

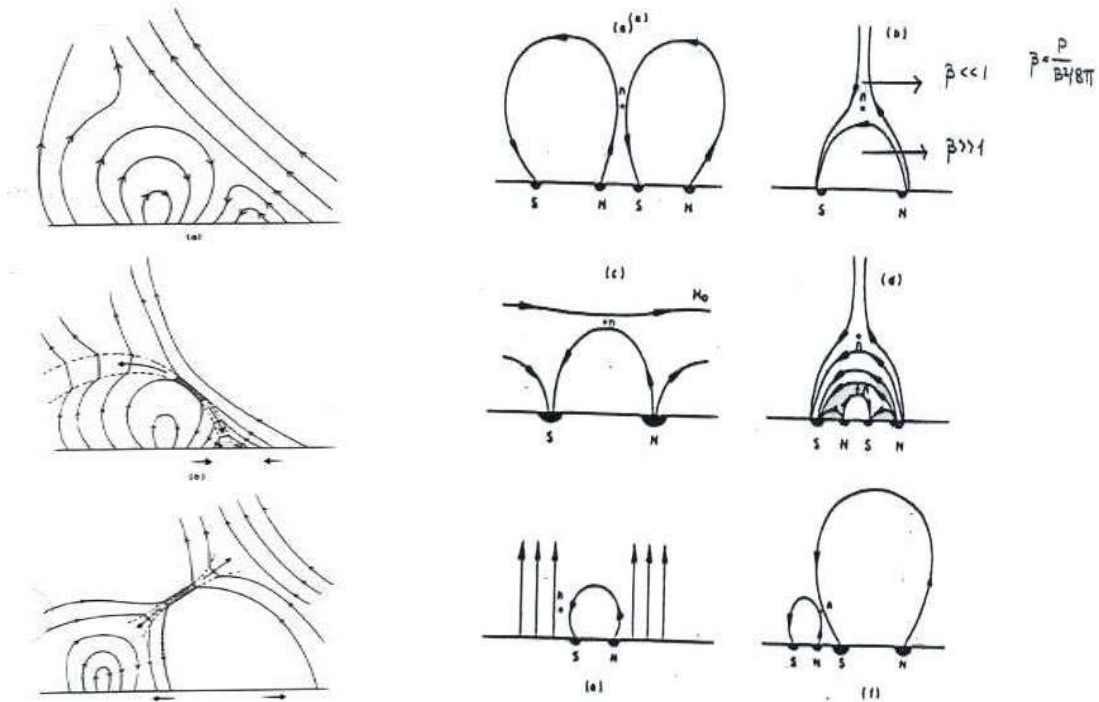
Manyetik Yeniden Birleşme

Dicle Zengin, E. Rennan Pekünlü, Esra Tığrak

Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

Manyetik yeniden birleşme manyetize plazmanın en doğal davranışlarından biri olan ve de kısa sürede yüksek düzeyde enerji açığa çıkaran bir süreç olup son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışılan bir konudur. Bu konuyu incelemekteki amaç ise manyetik yeniden birleşme sürecinin evrenin bir çok bölgesinde süregeldiğini ve son derece genel bir süreç olduğunu sergilemektir. Plazma akışlarındaki manyetik alanların varlığı evren bölgelerinin çoğunda kaçınılmaz olarak manyetik yeniden birleşme sürecine neden olacaktır. Bu bölgelerin her birinde olay yapısal olarak değişse de sürecin oluşumu aynı kalmaktadır.

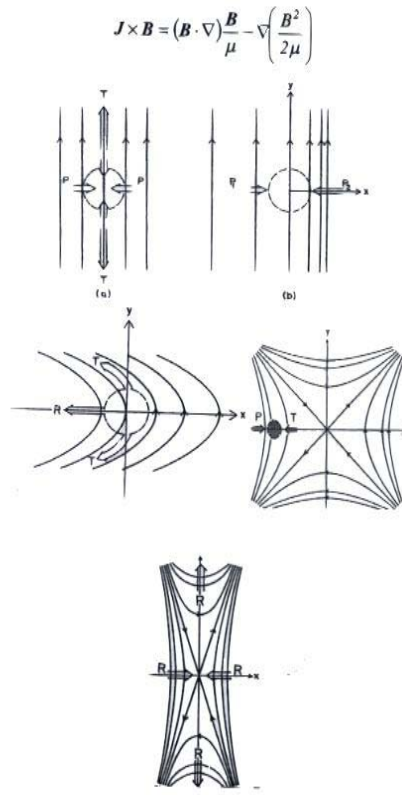
Bu süreci daha kolay anlayabilmek için Güneş üzerinde manyetik yeniden birleşme olayına bakacak olursak; Güneş flare olayından da bildiğimiz gibi konveksiyon bölgesinin alt tarafındaki akımların ortaya çıkardığı manyetik alanın poloidal bileşeni diferansiyel dönme nedeniyle toroidal manyetik alana dönüşerek manyetik akı hatları biçimine bürünür. Konveksiyon yardımıyla önce fotosfere oradanda kromosfer ve koronoya taşınır. Kararsızlıktan dolayı kuvvetlenen manyetik alan tek düze olmayan bir biçime gelir ve düşük- beta ve yüksek-beta görünümündeki çok katlı bir yapıya sahip olur. Burada sözü edilen β -plazma, gaz basıncının manyetik basınca oranıdır. Bir çok akım tabakası düşük-beta plazma içerisindeki manyetik alanlar arasında biçimlenir. Özgür enerji taşıyıcısı olan akım tabakaları, birbirine ters yönde yönelmiş olan manyetik alan kuvvet çizgileri arakesitinde oluşan iki boyutlu bölgelerdir. Bu tabakalarda manyetik alan kuvvet çizgileri değişik şekillerde yeniden birleşerek manyetik alanın potansiyel olmayan bölgesinde birikmiş olan özgür enerjiyi Joule saçılması ile çevreye ısı erkesi biçiminde sağlar. Manyetik yeniden birleşme bu büyük ölçekli, dinamik enerji salınımlarını açıklayan yüksek enerji astrofizikinin en önemli konularından biridir.



Şekil1: Sağ taraftaki şekil manyetik alanda nötr manyetik nokta çıkarabilecek değişik geometrileri gösterirken, sol taraftaki şekil ;(a)iki farklı manyetik alan yapısının göreceli devinimi sonucunda manyetik enerjiyi çevreye ısı erkesi biçiminde saçılması (b) yapılar birbirine yaklaşırken (c) yapılar birbirinden uzaklaşırken (Priest, p.229)

D. Zengin vd: Manyetik Yeniden Birleşme

Bu sürecin ne tür ortamlarda ve fiziksel koşullarda oluştuğunu görmek için olayı iki bağlamda incelememiz gerekir. Öncelikle ManyetikHidroDinamik açıdan fiziksel özelliklerini matematik işlemleriyle belirlemeli, ikinci aşamada da elde ettiğimiz sonuçları kullanarak gözlemsel verileri açıklamalıyız. Bu süreci özgür erke taşıyıcısı akım tabakalarının oluşumunu inceleyerek başlarsak bunların üç yolla oluştuğunu görürüz ;1.) X tür nötr nokta yakınındaki bölgenin çökmesiyle 2.) Bir manyetik yapının topolojik olarak farklı bölgeri birbirine doğru yaslandığında sınır bölgede akım tabakası görülebilir 3.)ManyetikHidrostatik denge durumunun sona ermesi veya kararsız duruma geçmesiyle birlikte akım tabakası oluşabilir. ManyetikHidroDinamiğin temel eşitliklerini kullanarak sürecin en önemli kısmını oluşturan akım tabakaları içerisindeki manyetik alanın zaman ve uzayda değişimini betimleyen “manyetik indüksiyon” eşitliğine ulaşırız. Bu eşitlikteki V hızını içeren dinamik terim ile sızma katsayısını içeren terimin birbirine oranını veren “Manyetik Reynolds sayısı”nın 1den küçük olduğu limit durumu manyetik alanın incelenen bölgeye sızmasını betimler ki bu da manyetik yeniden birleşme sürecinde akım tabakasına sızan manyetik alanın yapısını belirlememizi sağlar.



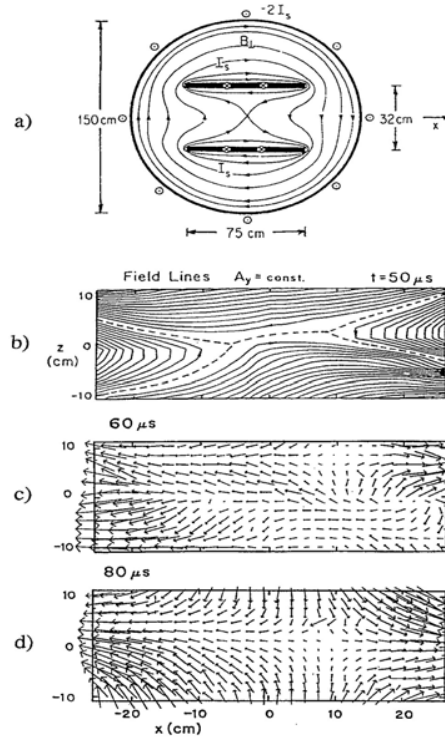
Şekil 2: Lorentz kuvveti etsindeki değişik geometrillerdeki manyetik alan yapılarını içermektedir

Manyetik alan çizgilerini ve plazmayı, manyetik alanın biçimine göre etkileyen Lorentz kuvveti bu açıdan önemlidir. Çünkü bu kuvvet iki etki doğurmaktadır. Manyetik gerilme terimi aracılığıyla kuvvet çizgilerini kısaltma eğiliminde, manyetik basınç terimi aracılığıyla plazmayı sıkıştırmaktadır. Plazmaya etki eden manyetik alan yapılarını tek düze manyetik alandan daha karmaşık olan hiperbolik yapılaraya dönüştürdüğümüzde Lorentz kuvvetinin net etkisi kolaylıkla görülebilmektedir. Özellikle elde edilen X- tür nötr nokta manyetik yeniden birleşmenin karakteristik yapılarındandır. X-eksenine yakın konumdaki plazma yumağı üzerine manyetik alan çizgilerinin eğri olmasından dolayı eğrilik merkezine doğru (T) gerilme terimi uygulanırken

manyetik alan yeğninliğinin azaldığı başlangıç noktasına doğru bir manyetik basınç kuvveti uygulanır. Bu iki kuvvet birbirini tamamen dengeler. Bu manyetik alan tedirgin edilirse denge durumundaki X- tür nötr nokta kararsız duruma geçer ve yeni şeklini alır. Bu yapıda manyetik basınç kuvveti içe doğru net bir etki yaratırken ,manyetik gerilme kuvvetlerinin net etkisi dışarıya doğrudur. Bu da plazmanın akım tabakasına ne şekilde girdiğini ve depolanmış erkenin hangi fiziksel yapıda özgür duruma geçtiğini anlamamızı sağlamaktadır. Akım tabakasının özelliklerini en iyi açıklayan ve kabul gören modellerden biride Sweet-Parker modelidir. Bu modeli kullanarak elde edilen sonuçlara göre; Bölgeden dışarıya doğru sızan plazmanın hızı Alfvén hızındadır. Plazma ve manyetik alan çizgilerinin sızma bölgesine girdiği hız ise bölgenin sızma katsayısı ile doğru, yol ile ters orantılıdır ve bu hız bölgeden dışarıya doğru sızan plazmanın hızından küçüktür. İçeriye doğru akan kinetik erkenin, içeriye doğru akan elektromanyetik erkeye oranı 1den küçüktür. Bu sonuç bizi akım tabakasına doğru akan erkenin çoğunun elektromanyetik kökenli olduğunu gösterir. Akının korunumu ilkesi gereğince

gerekl i işlemleride yaparak akım tabakası içine akan manyetik erkenin yarısı parçacıkların kinetik erkesine diğ er yarısıda ısısal erkeye dönüştüğ ünü görürüz. Diğ er bir deyiş le manyetik yeniden birleş me süreci sıcak ve hızla devinen bir plazma üretmektedir. Sonuç ta elde ettiğ imiz Poynting vektörü görülmektedir.

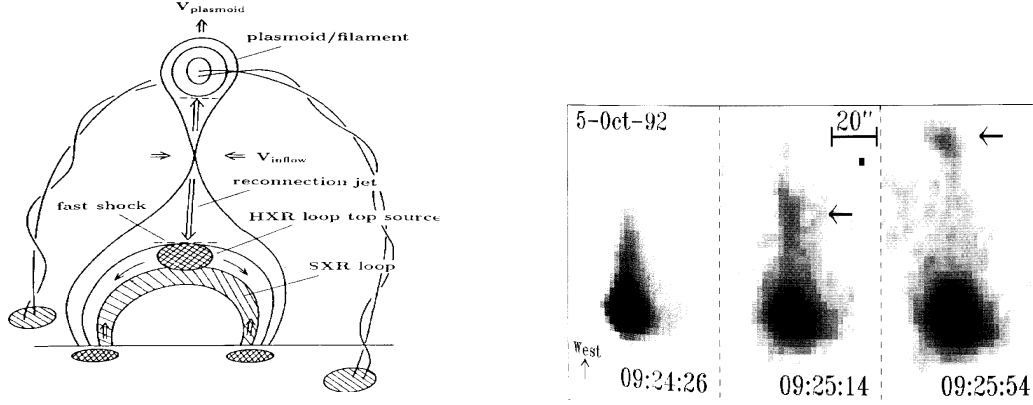
Elde ettiğ imiz bu sonucu yorumlamak istersek, fotoserden yukarıya doğru Poynting akısı olarak gönderilen erke değ iş ik etkilere uğ ramaktadır. Manyetik erkede artış , ohmic ısıtılma ve Lorentz kuvvetinin ürettiğ i iş bu etkiler arasındadır. Erkenin bir bölümü depolanabilir ve daha sonra prominence fı şkı rması veya flare olarak ortaya çıkarken bir baş ka bölümü ,sürekli olarak çevreye ısı erkesi olarak saçılabilir ve güneş tacinı ısıtabilir. Erkenin geri kalan bölümü de plazma parçacıklarını değ iş ik yollarla ivmelendirebilir ve bu hızlı parçacıklar ya ortamdan kurtulur veya erkelerini çevreye ısı erkesi olarak saçarlar.



Şekil 3: Stenzel & Gekelman deneyinin sonuçları. (a) LPD nin kesit görüntüsü, (b) $t = 50 \mu s$ sonunda yeniden birleşmeye uğ ramış olan manyetik alan kuvvet çizgilerinin kontur haritası, (c) ve (d) $t = 60 \mu s$ ve $t = 80 \mu s$ sonunda $z = 87$ konumunda ölçülen iyon hız vektörleri (Yamada, M., 1999, JGR).

Matematik ve fiziğ i kullanarak ulaştığ ımız bu sonuçlar labratuarda da tasarlanmış “zorla yeniden birleş me” süreci için hazırlanmış düzeneklerle de elde edilmektedir. Bunlara bir örnek vermek gerekirse UCLA ‘da (University of California at Los Angeles) yalnızca elektronların manyetize olduğ u LPD (Linear Plazma Device) olarak adlandırılan bir düzenekte yeniden birleş me akım tabakasının yerel özellikleri ölçülmüştür (Stenzel & Gekelman, 1981). Çalışmanın sonuçlarını şekilde görmek mümkündür. Şekil-a ‘da deney düzeneğ i görülürken, şekil-b’de manyetik alan yapısının X-tür nötr nokta olduğ u yeniden birleşmeye uğ ramış olan manyetik alan kuvvet çizgilerinin kontur haritası görülmektedir, şekil-c ve d ‘de ölçülen iyon hız vektörleri görülmektedir. Kuramsal bilgilerden uzaklaşarak bu sürecin evrendeki görsel kanıtları için Güneş i örnek gösterebiliriz

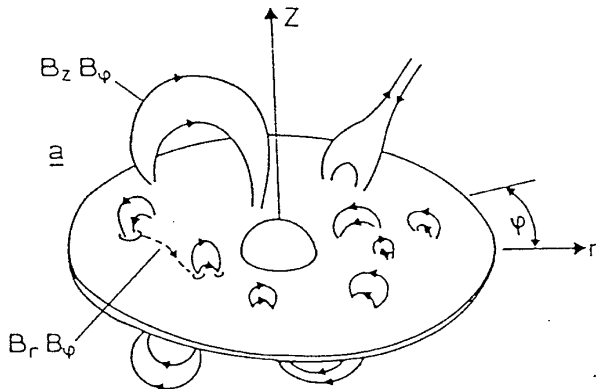
D. Zengin vd: Manyetik Yeniden Birleşme



Şekil 3a: (sağ) 5 Ekim 1992 günü gerçekleşen bir ilmik flaresinin atmalı aşamasında fırlatılan ve X- ışın frekanslarında ışınım yapan plazma yumağının YOYKOH uydusu SXT teleskobu ile alınmış görüntüsü. Plazma yumağının fırlatılma hızı 200-450 km/s. Şekil 3b: (sol), Plazma yumağının uyattığı yeniden birleşme modeli (Shibata, K., A&SS,1999)

Güneş flare olayının atmalı evresinde YOYKOH uydusunca alınan görüntüler bu bölgede ortaya çıkan jetlerin ve fırlatılan plazma yumaklarının varlığını açıkça göstermektedir. Plazma yumağının yeniden birleşme modeli de şeklin altında görülmektedir. Diğer şekilde de yüzeye çıkan ve onun üzerinde yer alan güneşçacı manyetik alanlarının yeniden birleşme süreciyle etkileşimi ve buna ilişkin oluşturulan model görülmektedir. CDS(Centre de Données Astronomiques de Strasbourg) tarafından görülen UV yakamozları (blinkers) keşfi, SOHO tarafından elde edilen önemli sonuçlardan birisidir. Geçiş bölgesinde yaklaşık 10-15 dk zaman ölçeğinde meydana gelen salmanın parlaması yakamozların(blinkers) basit bir açıklamasıdır. Herhangi bir zamanda 10^{19} J düzeylerinde enerji açığa çıkaran 3000 tane UV yakamozu olduğu tahmin edilmektedir. Bu yakamoz görüntüleri süpergranül hücrelerin köşelerinde yerleşmiş olarak görülür ve bunlar büyük olasılıkla manyetik yeniden birleşme bölgeleridir. Bu görüş çift yönlü jetleri gözleyen SUMER(Solar Ultraviolet Measurement of Emitted Radiation) aygıtınca da gözlenmiştir. Burada bilinmesi gereken çift yönlü plazma jetlerinin yeniden birleşme kuramının öngörülerinden birisi olmasıdır.

Etkin gökada çekirdeklerindeki yüksek sıcaklıklara sahip plazmanın varlığı da manyetik yeniden birleşme süreciyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Bunun için önerilen modellerden bir tanesi de AGN lerin on milyar Güneş kütlesi ya da daha büyük kütleyle sahip bir karadelik ve onu çevreleyen kütle aktarım diskinde oluştuğunu öne sürmektedir. Diferansiyel olarak dönen disk, manyetize olmuş bir taç oluştururken disk plazmasındaki kesme kuvvetleri çekirdek manyetik alanın güçlenmesine neden olan etkin bir dinamo oluşturur. Kaldırma kuvveti veya manyetik yeniden birleşmenin karakteristik yapılarından biri olan manyetik alana paralel elektrik alanının oluşturduğu kararsızlıkların bir sonucu olarak yeşin manyetik alanlar diskten disk tacına doğru yükselir ve manyetik ilmikleri oluştururlar. Akım tabakası taçta yükseldikçe sıcaklığı artar ve Joule ısınmasıyla ısısal iletkenlik dengeye gelir. Bu noktada akım tabakası kritik bir sıcaklığa erişir ve yavaş şok dalgaları üretilir ve bu dalgaların sonunda X-ışınları salınır.

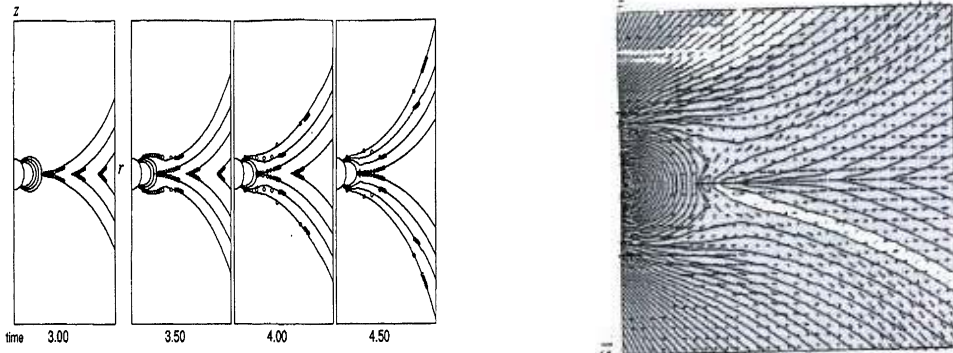


Şekil4: Karadelik çevresinde kütle aktarım diskinde oluşan manyetik ilmikleri göstermektedir (Yokoyoma, T., Tanuma, S.,

Kudoh, T. And Shibata, K., Adv. Space Res., 2000).

Şekilde disk üzerindeki ilmik yapılarını görmek mümkündür. AGN lerdeki relativistik elektronlar, kendilerini sert X-ışın ($e-e^+$ çift üretimi), Gamma ışınları ile (Svensson, 1987; Done ve Fabian, 1989) olduğu gibi Radyo gözlemlerinde ışık hızından daha büyük hızlarda deviniyormuş gibi davranan devinimlerle de gösterir (Abraham ve ark., 1991). Değişik AGN cisimlerinin değişik değerlere sahip X-ışın Moröte ışınlarını açıklayabilmek için AGN tacında bulunan yerel etkin bölgelerin varlığı önerilmiştir (Haardt, Maraschi ve Ghisselini, 1994). Gözlemler çok kısa zaman dilimlerinde büyük miktarlardaki erkenin açığa çıktığını işaret etmektedir. Bu nedenle bu erkenin hangi fiziksel süreçlerle sıcak taca aktarıldığı ve erkenin nasıl olup da flare benzeri yerel süreçlerle salındığı ancak manyetik yeniden birleşme gibi dinamik bir olayla açıklanabilmektedir.

Disk aktarım aşamasında olan ilkel yıldız oluşumlarının bulunduğu yerlerde yüksek hızlı jetlerin fırlatıldığı ortaya çıkmıştır (Montmerle ve ark.,1993). Koyoma ve çalışma ark. (1994,1996) ASCA(Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) ile molekül bulutlarındaki sert X-ışın kaynaklarının sistematik bir incelemesini yaparak bunlardan bazılarının flare türü etkinlikler gösterdiğini bulmuşlardır. İkel yıldız flareleri toplam erke ($10^{35} - 10^{36}$ erg), boyut (birkaç ilkel yıldız yarıçapında) ve çok daha yüksek sıcaklıkları (8keV) bakımından Güneş flaeerelerinden biraz farklıdır. İkel yıldız flareleri yine bir ilkel yıldız olan YLW15 yıldızında ROSAT uydusunca düşük erke bandında gözlenmiştir (Grosso ve ark., 1997). Manyetik yeniden birleşme ilkel yıldızlarda da tıpkı Güneş deki gibi bir sürece sahiptir. Diskten manyetik küreye kütle aktarımına izin veren manyetik yeniden birleşme, manyetik alan ile disk manyetik alanı arasında gerçekleşmektedir. Burada aktarılan kütle büyük bir kısmı yeniden birleşmiş manyetik alan boyunca yıldızda katılır. Kütle geri kalan bölümü, yıldızın açık manyetik alanı boyunca Lorentz kuvvetinin etkisinde tek yönde ivmelendirilir. Bu yeniden birleşme sürecinin yönlendirdiği jetler yıldızın dönmesinden dolayı merkezden kaçarak ivmelendirilmiştir ve bu genç yıldızdan gelen optik jetlere karşılık gelir. Manyetik yeniden birleşmede salınan manyetik erkenin sadece bir bölümü jetlerin kinetik erkesine çevrilir.

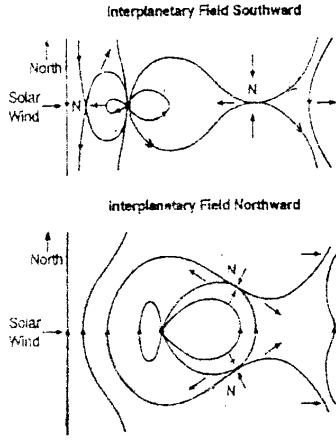


Şekil 5a(sol): Manyetosferik alan ile disk manyetik alanı arasındaki manyetik yeniden birleşme. Diskten yıldız kütle aktarımında görülmektedir. $t=3.0$ anında sol taraftaki kapalı çizgiler manyetosferik alanı, sağ taraftaki açık çizgiler disk manyetik alanını göstermektedir. Şekil: 5b(sağ) $t=3.70$ anında nötr nokta yakınındaki bölgenin büyültülmüş şeklidir (Hirose, S., Uchida, Y., Shibata, K., and Matsumoto, R., PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan, 1997).

Şekil manyetik yeniden birleşme boyunca olan bu aktarımı ve dağılımı göstermektedir. Yeniden birleşme tarafından oluşturulan flare öncesi ilmiklerin evriminin araştırılması için merkezdeki yıldızın dönmesini de içeren sayısal öykünümler yapılmıştır. Bu modeller yardımıyla manyetik yeniden birleşme ve plazmanın fırlatılmasının dönemsel olduğu ve bu zaman aralığında yaklaşık olarak 15 saat olduğu bulunmuştur (Hayashi, M., Shibata, K. And Matsumoto, R., Adv. Space. Res., 2000). Ayrıca ASCA yaklaşık 20 saatte üç kez yineleyen YLW15 yıldızındaki X-ışın flarelerinin de keşfetmiştir (Tsuboi ve ark., 1977). Böylesine yineleyen etkinlikler, disk ve ilkel yıldız ile ilişkili manyetik ilmiklerdeki manyetik yeniden birleşme ile açıklanabilir.

Gezegen manyetik kürelerindeki manyetik yeniden birleşme sürecine ilişkin modeller J.W. Dungey tarafından önerilmektedir (1963). Dungey iki modelinden ilki gezegenlerarası manyetik alan güneş yönüne olduğu durumdur. Dungey yer manyetik küresindeki konveksiyonu sağlayan sürecin manyetik yeniden birleşme olduğunu önermiştir.

D. Zengin vd: Manyetik Yeniden Birleşme



Şekil6:Dungey'in manyetik küre-sindeki yeniden birleşme modelleri görülmektedir.(üst) Gezegenlerarası manyetik alan güneye yönelik olması durumunda öğlen-geceyarısı meridyeni (Dungey, 1961).(alt) Gezegenlerarası manyetik alanın kuzeye yönelik olduğu durumda öğlen-geceyarısı meridyeni (Dungey, 1963)

Şekilde de görüldüğü gibi gezegenlerarası ve manyetik küre kökenli manyetik alanlar güney- kuzü noktasında eşleşir ve güneş rüzgarının momentumu, manyetik küre plazmasında oluşturduğu sirkülasyona bağlı olarak manyetik yeniden birleşme kuyruktaki nötr noktada oluşur. Kuzeye yönelik gezegenler arası manyetik alan durumunda ise manyetik akı, kuyruk "manyetopause" üzerindeki nötr noktalarda yeniden birleşmeye uğrar. Yer 'in dışındaki diğer gezegenler de değişik boyut ve plazma yapısına sahip manyetik kürelere sahiptir. Ayrıca Yer'in manyetik kuyruğunda manyetik fırtına gözlemleri sırasında

patlamalı yeniden birleşme gözlenmiştir. Yer'in manyetik alanı, gezegenler arası manyetik alana çok duyarlı olduğundan manyetik kuyruk güneş rüzgarına bağlı olarak değişebilir. Gözlemler, kuyruk-tipi akım tabakalarının patlamalı yeniden birleşmenin gerçekleştiği yerler olduğunu göstermektedir. Buradan yola çıkarak Satürn,Uranüs ve Neptün'de de patlamalı yeniden birleşmenin olduğunu söyleyebiliriz.

Görüldüğü gibi fizikteki bir çok kavram gibi, manyetik yeniden birleşme kavramı da tek bir evrensel ilke ile çok geniş bir aralıktaki süreçleri birleştirme yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak, yaptığımız çalışma manyetik yeniden birleşme sürecinin evrenin bir çok bölgesinde süregeldiğini ve genel bir süreç olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

- Birk, G.T., Lesch, H., Schopper, R., Wiechen, H., *Astroparticle Physics* 11 ,63-64 (1999).
Chen, F.F., *Introduction to Plasma Physics*, Plenum Press, NY, 1974.
Dendy, R.O., *Plasma Dynamics*, Clarendon Press, Oxford, 1990.
Hayashi, M., Shibata, K. and Matsumoto, R., *Adv. Space Res.* Vol. 26, No.3, pp. 567-570,2000.
Hirose,S.,Uchida,Y.,Shibata,K.,and Matsumoto,R.,*PASJ:Publ.Astron.Soc.Japan* 49,193-205,1997
Hood,A.W.,*Space Science Reviews* 87:79-92,1999.
Ji, H., Yamada, M., and Kulsrud, R., *Phys. Rev. Lett.*, 80, 3256, 1998.
Kirk, J.G., Melrose, D.B., Priest, E.R., *Plasma Astrophysics*, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
Lin,J.,Forbes,T.G.,Priest,E.R.,*ASP Conference Series*,Vol.68,1994.
Nishikawa, K. & Wakatani, M., *Plasma Physics*, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
Priest, E.R., *Solar magnetohydrodynamics*, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, 1984.
Russell, C.T., *Ads. Space Res.*, Vol. 26 No.3, PP 393-404, 2000.
Schopper, R., Lesch, H., and Birk, G.T.,*Astron. Astrophys.* 335, 26-32 (1998)
Shibata,K.,*Astrophysics and Space Science* ,Vol. 264,1999.
Shu, F.H., *The Physics of Astrophysics, Vol. II – Gas Dynamics*, University Science Books, California, 1992.
Stenzel, R.L., Gekelman, W., *JGR*, 86, 649,1998.
Tsuneta, S., *Ap.J.*, 456, 840 – 849,1996.
Yamada, M., 1999, *JGR*, 104, No. A7, 14529 – 14541.
Yokoyoma, T., Tanuma, S., Kudoh, T. And Shibata, K., *Adv. Space Res.* Vol.25, No.3, pp. 505-508, 2000
Hess,W.,N.,*The Radiation Belt and Magnetosphere*,Blaisshell Pub.Co.,1968