

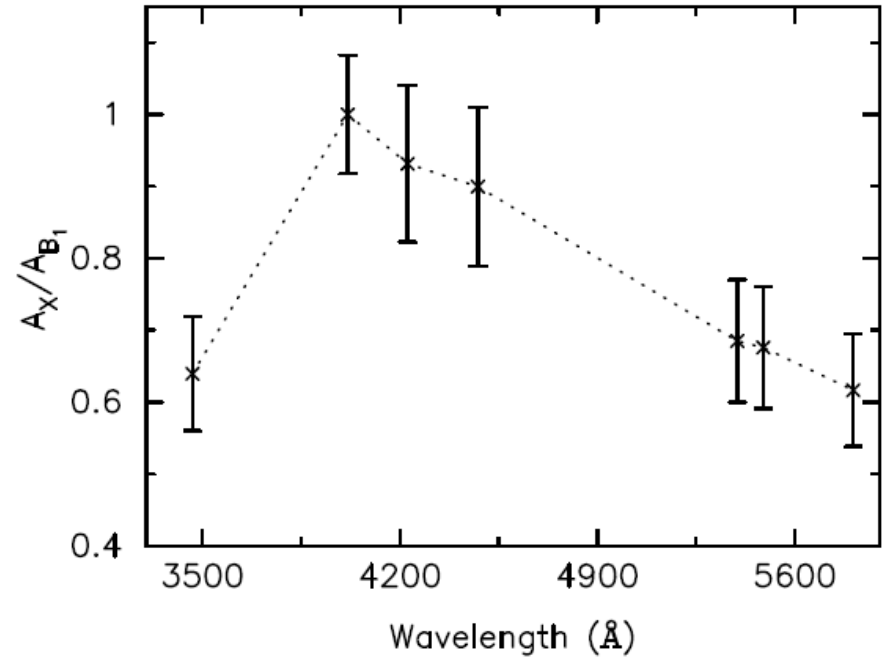
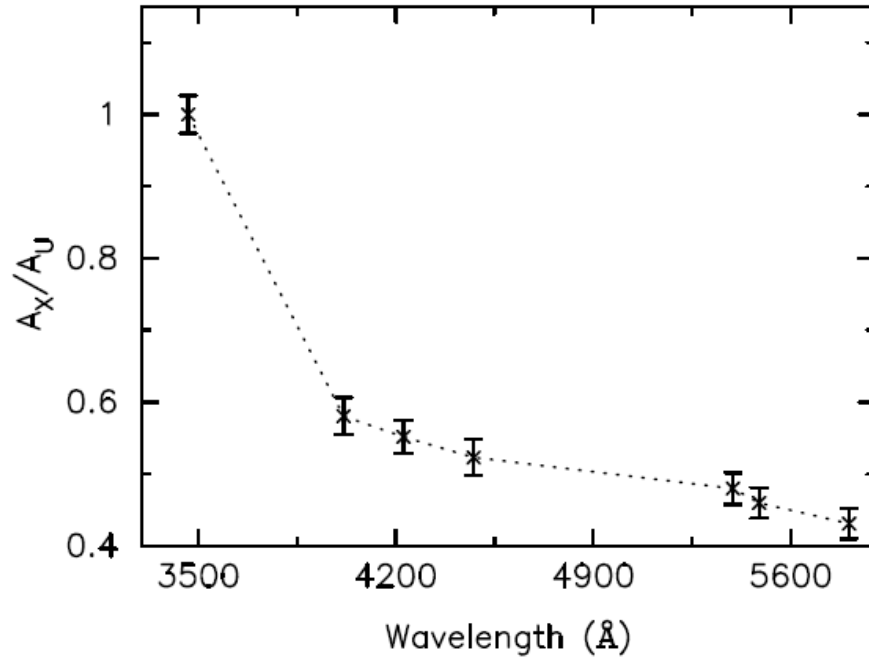
801.526 Asterosismoloji

Ders 5 :
Zonklama Modu Belirleme

Zonklama Modlarının Belirlenmesi (ing. Mode Identification)

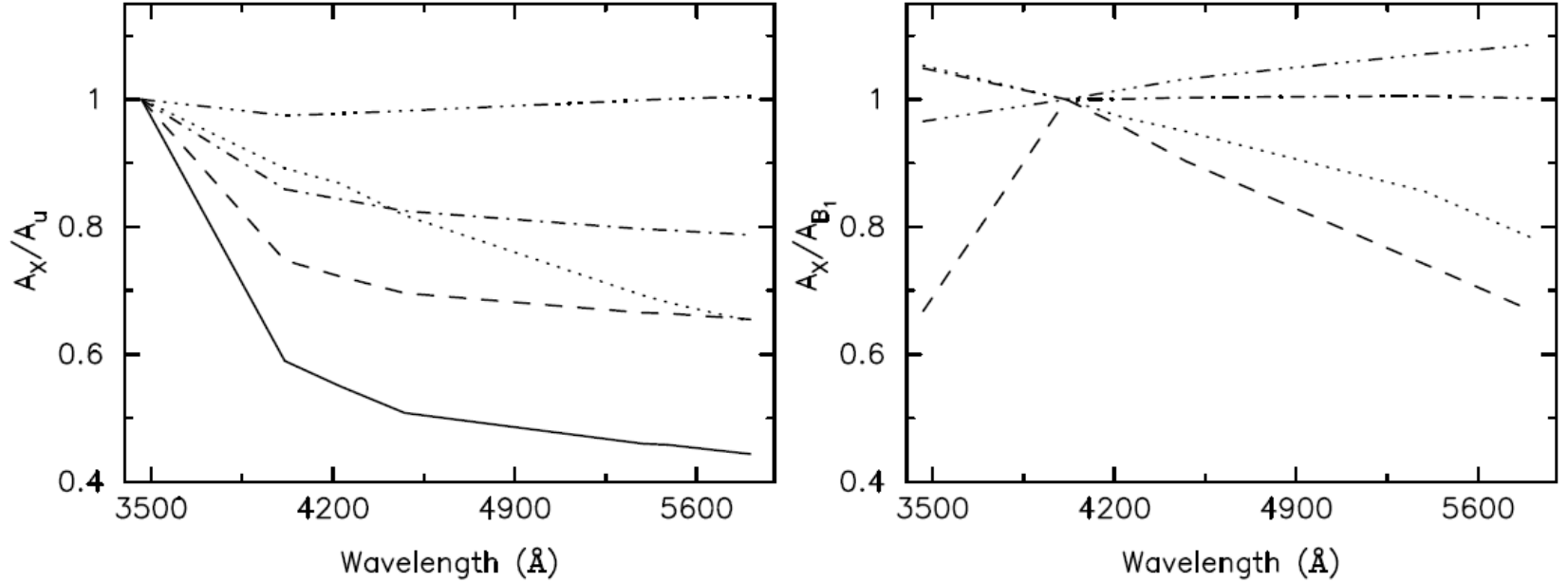
- ✓ Asterosismolojinin temel verisi zonklama frekanslarıdır. Frekansların gerek parametrik yöntemler (sicim uzunluğu, evre minimizasyonu, en küçük kareler yöntemiyle iteratif sinüs fiti gibi), gerekse de parametrik olmayan yöntemler (süreksiz Fourier serisi uyumlamaları ve buna dayanan periyodogramlar) kullanılarak nasıl belirlendiğini gördük.
- ✓ Tespit edilen her bir frekansın yıldızın hangi zonklama moduna ait (l, m) olduğunun belirlenmesine ise **mod tayini** (ing. mode identification) adı verilir.
- ✓ Temelde mod tayini için iki tür veri kullanılır: **“Çok bant ışıık ölçümü”** (ing. multicolor photometry) ile belirlenen zonklama kaynaklı değişim genliğinin dalgaboyu bağımlılığı ve yüksek çözünürlüklü tayfsal gözlemlerle belirlenen **çizgi profil değişimleri**.
- ✓ Zonklayan bir yıldızın hem yüzey sıcaklığı, hem de geometrik yapısı (kesit alanı) zonklama çevrimi boyunca değişim gösterir.
- ✓ Sıcaklık değişiminin bir dalgaboyu bağımlılığı olacağı açıktır. Zira yıldızları birer karacisim kabul ettiğimizde pulsasyon yapan yıldızların (özellikle bu bölümde ilgileneceğimiz klasik zonklayıcıların) ışınımının maksimumunu görsel bölgenin daha kısa dalgalıboylarında verecekleri Planck enerji dağılımından görülebilir. Sadece bu nedenle dahi zonklayan yıldızların kısa dalgalıboylarındaki salınım genlikleri uzun dalgalıboya göre daha fazladır.
- ✓ Buna ek olarak non-radyal salınımlarda sıcaklık değişimlerinin gerçekleştiği hacim hem zonklama modunun derecesine (l), hem de geometrik yapıya bağılıdır.
- ✓ Bu nedenlerle zonklamaların genlik ve evreleri de moda bağılı olarak değişim gösteren sıcaklık ve geometrik yapı değişimlerinden etkilenir. Bundan dolayı zonklama genlik ve evrelerinin farklı dalgalıboylarında yapılan gözlemlerden zonklama modlarının ortaya konmasında yararlanır.
- ✓ Kullanılan tüm filtrelerde (bantlarda) sadece gözlenebilir genliğin üzerindeki modlar tespit edilebilir.

Çok Bant Işık Ölçüm ile Mod Belirleme



(Solda) B2 tayf türünden β Cephei türü HD71913 yıldızının $l = 0$ modu için farklı bantlarda gözlenen zonklamalarının genlik oranları (Aerts 2000). (Sağda) F2 tayf türünden γ -Dor türü değişen yıldız HD12901'de $l = 1$ modu için Cenevre fotometrik sistemindeki farklı bantlarda gözlenen zonklama genliklerini oranı (Aerts vd. 2004).

Çok Bant Işık Ölçüm ile Mod Belirleme



(Solda) B2 tayf türünden β Cephei türü HD71913 yıldızının farklı bantlarda teorik olarak beklenen genlik oranları. (Sağda) F2 tayf türünden γ -Dor türü değişen yıldız HD12901 için farklı bantlarda gözlenmesi beklenen teorik genlik oranları. $l = 0$ modu sürekli eğri, $l = 1$ kesikli eğri, $l = 2$ kesikli-noktalı eğri, $l = 3$ noktalı eğri, $l = 4$ -.- şeklindeki eğri ile gösterilmiştir. Bir önceki slaytta görülen gözlemsel eğriler ile eşleştirme sonucu HD71913'te $l = 0$, HD12901'de $l = 1$ modu belirlenebilmiştir.

Zonklama Modlarının Belirlenmesi (ing. Mode Identification)

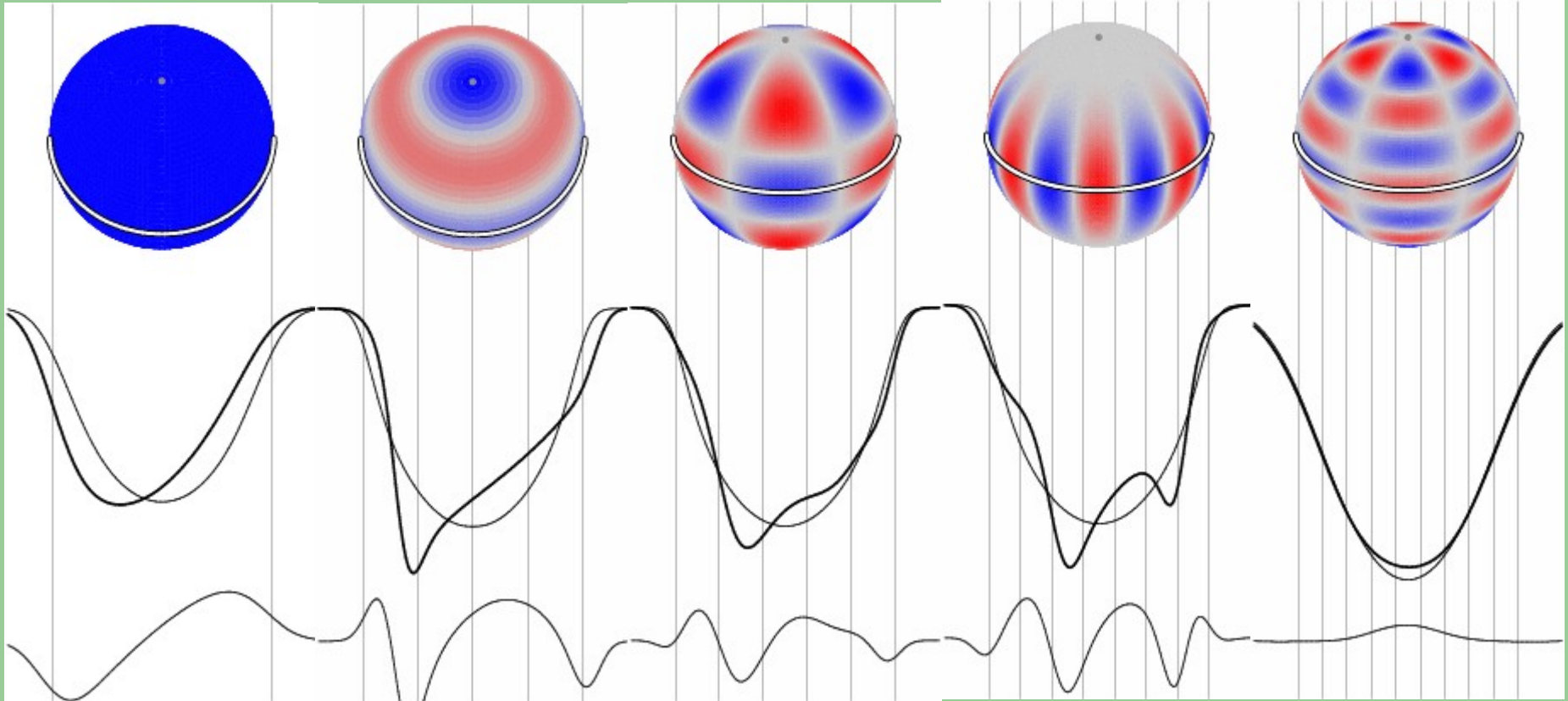
- ✓ Farklı dalgaboyu aralıklarındaki (bantlardaki) ışık eğrisi genlik ve evreleri için geliştirilen teorik ifadeler diğer tüm parametrelerin yanı sıra düğümlerin geometrik konfigürasyonu (l , m) ve bunların gözlemci tarafından hangi açı altında (i) gözlemlendiğine de bağlıdır.
- ✓ i (eğim açısı, ing. inclination angle) zonklamamanın simetri eksenini ile bakış doğrultusuna dik düzlem arasındaki açıdır. Simetri eksenini çoğunlukla dönme eksenini olarak alınır. Ancak roAp yıldızları gibi eğik zonklayıcı modeliyle anlaşılan çift kutuplu (bipolar) manyetik alanı kuvvetli yıldızlarda manyetik alanın eksenleri, yakın çift yıldızlarda ise tedirginlik kuvvetinin eksenleri simetri eksenini olarak seçilir.
- ✓ Watson (1988) genlik ve evrenin mod geometrisine bağımlılığının m ve i parametrelerini dalgaboyu bağımlılığı olmayan tek bir parametre altında birleştirilmesini mümkün kıldığını tespit etti. Böylece eğim açısından gelen dejenerasyon ortadan kaldırılmış oldu.
- ✓ Geneli itibarı ile standart uygulamada m ve i bu şekilde tek bir parametre altında birleştirilerek analiz yapılır ve mod belirlenir. Ancak bu yaklaşımın dezavantajı sadece modun derecesinin (l) belirlenip, azimutal derecenin (m) belirlenememesi sonucunu doğurur.
- ✓ Mod derecesinin belirlenebilmesi için hem yıldızın kenar kararmasına ilişkin yasaların tedirgin edilmiş versiyonlarının hem de zonklamayla değişen etkin sıcaklık ve yüzey çekim ivmesine bağlı olan yıldız akısının tedirgin edilmiş versiyonlarının kullanılması gerekir. Bu da kullanılan yıldız atmosferi modellerinin ve kenar kararma yasalarının hassas olmalarını gerektirir.
- ✓ Ayrıca δ Scuti ve γ Doradus yıldızları gibi dış konvektif katmana sahip yıldızlarda konveksiyonun da dikkate alınması gerekir.
- ✓ Dış konvektif katmanı bulunmayan radyatif zonklayanlarda ise bu kez metal bolluğu kritik önem arzeder (Dupret vd. 2003).

Çok renkli ışık ölçüm gözlemleriyle mod tayininin ayrıntılı matematiksel açıklaması için bkz. Bölüm 6.1,2, Aerts, Kurtz, Dalsgaard, 2009, Asteroseismology, Springer

Yüksek Çözünürlükle Tayf Ölçüm ile Mod Belirleme

- ✓ Radyal ve radyal olmayan salınımlar gözlemcinin bakış doğrultusuna da bağlı olarak değişen şiddette düzenli-yarı düzenli çizgi profil asimetrilerine neden olurlar. Bu asimetrik profiller üzerinden ölçülen dikine hızlar ise Doppler kaymaları (dikine hız değişimleri) olarak algılanır.
- ✓ Spektroskopik gözlemlerle mod tayininde beklenti $SNR > 300$, $R > 40000$ ve belki de en önemlisi uzun süreli ve sık gözlemlere ihtiyaç duyulur.
- ✓ Poz sürelerinin salınımların zaman ölçeğinden (periyodundan) çok daha kısa (en az Nyquist frekansında) olması gerekir ki salınımlar poz süresinin içine yayılarak gürültü olarak kalsın (ing. smear out).
- ✓ Yüzeydeki salınım alanının, iyi tanımlanabilmesi için en az 6 değişken içermesi gerekir. Bu karmaşık yapıyı anlamak için bu değişkenlerden en az bir kısmını belirli bir aralığa sıkıştırmak üzere fotometrik gözlemlerin olması önem taşır.
- ✓ Bu gözlemsel gereklilikler nedeniyle tayf ölçümünden mod belirleme oldukça "pahalı" bir iştir. Zira salınım sinyalini iyi örnekleyebilmek için çok uzun poz süreleri verilmemelidir. Bu durumda SNR'yi yüksek tutmak için kısa sürede fazla miktarda foton toplamak için büyük teleskoplara ihtiyaç duyulur. Ancak bu teleskopların programları doludur ve tek bir cismin uzun süreli gözlemlerine ayrılması mümkün olmaz.

Yüksek Çözünürlüklü Tayf Ölçüm ile Mod Belirleme



John Telting and Coen Schrijvers

Yüksek Çözünürlükle Tayf Ölçüm ile Mod Belirleme

- ✓ Teorik çizgi profilleri değişimlerini hesaplamaya yönelik ilk "şema" Osaki (1971) tarafından verilmiştir.
- ✓ Çizgi Genişleme Mekanizmaları:

1. Her bir enerji düzeyi üzerindeki belirsizlikten (Heisenberg belirsizlik ilkesi gereği) kaynaklanan genişleme (atomik ya da doğal genişleme) --> Lorentzian,

2. Çevredeki parçacıkların uyguladığı tedirginlik kuvvetleri nedeniyle özellikle yüksek elektronik enerji seviyelerindeki belirsizlik kaynaklı genişleme (basınç genişlemesi) --> Lorentzian,

3. Soğurmaya neden olan atomların plazma içindeki hareketleri kaynaklı genişleme (ısısal genişleme) --> Gaussian,

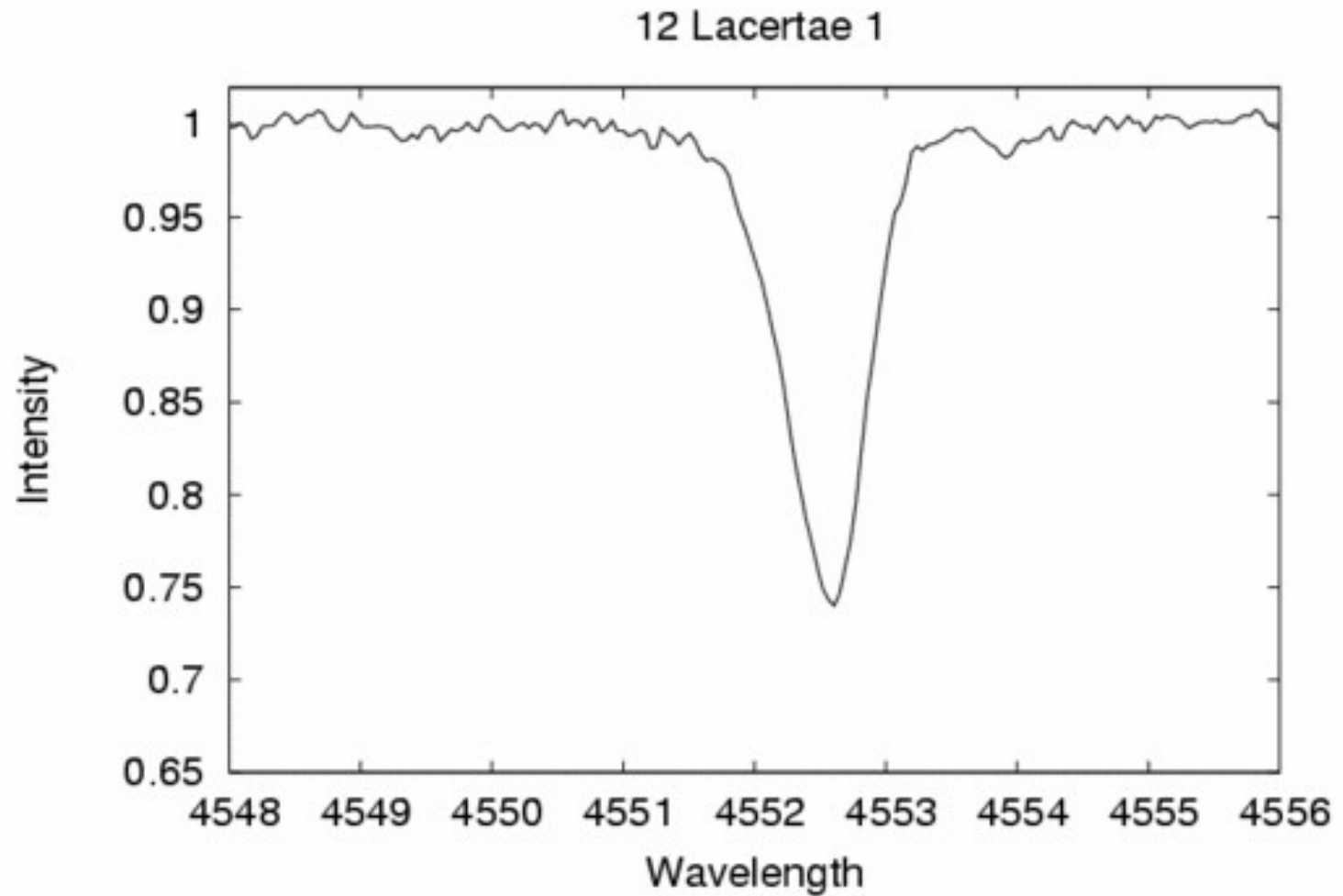
Bunlar plazmanın kendisinde üretilen genişleme mekanizmalarıdır. Eğer bu mekanizmaların çizgi profillerini tam olarak nasıl genişlettiklerini anlamış olsaydık mikrotürbülans ve makrotürbülans gibi serbest parametrelere ihtiyaç duymazdık. Ancak model atmosferlerde bu mekanizmalar iyi tanımlanmamış olduğu için bu serbest parametrelerle belirlenen profilin (Lorentzian * Gaussian --> Gaussian)

i. Dönmeyle genişleme --> Gaussian

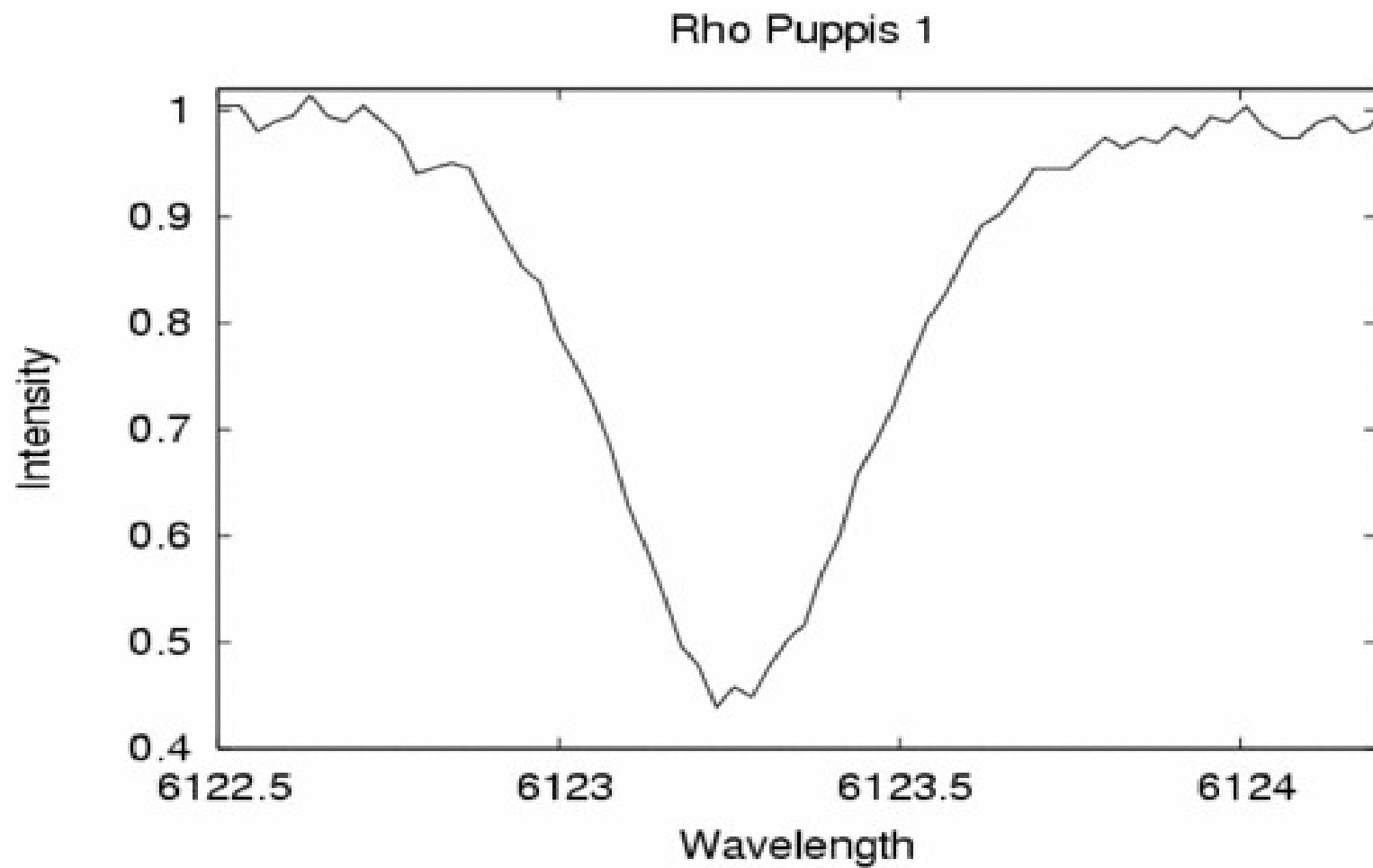
ii. Pulsasyon kaynaklı genişleme --> Pulsasyon parametrelerine bağlı yapıda

ile belirlenen profil yapısıyla konvolüsyonu model olarak belirlenir.

mikro(makro)türbülans * dönme * zonklama



Mathias vd. 2004



Mathias vd. 1997

Yüksek Çözünürlükle Tayf Ölçüm ile Mod Belirleme

- ✓ Hidrojen ve Helyum çizgileri basınçla çok fazla genişlemezken bu çizgiler üzerindeki dominant Stark etkisiyle (elektrik alan) genişler. Bu genişleme Lorentzian değildir ve plazmanın kendisinden kaynaklanan (ing. intrinsic) mekanizmalarla konvolüsyonu alındığında bir Gauss profili üretmez. Bu nedenle asterosismolojik analizlerde Hidrojen ve Helyum ile çalışmak tercih edilmez.
- ✓ Asterosismolojik analizlerde dar, temiz, çizgi örtüşmesine (ing. line blending) uğramamış Gaussyen profile sahip fotosferik çizgiler tercih edilir.
- ✓ Yüksek çözünürlüklü tayflar üzerinden mod tayini yapmak üzere temelde 2 yöntem takip edilmektedir. Çizgi profilinin momentleri üzerinden (geometrik) analiz (**moment analizi**) ve farklı modlar için üretilen çizgi profili asimetrisi ile gözlenen çizgi profili asimetrisinin eşleştirilmesine dayanan **piksel yöntemi**.
- ✓ Moment metodu ile piksel yöntemi arasındaki temel fark piksel metodunda çizgi profili değişiminin referans alınan tedirgin edilmemiş simetrik bir çizgiye göre belirlenmesidir. Moment metodunda ise böyle bir referans çizgi varsayımı bulunmaz.

Moment Metodu

- ✓ Bir çizginin j. momentini bir istatistiksel parametre olup aşağıdaki şekilde tanımlanır. Bir çizgi tüm momentleri bilindiğinde eşsiz olarak oluşturulabilir (ing. reconstruction).

$$\langle v^j \rangle_{f*g} \equiv \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} v^j p_{\text{theo}}(v) dv}{\int_{-\infty}^{+\infty} p_{\text{theo}}(v) dv} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} v^j (f * g)(v) dv}{\int_{-\infty}^{+\infty} (f * g)(v) dv}$$

- ✓ Bu tanımda $p_{\text{theo}}(v) = (f * g)(v)$ olmak üzere $g(v)$, çizginin plazma kaynaklı mekanizmalarla belirlenen profili (ing. intrinsic profile), ki Gaussiyendir, $f(v)$ ise diğer genişleme mekanizmalarıdır. Her iki nicelik de hız birimlerindedir. v , yıldızın bakış doğrultusundaki dönme ve pulsasyon kaynaklı hızların toplamıdır.

Moment Metodu

- ✓ Bir tayfsal çizgi üzerindeki tüm bilgi bu momentler kullanılarak elde edilebilir ve sadece momentleri bilinen bir tayfsal çizgi tekrar oluşturulabilir.
- ✓ İlk 3 moment çizginin bazı önemli parametrelerine işaret eder:
 - ✓ **1. moment:** yıldız merkezi orijin olarak seçilen bir referans çerçevesinde çizgi profilinin merkezini gösterir (yani Dünya'nın Güneş etrafındaki hareketi ve yıldızın Güneş'e göre hareketinden arındırılmış bir hıza işaret eder).
 - ✓ **2. moment:** Çizgi genişliğinin bir ölçütüdür (FWHM)
 - ✓ **3. moment:** Çizgi profilinin asimetrisinin ölçütüdür (skewness)
- ✓ Daha üst dereceden tüm momentler bu 3 moment cinsinden yazılabilir. Ancak moment derecesi arttıkça üzerindeki belirsizlik (gürültü) de artar. Aerts vd. (1992) ve Aerts vd. (1996) tarafından ilk 3 momentin Gaussyen bir çizgi profilini tekrar oluşturmak (ing. reconstruction) için yeterli olduğu belirlenmiştir.
- ✓ Tüm bu momentler **0. moment'e** yani eşdeğer genişliğe normalize edilerek tanımlanmıştır. Bu durum tanımda bölüm çizgisinin altında eşdeğer genişliğin olduğu kontrol edilerek görülebilir. Bu şekilde pulsasyon kaynaklı küçük sıcaklık ve akı değişimlerinden kurtulunmuş olur.

Moment Metodu

- ✓ Momentlerin tanımındaki fonksiyonların (g ve f) konvolüsyonlarının integrali bu fonksiyonların integralinin çarpımına eşittir. Bu eşitlikten faydalanarak momentler arasında aşağıdaki ilişkiler kurulabilir.

$$\begin{aligned}\langle v \rangle_{f*g} &= \langle v \rangle_f + \langle v \rangle_g, \\ \langle v^2 \rangle_{f*g} &= \langle v^2 \rangle_f + 2\langle v \rangle_f \langle v \rangle_g + \langle v^2 \rangle_g, \\ \langle v^3 \rangle_{f*g} &= 3\langle v^2 \rangle_f \langle v \rangle_g + 3\langle v \rangle_f \langle v^2 \rangle_g \\ &\quad + \langle v^3 \rangle_f + \langle v^3 \rangle_g.\end{aligned}$$

- ✓ Gaussyen profillerin (g: intrinsic profile) tek sayılı momentleri 0 km/s'e eşittir ($\langle v \rangle_g$, $\langle v^3 \rangle_g = 0$). Yine bu profilin ikinci momenti bu gaussyen profilin genişliğine eşittir ($\langle v_{\text{int}}^2 \rangle$). Bu iki bilgidен yararlanarak momentler aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir.

$$\begin{aligned}\langle v \rangle_{f*g} &= \langle v \rangle_f, \\ \langle v^2 \rangle_{f*g} &= \langle v^2 \rangle_f + v_{\text{int}}^2, \\ \langle v^3 \rangle_{f*g} &= \langle v^3 \rangle_f + 3v_{\text{int}}^2 \langle v \rangle_f.\end{aligned}$$

Moment Metodu

- ✓ Teorik normalize momentler gözlemcinin bakış doğrultusundaki toplam hız bileşeni dikkate alınarak yıldızın merkezi orijinli bir küresel koordinat sistemine transfer edildiğinde aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{aligned}\langle v \rangle_{f*g} &= v_p A(l, m, i) \sin(\omega t + \delta), \\ \langle v^2 \rangle_{f*g} &= v_p^2 C(l, m, i) \sin(2\omega t + 2\delta + 3\pi/2) \\ &\quad + v_p v_\Omega D(l, m, i) \sin(\omega t + \delta + 3\pi/2) \\ &\quad + v_p^2 E(l, m, i) + v_{\text{int}}^2 + b_2 v_\Omega^2 \\ \langle v^3 \rangle_{f*g} &= v_p^3 F(l, m, i) \sin(3\omega t + 3\delta) \\ &\quad + v_p^2 v_\Omega G(l, m, i) \sin(2\omega t + 2\delta + 3\pi/2) \\ &\quad + [v_p^3 R(l, m, i) + v_p v_\Omega^2 S(l, m, i) + v_p v_{\text{int}}^2 T(l, m, i)] \\ &\quad \times \sin(\omega t + \delta).\end{aligned}$$

- ✓ Burada da 0. normalize momentin ω açısal frekansına, δ evresine ve A genliğine sahip sinüsoidal bir değişimi olduğu görülüyor. Bu eşitlikler kullanılarak temel pulsasyon parametrelerine geçilebilir. A, ..., G fonksiyonları m, l ve i'ye bağlı fonksiyonlardır.

Moment Metodu

- ✓ Gözlemsel tayf Güneş-Yer ikilisinin kütle merkezine indirgenir (barycentric correction).
- ✓ Tüm kalibrasyon işlemleri sonrası 1-boyutlu hale getirilen tayf daha sonra normalize edilir (F_i) ve λ_i 'ye karşılık F_i şekline getirilir.
- ✓ Herhangi bir zamandaki tayfta her bir λ_i 'ye karşılık gelen dikine hızlar ($\Delta x_i = x_i - x_{i,0}$), çizginin laboratuvar dalgaboyundan kaymasının hız cinsinden ölçüsüdür) hesaplanır ve **normalize edilmemiş gözlemsel moment değerleri (küçük momentler)** aşağıdaki tanımdan yararlanılarak elde edilir.

$$\begin{aligned} m_0 &= \sum_{i=1}^N (1 - F_i) \Delta x_i, \\ m_1 &= \sum_{i=1}^N (1 - F_i) x_i \Delta x_i, \\ m_2 &= \sum_{i=1}^N (1 - F_i) x_i^2 \Delta x_i, \\ m_3 &= \sum_{i=1}^N (1 - F_i) x_i^3 \Delta x_i, \end{aligned}$$

Moment Metodu

- ✓ Gözlemsel tayfların da yıldız merkezine indirgenmesi için yıldızın Güneş-Dünya ikilisinin kütle merkezine göre hızı (x_0) çıkarılır. Bu şekilde **normalize edilmemiş gözlemsel büyük moment değerleri** elde edilmiş olur.

$$M_0 = \sum_{i=1}^N (1 - F_i) \Delta x_i,$$

$$M_1 = \sum_{i=1}^N (1 - F_i) (x_i - x_0) \Delta x_i,$$

$$M_2 = \sum_{i=1}^N (1 - F_i) (x_i - x_0)^2 \Delta x_i,$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^N (1 - F_i) (x_i - x_0)^3 \Delta x_i.$$

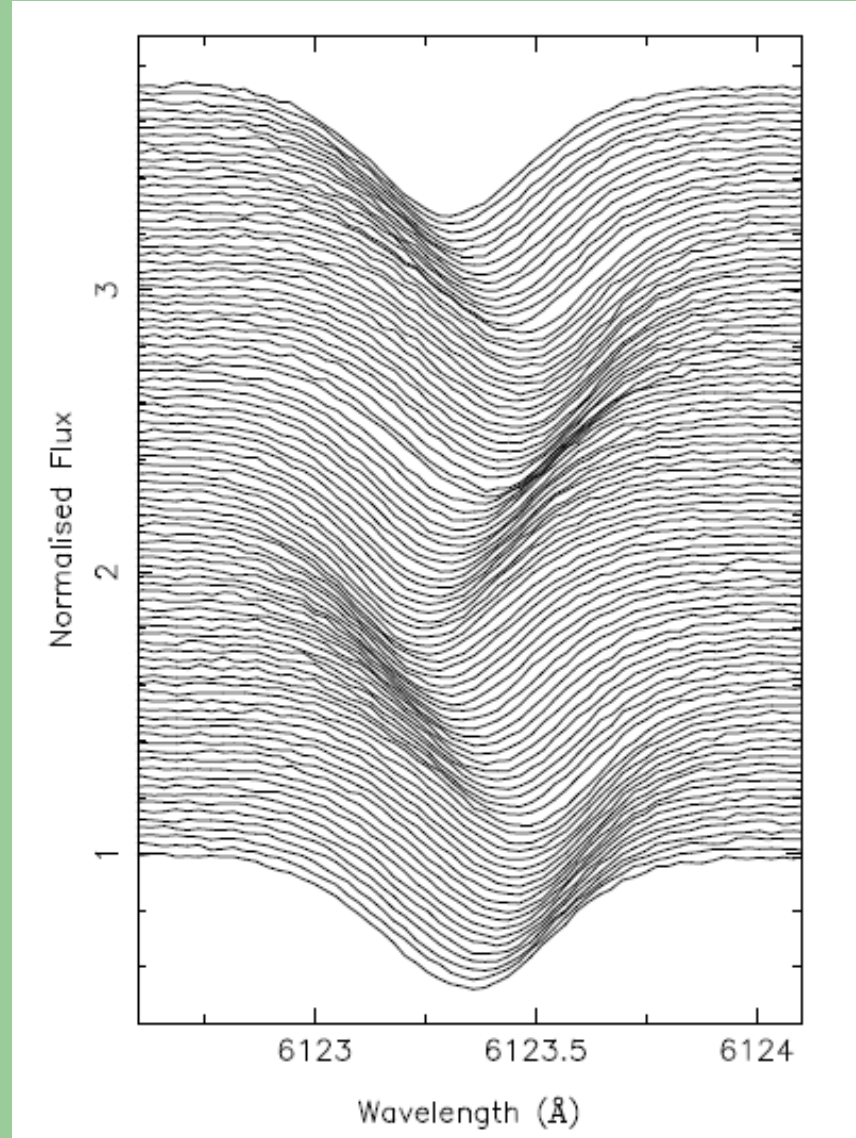
- ✓ Daha sonra bu momentlerin hepsi (tanımından gözlemsel çizginin eşdeğer genişliği oldukça açıkça görülen) M_0 (0. moment) büyük momentine normalize edilir ve **normalize edilmiş gözlemsel büyük momentler** elde edilmiş olur.

Bundan sonra amaç teorik moment değişimi ile gözlemsel moment (her ikisi de normalize) değişimi arasındaki farkı minimize etmek üzere aşağıdaki şekilde hesaplanan diskriminantın minimizasyonudur.

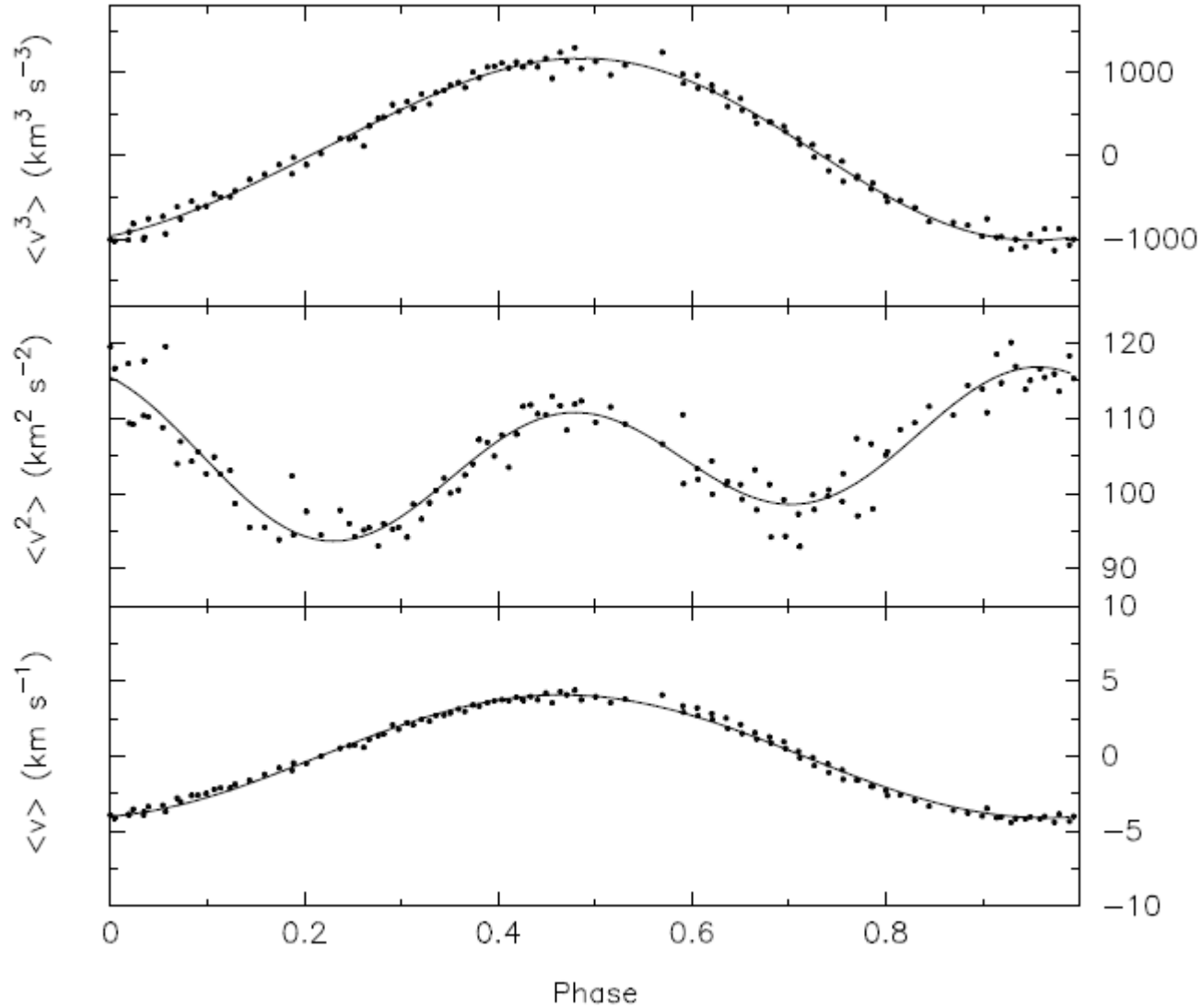
$$\begin{aligned} \Gamma_l^m(v_p, i, v_\Omega, v_{\text{int}}) \equiv & \left[\left| A_{\text{obs}} - v_p |A(l, m, i)| \right|^2 f_A^2 \right. \\ & + \left(\left| C_{\text{obs}} - v_p^2 |C(l, m, i)| \right|^{1/2} f_C \right)^2 \\ & + \left(\left| D_{\text{obs}} - v_p v_\Omega |D(l, m, i)| \right|^{1/2} f_D \right)^2 \\ & + \left(\left| E_{\text{obs}} - v_p^2 |E(l, m, i)| - v_{\text{int}}^2 - b_2 v_\Omega^2 \right|^{1/2} f_E \right)^2 \\ & + \left(\left| F_{\text{obs}} - v_p^3 |F(l, m, i)| \right|^{1/3} f_F \right)^2 \\ & + \left(\left| G_{\text{obs}} - v_p^2 v_\Omega |G(l, m, i)| \right|^{1/3} f_G \right)^2 \\ & + \left(\left| T_{\text{obs}} - v_p^3 |R(l, m, i)| - v_p v_\Omega^2 |S(l, m, i)| \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - v_p v_{\text{int}}^2 |T(l, m, i)| \right|^{1/3} f_T \right)^2 \Big]^{1/2} \end{aligned}$$

Sonuç olarak elde edilen bu denklemin bilinmeyenleri küresel harmonikler (l, m), pulsasyon genliği (v_p), yıldızın dönmesi nedeniyle genişlemenin gökyüzü düzlemine izdüşümü (v_Ω), dönme ekseninin bakış doğrultusuna dik düzlemle yaptığı açı (i) ve pulsasyon dışındaki mekanizmalar nedeniyle gerçekleşen çizgi genişlemesidir (v_{int}). Tüm genişlemeler hız biriminde (km/s) elde edilir.

Örnek: ρ Pupis



ρ Pupis yıldızının 7.098 gün^{-1} temel frekansına evrelendirilmiş çizgi profil değişimi
Mathias vd. 1997



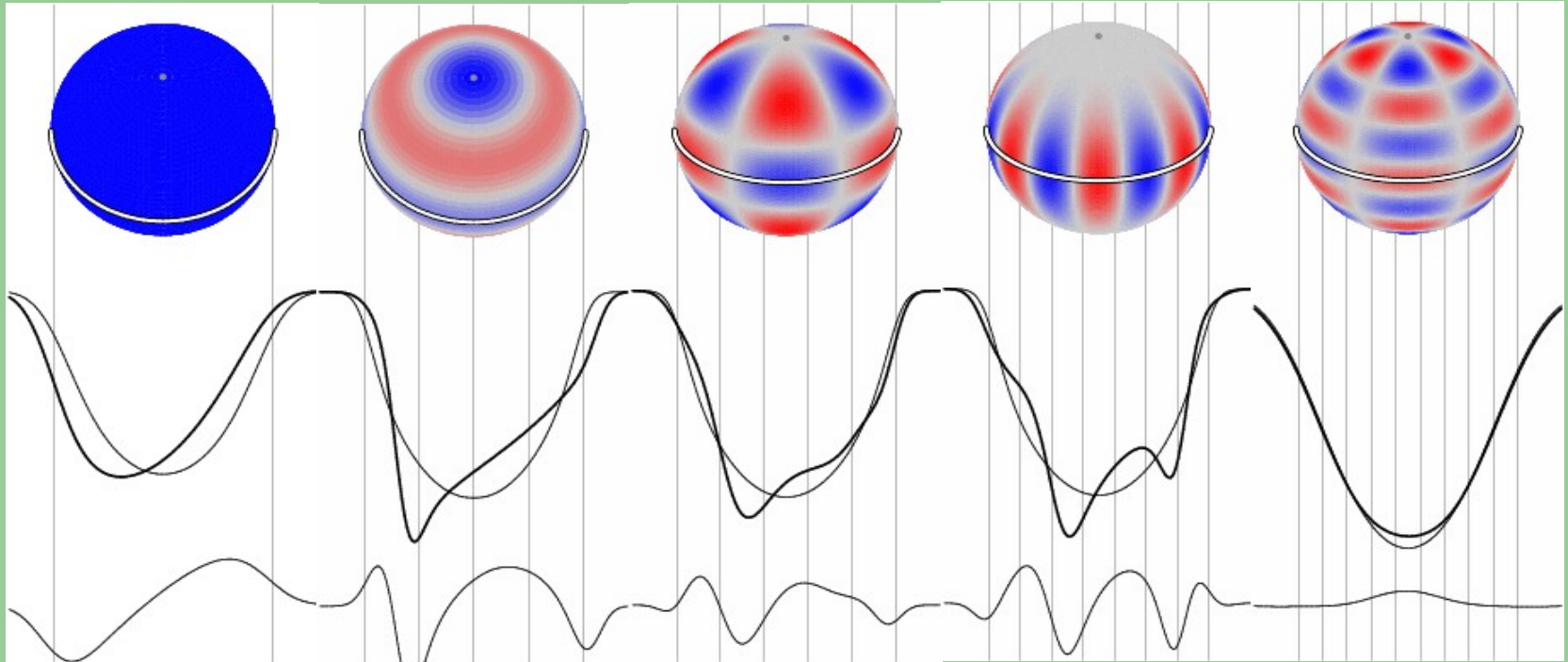
İlk 3 momentin evreyle değişimi. Sinüsoidal bir değişim durumunda 1. moment, 0.'nın 2 katı frekansa sahip olur. (Mathias vd. 1997). Bu beklenen bir durum çünkü eşdeğer genişlik çizgi merkezinin iki yöndeki (+/-) eş değeri için de aynıdır. Durum FWHM için de aynıdır (2. moment), bu nedenle 2. moment de 0'la aynı frekansa sahip olur.

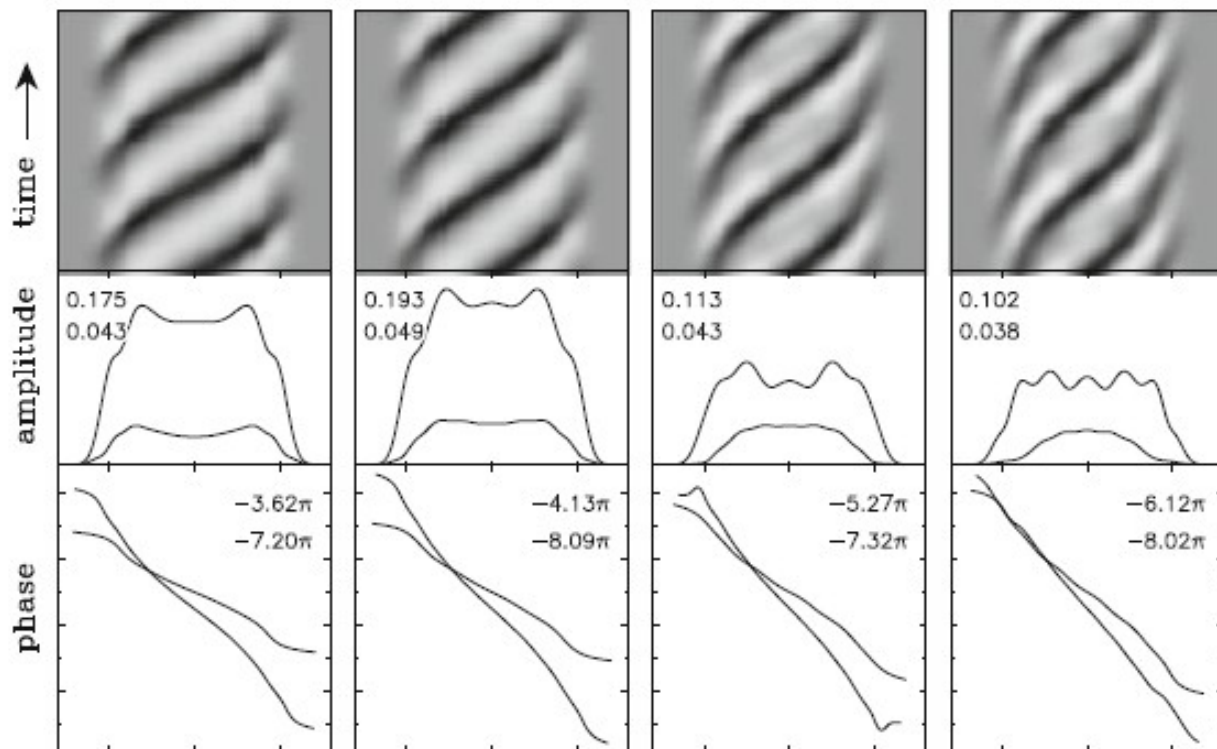
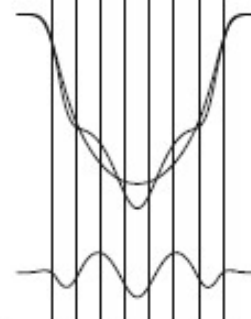
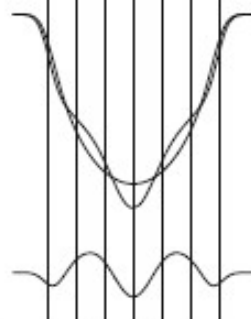
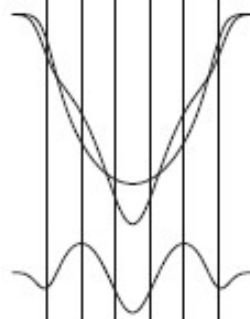
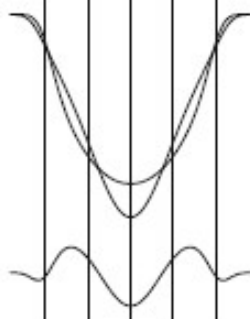
l	$ m $	γ_l^m	v_p	$K v_p$	i	v_Ω	v_{int}
0	0	0.08	5.6	0.218	—	15.3	6.5
1	1	0.13	10.0	0.390	38°	14.8	5.9
2	1	0.17	12.1	0.472	64°	16.4	2.2
1	0	0.18	5.0	0.195	7°	19.6	1.7
2	2	0.23	15.0	0.585	53°	10.3	4.8
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

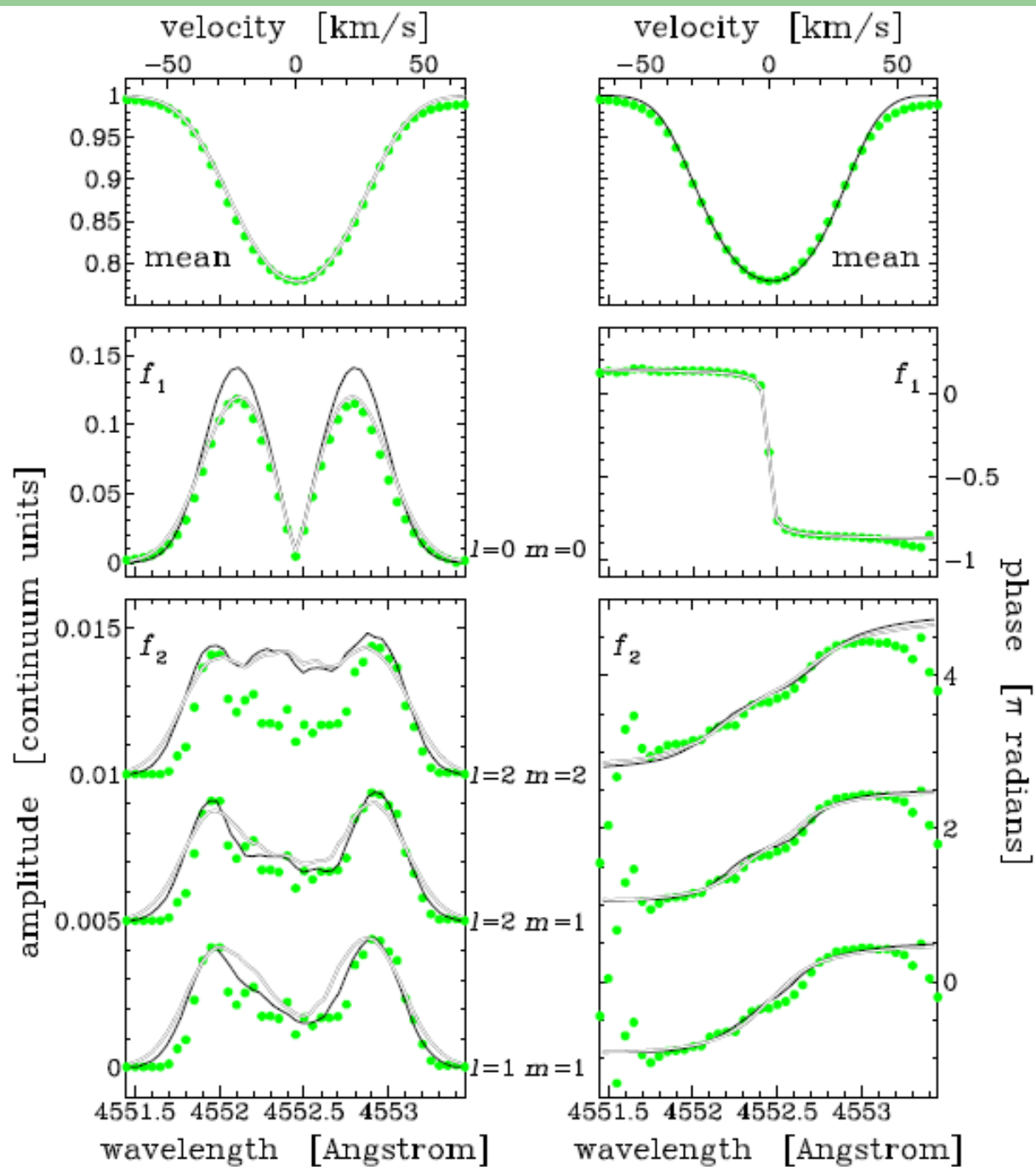
Tüm olası (l,m) ikilileri için diskriminant değerleri hesaplanır. Bu modlara karşılık gelen parametrelerle birlikte listelenir ve diskriminantın en küçük olduğu (l,m) ikilisi pulsasyonun derecesi (l) ve azimutal derecesi (m) olarak belirlenmiş olur. Bu örnekte (ρ Pup) bu değerler 0 ve 0'dır. Yani yıldız radyal modda salınmaktadır. Bu durum momentlerdeki sinüsoidal değişimden de anlaşılmaktadır. Radyal mod için pulsasyon ekseninin bakış açısına dik düzlemle yaptığı açı (i) belirlenemez, çünkü yıldızın simetri eksenine ne açıda bakıldığının önemi yoktur, yıldız hep aynı şekilde (radyal doğrultuda) salınır!

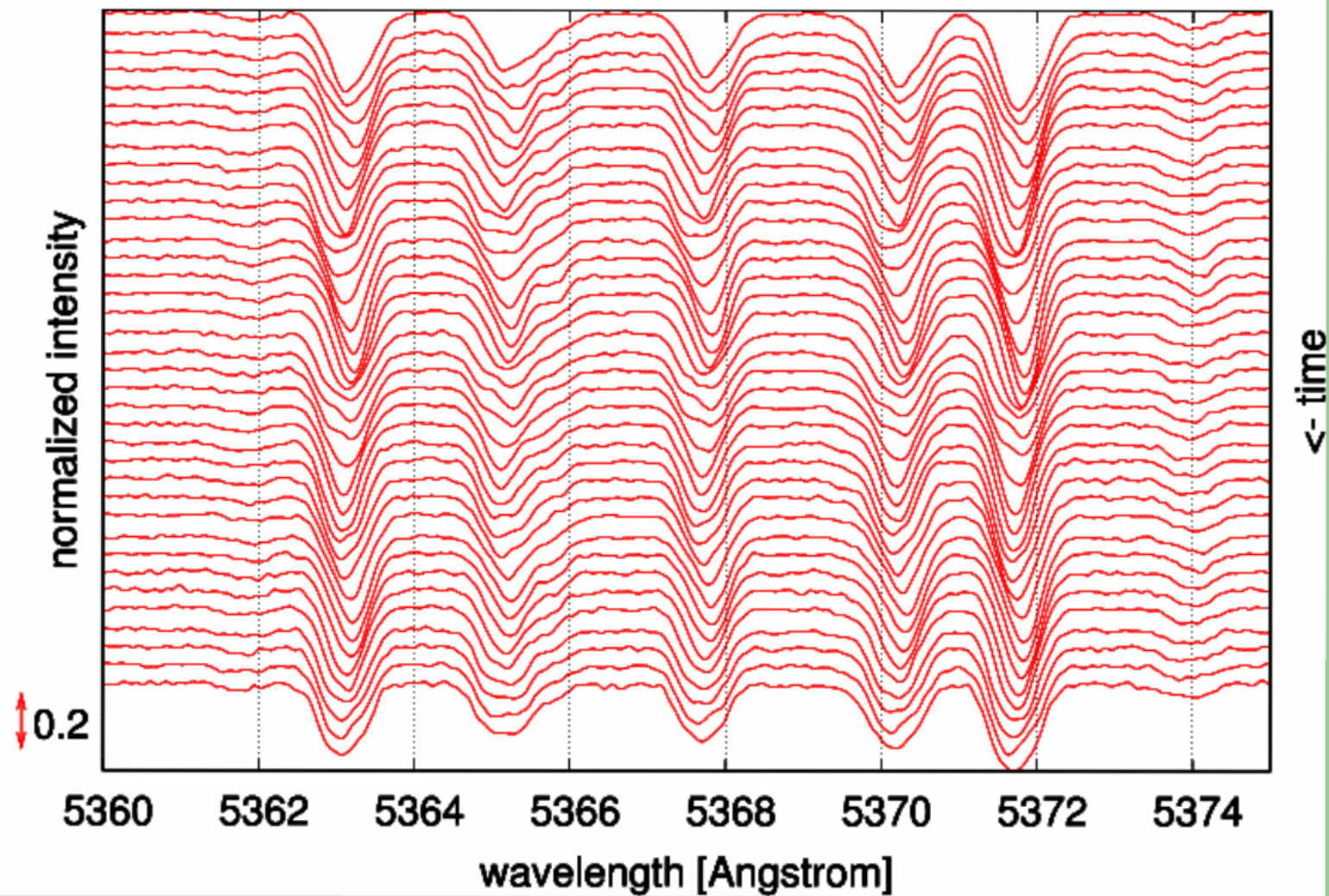
Piksel Metodu (ing. Pixel by Pixel Method)

- ✓ Çeşitli zonklama modlarını (l, m) ve eğim açılarını (i) içeren ve bu modlardaki salınımların söz konusu eğim açıları altında nasıl görüleceğini belirleyen birçok olası simülasyon hazırlanır ve bu simülasyonlar gözlemlerle karşılaştırılır.
- ✓ Pulsasyonun neden olduğu asimetriler ancak geniş bir profil üzerinde ayrılabilceğinden yıldızın yüksek dönme hızına sahip olması durumunda yöntem iyi çalışır. Moment metodu ise teoriye dayalı ve teori de küçük dönme hızları için geliştirilmiş olduğu için yavaş dönen yıldızlarda iyi çalışır. Bu anlamda birbirlerini tamamlarlar.



$l=4 \ m=-4$ $l=5 \ m=-4$ $l=6 \ m=-4$ $l=7 \ m=-4$ 





Zima (2006)

Özet Olarak

- ✓ Çizgi profili değişimlerinden mod tayinine yönelik oldukça sofistike yöntemler geliştirilmiş durumdadır.
- ✓ Çizgi profillerinin değişimlerinden moment yöntemi ya da piksel metodu ile frekanslar ve astrosismik parametrelere geçilebilir.
- ✓ Moment yöntemi yavaş dönen yıldızlar için daha iyi sonuç verirken piksel metodu hızlı dönen yıldızlar için iyi sonuç verir. Bu anlamda birbirlerini tamamlarlar. Ancak hızın yine de teoriyle tutarlı limitler dahilinde girilmesi kritik önem taşır.
- ✓ Moment yöntemi doğası gereği eşdeğer genişlik değişimlerine çok duyarlı değilken piksel metodu duyarlıdır.
- ✓ Moment metodu yüksek çözünürlükle gözlenmemiş, çok hassas olmayan çizgi profillerinde dahi kabul edilebilir sonuç verirken pulsasyon kaynaklı değişimleri mutlaka profil üzerinde tespit etmeyi gerektiren piksel metodu bu tür “kusurlara” son derece duyarlıdır.
- ✓ Öneri her iki metodu kullanarak analiz yapıp sonuçlarını karşılaştırmak ve aynı sonuçlara ulaşılp ulaşılmadığını denetlemektir.
- ✓ Çapraz korelasyon fonksiyonu, en küçük kareler dekonvolüsyonu, ortalama çizgi profilleri gibi pek çok çizgiden oluşturulmuş çizgi profilleri de kullanılabilir.
- ✓ Sentetik çizgi profilleri üretip, profili piksel piksel gözlemsel profille karşılaştırmaya dayanan piksel metodunda en küçük kareler dekonvolüsyonu (Least Squares Deconvolution, LSD) sıklıkla kullanılır. Yöntem bu anlamda yıldızlarda leke modellemesi için kullanılan Doppler Tomografi ile benzerdir.
- ✓ Eğer elde fotometrik veri de varsa her ikisinde de aynı frekansların gözlenip gözlenmediği sorgulanmalıdır.
- ✓ Fotometrik gözlemlerle elde edilen mod derecesi spektroskopide sabit tutularak sonra ulaşılan sonuçlarla serbest bırakılarak ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmalıdır.
- ✓ Tek bir mod için dahi olsa (l, m) belirleme yıldızı anlamak konusunda çok önemli bir adımdır.