

Güneşin Manyetizmasına Genel Bir Bakış

Adnan Ökten

İ. Ü. Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü
34452 Üniversite - İstanbul

1. GİRİŞ

Güneş, fiziksel süreçleri astrofizik açısından yeteri kadar ayrıntılı incelenebilen tek yıldızdır. Onun bu özelliği, yıldız atmosferlerinin manyetik kuvvetler, türbülent hareketler ve ısı prosesleri gibi birbirleri arasında anlaşılması güç etkileşmeler tarafından idare edilen son derece karmaşık bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir. Bu etkileşmeler kendilerini koyu lekeler, parlak fakülalar, parlamalar, X-ışın emisyonu, koronal geçici olaylar, rüzgar akıntıları gibi çeşitli yıldız aktiviteleri şeklinde gösterir. Global ölçekte bu yapılar, çevrimsel bir karaktere sahip karmaşık yapılar oluşturlar. Güneş, yıldız aktivitesi için bir prototip hizmeti görür.

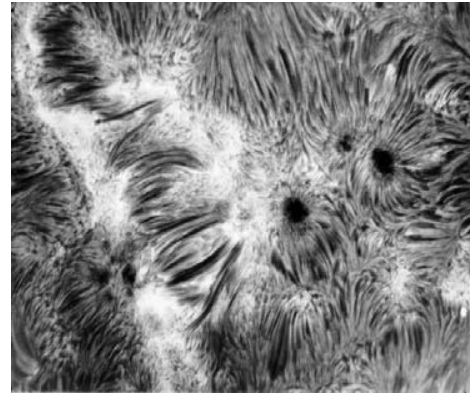
Güneş aktivitesinin bu çeşitli şekillerinin altında yatan anahtar fiziksel parametre manyetik alandır. Uzaktan bu yapıların direk teşhis edilebilmesinin tek yolu, güneşin elektromanyetik ışınımının polarizasyonun gözlenmesidir

Manyetik alanın polarizlenmiş radyasyonla teşhisinin özünde, atomun manyetik alan etrafındaki presesyonundan dolayı atomik enerji seviyelerinin parçalanmasına sebep olan Zeeman etkisi vardır. Spektrel çizgilerin parçalanma bileşenleri manyetik alan vektörünün büyüklüğü ve yönüne bağlı olarak polarizlenir. Her bir polarizasyon durumunun ölçülmesiyle (dairese ve lineer polarizasyon olabilir) manyetik alan vektörü, en azından prensipte, belirlenebilir.

Bir manyetik alanda atomların presesyonu "*Hanle Etkisi*" olarak isimlendirilen bir modifikasyon ortaya çıkarır. Bu bir saçılma polarizasyonudur. Hanle etkisi normal Zeeman etkisiyle mukayese edildiğinde farklı manyetik rejimlere (zayıf manyetik alanlara ve karışık polariteli alanlara) hassas olduğundan Hanle ve Zeeman etkisi birbirlerini tamamlar.

2. EMİSYONDA BULUNAN YAPILAR VE MANYETİK ALAN TOPOLOJİSİ

Bir tam tutulma sırasında güneş koronasına dikkatli bakıldığında güneşin manyetize bir küre olduğu hemen görülebilir (Şekil 1). Plazmanın kinetik enerji yoğunluğu manyetik enerji yoğunluğundan çok daha küçük olduğundan sıcak, seyrek koronal gazın dinamiğine genelde manyetik kuvvetler hakimdir. Bu tür şartlar altında manyetik alanın hemen hemen kuvvetten bağımsız (force-free) olduğu söylenir. Bunu anlamı manyetik olmayan kuvvetlerin manyetik basınçla ve kuvvet denge denklemindeki gerilim kuvvetleriyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğudur. Emisyonda bulunan yapılar (beyaz ışık koronasında elektron yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler) manyetik alanın kütle ve enerji akışını yönlendirmesinden dolayı manyetik alan çizgilerinin şekilleri tarafından idare edilir. Şekil 2'deki gibi H_{α} çizgisinde güneşe manyetik kuvvet çizgileri mknatis çubuğunun üzerine dökülen demir tozunun şeklini hatırlatacak şekilde vizüel olarak görülebilir. Koyu fibriller manyetik alanın ufuksal



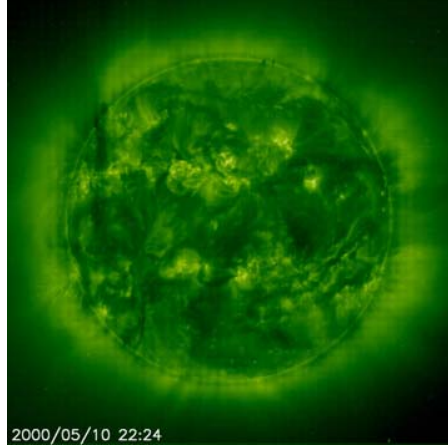
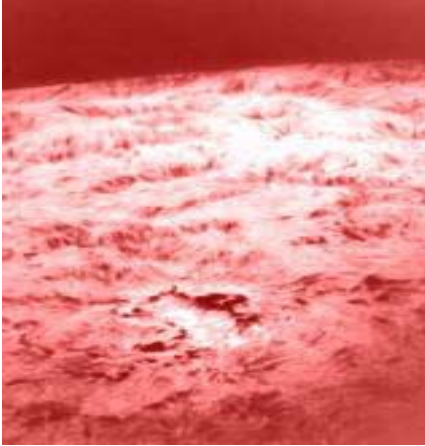
Şekil 1. Güneşin manyetik küre olduğunun belirtisi fotoğraf beyaz ışıkta 11 Ağustos 1999 tam güneş tutulması sırasında S. Koutchmy tarafından çekilmiştir.

Şekil 2. Yeni doğan bir aktif bölgede zıt manyetik polariteli iki lekeyi birleştiren koyu H_{α} fibrilleriyle kuvvet çizgilerinin görünüşü

bileşenin hatlarını gösterirken plaj olarak isimlendirilen parlak alanlar dikey manyetik alanın hakim olduğu yerleri gösterir.

Güneş manyetik alanlarının oluşturduğu yapılar 11 yıllık güneş aktivitesiyle evrimleşir. Fakat yapıların büyüklüğüne bağlı olarak farklı manyetik oluşumlar çok daha kısa zaman ölçeklerinde de gelişim gösterirler. Yeni manyetik akı güneşin iç kısmında sürekli olarak üretilir. Bu akı güneş yüzeyinde ortaya çıktığı zaman iki kutuplu manyetik alanları oluşturur. Büyük akı yoğunlaşmaları güneşin içinden gelen konvektif enerji naklini engeller.

Güneş leke ve parlama aktivitesinin olduğu iki kutuplu manyetik bölgeler “aktif bölgeler” olarak isimlendirilir. Manyetik alanlar güneş yüzeyinin her yerinde aktif bölgeler oluşturabilirler. Geri kalan kısımlar “Sakin bölgeler” olarak isimlendirilir ve bu bölgelerde konvektif bölgenin orta derinliklerinde konvektif hareketlerin oluşturduğu “süpergranülasyon” olarak isimlendirilen hüresel yapılar vardır. Manyetik kuvvet çizgileri güneş plazmasının yüksek elektriksel iletkenliğinden dolayı donmuş “frozen-in” durumundadır. Kuvvet çizgileri ufuksal akıntılarla hücre sınırına taşınırlar ve buralarda manyetik akı yoğunlaşır. Bu durum, güneşin disk kenarına yakın bir bölgenin H_{α} çizgisinin kanatlarında alınmış bir fotoğrafta açıkça görülebilir (Şekil 3). Şekil 3’de kısa, koyu ve ipliğe benzer yapılar manyetik alanların bulunduğu yerleri göstermektedir. Bu absorpsiyon yapılar disk kenarında parlak *spiküller* olarak görünür. Bu *spiküller* 10 km s^{-1} ve daha büyük hızlarla fırlatılan plazma jetleridir. Şekil 3’deki “koyu *spiküllerin*” ayak noktalarında çok küçük parlak emisyon noktaları da görülmektedir. Bu noktalar, ısının arttığı manyetik alanın yoğunlaştığı yerleri işaret etmektedir. Bu beyaz parlak noktalar üst fotosfer, kromosfer keza geçiş bölgesinde oluşan spektral spektral çizgilerde görülen “ağ yapı” olarak isimlendirilen bir yapı oluştururlar. Güneş atmosferinde yukarıya doğru çıkıldıkça emisyon ağyapı bozulmaya başlar. Bu durum yapıların tesir kesitlerinin yükseklikle birbirlerinden ayrıldığıнын bir göstergesi olarak görülebilir. Şekil 4, SOHO IET ile alınan X-ışın fotoğrafına bir örnektir. Düşük yoğunluklu koronal materyalin ısı kapasitesi de düşük olduğundan, küçük enerji dalgalanmaları veya kütle girişi büyük sıcaklık ve yoğunluk etkileri oluşturmakta, sonuçta da oldukça yapılanmış, yüksek



Şekil 3. H_{α} çizgi kanadında disk kenarına yakın “sakin” güneşte süpergranüler hücrelerin görünüşü. NSO/Sacramento Peak, AURA, Inc.

Şekil 4. Milyon derece sıcaklıktaki koronal plazmadan yayınlanan X-ışın emisyonuyla manyetik alanların genel topolojisinin görünüşü. Fotoğraf 10 Mayıs 2000 tarihinde SOHO uydusundaki IET ile alınmıştır.

kontraslı koronal X-ışın emisyonu ortaya çıkmaktadır. Emisyonda bulunan yapıların şekilleri beyaz ışık korona durumunda olduğu gibi (Şekil 1) manyetik alanlar tarafından idare edilmektedir. X-ışın resimleri bize alan çizgilerinin şekillerin değil aynı zaman zıt manyetik polariteli bölgeler arasındaki *topolojik bağlantıları* da görmemize imkan sağlar. Güneş Sisteminin sadece dış kısımlarında manyetik alan çizgileri güneşteki zıt polariteli bir bölge ile topolojik olarak birleşerek “kapanır”. Kapanma böyle bir uzaklıkta gerçekleşirken, karşılık alan çizgilerinin koronanın termodinamiği açısından “açık” olarak göz önüne alınır. Böylece koronal manyetik alanları iki ana topolojik sınıfa ayırabiliriz: açık ve kapalı. Açık bölgelerde alan çizgileri gezegenlerarası uzaya kadar uzanabilir ve koronal plazmanın serbestçe genişlemesine imkan sağlar.

Diğer taraftan kapalı lup bölgeler ısı ve kütle tuzaklandığı ve toplandığı “manyetik şişeler” olarak göz önüne alınabilir. Bundan dolayı yüksek yoğunluk ve sıcaklıklara sahiptirler. Sonuçta da, açık bölgelerle mukayese edildiğinde çok fazla X-ışın emisyonu üretirler.

Açık manyetik alan bölgelerine “koronal delik” (X-ışın radyasyonunda koyu görüldüğünden) adı verilir. Bütün enlemlerde oluşabilirler. X-ışın görüntülerinde en büyük ve en göze batanlar güneş lekeli aktif bölgeler üzerindeki yoğun şiddetli luplardır. Lup sistemi sık sık kararsız hale gelir ve koronal “geçici

“*alay*” (coronal transient) ismini alarak genişler. Küçük kapalı luplar *X-ışın parlak noktaları* olarak görülür. Bunlar güneş lekelerinin oluştuğu normal aktif bölgeler ile sınırlanmamıştır. Bütün enlemlerde görünürler. Fotosferdeki küçük iki kutuplu manyetik bölgelere karşılık gelirler. 8-12 saat gibi kısa yaşam süreleri vardır.

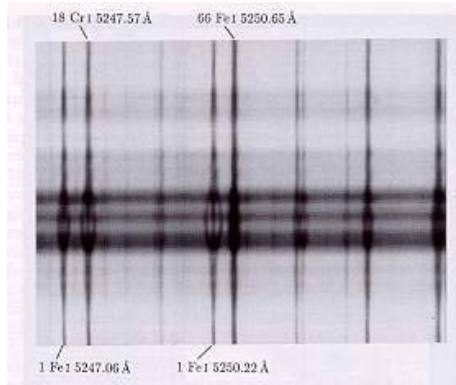
3. GÜNEŞTE ZEEMAN ETKİSİ

Zeeman, 1896 ‘da laboratuvarında manyetik alanın bir göstergesi olan ve Zeeman etkisi olarak bilinen olayı keşfetmiştir. Güneşin manyetik alanlarının sayısal ölçümleri ise, Zeeman olayının ilk kez 1908 de Hale tarafından güneş lekelerinde gözlenmesi ile mümkün olmuştur. Şekil 5 ‘de bir güneş lekesindeki Zeeman etkisi görülmektedir.

Manyetik alan içindeki atomların presesyonu ve presesyon frekansının atomik geçiş frekansı ile karışımı neticesinde, spektral çizgiler manyetik alanlı bir bölgede oluşuyorsa, spektral çizgiler çeşitli bileşenlere ayrılır. Spektral çizgideki yarılmalar geçişin kuantum sayılarına, manyetik alan şiddetine ve alanın yönüne bağlıdır. Fe I 5250.22 A çizgisindeki gibi bazı geçişler, biri kaymış π bileşen ile bunun her iki yanında iki σ bileşeni olmak üzere normal Zeeman üçlüsü olarak isimlendirilen bir durum arzeder. Dalgaboyu kayma miktarı, alan şiddeti ve çizginin Lande faktörü ile oranlıdır. Bileşenlerin polarizasyonu ve relatif şiddetleri alanın doğrultusu yardımı ile belirlenir.

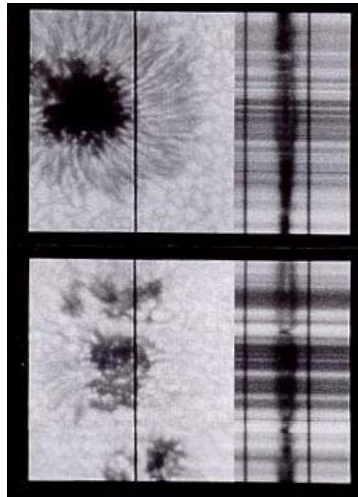
Şekil 5 ‘de görülen spektral bölge küçük ölçekli manyetik alanların teşhisinde önemli bir rol oynamıştır. Spektrografın yarığı 4.1 kG manyetik alan şiddeti genişliğine karşılık gelen alışılmamış bir çizgi genişliğiyle bir güneş lekesini keser. Leke sürekli spektrum üzerinde siyah bir band olarak görülmektedir. Aslında, yarık boyunca uzaysal ayırmagücü oldukça düşüktür. Yüksek ayırmagüçlü spektrograma örnek Şekil 9 gösterilebilir.

Şekil 5 ve 6 ‘da olduğu gibi hemen hemen sadece güneş lekelerinde polarizlenmemiş radyasyondaki Zeeman ayrışmasını direk olarak ölçebiliriz. Ayrışmanın yerine, Zeeman etkisi tarafından oluşturulan polarizasyon, güneşin yüzeyi üzerinde her hangi bir yerdeki yani güneş lekeleri olmadıkları yerlerdeki manyetik alanların keşfedilmesini ve sayısal değerlerin ölçülmesini sağlar.



Şekil 5. Bir güneş lekesindeki Zeeman ayrışması. Leke, sürekli radyasyondaki azalmadan dolayı koyu ufuksal bir band olarak görülür. Maksimum ayrışma 4.1 kG ‘luk bir alan şiddetine karşılık gelir. W.C. Livingston, NSO/Kitt Peak, Tucson.

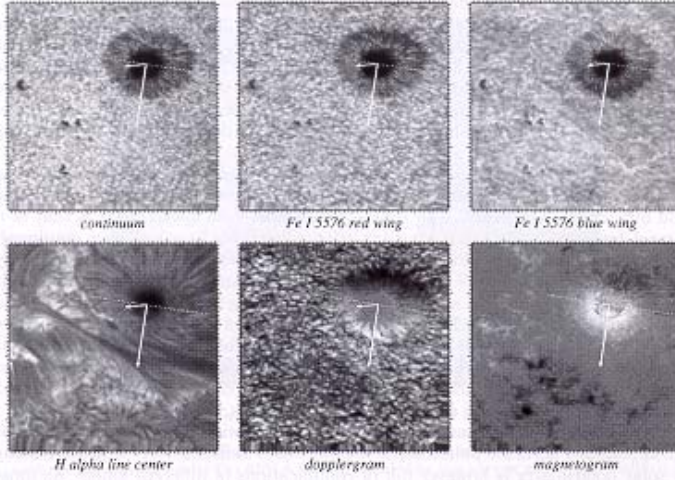
Şüphesiz tam bir gözlemsel bilgiyi, yüksek spektral ayırmagücü ile spektral çizgiler boyunca (dairese ve lineer) polarizasyonun mümkün bütün hallerini kayıt edebildiğimiz takdirde elde edebiliriz. Böyle bir gözlem hiç şüphe yok ki, bize polarizlenmiş çizgi profillerini verir. Zeeman ayrışması λ^2 ile değiştiğinden, çizgi genişliği de yaklaşık dalgaboyu ile orantılı olduğundan, uzun dalgaboylarına gidildiğinde Zeeman ayrışması daha belirgin olur. Bundan dolayı kırmızı ötesi bölgede çalışmak bir avantajdır.



Şekil 6. İsveç La Palma Gözlemevi’nde yüksek uzaysal ayırmagücüyle kaydedilen bir güneş lekesindeki Zeeman ayrışması. Soldaki slit-jaw beyaz ışık görüntüleri spektral yarığın (koyu, dikey şerit) yerini gösterir. Karşılık gelen spektrum sağda verilmiştir. Fe I 6302 A çizgisinin Zeeman ayrışması, sağ ve solunda arza ait iki dar çizgiyle birlikte görülmektedir. B. W. Lites, HAO, Boulder, Colorado

Bir büyük teşhis engeli, mevcut aletlerin uzaysal ayırma güçlerinin erişemediği küçük ölçekli ince yapıların manyetik alanlarının, son derece parçalanmış ve kesikli olması durumundan gelir. Ayırmagücü engelini yenmek ve ayırt edilebilen manyetik alanın gerçek özelliklerini tayin etmek için iyi spektral ayırmagüçlü gözlemler kullanmak şartıyla dolaylı yöntemler geliştirilmiştir. Yapılar ne kadar küçükse evrimsel zaman ölçekleri de o kadar kısa olduğundan yüksek uzaysal ayırmagüç çok kısa poz süreleri ile birleştirilmelidir. Yüksek ayırmagüçlü spektral ve kısa poz süreli polarimetrik hassasiyeti yüksek gözlemleri en büyük güneş teleskoplarını kullanarak yapsak bile, yine de yeterli foton elde edememe durumu ile karşı karşıya kalabiliriz. Bundan dolayı, bütün güneş gözlemleri amaca yönelik gözlem programlarına bağlı

olarak, ayırma gücü veya hassasiyet açısından uygun bir denge kurularak yapılmalıdır.



Şekil 7. Dar band filtreyle gözlenen bir aktif bölgenin farklı şekilde temsil edilmiş altı görüntü. Üst sıradan solden sağa: 'continuum' (sürekli), 'Fe I 5576 red wing' (Fe I 5576 kırmızı kanad), 'Fe I 5576 blue wing' (Fe I 5576 mavi kanad). Alt sıradan solden sağa: 'H alpha line center' (H alfa çizgi merkezi), 'dopplergram' (Doppler gram), 'magnetogram' (magnetogram). Her görüntüde aktif bölgenin farklı özellikleri vurgulanmıştır.

Manyetik alanların termodinamik ve güneş atmosferinin aktivitesi üzerindeki rolünü ortaya çıkarmak için Zeeman etkisinin atmosferin diğer fizik parametrelerinden sorumlu olan polarizlenmemiş radyasyon bilgisiyle birleştirilmesi gerekir. Buna iyi bir örnek Şekil 7 'de verilmiştir. Görüş alanın sağ üst kısmında güneş lekesine sahip bir aktif bölge görülmektedir. Farklı dalgaboylarında hemen hemen eş zamanlı dar band filtrelerle disk üzerinde aynı bölgenin görüntüleri elde edilmiştir. Alt ortadaki dopplergram Fe I 5576 A polarizlenmemiş çizginin yer değiştirmiş dalgaboyu haritasını temsil eder. Çizginin Lande faktörü sıfırdır. Görüntü, bu çizgi içindeki dört farklı pozisyonda filtrelenmiş görüntülerden elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler Doppler etkisinden ortaya çıktığından, fotosferik hızların görüş doğrultusundaki bileşeni ile orantılıdır. Magnetogram Fe I 6302 A çizgisinin mavi kanadındaki dairesel polarizasyon derecesinin bir haritasıdır. Bu, Zeeman etkisi ile ortaya çıkan polarizasyon, uzaysal ayrılmış bir elemandan gelen manyetik akının görüş doğrultusundaki bileşenle orantılı olarak bir ilk yaklaşımdır. Parlak ve koyu alanlar zıt manyetik polariteleri temsil ederler. Gri zemin yaklaşık sıfır manyetik akıya karşılık gelir.

4. MANYETİK ALANLARIN GLOBAL EVRİMİ

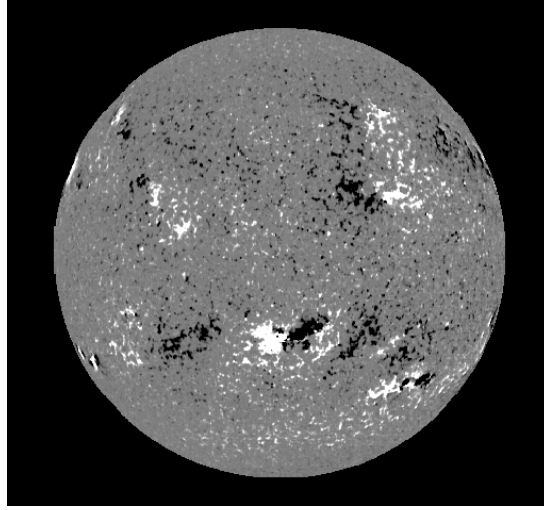
Full disk dairesel polarizasyon haritası, bir taraftan dar bir spektral pencereden dairesel polarizasyon kaydedilirken diğer taraftan eş zamanlı güneş görüntüsünün spektrografın giriş yarığı boyunca taranmasıyla oluşturulur. Şayet bu pencere Zeeman'a hassas bir spektral çizginin kanadında ise, ki böyle bir dairesel polarizasyon haritası genellikle bir *magnetogram* olarak isimlendirilir, bu yapılan işlem güneş diski boyunca manyetik akının görüş doğrultusundaki bileşeninin dağılımını ve morfolojisini gösterir. Şekil 8 spektrograf tabanlı full disk bir magnetogramın örneğini gösterir. Şekil 8 aktivitenin yüksek olduğu bir dönemdeki büyük ölçekli akı örneklerinin disk üzerinde nasıl dağıldığını iyi bir şekilde gösterir. Diskin görünüşü dikkatlice incelendiğinde manyetik ağıyapı rahatça ayırd edilebilir. Bu ağıyapıyı oluşturan bağımsız fotosferik akı elemanlarının tipik boyutlarının yaklaşık 100 km olması beklenmektedir.

Güneş lekelerine sahip yeni doğmuş kompakt iki kutuplu manyetik bölgeler daima Hale'in polarite kanununa uyar. Hale kanununa göre bir aktif bölge içindeki polaritenin Doğu-Batı yönlenmesi Kuzey ve Güney yarım kürelerde zıttır. Yeni bir 11-yıllık çevrim başladığında polarite işaret değiştirir. Halbuki, Güney yarım kürede durum tam tersidir.

11 yıllık çevrim süresince ortaya çıkan iki kutuplu manyetik akı ekvatora doğru göç eder. Yeni çevrim güneş leke gruplarının yüksek enlemlerde polaritelerini değiştirmesiyle başlar. Bunlar yekpare değildir. Küçük akı elemanlarından oluşmuştur. Polarite her iki yarım kürede zıt işaretlidir. Kutuplardaki bu polarite bir önceki çevrim boyunca kendi yarım küresindeki leke gruplarının takip eden kısmının işaretine sahip olurlar. Kutupların tekrar aynı işareti alması için iki 11 yıllık aktivite çevriminin geçmesi gerekir. Bundan dolayı manyetik aktivite çevriminin uzunluğu 22 yıldır.

Güneş yaklaşık 27 günlük bir periyotla döndüğünden, günlük full disk magnetogramlar serisi kullanılarak bütün enlem ve boylamlara ait bilgi çıkarılabilir. Böylece, bütün güneş yüzeyinin, enlemin ve boylamın bir fonksiyonu olarak görüş doğrultusundaki manyetik akı dağılımını gösteren "synoptik haritalar" oluşturulabilir. Güneş katı cisim gibi dönmez. Diferansiyel dönme gösterir. Düşük enlemler yüksek enlemlerden daha hızlıdır. Fakat, boylam sistemi geleneksel olarak kabul edildiği üzere sabit

hızda katı cisim gibi döner. Genellikle Carrington sistemi kullanılır. Buna göre dönme periyodu 27.2753 gündür. Aslında bu dönme hızı yaklaşık 16° enlemindeki güneş kelelerinin dönme hızına karşılık gelir.



Şekil 8. Ulusal Güneş Gözlemevi'nde (Kitt Peak) kaydedilen full disk güneş magnetogramı. Parlak alanlar manyetik alan yönünün bize doğru olduğunu, koyu alanlar ise bizden uzaklaştığını temsil eder.

Bundan dolayı şu anda dinamonun büyük kısmının güneşin radyatif kor ve konvektif bölge arasındaki bu sınır tabakaya yakın bir yerde işlediğine inanılmaktadır.

Çeşitli ölçeklerde yüzeyde ortaya çıkan manyetik akı miktarının yaklaşık 10^{20} Mx/gün aktif bölge (AB) şeklinde, 10^{22} Mx/gün geçici bölgeler (GB) şeklinde, 10^{24} Mx/gün intranetwork alanlar (IA) şeklinde olduğu tahmin edilmektedir. Ortaya çıkan akının miktarı 1:100:10 000 'le orantılıyken büyüklükler yaklaşık olarak 25:5:1 (veya $75'' : 15'' : 3''$) şeklindedir. Her ne kadar verilen her hangi bir zamanda güneş üzerinde görülen manyetik akıya en küçük ölçekli yapılar hakim ve kısa devridaim (turn-over) veya tekrar yapılanma zamanlarına sahiplerse de, bu durumun küçük ölçekli akıyı oluşturan süreçlerin, büyük ölçekli veya sistematik özellikleri sağlayacağına dair bir garantisi yoktur. Sistematik özelliklerle kastedilen; aktif boylamlar, Hale'in polarite kanununa uyum, iki kutuplu manyetik eksenin sistematik eğimleridir. Keza, büyük ölçekli manyetik yapılara en büyük katkının bunlardan geldiği de tam bilinmemektedir. Intranetwork alanların enlemsel dağılımlarının bunlardan daha geniş olduğu bilinmekte, fakat IA 'ların kutuplarının tamamen rasgele yöneldiğine ait bilgilerimiz henüz tam değildir.

5. SAKIN GÜNEŞ ÜZERİNDE KÜÇÜK ÖLÇEKLİ MANYETİK YAPILAR

Şekil 9'de göze batan en önemli özellik karmaşık polariteli ağyapı alanlarının süpergranül hücre sıralarında yer alma eğiliminde olmalarıdır. Keza IA olarak isimlendirilen süpergranül



hücrelerinin içinde görünürde daha zayıf karmaşık polariteli akılar da mevcuttur. Orta derecede ayırmagüçlü gözlemlerde polarizasyon ölçümlerine asıl katkıyı sağlayan bu ana arklar fotosferik ağ yapıda oluşken ve özellikleri ayrıntılı bilinirken, morfolojisi ve evriminin dışında IA'nın özellikleri hakkında az bilgiye sahibiz. Daha küçük ölçeklerde fotosferin ayırmagücü sınırının altında kalan karışık polariteli bir türbülent manyetik alanla dolu olduğunu beklemekteyiz. Bu "gizli" manyetik alanın mevcudiyeti ve bazı özellikleri dolaylı yöntemlerle çıkarılabilir. Magnetogramların uzaysal ayırmagücü sonsuza gitse bile, türbülent spektrum, yaklaşık 100 km'den daha küçük ölçekli yapıların görülmesini pratik bakımdan imkansız kılar.

Şekil 9. Disk merkezinde sakin bir bölgenin yüksek ayırmagüçlü magnetogramı. Parlak ve koyu alanlar zıt polariteli manyetik akıyı temsil eder. Görüş alanı 230×220 yay sn^2 'dir.

Nedeni, bu "mikrotürbülans" rejiminde,

türbülent elemanların spektral çizgi oluşum bölgesi boyunca görüş doğrultusunda zıt polaritelerden gelen polarizasyon katkısının yok edilmesi neticesinde optik olarak incelenmesidir.

Güneş (ve yıldız) aktivitesinin anlaşılmasındaki anahtar rol, manyetik alanların temel yapı taşlarının fiziğinde yatar. Bu yapı taşları erişilebilen uzaysal ayırmagücünün altında kaldığı sürece, ayırmagücünü yenmek ve ayırt edilemeyen manyetik alanların istatistiksel ve fiziksel özellikleri çıkarmak için bir çok dolaylı teşhis teknikleri geliştirmeliyiz. Bu durum fizikte olağandır. Atomun iç yapısını onu görmeden çıkarılabilir. Benzer şekilde yıldız fiziği yıldızların yüzeyleri görülmeksizin geliştirilmiştir.

Manyetik "akı tüpleri" olarak isimlendirilen ağıyapı alanlarının temel yapı taşları türbülent alanlarda olduğu gibi uzaysal olarak ayırt edilememişlerdir. Dolaylı yöntemler hem manyetik alanın teşhisini hem de akı tüplerinin termodinamiğini yüksekliğin bir fonksiyonu olarak vermeye çalışır. Bu dolaylı tekniklerle, yapının uzaysal olarak ayırt edilememesinden dolayı kaybolan bilgi, spektrumdaki tamamlayıcı bilgilerle telafi edilmiştir. Manyetik alanın küçük ölçekli yapısını anlamamızda anahtar rol oynayan "çizgi oranı tekniği" olarak isimlendirilen yöntemde Zeeman polarizasyon etkisinin iki veya daha fazla dikkatlice seçilmiş spektral çizgilerin aynı anda kayıt edilmesi esasına dayanmaktadır. Zayıf manyetik alanlar için, Zeeman ayrışması çizgi genişliği ile mukayese edildiğinde küçük, iki çizginin dairesel polarizasyon genlikleri de Lande faktörleri ile orantılıdır. Ayrışma, çizgi genişliği ile mukayese edildiği zaman, yine de polarizasyon sinyali doyar ve bu durum büyük Lande faktörlü çizgilerde diğer çizgilerdekenden daha fazladır. Bu diferansiyel Zeeman doyma ölçümleriyle gerçek alan şiddeti manyetik filling faktörün (katkıda bulunan akı ile doldurulan ayırt edilebilen elemanın relatif alanı) ne kadar küçük olduğuna bakılmaksızın tayin edilebilir.

Çizgi oranı tekniği sakin fotosferdeki ağıyapı manyetik alanlarına uygulandığı zaman her yerde 1-2 kG şiddetinde alanlar elde edildi. Bu oldukça sürpriz sonuçlar aynı zamanda alan şiddetinin hemen hemen manyetik filling faktöründen bağımsız olduğunu da gösterdi. Böylece, gerçek alan şiddetinin benzer değerleri aktif bölge plajları yanı sıra sakin güneş bölgelerinde de bulundu. Üstelik bu bölgelerde akı miktarı (ve dolayısıyla filling faktör) birkaç mertebe daha büyük çıkmıştır.

Fourier Transform Spektrometresi (FTS) bir polarimetre olarak kullanıma girmesiyle sadece birkaç spektral çizgi değil yüzlerce spektral olarak tamamen ayırt edilebilen tamamen polarize olmuş spektral çizgi profili aynı anda yüksek sinyal gürültü oranıyla kayıt edilmeye başlanmıştır. Bu yöntem sadece daha önce yapılan çizgi oranı sonuçlarını teyit etmekle kalmayıp akı tüpü yapısının iç termodinamiğinin anlaşılmasına varıncaya kadar bilgi vermektedir. FTS aynı zamanda akı tüpünde yükseklikle fizik parametrelerinin nasıl değiştiği hakkında da bilgi verir. Bu durum, şu ana kadar ulaşılmamış artan düzeyde bilgi ve fiziksel gerçekleri içeren deneysel akı tüpü modelleri için hızla gelişen bir model yapım "endüstrisine" götürmüştür.

6. DEĞERLENDİRME

Manyetik alan elemanlarındaki fiziksel parametrelerin sayısal bilgisi, homojen olmayan bir manyetik alana polarizlenmiş radyatif transfer teorisi uygulanarak polarimetrik verilerden türetilir. Her bir spektral çizgi güneş atmosferinin oluşturduğu lineer olmayan tedirginliklerin etkisi altındadır. Ancak bu etki farklı spektral çizgiler için farklı cereyan eder. Buna rağmen bilgiler çıkarılabilir ve fiziksel parametreler gözlenen polarizasyondan indirgenebilir. Dolaylı çıkarımda kullanılacak olan polarimetrik gözlem seti uygun seçilmelidir. Sentetik gözlenebilirleri hesaplamada kullanılan akı tüpü modelini karakterize eden serbest parametrelerin değerleri en küçük kareler uyumuyla tayin edilebilir. Bu şekilde oldukça fazla deneysel akı tüpü modeli yapılabilir. Daha iyi gözlem bilgileri geldiğinde bu modeller daha fazla fiziksel bilgiler sağlayacak şekilde iyileştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

Stenflo, J.O.: 1994, "Solar Magnetic Fields" Polarized Radiation Diagnostics, Kluwer Academy Publishers, ISBN 0-7923-2793-4.