

Φαινομενολογία του Ήλιου σε μεγάλη κλίμακα

Ο Ήλιος παρουσιάζει μεταβολές σε μεγάλες χρονικές και χωρικές κλίμακες. Σε μεγάλες χωρικές κλίμακες εννοούμε μεταβολές που επηρεάζουν όλη την επιφάνειά του.

Ο Γερμανός Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) παρατηρούσε τον Ήλιο με σκοπό να ανακαλύψει έναν νέο πλανήτη με τροχιά εσωτερική αυτής του Ερμή. Παρατηρούσε συστηματικά τις ηλιακές κηλίδες για να δει αν μια από αυτές ήταν η σκιά του άγνωστου πλανήτη. Οι παρατηρήσεις του διήρκεσαν από το 1826 έως το 1843. Δεν βρήκε ...πλανήτη αλλά είναι από τους πρώτους που κατάλαβε πως ο αριθμός των κηλίδων αυξομειώνεται περιοδικά σε διάρκεια ετών.

Ο Ελβετός αστρονόμος Rudolf Wolf (1816-1893) μελέτησε τις καταγραφές των κηλίδων από παρατηρητές από την ανακάλυψη του τηλεσκοπίου και μετά και βρήκε μια περίοδο 11.1 χρόνων για την περιοδική μεταβολή του αριθμού των κηλίδων.

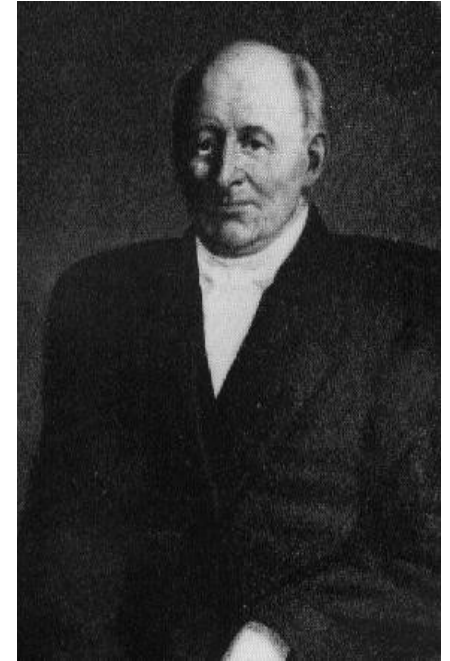
Βρήκε έναν εμπειρικό δείκτη R που εκφράζει τον αριθμό των κηλίδων:

$$R = K(10g + f)$$

f είναι ο αριθμός μεμονωμένων κηλίδων

g ο αριθμός ομάδων από κηλίδες

$K(\approx 0.6)$ είναι διορθωτικός δείκτης για να είναι συμβατοί μεταξύ τους διαφορετικοί παρατηρητές.



S.H. Schwabe, Wikipedia

Στο διπλανό σχήμα βλέπουμε τον αριθμό των κηλίδων από το 1750 ο οποίος έχει προκύψει με την μελέτη ιστορικών παρατηρήσεων των ηλιακών κηλίδων. Ως πρώτος κύκλος αναφέρεται αυτός του 1760, και σήμερα είμαστε στον 25ο κύκλο.

Παρατηρείστε πως τα μέγιστα διαφέρουν σε κάθε ηλιακό κύκλο όπως αυτούς μεταξύ 1800 και 1840.

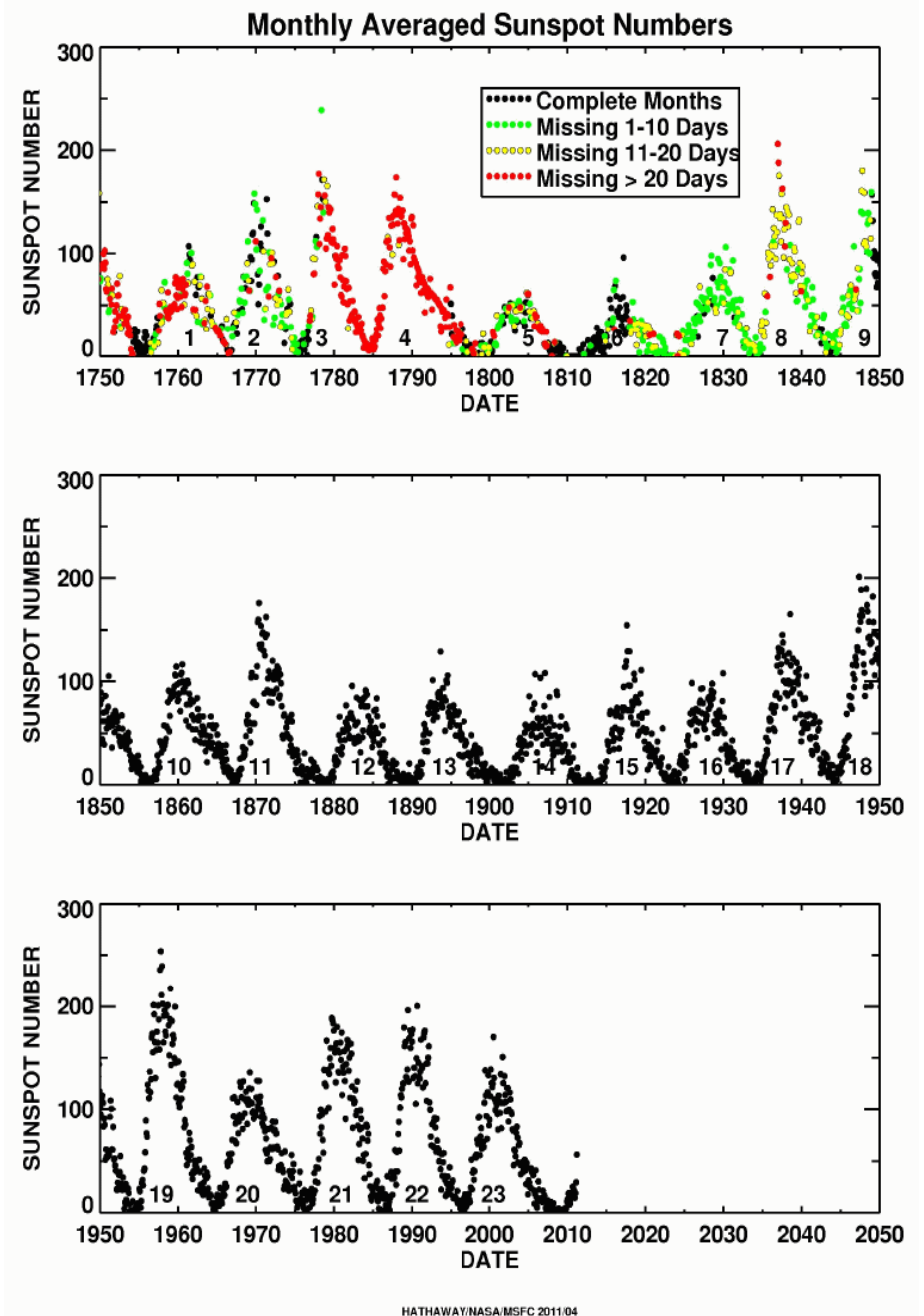
Θα δούμε στην συνέχεια πως σχεδόν όλοι οι ηλιακοί σχηματισμοί ακολουθούν τον 11ετή κύκλο, όπως οι χρωμοσφαιρικές εκτάσεις (plage) ή οι προεξοχές. Το πολικό σέλας της Γης ακολουθεί τον ηλιακό κύκλο. Επίσης η συνολική ροή ηλιακής ραδιοφωνικής ακτινοβολίας στα 10.7cm (προέλευση ψηλή χρωμόσφαιρα, χαμηλό στέμμα) είναι πολύ καλός δείκτης.

Ο 25ος ηλιακός κύκλος ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2019.



Ο δείκτης των 10.7cm από το 2000 και μετά.

www.swpc.noaa.gov/phenomena sfu: solar flux units



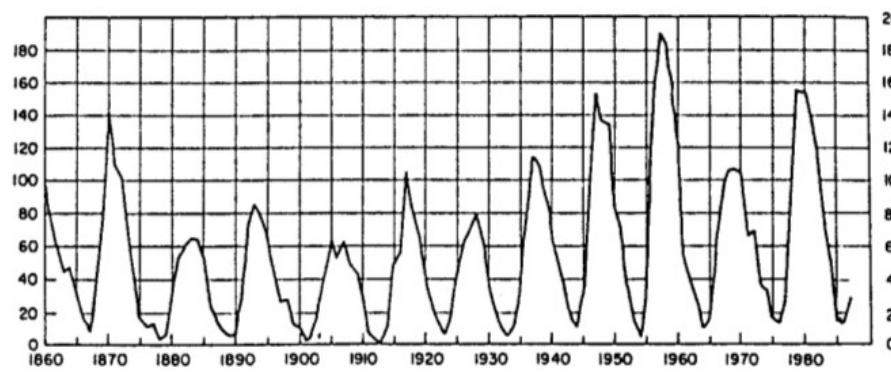
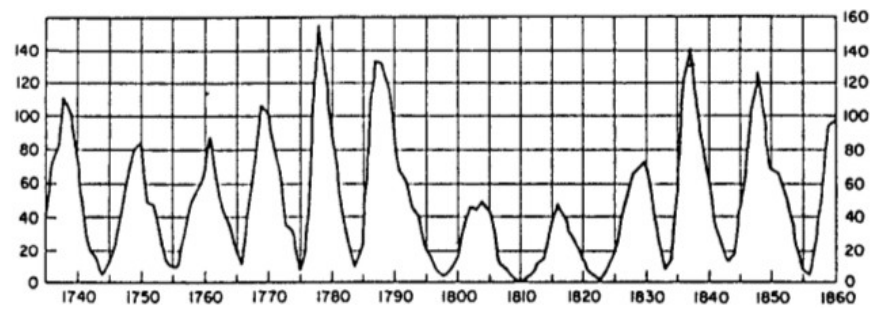
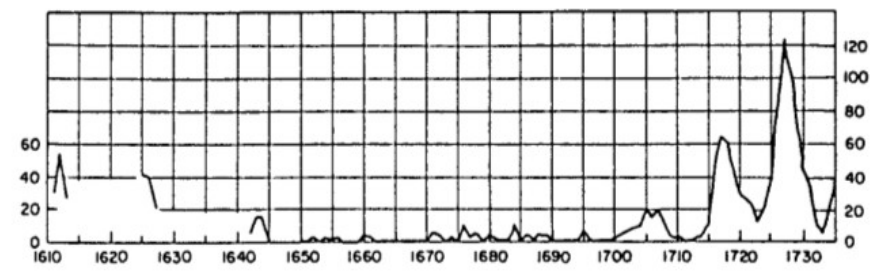
Ο αριθμός Wolf από το 1610 έως το τέλος του 20ου αιώνα. Την περίοδο από το 1640 έως το 1700 παρατηρούμε την σχεδόν έλλειψη κηλίδων η οποία ονομάζεται ελάχιστο του Maunder. Αυτή η περίοδος συνέπεσε με ψυχρό κλίμα που ονομάστηκε μίνι περίοδος παγετώνων. Είναι πιθανό να υπάρχει φυσική σχέση μεταξύ ηλιακής δραστηριότητας και κλίματος.

Η μέτρηση του λόγου C^{14}/C^{12} στον κορμό των δέντρων γνωστής ηλικίας είναι ένας δείκτης της ηλιακής δραστηριότητας. Ο ραδιενεργός άνθρακας δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της ατμόσφαιρας. Οι κοσμικές ακτίνες δημιουργούν νετρόνια και μέσω της αντίδρασης:

$$n + N^{14} \rightarrow C^{14} + p$$

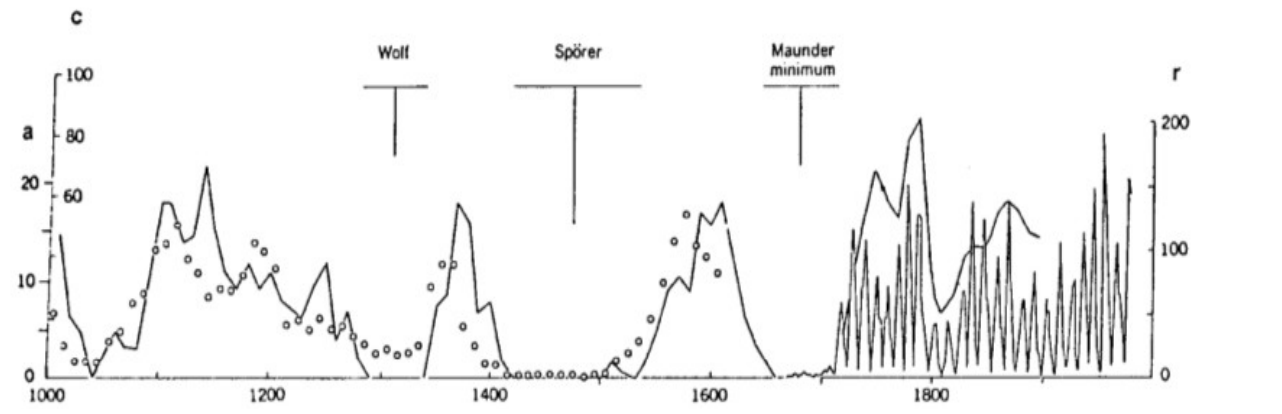
(Άζωτο: 7 πρωτόνια + 7 νετρόνια, δίνει άνθρακα-14: 6 πρωτόνια και 8 νετρόνια).

Έτσι δημιουργείται ραδιενεργός άνθρακας. Όταν η ηλιακή δραστηριότητα είναι στο ελάχιστο η ροή κοσμικών ακτίνων είναι μέγιστη. Στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας τα μαγνητικά πεδία της ηλιόσφαιρας είναι ισχυρά και εκτρέπουν τα φορτία της κοσμικής ακτινοβολίας. Επίσης η ηλιακή δραστηριότητα καταγράφεται και μέσω παρατηρήσεων του πολικού σέλαος. Στο κάτω σχήμα φαίνεται η ηλιακή δραστηριότητα μέσω καταγραφών κηλίδων (καμπύλη μεγάλης αυξομείωσης) του C^{14} (ομαλή καμπύλη) και καταγραφών του σέλαος (κύκλοι), Σε αυτήν καταγράφονται τα ελάχιστα των Maunder, Spörer, Wolf.



Σχήμα 10.11: Ο αριθμός Wolf αυξομειώνεται από το 1610 μέχρι το τέλος του 20ου αιώνα.

Σχήματα από βιβλίο Αλυσσανδράκη, Νίντου, Πατσουράκου



Η εμφάνιση των ηλιακών κηλίδων 'μεταναστεύει' στην ηλιακή επιφάνεια κατά την διάρκεια του ηλιακού κύκλου. Στην αρχή του κάθε ηλιακού κύκλου οι πρώτες κηλίδες εμφανίζονται σε ηλιογραφικό πλάτος $\sim \pm 35^\circ$ (γωνιακή απόσταση από τον ηλιακό ισημερινό). Με το πέρασμα του χρόνου οι νέες κηλίδες αναδύονται σε μικρότερα ηλιακά πλάτη ώσπου στο τέλος του κύκλου εμφανίζονται κοντά στον ισημερινό. Το φαινόμενο πρόσεξε ο C. Sheiner (17ος αιών.) και μελετήθηκε από τον Sröer. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η απεικόνιση των θέσεων των κηλίδων από το 1870. Παρουσιάζεται σε μια χαρακτηριστική μορφή που ονομάζεται **Διάγραμμα πεταλούδας**. Το διάγραμμα πεταλούδας επινοήθηκε από τον Maunder το 1904. Παρατηρήστε τα εξής:

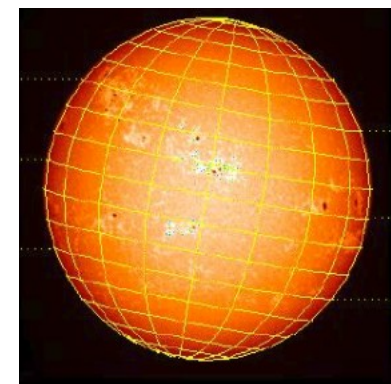
Δεν υπάρχουν ηλιακές κηλίδες πάνω από το πλάτος $\pm 40^\circ$ κοντά στους πόλους.

Πολλές φορές οι δυο πτέρυγες είναι πολύ ασύμμετρες (π.χ. 1950-1980).

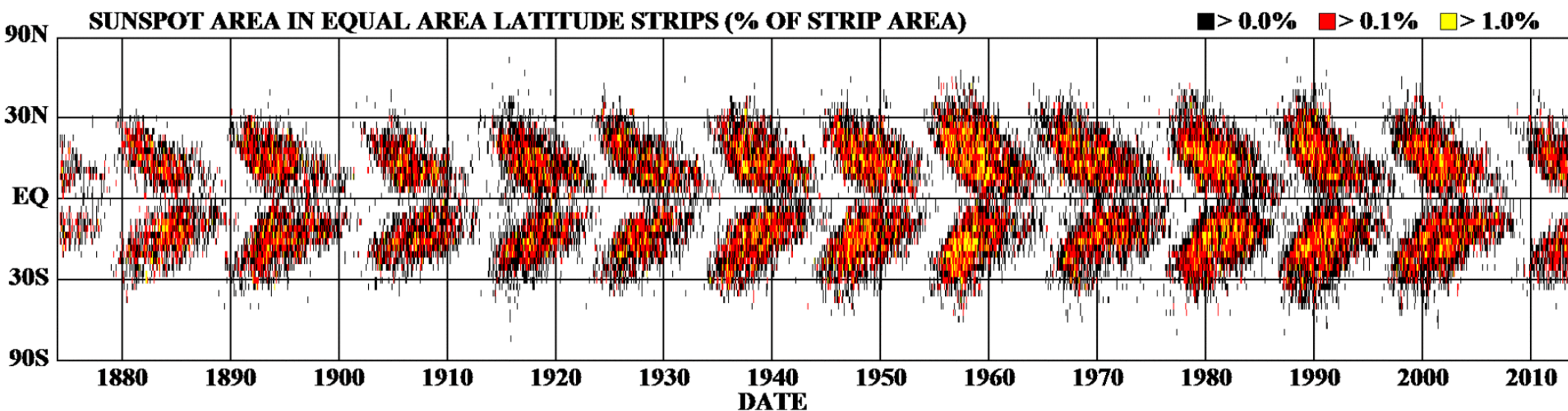
Το μέγιστο των ηλιακών κύκλων συμβαίνει στο μέσον του διαγράμματος πεταλούδας (π.χ. οι χρονιές μεγίστου είναι 1980, 1991, 2001).

Πως σχεδιάζεται το διάγραμμα:

Οι παράλληλοι καθορίζουν λωρίδες ίσου εμβαδού πάνω στον Ήλιο. Μετριέται το ποσοστό του εμβαδού κάθε λωρίδας που καλύπτεται από κηλίδες σε ίσους χρόνους. Στο διάγραμμα το ποσοστό εμβαδού που καλύπτεται από κηλίδες παρίσταται με χρώματα.



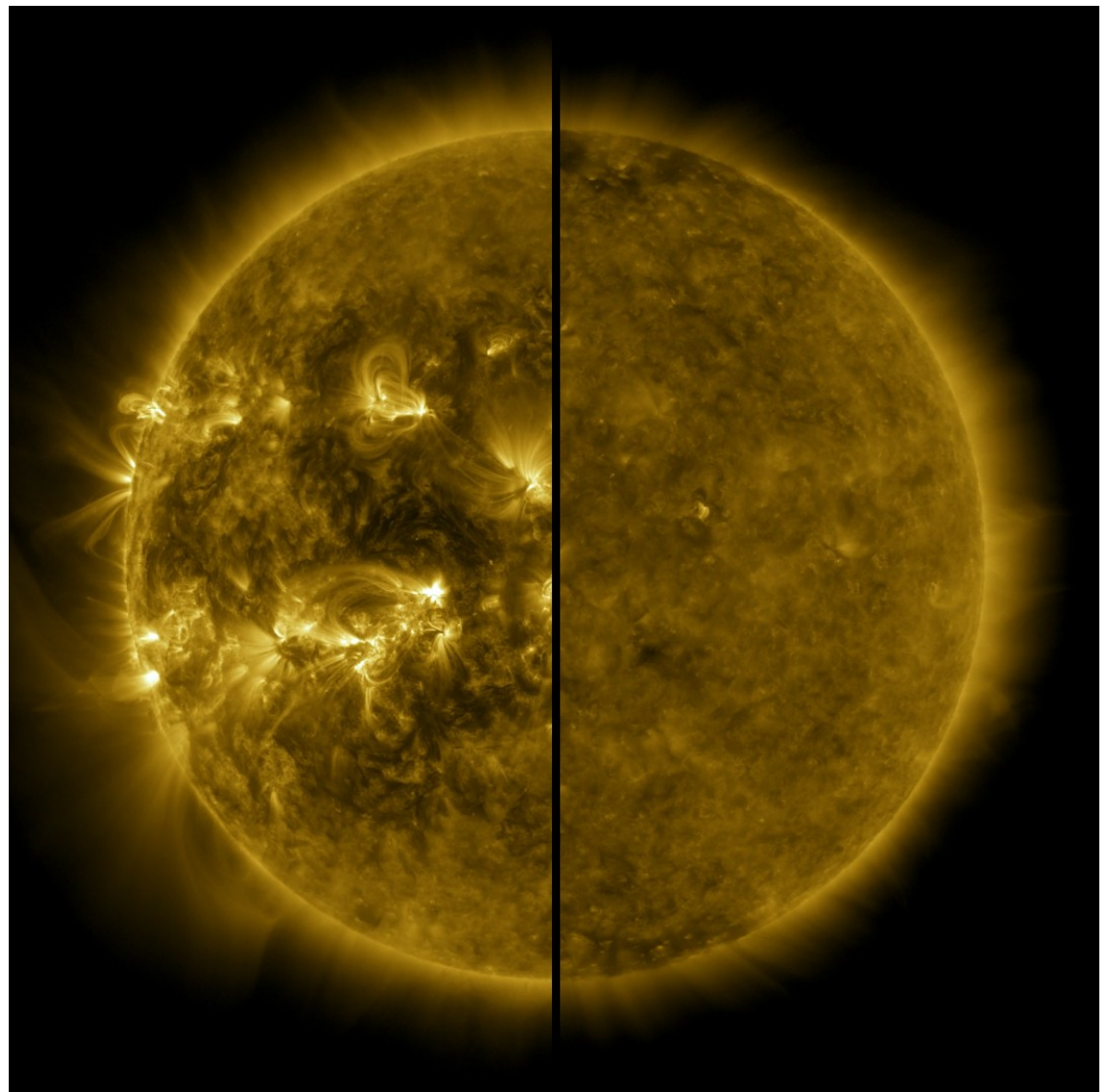
Ηλιογραφικό σύστημα συντεταγμένων, παράλληλοι στον ισημερινό κύκλοι και μεσημβρινοί. Κλίση άξονα περιστροφής όπως φαίνεται από τη Γη.



Το ηλιακό στέμμα σε φάση ηλιακής δραστηριότητας (αριστερά Απρίλιος του 2015) και σε ήρεμη φάση (δεξιά, Δεκέμβριος του 2019, αρχή του 25ου κύκλου). Εικόνες του τηλεσκοπίου AIA στο διαστημικό παρατηρητήριο SDO (Solar Dynamic Observatory).

Παρατηρήστε πως οι λαμπρές δομές κοντά στους πόλους (polar plumes) έχουν (σχεδόν) ακτινικό προσανατολισμό. Αυτό υποδεικνύει πως στους πόλους παρατηρούμε την σχεδόν διπολική (ή πολοϊδή poloidal) συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Στον ήρεμο ήλιο η πολοϊδής συνιστώσα κυριαρχεί.

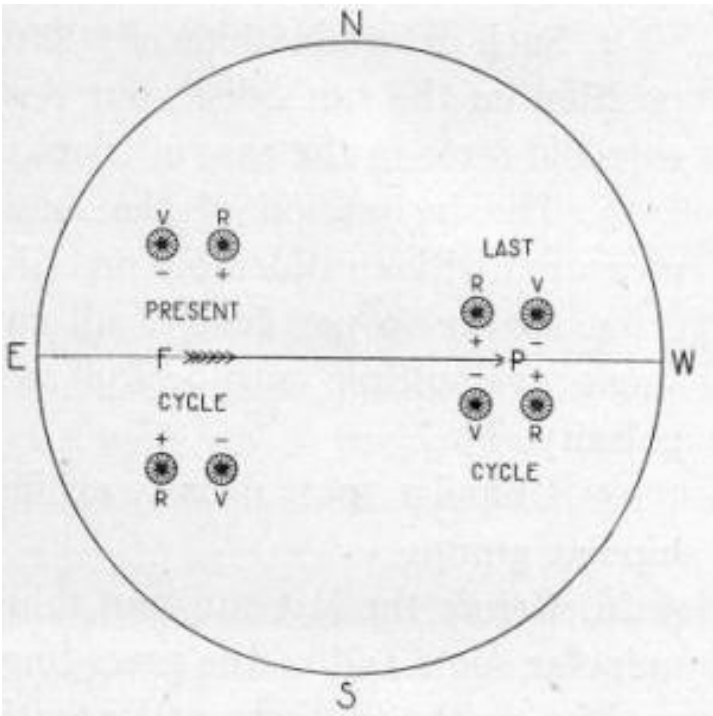
Να προσθέσουμε πως στους πόλους έχουμε τις στεμματικές οπές όπου το μαγνητικό πεδίο έχει την μορφή ανοιχτών γραμμών (δεν έχουμε κλειστούς βρόχους). Από εκεί προέρχεται ο γρήγορος ηλιακός άνεμος.



Νόμοι μαγνητικού πεδίου των κηλίδων. **Ο νόμος του Hale.**

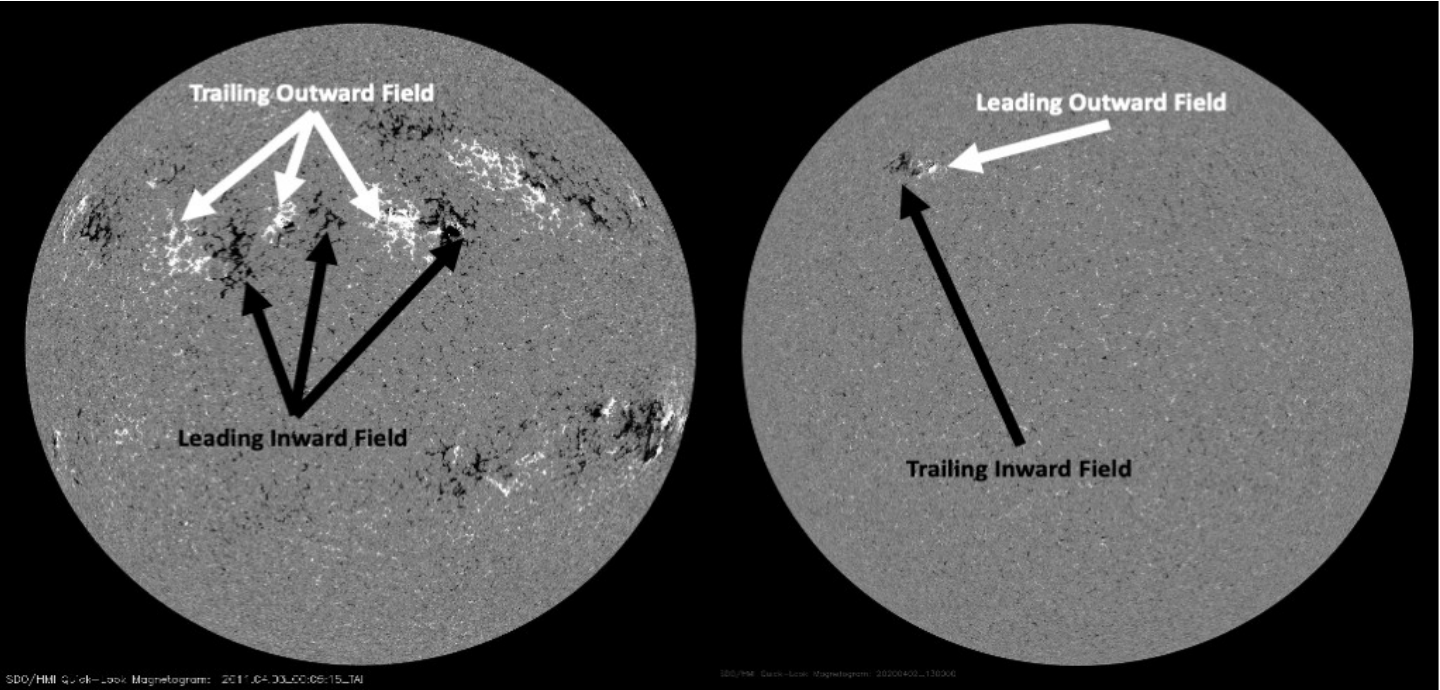
Από την δεκαετία του 50 έχουμε τακτικές μετρήσεις μαγνητικών πεδίων (μαγνητογραφήματα του ηλιακού δίσκου) και παρατηρήθηκε πως κάθε 22 χρόνια αντιστρέφεται το πρόσημο των μαγνητικών πεδίων στους πόλους. Υπάρχει ευθυγράμμιση των κηλίδων σε άξονα Ανατολή-Δύση, Κατοπτρική συμμετρία βορείου-νοτίου ημισφαιρίου (νόμος του Hale). Η πολικότητα σε κάθε ημισφαίριο αλλάζει με την αλλαγή του κύκλου.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει μαγνητογραφήματα του SDO/HMI στις 3 Απριλίου 2011 (κύκλος 24 πριν το μέγιστο) και δεξιά στις 2 Απριλίου 2020, (έναρξη του 25ου κύκλου). Αριστερά φαίνονται τα πεδία κέντρων δράσης. 24ος κύκλος (αριστερά). Στο βόρειο ημισφαίριο τα αρνητικά (νότια, μαύρο χρώμα) πεδία ηγούνται τα θετικά (βόρειο άσπρο χρώμα) έπονται. Το αντίθετο ισχύει για το νότιο ημισφαίριο. Δεξιά εικόνα: για τον νέο κύκλο (δεξιά) τα θετικά πεδία ηγούνται.

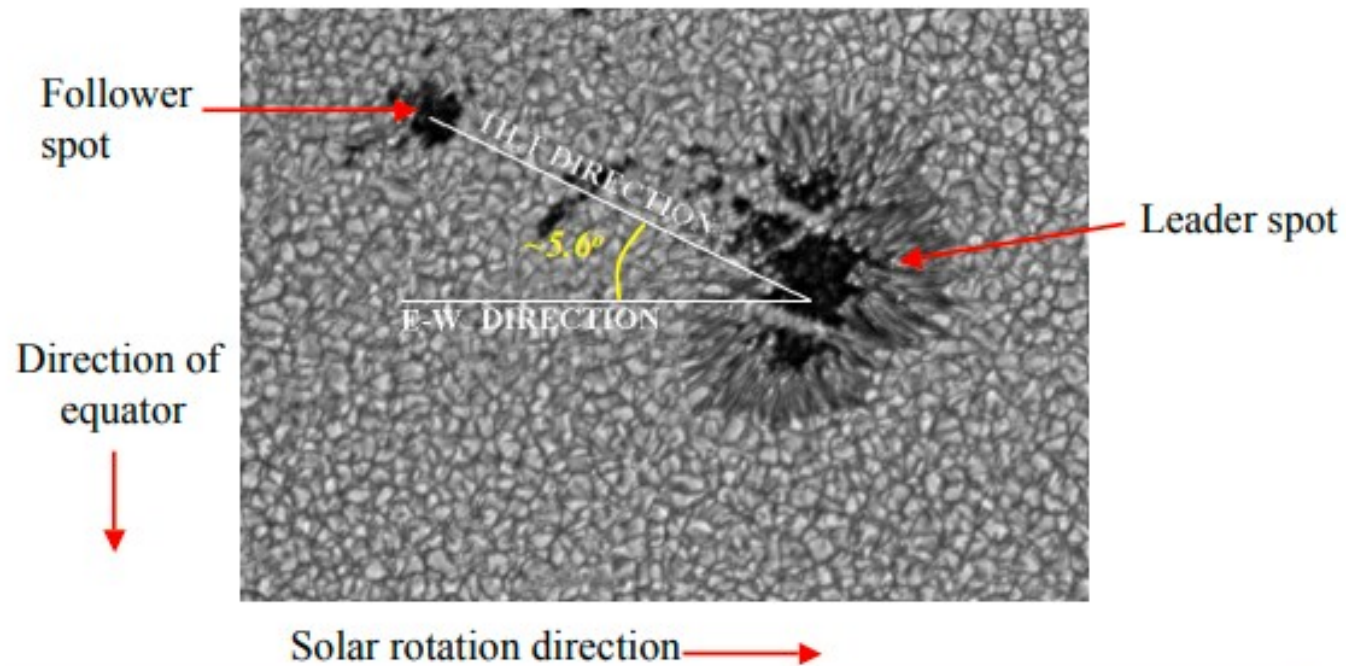


Hale, Ellerman, et al 1919, ApJ

Νόμος του Joy, Τα μαγνητικά δίπολα έχουν κλίση προς τον ισημερινό.



Νόμος του Joy, Τα μαγνητικά δίπολα έχουν κλίση προς τον ισημερινό.



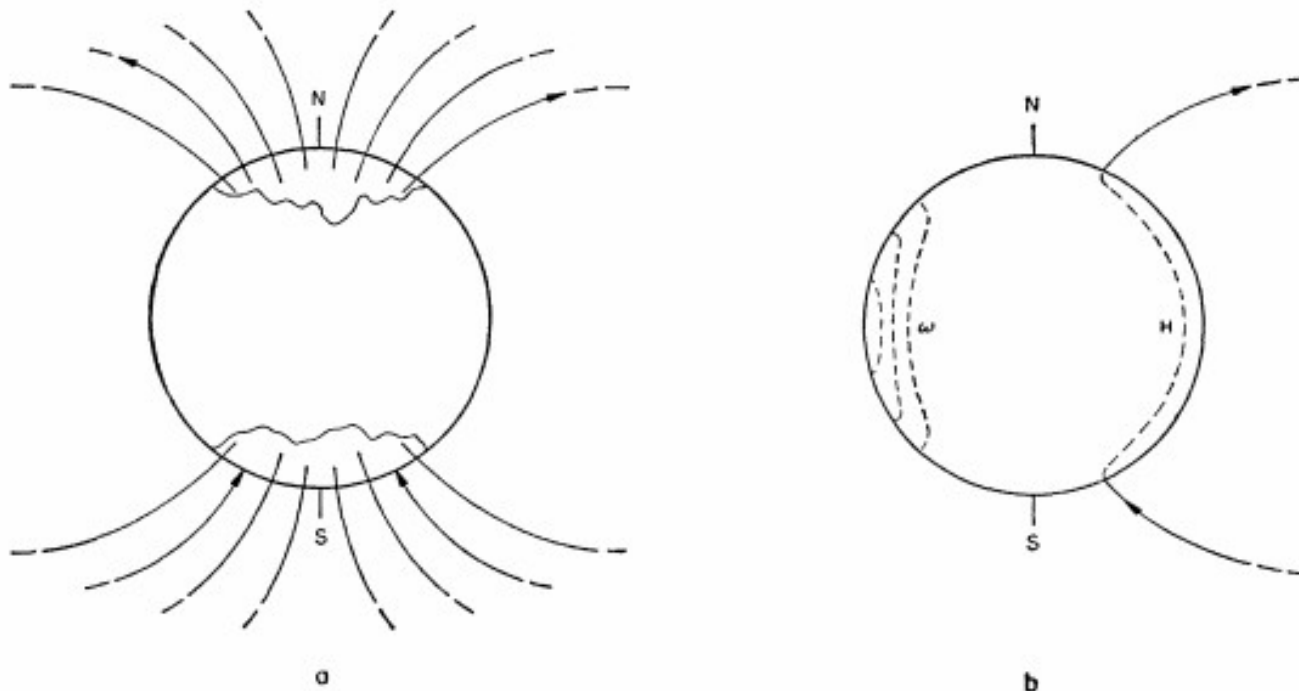
Peter Gallagher

Μία εξήγηση αυτών των φαινομένων

Το μοντέλο του Babcock (1961).

Ο Babcock παρουσίασε ένα μοντέλο εξέλιξης του συνολικού μαγνητικού πεδίου το οποίο εξηγεί ένα μεγάλο τμήμα απο τα φαινόμενα που παρουσιάσαμε.

Στην αρχή του κύκλου τα μαγνητογράμματα δείχνουν πως το μαγνητικό πεδίο έχει χαρακτηριστικά διπόλου, είναι πολοϊδές (poloidal): Το πεδίο είναι ευθυγραμμισμένο (περίπου) με τον άξονα περιστροφής και δεν έχει αζιμουθιακή συνιστώσα. Οι μαγνητικές γραμμές εισέρχονται στον πόλο και διαρρέουν το εσωτερικό σε βάθος $0.1R_s$. Οι δυναμικές γραμμές παρασέρνονται από την κίνηση της ανώτερης ηλιακής ατμόσφαιρας. Στο κάτω σχήμα φαίνεται το πολοϊδές πεδίο και δεξιά μια δυναμική γραμμή στο ηλιακό εσωτερικό. Οι διακεκομμένες καμπύλες δηλώνουν περιοχές ίσης γωνιακής ταχύτητας.



STAGE I

Babcock 1961

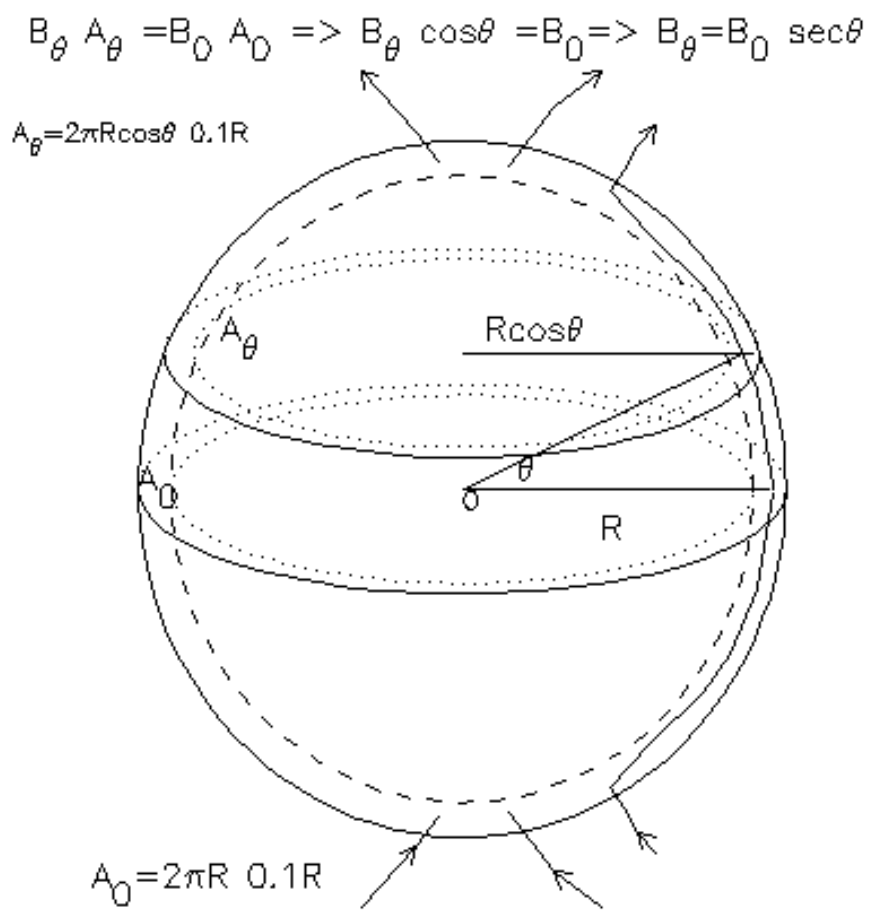
Η δομή του πολοϊδούς μαγνητικού πεδίου.
 Επειδή ο αριθμός Reynolds ($R_m = L\nu/\eta$) είναι πολύ μεγάλος (σκεφτείτε την κλίμακα μήκους) ισχύει η διατήρηση της μαγνητικής ροής. ($d\Phi/dt=0 \rightarrow \Phi=\text{σταθ.}$)
 Οι μαγνητικές γραμμές διατρέχουν κυκλικούς δακτυλίους που εφάπτονται στην ηλιακή επιφάνεια, κάθετους στον ηλιακό άξονα βορρά νότου, που εκτείνονται σε βάθος $0.1R_s$ (R_s η ηλιακή ακτίνα).
 Το εμβαδόν τους A είναι:
 $A=2\pi R \Delta R$

Αν θ είναι το ηλιογραφικό πλάτος.
 Η μαγνητική ροή Φ είναι:
 Στον ισημερινό:
 $\Phi(0)=B(0) A(0)= B(0) 2\pi R \Delta R=$
 $=B(0) 2\pi R 0.1R$

Ενώ σε πλάτος θ :
 $\Phi(\theta)= B(\theta) 2\pi R \cos\theta 0.1R$
 Η μαγνητική ροή διατηρείται $\Phi(0)=\Phi(\theta)\Rightarrow$
 $B(0)A(0)=B(\theta)A(\theta)$

Συνεπώς το μαγνητικό πεδίο αυξάνει με το πλάτος ως:
 $B(\theta) =B(0)/\cos\theta$

Αυτό παύει να ισχύει προς τους πόλους
 $\theta>+/-40$, όπου το εμβαδόν που καταλαμβάνει το πεδίο εκτείνεται σε όλη την πολική περιοχή.

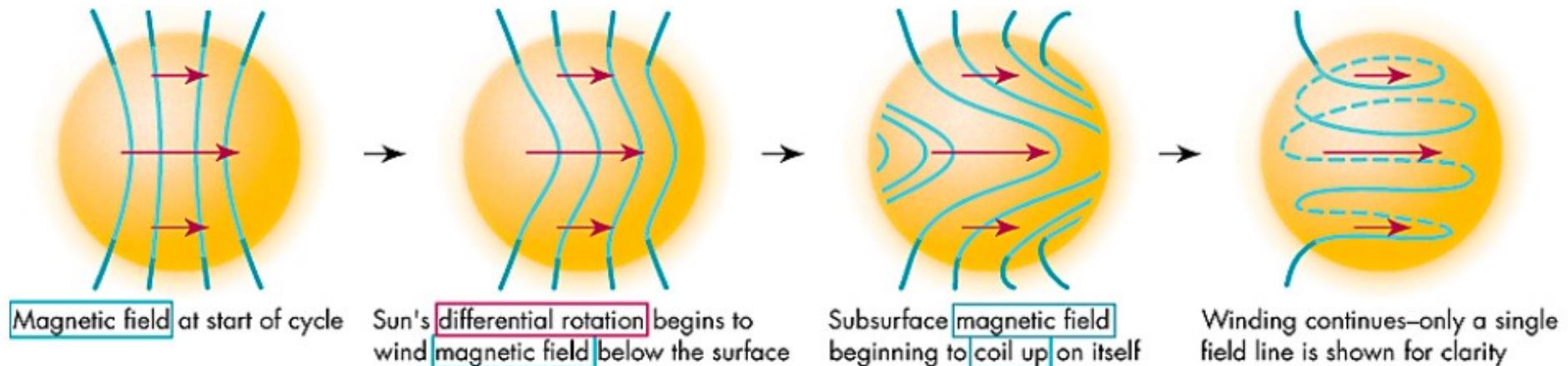
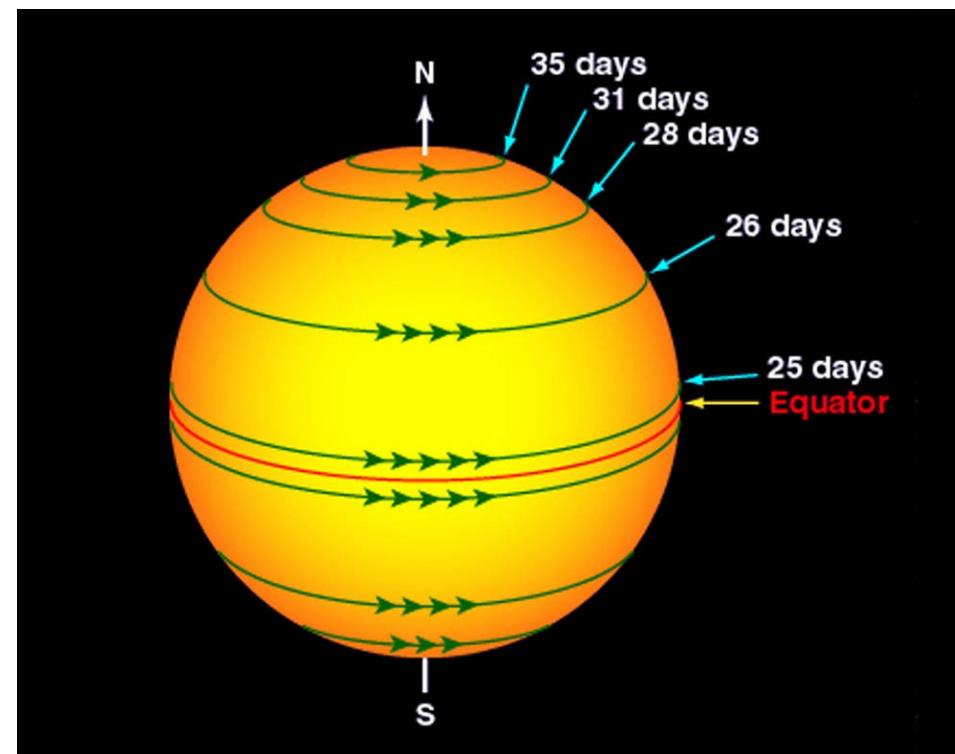


Ξέρουμε όμως πως στην επιφάνεια μετρούμε την διαφορική περιστροφή. Στην εργασία του Babcock (1961) χρησιμοποιείται η γωνιακή ταχύτητα:
 $\omega = 14^\circ.38 - 2^\circ.77 \sin^2\theta$

Το πλάσμα της ζώνης μεταφοράς παρασέρνει και παραμορφώνει τις μαγνητικές γραμμές στην κίνησή του. Αυτό λέγεται το φαινόμενο-Ω ω-effect.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η παραμόρφωση του αρχικά διπολικού πεδίου λόγω της διαφορικής περιστροφής που είναι ισχυρότερη στον ισημερινό. Σχηματίζεται μια αζιμουθιακή συνιστώσα του πεδίου (τοροειδές πεδίο).

Σύμφωνα με τον Babcock, τρία χρόνια μετά το ελάχιστο Ο ισημερινός θα προπορεύεται κατά 5.6 στροφές σε σχέση με το πλάσμα σε πλάτος $\phi = \pm 55^\circ$.



Ο Babcock χρησιμοποιεί τον νόμο της διαφορικής περιστροφής:

$$\omega = 14^\circ.38 - 2^\circ.77 \sin^2\theta \text{ ανά μέρα} \quad (\text{αγνοούμε τον όρο } \sin^4\theta)$$

Συνεπώς σε μία μέρα ο ισημερινός προπορεύεται σε ηλιογραφικό μήκος ϕ
 $\phi = 2^\circ.77 \sin^2\theta$ μοίρες ανά μέρα από μια περιοχή σε πλάτος θ .

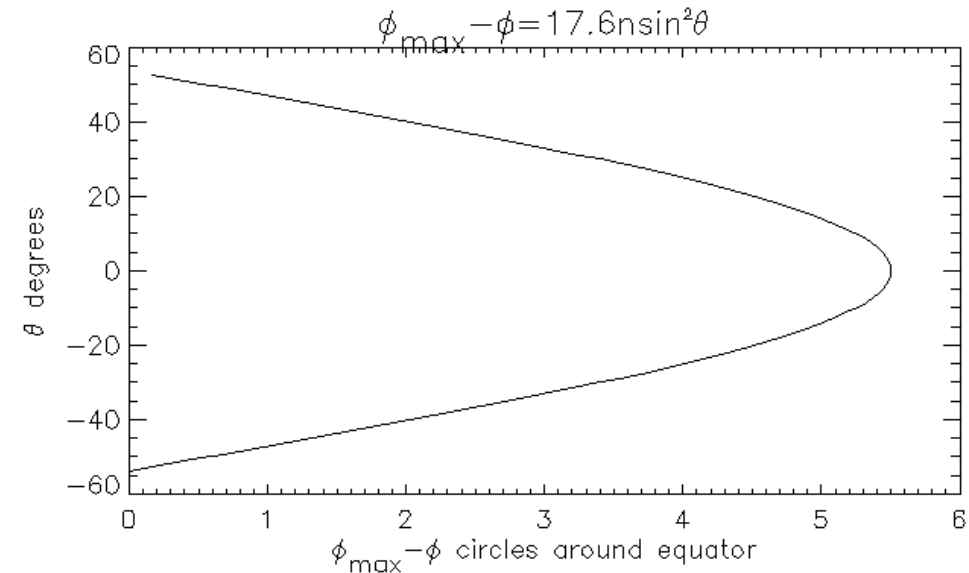
Το μετατρέπουμε σε ακτίνια ως:
 $\phi = 2.77 \cdot (\pi/180) \sin^2\theta = \mathbf{0.0483 \sin^2\theta}$ rad/μέρα

Σε ένα χρόνο θα έχουμε $\phi = 0.0483 \sin^2\theta \cdot 365 \text{ μέρες} =$
 $17.6 \sin^2\theta \text{ rad/έτος}$

Άρα για n έτη θα έχουμε τον εμπειρικό τύπο:

Η γωνία ψ που σχηματίζουν οι σπείρες των δυναμικών γραμμών

με τον κάθε μεσημβρινό είναι:



$$\phi = 17.6 n \sin^2 \theta$$

$$\tan \psi = \frac{d\phi}{d\theta} = 35.2 \sin \theta \cos \theta$$

Έχουμε την μαθηματική σχέση της σπείρας που σχηματίζουν οι δυναμικές γραμμές.

Η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της σπείρας είναι:

$$B = B_0 / \cos\theta / \cos\psi$$

Για μεγάλες του ψ : $\tan\psi = 1/\cos\theta$

$$B = B_0 / \cos\theta \tan\psi = (B_0 / \cos\theta) 35.2 n \cos\theta \sin\theta$$

$$B_{\text{spiral}} = 35.2 n B_0 \sin\theta$$

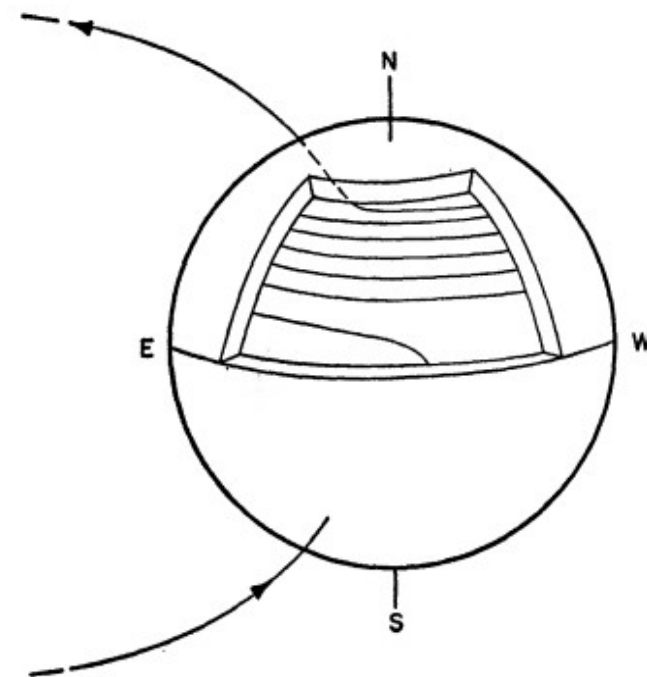
Για $B_0 = 5\text{Gauss}$ και $n=3$ χρόνια έχουμε:

$$B_{\text{spiral}} = 528 \sin\theta \quad +/-(2^\circ < \theta < 30^\circ)$$

Για πάνω από $\sim 30^\circ$ το πεδίο δεν περιορίζεται σε $0.1R_s$, επεκτείνεται προς την περιοχή των πόλων.

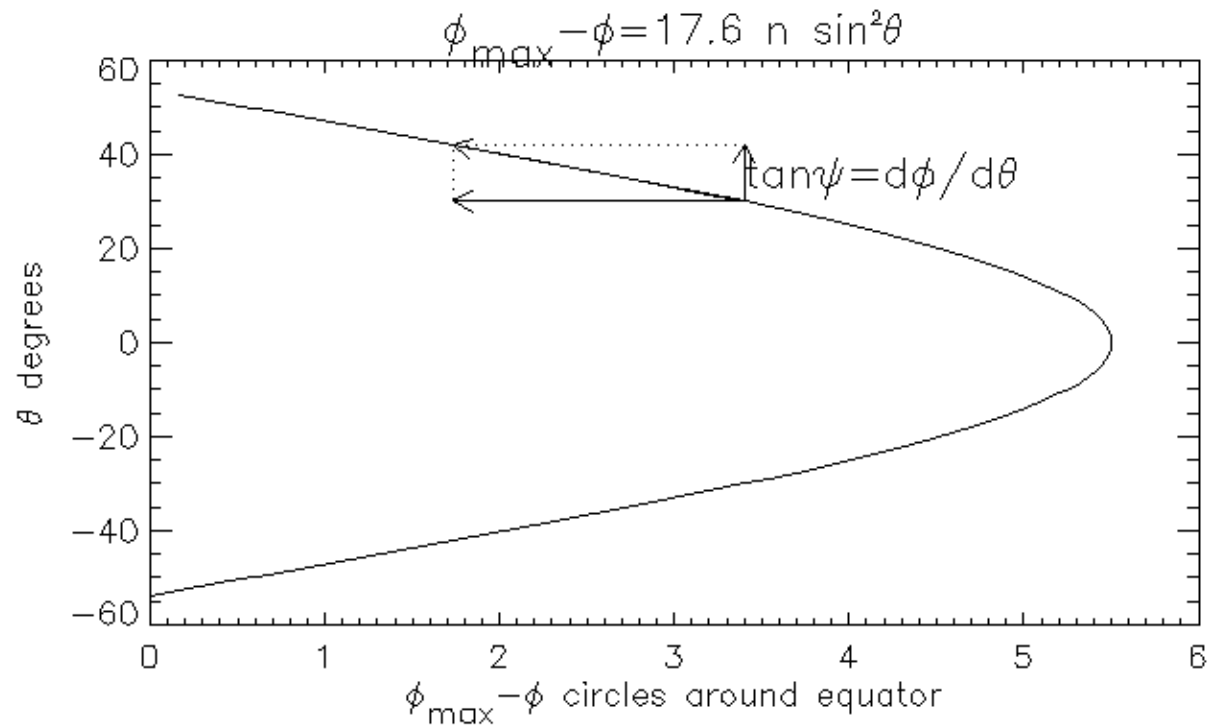
Για $\theta = 30^\circ$, $B_{\text{spiral}} = 264\text{G}$ το μαγνητικό πεδίο θα αναδυθεί λόγω άνωσης.

Άρα η ανάδυση του μαγνητικού πεδίου θα γίνει σε μεγάλα ηλιογραφικά πλάτη όπου το μαγνητικό πεδίο της σπείρας έχει μεγαλύτερη ένταση.



STAGE 2

Babcock 1961



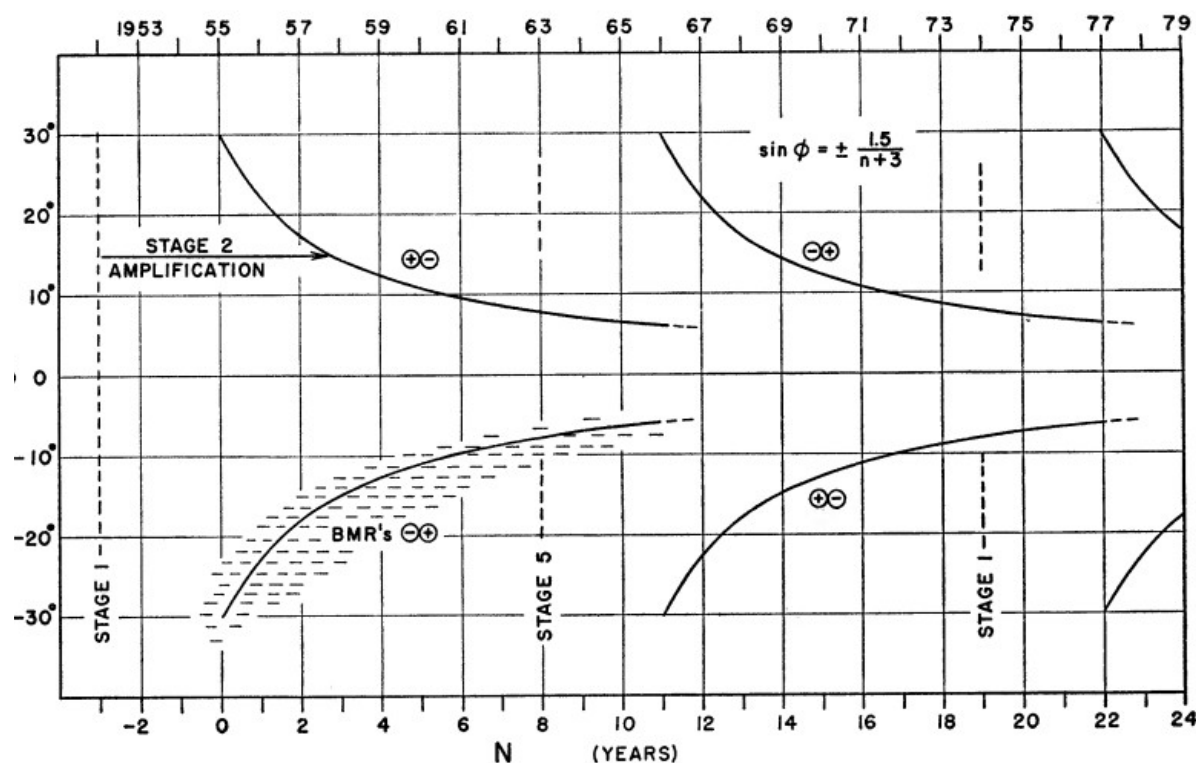
Η μετακίνηση της ανάδυσης μαγνητικών πεδίων σε μικρότερα απόλυτα πλάτη.

Σε ποιο πλάτος ϕ και σε ποιο χρόνο n θα έχουμε: $B_{\text{spiral}} = 264G$

Για $B_0 = 5G$ και $n = 3$ χρόνια έχουμε: $264 = 35.2 n^5 \sin \theta$

$\sin \theta = \pm (1.5/n)$ αντιστοιχεί στον νόμο του Spörer.

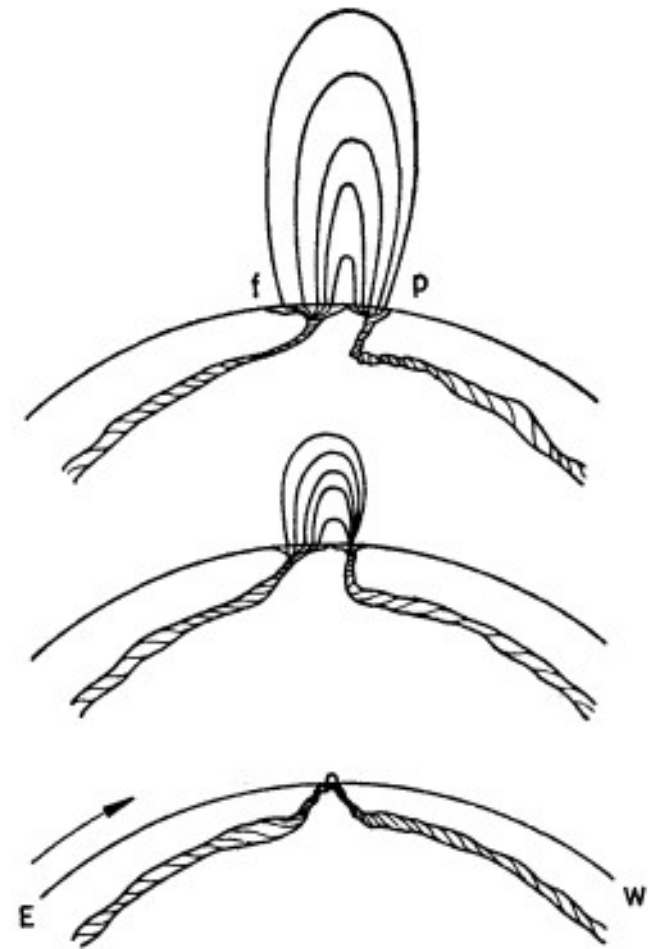
Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να περιγράψει την ανάδυση των ηλιακών κηλίδων στην διάρκεια του ηλιακού κύκλου.



Babcock 1961

Οι μαγνητικές γραμμές λόγω της αλληλεπίδρασης με την τυρβώδη κίνηση του πλάσματος στη ζώνη μεταφοράς παίρνουν την μορφή μαγνητικών σχοινιών τα οποία στην συνέχεια αναδύονται λόγω άνωσης.

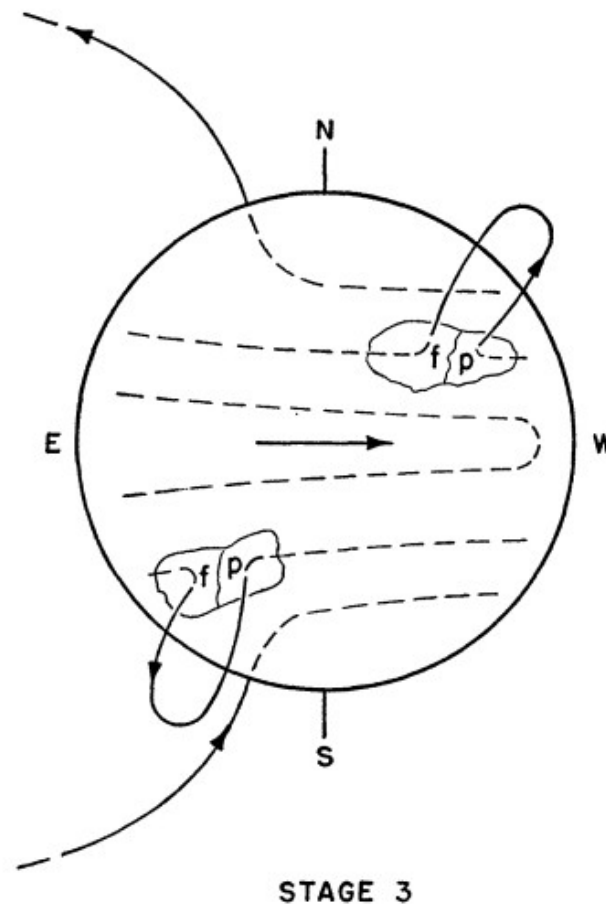
Και τώρα το πιο δύσκολο σημείο.
Από το τοροειδές πεδίο θα πρέπει να δημιουργηθεί το πολοϊδές του επόμενου ηλιακού κύκλου.



Babcock 1961

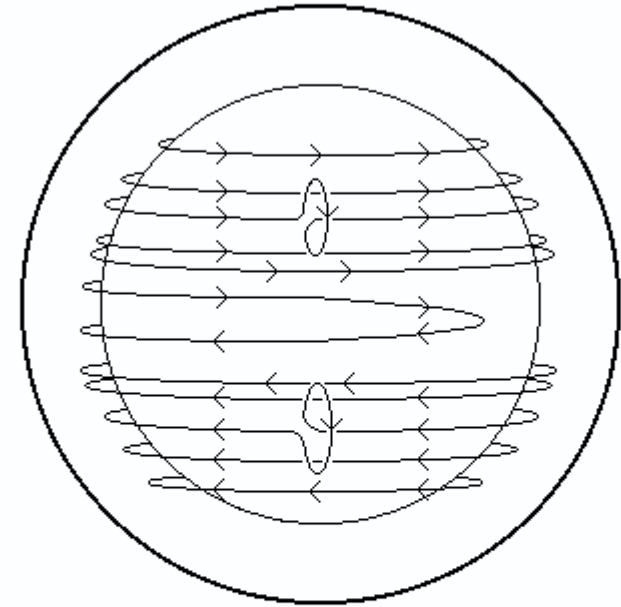
Επιβεβαίωση της κατοπτρικής συμμετρίας των ηγούμενων και επόμενων κηλίδων.

Η ανάδυση του μαγνητικού πεδίου λόγω άνωσης θα δημιουργήσει κηλίδες με αντίθετη πολικότητα. στο νότιο ημισφαίριο οι ηγούμενες κηλίδες θα έχουν αντίθετη πολικότητα από της ηγούμενες κηλίδες του βορείου ημισφαιρίου.



Babcock 1961

Μια δυνατότητα (εκτός μοντέλου Babcock): Σύμφωνα με τον Parker (1955) οι μαγνητικές γραμμές που αναδύονται θα περιστραφούν λόγω των κινήσεων της μεταβατικής ζώνης και της δύναμης Coriolis ($2\mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$) και θα αποκτήσουν μια συνιστώσα με προσανατολισμό βορρά- νότου αυτό θα δώσει στα ζευγάρια των κηλίδων μια κλίση προς τον ισημερινό (νόμος του Joy). Το άθροισμα αυτών των συνιστωσών θα σχηματίσει ένα πολοϊδές πεδίο με προσανατολισμό αντίθετο από αυτόν του αρχικού πολοϊδούς πεδίου. Αυτό ονομάζεται **φαινόμενο-άλφα**.



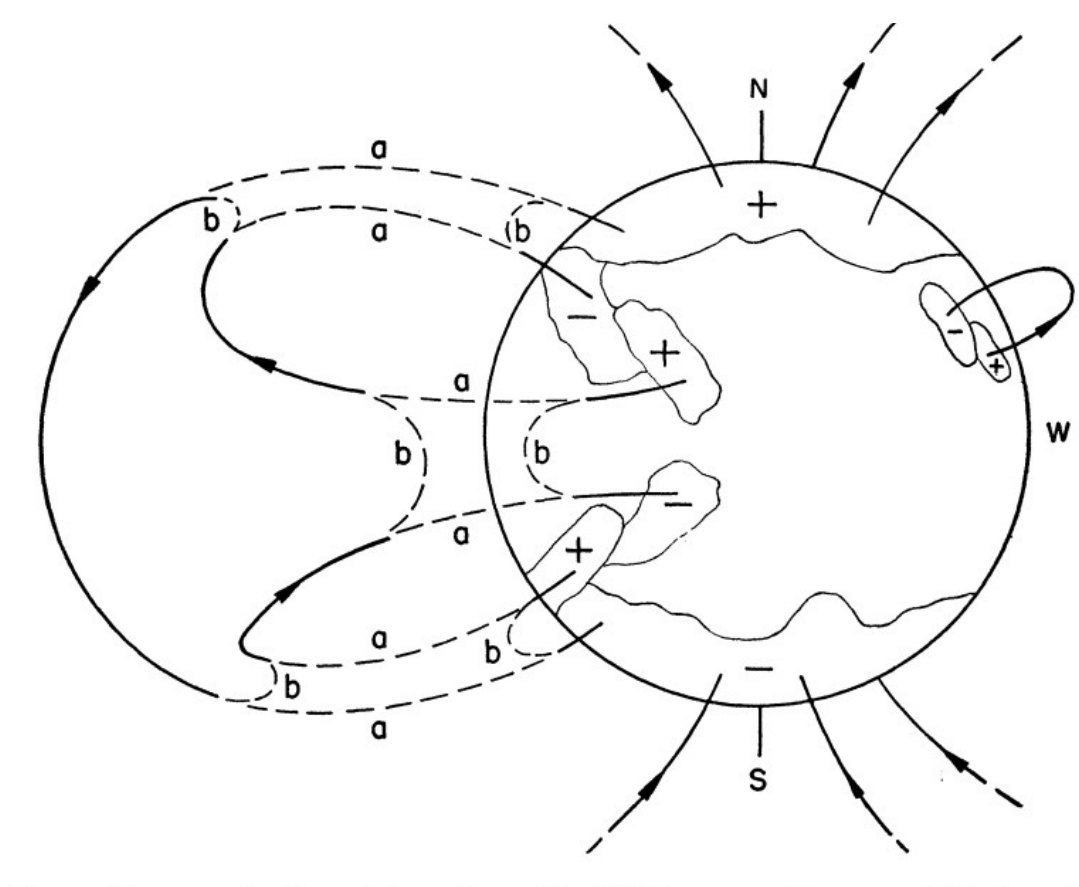
The α -effect

Η πρόταση του Babcock.

Οι ηγούμενες μαγνητικές δομές διαχέονται με κίνηση προς τον ισημερινό όπου γίνεται επανασύνδεση με το μαγνητικό πεδίο της κηλίδας του άλλου ημισφαιρίου. Οι επόμενες (following) δομές διαχέονται με κίνηση προς τους πόλους και εξαλείφουν το μαγνητικό πεδίο του αρχικού πολοϊδούς. Παράλληλα οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές των διπόλων διαστέλλονται. Στην συνέχεια αλληλεπιδρούν με το προηγούμενο διπολικό πεδίο (μαγνητική επανασύνδεση).

Με αυτό τον προσανατολισμό επανασυνδέονται με το διπολικό πεδίο (αντίθετης φοράς) του προηγούμενου κύκλου.

Τέλος σχηματίζεται ένα δίπολο αντίθετης πολικότητας.



Babcock 1961

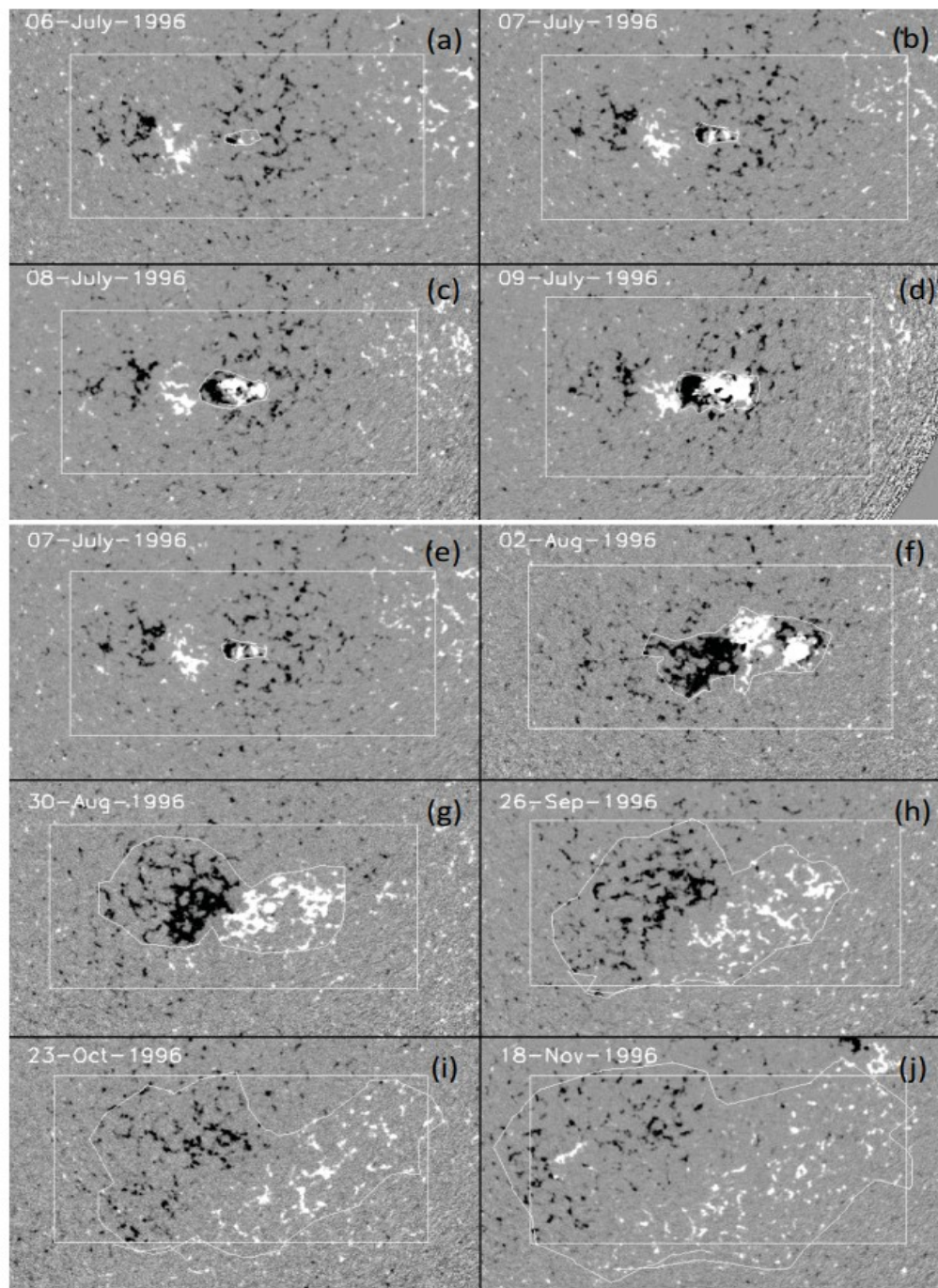
Παράδειγμα διάχυσης του μαγνητικού πεδίου ενός κέντρου δράσης σε διάρκεια μηνών όπως φαίνεται σε μαγνητογραφήματα.

Τον Ιούλιο του 1996 (εικόνες a,b,c,d) βλέπουμε την ανάδυση μαγνητικής ροής σε ήδη υπάρχων ενεργό μαγνητικό πεδίο (το αναδυόμενο πεδίο του κέντρου δράσης βρίσκεται μέσα στην άσπρη γραμμή).

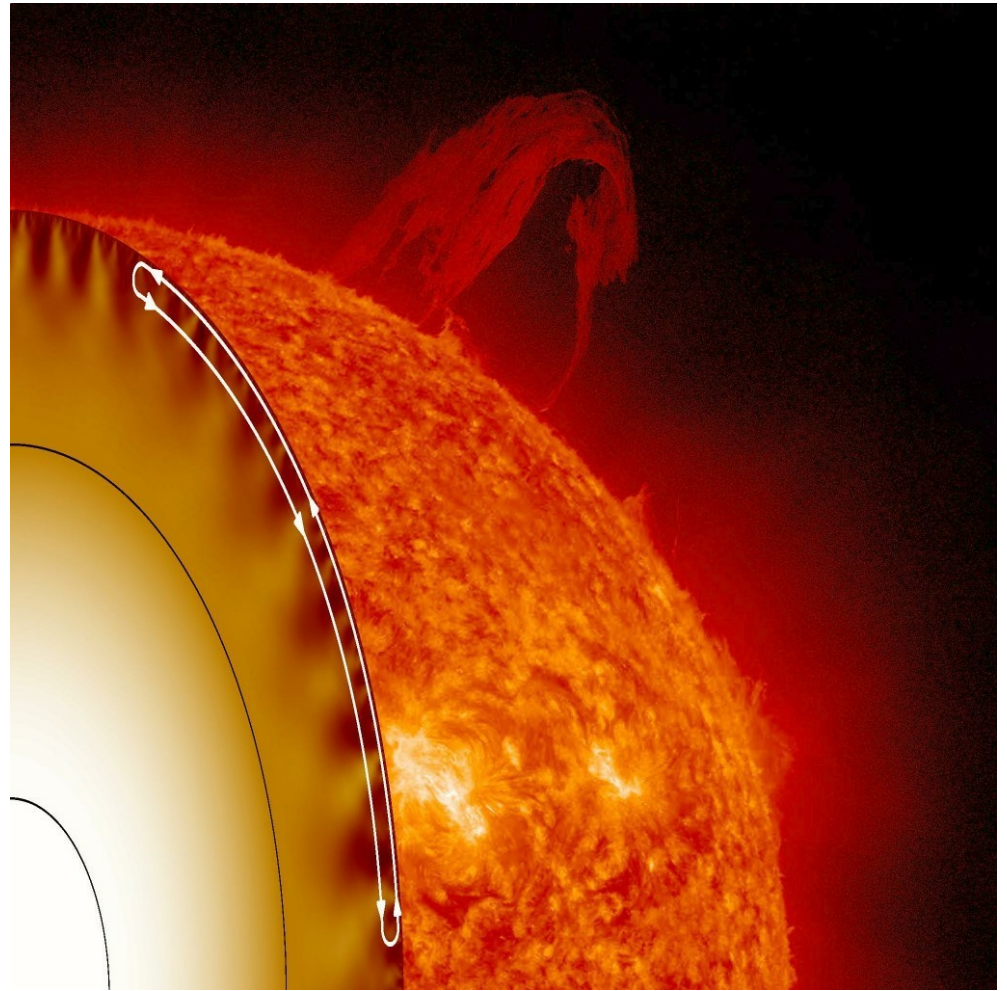
Σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το κέντρο δράσης;

Στις εικόνες f,g,h,i,j βλέπουμε την εξέλιξη του μαγνητικού πεδίου και στην συνέχεια πως αποδυναμώνεται λόγω της διάχυσης.

Από το *Evolution of Active Regions*, 2015, Lidia van Driel-Gesztelyi, Lucie May Green



Η μεσημβρινή ροή (meridional flow) αφορά αργές κινήσεις του πλάσματος από τον ισημερινό προς πόλους με ταχύτητες της τάξης των 20m/s. Αυτή πρέπει να είναι υπεύθυνη για την 'μετανάστευση' των μαγνητικών δομών προς τους πόλους. Η μεσημβρινή ροή πρέπει να συμπληρώνεται από κίνηση στο ηλιακό εσωτερικό (αλλιώς θα είχαμε συγκέντρωση υλικού στους πόλους) με μικρότερη ταχύτητα (λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του υλικού σε μεγαλύτερα βάθη). Οι κινήσεις αυτές έχουν μετρηθεί με μεθόδους της ηλιοσεισμολογίας.



Το μαγνητικό διάγραμμα πεταλούδας.

Ο μέσος όρος του ηλιακού μαγνητικού πεδίου ως προς το ηλιογραφικό μήκος (μας δείχνει την κατανομή του πεδίου συναρτήσει του πλάτους), συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρούμε το διάγραμμα της πεταλούδας, την αλλαγή της πολικότητας στους πόλους. Η ίδια πολικότητα επανέρχεται κάθε 22 χρόνια.

Παρατηρούμε λωρίδες να ξεκινούν από πλάτη $\pm 30^\circ$ με κατεύθυνση προς τους πόλους που δηλώνουν την μετανάστευση μαγνητικών δομών αντίθετης πολικότητας προς αυτής των πόλων.

Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην αντιστροφή της πολικότητας.

