ΝΕΟΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ Αποτελέσματα ερευνών του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφηρμοσμένων Μαθηματικών της Ακαδημίας Αθηνών

Επιμέλεια: Πάνος Πάτσης, Διευθύνων Γεώργιος Κοντόπουλος, Ακαδημαϊκός

AOHNA 2016

Πρόλογος

Οι επιστημονικές εργασίες του ΚΕΑΕΜ δημοσιεύονται κατά κύριο λόγο σε διεθνείς αστρονομικές επιθεωρήσεις με κριτές και κατά δεύτερο λόγο σε τόμους με πρακτικά συνεδρίων. Δεδομένου ότι απευθύνονται στη διεθνή επιστημονική κοινότητα που ειδικεύεται στους αντίστοιχους τομείς έρευνας, οι δημοσιεύσεις αυτές γίνονται στην αγγλική γλώσσα. (Ο κατάλογος των δημοσιεύσεων των ετών 2014 και 2015 βρίσκεται στη σελ. 81). Πέραν τούτου οι αποδείξεις των ερευνητικών αποτελεσμάτων περιέχουν ένα τεχνικό μέρος το οποίο απευθύνεται στους ειδικούς. Θέλοντας να παρουσιάσουμε χαρακτηριστικά πρόσφατα αποτελέσματα ερευνητικών εργασιών του ΚΕΑΕΜ σε ένα ευρύτερο κοινό στην ελληνική γλώσσα, συγκεντρώσαμε στο παρόν τεύχος μια σειρά άρθρων που συνοψίζουν την έρευνα που διεξάγεται στο Κέντρο. Τα άρθρα αυτά έχουν εν μέρει έναν εκλαϊκευτικό χαρακτήρα και απευθύνονται όχι μόνο σε ειδικούς αλλά και σε όσους ενδιαφέρονται για τη σύγχρονη αστρονομική έρευνα.

Π. Πάτσης, Διευθυντής Ερευνών, Διευθύνων το ΚΕΑΕΜ

Γ. Κοντόπουλος, Ακαδημαϊκός, Επόπτης του ΚΕΑΕΜ

Σωρανού Εφεσίου 4, Αθήνα, 11527

Ιστοσελίδα: http://astro.academyofathens.gr

E-mail: keaem@academyofathens.gr

Επόπτης του Κέντρου είναι ο Ακαδημαϊκός κ. Γεώργιος Κοντόπουλος, η δε σύνθεση του προσωπικού κατά το 2015 ήταν:

- Πάτσης Πάνος, Διευθύνων, Ερευνητής Α'
- Ευθυμιόπουλος Χρήστος, Ερευνητής Α'
- Κοντόπουλος Ιωάννης, Ερευνητής Α'
- Βασιλάκος Σπύρος, Ερευνητής Α'
- Γοντικάκης Κωνσταντίνος, Ερευνητής Β'
- Γεωργούλης Μανώλης, Ερευνητής Β'
- Βαγενάς Ηλίας, Ερευνητής Β' (εν αδεία)
- Χαρσούλα Μιρέλλα, Επιστημονικό Προσωπικό Ανάπτυξη Λογισμικού

 Τζιότζιου Κωνσταντίνος (συνεργασία με Μ. Γεωργούλη), Κατσανίκας Ματθαίος (συνεργασία με Γ. Κοντόπουλο, Π. Πάτση, Ι. Κοντόπουλο), Μωραΐτης Κων/νος (συνεργασία με Μ. Γεωργούλη), Δελής Νίκος (συνεργασία με Γ. Κοντόπουλο), Ι. Αλικάκος (συνεργασία με Π. Πάτση), Αθανάσιος Τζέμος (συνεργασία με τον Χ. Ευθυμιόπουλο) Μεταδιδακτορικοί Ερευνητές

Δάρα Ελένη, Ζαχαριάδης Θεοδόσης, Τριτάκης Βασίλειος, Επιστημονικοί Συνεργάτες

- Παπαδόπουλος Παντελής, Επισκέπτης Ερευνητής
- Ζούλιας Μανώλης, Τεχνικός Υπεύθυνος

 Τσιγαρίδη Λιάνα, Πούρη Αθηνά, Συντελής Πέτρος, Ναθαναήλ Αντώνιος, Κουτσαντωνίου Ελπίδα, Υποψήφιοι διδάκτορες

Περιεχόμενα

A′	Αναλυτική Μελέτη της Τάξης και του Χάους	
	Γεώργιος Κοντόπουλος	3
B′	Η δομή των γαλαξιακών ράβδων και η θεωρία του Χάους	
	Πάνος Πάτσης	15
Γ	Η αναζήτηση Τρωικών Εξω-πλανητών	
	Χρήστος Ευθυμιόπουλος	23
Δ΄	Η προέλευση του μαγνητικού πεδίου στο Σύμπαν	
	Ιωάννης Κοντόπουλος	27
Ε′	Η μεταβαλλόμενη ενέργεια του κενού, κλειδί για την κατανόηση των	
	μυστικών του Σύμπαντος;	
	Σπύρος Βασιλάχος	33
ΣΤ΄	Ηλιακή Φυσική: Φασματοσκοπία στο υπεριώδες και μελέτη επιτάχυν-	
	σης σωματιδίων στο ηλιακό στέμμα	
	Κωνσταντίνος Π. Γοντικάκης	37
Z′ H′	Εφαρμοσμένη ηλιακή φυσική: ανάλυση ηλιακών μαγνητικών πεδίων και	
	πρόγνωση του διαστημικού καιρού	
	Μανώλης Κ. Γεωργούλης	41
	«Ο δρόμος του Χάους»: αναλυτική περιγραφή των δομών του χάους	
	σε δυναμικά συστήματα και εφαρμογές στη Δυναμική Αστρονομία	
	Μιρέλλα Χαρσούλα	49
Θ΄	Γήινο Περιβάλλον και Εγγύς Διάστημα	
	Βασίλειος Τριτάχης	53
ľ	Διαφυγές Αστέρων	
	Γ. Κοντόπουλος & Μ. Χαρσούλα	63
ΙΑ΄	Δημοσιεύσεις του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων	
	Μαθηματικών της Ακαδημίας Αθηνών για το 2014	81
ΙB′	Δημοσιεύσεις του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων	
	Μαθηματικών της Ακαδημίας Αθηνών για το 2015	84

Κέντρο Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών (KEAEM)

Το Κέντρο Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών (ΚΕΑΕΜ) διεξάγει ανταγωνιστική έρευνα διεθνώς στους ακόλουθους τομείς: Δυναμική και μορφολογία γαλαξιών, μη-γραμμικά δυναμικά συστήματα (πολυπλοκότητα και χάος), Ηλιακή Φυσική, Μαγνητοϋδροδυναμική, Κοσμολογία και Βαρύτητα. Οι εργασίες του ΚΕΑΕΜ βασίζονται κυρίως στη παραγωγή θεωρητικών μοντέλων και σύγκριση με σύγχρονα παρατηρησιακά δεδομένα από γήινα και διαστημικά τηλεσκόπια (VLT, solar orbiter κ.λ.π.). Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να δοθούν απαντήσεις σε καίρια σύγχρονα ερωτήματα, όπως α) η δυναμική των σπειρών στο δικό μας Γαλαξία, β) η αναπαραγωγή της τριδιάστατης δομής του μαγνητικού πεδίου στον Ήλιο και η πρόβλεψη της ηλιακής δραστηριότητας και του διαστημικού καιρού, γ) η κατανόηση του περιβάλλοντος και των μηχανισμών ενίσχυσης μαγνητικών πεδίων και εκπομπής σε συμπαγή αντικείμενα (π.χ. αστέρες νετρονίων ή ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες), δ) η κατανόηση της φύσης της σκοτεινής ύλης και της σκοτεινής ενέργειας που οδηγούν την κοσμολογική εξέλιξη του Σύμπαντος.

Στις εργασίες αυτές, εκτός από το μόνιμο ερευνητικό και τεχνικό προσωπικό, συμβάλλουν αποφασιστικά και οι μεταδιδακτορικοί επιστημονικοί μας συνεργάτες (από την Ελλάδα, και επισκέπτες από το εξωτερικό), καθώς και οι διδακτορικοί φοιτητές που εκπονούν τη διατριβή τους υπό την επίβλεψη του ερευνητικού προσωπικού. Οι ερευνητές του ΚΕΑΕΜ παρέχουν επίσης δωρεάν διδακτικό έργο σε μεταπτυχιακά κυρίως τμήματα του Πανεπιστημίου Αθηνών, στον τομέα Αστρονομίας, Αστροφυσικής και Μηχανικής.

Το ΚΕΑΕΜ, σχοπεύοντας στη συνεχή προσπάθεια ενημέρωσης τόσο των ερευνητών, όσο και των μεταπτυχιαχών φοιτητών σε σύγχρονα θέματα έρευνας, οργανώνει εβδομαδιαία σεμινάρια, που χρηματοδοτούνται εν μέρει από την Αχαδημία Αθηνών. Στα σεμινάρια συμμετέχουν ως ομιλητές, αχαδημαϊχοί, χαθηγητές και διακεχριμένοι επιστήμονες από διάφορα Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα της Ελλάδος και του Εξωτεριχού. Τα σεμινάρια αυτά τα παραχολουθεί η ευρύτερη χοινότητα των φοιτητών, πανεπιστημιαχών και ερευνητών που εργάζονται σε σχετικά θέματα. Τα τελευταία χρόνια το ΚΕΑΕΜ έχει οργανώσει τέσσερα διεθνή συνέδρια σε θέματα Γαλαξιαχή Δυναμιχής, Ηλιαχής Φυσιχής και Βαρύτητας. Συχνά οι ερευνητές δίνουν σειρά εχλαϊχευτιχών ομιλιών, ενώ χατά το διεθνές έτος Αστρονομίας (2009) και κατά το διεθνές έτος Φωτός (2015) διοργανώθηχαν ειδιχές σειρές ομιλιών χαθ' όλη τη διάρχεια του έτους στην Ανατολιχή αίθουσα του χτηρίου της Αχαδημίας.

Η επιστημονική παραγωγή του ΚΕΑΕΜ (αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων, συνεργασίες των ερευνητών και προσκλήσεις στο εξωτερικό, χρηματοδοτήσεις, διοργάνωση συνεδρίων και σεμιναρίων, εκδηλώσεις επιμόρφωσης και διάδοσης της αστρονομίας στο κοινό) κατατάσσουν το ΚΕΑΕΜ ανάμεσα στα πλέον παραγωγικά ερευνητικά κέντρα που δραστηριοποιούνται στο χώρο της Αστρονομίας και παράγοντα προβολής της χώρας μας διεθνώς. Ενδεικτικά, κατά τα έτη 2014 και 2015 το Κέντρο μας δημοσίευσε 83 επιστημονικές εργασίες, εκ των οποίων 53 σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά υψηλού κύρους με κριτές, ερευνητές του επιμελήθηκαν την έκδοση τεσσάρων ειδικών θεματικών τόμων και έδωσαν 67 ομιλίες σε διεθνή συνέδρια και ερευνητικά ιδρύματα (οι περισσότερες από αυτές κατόπιν προσκλήσεως). Οι συνεργασίες μας με πολλά ερευνητικά ιδρύματα στο εξωτερικό, αλλά και στο εσωτερικό, αποδεικνύει ότι η έρευνα του ΚΕΑΕΜ συμβάλλει σημαντικά στην επιστημονική πρόοδο που συντελείται παγκοσμίως (στην περίπτωσή μας στον χώρο της Αστρονομίας και των συναφών επιστημών) και δεν είναι απομονωμένη. Η αναγνώριση των επιστημονικών εργασιών των μελών του ΚΕΑΕΜ τεκμηριώνεται από το πλήθος των αναφορών στο έργο τους (περί τις 10000) και από τις χρηματοδοτήσεις των συνεργασιών που γίνονται με έξοδα ιδρυμάτων του εξωτερικού (όπως και οι προσκεκλημένες συμμετοχές των ερευνητών μας σε διεθνή συνέδρια).

Οι επιστημονικές συνεργασίες των μελών του ΚΕΑΕΜ διαχέουν τη σύγχρονη επιστημονική γνώση σε ευρύτατα στρώματα φοιτητών, επιστημόνων σε ελληνικά Πανεπιστήμια και ιδρύματα, καθώς και στο ευρύ κοινό.

Α΄ Αναλυτική Μελέτη της Τάξης και του Χάους

Γεώργιος Κοντόπουλος

Στα δυναμικά συστήματα υπάρχει εν γένει συγχρόνως Τάξη και Χάος. Παραδείγματος χάριν σε ένα γαλαξία υπάρχουν οργανωμένες και χαοτικές τροχιές αστέρων (Σχ. Α΄.1).



Σχήμα Α΄.1: Γαλαξιακές Τροχιές (a) Οργανωμένη (b) Χαοτική

Μόνο σε ακραίες περιπτώσεις υπάρχει μόνο τάξη ή μόνο χάος. Ένα παράδειγμα που μελετήσαμε πρόσφατα είναι το μαγνητικό πεδίο γύρω από τη Γη, που σχηματίζει μια μαγνητική φιάλη (Σχ. Α΄.2).



Σχήμα Α΄.2: Μαγνητική Φιάλη γύρω από τη Γη.



Σχήμα Α΄.3: Τροχιές σε ένα μοντέλο μαγνητικής φιάλης. Ο άξονας z διευθύνεται προς τους πόλους και ο άξονας ρ ευρίσκεται στο ισημερινό επίπεδο. (a) Τρεις οργανωμένες τροχιές για ενέργεια E = 0.01 (b) Μία χαοτική τροχιά για ενέργεια E = 0.5.

Στο Σχ. Α΄.3a παρουσιάζουμε τρεις οργανωμένες τροχιές ηλεκτρονίων και στο Σχ. Α΄.3b μία χαοτική τροχιά ενός μοντέλου του μαγνητικού πεδίου της Γης. Στο μοντέλο αυτό δεν λαμβάνουμε υπ' όψη διαταραχές που προέρχονται από ανωμαλίες του πεδίου της Γης που θεωρείται αξισυμμετρικό, ούτε εξωτερικές διαταραχές που προέρχονται κυρίως από τον ήλιο. Τα ηλεκτρόνια κινούνται κοντά στις μαγνητικές γραμμές και όταν φθάσουν κοντά στη Γη δημιουργούν το βόρειο σέλας ή το νότιο σέλας (Σχ. Α΄.4).



Σχήμα Α΄.4: Βόρειο Σέλας.

Θεωρούμε τώρα τις τροχιές των ηλεκτρονίων στο χώρο των φάσεων, δηλαδή το χώρο των τιμών του ρ και z και των ταχυτήτων $\dot{\rho}$ και \dot{z} για κάθε χρονική στιγμή. Ο χώρος των φάσεων είναι 4 διαστάσεων $(\rho, z, \dot{\rho}, \dot{z})$ αλλά επειδή η ενέργεια

$$E = E(\rho, z, \dot{\rho}, \dot{z}) \tag{1.1}$$

διατηρείται σταθερή, ουσιαστικά έχουμε κινήσεις σε 3 διαστάσεις έστω τις (z, \dot{z}, ρ) (Σχ. Α΄.5) ενώ η $\dot{\rho}$ προκύπτει από την εξίσωση της ενέργειας.



Σχήμα Α΄.5: Διαδοχικά σημεία τομής μιας τροχιάς στο χώρο (z, \dot{z}, ρ) από την επιφάνεια τομής $\rho = 0$ $(\dot{\rho} > 0)$.

Αν τώρα πάρουμε τα διαδοχικά σημεία τομής των τροχιών με την επιφάνεια $\rho = 0$ (επιφάνεια τομής) βρίσκουμε είτε εν γένει καμπύλες (Σχ. Α΄.6) είτε εν γένει διάσπαρτα σημεία (Σχ. Α΄.7). Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε οργανωμένες τροχιές ενώ τα διάσπαρτα σημεία αντιστοιχούν σε χάος. Το κέντρο των Σχ. Α΄.6 και Σχ. Α΄.7 αντιστοιχεί σε μία περιοδική τροχιά ($z = \dot{z} = 0$) η οποία είναι ευσταθής στο Σχ. Α΄.6 και περιβάλλεται από κλειστές αμετάβλητες καμπύλες, ενώ είναι ασταθής στο Σχ. Α΄.7



Σχήμα Α΄.6: Αμετάβλητες καμπύλες στην επιφάνεια τομής όταν η ενέργεια είναι σχετικά μικρή E = 0.1, υπολογιζόμενες αριθμητικά (μαύρες καμπύλες) και θεωρητικά (κόκκινες καμπύλες). Χάος παρατηρείται κυρίως στις εξωτερικές γωνίες του σχήματος.



Σχήμα Α΄.7: Χαοτικές τροχιές στην επιφάνεια τομής όταν η ενέργεια είναι σχετικά μεγάλη Ε = 0.5. Στο σχήμα αυτό υπάρχουν μόνον 2 μικρές νησίδες ευστάθειας, άνω και κάτω του κέντρου.

Τα διαδοχικά σημεία τομής μιας τροχιάς σε κάθε περίπτωση δίνονται από τα σημεία 1, 2, 3,... Στην περίπτωση μιας οργανωμένης περιοδικής τροχιάς βρίσκονται σε μία κλειστή καμπύλη η οποία λέγεται αμετάβλητη καμπύλη (Σχ. Α΄.6), ενώ στην περίπτωση μιας χαοτικής τροχιάς τα διαδοχικά σημεία είναι φαινομενικά διάσπαρτα (Σχ. Α΄.7).

Γύρω από την περιοδική τροχι
ά(0,0)του Σχ. Α΄.6 υπάρχει ένα ακόμη προσεγγιστικό ολοκλήρωμα της κινήσεως, δηλαδή μία συνάρτηση

$$\Phi = \Phi(\rho, z, \dot{\rho}, \dot{z}) \tag{1.2}$$

η οποία παραμένει (περίπου) σταθερή κατά τη διάρκεια της κινήσεως. Αυτή η συνάρτηση είναι γνωστή ως 30 ολοκλήρωμα (10 ολοκλήρωμα είναι η ενέργεια και 20 ολοκλήρωμα η στροφορμή περί τον άξονα z, η οποία είναι επίσης σταθερή, αλλά δεν τη μελετούμε εδώ). (Σχετικά με το 30 ολοκλήρωμα ιδ. Contopoulos 2002). Το 30 ολοκλήρωμα δίνεται υπό μορφή σειράς,

$$\Phi = \Phi_2 + \Phi_3 + \dots \tag{1.3}$$

όπου $\Phi_2, \Phi_3...$ είναι οι όροι βαθμού 2, 3 κλπ στις μεταβλητές. Η σειρά 1.3 εν γένει είναι μόνο προσεγγιστική, δηλαδή δεν συγκλίνει, ωστόσο αν κόψουμε τη σειρά σε όρους αρκετά μεγάλης τάξης n,

$$\bar{\Phi} = \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n \tag{1.4}$$

η σειρά δίνει μια περίπου σταθερή τιμή κατά μήκος κάθε τροχιάς. Από τις εξισώσεις 1.1 και 1.4 με $\rho = 0$ απαλείφουμε τη μεταβλητή $\dot{\rho}$ και βρίσκουμε μία λύση

$$f(z, \dot{z}) = f_2 + f_3 + \dots = \sigma \tau \alpha \theta, \tag{1.5}$$

η οποία παριστά μία από τις καμπύλες του Σχ. Α΄.6 γύρω από το κέντρο. Στο Σχ. Α΄.6 βλέπουμε ότι οι θεωρητικές αμετάβλητες καμπύλες (κόκκινες) βρίσκονται πολύ κοντά στις εμπειρικές καμπύλες (μαύρες) που υπολογίζονται αριθμητικά, δηλαδή από τον ακριβή υπολογισμό των τροχιών.

Πάντως στο εξωτερικό μέρος του Σχ. Α΄.6 υπάρχουν μικρές νησίδες και περιοχές χάους που δεν μπορούν να παρασταθούν από το 3ο ολοκλήρωμα που υπολογίζεται μακράν των συντονισμών. Στην περίπτωση των νησίδων οι τροχιές περνούν διαδοχικά από κάθε νησίδα και δεν δημιουργούν μια κλειστή καμπύλη γύρω από το κέντρο. Π.χ. για ενέργεια E = 0.2 (Σχ. Α΄.8) παρατηρούμε 4 μεγάλες νησίδες (2 ζεύγη νησίδων του συντονισμού 2:1). Η συνήθης μορφή του 3ου ολοκληρώματος (μακράν του συντονισμού) αποδίδει μεν καλά τις κλειστές αμετάβλητες καμπύλες γύρω από το κέντρο (0,0) τόσο εντός όσο και εκτός του συντονισμού αλλά δεν αποδίδει καθόλου τις νησίδες. Πράγματι στην περιοχή των νησίδων δίνει μια καμπύλη που περιβάλλει την αρχή (0,0) και όχι τις καμπύλες των νησίδων (Σχ. Α΄.8).



Σχήμα Α΄.8: Θεωρητικές αμετάβλητες χαμπύλες (χόχχινες) οργανωμένων τροχιών όταν η ενέργεια είναι E = 0.2, χρησιμοποιώντας τη μορφή του 3ου ολοχληρώματος μαχράν του συντονισμού, χαι αχριβείς αριθμητιχές αμετάβλητες χαμπύλες (μαύρες). Οι θεωρητιχές χαμπύλες είναι χοντά στις αριθμητιχές χαμπύλες μαχράν του συντονισμού, όχι όμως χοντά στους συντονισμούς.

Το χυριότερο νέο στοιχείο της πρόσφατης εργασίας μας (Efthymiopoulos, Harsoula and Contopoulos 2014) είναι ότι σε μοντέλα "μαγνητιχής φιάλης" βρίσχουμε μία νέα μορφή του 3ου ολοχληρώματος χοντά σε χάθε συντονισμό, η οποία παριστά ιχανοποιητιχά τις νησίδες του συντονισμού αυτού. Πράγματι η συντονισμένη μορφή του 3ου ολοχληρώματος αποδίδει χαλά τόσο τις χαμπύλες γύρω από το χέντρο, όσο χαι τις 4 νησίδες στην περιοχή του συντονισμού (Σχ. Α΄.9). Ανάλογα ισχύουν χαι σε άλλους συντονισμούς. Πάντως σε χαμία περίπτωση δεν αποδίδονται οι χαοτιχές τροχιές ούτε με την πρώτη ούτε με την δεύτερη μορφή του 3ου ολοχληρώματος.



Σχήμα Α'.9: Οι θεωρητικές αμετάβλητες καμπύλες (κόκκινες) συντονισμού βρίσκονται κοντά στις αριθμητικές (μαύρες) τόσο μακράν των συντονισμών (καμπύλες γύρω από το κέντρο), όσο και κοντά στο συντονισμό 2:1 (καμπύλες που σχηματίζουν 2 ζεύγη νησίδων).

Είναι όμως γνωστό ότι και το χάος είναι απολύτως ντετερμινιστικό, δηλαδή οι χαοτικές τροχιές υπολογίζονται από τις εξισώσεις κινήσεως κατά ορισμένο τρόπο. Έτσι από κάθε σημείο μιας χαοτικής περιοχής στην επιφάνεια τομής περνά μία τροχιά, η οποία τέμνει πάλι την επιφάνεια τομής σε ένα ορισμένο σημείο. Μία τροχιά που αρχίζει στο σημείο 1 τέμνει την επιφάνεια τομής διαδοχικά στα σημεία 2, 3 κλπ. (Σχ. Α΄.7). Όμως τα σημεία αυτά φαίνονται διάσπαρτα και υπήρχε γενικά η εντύπωση ότι δεν είναι δυνατόν να δοθεί ένας αναλυτικός τύπος, ο οποίος να δίνει τα διαδοχικά σημεία μιας χαοτικής τροχιάς.

Μία ανατροπή της αντιλήψεως αυτής εδόθη το 1956 από το διάσημο μαθηματικό J. Moser (Moser 1956), οποίος απέδειξε ότι το 3ο ολοκλήρωμα γύρω από μία ασταθή περιοδική τροχιά συγκλίνει, δηλαδή παραμένει απολύτως σταθερό. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε με ένα ακριβή μαθηματικό τύπο τα διαδοχικά σημεία τομής κάθε τροχιάς στη χαοτική περιοχή με την επιφάνεια τομής.

Όμως έμενε ανοικτό το θέμα της περιοχής συγκλίσεως του 3ου ολοκληρώματος δηλαδή πόσο κοντά πρέπει να ευρίσκεται μία τροχιά προς την περιοδική τροχιά ώστε το 3ο ολοκλήρωμα να συγκλίνει. Στο θέμα αυτό εργάστηκαν εν μέρει διάφοροι ερευνητές (da Silva Ritter et al. 1987, Vieria and Ozorio de Almeida 1996, Ozorio de Almeida and Veiria 1997, Bongini et al. 2001, Giorgilli 2001) αλλά χωρίς οριστικά αποτελέσματα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση αυτή έχουν οι ασυμπτωτικές τροχιές. Οι τροχιές αυτές πλησιάζουν ασυμπτωτικά μία ασταθή περιοδική τροχιά όταν ο χρόνος t τείνει στο άπειρο (και αυτές λέγονται ευσταθείς ασυμπτωτικές τροχιές) ή όταν ο χρόνος τείνει στο μείον άπειρο (ασταθείς ασυμπτωτικές τροχιές) (Σχ. Α'.10).



Σχήμα Α΄.10: Μία ασταθής ασυμπτωτική τροχιά που απομακρύνεται από μια ασταθή περιοδική τροχιά.

Στη δεύτερη περίπτωση όταν ο χρόνος αυξάνει οι τροχιές απομακρύνονται από την περιοδική τροχιά. Στην επιφάνεια τομής οι ασυμπτωτικές τροχιές έχουν τα διαδοχικά σημεία τομής πάνω σε καμπύλες που ονομάζονται ασυμπτωτικές καμπύλες. Υπάρχουν 2 ασταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες που ξεκινούν από την ασταθή περιοδική τροχιά, η οποία τέμνει την επιφάνεια τομής σε ένα σημείο Ρ, προς 2 αντίθετες διευθύνσεις (Σχ. Α΄.11). Επίσης υπάρχουν 2 ευσταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες από το σημείο Ρ προς 2 αντίθετες διευθύνσεις.



Σχήμα Α΄.11: Ασταθείς (A, A') και ευσταθείς (E, E') ασυμπτωτικές καμπύλες που ξεκινούν από μία ασταθή περιοδική τροχιά (η οποία τέμνει την επιφάνεια στο σημείο P). Οι καμπύλες A και E τέμνονται για πρώτη φορά στο ομοκλινικό σημείο H_0 .

Οι ασταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες δεν τέμνουν τον εαυτό τους ή άλλη ασταθή ασυμπτωτική καμπύλη. Ομοίως δεν τέμνονται μεταξύ τους οι ευσταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες. Αλλά οι ασταθείς καμπύλες τέμνουν τις ευσταθείς καμπύλες της ίδιας τροχιάς P σε σημεία H που ονομάζονται ομοκλινικά σημεία. Το πρώτο ομοκλινικό σημείο είναι το H_0 . Οι τροχιές που ξεκινούν από τα ομοκλινικά σημεία προσεγγίζουν την περιοδική τροχιά P τόσο στο μέλλον όσο και στο παρελθόν και ονομάζονται διπλά ασυμπτωτικές καμπύλες.

Σε ορισμένα απλά συστήματα (απλές απεικονίσεις) τα διαδοχικά σημεία 1, 2, 3, ... μιας τροχιάς δίνονται από απλούς τύπους. Ορισμένοι ερευνητές (da Silva Ritter et

al. 1987) έχουν μελετήσει τέτοια συστήματα όπου οι τύποι (σειρές που παριστάνουν το 3ο ολοκλήρωμα) συγκλίνουν καθ' όλο το μήκος των ασυμπτωτικών καμπυλών (και τότε λέμε ότι η ακτίνα συγκλίσεως εκτείνεται στο άπειρο). Στις περιπτώσεις αυτές μπόρεσαν να υπολογίσουν τις ασυμπτωτικές καμπύλες και τα ομοκλινικά σημεία με ακρίβεια.

Όμως οι περιπτώσεις αυτές αποτελούν εξαιρέσεις. Εν γένει οι σειρές που παριστάνουν το 3ο ολοκλήρωμα συγκλίνουν μόνο μέχρι μία πεπερασμένη απόσταση. Σ' αυτές τις περιπτώσεις οι προηγούμενοι ερευνητές δεν κατόρθωσαν να υπολογίσουν ούτε το πρώτο ομοκλινικό σημείο (Veira and Ozorio de Almeida 1996, Bongini 2001). Αυτή η δυσκολία παρουσιάζεται κυρίως σε χαμιλτονιανά δυναμικά συστήματα.

Αυτό που κάναμε εμείς πρόσφατα (Efthymiopoulos, Contopoulos and Katsanikas 2014) ήταν να βρούμε μία νέα αναλυτική μέθοδο υπολογισμού των τροχιών, που δίνει όχι μόνο το πρώτο ομοκλινικό σημείο, αλλά πολλά ομοκλινικά σημεία που προσεγγίζουν το αρχικό σημείο της περιοδικής τροχιάς.

Η μέθοδός μας αξιοποιεί τη γνωστή από την ανάλυση τεχνική της «αναλυτικής επεκτάσεως». Η επέκταση αυτή μας επιτρέπει να υπολογίζουμε της ασυμπτωτικές τροχιές παρακάμπτοντας τις ιδιομορφίες (δηλαδή τα ανώμαλα σημεία) των εξισώσεων κινήσεως στο μιγαδικό επίπεδο του χρόνου.

Οι τύποι μας δίνουν τις διαδοχικές εικόνες κάθε σημείου μιας ασυμπτωτικής καμπύλης πάνω στην επιφάνεια τομής. Αν αρχίσουμε μία τροχιά σε ένα σημείο (1) της ασταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης σε μικρή απόσταση S_0 από την περιοδική τροχιά (Σχ. Α΄.11) η εικόνα της βρίσκεται πάνω στην ίδια ασυμπτωτική καμπύλη (σημείο 2) σε απόσταση λ περίπου από την περιοδική τροχιά κατά μήκος της καμπύλης, όπου λ είναι η μεγαλύτερη ιδιοτιμή της περιοδικής τροχιάς ($\lambda > 1$). Οι διαδοχικές εικόνες απομακρύνονται εκθετικά κατά μήκος της ασυμπτωτικής καμπύλης και εμφανίζονται τυχαία διασκορπισμένες στην περιοχή του χάους. Στην πραγματικότητα όμως η θέση τους είναι απολύτως καθορισμένη και το σημαντικό νέο στοιχείο είναι ότι η θέση αυτή δίνεται αναλυτικά από ένα μαθηματικό τύπο.



Σχήμα Α΄.12: Ασυμπτωτικές καμπύλες από την ασταθή περιοδική τροχιά Ο στο μοντέλο του μαγνητικού πεδίου της Γης. Τα μαύρα σημεία ανήκουν σε μία χαοτική τροχιά, αλλά ευρίσκονται πάνω στην ασταθή ασυμπτωτική καμπύλη από το Ο.

Με τη νέα μας μέθοδο ο υπολογισμός των ασυμπτωτικών καμπυλών γίνεται κατά τμήματα, ώστε σε κάθε τμήμα οι σειρές που χρησιμοποιούμε να είναι ακριβείς (να συγκλίνουν). Ένα παράδειγμα δίνεται από το σύστημα που παρίσταται από την χαμιλτονιανή συνάρτηση

$$H = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 - x^2) + \frac{1}{2}(\dot{y}^2 + y^2) + xy^2 + x^2y^2 + \frac{x^4}{4}$$
(1.6)

Το σύστημα αυτό έχει μια ασταθή περιοδική τροχιά στο κέντρο $(x = \dot{x} = 0)$ της επιφάνειας τομής $(y = 0, \dot{y} > 0)$. Γύρω από το κεντρικό σημείο $p(x = \dot{x} = 0)$ υπάρχει μια μεγάλη χαοτική περιοχή (Σχ. Α΄.13) όπου οι τροχιές φαίνονται εντελώς τυχαίες. Εν τούτοις μέσα στο χάος υπάρχουν οι ασυμπτωτικές καμπύλες που ξεκινούν από το ασταθές σημείο p(0,0). Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη μορφή του 3ου ολοκληρώματος βρίσκουμε την εξίσωση των θεωρητικών ασυμπτωτικών καμπυλών (U ασταθών και S ευσταθών) υπό μορφή σειράς

$$f(x,\dot{x}) = f_2 + f_3 + \dots = \sigma \tau \alpha \theta \tag{1.7}$$



Σχήμα Α'.13: Περιοχές τάξης και χάους στην επιφάνεια τομής y = 0 $(\dot{y} > 0)$ του συστήματος (6).



Σχήμα Α΄.14: Αριθμητικές ασυμπτωτικές καμπύλες (λεπτές γραμμές, S_{num}, U_{num}) και θεωρητικές καμπύλες (παχιές γραμμές, S_{anal}, U_{anal}) (a) Με τη μέθοδο Moser-Giorgilli μέχρι τάξεις 15 και 43 (b) με την νέα μας μέθοδο. Στο (b) οι θεωρητικές καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν με τις αριθμητικές καμπύλες.

Με την αρχική μέθοδο των Moser (1956) και Giorgilli (2001) οι θεωρητικές καμπύλες προσεγγίζουν τις πραγματικές (αριθμητικά υπολογιζόμενες) ασυμπτωτικές καμπύλες μέχρις ένα σημείο και μετά εκτρέπονται. Τα σημεία εκτροπής εξαρτώνται από το πλήθος των όρων της σειράς που χρησιμοποιούμε (π.χ. τάξη 15, ή τάξη 43 στο σχήμα Σχ. Α΄.14a). Όσο αυξάνουμε την τάξη των όρων του ολοκληρώματος τόσο πλησιάζουμε το πρώτο ομοκλινικό σημείο H_0 . Αλλά φθάνουμε το πολύ στα σημεία A' για την ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη και A για την ασταθή, άρα δεν φθάνουμε στο H_0 .

Χρησιμοποιώντας όμως τη νέα μέθοδό μας για τον υπολογισμό των ασυμπτωτικών καμπυλών κατορθώνουμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια τις ασυμπτωτικές καμπύλες όχι μόνο μέχρι το πρώτο ομοκλινικό σημείο H_0 , αλλά και σε απεριόριστη έκταση. Στο Σχ. Α΄.14b βλέπουμε ότι οι θεωρητικές μας καμπύλες αποδίδουν τις ταλαντώσεις των ασυμπτωτικών καμπυλών τουλάχιστον μέχρι τα ομοκλινικά σημεία H_1, H_2, H_3 και H_{-1}, H_{-2}, H_{-3} . Επομένως εκεί που στο Σχ. Α΄.13 βλέπουμε χάος και έχουμε την εντύπωση ότι η κατανομή των σημείων των τροχιών είναι τυχαία, στην πραγματικότητα έχουμε ένα πλέγμα από καμπύλες, οι οποίες υπολογίζονται ακριβώς αναλυτικά. Πάνω στις καμπύλες αυτές ευρίσκονται τα διαδοχικά σημεία των χαοτικών τροχιών, τα οποία επίσης υπολογίζονται αναλυτικά, και επομένως η διαδοχή τους δεν είναι καθόλου τυχαία. Οι τροχιές που αρχίζουν κοντά στην ασταθή περιοδική τροχιά αλλά όχι πάνω σε ασυμπτωτική καμπύλη μπορούν επίσης να υπολογισθούν αναλυτικά.

Τέλος βρήκαμε αναλυτικά περιπτώσεις ετεροκλινικών τροχιών, δηλαδή σημεία όπου η ασταθής ασυμπτωτική καμπύλη από μία ασταθή περιοδική τροχιά συναντά την ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη μιας άλλης ασταθούς περιοδικής τροχιάς Σχ. Α΄.15 (Contopoulos, Efthymiopoulos and Katsanikas 2013).



Σχήμα Α΄.15: Ετεροκλινικές τομές της ασταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης (πράσινης) μιας ασταθούς περιοδικής τροχιάς ($x_1 = 0$, $x_2 = 0$) και της ευσταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης (κόκκινης) μιας άλλης ασταθούς περιοδικής τροχιάς($x_1 = 0$, $x_2 = \pi$). Σημειώνονται επίσης οι ομοκλινικές τομές μεταξύ της ασταθούς (U) και της ευσταθούς (S) ασυμπτωτικής καμπύλης της ίδιας ασταθούς τροχιάς (0, 0).

Οι ετεροχλινικές τροχιές συνδέουν την περιοχή πλησίον της πρώτης ασταθούς περιοδικής τροχιάς με την περιοχή πλησίον της δευτέρας περιοδικής τροχιάς που εν γένει είναι εντελώς διαφορετική από την πρώτη περιοδική τροχιά (Σχ. Α΄.16). Δηλαδή οι ετεροχλινικές τροχιές είναι κατ' εξοχήν χαρακτηριστικά του εκτεταμένου χάους (και όχι μόνον του τοπικού χάους). Αυτές οι τροχιές υπολογίζονται για πρώτη φορά αναλυτικά.



Σχήμα Α΄.16: Μία ετεροκλινική τροχιά που ξεκινά ασυμπτωτικά κοντά στην ασταθή τροχιά P₁ και καταλήγει ασυμπτωτική κοντά στην ασταθή τροχιά P₂.

Αναφορές

1. Bongini, L., Bazzani, A. and Turchetti, G.: Phys. Rev. Sp. Topics 4, 114201, 2001.

- 2. Contopoulos, G.: Order and Chaos in Dynamical Astronomy, Springer, Berlin (2002).
- 3. Contopoulos, G., Efthymiopoulos, C. and Katsanikas, M.: Proc. Hellenic Astron. Conf., 26, 2013.
- 4. Da Silva Ritter, G.I., Ozorio de Almeida, A.M. and Douady, R.: Physica D 29, 181.
- 5. Efthymiopoulos, C., Contopoulos, G. and Katsanikas, M.: Cel.. Mech. Dyn. Astron. (accepted) 2014.
- 6. Efthymiopoulos, C., Harsoula, M. and Contopoulos, G.: 2014 (submitted).
- 7. Giorgilli, A.: Disc. Cont. Dyn. Sys. 7, 885, 2001.
- 8. Moser, J.: Commun. Pure Applied Math. 9, 673, 1956.
- 9. Ozorio de Almeida, A.M. and Vieira, W.M.: Phys. Lett. A. 227, 298, 1997.
- 10. Vieira, W.M and Ozorio de Almeida, A.M.: Physica D 90, 9, 1996.

Β΄ Η δομή των γαλαξιακών ράβδων και η θεωρία του Χάους

Πάνος Πάτσης

Ο Γαλαξίας μας είναι ένας "ραβδωτός" σπειροειδής γαλαξίας. Ανήχει δηλαδή στον μορφολογικό τύπο των δισκοειδών γαλαξιών που διαθέτουν μια κεντρική ράβδο και σπείρες που εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η ράβδος του Γαλαξία παρατηρούμενη από το πλάι είναι κιβωτιόσχημη και εμφανίζει έναν σχηματισμό "Χ". Αυτό είναι ένα σύνηθες χαρακτηριστικό πολλών άλλων γαλαξιών του ίδιου μορφολογικού τύπου. Η ερμηνεία του φαινομένου βασίζεται στη θεωρία των τροχιών και στο ρόλο μη-γραμμικών δυναμικών διεργασιών οι οποίες υποστηρίζουν τη δόμηση της ράβδου και την εν γένει μορφολογία των ραβδωτών σπειροειδών γαλαξιών.

Β΄.1 Εισαγωγή

Ο Ήλιος είναι ένας από τους 200 δισεκατομμύρια αστέρες του Γαλαξία μας οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με δυνάμεις βαρύτητας. Οι περισσότεροι από αυτούς σχηματίζουν έναν αστρικό δίσκο και περιστρέφονται γύρω από το κέντρο του. Μία ακτίνα φωτός χρειάζεται περίπου 100.000 χρόνια για να φτάσει από τη μία άκρη του στην άλλη περνώντας από το κέντρο του συστήματος. Μόλις τον 20ο αιώνα έγινε αντιληπτό ότι ο Γαλαξίας είναι ένας από τους εκατοντάδες δισεκατομμύρια γαλαξίες που παρατηρούμε στο Σύμπαν και ότι μορφολογικά ανήκει στην κατηγορία των δισκοειδών γαλαξιών. Η δομή του είναι παρόμοια με αυτή δισεκατομμυρίων άλλων γαλαξιών αυτού του τύπου. Οι αστέρες των δίσκων περιστρέφονται διαφορικά, δηλαδή οι εγγύτεροι αστέρες στο κέντρο περιστρέφονται ταχύτερα. Ο Ήλιος για παράδειγμα κινείται γύρω από το κέντρο του Γαλαξία μας σε μία περίπου κυκλική τροχιά με περίοδο 226 εκατομμυρίων ετών, σε μια μέση ακτίνα 27.000 ετών φωτός.

Στις κεντρικές περιοχές των γαλαξιακών δίσκων υπάρχει σχεδόν πάντα μια πιο πυκνή περιοχή από αστέρες που ονομάζεται "σφαιροειδές του πυρήνα" (bulge). Οι δίσκοι και τα σφαιροειδή των πυρήνων περιβάλλονται από την άγνωστης φύσης "σκοτεινή ύλη", η μάζα της οποίας είναι περισσότερη από τη συνολική μάζα όλων των αστέρων μαζί και εξακολουθεί να υπάρχει ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις από τα κέντρα των γαλαξιών, εκεί που δεν παρατηρούνται αστέρες.

Μέσα σε αυτό το περιβάλλον, η δυναμική των αστέρων, αλλά και του αερίου διαμορφώνει τη μορφολογία των δίσκων η οποία χαρακτηρίζεται από την παρουσία σπειρών και ράβδων, όπως στην περίπτωση του γαλαξία NGC 1097 (Σχ. Β΄.1). Εάν μπορούσαμε να παρατηρήσουμε τον Γαλαξία μας κάθετα στην οπτική μας ακτίνα, θα βλέπαμε μια παρόμοια μορφολογία.

Αυτή η μορφολογία γίνεται εμφανής όταν η γωνία κλίσης του δίσκου ως προς το επίπεδο του ουρανού είναι μικρή. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν ο προσανατολισμός του δίσκου είναι τέτοιος ώστε να τον παρατηρούμε από την κόψη, το μόνο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει είναι η κεντρική περιοχή της ράβδου που εξέχει του ισημερινού επιπέδου του δίσκου (Σχ. Β΄.2). Οι έρευνες των τελευταίων 20 ετών έδειξαν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η μορφολογία της κεντρικής περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία της ράβδου και όχι ενός σφαιροειδούς του πυρήνα.



Σχήμα Β΄.1: Ειχόνα του γαλαξία NGC 1097, από την Digitized Sky Survey του Space Telescope Science Institute, στην οποία γίνεται φανερή η παρουσία της ράβδου χαι των σπειρών.

Ως εκ τούτου παρατηρούμε μια κιβωτιόσχημη και όχι μια σφαιροειδή δομή, η οποία πολλές φορές μάλιστα εμφανίζει στο μέσον ένα ελάχιστο επιφανειακής λαμπρότητας προσομοιάζοντας το σχήμα ενός φιστικιού (peanut-shaped bulge). Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις τέτοιων μορφολογιών, εντός της κεντρικής περιοχής διακρίνεται και η δομή ενός "Χ". (Για λεπτομέρειες βλ. π.χ. Falcón-Barroso & Knapen 2013). Η εξήγηση αυτών των μορφολογικών χαρακτηριστικών παραμένει ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα θέματα της σύγχρονης Γαλαξιακής Δυναμικής.



Σχήμα Β'.2: Πλάγιες όψεις δύο ραβδωτών δισχοειδών γαλαξιών. Ο προσανατολισμός των δίσχων τους ως προς την αχτίνα παρατήρησης μας επιτρέπει να δούμε την δομή των ράβδων μαχριά από το ισημερινό επίπεδο του γαλαξία. Επάνω, ο γαλαξίας NGC 4710, όπως παρατηρήθηχε από το Hubble Space Telescope (δελτίο τύπου STScI-2009-30). Είναι εμφανής η παρουσία ενός σχηματισμού "X". Κάτω, ο γαλαξίας NGC 5746 από την Digitized Sky Survey του Space Telescope Science Institute, όπου παρατηρούμε την χιβωτιόσχημη δομή με μορφολογία φιστιχιού (peanut shaped bulge).

Η Ερμηνεία της κιβωτιόσχημης δομής: Η θεωρία που έχει επικρατήσει μέχρι τώρα για την ερμηνεία της δομής των κεντρικών περιοχών των γαλαξιακών δίσκων

είναι αυτή που δίδεται από τη θεωρία των τροχιών και μπορεί να συνοψισθεί ως εξής: Στο βαρυτικό πεδίο που δημιουργεί μια περιστρεφόμενη τριδιάστατη ράβδος, οι τροχιές των αστέρων που εκτελούν δύο κάθετες ταλαντώσεις καθώς συμπληρώνουν μια περιστροφή γύρω από το κέντρο του συστήματος (κάθετος συντονισμός 2:1), μπορούν να υποστηρίξουν δομές σαν κι αυτές που παρατηρούμε στο Σχ. Β΄.2).

Σε ένα δυναμικό περιστρεφόμενης ράβδου μπορούμε να υπολογίσουμε οικογένειες περιοδικών τροχιών και την ευστάθειά τους. Οι ευσταθείς περιοδικές τροχιές παγιδεύουν γύρω τους ημι-περιοδικές τροχιές με αποτέλεσμα οι αστέρες που ακολουθούν αυτές τις ημι-περιοδικές τροχιές να ενισχύουν τη δομή μιας δισδιάστατης ή μιας τριδιάστατης ράβδου (Contopoulos 1981, Pfenniger 1984, Patsis et al. 2002). Εάν y είναι ο μεγάλος άξονας της ράβδου και z ο άξονας κάθετος στο γαλαξιακό επίπεδο, τότε οι προβολές στο επίπεδο (y, z) των τριδιάστατων ευσταθών περιοδικών τροχιών που ενισχύουν το κομμάτι της ράβδου που εξέχει χαρακτηριστικά από το ισημερινό επίπεδο του γαλαξιακού δίσκου είναι όπως αυτές που φαίνονται στο Σχ. Β΄.3. Ο σχηματισμός "Χ" δημιουργείται κατά μήκος διαδοχικών μεγίστων αποστάσεων των τροχιών αυτών από το γαλαξιακό επίπεδο.

Ο ρόλος του Χάους: Παρόλο που εν γένει ο μηχανισμός της παγίδευσης ημιπεριοδικών τροχιών εξηγεί την τρισδιάστατη δομή των ράβδων, σε περιπτώσεις ισχυρών ράβδων, οι τροχιές των οικογενειών που χτίζουν το εσωτερικό τους μέρος είναι ασταθείς σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών. Μάλιστα, στην περίπτωση αυτή οι τροχιές είναι "μιγαδικά ασταθείς", έχουν δηλαδή ένα είδος αστάθειας κατά το οποίο η ευστάθεια της μητρικής οικογένειας δεν κληρονομείται σε διακλαδιζόμενες οικογένειες (βλ. π.χ. Contopoulos & Magnenat 1985).



Σχήμα Β΄.3: Προβολές περιοδικών τροχιών που δημιουργούν τον σχελετό των κιβωτιόσχημων κεντρικών περιοχών και ευνοούν το σχηματισμό των "X" που παρατηρούνται στους ραβδωτούς δισκοειδείς γαλαξίες (Patsis et al. 2002). Το ισημερινό επίπεδο του δίσκου είναι το z = 0.

Σε δύο διαδοχικές εργασίες το 2014 (Patsis & Katsanikas 2014a,b) μελετήσαμε τη συμβολή των χαοτικών τροχιών στη διατήρηση των κιβωτιόσχημων δομών και των "X". Στη μελέτη μας χρησιμοποιήσαμε τα δυναμικά ενός δίσκου Miyamoto, για τον τρισδιάστατο δίσκο, μια σφαίρα Plummer για το σφαιροειδές του πυρήνα και μια ράβδο Ferrers για την ράβδο. Το δυναμικό μας είναι το άθροισμα των τριών αυτών όρων και περιστρέφεται έτσι ώστε ο συντονισμός της συμπεριστροφής να βρίσκεται σε ακτίνα 6.31 kpc. Η οικογένεια στην οποία ανήκουν οι τρισδιάστατες τροχιές που απεικονίζονται στο Σχ. Β΄.3, διακλαδίζεται από την βασική οικογένεια ελλειπτικών επίπεδων τροχιών (γνωστή ως οικογένεια x_1 , Contopoulos 1981) στον κάθετο συντονισμό 2:1 ως ευσταθής και την έχουμε ονομάσει " x_1v_1 " (Skokos et al. 2002). Όταν αυτές οι περιοδικές τροχιές είναι ευσταθείς η τρισδιάστατη ράβδος δομείται από τις ημιπεριοδικές τροχιές που παγιδεύονται γύρω τους. Όμως εν γένει, οι τροχιές της οικογένειας x_1v_1 μετά από μια κρίσιμη ενέργεια, σχετικά κοντά στην ενέργεια διακλάδωσης, γίνονται μιγαδικά ασταθείς. Παρόλα αυτά, οι μελέτες μας έδειξαν ότι υπάρχουν τροχιές στη γειτονιά μιγαδικά ασταθείν περιοδικών τροχιών, οι οποίες αντί να διαχέονται απότομα στον φασικό χώρο μπορούν να ενισχύσουν τις δομές που μελετούμε για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συχνά για δεκάδες δυναμικούς χρόνους. Αυτή η συμπεριφορά είναι γνωστή ως "κολλητικότητα" (stickiness) (Contopoulos & Harsoula 2010). Χαοτικές τροχιές που εμφανίζουν το φαινόμενο της κολλητικότητας συμπεριφέρονται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα οιονεί ως οργανωμένες, παραμέ-νοντας παγιδευμένες σε συγκεκριμένες περιοχές του φασικού χώρου και ενισχύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο δομές που παρατηρούμε στους γαλαξίες.

Ένα άλλο ερώτημα το οποίο απασχολεί τους ερευνητές που ασχολούνται με την τρισδιάστατη δομή των γαλαξιαχών ράβδων είναι το γεγονός ότι σε άλλες περιπτώσεις οι αχτίνες του "X" φαίνονται να διέρχονται από το χέντρο του συστήματος, ενώ σε άλλες όχι (Bureau et al. 2006). Οι Bureau et al. (2006) ονομάζουν αυτές τις δύο κατηγορίες "CX" (centered) και "OX" (off-centered) αντίστοιχα (Σχ. Β΄.4). Στη μελέτη μας, ο μηχανισμός που βασίζεται στις τροχιές x_1v_1 δημιουργεί "X" τύπου "OX" (Σχ. Β΄.3), είτε αποχλειστικά από ημιπεριοδικές τροχιές, είτε με τη συμβολή χολλητιχών χαοτικών τροχιών στη γειτονιά μιγαδικά ασταθών περιοδικών τροχιών αυτής της οιχογένειας. Η δυνατότητα υποστήριξης "CX" δομών αναλύθηχε στην εργασία Patsis & Katsanikas (2014a).



Σχήμα Β΄.4: Σχηματική αναπαράσταση της "CX" μορφολογίας (a) και της "OX" μορφολογίας (b) που παρατηρούνται στις περιστρεφόμενες τρισδιάστατες ράβδους.

Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι προφίλ τύπου "CX" μπορούν να υποστηριχθούν:

 Από τρισδιάστατες ημιπεριοδικές τροχιές γύρω από την επίπεδη ευσταθή περιοδική τροχιά x₁ οι οποίες βρίσκονται επί αναλλοίωτων τόρων κοντά στις αρχικές συνθήκες περιοδικών τροχιών της ασταθούς περιοδικής τροχιάς x₁v₂. Η οικογένεια x1v2 διακλαδίζεται επίσης από την οικογένεια x1 στην περιοχή του κάθετου συντονισμού 2:1, έχει το κατάλληλο σχήμα για να υποστηρίξει "CX" προφίλ (οι πλάγιες προβολές της έχουν σχήμα "∞"), αλλά είναι ασταθής. Παρόλα αυτά υπάρχουν τροχιές επί των αναλλοίωτων τόρων της x₁ που μπορούν να ενισχύσουν στις πλάγιες προβολές το σχήμα "∞". Οι τόροι αυτοί βρίσκονται καθώς διαταράσσουμε τις αρχικές συνθήκες της x₁ πλησιάζοντας αυτές τις x₁v₂.

- 2. Από ημιπεριοδικές τροχιές παγιδευμένες γύρω από μια οικογένεια πολλαπλότητας 2 (κλείνουν μετά από δύο τομές με το επίπεδο τομής y = 0) την οποία ονομάζουμε x_1mul_2 . Η μορφολογία αυτών των τροχιών φαίνεται στο Σχ. 5. Πρόκειται για μια οικογένεια που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην εργασία Patsis & Katsanikas (2014a) και υπάρχει ως ευσταθής σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών. Η ίδια δομή υποστηρίζεται και από χαοτικές τροχιές κολλητικές στους αναλλοίωτους τόρους της x_1mul_2 . Τροχιές παρόμοιας μορφολογίας βρέθηκε από τους Portail et al. (2015) να δομούν κιβωτιόσχημες τρισδιάστατες ράβδους σε προσομοιώσεις Ν-σωμάτων, κάτι που υποδεικνύει τη μεγάλη σημασία που μπορεί να έχουν στη Δυναμική τους.
- 3. Апо́ хаотіхές трохіές отη үεітоνіа́ тης x_1v_2 . Оі аотаθείς πολλαπλότητες της x_1v_2 περιελίσσονται γύρω από τους τόρους των τροχιών x_1v_1 και της συμμετρικής της ως προς το ισημερινό επίπεδο x_1v_1' . Η μορφολογία των χαοτικών τροχιών στη γειτονιά της x_1v_2 μπορεί να είναι για δεκάδες δυναμικούς χρόνους υβριδική μεταξύ αυτής της x_1v_1 και της x_1v_2 . Μπορεί δηλαδή να υποστηρίζουν δηλαδή άλλοτε ένα "ΟX" και άλλοτε ένα "CX" προφίλ. Στο Σχ.6 βλέπουμε την (y, z)προβολή μιας τέτοιας χαοτικής υβριδικής τροχιάς στη γειτονιά της περιοδικής x_1v_2 (a) και την (z, pz) προβολή της ασταθούς πολλαπλότητας της x_1v_2 (p_z είναι η γενικευμένη ορμή στη διεύθυνση z). Τα κέντρα των τόρων που περιβάλλουν τις περιοδικές τροχιές x_1v_1 και x_1v_1' , βρίσκονται στα κέντρα των λοβών που δημιουργούνται εκατέρωθεν της θέσης της περιοδικής τροχιάς (σημειώνεται με "x" στη θέση $(z, p_z) \approx (0, 0.2)$.)



Σχήμα Β΄.5: Οι τρεις προβολές μιας ημι-περιοδικής τροχιάς παγιδευμένης γύρω από μια ευσταθή περιοδική τροχιά x_1mul_2 . Από αριστερά προς τα δεξιά (x, y), (x, z), (y, z). Η ράβδος εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y. Η προβολή (y, z) δείχνει πως αυτές οι τροχιές μπορούν να υποστηρίζουν ένα "CX" προφίλ.



Σχήμα Β΄.6: (a) H(y,z) προβολή μιας χαοτιχής τροχιάς στη γειτονιά της x_1v_2 με υβριδιχή μορφολογία που μπορεί να υποστηρίξει ένα "CX" προφίλ. (b) $H(z, p_z)$ προβολή της ασταθούς πολλαπλότητας της x_1v_2 (η θέση της σημειώνεται με "×"). Οι τελείες δείχνουν τα 18 πρώτα σημεία της τροχιάς που δίδεται στο (a) επί της τομής Poincaré y=0.

Κιβωτιόσχημες ισόφωτες σε κατόψεις ραβδωτών σπειροειδών γαλαξιών: Οι χαοτικές τροχιές που είναι κολλητικές στους τόρους των x_1v_1 και x_1v_1' αποδείχθηκε ότι είναι σημαντικές και για έναν ακόμα λόγο. Οι τροχιές αυτές, ειδικά με ενέργειες στην περιοχή του κάθετου συντονισμού 2:1 έχουν κιβωτιόσχημες προβολές επί του ισημερινού επιπέδου. Υποστηρίζουν δηλαδή ταυτοχρόνως χιβωτιόσχημες μορφολογίες και στις κατόψεις των μοντέλων (προβολές επί του ισημερινού επιπέδου) και στις προβολές από το πλάι. Έτσι δίδεται απάντηση σε ένα άλλο ανοιχτό ερώτημα της μορφολογίας των ράβδων, δηλαδή στην εμφάνιση χιβωτιόσχημων ισόφωτων στις ειχόνες ράβδων που παρατηρούνται χάθετα στην οπτιχή αχτίνα (Erwin & Debattista 2013). Στις κεντρικές περιοχές δεν υπάρχουν ακτινικοί συντονισμοί που να δικαιολογούν χιβωτιόσχημες τροχιές επί του γαλαξιαχού επιπέδου. Το χιβωτιόσχημα σχήμα των προβολών των τρισδιάστατων χαοτικών τροχιών που είναι κολλητικές στους τόρους των x_1v_1 και x_1v_1 δίνει απάντηση σε αυτό το πρόβλημα. Στο Σχ. Β'.7a και Σχ. Β'.7b παρατηρούμε τις προβολές (x, y) και (y, z) αντίστοιχα μιας χαρακτηριστικής περίπτωσης μιας τέτοιας τροχιάς καθώς και τις (p_x, x) και (p_z, z) προβολές της τετραδιάστατης τομής Poincaré στα Σχ. Β΄.7c και Σχ. Β΄.7d αντίστοιχα. Ο χρόνος ολοκλήρωσης αντιστοιχεί σε 100 περιόδους της επίπεδης τροχιάς της βασικής οικογένειας x_1 . Στα (a) και (b) με πιο έντονες γραμμές είναι σχεδιασμένες οι τροχιές κατά το πρώτο 1/10 του χρόνου ολοκλήρωσης.

Β΄.2 Συμπεράσματα

Οι ράβδοι των γαλαξιών, όπως και η ράβδος του δικού μας Γαλαξία, υποστηρίζονται τόσο από οργανωμένες όσο και από χαοτικές τροχιές. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι τροχιές που σχετίζονται με τις οικογένειες των περιοδικών τροχιών x_1v_1 και x_1v_1 , τις πρώτες τρισδιάστατες οικογένειες δηλαδή που διακλαδίζονται από την βασική οικογένεια επίπεδων ελλειπτικών τροχιών x_1 . Οι οικογένειες αυτές μπορούν να προσφέρουν στο σύστημα οργανωμένες τροχιές παγιδευμένες στη γειτονιά των περιοδικών τροχιών τους και να υποστηρίξουν κιβωτιόσχημες μορφολογίες όπως αυτές που υπάρχουν στους γαλαξιακούς δίσκους που παρατηρούμε από την κόψη. Βρήκαμε ότι ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ενισχυθεί για δεκάδες δυναμικούς χρό-



Σχήμα Β'.7: Χαοτικές τροχιές, κολλητικές στους τόρους των x_1v_1 και x_1v_1' . (a) Η προβολή επί του ισημερινού επιπέδου (x, y). (b) Η πλάγια προβολή (y, z), όπου y ο μεγάλος άξονας της ράβδου. (c) Η (p_x, x) προβολή και (d) η (p_z, z) προβολή των τετραδιάστατων τομών Poincaré. Οι θέσεις των περιοδικών τροχιών x_1 , x_1v_1 και x_1v_1' σημειώνονται με βέλη.

νους σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και από χαοτικές κολλητικές τροχιές στη γειτονιά περιοδικών τροχιών αυτής της οικογένειας όταν έχει γίνει μιγαδικά ασταθής. Αυτά τα προφίλ είναι τύπου "ΟΧ", οι πτέρυγες του "Χ" δεν περνάνε από το κέντρο του δίσκου. Η ύπαρξη των οικογενειών x_1v_1 και x_1v_1' είναι όμως σημαντική γενικότερα για τη διαμόρφωση του φασικού χώρου του μοντέλου μας. Οι τόροι που τις περιβάλλουν καταλαμβάνουν έναν σημαντικό όγκο του φασικού χώρου και οι χαοτικές τροχιές που είναι κολλητικές σε αυτούς υποστηρίζουν μορφολογικά χαρακτηριστικά. Το κυριότερο από αυτά είναι οι κιβωτιόσχημες προβολές στις κεντρικές περιοχές των ράβδων όταν παρατηρούνται κάθετα στην οπτική ακτίνα.

Εκτός από προφίλ τύπου "ΟΧ" έχουμε και προφίλ τύπου "CX" στα οποία οι πτέρυγες του "Χ" φαίνονται να περνάνε από το κέντρο των δίσκων. Το γεγονός ότι έχουμε δύο τύπους "Χ" προφίλ στους γαλαξίες που παρατηρούμε από το πλάι, υποδηλώνει την ύπαρξη δύο διαφορετικών μηχανισμών υποστήριξης αυτών των δομών. Βρήκαμε ότι η μορφολογία ημιπεριοδικών τροχιών που βρίσκονται γύρω από τόρους της x_1 , όταν έχει εισέλθει στο σύστημα η δεύτερη οικογένεια που διακλαδίζεται από αυτή στον κάθετο συντονισμό 2:1, η x_1v_2 , προσομοιάζει αυτή προφίλ τύπου "∞" καθώς οι αρχικές τους συνθήκες πλησιάζουν αυτές της x_1v_2 . Αυτές οι τροχιές υποστηρίζουν προφίλ τύπου "CX". Ένας δεύτερος μηχανισμός υποστήριξης προφίλ τύπου "CX" είναι η παγίδευση οργανωμένων τροχιών γύρω από τροχιές μιας νέας σημαντικής οικογένειας της οικογένειας $x_1 mul_2$ (Σχ. Β΄.5). Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι δομές όπως αυτές των τριδιάστατων γαλαξιακών ράβδων μπορούν να υποστηριχθούν τόσο από οργανωμένες όσο και από χαοτικές τροχιές. Η ύπαρξη χαοτικών τροχιών δεν καταστρέφει δομές αλλά σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να τις δημιουργήσει.

Αναφορές

- 1. Bureau M., Aronica G., Athanassoula E. Et al., 2006, Month. Not. R. Astr. Soc. 370, 753
- 2. Contopoulos G., 1981, Astron. Astrophys. 153, 44
- 3. Contopoulos G., Harsoula M., 2010, Celest. Mech. Dyn. Ast. 107, 77
- 4. Contopoulos G., Magnenat P., 1985, Celest. Mech. 37, 387
- 5. Erwin P., Debattista V., 2013, Month. Not. R. Astr. Soc., 431, 3060
- 6. Falcón-Barroso J., Knapen J. H. (eds), 2013, "Secular Evolution of Galaxies", Cambridge, UK, Cambridge University Press
- 7. Patsis P.A., Katsanikas M., 2014a, Month. Not. R. Astr. Soc. 445, 3525
- 8. Patsis P.A., Katsanikas M., 2014b, Month. Not. R. Astr. Soc. 445, 3546
- 9. Patsis P.A., Skokos Ch., Athanassoula E., 2002, Month. Not. R. Astr. Soc. 337, 578
- 10. Pfenniger, D., 1984, Astron. Astrophys. 134, 373
- 11. Portail M., Wegg C., Gerhard O., 2015, Month. Not. R. Astr. Soc. 450L, 66

Γ΄ Η αναζήτηση Τρωικών Εξω-πλανητών

Χρήστος Ευθυμιόπουλος

Μία από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις της αστρονομίας κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες είναι η ύπαρξη εξω-πλανητών, πλανητών δηλαδή που περιστρέφονται γύρω από αστέρια διαφορετικά από το κεντρικό αστέρι του δικού μας πλανητικού συστήματος: τον Ήλιο. Μέχρι σήμερα έχουν επιβεβαιωθεί παρατηρησιακά περίπου δύο χιλιάδες εξω- πλανήτες στο Γαλαξία μας. Ωστόσο, με στατιστικές μεθόδους εκτιμάται ότι υπάρχουν δισεκατομμύρια εξω-πλανήτες, και περίπου 200 εκατομμύρια πλανήτες του μεγέθους της Γης. Εξ αυτών, εκτιμάται ότι ένα σημαντικό ποσοστό βρίσκονται στη λεγόμενη "κατοικήσιμη ζώνη", σε απόσταση, δηλαδή, από το οικείο αστέρι και με τέτοια τροχιακά χαρακτηριστικά ώστε το νερό να μπορεί να υπάρξει σε υγρή μορφή στην επιφάνεια του πλανήτη. Ο ορισμός αυτός θέτει και τις βασικές προϋποθέσεις για την αναζήτηση της ύπαρξης ζωής σε άλλους πλανήτες.

Παρά το μικρό, σχετικά, πλήθος των παρατηρήσεων, μπορούν ήδη να εξαχθούν ορισμένα βασικά συμπεράσματα σχετικά με τα διαφορετικά ήδη των εξω-πλανητών και των παρατηρούμενων εξω-ηλιακών πλανητικών συστημάτων, καθώς και τη σύγκριση με το δικό μας ηλιακό σύστημα. Στην πρόσφατη προσκεκλημένη παρουσίασή του στο συνέδριο της Ελληνικής Αστρονομικής Εταιρείας στη Θεσσαλονίκη, ο A. Morbidelli, ένας από τους βασιχούς ερευνητές στο θέμα της δημιουργίας των εξω-πλανητών διεθνώς, συνόψισε τα συμπεράσματα της έρευνας κατά τα τελευταία χρόνια. Ένα βασικό αποτέλεσμα που φαίνεται να προκύπτει είναι ότι το δικό μας ηλιακό σύστημα δεν αποτελεί τυπική περίπτωση. Στη μεγάλη τους πλειοψηφία, τα σενάρια σχηματισμού των πλανητικών συστημάτων δεν επιτρέπουν την συνύπαρξη περισσοτέρων από ένα γιγάντιο αέριο πλανήτη στο ίδιο σύστημα, όπως ο Δίας και ο Κρόνος στο δικό μας σύστημα. Αντιθέτως, ευνοούν τη δημιουργία πλανητών ενδιάμεσου μεγέθους όπως ο Ποσειδώνας (Neptune-sized planets), και μάλιστα, ευρισκόμενων συχνά σε σχέση τροχιακού συντονισμού μέσης κίνησης. Με τον όρο αυτό εννοούμε ότι οι περίοδοι περιφοράς των πλανητών γύρω από το αστέρι ικανοποιούν μια σχέση ρητών αριθμών. Ο συνηθέστερα απαντώμενος συντονισμός είναι της μορφής 2:1, δηλαδή δύο πλανήτες περιφέρονται γύρω από το αστέρι κατά τρόπο ώστε η περιφορά του εσωτερικού πλανήτη να γίνεται με διπλάσιο ρυθμό απ' ότι η περιφορά του εξωτερικού πλανήτη. Εκτιμάται ότι περίπου 40% των εξω-ηλιακών πλανητικών συστημάτων περιέχουν πλανήτες στη κατάσταση συντονισμού μέσης κίνησης 2:1.

Ένα ερώτημα, τώρα, είναι αν μπορούμε να έχουμε ζεύγη εξω-πλανητών και σε άλλους συντονισμούς. Στο ΚΕΑΕΜ μελετούμε ιδιαίτερα την περίπτωση του συντονισμού 1:1, δηλαδή δύο εξω-πλανητών οι οποίοι συμπεριστρέφονται με την ίδια περίοδο περιφοράς γύρω από το αστέρι τους. Τέτοιοι πλανήτες δεν έχουν ακόμη ταυτοποιηθεί παρατηρησιακά. Ωστόσο η ύπαρξή τους έχει προβλεφθεί σε διάφορες θεωρητικές δυναμικές μελέτες καθώς και αριθμητικές προσομοιώσεις σχηματισμού εξω-πλανητών. Σημειώνεται όμως ότι η παρατηρησιακή ανίχνευση συμπεριστρεφόμενων εξω-πλανητών ενέχει ιδιαίτερες τεχνικές δυσκολίες. Επομένως, είναι απόλυτα ανοικτό το ερώτημα αν τέτοιοι πλανήτες όντως υπάρχουν και απλώς έχουν διαφύγει της ως τώρα παρατηρησιακής δυνατότητας ανίχνευσης.

Κατά τα τελευταία δύο χρόνια μελετήσαμε ιδιαίτερα το σενάριο που ευνοείται στις προσομοιώσεις, σύμφωνα με το οποίο ένας μικρός (του μεγέθους του Αρη ή το

πολύ της Γης) εξω-πλανήτης συνυπάρχει στην περιοχή του συντονισμού 1:1 με ένα γιγάντιο πλανήτη, π.χ. του μεγέθους του Δία. Εάν όντως υλοποιείται το σενάριο αυτό στη φύση, το πιο πιθανό είναι ότι ο μικρός εξω-πλανήτης έχει είτε δημιουργηθεί in situ, είτε συλληφθεί (πρόσκαιρα ή πιο μόνιμα) στη λεγόμενη περιοχή των λικνίσεων, των ταλαντωτικών δηλαδή κινήσεων που γίνονται, σε σχέση με τη θέση του πρωτεύοντος αέριου γίγαντα, γύρω από τα περίφημα σημεία ισορροπίας του Lagrange, L_4 και L_5 . Ο Lagrange ανακάλυψε τα σημεία αυτά το 1772, και έκτοτε, η μελέτη της δυναμικής στη γειτονιά τους προσέλχυσε το ενδιαφέρον πολλών μελετητών στην αστρονομία και τα μαθηματικά. Τα σημεία Lagrange βρίσκονται 60° μοίρες δεξιά και αριστερά του πρωτεύοντος πλανήτη, και, για αρκούντως μικρή μάζα του τελευταίου, είναι ευσταθή. Τούτο σημαίνει ότι αν ένα δεύτερο μικρό σώμα τοποθετηθεί σε κάποια μικρή εκτροπή από τα σημεία Lagrange, η κίνηση του μικρού σώματος παραμένει σε λίκνιση γύρω από αυτά και το σώμα δεν εκτίθεται στον κίνδυνο διαφυγής. Τότε λέμε ότι το μικρό σώμα είναι ένας Τρωικός συνοδός του πρωτεύοντος πλανήτη.

Στο δικό μας ηλιακό σύστημα, το πιο γνωστό παράδειγμα τρωικών συνοδών είναι οι τρωικοί αστεροειδείς του πλανήτη Δία. Ο πληθυσμός των τρωικών αστεροειδών ανακαλύφθηκε τον προηγούμενο αιώνα, αλλά σήμερα εκτιμάται ότι είναι συγκρίσιμος κατά τάξη μεγέθους με τον πληθυσμό της κύριας ζώνης των αστεροειδών. Ο τελευταίος κείται μεταξύ των τροχιών του Άρη και του Δία και συνιστά το πιο σημαντικό πληθυσμό στο ηλιακό μας σύστημα. Στη δική μας μελέτη, σε συνεργασία με τους ερευνητές Rocio Paez και Ugo Locatelli (Μαθηματικό Τμήμα Παν/μίου Ρώμης Tor Vergata), εξετάσαμε ιδιαίτερα το ερώτημα του πώς επηρεάζεται η ευστάθεια υποθετικών τρωικών εξω-πλανητών από ένα σημαντικό φαινόμενο της τοπικής δυναμικής, δηλ. το φαινόμενο των δευτερευόντων συντονισμών.

Η χίνηση του υποθετιχού τρωιχού εξω-πλανήτη χαραχτηρίζεται από τρεις βασιχές περιόδους: α) η λεγόμενη "βραχεία" περίοδος, είναι περίπου ίση με τη περίοδο περιφοράς γύρω από το αστέρι, β) η "συνοδιχή" περίοδος είναι η περίοδος της λίχνισης γύρω από τα σημεία Lagrange, χαι γ) η "αιώνια" περίοδος αφορά την πολύ αργή μετάπτωση την οποία εχτελεί το περίχεντρο της τροχιάς του εξω-πλανήτη. Εχτός από αυτές τις βασιχές περιόδους, ωστόσο, υπάρχουν χαι άλλες περιοδιχές χινήσεις που επηρεάζουν την ευστάθεια του εξω- πλανήτη. Ειδιχότερα, αν δεχθούμε ότι ο εξωπλανήτης βρίσχεται σε ένα περιβάλλον με περισσότερους από ένα χύριους πλανήτες, τότε οι τροχιές των ίδιων των πλανητών διαταράσσουν η μία την άλλη. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει χαι στο διχό μας ηλιαχό σύστημα, π.χ. το περιήλιο της Γης εχτελεί μια σχεδόν περιοδιχή χίνηση που οφείλεται στην επίδραση των υπόλοιπων πλανητών στο ηλιαχό σύστημα. Το ερώτημα αυτό, της λεγόμενης "αιώνιας εξέλιξης" (secular evolution) των ηλιαχών συστημάτων είναι από τα πιο χεντριχά σε όλη την ιστορία της Ουρανίου Μηχανιχής.

Στην περίπτωση των υποθετικών τρωικών εξω-πλανητών, δείχνουμε στη μελέτη μας ότι η ευστάθεια επηρεάζεται καθοριστικά από την ύπαρξη συντονισμών (ρητών δηλαδή σχέσεων) μεταξύ των τριών βασικών περιόδων της τρωικής κίνησης, αλλά και άλλων περιόδων που οφείλονται στις αιώνιες κινήσεις των πλανητών του εκάστοτε θεωρούμενου εξω-πλανητικού συστήματος.

Στο ακόλουθο Σχ. Γ΄.1, (Paez and Efthymiopoulos 2015, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy 121, 139) βλέπουμε ένα παράδειγμα υπολογισμού τέτοιων συντονισμών, και της επίδρασής τους στην ευστάθεια. Το αριστερό πλαίσιο δείχνει έναν υπολογισμό του λεγόμενου χάρτη ευστάθειας (stability map) στην περιοχή των τρωικών κινήσεων ενός υποθετικού συστήματος στο οποίο ο πρωτεύων γίγαντας έχει μάζα ίση με 0.0041 της μάζας του οικείου αστέρα. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε την τιμή της μέγιστης γωνίας λίκνισης του υποθετικού τρωικού εξω-πλανήτη, ενώ στον κάθετο άξονα έχουμε τη τιμή της λεγόμενης "ίδιας εκκεντρότητας" (proper eccentricity) της τροχιάς. Χρησιμοποιούμε τους λεγόμενους χαοτικούς δείκτες, όπως ο "γρήγορος δείκτης Lyapunov" (Fast Lyapunov Indicator) για να υπολογίσουμε την ευστάθεια των τροχιών. Οι μπλε περιοχές στο χάρτη δείχνουν τις τροχιές που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευστάθεια, ενώ οι κίτρινες δείχνουν έντονα χαοτικές τροχιές, που οδηγούν κατά κανόνα σε ταχύτατη διαφυγή του τρωικού εξω-πλανήτη. Εφαρμόζοντας ανάλυση συχνοτήτων υπολογίζουμε τώρα τους διάφορους δευτερεύοντες συντονισμούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται στο σχήμα με ακέραιους αριθμούς σε αγκύλες. Παρατηρούμε τη μεγάλη πολυπλοκότητα της περιοχής που καταλαμβάνεται από τους δευ τερεύοντες συντονισμούς. Η περιοχή ευστάθειας οριοθετείται από ένα σύνορο που έχει φρακταλική δομή.



Σχήμα Γ΄.1: Στο αριστερό πλαίσιο απειχονίζεται ο χάρτης ευστάθειας, χαθώς χαι οι θέσεις πολλαπλών δευτερευόντων συντονισμών (βλέπε χείμενο) για τις τρωιχές χινήσεις σε ένα υποθετιχό εξω-πλανητιχό σύστημα με ένα γιγάντιο πρωτεύοντα πλανήτη μάζας ίσης με 0.0041 της μάζας του οιχείου αστέρα.

Δεδομένης της σημασίας των δευτερευόντων συντονισμών, η ερευνά μας τελευταία επικεντρώνεται στην προσπάθεια να αναπτύξουμε μια αναλυτική θεωρία που να προβλέπει το είδος και τη θέση των δευτερευόντων συντονισμών σε διάφορες περιπτώσεις παραμέτρων του υπό μελέτη εξω-πλανητικού συστήματος. Στο ακόλουθο σχήμα, οι γαλάζιες καμπύλες αποτελούν την αναλυτική μας πρόβλεψη, σε σύγκριση με τη θέση των δευτερευόντων συντονισμών όπως προβλέπεται από τις προσομοιώσεις. Παρατηρούμε ότι η πρόβλεψη είναι ακριβής για μικρές τιμές της γωνίας λίκνισης, και λιγότερο ακριβής, αλλά πάντως με μικρό σφάλμα (όχι μεγαλύτερο από 5%, για μεγαλύτερες τιμές. Στην αναλυτική μας θεωρία χρησιμοποιούμε τεχνικές της λεγόμενης κανονικής θεωρίας διαταραχών, τις οποίες έχουμε αναπτύξει εκτενώς στο ΚΕΑΕΜ



Σχήμα Γ'.2: Οι γαλάζιες χαμπύλες που υπερτίθενται στο χάρτη ευστάθειας δείχνουν την πρόβλεψη της αναλυτιχής μας θεωρίας για τη θέση διάφορων δευτερευόντων συντονισμών τρωιχής χίνησης σε ένα υποτιθέμενο εξω-ηλιαχό σύστημα στο οποίο ο πρωτεύων πλανήτης έχει μάζα ίση με 0.0031 της μάζας του χεντριχού αστέρα.

την τελευταία δεκαετία. Στις τεχνικές αυτές γίνονται μαθηματικά αναπτύγματα των εξισώσεων κίνησης σε μορφή σειρών, χρησιμοποιώντας για το σκοπό αυτό ειδικά προγράμματα συμβολικής άλγεβρας τα οποία έχουμε αναπτύξει σε υπολογιστές.

Η αχρίβεια των προβλέψεων σχετίζεται χυρίως με τη δυνατότητά μας να επιτύχουμε αναπτύγματα μεγαλύτερης τάξης. Αυτό αποτελεί αντιχείμενο μαθηματιχής χυρίως έρευνας. Ωστόσο, οι προβλέψεις μας δίνουν ήδη τη δυνατότητα να χαραχτηρισθεί η περιοχή ευστάθειας σε συνάρτηση με παρατηρούμενες φυσιχές παραμέτρους του εξω-ηλιαχού συστήματος. Επομένως, τα αποτελέσματά μας είναι πλέον πραχτιχά ελεγχόμενα χαι χάτω από υπάρχουσες ή αναμενόμενες στο εγγύς μέλλον αστρονομιχές παρατηρήσεις.

Δ΄ Η προέλευση του μαγνητικού πεδίου στο Σύμπαν

Ιωάννης Κοντόπουλος

Τα τελευταία τρία χρόνια συνεχίζουμε την αναζήτηση της προέλευσης του μαγνητικού πεδίου στο Σύμπαν η οποία εξακολουθεί να παραμένει άγνωστη μέχρι σήμερα. Επικεντρώσαμε την έρευνά μας στην μελέτη των πιο ενεργητικών αστροφυσικών πηγών ακτινοβολίας, των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα (gamma ray bursts ή GRB), των αστρικών ζευγών ακτίνων X (X-ray binaries ή XRB), και των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων (active galactic nuclei ή AGN). Τα συστήματα αυτά πιστεύεται ότι περιλαμβάνουν δύο βασικά συστατικά: περιστρεφόμενες μελανές οπές και μαγνητικά πεδία. Η ενέργειά τους προέρχεται από την μελανή οπή μέσω ενός μηχανισμού ηλεκτρομαγνητικής επιβράδυνσης. Το μαγνητικό πεδίο αποτελεί τον «άξονα» που μεταφέρει την ενέργεια αυτή από την περιοχή της μελανής οπής σε μεγάλες αστροφυσικές αποστάσεις.

Η πρότασή μας για την προέλευση του μαγνητιχού πεδίου στο Σύμπαν βασίζεται στον μηχανισμό της Κοσμιχής Μπαταρίας τον οποίο έχουμε προτείνει από το 1998 σε συνεργασία με τον Δρ. Δημοσθένη Καζάνα (αντεπιστέλλον μέλος της Αχαδημίας Αθηνών). Η Κοσμιχή Μπαταρία προβλέπει ότι η αχτινοβολία από τον εσωτεριχό δίσχο προσαύξησης γύρω από την χεντριχή μελανή οπή σχεδάζεται πάνω στα ηλεχτρόνια του πλάσματος, τα επιβραδύνει, και προχαλεί με τον τρόπο αυτό ένα δαχτυλιοειδές ηλεχτριχό ρεύμα. Το μαγνητιχό πεδίο που δημιουργείται από αυτό το δαχτυλιοειδές ρεύμα εχτοξεύεται στην συνέχεια στον μεσοαστριχό χαι μεσογαλαξιαχό χώρο με την μορφή ενεργητιχών αστροφυσιχών πιδάχων (jets). Στα πλαίσια του προγράμματος «Η προέλευση των αστροφυσιχών μαγνητιχών πεδίων» της δράσης «ΑΡΙΣΤΕΙΑ» το οποίο χρηματοδοτήθηχε από την Γενιχή Γραμματεία Έρευνας χαι Τεχνολογίας του Υπουργείου Παιδείας χαι από το Ευρωπαϊχό Κοινωνιχό Ταμείο μελετήσαμε τις αχόλουθες διαφορετιχές πτυχές του παραπάνω προβλήματος:

Δ΄.1 Το πεδίο ακτινοβολίας γύρω από μια μελανή οπή

Μελετήσαμε την πίεση της ακτινοβολίας στα επιφανειακά στρώματα του αστροφυσικού δίσκου προσαύξησης γύρω από μια περιστρεφόμενη μελανή οπή τύπου Kerr, εκεί δηλαδή όπου λειτουργεί ο μηχανισμός της Κοσμικής Μπαταρίας (Koutsantoniou & Contopoulos 2014). Το νέο στοιχείο της έρευνάς μας είναι ότι η πηγή της ακτινοβολίας είναι η απέναντι επιφάνεια του δίσκου και όχι ένα κεντρικό αντικείμενο όπως στην περίπτωση του φαινομένου Poynting-Robertson στο ηλιακό σύστημα. Δημιουργήσαμε χάρτες του ουρανού όπως αυτός φαίνεται από το εσώτατο άκρο του δίσκου προσαύξησης (Σχ. Δ΄.1). Μελετήσαμε διάφορες μορφολογικές δομές του δίσκου προσαύξησης με κατανομή θερμοκρασιών τύπου Shakura-Sunyaev. Για κάθε μια από αυτές υπολογίσαμε την ηλεκτρεγερτική δύναμη της Κοσμικής Μπαταρίας, και με τον τρόπο αυτό εκτιμήσαμε τους χαρακτηριστικούς χρόνους που απαιτούνται για την παραγωγή των αστροφυσικών μαγνητικών πεδίων.



Σχήμα Δ΄.1: Ο χάρτης του ουρανού όπως τον βλέπει ένας παρατηρητής ΖΑΜΟ στην θέση του ISCO κοιτώντας προς την κατεύθυνση της κεντρικής μελανής οπής, για διάφορες τιμές της παραμέτρου περιστροφής της j=a/M (M είναι η μάζα της μελανής οπής), και για διάφορες μορφολογίες του δίσκου προσαύξησης. Η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στην ένταση της παρατηρούμενης ακτινοβολίας. Ξεχωρίζουν ο δακτύλιος Einstein, και η ασύμμετρη κατανομή της ακτινοβολίας λόγω της περιστροφής του χωρόχρονου.

Δ'.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Πραγματοποιήσαμε ρεαλιστικές αριθμητικές προσομοιώσεις του μηχανισμού της Κοσμικής Μπαταρίας στην περίπτωση ενός δίσκου προσαύξησης τύπου ADAF (Contopoulos, Nathanail & Katsanikas 2015, Σχ. Δ΄.2). Με τον τρόπο αυτό επαληθεύσαμε την αρχική μας πρόβλεψη ότι τα εσωτερικά τμήματα του διπολικού μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται λόγω του δακτυλιοειδούς ρεύματος συσσωρεύονται γύρω από την κεντρική μελανή οπή και συμβάλλουν στην ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου μεγάλης κλίμακας που την διαρρέει. Παράλληλα, τα εξωτερικά τμήματα του δίσκου προσαύξησης. Οι παραπάνω δύο διεργασίες συνεχίζονται για εκατοντάδες εκατομμύρια περιστροφές του εσώτατου δίσκου με αποτέλεσμα την σημαντική ενίσχυση του συσσωρευμένου στο κέντρο μαγνητικού πεδίου. Επαληθεύσαμε επίσης την αρχική μας πρόβλεψη ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του μαγνητικού αριθμού Prandtl της τάξεως της μονάδας πάνω από την οποία ο μηχανισμός αυτός κορέννυται.



Σχήμα Δ'.2: Μαγνητικές γραμμές καταγεγραμμένες σε χρόνους t_{acc} (a), $3t_{acc}$ (b), $8.6t_{acc}$ (c), $15.7t_{acc}$ (d), $23.7t_{acc}$ (e), και $38.4t_{acc}$ (f), στην περίπτωση δίσκου προσαύξησης με αριθμό Prandtl $P_m = 0.4$. Μήκη σε μονάδες r_{ISCO} . t_{acc} είναι ο χρόνος προσαύξησης από το εσώτατο άκρο του δίσκου σε ακτίνα r_{ISCO} . Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν το πρόσημο του B_{ϕ} (μπλε: αρνητικό, πορτοκαλί: θετικό). Η επιφάνεια του δίσκου βρίσκεται σε πολική γωνία $\theta = 60^{\circ}$. Το πεδίο δημιουργείται συνεχώς μέσω του μηχανισμού της Κοσμικής Μπαταρίας στην θέση r_{ISCO} . Τα εσωτερικά άκρα των μαγνητικών γραμμων μεταφέρονται προς το κέντρο μαζί με το υλικό που πέφτει πάνω στην μελανή οπη. Οι μαγνητικό πεδίου αντίθετης πολικότητας το οποίο διαχέεται συνεχώς προς τα έξω.

Δ΄.3 Η τοπολογία του μαγνητικού πεδίου στους αστροφυσικούς πίδακες

Η δημιουργία και η εκτόξευση των αστροφυσικών πιδάκων (jets) από τους ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGN) προβλέπουν την παρουσία ελικοειδών μαγνητικών πεδίων μεγάλης κλίμακας κατά μήκος του jet. Η Κοσμική Μπαταρία προβλέπει μια συγκεκριμένη τοπολογία του μαγνητικού αυτού πεδίου με σημαντικότατες παρατηρησιακές προεκτάσεις (Christodoulou, Gabuzda, Contopoulos & Kazanas 2015): Η συσσωρευμένη μαγνητική διπολική ροπή μ_B έχει κατεύθυνση παράλληλη με το διάνυσμα περιστροφής του δίσκου $\vec{\omega}$,

$$\vec{\mu}_B \parallel \vec{\omega} \tag{1.8}$$

Οι βάσεις των μαγνητικών γραμμών μέσα στον δίσκο περιελίσσονται λόγω διαφορικής περιστροφής. Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι η διεύθυνση περιέλιξης αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα μεγάλης κλίμακας I_{inner} το οποίο ρέει προς την πηγή του jet (AGN) κατά μήκος του άξονα και σε ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα μεγάλης κλίμακας I_{outer} , το οποίο ρέει προς τα έξω κατά μήκος των εξωτερικών μαγνητικών γραμμών.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του εσώτατου jet «κλείνει» κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ του εσώτατου jet και του εξωτερικού πεδίου του δίσκου. Η παραπάνω παγκόσμια (universal) κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά μήκος των εξωγαλαξιακών πιδάκων έχει προταθεί για πρώτη φορά από τους Contopoulos, Christodoulou, Kazanas & Gabuzda (2009) και αποτελεί μοναδική πρόβλεψη της Κοσμικής Μπαταρίας όπως αυτή έχει επαληθευθεί μέσω των αριθμητικών προσομοιώσεων των Christodoulou, Contopoulos & Kazanas (2008) και Contopoulos, Nathanail & Katsanikas (2015).

Είναι προφανές ότι είναι δυνατόν να ελέγξει κανείς τις παραπάνω προβλέψεις της Κοσμικής Μπαταρίας μέσω παρατηρήσεων της μεταβολής του προσήμου της στροφής Faraday εγκάρσια στο jet στις λίγες εκείνες περιπτώσεις όπου η μορφολογία του μαγνητικού πεδίου δεν έχει διαταραχθεί λόγω αλληλεπίδρασης του jet με το εξωτερικό του περιβάλλον. Όπως φαίνεται στο Σχ. Δ΄.3, όταν η παρατηρούμενη στροφή Faraday αυξάνει κατά την διεύθυνση των δεικτών του ωρολογίου (clockwise ή CW) σε σχέση με την πηγή του jet (AGN), το ρεύμα ρέει προς το κέντρο, ενώ όταν αυξάνει κατά την διεύθυνση αντίθετη των δεικτών του ωρολογίου (counter closkwise ή CCW), το ρεύμα ρέει προς τα έξω. Υπενθυμίζουμε ότι η σύμβαση για το πρόσημο της στροφής Faraday είναι θετικό/αρνητικό όταν το μαγνητικό πεδίο κατευθύνεται παράλληλα/αντίθετα προς την διεύθυνση παρατήρησης αντίστοιχα. Εν περιλήψει:

- α΄ Όταν η στροφή Faraday αυξάνει CW, το ρεύμα I_{inner} ρέει αντίθετα προς την διεύθυνση του jet.
- β' Όταν η στροφή Faraday αυξάνει CCW, το ρεύμα I_{outer} ρέει παράλληλα προς την διεύθυνση του jet.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν ανεξάρτητα από τη θέση του παρατηρητή (Σχ. Δ΄.3).

Αναζητήσαμε την παρουσία ελικοειδών μαγνητικών πεδίων σε ραδιοφωνικούς χάρτες εξωγαλαξιακών πιδάκων μεγάλης κλίμακας (kiloparsecs). Σε σύνολο 84 περιπτώσεων που εξετάσαμε, βρήκαμε σοβαρές ενδείξεις για την παρουσία ελικοειδών πεδίων σε 10 από αυτές. Είναι αξιοσημείωτο ότι και στις 10 αυτές περιπτώσεις, η τοπολογία του μαγνητικού πεδίου είναι αυτή ακριβώς που προβλέπει ο μηχανισμός της Κοσμικής Μπαταρίας! Το παρατηρησιακό αυτό αποτέλεσμα αποτελεί μέχρι στιγμής την ισχυρότερη ένδειξη ότι ο μηχανισμός της Κοσμικής Μπαταρίας πράγματι λειτουργεί στο Σύμπαν. Η μελέτη μας συνεχίζεται με την συλλογή περισσοτέρων παρατηρησιακών δεδομένων.


Σχήμα Δ΄.3: Σχηματική δομή του ελικοειδούς μαγνητικού πεδίου σε έναν εξωγαλαξιακό πίδακα (jet) όπως αυτή προβλέπεται από τον μηχανισμό της Κοσμικής Μπαταρίας για δύο τυχαίες θέσεις του παρατηρητή. Γκρί σφαίρα: κεντρική μελανή οπή. Κίτρινος δίσκος: εσώτατος δίσκος προσαύξησης. Γκρί γραμμή: άξονας συμμετρίας. Λευκό βέλος: διεύθυνση περιστροφής. Κίτρινες, πράσινες γραμμές: το πεδίου του εσωτερικού jet που διαρρέει την κεντρική μελανή οπή. Πορτοκαλί, κόκκινες γραμμές: το πεδίου του εσωτερικού avéμου που διαρρέει τον εξωτερικό δίσκο. Η κοσμική μπαταρία προβλέπει ότι η διεύθυνση του εσώτατου/εξωτερικού πεδίου είναι παράλληλη/αντιπαράλληλη με την διεύθυνη του ω. Οι μαγνητικές γραμμές περιελίσσονται λόγω της περιστροφής της μελανής οπής και του δίσκου προσαύξησης. Ο παρατηρητής του εσώτατου/εξωτερικού πεδίου αντιλαμβάνεται μια βαθμίδα της περιστροφής Faraday παράλληλη/αντίθετα προς την διεύθυνση των δεικτών του ωρολογίου η οποία αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο ρέει αντίθετα/παράλληλα προς την διεύθυνση του jet.

Δ΄.4 Μαγνητική επιβράδυνση μελανών οπών στις εκλάμψεις ακτίνων γάμμα

Μελετώντας τις καμπύλες φωτός των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα (GRB) πιστεύουμε ότι ανακαλύψαμε μια σημαντική παρατηρησιακή ένδειξη του μηχανισμού ηλεκτρομαγνητικής εξαγωγής ενέργειας από περιστρεφόμενες μελανές οπές όπως αυτός προβλέφθηκε από τους Blandford & Znajek (1977). Ένα χαρακτηριστικό του μηχανισμού αυτού είναι ότι, υπό κάποιες γενικές συνθήκες, η περιστροφή της μελανής οπής και η συνακόλουθη ακτινοβολία της πηγής φθίνουν εκθετικά. Μελετήσαμε διεξοδικά εκατοντάδες καμπύλες φωτός που συνελλέγησαν με το όργανο XRT του δορυφόρου Swift της NASA και διαπιστώσαμε ότι περίπου μία στις 5 παρουσιάζει εκθετική μείωση! Η διάρκεια του φαινομένου εξαρτάται από την ποσότητα μαγνητικής ροής που έχει συσσωρευθεί στον ορίζοντα. Η μέτρηση της διάρκειας μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε το αρχικό μαγνητικό πεδίου του αστέρος από την κατάρρευση του οποίο προήλθε η έκλαμψη. Οι εκτιμήσεις μας συμφωνούν με χαρακτηριστικές τιμές του μαγνητικού πεδίου που αναμένονται σε αστέρες τύπου Wolf-Rayet.



Σχήμα Δ'.4: Καμπύλη φωτός του GRB υπέρ-υψηλής διάρχειας 111209Α σε λογαριθμιχή-λογαριθμιχή (αριστερά) και λογαριθμιχή-γραμμιχή κλίμαχα (δεξιά), στο ενέργειαχό φάσμα 0.3-10 keV. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο θεωρητιχό μοντέλο εκθετικής επιβράδυνσης της κεντρικής μελανής οπής των Blandford & Znajek (1977). Σε λογαριθμική-γραμμική κλίμαχα, η εκθετική μείωση είναι προφανής ως ευθεία γραμμή.

Αναφορές

- 1. Blandford R. D. & Znajek R. 1977, MNRAS, 179, 433.
- 2. Christodoulou, D. M., Contopoulos, I. & Kazanas, D. 2008, ApJ, 674, 388.
- Christodoulou, D. M., Gabuzda, D. C., Contopoulos, I. & Kazanas, D. 2015 (in prep.).
- 4. Contopoulos, I., Christodoulou, D. M., Kazanas, D. & Gabuzda, D. C. 2009, ApJL, 702, L148.
- 5. Contopoulos, I. & Kazanas, D. 1998, ApJ, 508, 859.
- 6. Contopoulos, I., Nathanail, A. & Katsanikas, M. 2015, ApJ, 805, 105.
- 7. Koutsantoniou, L. E. & Contopoulos, I. 2014, ApJ, 794, 27.

Ε΄ Η μεταβαλλόμενη ενέργεια του κενού, κλειδί για την κατανόηση των μυστικών του Σύμπαντος;

Σπύρος Βασιλάχος

Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι τελευταίες δύο δεκαετίες αποτελούν τη "χρυσή" περίοδο στην επιστήμη της Κοσμολογίας. Πράγματι η λεπτομερής ανάλυση τόσο των διαστημικών όσο και των επίγειων παρατηρήσεων (της κοσμικής ακτινοβολίας μικροκυμάτων, πηγών ακτίνων-Χ, υπερκαινοφανών αστέρων, δομών μεγάλης κλίμακας, κτλ.) συγκλίνουν σε ένα Κοσμολογικό πρότυπο. Αυτό υποστηρίζει ότι το Σύμπαν δημιουργήθηκε με την μεγάλη έκρηξη, είναι χωρικά επίπεδο, είναι ομογενές και ισότροπο και έχει ηλικία ~ 13.8 δισεκατομμυρίων περίπου ετών. Στην πρώιμη περίοδο το Σύμπαν πέρασε από μια φάση επιταχυνόμενης διαστολής, που ονομάζεται πληθωρισμός η οποία ήταν σύντομης χρονικής διάρκειας. Στη συνέχεια μετά από μία παρατεταμένη περίοδο στην οποία χυριαρχούσαν κατά σειρά η ακτινοβολία και η ύλη, τα τελευταία ~ 7 δισεκατομμύρια χρόνια εισήλθε και πάλι σε φάση επιταχυνόμενης διαστολής. Μάλιστα για αυτή τους την ανακάλυψη οι Perlmutter, Riess και Schmidt τιμήθηκαν με το Νόμπελ Φυσικής για το έτος 2011.

Γνωρίζουμε επίσης ότι από το συνολικό ποσό υλοενέργειας που περιέχει το Σύμπαν, μόνο το 30% αποτελείται από ύλη (φωτεινή και σκοτεινή). Παρά την τεράστια πρόοδο που έχει επιτευχθεί σε θεωρητικό άλλα και σε παρατηρησιακό επίπεδο, μέχρι σήμερα δεν γνωρίζουμε σχεδόν τίποτα για τη φύση του υπόλοιπου 70% το οποίο και ευθύνεται για την σημερινή επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος. Για το λόγο αυτό της έχει δοθεί η αινιγματική ονομασία σκοτεινή ενέργεια! Πράγματι, κατά την τελευταία δεκαετία υπάρχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον στις τάξεις των κοσμολόγων και των θεωρητικών φυσικών σχετικά με τη φύση αυτής της εξωτικής "σκοτεινής ενέργειας". Η απουσία μιας θεμελιώδους φυσικής θεωρίας, όσον αφορά τον μηχανισμό επαγωγής της κοσμική επιτάχυνσης, έχει ανοίξει ένα παράθυρο σε μια πληθώρα εναλλακτικών κοσμολογικών σεναρίων. Τα περισσότερα από αυτά τα σενάρια βασίζονται είτε στην ύπαρξη νέων πεδίων στη φύση (και άρα νέας φυσικής), ή κάποια τροποποίηση της γενικής σχετικότητας του Einstein σε κοσμολογικές κλίμακες.

Η κυρίαρχη σύγχρονη θεωρία για την αρχή και την εξέλιξη του Σύμπαντος (θεωρία της μεγάλης εκρήξεως) υποστηρίζει ότι αυτό ξεκίνησε από μια κατάσταση πολύ υψηλής θερμοκρασίας και πυκνότητας, και έκτοτε διαστέλλεται συνεχώς. Με τη μεγάλη έκρηξη γεννιέται ο ίδιος ο χωρόχρονος ο οποίος εξασφαλίζει το απαραίτητο υπόβαθρο μέσα στο οποίο το Σύμπαν εξελίσσεται. Η διαστολή του Σύμπαντος παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό αστρονόμο Hubble στη δεκαετία του '20, είχε όμως προβλεφθεί από τη γενικευμένη θεωρία της βαρύτητας του Einstein (Γενική Θεωρία της Σχετικότητας). Σημαντική ένδειξη για την ορθότητα της θεωρίας της μεγάλης εκρήξεως, απετέλεσε η ανακάλυψη από τους Αμερικανούς αστρονόμους Penzias και Wilson (βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1978) της λεγόμενης Κοσμικής Ακτινοβολίας Μικροκυμάτων του υπόβαθρου (για συντομογραφία ΚΑΜ), δηλαδή της αρχικής θερμικής ακτινοβολίας που γέμισε το Σύμπαν μετά την αρχική έκρηξη. Με άλλα λόγια η ΚΑΜ είναι το ενεργειακό απολίθωμα των αρχέγονων φωτονίων (η θερμοκρασία της σήμερα είναι 2.7°K περίπου). Είναι φανερό ότι η μελέτη της μας οδηγεί στο να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη φυσική κατάσταση του πρώιμου Σύμπαντος. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας κατέστη δυνατή, κυρίως κατά την τελευταία δεκαετία, η δημιουργία χαρτών της χωρικής κατανομής της ΚΑΜ. Παρ' όλα τα θετικά στοιχεία της θεωρίας της μεγάλης έκρηξης η τελευταία σχετίζεται με το πρόβλημα της αρχικής ανωμαλίας, δηλαδή του απειρισμού της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του Σύμπαντος κατά τη στιγμή της μεγάλης έκρηξης.

Εξαιτίας του απειροστού μεγέθους του Σύμπαντος αυτό αρχικά συμπεριφέρεται ως ένα κβαντικό σύστημα. Παρά το γεγονός ότι μέχρι σήμερα δεν έχουμε μια πλήρη θεωρία κβαντικής βαρύτητας, ο χρόνος στον οποίο τα κβαντικά φαινόμενα της βαρύτητας χυριαρχούν, ονομάζεται χρόνος Planck και λαμβάνει χώρα τα πρώτα 10^{-43} δευτερόλεπτα μετά τη μεγάλη έχρηξη. Στη συνέχεια, και μόλις 10⁻³⁵ δευτερόλεπτα μετά τη μεγάλη έχρηξη, θεωρούμε ότι το Σύμπαν περνά σε μια φάση επιταχυνόμενης διαστολής (πληθωρισμός) η οποία δίνει μαχροσχοπιχές διαστάσεις στο Σύμπαν αυξάνοντας δραστικά το μέγεθος του (κατά ένα παράγοντα 10²⁵). Μέχρι στιγμής δεν γνωρίζουμε το πεδίο, αποχαλούμενο «inflaton», που προχαλεί τον πληθωρισμό, αλλά γίνονται προσπάθειες να χαθοριστούν οι ιδιότητές του από παρατηρήσεις. Η αβεβαιότητα του Heisenberg (Νόμπελ 1932), βασική αρχή της κβαντομηχανικής, μας λέει ότι σε οποιοδήποτε κβαντικό σύστημα (άρα και το νεαρό Σύμπαν), ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται σε χαμηλή ενεργειακή κατάσταση θα έχει ενέργεια που σχετίζεται με το "κενό", η πυκνότητα του οποίου στο πλαίσιο της καθιερωμένης κβαντικής θεωρίας πεδίου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από τον χρόνο. Η έρευνα έχει δείξει ότι η ενέργεια αυτή πρακτικά θα μπορούσε να ευθύνεται για την πρώιμη πληθωριστική περίοδο.

Το βασικό αποτέλεσμα αυτής της πληθωριστικής εποχής είναι ότι εξομαλύνει σε μεγάλο βαθμό τις αρχικές ανομοιογένειες αλλά και επιβάλλει την επίπεδη (Ευκλείδεια) γεωμετρία στο χωρικό μέρος του χωρόχρονου. Στη συνέχεια σε κάποιο σημείο, δεν είμαστε σίγουροι για το πότε ή γιατί - η περίοδος αυτή της επιταχυνόμενης διαστολής τελειώνει. Εν συνεχεία η ενέργεια που την οδηγούσε μετατρέπεται σε συνηθισμένη ύλη και ακτινοβολία, και με αυτό τον τρόπο η συμβατική κοσμική ιστορία όπως προβλέπεται από τη θεωρία της μεγάλης έχρηξης αρχίζει. Αξίζει να αναφέρουμε ότι ο πληθωρισμός ως αναγκαία φάση στην εξέλιξη του Σύμπαντος, ενώ έχει προταθεί εδώ και 30 χρόνια περίπου, δεν βασίζεται σε κάποια θεμελιώδη φυσική θεωρία, γεγονός που συνεχίζει να κάνει τους κοσμολόγους να νοιώθουν σχετικά «άβολα». Μετά τον Πληθωρισμό, το Σύμπαν εισέρχεται στην εποχή της ακτινοβολίας όπου αρχικά έχουμε την ισοδυναμία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς πυρηνικής δύναμης αλλά και τη δημιουργία των βαρυονίων (πρωτονίων, νετρονίων, κτλ) όπου το βαθμωτό πεδίο του Higgs (Νόμπελ 2013) παίζει βασικό ρόλο. Στη συνέχεια έχουμε τη δημιουργία των πυρήνων των ελαφρότερων στοιχείων του περιοδιχού πίνακα (κυρίως υδρογόνου, ηλίου και πολύ λίγο λιθίου) και λίγο μετά εξαιτίας της διαστολής και της συνεπακόλουθης ψύξης που υφίσταται το Σύμπαν, τα ηλεκτρόνια σταδιακά χάνουν την κινητική τους ενέργεια και τελικά συζεύγχονται με τους ατομιχούς πυρήνες για να δημιουργήσουν άτομα. Η εποχή της ακτινοβολίας διαρχεί περίπου ~ 380000 χρόνια ενώ η θερμοχρασία στο τέλος αυτής της περιόδου είναι $\sim 3000^\circ$ K.

Κατόπιν το Σύμπαν εισέρχεται στην εποχή όπου η σημαντικότερη συνιστώσα του κοσμικού ρευστού που καθορίζει την δυναμική συμπεριφορά του Σύμπαντος

είναι η ύλη (σκοτεινή και βαρυονική) που κυριαρχεί για τα επόμενα ~ 7 δισεκατομμύρια χρόνια της ιστορίας του Σύμπαντος. Αυτή η περίοδος χαρακτηρίζεται από την δημιουργία, μέσω βαρυτικών αλληλεπιδράσεων, των κοσμικών δομών (αρχικά δομές τυπικού μεγέθους αστρικών σμηνών – και λίγο μικρότερες – και σταδιακά μεγέθους γαλαξιών και σμηνών γαλαξιών). Με την πάροδο του χρόνου όμως, η δυναμική του Σύμπαντος και η ικανότητά του να γεννά κοσμικές δομές αλλάζει. Ο ρυθμός παραγωγής γαλαξιών συνεχώς φθίνει, και η περαιτέρω δημιουργία σμηνών γαλαξιών μειώνεται δραστικά στη σημερινή εποχή μιας και η διαστολή αραιώνει συνεχώς την συγκέντρωση της ύλης και εξασθενεί τον ρόλο της βαρύτητας. Ταυτόχρονα όμως, μία «σκοτεινή» (αόρατη) μορφή ενέργειας η οποία έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτή που οδηγεί τον αρχικό πληθωρισμό αρχίζει σιγά-σιγά να κυριαρχεί. Η διατάραξη της σχέσης ύλης-«σκοτεινής» ενέργειας υπέρ της τελευταίας επέδρασε δραματικά στη μετέπειτα εξέλιξη του Σύμπαντος αλλάζοντας τον ρυθμό διαστολής του από επιβραδυνόμενο σε επιταχυνόμενο.

Για να καταλάβουμε με απλό τρόπο πώς λειτουργεί η σκοτεινή ενέργεια, ας θυμηθούμε πρώτα πώς λειτουργεί η βαρύτητα, που είναι ελκτική δύναμη, όταν δύο σώματα απομακρύνονται μεταξύ τους: η δυναμική ενέργεια αυξάνει και παράλληλα η κινητική τους ενέργεια ελαττώνεται, οπότε η απομάκρυνσή τους επιβραδύνεται. Με άλλα λόγια, η βαρύτητα που από την φύση της ευθύνεται για την δημιουργία των κοσμικών συμπυκνώσεων, προσπαθεί να «φρενάρει» την ίδια την διαστολή του Σύμπαντος. Από την άλλη η «σκοτεινή» ενέργεια λειτουργεί ακριβώς αντίθετα από τη βαρύτητα, δηλαδή δημιουργεί ένα «απωστικό» πεδίο. Το ρόλο της «αντιβαρύτητας» θα μπορούσε να τον παίξει η Κοσμολογική σταθερά η οποία εισήχθη αρχικά από τον Einstein περίπου πριν από 100 χρόνια. Πράγματι έχει βρεθεί ότι το μοντέλο με την Κοσμολογική σταθερά ερμηνεύει πολύ καλά το παρατηρούμενο Σύμπαν. Όμως η παρατηρούμενη τιμή της είναι απείρως μικρή σε σχέση με την τιμή που πρέπει να έχει στο πρώιμο Σύμπαν ώστε να οδηγήσει τον αρχικό πληθωρισμό.

Συνοψίζοντας λοιπόν, τα βασικά ανοικτά θέματα στην σύγχρονη Κοσμολογία είναι:

- Πώς μπορεί να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αρχικής ανωμαλίας
- Με ποιο φυσικό μηχανισμό ξεκινά ο πρώιμος πληθωρισμός, πότε και γιατί τελειώνει αλλά και πώς το Σύμπαν εισέρχεται στην περίοδο της ακτινοβολίας.
- Ποιος είναι ο λόγος για τον οποίο η πληθωριστική φάση «ανάβει» για λίγο στο νεαρό Σύμπαν, στη συνέχεια «σβήνει» για τα επόμενα 7 δισεκατομμύρια χρόνια και ξανακυριαρχεί στην κοσμική εξέλιξη τα τελευταία 7 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια.
- Ποια είναι η φύση της σκοτεινής ενέργειας η οποία σχετίζεται με την παρατηρούμενη επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος. Θεωρίες για τη φύση της «σκοτεινής» ενέργειας έχουν προταθεί πολλές (πχ. παραλλαγές της θεωρίας της βαρύτητας, νέα σωματίδια, νέα πεδία) οι οποίες μελετώνται και ελέγχονται από τους ερευνητές ως προς το κατά πόσο και εάν, επαληθεύονται από τις σύγχρονες παρατηρήσεις.

Η δική μας πρόταση για την αντιμετώπιση των παραπάνω θεμάτων έχει να κάνει με την εφαρμογή στην Κοσμολογία της θεώρησης, ότι η ενέργεια του κενού εξελίσσεται με τον χρόνο. Με άλλα λόγια η Κοσμολογική σταθερά του Einstein δεν είναι πλέον μια σταθερά της φύσης άλλα εξαρτάται από τον χρόνο (Κοσμολογική παράμετρος). Η θεώρηση αυτή βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με την ομογένεια και ισοτροπία του Σύμπαντος και δεν αντιτίθεται σε καμία από τις βασικές αρχές τις Κοσμολογίας. Εμείς προτείνουμε κάτι καινούργιο: αν υπάρχει η Κοσμολογική παράμετρος τότε δεν χρειαζόμαστε την εισαγωγή νέων πεδίων στη φυσική ούτε την τροποποίηση της θεωρίας βαρύτητας. Η λύση των κλασσικών εξισώσεων πεδίου του Einstein μας δίνει ένα μοντέλο του Σύμπαντος που είναι απαλλαγμένο από τα παραπάνω προβλήματα. Συγκεκριμένα το Σύμπαν ξεκινά χωρίς αρχική ανωμαλία ευρισκόμενο σε φάση πρώιμου πληθωρισμού. Στη συνέχεια η γρήγορη μεταστοιχείωση του χενού σε αχτινοβολία παράγει τα αρχέγονα φωτόνια της ΚΑΜ αλλά και σταματά με φυσικό τρόπο των πρώιμο πληθωρισμό. Με αυτό τον τρόπο το Σύμπαν εισέρχεται ομαλά στην εποχή της ακτινοβολίας ικανοποιώντας όλες τις αρχές του καθιερωμένου προτύπου. Τέλος, ο μηχανισμός μας σε ένα πολύ μεταγενέστερο στάδιο της ιστορίας του Σύμπαντος πρακτικά οδηγεί την Κοσμολογική παράμετρο στο να τείνει στη σημερινή παρατηρούμενη τιμή της, συνδέοντας με φυσικό και ομαλό τρόπο τον πρώιμο πληθωρισμό με την σημερινή επιταχυνόμενη διαστολή του Σύμπαντος. Ταυτόχρονα ο προβλεπόμενος ρυθμός παραγωγής των κοσμικών δομών βρίσκεται σε απόλυτη αντιστοιχία με τις παρατηρήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι έχουμε δημοσιεύσει τον μηχανισμό μας σε διεθνή ευρωπαϊκά και αμερικανικά επιστημονικά περιοδικά με κριτές υψηλού κύρους (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Journal of Cosmology & Astroparticle Physics, Physical Review D.). Επίσης, γι' αυτή την ιδέα λάβαμε δύο τιμητικές διακρίσεις ("Honorable Mention") στο διεθνή διαγωνισμό βαρύτητας που γίνεται κάθε χρόνο στις ΗΠΑ: Essay Competition of Gravity Research (2013) & (2014) για τις εργασίες α) "From Inflation to Dark Energy Through a Dynamical Λ: An Attempt at Alleviating Fundamental Cosmic Puzzles" και β) "A viable Starobinsky-like inflationary scenario in the light of Planck and BICEP2 results". Οι παραπάνω εργασίες έγιναν σε συνεργασία με τους καθηγητές J. Sola (Barcelona), A. Lima (Sao Paulo) και δημοσιεύθηκαν σε ειδική έκδοση του επιστημονικού περιοδικού Inter. Journal. of Mod. Physics D.

Για περισσότερες πληροφορίες

http://www.gravityresearchfoundation.org/announcements.html

ΣΤ΄ Ηλιαχή Φυσική: Φασματοσχοπία στο υπεριώδες και μελέτη επιτάχυνσης σωματιδίων στο ηλιαχό στέμμα

Κωνσταντίνος Π. Γοντικάκης

Κατά την ενασχόλησή μου στο ΚΕΑΕΜ έχω ενδιαφερθεί στην μελέτη του ηλιακού στέμματος, του ποιο θερμού τμήματος της ηλιαχής ατμόσφαιρας. Η μελέτη αυτή έχει γίνει με ανάλυση παρατηρήσεων στο μαχρινό υπεριώδες με δεδομένα φασματογράφων που παρατηρούν από δορυφόρους όπως ο SOHO, και ο Hinode. Επίσης έχω εργαστεί στην θεωρητική μελέτη της επιτάχυνσης φορτισμένων σωματιδίων στο ηλιαχό στέμμα χατά την διάρχεια εχλάμψεων, οι οποίες προχαλούν την εχπομπή σχληρών αχτίνων-Χ. Οι μελέτες έχουν στόχο την χατανόηση των δομών του ηλιαχού στέμματος χαθώς και γενικότερα της ηλιαχής ατμόσφαιρας.

Στην επιφάνεια του Ηλίου, που ονομάζεται φωτόσφαιρα, το αέριο που τον αποτελεί, βρίσκεται σε έναν συνεχή κοχλασμό. Αυτός ο κοχλασμός, προκαλείται από την ροή ενέργειας από το εσωτερικό του Ήλιου προς την επιφάνεια. Το αέριο αυτό, που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο, είναι ηλεκτρικά φορτισμένο, και ονομάζεται πλάσμα. Η κίνηση του ηλεκτρικά φορτισμένου πλάσματος έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Το ηλιακό μαγνητικό πεδίο, λόγω της κίνησης του πλάσματος, διαταράσσεται, αποκτά περίπλοκη γεωμετρική δομή και προκαλεί θέρμανση της ανώτερης ηλιακής ατμόσφαιρας, το στέμμα, η οποία εκτείνεται σε ύψη πέραν των 2000 με 3000 χιλιομέτρων από την ηλιακή επιφάνεια. Η θέρμανση του ηλιακού στέμματος, το οποίο φτάνει σε θερμοκρασίες ενός με δύο εκατομμύρια βαθμούς, είναι γνωστό από τις αρχές της δεκαετίας του 1940. Τα αίτια αυτού του φαινομένου δεν έχουν απαντηθεί αχόμα πλήρως.

Τα φυσικά φαινόμενα της ηλιακής ατμόσφαιρας, που εκτείνεται από την φωτόσφαιρα, έως το στέμμα μπορούν να μελετηθούν με την παρατήρηση φασματικών γραμμών. Οι φασματικές γραμμές, μελετήθηκαν πρώτη φορά από τον Βαυαρό Joseph von Fraunhofer το 1814. Αυτός παρατήρησε το ηλιακό φως μέσα από ένα πρίσμα που ανέλυε τα χρώματά του. Εκεί οι φασματικές γραμμές εμφανίζονται σαν σκοτεινά σημεία σε συγκεκριμένα χρώματα, δηλαδή σε συγκεκριμένα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχ. ΣΤ΄.1). Πρόκειται για φασματικές γραμμές απορρόφησης.

Η ακτινοβολία του στέμματος δημιουργεί φασματικές γραμμές εκπομπής στο μακρινό υπεριώδες το οποίο πρέπει να μελετηθεί από φασματογράφους στο διάστημα, μια και η γήινη ατμόσφαιρα απορροφά το υπεριώδες φως. Οι φασματικές γραμμές μας παρέχουν γνώσεις για την χημική σύσταση, την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του ηλιακού πλάσματος, τις ταχύτητες και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά. Σε πολλές εργασίες έχουμε μελετήσει συγκεκριμένες φασματικές γραμμές για την κατανόηση της φυσικής του πλάσματος.

ΣΤ΄.1 Μελέτη της σκέδασης ακτινοβολίας με τις γραμμές του ιονισμένου άνθρακα

Ένα παράδειγμα ήταν η μελέτη των φασματικών γραμμών που εκπέμπονται στα μήκη κύματος 154.8 και 155.0 νανόμετρα (nm, ένα νανόμετρο ισούται με ένα



Σχήμα ΣΤ΄.1: Ανάλυση του ηλιαχού φωτός στα χρώματά του (από ερυθρό έως το ιώδες) με τις φασματιχές γραμμές απορρόφησης. Το παραπάνω γράφημα αναπαριστά την ένταση του φωτός συναρτήσει του μήχους χύματος, ή του χρώματος. (από την ιστοσελίδα Exploratorium Teacher Institute workshop 5 November 2011, Linda Shore, Paul Doherty, Tory Brady.)

δισεκατομμυριοστό του μέτρου), από ιόντα του τριπλά ιονισμένου άνθρακα. Με τον φασματογράφο SUMER που παρατηρεί από τον δορυφόρο SOHO μελετήσαμε παρατηρήσεις ενός κέντρου δράσης που πάρθηκαν τον Μάιο του 1999. Η σχισμή του φασματογράφου κατέγραψε μια έκλαμψη μικρής έντασης την στιγμή της έναρξής της, κάτι το οποίο είναι σπάνιο. Μετρήσαμε τον λόγο της έντασης της γραμμής στα 154.8nm ως προς την ένταση της γραμμής στα 150. nm. Ο λόγος αυτός 154.8/155. ισούται με δύο όταν το πλάσμα είναι οπτικά λεπτό. Οπτικά λεπτό πλάσμα σημαίνει πως όταν εκπέμπεται φως, τα εκπεμπόμενα φωτόνια δεν αλληλεπιδρούν ξανά με τα σωματίδια του πλάσματος.

Σε μία περιοχή κοντινή της έκλαμψης παρατηρήσαμε πως αυτός ο λόγος γίνεται μεγαλύτερος 2 και φτάνει την τιμή 4. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μόνο αν οι φασματικές γραμμές σκεδάζουν την ακτινοβολία η οποία προσπίπτει από μια γειτονική λαμπρή περιοχή. Η σκέδαση ακτινοβολίας προκαλείται από την ένταση του φωτός της γειτονικής έκλαμψης και η χαμηλή πυκνότητα πλάσματος σε μια μικρή ηλιακή κηλίδα. Υπολογίσαμε επίσης την ηλεκτρονική πυκνότητα (Σχ. ΣΤ΄.2) χρησιμοποιώντας στην περιοχή της σκέδασης ακτινοβολίας. Είναι ίσως η μοναδική φορά που καταγράφεται φαινόμενο σκέδασης ακτινοβολίας στον ηλιακό δίσκο (σε αντίθεση με περιοχές μακριά από το ηλιακό χείλος).

Η μελέτη αυτή δημοσιεύτηκε το 2013 (Gontikakis, Winebarger, Patsourakos 2013). Συνεχίζουμε την μελέτη των φασματικών γραμμών του ιονισμένου άνθρακα και έχουμε βρει και άλλες σπάνιες περιπτώσεις φαινομένων σκέδασης ακτινοβολίας. Έχει υποβληθεί το 2016 νέα εργασία σχετικώς με αυτά τα φαινόμενα.

ΣΤ΄.2 Μελέτη μαγνητικών δομών ενός κέντρου δράσης λίγες ώρες πριν την εκτίναξη στεμματικής μάζας.

Άλλο παράδειγμα είναι η μελέτη του κέντρου δράσης NOAA 11429 το οποίο τον Μάιο του 2012 παρουσίασε δύο ισχυρότατες εκλάμψεις οι οποίες συνδέονται και με δυο εκτινάξεις στεμματικής μάζας. Ο φασματογράφος EIS του δορυφόρου Hinode παρατήρησε το κέντρο δράσης μερικές ώρες πριν από τις εκλάμψεις. Σκοπός μας να μελετήσουμε την θερμοδυναμική του πλάσματος και τις κινήσεις του πριν από αυτά τα κατακλυσμικά γεγονότα. Το κέντρο δράσης έχει ένα χαρακτηριστικό σχηματισμό όπου το μαγνητικό πεδίο έχει την μορφή ενός ελατηρίου ή σχοινιού με τις μαγνητικές γραμμές να περιτυλίγονται γύρω από άξονα παράλληλο στην επιφάνεια της φωτόσφαιρας. Αυτός ο σχηματισμός ονομάζεται σχοινί μαγνητικής ροής.

Μελετήσαμε το ηλιαχό πλάσμα του σχοινιού το οποίο βρίσχεται σε θερμοχρασίες που φτάνουν τα 5 εχατομμύρια Kelvin. Για τον λόγο αυτό μελετήσαμε φασματιχές γραμμές του ΕΙS που σχηματίζονται από θερμό πλάσμα όπως για παράδειγμα οι φασματιχές γραμμές 18.1 χαι 20.1 nm που εχπέμπονται από το 13 φορές ιονισμένο ασβέστιο. Με τον λόγο των φασματιχών γραμμών 18.1/20.1, μετρήσαμε την πυχνότητα ηλεχτρονίων του πλάσματος σε θερμοχρασίες τεσσάρων εχατομμυρίων Kelvin. Επίσης μετρήσαμε την χατανομή της διαφοριχής μέτρησης εχπομπής του πλάσματος σε θερμοχρασίες από πενταχόσιες χιλιάδες έως 5 εχατομμύρια Kelvin. Η εργασία αυτή δημοσιεύθηχε το 2016 (Syntelis, Gontikakis, Patsourakos & Tsinganos).

ΣΤ΄.3 Μελέτη επιτάχυνσης σωματιδίων στο ηλιακό στέμμα

ο μαγνητικό πεδίο της ηλιακής ατμόσφαιρας μπορεί σε ορισμένες συνθήκες να προκαλέσει την επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων όπως ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Η επιτάχυνση σωματιδίων παρατηρείται όταν το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει συγκεκριμένες γεωμετρίες όπως τα φύλλα ρεύματος. Εκεί επάγονται ηλεκτρικά πεδία τα οποία επιταχύνουν τα φορτία. Η επιτάχυνση φορτίων συμβαίνει κατά την διάρκεια εκλάμψεων και εκεί προκαλεί την εκπομπή σκληρών ακτίνων-Χ. Οι ακτίνες Χ παράγονται όταν τα ηλεκτρόνια που έχουν επιταχυνθεί συγκρούονται με πλάσμα μεγάλης πυκνότητας στη χρωμόσφαιρα. Εκεί εκπέμπουν ακτίνες Χ με τον μηχανισμό πέδησης.

Μελετήσαμε την υπόθεση κατά πόσο η επιτάχυνση σωματιδίων μπορεί να είναι υπεύθυνη για την θέρμανση του στέμματος. Υπολογίσαμε το μαγνητικό πεδίο ενός κέντρου δράσης και καταγράψαμε περίπου 1000 στεμματικούς βρόχους. Υποθέσαμε πως κάθε στεμματικός βρόχος διατρέχεται από ένα φύλλο ρεύματος (Σχ. ΣΤ΄.4) ο οποίος μετατρέπει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, μέσο του διανύσματος Poynting από τη φωτόσφαιρα, σε κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Στην εργασία μας υπολογίσαμε την θέρμανση που παράγεται αν μετατρέψουμε την κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων και πρωτονίων σε θερμότητα. Στη συνέχεια υπολογίσαμε την μεταβολή της θερμοκρασίας, της πυκνότητας του πλάσματος και της ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου, για κάθε ένα από αυτούς τους βρόχους για να εκτιμήσουμε την ακτινοβολία του κέντρου δράσης. Επίσης υπολογίσαμε την εκπομπή ακτίνων X η οποία αντιστοιχεί στο σύνολο του κέντρου δράσης. Η εργασία αυτή δημοσιεύθηκε το 2013 Gontikakis, Patsourakos, Efthymiopoulos, Anastasiadis, Georgoulis 2013.



Σχήμα ΣΤ΄.2: Ανάλυση των φασματικών γραμμών του ιονισμένου άνθρακα όπου καταγράφονται φαινόμενα σκέδασης. a) ένταση στη γραμμή 154.8 nm με την περιοχή της έκλαμψης η οποία φαίνεται καμένη. Η μαύρη γραμμή περικλείει την περιοχή που εμφανίζεται η σκέδαση. b), μέτρηση του λόγου των εντάσεων 154.8/155.0. c) φασματικά προφίλ των δύο γραμμών του άνθρακα. Φαίνεται πως η γραμμή 154.8 nm είναι έως και τέσσερις φορές ποιο λαμπρή από την γραμμή στα 155.0nm. Σχήμα d) υπολογισμός της πυκνότητας ηλεκτρονίων στην περιοχή σκέδασης.



Σχήμα ΣΤ΄.3: a) Ειχόνα της έντασης στην φασματιχή γραμμή των 20.1nm, του δεχατέσσερις φορές ιονισμένου ασβεστίου (φασματιχός τύπος Ca XV). Τα τετράγωνα στην ειχόνα δείχνουν τα δείγματα που λάβαμε για την μέτρηση της πυχνότητας ηλεχτρονίων. b) Ο μέσος όρος της πυχνότητας ηλεχτρονίων συναρτήσει του χρόνου. Οι πυχνότητες έχουν τιμές από ένα δισεχατομμύριο έως σαράντα δισεχατομμύρια ηλεχτρόνια ανά χυβιχό εχατοστό.



Σχήμα ΣΤ΄.4: Αναπαράσταση του γεωμετριχού μοντέλου φύλλου ρεύματος στο εσωτεριχό ενός στεμματιχού βρόχου. Ο άξονας του βρόχου φαίνεται ευθύγραμμος για λόγους ευχολίας. Το φύλλο ρεύματος τέμνει τον βρόχο στα δύο χαι φαίνεται με μια διαχεχομμένη γραμμή. Το μαγνητιχό πεδίο (B_{||}) στο εσωτεριχό του βρόχου, φαίνεται με βέλη να αλλάζει διεύθυνση από το τμήμα του βρόχου πάνω από το φύλλο στο χάτω τμήμα. Φαίνεται επίσης η χατεύθυνση της ταχύτητας του πλάσματος προς το εσωτεριχό του φύλλου ρεύματος (Vinflow) χαθώς χαι το ηλεχτριχό πεδίο (Erec).

Ζ΄ Εφαρμοσμένη ηλιακή φυσική: ανάλυση ηλιακών μαγνητικών πεδίων και πρόγνωση του διαστημικού καιρού

Μανώλης Κ. Γεωργούλης

Κατά την ενασχόλησή του στο ΚΕΑΕΜ, ο γράφων έχει συμμετάσχει, συμ μετέχει και συντονίζει πολλαπλά ερευνητικά προγράμματα που χρηματοδοτούνται από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Παλαιότερα, κατά τη διάρκεια της σχεδόν δεκαετούς παραμονής του στις ΗΠΑ, συμμετείχε και συντόνιζε ανάλογα προγράμματα του Αμερικανικού Οργανισμού Διαστήματος (NASA), Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών (NSF) και του Γραφείου Επιστημονικής Έρευνας της Αμερικανικής Αεροπορίας (AFOSR). Σήμερα είναι πρόεδρος του Ευρωπαϊκού Τμήματος Ηλιακής Φυσικής της Ευρωπαϊκής Φυσικής Εταιρείας (ESPD/EPS), εθνικός εκπρόσωπος στην Επιτροπή Προγράμματος Επιστήμης του ESA (ESA/SPC), αντιπρόεδρος της Ελληνικής Αστρονομικής Εταιρείας (ΕΛΑΣΕΤ), μέλος της Εθνικής Αστρονομικής Επιτροπής (EAE) και μέλος της Εθνικής Ομάδας Εκπροσώπησης της Διεθνούς Επιτροπής για το Διάστημα (COSPAR).

Ο Ήλιος, ο κοντινότερος στη Γη μας αστέρας και το κέντρο του ηλιακού μας συστήματος, είναι κατεξοχήν υπεύθυνος για τη ζωή στη Γη και ενδεχομένως σε άλλες – ακόμα ανεξερεύνητες – γωνιές του ηλιακού μας συστήματος. Το ζωογόνο ηλιακό φως προέρχεται σε συντριπτικό βαθμό από τη θερμοπυρηνική καύση του υδρογόνου σε ήλιο στον πυρήνα του Ήλιου, η οποία με αξιοσημείωτη σταθερότητα λαμβάνει χώρα τα τελευταία 4 δισεκατομμύρια χρόνια (Σχ. Ζ΄.1). Τοποθετώντας μια επίπεδη πλάκα επιφάνειας 1 τ.μ. κάθετα στην οπτική γραμμή Γης – Ηλίου έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, η πλάκα θα συλλέγει σταθερά ισχύ ίση με 1.366 kW περίπου¹. Στην επιφάνεια της θάλασσας, το μεσημέρι μιας ανέφελης μέρας, η πλάκα θα συλλέγει περίπου 1 kW ισχύος λόγω της προστατευτικής ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Αυτή η ισχύς είναι η κινητήρια δύναμη των πάντων στην επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της Γης – από τα θαλάσσια ρεύματα ως τις μεταβολές του καιρού, τη χλωρίδα και την πανίδα.

Με την αχριβή μέτρηση της ηλιακής σταθεράς, όπως ονομάζεται η ισχύς αυτή, παρατηρήθηκε και η εκπληκτική της σταθερότητα, με ελάχιστες μόνο μεταβολές της τάξης του 0.1% κατά τη διάρκεια του ενδεκαετούς ηλιακού κύκλου (Σχ. Ζ΄.2). Τι είναι, όμως, ο ηλιακός κύκλος; Πρόκειται για περιοδική δραστηριότητα της οποίας τα διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα συμβαίνουν κάθε 11 χρόνια περίπου. Ο ηλιακός κύκλος συνδέεται άρρηκτα με ένα άλλο φαινόμενο, γνωστό από τους Κινέζους αυτοκρατορικούς αστρονόμους και καταγεγραμμένο από τον 11ο μ.χ. αιώνα (John of Warcester, Αγγλία), αυτό των ηλιακών κηλίδων (Σχ. Ζ΄.1). Οι κηλίδες εμφανίζονται, εξελίσσονται και εξαφανίζονται μέσα σε μερικές εβδομάδες. Αν και γνωστές για πάνω από μια χιλιετία, η πραγματική φύση των κηλίδων δεν αποκαλύφθηκε παρά μόνο στις αρχές του 20ου αιώνα: οι ηλιακές κηλίδες οφείλουν την ύπαρξη τους σε ισχυρότατα ηλιακά μαγνητικά πεδία, τα ισχυρότερα που απαντά κανείς στο ηλιακό

¹Τελευταίες εξελίξεις ελαττώνουν αυτή την τιμή ελαφρά, στα 1361 kW, περίπου.

σύστημα.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το 0.1% της μεταβολής της ηλιαχής σταθεράς οφείλεται στην αχατάπαυστη δραστηριότητα των μαγνητικών πεδίων τα οποία «γεμίζουν» κυριολεχτικά το ηλιαχό στέμμα, δηλαδή το χώρο πάνω από την επιφάνεια του Ήλιου. Τα μαγνητικά πεδία με το πλάσμα (δηλαδή τα φορτισμένα σωματίδια ύλης, ηλεχτρόνια και ιόντα) μετασχηματίζονται σε περίπου 7 εχατομμύρια χλμ. από την ηλιαχή επιφάνεια, ή περίπου 10 ηλιαχές αχτίνες, σε αυτό που ονομάζεται ηλιαχός άνεμος. Κυριολεχτώντας, λοιπόν, όλο το ηλιαχό σύστημα «χαταιωνίζεται» στη ροή του ηλιαχού ανέμου.

Η φαινομενικά ασήμαντη μεταβολή της ηλιακής σταθεράς λόγω μαγνητικής δραστηριότητας δεν θα είχε καμμία πρακτική σημασία αν η μεταβλητή αυτή ακτινοβολία δεν αφορούσε σε ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, από τις ακτίνες γ ως και τα ραδιοκύματα. Αυτή η μεγάλη ποικιλία οφείλεται στο γεγονός ότι τα μαγνητικά πεδία της ατμόσφαιρας του Ήλιου δεν εξελίσσονται με ομαλό, συνεχή τρόπο: αντίθετα, δημιουργούν γιγάντιες εκρήξεις (Σχ. Ζ΄.3), τις ηλιακές εκλάμψεις, εκτινάξεις πλάσματος από το στέμμα (CMEs, σε λατινική συντομογραφία) και πλήθος άλλων, μικρότερης κλίμακας φαινομένων. Ύλη και φως εξωθούνται σε ακραίες καταστάσεις από αυτά τα φαινόμενα, τις μεγαλύτερες εκρήξεις στο ηλιακό σύστημα, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα το λεγόμενο γεωδιάστημα, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο της Γης, τον ίδιο τον πλανήτη μας, καθώς και το έμψυχο και άψυχο δυναμικό εκτός ατμόσφαιρας. Μόλις αυτή η αλληλεπίδραση έγινε αντιληπτή, κατά τα τέλη πια του 20ου αιώνα, γεννήθηκε ο όρος «διαστημικός καιρός» και η πρόγνωσή του αναβαθμίστηκε σε αυθύπαρκτο επιστημονικό αντικείμενο.

Η ενδελεχής μελέτη των ηλιαχών μαγνητιχών πεδίων, συνεπώς, οδηγεί αφενός στην επιστημονιχή κατανόηση της μεταβλητής ηλιαχής δραστηριότητας και αφετέρου αποτελεί τη μοναδιχή ελπίδα κατανόησης, αρχιχά, και πρόγνωσης, στη συνέχεια, του διαστημιχού καιρού. Οι μεγαλύτεροι οργανισμοί διαστήματος παγχοσμίως θεωρούν την επίτευξη πρόγνωσης ως πρόβλημα χεφαλαιώδους σημασίας για τον τεχνιχό μας πολιτισμό στη διαστημιχή εποχή. Η πραχτιχή μελέτη ξεχινά από την επεξεργασία μετρήσεων του ηλιαχού μαγνητιχού πεδίου, η οποία μέχρι στιγμής είναι δυνατή μόνο στην επιφάνεια του Ήλιου, τη φωτόσφαιρα. Η μέτρηση των φωτοσφαιριχών μαγνητιχών πεδίων γίνεται μέσω του φαινομένου Zeeman, με βάση το οποίο μια φασματιχή γραμμή εχπομπής διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερες γραμμές όταν η εχπομπή γίνεται από περιοχή ισχυρού μαγνητιχού πεδίου. Όσο ισχυρότερη είναι η ένταση του πεδίου αυτού, τόσο πιο εμφανής είναι ο διαχωρισμός. Επιπλέον, το ηλιαχό φως πολώνεται τόσο γραμμικά όσο και χυχλιχά, επιτρέποντας την αναγωγή των συνιστωσών του διανυσματιχού μαγνητιχού πεδίου κατ' ένταση, διεύθυνση και φορά τόσο κατά μήχος όσο και χάθετα στη γραμμή παρατήρησης.

Πρώτη θεμελιώδης δυσκολία στο εγχείρημα της μέτρησης των ηλιακών μαγνητικών πεδίων είναι η αζιμουθιακή συμμετρία κατά 180° των ιδιοτήτων του φαινομένου Zeeman με αποτέλεσμα την ισοπίθανη ύπαρξη δύο διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο της φωτόσφαιρας. Έχουμε εργαστεί εντατικά στο πρόβλημα, δημοσιεύοντας το 2005 μέθοδο φυσικής και αλγοριθμικής άρσης της αζιμουθιακής αβεβαιότητας (Georgoulis, 2005). Η μέθοδος χρησιμοποιείται από την ηλιακή ομάδα στο KEAEM, άλλες διεθνείς και εγχώριες ερευνητικές ομάδες και την ομάδα του ηλιακού τηλεσκοπίου SOLIS του Εθνικού Ηλιακού Παρατηρητηρίου των ΗΠΑ. Μετά την άρση της αζιμουθιαχής αβεβαιότητας του φωτοσφαιριχού μαγνητιχού πεδίου είναι χομβιχής σημασίας η αναγνώριση των χρίσιμων φυσιχών παραμέτρων που μπορούν να εξαχθούν από τις μετρήσεις. Με συστηματιχή μελέτη χαταλήξαμε στις εξής παραμέτρους: (α) την πυχνότητα του ηλεχτριχού ρεύματος το οποίο, λόγω της ύπαρξης του πλάσματος, ρέει στην ατμόσφαιρα του Ήλιου (Σχ. Ζ΄.4), (β) τη μαγνητιχή ενέργεια λόγω αυτής χαι (γ) τη μαγνητιχή ελιχότητα που αντιστοιχεί στα παρατηρούμενα μαγνητιχά πεδία. Λόγω της τελευταίας, οι μαγνητιχές δυναμιχές γραμμές συστρέφονται χαι παρουσιάζουν παραμορφώσεις όπως αυτές που παρατηρεί κανείς συστρέφοντας ένα χομμάτι χοινού λαστιχένιου σωλήνα (Georgoulis, Tziotziou & Raouafi, 2012).

Δεύτερη μεγάλη δυσχολία, η αδυναμία εφαρμογής του φαινομένου Zeeman πάνω από τη φωτόσφαιρα, στο ηλιαχό στέμμα, λόγω έλλειψης ιχανού αριθμού φωτονίων. Αυτή η αδυναμία έχει οδηγήσει διεθνώς στην προσομοιωτιχή παρέχταση των μετρούμενων φωτοσφαιριχών μαγνητιχών πεδίων στο στέμμα, «μαντεύοντας» έτσι ποιο θα πρέπει να είναι το μαγνητιχό πεδίο που αντιστοιχεί στην παρατηρούμενη φωτοσφαιριχή οριαχή συνθήχη. Ο ρεαλισμός της παρεχτατιχής προσέγγισης, μεταξύ πολλών προτεινόμενων μεθόδων, χαθορίζει χαι το ρεαλισμό της τρισδιάστατης λύσης για το στεμματιχό μαγνητιχό πεδίο. Και σε αυτό τον τομέα, πέραν της χρήσης διεθνώς αναγνωρισμένων μεθόδων, εργαζόμαστε συστηματιχά χαι συνεργατιχά στο ΚΕΑΕΜ με σχοπό την ανάπτυξη μεθόδου η οποία να υπερέχει διεθνώς, υλοποιώντας έτσι άλλη μια πραχτιχή συνεισφορά του Κέντρου σε ερευνητιχά προβλήματα αιχμής. Η πρώτη μας δημοσίευση προς αυτή την χατεύθυνση πραγματοποιήθηχε το 2011 (Σχ. Ζ΄.5) ενώ οι προσπάθειες περαιτέρω βελτίωσης είναι συνεχείς.

Στη συνέχεια, υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων από μέρους μας ως προς τον υπολογισμό ηλεκτρικών ρευμάτων, μαγνητικών ενεργειών και ελικοτήτων τόσο τοπικά στην ηλιακή ατμόσφαιρα όσο και συνολικά για όλο τον Ήλιο και τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου. Από τα πιο σημαντικά μας ευρήματα είναι ο υπολογισμός ισχυρότατων ρευμάτων καθώς και μαγνητικών δυνάμεων Lorentz στη φωτόσφαιρα και η ποσοτική απόδειξη ότι οι γιγάντιες εκρήξεις CMEs αποτελούν την προσπάθεια του Ήλιου να απαλλαγεί από την περίσσεια ελικότητας την οποία παράγει (Georgoulis et al., 2009; Georgoulis Titov & Mikic, 2012). Η πρώτη θεωρητική διατύπωση προς αυτή την κατεύθυνση έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 1990 – τώρα πλέον είμαστε σε θέση να την αποδείξουμε και επί τη βάσει μετρήσεων και υπολογισμών.

Στον τομέα της ερμηνείας των παρατηρήσεων, θεωρούμε σημαντική τη συνεισφορά μας στην κατανόηση της απαρχής των μεγάλων ηλιακών εκρήξεων (εκλάμψεων και CMEs). Συνθέτοντας διάφορα κομμάτια του γρίφου, μέσω υπολογισμών διατυπώνουμε μια λογική αλληλουχία αιτίου – αιτιατού η οποία οδηγεί σε εκρήξεις κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και για συγκεκριμένα ηλιακά κέντρα δράσης. Σύμφυτη με αυτή την εξέλιξη είναι και η εύρεση από μέρους μας μιας πιθανότατα θεμελιώδους συσχέτισης ανάμεσα στη μαγνητική ενέργεια και την ελικότητα των επιμέρους ηλιακών μαγνητικών δομών, ανεξαρτήτως της μεθόδου υπολογισμού των μεγεθών αυτών (Σχ. Ζ΄.6). Η συσχέτιση αυτή έχει απτές εφαρμογές (α) στους τρόπους δημιουργίας των δομών αυτών και (β) στην απάντηση του ερωτήματος γιατί κάποιες δομές εκρήγνυνται, ενώ κάποιες άλλες όχι. Σε αυτούς τους τομείς εργαζόμαστε επίσης εντατικά.

Τέλος, θεωρούμε σημαντική τη συνεισφορά μας σε θέματα πρόγνωσης ηλιακών εκλάμψεων και CMEs. Από το 2007 έχουμε δημοσιεύσει και βελτιώσει μέθοδο (Georgoulis & Rust, 2007; Georgoulis 2008) σύμφωνα με την οποία η πιθανότητα εμφάνισης μιας μεγάλης έκλαμψης, ενός CME, καθώς και μια εκτιμώμενη αρχική ταχύτητα του CME, συνδέονται με μια βαθμωτή παράμετρο η οποία ποσοτικοποιεί τη μαγνητική πολυπλοκότητα ηλιακών κέντρων δράσης (Σχ. Ζ΄.7). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται εντατικά, τόσο από εμάς όσο και διεθνώς. Αποκορύφωμα της προσπάθειας αυτής είναι ο γενικός συντονισμός από μέρους ΚΕΑΕΜ της μεγάλης κοινοπραξίας FLARECAST της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του νέου ευρωπαϊκού προγράμματος-πλαισίου Horizon 2020. Αυτή την περίοδο συνεργαζόμαστε, εξάλλου, με ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για την εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου των ίδιων των CMEs στα αρχικά στάδια της εκτόξευσής τους σε μια προσπάθεια να κατανοήσουμε εκ των προτέρων την επίδρασή τους στο γήινο μαγνητικό πεδίο (Patsourakos & Georgoulis, 2016). Το πρόβλημα αυτό αποτελεί την κορωνίδα της πρόγνωσης του διαστημικού καιρού. Η συνεισφορά μας και σε αυτό τον τομέα θεωρείται σημαντική και εργαζόμαστε εντατικά και προς αυτή την κατεύθυνση.



Σχήμα Ζ΄.1: Ο Ήλιος με τις χηλίδες του στο λευχό φως, όπως είναι γνωστός εδώ χαι μια χιλιετία, περίπου (αριστερά) χαι όπως τον μάθαμε χατά τη διαστημιχή εποχή, λόγω των στεμματιχών μαγνητιχών πεδίων (δεξιά). Οι δύο ειχόνες είναι ταυτόχρονες χαι έχουν ληφθεί στις 30.07.2013 από την αποστολή Solar Dynamics Observatory (NASA).



Σχήμα Ζ'.2: Η ηλιαχή σταθερά ($\approx 1.366 \text{ kW/m}^2$) χαι οι μεταβολές που υφίσταται λόγω ηλιαχού χύχλου χατά τη διαστημιχή εποχή. Διαχρίνονται τρεις χύχλοι, οι 21 (1975 - 1986), 22 (1986 – 1997) χαι 23 (1997 – 2008) [Πηγή: James Hansen / NASA].



Σχήμα Ζ'.3: Μεγάλη ηλιαχή έχλαμψη (αριστερά) χαι CME (δεξιά) παρατηρημένα από την αποστολή Solar Dynamics Observatory (NASA). Μια τυπιχή έχλαμψη έχει ενέργεια $\approx 10^{23}$ J (περίπου 1 δισεχατομμύριο βόμβες όπως αυτή της Hiroshima) ενώ ένα τυπιχό CME έχει ανάλογη ενέργεια, μάζα 10 δισεχατομμύρια τόνους (περίπου 20 000 φορές το μεγαλύτερο δεξαμενόπλοιο) χαι χινείται με ταχύτητες από 500 έως χαι > 3 000 km/s.



Σχήμα Ζ'.4: Παράδειγμα δικής μας ανάλυσης για το ηλιακό κέντρο δράσης ΝΟΑΑ AR 11930, παρατηρημένο από την αποστολή Hinode (JAXA) στις 11.12.2006. Διακρίνεται το βασικό σύμπλεγμα κηλίδων που απαρτίζει το κέντρο δράσης και λεπτομέρειά του (πάνω), το αντίστοιχο φωτοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο και λεπτομέρειά του με την αζιμουθιακή αβεβαιότητα επιλυμένη (μέσο) και φωτοσφαιρική πυκνότητα ρεύματος και λεπτομέρειά της (κάτω). Η εικόνα έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό The Astrophysical Journal (Georgoulis, Titov & Mikic, 2012).



Σχήμα Ζ΄.5: Δική μας προσπάθεια ολικής παρέκτασης του παρατηρούμενου φωτοσφαιρικού μαγνητικού πεδίου στο στέμμα. Το επιφανειακό μαγνητικό πεδίο προέρχεται από παρατηρήσεις του επίγειου τηλεσκοπίου SOLIS (NSO, ΗΠΑ), ενώ οι δυναμικές γραμμές αποτελούν την υπολογισμένη τρισδιάστατη λύση του στεμματικού μαγνητικού πεδίου. Η εικόνα έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό Solar Physics (Contopoulos, Kalapotharakos & Georgoulis, 2011).



Σχήμα Ζ΄.6: Εύρεση από την ομάδα μας θεμελιώδους συσχέτισης ανάμεσα στο μέτρο |H| της μαγνητικής ελικότητας και τη μαγνητική ενέργεια E_c λόγω ηλεκτρικών ρευμάτων για διάφορους τύπους ηλιακών μαγνητικών δομών και διάφορες μεθόδους υπολογισμού. Η εικόνα έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό Astronomy & Astrophysics (Tziotziou et al., 2014).



Σχήμα Ζ'.7: Παράδειγμα αυτόματης (χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση) ανάλυσης κέντρου δράσης για τον υπολογισμό της πιθανότητας έκλαμψης σε αυτό. Το κέντρο δράσης NOAA AR 12205 αναγνωρίζεται στον ηλιακό δίσκο (αριστερά) και στη συνέχεια εκτιμάται η φωτοσφαιρική μαγνητική συνδεσιμότητά του (δεξιά) από την οποία θα εξαχθεί η πιθανότητα έκλαμψης και CME. Οι εικόνες προέρχονται από δύο τρέχοντα ερευνητικά προγράμματα πρόγνωσης διαστημικού καιρού του ESA και συγκεκριμένα τα A-EFFort (KEAEM) και FORSPEF (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

Αναφορές

- Contopoulos, I., Kalapotharakos, C., & Georgoulis, M. K.: Nonlinear Force-Free Reconstruction of the Global Solar Magnetic Field: Methodology, 2011, Sol. Phys., 269, 351
- 2. Georgoulis, M. K.: A New Technique for a Routine Azimuth Disambiguation of Solar Vector Magnetograms, Astrophys. J., 2005, 629, L69
- 3. Georgoulis, M. K.: Magnetic Complexity in Eruptive Active Regions and Associated Eruption Parameters, 2008, Geophys. Res. Lett., 35, L06S02
- 4. Georgoulis, M. K. & Rust, D. M.: Quantitative Forecasting of Major Solar Flares, 2007, Astrophys. J., 661, L109
- Georgoulis, M. K., Rust, D. M., Pevtsov, A. A., Bernasconi, P. N., & Kuzanyan, K. M.: Solar Magnetic Helicity Injected Into the Heliosphere: Magnitude, Balance, and Periodicities over Solar Cycle 23, 2009, Astrophys. J. Lett., 705, L48
- Georgoulis, M. K., Titov, V. S., & Mikic, Z.: Non-Neutralized Electric Current Patterns in Solar Active Regions: Origin of the Shear-Generating Lorentz Force, 2012, Astrophys. J., 761, 61
- Georgoulis, M. K., Tziotziou, K., & Raouafi, N.-E.: Magnetic Energy and Helicity Budgets in the Active-Region Solar Corona. II. Nonlinear Force-Free Approximation, 2012, Astrophys. J., 759, 1
- 8. Patsourakos, S. & Georgoulis, M. K.: Inference of the Near-Sun Magnetic-Field Magnitude of Coronal Mass Ejections and Extrapolation to ICME Magnetic Fields at 1 AU, 2016, Astron. Astrophys., submitted

 Tziotziou, K., Moraitis, K., Georgoulis, M. K., & Archontis, V.: Validation of the Magnetic Energy vs. Helicity Scaling in Solar Magnetic Structures, 2014, Astron. Astrophys., 570, id.L1

Η΄ «Ο δρόμος του Χάους»: αναλυτική περιγραφή των δομών του χάους σε δυναμικά συστήματα και εφαρμογές στη Δυναμική Αστρονομία

Μιρέλλα Χαρσούλα

Με τον όρο «δυναμικό σύστημα» δηλώνεται κάθε σύστημα, φυσικό, χημικό, βιολογικό, οικονομικό, οικολογικό, κλπ., που περιγράφεται από μαθηματικές εξισώσεις με τις οποίες μπορούμε να παρακολουθήσουμε την χρονική του εξέλιξη. Αν σε κάποια χρονική στιγμή, π.χ. την αρχική στιγμή της παρατήρησης, η κατάσταση ενός δυναμικού συστήματος, (π.χ. οι θέσεις και οι ταχύτητες όλων των αστεριών ενός γαλαξία) ορίζει μονοσήμαντα την μελλοντική και παρελθούσα εξέλιξή του στο χώρο των καταστάσεων, λέμε ότι πρόκειται για ντετερμινιστικό σύστημα.

Κατά κανόνα, σε όλα τα δυναμικά συστήματα υπάρχει συγχρόνως τάξη και χάος. Υπάρχουν, δηλαδή τροχιές στις οποίες μία μικρή μεταβολή στις αρχικές τους συνθήκες δεν μεταβάλλει πολύ την χρονική εξέλιξή τους στον χώρο (οργανωμένη τροχιά) και άλλες στις οποίες μία απειροελάχιστη μεταβολή των αρχικών συνθηκών δίνει μία τελείως διαφορετική χρονική εξέλιξη της τροχιάς στον χώρο (χαοτική τροχιά). Παραδείγματος χάριν, σε ένα μοντέλο που προσομοιάζει με έναν σπειροειδή γαλαξία σε 2 διαστάσεις, υπάρχουν οργανωμένες τροχίες αστεριών, οι οποίες μένουν περιορισμένες στον φυσικό (θέσεις) και φασικό (θέσεις-ταχύτητες) χώρο (Σχ. Η΄.1α), και χαοτικές τροχιές που μπορούν να γεμίζουν όλον τον επιτρεπτό φυσικό και φασικό χώρο (Σχ. Η΄.1β).



Σχήμα Η'.1: (α) Μία οργανωμένη τροχιά σε έναν σπειροειδή γαλαξία. (β) Μία χαοτική τροχιά σε έναν σπειροειδή γαλαξία.

Στην προσπάθεια εξήγησης της μορφολογίας των ραβδωτών-σπειροειδών γαλαξιών με μελέτη της τροχιαχής δομής σε προσομοιώσεις Ν-σωμάτων, δόθηκε από την ομάδα μας ιδιαίτερη έμφαση στον ρόλο των χαοτιχών τροχιών σχετιχά με την συνεισφορά τους στους σπειροειδείς βραχίονες του γαλαξία. Παλαιότερα, υπήρχε η εδραιωμένη αντίληψη ότι μόνο οι οργανωμένες τροχιές μπορούν να συμβάλλουν στην μορφολογία των σπειρών επειδή οι οργανωμένες περιοχές στον φυσιχό και φασιχό χώρο συγκρατούν γύρω τους την ύλη. Τα τελευταία όμως χρόνια, (μέσα στην δεκαετία του 2000 και έκτοτε) έχει δοθεί έμφαση στον ρόλο του χάους στην εμφάνιση της σπειροειδούς μορφής. Τα τελευταία χρόνια, η ομάδα μας στο ΚΕΑΕΜ έχει δημοσιεύσει μια σειρά από επιστημονικά άρθρα, στα οποία μελετάται η σημαντική συνεισφορά των χαοτικών τροχιών στην δημιουργία των σπειροειδών δομών στους γαλαξίες. Οι χαοτικές τροχιές των αστεριών στα μοντέλα αυτά, παρόλο που θα περίμενε κανείς να έχουν μία τυχαία κατανομή στον χώρο, φαίνονται να έχουν συμπεριφορά οργανωμένων τροχιών για μεγάλους χρόνους συγκρίσιμους με την ηλικία του Σύμπαντος και να παραμένουν «κολλημένες» σε κάποιες καμπύλες που εκφύονται από ασταθείς περιοδικές τροχιές στα όρια των ράβδων.



Σχήμα Η'.2: (α) Τα διαδοχικά σημεία μιάς χαοτικής τροχιάς (κόκκινα σημεία) φαίνονται να είναι τυχαία κατανεμημένα γύρω από μία οργανωμένη περιοχή (που περικλείεται από την μαύρη καμπύλη) στην απεικόνιση του Hénon. (β) Τα διάσπαρτα σημεία της εικόνας (α) ανήκουν, στην πραγματικότητα, σε μία συγκεκριμένη καμπύλη που ονομάζεται «καμπύλη Moser» και μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με έναν μαθηματικό τύπο. Η εικόνα αυτή έχει δημοσιευτεί στο επιστημονικό περιοδικό Journal of Physics A το 2015.

Για την κατανόηση αυτού του φαινομένου μελετήσαμε απλά δυναμικά συστήματα όπως είναι οι 2διάστατες απειχονίσεις και βρήχαμε χάποιους αναλυτιχούς μαθηματικούς τύπους (συγκλίνουσες σειρές) που περιγράφουν ακριβώς τις σταθερές αυτές διαδρομές που θα αχολουθήσουν οι χαοτιχές τροχιές. Στο Σχ. Η΄.2(α) φαίνεται η κατανομή των σημείων μιας χαοτικής τροχιάς (κόκκινα σημεία) γύρω από μία περιοχή οργανωμένης κίνησης (που περικλείεται από την συνεχή μαύρη γραμμή) σε ένα απλό δυναμικό σύστημα διακριτού χρόνου 2 διαστάσεων που ονομάζεται απεικόνιση του Hénon και παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά. Στην περίπτωση όμως που σχεδιαστεί μία διαδρομή που προέρχεται από έναν αναλυτικό μαθηματικό τύπο που έχει προκύψει από το μαθηματικό ανάπτυγμα των τύπων της απεικόνισης γύρω από μία περιοδική τροχιά, παρατηρείται ότι όλα αυτά τα διάσπαρτα σημεία της χαοτικής τροχιάς ανήκουν σε μία συγκεκριμένη «καμπύλη-διαδρομή» (Σχ. Η΄.2(β)). Η καμπύλη αυτή ονομάζεται «καμπύλη Moser», επειδή ο Γερμανο-Αμερικανός μαθηματικός Jurgen Moser απέδειξε ότι οι αναλυτικές αυτές σειρές γύρω από ασταθείς περιοδικές τροχιές συγκλίνουν και μπορούν να δώσουν μία καλή προσέγγιση αυτών των καμπυλών ανάλογα με την τάξη της αποκοπής τους. Στην πραγματικότητα υπάρχουν άπειρα τέτοια συγκεκριμένα «χαοτικά μονοπάτια» στη χαοτική περιοχή του κάθε δυναμικού συστήματος που μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά (με μία συγκεκριμένη ακρίβεια στους υπολογισμούς) και τα οποία καθορίζουν την διαδρομή κάθε χαοτική τροχιάς. Μπορούν λοιπόν να καθοριστούν τελείως ντετερμινιστικά οι «διαδρομές του χάους» ακόμα και σε συστήματα που επιτρέπουν την διαφυγή των τροχιών στο άπειρο μέσα από απλούς μαθηματικούς τύπους.

Αυτή η μελέτη οδήγησε επίσης στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην εύρεση αυτών των αναλυτικών μαθηματικών σειρών οι οποίοι συνοψίζονται στα παρακάτω: 1) οι σειρές αυτές περιορίζονται μέχρι κάποια τάξη και επομένως η αναλυτική περιγραφή συμπίπτει με την πραγματική αριθμητική περιγραφή μόνο σε ένα περιορισμένο αρχικό τμήμα των καμπυλών. Στην πραγματικότητα βέβαια μπορούμε να παρακολουθήσουμε αριθμητικά αυτές τις διαδρομές σε πολύ μεγάλο μήκος και 2) η περιοχή (στον φυσικό ή φασικό χώρο ενός συστήματος) μέσα στον οποίο μπορούμε να βρούμε τέτοιες αναλυτικές σειρές που συγκλίνουν είναι περιορισμένη. Μολαταύτα, είναι δυνατόν να βρεθεί ακριβώς αυτήν η συγκεκριμένη περιοχή της σύγκλισης χρησιμοποιώντας κάποια μαθηματικά κριτήρια, όπως το κριτήριο σύγκλισης του D' Alembert.



Σχήμα Η'.3: Αριστερά: Η περιοχή σύγκλισης των αναλυτικών καμπύλων "Moser" (κόκκινη περιοχή) στην απεικόνιση του Hénon. Η μπλε και πράσινη περιοχή είναι αντίστοιχα η πρώτη και δεύτερη απεικόνιση των τροχιών με αρχικές συνθήκες έξω από την περιοχή σύγκλισης. Οι δύο περιοχές μέσα και έξω από την περιοχή σύγκλισης δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Η εικόνα αυτή έχει δημοσιευτεί στο επιστημονικό περιοδικό Journal of Physics A το 2015. Δεξιά: Η εικόνα ενός ραβδωτού σπειροειδή γαλαξία όπως έχει προκύψει από μία προσομοίωση N-σωμάτων. Οι μαύρες σπειροειδείς περιοχές του σημείου L_1 (μπλέ σημείο) και L_2 . Όλες οι χαοτικές τροχίες ακολουθούν αυτό το συγκεκριμένο μονοπάτι πριν να διαφύγουν από τον γαλαξία.

Στο Σχ. Η΄.3 (αριστερά) έχει απειχονιστεί μία τέτοια περιοχή σύγκλισης των αναλυτικών τύπων που περιγράφουν τις χαοτικές διαδρομές, για την απεικόνιση Hénon (μπλε περιοχή γύρω από την ασταθή περιοδική τροχιά «Ο»). Μία σημαντική νέα ανακάλυψη είναι το γεγονός ότι αυτή η «περιοχή σύγκλισης» δεν επικοινωνεί με τον υπόλοιπο χώρο της απεικόνισης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι χαοτικές τροχιές με αρχικές συνθήκες μέσα σε αυτή την περιοχή να μπορούν να κινηθούν μόνο μέσα από τα όρια αυτής της περιοχής. Για παράδειγμα, στο Σχ. Η΄.3 (αριστερά) απειχονίζεται η εξέλιξη των αρχικών συνθηκών που βρίσχονται έξω από την μπλε περιοχή σύγκλισης. Η πρώτη τους απεικόνιση μέσω των τύπων του Hénon, αντιστοιχεί στην πράσινη περιοχή, ενώ η δεύτερη απεικόνιση στην κόκκινη περιοχή. Παρόλο που οι διαδοχικές τους απεικονίσεις πλησιάζουν την μπλε περιοχή σύγκλισης στην πραγματικότητα δεν μπορούν ποτέ να μπουν στην περιοχή αυτή.

Στην τελευταία μας ερευνητική δουλειά μελετάται μία πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της ύπαρξης των χαμπυλών «Moser» και των περιοχών «σύγκλισης» που περιορίζουν χωρικά τις χαοτικές τροχιές. Η εφαρμογή αφορά στους ραβδωτούςσπειροειδείς γαλαξίες (Σχ. Η΄.3 (δεξιά)). Η μελέτη μας επικεντρώνεται στην περιοδική τροχιά του σημείου Lagrange L1 που βρίσκεται κοντά στο τέλος της ράβδου (μπλε σημείο στο Σχ. Η'.3). Κατόπιν γίνεται η ανάλυση που περιγράφηχε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας μία προσεγγιστική απεικόνιση η οποία έχει προέλθει από το δυναμικό ενός ραβδωτού σπειροειδή γαλαξία. Το γαλαξιακό αυτό μοντέλο έχει προκύψει με την χρήση κώδικα Ν-σωμάτων. Έτσι εντοπίζουμε την «περιοχή σύγκλισης» των αναλυτικών σειρών που μας δίνουν τις καμπύλες "Moser" (μαύρη περιοχή στο (Σχ. Η΄.3(δεξιά)). Αυτή η περιοχή φαίνεται να έχει σπειροειδές σχήμα. Στη συνέχεια θα πρέπει να βρεθούν και οι αντίστοιχες περιοχές από άλλες σημαντικές περιοδικές τροχιές του συγκεκριμένου μοντέλου και να απεικονιστούν όλες μπροστά στο χρόνο για να δώσουν μαζί με τις αναδιπλώσεις τους ένα πάχος που να μπορεί να συγχριθεί με το πάχος των σπειροειδών βραχιόνων του γαλαξία. Το σημαντικό συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι οι διαδρομές που ακολουθούν οι χαοτικές τροχιές πριν διαφύγουν τελείως από το γαλαξιαχό αυτό μοντέλο έχουν σπειροειδή μορφή χαι μπορούν να περιγραφούν με αναλυτικούς τύπους.

Σε παλαιότερη εργασία της ομάδας μας, η οποία έχει δημοσιευτεί στο επιστημονικό περιοδικό "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society" το 2013, είχε βρεθεί άλλωστε ότι η διάχυση των χαοτικών αυτών τροχιών μέσα από αυτές τις διαδρομές στο γαλαξιακό αυτό μοντέλο μπορεί να γίνει πολύ αργή έτσι ώστε να παρουσιάζουν συμπεριφορά οργανωμένων τροχιών για χρόνους συγκρίσιμους με την ηλικία του Σύμπαντος. Τώρα λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι οι χρόνοι διαφυγής μπορεί να γίνουν πολύ μεγάλοι λόγω των πολλαπλών αναδιπλώσεων αυτών των καμπυλών "Moser" μέσα στην επιτρεπτή περιοχή κίνησης.

Θ΄ Γήινο Περιβάλλον και Εγγύς Διάστημα

Βασίλειος Τριτάκης

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα της Γης δεν εντοπίζονται μόνο σε ανθρωπογενή η φυσικά φαινόμενα της ατμοσφαίρας αλλά και σε εξωγενείς επιδράσεις που προέρχονται από το πλανητικό σύστημα μέσα στο οποίο βρισκόμαστε. Οι επιδράσεις που δέχεται από το εγγύς διάστημα η Γη έχουν ιδιαίτερη σημασία χαθώς πέρα όλων των άλλων φιλοξενεί την ζωή, ένα γεγονός μοναδικό καθώς δεν έχει εντοπιστεί ακόμη άλλος χώρος μέσα στο σύμπαν που να φιλοξενεί οποιασδήποτε μορφής ζωή. Η Γη είναι ο τρίτος πλανήτης από τον Ήλιο, μετά τον Ερμή και την Αφροδίτη. Ακολουθούν ο Άρης, ο Δίας, ο Κρόνος, ο Ουρανός και ο Πλούτωνας. Από αυτή την άποψη, βρίσκεται σε προνομιούχο θέση ως προς τον Ήλιο γι' αυτό και τελικά κατάφερε να δημιουργήσει και να συντηρήσει ζωή σε αντίθεση με τους άλλους πλανήτες που δεν τα κατάφεραν. Βρίσκεται αρκετά κοντά στον Ήλιο για να δέχεται την απαραίτητη ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται για να διατηρεί μία ικανοποιητική θερμοκρασία και αρκετά μακριά για να μην υπερθερμανθεί. Παράλληλα έχει το σωστό μέγεθος, αρχετά μεγάλο για να συγχρατεί την απαραίτητη ατμόσφαιρα χαι αρχετά μιχρό για να μην αναπτύσσει υπερβολική βαρύτητα. Η σχέση της όμως με τον Ήλιο βρίσκεται πάντα σε λεπτή ισορροπία, η οποία αν διαταραχθεί θα έχει ολέθριες συνέπειες για την ζωή επάνω στη Γη. Ο Ήλιος είναι μία φλεγόμενη ρευστή σφαίρα η θερμοχρασία της οποίας χυμαίνεται από 6000 έως 1,5 εχατομμύριο βαθμούς Κελσίου. Στην επιφάνεια του Ήλιου αναπτύσσονται εκρηκτικά κέντρα δράσεως τα οποία εκτοξεύουν συνεχώς σωματιδιακή (ηλεκτρόνια, πρωτόνια πυρήνες ηλίου) και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (υπεριώδη ακτινοβολία, ακτίνες Χ, ακτίνες γ) ποσοστό της οποίας φτάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας. Οι ακτινοβολίες αυτές έχουν τεράστια βιολογική επίδραση, με απλά λόγια καταστρέφουν άμεσα οτιδήποτε οργανικό π.χ. κύτταρα, οπότε αν έστω και ένα μικρό ποσοστό τους κατάφερνε να φτάσει στην επιφάνεια της Γης η ζωή θα καταστρεφόταν ολοσχερώς μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.



Σχήμα Θ΄.1: Ο Ήλιος αριστερά και οι εννέα πλανήτες κατά σειρά απόστασης από τον Ήλιο. Ερμής, Αφροδίτη, Γη, Άρης, Δίας, Κρόνος, Ποσειδών, Ουρανός και Πλούτων.



Σχήμα Θ'.2: Η ατμόσφαιρα του Ήλιου (χρωμόσφαιρα) άνω αριστερά. Οι λαμπρές περιοχές είναι κέντρα δράσεως στα οποία δημιουργούνται ισχυρότατες εκρήξεις και από τα οποία εκπέμπονται ακτινοβολίες υψηλής ενέργειας. Η εξωτερική ατμόσφαιρα του Ήλιου (στέμμα) κάτω αριστερά. Οι σκοτεινές περιοχές ονομάζονται στεμματικές οπές και μέσα από αυτές διέρχεται ένα συνεχές ρεύμα σωματιδίων που ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Δεξιά επάνω φαίνεται η μεταβολή ενέργειας στην σκληρή υπεριώδη ακτινοβολία ενώ κάτω δεξιά απεικονίζεται η μεταβολή ενέργειας του ηλιακού ανέμου.

Η Γη όμως έχει φροντίσει να θωρακιστεί από τις ηλιακές εκρήξεις και τις ακτινοβολίες που τις συνοδεύουν με δύο εξαιρετικά αποτελεσματικές ασπίδες, το γήινο μαγνητικό πεδίο και την ατμόσφαιρα της. Το μαγνητικό πεδίο θωρακίζει τη Γη από την σωματιδιακή ακτινοβολία, η ατμόσφαιρα από την ηλεκτρομαγνητική. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα νέφος σωματιδίων ηλιακού ανέμου να εκτοξεύεται από την ατμόσφαιρα του Ήλιου και κατευθύνεται προς την Γη. Η Γη όμως βρίσκεται καλά προστατευμένη μέσα στο μαγνητικό της πεδίο.

Το νέφος του ηλιαχού ανέμου προσχρούει επάνω στις μαγνητιχές γραμμές, χαι ρέει γύρω από το χέλυφος της γήινης μαγνητόσφαιρας αχριβώς όπως ρέει το νερό γύρω από μία συμπαγή σφαίρα όταν την συναντήσει στον δρόμο του. Στη συνέχεια το νέφος των σωματιδίων ρέοντας γύρω από την μαγνητόσφαιρα χαταλήγει στο πίσω μέρος της, στην μαγνητιχή ουρά, όπου εχμεταλλευόμενο την αντίθετη χατεύθυνση των μαγνητιχών γραμμών αλλάζει πορεία χαι χατευθύνεται πάλι προς την Γη, οι χλειστές μαγνητιχές γραμμές της όμως εμποδίζουν χαι πάλι την είσοδο τον σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της Γης. Τελιχά τα ηλιαχά σωματίδια συγχεντρώνονται χοντά στους δύο γήινους πόλους σχηματίζοντας από μία έγχρωμη ζώνη, το γνωστό μας πολιχό σέλας, το βόρειο σέλας (Aurora Borealis) χαι το νότιο σέλας (Aurora Australis). Με αυτό τον τρόπο η Γη μένει απρόσβλητη από την σωματιδιαχή αχτινοβολία του Ήλιου.

Ανάλογη προστασία στη Γη από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρέχει η ατμόσφαιρα της. Η γήινη ατμόσφαιρα εκτείνεται σε ύψος χιλίων περίπου χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της Γης και αποτελείται από επάλληλα στρώματα με διάφορες φυσικές ιδιότητες το καθένα. Τροπόσφαιρα (0-12km, στρατόσφαιρα 12-100 km, μεσόσφαιρα(100-500 km, ιονόσφαιρα κλπ.



Σχήμα Θ΄.3: Επίθεση ηλιαχού ανέμου εναντίον της Γης. Η Γη είναι ο λευχός χύχλος δεξιά ενώ οι μπλε γραμμές συγχροτούν το μαγνητιχό της πεδίο που την προστατεύει.



Σχήμα Θ΄.4: Απόκρουση του ηλιακού ανέμου από την γήινη μαγνητόσφαιρα (αριστερά). Ο ηλιακός άνεμος εμποδίζεται να φτάσει στη Γη και υποχρεώνεται να ρεύσει στο εξωτερικό τμήμα της μαγνητόσφαιρας (ροζ νέφος).



Σχήμα Θ΄.5: ΑνάλοΓη εικόνα με την προηγούμενη όπου απεικονίζεται η τροχιά ροής του ηλιακού ανέμου γύρω από την Γη (μαύρος κύκλος)

Το πρώτο στρώμα που εκτείνεται σε ύψος από μηδέν έως δέκα- δώδεκα χιλιόμετρα λέγεται τροπόσφαιρα και είναι το στρώμα μέσα στο οποίο συμβαίνουν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα (νέφωση, βροχή, χιόνι, κλπ.) Το αμέσως επόμενο στρώμα λέγεται στρατόσφαιρα και εκτείνεται από το τέλος της τροπόσφαιρας (τροπόπαυση) μέχρι το ύψος των εκατό χιλιομέτρων. Το στρώμα αυτό παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον διότι περιέχει το καθοριστικό για την επιβίωση μας στρώμα του όζοντος.



Σχήμα Θ΄.6: Στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας.

Το στρώμα αυτό εκτείνεται από το ύψος των 25 έως 75 χιλιομέτρων με μέγιστη πυκνότητα στα 35-37 χιλιόμετρα, αποτελεί δε την κύρια ασπίδα προστασίας της Γης από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία. Η εξαιρετικά δραστική και επιβλαβής για την ζωή υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον με μία απλή αλλά αποτελεσματική χημική αντίδραση (διάσπαση του όζοντος σε μοριακό και ατομικό οξυγόνο και στην συνέχεια επανασύνδεση τους σε όζον) με τελικό αποτέλεσμα να μην φτάνει υπεριώδης ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης πράγμα που θα προκαλούσε την απόλυτη βιολογική καταστροφή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ολόκληρο το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών από τα πλέον μακρά ραδιοκύματα στα αριστερά όπως κοιτάζουμε, μέχρι τις υπέρ–υψίσυχνες κοσμικές ακτίνες στα δεξιά. Η λεπτή έγχρωμη ταινία στη μέση του φάσματος ορίζει την ορατή περιοχή του φάσματος από το ερυθρό έως το ιώδες χρώμα.

Το τμήμα του φάσματος που βρίσκεται αριστερά του ορατού αποτελείται από ραδιοχύματα διαφόρων συχνοτήτων και είναι γενικά αχίνδυνο. αντίθετα, το τμήμα δεξιά του ορατού είναι εξαιρετικά θανατηφόρο. Όλες οι αχτινοβολίες της περιοχής αυτής, υπεριώδεις, αχτίνες-Χ, αχτίνες-γ έχουν μεγάλη βιολογική δραστηριότητα με αποτέλεσμα αν το τμήμα αυτό του φάσματος έφτανε ποτέ στη Γη θα νέχρωνε χάθε μορφή ζωής μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα.

Ευτυχώς όμως υπάρχει το στρώμα του όζοντος που σε ύψος 30-60 χιλιόμετρα περίπου πάνω από τη Γη απορροφά τις θανατηφόρες αυτές ακτινοβολίες. Τελικά από την πολύπλοκη ηλιακή ακτινοβολία στη Γη φτάνει μόνο η ορατή περιοχή, μία λεπτή περιοχή υπερύθρου (θερμότητα), μία λεπτή περιοχή υπεριώδους (προκαλεί το μαύρισμα της ηλιοθεραπείας) και ένα τμήμα ραδιοκυμάτων στην περιοχή των μικροκυμάτων. ακόμη όμως και αυτό το μικρό ποσοστό του ηλιακού φάσματος που διεισδύει στην ατμόσφαιρα φαίνεται ότι προκαλεί ουσιαστικές μεταβολές. Το τμήμα της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που φτάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας έχει σταθερή ροή και είναι ίση με $1,938cal/(min \cdot cm^2)$. Αυτό σημαίνει ότι στα όρια της ατμόσφαιρας (περίπου 1000 χιλιόμετρα ύψος) κάθε τετραγωνικό εκατοστό

επιφάνειας δέχεται 1,938 θερμίδες ενέργειας ή θερμότητος το λεπτό. Το νούμερο αυτό για πολλά χρόνια εθεωρείτο σταθερό γι' αυτό και ονομαζόταν «ηλιακή σταθερά».



Σχήμα Θ΄.7: Πλήρες φάσμα ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών από τα μακρά ραδιοφωνικά κύματα (άκρο Αριστερά) μέχρι την ακτινοβολία –γ στα δεξιά. Η έγχρωμη λωρίδα στο μέσον είναι το ορατό φως, δηλαδή τα χρώματα της ίριδος, κόκκινο, πορτοκαλή, κίτρινο, πράσινο, μπλε, βαθύ μπλε και μωβ.

Όταν όμως οι παρατηρήσεις, χάρη στους τεχνητούς δορυφόρους, έγιναν ακριβέστερες αποκαλύφτηκε ότι η «ηλιακή σταθερά» δεν ήταν καθόλου σταθερά. Φάνηκε τότε ότι η η.σ. μεταβάλλεται με ρυθμό ανάλογο του ενδεκαετούς ηλιακού κύκλου. αυτό ίσως εξηγεί κάποια κλιματικά φαινόμενα τόσο του παρελθόντος όσο και του παρόντος που ακόμη φαίνονται ανεξήΓητα.

Χαρακτηριστικό φαινόμενο αυτής της κατηγορίας είναι το πασίγνωστο φαινόμενο El Nijio (μικρό αγόρι) που πήρε το όνομα αυτό επειδή συνήθως παρουσιάζεται Δεκέμβριο μήνα και συνδυάζεται με τα Χριστούγεννα. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στον ειρηνικό Ωκεανό και χαρακτηρίζεται από αυξημένη θερμοκρασία της θάλασσας η οποία δημιουργεί μία ολόχληρη σειρά διαδιχασιών. Η εμφάνιση χαι η διάρχεια του δεν υπαχούουν σε χάποιο εμφανή χανόνα, παρουσιάζεται αχανόνιστα κάθε δύο έως επτά χρόνια και διαρκεί από εννέα μήνες έως δύο χρόνια. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης στον Ινδικό ωκεανό, Ινδονησία και την Αυστραλία με παράλληλη πτώση πίεσης στον κεντρικό και ανατολικό ειρηνικό Ωκεανό. Η διαφορά αυτή πίεσης προκαλεί βροχές στην συνήθως ξηρά περιοχή του ανατολικού ειρηνικού και ξηρασία στον συνήθως υγρό δυτικό ειρηνικό. Πρόκειται για μετεωρολογική μεταβολή μεγάλης κλίμακας που έχει μεγάλες επιπτώσεις στην χοινωνιχή και οικονομική ζωή μεγάλων περιοχών. Καταρχήν η θέρμανση της θάλασσας υποχρεώνει τα ψάρια να απομαχρυνθούν από την περιοχή πράγμα που έχει μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο στους πληθυσμούς των κρατών που έχουν ακτές στον ειρηνικό. Η ξηρασία που προκαλείται σε πολλές περιοχές ελαττώνει τα υδάτινα αποθέματα με μεγάλο αντίκτυπο στην Γεωργία. Το ατμοσφαιρικό τμήμα του φαινομένου El Nijio, ονομάζεται και Νότια κύμανση (Southern Oscillation). Αδελφό φαινόμενο προς το El Ninjio θεωρείται το La Niña (μιχρό χορίτσι) το οποίο παρουσιάζει τα εντελώς αντίθετα αποτελέσματα με το El Nijio. Επηρεάζει ολόκληρα τα καιρικά συστήματα των ακτών του Περού, Χιλής, Νέας Ζηλανδίας καθώς και το σύστημα τυφώνων του ατλαντικού, με πολύ δυσάρεστες συνέπειες για τις οικονομίες όλων αυτών των περιοχών που πλήττει.



Σχήμα Θ΄.8: Μεταβολή «ηλιαχής σταθεράς» χατά την διάρχεια δύο ηλιαχών ενδεχαετών χύχλων.



Σχήμα Θ΄.9: Ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τον Ήλιο (επάνω κόκκινη λωρίδα και ακτινοβολίες που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης (Κάτω μπλε λωρίδα).

Συνήθως τα φαινόμενα αυτά παρουσιάζονται το ένα μετά το άλλο χωρίς όμως αυτό να είναι και απόλυτο ενώ η ηλιακή επίδραση στον σχηματισμό και την εξέλιξη τους θεωρείται πολύ πιθανή χωρίς όμως να έχει ακόμη επιβεβαιωθεί.

Ένα άλλο φαινόμενο στο οποίο η ηλιακή επίδραση θεωρείται εξαιρετικά πιθανή είναι η μικρή εποχή των παγετώνων (Little Ice Age) που σημειώθηκε περί τον 15-16 αιώνα π.χ. κατά την περίοδο αυτή σημειώθηκαν αφύσικα χαμηλές θερμοκρασίες στην Ευρώπη, ιδιαίτερα την κεντρική ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε απόλυτη απουσία δραστηριότητος στον Ήλιο.

Τα δύο αυτά φαινόμενα, χαμηλές θερμοχρασίες στην Ευρώπη, μηδενική δραστηριότητα στον ήλιο έχουν συσχετιστεί και ταυτοποιηθεί χωρίς όμως να εξηΓηθεί ακόμη ο μηχανισμός που τα συνδέει. Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό είναι σκόπιμο από πολλές πλευρές να υπογραμμίσουμε τον αποφασιστικό ρόλο που διαδραμάτισε η διαστημική τεχνολογία των τελευταίων δεκαετιών στην μελέτη και ανάλυση των μηχανισμών που προστατεύουν το γήινο περιβάλλον από εξωγενείς κινδύνους. Μια σειρά φωτογραφιών και σχολίων που ακολουθεί δείχνει ακριβώς το μέγεθος των δυνατοτήτων της.



Σχήμα Θ'.10: Κυκλοφορία του αέρα και των νεφικών συστημάτων στο κεντρικό Ειρηνικό Ωκεανό κατά την διάρκεια φυσιολογικής μετεωρολογικής κατάστασης (σχήμα αριστερά) και κατά την διάρκεια φαινομένου El Ninjio (σχήμα στο κέντρο). Το δεξιό σχήμα είναι δορυφορική φωτογραφία που απεικονίζει την άνοδο της θερμοκρασίας της θάλασσας στον κεντρικό ειρηνικό (κόκκινη λωρίδα) από τις ακτές του Περού μέχρι την Ταϊτή.



Σχήμα Θ΄.11: Δορυφόρος τηλεπισκόπησης. Φωτογραφίζει διάφορες γήινες δραστηριότητες με υψηλή ακρίβεια.



Σχήμα Θ΄.12: Σειρά δορυφοριχών φωτογραφιών που δείχνουν ολόχληρη την Γη φωτισμένη την νύχτα. Από τέτοιες φωτογραφίες υπολογίζεται η πυχνότητα πληθυσμού χατά περιοχή, η χαταναλισχόμενη ενέργεια, ο βαθμός τεχνολογιχού πολιτισμού χαι πολλοί άλλοι δείχτες.



Σχήμα Θ΄.13: Σειρά δορυφοριχών φωτογραφιών που δείχνουν τον βαθμό δασοχάλυψης χαι βλάστησης σε ολόχληρη της επιφάνεια της Γης.



Σχήμα Θ΄.14: Δορυφορικές φωτογραφίες που δείχνουν την μεταβολή της παγοκάλυψης στον Βόρειο Πόλο.

Οι παραπάνω φωτογραφίες παρουσιάζουν μερικές πολύ απλές εφαρμογές της διαστημικής τεχνολογίας διότι υπάρχουν πολύ πολυπλοκότερες και περισσότερο αξιοποιήσιμες.

Παρόλα αυτά δεν λείπουν οι γχρίνιες και οι μεμψιμοιρίες για τις δραστηριότητες της διαστημικής τεχνολογίας. Καταρχήν η διαστημική έρευνα έχει κατηγορηθεί ότι απορροφά πολλά χρήματα όταν τα χρήματα αυτά χρειάζονται να καλύψουν άλλους τομείς προτεραιοτήτων όπως π.χ. η υγεία. Μία σύντομη ανάλυση όμως των οικονομικών που αφορούν την διαστημική έρευνα και η σύγκριση με άλλες δραστηριότητες αποδεικνύει ότι τα πράγματα δεν είναι ακριβώς έτσι. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το κόστος βασικών διαστημικών αποστολών ανάλογα με το μέγεθος τους. Από τα παρακάτω προκύπτει ότι μία μεγάλη διαστημική αποστολή δεν στοιχίζει περισσότερο από ένα σύγχρονο υποβρύχιο (περίπου 1 δισεκατομμύριο δολάρια) ενώ μία μικρή αποστολή 50-150 εκατομμυρίων δολαρίων δεν στοιχίζει περισσότερο από 1-2 σύγχρονα μαχητικά αεροσκάφη F-16. Αν δε από τα κόστη αυτά αφαιρέσετε το όφελος που προκύπτει από τα παραγόμενα προϊόντα (φωτογραφήσεις, υπολογισμοί, εκτιμήσεις, τηλεπικοινωνίες, συστήματα εντοπισμού GPS, μετεωρολογικές και κλιματικές προβλέψεις, έγκαιρες προειδοποιήσεις για επικίνδυνες καταστάσεις, κλπ.) τότε το κόστος σχεδόν μηδενίζεται μέσω αποσβέσεων. Έχει υπολογιστεί ότι κάθε δολάριο που επενδύεται στο διάστημα αποδίδει οχτώ δολάρια προϊόντων. Καμία άλλη νόμιμη επένδυση στον χόσμο δεν έχει απόδοση 1:8. Μόνο παράνομες χαι εγχληματιχές δραστηριότητες όπως το εμπόριο ναρχωτιχών χαι όπλων μπορούν να αποδώσουν τέτοια χέρδη.

Κόστος Διαστημικών Προγραμμάτων

Μικρές αποστολές: 50-150 εκατομ. δολάρια Μεσαίες αποστολές: 300-600 εκατομ. δολάρια Μεγάλες αποστολές: 800 εκατομ. – 1,5 δισεκ. δολάρια

Συγκρίσεις

Υποβρύχιο 214: 1 δισεκ. δολάρια Μαχητικό F-16 εξοπλισμένο: 50 εκατομ. δολάρια (έχουμε 200 περίπου)

Στην συνέχεια παρατίθεται πίναχας με τους ετήσιους προϋπολογισμούς των χυριότερων διαστημικών οργανισμών του κόσμου από τους οποίους προχύπτει ότι τα χρήματα που ξοδεύονται για διαστημικά προγράμματα είναι ελάχιστα μπροστά σε αυτά που ξοδεύονται για άλλες χρατικές δραστηριότητες όπως π.χ. οι εξοπλισμοί.

Ετήσιοι Προυπολογισμοί Κυριότερων Διαστημικών Οργανισμών

ΝΑSΑ (Αμερική): 9,5 δισεκ. δολάρια ESA (Ευρώπη): 3,5 δισεκ. δολάρια JAXA (Ιαπωνία): 1,8 δισεκ. δολάρια ROSCOSMOS (Ρωσία): 6 δισεκ. δολάρια Ελληνικό χρέος (2013): 370 δισεκ. Ευρώ ή 460 δισεκ. δολάρια.

Τέλος στον τελευταίο πίνακα παρουσιάζονται τα ποσά που δαπανώνται σε διάφορες δραστηριότητες παγκοσμίως. Το εμπόριο όπλων καλύπτει 50 δισεκατομμύρια δολάρια, πολύ περισσότερα δηλαδή από τα διαστημικά προγράμματα όλων των χωρών μαζί. Το εμπόριο ναρκωτικών επισήμως καλύπτει 200 δις αν και κατά κάποιους ανεπίσημους υπολογισμούς πρέπει να ξεπερνά το 1 τρισεκατομμύριο δολάρια ετησίως. Ίσως κάποιοι αναρωτηθούν γιατί αναφέρω το εμπόριο φαρμάκων, το οποίο σημειώνει ετήσιους κύκλους εργασιών ανάλογους εκείνων των ναρκωτικών, ανάμεσα σε ημιπαράνομες ή εντελώς παράνομες δραστηριότητες. Ο λόγος είναι ότι η κερδοσκοπία των φαρμακοβιομηχανιών, με την υπερτιμολόγηση των προϊόντων τους, την κυκλοφορία άχρηστων ή αναποτελεσματικών προϊόντων και την παραγωγή κακών απομιμήσεων από τρίτες χώρες, έχει καταφέρει να εντάξει το εμπόριο φαρμάκων στις ημι-παράνομες ή επιεικώς ύποπτες δραστηριότητες.

Ετήσιοι Κύκλοι Εργασιών Μεγάλων Δραστηριοτήτων

Εμπόριο Όπλων: 50 δισ. δολάρια (Ελλάδα: 4,8 δισ.) Εμπόριο Ναρχωτιχών: 200 δισ. δολάρια ???? Εμπόριο Φαρμάχων: 800 δισ. δολάρια !!!!

Τα συμπεράσματα στα οποία θα μπορούσαμε να καταλήξουμε από το σύνολο της παρουσίασης αυτής αφορούν κυρίως το περιβαλλοντικό κομμάτι προστασίας της Γης. Μέσα στις περιβαλλοντικές υποχρεώσεις της ανθρωπότητας προβάλει πλέον ως πρωταρχικής σημασίας η προστασία των δύο γήινων ασπίδων, της μαγνητόσφαιρας και του στρώματος του όζοντος. Η μαγνητόσφαιρα, ως ηλεκτρομαγνητικός σχηματισμός θα μπορούσε να διαταραχθεί μόνο με πυρηνικές δραστηριότητες του ανθρώπου στην ατμόσφαιρα π.χ. πυρηνικές δοκιμές κάτι που με τις σημερινές συνθήκες δεν φαίνεται πιθανό. Μόνο σε ένα ανεξέλεγκτο πυρηνικό πόλεμο θα μπορούσε να καταστραφεί, κάτι που δεν θα είχε όμως σημασία, διότι η καταστροφή της Γης θα είχε ήδη συντελεστεί από την πυρηνική σύρραξη.

Αντίθετα η καταστροφή του στρώματος του όζοντος είναι πολύ περισσότερο πιθανή. Το όζον είναι ένα πολύ ασταθές αέριο και μπορεί να καταστραφεί πολύ εύκολα από την χρήση άλλων βιομηχανικών αερίων όπως το Freon που χρησιμοποιείται στα κλιματιστικά και ψυκτικά μηχανήματα, τα προωθητικά αέρια που χρησιμοποιούνται στα spray, τα καυσαέρια των αεροσκαφών που πετούν στα όρια της τροπόπαυσης (12km ύψος) και άλλα. Για τον λόγο αυτό με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ που υπεγράφη πριν 20 χρόνια έχουν μπει σοβαροί περιορισμοί στην χρήση αερίων που θα μπορούσαν να βλάψουν το όζον. Καθήκον δικό μας πλέον είναι τους περιορισμούς αυτούς που εισήγαγε το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ απλά να τους τηρούμε.

Θα πρέπει πάντα να θυμόμαστε δύο πράγματα. Το ένα είναι ότι ο άνθρωπος πολύ εύχολα μπορεί να καταστρέψει ή να προχαλέσει περιβαλλοντιχές ζημιές, πολύ δύσχολα όμως μπορεί να τις επανορθώσει. Το δεύτερο είναι ότι η φύση είναι πολύ ισχυρότερη από την ανθρώπινη τεχνολογία. Το τσουνάμι της Ινδονησίας τα Χριστούγεννα του 2004 στοίχισε την ζωή σε πάνω από 200.000 ανθρώπους και δισεχατομμύρια δολάρια υλιχές ζημιές ενώ το ανάλογο τσουνάμι της Ιαπωνίας την Άνοιξη του 2011 στοίχισε 20.000 θύματα και ένα πυρηνιχό ατύχημα. Θα πρέπει λοιπόν να σεβόμαστε την φύση και να μην την προχαλούμε διότι αν θυμώσει και μας επιτεθεί, η τεχνολογία που διαθέτουμε δεν θα μπορέσει να μας προστατεύσει.

Και κάτι ακόμη. Η Γη έχει ηλικία 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια και η ζωή μόνο 2 δισεκατομμύρια. η παρουσία του ανθρώπου επάνω στη Γη δεν ξεπερνά το 1 εκατομμύριο χρόνια. Αυτό δείχνει ότι η ζωή δεν είναι απαραίτητο συστατικό της Γης ή ποιο απλά η Γη μπορεί να ζήσει και χωρίς εμάς. Έζησε δισεκατομμύρια χρόνια χωρίς ζωή επάνω της και σίγουρα μπορεί να ζήσει αρκετά ακόμη χωρίς εμάς. Γι' αυτό ας προσπαθήσουμε να μην την προκαλούμε.

Ι΄ Διαφυγές Αστέρων

Γ. Κοντόπουλος & Μ. Χαρσούλα

Ι'.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι πολλοί αστέρες του Γαλαξίου μας διαφεύγουν εις το άπειρο μετά από ένα αρχετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο συνήθης μηχανισμός διαφυγής είναι ο εξής: Λόγω των προσεγγίσεων αστέρων μεταξύ τους οι ταχύτητες των αστέρων μεταβάλλονται χατά τυχαίο τρόπο, χαι η χατανομή των ταχυτήτων πλησιάζει προς την χατανομή Maxwell, παρόμοια με την χατανομή των ταχυτήτων των μορίων του αέρος ενός δωματίου (Σχ. Ι΄.1).



Σχήμα Ι΄.1: Κατανομή ταχυτήτων Maxwell

Η κατανομή Maxwell έχει λίγα μόρια με μικρές και μεγάλες ταχύτητες, ενώ οι περισσότεροι αστέρες έχουν μια μέση ταχύτητα. Η κατανομή αυτή αποκαθίσταται λόγω των τυχαίων συγκρούσεων των μορίων μεταξύ τους και με τα τοιχώματα σε ένα χρονικό διάστημα που λέγεται "χρόνος αλλοιώσεως" (time of relaxation). Στην περίπτωση του αερίου ο χρόνος αλλοιώσεως είναι μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Στον γαλαξία όμως ο χρόνος αλλοιώσεως είναι περίπου 1014 έτη (100 τρισεκατομμύρια έτη).

Υπάρχει όμως μία σημαντική διαφορά μεταξύ του αερίου ενός δωματίου και ενός γαλαξίου. Ο γαλαξίας δεν περιβάλλεται από τοίχωμα, και άρα όσοι αστέρες έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαφυγής V_{esc} φεύγουν εις το άπειρο.

Κάτι ανάλογο γίνεται και με την ατμόσφαιρα της Γης, που επίσης δεν περιβάλλεται από τοίχωμα. Τα ελαφρά στοιχεία, όπως το υδρογόνο και το ήλιο αποκτούν μεγάλες ταχύτητες και φεύγουν, ενώ παραμένουν τα βαρύτερα αέρια όπως το οξυγόνο, το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακος, τα οποία θέλουν πολύ μεγαλύτερο χρόνο για να διαφύγουν. Στην περίπτωση της Γης η ταχύτης διαφυγής είναι 11.2 km/sec. Δηλαδή όταν ένα μόριο αέρος (ή ένα διαστημόπλοιο) αποκτήσει ταχύτητα μεγαλύτερη από 11.2 km/sec θα διαφύγει και δεν θα επιστρέψει στη γη (εκτός αν το διαστημόπλοιο χρησιμοποιήσει τους πυραύλους του ή κάνει μία περιστροφή γύρω από τη Σελήνη για να επιστρέψει στη Γη). Στην περίπτωση του Γαλαξίου η ταχύτης διαφυγής είναι περίπου 500 km/sec και το ποσοστό των αστέρων με ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής είναι 0.0074 δηλαδή κάπως λιγότερο από ένα εκατοστό του συνόλου.

Το ποσοστό αυτό των αστέρων θα φύγει μέσα σε ένα χρόνο αλλοιώσεως, δηλαδή σε 10¹⁴ έτη. Αφού φύγουν οι αστέρες αυτοί δεν έχουμε πλέον μία κατανομή Maxwell. Όμως οι αλληλεπιδράσεις των αστέρων τείνουν πάλι να δημιουργήσουν μία κατανομή Maxwell, οπότε σε έναν ακόμη χρόνο αλλοιώσεως θα φύγει άλλο ένα εκατοστό περίπου του Γαλαξίου, κ.ο.κ.

Έτσι σε 10¹⁶ περίπου έτη ο Γαλαξίας θα χάσει το μεγαλύτερο μέρος των αστέρων του και ουσιαστικά θα διαλυθεί. Αυτό είναι το σενάριο διαλύσεως του Γαλαξίου μας και όλων των άλλων γαλαξιών. Δηλαδή μετά 10¹⁶ έτη δεν θα υπάρχουν μεγάλα συστήματα αστέρων όπως οι γαλαξίες, αλλά μόνον μεμονωμένοι αστέρες εις το διάστημα.

Το πρόβλημα τώρα που ενδιαφέρει τους αστρονόμους είναι οι λεπτομέρειες της διαφυγής. Ποιοί αστέρες θα διαφύγουν και προς ποία κατεύθυνση.

Για μεγάλα χρονικά διαστήματα, της τάξεως μερικών τρισεκατομμυρίων ετών, (αλλά μικρότερα από το χρόνο αλλοιώσεως) το δυναμικό πεδίο του Γαλαξίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε τις τροχιές των αστέρων στο διάστημα αυτό και να δούμε ποιές τροχιές οδηγούν σε διαφυγή.

Για να μελετήσουμε λεπτομερέστερα το φαινόμενο της διαφυγής χρειαζόμαστε ένα απλό μοντέλο δυναμικού. Έτσι θα έχουμε μια πρώτη ιδέα για τις λεπτομέρειες του μηχανισμού διαφυγής των αστέρων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε ένα πολύ απλό μοντέλο δυναμικού

$$V = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) - xy^2$$
(1.9)

που μπορεί να παραστήσει την χεντριχή περιοχή ενός γαλαξίου που δεν έχει αξονιχή συμμετρία. Για σύγχριση με το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήσαμε άλλα παρόμοια μοντέλα, όπως το

$$V = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) - x^2 y^2$$
(1.10)

κλπ. Είναι ενδιαφέρον ότι τα φαινόμενα διαφυγής σε διαφορετικές περιπτώσεις έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Κατωτέρω μελετούμε τις τροχιές στο γαλαξιακό μοντέλο 1.9 με ιδιαίτερη έμφαση στις τροχιές διαφυγής.

Ι΄.2 Τύποι τροχιών

Η συνάρτηση ενεργείας ενός αστέρος στο μοντέλο 1.9 είναι:

$$H = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + x^2 + y^2) - xy^2 = h,$$
(1.11)

όπου \dot{x}, \dot{y} είναι οι ταχύτητες κατά τους άξονες x, y, ενώ h είναι η αριθμητική τιμή της ενεργείας. Όταν η ενέργεια είναι μικρότερη από την ενέργεια διαφυγής $h_{esc} = 0.125$ οι τροχιές περιορίζονται από μια κλειστή "καμπύλη μηδενικής ταχύτητος" (Curve of Zero Velocity, CZV) (Σχ. Ι΄.2a).



Σχήμα Ι'.2: Περιοδικές τροχιές για ενέργειες (a) h = 0.12 (b) h = 0.2



Σχήμα Ι΄.3: (α) Καμπύλες μηδενιχής ταχύτητος και τροχιές $y = \pm \sqrt{2}x$ για διάφορες ενέργειες και (β) Μία περιοδιχή τροχιά τύπου (b) για μεγάλη ενέργεια

Μέσα στην καμπύλη αυτή υπάρχουν πολλές περιοδικές τροχιές. Ειδικότερα υπάρχουν 6 απλές περιοδικές τροχιές. Αυτές είναι:

1. Οι ευθύγραμμες τροχιές (a) και (a') που έχουν εξισώσεις

$$y = \pm \sqrt{2}x \tag{1.12}$$

- 2. Οι τροχιές (b) και (b') που μοιάζουν με ελλείψεις που διαγράφονται κατά αντίθετες φορές (κατά την φορά των δεικτών του ωρολογίου, και αντιστρόφως)
- 3. Μία τροχιά (c) που τέμνει κάθετα τον άξονα y = 0, και
- 4. Ο άξονας (τροχιά (d)) y = 0. Οι τροχιές (a), (a'), (b) και (b') είναι ευσταθείς για μικρές ενέργειες, ενώ οι τροχιές (c) και (d) είναι πάντα ασταθείς. Οι τροχιές (a), (a'), (c) και (d) φθάνουν στην καμπύλη μηδενικής ταχύτητος και ανακλώνται προς τα πίσω.

Οι τροχιές (b), (c) και (d) υπάρχουν για απεριόριστα μεγάλες ενέργειες. Μία τροχιά τύπου (b) για μεγάλη ενέργεια, έχει σχεδιαστεί στο Σχ. Γ.3b. Από τις απλές περιοδικές τροχιές διακλαδίζονται πολλές τροχιές ανωτέρας τάξεως, όπως η τροχιά 2:1 στο Σχ. Γ.2b. Όταν η ενέργεια h υπερβαίνει την ενέργεια διαφυγής h_{esc} , η καμπύλη μηδενικής ταχύτητας ανοίγει δεξιά άνω και κάτω (Σχ. Γ.2b) και πολλές τροχιές δια-φεύγουν στο άπειρο. Οι περιοδικές τροχιές (a) και (a') δεν υπάρχουν πλέον. Αν μία τροχιά ξεκινήσει κατά μήκος της ευθείας (a) και (a') αυτή εκτείνεται εις το άπειρο

(Σχ. Ι΄.3*a*). Εξ' άλλου εις τα στενότερα σημεία των ανοιγμάτων της καμπύλης μηδενικής ταχύτητος υπάρχουν δύο ασταθείς περιοδικές τροχιές O_1 και O_2 (Σχ. Ι΄.2b), οι οποίες ονομάζονται τροχιές Lyapunov.

Οι τροχιές που είναι κοντά σε ευσταθείς περιοδικές τροχιές δημιουργούν σωλήνες παρόμοιας μορφής με τις περιοδικές τροχιές και ονομάζονται ημιπεριοδικές τροχιές (Σχ. Ι΄.4)



Σχήμα Ι'.4: Ημιπεριοδικές τροχιές κοντά στις περιοδικές τροχιές (a) (a') (b) (ενέργεια h = 0.12)



Σχήμα Ι΄.5: Μία ημιπεριοδική τροχιά σε κάποια απόσταση από την περιοδική τροχιά (d) για ενέργεια h = 0.12

Η τροχιά y = 0 στο σύστημα (1.11) είναι ασταθής, αλλά υπάρχουν ημιπεριοδικές τροχιές (Σχ. Ι΄.5) σε κάποια απόσταση από την τροχιά αυτή. Εξ' άλλου οι τροχιές
που είναι ακανόνιστες γεμίζουν ένα τμήμα του χώρου εντός της καμπύλης μηδενικής ταχύτητος (Σχ. Ι΄.6) και ονομάζονται χαοτικές.



Σχήμα Ι΄.6: Μία χαοτική τροχιά για ενέργει
αh=0.12

Τέλος υπάρχουν τροχιές, οι οποίες διαφεύγουν από το σύστημα προς το άπειρο. Τέτοιες τροχιές υπάρχουν μόνον όταν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια διαφυγής. Αποδειχνύεται (Churchill et al. 1975, 1979) ότι αν μία τροχιά διασχίζει την χαμπύλη O_1 ή την O_2 (Σχ. Ι΄.2b), προς τα έξω, διαφεύγει προς το άπειρο χωρίς επιστροφή.

Καθώς η ενέργεια αυξάνει οι διάφορες ευσταθείς τροχιές γίνονται ασταθείς. Ειδικότερα οι τροχιές (a) και (a') έχουν άπειρες μεταβάσεις από ευστάθεια σε αστάθεια και τανάπαλιν. Σε κάθε μετάβαση από ευστάθεια σε αστάθεια δημιουργείται μία ευσταθής διακλαδιζόμενη τροχιά διπλής περιόδου (2:1) ή μονής περιόδου (1:1). Επίσης σε κάθε μετάβαση από ασταθή σε ευσταθή τροχιά (a), ή (a'), δημιουργείται μία ασταθής διακλάδωση 2:1 ή 1:1.

Οι πρώτες διακλαδώσεις των τροχιών (a) και (a') δημιουργούνται στις τιμές ενέργειας

$$h_1 = 0.11136, h'_1 = 0.11529, h_2 = 0.12352, h'_2 = 0.12398, h'_3 = 0.12484$$
 (1.13)

και το όριο των τιμών αυτών μετά από άπειρες διακλαδώσεις, h_{∞} , ισούται με την ενέργεια διαφυγής $h_{esc} = 0.125$. Διαπιστώσαμε ότι η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών ενεργειών διακλαδώσεως, $(h_n - h_{n-1})$, ή $(h'_n - h'_{n-1})$ μικραίνει περίπου γεωμετρικά, δηλαδή ο λόγος των διαδοχικών διαστημάτων

$$\delta = \frac{h_n - h_{n-1}}{h_{n+1} - h_n} \tag{1.14}$$

τείνει προς τον αριθμό $\delta = 9.22$ (Contopoulos and Zikides 1980; Contopoulos 1981), ο οποίος ισούται με $\delta = \exp(\pi/\sqrt{2})$ (Heggie 1983).

Οι διαχλαδιζόμενες ευσταθείς τροχιές από τις (a) και (a') υφίστανται περαιτέρω διαχλαδώσεως διπλής περιόδου και κατά τις διαχλαδώσεις αυτές γίνονται ασταθείς. Έτσι έχουμε μία απειρία διαχλαδώσεων διπλών περιόδων. Ο λόγος δ μεταξύ διαδοχικών διαστημάτων σε συστήματα με απώλειες ενέργειας (dissipative) ισούται με $\delta = 4.67$. Ο λόγος αυτός είναι παγκόσμιος (Feigenbaum 1978, Coullet and Tresser 1978) δηλαδή είναι ο ίδιος στα περισσότερα δυναμικά συστήματα (πλην ορισμένων εξαιρέσεων). Σε διατηρητικά συστήματα (conservative) ο λόγος αυτός είναι $\delta = 8.72$ και είναι επίσης παγκόσμιος (Benettin et al. 1980). Πάντως ο λόγος αυτός είναι διαφορετικός στις διαχλαδώσεις κατά μήκος των ευθύγραμμων τροχιών (a) και (a'). Σε μία προηγούμενη εργασία μας (Contopoulos and Barbanis 1985) βρήκαμε και τους δύο λόγους $\delta = 9.22$ κατά μήκος των ευθυγράμμων τροχιών και $\delta = 8.72$ στις διαδοχικές διαχλαδώσεις.

Όλες οι περιοδικές τροχιές που δημιουργούνται από τις διακλαδώσεις των περιοδικών τροχιών γίνονται τελικά ασταθείς, όταν η ενέργεια υπερβεί κατά πολύ την ενέργεια διαφυγής. Αλλά οι περιοδικές αυτές τροχιές δεν διαφεύγουν εις το άπειρο. Π.χ. από τις τροχιές (a) και (a') δημιουργούνται άπειρες ασταθείς περιοδικές τροχιές που υπάρχουν για κάθε h > 0.125. Μόνον οι περιοδικές τροχιές (a) και (a') οδηγούνται σε διαφυγή. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των τροχιών αυτών είναι ότι η περίοδος τους αυξάνει και τείνει στο άπειρο όταν η ενέργεια h τείνει προς την hesc. Όταν η ενέργεια h υπερβεί το h_{esc} οι ευθύγραμμες τροχιές $y = \pm \sqrt{2}x$ δεν συναντούν πλέον την καμπύλη μηδενικής ταχύτητος, αλλά εκτείνονται στο άπειρο, δηλαδή δεν είναι πλέον περιοδικές τροχιές (Σχ. Γ.3).

Οι τροχιές πλησίον των τροχιών Lyapunov O_1, O_2 εάν κινούνται έξω από μία τροχιά Lyapunov, έστω την O_1 , διαφεύγουν προς το άπειρο. Εάν όμως κινούνται προς τα μέσα, τότε είναι δυνατόν να διαφύγουν αργότερα είτε από την O_1 , είτε από την O_2 . (Σχ. Ι'.7α,β)



Σχήμα Ι'.7: Τροχιές που αρχίζουν πλησίον της τροχιάς Lyapunov O_1 και φεύγουν μέσω της (α) $_1$ (β) O_2

Οι οριαχές τροχιές που δεν διαφεύγουν αλλά φθάνουν οριαχά στο άνοιγμα O_1 ή το άνοιγμα O_2 , είναι η ομοχλινιχή τροχιά του Σχ. Ι΄.8a ή η ετεροχλινιχή τροχιά του Σχ. Ι΄.8b.



Σχήμα Ι΄.8: Τροχιές που αρχίζουν με απειροστή εκτροπή από την τροχιά Lyapunov O₁ και καταλήγουν ασυμπτωτικά (a) στην O₁ (ομοκλινική τροχιά) ή (b) στην O₂ (ετεροκλινική τροχιά).

I'.3 Αναπαράσταση του συνόλου των τροχιών

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να παραστήσουμε το σύνολο των τροχιών είναι με την χρησιμοποίηση μιας επιφάνειας τομής. Δηλαδή σημειώνουμε τις τομές των τροχιών στον χώρο των φάσεων (x, \dot{x}, y) με μία επιφάνεια και συγκεκριμένα την επιφάνεια y = 0. Η επιφάνεια τομής έχει άξονες x και \dot{x} (ενώ η τιμή του \dot{y} λαμβάνεται θετική και υπολογίζεται από την εξίσωση της ενέργειας 1.11 όταν δοθεί η τιμή της ενέργειας h). Μία χαρακτηριστική περίπτωση επιφάνειας τομής είναι για την ενέργεια h = 0.12 (Σχ. Γ.9).



Σχήμα Ι'.9: Επιφάνεια τομής y = 0 (με $\dot{y} > 0$) όταν h = 0.12

Στην επιφάνεια αυτή οι περιοδικές τροχιές χαρακτηρίζονται ως μεμονωμένα σημεία, εκτός της τροχιάς y = 0, η οποία παρίσταται με το εξωτερικό όριο της καμπύλης, που έχει εξίσωση

$$\dot{x}^2 + \dot{y}^2 = 2h$$
 χύχλος. (1.15)

Συγκεκριμένα στον άξονα x = 0 υπάρχουν οι τροχιές (a) (άνω) και (a') (κάτω), στον άξονα υπάρχουν οι τροχιές (b)(αριστερά) και (b') (δεξιά) καθώς και η ασταθής περιοδική τροχιά (c) (δεξιά του κέντρου). Οι τροχιές (a), (a'), (b) και (b') περιβάλλονται από νησίδες ευστάθειας. Υπάρχουν ακόμη 3 νησίδες γύρω από τις τροχιές (a) και (a') και πιο πέρα από τα (a) και (a') δύο νησίδες και άλλες μικρότερες νησίδες. Γύρω από το σημείο (c) υπάρχει μία μεγάλη χαοτική περιοχή, που περιέχει διάσπαρτα σημεία. Αυτή περιβάλλεται από κλειστές αμετάβλητες καμπύλες, που περιβάλλουν το (c), καθώς και τα (a) και (a') και αντιστοιχούν σε ημιπεριοδικές τροχιές. Εξ άλλου κοντά στον οριακό κύκλο υπάρχει μία μικρή χαοτική ζώνη.

Οι τροχιές πλησίον της ασταθούς περιοδικής τροχιάς (c) εν γένει απομακρύνονται από την τροχιά αυτή. Υπάρχει μόνον μία καμπύλη (μπλε στο Σχ. Γ.9) στο μήκος της οποίας οι τροχιές πλησιάζουν ασυμπτωτικά την περιοδική τροχιά που αρχίζει από το σημείον (c). Η καμπύλη αυτή ονομάζεται ευσταθής ασυμπτωτική καμπύλη. Εξ' άλλου υπάρχει ακόμη μία ασταθής ασυμπτωτική καμπύλη (μαύρη) κατά μήκος της οποίας ευρίσκονται τα σημεία τομής τροχιών που αρχίζουν σε απειροστή απόσταση από το σημείον (c) και απομακρύνονται από την περιοδική τροχιά. Επομένως, μία τροχιά που αρχίζει σε ένα σημείο της ασταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά την περιοδική τροχιά (c) κατά την αρνητική φορά του χρόνου.

Οι ασυμπτωτικές καμπύλες δεν τέμνουν τον εαυτό τους, αλλά η ευσταθής και η ασταθής καμπύλη τέμνονται σε άπειρα ομοκλινικά σημεία. Τα σημεία αυτά είναι οι αρχικές συνθήκες διπλά ασυμπτωτικών τροχιών που πλησιάζουν ασυμπτωτικά το (c) τόσο προς τη θετική όσο και προς την αρνητική φορά του χρόνου.

Όταν η ενέργεια υπερβεί την ενέργεια διαφυγής ορισμένες περιοχές αρχικών συνθηκών γύρω από τις καμπύλες διαφεύγουν εις το άπειρο. Ένα παράδειγμα είναι οι κόκκινες περιοχές στην επιφάνεια τομής για ενέργεια h = 0.132 (Σχ. Ι'.10).



Σχήμα Ι'.10: Επιφάνεια τομής y = 0 (με $\dot{y} > 0$) όταν h = 0.132. Οι περιοχές αμέσου διαφυγής είναι χόχχινες.

Στο σχήμα αυτό βλέπουμε τις περιοχές αμέσου διαφυγής άνω και κάτω του άξονος $\dot{x} = 0$ (κόκκινες). Οι τροχιές που αρχίζουν στις κόκκινες περιοχές διαφεύγουν αμέσως χωρίς άλλη τομή με την επιφάνεια τομής. Οι περιοχές αυτές δεν είναι συμμετρικές διότι και στην κάτω περιοχή θεωρούμε τροχιές με $\dot{y} > 0$ (και όχι συμμετρικές τροχιές με $\dot{y} < 0$). Τα όρια των κόκκινων περιοχών αντιστοιχούν στις ασυμπτωτικές καμπύλες από τις τροχιές Lyapunov O_1 (άνω) και O_2 (κάτω). Ακριβέστερα είναι οι τομές των ασυμπτωτικών επιφανειών των τροχιών O_1 και O_2 από το επίπεδο τομής (x, \dot{x}) .

Στο Σχ. Ι΄.10 υπάρχουν επίσης οι νησίδες γύρω από τις τροχιές (b) και (b') και άλλες μικρότερες νησίδες. Η περιοχή του χάους στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερη από ότι στο Σχ. Ι΄.9.

Οι χαοτικές τροχιές στις περιοχές που είναι έξω από τις κόκκινες περιοχές διαφεύγουν εις το άπειρο μετά από αρκετό χρόνο. Εξ' άλλου οι οργανωμένες τροχιές που δημιουργούν τις αμετάβλητες καμπύλες που περιβάλλουν την τροχιά (c) και τις ασυμπτωτικές της καμπύλες, ή δημιουργούν τις διάφορες νησίδες δεν διαφεύγουν εις το άπειρο. Μέσα στις νησίδες υπάρχουν ανωτέρας τάξεως ασταθείς περιοδικές τροχιές. Αυτές οι τροχιές συνοδεύονται από μικρές χαοτικές περιοχές αλλά οι τροχιές αυτών των περιοχών είναι παγιδευμένες στις νησίδες και δεν διαφεύγουν από το σύστημα.

Στο Σχ. Ι΄.10 έχουμε σχεδιάσει τμήματα δύο ασυμπτωτικών καμπυλών της ασταθούς περιοδικής τροχιάς (c). Η μία είναι ασταθής (μαύρη η οποία αρχίζει προς τα κάτω δεξιά) και η άλλη ευσταθής (μπλε η οποία αρχίζει προς τα κάτω αριστερά). Υπάρχουν άλλες δύο ασυμπτωτικές καμπύλες από το σημείο (c) με αντίθετες αρχικές διευθύνσεις προς τα άνω (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα). Έχουμε σημειώσει με αριθμούς 5 ομοκλινικά σημεία μεταξύ των καμπυλών που αρχίζουν προς τα κάτω. Το σημείο (1) είναι αριστερά και κάτω από την κόκκινη περιοχή, απέναντι από το σημείο (c), το σημείο (2) είναι αριστερά, τα σημεία (3) και (5) είναι διαδοχικές εικόνες του σημείου (1) κατά την θετική φορά του χρόνου και το σημείο (4) είναι η πρώτη ειχόνα του σημείου (2). Αν προχωρήσουμε πέραν του (5) μέχρι το ∞ , τα διαδοχιχά σημεία επί της ευσταθούς χαμπύλης πλησιάζουν ασυμπτωτιχά το σημείο (c). Μεταξύ των σημείων (1) και (2), μεταξύ των (3) και (4) καθώς και μεταξύ των (5) και (6), η μαύρη ασυμπτωτική καμπύλη (ασταθής) είναι μέσα από την μπλε ασυμπτωτική καμπύλη (ευσταθή). Η μαύρη καμπύλη κάνει όλο και μεγαλύτερες ταλαντώσεις πλησιάζοντας, ασυμπτωτικά την αρχική μαύρη καμπύλη από το (c) προς τα κάτω καθώς και την αντίστοιχη ασταθή καμπύλη από το (c) προς τα άνω. Η ταλάντωση μεταξύ των ομοκλινικών σημείων 9 και 10 (που δεν σημειώνονται στο σχήμα αυτό) οδηγεί την μαύρη καμπύλη στο να τμήσει την κόκκινη περιοχή. Οι συνέπειες της τομής της ασταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης με την κόκκινη περιοχή των αμέσων διαφυγών θα αναφερθούν στην περιγραφή του Σχ. Ι΄.11.

Οι τροχιές που αρχίζουν στην ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη (μπλε) προσεγγίζουν ασυμπτωτικά την ασταθή τροχιά (c). Τροχιές κοντά στην ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη παραμένουν πλησίον της επί μακρά χρονικά διαστήματα και αργούν να διαφύγουν. Εφ' όσον η ευσταθής ασυμπτωτική καμπύλη δεν περιέχει τροχιές διαφυγής έπεται ότι η καμπύλη αυτή δεν τέμνει τις κόκκινες περιοχές (περιοχές αμέσου διαφυγής). Στο Σχ. Γ.11, δίνεται η επιφάνεια τομής για ενέργεια h = 0.20. Σ' αυτήν την περίπτωση οι περιοχές αμέσου διαφυγής (κόκκινες) είναι πολύ μεγαλύτερες.

Υπάρχουν 2 περιοχές άμεσης διαφυγής (κόκκινες), περιοχές πράσινες από τις οποίες οι τροχιές διαφεύγουν αργότερα και 2 νησίδες ευστάθειας (b) και (b') αριστερά και δεξιά (λευκές περιοχές). Επίσης έχουμε σχεδιάσει τμήμα της ασταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης (μαύρη) και της ευσταθούς ασυμπτωτικής καμπύλης (μπλε) από το

σημείο (c) προς τα κάτω.



Σχήμα Ι'.11: Επιφάνεια τομής για ενέργεια h = 0.20. Οι περιοχές αμέσου διαφυγής όταν $\dot{y} > 0$ είναι κόκκινες, και όταν $\dot{y} < 0$ είναι κίτρινες. Οι κίτρινες περιοχές είναι συμμετρικές προς τις κόκκινες, αλλά καλύπτονται εν μέρει από τις κόκκινες. Οι λευκές περιοχές δεν διαφεύγουν. Οι πράσινες περιοχές περιέχουν τροχιές που διαφεύγουν μετά μία ή περισσότερες τομές με την επιφάνεια τομής.

Η ασταθής ασυμπτωτική καμπύλη από το σημείο C τέμνει την κόκκινη περιοχή στο σημείο Α πολύ κοντά στο C (δεξιά και κάτω από το C). Μεταξύ όμως του (C)και του πρώτου σημείου τομής υπάρχουν άπειρες ομοκλινικές τομές με την ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη (μπλε). Πράγματι η ευσταθής ασυμπτωτική καμπύλη αρχίζει από το C προς τα αριστερά και κάνει μία ολόκληρη περιστροφή γύρω από την κάτω κόκκινη περιοχή (η οποία είναι πολύ μεγάλη και εκτείνεται προς τα δεξιά και πάνω) και αφού περιβάλει εντελώς την κόκκινη περιοχή έρχεται από πάνω δεξιά κοντά στο c και τέμνει την ασταθή καμπύλη (μαύρη) σε ένα ομοκλινικό σημείο. Το ομοκλινικό σημείο είναι πολύ κοντά στο σημείο τομής Α της μαύρης γραμμής με την κόκκινη περιοχή (πλησιέστερα προς το σημείο C). Η εικόνα του τμήματος CA είναι η μαύρη καμπύλη από το C προς τα κάτω που κάνει άπειρες περιελίξεις κατά την φορά των δεικτών του ωρολογίου (Σχ. Ι΄.11). (Ονομάζουμε εικόνα την καμπύλη που αποτελείται από τα επόμενα σημεία τομής των τροχιών, που έχουν αρχικές συνθήκες στο τμήμα της καμπύλης μεταξύ και C και με την επιφάνεια τομής). Καθώς η ασταθής (μαύρη) καμπύλη πλησιάζει το Α, η εικόνα της τείνει προς το όριο της ίδιας καμπύλης μετά από άπειρες περιελίξεις κατά τη φορά των δεικτών του ωρολογίου, γύρω από το κέντρο της κόκκινης περιοχής. Το όριο αυτής της καμπύλης είναι συμμετρικό προς το όριο της άνω κόκκινης περιοχής και ταυτίζεται με το όριο της περιοχής αμέσων διαφυγών διά μέσου της τροχιάς O_1 όταν $\dot{y} < 0$ (δηλαδή το όριο της κάτω κίτρινης περιοχής) (Contopoulos and Efstathiou 2004).

Η μαύρη καμπύλη μετά το Α συνεχίζει εντός της κόκκινης περιοχής, μεταξύ Α και Β, και μετά το Β εξέρχεται από την κόκκινη περιοχή. Το τμήμα ΑΒ της καμπύλης αυτής δεν έχει εικόνα διότι όλες οι τροχιές που αρχίζουν σε σημεία του τμήματος

AB διαφεύγουν αμέσως. Όταν όμως η μαύρη χαμπύλη συνεχίζει χάτω από το B έχουμε πάλι ειχόνα της χαμπύλης αυτής που αρχίζει με άπειρες περιελίξεις χοντά στις προηγούμενες άπειρες περιελίξεις (λίγο πιο έξω από αυτές) με φορά αντίθετη των δειχτών του ωρολογίου. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρούνται χάθε φορά που η μαύρη χαμπύλη διασχίζει την χόχχινη περιοχή των άμεσων διαφυγών.

Στο Σχ. Ι'.12 έχουμε σχεδιάσει την ευσταθή ασυμπτωτική καμπύλη που αρχίζει από το σημείο C προς τα αριστερά και κάτω για μεγάλο χρονικό διάστημα (μπλε καμπύλη). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη αυτή δεν τέμνει ποτέ την κόκκινη περιοχή, αλλά πλησιάζει ασυμπτωτικά τόσο την κάτω κόκκινη περιοχή (αμέσου διαφυγής) όσο και την άνω. Η καμπύλη αυτή διέρχεται επίσης από διάφορες πράσινες περιοχές, που αντιστοιχούν σε χαοτικές διαφυγές μετά από 1 ή περισσότερες τομές με την επιφάνεια τομής. Όμως οι τροχιές που αρχίζουν στην μπλέ καμπύλη δεν διαφεύγουν. Επομένως οι πράσινες περιοχές έχουν κενά κατά μήκος των μπλε γραμμών.

Καθώς η ενέργεια αυξάνει, οι περιοχές των άμεσων διαφυγών αυξάνουν πολύ (Σχ. Ι΄.13 για h = 0.355).



Σχήμα Ι΄.12: Η ευσταθής ασυμπτωτική καμπύλη από την ευσταθή τροχιά
 cγια μεγάλο χρονικό διάστημα (h=0.20)

Στην περίπτωση h = 0.355 οι τροχιές (b) και (b') έχουν γίνει ασταθείς και δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια νησίδα ευστάθειας. Παρ' όλα αυτά μικρές νησίδες ευστάθειας δημιουργούνται αχόμη και για μεγάλες ενέργειες. Πράγματι τέτοιες νησίδες εμφανίζονται κοντά στα σημεία όπου μία ευσταθής και μία ασταθής ασυμπτωτική καμπύλη, εφάπτονται (θεώρημα Newhouse 1977, 1983). Π.χ. στο Σχ. Ι'.13 η ευσταθής ασυμπτωτική χαμπύλη S από την ασταθή περιοδική τροχιά (b) φθάνει στην ασταθή ασυμπτωτική χαμπύλη από το C και την τέμνει ελάχιστα. Για λίγο μικρότερη ενέργεια h οι δύο καμπύλες εφάπτονται. Και τότε εφαρμόζεται το θεώρημα Newhouse, που αποδεικνύει την ύπαρξη μιας ευσταθούς περιοδικής τροχιάς (και άρα μιας νησίδος ευσταθείας) πλησίον του σημείου επαφής. Η νησίδα αυτή όμως είναι πολύ μικρή.



Σχήμα Ι΄.13: Επιφάνεια τομής για h=0.355

Καθώς αυξάνει αχόμη περισσότερο η ενέργεια, οι ασυμπτωτιχές χαμπύλες εχτείνονται περισσότερο, με νέες αναδιπλώσεις, έτσι ώστε να δημιουργούν νέα σημεία επαφής χαι άρα νέες ευσταθείς περιοδιχές τροχιές χαι νησίδες. Όμως οι νησίδες αυτές είναι εξαιρετιχά μιχρές.

Ι'.4 Ποσοστά τροχιών διαφυγής

Η στατιστική των χαοτικών και διαφευγόντων τροχιών δίνει ορισμένες ενδιαφέρουσες πληροφορίες. Το ποσοστό των χαοτικών τροχιών για μικρές ενέργειες είναι μικρό. Καθώς η ενέργεια αυξάνει το ποσοστό αυτό αυξάνει απότομα μεταξύ h = 0.075 και h = 0.2 (Σχ. Γ.14).



Σχήμα Ι΄.14: Το ποσοστό των χαοτικών τροχιών N_{cha}/N_o (συμπεριλαμβανομένων και των τροχιών διαφυγής) συναρτήσει της ενέργειας h.

Για την ενέργεια διαφυγής $h_{esc} = 0.125$, το ποσοστό N_{cha}/N_o είναι περίπου 0.4 (είναι το πλήθος των τροχιών αρχικά). Όταν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη της ενέργειας διαφυγής οι χαοτικές τροχιές εν γένει διαφεύγουν εις το άπειρο. Για ενέργειες μεγαλύτερες του h = 0.2 σχεδόν το σύνολο των τροχιών διαφεύγει Ένας προσεγγιστικός τύπος που δίνει το ποσοστό αυτό είναι:



$$N_{cha}/N_o = 0.5(1 + \tanh 30.0h - 4.0) \tag{1.16}$$

Σχήμα Ι'.15: Το ποσοστό των αστέρων που διαφεύγουν αμέσως συναρτήσει της ενέργειας h.

Το ποσοστό των τροχιών dN_0/N_0 που διαφεύγουν αμέσως από τα ανοίγματα O_1 , O_2 , χωρίς άλλη τομή, εκτός της αρχικής, με την επιφάνεια τομής δίνεται στο Σχ. Ι'.15. Το ποσοστό αυτό αυξάνει ταχέως από το μηδέν, καθώς η ενέργεια γίνεται μεγαλύτερη από $h = h_{esc} = 0.125$ και γίνεται περίπου $dN_0/N_0 = 0.4$ για h = 0.2. Φθάνει το $dN_0/N_0 = 0.9$ για h = 0.7 και για μεγαλύτερα h αυξάνει βραδέως και τείνει στο 100%.



Σχήμα Ι΄.16: Ο λογάριθμος του ποσοστού των αστέρων που διαφεύγουν μετά την n τομή με την επιφάνεια τομής και πριν από την (n+1) τομή συναρτήσει του n, για h = 0.1216 και h = 0.20.

Ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα είναι ο χρόνος διαφυγής. Εκτός από τους αστέρες που διαφεύγουν αμέσως, οι υπόλοιποι αστέρες διαφεύγουν μετά από λίγες ή πολλές τομές με την επιφάνεια τομής. Εις το Σχ. Ι'.16 δίδεται το ποσοστό των αστέρων που διαφεύγουν μετά από n τομές με την επιφάνεια τομής και δεν έχουν (n + 1) τομή. Το n είναι ένα μέτρο του χρόνου διαφυγής. Όταν n = 0 έχουμε τροχιές οι οποίες διαφεύγουν αμέσως μετά το αρχικό σημείο εκκινήσεως. Αυτές είναι $dN_0/N_0 = 0.1$ για ενέργεια h = 0.126 και $dN_0/N_0 = 0.4$ για h = 0.2 Το ποσοστό dN/N_0 μικραίνει απότομα καθώς το n αυξάνει για μικρά σχετικά n αλλά λιγότερο απότομα για μεγαλύτερα n (Σχ. Ι'.16).

Τέλος υπολογίζουμε την πιθανότητα διαφυγής

$$p_n = \frac{dN_n}{N_n} \tag{1.17}$$

όπου N_n είναι το πλήθος των παραμενόντων αστέρων μετά από χρόνο t = n (Σχ. Ι'.17). Έχει βρεθεί ότι όταν το n αυξάνει και τείνει στο άπειρο η πιθανότης p_n τείνει προς μία οριακή τιμή p, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις αρχικές συνθήκες της κάθε χαοτικής τροχιάς (υπό την προϋπόθεση ότι η χαοτική τροχιά αρχίζει σε μια περιοχή χάους, η οποία επικοινωνεί με τις περιοχές διαφυγής (Contopoulos et al. 1993, Siopis et al. 1995a,b, 1997). Η τιμή της οριακής πιθανότητος p εξαρτάται μόνον από την ενέργεια h όταν η h είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια διαφυγής h_{crit} .

Το σημαντικό όμως είναι ότι το όριο αυτό είναι p = 0 για ενέργειες μέχρι μία κρίσιμη τιμή $h_{crit} = 0.175$, ενώ είναι διάφορη του μηδενός για μεγαλύτερες ενέργειες, και μάλιστα δίνεται από έναν τύπο δυνάμεως

$$p = 0.11(h - h_{crit})^{\alpha}$$
(1.18)

όπου $\alpha \approx 0.53$ Εις το Σχ. Ι'.17 δίδεται η πιθανότης διαφυγής pn συναρτήσει του n σε δύο περιπτώσεις, h = 0.18 και h = 0.20. Παρατηρούμε ότι παρ' όλον ότι υπάρ-

χουν πολλές ανωμαλίες στις χαμπύλες $P_n(n)$ οι τιμές p_n τείνουν προς σταθερά όρια, διάφορα του μηδενός, τα οποία δίνονται από τον τύπο 1.18.



Σχήμα Ι'.17: Η πιθανότης διαφυγής p_n συναρτήσει του n στις περιπτώσεις h = 0.18 (χόχχινη χαμπύλη) χαι h = 0.2 (μπλε χαμπύλη). Οι οριαχές τιμές p σημειώνονται με οριζόντιες γραμμές.

Σε προηγούμενες εργασίες (Siopis et al. 1995a,b) είχαν διατυπωθεί τρία χαρακτηριστικά, τα οποία επιβεβαιώνονται και στην παρούσα εργασία:

- 1. Ότι η πιθανότης p_n τείνει σε μία οριακή τιμή p όταν $n \to \infty$, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις αρχικές συνθήκες και εξαρτάται μόνον από την ενέργεια h.
- 2. Ότι η τιμή του p είναι μηδέν όταν η ενέργεια είναι λίγο μεγαλύτερη από την ενέργεια διαφυγής, μέχρι μία χρίσιμη τιμή $h = h_{crit}$, ενώ είναι διάφορη του μηδενός για μεγαλύτερα h.
- 3. Ότι για $h > h_{crit}$ η οριαχή πιθανότης p δίνεται από έναν τύπο δυνάμεως

$$p = A(h \cdot h_{crit})^{\alpha}, \tag{1.19}$$

όπου το α είναι περίπου ίσο με $\alpha = 0.5$. Ο τύπος αυτός με $\alpha = 0.5$ φαίνεται ότι ισχύει γενικά σε διάφορα δυναμικά συστήματα, δηλαδή είναι παγκόσμιος. Στην περίπτωση μας το $\alpha = 0.53$ είναι πολύ κοντά στην γενική τιμή $\alpha = 0.5$.

Η αλλαγή του ρυθμού διαφυγής από $h \leq h_{crit}$ σε $h > h_{crit}$ φαίνεται ότι οφείλεται σε ένα φαινόμενο χολλητιχότητος (stickiness) που επηρεάζει χυρίως τις τροχιές με ενέργειες λίγο μεγαλύτερες από την ενέργεια διαφυγής. Το φαινόμενο της χολλητιχότητος έχει μελετηθεί συστηματιχά τα τελευταία χρόνια (Contopoulos and Harsoula 2010). Το χύριο όμως πρόβλημα είναι γιατί η μεταβολή του ορίου p γίνεται από μηδέν σε τιμές που δίνονται από τον εχθετιχό νόμο 1.19 χαι τί χαθορίζει την χρίσιμη ενέργεια h_{crit} . Το θέμα αυτό χρειάζεται περισσότερη μελέτη.

Γ.5 Συμπεράσματα

Μελετήσαμε τις τροχιές σε ένα απλό μοντέλο γαλαξιακών δυναμικών. Μερικά από τα συμπεράσματά μας είναι τα εξής:

- Υπάρχουν τροχιές 3 ειδών, περιοδικές, ημιπεριοδικές και χαοτικές. Οι ημιπεριοδικές τροχιές έχουν την τοπολογία ευσταθών περιοδικών τροχιών αλλά με επί πλέον ταλαντώσεις γύρω από τις περιοδικές τροχιές. Για μικρές ενέργειες όλες οι τροχιές περιορίζονται μέσα σε μία κλειστή καμπύλη μηδενικής ταχύτητος. Όταν η ενέργεια υπερβεί την ενέργεια διαφυγής η καμπύλη μηδενικής ταχύτητος ανοίγει και πολλές τροχιές διαφεύγουν στο άπειρο. Όμως οι περιοδικές τροχιές δεν διαφεύγουν, εκτός από αυτές που φθάνουν ακριβώς σε ένα σημείο ανοίγματος της καμπύλης μηδενικής ταχύτητος.
- 2. Οι υπόλοιπες περιοδικές τροχιές γίνονται ασταθείς δημιουργώντας διακλαδώσεις δύο ειδών (α) διακλαδώσεις διπλής περιόδου, οι οποίες οδηγούν κατόπιν σε άπειρες διακλαδώσεις 4πλης, 8πλης κ.λπ. περιόδου, και (β) άπειρες διακλαδώσεις τροχιών της ίδιας της αρχικής τροχιάς η οποία υφίσταται άπειρες εναλλαγές ευστάθειας και αστάθειας με συνεχώς αυξανόμενη περίοδο. Η δεύτερη περίπτωση ισχύει για τις τροχιές οι οποίες τελικά φθάνουν στα σημεία ανοίγματος της καμπύλης μηδενικής ταχύτητος, οπότε η περίοδος της τροχιάς τείνει εις το άπειρο.
- 3. Χαοτικές τροχιές υπάρχουν κοντά στις ασταθείς περιοδικές τροχιές. Όταν η ενέργεια υπερβεί την ενέργεια διαφυγής δημιουργούνται περιοχές αρχικών συνθηκών που οδηγούν αμέσως σε διαφυγή, χωρίς οι τροχιές αυτές να έχουν άλλη τομή με την επιφάνεια τομής. Οι περισσότερες από τις υπόλοιπες χαοτικές τροχιές διαφεύγουν εις το άπειρο μετά από λίγες ή πολλές τομές με την επιφάνεια τομής.
- 4. Οι ευσταθείς περιοδικές τροχιές περιβάλλονται από νησίδες ευστάθειας. Όταν οι ευσταθείς περιοδικές τροχιές γίνονται ασταθείς, τελικά οι νησίδες τους εξαφανίζονται. Εν τούτοις νέες νησίδες εμφανίζονται κοντά σε σημεία επαφής των ασυμπτωτικών καμπυλών των ασταθών περιοδικών τροχιών. Οι νέες αυτές νησίδες είναι πολύ μικρές.
- 5. Μελετήσαμε την τοπολογία των ασυμπτωτικών καμπυλών των ασταθών περιοδικών τροχιών. Οι ευσταθείς καμπύλες μιας ασταθούς τροχιάς αποτελούνται από αρχικές συνθήκες τροχιών που πλησιάζουν ασυμπτωτικά την ασταθή περιοδική τροχιά. Οι ασταθείς καμπύλες αποτελούνται από αρχικές συνθήκες τροχιών που απομακρύνονται από την περιοδική τροχιά. Ορισμένα τμήματα των ασταθών ασυμπτωτικών τροχιών περιέχουν τροχιές διαφυγής. Εν γένει οι ασταθείς ασυμπτωτικές καμπύλες αποτελούνται από διαφορετικούς κλάδους και κάθε κλάδος περιλαμβάνει άπειρες περιελίξεις.
- 6. Καθώς η ενέργεια αυξάνει το ποσοστό των χαοτικών τροχιών, συμπεριλαμβανομένων των τροχιών διαφυγής, αυξάνει και τείνει στο 100%. Ένα σημαντικό ποσοστό διαφεύγει αμέσως από το σύστημα. Οι υπόλοιπες όμως χαοτικές τροχιές απαιτούν μεγάλο χρόνο για να οδηγήσουν σε διαφυγές. Όταν η ενέργεια

είναι λίγο μεγαλύτερη από την ενέργεια διαφυγής ο μέσος χρόνος διαφυγής είναι πολύ μεγάλος, αλλά γίνεται μικρότερος όταν η ενέργεια γίνει μεγαλύτερη.

- 7. Μελετήσαμε την πιθανότητα διαφυγής ενός αστέρος μετά από n τομές με την επιφάνεια τομής. Όταν το n τείνει στο άπειρο η πιθανότης p_n τείνει προς μία οριαχή πιθανότητα p. Η οριαχή αυτή πιθανότης είναι μηδέν όταν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια διαφυγής h_{esc} αλλά μικρότερη από μία χρίσιμη ενέργεια h_{crit} . Αλλά για μεγαλύτερες ενέργειες h η πιθανότης p είναι περίπου ανάλογη του $(h h_{crit})\alpha$ όπου α είναι περίπου ίσο με $\alpha = 0.5$.
- 8. Όλα τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν σε διάφορα δυναμικά συστήματα που παριστάνουν γαλαξίες και ισχύουν όταν το δυναμικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Όμως καθώς οι αστέρες φεύγουν το δυναμικό πεδίο του γαλαξίου μεταβάλλεται. Όταν οι αστέρες με ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής έχουν φύγει από τον γαλαξία, ο μηχανισμός των προσεγγίσεων των αστέρων λειτουργεί ώστε νέοι αστέρες ν' αποκτήσουν ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής. Ό βασικός χρόνος διαλύσεως ενός γαλαξίου είναι της τάξεως των 10¹⁶ ετών όπως αναφέραμε στην εισαγωγή.
- 9. Το τελικό συμπέρασμα των ανωτέρω είναι ότι όποια και αν είναι η πορεία διαφυγών των αστέρων μετά από ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 10¹⁶ ετών δεν θα υπάρχουν πλέον οργανωμένοι γαλαξίες εις το Σύμπαν, αλλά μόνον μεμονωμένοι αστέρες. Εξ' άλλου στο διάστημα αυτό όλοι οι γαλαξίες και οι αστέρες που διέφυγαν από αυτούς απομακρύνονται με μεγάλες ταχύτητες λόγω της διαστολής του Σύμπαντος. Μέσα σε 10¹⁶ έτη οι αστέρες αυτοί θα έχουν φθάσει εις τα όρια του ορατού Σύμπαντος. Επομένως μετά ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 10¹⁶ ετών ο Ήλιος και το πλανητικό μας σύστημα, αν δεν έχει καταστραφεί για άλλους λόγους, θα παραμείνει απομονωμένο σ' ένα πρακτικά κενό χώρο, μακριά από όλους τους άλλους αστέρες του Σύμπαντος.

Αναφορές

- 1. Bennetin, G., Lo Vecchio, G. and Tenenbaum, A.: 1980, Phys. Rev. A14, 2338
- 2. Churchill, R.C., Pecelli, G. and Rod, D.L.: 1975, J. Diff. Equ. 17, 329
- 3. Churchill, R.C., Pecelli, G. and Rod, D.L.: 1979 Lect. Not. Phys. 93, 76
- 4. Contopoulos, G.: 1981, Astron. Astrophys. 102, 265.
- 5. Contopoulos, G. and Barbanis, B.: 1985, Astron.Astrophys. 153, 44
- 6. Contopoulos, G. and Efstathiou, K.: 2004, Celest. Mech. Dyn. Astron. 88, 163
- 7. Contopoulos, G. and Harsoula, M.: 2010 Astron. Soc. Pacific. Conf. Series 424, 355
- 8. Contopoulos, G. and Zikides, M.: 1980, Astron. Astrophys. 90, 198
- 9. Contopoulos, G., Kandrup, H. and Kaufmann, D.: 1993, Physica D 64, 310
- 10. Coullet, P. and Tresser, C.: 1978, J. de Physique 39, C5, 25

- 11. Heggie, D.C.: 1983, Celest. Mech. Dyn. Astron. 29, 207
- 12. Newhouse, S.E.: 1977, Am. J. Math 99, 1061
- 13. Newhouse, S.E.:1983, in Iooss, G., Hellemen, R.H. and Stora, R. (eds) "Chaotic Behaviour of Deterministic Systems" North Holland, Amsterdam, 443
- Siopis, C., Contopoulos, G. and Kandrup, H.,: 1995, in Gottesman, S., Ipser, J. and Kandrup, H.(eds) "Three Dimensional Systems", N.York Acad.Sci.Annals 751, 205
- 15. Siopis, C., Kandrup, H., Contopoulos, G. and Dvorak, R.: 1995, in Hunter, J and Wilson, R. (eds) "Waves in Astrophysics", N.York Acad.Sci.Annals 773, 221
- 16. Siopis, C., Kandrup, H., Contopoulos, G. and Dvorak, R.: 1997, Celest.Mech. Dyn.Astron. 65, 57

ΙΑ΄ Δημοσιεύσεις του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών της Ακαδημίας Αθηνών για το 2014

Κατά το έτος 2014 δημοσιεύθηκαν ή έγιναν δεκτές προς δημοσίευση 42 εργασίες, εκ των οποίων 21 σε περιοδικά με σύστημα κριτών.

Ο κ. Ι. Κοντόπουλος επιμελήθηκε ως editor τον τόμο "The Formation and Destruction of Black Hole Jets", eds. I. Contopoulos, D. Gabuzda & N. Kylafis (Springer Verlag-Berlin) Ο κ. Βασιλάκος επιμελήθηκε ως editor την ειδική έκδοση του περιοδικού Int. J. of Mod. Phys. D. με θέμα "Testing inflationary scenarios with the Planck and BICEP2 data" (eds. S. Basilakos, M. Plionis). Επίσης ο κ. Βασιλάκος είναι ένας από τους editors ενός ειδικού τόμου του περιοδικού "High-Energy and Astroparticle Physics".

ΙΑ΄.1 Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά με κριτές

- 1. Efthymiopoulos C., Contopoulos G., Katsanikas M., 2014, Analytical Invariant manifolds near unstable points and the structure of chaos, Cel.Mech. Dyn. Astron. 119,331
- Patsis P. A., Katsanikas M., 2014, The phase space of boxy-peanut and X-shaped bulges in galaxies - I. Properties of non-periodic orbits, Mon. Not. R. Ast. Soc. 445, 3525
- Patsis P. A., Katsanikas M., 2014, The phase space of boxy-peanut and X-shaped bulges in galaxies - II. The relation between face-on and edge-on boxiness, Mon. Not. R. Ast. Soc. 445, 3546
- 4. 4. Cincotta P., Efthymiopoulos C., Giordano C.M., and Mestre M., 2014, Chirikov and Nekhoroshev diffusion estimates: bridging the two sides of the river. Physica D, 266, 49
- 5. Contopoulos, I., Kalapotharakos, K. & Kazanas, D. 2014, A new standard pular magnetosphere, Astrophys. J., 781, 46
- 6. Contopoulos, I., Nathanail, A. & Pugliese, D. 2014, "The orthogonal gamma-ray burst model", Astrophys. J., , 780, L5
- Fukumura, K., Tombesi, F., Kazanas, D., Shrader, C., Behar, E. & Contopoulos, I. 2014, "Stratified Magnetically-Driven Accretion-Disk Winds and their Relations to Jets", Astrophys. J., 780, 120
- Nathanail, A. & Contopoulos, I. 2014, "Black hole magnetospheres", Astrophys. J., 788, 186
- 9. Koutsantoniou, L. E. & Contopoulos, I. 2014, "Accretion disk radiation dynamics and the Cosmic Battery", Astrophys. J., 794, 27

- Paliathanasis A., Tsamparlis M., Basilakos S, Capozziello S., 2014, Scalar tensor gravity cosmology: Noether symmetries and analytical solutions, Phys. Rev. D. 89, 063532
- 11. Basilakos S., Sola J., 2014, Effective equation of state for running vacuum: 'mirage' quintessence and phantom dark energy, Mon. Not. R. Ast. Soc. 437, 3331
- Basilakos S., Sola J., 2014, Entropic-force dark energy reconsidered, Phys. Rev. D. 90, 023008
- 13. Pouri A., Basilakos S., Plionis M., 2014, Precision growth index using the clustering of cosmic structures and growth data, J. Cosm. Astropart. Phys. 08, 042
- Chavez R., Terlevich R., Terlevich E., Bresolin F., Melnick J, Plionis M., Basilakos S., The L-sigma relation for massive bursts of star formation, 2014, Mon. Not. R. Ast. Soc. 442, 3565
- Lima A., Graef L., Pavon D., Basilakos S., 2014, Cosmic acceleration without dark energy: background tests and thermodynamic analysis, J. Cosm. Astropart. Phys. 10, 042
- 16. Paliathanasis A., Tsamparlis M., Basilakos S., 2014, Dynamical symmetries and observational constraints in scalar field cosmology, Phys. Rev. D., 90, 1035024
- 17. Paliathanasis A., Basilakos S., Saridakis E., Capozziello S., Atazadeh K., Darabi F. Tsamparlis M., New Schwarzschild-like solutions in f(T) gravity through Noether symmetries, 2014 , Phys. Rev. D. 89, 104042
- Basilakos S., Lima A., Sola J., A viable Starobinsky-like inflationary scenario in the light of Planck and BICEP2 results, Int. J. Mod. Phys. D., 2014, IJMPD 23, 1442011
- 19. Tziotziou, K., Tsiropoula, G., Georgoulis, M. K., & Kontogiannis, I.: Energy and Helicity Budgets of Quiet Solar Regions, Astron. Astrophys. 564, A86, 2014
- 20. Moraitis, K., Tziotziou, K. Georgoulis, M. K., & Archontis, V.: Validation and Benchmarking of a Practical Free Magnetic Energy and Relative Magnetic Helicity Budget Computation in Solar Magnetic Structures, Solar Phys., 289, 4453, 2014
- Tziotziou, K., Moraitis, K., Georgoulis, M. K., & Archontis, V.: Validation of the Magnetic Energy vs. Helicity Scaling in Solar Magnetic Structures, Astron. Astrophys., 570, L1, 2014

ΙΑ΄.2 Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων και άλλες εργασίες

1. Contopoulos G., Delis N., Efthymiopoulos C., 2014, Bohmian trajectories in the scattering problem, in G. Nicolis, V. Basios (eds), Chaos, Information and Dynamical Games, World Scientific

- 2. G. Lukes-Gerakopoulos, Contopoulos, G. and Th. Apostolatos, 2014, Nonlinear Effects in Non-Kerr spacetimes, in Bicak, J. and Ledvinka, T. (eds) Relativity and Gravitation, Springer Proceedings in Physics 157, 129
- 3. Contopoulos G., Efthymiopoulos C., Katsanikas M: 2014, Analytical study of the structure of chaos near unstable points, proceedings of the 11th Hellenic Astronomical Conference, arXiv1410.2761
- Grosbol P., Patsis P. A., 2014, Amplitudes of Spiral Perturbations, Structure and Dynamics of Disk Galaxies. Proceedings of the Conference held 12-16 August, 2013 at the Winthrop Rockefeller Institute, Petit Jean Mountain, Arkansas, USA. Edited by M.S. Seigar and P. Treuthardt. ASP Conference Series, Vol. 480, 117
- Grosbol P., Patsis P. A., Dottori H., 2014, Formation of Massive Clusters in Grand-Design Spiral Galaxies, Massive Young Star Clusters Near and Far: From the Milky Way to Reionization. 2013 Guillermo Haro Conference, Eds. Y. D. Mayya, D. Rosa González and E. Terlevich. INAOE & AMC, June 2014. ISBN: 978-607-8379-01-9, pp.113-116
- 6. Paez R., Efthymiopoulos C., 2014, Modelling Trojan dynamics: diffusion mechanisms through resonances, in Z. Knezevic and A. Lemaitre (eds), "Complex Planetary Systems", proceedings of the IAU Symposium 310, Springer (in press)
- 7. Efthymiopoulos C., and Paez R., 2014, Modelling resonant trojan motions in planetary systems", in Z. Knezevic and A. Lemaitre (eds), "Complex Planetary Systems", proceedings of the IAU Symposium 310, Springer (in press)
- 8. Contopoulos I., The Cosmic Battery around Black Holes, in "The Formation and Destruction of Black Hole Jets", eds. I. Contopoulos, D. Gabuzda & N. Kylafis (Springer)
- Chavez R., Terlevich E., Terlevich R., Plionis M., Melnick J., Bresolin F., Basilakos, S., 2014, The Hubble Constant via HII Galaxies and Giant HII Regions, Conference Proceedings: "From the Milky Way to Reionization. 2013 Guillermo Haro Conference"
- Plionis M., Terlevich R., Basilakos S., Terlevich E., Chavez R., Bresolin F., Melnick J., 2014, Tracing the High-z Hubble Expansion with H II Galaxies, Conference Proceedings: "From the Milky Way to Reionization. 2013 Guillermo Haro Conference"
- Terlevich R., Chavez R., Terlevich E., Bresolin F., Melnick J., Plionis M., Basilakos S., 2014, The L sigma Relation for Massive Bursts of Star Formation and its Use for Precision Cosmology, Conference Proceedings: "From the Milky Way to Reionization. 2013 Guillermo Haro Conference"

ΙΑ΄.3 Δημοσιεύσεις στην Ελληνική

- Γ. Κοντόπουλος, Χ. Ευθυμιόπουλος, Μ. Χαρσούλα και Μ. Κατσανίκας. 2014, "Αναλυτική Μελέτη της Τάξης και του Χάους", Πρακτ. της Ακαδημίας Αθηνών, τ.89 Α'
- 2. Γ. Κοντόπουλος, 2013, "Ι. Χατζηδημητρίου", 11ο Ελληνικό Αστρονομικό Συνέδριο.
- Γ. Κοντόπουλος, 2014, "Ακτινοβολία από την αρχή του Σύμπαντος", Ακαδημία Αθηνών
- 4. Γ. Κοντόπουλος, 2014, "Επιστήμη και Ηθική", Ακτίνες.
- 5. Π. Α. Πάτσης, 2014, "Η σημασία της ανάλυσης αστρονομικών εικόνων για την κατανόηση της Δυναμικής των γαλαξιών", "Φαινόμενον" 21, σελ.2-7. Περιοδική έκδοση του Φυσικού Τμήματος του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- 6. Χ. Ευθυμιόπουλος, 2014, "Σύγχρονες Ερμηνείες της Κβαντομηχανικής", Ακτίνες, αρ.748, 203.
- Σ. Βασιλάκος, 2014, "Στην αρχή ήταν η μεγάλη έκρηξη ή μήπως όχι", εφημερίδα το Βήμα δημοσίευση: 06/07/2014.
- 8. Σ. Βασιλάχος, 2014, "Κοσμολογικά βαρυτικά κύματα: η επιβεβαίωση της θεωρίας του πληθωρισμού", ενημερωτικός ιστότοπος goodnews.gr, Απρίλιος 2014.
- 9. Μ. Γεωργούλης, 2014, «Τι είναι οι Λεοντίδες που θα γεμίσουν τον ελληνικό ουρανό;», ιστότοπος news.gr, τομέας "Περιβάλλον", 14 Νοεμβρίου 2014.
- Β. Τριτάκης, 2014, "Περιβάλλον, Οικονομία και Ποιότητα Ζωής", Ομιλίες Σεμιναρίων Περιβάλλοντος, Αθήνα 293, σ. 137.

ΙΒ΄ Δημοσιεύσεις του Κέντρου Ερευνών Αστρονομίας και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών της Ακαδημίας Αθηνών για το 2015

Κατά το έτος 2015 δημοσιεύθηκαν ή έγιναν δεκτές προς δημοσίευση 41 εργασίες, εκ των οποίων 32 σε περιοδικά με σύστημα κριτών. Συγκεκριμένα οι δημοσιεύσεις είναι:

ΙΒ΄.1 Επιμέλεια ειδικών εκδόσεων

Δημοσιεύθηκε ο τόμος "The Formation and Destruction of Black Hole Jets", eds.
I. Contopoulos, D. Gabuzda & N. Kylafis (Springer Verlag-Berlin) τον οποίο επιμελήθηκε ο κ. Ι. Κοντόπουλος ως editor.

- Δημοσιεύθηκε η ειδική έκδοση του περιοδικού Int. J. of Mod. Phys. D. με θέμα "Testing inflationary scenarios with the Planck and BIDEP2 data", Volume: 24, Number: 04 (April 2015), eds. S. Basilakos, M. Plionis, την οποίο επιμελήθηκε ο κ. Βασιλάκος ως editor.
- Ο κ. Γεωργούλης επιμελήθηκε ως editor τον ειδικό τόμο του περιοδικού Advances in Space Research, "ESPM-14 Topical Issue entitled Advances in Solar Physics" (eds. M. K. Georgoulis & V. M. Nakariakov), Adv. Space Res., 56(12), 2015. Ο τόμος εκδόθηκε στο πλαίσιο του συνεδρίου "14th European Solar Physics Meeting".
- Ο κ. Γεωργούλης επιμελήθηκε την έκδοση του 12ου τεύχους του περιοδικού της Ελληνικής Αστρονομικής Εταιρείας "Ιππαρχος".

ΙΒ΄.2 Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά με κριτές

- 1. Contopoulos, G. and Harsoula, M., 2015, "Convergence regions of the Moser normal forms and the structure of chaos", J. Phys. A. Math. Theor. 48, 335101
- 2. Harsoula, M., Contopoulos, G., Efthymiopoulos, C., 2015, "Analytic description of the structure of chaos". J. Phys. A. Math. Theor. 48, 135102
- 3. Efthymiopoulos, C., Harsoula, M., and Contopoulos, G., 2015, "Resonant normal form and asymptotic normal form behavior in magnetic bottle Hamiltonians", Nonlinearity, 28, 851
- 4. Tsigaridi, L., Patsis, P. A.. 2015, Morphologies introduced by bistability in barredspiral galactic potentials, Month. Not. R. Ast. Soc. 448, 3081
- 5. Paez, R., Efthymiopoulos, C., 2015. "Trojan resonant dynamics, stability, and chaotic diffusion, for parameters relevant to exoplanetary systems". Cel. Mech. Dyn. Astron., 121, 139
- Delis, N., Efthymiopoulos, C., Kalapotharakos, C.: 2015. "Effective power-law dependence of Lyapunov exponents on the central mass in galaxies", Mon. Not. R. Astr. Soc., 448, 2448
- 7. Contopoulos, I., Nathanail, A., Katsanikas, M., 2015, "The Cosmic Battery in Astrophysical Disks", Astrophys. J., 805, 105
- Fukumura, K., Tombesi, F., Kazanas, D., Shrader, C., Behar, E., Contopoulos, I., 2015, "Magnetically Driven Accretion Disk Winds and Ultra-fast Outflows in PG 1211+143", Astrophys. J., 805, 17
- Papadopoulos, D. B., Contopoulos, I., Kokkotas, K. D., Stergioulas, N., 2015, "Radiation from charged particles on eccentric orbits in a dipolar magnetic field around a Schwarzschild black hole", Gen. Rel. Grav., 47, 49
- 10. Nathanail, A., Contopoulos, I., 2015, "Are Ultra Long Gamma Ray Bursts powered by black holes spinning down?", Mon. Not. R. Astr. Soc. 453, L1

- Contopoulos, I., Esposito, F. P., Kleidis, K., Papadopoulos, D. B., Witten, L., 2015, "Generating Solutions to the Einstein-Maxwell Equations", Int. J. Math. Phys. D, in press
- 12. Contopoulos, I., Esposito, F. P., Kleidis, K., Papadopoulos, D. B., Witten, L., 2015, "Generating Solutions to the Einstein Field Equations", Gen. Rel. Quant. Cosm., in press
- Nathanail, A., Strantzalos, A., Contopoulos, I., 2015, "The rapid decay phase of the afterglow as the signature of the Blandford-Znajek mechanism", Mon. Not. R. Astr. Soc., in press
- 14. Paliathanasis A., Tsamparlis M., Basilakos S, Barrow J., 2015, "Dynamical analysis in scalar field cosmology", Phys. Rev. D. 91, 123535
- 15. Gomez-Valent Andria, Sola J., Basilakos S., 2015, "Dynamical vacuum energy in the expanding Universe confronted with observations: a dedicated study", J. Cosm. Astropart. Phys., 01, 004
- 16. Basilakos S., Sola J., 2014, "Growth index of matter perturbations in running vacuum models", 2015, Phys. Rev. D. 92, 123501
- 17. Lima J. A.S., Basilakos S., Sola J., 2015, "Nonsingular decaying vacuum cosmology and entropy production", Gen. Rel. Grav. Cosm. 47, 40
- 18. Basilakos S., 2015, "The growth index of matter perturbations using the clustering of dark energy", Mon. Not. R. Ast. Soc. 449, 2151
- 19. Basilakos S., 2015, "Cosmic expansion and structure formation in running vacuum cosmologies", Mod. Phys. Lett. A. 30, 1540031
- 20. Basilakos S., Barrow J., 2015, "Hyperbolic inflation in the light of Planck 2015 data", Phys. Rev. D., 91, 103517
- Terlevich R., Terlevich E., Melnick J, Chavez R., Plionis M., Bresolin, F., Basilakos S., "On the road to precision cosmology with high-redshift H II galaxies", 2015, Mon. Not. R. Ast. Soc. 451, 3001
- 22. Mehrabi A., Basilakos S., Pace F., 2015, "How clustering dark energy affects matter perturbations," Mon. Not. R. Ast. Soc. 452, 2930
- Mehrabi A., Basilakos S., Malekjani M., Davari Z., 2015, "Growth of matter perturbations in clustered holographic dark energy cosmologies", Phys. Rev. D. 92 123513
- 24. Basilakos S., Plionis M., 2015, "Special Issue: Testing Inflationary Scenarios with the Planck and BICEP2 Results", Int. J. Mod. Phys. D., 24, 1502001
- 25. Syntelis, P.; Archontis, V.; Gontikakis, C.; Tsinganos, K., 2015, "Emergence of non-twisted magnetic fields in the Sun: Jets and atmospheric response", Astron. Astrophys. 584, 10

- 26. Rohan, L. E., Ravindra, B., Georgoulis, M. K., Kueker, M., 2015, "Analyzing the Effects of Apodising Windows on Local Correlation Tracking Using Nirvana Simulations of Convection", Solar Phys. 290, 1135
- McAteer, R. T. J., Aschwanden, M. J., Dimitropoulou, M., Georgoulis, M. K., Pruessner, G., Morales, L., Ireland, J., & Abramenko, V.: 25 Years of Self-Organized Criticality: Numerical Detection Methods, Space Sci. Rev., in press, DOI 10.1007/s11214-015-0158-7, pp 1-50
- Patsourakos, S., Georgoulis, M. K., Vourlidas, A., et al. 2015, "The Major Geoeffective Solar Eruptions of 7 March 2012: Comprehensive Sun-to-Earth Analysis", Astrophys. J. in press
- 29. Bisbas, Th. G.; Papadopoulos, P. P.; Viti, S., 2015, "Effective Destruction of CO by Cosmic Rays: Implications for Tracing H2 Gas in the Universe", Astrophys. J. 803, 37
- 30. Carvalho C.S., 2015, "Integrated probability of coronary heart disease subject to the -308 tumor necrosis factor-alpha SNP: a Bayesian meta-analysis, PeerJ 3, 31236
- Carvalho C.S., Marques K., 2015, "Angular distribution of cosmological parameters: measurement of inhomogeneities from type Ia supernovae", Mon. Not. R. Ast. Soc. In press, arXiv:1512.07869
- 32. Lampropoulos G., Mavromichalaki H., Tritakis V., 2015, "Possible Estimation of the Solar Cycle Characteristic Parameters by the 10.7cm Solar Radio Flux", Solar Phys. In press

ΙΒ΄.3 Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων με κριτές

- Fukumura, K., Tombesi, F., Kazanas, D., Shrader, C., Behar, E., Contopoulos, I. 2015, "Fast Ionized X-ray Absorbers in AGNs", The Extremes of Black Hole Accretion, Proceedings of the conference held 8-10 June, 2015 in Madrid, Spain
- Contopoulos, G., Delis, N., Efthymiopoulos, C.: 2015, "Bohmian Trajectories in the Scattering Problem", in Chaos, Information Processing and Paradoxical Games: the legacy of John S Nicolis, World Scientific, pp.3 – 25
- Efthymiopoulos, C.: 2015, "Perturbative methods in Celestial Mechanics and the roots of Quantum Mechanics: A historical perspective", in Rivista dell'Unione Matematica Italiana, Ser. I, 8, pp.1 – 35
- 4. Pouri A., Basilakos S., 2015, "Testing General Relativity on cosmological scales", in Journal of Physics: Conference Series, Volume 633, 012035
- Papaioannou, A., Anastasiadis, A., Sandberg, I., Georgoulis, M. K., Tsiropoula, G., Tziotziou, K., Jiggens, P., & Hilgers, A., 2015, "A Novel Forecasting System for Solar Particle Events and Flares (FORSPEF)", in J. Phys.: Conf. Series, 632(1), article id. 012075

ΙΒ΄.4 Άλλες εργασίες

- 1. Georgoulis, M. K.: Greece and ESA: A Membership and Relation that is Imperative to Maintain, in Spite of Problems, Hipparchos, 2(12), pp. 4 – 5, Ιούνιος 2015
- Georgoulis, M. K. & Zoulias, M.: Cosmic Light: Primordial and Eternal, e-EPS Newsletter, 23 Νοεμβρίου 2015

ΙΒ΄.5 Δημοσιεύσεις στην Ελληνική

- 1. Γ. Κοντόπουλος, 2015, "Χάος και Τύχη", Physics News, Ένωση Ελλήνων Φυσικών, Μάρτιος 2015
- Βλάχος, Λ. & Γεωργούλης Μ.: Μαύρα Γυαλιά για μια Έκλειψη, άρθρο γνώμης από τον Πρόεδρο και τον Αντιπρόεδρο της ΕΛ.ΑΣ.ΕΤ., ΤΑ ΝΕΑ, 28 Απριλίου 2015

ΙΒ΄.6 Συνεργασίες με ερευνητικά κέντρα του εξωτερικού

Πανεπιστήμιο Μονάχου και διεπιστημονικό πρόγραμμα αριστείας "Excellence Cluster"– Γερμανία (A. Burkert), Max-Planck Institut für Astronomie - Γερμανία (Th. Naab), European Southern Observatory, Μόναχο - Γερμανία (P. Grosbol), Αστρονομικό Ινστιτούτο Πανεπιστημίου Στοκχόλμης – Σουηδία (K. Fathi), Southwest Research Institute, Boulder – ΗΠΑ (D. Kaufmann), NASA Goddard Space Flight Center, – ΗΠΑ (D. Kazanas, C. Kalapotharakos), University of Maryland – ΗΠΑ (K. Fukumura), University College Cork – Ιρλανδία (D. Gabuzda), Institute for Theoretical Physics, Frankfurt am Main - Γερμανία (L. Rezzolla), Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) – Μεξικό (R. Terlevich), University of Barcelona – Ισπανία (J. Sola), University of Naples – Ιταλία (S. Capozziello), University of Sao Paulo – Βραζιλία (A. Lima), King College University of London – Αγγλία (Ν. Μαυρόματος), European Space Agency (προγράμματα Μ. Γεωργούλη), International Space Science Institute, Βέρνη - Ελβετία (προγράμματα Μ. Γεωργούλη), University of Cardiff – Μ. Βρετανία (Π. Παπαδόπουλος).

ΙΒ΄.7 Συνεργασίες με Ελληνικά Ιδρύματα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Δ. Παπαδόπουλος, Μ. Πλειώνης, Λ. Βλάχος), Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Μ. Ξυλούρης, Γ. Τσιροπούλα, Α. Αναστασιάδης), Πανεπιστήμιο Αθηνών (Κ. Τσίγκανος, Α. Πασχάλης), Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (Σ. Πατσουράκος).