

# Güneş'in İç Yapısını Ne Kadar Biliyoruz?

## Mutlu YILDIZ

Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100 Bornova-İZMİR  
e-mail: yıldız@astronomy.sci.ege.edu.tr

**Özet:** Yıldız astrofizikinde, özellikle son on yılda kaydedilen gelişmeler ışığında Güneş modellerindeki değişimler irdelenerek, Güneş'teki beş dakikalık p-biçimindeki titreşimlerden elde edilen helyosismolojik verilerle Güneş modelleri kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslamalar sayesinde, kimyasal elementlerin yayılma (diffusion) işlemi hesaba katıldı ve iç yapı modellerinde önemli bir ilerleme sağlandı. Helyosismik yöntemlerin başarılı uygulamaları sayesinde, bugün, konvektif bölgenin taban yarıçapı, yüzeydeki helyum bolluğu ve hemen hemen merkezden yüzeye kadar ses hızı iyi bir duyarlılıkla bilinmektedir. Yapılan modellerde, bu niceliklerin yayılma katsayısı, opasite ve hal denklemi ile kesin olarak bilemediğimiz Güneş'in ağır element bolluğu ve yaşına karşı duyarlılığı tespit edildi. Bir çok araştırma grubları tarafından yapılan en iyi modellerde de ses hızı için model ile helyosismik sonuç arasındaki ses hızı farkı en fazla %0.2 (genellikle konvektif bölgenin hemen altı) olarak çıkmaktadır. Bu çok iyi uyuma karşın, aradaki fark helyosismik yoldan elde edilen ses hızındaki hatadan büyük olduğundan aradaki fark halen önemlidir. Bu nedenle, bu farklılardan yola çıkarak önemli iyileştirmeler yapılabilir: hem Güneş'te belirsiz olan kompozisyon ve yaş için, hem de öbür yıldızları da doğrudan ilgilendiren girdi fizik için.

## 1. Giriş

Hiç kuşkusuz, hem kuramsal hem de gözlemsel açıdan, iç yapısını en iyi bildiğimiz yıldız Güneş'tir. Hatta, Güneş'in iç yapısı hakkında bilebileceğimiz herşeyi biliyoruz ya da herşey çözüldü yanlıgısına karşı uyararak diyebiliriz ki, Güneş'in iç yapısını çok iyi biliyoruz. Bu duruma, büyük oranda son yirmi yılda büyük bir gelişme kat eden helyosismoloji ile ulaşılmıştır. Klasik yöntemlerle yapılan gözlemlerde yıldızın sadece yüzeyini görürken, artık yıldızın içini 'görmeye' başladık.

Güneş'in 5-dakikalık titreşimlerinden elde edilen gözlemsel sonuçlara göre, yüzeyindeki kütlece helyum bolluğu  $0,246 \pm 0,001$  (Basu ve Antia, 1995), dış kısmında bulunan konvektif zarfın taban yarıçapı ise toplam yarıçapın  $0,713 \pm 0,001$  (Basu ve Antia, 1997) katıdır. Daha da önemlisi, yine helyosismik verilerden, ses hızını, hemen hemen merkezden (yaklaşık olarak 510 km/s) yüzeye (yaklaşık 90 km/s) kadar, oldukça duyarlı bir şekilde bilebilmekteyiz. Son yıllardaki çalışmalar ise Güneş'in iç kısımlarının nasıl döndüğü üzerine odaklanmış durumdadır. Burada anmak gerekir ki, bilgilerimizin çok önemli bir kısmı, Dünya ile Güneş tarafından eşit kuvvette çekilme noktasında bulunan SOHO uydusunun ve Dünyanın her tarafına dağılmış GONG ağıının kesintisiz ve çok kaliteli verilerinin işlenmesinden elde edilmiştir.

Son on yılda yıldızların yapısını kuramsal olarak anlayabilmemizde de önemli gelişmeler oldu:

- 1) Maddenin ışınlama karşı direncinin bir ölçütü olan opasite hesabı çok geliştirildi.
- 2) Yıldızın herhangi bir bölgesindeki yoğunluk, sıcaklık ve kimyasal içeriğinden basınç ve iç enerjii gerçek değerine daha yakın olarak hesaplayabiliyoruz.
- 3) Yıldızlarda, en azından Güneş benzeri olanlarda, yayılma (diffüzyon) işleminin artık önemsiz olmadığını biliyoruz. Bütün bunlar gözlem ile kuram arasındaki farkın kapanmasında çok önemli rollere sahip oldular.

Yayılmayı içeren günümüz modelleri ile Güneş arasındaki görelî ses hızı farkının en fazla olduğu yer konvektif bölge tabanının hemen altındadır. Bu farklılık genel olarak konvektif fırlatmanın bir sonucu olarak yorumlanmaktadır. Bu çalışmada ise, bu farkın konvektif parametrenin geçmişte daha fazla olması durumuyla da giderilebileceği gösterilmektedir.

## 2. Modellerin Özellikleri

Bilindiği gibi, yıldız modeli oluşturmanın yolu yıldız olabildiğince çok katmanlara ayırarak yıldız yapı denklemlerinin dördünü de eş zamanlı olarak çözmekten geçer. Bu şekilde, yıldızların yapısı ve evrimi deşifre edilebilmektedir. Ülkemizde, bu tarz çalışmaların başlamasını ve ilerlemesini Dilhan Ezer-Eryurt'un çok değerli çalışmalarına borçluyuz.

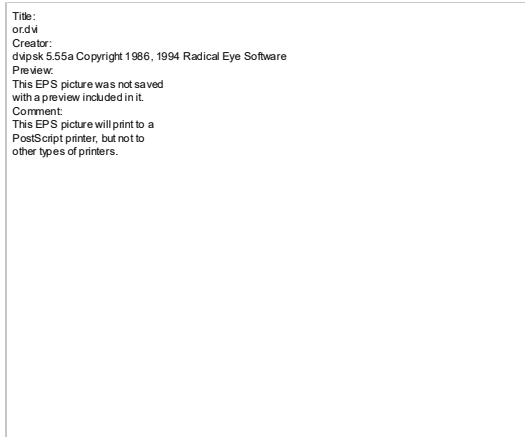
Lineer olmayan bu dört denklemi çözebilmek için de, 'içindekiler' diye anılan nükleer tepkime hızları, opasite ve hal denklemine gereksinimimiz var. Bu çalışmada nükleer tepkimeler Caughlan & Fowler'dan (1988) alınırken, opasite olarak OPAL'96 (Iglesias ve Rogers, 1996) kullanıldı. Hal denklemini ise, kendimiz, Coulomb etkileşimini ve  $\tau$ -etkisini (Harris vd., 1960) gözönünde tutarak hesaplamaktayız: hidrojen ve helyum'un parçalama (partition) fonksiyonu hesabında MHD (Mihalas vd., 1990) yöntemi kullanılmaktadır. Kimyasal elementlerin yayılma hızları için Michaud ve Proffitt'in (1993) yayılma katsayıları kullanılmıştır.

Ayrıca, düşük sıcaklıklarda Alexander ve Ferguson (1994) opasite tablosundan yararlanılırken, konveksiyon için de klasik karışım uzunluğu kuramı (Böhm-Vitense, 1958) kullanıldı. Ağır element bolluğunun elementlere göre dağılımı ise Grevesse ve Noels'dan (1993) alınmıştır.

### 3. Yayılma (diffüzyon) İşlemi

Eddington'ın 1920'de yaptığı bir çalışmada kimyasal elementlerin yayılma işlemi için zaman ölçeğinin yıldızın yaşamından daha fazla olmasından dolayı, yayılma işleminin önemsiz olduğunu belirtmiştir. Yakın zamana kadar da hep gözardı edilmiştir. Ap yıldızlarının tuhaflığına yönelik şimdiye kadar yapılan en iyi açıklama yayılma işlemine dayandığı için tekrar yıldız astrofizikinin gündemine gelmiştir. Belki de en somut etkisi de Güneş modellerinde saptanmıştır.

Elementlerin yayılmasını belirleyen dört durum sözkonusu. Bunlar, basınç ve sıcaklık gradyentleri, homojen olmayan element dağılımı ve ışınımsal sürüklenme. Basınç gradyenti Güneş'te belirleyici role sahiptir. Çok mitarda cam masket ve tenis toplarını aynı kaba koyup



Şekil 1. Merkezden yüzeye kadar, Güneş ile yayılmayı içeren ve içermeyen modeller arasındaki görelî ses hızı farkı (Yıldız, 2000).

salladığımızda nasıl cam masketler alta inip tenis toplarında yukarı çıkarsa, aynı şekilde, Güneş'te de, hidrojen elementi yukarı çıkarken helyum ve ağır elementler merkeze doğru gömülmektedir. Işınımsal sürüklenmenin ise, etkin sıcaklığı 6700 K'den fazla olan yıldızlarda demir grubu elementlerin yüzeye doğru fotonlar tarafından sürüklenmesinden dolayı, Ap yıldızlarının tuhaf spektroskopik özelliklere sahip olmasından sorumlu olduğu düşünülmektedir.

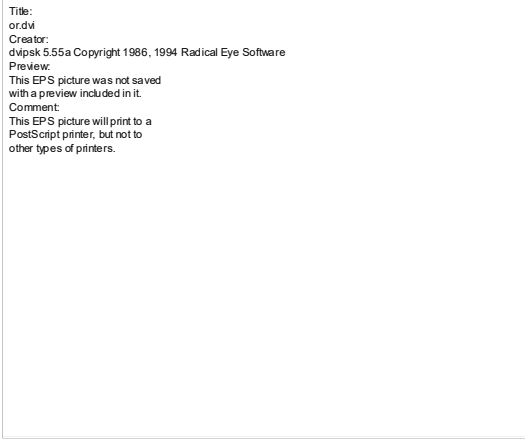
Yayılma hızları gerçekten çok düşüktür. Güneş modellerinde, Hidrojen elementi için yayılma hızı, merkezde  $10^{-10}$  cm/s iken konvektif bölgenin tabanında  $10^{-6}$  cm/s olmaktadır. Helyum ve ağır elementler içinse yaklaşık aynı mertebede fakat negatif değerli hızlar sözkonusudur.

### 4. Sonuçlar

Güneş'te, bugüne kadar, 10 milyon farklı modda titreşim tespit edilmiştir. Bunların bazıları yüzey dalgalarıyken, bazıları da Güneş'in farklı iç katmanlarına inebilen ses dalgalarıdır. Farklı katmanlara indikleri için de hemen hemen merkezden yüzeye kadar ses hızının tespit edilmesi başarılmıştır. Gözlemlerden elde edilen ses hızıyla kuramsal modellerden elde edilen ses hızı arasındaki farklardan yola çıkarak, yayılma (diffüzyon) işleminin çok önemli olduğu anlaşılmıştır.

Yayılmayı içeren modelin başlangıç hidrojen bolluğu 0,705, helyum bolluğu 0,275 ve ağır element bolluğu da 0,02'dir. Başlangıçta homojen olan kimyasal içerik, nükleer tepkimelerle gerçekleşen dönüşümün dışında, elementlerin ağırlıkları birbirinden farklı oldukları için, zamanla homojen olmayan bir nitelik kazanıyor. Hidrojen elementinin yüzeye doğru hareketi sonucu, 4,6 milyar yıl yaşındaki günümüz Güneş modelinde yüzey hidrojen bolluğu 0,735'e çıkmaktadır. Helyum ve ağır elementlerin yüzey bollukları ise, bunların gömülmelerinden dolayı, sırasıyla, 0,246 ve 0,019'a düşmektedir.

Şekil 1'de Güneş ile yayılmayı içeren ve içermeyen model arasındaki görelî ses hızı farkı normalize edilmiş yarıçapa göre çizilmiştir (Yıldız, 2000). Yayılmayı içermeyen modelde ses hızının Güneş'e göre en farklı olduğu yerde fark, 0,6 %'dan biraz fazla iken (ince çizgi), yayılmayı içeren modelde en fazla fark 0,2 % olmaktadır (kalın çizgi). Şekil 2'de başka iki model için de görelî ses hızı farkı çizilmiştir: küçük noktalarla gösterilen modelde sadece hidrojen ve helyumun yayılması hasaba katılırken, büyük noktalarla gösterilen modelde hal denkleminde etkisini tespit edebilmek için  $\tau$ -etkisi gözardı edilmiştir.



**Şekil 2.** Merkezden yüzeye kadar, Güneş ile sabit ve değişken konvektif parametreliler arasındaki görelî ses hızı farkı. Noktayla işaretlenmiş model de sabit konvektif parametreliler; fakat opasite hesabı için Günter Houdek tarafından hazırlanan alt-programlar kullanılmıştır.

Yayımla işlemleri, sadece modellerin ses hızında iyileştirme yapmakla kalmıyor, modelleri, yine titreşimler arasındaki farklılardan bulunan konvektif zarfın taban yarıçapı ( $0,713 \pm 0,001R_{\odot}$ ) ve yüzeydeki helyum bolluğu ( $0,246 \pm 0,001$ ) değerlerine de oldukça yaklaşıyor. Yayılmayı içermeyen modelde konvektif bölgenin taban yarıçapı  $0,723R_{\odot}$  iken, içeren modelde aynı nicelik  $0,710R_{\odot}$  olmaktadır. Yüzeydeki helyum bolluğu ise, yayılmayı içermeyen ve içeren modellerde, sırasıyla,  $0,278$  ve  $0,246$  olmaktadır.

Aslında, gözlenen ile yayılmayı içeren bir modelin ses hızı arasındaki fark gerçekten çok az olmasına karşın, gözlenen ses hızındaki hata payı çok düşük olduğu için bu farklar anlamlıdır. Güneş'in iç yapısı üzerine yapılan kuramsal çalışmalarda özellikle konvektif bölgenin hemen altındaki tepe ile merkeze yakın kısımlarda bulunan yarım tepenin giderilmesine çalışılmaktadır. Konvektif bölgenin hemen altındaki tepenin, *konvektif fırlatmanın* bir sonucu olduğu şeklinde genel bir kanıya rağmen, Güneş'in geçmişteki evriminin bir artışı olma olasılığı daha fazladır. Bu duruma bir örnek, geçmişte konvektif parametrenin ( $\alpha$ ) daha fazla olmasıdır. Şunu belirtmemiz gerekir ki, konveksiyonun yıldız astrofizikinde en az bilinen konular arasında yerini koruduğu bir durumda, Güneş için  $\alpha$ 'nın geçmişte daha fazla olduğuna dair bir gösterge yoktur. Ayrıca, konvektif bölgenin tabanından tavanına kadar, karışım uzunluğunun basınç ölçek yüksekliğine oranının sabit olması gibi bir zorunluluk da bulunmamaktadır.

Şekil 2'de ince çizgi sabit, koyu çizgi ise değişken  $\alpha$  ile yapılan modelleri temsil etmektedirler. Değişken konvektif parametre ile

elde edilen modelde,  $\alpha$ 'nın, Güneş oluştuğunda bugünkünden 1 fazla olduğu ve zamanla lineer olarak azaldığı varsayılmıştır. Burada, konvektif parametrenin zamana karşı nasıl bağımlı olduğundan daha çok, zamana (ya da Güneş'in zamanla değişen bir niceliğine) bağlı olma durumundaki etkinin ne olduğu önemsenmiştir. Konvektif parametrenin az ve fazla olduğu iki konvektif zarflı model arasındaki en önemli fark yıldızların toplam yarıçaplarında gerçekleşir. Konvektif parametre ne kadar fazlaysa modelin yarıçapı da o kadar az olacaktır. Bunun yanı sıra, modelin konvektif zarfındaki kütle de  $\alpha$ 'ya duyarlıdır:  $\alpha$  arttıkça konvektif bölgedeki kütle miktarı da artar. Konvektif bölgenin hemen altındaki tepenin tamamen giderilmesi için uygun bir zamana bağımlılık bulmak mümkündür, ancak, bize göre, burada asıl çıkarılması gereken sonuç, geçmişte konvektif bölgenin,  $0,6R_{\odot}$ 'in üzerindeki kütleyle yakın bir kütleyle sahip olduğudur. Güneş'in konvektif zarfının geçmişte, bugünkünden daha fazla olması için,  $\alpha$ 'nın zamana bağımlılığının dışında, başka nedenler de olabilir.

Diğer önemli bir konu ise Güneş'in iç kısımlarının dönmesidir. Yine helyosismolojiden, Güneş'in iç kısımlarının da hemen hemen dış kısımlarla aynı hızda, bir katı cisim gibi döndüğünü anladık. Bu durum, pek çözemediğimiz açısal momentum problemi açısından oldukça ilginç.

Güneş iç yapısı ile ilgili olarak çok önemli bir problem ise hala çözülmemiş durumdadır. Her nükleer çevrimde fotonların yanı sıra nötrinolar da açığa çıkmaktadır. Yerin altında konuşlanmış bir çok nötrino dedektörleri ile Güneş'ten gelen nötrinoları kaydedebilmekteyiz. Sorun şu; Güneş modellerinden kuramsal olarak hesapladığımız nötrino miktarı ölçülenden iki-üç kat daha fazla. Helyosismoloji yaptığımız modellere olan güvenimizi arttırdığı için, bu problemin parçacık fizikinin çözmesi gereken bir problem olduğu kanısı genel kabul görmektedir.

## Kaynaklar

- Alexander D.R., Ferguson J.W., 1994, *ApJ*, **437**, 879  
Basu S., Chaplin W.J., Christensen-Dalsgaard J., et al., 1997, *MNRAS*, **292**, 243  
Basu S., Antia, H.M., 1995, *MNRAS*, **276**, 1402  
Basu S., Antia, H.M., 1997, *MNRAS*, **287**, 189  
Böhm-Vitense E., 1958, *ZfA*, **46**, 108  
Caughlan G.R., Fowler W.A., 1988, *Atomic and Nuc. Data Tab.*, **40**, 283

- Grevesse N., Noels A., 1993, *Origin and Evolution of the Elements*, (ed. Pratz M., et al.), Cambridge University Press.
- Harris G.M., Roberts J.E., Trulio J.G., 1960, *Phys. Rev.*, **119**, 1832
- Iglesias C.A., Rogers F.J., 1996, *ApJ*, **464**, 943
- Michaud G., Proffitt C.R., 1993, *Inside the Stars*, Proc. IAU Coll. 137, (eds. W.W. Weiss, A. Baglin), p.246
- Mihalas D., Hummer D.G., Mihalas B.W., Dappen W., 1990, *ApJ*, **350**, 300
- Yıldız M., 2000, *Variable Stars as Essential Astrophysical Tools*, (ed. İbanoğlu C.), Kluwer Academic Press, p.169