

## Güneştacı Deliğinde Dalga – Parçacık Etkileşimi

Esat Rennan Pekünlü, Kadri Yakut, Hicran Şart  
Ege Üniversitesi  
Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü  
Bornova, 35100 İzmir

[rpekunlu@astronomy.sci.ege.edu.tr](mailto:rpekunlu@astronomy.sci.ege.edu.tr), [yakut@astronomy.sci.ege.edu.tr](mailto:yakut@astronomy.sci.ege.edu.tr),  
[sart@astronomy.sci.ege.edu.tr](mailto:sart@astronomy.sci.ege.edu.tr)

**Özet.** *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) uydusundaki moröte tayfi, kuzey kutup güneştacı deliğindeki iyonların sıcaklık yönbağımlılığı gösterdiğini saptamıştır. Bizim çalışmamızda güneştacı deliğinde yayılan ve yönbağımlı sıcaklıklar sergileyen iyonlarla iyon cyclotron dalgalarının etkileşimi incelenmiştir. Empirik modelimizde proton O VI ve MgX iyonlarının hız uzay dağılımlarının bi-Maxwellian olduğunu varsaydık. Güneştacı tabanından kaynaklandığını varsaydığımız sol çembersel uçlaşmış iyon – cyclotron dalgalarının(ICD) dağılma bağıntısını türettik. Frekansları 2.5 kHz – 10 kHz aralığında bulunan ICD O VI iyonlarıyla  $1.5R_{\odot} - 3.0R_{\odot}$  aralığında rezonansa geldiğini saptadık. Dağılma bağıntısını proton ve Mg X iyonları için de çözdük. 2.5 kHz – 10 kHz frekansına sahip dalgaların aynı bölgede önce O VI iyonlarını ısıttığını gördük. Bu dalgaların güç tayflarının evrimini bilmiyoruz. Bu nedenle, önce O VI iyonlarıyla rezonansa gelen ICD dan geriye, Mg X iyonları ve protonlar için de dalga erkesinin kalıp kalmadığını bilemiyoruz. Ancak, tüm iyonların dikine sıcaklıklarının koşut sıcaklıklarından daha büyük olduğuna ilişkin SOHO verileri ışığında ICD nin tüm iyonlara yetecek denli erkeye sahip olduğu hipotezini kullandık.*

### 1. Giriş.

SOHO/UVCS ve SUMER veri tabanları güneştacı deliğindeki plazmanın “çarpışmasız” olduğunu saptamıştır. Örneğin Kohl ve ark. [1]  $O^{5+}$  iyonu için  $T_{\perp} / T_{\parallel} \sim 10 - 100$  olduğunu göstermişlerdir. SOHO verilerine göre bu bölgenin elektron sayı yoğunluğu aşağıdaki gibidir[2]:

$$N_e = \frac{3.2 \times 10^8}{R^{15.6}} + \frac{2.5 \times 10^6}{R^{3.76}} + \frac{1.4 \times 10^5}{R^2} cm^{-3} \quad (1)$$

ve modellenmiş olan manyetik alanı,

$$B = 1.5(f_{\max} - 1)R^{-3.5} + 1.5R^{-2} G \quad (2)$$

olarak verilir [3]. Heriki bağıntıda da  $R = r / R_{\odot}$  ve  $r$  de Güneş özeğinden olan uzaklıktır,  $f_{\max} = 9$  alınır. Kohl ve arkadaşlarının [1] bulguları temelinde güneştacı deliğindeki  $O^{5+}$  iyonu hız dağılımının bi – Maxwellian olduğu varsayımını kullandık:

$$f_0 = N_{O^{5+}} \alpha_{\perp}^2 \alpha_{\parallel} \pi^{-3/2} \exp[-(\alpha_{\perp}^2 v_{\perp}^2 + \alpha_{\parallel}^2 v_{\parallel}^2)] \quad (3)$$

(3) numaralı bağıntıda,  $\alpha_{\perp(i)} = (2k_B T_{\perp(i)} / m_i)^{-1/2}$  yerel manyetik alana dik (koşut) yöndeki “en olası hız”ın tersidir,  $N_{O^{5+}}$ , O VI iyonunun parçacık sayı yoğunluğudur.

### 2. Vlasov Eşitliğinin Çözümü.

Güneştacı deliğindeki “çarpışmasız” soğuk plazmada yayılan dalgaların dağılma bağıntısı aşağıdaki dalga denkleminde türetilecektir:

$$\mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{E}) + \frac{\omega^2}{c^2} \boldsymbol{\kappa} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

(4) numaralı eşitlik, düzlem dalga varsayımıyla elde edilmiştir, diğer bir deyişle, ortamdaki tedirginlik niceliklerinin uzay – zaman değişimlerinin  $\exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$  biçiminde olduğu varsayılmıştır. Burada  $\omega$  dalganın frekansı,  $t$  zaman,  $\mathbf{k}$  dalga vektörü ve  $\mathbf{r}$  kaynaktan olan uzaklık,  $\mathbf{E}$  elektrik alan vektörü ve  $\boldsymbol{\kappa}$  dielektrik tensördür.  $\boldsymbol{\kappa}$  dielektrik tensörü aşağıdaki doğrusallaştırılmış Vlasov eşitliğinden türetilcektir:

$$\frac{\partial f_l}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f_l}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q_l}{m_l} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0) \cdot \frac{\partial f_l}{\partial \mathbf{v}} = - \frac{q_l}{m_l} (\mathbf{E}_l + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_l) \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{v}} \quad (5)$$

(5) numaralı bağıntıda  $f_l$  parçacıkların evre-uzay yoğunluğunun tedirginlik niceliği,  $q_l$  ve  $m_l$  ilgili iyonun sırasıyla elektrik yükü ve kütlesi,  $\mathbf{v}$  parçacığın hız vektörü,  $\mathbf{B}_0$  güneşacı deliğindeki manyetik alan yeğinliği,  $\mathbf{E}_l$  iyonlarla rezonansa girecek olan dalgaların elektrik alan vektörü,  $f_0$  da tedirgin edilmemiş evre – uzay yoğunluğudur. (5) numaralı bağıntıdan, sol çembersel uçlaşmış iyon – cyclotron dalgaları için elde edilen  $\boldsymbol{\kappa}$  dielektrik tensörü aşağıdaki gibidir:

$$\kappa_L = I + \frac{J/E}{i\omega\epsilon_0} = I + \frac{q_i^2 \pi}{m\omega^2 \epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} dv_{||} \int_0^{\infty} \frac{(\omega - kv_{||})(\partial f_0 / \partial v_{\perp}) + kv_{\perp}(\partial f_0 / \partial v_{||})}{\omega - kv_{||} - \Omega_{ic}} v_{\perp}^2 dv_{\perp} \quad (6)$$

(6) numaralı bağıntıda  $J$  akım yoğunluğu,  $\epsilon_0$  vakumun dielektrik sabiti,  $\Omega_{ic}$  iyon cyclotron frekansıdır.  $\partial f_0 / \partial v_{\perp}$  ve  $\partial f_0 / \partial v_{||}$  türevleri (3) numaralı bağıntıdan türetilcektir. (4) numaralı dalga denkleminin çözümü olan dağılma bağıntısı, “principal” ve “residual” katkılarla aşağıdaki gibi elde edilir:

$$k^2 \left[ \frac{\omega_{ip}^2}{2\omega^2 \alpha_{||}^2 (\omega - \Omega_{ic})^2} P + \frac{c^2}{\omega^2} \right] - \frac{k}{\alpha_{||} \pi^{1/2}} \left( \frac{\omega_{ip}^2}{\omega^2 (\omega - \Omega_{ic})} \right) P + \frac{\omega_{ip}^2}{\omega (\omega - \Omega_{ic})} - I + R = 0 \quad (7)$$

(7) numaralı bağıntıda  $\omega_{ip}$  iyon plazma frekansı,  $P = [\omega / (\omega - \Omega_{ic})] + (T_{\perp} / T_{||}) - I$  ve Residual katkı (R) da aşağıdaki bağıntıda verildiği gibidir:

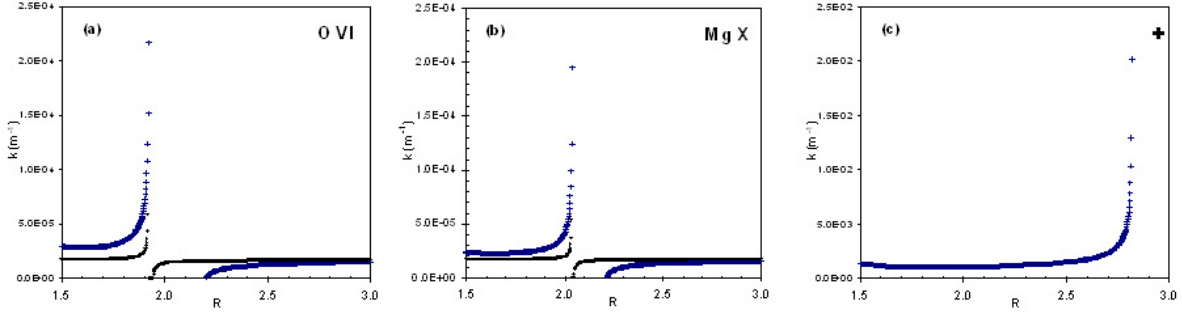
$$R = -i\pi^{1/2} \alpha_{||} \frac{\omega_{ip}^2}{k\omega^2} \left[ \Omega_{ic} \left( I - \frac{T_{\perp}}{T_{||}} \right) + \omega \right] \exp \left[ -\alpha_{||}^2 \left( \frac{\omega - \Omega_{ic}}{k} \right)^2 \right] \quad (8)$$

(7) numaralı eşitliği, gerçel  $k$  ve karmaşık  $\omega$  varsayımıyla çözersek, iyonlarla rezonansa giren iyon – cyclotron dalgalarının *sönme oranını* (damping rate) elde ederiz:

$$\gamma = \text{Im } \omega = \frac{\alpha_{||} \omega_{ip}^2 \pi^{1/2}}{\omega^2 k} \left[ \Omega_{ic} \left( \frac{T_{\perp}}{T_{||}} - I \right) - \omega \right] \exp \left[ -\alpha_{||}^2 \left( \frac{\omega - \Omega_{ic}}{k} \right)^2 \right] \left[ \omega_{res} \frac{\partial \kappa_0}{\partial \omega} + 2\kappa_0 \right]^{-1} \quad (9)$$

$\gamma$  sönme oranı, SOHO verilerinin elde edildiği  $1.5R_{\odot} - 3.0R_{\odot}$  aralığında daima pozitif değerler almaktadır. Bu sonuç, iyon cyclotron dalgalarının bu aralıkta sönmeye uğradığını

gösterir. (7) numaralı dağılma bağıntısı O VI, Mg X ve protonlar için ayrı ayrı çözülmüş ve Şekil 1 deki (R,k) uzayında gösterilmiştir. k dalga sayısının sonsuza gittiği bölgeler iyonlarla iyon – cyclotron dalgalarının zoruna titreşime girdiği bölgelerdir. Bu bölgelerde dalgaların mekanik erkeleri ortama ısı erkese olarak saçılır.



Şekil 1. İyon Cyclotron Dalgalarının dağılma bağıntısının (R,k) grafiği. 5 kHz frekansına sahip dalgalar için çizilmiş olan bu grafikte (a) O VI iyonu, (b) Mg X iyonu ve (c) proton ile rezonansa giren dalgaların k dalga vektörünün sonsuza gittiği bölgeler görülmektedir. Literatürde O VI iyonunun parçacık sayı yoğunluğu iki farklı biçimde verilmektedir. 1)  $N_{OVI} = 10^{-3} N_p$  [4] ve 2)  $N_{OVI} = 6.8 \times 10^{-5} N_p$  [5]. Burada  $N_p$  proton sayı yoğunluğudur. Güneştacı deliğinde  $N_p = N_e$  varsayılır. Şekil’de (+) işaretleriyle gösterilen eğri  $N_{OVI} = 10^{-3} N_p$  varsayımıyla çizilmiş, (.) noktalarla çizilmiş olan eğri de  $N_{OVI} = 6.8 \times 10^{-5} N_p$  varsayımıyla çizilmiş eğrilerdir. Dikkat edilirse, sabit bir frekanstaki dalgalar, eğer güneştacı tabanından kaynaklanıyorsa, önce O VI, sonra Mg X iyonuyla ve en son da protonlarla rezonansa girmektedir. Buradan, ısıtılma sürecinde O VI iyonlarının yeğlendiğini savunuyoruz ki bu savımız SOHO verileriyle tutarlıdır. Bu durum, 2.5 kHz – 10 kHz aralığındaki tüm frekanslar için de geçerlidir.

### 3. Sonuç.

SOHO uydusunun, güneştacı plazma parametrelerine ilişkin verilerini kullanarak dalga – parçacık etkileşimini, Vlasov eşitliğinin çözümünü yaparak inceledik. Bulduğumuz sonuçlar, 2.5 kHz – 10 kHz frekans aralığındaki iyon – cyclotron dalgalarının güneştacı plazmasını ısıtmaya ve hızlı güneş rüzgarını oluşturmaya kuvvetli aday olduğunu gösterdi. İyon – cyclotron rezonans süreci iyonları dik yönde daha fazla ısıtırken, manyetik ayna kuvveti aracılığıyla da manyetik alana dik yönde ivmelendirir.

### Kaynaklar

- [1] Kohl J.L. ark., “Measurements of H I and O VI velocity distributions in the extended solar corona with UVCS/SOHO and UVCS/Spartan 201”, *Advances in Space Research*, 20, No.1, 3-14, 1997.
- [2] Feldman W.C., Habbal S.R., Hoogeveen G. Ve Wang Y. –M., “Separation Rate of the Magnetic Field Lines Observed by Ulysses at High Latitudes”, *Advances in Space Research*, 19, (6) 843, 1997.
- [3] Hollweg J.V., “Potential wells, the cyclotron resonance, and ion heating in coronal holes”, *Journal of Geophysical Research*, 104, No.A1, 505-520, 1999.
- [4] Vocks C., “A kinetic model for ions in the solar corona including wave-particle interactions and Coulomb collisions”, *Astrophysical Journal*, 568, 1017, 2002.
- [5] Raymond J.C. ve ark., “Composition of Coronal Streamers from the SOHO Ultraviolet Coronagraph Spectrometer” *Solar Physics*, 175, 645-665, 1997.