m(\theta, \varphi) e^{-i2\pi\vartheta t}$$

$$\zeta_\theta(r, \theta, \varphi, t) = b(r) \frac{\partial Y_l^m(\theta, \varphi)}{\partial \theta} e^{-i2\pi\vartheta t}$$

$$\zeta_\varphi(r, \theta, \varphi, t) = \frac{b(r)}{\sin\theta} \frac{\partial Y_l^m(\theta, \varphi)}{\partial \varphi} e^{-i2\pi\vartheta t}$$

$\zeta_r, \zeta_\theta, \zeta_\phi$ : yer değiştirme,

$a(r), b(r)$ : genlikler

$\vartheta$ : salınım frekansı

$\partial Y_l^m$ : küresel harmonikler

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = -1^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(1-m)!}{(1+m)!}} P_l^m(\cos\theta) e^{im\varphi}$$

Burada  $P_l^m(\cos\theta)$ , Legendre polinomlarıdır ve

$$P_l^m(\cos\theta) = \frac{1}{2^l l!} (1 - \cos^2\theta)^{m/2} \frac{d^{l+m}}{d\cos^{1+m}\theta} (\cos^2\theta - 1)^l$$

Normalizasyon katsayısı

$$c_{lm} = -1^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(1-m)!}{(1+m)!}}$$

# 3 Boyutlu Salınımlarda Modlar

- ✓ Toplamda 3 kuantum sayısına ihtiyaç duyulur:
- ✓  $n$  (modun üst tonu -overtone of the mode-): radyal (**çembersel**) **düğüm**lerin sayısı
- ✓  $l$  (modun derecesi -degree of the mode-): **yüzeydeki düğümler**in sayısı
- ✓  $m$  (modun azimutal mertebesi -azimuthal order of the mode-): yüzeydeki düğümlerden **boylamsal** olanların sayısı
- ✓ Buradan yüzeydeki **enlemsel düğümler**in sayısı  $l - |m|$  olarak bulunur.
- ✓  $-l < m < l$  olup, her bir derece ( $l$ ) için  $2l + 1$  mod vardır.

# Yıldızlarda Radyal Modlar

- ✓ En basit salınım modu **radyal ( $n = 0, l = 0$ ) mod**dur. Temel radyal modda yıldız **içeri doğru büzülür ve dışarı doğru genişler**. Yıldızın **çekirdeği düğüm** (node), **yüzeyi dalga karnı** (anti-node) olarak düşünülebilir. (örn. Sefeidler, RR Lyrae değişenleri...)
- ✓ **Birinci üst ton radyal mod**da (first overtone radial mode,  $n = 1, l = 0$ ) **yıldızın içinde bir küre yüzeyi düğümdür** ve bu **kürenin iç tarafı büzülürken, dış tarafı genişler**. Yıldız **yüzeyi yine dalga karnı** olarak düşünülmelidir. (örn. roAp yıldızlarında bu mod gözlenmiştir (Kurtz vd. 2005))
- ✓ *Her iki modda* (temel ve birinci üst ton) zonklayan yıldızlar vardır. (örn. Bazı Sefeidler (double mode Cepheids), RR Lyrae (RRd) ve  $\delta$  Scuti değişenleri)
- ✓ Eğer yıldızın içinde *sıcaklık ve kimyasal kompozisyon* (dolayısı ile ses hızı) her noktada aynı olsaydı *ilk iki radyal modun dönemlerinin oranı* Sefeidlerde gözlenen  $P_{l=0,n=1} / P_{l=0,n=0} = 0.71$  ya da  $\delta$  Scuti değişenlerinde gözlenen  $P_{l=0,n=1} / P_{l=0,n=0} = 0.77$ 'den farklı olurdu.
- ✓ Aradaki bu fark dev Sefeid yıldızının, merkezinde H yakmaya devam eden  $\delta$  Scuti yıldızına göre iç bölgesinin daha sıkışık olmasından kaynaklanmaktadır. (Asterosismolojideki ilk çıkarımımız!)

# Yıldızlarda Radyal Olmayan (non-radial) Modlar

- ✓ En basit radyal olmayan mod **“dipole”** ( $l = 1, m = 0$ ) moddur. Bu modda **düğüm ekvator**dur. **Kuzey yarıküre içe doğru büzülürken ve güney yarıküre dışarı doğru genişler.** Yıldızın gözlemci tarafından görünen dairesel kesiti değişmez, *yıldız yukarı ve aşağı doğru salınıyor* şeklinde gözlenir. Bu sırada doğal olarak yıldızın kütle merkezi yer değiştirmez, zira yıldız uzayda yukarı ve aşağı “zıplayamaz!”
- ✓ Kütle merkezinin sabit kalmasını sağlayan şey, dış katman gözlemciye göre yukarı doğru genişlerken, iç katmanların içeri doğru büzülmesidir. Yani **yıldız radyal modda da zonklar** ( $n \geq 1$ ). Bir yıldızda dipol mod ancak en az bir radyal modun varlığında mümkündür. (örn. roAp yıldızları...)
- ✓  $l = 2, m = 0$  modu **“dörtlü” (quadruple) mod** olarak adlandırılır. Yıldızın kutupları şişerken ekvator çevresi büzülür, ekvator çevresi şişerken kutupları büzülür. **Düğümler +/- 35° enlemlerdedir.**
- ✓ Henüz ne Doppler görüntüleme tekniği ne de başka bir yolla Güneş’ten başka bir yıldızın **yüzeyindeki düğümleri çözümleyebilmiş değiliz.**
- ✓ Yıldız yüzeyinde ne kadar çok düğüm olursa *düğümlerin zıt tarafları zıt yönlerde hareket ediyor* olacağından, integre akı (fotometri) ya da dikine hız (tafysal) gözlemlerinde yakalanması o kadar güç olur, zira *birbirini sıfırlarlar* (**partial cancellation**)!

# Sekizli (Octupole) Mod

Simetrik sekizli mod  
( $l = 3, m = 0$ )

**Yüzey  
Düğümü**  
( $\pm 51^\circ$  ve  $0^\circ$   
enlemlerde)

“Eş ölçülü”  
(tesseral:  $0 < |m| < l$ )  
sekizli mod  
( $l = 3, m = \pm 1$ )

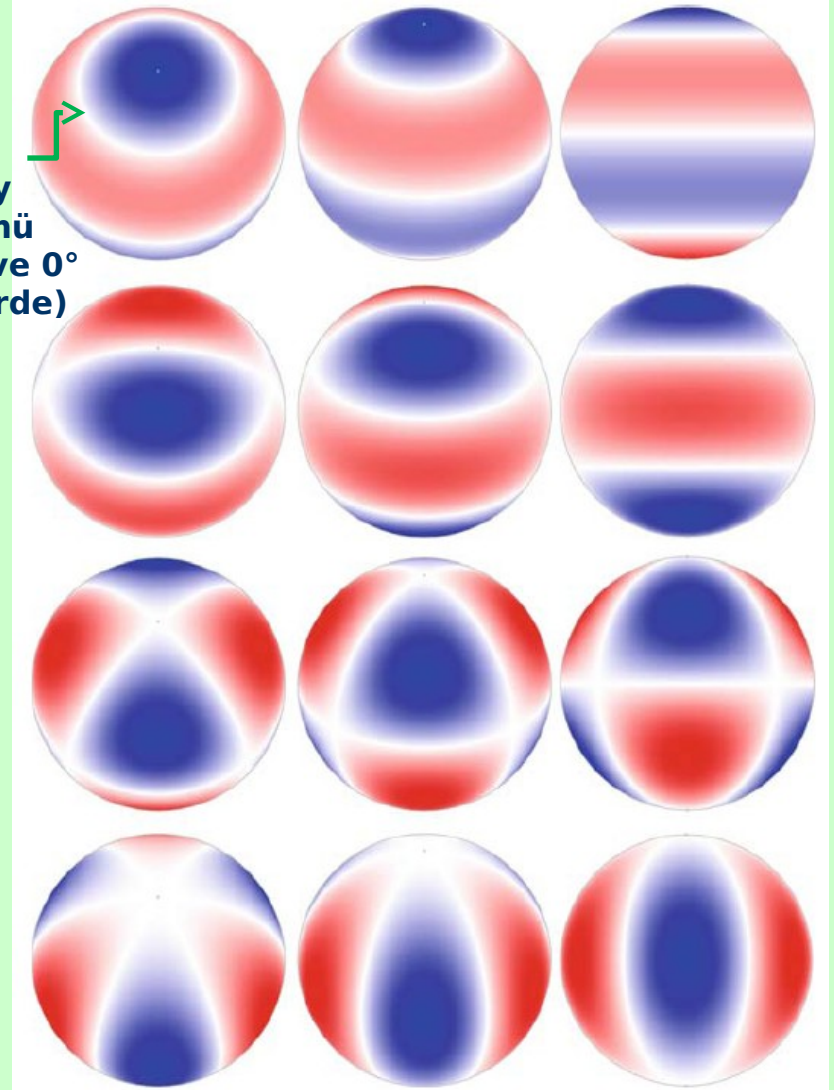
“Eş ölçülü”  
(tesseral:  $0 < |m| < l$ )  
sekizli mod  
( $l = 3, m = \pm 2$ )

“Sektörel”  
(sectoral:  $|m| = l$ )  
sekizli mod  
( $l = 3, m = \pm 3$ )

$i = 30^\circ$

$i = 60^\circ$

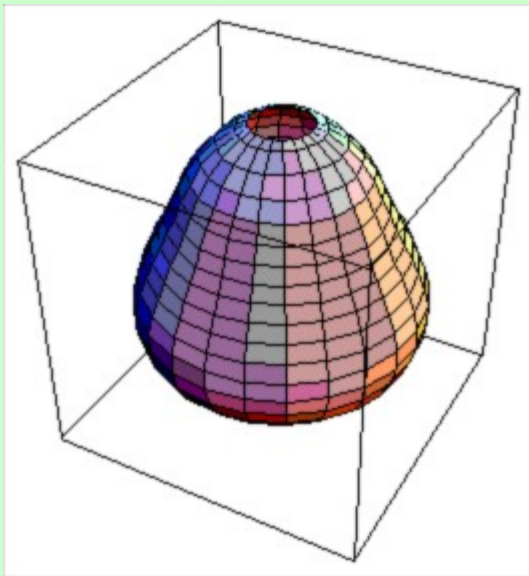
$i = 90^\circ$



# Zonklayan Yıldızlar

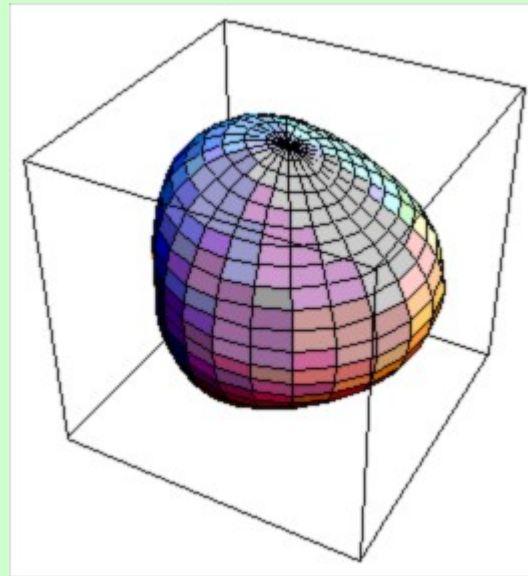
<http://asteroseismology.org> Animasyonlar!

Animations by B. Guenther, University of St. Mary's



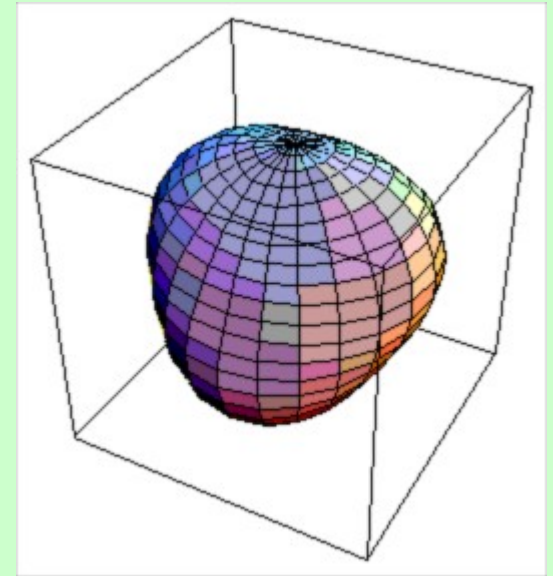
$$l = 3, m = 0$$

Axisymmetric  
mode



$$l = 3, m = 1$$

Tesseral mode



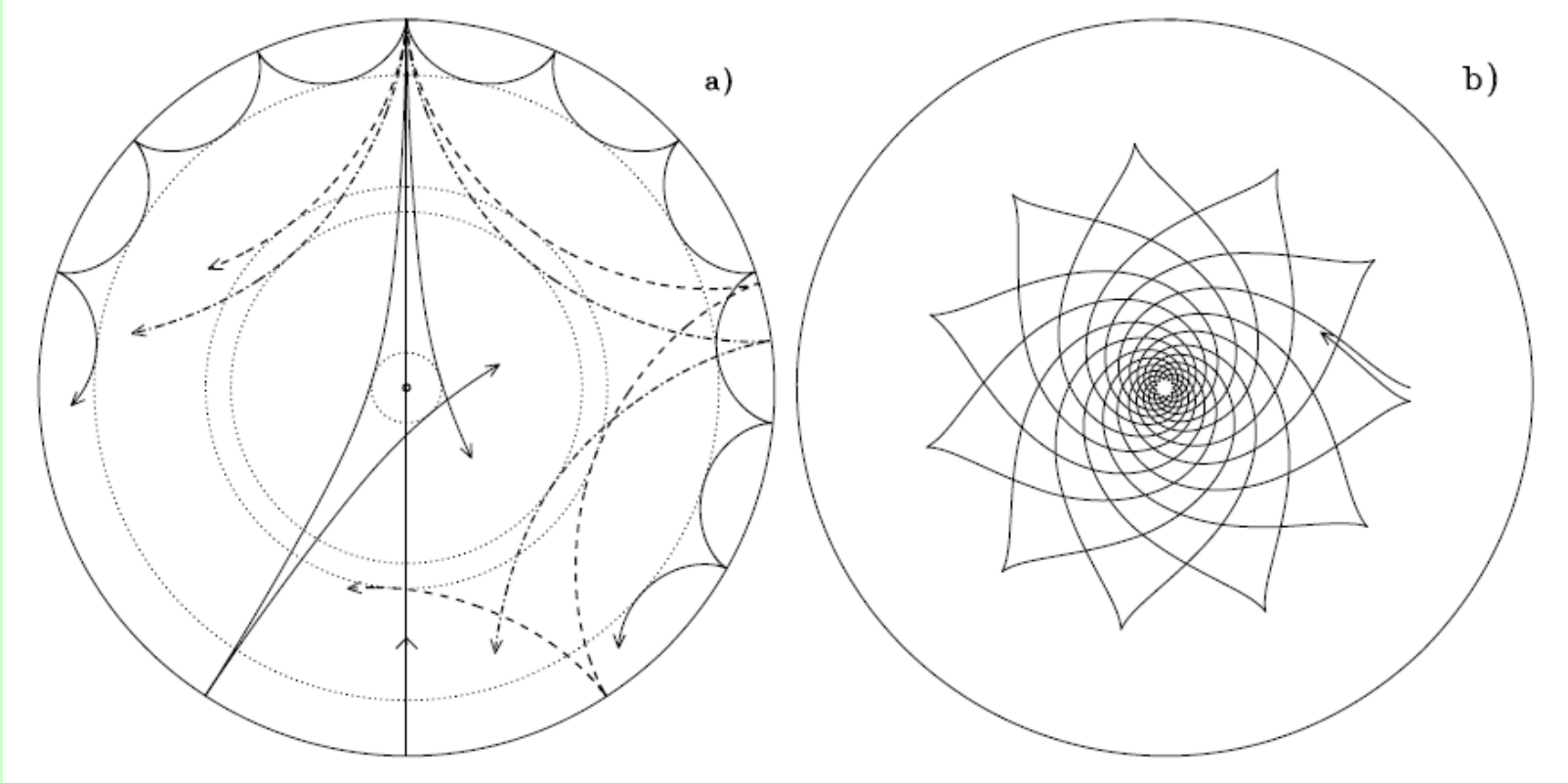
$$l = 3, m = 3$$

Sectoral mode

# Dönme Etkisi

- ✓  $m \neq 0$  modları 3-D salınım denklemlerinde zaman bağımlı bir çarpan getirir ( $e^{-i(2\pi\nu t - m\phi)}$ ). İşte bu “m” içeren evre terimi, dalganın durağan değil hareketli (travelling) olduğuna işaret eder. +m (pozitif modlar) dönmeye aynı (**prograd**) yönde, -m (negatif) modlar ise dönmeye ters yönde (**retrograd**) hareket eder.
- ✓ Yıldızın dönmesinin en önemli etkisi **küresel simetriden ayrılmasıdır!**
- ✓ **Prograd modlar** ( $m > 0$ , dönme ile aynı yönde) simetrik moddan ( $m = 0$ ) *daha düşük frekanslara* sahip olurken, **retrograd modlar** ( $m < 0$ , dönme ile zıt yönde) *daha yüksek frekanslara* sahip olurlar --> **Dönme ile ayrışma** (“rotational splitting”)
- ✓ Bugün dönme nedeniyle ayrışan frekansların ölçümünden Güneş’in iç katmanlarının nasıl döndüğünü belirleyebiliyoruz!

# Basınç ve Çekim Modları



Ses ve çekim dalgalarının Güneş benzeri bir yıldızın kesiti üzerinde yayılma yolları. **a)** Ses dalgaları yıldız içindeki çeşitli katmanlarda ses hızının değişmesi nedeniyle kırılır ve ani yoğunluk değişimi nedeniyle yüzeyden yansırken, **bazı modlar (nokta-nokta ile gösterilen) iç katmanları geçemez.** Gösterilen modlar 3 mHz frekansa sahip olan, ulaşabildikleri derinlik sırasına göre  $l=75, 25, 20$  ve  $2$  modlarıdır. Çekirdeğe kadar ulaşan ve kesiksiz eğri ile gösterilen mod **temel radyal moddur.** **b)** Verilen **çekim modu  $l=5$**  derecesine sahip olan 0.19 mHz frekansta mod olup, yıldızın içne hapsolmuş durumdadır. Görüldüğü üzere çekim modları çekirdek civarındaki koşullara oldukça hassastır ve bu onlar için önemli bir özelliktir.

## ✓p-modları:

Geri çağırıcı kuvvet

(Restoring force)

Dalga formu

(Wave form)

Gaz Hareketi

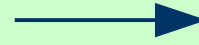
(Gas motion)

Derinlik

(Probing Scale)

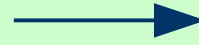
$n \gg 1$

(Radial modes)



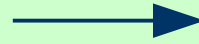
Basınç

(Gas pressure)



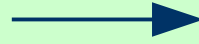
Akustik (basınç)

(Acoustic -pressure- waves)



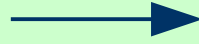
Dik yönde

(Vertical)



Dış katmanlar

(Outer layers)



Eş aralıklı frekanslar

(Modes equally spaced in frequency)

## ✓g-modları:

Geri çağırıcı kuvvet

(Restoring force)

Dalga formu

(Wave form)

Gaz Hareketi

(Gas motion)

Derinlik

(Probing Scale)

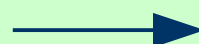
$n \gg 1$

(Radial modes)



Kaldırma Kuvveti

(Buoyancy)



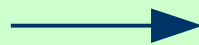
Çekim dalgası

(Gravity waves)



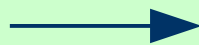
Yatay yönde

(Horizontal)



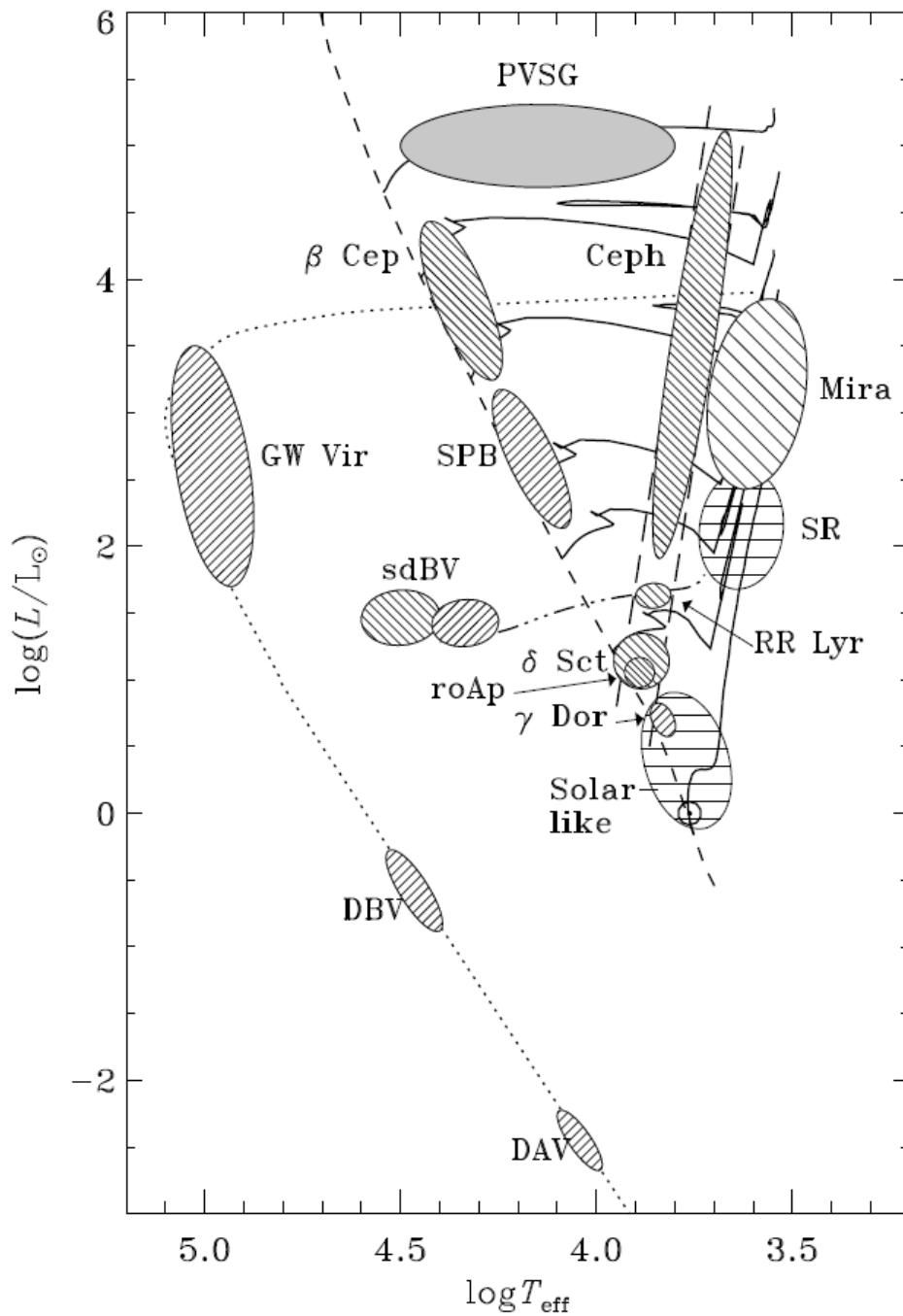
İç katmanlar

(Inner layers)



Eş aralıklı dönemler

(Modes equally spaced in period)



Haftaya:  
Üzerinde  
Yıldızlar

HR  
Diyagramı  
Zonklayan