

# ETKİN SOĞUK YILDIZLARDA MANYETİK AKININ YÜZEYSEL TAŞINIMI VE YILDIZ LEKELERİNİN ÖMÜRLERİ

Emre IŞIK<sup>1</sup>

## Özet

Bu çalışmada, soğuk cüce ve alt dev yıldızlarda diferansiyel dönme, yıldız yarıçapı ve leke büyüklüğünün yıldız lekelerinin ömürlerine etkisi konusunda sayısal benzetimler yapılmış, ayrıca lekelerin olası biçimsel yapısı irdelenmiştir. Yıldız lekeleri, manyetik alanın yüzeye dik olduğu çift kutuplu manyetik bölgeler (ÇMB) olarak tasarlanmıştır. Bir ÇMB'nin diferansiyel dönme ve boylamsal akış etkisi altında çalkantılı difüzyonu için iki boyutlu bir doğrusal model yardımıyla benzetimler yapılmıştır. Diferansiyel dönme için AB Dor, Güneş ve HR 1099'un alt dev bileşeninin gözlenen diferansiyel dönme oranları kullanılmıştır. Başlangıç enlemi, diferansiyel dönme oranı ve yerel enleme göre eğiklik açısının değişik değerleri için yapılan benzetimlerde ÇMB'lerin manyetik akı değişimi ve ömürleri hesaplanmıştır. Güneş'te gözlenen büyük ÇMB'lere yakın çaptakiler için diferansiyel dönme oranı ile eğiklik açısının değiştirilmesi, yaşam süresinde bir aya varan değişikliklere neden olmaktadır. Çok büyük ÇMB'lerde ise (kesirsel alan ~0.1-0.2) eğiklik açısının varlığı, ömürde dikkate değer bir uzamaya yol açmaktadır. Böylesi ÇMB'lerin yüzey akışları altında evrilerek kutup lekeleri oluşturabileceği ve oluşan lekenin başka bir akı katkısı olmaksızın bir yıl düzeyinde bir ömrü olabileceği saptanmıştır. HR 1099'un alt dev bileşeninin gözlenen zayıf diferansiyel dönmesi ve yarıçapı hesaba katıldığında, 70° enlemde ortaya çıkan, açılal çapı Güneş'teki büyük ÇMB'lerindeki yöresinde olan bir ÇMB'nin yaklaşık iki yıl kadar yaşayabileceği bulunmuştur.

Yıldız lekelerinin biçimsel yapısına ilişkin yapılan yaklaşımlarda tek kutuplu manyetik bölgeler kullanılmıştır. Etkin yıldızlarda gözlenen büyük lekelerin tek ya da çok parçalı oluşunun lekenin manyetik akı evrimine etkisi sınıanmıştır. Diferansiyel dönmenin etkisi olmadığı durumda söz konusu iki durumun birbirine yakın yaşam süreleri verdiği bulunmuştur. Tek parçalı leke benzetmesinde manyetik akının doğrusal biçimde azalışı, analitik çözümle doğrulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yıldızlar: manyetik alanlar – manyetohidrokinamik (MHD) – yıldızlar: etkinlik

## Abstract

The effects of surface differential rotation, stellar radius, and spot size on the lifetimes of starspots have been simulated and possible configurations for starspots are considered. Starspots have been considered as bipolar magnetic regions (BMRs). Turbulent diffusion of a BMR under the effects of differential rotation and meridional flow has been simulated under different stellar conditions. For the surface differential rotation, we have taken the observed values AB Dor, the Sun, and the subgiant component of HR 1099. With these settings, we estimate the dependence of starspot lifetimes on the emergence latitude, the tilt angle, spot size and stellar radius. Finally we

<sup>1</sup> Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Max-Planck-Str. 2, 37191, Katlenburg-Lindau, Almanya  
Tel.: +49-5556-979273, Faks: +49-5556-979190, e-posta: ishik@mps.mpg.de

present test simulations for the evolution of an isolated starspot having different configurations and compare the decay of a monolithic spot without large scale flows.

**Key words:** Stars: magnetic fields – magnetohydrodynamics (MHD) – stars: activity

## 1. Giriş

Hızlı dönen soğuk yıldızlarda oldukça etkin çalışan hidromanyetik dinamo, yüzeyde konvektif enerji akısını baskılayacak derecede güçlü manyetik bölgeler oluşturmakta ve bu bölgeler, çevresine göre daha soğuk yıldız lekeleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Doppler ve Zeeman-Doppler görüntüleme teknikleri, yıldız lekelerinin dolaylı olarak gözlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemlerle farklı zamanlarda elde edilen parlaklık ve manyetik alan haritaları, genç tek yıldızlarda ve hızlı dönen yakın çift yıldızların evrimleşmiş alt dev ya da dev bileşenlerinde leke dağılımının alçak ve orta enlemlerde bir ay zarfında tümüyle değiştiğini, buna karşın kutup lekelerinin on yıl kadar yaşayabildiğini göstermektedir [1]. Gözlenen lekelerin tek parçalı mı, yoksa çok parçalı mı olduğu sorusu güncelliğini korumaktadır [2]. Literatürde yıldız lekelerinin ömürlerine odaklanan bir kuramsal çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, yüzey akışlarının yıldız lekelerinin ömürlerini nasıl etkileyebileceğini ve kutup lekelerinin oluşumunu araştırmaktır.

İkinci bölümde kuramsal modelin altyapısı, üçüncü bölümde ÇMB'ler olarak yıldız lekelerinin evrimi, dördüncü bölümde yıldız lekelerinin yapısına ilişkin irdelemeler verilmiştir. Beşinci bölümde ise sonuçlar sıralanmıştır.

## 2. Model

Yıldız lekelerini oluşturan manyetik alanın bünyesel dağılımı bilinmemektedir. Bu nedenle çalışmada yıldız lekeleri, olası en basit biçimde, işareti olan, yüzeye dik manyetik alan dağılımları olarak ele alınmıştır. Bu durum, Güneş'in büyük ölçekteki yüzey manyetik alanı için iyi bir yaklaşımdır [3], [4]. 3. bölümde yıldız lekeleri, Güneş'ten bildiğimiz çift kutuplu manyetik bölgeler (bundan böyle ÇMB) olarak betimlenmiştir. Bir ÇMB'nin enleme ( $\lambda$ ) ve boylama ( $\phi$ ) bağlı işaretli manyetik akı yoğunluğu,

$$B(\lambda, \phi) = B^+(\lambda, \phi) - B^-(\lambda, \phi) \quad (1)$$

biçiminde ifade edilmiştir. ÇMB'nin manyetik alan dağılımı için [5] ve [6]'nın Güneş'te manyetik akı taşınım modelleri için kullandığı

$$B^\pm(\lambda, \phi) = B_0 \exp\left[-\frac{2[1 - \cos \beta_\pm(\lambda, \phi)]}{\beta_0^2}\right] \quad (2)$$

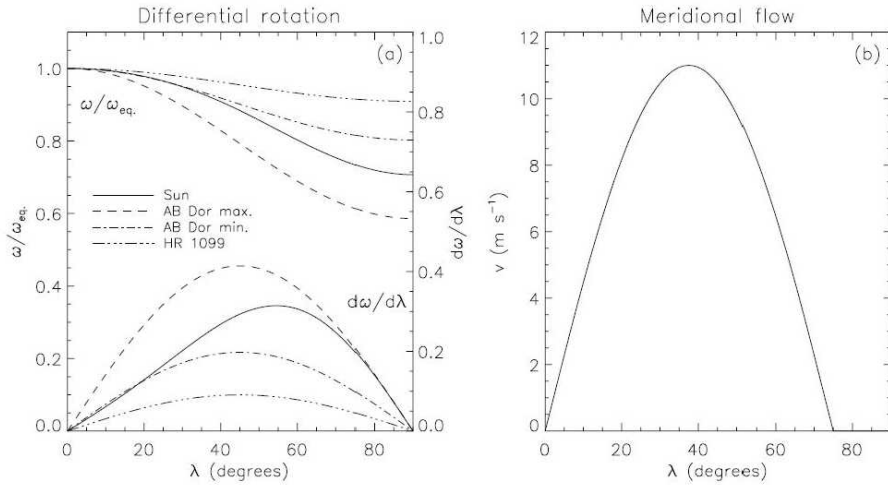
fonksiyonu kullanılmıştır. Burada  $\beta_\pm(\lambda, \phi)$ , pozitif ya da negatif kutbun merkezi ile verilen bir  $(\lambda, \phi)$  konumu arasındaki yıldız merkezli açıdır. Bir ÇMB'nin toplam büyüklüğü, her bir kutbun başlangıç genişliği  $\beta_0$  ve kutup merkezleri arasındaki yıldız merkezli açı  $\Delta\beta$  ile belirlenmektedir.  $B_0$ , keyfi bir biçimde 250 G olarak seçilmiştir. Bu değer, Güneş'teki etkin bölgelerin manyetik akı yoğunluğu değerlerine uygun olduğu için seçilmiştir. Modelimiz kapsamında  $B_0$  için seçilen değer ne olursa olsun sonuçları değiştirmeyecektir, çünkü aşağıda verilen manyetik indüksiyon denklemi ile belirlenen akı taşınımı, edilgen ve doğrusal bir süreçtir (manyetik alan, akışlara tepki vermeden taşınır). Lekeleri manyetik alan yeğinliği başlangıç maksimum değerinin belli bir kesrinin üzerinde olan bölgeyi seçtiğimiz için sonuçlar zaten  $B_0$  seçiminden bağımsız olmaktadır. ÇMB'lerin kutupları ya aynı enlem üzerinde, ya da kutupları birleştiren doğru, yerel enlem  $\lambda$  ile  $\alpha = 0.5\lambda$  kadar bir "eğiklik

açısı” yapacak biçimde, Güneş’te bilinen Joy yasasına uyumlu doğrultuda konuşlandırılmaktadır. Tanımlanan ÇMB’lerin evrimi,  $(R_*, \lambda, \phi)$  küresel koordinatlarda yazılan manyetik indüksiyon denklemi ile belirlenir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & -\omega(\lambda) \frac{\partial B}{\partial \phi} + \frac{1}{R_* \cos \lambda} \frac{\partial}{\partial \lambda} (v(\lambda) B \cos \lambda) \\ & + \frac{\eta}{R_*^2} \left[ \frac{1}{\cos \lambda} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \cos \lambda \frac{\partial B}{\partial \lambda} \right) + \frac{1}{\cos^2 \lambda} \frac{\partial^2 B}{\partial \lambda^2} \right] \\ & + S(\lambda, \phi) - D_r(\eta_r) \end{aligned} \quad (3)$$

Burada  $\omega$ , enleme bağlı açısal hız (yıldızın dönme hızı),  $R_*$  yıldızın yarıçapı,  $v$  enleme bağlı boylamsal akış hızı,  $\eta$  çalkantılı manyetik difüzyon katsayısı,  $S$  ÇMB’leri tanımlayan kaynak fonksiyonu (2),  $D_r$  ise özgül difüzyon katsayısı  $\eta_r$  olan yıldız yarıçapı doğrultusundaki difüzyonu temsil eden terimdir (bkz. [6]). (3) denkleminin sayısal çözümü için manyetik alan, küresel harmonikler cinsinden ifade edilmiştir. En yüksek küresel harmonik derece olarak  $l = 63$  alınmıştır. Bu derece, Güneş yarıçapı için Güneş’teki süpergranüllerin büyüklük ölçeğine ( $\sim 30$  Mm) karşılık gelmektedir. Akı taşınımı modelinin ayrıntıları için bkz. [7] ve [8].

Açısal hızın enleme bağıllığı için Güneş’in [9], AB Doradus’un ve HR 1099 alt dev bileşeninin [10] gözlenen diferansiyel dönme kesitleri alınmıştır. Boylamsal akış kesiti için Güneş’in gözlenen boylamsal hız alanını iyi temsil eden bir fonksiyon alınmıştır ([11], [5]). Yüzey hız alanları Şekil 1’de gösterildiği gibidir.



**Şekil 1. (a)** Ekvatordaki ( $\lambda = 0$ ) değerine boylanmış açısal hız (sol eksen, üstteki eğriler) ve makaslama oranı (“shear rate”; sağ eksen, alttaki eğriler). Eğriler, Güneş’in diferansiyel dönmesine [9], AB Dor’un gözlenen minimum ve maksimum diferansiyel dönme oranına ve HR 1099’un etkin alt dev bileşenin diferansiyel dönmesine [10] karşılık gelmektedir. **(b)** Boylamsal akış hızının enleme göre değişimi (pozitif hız değerleri, akışın kutba doğru olduğu anlamına gelmektedir). Makaslama oranı ve boylamsal akış hızı kesitleri, ekvatora göre ters bakışıktır (antisimetriktir).

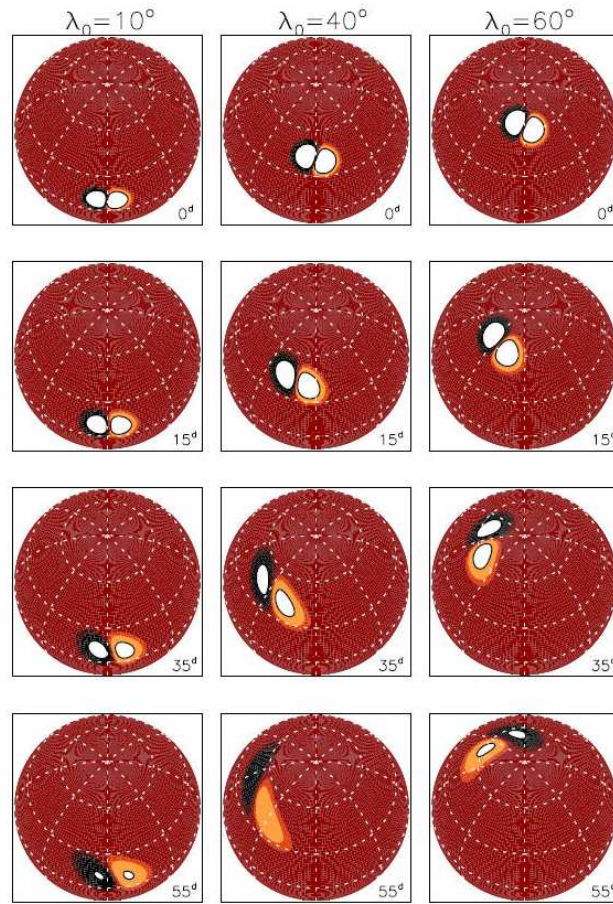
### 3. Yıldızlarda ÇMB’lerin evrimi

Bu bölümde yıldız lekeleri, ÇMB’ler biçiminde ele alınmıştır. Burada geçerli olan varsayım, ÇMB’lerin yıldız lekelerini barındırmasıdır. Ayrıca Zeeman-Doppler görüntüleri ve manyetik alanın doğası göz önüne alınırsa yıldız lekelerinin yüzeye giren ve yüzeyden çıkan manyetik alanlar tarafından oluşturulduğu, uygun bir varsayımdır. Zeeman-Doppler görüntülerinde yüzeye koşut alanlar da görülmektedir; fakat çalışmamızda alanın yatay

bileşenini göz ardı etmekteyiz. Yatay manyetik difüzyon katsayısı  $\eta = 600 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  [12], dikey manyetik difüzyon katsayısı  $\eta_r = 100 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  [6] alınmıştır. Bir ÇMB'nin belli bir andaki yüzey alanı, belirli bir eşiğin üzerinde manyetik alan yoğunluğuna sahip olan bölgenin alanı olarak belirlenmiştir. Bu eşik, başlangıçtaki maksimum manyetik alan yoğunluğunun ( $B_0$ ) %14'ü olarak alınmıştır. Bu değer, Güneş'in SOHO/MDI manyetogramlarında seçilen bazı ÇMB'lerin yaşam süreleri ile benzetimlerimizin verdiği yaşam sürelerinin uyumu göz önüne alınarak belirlenmiştir.

### 3.1. Güneş yarıçaplı anakol yıldızı

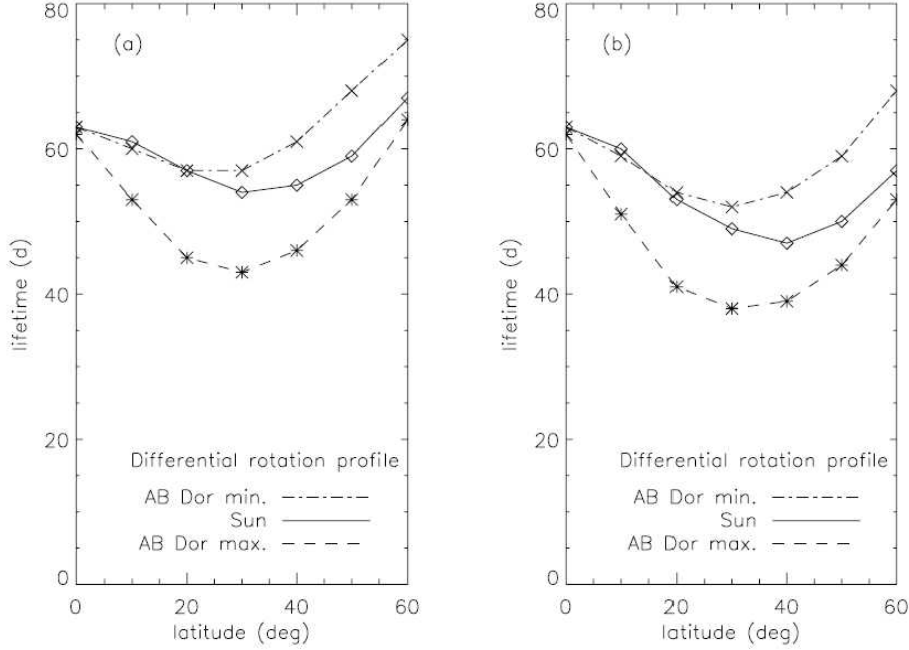
Bu bölümde, Güneş'in diferansiyel dönmesini ve yarıçapı Güneş'le neredeyse aynı olan [13] K0V türü yıldız AB Dor'un gözlenen diferansiyel dönme kesitini alarak yaptığımız benzetimlerden söz edeceğiz. Şekil 2'de  $\beta = 4^\circ$ ,  $\Delta\beta = 10^\circ$  olan bir ÇMB'nin farklı başlangıç enlemleri için evrimi verilmiştir. Diferansiyel dönme için Güneş'in dönme yasası alınmıştır.



**Şekil 2.** Güneş yarıçapında bir yıldızda,  $10^\circ$ ,  $40^\circ$  ve  $60^\circ$  enlemlerde, enlemin yarısı kadar eğiklik açısıyla ortaya çıkan üç ÇMB'nin evrimi. Alan yoğunluğu  $0.14B_0$  eşik değerinin üzerinde olan bölgeler, yıldız lekesi olarak belirlenmiş ve her iki kutbun da ortasında koyu kenarlıkla gösterilmiştir. Her pencerede, ortaya çıkıştan sonra geçen gün sayısı verilmiştir. Yıldızın dönmesi, ekvatorun durgun olduğu çerçevede gösterilmiştir. Başlangıç maksimum manyetik alan yoğunluğunun %4 ve %2 kadarını gösteren kenarlıkların içleri her bir kutup için iki ayrı renk tonu ile doldurulmuştur.

55 gün sonunda ÇMB'lerin aldıkları duruma bakılırsa, yüksek enlemlerde en uzun ömürler, alçak enlemlerde daha kısa, orta enlemlerde ise en kısa ömürler elde edilmiştir. Orta enlemlerde en yüksek oranda olan diferansiyel dönme, ÇMB'nin uzunluk ölçeklerini daha hızlı azaltmaktadır; bu da daha hızlı difüzyona neden olmaktadır. Üst enlemlerde ise,

1. başlangıçtaki eğiklik açısının enleme artması, diferansiyel dönmenin de yardımıyla pozitif ve negatif manyetik kutuplar arasındaki akı sıfırlanması ekisini azaltmaktadır,
2. boylamsal akışın yukarı enlemlere doğru yavaşlaması (bkz. Şekil 1) nedeniyle difüzyonla yitirilen akının çevreye saçılması daha yavaş gerçekleşmektedir.

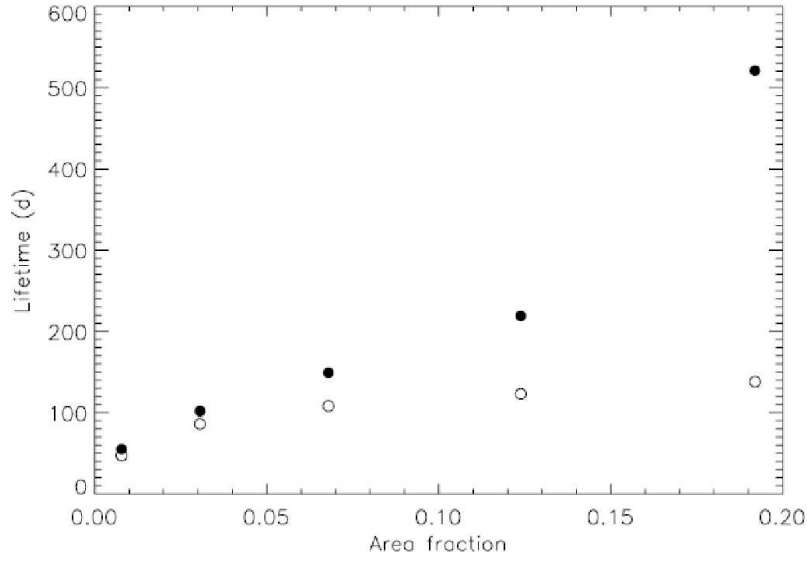


**Şekil 3. (a)** Şekil 1a'da verilen farklı diferansiyel dönme kesitleri için Şekil 2'deki gibi eğik ÇMB'lerin yaşam sürelerinin enleme bağlılığı. **(b)** a'daki ile aynı, fakat eğiklik açısının sıfır olduğu durum.

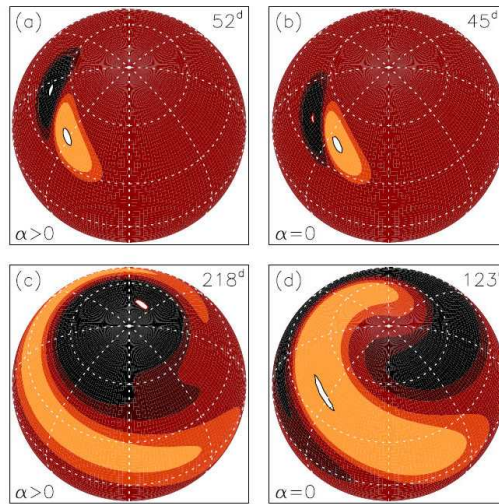
Bu nedenlerle yüksek enlemlerde daha uzun leke yaşam süreleri beklenmelidir. Leke ömrünün ortaya çıkış enlemine bağlılığı, Şekil 3a'da çeşitli diferansiyel dönme kesitleri için gösterilmiştir. Dönme makaslaması (rotational shear) ne kadar büyükse yaşam süreleri de o kadar kısa olmaktadır. ÇMB'ler için eğiklik açıları sıfır alındığında ise (Şekil 3b) yukarıda birinci maddede verilen etki ortadan kalktığı için yaşam süreleri kısalmaktadır.

Leke ömrünün leke büyüklüğüne bağlılığı, 40° enlem için Şekil 4'te gösterilmiştir. Leke büyüklüğü, ÇMB alanının yıldızın toplam yüzey alanına oranı (kesirsel alan) şeklinde verilmiştir. İçi dolu daireler, 20° eğiklik açısı ile ortaya çıkan ÇMB'leri, içi boş daireler ise eğiklik açısı olmadan ortaya çıkan ÇMB'leri temsil etmektedir. Eğiklik açısı, yüzey alanı büyüdükçe artan oranda uzun yaşam sürelerine neden olmaktadır. Bunun nedeni, aşağıdaki örneklerle açıklanabilir:

Kesirsel alanı yaklaşık 0.008 ve 0.12 olan, eğik ( $\alpha > 0$ ) ve eğik olmayan ( $\alpha = 0$ ) ÇMB'lerin ömürlerinin sonunda aldıkları durumlar, ortaya çıkışlarından beri geçen gün sayısı ile birlikte Şekil 5'te verilmiştir. Büyük olan ÇMB, bir eğiklik ile ortaya çıktığında (Şekil 5c), bir süre sonra dairesel yapıda bir kutup lekесinin oluşumuna yol açmaktadır. Bu kutup lekесi, neredeyse dairesel olan şeklinden dolayı diferansiyel dönmenin ömür kısaltıcı etkilerinden arınmış durumdadır. Bu yüzden difüzyonun daha yavaş ilerlemesine neden olarak toplam yaşam süresinin yaklaşık 7 ay olmasını sağlamıştır.



**Şekil 4.** Güneş yarıçapındaki bir yıldızda  $40^\circ$  enlemde ortaya çıkan eğik (içi dolu daireler) ve eğik olmayan (içi boş daireler) ÇMB'lerin yaşam sürelerinin kesirsel alanlarına bağlılığı.



**Şekil 5. (a-b)** Başlangıçtaki kesirsel alanı 0.008 olan,  $40^\circ$  enlemde eğiklik açısı ile (a) ve eğiklik olmadan (b) ortaya çıkmış bir ÇMB'nin eşik alan yeğlinliğinin altına düşmeden hemen önceki durumu. (c-d) a ve b'deki gibi, ancak kesirsel yarıçapı 0.12 olan, eğik ve eğik olmayan iki ÇMB'nin evrimleri sonundaki durumları.

### 3.2. HR 1099'un alt dev bileşeni

Hızlı dönen yakın çift HR 1099'un alt dev bileşeni olan etkin yıldızın yarıçapını 3.3 güneş yarıçapı olarak yaptığımız benzetimlerde, aynı kesirsel alanlar için cüce yıldızla göre çok daha uzun yaşam süreleri elde edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, modelde yüzey manyetik alanı için difüzyon zaman ölçeğinin yıldız yarıçapına

$$\tau_l = \frac{R_*^2}{\eta l(l+1)} \quad (4)$$

biçiminde bağlı oluşudur. Burada  $\eta$  manyetik difüzyon katsayısı,  $l$  ise difüzyona uğrayan manyetik bölgenin boyutlarına karşılık gelen küresel harmonik derecedir. Uzun yaşam

süresinin ikinci nedeni ise HR 1099'da diferansiyel dönmenin AB Dor ile Güneş'inkinden daha zayıf olmasıdır.

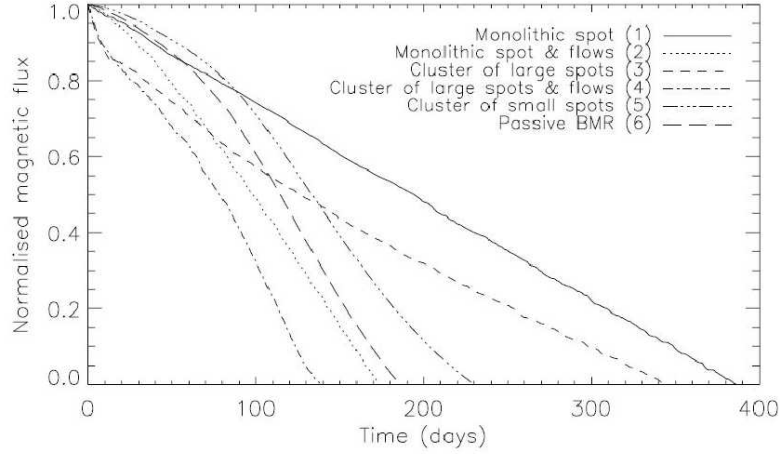
Yapılan benzetmelerde, enlemin yarısı kadar eğiklik açısıyla  $70^\circ$  enlemde ortaya çıkan, 0.008 kesirsel alana sahip olan bir ÇMB'nin HR 1099 üzerinde 2 yıl kadar yaşayabileceği bulunmuştur.

#### 4. Yıldız lekelerinin yapısı ve evrimi

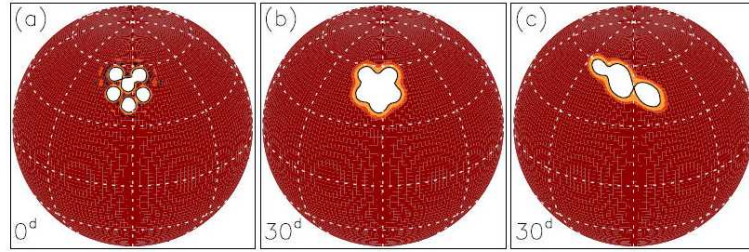
Bu bölümde yıldız lekelerinin yapısına ve akı evrimine ilişkin deneme benzetimleri sunulmuştur. Lekeler tek kutuplu olarak betimlenmiştir. Ana sorun, gözlenen büyük yıldız lekelerinin çok parçalı mı, tek parçalı mı olduklarının bilinmemesidir. Geniş ölçekli yüzey akışlarının Güneş lekelerinin dinamiğini önemli ölçüde etkilemediği bilindiği için aşağıdaki yaklaşımların bazılarında diferansiyel dönme ile boylamsal akışı yok saymaktayız. Benzer biçimde, konvektif akışları baskıladığı bilinen Güneş lekeleri için manyetik difüzyon katsayısının  $10\text{-}50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$  aralığında olduğu belirlendiği için [14] bazı modellerde böylesi düşük değerler aldık. Her bir modelde toplam manyetik akı,  $1.5 \times 10^{22} \text{ Mx}$  olarak alınmıştır. Deneme modelleri şöyle sıralanabilir:

1. Tek parçalı leke (kesirsel alan: 0.005). Diferansiyel dönme ve boylamsal akış (bundan böyle "geniş ölçekli yüzey akışları") yok.  $\eta_r = 50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ . Şekil 6'da "monolithic spot".
2. Tek parçalı leke (kesirsel alan: 0.005). Geniş ölçekli akışlar var.  $\eta_r = 50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ . Şekil 6'da "monolithic spot & flows".
3. Büyük lekeler topluluğu (lekelerin toplam kesirsel alanı: 0.006). Geniş ölçekli akışlar yok.  $\eta_r = 50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ . Şekil 6'da "cluster of large spots".
4. Büyük lekeler topluluğu (lekelerin toplam kesirsel alanı: 0.006). Güneş benzeri geniş ölçekli akışlar var.  $\eta_r = 50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ . Şekil 6'da "cluster of large spots & flows".
5. Geniş bir alana yayılmış (kesirsel alan: 0.05; manyetik ve manyetik olmayan bölgeler dahil), küçük lekeler topluluğu. Güneş benzeri geniş ölçekli akışlar var.  $\eta_r = 50 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ . (Şekil 6'da "cluster of small spots"). Bu modelde lekeler tek tek belirlenmemiş, ancak geniş ölçekli akışların etkisi altında zayıf (25 G), tek kutuplu bir manyetik alan dağılımı olarak temsil edilmiştir.
6. Bir önceki ile aynı model (kesirsel alan: 0.05), fakat  $\eta_r = 600 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ , yani ÇMB gibi tümüyle edilgen bir akı dağılımı. (Şekil 6'da "passive BMR").

Yukarıda verilen modeller için akının zamanla değişimi, Şekil 6'da gösterilmiştir. 1. modelde akı, zamanla doğrusal olarak azalmaktadır ve geniş ölçekli akışların etkisi olmadığı için yaşam süresi uzundur. 2. modelde akışlar, doğrusallığı bozarak ömrü büyük oranda azaltmıştır. 3. modelde ilk aşamada bütünü oluşturan parçalar, Şekil 7a,b'de görüldüğü gibi hızlıca difüzyona uğramakta, tek bir parçada birleştikten sonra ise doğrusal, 1. modeldekine koşut biçimde evrilmektedir. 4. durumda akışlar da katıldığı için, Şekil 7c'de görüldüğü gibi diferansiyel dönme, leke topluluğunu dağıtmaktadır. Böylece bileşenlerin uzunluk ölçeğinin hızla küçülmesi, kısa bir ömre neden olmaktadır. Küçük lekeler topluluğu (5. model) ve ÇMB benzeşiği 6. model, geniş ölçekli akışların etkisinden dolayı doğrusal olmayan biçimde evrilmektedir. Aynı nedenle bunların yaşam süreleri görece kısadır.



**Şekil 6.** Çeşitli deneme benzetimlerinden elde edilen manyetik akı değişimleri. Manyetik akı, başlangıç değeri olan  $1.5 \times 10^{22}$  maxwell'e boylanmış. Ayrıntılar için metne bakınız.



**Şekil 7.** (a) 3. ve 4. leke modellerinin başlangıçtaki durumu. (b) 3. modelin bir ay sonraki durumu. (c) 4. modelin bir ay sonraki durumu.

Geniş ölçekli akışların olmadığı durumda tek parçalı lekenin akısının neden doğrusal olarak azaldığını basit bir analitik modelle açıklayabiliriz. Başlangıçta bir düzlem üzerinde, düzleme dik bir  $z$  eksenine göre bakışık biçimde dağılmış olan bir skaler  $B$  alanını ele alalım. Leke yarıçapının yıldız yarıçapının yanında boşlanabileceğini düşünerek küresellik etkilerini de boşlayalım. Alan için difüzyon denklemi,  $(r, \theta, z)$  silindirik koordinatlarında

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \eta \left( \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} \right) \quad (5)$$

biçimindedir. Burada  $\eta$ , manyetik difüzyon katsayısıdır. Başlangıçta

$$B(r, t = 0) = B_0 \exp\left(\frac{-r^2}{R_0^2}\right) \quad (6)$$

biçiminde Gauss biçimli bir alan dağılımı olsun. Bu durumda (5) denklemi için “kendine benzeyen” (self similar) şöyle bir çözüm yazılabilir:

$$B(r, t) = \frac{\Phi_{0T}}{\pi R^2(t)} \exp\left(\frac{-r^2}{R^2(t)}\right). \quad (7)$$



Burada  $\Phi_{0T} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} B(r,0) r d\theta dr = \pi R_0^2 B_0$ , korunan toplam manyetik akı,  $R(t) = (4\eta t + R_0^2)^{1/2}$ , zamanla değişen karakteristik uzunluk ölçeğidir. Bu durumda,  $\eta/R^2(t)$  şeklinde olan difüzyon zaman ölçeği de zamana bağlıdır. Yeğirliği, bir  $f$  eşik düzeyinin (benzetimlerimizde  $f=0.14$ ) üzerinde olan bölge içinden geçen manyetik akı integre edilirse

$$\Phi(t) = \Phi_0 \left( 1 - \frac{4f\eta t}{(1-f)R_0^2} \right) \quad (8)$$

bulunur. Burada  $\Phi_0 = \Phi_{0T}(1-f)$ , başlangıçta bölgeden geçen akı değeridir. (8) denkleminin gösterdiği doğrusal akı azalışı, Model 1 için yapılan sayısal benzetimi doğrulamaktadır. Gerçekten de,  $f=0.14$  ve karakteristik uzunluğun başlangıç değeri olarak da Model 1'deki Gauss biçimli alan dağılımının  $\sigma$  genişliği seçildiğinde sınırlı bölgeyle tanımlanan lekenin ömrü 1623 gün (yaklaşık 1.5 başlangıç difüzyon zaman ölçeği) kadar bulunmaktadır. Bu değer, Model 1 göz önüne alınarak  $\eta_r = 0$  için yapılan sayısal benzetme ile uyumlu sonuç vermiştir. Bu durum, ayrıca yapılan sayısal benzetimlerin güvenilir olduğunu göstermektedir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada geniş ölçekli yüzeysel akışların ve yıldız yarıçapının yıldız lekesi ömürlerini nasıl etkileyebileceği üzerinde sayısal benzetimler yapılmıştır. Diferansiyel dönme ve yıldız yarıçapının, yıldız lekelerinin kısa süreli evriminde önemli rolü olduğu görülmüştür. Orta enlemlerde eğiklik açısıyla ortaya çıkan büyük leke çiftlerinin boylamsal akışın da yardımıyla yıldızın kutbu çevresinde birikerek uzun süre (cücelerde aylarca, alt devlerde yıllarca) yaşayan kararlı kutup lekeleri oluşturabileceği görülmüştür. Orta enlemlerdeki yıldız lekeleri için 2 ay yöresinde yaşam süreleri bulunmuştur. Bu durum, yıldızlarda etkin bölgelerin yaşam sürelerine ilişkin Ca II H & K gözlemlerine dayanan tahminlerle örtüşmektedir [15]. Buna karşın hızlı dönen etkin yıldızlardan 1 ay süreyle alınan Doppler görüntüleri arasında korelasyon bulunamaması (bkz. [1]), bir yıldız lekesi ölmeden önce başka yıldız lekelerinin sürekli olarak ortaya çıkması ile açıklanabilir. Ayrıca, orta enlemlerde kutup lekesini besleyecek manyetik yönelimde ÇMB'ler ortaya çıktığında kutup lekelerinin 10 yıla varan yaşam süreleri açıklanabilir. Bu çalışmada son olarak yıldız lekelerinin yapısına ilişkin basit modeller önerilmiş ve denenmiştir. Yapılan sayısal benzetimler, gözlenen yıldız lekelerinin tek parçalı mı çok parçalı mı olduğu konusunda bir fikir vermemektedir.

## Teşekkür

*Yüzeysel akı taşınımı kodu ile ilgili yardımlarından dolayı Ingo Baumann'a, verimli tartışmalar için Manfred Schüssler'e ve Sami Solanki'ye teşekkür ederim.*

## Kaynaklar

- [1] Hussain, G. A. J. (2002), "Starspot lifetimes", *Astronomische Nachrichten*, 323, 349
- [2] Solanki, S. K., Unruh, Y. C. (2004), "Spot sizes on Sun-like stars" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 348, 307
- [3] Solanki, S. K., (1993), "Small scale solar magnetic fields", *Space Science Reviews*, 63, 1
- [4] Martinez-Pillet, V., Lites, B. W., Skumanich, A., (1997), "Active region magnetic fields. I. Plage fields", *Astrophysical Journal*, 474, 810
- [5] van Ballegoijen, A.A., Cartledge, N. P., Priest, E. R., (1998), "Magnetic flux transport and the formation of filament channels on the Sun", *Astrophysical Journal*, 501, 866
- [6] Baumann, I., Schmitt, D., Schüssler, M., (2006), "A necessary extension of the surface flux transport model", *Astronomy and Astrophysics*, 446, 307

- [7] Baumann, I., Schmitt, D., Schüssler, M., Solanki, S. K., (2004), “Evolution of the large-scale magnetic field on the solar surface: A parameter study”, *Astronomy and Astrophysics*, 426, 1075
- [8] Baumann, I., (2005), Doktora tezi, Universität Göttingen, Almanya. Online: <http://www.solar-system-school.de/alumni/baumann.pdf>
- [9] Snodgrass, H. B., (1983), “Magnetic rotation of the solar photosphere”, *Astrophysical Journal*, 270, 288
- [10] Donati, J.-F., Collier-Cameron, A., Petit, P., (2003), “Temporal fluctuations in the differential rotation of cool active stars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 345, 1187
- [11] Hathaway, D. H., (1996), “Doppler Measurements of the Sun's Meridional Flow”, *Astrophysical Journal*, 460, 1027
- [12] Wang, Y.-M., Nash, A. G., Sheeley, N. R., (1989), “Magnetic flux transport on the Sun”, *Science*, 245, 712
- [13] Ambruster, C. W., Fekel, F. C., Brown, A., (2003), “The Radii of Solar Neighborhood ZAMS Stars”, *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ed. A. Brown, G. M. Harper, T. R. Ayres, University of Colorado, s.912
- [14] Martinez-Pillet, V., Moreno-Inertis, F., Vazquez, M., (1993), “The distribution of sunspot decay rates”, *Astronomy and Astrophysics*, 274, 521
- [15] Donahue, R. A., Dobson, A. K., Baliunas, S. L., (1997), “Stellar Active Region Evolution - I. Estimated Lifetimes of Chromospheric Active Regions and Active Region Complexes”, *Solar Physics*, 171, 191