ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Λουκάς Βλάχος
Τμήμα Φυσικής
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
54006 Θεσσαλονίκη
e-mail: vlahos@astro.auth.gr

9 Σεπτεμβρίου 2016

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο άρθρο αυτό γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστούν οι απαραίτητες έννοιες για την περιγραφή των πολύπλοκων συστημάτων. Η λέξη **'πολυπλοκότητα'** ή, καλύτερα, η λέξη πολύπλοκος, χρησιμοποιείται ευρέως με πολλές διάφορετικές έννοιες, αλλά στήν ανάλυση που ακολουθεί θα ορίσουμε τα πολύπλοκα συστήματα ως εξής:

> *Ενα σύστημα είναι πολύπλοκο, αν αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών υποσυστημάτων, που αλληλεπιδρούν μή-γραμμικά μεταξύ τους.*

Η στατιστική φυσική μας έχει συνηθίσει στη μαθηματική περιγραφή συστημάτων που αποτελούνται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό υποσυστημάτων. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ιδανικού αερίου, αλλά και των στερεών προκύπτουν από τη στατιστική περιγραφή αυτών των συστημάτων. Όμως, η μαθηματική ανάλυση των συστημάτων αυτών είναι δυνατή επειδή χρησιμοποιούμε μια σειρά από απλουστεύσεις, για παράδειγμα θεωρούμε ότι:

- Όλα τα αλληλεπιδρώντα υποσυστήματα είναι ίδια μεταξύ τους (άτομα, μόρια κλπ.).
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ τους είναι ασθενής και μπορεί να αγνοηθεί (ιδανικά αέρια) ή να θεωρηθεί γραμμική (στερεά).

- Τα συστήματα βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία.

Τα συστήματα αυτά, δεν ακολουθούν τον ορισμό που δώσαμε και δε χαρακτηρίζονται πολύπλοκα. Παραδείγματα πολύπλοκων συστημάτων είναι: (1) ο ανθρώπινος εγκέφαλος, (2) ο σύγχρονος ηλεκτρονικός υπολογιστής, (3) τα πολυφασικά χημικά συστήματα, (4) τα κοινωνικά και οικονομικά συστήματα κ.α. Στο άρθρο αυτό θα δείξουμε επίσης, ότι αρκετά γνωστά μας αστροφυσικά συστήματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολύπλοκα με βάση τον ορισμό που ήδη δώσαμε.

Η έρευνα στη δυναμική των πολύπλοκων συστημάτων δε θα μπορούσε να προχωρήσει χωρίς την ανάπτυξη νέων εργαλείων, που θα εκμεταλλεύονταν τις δυνατότητες του σύγχρονου υπολογιστή. Τα εργαλεία αυτά αναπτύχθηκαν ήδη από τα μέσα του αιώνα μας από τους ίδιους ερευνητές, που ανέπτυξαν το σύγχρονο ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μια σημαντική πρόταση για την ανάπτυξη ενός εργαλείου για τη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων έγινε αργότερα από τον αμερικανό επιστήμονα John von Neumann, που πρωτοστατούσε την ίδια εποχή στην ανάπτυξη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο von Neumann, επιχείρησε να κατασκευάσει μοντέλα για συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να αναπαράγονται (όπως οι ζωντανοί οργανισμοί). Δημιούργησε για το σκοπό αυτό ένα πλέγμα (grid), στο οποίο κάθε σημείο του (grid point) περιγράφει ένα ανεξάρτητο υποσύστημα ή και έναν ολόκληρο οργανισμό (το άρθρο του δημοσιεύτηκε το 1966, αρκετά χρόνια μετά το θάνατό του). Το υποσύστημα μπορούμε να το περιγράψουμε με ακρίβεια με τα γνωστά μας μαθηματικά. Το σημείο αυτό του πλέγματος το ονόμασε αργότερα '*αυτόματο*' και αντιπροσώπευε έναν πραγματικό '*οργανισμό*¨, που μπορούσε να αλληλεπιδράσει με το γειτονικό του περιβάλλον και να εξελιχθεί.

Στη συνέχεια, με αφορμή τις αρχικές αυτές σκέψεις, αναπτύχθηκαν τα δίκτυα αυτομάτων (automata networks), ενώ συγχρόνως έγινε κατανοητό ότι για να συνεχιστεί η περιγραφή της δυναμικής εξέλιξης του πολύπλοκου συστήματος, έπρεπε να κάνουμε μερικές σημαντικές παραδοχές:

- Να υπεραπλουστεύσουμε τη συμπεριφορά των υποσυστημάτων που αποτελούν το πολύπλοκο σύστημα.

- Η απλούστευση όμως αυτή δεν θα έπρεπε να μας εμποδίσει να εξάγουμε αυστηρά αποτελέσματα και να τα συγκρίνουμε με τις παρατηρήσεις.

- Τέλος, η έμφαση έπρεπε να δοθεί στη δυναμική εξέλιξη ολόκληρου του συστήματος (global behaviour). Ξεκινάμε πάντα από την καλή γνώση των τοπικών λύσεων του προβλήματος, τη γνώση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών σημείων του πλέγματος και παρακολουθούμε τη δυναμική εξέλιξη ολόκληρου του συστήματος. Η νέα πραγματικότητα, που προκύπτει

από το πολύπλοκο σύστημα, έχει νέους νόμους και νέες κανονικότητες, που δεν προκύπτουν από την απλή επαλληλία των τοπικών λύσεων. Καταλήξαμε λοιπόν στο συμπέρασμα, ότι είναι αδύνατον από τις απλές τοπικές λύσεις και αλληλεπιδράσεις να συνθέσουμε τους νόμους και τις κανονικότητες του όλου.

Στο άρθρο αυτό θα επιχειρήσουμε να απαντήσουμε σύντομα σε τρία ερωτήματα:

- *Πώς μπορεί να μελετηθεί ένα πολύπλοκο σύστημα;*
- *Τι είναι τα αυτόματα και τα κυψελικά αυτόματα;*
- *Πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη συγκεκριμένων αστροφυσικών συστημάτων;*

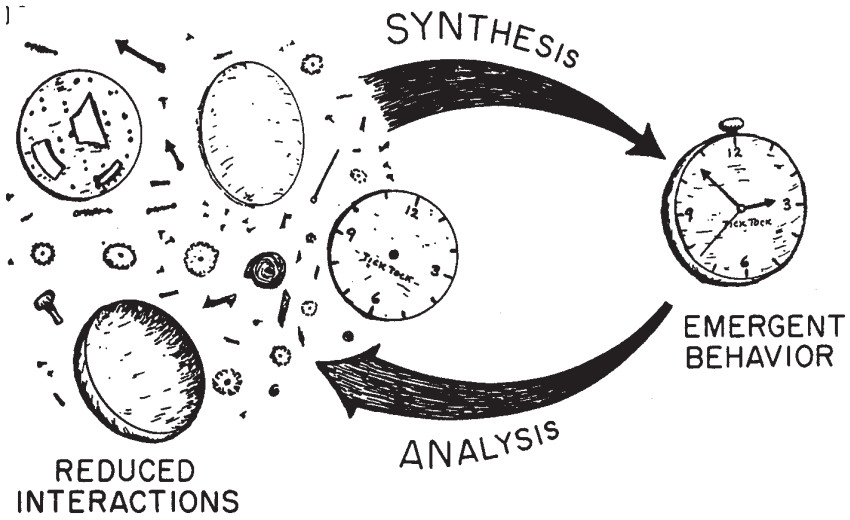
2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Πιστεύουμε σήμερα ότι οι διαφορικές εξισώσεις δεν είναι το καταλληλότερο εργαλείο για τη μελέτη των πολύπλοκων συστημάτων. Είναι όμως ιδανικό εργαλείο για την αναλυτική μελέτη απλών συστημάτων και την αναζήτηση τοπικών λύσεων.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται γραφικά όλα αυτά που αναφέραμε μέχρι τώρα.

Η μέθοδος της μελέτης των πολύπλοκων συστημάτων πρέπει να στηρίζεται στην αυστηρή περιγραφή και ανάλυση των τοπικών χαρακτηριστικών του. Θα πρέπει να ξεκινήσουμε από τη μελέτη της τοπικής αλληλεπίδρασης και να καταλήξουμε στην περιγραφή των ιδιοτήτων ολόκληρου του συστήματος. Παρατηρούμε συχνά ότι το δυναμικό σύστημα παρουσιάζει αυτοοργάνωση και προσαρμογή σε νέες εξωτερικές συνθήκες που είναι άγνωστες στα υποσυστήματά του. Η στατιστική περιγραφή των νέων ιδιοτήτων του συστήματος αποτελεί το στόχο της ανάλυσης που ακολουθεί. Για περισσότερες λεπτομέρειες ανατρέξτε στα βιβλία των Weisbush (1989) ή του Jackson (1991) .

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε σύντομα τα αυτόματα και θα επιμείνουμε ιδιαίτερα στα κυψελιδικά αυτόματα.



Σχήμα 1: Η διάλυση ενός σύνθετου συστήματος στα μέρη του και η λεπτομερής μελέτη των μερών του δεν είναι σίγουρο ότι θα μας οδηγήσει στη σύνθεση και την κατανόηση των διεργασιών του συστήματος. Νέες ιδιότητες και κανονικότητες, που δεν υπήρχαν στα μέρη του,προκύπτουν.

3 ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΙΔΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΑ

3.1 Αυτόματα

Ενα αυτόματο ορίζεται από τρείς παραμέτρους:

Σχήμα 2: Ένα τυπικό αυτόματο

- I, το σήμα εισόδου

- S, την εσωτερική του κατάσταση
- O, το σήμα εξόδου

Υπάρχει μια σειρά από διαφορετικά αυτόματα: (1) το Boolean automaton, έχει ως είσοδο και έξοδο μια ακολουθία από 0 και 1, (2) το αυτόματο με κατώφλι (threshold automaton) που ενεργοποιείται μόνο αν το σήμα εισόδου περάσει μια συγκεκριμένη τιμή κ.λ.π.

Το αυτόματο αποτελεί την απλούστευση μιας διαφορικής εξίσωσης. Παρακολουθώντας ένα σύστημα σε διακριτά σημεία του χρόνου μπορούμε αντίστοιχα να μετατρέψουμε τη διαφορική εξίσωση που το περιγράφει σε εξίσωση διαφορών: για παράδειγμα η εξίσωση

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t) \tag{1}$$

γίνεται

$$x(t+1) = x(t) + f(x(t),t) \tag{2}$$

διακρίνουμε δηλαδή αμέσως τα χαρακτηριστικά του αυτόματου στην εξίσωση διαφορών. Το σήμα εισόδου $x(t)$ έχει μετατραπεί σε σήμα εξόδου $x(t+1)$, ενώ η εσωτερική κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από τη συνάρτηση f.

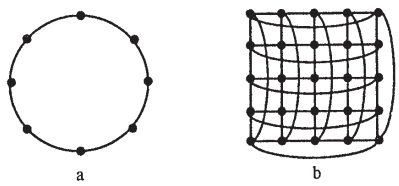
Τέλος, όπως προαναφέραμε, μία σειρά συνδεδεμένων μεταξύ τους αυτομάτων, δημιουργούν αυτό που λέμε αλυσίδα αυτομάτων (automata networks).

3.2 Κυψελιδικά αυτόματα

Τα κυψελιδικά αυτόματα αποτελούν μια γενίκευση του τυπικού αυτόματου. Αποτελούνται από αυτόματα κατανεμημένα στους κόμβους ενός πλέγματος. Τα κυψελιδικά αυτόματα είναι συνήθως περιοδικά. Στο Σχήμα 3 συμβολίζουμε με τελείες τα αυτόματα και με γραμμές τις μεταξύ τους συνδέσεις.

Ενα κυψελιδικό αυτόματο χαρακτηρίζεται από τρείς βασικές αρχές:

- Τους κανόνες του. Στους κανόνες εξέλιξής του ενσωματώνουμε τη γνώση της τοπικής πληροφορίας, που έχουμε στη διάθεσή μας
- Τη σχέση των άκρων του (περιοδικό πλέγμα κ.λ.π.).
- Την έκταση της αλληλεπίδρασης (πόσο μακριά επεκτείνεται η αλληλεπίδραση των αυτομάτων). Συνήθως μελετάμε μόνο τις αλληλεπιδράσεις των κοντινότερων γειτόνων (nearest neighbors).



Σχήμα 3: Μονοδιάστατα και δισδιάστατα περιοδικά κυψελιδικά αυτόματα

Σχήμα 4: Διάφορα είδη πλεγμάτων

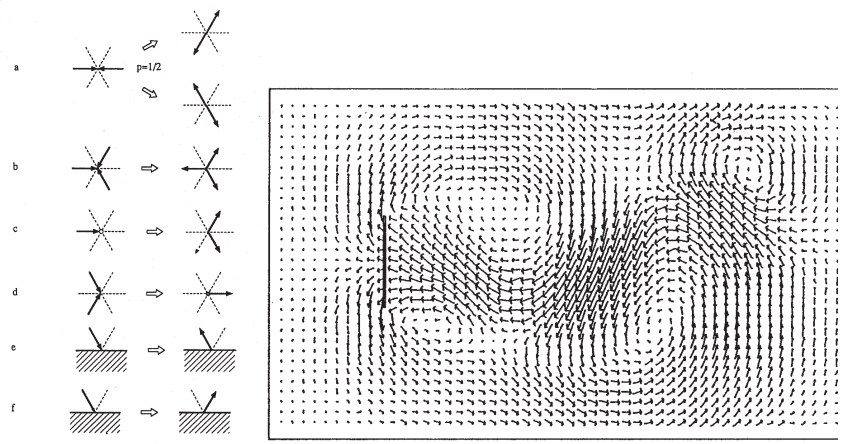
Τα πλέγματα μπορεί να είναι τριγωνικά, τετραγωνικά ή εξαγωνικά. Η επιλογή του καταλληλότερου πλέγματος γίνεται συνήθως εμπειρικά.

Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα μελέτης ενός φυσικού συστήματος με τη μετατροπή του σε κυψελιδικό αυτόματο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5α. Το συγκεκριμένο κυψελιδικό αυτόματο είναι γνωστό ως *το πλέγμα του αερίου* (Lattice gas) και περιγράφει τη συμπεριφορά του ιδανικού αερίου . Οι τοπικές αλληλεπιδράσεις και οι νόμοι εξέλιξης περιγράφονται μέσα από τις δυνατές συγκρούσεις πάνω σε ένα τριγωνικό πλέγμα. Στο Σχήμα 5β περιγράφεται η ροή του αερίου γύρω από μία σταθερή πλάκα. Η επιτυχία του μοντέλου είναι εντυπωσιακή.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μερικές εφαρμογές των κυψελιδικών αυτομάτων στην αστροφυσική.

4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

Στη σύντομη περιγραφή που ακολουθεί παρουσιάζουμε πρώτα το φυσικό πρόβλημα και στη συνέχεια τη μετατροπή του σε κανόνες εξέλιξης του κυψελιδικού αυτόματου.



Σχήμα 5: (α)Οι κανόνες για τις συγκρούσεις του αερίου που κινείται πάνω σε τριγωνικό πλέγμα, (β) Η κίνηση του αερίου πίσω από μια σταθερή πλάκα περιγράφεται με μεγάλη ακρίβεια

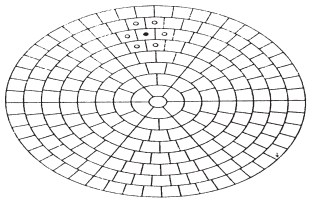
4.1 Η δυναμική ενός σπειροειδούς γαλαξία

4.1.1 Το φυσικό πρόβλημα

Θεωρούμε ότι ένας γαλαξίας αποτελείται από τον κεντρικό πυρήνα και το αέριο που στροβιλίζεται πάνω σε ένα δίσκο γύρω από τον πυρήνα. Τυχαίες διακυμάνσεις της πυκνότητας του αερίου μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό νέων αστέρων. Τα αστέρια ζουν μερικά δισεκατομμύρια χρόνια και στη συνέχεια εκρήγνυνται, προκαλώντας με τη σειρά τους νέες διακυμάνσεις στην πυκνότητα του αερίου της γειτονιάς τους, σηματοδοτώντας έτσι την πιθανή δημιουργία νέων αστέρων. Το ερώτημα είναι: Θα μπορούσε το παραπάνω σενάριο για τη γέννηση των αστέρων να περιγράψει τις παρατηρούμενες δομές των σπειροειδών γαλαξιών;

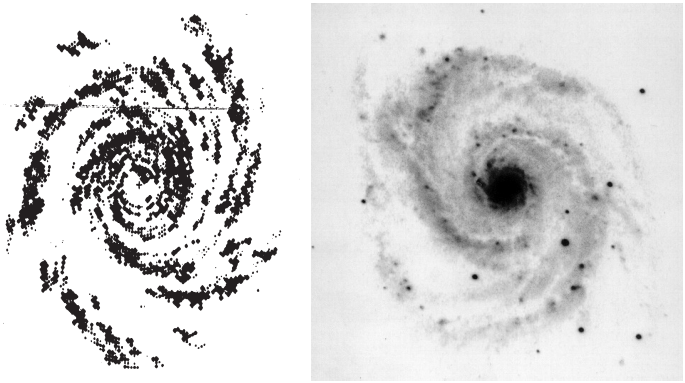
4.1.2 Οι κανόνες του αυτόματου

Ξεκινάμε με τη δημιουργία ενός διαφορικά περιστρεφόμενου κυκλικού πλέγματος (βλ. Σχήμα 6). Όλα τα σημεία του πλέγματος παίρνουν αρχικά την τιμή μηδέν. Το μηδέν θεωρούμε πως αντιπροσωπεύει την αρχική, απλή αέρια κατάσταση της ύλης.



Σχήμα 6: Το περιστρεφόμενο πλέγμα

Στη συνέχεια,ένας μικρός αριθμός (1%) τυχαίων σημείων του πλέγματος μετατρέπεται σε 1 (αστέρες). Μετά από μερικά χρονικά βήματα οι μονάδες μετατρέπονται σε μηδέν (θάνατος των αστέρων), προκαλώντας με πιθανότητα P , λόγω της διαταραχής που προκαλούν, τη γέννηση νέων αστέρων στη γειτονιά τους. Το μοντέλο αυτό, παρ΄ όλο που είναι εξαιρετικά απλό, προσεγγίζει πολύ καλά τις παρατηρήσεις, όπως βλέπουμε και στο Σχημα 7 (Gerola and Seiden, 1978).



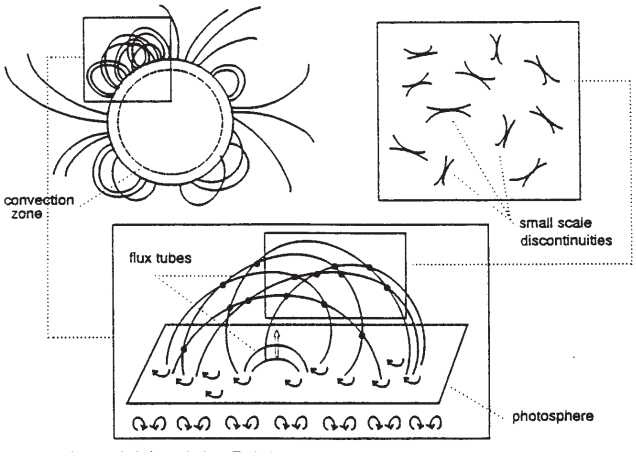
Σχήμα 7: (α) Τα αποτελέσματα του κυψελιδικού αυτόματου (β) Ο γαλαξίας M51

4.2 Κυψελιδικά αυτόματα για τις ηλιακές εκλάμψεις

4.2.1 Το φυσικό πρόβλημα

Οι εκλάμψεις αποτελούν ένα από τα δυσκολότερα και μέχρι σήμερα άλυτα προβλήματα της Ηλιακής Φυσικής.

Παρατηρήθηκαν πριν από εκατό περίπου χρόνια και αποτελούν ακόμα και σήμερα ένα μεγάλο μυστήριο. Πιστεύουμε ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια μιας έκλαμψης, είναι το αποτέλεσμα της απότομης μετατροπής



Σχήμα 8: Παρουσιάζουμε ένα πιθανό μοντέλο για τις ηλιακές εκλάμψεις. Ο τυχαίος σχηματισμός φύλλων ρεύματος συνοδεύεται από την ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας πάνω από τα κέντρα δράσης

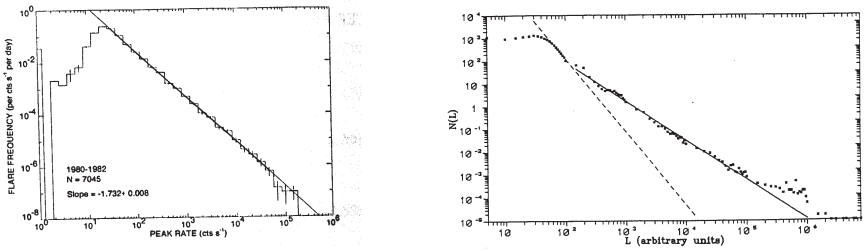
μαγνητικής ενέργειας σε ενέργεια πλάσματος. Ένα από τα προτεινόμενα μοντέλα για τις εκλάμψεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Τα μαγνητικά πεδία πάνω από τα κέντρα δράσης διαταράσσονται συνεχώς από την τυρβώδη ροή της ύλης στη ζώνη μεταφοράς. Σχηματίζουν συνεχώς τοπικές ασυνέχειες και μικρά φύλλα ρεύματος, που αποτελούν τους βασικούς μηχανισμούς απελευθέρωσης μαγνητικής ενέργειας και αλλαγής της τοπολογίας των πεδίων πάνω από τα κέντρα δράσης.

Τελευταίες παρατηρήσεις έδειξαν ότι, αν παραστήσουμε γραφικά τον αριθμό των εκλάμψεων ως συνάρτηση της απελευθερούμενης ενέργειας, η καμπύλη που σχηματίζεται ακολουθεί νόμο δύναμης με συγκεκριμένο και σταθερό εκθέτη (Lin et al., 1984)(βλ. Σχήμα 9α). Η συγκεκριμένη παρατήρηση υποδηλώνει ότι το σύστημα ζώνη μεταφοράς-κέντρα δράσης παρουσιάζει μερικές νέες κανονικότητες καθώς και αυτοοργάνωση. Η στατιστική περιγραφή των χαρακτηριστικών των εκλάμψεων παρουσιάζει τελευταία πολύ μεγάλο ενδιαφέρον.

4.2.2 Το κυψελιδικό αυτόματο

Η δημιουργία ενός κυψελιδικού αυτόματου, που θα περιγράφει τη συμπεριφορά των μαγνητικών πεδίων πάνω από τα κέντρα δράσης, αποτέλεσε το αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια.

Αρχικά σχηματίζουμε ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Σε όλα τα σημεία του πλέγματος τοποθετούμε, αρχικά, τυχαία (σε ένταση και διεύθυνση) μαγνητικά πεδία. Στη συνέχεια προσθέτουμε σε τυχαία σημεία του πλέγματος νέα μαγνητική



Σχήμα 9: (α) Η στατιστική ανάλυση της παρατηρούμενης χρονοσειράς των εκλάμψεων παρουσιάζει μερικές ενδιαφέρουσες κανονικότητες, (β) Το κυψελιδικό αυτόματο που περιγράψαμε συμφωνεί αρκετά καλά με τις παρατηρήσεις.

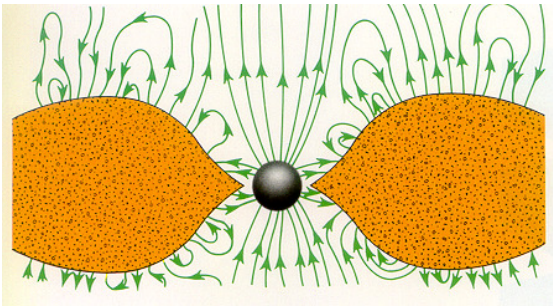
ροή, που πιθανότατα προκύπτει από τις κινήσεις του πλάσματος στη φωτόσφαιρα ή από την ανάδυση νέας μαγνητικής ροής από τη ζώνη μεταφοράς. Αν τα τοπικά μαγνητικά πεδία σχηματίσουν φύλλα ρεύματος, ικανά να ξεπεράσουν μια χαρακτηριστική τιμή, θα απελευθερώσουνε μαγνητική ενέργεια και θα αλλάξουν τοπικά την τοπολογία των μαγνητικών πεδίων. Αυτή η ανακατάταξη μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει το φαινόμενο της χιονοστιβάδας και να προκληθούν από σχετικά μικρές αρχικές διαταραχές, μεγάλες τοπικές εκρήξεις. Το αποτέλεσμα από την ανάλυση του κυψελικού αυτόματου είναι μια νέα χρονοσειρά, που παρουσιάζει τις ίδιες κανονικότητες με τις παρατηρήσεις (βλ. Σχημα 9β)(Lu and Hamilton, 1991; Vlahos et al., 1995; Georgoulis and Vlahos, 1996).

4.3 Η μαγνητική δραστηριότητα στους δίσκους προσαύξησης

4.3.1 Το φυσικό πρόβλημα

Οι δίσκοι προσαύξησης δημουργούνται γύρω από συμπαγή αστροφυσικά αντικείμενα και αποτελούν αποθήκες στροφορμής, ενώ συγχρόνως μεταφέρουν με γρήγορους ρυθμούς μάζα από την περιφέρεια προς το κεντρικό αντικείμενο. Η μάζα δεν είναι δυνατό να προσεγγίσει το ελκτικό κέντρο, αν δε χάσει πρώτα τη στροφορμή της. Ο μηχανισμός με τον οποίο η μάζα χάνει τη στροφορμή της και προσπίπτει στον πυρήνα, δεν είναι γνωστός. Υπάρχουν πολλές προτάσεις, αλλά καμία δεν έχει δώσει λύση στο πρόβλημα, που είναι γνωστό ως ’ανώμαλο ιξώδες¨.

Είναι γνωστό ότι στο εσωτερικό του δίσκου δημιουργούνται μαγνητικά πεδία, πιθανότατα επειδή βρίσκεται σε κατάσταση τυρβώδους ροής. Ένα βασικό ερώτημα παρέμεινε αναπάντητο μέχρι σήμερα: Είναι δυνατόν τα διπολικά μαγνητικά πεδία (βλέπε Σχήμα 10) να υποβοηθούν την απώλεια στροφορμής, επειδή

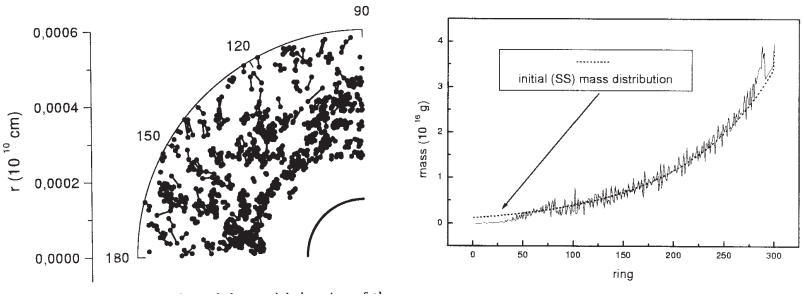


Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση του δίσκου προσαύξησης γύρω από μια μαύρη τρύπα. Η μαγνητική δραστηριότητα των δίσκων προσαύξησης αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα της αστροφυσικής.

αναγκάζουν σημεία με διαφορετική ακτίνα να συγχρονιστούν, δηλαδή μάζες που βρίσκονται σε μεγάλη ακτινική απόσταση να κινηθούν με την ίδια στροφορμη; Η πρόταση αυτή έγινε αρχικά από τον J. Kuijpers το 1995. Πραγματοποιώντας απλούς υπολογισμούς για τα μαγνητικά δίπολα, έδωσε μια αναλυτική τοπική λύση στο πρόβλημα αυτό. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα κυψελιδικό αυτόματο που προσομοιώνει τη μαγνητική δραστηριότητα στους δίσκους προσαύξησης.

4.3.2 Το κυψελιδικό αυτόματο

Το κυψελιδικό αυτόματο περιγράφει τη μαγνητική δραστηριότητα των δίσκων προσαύξησης και αποτελείται από ένα δισδιάστατο κυκλικό πλέγμα. Ο κάθε δακτύλιος του πλέγματος περιστρέφεται με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα $\Omega(r)$. Διαλέγουμε αρχικά τυχαία ζεύγη από κόμβους και εμφανίζουμε ένα μικρό ποσοστό μαγνητικών διπόλων. Τα δίπολα μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση νέων διπόλων με πιθανότητα P ή να καταστραφούν απελευθερώνοντας μαγνητική ενέργεια, όταν στραφούν περισσότερο από μία συγκεκριμένη γωνία. Τα δίπολα αναγκάζουν δύο τελείως διαφορετικά σημεία του δίσκου να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, για όσο χρόνο παραμένουν συνδεδεμένα. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται η μεταφορά μάζας προς το κέντρο,φαινόμενο που συνοδεύεται από ταυτόχρονη απώλεια στροφορμής. Ως αιτία του ανώμαλου ιξώδους θεωρείται για το συγκεκριμένο μοντέλο η μαγνητική δραστηριότητα του δίσκου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μαγνητικά δίπολα πράγματι παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά μάζας προς το κεντρικό αντικείμενο (Pavlidou, Kuijpers and Vlahos, 1999).



Σχήμα 11: (α) Η τυχαία εμφάνιση μαγνητικών διπόλων στην επιφάνεια του δίσκου αλλάζει τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας και στροφορμής (β) Η προβλεπόμενη από το κυψελιδικό αυτόματο μεταφορά μάζας ακολουθεί τον επιθυμητό νόμο, που υπολόγισαν εμπειρικά οι Shakura και Sunyaev το 1973

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε μέχρι τώρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μελέτη της συμπεριφοράς των πολύπλοκων αστροφυσικών συστημάτων είναι δυνατή με τη βοήθεια των κυψελιδικών αυτομάτων. Το πέρασμα, όμως, από τις παρατηρήσεις και την ποιοτική περιγραφή του προβλήματος στην περιγραφή του πολύπλοκου αστροφυσικού συστήματος, γίνεται μόνο αν καταφέρουμε:

- Να μετατρέψουμε τις τοπικές φυσικές διεργασίες σε κανόνες εξέλιξης του αυτόματου.
- Να επιλέξουμε το σωστό πλέγμα.
- Να κάνουμε τη σωστή επιλογή για τους τρόπους αλληλεπίδρασης των πλησιέστερων γειτόνων.

Η περιγραφή πολύπλοκων φυσικών συστημάτων στο εργαστήριο και στη φύση αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του αιώνα που έρχεται. Θα χρειαστούν νέα ευέλικτα εργαλεία και σίγουρα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής θα πρωταγωνιστήσει στην ανάπτυξη αυτού του νέου κλάδου.

Ευχαριστίες: Είναι ιδιαίτερη χαρά για μένα το γεγονός ότι συμμετέχω στην έκδοση των πρακτικών του $11^{ου}$ θερινού Σχολείου, που είναι αφιερωμένο στον καθηγητή μου, κ. Γ. Κοντόπουλο. Πριν από περίπου τριάντα χρόνια με

παρότρυνε να σπουδάσω Φυσική του Πλάσματος και Αστροφυσική και είχα επίσης την τύχη να συνεργαστώ μαζί του στην πρώτη μου επιστημονική δημοσίευση. Θέλω να ευχαριστήσω από τη θέση αυτή τους στενούς μου συνεργάτες Dr. Rene Kluiving, Dr. Heinz Isliker, Δρ. Τάσο Αναστασιάδη, Μανώλη Γεωργούλη και Βασιλική Παυλίδου για τη συμμετοχή τους στα ερευνητικά θέματα που ανέπτυξα στο άρθρο αυτό. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω θερμά τους καλούς μου φίλους, συνεργάτες και συναδέλφους Χρόνη Πολυμίλη, Κυριάκο Χιτζανίδη και Δημήτρη Φραντζεσκάκη για την επιλογή τους να οργανώσουν αυτό το Σχολείο στην πόλη που γεννήθηκα και μεγάλωσα.

Αναφορές

[1] d'Humieres, D., Pomeau, Y. and Lallemand, P., 1987, *Le Courrier Du CNRS*, 89-94.

[2] Geogoulis, M.K. and Vlahos,L., 1996, "Coronal Heating by Nanoflares and the Variability of th Occurence Frequency in Solar Flares", *Astrophysical Journal Letters*, **469**, L135-L138.

[3] Gerola, H. and Seiden, P.E., 1978, "Stochastic Star Formation nd Spiral Galaxies", *Astrophysical Journal*

[4] Jackson, E.A.,1991, "Prospectives of Nonlinear Dynamics, Vol. 2",*Cambridge University Press*, **Chapter 10.**

[5] Kuijpers, J., 1995, "Flares in Accreation Disks", In: Benz, A.O and Kruger, A. (eds), *Coronal Magnetig Energy Release*, Springer- Verlag, p.135.

[6] Lin, R.P., Schwartz, R.A., Kane, S.R., Pelling, R.N. and Hurtly, C.C., 1984, *Astrophysical Journal*, **285**, 421

[7] Lu, E.T. and Hamilton, R.J., 1991, *Astrophysical Journal*, **380**,L89

[8] Pavlidou, V., Kuijpers, J. and Vlahos,L., 1999, "A Cellular Automata Model for the Magnetic Activity in Accreation Disks", *Astronomy and Astrophysics*, submitted.

[9] Shakura, N.I. and Sunyaev, R.A., 1973, *Astronomy and Astrophysics*, **24**, 337

[10] von Neumann, J., 1966, "Theory of Self-Reproducing Automata", *Burks, A. (ed)*, University of Illinois Press.

[11] Vlahos, L., Georgoulis, M.K., Kluiving, R. and Paschos, P.,1995, *Astronomy asnd Astrophysics*, **299**,897

[12] Weisbuch, G., 1989, " Complex Systems Dynamics", *Addison-Wesley Pub. Co.*.