



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Πτυχιακή Εργασία

(του Προγράμματος Σπουδών του πρώην ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας)

με τίτλο:

**“Εφαρμογές της Μηχανικής Στερεού Σώματος στο
Διάστημα”**

του: Γεωργίου Κούλα



Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Σιδερίδης

Κοζάνη 2023

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στην Υπεραγία Θεοτόκο, με τη βοήθεια της οποίας την έφερα εις πέρας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σεβαστό μου καθηγητή, κύριο Γεώργιο Σιδερίδη, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την άποψη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαιτέρως τη σύζυγο μου Σταυρούλα, για τη συνεχή της υποστήριξη σε όλο αυτό το εγχείρημα.

Ιερέυς

Γεώργιος Κούλας

Περιεχόμενα

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	8
1.1 Ιστορία του Διαστήματος	8
1.2 Εξερεύνηση του Διαστήματος – Η Αρχή.....	8
1.3 Οι Σημαντικότερες Διαστημικές Αποστολές	20
1.3.1 Sputnik 1 – 1957	20
1.3.2 Vostok 1 – 1961	21
1.3.3 Mariner 4 – 1964.....	22
1.3.4 Apollo 11 – 1969.....	23
1.3.5 Salyut 1 – 1971.....	24
1.3.6 Viking 1 & 2 – 1976.....	25
1.3.7 Voyager 1 & 2 – 1979	26
1.3.8 Space Shuttle Program – 1981	28
1.3.9 Hubble Space Telescope – 1990	29
1.3.10 MIR Space Station – 1995	31
1.3.11 International Space Station – 1998.....	33
1.3.12 NEAR Shoemaker – 2000	35
1.3.13 Cassini-Huygens – 2004.....	35
1.3.14 Chang’e 1 – 2007	36
1.3.15 Chandrayaan 1 – 2008.....	36
1.3.16 Rosetta – 2014.....	37
1.3.17 Falcon 9 – 2015.....	38
1.3.18 Chang’e 4 – 2018	39
1.3.19 Starlink – 2018.....	39
1.3.20 Chandrayaan 2 – 2019.....	40
1.3.21 Beresheet – 2019.....	41
1.3.22 Crew Dragon – 2020	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΜΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	43
2.1 Εισαγωγή	43
2.2 Πλανήτες και Πλανητικά Συστήματα	45
2.3 Γενικά.....	47
2.4 Ήλιος.....	47
2.5 Συνοπτική Εικόνα των Αντικειμένων Περί τον Ήλιο	48
2.5.1 Εσωτερικό Ηλιακό Σύστημα	49
2.5.2 Εξωτερικό Ηλιακό Σύστημα	50
2.5.3 Υπερ-Ποσειδώνεια Περιοχή (Trans-Neptunian Objects).....	51

2.6 Πλανήτες.....	51
2.6.1 Εσωτερικοί ή Γήινοι Πλανήτες	52
2.6.1.1 Ερμής.....	53
2.6.1.2 Αφροδίτη	55
2.6.1.3 Άρης	56
2.6.2 Εξωτερικοί ή Γίγαντες Πλανήτες	57
2.6.2.1 Δίας.....	58
2.6.2.2 Κρόνος.....	60
2.6.2.3 Ουρανός.....	61
2.6.2.4 Ποσειδώνας	62
2.6.3 Νάνοι Πλανήτες	64
2.6.3.1 Πλούτωνας	64
2.6.3.2 Δήμητρα	65
2.6.4 Δορυφόροι και Δακτύλιοι	66
2.6.5 Ελάσσονες Πλανήτες και Κομήτες	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΒΑΣΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ ΚΛΑΣΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ 79

3.1 Γενικά.....	79
3.2 Θεμελιώδη Μεγέθη.....	80
3.2.1 Δύναμη	80
3.2.2 Ενέργεια	80
3.2.2.1 Μηχανική Ενέργεια	81
3.2.2.1.1 Δυναμική Ενέργεια.....	81
3.2.2.1.2 Κινητική Ενέργεια.....	81
3.2.2.2 Ηλεκτρομαγνητική Ενέργεια.....	82
3.2.2.2.1 Ηλεκτρική Ενέργεια	82
3.2.2.2.2 Ενέργεια Ακτινοβολίας.....	83
3.2.2.3 Πυρηνική Ενέργεια.....	83
3.2.2.4 Θερμική Ενέργεια.....	83
3.2.2.5 Χημική Ενέργεια	84
3.2.3 Έργο	84
3.2.4 Ισχύς.....	85
3.2.5 Ορμή	85
3.2.6 Ωθηση	86
3.2.7 Κρούση.....	86
3.3 Περιτροφική Κίνηση	87
3.3.1 Γωνιακή Ταχύτητα	87
3.3.2 Γωνιακή επιτάχυνση	87
3.3.3 Ροπή	88
3.3.4 Στροφορμή	89
3.3.5 Ροπή Αδράνειας	91
3.4 Μηχανική των Στερεών.....	92
3.4.1 Κέντρο Βάρους	92
3.4.2 Κέντρο Μάζας.....	92
3.4.3 Πυκνότητα.....	93
3.4.4 Ελαστικότητα	93
3.4.4.1 Μέτρο Ελαστικότητας Young	94
3.4.4.2 Μέτρο Διάτμησης.....	94
3.4.4.3 Μέτρο Ελαστικότητας Όγκου	94
3.4.5 Τάση.....	95
3.5 Μηχανική των Ρευστών	96
3.5.1 Πίεση.....	97
3.5.2 Άνωση	99
3.5.3 Παροχή.....	100

3.5.4 Ιξώδες.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ.....	102
4.1 Βασικές Έννοιες Ουράνιας Μηχανικής.....	102
4.1.1 Βαρυτικό Πεδίο.....	102
4.1.1.1 Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης.....	103
4.1.1.2 Ένταση Βαρυτικού Πεδίου.....	104
4.1.1.3 Δυναμικό Βαρυτικού Πεδίου.....	104
4.1.1.4 Δυναμική Ενέργεια Βαρυτικού Πεδίου.....	105
4.1.1.5 Παλιρροϊκές Δυνάμεις.....	106
4.1.1.6 Το Όριο Roche.....	109
4.1.2 Εισαγωγή στην Ουράνια Μηχανική.....	109
4.1.2.1 Φαινόμενη Κίνηση των Πλανητών.....	111
4.1.2.2 Εξίσωση της Σχετικής Κίνησης.....	112
4.1.2.3 Παραβολική Κίνηση – Ταχύτητα Διαφυγής.....	113
4.1.2.4 Κυκλική και Ελλειπτική Κίνηση.....	114
4.1.2.4.1 Κυκλική κίνηση.....	115
4.1.2.4.2 Ελλειπτική κίνηση.....	115
4.1.2.5 Η Εξίσωση του Kepler.....	116
4.1.3 Διαταραχές της Κίνησης.....	119
4.1.3.1 Στοιχεία της Τροχιάς.....	119
4.1.3.2 Παρεφαπτόμενη Τροχιά.....	121
4.1.4 Εξισώσεις Διαταραχών του Lagrange.....	123
4.1.4.1 Επίδραση του Ισημερινού Εξογκώματος της Γης στην Κίνηση Δορυφόρου.....	126
4.1.5 Το Πρόβλημα των Δύο Σωμάτων.....	128
4.1.6 Βαρυτική Επίδραση 3 ^{ου} Σώματος.....	132
4.1.6.1 Γραμμική Θεωρία Μακροπρόθεσμης (Αένας) Κίνησης.....	134
4.1.6.2 Κίνηση σε Συντονισμό.....	136
4.1.7 Μη Συντηρητικές Διαταραχές.....	137
4.1.8 Επίδραση Παλιρροιών.....	139
4.2 Εφαρμογές Ουράνιας Μηχανικής – Τεχνητοί Δορυφόροι.....	142
4.2.1 Η Τροχιά στο Διάστημα.....	142
4.2.2 Τροχιακή Κατανομή των Δορυφόρων.....	144
4.2.2.1 Διαστημικά «Σκουπίδια» (Space Debris).....	145
4.2.2.2 Διαπλανητικές Αποστολές και Ελιγμοί Υποβοήθησης.....	148
4.2.2.2.1 Ο Ελιγμός της Βαρυτικής Υποβοήθησης (Slingshot Effect).....	149
4.2.2.2.2 Ο Ελιγμός Oberth (Oberth Effect).....	155
4.2.3 Προσδιορισμός και Παρακολούθηση Τροχιάς.....	158
4.2.4 Διόρθωση και Μετάθεση Τροχιάς.....	160
4.2.4.1 Η Εξίσωση Πυραύλου.....	161
4.2.4.2 Αλλαγή Ύψους Περιγείου / Απογείου.....	162
4.2.4.3 Μετάθεση Τύπου Hohmann.....	163
4.2.4.4 Τοποθέτηση Δορυφόρου σε Τροχιά GEO.....	165
4.3 Δυναμική Συμπεριφορά του Ηλιακού Συστήματος.....	167
4.3.1 Οι Τροχιές των Πλανητών.....	167
4.3.1.1 Μεταπτώσεις της Τροχιάς και Επίδραση στο Κλίμα της Γης.....	168
4.3.1.2 Ευστάθεια του Πλανητικού Συστήματος.....	169
4.3.2 Οι Τροχιές των Φυσικών Δορυφόρων των Πλανητών.....	172
4.3.3 Οι Τροχιές των Αστεροειδών.....	174
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΤΑΞΙΔΙΑ.....	176
5.1 Το Διαστημικό Περιβάλλον.....	176
5.2 Είδη Διαστημικών Σκαφών.....	176

5.3 Εκτόξευση στο Διάστημα	177
5.3.1 Βαρύτητα.....	178
5.3.2 Σταδιοποίηση Πυραύλου.....	178
5.3.3 Ρυθμοί Επιτάχυνσης.....	179
5.3.4 Τροχιές Πτήσης.....	179
5.3.4.1 Ηχητικοί Πύραυλοι.....	180
5.3.4.2 Γήινη Τροχιά	180
5.3.4.3 Διαφυγή της Γης.....	182
5.3.4.4 Πλανητική τροχιά.....	183
5.3.5 Πλοήγηση.....	185
5.3.6 Συνάντηση και Πρόσδεση.....	186
5.3.7 Επανείσοδος και Ανάκτηση	187
5.4 Μετάβαση από τη Γη στη Σελήνη και επίτευξη τροχιάς.....	188
5.4.1 Ο Άμεσος Τρόπος: Γρήγορος αλλά Ακριβός	188
5.4.2 Έμμεσοι Τρόποι: Αργοί αλλά Οικονομικά Αποδοτικοί	190
5.4.2.1 Εκτοξεύσεις αερομεταφοράς (Piggyback Launches)	190
5.4.2.2 Σύντομες Μεταφορές από Γεωστατική Τροχιά	190
5.4.2.3 Μακροχρόνιες Μεταφορές από Γεωστατική Τροχιά.....	191
5.4.2.4 Μεταφορές Ορίων Ασθενούς Σταθερότητας.....	192
5.5 Διαπλανητικά Ταξίδια	195
5.5.1 Σχεδιασμός Διαπλανητικού Ταξιδιού.....	196
5.5.1.1 Διαπλανητικά Συστήματα Συντεταγμένων.....	196
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	204
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	206

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την περιγραφή και ανάλυση των διαστημικών ταξιδιών. Όπως αναφέρει και ο τίτλος εξετάζονται οι εφαρμογές της μηχανικής των στερεών σωμάτων στο διάστημα, δηλαδή των διαστημόπλοιων, και τον τρόπο με τον οποίο αυτά κινούνται στον διαστημικό χώρο, ανάμεσα στα άλλα ουράνια σώματα.

Η εργασία ξεκινάει με μια ιστορική αναδρομή στα αρχαία χρόνια και τη θεώρηση του σύμπαντος που είχαν εκείνη την εποχή οι άνθρωποι, και συνεχίζει μέχρι τα νεότερα χρόνια όπου η ανθρωπότητα κατάφερε να νικήσει την βαρυτική έλξη της Γης και να βγει για πρώτη φορά στο διάστημα. Εν συνεχεία, γίνεται αναφορά των σημαντικότερων ιστορικών διαστημικών αποστολών. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής περιγραφή των ουράνιων σωμάτων που υπάρχουν στο ηλιακό μας σύστημα. Ξεκινώντας από το τρίτο κεφάλαιο, επιχειρείται η επιστημονική προσέγγιση των θεμελιωδών φυσικών νόμων του σύμπαντος, μέσω μιας τυπικής περιγραφής και βασικών μαθηματικών εξισώσεων. Στο τέταρτο κεφάλαιο συνεχίζεται η επιστημονική προσέγγιση των νόμων και φαινομένων της Ουράνιας Μηχανικής που αποτελούν και τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση διαστημικών αποστολών. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό συμπεριλαμβάνεται και η δυναμική συμπεριφορά του ηλιακού μας συστήματος. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται τα στάδια ενός διαστημικού ταξιδιού, από την εκτόξευση του πυραύλου, μέχρι τον τελικό προορισμό στον πλανήτη-στόχο.

Στη διπλωματική αυτή εργασία επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός πολύπλοκου και πολυδιάστατου θέματος με όσο το δυνατόν πιο απλό, αλλά ωστόσο επιστημονικό τρόπο, προσπαθώντας ταυτόχρονα να είναι πληρέστερη χωρίς πλατειασμούς, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις έννοιες και τα φαινόμενα που περιγράφονται. Επίσης για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε πλούσιο φωτογραφικό υλικό για την σαφέστερη κατανόηση των πολύπλοκων εννοιών καθώς και την οπτική απεικόνιση των διάφορων ουράνιων σωμάτων όπου η απλή περιγραφή τους δεν θα μπορούσε ποτέ να γίνει πλήρως αντιληπτή από τον αναγνώστη.

Κεφάλαιο 1 – Ιστορική Αναδρομή

1.1 Ιστορία του Διαστήματος

Τα πρώτα βήματα προς την επιστημονική θεώρηση του σύμπαντος, έγιναν στην αρχαία Βαβυλωνία και την Αίγυπτο περίπου το 5.000 π.Χ.. Οι συστηματικές παρατηρήσεις άρχισαν από το 3.000 π.Χ. και κατά την δεύτερη χιλιετία, οι πλανήτες είχαν ήδη ενταχθεί στο ζωδιακό σύστημα ενώ γύρω στο 1.000 π.Χ. υπάρχουν πια σημειώσεις και αναφορές γύρω από τις κινήσεις τους.

Στις αρχές του 6^{ου} π.Χ. αιώνα, ο Θαλής ο Μιλήσιος, στον οποίο αποδίδεται η θεμελίωση της επιστήμης των μαθηματικών και της φιλοσοφίας, ταξίδεψε στην Αίγυπτο και διδάχθηκε εκεί, ιδρύοντας κατόπιν την ονομαστή Ιωνική σχολή της Ελληνικής Αστρονομίας. Ο Θαλής προέβλεψε την ηλιακή έκλειψη της 28^{ης} Μαΐου 585 π.Χ. και μέτρησε την φαινόμενη διάμετρο του Ήλιου. Αργότερα, οι οπαδοί του προχώρησαν παραπέρα. Ο Αναξιμένης διατύπωσε την υπόθεση ότι υπάρχουν πολλά, σαν τη Γη, ουράνια σώματα καθώς και ότι ο άνθρωπος προέρχεται από άλλα ζώα, ο Ηράκλειτος είδε τον ουρανό γεμάτο από ουράνια φωτιά ενώ ο Αναξίμανδρος αντιλαμβάνονταν ότι η Γη δεν είναι επίπεδη.

Μία άλλη σχολή στη Σάμο, έκανε παράλληλα τις δικές της εκτιμήσεις. Ο ιδρυτής της, ο Πυθαγόρας, από τον 6^ο έως τον 4^ο αιώνα, υποστήριξε με θέρημη την σφαιρικότητα της Γης, ο Ηρακλείδης εξήγησε την ημερήσια περιφορά των άστρων, υποθέτοντας ότι η Γη στρέφεται γύρω από τον άξονα της, ενώ ο Αρίσταρχος, έκανε πρώτος λόγο για ηλιοκεντρικό σύστημα.

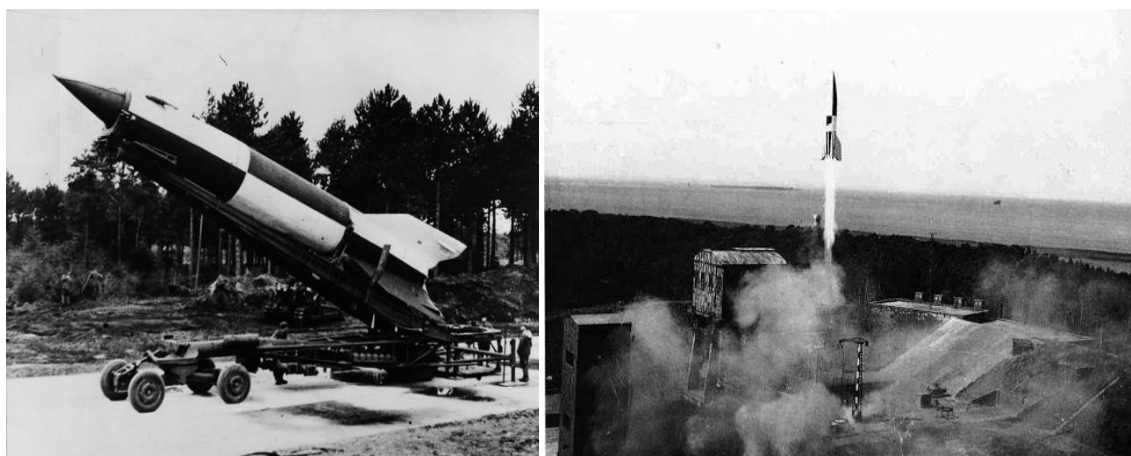
Ο Ερατοσθένης (276 – 192 π.Χ.) υπολόγισε με ακρίβεια την περιφέρεια της Γης και ο Ίππαρχος, ο μεγαλύτερος Έλληνας αστρονόμος, μέτρησε το μέγεθος του Ήλιου και της Σελήνης. Οι αναμφίβολα σπουδαίες αυτές γνώσεις χρησίμευσαν στον άνθρωπο, ώστε να αρχίσει να αντιλαμβάνεται τον κόσμο γύρω του. Το επόμενο βήμα ήταν λοιπόν να προσπαθήσει, πειραματικά στην αρχή, να ταξιδέψει προς αυτούς τους νέους ορίζοντες.

1.2 Εξερεύνηση του Διαστήματος – Η Αρχή

Πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με τομέες του Διαστήματος κατά τον μεσαίωνα, την αναγέννηση αλλά οι μεγαλύτερες ανακαλύψεις στον τομέα έγιναν την σύγχρονη εποχή, μετά το 1900. Το 1903, Ρώσος επιστήμονας, Κωνσταντίν Τσιολκόφσκυ διατυπώνει και δημοσιεύει για πρώτη φορά, τους θεμελιώδεις μαθηματικούς νόμους της κίνησης των πυραύλων και τα κύρια συμπεράσματα τους και είναι από τους πρώτους που θα προβλέψει την εξάπλωση της ζωής στο ηλιακό μας σύστημα. Αφιέρωσε πολύ χρόνο μελετώντας θεωρητικά τους πυραυλοκινητήρες και υπολογίζοντας την ενεργειακή αξία διαφόρων συνδυασμών καυσίμων. Το 1920, στην Αμερική ένας επιστήμονας, ο Robert Goddard δημιούργησε τον πρώτο πύραυλο υγρών καυσίμων χρησιμοποιώντας κηροζίνη και υγρό οξυγόνο. Την ίδια περίπου περίοδο ο Ουγγρο-γερμανός Hermann Oberth και αυτός πανεπιστημιακός, άρχισε να δημοσιεύει εργασίες πάνω στο αντικείμενο της αστροναυτικής και να δίνει με επιστημονικό τρόπο τους τρόπους που θα μπορούσε να εξερευνηθεί το διάστημα με διαστημικές πτήσεις. Θεωρείται ένας από του πατέρες την διαστημικής με τον Τσιολκόφσκι και τον Γκόνταρτ και ακολούθησε την γερμανική ομάδα του

Πεeneμούντε στην Αμερική, συνεισφέροντας στο Διαστημικό πρόγραμμα της Αμερικής.

Ο 2ος Παγκόσμιος Πόλεμος (ΠΠ) αποτέλεσε τον καταλύτη για την ανάπτυξη των περισσότερων τεχνολογιών και εφαρμογών αεροδιαστημικής σήμερα, όπως τα ραντάρ, την προώθηση αεροσκαφών με κινητήρες 'jet', την ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων όπως στροβιλοκινητήρων, μπαταριών και πυραύλων ως μερικά παραδείγματα. Έτσι η τεχνολογία των πυραύλων ήταν λογικό να προσελκύσει το ενδιαφέρον στρατιωτικών από όλους τους συμμετέχοντες στον 2ο ΠΠ, ως ένα οπλικό σύστημα που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως προέκταση του πυροβολικού, στέλνοντας φορτία με εκρηκτικά σε μακρύτερες αποστάσεις από ότι ήταν εφικτό εκείνη την εποχή, αυτόνομα με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρή δυνατότητα αναχαίτησης από τον αντίπαλο. Γερμανοί επιστήμονες εργάζονταν πυρετωδώς πάνω στην ανάπτυξη βαλλιστικών πυραύλων αν και οι περισσότεροι είχαν στο μυαλό τους τα διαστημικά ταξίδια. Κοντά στις ακτές της Βαλτικής, στο Πεeneμούντε, χιλιάδες Γερμανοί μηχανικοί και επιστήμονες, υπό την καθοδήγηση ενός ιδιαίτερα χαρισματικού μηχανικού, του Wehner Von Braun, εργάζονταν για την παραγωγή ενός γιγάντιου κατευθυνόμενου βλήματος, του A-4, γνωστότερου ως V-2. Ο V-2 ήταν ένα βλήμα βάρους 12,5 τόνων, που θα έφτανε σε ύψος 80 χιλιομέτρων και ο κινητήρας του απαιτούσε ισχύ, μεγαλύτερη των 500.000 ίππων. Ο V-2 ήταν ένα τεχνολογικό θαύμα για την εποχή του, αλλά και μετά, έχοντας επιλύσει ιδιαίτερα δύσκολα και πολύπλοκα τεχνολογικά προβλήματα στην τεχνολογία και παραγωγή πυραύλων. Έχοντας δοκιμαστεί επιτυχώς το 1942 αλλά με πολλά προβλήματα αξιοπιστίας, έναντι στόχων στην Αγγλία και ιδιαίτερα στο Λονδίνο, οι πύραυλοι V-2 με τον κατάλληλο χρόνο και ρυθμό βελτιστοποίησης και παραγωγής θα μπορούσε να είχαν αλλάξει τον ρου του 2ου ΠΠ, αν και ευτυχώς για τους συμμάχους και την ανθρωπότητα οι εκτεταμένοι βομβαρδισμοί δεν επέτρεψαν την περαιτέρω ανάπτυξη και παραγωγή της τεχνολογίας πυραύλων καθώς και άλλων ιδιαίτερα δολοφονικών όπλων και τεχνολογιών που ανέπτυσαν οι Ναζί εκείνη την εποχή όπως π.χ. η πυρηνική βόμβα.



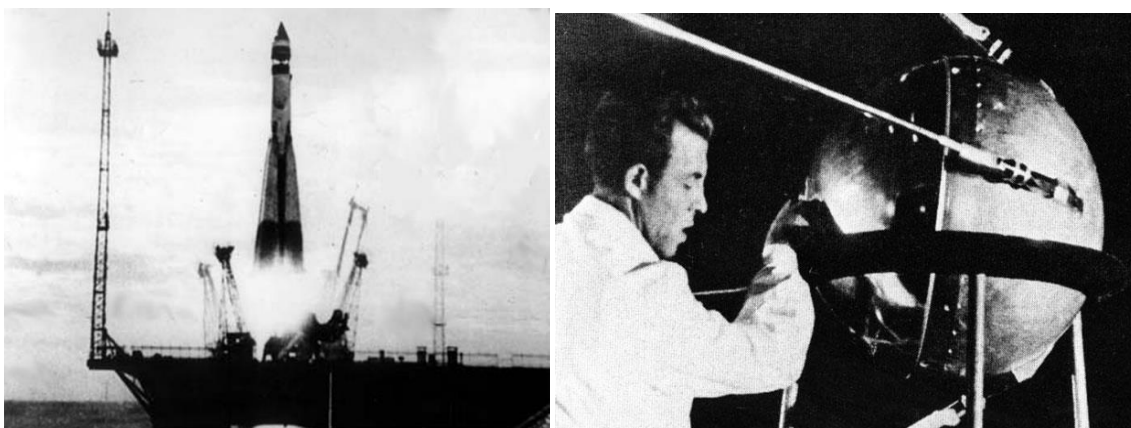
Εικόνα 1: Ο βαλλιστικός πύραυλος V-2 στο Πεeneμούντε

Εκείνο που οφείλουμε να παραδεχθούμε είναι ότι, ακόμη και κάτω από αυτές τις συνθήκες πολέμου, είναι επιβεβαιωμένο από πολλές πηγές ότι ο άνθρωπος εργάστηκε για να πραγματοποιήσει ένα πανάρχαιο όνειρο του και στο Πεeneμούντε -το όνειρο της διαστημικής πτήσης- όπου και έγινε το μεγάλο άλμα στην τεχνολογία των πυραύλων / διαστημικών εκτοξευτών. Εξάλλου, Ο Βέρνερ φον Μπράουν δεν

ενδιαφερόταν για την επικράτηση του τρίτου Ράιχ αλλά για την κατάκτηση του διαστήματος. Σε μία μυθιστορηματική επιχείρηση των Αμερικανικών δυνάμεων στην Γερμανία το Μάρτιο του 1944 με τον τίτλο “paperclip”, ο Βέρνερ φον Μπράουν με πάνω από 200 Γερμανούς επιστήμονες αεροδιαστημικής, συνελήφθη αιφνιδίως και κρατήθηκε στην φυλακή για δύο εβδομάδες επειδή είχε δηλώσει: «ο V-2 δεν προοριζόταν για πολεμικό όπλο, όταν τον ανέπτυσσα. Είχα στο μυαλό μου, το διαστημικό ταξίδι και λυπόμουνα για την επιχειρησιακή του χρήση». Αυτό επιβεβαιώνεται άλλωστε και από το ότι οι Γερμανοί είχαν αναπτύξει θεαματικά την ικανότητα των υγρά προωθούμενων πυραύλων, με σκοπό να κατασκευάσουν οχήματα για ταξίδια στο διάστημα. Όταν δε τελείωσε ο πόλεμος, η ομάδα Ντόρμπεργκερ – Μπράουν, στο Πεενεμούντε είχε έτοιμα σχέδια για δορυφόρο βαλλιστικό πύραυλο, με ακτίνα δράσης 3.500 μίλια αλλά και για, πρώτη φορά, τριώροφο πύραυλο για διαστημική πτήση. Όλες αυτές οι γνώσεις μεταβιβάστηκαν στις Η.Π.Α. όπου ο ομάδα φον Μπράουν έχοντας μεταφερθεί στην μακρινή Αλαμπάμα στις ΗΠΑ, σε απομόνωση για να λόγους ασφάλειας, δημιούργησε το Αμερικανικό βαλλιστικό πρόγραμμα και διαστημικό πρόγραμμα που έστειλε μετά από 2 δεκαετίες τον άνθρωπο στην Σελήνη με το πρόγραμμα “Apollo”. Οι Γερμανοί επιστήμονες στην Αμερική αλλά και αυτοί που κατόρθωσαν να συλλάβουν οι Σοβιετικοί στο τέλος του 2^{ου} ΠΠ αποτέλεσαν τους «πατέρες» των διαστημικών προγραμμάτων των ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης. Είναι άλλωστε γνωστό ότι χιλιάδες Γερμανοί επιστήμονες που ασχολούντο με τα προγράμματα ανάπτυξης πρωτοποριακών όπλων και τεχνολογιών μεταφέρθηκαν με την θέληση τους, αλλά και χωρίς αυτή, σε πολλές χώρες νικήτριες του 2^{ου} ΠΠ και εργάστηκαν σε διάφορα προγράμματα αεροδιαστημικής, ενέργειας, μεταφορών και μηχανικής.

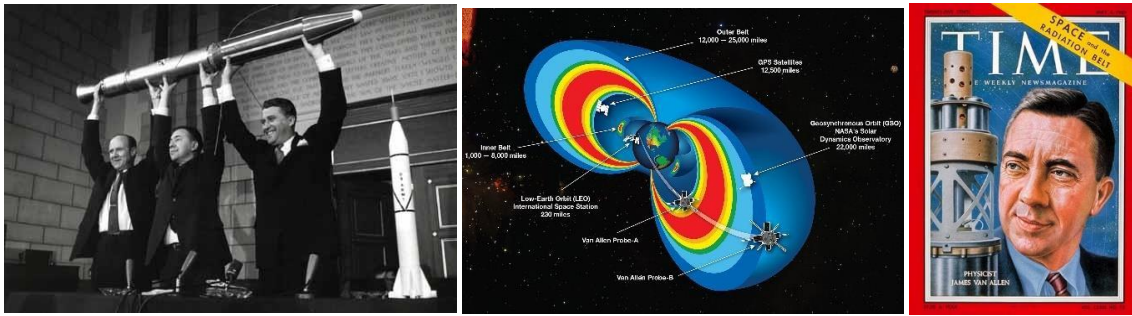
Ύστερα από μία δεκαετία ανάπτυξης βαλλιστικών πυραύλων αλλά και διαστημικών εκτοξευτών βασιζόμενα στην τεχνογνωσία της ομάδας φον Μπράουν και στα δύο άκρα του κόσμου, στις ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης, η ανθρωπότητα βρισκόταν στην δύνη του Ψυχρού Πολέμου όπου ο τεχνολογικός, στρατιωτικός και γεωπολιτικός ανταγωνισμός ανάμεσα στην Δύση και την Σοβιετική Ένωση (Ανατολή) αποτελούσε τον τρόπο της ανθρωπότητας με την κάθε πλευρά να προσπαθεί να προβάλλει τα μεγαλύτερα στρατιωτικά και τεχνολογικά επιτεύγματα και να αναπτύσσει φονικά όπλα όπως η ατομική βόμβα, βόμβα υδρογόνου, υπερηχητικά βομβαρδιστικά με πυρηνικά φορτία, βαλλιστικούς πυραύλους και προηγμένα πολιτικά συστήματα κάθε είδους. Η εμφάνιση της ατομικής βόμβας είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κλίματος απειλής, οπότε και ο συνακόλουθος ανταγωνισμός στο πεδίο της επιστήμης ήταν αναπόφευκτος. Με την ανακατάληψη των χώρων εκτόξευσης των πυραύλων V-2 και του εργοστασίου κατασκευής τους, οι Σοβιετικοί αποφάσισαν να στηριχθούν στην τεχνολογία αυτή, με στόχο τη δημιουργία ενός πανίσχυρου διηπειρωτικού πυραύλου. Ο πύραυλος αυτός θα είχε την ικανότητα να ξεπεράσει τη γήινη βαρύτητα, να μπει σε τροχιά γύρω από τη Γη και στη συνέχεια, εκμεταλλευόμενος την περιστροφή της, να πέσει σε προεπιλεγμένο σημείο του εδάφους. Παράλληλα, Αμερικανοί επιστήμονες καταπιάνονταν επίσης με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των εν λόγω πυραύλων. Στόχος και των δύο ήταν η υπεροχή σε εξοπλισμό διηπειρωτικών βαλλιστικών βλημάτων, ως φορείς πυρηνικών όπλων μεγάλης ακτίνας. Πριν από 60 ακριβώς χρόνια σε μια απομακρυσμένη περιοχή του Καζακστάν και με την άκρατη μυστικότητα που επικρατούσε στη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, η τότε Σοβιετική Ένωση προετοίμαζε ένα τεχνολογικό κατόρθωμα που θα άφηνε άναυδο ολόκληρο τον κόσμο, ενώ συγχρόνως θα μετέφερε και στο Διάστημα τον ανταγωνισμό των δύο υπερδυνάμεων, των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και της τότε Σοβιετικής Ένωσης. Στις 4 Οκτωβρίου του 1957, από τις

πυραυλικές εγκαταστάσεις του Διαστημικού Κέντρου του Μπαϊκονούρ, η Σοβιετική Ένωση έθεσε σε τροχιά τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο, τον «Σπούτνικ 1». Επρόκειτο για μια μεταλλική σφαίρα με μέγεθος 58 εκατοστών και βάρος περίπου 83 κιλών, η οποία περιφέρονταν γύρω από τη Γη μία φορά κάθε 96 λεπτά. Έτσι, για πρώτη φορά ο άνθρωπος κατόρθωσε να θέσει ένα δικό του δημιούργημα στο κενό του διαστήματος, τα ρυθμικά ραδιοσήματα του οποίου χαιρέτιζαν μια νέα εποχή στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού: την εποχή του Διαστήματος. Ένα μήνα αργότερα, οι Ρώσοι επανέλαβαν το θριαμβευτικό τους κατόρθωμα, τοποθετώντας σε τροχιά έναν σκύλο, με το όνομα «Λάικα», ως επιβάτη ενός διαστημοπλοίου 500 περίπου κιλών, του «Σπούτνικ 2».



Εικόνα 2: Η Εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου Sputnik-1 με τον φορέα R-7, πρόδρομο του σημερινού Soyuz

Η Αμερική δεν άργησε να ακολουθήσει. Τέσσερις μήνες μετά τον «Σπούτνικ 1» εκτοξεύτηκε ο πολύ μικρότερος και ελαφρύτερος πρώτος αμερικανικός δορυφόρος “Explorer – 1” στις 31 Ιανουαρίου 1958. Κι έτσι την 1η Οκτωβρίου 1958, ένα χρόνο μετά την εκτόξευση του «Σπούτνικ 1», και με τη δημιουργία της Αμερικανικής Διαστημικής Υπηρεσίας –NASA–, ένας αγώνας δρόμου άρχισε τότε ανάμεσα στην τότε Σοβιετική Ένωση και τις Ηνωμένες Πολιτείες για την κατάκτηση του Διαστήματος. Την ίδια περίοδο οι Αμερικανοί προσπαθούσαν να φτάσουν τους πρωτοπόρους Σοβιετικούς. Μία τεράστια προσπάθεια από επιστήμονες, μηχανικούς και στρατιωτικούς στην Αμερική οδήγησε στο να τεθούν οι βάσεις για μετέπειτα επιτυχίες στην διαστημική άμυνα και τις διαστημικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, ο James Van Allen του State University ανακάλυψε το 1958 με την εκτόξευση του Αμερικανικού δορυφόρου “Explorer – 1” και “Explorer – 3” τις ζώνες Van Allen, οι οποίες είναι περιοχές γύρω από τη Γη, με συγκέντρωση σωματιδίων υψηλής ενέργειας, κυρίως πρωτονίων και ηλεκτρονίων, κάνοντάς τον έτσι έναν από τους σημαντικότερους επιστήμονες του Διαστήματος. Οι ζώνες Van Allen, είναι σημαντικές και κρίσιμες για την σχεδίαση δορυφόρων και διαστημικών οχημάτων καθώς επηρεάζονται τα ηλεκτρονικά τους συστήματα, επηρεάζοντας κατ’ επέκταση την αντοχή, απόδοση και χρόνο λειτουργίας των, από τα σωματίδια υψηλής ενέργειας τα οποία μπορούν να διαπεράσουν μια πλάκα από ατσάλι πάχους 3 εκατοστών (θωράκιση) ή να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στα κύτταρα διαπερνώντας το ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 3: Ο πρώτος Αμερικανικός δορυφόρος Explorer – 1 με τους Von Braun, Van Allen, οι ζώνες Van Allen γύρω από την Γη

Δεκάδες πύραυλοι και τεχνητοί δορυφόροι εκτοξεύτηκαν και από τις δύο πλευρές, στην προσπάθειά τους να μάθουν όσο το δυνατόν περισσότερα για τον διαστημικό χώρο, που οδήγησαν τελικά στην πρώτη επανδρωμένη αποστολή στο Διάστημα του Ρώσου κοσμοναύτη Γιούρι Γκαγκάριν στις 12 Απριλίου 1961.



Εικόνα 4: Ο Φορέας R-7 μεταφέρει την κάψουλα VOSTOK με τον πρώτο αστροναύτη σε τροχιά, Yuri Gagarin

Η πρώτη επανδρωμένη φάση του αμερικανικού προγράμματος για τη Σελήνη εκτελέστηκε με την ονομασία Πρόγραμμα Mercury (Ερμής) και άρχισε στις 5 Μαΐου 1961, ένα μήνα μετά την πτήση του Γκαγκάριν. Στην Ουάσιγκτον, στη διάρκεια της γιορτής που έγινε για να τιμηθεί ο Αλαν Σέπαρντ, ο πρώτος Αμερικανός που ταξίδεψε στο Διάστημα, ο πρόεδρος Τζον Κένεντι έθεσε στόχο την επανδρωμένη επίσκεψη στη Σελήνη πριν από το τέλος της δεκαετίας του 1960. Ηθικός αυτουργός και κινητήρια δύναμη του προγράμματος ήταν ο Πρόεδρος Kennedy, αφού με αυτό τον τρόπο επεδίωκε την ανάκτηση του χαμένου κύρους των Η.Π.Α. μετά την αποτυχημένη εισβολή στον Κόλπο των Χοίρων. Τα κίνητρα του προγράμματος ήταν κυρίως πολιτικά παρά επιστημονικά, αφού υπήρχαν εντάσεις και ανησυχίες σχετικά με την κατάλληλη προετοιμασία των Η.Π.Α. για ένα τόσο σημαντικό διαστημικό πρόγραμμα. Έναν στόχο που οριοθετούσε ξεκάθαρα πλέον τον διαστημικό ανταγωνισμό Αμερικής – Σοβιετικής Ένωσης. Ο στόχος αυτός προϋπέθετε μια σειρά από εκατοντάδες επιτεύγματα σε διάφορους επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς. Επιτεύγματα που απαίτησαν δεκάδες πτήσεις, επανδρωμένων και μη, διαστημικών οχημάτων.

Τελικά, τον Ιούλιο του 1969, οι Αμερικάνοι κατάφεραν να στείλουν τον πρώτο άνθρωπο στην Σελήνη, τον Νηλ Αρμостρονγκ, όπου για πρώτη φορά στην ιστορία αποτυπώθηκε ένα ανθρώπινο χνάρι στη σκονισμένη επιφάνεια της Σελήνης λέγοντας

την χαρακτηριστική φράση «ένα μικρό βήμα για τον άνθρωπο, ένα τεράστιο άλμα για την ανθρωπότητα». Τα επόμενα τρία χρόνια, από το 1969 έως τον Δεκέμβριο του 1972, ολόκληρη η ανθρωπότητα παρακολούθησε από τις οθόνες των τηλεοράσεων μια από τις μεγαλύτερες εξερευνήσεις της ανθρώπινης ιστορίας. Με τη βοήθεια εκατοντάδων χιλιάδων επιστημόνων, μηχανικών και τεχνικών, συνολικά 27 αστροναύτες περιφέρθηκαν γύρω από το Φεγγάρι, ενώ 12 απ' αυτούς περπάτησαν και εξερεύνησαν έξι διαφορετικές περιοχές της επιφάνειάς του.



Εικόνα 5: Εκτόξευση της αποστολής Apollo 11 που μετέφερε τον πρώτο άνθρωπο στο Φεγγάρι

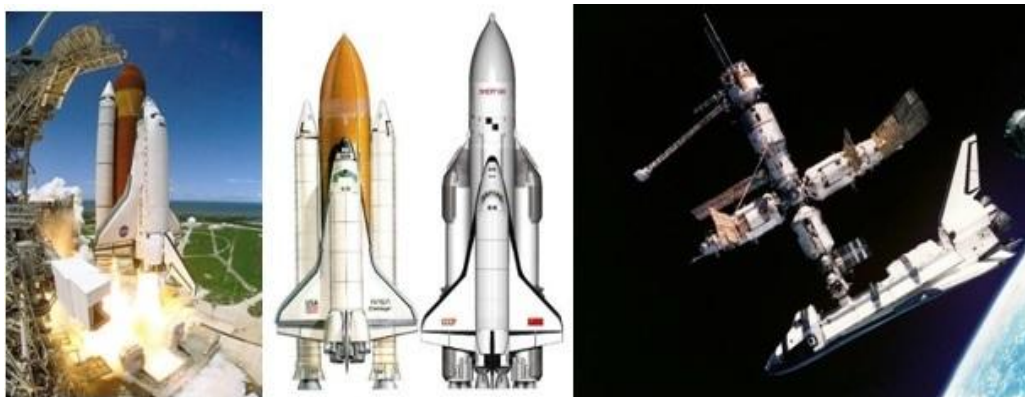
Η αλματώδης αυτή εξέλιξη της αεροδιαστημικής, εντός μιας μόνο δεκαετίας, είναι ενδεικτική της ακμής της επιστήμης και της έρευνας κατά την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου. Έπειτα από αυτή την «ήττα» Η.Ε.Σ.Σ.Δ. ενέτεινε τις προετοιμασίες της για ένα αντίστοιχο πρόγραμμα. Δημιουργήθηκε λοιπόν ο πύραυλος N1, με στόχο να αναπληρώσει το χαμένο έδαφος, και να φέρει εις πέρας το ταξίδι στο δορυφόρο της Γης. Παρ'όλα αυτά, και οι τέσσερις προσπάθειες εκτόξευσης που πραγματοποιήθηκαν, απέτυχαν. Αποτέλεσμα ήταν η ακύρωση του προγράμματος το 1976, και η πρόκληση ενός των μεγαλύτερων πληγμάτων της Σοβιετικής Ένωσης. Το τέλος του διαστημικού ανταγωνισμού σηματοδοτήθηκε από την κοινή Αμερικανοσοβιετική αποστολή Apollo – Soyuz τον Ιούλιο του 1975. Πλέον, δημιουργήθηκε ένα πνεύμα συνεργασίας, με αμοιβαία παροχή πληροφοριών και υποστήριξης και το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε προς τη μελέτη άλλων ουράνιων σωμάτων του διαστήματος και όχι προς την κατάκτησή του. Με βάση το Διεθνές Δίκαιο άλλωστε, το διάστημα δεν μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο εθνικής ιδιοποίησης και τα δύο κράτη δεσμεύτηκαν να μην εγκαταστήσουν ποτέ πυρηνικά όπλα στην εν λόγω περιοχή. Το διάστημα έπαψε να θεωρείται εθνική υπόθεση αλλά αποτελούσε πλέον επιχείρηση ολόκληρης της ανθρωπότητας. Η υλοποίηση τέτοιων εγχειρημάτων έφερε επανάσταση σε πληθώρα τεχνολογικών και επιστημονικών τομέων όπως η πυραυλική, οι τηλεπικοινωνίες, η πληροφορική και τα ηλεκτρονικά συστήματα.

Για πολλούς ο ανηλεής ανταγωνισμός μεταξύ των δύο υπερδυνάμεων στην κούρσα για την κατάκτηση του διαστήματος σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη κούρσα των στρατιωτικών εξοπλισμών, είχαν ως αποτέλεσμα την οικονομική και πολιτική εξουθένωση του Σοβιετικού καθεστώτος και στο τέλος της δεκαετίας του 1980 την διάλυση της Ε.Σ.Σ.Δ., όπου και σήμανε και το τέλος του Ψυχρού Πολέμου. Το τέλος της ΕΣΣΔ και την διαστημικής κούρσας οδήγησε στην δεκαετία του '90 στην στενή συνεργασία των Η.Π.Α. – Ρωσίας με τις πτήσεις του Διαστημικού Λεωφορείου (Space Shuttle) όπου πραγματοποίησε δεκάδες αποστολές σύνδεσης με τον Διαστημικό Σταθμό MIR, ο οποίος ανήκοντας στην Ρωσία πλέον, (Πρώην ΕΣΣΔ) παρέμεινε στο Διάστημα ως εργαστήριο ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, διεθνούς

συνεργασίας (με την NASA και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος – ESA) και δοκιμών μακροχρόνιας διαμονής και εργασίας στο Διάστημα.

Το υψηλό κόστος των διαστημικών αποστολών οδήγησε στις διεθνείς συνεργασίες, ιδιαίτερα στις διαστημικές αποστολές εξερεύνησης αλλά και στην ανάπτυξη νέων πιο οικονομικών διαστημικών αποστολών, κυρίως ρομποτικής μορφής. Το υψηλό κόστος εκτόξευσης (μεγαλύτερο των 50 – 100 χιλιάδων ευρώ ανά κιλό) και η πολυπλοκότητα των διαστημικών συστημάτων έκανε τους διαστημικούς σχεδιαστές να αναπτύξουν δορυφορικές πλατφόρμες και ρομποτικές συσκευές με μικρότερη μάζα, τους μικροδορυφόρους αλλά και να αναπτύξουν συστήματα που μπορούσαν να λειτουργούν περισσότερο αυτόνομα με ελαχιστοποίηση του ανθρώπινου παράγοντα, ώστε να ελαττωθεί το κόστος των διαστημικών αποστολών.

Μετά από την ιστορική εποχή του προγράμματος εξερεύνησης της Σελήνης (Apollo), η Αμερικανική κυβέρνηση Νίξον εν μέσω μεγάλων ενεργειακών, πολιτικών και οικονομικών κρίσεων, αλλά και για να διαφοροποιηθεί από τις προηγούμενες επιτυχίες της NASA / Η.Π.Α., αποφάσισε την ανάπτυξη ενός επαναχρησιμοποιούμενου Διαστημικού Λεωφορείου (Space Shuttle) με το οποίο θα μπορούσε να υπάρξει τακτική εβδομαδιαία πρόσβαση στο Διάστημα, η οποία δημιούργησε ένα πλήθος διαστημικών αποστολών τις δεκαετίες του 1980 – 2010. Συνολικά κατασκευάστηκαν επτά διαστημικά λεωφορεία, εκ των οποίων τρία αποσύρθηκαν, τα Discovery, Atlantis και Endeavour, δυο καταστράφηκαν σε ατυχήματα, τα Challenger και Columbia, ενώ ένα χρησιμοποιήθηκε για δοκιμαστικές πτήσεις στη γήινη ατμόσφαιρα κι όχι για διαστημικές αποστολές, Enterprise το πρώτο διαστημικό λεωφορείο της NASA, και τέλος το Pathfinder, το οποίο αποτελεί εξομοιωτή διαστημικού λεωφορείου. Τα διαστημικά λεωφορεία εκτοξευόταν κάθετα, φέρνοντας συνήθως πέντε έως επτά αστροναύτες (αν και έχουν μεταφερθεί και οκτώ) και μέχρι περίπου 22.700 κιλά ωφέλιμου φορτίου σε χαμηλή γήινη τροχιά. Όταν η αποστολή του τελειώνει, επέστρεφε μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα, πετούσε σαν ανεμοπλάνο και προσγειωνόταν οριζοντίως σε προκαθορισμένους διαδρόμους προσγείωσης. Το διαστημικό λεωφορείο ήταν το πρώτο τροχιακό διαστημικό σκάφος που σχεδιάστηκε με μερική ικανότητα επαναχρησιμοποίησης. Ήταν επίσης το πρώτο επανδρωμένο διαστημικό σκάφος με φτερά που έχει επιτύχει να εκτοξευθεί σε τροχιά και να προσγειωθεί. Μετέφερε μεγάλα ωφέλιμα φορτία σε διάφορες τροχιές, χρησίμευσε σαν πορθμείο για την μεταφορά πληρωμάτων προς και από το Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (International Space Station / I.S.S.), και εκτέλεσε αποστολές συντήρησης και επισκευών.



Εικόνα 6: (Αριστερά) Εκτόξευση του Διαστημικού Λεωφορείου Discovery (Μέση) Σύγκριση του Αμερικανικού και Σοβιετικού Λεωφορείου (Δεξιά) Πρόσδεση του STS Atlantis με τον Ρωσικό Διαστημικό Σταθμό MIR το 1995

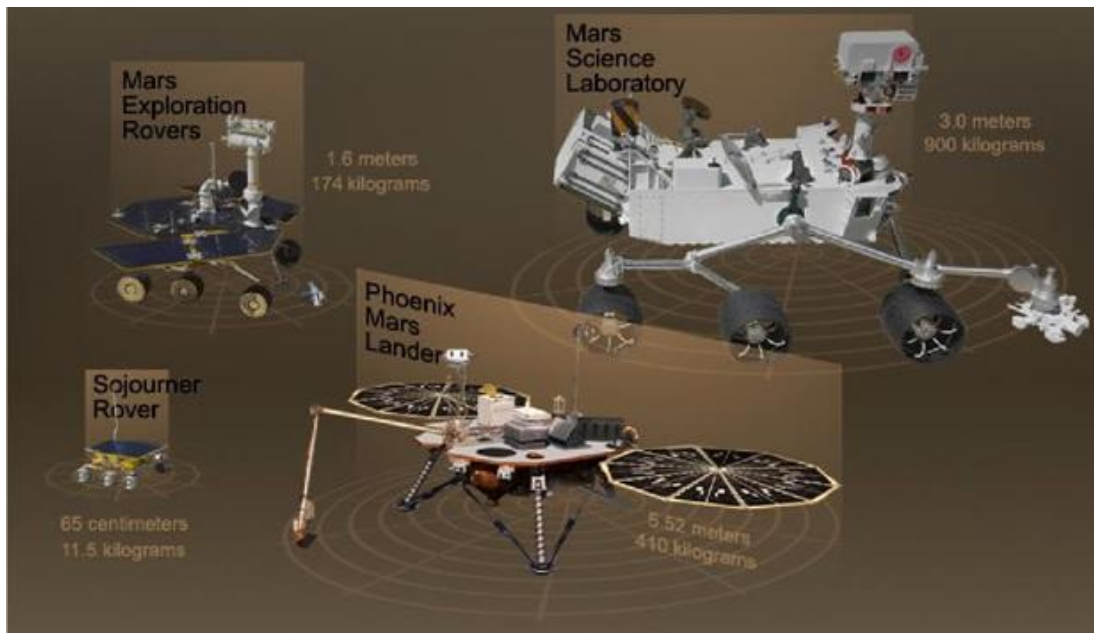
Το όχημα μπορούσε επίσης να ανακτήσει δορυφόρους και άλλα ωφέλιμα φορτία από την τροχιά τους και να τα επιστρέψει στη γη, αλλά αυτή η ικανότητα δεν χρησιμοποιήθηκε συχνά. Εντούτοις, αυτή η ικανότητα χρησιμοποιήθηκε για να επιστρέψει μεγάλα φορτία στη γη από το διεθνές διαστημικό σταθμό, δεδομένου ότι το ρωσικό σκάφος Σογιούζ έχει περιορισμένη ικανότητα επιστροφής φορτίων. Κάθε διαστημικό λεωφορείο σχεδιάστηκε με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 100 εκτοξεύσεων ή 10 ετών λειτουργικής ζωής. Εν τέλει η μέση διάρκεια ζωής αποδείχτηκε πως ήταν 19 πτήσεις για τα Challenger και Columbia, 32 πτήσεις για τα αποσυρθέντα οχήματα Endeavour, Atlantis, και Discovery, και 5 πτήσεις για το δοκιμαστικό όχημα Enterprise.

Η NASA ανακοίνωσε το 2004 ότι το διαστημικό λεωφορείο θα αποσυρθεί το 2010 και θα αντικατασταθεί από το όχημα Orion και τον πυραυλικό φορέα SLS, αν και μετέπειτα ανακοινώθηκε ένα επιπλέον πρόγραμμα για την κατασκευή και εκτόξευση επανδρωμένων οχημάτων με νικήτριες τις Boeing και SpaceX. Τελικά, η τελευταία αποστολή διαστημικού λεωφορείου πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2011 (STS – 135).

Με τις επανδρωμένες αποστολές του Space Shuttle και μη επανδρωμένες αποστολές μεγάλων, πολύπλοκων αποστολών (όπως η αποστολή Galileo μπήκε σε τροχιά γύρω από τον Δία το 1989 και ξεπέρασε το 1 δις δολάρια σε κόστος) οι οποίες απαιτούσαν τεράστιους προϋπολογισμούς και χρόνο κατασκευής, υπήρξαν σκέψεις και προτάσεις για την σχεδίαση και εκτόξευση μικρότερων αποστολών οι οποίες θα είχαν μικρότερο μέγεθος (μάζα / όγκο), μικρότερο κόστος και θα μπορούσαν να εκτοξεύονται αρκετά συχνότερα από μεγαλύτερες διαστημικές αποστολές που απαιτούσαν δισεκατομμύρια σε προϋπολογισμό και δεκαετίες προετοιμασίας από την στιγμή της ιδέας / σύλληψης μέχρι την εκτόξευση και την παραγωγή αποτελεσμάτων και επιστημονικών δεδομένων. Η δεκαετία του '90 στην Αμερική περιλάμβανε μεγάλες περικοπές στο διαστημικό πρόγραμμα με πολλά παραδείγματα διαστημικών αποστολών να έχουν τεράστιες αποκλίσεις στον προϋπολογισμό τους (παραδείγμα η αποστολή Mars Observer που είχε κόστος 400 εκατομμύρια δολάρια αλλά ξεπέρασε 700 εκατομμύρια χωρίς το κόστος εκτόξευσης). Προς το τέλος το τέλος την δεκαετίας του '80 η NASA αποφάσισε να κάνει μία στρατηγική αναδιάταξης δυνάμεων και στόχων. Το αποτέλεσμα της νέας στρατηγικής ήταν να προταθεί μία νέα μεθοδολογία σχεδίασης και κατασκευής διαστημικών αποστολών βασιζόμενη στο δόγμα "Faster, Better, Cheaper", πραγματοποιώντας δηλαδή διαστημικές αποστολές, γρηγορότερα, καλύτερα και με χαμηλότερους προϋπολογισμούς με νέες ευέλικτες και απλοποιημένες σχεδιαστικές διαδικασίες. Πρωτοπόρο σε αυτή την νέα στρατηγική ήταν το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University με την εξαιρετικά καινοτόμα αποστολή NEAR του προγράμματος Discovery, ενός προγράμματος της NASA για ρομποτικές αποστολές με χαμηλό κόστος, κάτω των 200 εκατομμυρίων. Η αποστολή NEAR αποτέλεσε επανάσταση στον χώρο του διαστήματος, όχι μόνο για τα επιστημονικά και τεχνολογικά της επιτεύγματα (συνάντηση, μελέτη και προσεδάφιση στον αστεροειδή Έρως) αλλά και στην διαχείριση και υλοποίηση πολύπλοκων διαστημικών αποστολών, καθότι ολοκληρώθηκε σε μόλις 27 μήνες, το κόστος κατασκευής του οχήματος ήταν λιγότερο από 150 εκατομμύρια δολάρια. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι ο καθ. Σ. Κριμιζής, διευθυντής τότε του Applied Physics Laboratory του John Hopkins University που ήταν ο υπεύθυνος οργανισμός για την αποστολή, σε μία εκδήλωση αποδοχής του διαστημοπλοίου NEAR από την NASA, επέστρεψε 38 εκατομμύρια δολάρια του προϋπολογισμού των 150 εκατομμυρίων

πίσω στην NASA, ως αποτέλεσμα της επιτυχούς διαχείρισης της αποστολής, κάτι που δεν είχε γίνει ποτέ στην ιστορία του Διαστήματος και των διαστημικών αποστολών.

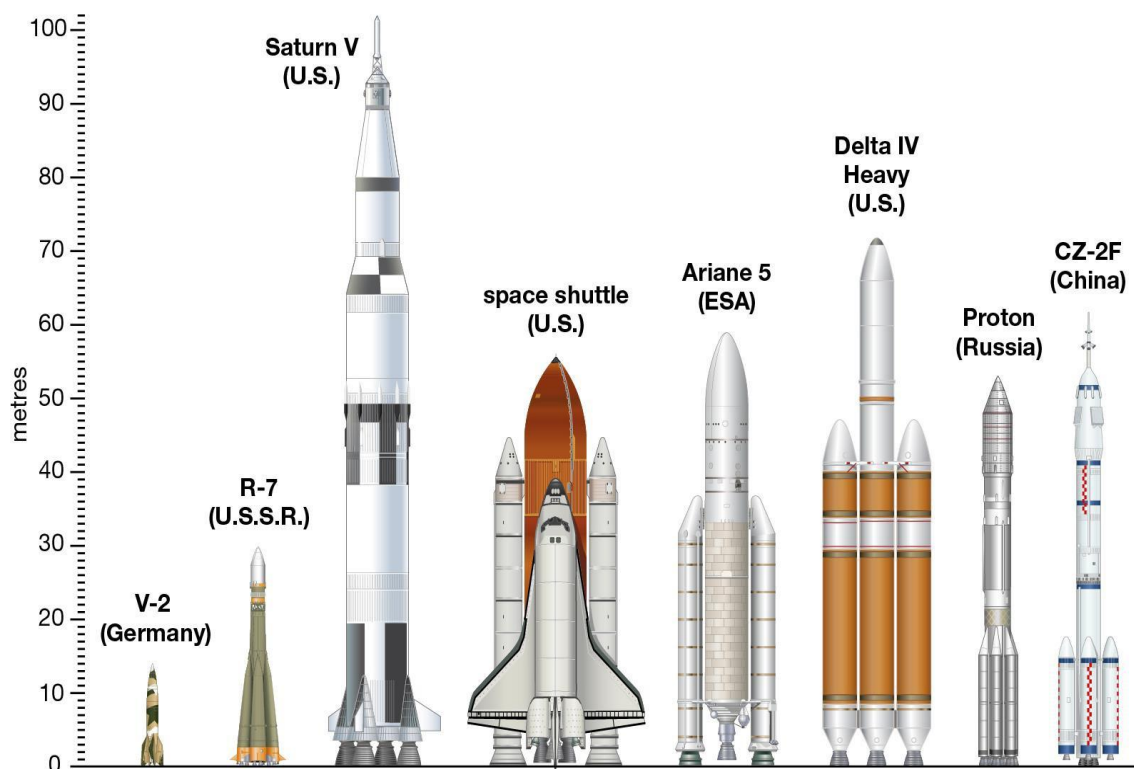
Επίσης εξαιρετικής σημασίας είναι και οι αποστολές που πραγματοποιήθηκαν στον πλανήτη Άρη, όπου η εξερεύνηση του ξεκίνησε με την αποστολή Mariner – 4 το 1964, η οποία ως η πρώτη επιτυχημένη αποστολή εξερεύνησης στον Άρη μετέφερε την πρώτη ψηφιακή κάμερα που είχε κατασκευαστεί ποτέ και μετέδωσε τις πρώτες εικόνες από άλλον πλανήτη εκτός της Γης. Η αποστολή είχε μεταξύ των μελών της και τον Έλληνα ακαδημαϊκό καθ. Σ. Κριμιζή ο οποίος ήταν υπεύθυνος για ένα επιστημονικό όργανο το οποίο θα μετρούσε σωματίδια υψηλής ενέργειας. Με το επιστημονικό όργανο του καθ. Κριμιζή ανακαλύφθηκε ότι στις ηλιακές εκρήξεις εκτός από πρωτόνια εκπέμπονται και ηλεκτρόνια. Από τότε όλες οι διαστημικές αποστολές φέρουν όργανα μέτρησης των ηλεκτρονίων από τις ηλιακές εκρήξεις. Η εξερεύνηση του Άρη πάντα προκαλούσε ξεχωριστό ενδιαφέρον στο κοινό και για τους επιστήμονες αλλά οι δύσκολες καιρικές συνθήκες στον Άρη και η πολυπλοκότητα στην διαδικασία προσγείωσης έχει αποτελέσει αφορμή για την απώλεια αρκετών διαστημικών οχημάτων. Μετά την αποστολή Mariner – 4 το 1965, η αποστολή Mariner – 9 ήταν η πρώτη που μπήκε σε τροχιά γύρω από τον Άρη το 1971. Οι Σοβιετικές αποστολές Mars – 2 και 3 απέτυχαν στην αποστολή δεδομένων από την επιφάνεια του Άρη αν και το Mars – 3 προσγειώθηκε επιτυχώς. Το 1975 η NASA έστειλε τα Viking – 1 και 2 και αποτέλεσαν τις κύριες επιτυχίες και πηγές δεδομένων από τον Άρη για πολλά χρόνια. Επίσης, οι Σοβιετικές αποστολές Phobos – 1 και 2 που εκτοξεύτηκαν το 1988 απέτυχαν να προσεδαφιστούν στον Άρη. Συνολικά 25 από τις 55 αποστολές που έχουν σταλεί στον Άρη έχουν επιτύχει την αποστολή τους αν και από τις 16 αποστολές που έχουν εκτοξευθεί από το 2001, 12 έχουν πετύχει τους στόχους τους και οκτώ από αυτούς είναι ακόμα επιχειρησιακοί. Οι αποτυχημένες αποστολές περιλαμβάνουν τα Mars Observer (1992), Mars – 96 (1996), Mars Climate Orbiter (1999), Mars Polar Lander / Deep Space – 2 (1999), Beagle – 2 (2003) και πρόσφατα το Schiaparelli του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (2016). Η πρώτη αποστολή στην οποία προσεδαφίστηκε κινούμενο ρομποτικό όχημα ήταν η αποστολή της NASA Mars Pathfinder το 1997, η οποία μετέφερε το όχημα Sojourner με μάζα 11,5 kg και διένυσε απόσταση 100m με διάρκεια ζωής 85 μέρες ξεπερνώντας την προδιαγραφή των 7 ημερών. Το 2004 τα δίδυμα rover Spirit και Opportunity της NASA προσεδαφίστηκαν στον Άρη και ξεπέρασαν κάθε προσδοκία με την απόδοσή τους και τον χρόνο λειτουργίας τους, με το Spirit να επιβιώνει μέχρι και το 2010. Το 2012 το rover Curiosity, με μέγεθος όσο ένα συμβατικό αυτοκίνητο προσεδαφίστηκε στον Άρη με μεγαλύτερη εμβέλεια από κάθε άλλο rover. Το 2020 εκτοξεύτηκαν οι αποστολές Mars 2020 της NASA με στόχο ένα rover όπως το Curiosity που περιλαμβάνει και ένα μη επανδρωμένο μικρό ελικόπτερο να εξερευνήσει τον Άρη, το Κινεζικό Tianwen – 1 που περιλαμβάνει τροχιακό όχημα και rover για την επιφάνεια του Άρη και το τροχιακό όχημα Hope των ΗΑΕ που θα μελετήσει τον καιρό στον Άρη. Η Ευρωπαϊκή αποστολή ExoMARS έχει μετατεθεί για το 2022 και περιλαμβάνει το rover Rosalind που θα εξερευνήσει την επιφάνεια του Άρη.



Εικόνα 7: Σύγκριση του μεγέθους των ρομπότ (rover) που έχουν προσεδαφιστεί στον Άρη: Sojourner rover, Mars Exploration Rovers (Spirit & Opportunity), Phoenix lander και Mars Science Laboratory (Curiosity)

Στον τομέα της διαστημικής, πάντα αναπτύσσονται ιδιαίτερα καινοτόμες τεχνολογίες και εφαρμογές, πολλές από τις οποίες αναπτύχθηκαν αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς. Μία τέτοια καινοτομία – εφαρμογή ανέπτυξε πρώτο το Applied Physics Laboratory του John Hopkins University το 1959, το ‘Transit Navigation System’ το οποία μπορούσε να δίνει στα πλοία του Αμερικανικού πολεμικού ναυτικού τις συντεταγμένες τους οπουδήποτε στον ωκεανό, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και το οποίο μετέπειτα το 1967 εφαρμόστηκε η χρήση του στον εμπορικό στόλο όλου του κόσμου. Το σύστημα ‘Transit’ αποτέλεσε τον πρόγονο των συστημάτων πλοήγησης που αναπτύχθηκαν το 1970 – 1980 (Global Positioning System – GPS, Αμερική), το 2015 και ύστερα με το Ευρωπαϊκό σμήνος Galileo (Ευρώπη) και το Κινεζικό Beidou.

Οι δεκαετίες του 1980 – 1990 είδαν όμως χώρες όπως η Ινδία, Κίνα και Ιαπωνία να αναπτύσσουν πλειάδα από δορυφόρους πολλαπλών εφαρμογών (επιστημονικούς και εμπορικούς) και πυραυλικούς φορείς. Η Ινδία απέκτησε ένα από τα πιο προηγμένα διαστημικά προγράμματα εκτοξεύοντας τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους αλλά και δορυφόρους τηλεπισκόπησης (παρατήρησης της Γης) με τον δικό της πυραυλικό φορέα Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) ο οποίος θα αποδειχθεί μετέπειτα και εμπορικά δημοφιλής εκτοξεύοντας και δορυφόρους από άλλες χώρες. Η Κίνα, μετά από πολλαπλές αποτυχίες και βασιζόμενη αρχικά στην τεχνολογία βαλλιστικών, διηπειρωτικών πυραύλων ανέπτυξε σταδιακά μία μεγάλη οικογένεια από πυραυλικούς φορείς και τεχνολογία κατασκευής δορυφόρων και διαστημικών συστημάτων που την κατατάσσει πλέον ως μία από τις τρεις σημαντικότερες και μεγαλύτερες διαστημικές δυνάμεις, έχοντας εκτοξεύσει δικούς της αστροναύτες σε τροχιά το 2003, έχοντας έναν στόλο σε τροχιά από δορυφόρους πλοήγησης (Beidou), τηλεπικοινωνιακούς, τηλεπαρατήρησης και επιτυχείς αποστολές με ρομποτικά οχήματα (lander – rover) στην Σελήνη αλλά και πρόσφατα στον Άρη (Ιούλιος 2020).



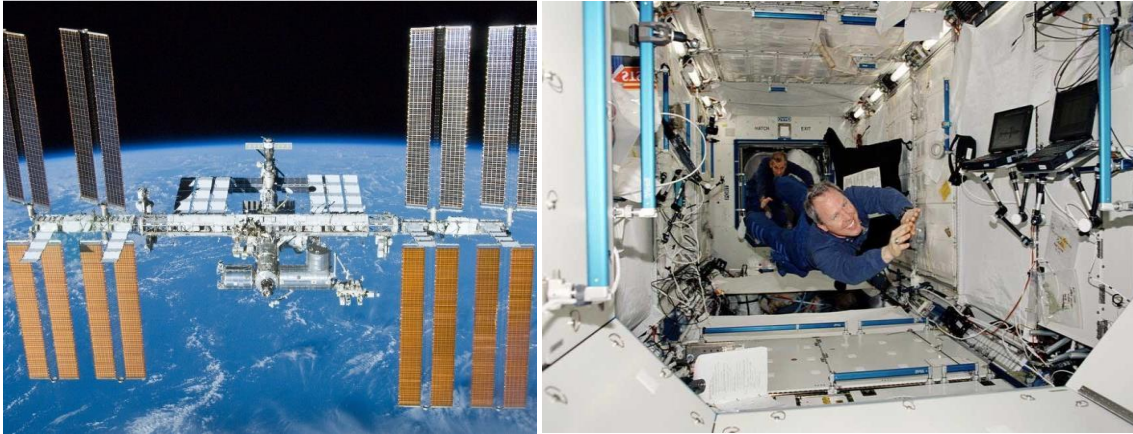
Εικόνα 8: Διαστημικοί Φορείς/Εκτοξευτές

Στις δεκαετίες του 1980 και 1990, η Ευρώπη μέσω του Ευρωπαϊκού Διαστημικού Οργανισμού (European Space Agency – E.S.A.) αλλά τα τελευταία μέσω και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει αναπτύξει και αυτή μία σειρά από ιδιαίτερα χρήσιμα διαστημικά συστήματα, τεχνολογίες, διαστημικές αποστολές εξερεύνησης, διαστημικούς φορείς (Ariane – 1-6, VEGA), προηγμένους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, δορυφόρους πλοήγησης (Galileo), παρατήρησης της Γης (Copernicus) διατηρώντας την πρωτοπορία σε πολλούς τομείς του Διαστήματος. Ο ηγετικός ρόλος της Ευρώπης στους εμπορικούς διαστημικούς φορείς και τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους ήταν ιδιαίτερα αισθητός την δεκαετία του 1990 πριν την εμφάνιση της Space X (Η.Π.Α.) και της ιδιωτικής πρωτοβουλίας, με τους διαστημικούς φορείς Ariane – 4 και 5 να αποτελούν τεράστιες εμπορικές επιτυχίες με μεγάλο μερίδιο της αγοράς, κάτι που φιλοδοξεί να πετύχει ο E.S.A. με τον νέο διαστημικό φορέα Ariane – 6, που αναμένεται να εκτοξευτεί μέσα στο τέταρτο τρίμηνο του 2023. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επενδύσει σε δύο γιγαντιαία προγράμματα με κρίσιμο εμπορικό, κοινωνικό και οικονομικό αντίκρυσμα, το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης Galileo, που επιτρέπει την ανεξάρτητη πλοήγηση οχημάτων με μεγάλη ακρίβεια θέσης και το πρόγραμμα Copernicus, όπου ένας στόλος από δεκάδες δορυφόρους σε τροχιά χαρτογραφεί τον πλανήτη και βοηθά με τα δεδομένα του την πρόληψη περιβαλλοντικών καταστροφών, την παρακολούθηση και μελέτη της κλιματικής αλλαγής αλλά και την δημιουργία νέων καινοτόμων εφαρμογών.



Εικόνα 9: Εκτόξευση του Φορέα Ariane V με τον Ελληνοκυπριακό Δορυφόρο HELLASAT – 4 το 2019

Ακόμη ένα αξιοσημείωτο τεχνολογικό κατόρθωμα της αεροδιαστημικής είναι και ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (Δ.Δ.Σ.). Πρόκειται για έναν ερευνητικό διαστημικό σταθμό σε τροχιά γύρω από τη Γη η συναρμολόγηση του οποίου ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 1998 ενώ το πρώτο του πλήρωμα εγκαταστάθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Ο Δ.Δ.Σ. εξακολουθεί και σήμερα να βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης. Είναι ορατός από τη Γη δια γυμνού οφθαλμού, με την απόστασή του από την επιφάνειά της να κυμαίνεται μεταξύ 400,2 και 409,5 χιλιομέτρων. Ο Δ.Δ.Σ. αποτελεί κοινό πρόγραμμα μεταξύ των διαστημικών οργανισμών NASA των Η.Π.Α., Roscosmos της Ρωσίας, JAXA της Ιαπωνίας, CSA του Καναδά και ESA της Ευρώπης. Ο Δ.Δ.Σ. είναι η συνέχιση αυτού που ξεκίνησε ως ο αμερικανικός διαστημικός σταθμός Freedom, η χρηματοδότηση του οποίου περικόπηκε σημαντικά, και αντιπροσωπεύει τη συγχώνευση του με προγράμματα διαστημικών σταθμών από άλλες χώρες, όπως του ρωσικού MIR – 2, του ευρωπαϊκού Columbus και του ιαπωνικού Kibō. Ο Δ.Δ.Σ. κατοικείται συνεχώς από τότε που το πρώτο πλήρωμα μπήκε στον σταθμό στις 2 Νοεμβρίου 2000, παρέχοντας έτσι συνεχή ανθρώπινη παρουσία στο διάστημα. Ο Δ.Δ.Σ. εξυπηρετείται κυρίως από τα ρωσικό διαστημόπλοιο Soyuz, το αμερικανικό Progress και πρόσφατα και από το Ευρωπαϊκό μεταφορικό σκάφος ATV με κωδική ονομασία για την πρώτη αποστολή Jules Verne, η οποία πήρε το όνομά της από τον συγγραφέα Ιούλιο Βερν. Ο σταθμός πάντως έχει δεχτεί συνολικά 200 αστροναύτες από 15 χώρες και ήταν επίσης ο προορισμός των επτά πρώτων τουριστών του διαστήματος. Το 2012 το διαστημικό όχημα τύπου Dragon της SpaceX έγινε το πρώτο όχημα ιδιωτικής εταιρείας που προσέδεσε στον σταθμό μεταφέροντας προμήθειες και εξοπλισμό ενώ Ιούλιο του 2020 προσδέθηκε επανδρωμένο με Αμερικανούς αστροναύτες. Έως τότε, όλοι οι αστροναύτες που μεταφέρονταν στον Δ.Δ.Σ. (Αμερικανοί, Ευρωπαίοι κλπ.) χρησιμοποιούσαν το Ρωσικό διαστημικό όχημα Soyuz.



Εικόνα 10: Διεθνής Διαστημικός Σταθμός – International Space Station

Ο συμβατικός και τις περισσότερες φορές πολύπλοκος και ακριβός σχεδιασμός διαστημικών αποστολών και συστημάτων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στους τομείς της μικροηλεκτρονικής, υλικών και αυτόνομων συστημάτων, οδήγησε στο τέλος της δεκαετίας του 2010 στην ιδιωτική πρωτοβουλία, όπου νεοφυής νέοι επιχειρηματίες όπως ο Elon Musk, αλλά και επιχειρηματίες κύρους από τομείς εκτός της αεροδιαστημικής, ξεκίνησαν να επενδύουν σημαντικά κεφάλαια δημιουργώντας νέους αεροδιαστημικούς κολοσσούς εκ του μηδενός, όπως η SpaceX, Blue Origin και Planet που σε πολλούς τομείς έχουν ξεπεράσει σε ανταγωνιστικότητα εταιρίες όπως η Boeing, Lockheed Martin, ArianeGroup και Airbus στην κατασκευή και εμπορική χρήση με κερδοφορία, διαστημικών εκτοξευτών, επανδρωμένων διαστημικών οχημάτων (π.χ. κάψουλα Dragon, Falcon – 9) και πολλές φορές αποδεικνύοντας ότι η ιδιωτική πρωτοβουλία και διαχείριση πολύπλοκων και κοστοβόρων προγραμμάτων όπως οι επανδρωμένες πτήσεις μπορούν να γίνουν αρκετά φθηνότερα και με εμπορικό χαρακτήρα – κερδοφορία σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους ανάπτυξης και διαχείρισης τέτοιων προγραμμάτων από δημόσιους οργανισμούς ή από ‘κλασικές εταιρίες’ του αεροδιαστημικού – αμυντικού τομέα που έχουν μάθει να αναπτύσσουν διαστημικά οχήματα και συστήματα με πιο συμβατικό και πολλές φορές αναχρονιστικό τρόπο.

1.3 Οι Σημαντικότερες Διαστημικές Αποστολές

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε εν συντομία, τις κυριότερες Διαστημικές αποστολές από την αρχή της εποχής του Διαστήματος έως και τις πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο.

1.3.1 Sputnik 1 – 1957

Ο Σπούτνικ 1 (Спутник-1, Sputnik 1) ήταν ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος στην ιστορία. Εκτοξεύτηκε ώστε να μπει σε τροχιά, στις 4 Οκτωβρίου 1957 από τη Σοβιετική Ένωση και αποτελεί το πρώτο αποφασιστικό βήμα της ανθρωπότητας στην εξερεύνηση του διαστήματος.

Ο Σπούτνικ 1 (στα Ρωσικά *Σπούτνικ* σημαίνει *δορυφόρος*, ενώ το επίσημο όνομά του ήταν *Τεχνητός Δορυφόρος της Γης* ή ISZ στα Ρώσικα) ήταν ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος στην ιστορία. Εκτοξεύτηκε το 1957 από το Κοσμοδρόμιο του Μπαϊκονούρ στο Καζακστάν, με έναν πύραυλο R-7. Κατασκευάστηκε και

εκτοξεύτηκε από τη Σοβιετική Ένωση ως συμβολή στο Διεθνές Γεωφυσικό Έτος 1957. Ήταν ο πρώτος μιας σειράς δέκα δορυφόρων με το ίδιο όνομα. Ο επόμενος Σπούτνικ 2 μετέφερε τον πρώτο ζωντανό οργανισμό στο διάστημα, τη σκυλίτσα Λάικα, ενώ ο Σπούτνικ 3 ήταν ένα πολύ μεγαλύτερο τροχιακό εργαστήριο και οι Σπούτνικ 4-10 ήταν σκάφη τύπου Βοστόκ που μετέφεραν ζώα και ένα ανθρώπινο ομοίωμα.

Ο δορυφόρος ουσιαστικά ήταν ένα μεταλλικό σώμα στρογγυλού (σφαιρικού) σχήματος διαμέτρου 58 εκατοστών, κατασκευασμένο από αλουμίνιο και βάρους περίπου 83 κιλών. Σκοπός του ήταν η μελέτη του περιβάλλοντος έξω από την ατμόσφαιρα. Κατέγραψε την θερμοκρασία στο εσωτερικό και την επιφάνεια της σφαίρας καθώς και την πυκνότητα της ανώτερης ατμόσφαιρας και της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ιονόσφαιρα. Οι δυο τελευταίες μετρήσεις έγιναν με τη μελέτη των σημάτων που έστελνε ο δορυφόρος στη Γη, των περιφημων «μπιπ» του, που εξέπεμπε κάθε 0,3 δευτερόλεπτα. Ακόμα, η σφαίρα ήταν γεμάτη με άζωτο υπό πίεση, για να διαπιστωθεί κατά πόσον θα υπήρχαν συγκρούσεις με μετεωρίτες και απώλεια αερίου, κάτι που όμως δεν παρατηρήθηκε. Περιφερειακά στη μεταλλική σφαίρα υπήρχαν τέσσερις κεραιές επικοινωνίας, μήκους 2,4-2,9 μέτρων. Είχε δύο πομπούς ισχύος 1 Watt στα βραχέα κύματα και συγκεκριμένα στις συχνότητες 20.005 και 40.002 MHz. Η εκπομπή συνίστατο από παλμούς, το εύρος των οποίων καθορίζονταν από την θερμοκρασία και την πίεση. Οι πομποί του λειτούργησαν για τρεις βδομάδες, μέχρι δηλαδή οι μπαταρίες του να εξασθενήσουν. Συνέχισε όμως την τροχιά του γύρω από τη Γη για 92 μέρες, μέχρι τις 4 Ιανουαρίου 1958, οπότε κήκε κατά την επανείσοδο του στην ατμόσφαιρα. Είχε κάνει 1.400 τροχιές γύρω από τη Γη, καλύπτοντας μια συνολική απόσταση 70 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Το μέσο ύψος της τροχιάς ήταν 250 χιλιόμετρα, με απόγειο στα 947 χιλιόμετρα στην αρχή της αποστολής και με έγκλιση 65,0° ως προς τον Ισημερινό. Στην διάρκεια της τριμηνιαίας πτήσης του έχανε συνέχεια ύψος επειδή η τριβή με την ιονόσφαιρα ήταν ισχυρή, ισχυρότερη από τις προβλέψεις, και τον επιβράδυνε ασταμάτητα. Έτσι την 96η ημέρα και σε ύψος 100 χιλιομέτρων μπήκε στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και κήκε.

Ο Σπούτνικ ήταν η απαρχή για το συναγωνισμό ανάμεσα σε ΗΠΑ και Σοβιετική Ένωση για την κυριαρχία στο χώρο της εξερεύνησης του διαστήματος.



Εικόνα 11: Εικόνα του Sputnik – 1

1.3.2 Vostok 1 – 1961

Το Βοστόκ 1 (*ВОСТОК-1*) ήταν η πρώτη διαστημική πτήση του προγράμματος Βοστόκ και η πρώτη επανδρωμένη διαστημική πτήση στην ιστορία. Το διαστημικό σκάφος εκτοξεύθηκε στις 12 Απριλίου του 1961 με τον Σοβιετικό κοσμοναύτη Γιούρι Γκαγκάριν, ο οποίος έγινε ο πρώτος άνθρωπος που ταξίδεψε στο Διάστημα και μπήκε

σε τροχιά γύρω από τη Γη. Έγινε διάσημος και εξαιρετικά δημοφιλής παγκοσμίως, και του απονεμήθηκε ένας μεγάλος αριθμός μεταλλίων και βραβείων, ανάμεσα τους και αυτό του *Ηρωα της Σοβιετικής Ένωσης* η οποία ήταν και η ανώτατη διάκριση της χώρας. Η πτήση του με το Βοστόκ 1 ήταν η μοναδική στην οποία συμμετείχε, ωστόσο υπηρέτησε ως μέλος του αναπληρωματικού πληρώματος του Σογιούζ 1 και έπαιξε ρόλο στις διαστημικές προσπάθειες της Σοβιετικής Ένωσης. Αργότερα απέκτησε τη θέση του αναπληρωτή διευθυντή εκπαίδευσης στο κέντρο εκπαίδευσης κοσμοναυτών έξω από τη Μόσχα, το οποίο ονομάστηκε προς τιμή του.

Στις 12 Απριλίου 1961, 09:07 ώρα Μόσχας, ο Γιούρι Γκαγκάριν ξεκίνησε για το ιστορικό του ταξίδι μέσα στο Βοστόκ 1. Εικοσιπέντε λεπτά μετά την εκτόξευση, μπήκε σε ελλειπτική τροχιά με απόγειο 302 χιλιόμετρα, περίγειο 175 χιλιόμετρα και περίοδο 89 λεπτά και 34 δευτερόλεπτα, κινούμενος με ταχύτητα 7,61 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο (27.396 χιλιόμετρα ανά ώρα). Μετά από 67 λεπτά σε τροχιά, το προσωπικό ελέγχου πτήσης έδωσε εντολή στο σκάφος να πυροδοτήσει τους κινητήρες επιβράδυνσης και να αρχίσει την επανείσοδό του στην ατμόσφαιρα. Ο Γκαγκάριν δεν προσγειώθηκε μαζί με την κάψουλα, αλλά χρησιμοποίησε το εκτινασόμενο κάθισμά του σε ύψος 7 χιλιομέτρων, και μετά από ελεύθερη πτώση χρησιμοποίησε το αλεξίπτωτό του και προσγειώθηκε κοντά στην πόλη Τακτάροβα. Η συνολική διάρκεια της αποστολής, που τελείωσε στις 10:55 ώρα Μόσχας με την προσγείωση του Γκαγκάριν, ήταν 108 λεπτά.

Ο Γκαγκάριν πέθανε το 1968 όταν το αεροσκάφος MiG – 15 που πετούσε κατά την διάρκεια εκπαίδευσης κατέπεσε από μηχανική βλάβη. Προς τιμή του έχει ιδρυθεί το βραβείο Γιούρι Γκαγκάριν.



Εικόνα 12: Πρωτοσέλιδο εφημερίδας του 1961 (μέσον), Η κάψουλα με τη οποία ταξίδεψε ο Γκαγκάριν (δεξιά)

1.3.3 Mariner 4 – 1964

Το Μάρινερ 4, γνωστό και ως *Μάρινερ – Άρης 1964*, ήταν το τέταρτο διαστημικό σκάφος του προγράμματος Μάρινερ που χρησιμοποιήθηκε για την εξερεύνηση του πλανητικού μας συστήματος και εκτέλεσε επιτυχή προσέγγιση του πλανήτη Άρη, στέλνοντας τις πρώτες εικόνες της επιφάνειάς του.

Για πρώτη φορά εικόνες ενός άλλου πλανήτη διαβιβάζονταν από το βαθύ διάστημα στην γη, αποκαλύπτοντας έναν φαινομενικά νεκρό κόσμο γεμάτο κρατήρες. Το Μάρινερ 4 είχε ως σκοπό να διευθύνει τις επιστημονικές παρατηρήσεις κινηματογραφήσεων σε πρώτο πλάνο τον Άρη και να διαβιβάσει αυτές τις εικόνες στη γη. Άλλοι στόχοι της αποστολής ήταν η καταμέτρηση πεδίων, η ανίχνευση ιόντων στο διαπλανητικό διάστημα κοντά στον Άρη καθώς και η εξάσκηση και

εκμάθηση των ικανοτήτων εφαρμοσμένης μηχανικής για τις διαπλανητικές πτήσεις μακροχρόνιας διάρκειας.

Εκτοξεύτηκε από τη βάση της Αμερικανικής πολεμικής αεροπορίας στο ακρωτήριο Κανάβεραλ στις 28 Νοεμβρίου 1964 και έπειτα από 7,5 μήνες προσέγγισε τον Άρη. Η κοντινότερη απόσταση από τη επιφάνεια του Άρη που κατάφερε να φτάσει ήταν τα 9.846 χιλιόμετρα. Η αναμετάδοση στοιχείων συνεχίστηκε έως τα τέλη του 1967 όπου στις 21 Δεκεμβρίου διακόπηκε οριστικά η επικοινωνία έπειτα από πολλές συγκρούσεις με μικρομετεωρίτες και ελλείψεις στα συστήματα του.



Εικόνα 13: Η πιο πετυχημένη φωτογραφία του Άρη από το Mariner 4 (αριστερά), το Διαστημικό Σκάφος Mariner 4 (μέσον), οι θέσεις του Mariner 4 γύρω από τον Άρη (δεξιά)

1.3.4 Apollo 11 – 1969

Η αποστολή Απόλλων 11 (Apollo 11) ήταν η διαστημική πτήση που προσεδάφισε τους πρώτους δύο ανθρώπους στη Σελήνη. Ο αρχηγός της αποστολής Νηλ Άρμστρογκ και ο πιλότος Έντουιν «Μπαζ» Όλντριν, αμφότεροι Αμερικανοί, προσεδάφισαν τη σεληνάκατο *Eagle* στις 20 Ιουλίου του 1969. Έξι ώρες μετά την προσσελήνωση στις 21 Ιουλίου, ο Άρμστρογκ έγινε ο πρώτος άνθρωπος που πάτησε στην επιφάνεια της Σελήνης. Ο Όλντριν τον συνόδευσε περίπου 20 λεπτά αργότερα. Πέρασαν μαζί περίπου 2 ώρες και ένα τέταρτο έξω από το διαστημικό σκάφος και συνέλεξαν 21,5 κιλά σεληνιακού υλικού για να επιστρέψουν στη Γη. Ενώ βρίσκονταν στην επιφάνεια της Σελήνης, ο Μάικλ Κόλινς οδηγούσε μόνος του το όχημα διακυβέρνησης *Columbia* σε σεληνιακή τροχιά. Ο Άρμστρογκ και ο Όλντριν πέρασαν σχεδόν μία ημέρα στη σεληνιακή επιφάνεια προτού επανέλθουν στο *Columbia*.

Το Απόλλων 11 εκτοξεύτηκε με έναν πύραυλο Saturn V από το Διαστημικό Κέντρο Κένεντι στο νησί Μέριτ στη Φλόριντα στις 16 Ιουλίου, και ήταν η πέμπτη επανδρωμένη αποστολή του προγράμματος Απόλλων της NASA. Το διαστημικό σκάφος Απόλλων είχε τρία μέρη: ένα όχημα διακυβέρνησης (CM) με καμπίνα για τους τρεις αστροναύτες, και ήταν το μόνο μέρος που επέστρεψε στη Γη, ένα υπηρεσιακό σκάφος (SM), το οποίο υποστήριζε το όχημα διακυβέρνησης με πρόωση, ηλεκτρική ενέργεια, οξυγόνο και νερό, και τη σεληνάκατο (LM) που είχε δύο επίπεδα, ένα χαμηλότερο για την προσσελήνωση και ένα ανώτερο για να θέσει τους αστροναύτες πίσω σε σεληνιακή τροχιά.

Αφού τέθηκαν στη σωστή κατεύθυνση προς τη Σελήνη από τον Saturn V, οι αστροναύτες αποκόλλησαν το διαστημικό σκάφος από τον πύραυλο και ταξίδεψαν για τρεις ημέρες έως ότου μπήκαν σε σεληνιακή τροχιά. Τότε ο Άρμστρογκ και ο Όλντριν μεταφέρθηκαν στη σεληνάκατο *Eagle* και προσσεληνώθηκαν. Έμειναν

συνολικά περίπου 21,5 ώρες στην επιφάνεια της Σελήνης. Οι αστροναύτες χρησιμοποίησαν το ανώτερο επίπεδο του *Eagle* για να απομακρυνθούν από την επιφάνεια της Σελήνης και να ενωθούν πάλι με τον Κόλινς στο όχημα διακυβέρνησης. Εγκατέλειψαν το *Eagle* προτού εκτελέσουν τους ελιγμούς που τους έβγαλαν από τη σεληνιακή τροχιά και τους έθεσαν σε τροχιά με προορισμό τη Γη. Επέστρεψαν με την προσγείωσή τους στον Ειρηνικό Ωκεανό στις 24 Ιουλίου.

Η προσσελήνωση μεταδόθηκε ζωντανά στην τηλεόραση παγκοσμίως. Ο Άρμστρονγκ πάτησε πάνω στην επιφάνεια της Σελήνης και περιέγραψε το γεγονός ως «ένα μικρό βήμα για τον άνθρωπο, ένα τεράστιο άλμα για την ανθρωπότητα» (“one small step for man, one giant leap for mankind”). Το Απόλλων 11 τερμάτισε ουσιαστικά την κούρσα των δύο υπερδυνάμεων για την κατάκτηση του Διαστήματος και εκπλήρωσε έναν εθνικό στόχο που είχε τεθεί το 1961 από τον Αμερικανό πρόεδρο Τζον Φιτζέραλντ Κένεντι: «Πριν το τέλος της δεκαετίας, η μετάβαση ενός ανθρώπου στη Σελήνη και η ασφαλής επιστροφή του στη Γη».



Εικόνα 14: Ο πρώτος άνθρωπος στην επιφάνεια της Σελήνης (αριστερά), το πρωτοσέλιδο της εφημερίδας New York Times με την μεγάλη είδηση (μέσον), οι κοσμοναύτες, από αριστερά προς τα δεξιά, Νηλ Άρμστρονγκ, Μάικλ Κόλινς και Μπαζ Όλντριν (δεξιά)

1.3.5 Salyut 1 – 1971

Ο Salyut 1 (DOS-1) ήταν ο πρώτος διαστημικός σταθμός στον κόσμο που εκτοξεύτηκε σε χαμηλή τροχιά της Γης από τη Σοβιετική Ένωση στις 19 Απριλίου 1971. Κατά την εκτόξευση, ο ανακοινωμένος σκοπός του Salyut ήταν να δοκιμάσει τα στοιχεία των συστημάτων ενός διαστημικού σταθμού και να πραγματοποιήσει επιστημονική έρευνα και πειράματα. Ακολούθησε το πρόγραμμα Salyut με πέντε επιτυχημένες εκτοξεύσεις επτά ακόμη σταθμών. Η τελευταία ενότητα του προγράμματος, Zvezda (DOS-8), έγινε ο πυρήνας του ρωσικού τμήματος του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού και παραμένει σε τροχιά.

Ο Salyut 1 τροποποιήθηκε από μια άτρακτο του προγράμματος Almaz και κατασκευάστηκε από πέντε στοιχεία: ένα διαμέρισμα μεταφοράς, ένα κύριο διαμέρισμα, δύο βοηθητικά διαμερίσματα και το διαστημικό παρατηρητήριο Orion 1. Από αυτά τα τρία ήταν υπό πίεση και στα δύο μπορούσε να εισέλθει το πλήρωμα.

Τον Salyut 1 επισκέφτηκαν τα Soyuz 10 και 11. Η προσάρτηση του Soyuz 10 απέτυχε λόγω βλάβης στη θυρίδα εισόδου και παρόλο που συνδέθηκε με αυτόν, το πλήρωμα αναγκάστηκε να ματαιώσει αυτή την αποστολή. Το δεύτερο πλήρωμα εκτοξεύτηκε με το Soyuz 11 και προσέδεσε επιτυχώς όμως βρήκε τον σταθμό σε κακή κατάσταση, λόγω πυρκαγιάς σε καλώδια, εντούτοις προσαρμόστηκε και κατάφερε να ζήσει και να πραγματοποιήσει πειράματα στον Salyut 1 για 23 ημέρες. Δυστυχώς, λίγο πριν την επάνοδο του πληρώματος στη Γη, και κατά την απόρριψη του τροχιακού τμήματος του Soyuz 11, τα εκρηκτικά μπουλόνια που σκοπό τους

έχουν να διαχωρίζουν τη μονάδα επανεισόδου από το υπόλοιπο πλοίο, δεν εκτοξεύτηκαν προκαλώντας ένα έντονο τράνταγμα που με τη σειρά του προκάλεσε το άνοιγμα μιας βαλβίδας πίεσης κάτω από ένα από τα καθίσματα. Η καμπίνα έχασε γρήγορα όλη την ατμόσφαιρα της και το πλήρωμα βρήκε τραγικό θάνατο, όντας έτσι οι μόνοι άνθρωποι που πέθαναν πάνω από τη γραμμή Κάρμάν. Η αποστολή του Salyut 1 τερματίστηκε αργότερα και στις 11 Οκτωβρίου 1971 κατά την επανείσοδο στην ατμόσφαιρα της Γης, κάηκε.



Εικόνα 15: Ο Διαστημικός Σταθμός Salyut 1 και από αριστερά προς τα δεξιά, οι κοσμοναύτες Gregori Dobrovolski, Vladislav Vokon και Victor Patsayev το πλήρωμα του Soyuz 11

1.3.6 Viking 1 & 2 – 1976

Το πρόγραμμα Viking αποτελούνταν από ένα ζευγάρι πανομοιότυπων αμερικανικών διαστημικών ανιχνευτών, Viking 1 και Viking 2, που προσγειώθηκαν στον Άρη το 1976. Αποστολή τους ήταν να στείλουν φωτογραφίες από την επιφάνεια του, να μελετήσουν το κλίμα του και να εκτελέσουν μια σειρά από πειράματα για την ύπαρξη ή όχι ζωής στον πλανήτη. Κάθε διαστημόπλοιο αποτελούνταν από δύο κύρια μέρη: ένα τροχιακό που είχε σχεδιαστεί για να φωτογραφίζει την επιφάνεια του Άρη από τροχιά και ένα επίγειο σχεδιασμένο να μελετά τον πλανήτη από την επιφάνεια. Τα τροχιακά χρησίμευαν επίσης ως μεταφορείς επικοινωνίας για τα προσγειωμένα αεροσκάφη μετά την προσεδάφιση.

Το πρόγραμμα Viking αναπτύχθηκε από το προηγούμενο, ακόμη πιο φιλόδοξο πρόγραμμα της NASA, Voyager Mars, το οποίο δεν σχετιζόταν με τους επιτυχημένους ανιχνευτές βαθέους διαστήματος (εξωδιάστημα) Voyager στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το Viking 1 εκτοξεύτηκε στις 20 Αυγούστου 1975 και το δεύτερο σκάφος, το Viking 2, εκτοξεύτηκε στις 9 Σεπτεμβρίου 1975, και τα δύο βρίσκονταν πάνω σε πυραύλους Titan III με ανώτερες βαθμίδες Centaur. Το Viking 1 μπήκε στην τροχιά του Άρη στις 19 Ιουνίου 1976, με το Viking 2 να ακολουθεί στις 7 Αυγούστου.

Ύστερα από περιφορά γύρω από τον Άρη για περισσότερο από ένα μήνα και μετά από επιστροφή εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή του τόπου προσγείωσης, τα προσεδάφια αποκολλήθηκαν από τα τροχιακά και αφού εισήλθαν στην ατμόσφαιρα του Άρη, προσγειώθηκαν ήπια στις τοποθεσίες που είχαν επιλεγεί. Το επίγειο Viking 1 προσγειώθηκε στην επιφάνεια του Άρη στις 20 Ιουλίου 1976, δύο εβδομάδες πριν από την άφιξη του Viking 2. Στη συνέχεια, το Viking 2 προσγειώθηκε και αυτό επιτυχώς στις 3 Σεπτεμβρίου. Τα τροχιακά μέρη συνέχισαν να απεικονίζουν και να εκτελούν άλλες επιστημονικές εργασίες σε τροχιά, ενώ τα επίγεια οχήματα ανέπτυξαν τα επιστημονικά τους όργανα στην επιφάνεια.

Το κόστος του έργου ήταν περίπου 1 δισεκατομμύριο δολάρια ΗΠΑ κατά τη στιγμή της έναρξης, που ισοδυναμεί με περίπου 5 δισεκατομμύρια δολάρια σε

δολάρια του 2021. Η αποστολή θεωρήθηκε επιτυχημένη και είναι αναγνωρισμένο ότι βοήθησε στο να σχηματιστεί το μεγαλύτερο μέρος της γνώσης μας για τον Άρη στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000.



Εικόνα 16: Το διαστημικό σκάφος Viking 1, εικόνες της επιφάνειας του πλανήτη Άρη από το Viking 1

1.3.7 Voyager 1 & 2 – 1979

Το Βόγιατζερ 1 είναι ένα μη επανδρωμένο διαπλανητικό διαστημόπλοιο που εκτοξεύτηκε 16 ημέρες μετά το Βόγιατζερ 2, στις 5 Σεπτεμβρίου 1977, από το Ακρωτήριο Κανάβεραλ με προωθητικό σύστημα τον πύραυλο-φορέα Titan III-Centaur. Η διαστημική του τροχιά ήταν έτσι προγραμματισμένη ώστε να πλησιάσει στον Ουρανό πολύ νωρίτερα από το δίδυμο Βόγιατζερ 2. Αρχικά το Βόγιατζερ 1 έφερε τον κωδικό Μάρινερ 11 και προοριζόταν να ενταχθεί στα πλαίσια του προγράμματος Μάρινερ. Στις 12 Σεπτεμβρίου 2013 η NASA ανακοίνωσε ότι το Βόγιατζερ 1 είναι επισήμως το πρώτο ανθρώπινο κατασκεύασμα που φτάνει στο διαστημικό χώρο. Η είσοδος στο διαστημικό χώρο έγινε στις 25 Αυγούστου του 2012, όπως προέκυψε από την ανάλυση της πυκνότητας του πλάσματος.

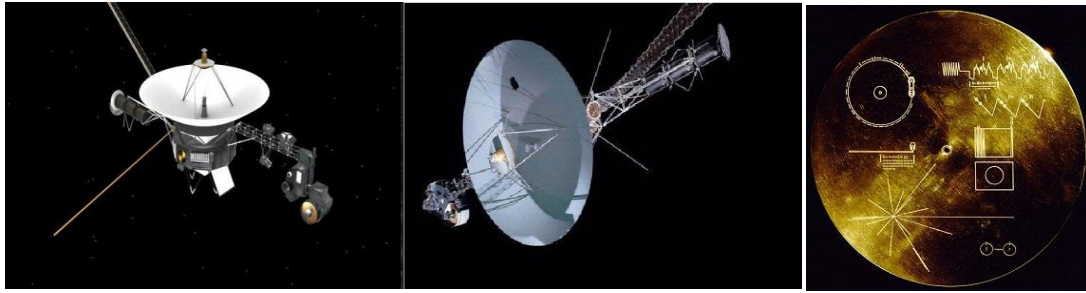
Το Βόγιατζερ 1 πήρε τις πρώτες φωτογραφίες προσεγγίζοντας τον Δία τον Ιανουάριο του 1979. Η κοντινότερη προσέγγιση ήταν 278.000 χλμ. στις 5 Μαρτίου 1979. Στο πλαίσιο της αποστολής αυτής λήφθηκαν σχεδόν 19.000 φωτογραφίες. Πλησίασε το δορυφόρο Ιώ στα σχεδόν 18.640 χλμ. και ανακάλυψε τις πρώτες εξωγήινες ηφαιστειακές δραστηριότητες. Χάρη στην επίδραση του πεδίου βαρύτητας του Δία συνέχισε το ταξίδι του επιταχύνοντας την πορεία του, έτσι ώστε στις 12 Νοεμβρίου 1980, σε απόσταση μόλις 124.200 χλμ. από τον Κρόνο, φωτογράφησε το σύστημα των δακτυλίων του και ανέλυσε τη σύσταση της ατμόσφαιρας και του Κρόνου και του δορυφόρου του Τιτάνα. Στις 18 Φεβρουαρίου 1998, στις 00:10 ώρα το πρωί, η απόστασή του από τον ήλιο ήταν 10,4 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα, δηλαδή έγινε μεγαλύτερη και από αυτή του Πάιονιρ 10, ο οποίος είχε εκτοξευτεί το 1972 με προορισμό τον Κρόνο. Στις 14 Οκτωβρίου 2005 το Βόγιατζερ 1 απείχε 14,5 δισεκατομμύρια χλμ. (ισοδυναμεί με 97,1 AU ή 13,4 ώρες φωτός) από τον Ήλιο, έχοντας διανύσει 115 AU ή 17,2 δισ. χλμ. από την ημέρα της εκτόξευσής του. Στις 20 Μαρτίου 2013 ανακοινώθηκε ότι το Βόγιατζερ 1 είναι το πρώτο αντικείμενο κατασκευασμένο από τον άνθρωπο που βγήκε από το ηλιακό μας σύστημα. Τον Ιανουάριο του 2023 το Βόγιατζερ 1 απείχε από τη Γη περίπου 23,8 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα ή 159 AU όντας το πιο απομακρυσμένο από τη Γη αντικείμενο ανθρώπινης κατασκευής. Η ταχύτητά του είναι περίπου 3,6 AU (ισοδυναμεί με 600 εκ. χλμ.) τον χρόνο εν συγκρίσει με τον Ήλιο. Δηλαδή σε σχέση με τον Ήλιο η ταχύτητά του είναι περίπου 17 χλμ. το δευτερόλεπτο. Όπως και το δίδυμό του

Βόγιατζερ 2, το Βόγιατζερ 1 μεταφέρει ένα δίσκο από χρυσάφι με ένα χαιρετισμό προς τα τυχόν νοήμονα όντα που, ίσως συναντήσει κάποτε το σκάφος. Ο δίσκος περιλαμβάνει ήχους, μουσική και 115 εικόνες από τον πλανήτη Γη. Η αποστολή του Βόγιατζερ 1 εκτιμάται πώς θα ολοκληρωθεί τον Ιούνιο του 2025 όταν πια η γεννήτρια ραδιοϊσοτόπων με την οποία είναι εξοπλισμένο δε θα μπορεί να παραγάγει αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει κανένα όργανό του.

Ο Βόγιατζερ 2 είναι μία μη επανδρωμένη διαπλανητική διαστημοσυσκευή, που εκτοξεύτηκε στις 20 Αυγούστου 1977, στο πλαίσιο του Προγράμματος Βόγιατζερ για την εξερεύνηση των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού μας συστήματος.

Είναι πανομοιότυπος με τον Βόγιατζερ 1, που εκτοξεύτηκε λίγες μέρες αργότερα. Τα δυο σκάφη επισκέφθηκαν τον Δία και τον Κρόνο με διαφορά λίγων μηνών. Ο δίδυμός του πραγματοποίησε ένα κοντινό πέρασμα από τον δορυφόρο του Κρόνου Τιτάνα και στη συνέχεια συνέχισε σε πορεία που τον οδηγούσε έξω από το ηλιακό σύστημα, όμως ο Βόγιατζερ 2 ακολούθησε διαφορετική τροχιά που του επέτρεψε να μείνει στην εκλειπτική κι έτσι να συνεχίσει το ταξίδι του στο ηλιακό σύστημα, εξερευνώντας για πρώτη φορά τον Ουρανό και τον Ποσειδώνα.

Το Βόγιατζερ 2 θεωρείται το πιο επιτυχημένο διαστημικό εξερευνητικό όχημα έως τώρα. Επισκέφθηκε τέσσερις πλανήτες, δύο από τους οποίους εξερευνήθηκαν για πρώτη -και τελευταία μέχρι σήμερα- φορά, και πολλούς από τους δορυφόρους τους, μελετώντας τους με μια πληθώρα οργάνων και επεκτείνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τις γνώσεις μας για την περιοχή αυτή του ηλιακού μας συστήματος. Ανακάλυψε δακτυλίους, δορυφόρους, ηφαιστειότητα σε παγωμένα φεγγάρια, κι έναν πιθανό υπόγειο ωκεανό στην Ευρώπη, δορυφόρο του Δία. Οι αντιλήψεις για το σχηματισμό, τη δομή και τη δυναμική του ηλιακού συστήματος άλλαξαν ριζικά μετά από το ταξίδι του, που εκμεταλλεύτηκε μια σπάνια γεωμετρική διάταξη των εξωτερικών πλανητών που συμβαίνει κάθε 176 χρόνια και δίνει τη δυνατότητα ενός γρήγορου ταξιδιού από τον ένα στον άλλο με τη χρήση βαρυτικής προώθησης. Σε απόσταση 120 AU από τον Ήλιο και κινούμενο με ταχύτητα 55.230 χλμ/ώρα, το Βόγιατζερ 2 είναι η τέταρτη διαστημοσυσκευή που ανέπτυξε την απαιτούμενη ταχύτητα διαφυγής για να εγκαταλείψει το ηλιακό σύστημα. Στις 5 Νοεμβρίου 2018 το σκάφος εγκατέλειψε την ηλιόσφαιρα και έγινε το δεύτερο ανθρώπινο κατασκεύασμα που εισήλθε σε διαστρικό χώρο, παρέχοντας τις πρώτες άμεσες μετρήσεις της πυκνότητας και της θερμοκρασίας του διαστρικού πλάσματος. Ο Βόγιατζερ 2 σήμερα βρίσκεται σε πορεία που θα τον βγάλει στο μέλλον έξω από το ηλιακό μας σύστημα. Οι πυρηνικές γεννήτριες ισχύος του σκάφους θα συνεχίσουν να λειτουργούν περίπου μέχρι το 2025, οπότε θα τερματιστεί και η λειτουργία του. Τον Σεπτέμβριο του 2020 βρισκόταν σε απόσταση 18,6 δισεκατομμυρίων χιλιομέτρων περίπου (ή 124 AU) από τον Ήλιο, από τον οποίο απομακρύνεται με ταχύτητα περίπου 3,3 AU το χρόνο. Σε περίπου 296.000 χρόνια, θα περάσει σε απόσταση 4,3 ετών φωτός από το Σείριο. Όπως και ο δίδυμός του, ο Βόγιατζερ 2 μεταφέρει έναν χρυσό δίσκο.



Εικόνα 17: Τα διαπλανητικά διαστημόπλοια Voyager 1 και 2 (αριστερά, μέσον), ο χρυσός δίσκος που μεταφέρουν τα δύο διαστημόπλοια (δεξιά)

1.3.8 Space Shuttle Program – 1981

Το πρόγραμμα Space Shuttle (Διαστημικό Λεωφορείο) ήταν το τέταρτο πρόγραμμα ανθρώπινης διαστημικής πτήσης που πραγματοποιήθηκε από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστημικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (NASA), η οποία πραγματοποίησε μεταφορές ρουτίνας σε πλήρωμα και φορτίο από τη Γη και σε τροχιά γύρω από αυτήν στο διάστημα από το 1981 έως το 2011. Η επίσημη ονομασία του, Space Transportation System (STS – Διαστημικό Σύστημα Μεταφορών), ελήφθη από ένα σχέδιο του 1969 για ένα σύστημα επαναχρησιμοποιήσιμων διαστημικών σκαφών του οποίου ήταν το μόνο στοιχείο που χρηματοδοτήθηκε για ανάπτυξη. Συνολικά πέταξε 135 αποστολές και μετέφερε 355 αστροναύτες από 16 χώρες, πολλοί εξ αυτών σε πολλαπλά ταξίδια.

Το Διαστημικό Λεωφορείο αποτελείται από ένα τροχιακό σκάφος που εκτοξεύονταν με δύο επαναχρησιμοποιήσιμους ενισχυτές στερεών πυραύλων και μια εξωτερική δεξαμενή καυσίμου μίας χρήσης και μετέφερε έως και οκτώ αστροναύτες καθώς και έως και 50.000 λίβρες (23.000 κιλά) ωφέλιμου φορτίου σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη. Όταν ολοκληρωνόταν η αποστολή του, το τροχιακό σκάφος έμπαινε ξανά στην ατμόσφαιρα της Γης και προσγειωνόταν σαν ανεμόπτερο είτε στο Διαστημικό Κέντρο Κένεντι είτε στην αεροπορική βάση του Έντουαρντς.

Το Διαστημικό Λεωφορείο είναι το μόνο φτερωτό διαστημικό σκάφος που πέτυχε τροχιά και προσγείωση και το πρώτο επαναχρησιμοποιήσιμο διαστημικό όχημα που έκανε πολλαπλές πτήσεις σε τροχιά. Οι αποστολές του περιελάμβαναν τη μεταφορά μεγάλων ωφέλιμων φορτίων σε διάφορες τροχιές, συμπεριλαμβανομένου του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (ISS), την παροχή εναλλαγής πληρώματος για τον διαστημικό σταθμό και την εκτέλεση αποστολών υπηρεσίας στο διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Ανέκτησε επίσης δορυφόρους και άλλα ωφέλιμα φορτία (π.χ. από το ISS) από το διάστημα και τα επέστρεψε στη Γη, αν και αυτή του η ικανότητα χρησιμοποιήθηκε σπάνια. Κάθε όχημα σχεδιάστηκε με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 100 εκτοξεύσεων ή 10 χρόνων λειτουργικής ζωής. Τα αρχικά χαρακτηριστικά πώλησης των λεωφορείων ήταν πάνω από 150 εκτοξεύσεις σε μια επιχειρησιακή περίοδο 15 ετών με «εκτόξευση ανά μήνα» που αναμενόταν στην κορύφωση του προγράμματος, αλλά οι εκτεταμένες καθυστερήσεις στην ανάπτυξη του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού δεν δημιούργησαν ποτέ τέτοια αιχμή ζήτησης για συχνές πτήσεις.

Συνολικά, κατασκευάστηκαν πέντε διαστημικά λεωφορεία, τα Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis και Endeavour. Εξ' αυτών τρία αποσύρθηκαν, Discovery, Atlantis, Endeavour, και δυο καταστράφηκαν σε ατυχήματα, Challenger και Columbia, το 1986 και 2003 αντίστοιχα. Το πρώτο πλήρως λειτουργικό

Διαστημικό Λεωφορείο ήταν το Columbia (ονομάστηκε OV-102), που κατασκευάστηκε στο Palmdale της Καλιφόρνια. Παραδόθηκε στο Διαστημικό Κέντρο Κένεντι (KSC) στις 25 Μαρτίου 1979 και εκτοξεύτηκε για πρώτη φορά στις 12 Απριλίου 1981, την 20ή επέτειο της διαστημικής πτήσης του Γιούρι Γκαγκάριν, με πλήρωμα δύο ατόμων. Το Challenger (OV-099) παραδόθηκε τον Ιούλιο του 1982, το Discovery (OV-103) τον Νοέμβριο του 1983, το Atlantis (OV-104) τον Απρίλιο του 1985 και το Endeavor τον Μάιο του 1991. Το Challenger κατασκευάστηκε αρχικά και χρησιμοποιήθηκε ως δοκιμαστικό (STA-099), αλλά μετατράπηκε σε πλήρες τροχιακό σκάφος όταν διαπιστώθηκε ότι ήταν λιγότερο δαπανηρό από τη μετατροπή του Enterprise σε διαστημικό όχημα. Στις 24 Απριλίου 1990, το Discovery μετέφερε το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble στο διάστημα κατά τη διάρκεια της αποστολής STS-31. Η μεγαλύτερη αποστολή Shuttle ήταν η STS-80 διάρκειας 17 ημερών, 15 ωρών και η τελευταία πτήση του προγράμματος Space Shuttle ήταν η STS-135 στις 8 Ιουλίου 2011.



Εικόνα 18: Το διαστημικό λεωφορείο Atlantis εκτοξεύεται ξεκινώντας την αποστολή STS-71 (αριστερά), στις εξωτερικές επιφάνειες του σκάφους αναπτύσσονται θερμοκρασίες έως και 1.500°C κατά τη διάρκεια της επανεισόδου στην ατμόσφαιρα της Γης (μέσον), το Endeavour στη φάση της προσγείωσης (δεξιά)

1.3.9 Hubble Space Telescope – 1990

Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (συχνά αναφέρεται ως HST ή Hubble) είναι ένα διαστημικό τηλεσκόπιο που εκτοξεύτηκε σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη το 1990 και παραμένει σε λειτουργία. Δεν ήταν το πρώτο διαστημικό τηλεσκόπιο, αλλά είναι ένα από τα μεγαλύτερα και πιο ευέλικτα, γνωστό τόσο ως ζωτικής σημασίας ερευνητικό εργαλείο όσο και ως όφελος δημοσίων σχέσεων για την αστρονομία. Το τηλεσκόπιο Hubble πήρε το όνομά του από τον αστρονόμο Edwin Hubble και είναι ένα από τα «Μεγάλα Παρατηρητήρια» (Great Observatories) της NASA. Το Επιστημονικό Ινστιτούτο του Διαστημικού Τηλεσκοπίου (STScI) επιλέγει τους στόχους του Hubble και επεξεργάζεται τα δεδομένα που προκύπτουν, ενώ το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Goddard (GSFC) ελέγχει το διαστημόπλοιο.

Το Hubble είναι ένας μεγάλος τεχνητός δορυφόρος με μάζα 11,25 τόνους, μήκους 13,2 μ. και διάμετρο 4,2 μ. και περιφέρεται σε ύψος 559 χλμ. πάνω από τη Γη με ταχύτητα 25.000 χλμ/ω. Φέρει εξωτερικά κατά μήκος δύο ζεύγη (ένα ανά πλευρά) αντιστακτούς αναπεπταμένους ηλιακούς συλλέκτες που φορτίζουν 6 μπαταρίες παρέχοντας λειτουργία για 25 λεπτά όταν κινείται στη σκιά της Γης. Επίσης φέρει μία πτυσσόμενη κεραία ραδιοκυμάτων υψηλής απολαβής (περί το μέσον της άνω κατά μήκους πλευράς) καθώς και μία επίσης ραδιοκυμάτων στη κάτω πλευρά. Στο εσωτερικό του φέρει ένα κατοπτρικό τηλεσκόπιο τύπου Ritchey-Chrétien που λειτουργεί στην εγγύς υπέρυθη ακτινοβολία, στο οπτικό φως και την υπεριώδη

ακτινοβολία. Τα όργανα τα οποία βρίσκονται στο Χαμπλ είναι η κάμερα NICMOS (κάμερα εγγύς υπερύθρου και φασματογράφος πολλών αντικειμένων), η κάμερα ACS (προηγμένη κάμερα ερευνών), η WFC3 (η ευρυπεδιακή φωτογραφική μηχανή), ο COS (φασματογράφος της κοσμικής προέλευσης), ο STIS (φασματογράφος απεικόνισης διαστημικού τηλεσκοπίου) και το FGS (συμβολόμετρο εξαιρετικής καθοδήγησης). Η τροχιά του Hubble έξω από την παραμόρφωση της ατμόσφαιρας της Γης του επιτρέπει να συλλαμβάνει εικόνες εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης με σημαντικά χαμηλότερο φως φόντου από τα επίγεια τηλεσκόπια. Έχει καταγράψει μερικές από τις πιο λεπτομερείς εικόνες ορατού φωτός, επιτρέποντας μια βαθιά θέα στο διάστημα. Πολλές παρατηρήσεις του Hubble έχουν οδηγήσει σε ανακαλύψεις στην αστροφυσική, όπως ο προσδιορισμός του ρυθμού διαστολής του σύμπαντος.

Τα διαστημικά τηλεσκόπια προτάθηκαν ήδη από το 1923, και το τηλεσκόπιο Hubble χρηματοδοτήθηκε και κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1970 από την αμερικανική διαστημική υπηρεσία NASA με συνεισφορές από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία. Η προβλεπόμενη εκτόξευση του ήταν το 1983, αλλά το έργο πλαισιώθηκε από τεχνικές καθυστερήσεις, προβλήματα προϋπολογισμού και την καταστροφή του Challenger το 1986. Το Hubble εκτοξεύτηκε τελικά το 1990 με το διαστημικό λεωφορείο Discovery, αλλά ο κύριος καθρέφτης του είχε γειωθεί λανθασμένα, με αποτέλεσμα τη σφαιρική εκτροπή που έθεσε σε κίνδυνο τις δυνατότητες του τηλεσκοπίου. Τα οπτικά διορθώθηκαν στην προβλεπόμενη ποιότητά τους από μια αποστολή σέρβις το 1993. Το Hubble είναι το μόνο τηλεσκόπιο που έχει σχεδιαστεί για να συντηρείται στο διάστημα από αστροναύτες. Πέντε αποστολές του διαστημικού λεωφορείου έχουν επισκευάσει, αναβαθμίσει και αντικαταστήσει συστήματα στο τηλεσκόπιο, συμπεριλαμβανομένων και των πέντε κύριων οργάνων. Η πέμπτη αποστολή αρχικά ακυρώθηκε για λόγους ασφάλειας μετά την καταστροφή του Columbia (2003), αλλά τελικά ο διαχειριστής της NASA Michael D. Griffin την ενέκρινε και έτσι το HST ολοκληρώθηκε το 2009. Συμπλήρωσε 30 χρόνια λειτουργίας τον Απρίλιο του 2020 και προβλέπεται να διαρκέσει έως το 2030 – 2040.

Το Hubble αποτελεί τη συνιστώσα του ορατού φωτός του προγράμματος Great Observatories της NASA, μαζί με το Παρατηρητήριο ακτίνων γάμμα Compton, το Παρατηρητήριο ακτίνων X Chandra και το διαστημικό τηλεσκόπιο Spitzer, το οποίο καλύπτει τις υπέρυθρες ζώνες. Ο διάδοχος της ζώνης “mid-IR-to-visible” (μέσης υπέρυθρης σε ορατή) του τηλεσκοπίου Hubble είναι το διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb (JWST), το οποίο εκτοξεύτηκε στις 25 Δεκεμβρίου 2021, με το διαστημικό τηλεσκόπιο Nancy Grace Roman που αναμένεται να ακολουθήσει το 2027.



Εικόνα 19: Το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble (αριστερά), η διάσημη φωτογραφία του HST “Pillars of Creation” (Πυλώνες της Δημιουργίας) από το Νεφέλωμα του Αετού στον αστερισμό Όφις (Οι Πυλώνες της Δημιουργίας δεν υπάρχουν πια. Το 2007, αστρονόμοι ανακοίνωσαν ότι

καταστράφηκαν από το εκρηκτικό κύμα ενός υπερκαινοφανή αστέρα -supernova- πριν από περίπου 6.000 χρόνια. Λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός, αυτή τη στιγμή από τη Γη μπορεί να παρατηρηθεί η προσέγγιση του εκρηκτικού κύματος στους Πυλώνες. Για να γίνει ορατή η πλήρης καταστροφή τους, θα χρειαστεί τουλάχιστον μια χιλιετία.) (μέσον), το Hubble προδεδωμένο στο Διαστημικό Λεωφορείο Discovery (δεξιά)

1.3.10 MIR Space Station – 1995

Ο MIR (σημαίνει κόσμος ή ειρήνη στα ρωσικά) ήταν σοβιετικός διαστημικός σταθμός. Τέθηκε σε τροχιά στις 19 Φεβρουαρίου του 1986 και υπήρχε στο διάστημα μέχρι τις 23 Μαρτίου του 2001. Μετά τη διάλυση της ΕΣΣΔ, τη διαχείριση και περαιτέρω ανάπτυξη του σταθμού ανέλαβε η Ρωσική Ομοσπονδία, μέσω της Ρωσικής Ομοσπονδιακής Διαστημικής Υπηρεσίας (RKA). Ήταν ο πρώτος διαστημικός σταθμός που αποτελούνταν από περισσότερα από ένα τμήματα (αγγλικά: modules) και αποτελούσε το επόμενο εξελικτικό στάδιο μετά τους σταθμούς του προγράμματος Σαλιούτ. Χρησιμοποιήθηκε σαν τροχιακή πλατφόρμα για τη διεξαγωγή πειραμάτων βιολογίας, φυσικής, αστρονομίας, μετεωρολογίας και φυσιολογίας. Επίσης, απετέλεσε πλατφόρμα μελέτης και ανάπτυξης μεθόδων και τεχνολογιών που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή επανδρωμένων διαστημικών αποστολών μακράς διάρκειας. Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του προγράμματος MIR ήταν πολύ σημαντικές για την κατασκευή του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού.

Συνολικά επισκέφθηκαν τον σταθμό πληρώματα από 12 διαφορετικές χώρες, με τη συντριπτική πλειοψηφία αυτών να προέρχεται από την ΕΣΣΔ και μετέπειτα από τη Ρωσική Ομοσπονδία. Επίσης συμμετείχαν αστροναύτες / κοσμοναύτες προερχόμενοι από τις χώρες του Συμφώνου της Βαρσοβίας και της Ευρώπης γενικότερα, τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Βασιζόταν στη σειρά των διαστημικών σταθμών Σαλιούτ που είχαν τεθεί σε τροχιά τη δεκαετία του 1970. Εκείνη την εποχή, οι ΗΠΑ είχαν στα σχέδιά τους την κατασκευή του διαστημικού σταθμού Freedom, αλλά το σχέδιο ακυρώθηκε καθώς μετά από την πτώση της Σοβιετικής Ένωσης υπήρχε η προοπτική συνεργασίας στο πρόγραμμα MIR. Κάτι το οποίο έγινε μετά το τέλος του Ψυχρού πολέμου, όταν οι δύο χώρες συνεργάστηκαν και επιτράπηκε στις ΗΠΑ η αποστολή αστροναυτών στο διαστημικό σταθμό. Η στενή συνεργασία επήλθε όταν το διαστημικό αεροσκάφος Atlantis ενώθηκε με τον MIR το 1995.

Ο MIR πετούσε σε τροχιά 400 χλμ. πάνω από τη Γη και μέχρι το τέλος της ζωής του είχε πραγματοποιήσει 89.067 περιστροφές γύρω από τη Γη. Είχε δεχτεί 28 διαστημόπλοια Σογιούζ με αποστολές επάνδρωσης και συνολικά 104 αστροναύτες από τη Ρωσία, τις ΗΠΑ και άλλες χώρες. Ο MIR έμεινε 15 χρόνια σε τροχιά, έχοντας υποστεί περισσότερες από 1.000 βλάβες, μία πυρκαγιά και μία παραλίγο καταστροφική σύγκρουση με σκάφος ανεφοδιασμού. Η πτώση της Σοβιετικής Ένωσης είχε επηρεάσει και τον MIR, καθώς υπήρχε η σκέψη της καταστροφής του λόγω οικονομικών προβλημάτων, ενώ ο κοσμοναύτης Σεργκέι Κρικάλεφ έμεινε ολομόναχος για έναν ολόκληρο χρόνο στον διαστημικό σταθμό αφού η χώρα του πλέον δεν μπορούσε να χρηματοδοτήσει την επιστροφή του στη Γη. Επίσης, ο αστροναύτης Βαλερί Πολιακόφ είναι ο άνθρωπος που έχει μείνει τις πιο πολλές συνεχόμενες μέρες στο διάστημα. Τη διετία 1994-1995 έμεινε στον MIR για 437 μέρες.

Στον MIR προστέθηκαν επτά υπομονάδες, οι οποίες στάλθηκαν ξεχωριστά (οι πιο πολλές με το Proton) μέχρι το 1997 οι οποίες ήταν οι εξής:

- *MIR Core Module*: Ο πυρήνας ήταν εκεί που ζούσαν οι αστροναύτες, αλλά και ο σταθμός ελέγχου. Στάλθηκε στις 19 Φεβρουαρίου 1986 με το Proton. Πάνω σε αυτό, συνδέθηκαν τα άλλα έξι υποσυστήματα.
- *Kvant-1*: Το Κβαντ-1 είχε κατασκευαστεί για να συνδεθεί με το Σαλιούτ 7 κάτι το οποίο και δεν έγινε. Περιλάμβανε το πρώτο σετ έξι γυροσκοπίων για έλεγχο του προσανατολισμού του σταθμού και όργανα αστροπαρατήρησης με ακτίνες X και υπεριώδεις ακτίνες, καθώς είχε στόχο τη μελέτη των φυσικών αρχών που διέπουν κβάντα, αστέρες νετρονίων και ενεργούς γαλαξίες. Στάλθηκε στις 31 Μαρτίου 1987 και θα ενωνόταν στις 5 Απριλίου με τον MIR, αν και υπήρξε αρχικά μια αναβολή, καθώς δημιουργήθηκε πρόβλημα στην ένωση. Το πρόβλημα τελικά ήταν μία σακούλα σκουπιδιών, η οποία αφαιρέθηκε μετά από διαστημικό περίπατο του πληρώματος του σταθμού και τελικά το Κβαντ-1 ενώθηκε στις 12 Απριλίου.
- *Kvant-2*: Το Κβαντ-2 στάλθηκε στις 26 Νοεμβρίου 1989 και ενώθηκε στις 6 Δεκεμβρίου. Περιλάμβανε το δεύτερο σετ γυροσκοπίων, νέο σύστημα ανακύκλωσης νερού, συστήματα παραγωγής οξυγόνου καθώς και εργαστήριο βιοτεχνολογίας.
- *Kristall*: Το Κρίσταλ ήταν ένα εργαστήριο τεχνολογικό, επεξεργασίας υλικών, γεωφυσικό και αστροφυσικό. Στάλθηκε στις 31 Μαΐου 1990 και ενώθηκε στις 10 Ιουνίου. Επίσης ήταν ειδικά κατασκευασμένο για να συνδεθεί και με το σοβιετικό διαστημικό λεωφορείο Μπουράν. Τέτοια διασύνδεση δεν έγινε ποτέ, ο σύνδεσμος όμως χρησιμοποιήθηκε για πρόσδεση με το αμερικανικό διαστημικό λεωφορείο Atlantis.
- *Spektr*: Το Σπεκτρ ήταν εργαστήριο για τους αστροναύτες και ειδικότερα για την παρατήρηση γήινων φαινομένων. Στάλθηκε στις 20 Μαΐου 1995 και ενώθηκε στις 1 Ιουνίου.
- *Docking Module*: Η Υπομονάδα Διασύνδεσης στάλθηκε με σκοπό την καλύτερη σύνδεση διαστημικών λεωφορείων με το MIR, μιας και υπήρξε πρόβλημα με την ένωση του Atlantis. Στάλθηκε με το Ατλαντίς (το μόνο που δεν στάλθηκε με το Proton) στις 12 Νοεμβρίου 1995 και ενώθηκε στις 15 Νοεμβρίου.
- *Priroda*: Το Πριρόντα ήταν ένα ραντάρ μέτρησης θερμοκρασιών, νέφους και όζοντος. Στάλθηκε στις 23 Απριλίου 1996 και ενώθηκε στις 26 Απριλίου.

Η καταστροφή του MIR έγινε στις 23 Μαρτίου 2001, όταν μπήκε στην ατμόσφαιρα. Τα κομμάτια του έπεσαν κοντά στα νησιά Φίτζι στον Ειρηνικό ωκεανό. Ο 120 τόνων διαστημικός σταθμός καταστράφηκε μετά από 15 χρόνια, παρόλο που είχε κατασκευαστεί για να μείνει 5 με 6 χρόνια.



Εικόνα 20: Το Διαστημικό Λεωφορείο Atlantis συνδεδεμένο με τον Διαστημικό Σταθμό MIR σε τροχιά γύρω από τη Γη (αριστερά), ο κοσμοναύτης Yuri Onufrienko στον MIR (μέσον), ο κοσμοναύτης Valeri Polyakov στον MIR (δεξιά)

1.3.11 International Space Station – 1998

Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS) είναι ο μεγαλύτερος δομοστοιχειωτός διαστημικός σταθμός σε χαμηλή τροχιά της Γης. Στο εγχείρημα συμμετέχουν πέντε διαστημικές υπηρεσίες: η NASA των Ηνωμένων Πολιτειών, η Roscosmos της Ρωσίας, η JAXA της Ιαπωνίας, η ESA της Ευρώπης και η CSA του Καναδά. Η ιδιοκτησία και η χρήση του διαστημικού σταθμού καθορίζονται με διακυβερνητικές συνθήκες και συμφωνίες. Ο σταθμός χρησιμεύει ως ερευνητικό εργαστήριο μικροβαρύτητας και διαστημικού περιβάλλοντος στο οποίο διεξάγεται επιστημονική έρευνα στην αστροβιολογία, την αστρονομία, τη μετεωρολογία, τη φυσική και άλλους τομείς. Ο ISS είναι κατάλληλος για τη δοκιμή των συστημάτων και του εξοπλισμού διαστημικών σκαφών που απαιτούνται για πιθανές μελλοντικές μακροχρόνιες αποστολές στη Σελήνη και τον Άρη.

Το πρόγραμμα ISS εξελίχθηκε από τον Διαστημικό Σταθμό Freedom, μια αμερικανική πρόταση του 1984 για την κατασκευή ενός μόνιμα πληρωμένου σταθμού σε τροχιά γύρω από τη Γη και τη σύγχρονη σοβιετική-ρωσική πρόταση Mir-2 από το 1976 με παρόμοιους στόχους. Ο ISS είναι ο ένατος διαστημικός σταθμός που κατοικείται από πληρώματα, μετά τους σοβιετικούς και αργότερα ρωσικούς σταθμούς Salyut, Almaz και Mir και το αμερικανικό Skylab. Είναι το μεγαλύτερο τεχνητό αντικείμενο στο ηλιακό σύστημα και ο μεγαλύτερος δορυφόρος σε χαμηλή τροχιά της Γης, συχνά ορατός ακόμη και με γυμνό μάτι από την επιφάνεια της Γης. Διατηρεί τροχιά με μέσο υψόμετρο 400 χιλιομέτρων (250 μίλια) μέσω ελιγμών επανεκκίνησης χρησιμοποιώντας τους κινητήρες της μονάδας σέρβις Zvezda ή επισκεπτόμενο διαστημόπλοιο. Ο ISS κάνει κύκλους γύρω από τη Γη σε περίπου 93 λεπτά, ολοκληρώνοντας έτσι 15,5 τροχιές την ημέρα.

Ο σταθμός χωρίζεται σε δύο τμήματα: το Russian Orbital Segment (ROS) λειτουργεί από τη Ρωσία, ενώ το United States Orbital Segment (USOS) διευθύνεται από τις Ηνωμένες Πολιτείες καθώς και από άλλες χώρες. Το ρωσικό τμήμα περιλαμβάνει έξι θαλαμίσκους. Το τμήμα των ΗΠΑ περιλαμβάνει δέκα θαλαμίσκους, των οποίων οι υπηρεσίες υποστήριξης διανέμονται κατά 76,6% για τη NASA, 12,8% για την JAXA, 8,3% για την ESA και 2,3% για την CSA. Το μήκος κατά μήκος του κύριου άξονα των τμημάτων υπό πίεση είναι 218 ft (66 m) και ο συνολικός όγκος αυτών των τμημάτων είναι 13.696 cu ft (387,8 m³).

Η Roscosmos είχε προηγουμένως εγκρίνει τη συνέχιση της λειτουργίας του ROS έως το 2024, έχοντας προτείνει τη χρήση στοιχείων του τμήματος για την κατασκευή ενός νέου ρωσικού διαστημικού σταθμού που θα ονομάζεται OPSEK. Ωστόσο, η

συνεχιζόμενη συνεργασία έχει καταστεί αβέβαιη εξαιτίας της ρωσικής εισβολής του 2022 στην Ουκρανία και τις επακόλουθες διεθνείς κυρώσεις στη Ρωσία, η οποία θεωρητικά μπορεί να μειώσει, να ανακατευθύνει ή να παύσει τη χρηματοδότηση από την πλευρά του διαστημικού σταθμού λόγω των κυρώσεων που τους επιβλήθηκαν.

Το πρώτο εξάρτημα ISS εκτοξεύτηκε το 1998 και οι πρώτοι κάτοικοι μακράς διάρκειας έφτασαν στις 2 Νοεμβρίου 2000 μετά την εκτόξευση από το κοσμοδρόμιο του Μπαϊκονούρ στις 31 Οκτωβρίου 2000. Έκτοτε, ο σταθμός απασχολείται συνεχώς για 22 χρόνια και 113 ημέρες, τη μεγαλύτερη συνεχή ανθρώπινη παρουσία σε χαμηλή τροχιά της Γης, έχοντας ξεπεράσει το προηγούμενο ρεκόρ των 9 ετών και 357 ημερών που κατείχε ο διαστημικός σταθμός Mir. Η τελευταία μεγάλη μονάδα υπό πίεση, το Nauka, τοποθετήθηκε το 2021, λίγο περισσότερο από δέκα χρόνια μετά την προηγούμενη σημαντική προσθήκη, το Leonardo το 2011. Η ανάπτυξη και η συναρμολόγηση του σταθμού συνεχίζεται, με έναν πειραματικό φουσκωτό διαστημικό βιότοπο που προστέθηκε το 2016 και πολλά σημαντικά νέα ρωσικά στοιχεία που προγραμματίστηκαν να ξεκινήσουν το 2021. Τον Ιανουάριο του 2022, η εξουσιοδότηση λειτουργίας του σταθμού επεκτάθηκε έως το 2030, με τη χρηματοδότηση να εξασφαλίζεται εντός των Ηνωμένων Πολιτειών μέχρι εκείνο το έτος. Υπήρξαν εκκλήσεις για ιδιωτικοποίηση των λειτουργιών του ISS μετά από εκείνο το σημείο για την επιδίωξη μελλοντικών αποστολών σε Σελήνη και Άρη, με τον πρώην διαχειριστή της NASA Jim Bridenstine να δηλώνει: «δεδομένων των περιορισμών του τρέχοντος προϋπολογισμού μας, αν θέλουμε να πάμε στο φεγγάρι και θέλουμε να πάμε στον Άρη, πρέπει να εμπορευματοποιήσουμε τη χαμηλή τροχιά της Γης και να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα».

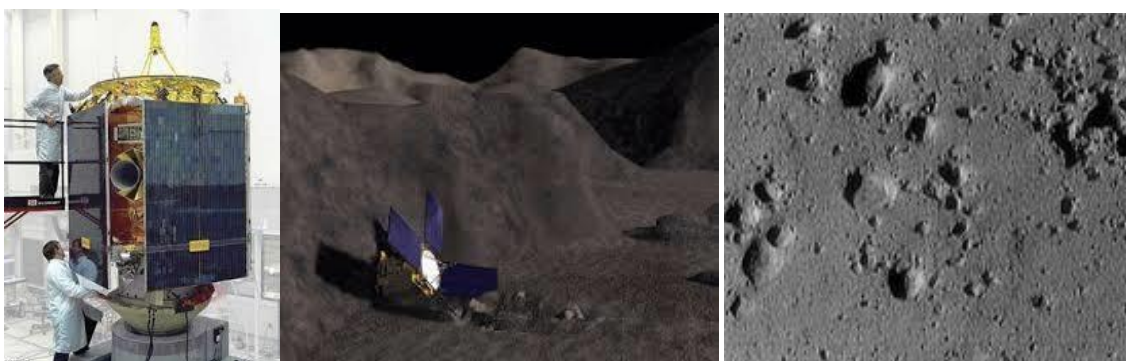
Το ISS αποτελείται από μονάδες κατοίκησης υπό πίεση, δομικά δοκάρια, φωτοβολταϊκές ηλιακές συστοιχίες, θερμικά θερμαντικά σώματα, θύρες σύνδεσης, θέσεις πειραμάτων και ρομποτικούς βραχίονες. Σημαντικές μονάδες ISS έχουν εκτοξευθεί από ρωσικούς πυραύλους Proton και Soyuz και διαστημικά λεωφορεία των ΗΠΑ. Ο σταθμός εξυπηρετείται από μια ποικιλία επισκεπτών διαστημικών σκαφών: το Russian Soyuz and Progress, το SpaceX Dragon 2, το Northrop Grumman Space Systems Cygnus και παλαιότερα το European Automated Transfer Vehicle (ATV), το ιαπωνικό H-II Transfer Vehicle, καθώς και το SpaceX Dragon 1. Το διαστημόπλοιο Dragon επιτρέπει την επιστροφή φορτίου υπό πίεση στη Γη, το οποίο χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, για τον επαναπαρισμό επιστημονικών πειραμάτων για περαιτέρω ανάλυση. Από τον Απρίλιο του 2022, 251 αστροναύτες, κοσμοναύτες και διαστημικοί τουρίστες από 20 διαφορετικά έθνη έχουν επισκεφθεί τον διαστημικό σταθμό, πολλοί από αυτούς πολλαπλές φορές.



Εικόνα 21: Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός φωτογραφημένος από τη διαστημική κάψουλα Crew-2 Dragon της SpaceX μετά την αποσύνδεση της από αυτόν στις 8 Νοεμβρίου 2021 (αριστερά), ο αστροναύτης Robert Thirsk αποθηκεύοντας δείγματα (μέσον), διάφορα εργαστήρια του ISS και το Διαστημικό Λεωφορείο Endeavour προσδεμένο επ' αυτού (δεξιά)

1.3.12 NEAR Shoemaker – 2000

Η πρώτη αποστολή ειδικά για τη μελέτη αστεροειδών ήταν η αμερικανική NEAR-Shoemaker, που σχεδιάστηκε από το πανεπιστήμιο John Hopkins (JHU) και εκτοξεύτηκε το 1996 με επιστημονικό υπεύθυνο (principal investigator) τον Έλληνα αστροφυσικό καθ. Σ. Κριμιζή. Το 1997 φωτογράφησε τον αστεροειδή Mathilde (Μαθίλδη) και το 2000 μπήκε σε τροχιά γύρω από τον αστεροειδή Eros (Έρωτα), στην επιφάνεια του οποίου έπεσε το 2001. Το διαστημόπλοιο NEAR Shoemaker εξερεύνησε τον αστεροειδή Eros. Αυτή η συσκευή μπήκε σε τροχιά γύρω από αυτόν, τράβηξε φωτογραφίες της επιφάνειάς του και τις 21 Φεβρουαρίου 2001, στο τέλος της αποστολής του, προσεδαφίστηκε στην επιφάνεια του αστεροειδή χρησιμοποιώντας τους κινητήρες για τις μανούβρες. Το NEAR-Shoemaker προσεδαφίστηκε με επιτυχία και μια ώρα αργότερα το σήμα του εγκλωβίστηκε από τις κεραιές του Δικτύου Βαθέως Διαστήματος (Deep Space Network) της NASA. Στη συνέχεια συνέχισε σε διάφορες εδαφολογικές παρατηρήσεις, στέλνοντας τα δεδομένα στη Γη. Η αποστολή NEAR ήταν η πρώτη του προγράμματος Discovery της NASA που είχε στόχο την σχεδίαση και κατασκευή διαστημικών οχημάτων εξερεύνησης χρησιμοποιώντας καινοτόμες τεχνολογίες, σε λιγότερο από 3 χρόνια, με προϋπολογισμό λιγότερο των 150 εκατ. δολαρίων ΗΠΑ και ήταν η πρώτη και μοναδική αποστολή όπου ο κατασκευαστής παρέδωσε το διαστημικό όχημα με πλεόνασμα χρημάτων (38 εκατ. δολ. ΗΠΑ) τα οποία και επεστράφησαν στην NASA.

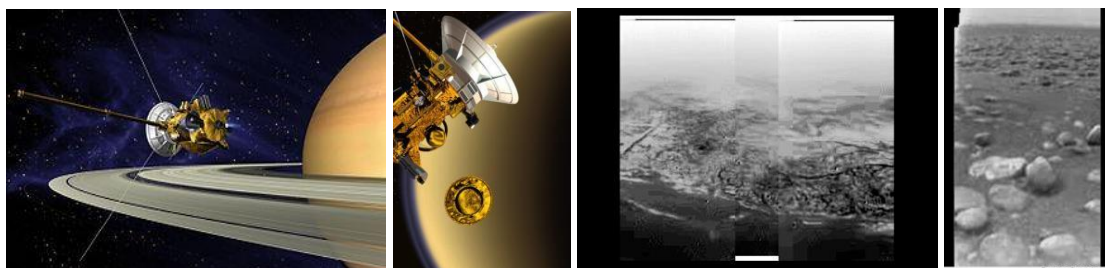


Εικόνα 22: Το διαστημόπλοιο NEAR Shoemaker (αριστερά), το σχέδιο προσεδάφισης στον αστεροειδή Eros (μέσον), εικόνα από το διαστημόπλοιο κατά τη διάρκεια της προσεδάφισης (δεξιά)

1.3.13 Cassini-Huygens – 2004

Το Κασσίνι-Χόιγκενς (Cassini-Huygens) ήταν μια κοινή αποστολή ρομποτικού διαστημικού οχήματος από τη NASA, την ESA και την ιταλική ASI για την μελέτη του Κρόνου και των φυσικών δορυφόρων του. Το διαστημόπλοιο αποτελούνταν από δύο βασικά στοιχεία: το σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από την NASA *Cassini Orbiter*, που ονομάστηκε έτσι για να τιμηθεί ο Ιταλο-Γαλλικής εθνικότητας αστρονόμος Τζιοβάνι Ντομένικο Κασίνι (Giovanni Domenico Cassini), καθώς και το συνοδευτικό σκάφος που ήταν σχεδιασμένο από την ESA με το όνομα *Huygens* που όφειλε το όνομά του στον Ολλανδό αστρονόμο, μαθηματικό και φυσικό Κρίστιαν Χόιγκενς (Christiaan Huygens). Το Κασσίνι ήταν το πρώτο διαστημόπλοιο που τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη Κρόνο και το τέταρτο που επισκέφθηκε τον Κρόνο. Το Κασσίνι ξεκίνησε στις 15 Οκτωβρίου 1997 και, μετά από ένα μακρύ διαπλανητικό ταξίδι, τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον Κρόνο την 1η Ιουλίου 2004. Στις 25

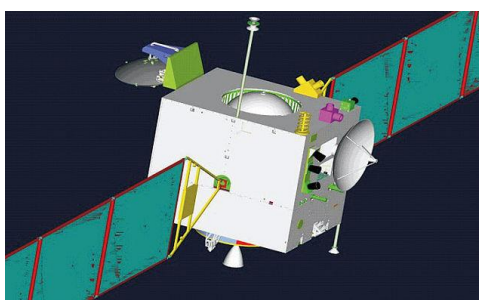
Δεκεμβρίου 2004, το Χόιγκενς αποχωρίστηκε από το κυρίως σώμα του Κασσίνι και στη συνέχεια, έφθασε στο δορυφόρο του Κρόνου, Τιτάνα στις 14 Ιανουαρίου 2005, όπου εισχώρησε στην ατμόσφαιρα του Τιτάνα, και προσεδαφίστηκε στέλνοντας πληροφορίες πίσω στη Γη .



Εικόνα 23: Η αποστολή Cassini-Huygens (αριστερά), εικόνες από το Huygens από την ατμόσφαιρα του Τιτάνα

1.3.14 Chang'e 1 – 2007

Το Chang'e 1, ένα τηλεκατευθυνόμενο διαστημόπλοιο που μπήκε σε τροχιά γύρω από την Σελήνη, είναι μέρος της πρώτης φάσης του κινεζικού προγράμματος εξερεύνησης της σελήνης. Το διαστημικό σκάφος πήρε το όνομά του από την ομώνυμη κινεζική θεά του φεγγαριού. Σύμφωνα με το πρόγραμμα, το λεπτομερές σχέδιο του πρώτου κατά μέρους στόχου ολοκληρώθηκε τον Σεπτέμβριο του 2004. Η μελέτη έρευνας και κατασκευής ενός δοκιμαστικού πρωτότυπου καθώς και τα σχετικά δοκιμαστικά είχαν ολοκληρωθεί πριν από το τέλος του 2005. Ακολούθησαν ο επιμελής σχεδιασμός, η κατασκευή και συναρμολόγηση του διαστημοπλοίου, καθώς και διάφορα πειράματα στο έδαφος της γης που ολοκληρώθηκαν πριν από τον Δεκέμβριο του 2006. Το Chang'e 1 εκτοξεύτηκε στις 24 Οκτωβρίου 2007, από το διαστημικό κέντρο Xichang. Πέρασε από τη σεληνιακή τροχιά μεταφοράς στις 31 Οκτωβρίου και μπήκε στην τροχιά γύρω από τη σελήνη στις 5 Νοεμβρίου. Οι πρώτες εικόνες της σελήνης αναμεταδόθηκαν στις 26 Νοεμβρίου 2007.



Εικόνα 24: Το Κινέζικο Διαστημόπλοιο Chang'e 1

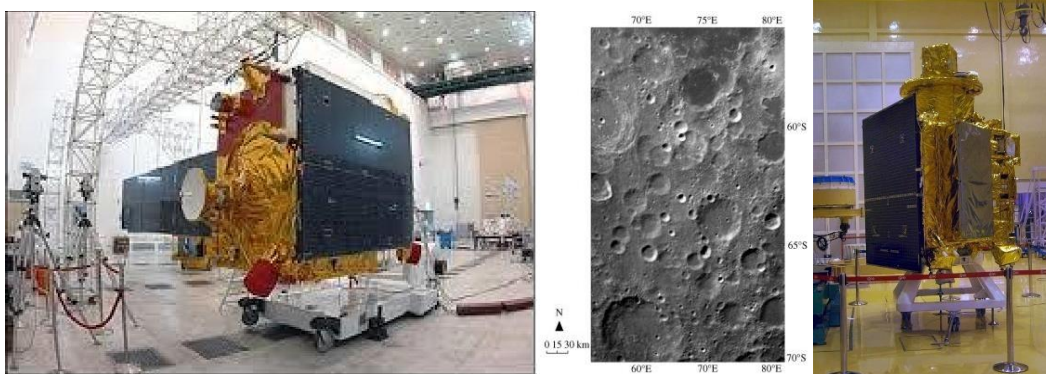
1.3.15 Chandrayaan 1 – 2008

Το Chandrayaan-1 ήταν ο πρώτος ινδικός σεληνιακός ανιχνευτής στο πλαίσιο του προγράμματος Chandrayaan. Εκτοξεύτηκε από τον Ινδικό Οργανισμό Διαστημικής Έρευνας (ISRO) τον Οκτώβριο του 2008, και λειτούργησε μέχρι τον Αύγουστο του 2009. Η αποστολή περιελάμβανε ένα σεληνιακό τροχιακό και ένα επίγειο. Η Ινδία εκτόξευσε το διαστημόπλοιο χρησιμοποιώντας έναν πύραυλο PSLV-XL στις 22 Οκτωβρίου 2008 από το Διαστημικό Κέντρο Satish Dhawan, στη Sriharikota, Andhra Pradesh. Η αποστολή ήταν μια σημαντική ώθηση στο διαστημικό πρόγραμμα της

Ινδίας, καθώς η Ινδία ερευνήσε και ανέπτυξε γηγενή τεχνολογία για να εξερευνήσει τη Σελήνη. Το όχημα εισήχθη σε σεληνιακή τροχιά στις 8 Νοεμβρίου 2008. Στις 14 Νοεμβρίου 2008, το Moon Impact Probe διαχωρίστηκε από το τροχιακό Chandrayaan στις και προσεδάφιστηκε στον νότιο πόλο, κάνοντας την Ινδία την τέταρτη χώρα που τοποθέτησε τα διακριτικά της σημαίας της στη Σελήνη. Το επίγειο όχημα προσγειώθηκε κοντά στον κρατήρα Shackleton και η τοποθεσία ονομάστηκε Jawahar Point. Το εκτιμώμενο κόστος για το έργο ήταν 386 ₹ crore (48 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ).

Σκοπός ήταν να ερευνηθεί η επιφάνεια της Σελήνης για μια περίοδο δύο ετών, να παραχθεί ένας πλήρης χάρτης της χημικής σύνθεσης στην επιφάνεια και τρισδιάστατη τοπογραφία. Οι πολικές περιοχές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς ενδέχεται να περιέχουν πάγο νερού. Μεταξύ των πολλών επιτευγμάτων του ήταν η ανακάλυψη της ευρείας παρουσίας μορίων νερού στο σεληνιακό έδαφος. Μετά από σχεδόν ένα χρόνο, ο τροχιακός άρχισε να υποφέρει από πολλά τεχνικά ζητήματα, συμπεριλαμβανομένης της αστοχίας του ιχνηλάτη αστεριών και της κακής θερμικής θωράκισης. Το Chandrayaan-1 σταμάτησε να επικοινωνεί στις 28 Αυγούστου 2009, και λίγο αργότερα η ISRO δήλωσε επίσημα ότι η αποστολή τελείωσε. Το Chandrayaan-1 λειτούργησε για 312 ημέρες σε αντίθεση με τα προβλεπόμενα δύο χρόνια, ωστόσο η αποστολή πέτυχε τους περισσότερους επιστημονικούς στόχους της, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης της παρουσίας σεληνιακού νερού.

Στις 2 Ιουλίου 2016, η NASA χρησιμοποίησε επίγεια συστήματα ραντάρ για τον επανεντοπισμό του Chandrayaan-1 στη σεληνιακή του τροχιά, περισσότερα από επτά χρόνια μετά το τέλος της αποστολής. Οι επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις τους επόμενους τρεις μήνες επέτρεψαν έναν ακριβή προσδιορισμό της τροχιάς του που κυμαίνεται μεταξύ 150 και 270 km σε υψόμετρο κάθε δύο χρόνια.



Εικόνα 25: Το Διαστημόπλοιο Chandrayaan 1 (αριστερά και δεξιά), φωτογραφία της Σελήνης από το Chandrayaan (μέσον)

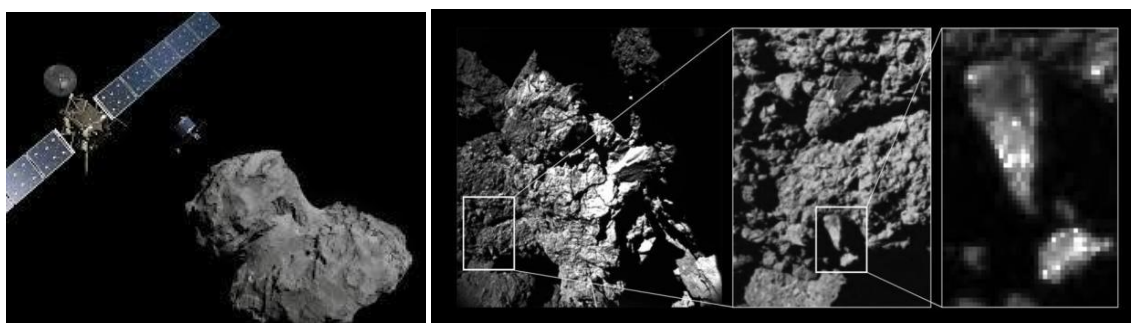
1.3.16 Rosetta – 2014

Το Rosetta ήταν ένα διαστημικό σκάφος που κατασκευάστηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος και εκτοξεύτηκε στις 2 Μαρτίου 2004. Μαζί με το Philae, τη μονάδα προσεδάφισής του, η Rosetta πραγματοποίησε μια λεπτομερή μελέτη του κομήτη 67P/Churyumov–Gerasimenko (67P). Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του προς τον κομήτη, το διαστημόπλοιο πραγματοποίησε πτήσεις γύρω από τη Γη, τον Άρη και τους αστεροειδείς 21 Lutetia και 2867 Šteins. Ξεκίνησε ως η Τρίτη βασική

αποστολή του προγράμματος Horizon 2000 της ESA, μετά το SOHO / Cluster και το XMM-Newton.

Στις 6 Αυγούστου 2014, το διαστημόπλοιο έφτασε στον κομήτη και πραγματοποίησε μια σειρά ελιγμών για να μπει τελικά σε τροχιά γύρω από αυτόν σε αποστάσεις 30 έως 10 χιλιομέτρων. Στις 12 Νοεμβρίου, η μονάδα προσεδάφισής της Philae πραγματοποίησε την πρώτη επιτυχή ιστορικά προσγείωση σε έναν κομήτη, αν και η ισχύς της μπαταρίας της εξαντλήθηκε δύο ημέρες αργότερα. Οι επικοινωνίες με τη Philae αποκαταστάθηκαν για λίγο τον Ιούνιο και τον Ιούλιο του 2015, αλλά λόγω της μείωσης της ηλιακής ενέργειας, η μονάδα επικοινωνίας της Rosetta με το προσεδάφιο απενεργοποιήθηκε στις 27 Ιουλίου 2016. Στις 30 Σεπτεμβρίου 2016, το διαστημόπλοιο Rosetta τελείωσε την αποστολή του κάνοντας ανώμαλη προσγείωση στον κομήτη στην περιοχή του Ma'at.

Ο ανιχνευτής πήρε το όνομά του από την πέτρα της Ροζέτα, μια στήλη αιγυπτιακής προέλευσης με τρεις εκδοχές ενός διατάγματος που εκδόθηκε στην αρχαία Μέμφις. Το επίγειο πήρε το όνομά του από τον οβελίσκο Philae, ο οποίος φέρει μια δίγλωσση ελληνική και αιγυπτιακή ιερογλυφική επιγραφή.



Εικόνα 26: Η αποστολή Rosetta με το διαστημικό όχημα Philae το οποίο προσεδάφιστηκε στον κομήτη Churyumov-Gerasimenko (αριστερά), φωτογραφία του κομήτη από το Rosetta

1.3.17 Falcon 9 – 2015

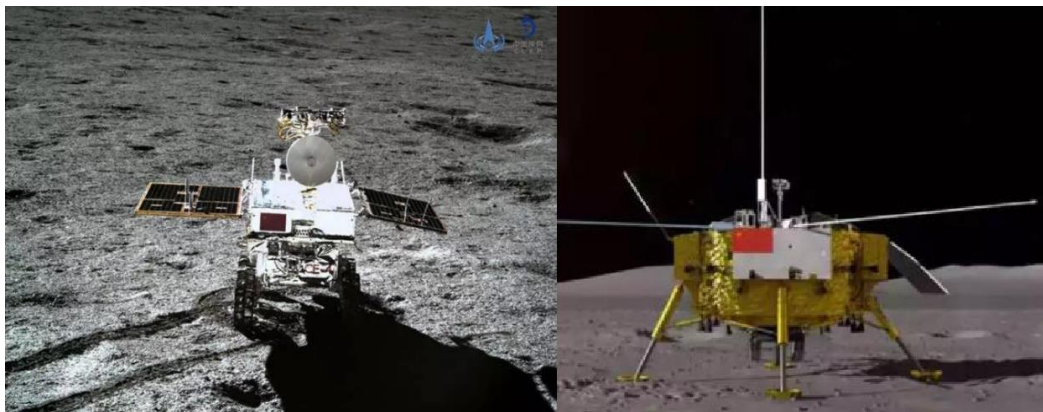
Η SpaceX έχει στο ενεργητικό της αρκετά σημαντικά επιτεύγματα: ήταν η πρώτη εταιρεία που βασιζόμενη σε ιδιωτική χρηματοδότηση έθεσε σε τροχιά πύραυλο υγρών καυσίμων, τον πύραυλο Falcon 1 το 2008, η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που κατάφερε επιτυχημένα να εκτοξεύσει, να θέσει σε τροχιά και να ανακτήσει ένα διαστημικό σκάφος, το Dragon το 2010 και η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που έστειλε διαστημικό σκάφος στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, το Dragon το 2012. Επίσης, πέτυχε την πρώτη κάθετη προσγείωση πυραύλου που είχε χρησιμοποιηθεί για την αποστολή φορτίου σε τροχιά και την πρώτη επαναχρησιμοποίηση πυραύλου που είχε αποστείλει φορτίο σε τροχιά με τον Falcon 9 το 2015 και το 2017 αντίστοιχα, ενώ έγινε και η πρώτη ιδιωτική εταιρεία που εκτόξευσε φορτίο σε τροχιά γύρω από τον Ήλιο με τον πύραυλο Falcon Heavy το 2018. Η SpaceX έχει πραγματοποιήσει 14 αποστολές ανεφοδιασμού προς τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, στα πλαίσια σχετικής συμφωνίας συνεργασίας που έχει συνάψει με τη NASA.



Εικόνα 27: Προσγείωση των προωθητών (booster) του Falcon 9 Heavy το 2018 (αριστερά), προσγείωση του προωθητή Falcon 9 στην τηλεκατευθυνόμενη πλατφόρμα “Of course I still love you” το 2016 (δεξιά)

1.3.18 Chang'e 4 – 2018

Η αποστολή Chang'e-4 της Κίνας περιλάμβανε μια πλατφόρμα προσγείωσης και ένα ρομπότ/rover με το όνομα Yutu-2 στην άκρη της Σελήνης, η πρώτη αποστολή εκεί από οποιαδήποτε χώρα. Ο Chang'e-4 προσγειώθηκε στον κρατήρα Von Kármán, στη λεκάνη του Νότιου Πόλου Aitken της Σελήνης, το Δεκέμβριο του 2018. Μια αρχαία σεληνιακή επίδραση εκεί ενδέχεται να έχει εκθέσει τον μανδύα της Σελήνης. Μελετώντας απευθείας αυτήν την περιοχή, οι επιστήμονες θα μάθουν περισσότερα για το πρώιμο ηλιακό σύστημα και τη Γη. Η αποστολή δείχνει επίσης τη σκοπιμότητα μελλοντικών ανθρώπινων και ρομποτικών απομακρυσμένων αποστολών. Τα Chang'e-4 και Yutu-2 συνεχίζουν να διεξάγουν επιστημονικές επιχειρήσεις. Και τα δύο οχήματα απενεργοποιούνται κατά τη σεληνιακή βραδιά των 2 εβδομάδων, όταν οι θερμοκρασίες πέφτουν στους -173 βαθμούς Κελσίου, για να αποφευχθεί η καταστροφή των οργάνων τους. Πρέπει επίσης να απενεργοποιούνται όταν ο Ήλιος είναι άμεσα πάνω από αυτά για να αποφύγουν την υπερθέρμανση.



Εικόνα 28: Το rover Yutu-2 όπως φαίνεται από το Chang'e-4 (αριστερά), εικόνα του διαστημόπλοιου Chang'e-4 (δεξιά)

1.3.19 Starlink – 2018

Το Starlink είναι σύστημα δορυφόρων που κατασκευάζεται από την SpaceX για την παροχή δορυφορικού διαδικτύου. Το σύστημα θα αποτελείται από χιλιάδες μικρούς δορυφόρους σε χαμηλή γήινη τροχιά (LEO), σε συνδυασμό με πομποδέκτες εδάφους. Η SpaceX σχεδιάζει επίσης να πουλήσει μερικούς από τους δορυφόρους για

στρατιωτικούς και επιστημονικούς ή διερευνητικούς σκοπούς. Οι εγκαταστάσεις ανάπτυξης δορυφόρων της SpaceX βρίσκονται στο Ρέιμοντ της Ουάσινγκτον. Το συνολικό κόστος του δεκαετούς έργου για το σχεδιασμό, την κατασκευή και την ανάπτυξη του Starlink από την SpaceX τον Μάιο του 2018 εκτιμήθηκε περίπου στα 10 δις δολάρια.

Η ανάπτυξη του προγράμματος ξεκίνησε το 2015, με τους δύο πρώτους δοκιμαστικούς δορυφόρους να μπαίνουν σε τροχιά τον Φεβρουάριο του 2018. Ένα δεύτερο ζευγάρι δοκιμαστικών δορυφόρων και η πρώτη μαζική εκτόξευση δορυφόρων πραγματοποιήθηκε τον Μάιο του 2019 όταν οι πρώτοι 60 λειτουργικοί δορυφόροι μπήκαν σε τροχιά. Από το 2020, η SpaceX εκτοξεύει 60 δορυφόρους ανά φορά, με στόχο την ανάπτυξη των 1.584 δορυφόρων για την παροχή διαδικτύου παγκοσμίως έως τα τέλη του 2022. Η SpaceX παρέχει ήδη υπηρεσίες σε χρήστες που κατοικούν στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά, Αυστραλία, Αφρική, Γροιλανδία καθώς και σε όλη της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης και της χώρας μας.

Έχουν προβληθεί ανησυχίες σχετικά με τον μακροπρόθεσμο κίνδυνο διαστημικών σκουπιδιών που θα προκύψει από την τοποθέτηση χιλιάδων δορυφόρων σε τροχιές άνω των 600 χιλιομέτρων και το πιθανό αντίκτυπο στην αστρονομία. Οι δορυφορικές τροχιές του Starlink μειώθηκαν στα 550 χιλιόμετρα και κάτω. Η SpaceX φέρεται να προσπαθεί να λύσει το τελευταίο ζήτημα, με το Starlink 2, ένας από τους δορυφόρους έχει μια πειραματική επίστρωση για να τον κάνει λιγότερο ανακλαστικό και, συνεπώς, να επηρεάζει λιγότερο τις αστρονομικές παρατηρήσεις που βασίζονται στο έδαφος. Ακόμα η εκτόξευση του Ιουνίου του 2020 περιελάμβανε έναν δορυφόρο με ένα πειραματικό σκίαστρο.



Εικόνα 29: 60 Δορυφόροι Starlink στοιβαγμένοι κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης στις 24 Μαΐου 2019

1.3.20 Chandrayaan 2 – 2019

Το Chandrayaan-2/Τσαντραγιάν-2 είναι η δεύτερη ινδική αποστολή εξερεύνησης της Σελήνης, μετά το Τσαντραγιάν-1. Αναπτύχθηκε από τον Ινδικό Οργανισμό Εξερεύνησης του Διαστήματος και εκτοξεύτηκε στις 22 Ιουλίου 2019, από το διαστημικό κέντρο Σατίς Νταβάν με προορισμό τη Σελήνη. Η σχεδιασμένη τροχιά έχει απόγειο 170 χλμ. και απόγειο 45.475 χλμ. Το σύστημα περιλαμβάνει τροχιακό μηχανισμό, ένα όχημα προσεδάφισης και ένα ρόβερ με το όνομα Πραγκιάν, ενώ τα υποσυστήματα του Τσαντραγιάν κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου στην Ινδία. Ο κύριος στόχος του Τσαντραγιάν ήταν να μελετήσει την ύπαρξη νερού στην σελήνη. Δυστυχώς το διαστημόπλοιο απέτυχε στην διαδικασία της προσγείωσης και καταστράφηκε.



Εικόνα 30: Το όχημα προσεδάφισης Chandrayaan 2 φορτώνοντας το rover Pragyan

1.3.21 Beresheet – 2019

Το 2019, το Ισραήλ έγινε η έβδομη χώρα στην ιστορία που έθεσε σε τροχιά μια διαστημοσυσκευή γύρω από το φεγγάρι. Το μικρό ρομποτικό ισραηλινό σκάφος Beresheet (Γένεσις), που είχε εκτοξευθεί στις 21 Φεβρουαρίου, εισήλθε σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τη Σελήνη με στόχο να προσσεληνωθεί. Η τροχιά του κυμαίνονταν σε απόσταση 500 έως 10.000 χιλιομέτρων από το φεγγάρι. Το βάρος 585 κιλών και κόστους 100 εκατομμυρίων δολαρίων Beresheet, αναπτύχθηκε με την υποστήριξη της ιδιωτικής επιχειρηματικής πρωτοβουλίας από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό SpaceIL και από την κρατική ισραηλινή αεροδιαστημική εταιρεία Israel Aerospace Industries. Δυστηγώς, το Beresheet καταστράφηκε κατά την διαδικασία της προσγείωσης. Η αποτυχία του Beresheet να φτάσει στη Σελήνη αποδίδεται πιθανόν σε δυσλειτουργία της κύριας μηχανής του (βρετανικής κατασκευής) κατά τη στιγμή της καθόδου στο φεγγάρι. Παρά την αποτυχία να ολοκληρώσει την αποστολή του με επιτυχία, το διαστημικό σκάφος Beresheet έγραψε -ούτως ή άλλως- ιστορία αφού είναι η πρώτη ιδιωτική διαστημοσυσκευή που έφτασε ως το φεγγάρι. Ο Ελληνο-αμερικανός επιχειρηματίας Πίτερ Διαμαντής, ιδρυτής του Ιδρύματος X-Prize, ανακοίνωσε ότι η ισραηλινή Space IL που συμμετείχε στον διαγωνισμό X-Prize, θα λάβει το βραβείο του ενός εκατομμυρίου δολαρίων, προκειμένου να συνεχίσει τις προσπάθειες της παρά την αποτυχημένη πρώτη αποστολή.



Εικόνα 31: Το όχημα προσεδάφισης Beresheet

1.3.22 Crew Dragon – 2020

Η SpaceX Demo-2 ήταν μια δοκιμαστική πτήση του διαστημικού σκάφους Crew Dragon, που εκτοξεύθηκε στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό στις 30 Μαΐου 2020. Το

Demo-2 είναι η πρώτη επανδρωμένη αποστολή που εκτοξεύθηκε από τις Ηνωμένες Πολιτείες μετά την τελική αποστολή του Διαστημικού Λεωφορείου, STS-135, το 2011, στην οποία, πιλότος ήταν ο Douglas G. Hurley. Ο Hurley μαζί με τον Robert L. Behnken ήταν το πλήρωμα της αποστολής Crew Dragon Demo-2. Η πρώτη προσπάθεια εκτόξευσης στις 27 Μαΐου ακυρώθηκε λόγω κακοκαιρίας, που προκλήθηκε από τροπική καταιγίδα, 16 λεπτά και 53 δευτερόλεπτα πριν από την εκτόξευση. Η κάψουλα Dragon με τους αστροναύτες επέστρεψαν και προσγειώθηκαν επιτυχώς στη Γη στις 2 Αυγούστου 2020.



Εικόνα 32: Εικόνες από την Αποστολή SpaceX Demo-2 στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό ISS

Κεφάλαιο 2 – Περιγραφή του Ηλιακού μας Συστήματος

2.1 Εισαγωγή

Από την εποχή που οι άνθρωποι έστρεψαν το βλέμμα τους στον ουρανό, διαπίστωσαν ότι σε αυτόν φαίνονται διάφορα φωτεινά αντικείμενα, την ημέρα ο δίσκος του Ήλιου και το βράδυ ο δίσκος της Σελήνης καθώς και ένας μεγάλος αριθμός από φωτεινά σημεία. Τα σημεία αυτά οι πρόγονοί μας αρχαίοι Έλληνες ονόμαζαν αστέρες, τους οποίους είχαν κατατάξει σε δύο ομάδες: σε αυτούς που κάθε βράδυ φαίνονται στην ίδια θέση και αυτούς που από βράδυ σε βράδυ φαίνονται να μετακινούνται. Τους αστέρες της δεύτερης ομάδας τους είχαν ονομάσει πλανήτες αστέρες επειδή φαινόταν να πλανώνται, δηλαδή να κινούνται, στον ουρανό ενώ τους αστέρες της πρώτης ομάδας τους ονόμαζαν απλανείς αστέρες. Με τον καιρό άλλαξε ο τονισμός της λέξης πλάνης, γενική του πλάνητος, και παρέμεινε ο όρος πλανήτες ως ουσιαστικοποιημένο επίθετο το οποίο μεταφέρθηκε και στις άλλες γλώσσες π.χ. στα Αγγλικά planets. Σήμερα γνωρίζουμε ότι ο Ήλιος, η Σελήνη, οι πλανήτες καθώς και άλλα μικρά σώματα, που δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι, αποτελούν τα μέλη μιας πολυπληθούς ομάδας σωμάτων που συνδέονται βαρυτικά με τον Ήλιο. Η ομάδα αυτή είναι το Ηλιακό Σύστημα.

Η κρατούσα θεωρία σήμερα είναι ότι το Ηλιακό Σύστημα δημιουργήθηκε πριν από 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια, από ένα νέφος αερίων και σκόνης του Γαλαξία μας. Για ένα λόγο που σήμερα δεν είναι γνωστός με βεβαιότητα, το νέφος αυτό άρχισε εκείνη την εποχή να συρρικνώνεται, φαινόμενο που στην αστρονομική ορολογία ονομάζεται *βαρυτική κατάρρευση*. Το νέφος αυτό είχε μη μηδενική στροφορμή, αφού από τη Θεωρία Πιθανοτήτων γνωρίζουμε ότι η πιθανότητα να είχε στροφορμή ακριβώς μηδέν, στο σύνολο των πραγματικών αριθμών, είναι ακριβώς μηδέν! Καθώς οι διαστάσεις του νέφους (που είχε μάζα M και “τυπική ακτίνα” R) μειώνονταν λόγω της συρρίκνωσης, το νέφος άρχισε να περιστρέφεται με ολοένα και μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα, ω , έτσι ώστε να παραμένει σταθερή η στροφορμή του, J , η οποία – σε τάξη μεγέθους – ήταν: $J = MR\omega^2$. Λόγω αυτού του φαινομένου το νέφος άρχισε να αποκτά δισκοειδή μορφή, στο κέντρο της οποίας δημιουργήθηκε μια συγκέντρωση ύλης που έμελλε να αποτελέσει τον Ήλιο. Στον υπόλοιπο δίσκο δημιουργήθηκαν μικρότερες συγκεντρώσεις ύλης, οι οποίες ακολουθούσαν, με μεγάλη προσέγγιση, ελλειπτικές τροχιές περί τον Ήλιο. Τα σώματα αυτά υπέστησαν διαδοχικές συγκρούσεις μεταξύ τους, άλλες από τις οποίες είχαν για αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερων σωμάτων, λόγω πλαστικής κρούσης και συσσωμάτωσης των συγκρουόμενων σωμάτων σε ένα μεγαλύτερο, και άλλες τη δημιουργία μικρότερων σωμάτων, λόγω διάσπασης των συγκρουόμενων σωμάτων σε άλλα μικρότερα. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργήθηκαν οι γνωστοί πλανήτες. Επιπλέον η βαρυτική αλληλεπίδραση των σωμάτων αυτών μεταξύ τους οδήγησε σε αλλαγές της τροχιάς τους, έτσι ώστε άλλα από αυτά βρέθηκαν σε μεγαλύτερες ή μικρότερες μέσες αποστάσεις από τον Ήλιο, φαινόμενο που στην αστρονομική ορολογία αναφέρεται ως *πλανητική μετανάστευση* (planetary migration), και άλλα από αυτά έπεσαν στον Ήλιο ή απέκτησαν ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής από τον Ήλιο και απομακρύνθηκαν σε άπειρη απόσταση.

Όπως αναφέρθηκε και στον πρώτο κεφάλαιο, ιστορικά οι πρώτες προσπάθειες μελέτης του Ηλιακού Συστήματος έγιναν από τους λαούς της Μεσοποταμίας και από τους αρχαίους Έλληνες φυσικούς φιλόσοφους, και περιορίζονταν αρχικά στην καταγραφή και στη συνέχεια στην προσπάθεια ερμηνείας της κίνησης εκείνων των

μελών του Ηλιακού Συστήματος που είναι ορατά με γυμνό μάτι. Αυτά είναι ο Ήλιος, η Σελήνη και οι πέντε πιο λαμπροί πλανήτες, Ερμής, Αφροδίτη, Άρης, Δίας και Κρόνος. Οι κομήτες ήταν επίσης γνωστοί στην αρχαιότητα, αλλά δεν ήταν ξεκάθαρη η φύση του φαινομένου. Για παράδειγμα ο Αριστοτέλης θεωρούσε ότι οι κομήτες είναι ατμοσφαιρικό φαινόμενο. Το ότι οι κομήτες βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις αποδείχθηκε για πρώτη φορά την εποχή του Γαλιλαίου, όταν ένας Ιησουίτης μοναχός διαπίστωσε ότι η τροχιά τους περνά πέρα από την τροχιά της Σελήνης. Την ίδια εποχή ο Γαλιλαίος ανακάλυψε τους τέσσερις μεγαλύτερους δορυφόρους του πλανήτη Δία, δείχνοντας έτσι ότι η Γη δεν είναι ο μοναδικός πλανήτης που συνοδεύεται από δορυφόρο, τη Σελήνη. Στα νεώτερα χρόνια ανακαλύφθηκαν οι δορυφόροι του Κρόνου και του Άρη, καθώς και οι δύο πιο απομακρυσμένοι γίγαντες πλανήτες, ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας. Ο μεν Ουρανός ανακαλύφθηκε από τον William Herschel το 1781 ο δε Ποσειδώνας από τον Johann Gottfried Galle, διευθυντή του αστεροσκοπείου του Βερολίνου, το 1846. Ο Γκάλε αξιοποίησε τους θεωρητικούς υπολογισμούς του Γάλλου αστρονόμου Λεβεριέ (Urbain Le Verrier), ο οποίος για να ερμηνεύσει τις μικρές αποκλίσεις της τροχιάς του Ουρανού από την τροχιά που υπολογιζόταν θεωρητικά, λαμβάνοντας υπόψη την έλξη του Ουρανού από τον Ήλιο και τους άλλους γνωστούς τότε πλανήτες, υπέθεσε την ύπαρξη και ενός όγδοου πλανήτη, εξωτερικού του Ουρανού, την θέση του οποίου υπολόγισε θεωρητικά.

Στη συνέχεια ανακαλύφθηκε ότι υπάρχουν και άλλα σώματα σε τροχιά περί τον Ήλιο, μικρότερα από τους πλανήτες, η ονοματολογία των οποίων έχει περάσει από πολλά στάδια. Τα πρώτα από αυτά ονομάστηκαν *αστεροειδείς*, επειδή η εικόνα τους στο τηλεσκόπιο δεν ήταν ένας φωτεινός δίσκος, όπως η εικόνα των οκτώ πλανητών, αλλά ένα φωτεινό σημείο, ίδια ακριβώς με την εικόνα των αστερών. Ο πρώτος αστεροειδής ανακαλύφθηκε την πρωτοχρονιά του 1800 από τον Ιταλό αστρονόμο Giuseppe Piazzi. Ο Πιάτσι θεώρησε ότι το σώμα αυτό ήταν ένας νέος πλανήτης και τον ονόμασε Δήμητρα, συνεχίζοντας την παράδοση ονομασίας των πλανητών με βάση τους θεούς των Αρχαίων Ελλήνων και των Ρωμαίων. Όταν όμως άρχισαν να ανακαλύπτονται και άλλα ουράνια σώματα στην ίδια περίπου μέση απόσταση από τον Ήλιο, μεταξύ των πλανητών Άρη και Δία, έγινε κατανοητό ότι η Δήμητρα και τα άλλα αυτά σώματα αποτελούν μια νέα τάξη μελών του Ηλιακού Συστήματος. Σήμερα τα σώματα αυτά ονομάζονται *ελάσσονες πλανήτες* (minor planets) και ειδικά αυτά που έχουν σχήμα σφαιρικό ονομάζονται *νάνοι πλανήτες* (dwarf planets). Αλλά ο όρος αστεροειδής έχει επικρατήσει στην καθομιλουμένη επιστημονική γλώσσα.

Μετά από την ανακάλυψη των αστεροειδών στην περιοχή μεταξύ Άρη και Δία, ο Ιρλανδός Kenneth Edgeworth και ο Αμερικανο-Ολανδός Gerard Kuiper πρότειναν, για θεωρητικούς λόγους, την ύπαρξη και μιας άλλης ομάδας σωμάτων ανάλογης με αυτήν των γνωστών αστεροειδών αλλά πέρα από την τροχιά του Ποσειδώνα. Ο θεωρητικός λόγος ήταν πως οι παρατηρούμενοι κομήτες μπορούν να καταταγούν σε αυτούς που έχουν μεγάλες περιόδους, μεγαλύτερες από 200 χρόνια, και σε αυτούς που έχουν μικρότερες από 200 χρόνια. Η περίοδος των κομητών της δεύτερης κατηγορίας αντιστοιχεί, σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Kepler, σε τιμές του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς τους μεγαλύτερες κατά ~2 φορές από τον μεγάλο ημιάξονα του Ποσειδώνα. Στον πληθυσμό αυτόν του Ηλιακού Συστήματος συμπεριλαμβάνεται και ο Πλούτωνας, ο οποίος ανακαλύφθηκε το 1930 από τον αμερικανό αστρονόμο Clyde Tombaugh, ο οποίος αρχικά είχε αντιμετωπιστεί ως ο ένατος πλανήτης του Ηλιακού Συστήματος. Δηλαδή με τον Πλούτωνα επαναλήφθηκε το ίδιο λάθος που είχε γίνει με τη Δήμητρα. Μολονότι πολλοί αστεροειδείς της κύριας ζώνης είχαν ανακαλυφθεί μέσα σε μερικά χρόνια από την ανακάλυψη της Δήμητρας, το πρώτο σώμα της ζώνης

Edgeworth – Kuiper, ανακαλύφθηκε το 1992, 62 ολόκληρα χρόνια μετά την ανακάλυψη του Πλούτωνα. Έτσι ο Πλούτωνας για μεγάλο χρονικό διάστημα ήταν το μοναδικό γνωστό σώμα στην απόσταση των ~40 Astronomical Unit (AU) και πρόλαβε να καθιερωθεί στην κοινή γνώμη και στην αστρονομική κοινότητα ως πλανήτης, παρά τις εμφανείς διαφορές που έχει η τροχιά του από τις τροχιές των οκτώ πλανητών, δηλαδή μεγάλη εκκεντρότητα και μεγάλη κλίση.

2.2 Πλανήτες και Πλανητικά Συστήματα

Όπως φαίνεται από όσα αναφέρθηκαν στην Εισαγωγή, η λέξη «πλανήτης» έχει αλλάξει αρκετές φορές έννοια από την εποχή των Αρχαίων Ελλήνων μέχρι σήμερα. Στην αρχή αναφερόταν στα ουράνια σώματα που φαίνονταν να αλλάζουν θέση από νύχτα σε νύχτα, «πλανώμενα» μεταξύ των απλανών αστερών που μένουν ακίνητοι στις ίδιες θέσεις στον ουρανό. Αργότερα, με την επικράτηση της ηλιοκεντρικής θεωρήσης, έγινε πια αποδεκτό ότι οι πλανήτες είναι σώματα που περιφέρονται γύρω από το μητρικό μας άστρο, τον Ήλιο. Στη συνέχεια ο όρος αυτός περιορίστηκε να περιγράφει μόνο τα οκτώ μεγαλύτερα σώματα του Ηλιακού Συστήματος, ενώ γύρω από τον Ήλιο περιφέρονται και εκατοντάδες χιλιάδες *ελάσσονες πλανήτες* (minor planets, γνωστοί και ως *αστεροειδείς*) αλλά και μερικοί *νάνοι πλανήτες* (dwarf planets), όπως χαρακτηρίζονται πια ο Πλούτωνας αλλά και η Δήμητρα που παλαιότερα κατατασσόταν στους αστεροειδείς, και μάλιστα ο μεγαλύτερος από αυτούς.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 πλανήτες ονομάζονται και τα μεγάλα σώματα που περιφέρονται γύρω από άλλους αστέρες εκτός του Ηλίου. Σήμερα, γνωρίζουμε ήδη πάνω από 2.000 εξωπλανήτες (exoplanets), που ανήκουν σε περίπου 650 εξωηλιακά πλανητικά συστήματα, και ο κατάλογος αυξάνεται με επιταχυνόμενο ρυθμό. Πιστεύεται ότι ο αριθμός των εξωπλανητών στο Γαλαξία μας είναι μεγαλύτερος από 200 δισεκατομμύρια, δηλαδή μεγαλύτερος από τους αστέρες που αυτός περιέχει. Ανάλογη θα πρέπει να είναι η περίπτωση και για τους άλλους γαλαξίες. Τέλος το 2000 ανακαλύφθηκε στο Γαλαξία μας και μία ακόμη κλάση ουράνιων σωμάτων, τα οποία έχουν μάζα όση περίπου και του Δία αλλά δεν περιφέρονται γύρω από κάποιον μητρικό αστέρα και γι' αυτό ονομάζονται *ελεύθεροι πλανήτες* (free floating planets, rogue planets, orphan planets). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη τέτοιου είδους σωμάτων είχε προβλεφθεί θεωρητικά από τον Harlow Shapley και τον Ernst Öpik ήδη περί το 1960. Προκαταρκτικοί υπολογισμοί, που βασίζονται σε παρατηρήσεις, έδειξαν ότι ο αριθμός των ελεύθερων πλανητών στον Γαλαξία μας είναι διπλάσιος από τον αριθμό των αστερών του, δηλαδή της τάξης των 400 δισεκατομμυρίων. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι ο κλασικός ορισμός του «πλανήτη» έχει αναθεωρηθεί, ώστε να ανταποκρίνεται τόσο στα νέα παρατηρησιακά δεδομένα όσο και στις πρόσφατες εξελίξεις των κοσμολογικών θεωριών.

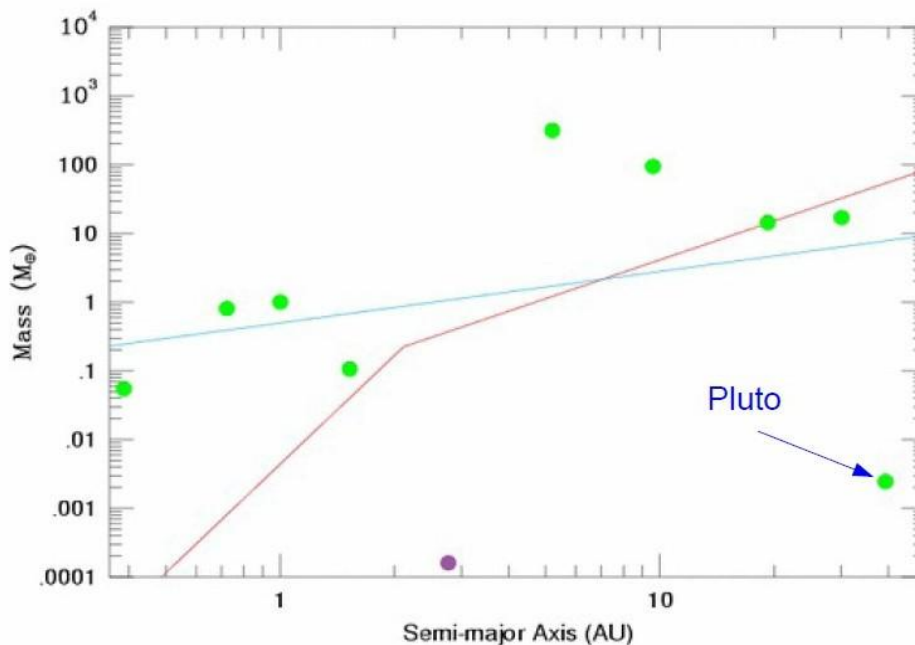
Αν εξαιρέσουμε τους ελεύθερους πλανήτες, «πλανήτης» ονομάζεται ένα ουράνιο σώμα που:

- περιφέρεται γύρω από έναν αστέρα ή αστρικό υπόλειμμα (λευκό νάνο ή αστέρα νετρονίων)
- έχει σχεδόν σφαιρικό σχήμα, λόγω της ιδιοβαρύτητας του
- δεν έχει αρκετά μεγάλη μάζα ώστε να συντηρεί στο εσωτερικό του θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, οπότε δεν είναι αυτόφωτο

- έχει «καθαρίσει» την περιοχή γύρω από την τροχιά του από άλλους (μικρούς) πλανητοειδείς (planetesimals)

Η τελευταία προϋπόθεση είναι και η πιο σημαντική, από φυσικής άποψης, καθώς βασίζεται στη θεωρητική μας γνώση για το πώς σχηματίζονται οι πλανήτες. Ένας πλανήτης, προκειμένου να έχει «καθαρίσει» τη γειτονιά του, θα πρέπει να έχει ενσωματώσει όλα τα μικρά σώματα της περιοχής στη μάζα του, ή να τα έχει εκδιώξει από την περιοχή, μέσω του φαινομένου της βαρυτικής σκέδασης (γνωστό επίσης ως φαινόμενο της σφενδόνας – slingshot effect) στο το οποίο θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια. Οι δύο αυτές συνθήκες μεταφράζονται σε δύο μαθηματικές σχέσεις που μας δίνουν τη μάζα που πρέπει να έχει ένας πλανήτης, ως συνάρτηση της απόστασής του από τον ήλιο, ώστε κάθε αντικείμενο μικρής μάζας στη γειτονιά του να συγκρούεται υποχρεωτικά μαζί του ή κάθε αντικείμενο μικρής μάζας στη γειτονιά του να κερδίζει τόση ενέργεια ώστε να εκτοξευτεί σε υπερβολική (ως προς τον κεντρικό αστέρα) τροχιά.

Οι δύο καμπύλες, που προκύπτουν από τη γραφική παράσταση των δύο παραπάνω σχέσεων, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου επίσης φαίνονται οι οκτώ πλανήτες του ηλιακού συστήματος, ο Πλούτωνας (στις 39 AU) και η Δήμητρα (στις 2.7 AU). Είναι φανερό ότι οι οκτώ μεγάλοι πλανήτες βρίσκονται πάνω από τουλάχιστον μία από τις δύο καμπύλες, δηλαδή έχουν μεγαλύτερη μάζα από αυτήν που απαιτείται για να ικανοποιείται τουλάχιστον η μία εκ των δύο προϋποθέσεων καθαρισμού της γειτονιάς τους. Αντίθετα, ο Πλούτωνας και η Δήμητρα βρίσκονται κάτω και από τις δύο καμπύλες, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι δυνατό να θεωρηθούν ως πλανήτες. Όντως, τόσο η Δήμητρα όσο και ο Πλούτωνας, παρότι είναι σχεδόν σφαιρικά σώματα, κινούνται σε δύο περιοχές που είναι γεμάτες από μικρούς πλανήτες, την κύρια ζώνη των αστεροειδών η πρώτη και τη ζώνη του Kuiper ο δεύτερος.



Εικόνα 33: Η μάζα ενός πλανήτη συναρτίζεται της απόστασής του από κεντρικό αστέρα, πάνω από την οποία ο πλανήτης έχει ενσωματώσει τους γειτονικούς πλανητοειδείς (ευθεία – γαλάζια καμπύλη) και πάνω από την οποία ο πλανήτης έχει εκδιώξει τους γειτονικούς πλανητοειδείς (κεκαμμένη – μωβ καμπύλη) (H. Levison / SWRI)

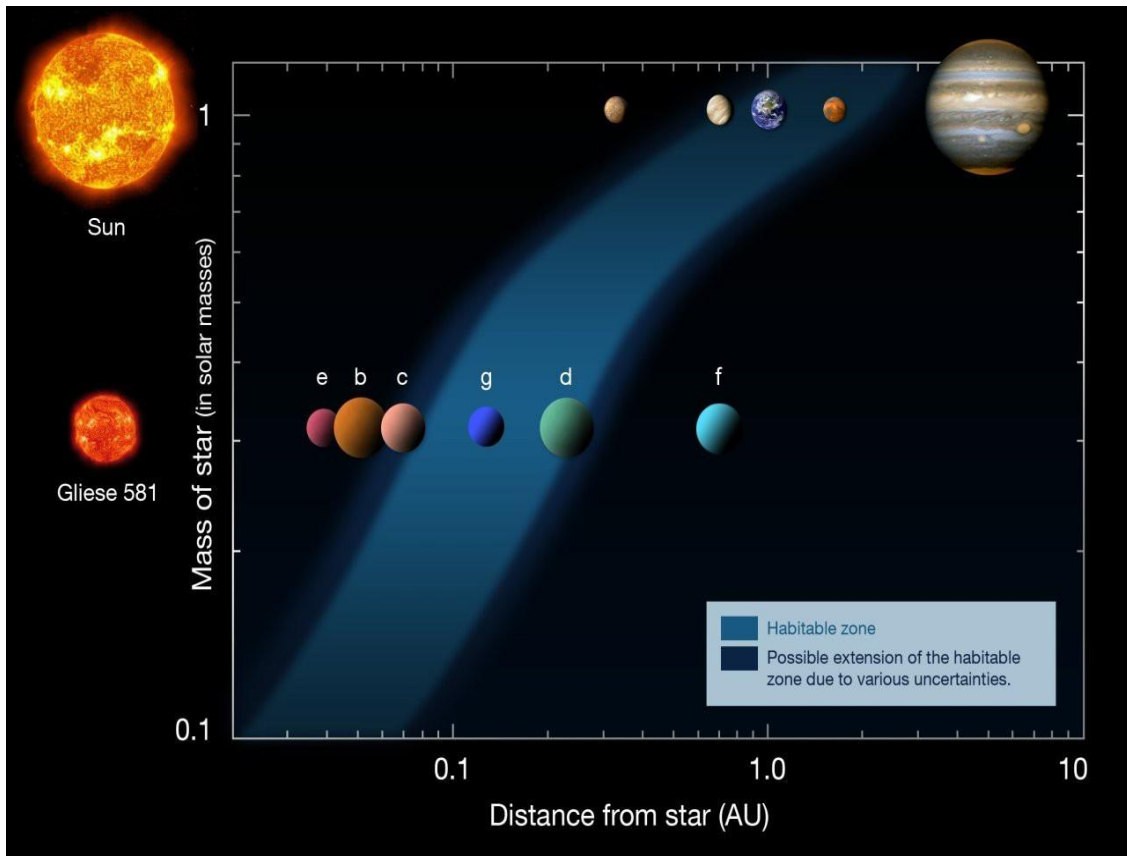
2.3 Γενικά

Το Ηλιακό Σύστημα απαρτίζεται από τον Ήλιο και όλα τα σώματα που περιφέρονται γύρω από αυτόν, μεταξύ των οποίων κυριότερα είναι οι πλανήτες, οι δορυφόροι, οι αστεροειδείς, οι κομήτες και οι μετεωροειδείς. Στο κέντρο του βρίσκεται ο Ήλιος και σε αυξανόμενες αποστάσεις βρίσκουμε τους τέσσερις εσωτερικούς ή γήινους πλανήτες Ερμή, Αφροδίτη, Γη, Άρη, την εσωτερική ζώνη των αστεροειδών, τους τέσσερις γιγαντιαίους πλανήτες Δία, Κρόνο, Ουρανό και Ποσειδώνα, την ζώνη Edgeworth – Kuiper ή εξωτερική ζώνη των αστεροειδών που έχει δισκοειδή μορφή, το σφαιρικό νέφος του Oort και τέλος, την Ηλιόπαυση, που τελειώνει σε απόσταση 18 δισεκατομμυρίων χιλιομέτρων από τον Ήλιο. Από την αρχαιότητα ήταν γνωστοί οι τέσσερις εσωτερικοί πλανήτες καθώς και οι Δίας και Κρόνος. Ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας ανακαλύφθηκαν μετά την εφεύρεση του τηλεσκοπίου, τον 18ο και 19ο αιώνα αντίστοιχα. Οι κομήτες ήταν επίσης γνωστοί από την αρχαιότητα και την εποχή του Γαλιλαίου διαπιστώθηκε ότι κινούνται σε αποστάσεις πέρα από την τροχιά της Σελήνης. Ακόμη, ήταν γνωστοί και οι μετεωρίτες, μετά από την παρατήρηση ενός τέτοιου σώματος που είχε πέσει στην περιοχή *Αιγός Ποταμοί* του Ελλησπόντου. Σήμερα εξακολουθούν να ανακαλύπτονται, και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό, σώματα μικρότερα από τους οκτώ μεγάλους πλανήτες, κυρίως αστεροειδείς στις δύο ζώνες και κομήτες.

2.4 Ήλιος

Σε κάθε πλανητικό σύστημα πρωτεύοντα ρόλο κατέχει ο κεντρικός αστέρας, γύρω από τον οποίο περιφέρονται τα υπόλοιπα ουράνια σώματα, που είναι συνδεδεμένα βαρυτικά με αυτόν. Η μαθηματική συνθήκη είναι η μηχανική ενέργεια του συστήματος του αστέρα με το κάθε ένα από τα υπόλοιπα μέλη του πλανητικού συστήματος (κινητική ως προς κέντρο μάζας + βαρυτική δυναμική) να είναι αρνητική.

Στο δικό μας σύστημα, κεντρικός αστέρας είναι ο *Ήλιος*. Πρόκειται για ένα αστέρα της κύριας ακολουθίας, φασματικού τύπου (spectral type, Sp) G2V. Σημειώνουμε ότι ο φασματικός τύπος του αστέρα αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον καθορισμό της λεγόμενης «κατοικήσιμης ζώνης» (habitable zone), δηλαδή μιας δακτυλιοειδούς περιοχής γύρω από τον αστέρα εντός της οποίας ένας στερεός πλανήτης μπορεί να διατηρήσει νερό σε υγρή μορφή στην επιφάνειά του, κι επομένως έχει πιθανότητες να φιλοξενεί ζωή, με τη μορφή που γνωρίζουμε. Η έκταση και τα όρια της κατοικήσιμης ζώνης εξαρτώνται από τη φωτεινότητα του αστέρα. Όσο φωτεινότερος είναι ο αστέρας, τόσο πιο μακριά από αυτό βρίσκεται η κατοικήσιμη ζώνη.

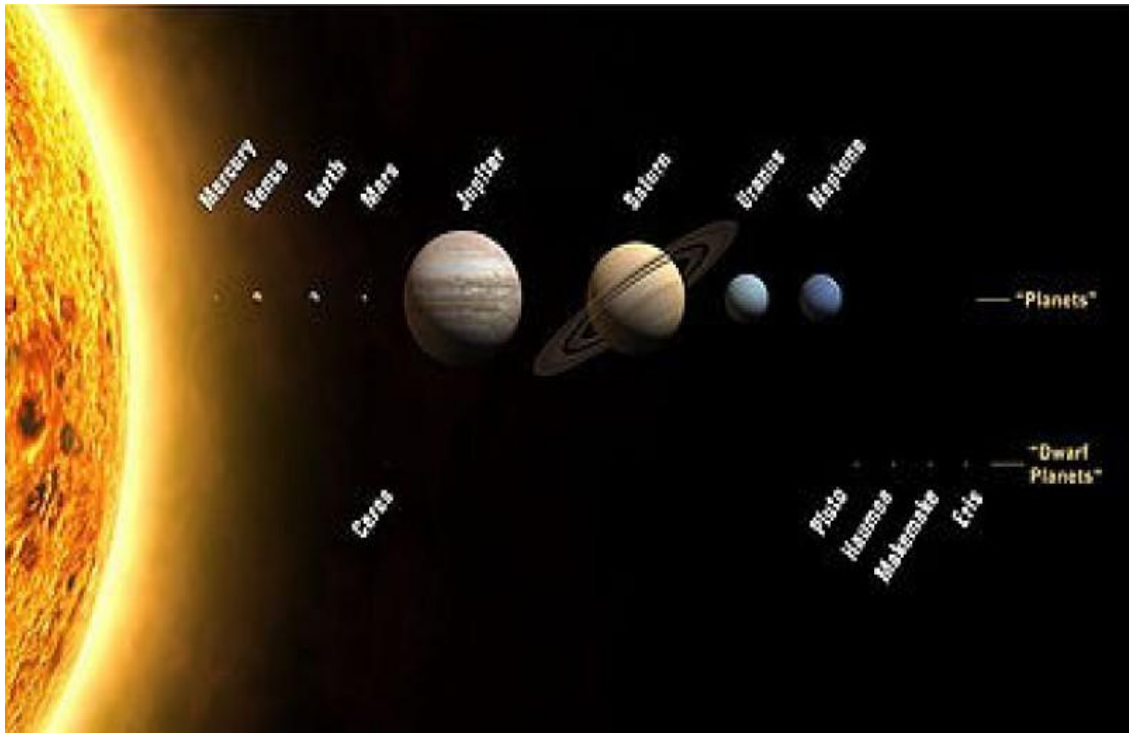


Εικόνα 34: Η θέση και η έκταση της κατοικήσιμης ζώνης ως συνάρτηση της μάζας του κεντρικού αστέρα (διαγώνια γαλάζια ζώνη). Σύγκριση του Ηλιακού μας Συστήματος (πάνω) και του εξωπλανητικού συστήματος Gliese 581 (κάτω). (Henrikus / ESO, Creative Commons)

Η μάζα του Ήλιου είναι περίπου το 99,8% της συνολικής μάζας του ηλιακού συστήματος, έτσι ώστε το κέντρο μάζας του συστήματος να βρίσκεται στο εσωτερικό του Ήλιου. Αντίθετα, το 98% της συνολικής στροφορμής του συστήματος βρίσκεται στις τροχιές των πλανητών. Η ηλικία του ήλιου υπολογίζεται στα 4,6 δισεκατομμύρια έτη (Gy). Με βάση τα μοντέλα αστρικής εξέλιξης, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στο μέσον της ζωής του, αφού η ακτίνα του και η φωτεινότητά του δεν αναμένεται να παρουσιάσουν σημαντικές μεταβολές κατά τα επόμενα 4,5 Gy περίπου. Κατά συνέπεια, η δυναμική κατάσταση του Ηλιακού συστήματος δεν αναμένουμε να μεταβληθεί σημαντικά μέχρι τότε, εκτός κι αν το σύστημα δεν είναι στην πραγματικότητα ευσταθές, όπως συνήθως θεωρούμε.

2.5 Συνοπτική Εικόνα των Αντικειμένων Περί τον Ήλιο

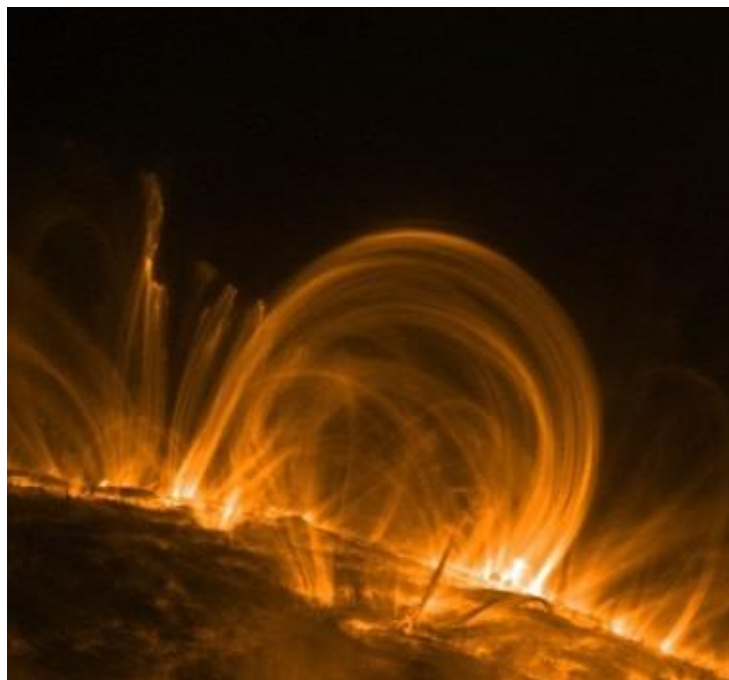
Γύρω από τον Ήλιο περιφέρονται τα υπόλοιπα σώματα που απαρτίζουν το Ηλιακό Σύστημα σε τροχιές που είναι κατά πολύ καλή προσέγγιση ελλείψεις, με τον Ήλιο στη μία εστία τους. Το στοιχείο αυτό το είχε ανακαλύψει πρώτος ο Kepler, αναλύοντας τις παρατηρήσεις του δασκάλου του Tycho Brahe, και το ερμήνευσε ο Νεύτωνας, συνδυάζοντας το δεύτερο αξίωμα της κίνησης, $F = m \cdot \gamma$, με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης, $F = -GMm/r^2 e_r$.



Εικόνα 35: Οι πλανήτες και νάνοι πλανήτες του Ηλιακού μας Συστήματος. Τα μεγέθη των πλανητών είναι υπό τη σωστή κλίμακα αλλά οι αποστάσεις τους από τον Ήλιο όχι. (IAU)

2.5.1 Εσωτερικό Ηλιακό Σύστημα

Οι τέσσερις εσωτερικοί πλανήτες είναι ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη και ο Άρης, και αποτελούνται από πετρώματα και μέταλλα, κυρίως σίδηρο και νικέλιο. Ονομάζονται και γήινοι πλανήτες, επειδή έχουν μέγεθος και χημική σύσταση παρόμοια με της Γης. Η Γη έχει ένα φυσικό δορυφόρο, τη Σελήνη, και ο Άρης έχει δύο, τον Δείμο και τον Φόβο.



Εικόνα 36: Μαγνητικοί βρόχοι στη χρωμόσφαιρα και το στέμμα του Ήλιου, όπως καταγράφηκαν από το διαστημόπλοιο TRACE. Το μαγνητικό πεδίο του κεντρικού αστέρα είναι πηγή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής και σωματιδιακής ακτινοβολίας, οι οποίες επηρεάζουν την δυνατότητα ανάπτυξης ζωής σε ένα πλανήτη που δεν έχει μαγνητικό πεδίο και ατμόσφαιρα (NASA)

Μεταξύ του Άρη και του Δία βρίσκεται η ζώνη των αστεροειδών. Οι αστεροειδείς ονομάζονται στην επίσημη αστρονομική ορολογία *ελάσσονες πλανήτες* (minor planets) και εκτιμάται ότι υπάρχουν περισσότεροι από 750,000 με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 χιλιόμετρο. Ο μεγαλύτερος αστεροειδής είναι η Δήμητρα, με διάμετρο περίπου 950 χιλιόμετρα, που σήμερα κατατάσσεται στην ολιγομελή ομάδα των *νάνων πλανητών* (dwarf planets). Μερικοί αστεροειδείς ακολουθούν έκκεντρες τροχιές που τους οδηγούν μέσα από την τροχιά του Άρη, με αποτέλεσμα να συγκρούονται με τη Γη ή τους άλλους εσωτερικούς πλανήτες.

2.5.2 Εξωτερικό Ηλιακό Σύστημα

Οι εξωτερικοί πλανήτες Δίας, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας, είναι γιγαντιαία σώματα με βραχώδεις πυρήνες και εκτεταμένες ατμόσφαιρες. Το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας τους αποτελεί την ατμόσφαιρά τους, η οποία με τη σειρά της αποτελείται από υδρογόνο και ήλιο, έτσι ώστε η χημική σύστασή τους μοιάζει με αυτήν του Ήλιου. Περιβάλλονται από δακτύλιους σκόνης και πάγου, εκ των οποίων οι πιο ευδιάκριτοι είναι αυτοί του Κρόνου.

Οι κομήτες, που πολλές φορές αποκαλούνται και *βρώμικες χιονόμπαλες*, αποτελούνται κυρίως από πάγο και σκόνη. Όταν η τροχιά ενός κομήτη τον οδηγεί κοντά στον Ήλιο, ένα μέρος του πάγου από την πλευρά που θερμαίνεται από τον Ήλιο εξαχνώνεται, παρασύροντας και σκόνη. Τα υλικά που απελευθερώνονται δημιουργούν τις δύο ουρές των κομητών, την ουρά σκόνης και την ουρά αερίων. Οι κομήτες μικρής περιόδου, δηλαδή αυτοί που έχουν περίοδο μικρότερη από 200 χρόνια, πιστεύεται ότι προέρχονται από την δισκοειδή ζώνη Edgeworth – Kuiper, ενώ οι κομήτες μακράς περιόδου, με περίοδο μεγαλύτερη από 200 χρόνια, πιστεύεται ότι προέρχονται από το σφαιρικά συμμετρικό νέφος του Oort.

2.5.3 Υπερ-Ποσειδώνεια Περιοχή (Trans-Neptunian Objects)

Οι αστρονόμοι είχαν από καιρό υποθέσει την ύπαρξη μιας ζώνης από παγωμένο υλικό, αυτήν που σήμερα ονομάζουμε ζώνη Edgeworth-Kuiper προς τιμήν των πρώτων αστρονόμων που πρότειναν την ύπαρξή της. Η ζώνη αυτή, που βρίσκεται πέρα από την τροχιά του Ποσειδώνα, είναι ένας δακτύλιος με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα 30 και 55 AU αντίστοιχα, και στην περιοχή αυτή έχουν μέχρι στιγμής ανακαλυφθεί περισσότερα από 1.000 σώματα. Εκτιμάται ότι στη ζώνη αυτή υπάρχουν εκατοντάδες χιλιάδες σώματα με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 χιλιόμετρα, καθώς και ένα τρισεκατομμύριο κομήτες. Το νέφος του Oort βρίσκεται πέρα από την ζώνη Edgeworth – Kuiper, και θεωρητικά εκτείνεται σε ένα σφαιρικό φλοιό με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα 5.000 και 100.000 AU αντίστοιχα. Σε αυτή την περιοχή εκτιμάται ότι υπάρχουν 2 τρισεκατομμύρια κομήτες. Πέρα από το νέφος του Oort εκτείνεται η ηλιόσφαιρα, μια τεράστια περιοχή του διαστήματος σε σχήμα σταγόνας (με τον Ήλιο αντίθετα από την «ακίδα» της σταγόνας), που περιέχει ιόντα και ηλεκτρόνια, τα συστατικά του ηλιακού άνεμου που εκπέμπεται από τον Ήλιο. Σήμερα εκτιμάται ότι το όριο της ηλιόσφαιρας, που είναι γνωστό και ως *ηλιόπαυση*, βρίσκεται σε απόσταση 18 δισεκατομμυρίων χιλιομέτρων από τον Ήλιο.

Ο Πλούτωνας, που παλαιότερα εθεωρείτο ως ο ένατος πλανήτης αλλά σήμερα κατατάσσεται στην ολιγομελή ομάδα των νάνων πλανητών, βρίσκεται στη ζώνη Edgeworth – Kuiper μαζί με τους άλλους νάνους πλανήτες, *Μακεμάκε* (Makemake), *Χαουμέα* (Haumea) και *Έριδα* (Eris). Άλλα αντικείμενα σε αυτήν τη ζώνη είναι ο *Καοάρ* (Quaoar) που είναι πιθανά και αυτός νάνος πλανήτης, ενώ δέκα φορές πιο μακριά βρίσκεται η *Σέντνα* (Sedna), που σήμερα κατατάσσεται στον πληθυσμό του *σκεδασμένου δίσκου*.

2.6 Πλανήτες

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 1 με τα βασικά μακροσκοπικά στοιχεία των πλανητών (απόσταση από τον Ήλιο, εκκεντρότητα, τροχιά, ακτίνα, μάζα, περιστροφή).

	a (AU)	e	i (deg) προς εκλ.	Λόξωση (deg)	Τπεριφ	Τπεριστ ρ	Μάζα (M_{Γ})	Ακτίνα (R_{Γ})
Ερμής	0.387	0.2	7.0	0.054	87.97 d	58.785 d	0.0553	0.38
Αφροδίτη	0.723	0.006 7	3.39	177.36	224.7 d	- 243.69 d	0.815	0.95
Γη	1.000	0.016 7	0.0	23.44	1 yr	23.93 h	1.0	1.0
Άρης	1.524	0.093 5	1.85	25.19	1.881 yr	1.029 d	0.107	0.532
Δήμητρα	2.767	0.078 9	10.58	?	4.60 yr	9.074 h	0.00006 3	0.152 9
Δίας	5.204	0.048 9	1.304	3.13	11.862	9.925 h	317.83	11.20 9
Κρόνος	9.582	0.056 5	2.485	26.73	29.457	10.656 h	95.159	9.449
Ουρανός	19.20 1	0.045 7	0.772	97.77	84.011 yr	-17.24 h	14.536	4.007
Ποσειδών ας	30.04 7	0.011 3	1.769	28.32	164.79 y	16.11 h	17.147	3.883
Πλούτωνας	39.48 2	0.248 8	17.16	122.53	247.68 yr	- 153.29 h	0.0022	0.187
Χαουμέα	43.21 8	0.191	28.19	?	284.12 yr	3.91 h	0.00066	0.009 7
Καοάρ	43.40 5	0.039 4	7.996	?	285.97 yr	17.67 h	.00023	0.174 2
Μακεμάκ ε	45.71 5	0.155 8 6	29.00	?	309.09 yr	7.771 h	?	0.112 2
Έρις	67.78 1	0.440 6 8	44.04	?	558.04 yr	25.9 hr	0.0028	0.182
Σέντνα	524.4	0.854	11.928	?	11,400 yr	10.3 h	?	0.156

Πίνακας 1: Τιμές των βασικών φυσικών και τροχιακών χαρακτηριστικών των πλανητών και νέων πλανητών του Ηλιακού μας Συστήματος

2.6.1 Εσωτερικοί ή Γήινοι Πλανήτες

Ο όρος *γήινοι πλανήτες* χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε τους μικρούς στερεούς πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, αλλά και γενικότερα πλανήτες παρόμοιους με τη Γη που τυχόν υπάρχουν σε άλλα πλανητικά συστήματα. Σε αντιδιαστολή με τους γίγαντες, οι γήινοι είναι πλανήτες μικρής μάζας, που αποτελούνται κυρίως από στερεά πετρώματα και πιθανόν περιβάλλονται από μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική ατμόσφαιρα.

Οι δύο μεγαλύτεροι γήινοι πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος είναι η Γη και η Αφροδίτη. Έχουν συγκρίσιμη μάζα και ακτίνα, ~6.000 km, βρίσκονται σε μέση απόσταση ~1 και ~0.7 AU αντίστοιχα από τον ήλιο και οι τροχιές τους είναι σχεδόν κυκλικές ($e \sim 0.01$). Επίσης, περιβάλλονται και οι δύο από σχετικά πυκνή ατμόσφαιρα. Το πιο αξιοπερίεργο στοιχείο της Αφροδίτης είναι η ανάδρομη ιδιοπεριστροφή της, με τον άξονα περιστροφής της να σχηματίζει γωνία σχεδόν 180° , σε σχέση με τον άξονα της τροχιάς της. Μια πιθανή ερμηνεία αυτού του φαινομένου είναι ότι, κατά τα τελικά στάδια σχηματισμού της, ένα άλλο πλανητικό σώμα προσέκρουσε στην Αφροδίτη, με αποτέλεσμα την απότομη αντιστροφή του άξονα περιστροφής της.

Οι υπόλοιποι δύο γήινοι πλανήτες, ο Ερμής ($a = 0.4$ AU, $e = 0.2$) και ο Άρης ($a = 1.5$ AU, $e = 0.1$) έχουν σαφώς μικρότερη μάζα από τη Γη. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η αυξημένη εκκεντρότητα της τροχιάς τους, η οποία σε συνδυασμό με τη μικρή μάζα τους, πιθανόν αντικατοπτρίζει τον «άναρχο» τρόπο σχηματισμού των γήινων πλανητών, μέσω διαδοχικών συγκρούσεων μικρότερων πλανητικών εμβρύων (planetary embryos). Κι αυτό γιατί όσο λιγότερα πλανητικά έμβρυα χρειάζονται για να φτιαχτεί ένας πλανήτης, τόσο πιο ανισοτροπική είναι η κατανομή των συγκρούσεων και άρα πιο ελλειπτική η τελική τροχιά.

Η ατμόσφαιρα του Ερμή και του Άρη είναι εξαιρετικά αραιές. Επιπλέον, ο Ερμής και η Γη έχουν μαγνητικό πεδίο, ο Ερμής ασθενές και η Γη σχετικά ισχυρό, που θεωρούμε ότι οφείλεται σε ροή ηλεκτρικά αγωγίμων ρευστών στο εσωτερικό τους, σε συνδυασμό με τον ρυθμό περιστροφής τους (θεωρία της μαγνητικής γεννήτριας – magnetic dynamo). Η Αφροδίτη δεν έχει μαγνητικό πεδίο, αν και έχει ρευστό πυρήνα, επειδή περιστρέφεται εξαιρετικά αργά. Ο Άρης δεν έχει μαγνητικό πεδίο επειδή το εσωτερικό του έχει στερεοποιηθεί. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλύσουμε πιο διεξοδικά τη δομή τόσο του εσωτερικού όσο και της ατμόσφαιρας των πλανητών.



Εικόνα 37: Σύγκριση του μεγέθους των γήινων πλανητών. Από αριστερά προς τα δεξιά: Ερμής, Αφροδίτη, Γη, Άρης (NASA)

2.6.1.1 Ερμής

Ο Ερμής είναι ο πλησιέστερος προς τον Ήλιο πλανήτης και δεν έχει ατμόσφαιρα. Επειδή είναι τόσο κοντά στον Ήλιο, η θερμοκρασία στις περιοχές που έχουν «μεσημέρι» (δηλαδή εκεί όπου ο Ήλιος μεσουραναει) μπορεί να φτάσει στους 450°C . Επειδή όμως δεν υπάρχει ατμόσφαιρα, η οποία εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές

διαφορές, η θερμοκρασία τη νύκτα μπορεί να φθάσει τους $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$, έτσι ώστε ο Ερμής παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασιών στο Ηλιακό Σύστημα, $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η μέση θερμοκρασία της επιφάνειάς του είναι $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ αλλά, λόγω της μεγάλης διακύμανσης που αναφέραμε, αυτό το στοιχείο δεν έχει φυσική σημασία. Ο Ερμής είναι ο μικρότερος πλανήτης του Ηλιακού Συστήματος, όντας ελαφρά μεγαλύτερος της Σελήνης. Η έλλειψη ατμόσφαιρας εξηγεί τους πολυάριθμους κρατήρες στην επιφάνειά του. Σε έναν από αυτούς τους κρατήρες, κοντά στο Βόρειο Πόλο του πλανήτη, ανακαλύφθηκε το 2010 από το διαστημόπλοιο Messenger η ύπαρξη νερού υπό μορφή πάγου, που θα μπορούσε να οφείλεται είτε στην πρόσκρουση κομητών είτε στην ανάδυση υδρατμών από το εσωτερικό του πλανήτη. Ο Ερμής έχει ένα τεράστιο μεταλλικό πυρήνα, που καλύπτει το 75% της διαμέτρου του και είναι ο πλανήτης με τη δεύτερη μεγαλύτερη πυκνότητα, μετά τη Γη.

Μια εντελώς απρόσμενη ανακάλυψη από το διαστημόπλοιο Μάρινερ 10 είναι ότι ο Ερμής έχει μαγνητικό πεδίο, αν και ασθενές, που αντιστοιχεί περίπου στο 1% του μαγνητικού πεδίου της Γης. Σύμφωνα με την κρατούσα θεωρία της μαγνητικής γεννήτριας που προτάθηκε από τον Eugene Parker, ένας πλανήτης έχει μαγνητικό πεδίο αν διαθέτει ρευστό πυρήνα και αν περιστρέφεται γρήγορα, έτσι ώστε τα ρεύματα μεταφοράς στο αγωγίμο ρευστό υλικό του πυρήνα να παράγουν μαγνητικό πεδίο, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το ρεύμα που διατρέχει την καλωδίωση ενός ηλεκτρομαγνήτη. Αλλά η περίοδος περιστροφής του Ερμή, 58.6 ημέρες, είναι πολύ μεγάλη για να δικαιολογήσει την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου. Η κατάσταση του πυρήνα του δεν είναι σήμερα ξεκάθαρη. Το μέγεθος του πλανήτη είναι τόσο μικρό, ώστε θεωρητικά ο πυρήνας του θα έπρεπε να έχει ψυχθεί και στερεοποιηθεί σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα μετά τη δημιουργία του. Υπάρχουν όμως παρατηρήσεις με ραντάρ από τη Γη, που υποδεικνύουν ότι ο πυρήνας του εξακολουθεί να είναι σε ρευστή κατάσταση.



Εικόνα 38: Φωτογραφία του πλανήτη Ερμή από το διαστημόπλοιο Messenger. Ο χρωματισμός έχει αποδοθεί ψηφιακά με την χρήση εικόνων από την καμπάνια απεικόνισης χρωματικών βασικών χαρτών κατά τη διάρκεια της κύριας αποστολής του Messenger (NASA)

2.6.1.2 Αφροδίτη

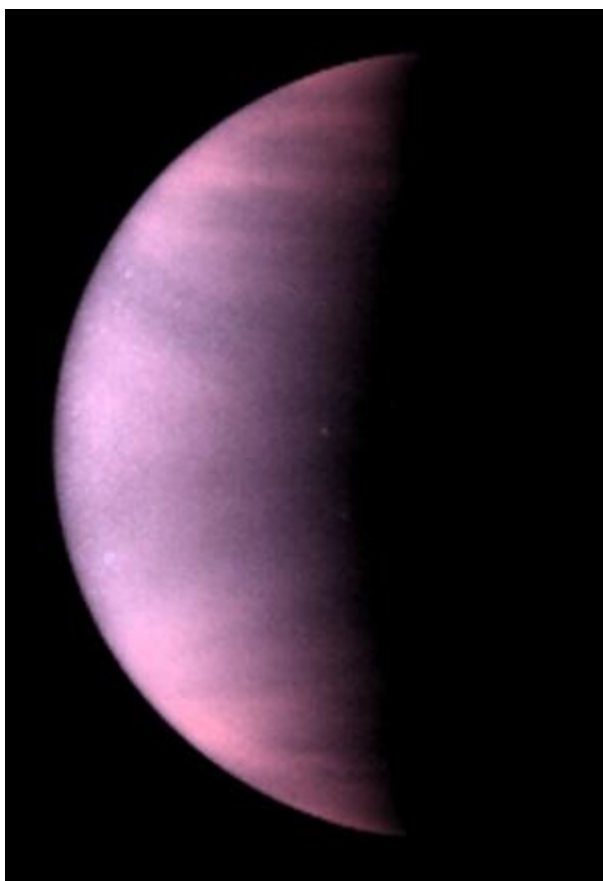
Η Αφροδίτη και η Γη συχνά αναφέρονται ως «δίδυμες», επειδή είναι παρόμοιες σε μέγεθος, μάζα, πυκνότητα και σύνθεση. Ωστόσο οι ομοιότητες τελειώνουν εκεί.

Παρά το γεγονός ότι η Αφροδίτη δεν είναι ο πλησιέστερος προς τον Ήλιο πλανήτης, είναι ο θερμότερος, λόγω του ισχυρού φαινομένου του θερμοκηπίου που προκαλεί η πυκνή ατμόσφαιρά του, η οποία αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Αφροδίτης φτάνει τους 465 °C, πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του μολύβδου. Λόγω της μεγάλης μάζας της ατμόσφαιρας, η πίεση στην επιφάνεια του πλανήτη είναι 92 ατμόσφαιρες.

Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, η ατμόσφαιρα της Αφροδίτης περιέχει επίσης άζωτο και νέφη θεικού οξέος. Η επιφάνεια και η ατμόσφαιρα της Αφροδίτης είναι εξαιρετικά άνυδρες. Πιστεύεται ότι όσο νερό υπήρχε στον πλανήτη διέφυγε με τον εξής μηχανισμό. Το νερό βρισκόταν, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της επιφάνειας του πλανήτη, στην αέρια φάση. Επειδή οι υδρατμοί είναι ελαφρότεροι από το διοξείδιο του άνθρακα, ανέβηκαν στην κορυφή της ατμόσφαιρας, όπου η υπερϊώδης ηλιακή ακτινοβολία διέσπασε τα μόρια του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Στη συνέχεια το υδρογόνο διέφυγε, επειδή τα άτομά του, λόγω της μικρής μάζας τους, είχαν ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαφυγής.

Περίπου τα 2/3 της επιφάνειας της Αφροδίτης καλύπτονται από επίπεδες, ομαλές πεδιάδες διάσπαρτες με ηφαίστεια, ορισμένα από τα οποία είναι ακόμα και σήμερα ενεργά. Το υπόλοιπο 1/3 αποτελείται από έξι ορεινές περιοχές.

Η Αφροδίτη περιστρέφεται δεξιόστροφα (δηλαδή με φορά αντίθετη προς αυτήν της Γης) και πολύ αργά. Αυτή η αργή περιστροφή, σε συνδυασμό με την απουσία ρευμάτων μεταφοράς θερμότητας από τον θερμό πυρήνα προς την επιφάνεια επειδή η επιφάνεια είναι ήδη θερμή, οδηγεί στην απουσία μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 39: Φωτογραφία της Αφροδίτης με υπεριώδες φως από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble, που λήφθηκε στις 24 Ιανουαρίου 1995 όταν η Αφροδίτη βρισκόταν σε απόσταση 113,6 εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τη Γη.

2.6.1.3 Άρης

Ο Άρης, ακόμη και με γυμνό μάτι, φαίνεται κοκκινωπός, λόγω των οξειδίων του σιδήρου που έχει στην επιφάνειά του, σε μορφή πετρωμάτων και σκόνης (ρεγολίθος – regolith). Ο Άρης διαθέτει αραιή ατμόσφαιρα από νερό, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα και έχει στους πόλους του στρώμα από παγωμένο νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Η γεωλογική διαμόρφωσή του έχει στοιχεία σημαντικά πιο έντονα από τα αντίστοιχα της Γης. Έχει ένα ηφαίστειο ύψους 25 χιλιομέτρων και μια κοιλάδα βάθους 10 και μήκους 4.000 χιλιομέτρων. Η μέση θερμοκρασία του Άρη είναι -60°C αλλά κυμαίνεται από -125°C το χειμώνα στους πόλους έως 20°C το μεσημέρι στον ισημερινό.

Ο πλανήτης μοιάζει σε δύο σημεία με τη Γη: η περίοδος περιστροφής του είναι 24,65 ώρες και η λόξωση του (obliquity) 25,19 μοίρες, και τα δύο παρόμοια με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της Γης (περίοδος περιστροφής 24 ώρες και λόξωση 23,47 μοίρες). Αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια του ημερονύκτιου είναι περίπου όση και της Γης και ότι η ποσότητα του ηλιακού φωτός που πέφτει σε κάποιο μέρος του πλανήτη διαφέρει σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, δίνοντας στον Άρη εποχές. Ο Άρης τη σημερινή εποχή δεν έχει μαγνητικό πεδίο μεγάλης κλίμακας, αν και υπάρχουν περιοχές στην επιφάνειά του που είναι μαγνητισμένες. Ο Άρης έχει δύο δορυφόρους, τον Φόβο και τον Δείμο. Τα σώματα αυτά είναι μικρά σε μέγεθος, με διαμέτρους 27 και 15 χιλιόμετρα αντίστοιχα, γι' αυτό και το σχήμα τους δεν είναι σφαιρικό. Και οι δύο δορυφόροι είναι διάσπαρτοι από κρατήρες, ένα χαρακτηριστικό

κοινό για όλα τα σώματα του Ηλιακού Συστήματος που δεν έχουν ατμόσφαιρα και είναι γεωλογικά ανενεργά (όπως π.χ. η Σελήνη και ο Ερμής). Αν ένα από τα δύο αυτά χαρακτηριστικά λείπει, τότε είτε η ατμοσφαιρική είτε η γεωλογική δραστηριότητα σβήνουν τα σημάδια των κρατήρων πρόσκρουσης σε χρονικές κλίμακες πολύ μικρότερες από την ηλικία του Ηλιακού Συστήματος.



Εικόνα 40: Κοντινή φωτογραφία του πλανήτη Άρη κατά τη διάρκεια καταιγίδας σκόνης. Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble της NASA, φωτογράφησε τον Άρη στις 18 Ιουλίου κοντά στην πλησιέστερη προσέγγιση του στη Γη από το 2003.

2.6.2 Εξωτερικοί ή Γίγαντες Πλανήτες

Ο μεγαλύτερος σε μάζα πλανήτης του ηλιακού συστήματος είναι ο Δίας, ο οποίος ακολουθεί μια ελαφρώς ελλειπτική τροχιά (εκκεντρότητα $e = 0.05$) με μεγάλο ημιάξονα $a = 5.2$ AU. Μαζί με τον Κρόνο ($e = 0.06$, $a = 9.6$ AU), τον Ουρανό ($e = 0.07$, $a = 19.2$ AU) και τον Ποσειδώνα ($e = 0.01$, $a = 30.1$ AU) αποτελούν τους γίγαντες πλανήτες. Οι πλανήτες αυτοί χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στους αέριους γίγαντες (gas giants, Δίας και Κρόνος) και στους παγωμένους γίγαντες (ice giants, Ουρανός και Ποσειδώνας).

Οι αέριοι γίγαντες έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα από τους υπόλοιπους πλανήτες, με το Δία να έχει μάζα περίπου 340 φορές τη μάζα της Γης (M_{Γ}), και τον Κρόνο να έχει μάζα περίπου $120 M_{\Gamma}$. Βέβαια, ακόμη και ο μεγαλύτερος πλανήτης Δίας έχει μόλις το 0.001 της μάζας του Ήλιου (M_{\odot}). Έτσι, αν μπορούσαμε να παρατηρήσουμε το ηλιακό σύστημα από μακριά, πιθανότατα θα μπορούσαμε να αντιληφθούμε την ύπαρξη μόνο των δύο αέριων γιγάντων. Οι παγωμένοι γίγαντες, Ουρανός και Ποσειδώνας, έχουν μάζα περίπου $20 M_{\Gamma}$ και $17 M_{\Gamma}$ αντίστοιχα.

Εκτός από τη μεγάλη διαφορά μάζας, η κύρια διαφορά των αέριων από τους παγωμένους γίγαντες έχει να κάνει με τη χημική σύστασή τους. Περισσότερο από το

90% της μάζας του Δία και του Κρόνου αποτελείται από αέριο υδρογόνο (H) και ήλιο (He), με το υπόλοιπο ποσοστό μάζας να αντιστοιχεί σε έναν στερεό πυρήνα (solid core) με μάζα $\sim 10 M_{\Gamma}$. Αντίθετα, η σύσταση των παγωμένων γιγάντων κυριαρχείται από πετρώματα, νερό (H_2O), αμμωνία (NH_3) και μεθάνιο (CH_4), που τους δίνει το χαρακτηριστικό κυανό χρώμα και μόλις 1 – 4 M_{Γ} σε υδρογόνο (H) και ήλιο (He). Παρά τη φαινομενικά μεγάλη διαφορά στη σύσταση, οι δύο υποκατηγορίες έχουν ένα πολύ βασικό κοινό χαρακτηριστικό: στερεό πυρήνα με μάζα $\sim 10 M_{\Gamma}$. Αυτή η παρατήρηση έχει οδηγήσει στη γενική παραδοχή του βασικού θεωρητικού προτύπου για το σχηματισμό γιγάντων πλανητών, σύμφωνα με το οποίο ο σχηματισμός ενός στερεού πυρήνα αυτού του μεγέθους αποτελεί το πρώτο στάδιο σχηματισμού των γιγάντων πλανητών καθώς και βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω προσαύξηση μάζας.

Αξίζει να σημειωθεί η παράδοξη περιστροφική κίνηση του Ουρανού. Είναι ο μόνος γιγάντιος πλανήτης με *ανάδρομη ιδιοπεριστροφή* (retrograde rotation), καθώς η κλίση του άξονα περιστροφής του ως προς την εκλειπτική είναι 98° . Πιθανές ερμηνείες αυτού του φαινομένου είναι η ενδεχόμενη σύγκρουση του Ουρανού με ένα μικρότερο πλανήτη κατά το απώτερο παρελθόν, ή πιθανές ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους του άξονα περιστροφής λόγω κάποιου παροδικού συντονισμού μεταξύ της περιστροφικής κίνησης του πλανήτη και των έντονα μεταβαλλόμενων τροχιών των μεγάλων πλανητών, κατά τα πρώτα στάδια σχηματισμού του συστήματος.

Τέλος, σημειώνουμε ότι όλοι οι γίγαντες πλανήτες έχουν αρκετά ισχυρό μαγνητικό πεδίο, κάτι το οποίο μπορεί να αποδοθεί στη διαφορική περιστροφή του στερεού πυρήνα τους, ως προς το ρευστό μανδύα που τον περιβάλλει.

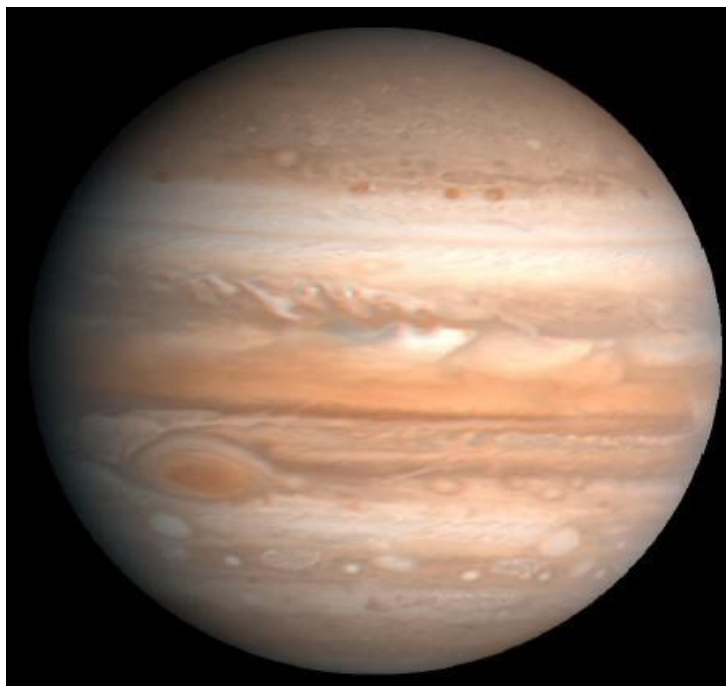
2.6.2.1 Δίας

Ο Δίας είναι ο μεγαλύτερος πλανήτης του Ηλιακού Συστήματος. Η μάζα του είναι περισσότερο από διπλάσια από το σύνολο των μαζών των υπόλοιπων σωμάτων του Ηλιακού Συστήματος και αν ήταν 80 φορές μεγαλύτερη ο Δίας θα ήταν αστέρας και όχι πλανήτης. Η σύσταση της ατμόσφαιράς του μοιάζει με τη σύσταση του Ήλιου, που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο.

Οι πολύχρωμες φωτεινές και σκοτεινές ζώνες του οφείλονται σε ισχυρούς ανέμους στην ανώτερη ατμόσφαιρά του, οι οποίοι φυσούν στην κατεύθυνση Ανατολής – Δύσης. Τα λευκά σύννεφα αποτελούνται από κρυστάλλους αμμωνίας ενώ τα πιο σκούρα στην παρουσία άλλων χημικών ενώσεων. Το σχήμα των ζωνών και το χρώμα τους αλλάζουν σε χρονικές κλίμακες της τάξης των μηνών. Το πιο εκπληκτικό χαρακτηριστικό στον Δία είναι αναμφίβολα η *Μεγάλη Ερυθρά Κηλίδα*, ένας γιγαντιαίος αντι-κυκλώνας με διάμετρο $\sim 40,000$ χιλιόμετρα, που διαρκεί πάνω από 300 χρόνια. Το χρώμα της κηλίδας, που οφείλεται μάλλον στην παρουσία ενώσεων του θείου και του φωσφόρου, καθώς και το σχήμα της μεταβάλλονται αισθητά σε χρονικές κλίμακες επίσης μηνών.

Ο Δίας έχει μαγνητικό πεδίο $\sim 20,000$ φορές ισχυρότερο από αυτό της Γης. Περιστρέφεται πιο γρήγορα από κάθε άλλο πλανήτη, με περίοδο λίγο μικρότερη από 10 ώρες. Γι' αυτόν το λόγο η ισημερινή ακτίνα του είναι 7% μεγαλύτερη από την πολική. Ο πυρήνας του ισοδυναμεί με ~ 10 φορές τη μάζα της Γης, και περιβάλλεται από ένα στρώμα υγρού μεταλλικού υδρογόνου που εκτείνεται έως το 80% – 90% της ακτίνας του, το οποίο με τη σειρά του περιβάλλεται από ατμόσφαιρα κυρίως αερίου υδρογόνου. Περιβάλλεται από τρεις αμυδρούς δακτυλίους, που ανακαλύφθηκαν από

το διαστημόπλοιο Voyager 1 το 1979. Σε δύο περιοχές της τροχιάς του Δία που απέχουν 60° εκατέρωθεν του Δία, γύρω από τα σημεία ευσταθούς ισορροπίας Lagrange, είναι συγκεντρωμένοι πολλοί αστεροειδείς που ονομάζονται Τρωικοί.



Εικόνα 41: Φωτογραφία του πλανήτη Δία από το διαστημόπλοιο Voyager 1 (NASA)

Ο Δίας έχει τουλάχιστον 63 δορυφόρους. Από αυτούς οι τέσσερις μεγαλύτεροι, Ιώ, Ευρώπη, Γανυμήδης και Καλλιστώ, ανακαλύφθηκαν από τον Γαλιλαίο και είναι γνωστοί ως γαλιλαϊκοί δορυφόροι.

Ο Γανυμήδης είναι ο μεγαλύτερος δορυφόρος στο Ηλιακό Σύστημα, μεγαλύτερος σε διαστάσεις από τον Ερμή και τον Πλούτωνα ακόμη. Έχει όμως μόνο το $1/2$ της μάζας του Ερμή, κάτι που συμφωνεί με την άποψη ότι στο αρχέγονο νέφος, από το οποίο δημιουργήθηκε το Ηλιακό Σύστημα, τα βαριά στοιχεία είχαν συγκεντρωθεί «κάτω» (προς τον Ήλιο) και τα ελαφρά «επάνω» (μακριά από τον Ήλιο). Είναι επίσης ο μόνος δορυφόρος που είναι γνωστό ότι έχει μαγνητικό πεδίο. Ο Γανυμήδης έχει μια ασυνήθιστη δομή, καθώς ένας μεγάλος υπόγειος υδάτινος ωκεανός βρίσκεται μεταξύ δύο στρωμάτων πάγου. Ίσως μάλιστα να υπάρχει και αλληλουχία περισσότερων στρωμάτων πάγου και νερού. Ο Γανυμήδης συμμετέχει στον τροχιακό συντονισμό του Laplace 1:2:4 με άλλους δύο από τους γαλιλαϊκούς δορυφόρους, την Ευρώπη και την Ιώ.

Η Ιώ είναι το πιο ηφαιστειακά ενεργό σώμα στο Ηλιακό Σύστημα. Το θείο που εκλύεται από τα ηφαιστεια της, δίνει στην Ιώ ένα κίτρινο-πορτοκαλί χρώμα. Η αιτία της ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι οι παλίρροιες της στερεής επιφάνειάς της, οι οποίες οφείλονται στη βαρυτική έλξη του Δία και των άλλων γαλιλαϊκών δορυφόρων του. Λόγω της περιοδικής ανύψωσης και καταβύθισης της επιφάνειάς της Ιούς, αναπτύσσεται τριβή η οποία μετατρέπει το μηχανικό έργο σε θερμότητα και λιώνει τα πετρώματα στο εσωτερικό της.

Η επιφάνεια της Ευρώπης αποτελείται κυρίως από παγωμένο νερό που διασχίζεται από μακριές ρωγμές. Κάτω από τον πάγο πιστεύεται ότι υπάρχει ένας τεράστιος

ωκεανός, που περιέχει διπλάσια ποσότητα νερού από αυτό της Γης και θα μπορούσε να φιλοξενεί ζωή.

Τέλος η Καλλιστώ έχει τη μικρότερη ανακλαστικότητα (albedo) από τους τέσσερις γαλιλαϊκούς δορυφόρους, κάτι που υποδηλώνει ότι η επιφάνειά της μπορεί να αποτελείται από σκοτεινά, άχρωμα πετρώματα.



Εικόνα 42: Σύγκριση του μεγέθους των τεσσάρων γαλιλαϊκών δορυφόρων του Δία. Από αριστερά κατά σειρά αύξουσας απόστασης από τον Δία: Ιώ, Ευρώπη, Γανυμήδης, Καλλιστώ. Οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί από το διαστημόπλοιο Galileo Orbiter (NASA)

2.6.2.2 Κρόνος

Ο Κρόνος είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος πλανήτης στο Ηλιακό Σύστημα και, όπως και ο Δίας, αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο. Οι κίτρινες και χρυσαφές ζώνες που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα του Κρόνου είναι το αποτέλεσμα ισχυρών ανέμων στην ανώτερη ατμόσφαιρα του πλανήτη. Η ταχεία περιστροφή του πλανήτη δίνει στον Κρόνο το σχήμα ελλειψοειδούς εκ περιστροφής, με την ισημερινή ακτίνα του να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την πολική.

Ο Κρόνος έχει μαγνητικό πεδίο περίπου 555 φορές πιο ισχυρό από αυτό της Γης. Ο πυρήνας του αποτελείται από σίδηρο και πετρώματα 10-20 φορές μεγαλύτερης μάζας από της Γης και περιβάλλεται από μανδύα αμμωνίας, μεθανίου και νερού, ο οποίος με τη σειρά του περιβάλλεται από ένα στρώμα υγρού μεταλλικού υδρογόνου και αερίου ηλίου. Στο όριο με την ατμόσφαιρά του το υδρογόνο βρίσκεται στην αέρια φάση.

Ο Κρόνος έχει τουλάχιστον 62 δορυφόρους. Δεδομένου ότι ο πλανήτης ονομάστηκε από τον θεό Κρόνο, άρχοντα των Τιτάνων στην ελληνική μυθολογία, οι περισσότεροι από τους δορυφόρους του έχουν πάρει το όνομά τους από τους Τιτάνες και τους απογόνους τους, καθώς και από μύθους των Εσκιμώων, των Γαλατών και των Νορβηγών. Ο μεγαλύτερος δορυφόρος του Κρόνου, ο Τιτάνας, είναι ελαφρά μεγαλύτερος από τον Ερμή και είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος δορυφόρος στο Ηλιακό Σύστημα μετά τον Γανυμήδη. Ο Τιτάνας περιβάλλεται από μια πυκνή, πλούσια σε άζωτο ατμόσφαιρα, η οποία περιέχει υδρογονάνθρακες, κυρίως μεθάνιο, το οποίο υγροποιείται και πέφτει στην επιφάνειά του υπό μορφή βροχής. Οι δορυφόροι Παν και Άτλας έχουν περίεργο ελλειψοειδές σχήμα, ενώ ο Ιαπετός έχει τη μία πλευρά του τόσο φωτεινή όσο το χιόνι και την άλλη τόσο σκοτεινή όσο ο άνθρακας. Ο Εγκέλαδος έχει μεγάλο αριθμό από θερμοπίδακες (geyser) στο νότιο πόλο του. Μερικοί από τους δορυφόρους, όπως ο Προμηθέας και η Πανδώρα, συγκρατούν το υλικό των γνωστών δακτυλίων του πλανήτη και τους εμποδίζουν να διαλυθούν.

Τους δακτυλίους παρατήρησε πρώτος ο Γαλιλαίος με το πρωτόγονο τηλεσκόπιο του, θεωρώντας ότι είναι προέκταση του πλανήτη. Στη συνέχεια, μετά από παρατηρήσεις από επίγεια τηλεσκόπια και από την αποστολή Voyager 2, διαπιστώθηκε ότι ο Κρόνος έχει δεκάδες δακτυλίων που αποτελούνται από σωματίδια τυπικής διαμέτρου από ένα χιλιοστόμετρο μέχρι 10 μέτρα. Παρόλο που οι δακτύλιοι απέχουν χιλιάδες χιλιόμετρα από τον πλανήτη, έχουν τυπικό πάχος μόνο 10 μέτρα, δηλαδή ουσιαστικά είναι επίπεδα αντικείμενα.



Εικόνα 43: Φωτογραφία του πλανήτη Κρόνου και των δακτυλίων του από το διαστημόπλοιο Cassini (NASA)

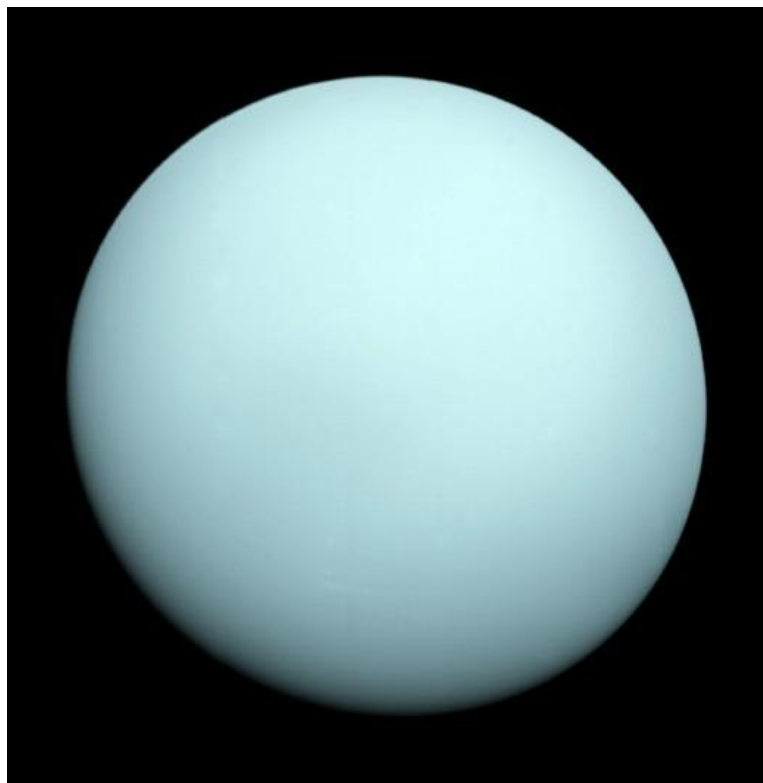
2.6.2.3 Ουρανός

Παρόλο που ο Ουρανός είναι ορατός με γυμνό οφθαλμό ως ένας αμυδρός αστέρας μεγέθους μικρότερο από 6 (που είναι και το όριο παρατήρησης σωμάτων με γυμνό οφθαλμό), ανακαλύφθηκε μόλις το 1781 από τον Άγγλο ερασιτέχνη αστρονόμο William Herschel. Κινείται πολύ αργά μεταξύ των απλανών αστέρων, αφού έχει περίοδο περιφοράς 84 έτη. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ότι ο άξονας περιστροφής του βρίσκεται σχεδόν πάνω στο επίπεδο της τροχιάς του.

Το κυανο-πράσινο χρώμα του Ουρανού οφείλεται στην παρουσία μεθανίου στην ατμόσφαιρά του, η οποία κατά τα άλλα αποτελείται από υδρογόνο και ήλιο. Το εσωτερικό του πλανήτη αποτελείται κυρίως από πάγους νερού, μεθανίου και αμμωνίας, και για το λόγο αυτό ο Ουρανός, όπως και ο αδελφός πλανήτης του Ποσειδώνας, αποκαλούνται και *παγωμένοι γίγαντες*. Ο πυρήνας του αποτελείται από μέταλλα (σίδηρο και μαγνήσιο) καθώς και πυρίτιο.

Οι μαγνητικοί πόλοι των περισσότερων πλανητών συνήθως βρίσκονται κοντά στους γεωγραφικούς. Ο Ουρανός αποτελεί εξαίρεση, αφού οι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται σε απόσταση 60° από τους γεωγραφικούς.

Ο Ουρανός ήταν ο πρώτος πλανήτης που διαπιστώθηκε ότι έχει δακτυλίους, μετά τον Κρόνο. Έχει επίσης 27 γνωστούς δορυφόρους, τα ονόματα των οποίων έχουν παρθεί από τα ονόματα πνευμάτων που αναφέρονται σε έργα του William Shakespeare και του Alexander Pope. Οι μεγαλύτεροι από αυτούς είναι ο Όμπερον, η Τιτάνια, ο Αριήλ, ο Ουμπριήλ και η Μιράντα. Ο Ουρανός έχει επίσης και σώματα που τον ακολουθούν στην περιφορά του περί τον Ήλιο ευρισκόμενα στα σημεία Lagrange, αντίστοιχα με τους Τρωικούς αστεροειδείς που ακολουθούν τον Δία.



Εικόνα 44: Φωτογραφία του πλανήτη Ουρανού από το διαστημόπλοιο Voyager 2 (NASA)

2.6.2.4 Ποσειδώνας

Ο Ποσειδώνας ήταν ο πρώτος πλανήτης του οποίου η ύπαρξη πρώτα προβλέφθηκε θεωρητικά από τον Γάλλο αστρονόμο Urbain Le Verrier και έπειτα επιβεβαιώθηκε παρατηρησιακά από τον Γερμανό αστρονόμο Johann Gottfried Galle. Η θεωρητική πρόβλεψη βασίστηκε στις παρατηρούμενες ανωμαλίες της τροχιάς του Ουρανού, οι οποίες δεν μπορούσαν να ερμηνευθούν με βάση τη βαρυτική έλξη των υπόλοιπων πλανητών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πλανήτης αυτός είχε παρατηρηθεί με τηλεσκόπιο από τον Γαλιλαίο, ο οποίος όμως τον είχε εκλάβει για απλανή αστέρα, λόγω της εξαιρετικά αργής κίνησής του μεταξύ των απλανών αστερών, αφού η περίοδος περιφοράς του περί τον Ήλιο είναι 179 έτη.

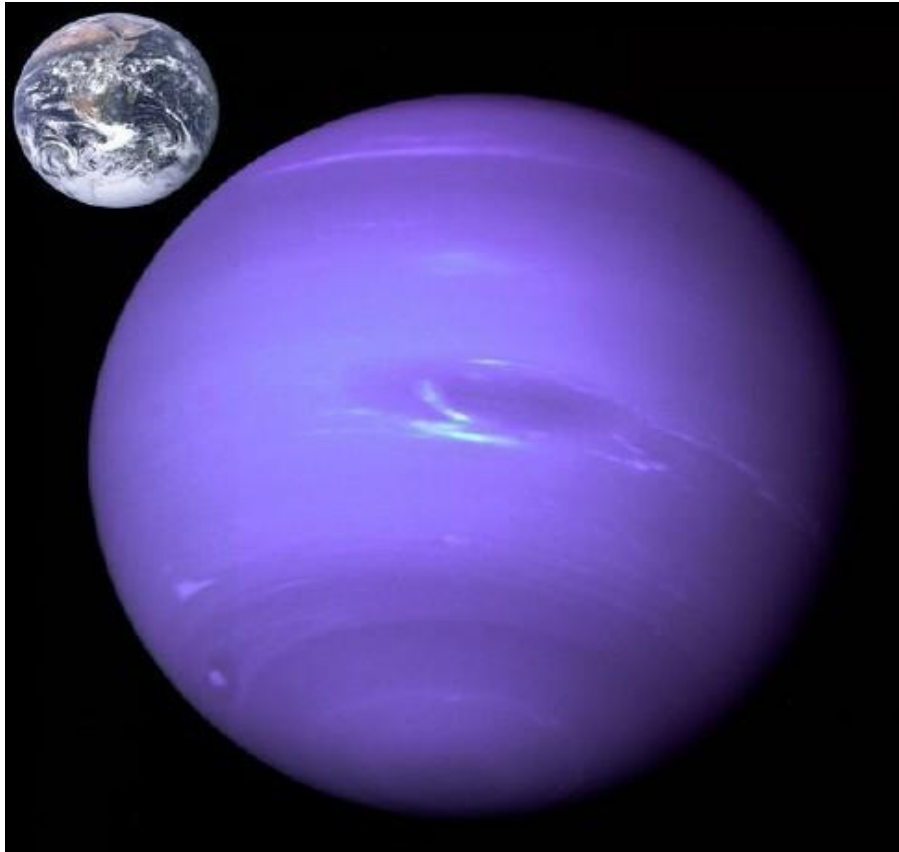
Η εικόνα του Ποσειδώνα που έχουμε από την αποστολή Voyager 2 είναι παρόμοια με αυτήν του Ουρανού. Ο πλανήτης έχει μια κυανο-πράσινη απόχρωση που οφείλεται εν μέρει στην απορρόφηση του ερυθρού τμήματος του φάσματος από το μεθάνιο της

ατμόσφαιρας, η οποία αποτελείται κατά βάση από υδρογόνο και ήλιο. Κάτω από την ατμόσφαιρά του υπάρχει, όπως και στον Ουρανό, ένας μανδύας από παγωμένο νερό, αμμωνία και μεθάνιο. Τέλος ο βραχώδης πυρήνας του από σίδηρο, μαγνήσιο και πυρίτιο έχει το μέγεθος της Γης.

Ο Ποσειδώνας έχει μαγνητικό πεδίο 27 φορές ισχυρότερο από αυτό της Γης και, όπως και στον Ουρανό, οι μαγνητικοί πόλοι του απέχουν σημαντικά από τους γεωγραφικούς, εδώ κατά 47°.

Ο Ποσειδώνας βρίσκεται σε τροχιακό συντονισμό 2:3 με τον Πλούτωνα, γεγονός που προφυλάσσει τα δύο αυτά σώματα από σύγκρουση, παρόλο που κάθε 248 χρόνια η έκκεντρη τροχιά του Πλούτωνα οδηγεί τον πλανήτη αυτόν μέσα από την τροχιά του Ποσειδώνα για 20 περίπου έτη. Λόγω του συντονισμού, τη στιγμή που ο Πλούτωνα διασχίζει την τροχιά του Ποσειδώνα ο τελευταίος βρίσκεται πάντα σε μεγάλη απόσταση από τον Πλούτωνα.

Ο Ποσειδώνας έχει 14 γνωστούς δορυφόρους, που πήραν το όνομά τους από θαλάσσιους θεούς και νύμφες της ελληνικής μυθολογίας. Ο μεγαλύτερος είναι ο Τρίτων, που είναι και ο μόνος από τους 14 δορυφόρους με σφαιρικό σχήμα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ότι περιφέρεται γύρω από τον Ποσειδώνα με φορά αντίθετη προς την φορά περιστροφής του πλανήτη. Αυτό ίσως να υποδεικνύει ότι ο Τρίτων ήταν παλαιότερα ένας νάνος πλανήτης, σαν τη Δήμητρα, ο οποίος συνελήφθη βαρυντικά από τον Ποσειδώνα σε μεταγενέστερη εποχή. Οι δακτύλιοι του Ποσειδώνα είναι ασυνήθιστοι, κατά το ότι η ύλη τους δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά μήκος των δακτυλίων, αλλά είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένα τόξα.



Εικόνα 45: Φωτογραφία του πλανήτη Ποσειδώνα από το διαστημόπλοιο Voyager 2. Το γαλαζωπό χρώμα του πλανήτη οφείλεται στο μεθάνιο της ατμόσφαιρας του. Αριστερά επάνω εικονίζεται, για σύγκριση, η Γη. Οι σχηματισμοί στο κέντρο και αριστερά κάτω είναι πιθανόν σύννεφα (NASA)

2.6.3 Νάνοι Πλανήτες

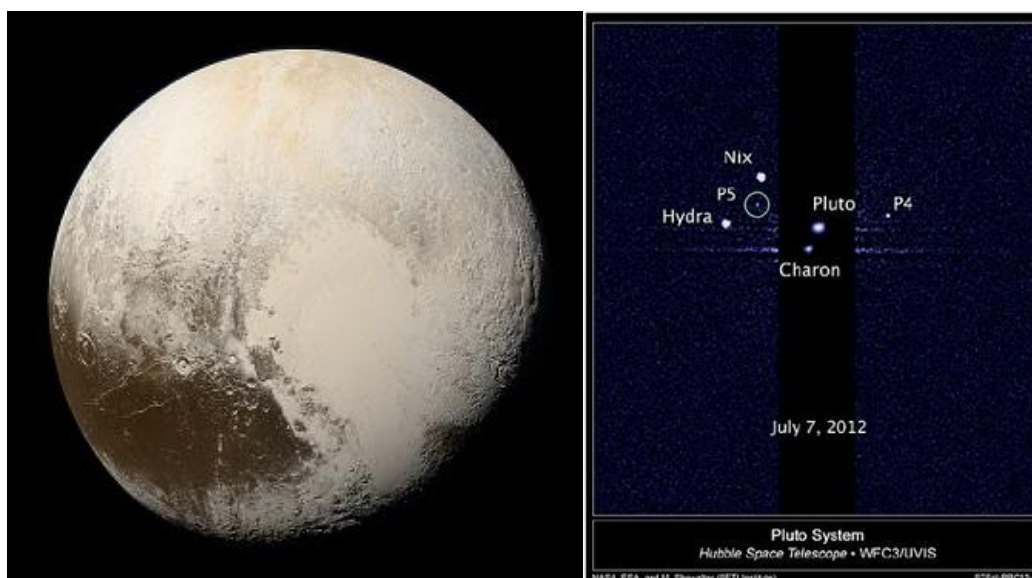
Οι πιο γνωστοί από τους νάνους πλανήτες (dwarf planets) του ηλιακού συστήματος είναι ο *Πλούτωνας* (πρώην πλανήτης, $a = 39$ AU, $e = 0.25$ και κλίση $i = 17^\circ$ ως προς την εκλειπτική) και η *Δήμητρα* (πρώην αστεροειδής, $a = 2.7$ AU). Πρόκειται για σφαιρικά αντικείμενα μικρής μάζας και διαμέτρου (~1,000 km). Επιπλέον, πρόσφατα ανακαλύφθηκαν και άλλα αντικείμενα, συγκρίσιμου μεγέθους με τον Πλούτωνα, που περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτόν. Αναμένεται μάλιστα, να ανακαλυφθούν ακόμη περισσότερα σε αυτήν την περιοχή της ζώνης Edgeworth – Kuiper. Αυτός είναι άλλωστε, ένας από τους κύριους λόγους που ώθησαν την Διεθνή Αστρονομική Ένωση (I.A.U.) να αναθεωρήσει τον ορισμό του πλανήτη.

2.6.3.1 Πλούτωνας

Η τροχιά του Πλούτωνα διαφέρει σημαντικά από τις τροχιές των οκτώ πλανητών, εξαιτίας της μεγάλης εκκεντρότητας και κλίσης του σε σχέση με το μέσο επίπεδο των τροχιών των υπόλοιπων πλανητών. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με τη μικρή μάζα του, αποτελούσαν πάντοτε μια «ενοχλητική παραφωνία» για τους επιστήμονες. Σήμερα πιστεύουμε ότι η διαδικασία σχηματισμού πλανητών έχει εξαιρετικά μικρή

αποδοτικότητα σε τόσο μεγάλες αποστάσεις από τον ήλιο (~40 AU), σε σύγκριση με την περιοχή των αέριων γιγάντων (5 – 10 AU). Με άλλα λόγια σε αποστάσεις μεγαλύτερες από τη ζώνη των γιγαντιαίων πλανητών δεν είναι δυνατό να δημιουργηθούν πλανήτες με μάζες παρόμοιες με αυτές των οκτώ πλανητών, επειδή ο ρυθμός συγκέντρωσης μάζας από τον πρωταρχικό δίσκο αερίου και σκόνης είναι χαμηλός και δεν προλαβαίνει να συγκεντρωθεί αρκετή μάζα πριν διαλυθεί ο δίσκος λόγω της πίεσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως ο Πλούτωνας, καθώς και τα υπόλοιπα αντικείμενα της περιοχής του, δε θα μπορούσαν να έχουν εξελιχθεί σε κανονικό πλανήτη.

Ο Πλούτωνας αποτελεί ουσιαστικά *διπλό σύστημα* (binary) με τον μεγαλύτερο από τους πέντε δορυφόρους του, τον *Χάροντα*. Μάλιστα, είναι το μόνο διπλό σύστημα σωμάτων στο ηλιακό σύστημα που το κέντρο μάζας του βρίσκεται έξω από την φυσική ακτίνα του μεγαλύτερου σώματος (Πλούτωνας). Αυτό οφείλεται στον σχετικά μεγάλο λόγο μαζών (~1/10) των δύο σωμάτων. Η αποστολή New Horizons της NASA, που έφτασε στον Πλούωνα το καλοκαίρι του 2015, αναμένεται να δώσει σημαντικά αποτελέσματα.



Εικόνα 46: Φωτογραφία του νάνου πλανήτη Πλούωνα τραβηγμένη από το διαστημόπλοιο New Horizons το 2015 (αριστερά). Ο νάνος πλανήτης Πλούτωνας και το σύστημα των 5 γνωστών, μέχρι σήμερα, δορυφόρων του (δεξιά) (NASA)

2.6.3.2 Δήμητρα

Η Δήμητρα που, περιλαμβανόταν στον κατάλογο των αστεροειδών αλλά πρόσφατα αναβαθμίστηκε σε νάνο πλανήτη, είναι το πρώτο κατά χρονολογική σειρά ανακάλυψης, μικρό σώμα του Ηλιακού Συστήματος. Ανακαλύφθηκε από τον ιερέα Giuseppe Piazzi την πρωτοχρονιά του 1801. Βρίσκεται περίπου στο μέσον της ζώνης των αστεροειδών (asteroid belt), άρα όχι πολύ μακριά από τη Γη, κι έτσι είναι εύκολα προσβάσιμη σε διαστημικές αποστολές. Η αποστολή Dawn της NASA έφτασε στην Δήμητρα την άνοιξη του 2015, έχοντας ήδη αφιερώσει ένα χρόνο μελετώντας τον αστεροειδή *Εστία* (Vesta).



Εικόνα 47: Ο νάνος πλανήτης Δήμητρα φωτογραφημένος από το διαστημόπλοιο Αυγή (Dawn) το 2015 (NASA)

2.6.4 Δορυφόροι και Δακτύλιοι

Μια ματιά στους σχετικούς πίνακες αρκεί για να γίνει αντιληπτή μια ακόμη διαφορά μεταξύ των γιγάντιων και των γήινων πλανητών. Οι πρώτοι περιβάλλονται από πολυπληθή συστήματα δορυφόρων και δακτυλίων σκόνης, ενώ οι δεύτεροι έχουν από κανέναν μέχρι δύο δορυφόρους.

Συγκεκριμένα ο Ερμής και η Αφροδίτη δεν έχουν δορυφόρους. Η Γη έχει έναν δορυφόρο, τη Σελήνη, και ο Άρης έχει δύο, τον Φόβο και τον Δείμο. Με μια προσεκτικότερη ματιά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η Σελήνη είναι σφαιρική και η μάζα της είναι περίπου το 1/80 της μάζας της Γης, ενώ οι δύο δορυφόροι του Άρη έχουν αναλογικά πολύ μικρότερη μάζα και σχετικά ασύμμετρο σχήμα. Αυτές οι διαφορές καταδεικνύουν πιθανόν διαφορετική διαδικασία σχηματισμού για κάθε σύστημα.

Το επικρατέστερο μοντέλο για τη δημιουργία της Σελήνης είναι αυτό της σύγκρουσης της πρωτο-Γης με έναν άλλο πρωτο-πλανήτη, συγκρίσιμο σε μάζα με τον Άρη. Τα θραύσματα μιας τέτοιας σύγκρουσης θα μπορούσαν να επανενωθούν σχετικά γρήγορα, δημιουργώντας έτσι τη Σελήνη. Αυτό το μοντέλο ερμηνεύει την αξιοπρόσεκτη ομοιότητα που έχει η σύσταση των πετρωμάτων της Σελήνης με αυτών της Γης. Αντίθετα, η πιθανότερη ερμηνεία για την ύπαρξη των δορυφόρων του Άρη είναι η *βαρυτική παγίδευση* τους (gravitational trapping). Σύμφωνα με αυτήν τη θεωρία, οι δύο δορυφόροι του Άρη δεν είναι παρά δύο μικροί πλανητοειδείς (planetesimals), από αυτούς που απετέλεσαν τους δομικούς λίθους των πλανητών, οι οποίοι περνώντας κοντά από τον Άρη, συλλήφθηκαν από αυτόν λόγω της παρουσίας εκείνη τη στιγμή κάποιου τρίτου σώματος.



Εικόνα 48: Η Σελήνη φωτογραφημένη από το Βόρειο Ημισφαίριο της Γης

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η ύπαρξη των δορυφόρων των γήινων πλανητών οφείλεται μάλλον σε «σύμπτωση», όσο μπορεί να θεωρηθεί σύμπτωση ένα φαινόμενο το οποίο επαναλήφθηκε εκατομμύρια φορές (συγκρούσεις), προκειμένου να φτιαχτούν τελικά οι πλανήτες. Η «σύμπτωση» έχει να κάνει με τη χρονική περίοδο που αυτά τα γεγονότα συνέβησαν, όταν ο σχηματισμός των πλανητών ήταν προς το τέλος του και η αριθμητική πυκνότητα των πλανητοειδών ήταν πια πολύ μικρή, σε σχέση με πριν.

Αντίθετα, ευνοϊκές συνθήκες για το σχηματισμό δορυφόρων φαίνεται ότι επικρατούν στη γειτονιά ενός γιγάντιου πλανήτη. Όλοι οι γίγαντες περιβάλλονται από ένα ολιγομελές σύστημα κανονικών δορυφόρων (regular satellites), των οποίων οι τροχιές είναι σχεδόν τέλειοι κύκλοι, με μικρή σχετικά ακτίνα και πάνω στο επίπεδο του ισημερινού του. Επίσης, από ένα πολυπληθές σύστημα πολύ μικρότερων, μη-κανονικών δορυφόρων (irregular satellites), που κινούνται σε πολύ ελλειπτικές τροχιές, σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον πλανήτη και με τροχιακές κλίσεις που μπορεί να έχουν οποιαδήποτε τιμή (από 0 έως 180°) και τέλος από ένα σύστημα ισημερινών δακτυλίων (rings) που αποτελούνται από πολύ μικρά, στερεά υπολείμματα (debris), πιθανότατα τα απομεινάρια της διαδικασίας σχηματισμού των δορυφόρων.

Η εικόνα που εμφανίζουν οι γίγαντες πλανήτες είναι αυτή μιας *μικρογραφίας* ενός πλανητικού συστήματος. Είναι μάλιστα σχεδόν βέβαιο ότι η διαδικασία σχηματισμού των δορυφόρων των γιγάντιων πλανητών μοιάζει αρκετά με τη διαδικασία σχηματισμού των πλανητών. Ένας *δίσκος πρωτο-δορυφόρων* (proto-satellite disc) που αποτελείται κυρίως από στερεά υλικά (πλανητοειδείς με μέγεθος μερικών χιλιομέτρων) περιβάλλει αρχικά τον πλανήτη. Μέσω διαδοχικών συγκρούσεων

σχηματίζεται ένας μικρός αριθμός μεγάλων (κανονικών) δορυφόρων. Το υπόλοιπο υλικό σχηματίζει τους μικρότερους (μη-κανονικούς) δορυφόρους και τους δακτυλίους.

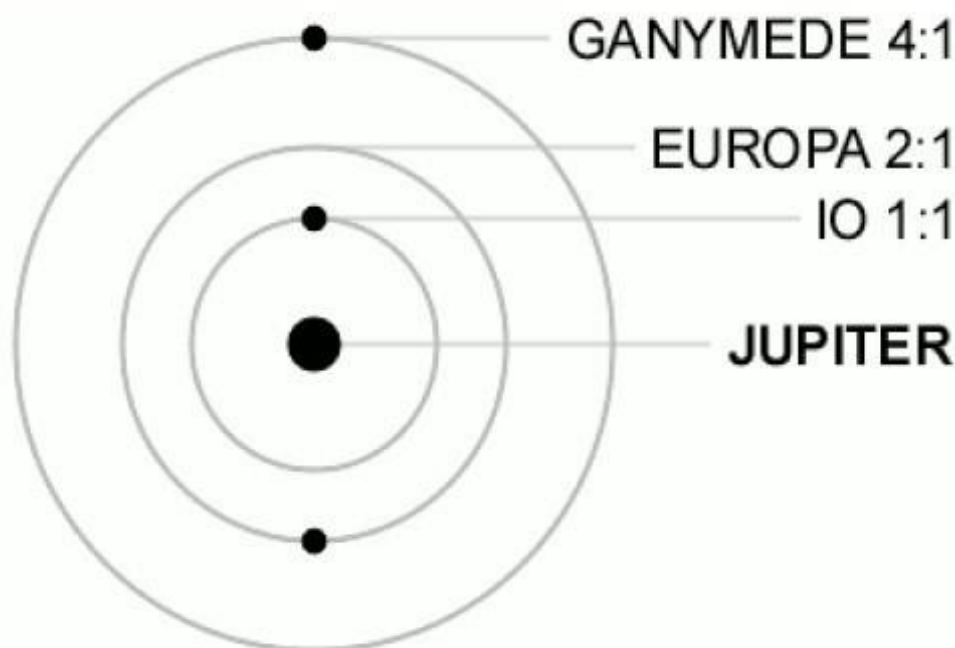


Εικόνα 49: Ο Δίας με τους τέσσερις γαλιλαϊκούς δορυφόρους του

Σε αυτό το γενικό θεωρητικό σχήμα, αξίζει να σημειώσουμε δύο μικρές παραφωνίες. Πρώτον πως ο μεγαλύτερος δορυφόρος του Ποσειδώνα, ο Τρίτωνας, είναι μη-κανονικός με την κλίση του επιπέδου της τροχιάς του να είναι ίση με 157° ως προς τον ισημερινό του πλανήτη, κάτι που συνηγορεί μάλλον υπέρ της βαρυτικής σύλληψης του Τρίωνα παρά υπέρ του σχηματισμού του σύμφωνα με το γενικό σενάριο, και δεύτερον ότι οι δακτύλιοι του Κρόνου είναι, ως γνωστόν, πολύ πιο φωτεινοί, σε σχέση με τους δακτυλίους των υπόλοιπων γιγάντων, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη επιφανειακή πυκνότητά τους. Χωρίς να υπάρχει γενικώς αποδεκτή ερμηνεία γι' αυτό το φαινόμενο, είναι πιθανό οι δακτύλιοι του Κρόνου να εμπλουτίστηκαν με επιπλέον υλικό, το οποίο προήλθε από τη διάλυση, μέσω σύγκρουσης, ενός δορυφόρου που βρισκόταν κάποτε στη γειτονιά των δακτυλίων του. Έτσι, είναι πιθανό οι δακτύλιοι του Κρόνου, όπως παρατηρούνται σήμερα, να μην αποτελούν αρχέγονο σχηματισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τροχιές των κανονικών δορυφόρων των γιγάντων πλανητών τείνουν να σχηματίζουν *συντονισμούς τροχιακών περιόδων* (orbital resonances). Πιο χαρακτηριστικός είναι ο τριπλός συντονισμός, ο ονομαζόμενος *συντονισμός του Laplace* που είναι ο συντονισμός μεταξύ τριών ή περισσότερων σωμάτων, με λόγους τροχιακών περιόδων απλούς ακέραιους αριθμούς. Σημειώνεται ότι ο συντονισμός Laplace 1:2:4 δεν φαίνεται να είναι σπάνιος, αφού εμφανίζεται και στο εξωπλανητικό σύστημα Gliese 876e, b και c. Στο ηλιακό μας σύστημα ο συντονισμός του Laplace συναντάται μεταξύ των τριών πλησιέστερων προς το Δία

κανονικών δορυφόρων του Ιώ, Ευρώπη και Γανυμήδη. Συγκεκριμένα, οι τροχιές των τριών αυτών σωμάτων έχουν λόγο περιόδων 1:2:4, δηλαδή για κάθε μία περιφορά του Γανυμήδη γύρω από το Δία, η Ευρώπη εκτελεί δύο και η Ιώ τέσσερις περιφορές.



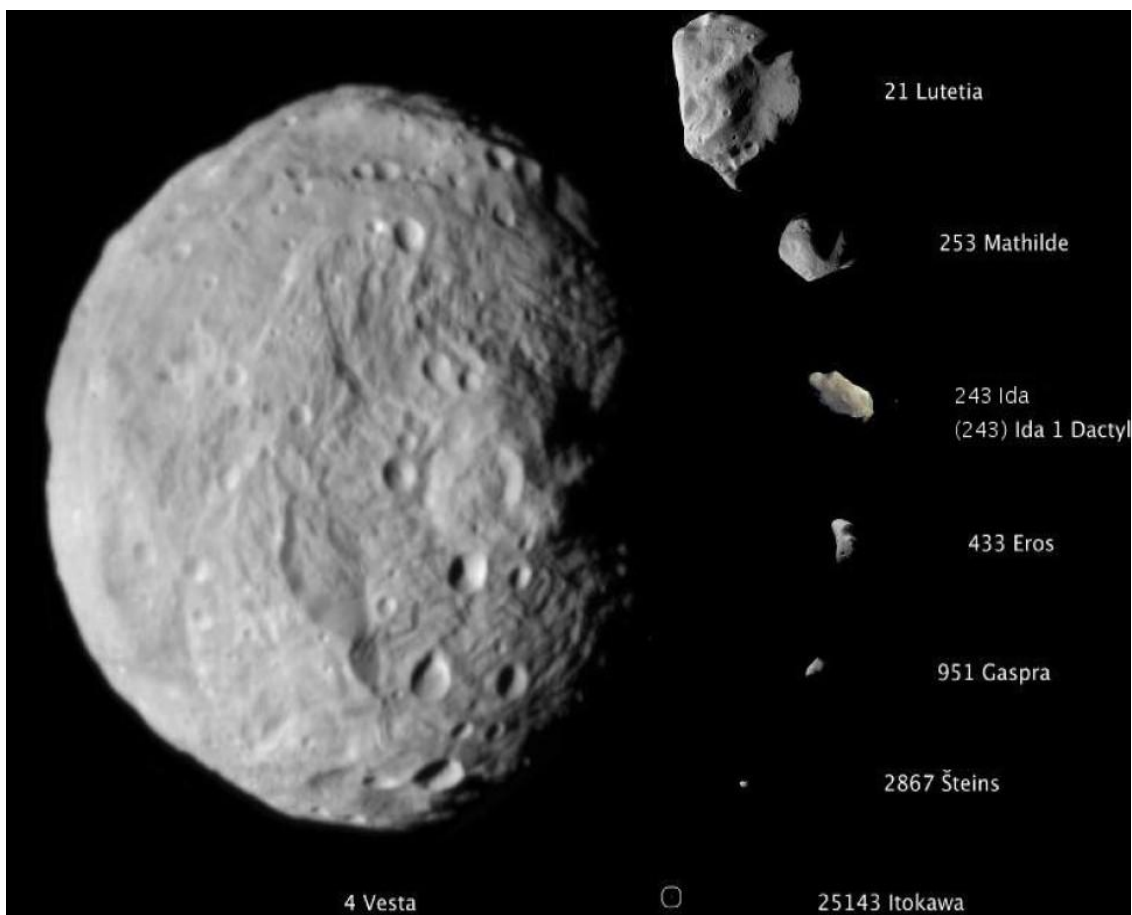
Εικόνα 50: Σκαρίφημα για την επεξήγηση του συντονισμού Laplace 1:2:4 μεταξύ τριών από τους γαλιλαϊκούς δορυφόρους του Δία

Παρόμοιες σχέσεις ρητού συντονισμού μπορεί κανείς να εντοπίσει ανάμεσα και σε δορυφόρους του Κρόνου. Επίσης, αρκετοί δορυφόροι βρίσκονται πολύ κοντά σε αντίστοιχους συντονισμούς. Η ύπαρξη των συντονισμένων αυτών κινήσεων οφείλεται στην τάση που χαρακτηρίζει τα βαρυτικά συστήματα με μικρό αριθμό σωμάτων, να σχηματίζουν συντονισμούς κατά τη διαδικασία σχηματισμού τους. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει η ύπαρξη μη συντηρητικών δυνάμεων, που οδηγούν σε μικρές, συνεχείς μεταβολές της μηχανικής ενέργειας των σωμάτων. Ένα παράδειγμα μη συντηρητικής δύναμης είναι αυτή που εμφανίζεται λόγω της απώλειας μηχανικής ενέργειας ενός δορυφόρου που υφίσταται ένα σύστημα πλανήτη – δορυφόρου, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ παρακείμενων στρωμάτων στο εσωτερικό του δορυφόρου. Το φαινόμενο αυτό, εκτός από τη μεταβολή της τροχιάς των δορυφόρων, προκαλεί και την εμφάνιση ηφαιστειακής δραστηριότητας σε κάποιους από αυτούς, όπως η Ιώ και ο Εγκέλαδος (δορυφόρος του Κρόνου). Επίσης, οι παλιρροιογόνες δυνάμεις των πλανητών προκαλούν τη *μηχανική παραμόρφωση* (mechanical deformation) της επιφάνειας των δορυφόρων, κάτι που μπορεί να είναι παρατηρήσιμο. Έτσι, η παγωμένη Ευρώπη εμφανίζει ρωγμές στην επιφάνειά της, που υποδηλώνουν την ύπαρξη υγρού ωκεανού κάτω από το περίβλημα του πάγου, καθιστώντας την υποψήφια για φιλοξενία κάποιας μορφής υποθαλάσσιας ζωής.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετοί δορυφόροι, όπως η Σελήνη, η Ιώ, ο Τρίτωνας και ο Τιτάνας, έχουν ατμόσφαιρα αν και αρκετά διαφορετική από αυτήν της Γης.

2.6.5 Ελάσσονες Πλανήτες και Κομήτες

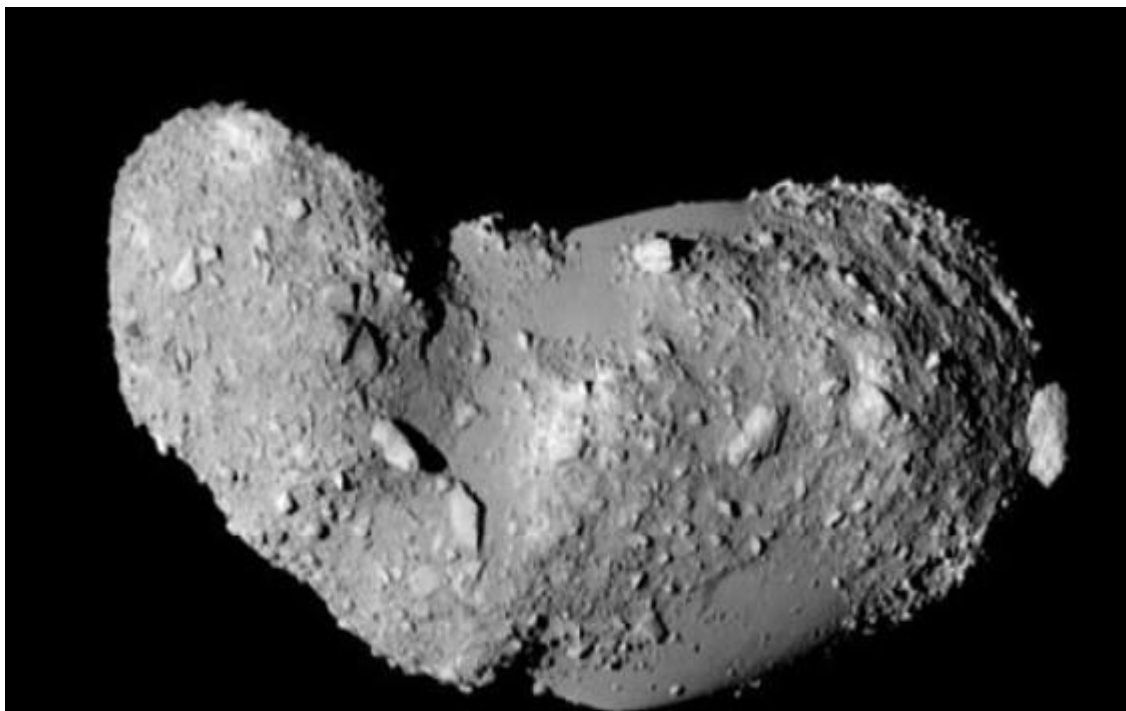
Οι ελάσσονες πλανήτες (minor planets) του ηλιακού συστήματος είναι πιο γνωστοί με το όνομα *αστεροειδείς* (asteroids). Πρόκειται για μικρά, στερεά αντικείμενα, με διάμετρο από μερικές δεκάδες μέτρα (όση είναι η διακριτική ικανότητά των παρατηρήσεών μας) μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Σήμερα γνωρίζουμε με ακρίβεια τις τροχιές περίπου 400,000 αστεροειδών. Η συνολική μάζα τους εκτιμάται σε μόλις $\sim 0.005\% M_{\Gamma}$, με τους τέσσερις μεγαλύτερους να συνιστούν το $\sim 50\%$ αυτής. Προφανώς, η συντριπτική πλειοψηφία των αστεροειδών είναι πολύ μικροί.



Εικόνα 51: Οι αστεροειδείς που έχουν φωτογραφηθεί από διαστημικές αποστολές, κατά σειρά μεγέθους. Στην εικόνα δεν περιλαμβάνεται η Δήμητρα, η οποία σήμερα κατατάσσεται στους νάνους πλανήτες (NASA)

Σήμερα πιστεύουμε ότι οι αστεροειδείς, όπως και οι κομήτες, αποτελούν τα απομεινάρια των αρχικών πλανητοειδών του πρωτο-πλανητικού δίσκου που πότε δεν συνενώθηκαν ώστε να σχηματίσουν κάποιον πλανήτη. Παλαιότερα υπήρχε η αντίληψη πως αποτελούν τα απομεινάρια ενός πλανήτη που διαλύθηκε μετά από μια βίαιη σύγκρουση. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι το υλικό από το οποίο αποτελούνται είναι αρχέγονο, αφού σε αντίθεση με ό,τι συνέβη στο εσωτερικό των πλανητών, οι περισσότεροι αστεροειδείς ποτέ δεν υπέστησαν *γεωλογική διαφοροποίηση* (differentiation). Έτσι, η ανάλυση υλικού που προέρχεται από αστεροειδείς είναι ουσιαστικά ο μόνος τρόπος να αποκτήσουμε άμεση γνώση για την περίοδο γένεσης του ηλιακού συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που τα τελευταία χρόνια πολλές διαστημικές αποστολές έχουν ως άμεσο στόχο τη συλλογή υλικού από αστεροειδείς

και κομήτες και τη μεταφορά του στη Γη για ανάλυση. Οι αποστολές *Hayabusa* της JAXA (Ιαπωνία) και *Deep Impact* της NASA έχουν ήδη πετύχει αυτόν τον στόχο, επισκεπτόμενες αντίστοιχα τον αστεροειδή *Itokawa* και τον κομήτη *Swift-Tuttle*.



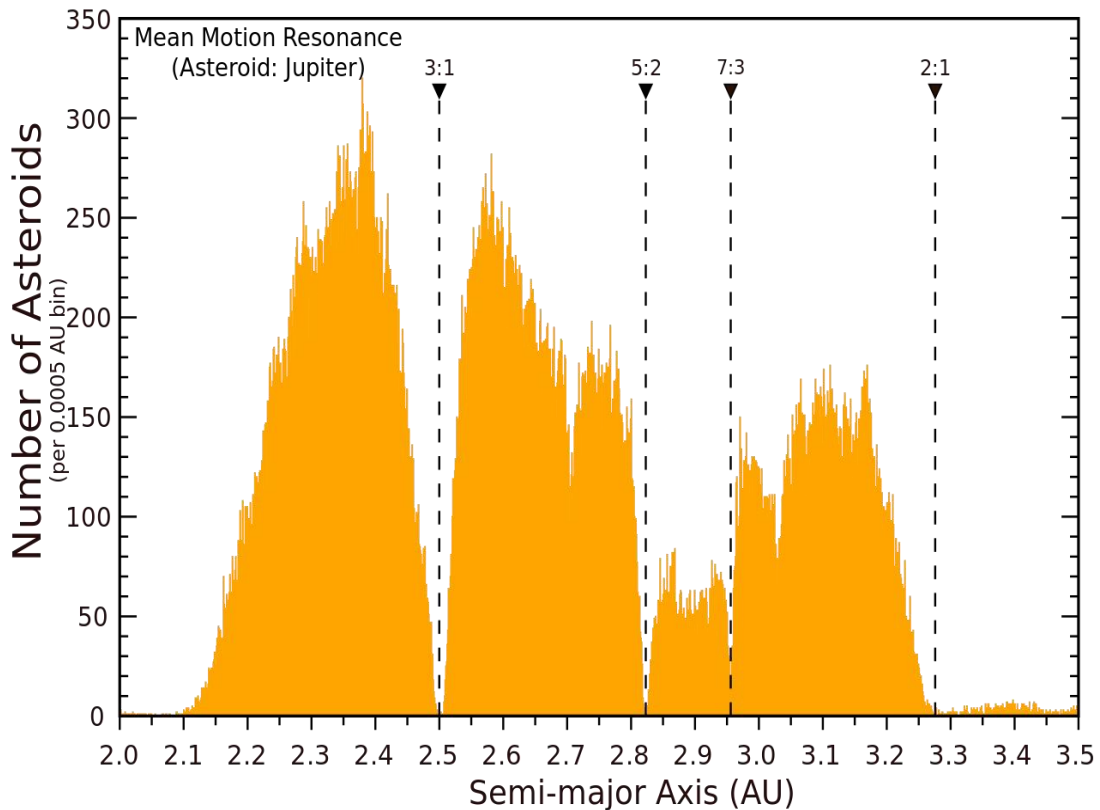
Εικόνα 52: Ο αστεροειδής Itokawa, φωτογραφημένος από το ιαπωνικό διαστημόπλοιο Hayabusa. Φαίνεται ότι αποτελεί συνένωση δύο μικρότερων σωματιών, που συνδέονται με βαρυτικές δυνάμεις (NASA)

Η πλειονότητα των αστεροειδών κινείται σε τροχιές με ημιάξονες ανάμεσα σε 2 και 4 AU, μεταξύ των τροχιών του Άρη και του Δία. Αυτή η δακτυλιοειδής περιοχή ονομάζεται *κύρια ζώνη των αστεροειδών* (main asteroid belt). Οι τροχιές των αστεροειδών είναι αρκετά ελλειπτικές, με εκκεντρότητες μέχρι και $\sim 0,4$. Επίσης, η κλίση του επιπέδου της τροχιάς τους (ως προς την εκλειπτική) μπορεί να ξεπερνά και τις 30° . Είναι φανερό ότι η ζώνη των αστεροειδών δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ένας σχεδόν επίπεδος δίσκος. Η απόκλιση αυτή από τη συνεπίπεδη μορφολογία των πλανητικών τροχιών οφείλεται στις παρελκτικές διαταραχές που εξασκούν στους αστεροειδείς οι πλανήτες, εδώ και 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια.

Η κατανομή των τροχιών των αστεροειδών χαρακτηρίζεται από ορισμένα βασικά παρατηρησιακά δεδομένα:

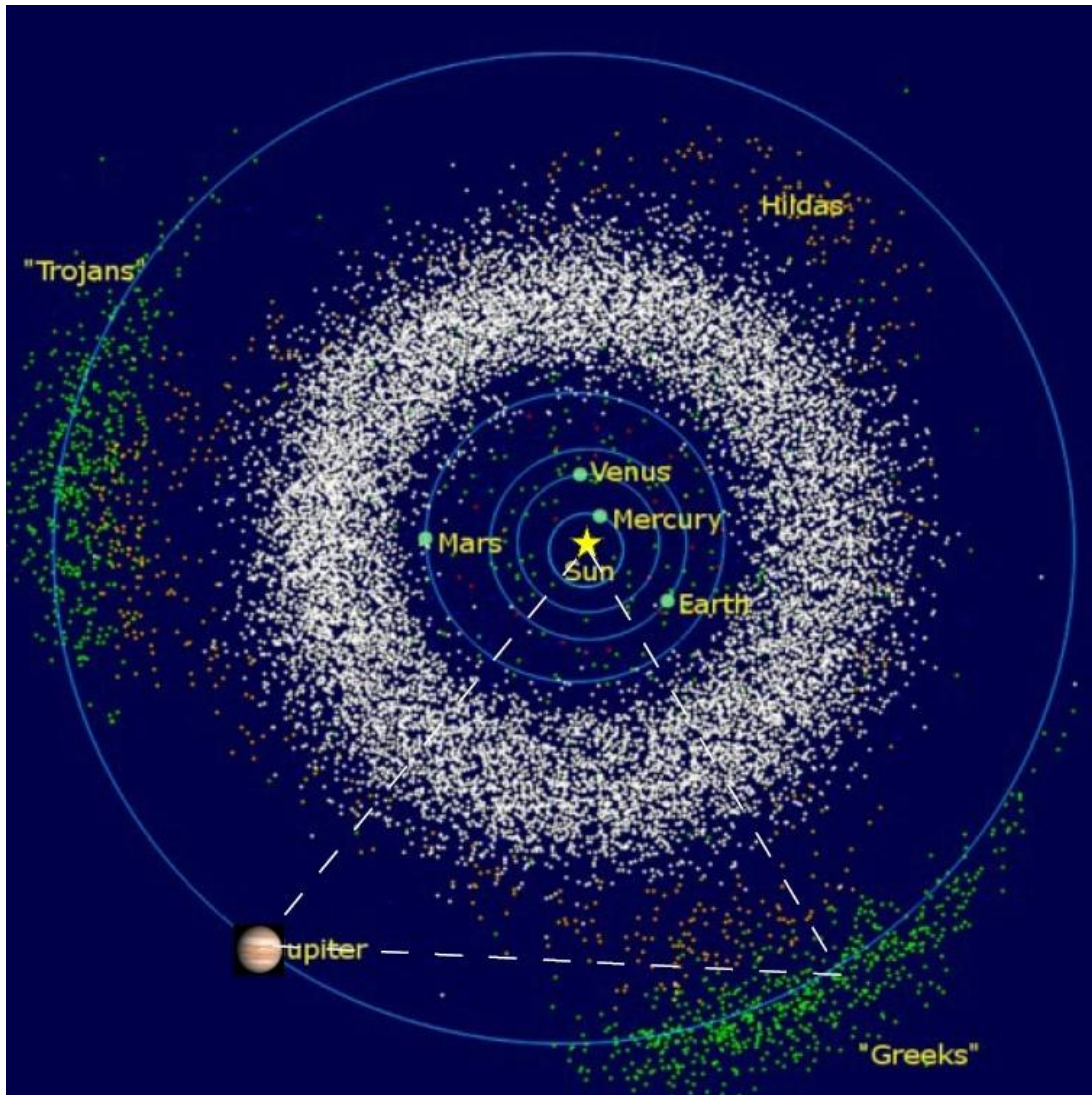
- η αριθμητική πυκνότητα των αστεροειδών δεν είναι ομαλή συνάρτηση της απόστασης από τον ήλιο. Αντίθετα, εμφανίζει συγκεκριμένα απότομα ελάχιστα, με σχεδόν μηδενική πυκνότητα, που συμπίπτουν με εκείνες τις τιμές της απόστασης για τις οποίες έχουμε ρητό συντονισμό περιόδων με τον πλανήτη Δία. Αυτά είναι τα περίφημα *διάκενα* που πρώτος παρατήρησε ο Daniel Kirkwood (1867), εξού και η ονομασία “Kirkwood gaps”, και αντιστοιχούν στους συντονισμούς 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 και 2:1. Σήμερα γνωρίζουμε ότι τα διάκενα του Kirkwood δεν ήταν πάντοτε άδεια αλλά εκκενώθηκαν με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι τροχιές των αστεροειδών σε αυτούς τους συντονισμούς είναι ασταθείς και έχουν την τάση να διαφύγουν από τη ζώνη.

Asteroid Main-Belt Distribution Kirkwood Gaps



Εικόνα 53: Η κατανομή του πλήθους των αστεροειδών ως συνάρτηση του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς τους (NASA)

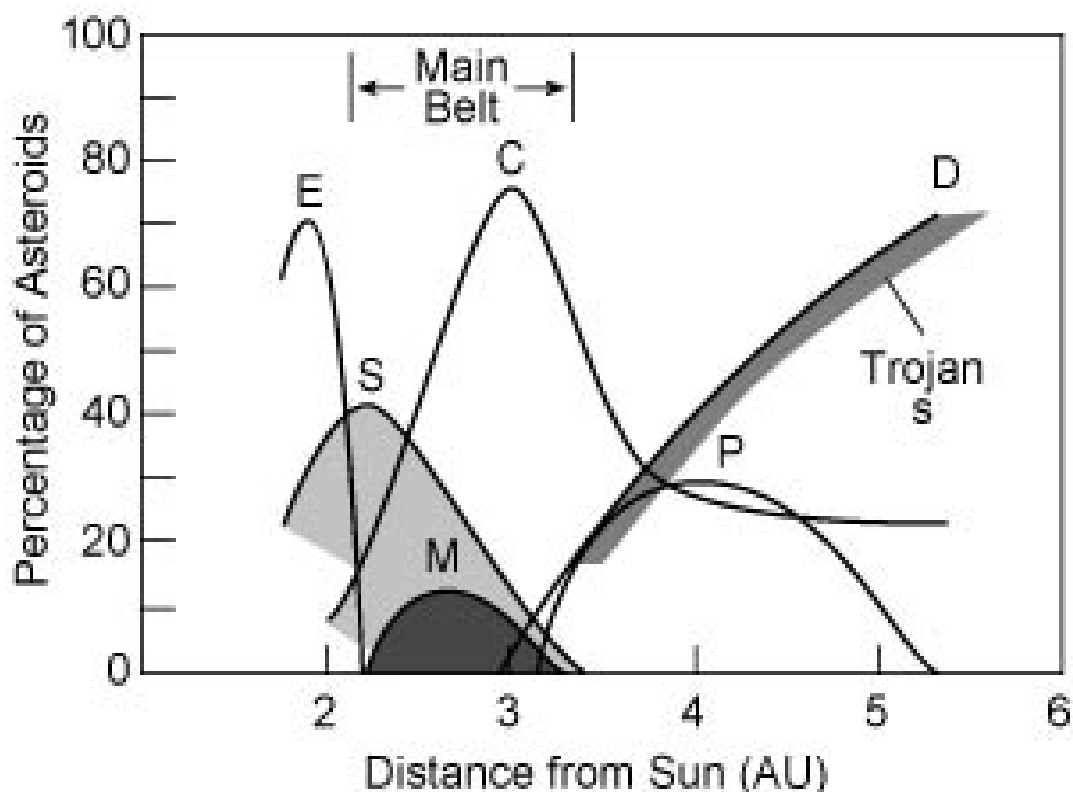
- εμφανίζονται ομάδες αστεροειδών σε κάποιους άλλους συντονισμούς, όπως οι *Hildas* στον 3:2 και οι *Τρωικοί* στον 1:1, οι οποίοι σε αντίθεση με τα διάκενα Kirkwood, είναι ευσταθείς για χρόνους συγκρίσιμους με την ηλικία του συστήματος.
- εμφανίζονται συγκεντρώσεις αστεροειδών με πολύ παρόμοια στοιχεία τροχιάς, κάτι το οποίο δεν είναι λογικό να αποδοθεί στην τύχη. Σήμερα πιστεύουμε ότι αυτές οι *οικογένειες αστεροειδών*, που πρώτος παρατήρησε ο Kiyotsugu Hirayama το 1918, αποτελούν θραύσματα που προέκυψαν από συγκρούσεις μεταξύ μεγαλύτερων σε μέγεθος αστεροειδών, πριν από εκατομμύρια, ή και δισεκατομμύρια, χρόνια. Η μελέτη των οικογενειών, μας δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες της ύλης από την οποία αποτελούνται οι αστεροειδείς.



Εικόνα 54: Το εσωτερικό ηλιακό σύστημα με τους Τρωικούς αστεροειδείς και την οικογένεια της Χίλτας. Οι «Έλληνες» βρίσκονται μπροστά από τον Δία κατά την αριστερόστροφη φορά περιφοράς του Δία περί τον Ήλιο και οι «Τρώες» πίσω του. Σχεδόν όλα τα σώματα του Ηλιακού μας συστήματος κινούνται αριστερόστροφα, αν τα κοιτάξουμε από τον Βόρειο Πόλο της Γης. Ήλιος – Δίας – Τρωικοί σχηματίζουν δύο ισόπλευρα τρίγωνα

- οι αστεροειδείς κατανέμονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τη μορφή του φάσματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που λαμβάνουμε, η οποία συνδέεται ευθέως με την πετρολογική σύσταση της επιφάνειάς τους. Μάλιστα, καθένας από τους βασικούς φασματικούς τύπους κυριαρχεί σε διαφορετικές περιοχές της ζώνης. Στις εσωτερικές παρυφές της ζώνης ($a < 2.1$ AU) υπερिशύουν οι αστεροειδείς τύπου *E*, από το πέτρωμα *ενστατίτης* που πιθανότατα κυριαρχεί στην επιφανειακή σύστασή τους. Καθώς η απόσταση από τον ήλιο αυξάνει, αρχίζουν να πλειοψηφούν οι *πυριτιούχοι* ($S = \text{silicate}$), ενώ στην εξωτερική ζώνη ($a > 2.8$ AU) υπερिशύουν οι *ανθρακώδεις* ($C = \text{carbonaceous}$). Οι τελευταίοι ανήκουν στους αστεροειδείς *πρώιμου τύπου*, που είναι σχετικά πλούσιοι σε νερό. Τέλος, μετά την περιοχή του συντονισμού 2:1, που αντιστοιχεί σε ημιάξονες $a \sim 3.5$ AU, η πλειονότητα των αστεροειδών ανήκει στους τύπους *D/P* (primitive),

που είναι πλούσιοι σε νερό και μοιάζουν αρκετά με κομήτες, πιστεύουμε μάλιστα ότι είναι αρκετά σαθροί.



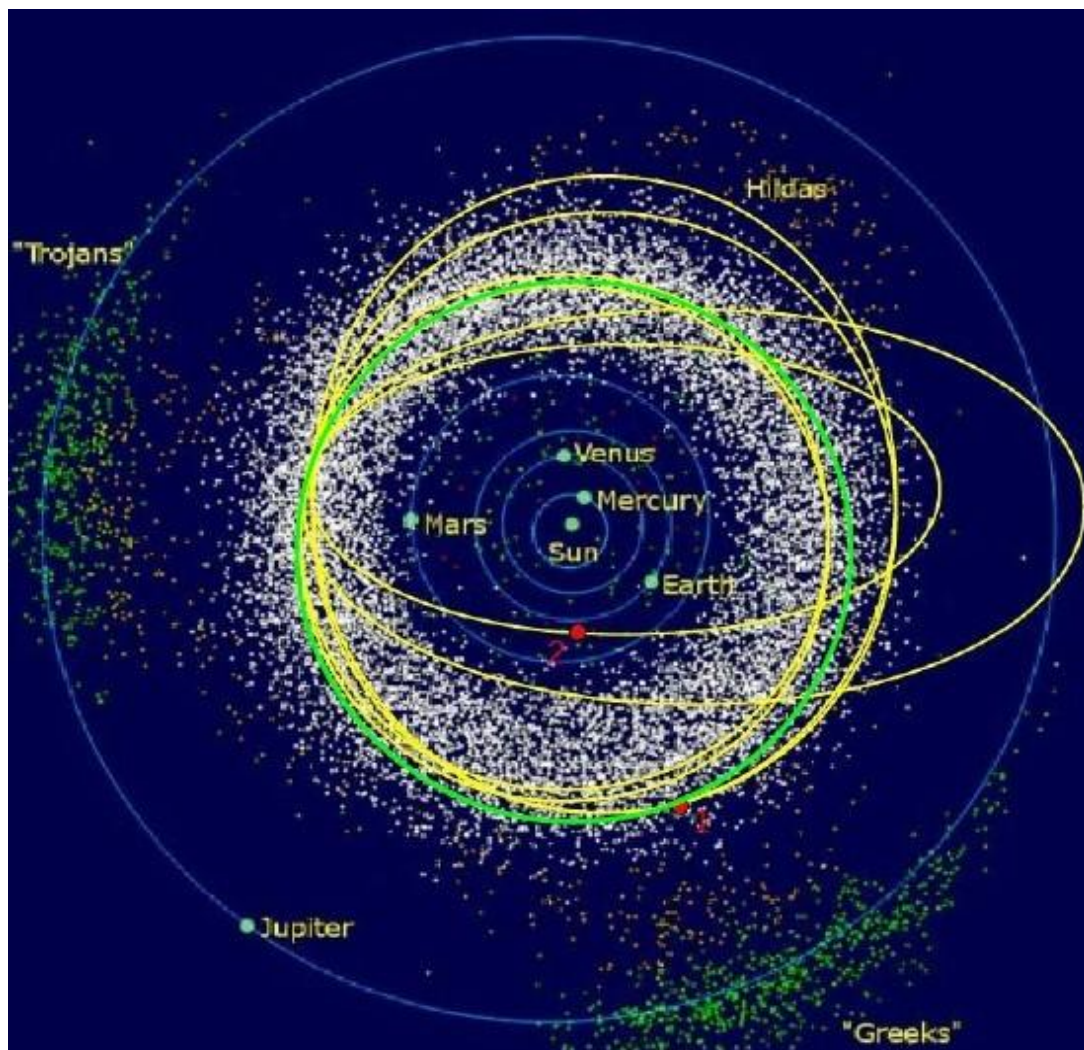
Εικόνα 55: Η κατανομή φασματοσκοπικής τάξης ως συνάρτηση της απόστασης των αστεροειδών από τον Ήλιο. Το χρώμα, και άρα η χημική σύσταση της επιφάνειας των αστεροειδών, συνδέεται άμεσα με τη μέση απόστασή τους από τον Ήλιο. Ξεκινώντας από την γειτονιά του Ήλιου, βρίσκουμε τους λευκούς αστεροειδείς τύπου E, τους κοκκινωπούς (ή πυριτιούχους) τύπου S, τους μελανούς (ή ανθρακούχους) τύπου C και τους ασυνήθιστα ερυθρούς τύπου D. Αυτή η συστηματική μεταβολή αποδίδεται συνήθως στην βαθμιαία ελάττωση της θερμοκρασίας με την απόσταση από τον Ήλιο την εποχή της δημιουργίας των αστεροειδών. Μόνο αυτό το στοιχείο όμως δεν μπορεί να εξηγήσει την ύπαρξη των μεταλλικών αστεροειδών τύπου M που βρίσκονται στο μέσον της ζώνης των αστεροειδών. Πιθανόν αυτοί να αποτελούσαν του πυρήνες από προγενέστερα, μεγαλύτερα μητρικά σώματα

Μια ιδιαίτερη κατηγορία αστεροειδών είναι οι ονομαζόμενοι *παραγήνιοι αστεροειδείς* (*Near Earth Asteroids, NEAs*), οι οποίοι κινούνται εκτός της κύριας ζώνης ($a < 2\text{AU}$) και οι τροχιές τους τέμνουν τις τροχιές των εσωτερικών πλανητών.

Οι τροχιές των NEAs είναι εξαιρετικά ασταθείς, τα στοιχεία τους μεταβάλλονται με ακανόνιστο τρόπο είναι *χαοτικές* και βραχύβιες, καθώς μέσα σε χρόνο μικρότερο από 10 εκατομμυρίων χρόνων οι NEAs είτε συγκρούονται με κάποιον πλανήτη, είτε καταλήγουν εκτός ηλιακού συστήματος, ακολουθώντας υπερβολικές τροχιές. Οι NEAs προέρχονται από την κύρια ζώνη και ο πληθυσμός τους αναπληρώνεται διαρκώς από αυτήν, όπως περιγράφουμε στην επόμενη παράγραφο.

Ο δυναμικός μηχανισμός μέσω του οποίου «παράγονται» οι NEAs φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα. Ένας αστεροειδής της κύριας ζώνης που κινείται σε κάποια επικίνδυνη περιοχή της ζώνης, συνήθως σε κάποιο συντονισμό, υφίσταται έντονες αυξητικές μεταβολές της εκκεντρότητας της τροχιάς του, διατηρώντας σχεδόν σταθερή την περίοδό του. Έτσι, αργά-αργά η τροχιά γίνεται έντονα ελλειπτική και τέμνει τις τροχιές των γήινων πλανητών. Από εκεί και πέρα, είναι πια θέμα χρόνου να έχει μια *κοντινή προσέγγιση* (*close encounter*) με τον Άρη ή

τη Γη, η οποία θα τον εκτρέψει σημαντικά από την τροχιά του, μειώνοντας σημαντικά την απόσταση του από τον ήλιο, και θα τον καταστήσει ΝΕΑ, αποσπώντας τον από την κύρια ζώνη.



Εικόνα 56: Διάγραμμα του εσωτερικού Ηλιακού Συστήματος, στο οποίο έχουν σημειωθεί οι θέσεις των αστεροειδών μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και οι τροχιές των πλανητών

Οι κομήτες συγκαταλέγονται αναμφίβολα στα πιο γνωστά και πλέον εντυπωσιακά ουράνια σώματα. Όπως γνωρίζουμε, εμφανίζονται κατά καιρούς στον ουρανό και γίνονται εύκολα αντιληπτοί με γυμνό μάτι, λόγω της εντυπωσιακής φωτεινής *κόμης* και της επίσης εντυπωσιακής *ουράς* τους. Γνωρίζουμε ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν δύο ουρές. Και οι δύο οφείλονται στη θέρμανση της επιφάνειας του κομήτη από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς ο κομήτης διαγράφοντας την τροχιά του, πλησιάζει προς τον Ήλιο. Από τη θέρμανση εξαχνώνονται υπόγεια στρώματα από στερεοποιημένα πτητικά υλικά (πάγο κατά κόρον), και την συνακόλουθη εκτόξευση υπερκείμενων στρωμάτων στερεάς σκόνης μαζί με τους εξωθούμενους ατμούς. Το υλικό αυτό περιβάλλει τον κομήτη και αποτελεί την *κόμη* του. Στη συνέχεια η σκόνη απωθείται από την πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας και δημιουργεί τη ουρά σκόνης. Παράλληλα τα μόρια των αερίων ιοντίζονται από το υπεριώδες τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας και παγιδεύονται από τον ηλιακό άνεμο, που εκπέμπεται από τον Ήλιο, δημιουργώντας την *ουρά πλάσματος*. Προφανώς και οι δύο ουρές έχουν κατεύθυνση αντιδιαμετρική από την κατεύθυνση του Ήλιου.



Εικόνα 57: Ο κομήτης Hale-Bopp το 1997

Οι κομήτες προέρχονται από δύο βασικές πηγές:

- το νέφος του *Oort*, μια σφαιρική κατανομή μικρών σωμάτων ($\sim 1 - 100$ km) που πιστεύουμε ότι βρίσκεται στα έσχατα όρια του ηλιακού συστήματος ($a \sim 10,000$ AU). Οι εκεί κομήτες έχουν πολύ μικρή αρνητική δυναμική ενέργεια και πολύ μικρή θετική κινητική ενέργεια, έτσι ώστε η συνολική μηχανική ενέργειά τους να είναι σχεδόν μηδέν, αλλά αρνητική ειδήλλως δεν θα ήταν βαρυτικά συζευγμένοι με τον Ήλιο και θα είχαν χαθεί στο διάστημα. Λόγω της σχεδόν μηδενικής μηχανικής ενέργειας τους κινούνται σε σχεδόν παραβολικές τροχιές με πολύ μικρή ταχύτητα, εξαιτίας της μικρής κινητικής ενέργειάς τους. Επίσης, λόγω των πλανητικών διαταραχών, κατά καιρούς από τους κομήτες της ζώνης του Oort εκτρέπεται κάποιος από αυτούς από την τροχιά του και εισχωρεί στο εσωτερικό ηλιακό σύστημα. Τότε αν περάσει σε αρκετά μικρή απόσταση από τον Ήλιο, αποκτά κόμη και επομένως εμφανίζει έντονη φωτεινή δραστηριότητα. Οι κομήτες αυτοί αν πραγματοποιούν πάνω από μια κοντινή διέλευση γύρω από τον Ήλιο, ονομάζονται περιοδικοί κομήτες μεγάλης περιόδου (Long Period Comets, LPCs). Σημειώνουμε ότι η παρατηρούμενη κατανομή των LPCs είναι σχεδόν ισοτροπική, γεγονός που ενισχύει προφανώς την πεποίθηση ότι το νέφος του Oort έχει σφαιρική συμμετρία.
- Η ζώνη Edgeworth – Kuiper, που βρίσκεται πέρα από την τροχιά του Ποσειδώνα ($36 < a < 50$ AU), έχει δισκοειδή δομή και, λόγω των διαταραχών του Ποσειδώνα, παράγει τον λεγόμενο δίσκο σκεδασμένων σωμάτων (Scattered Disc), απ' όπου κατά καιρούς εκτρέπονται σώματα που

εμφανίζονται στην περιοχή της Γης ως *κομήτες βραχείας περιόδου* (Short-Period Comets, SPCs). Ανάλογα με την τιμή της περιόδου της τροχιάς τους, οι SPCs χωρίζονται σε δύο υπο-κατηγορίες: Haley-type και Jupiter-family comets. Η παρατηρούμενη κατανομή των SPCs δεν είναι ισοτροπική, αντίθετα η μέση κλίση της τροχιάς τους είναι $i \sim 40^\circ$.



Εικόνα 58: Κοντινή φωτογραφία του κομήτη Hartley 2 από την αποστολή EPOXI της NASA τον Νοέμβριο του 2010 (NASA)

Αυτή η παρατήρηση ήταν γνωστή εδώ και δεκαετίες και ενίσχυε την άποψη ότι οι SPCs δεν μπορεί να προέρχονται από την ίδια πηγή με τους LPCs, αλλά αντίθετα θα πρέπει να προέρχονται από μια δισκοειδή κατανομή σωμάτων. Έτσι, προτάθηκε ως πιθανή πηγή η άγνωστη τότε ζώνη του Kuiper, της οποίας τα δυναμικά χαρακτηριστικά περιγράφηκαν θεωρητικά ώστε να συμφωνούν με τις παρατηρούμενες τροχιές των SPCs. Το 1992 οι Jane Luu και David Jewitt ανακάλυψαν το πρώτο αντικείμενο της ζώνης Kuiper, η οποία πλέον αριθμεί πάνω από 1.000 αντικείμενα με γνωστές τροχιές. Επομένως, η ύπαρξη της ζώνης του Kuiper προβλέφθηκε θεωρητικά προτού παρατηρηθεί έστω ένα αντικείμενο.



Εικόνα 59: Λαμπρά σωματίδια σκόνης αποκόπτονται από έναν κομήτη, κατά τη διάβαση του από το περίηλιο της τροχιάς του

Κεφάλαιο 3 – Βασικές Έννοιες Κλασσικής Μηχανικής

3.1 Γενικά

Στη φυσική, η Κλασσική Μηχανική είναι ένας από τους δύο κύριους κλάδους της Μηχανικής, η οποία ασχολείται με το σύνολο των Φυσικών Νόμων που περιγράφουν την κίνηση σωμάτων υπό την επίδραση ενός συστήματος δυνάμεων. Η μελέτη της κίνησης των σωμάτων είναι αρχαία, κάνοντας την κλασσική μηχανική έναν από τους παλαιότερους και ευρύτερους κλάδους της φυσικής, της μηχανικής και της τεχνολογίας.

Η κλασσική μηχανική περιγράφει την κίνηση μακροσκοπικών αντικειμένων, από βλήματα έως και μέρη μηχανικών συστημάτων, καθώς και αστρονομικών αντικειμένων, όπως διαστημόπλοια, πλανήτες, αστέρια, και γαλαξίες. Εκτός αυτών, πολλές ειδικεύσεις μέσα στον τομέα ασχολούνται με Ρευστά (Αέρια, Υγρά), Στερεά, και άλλα ειδικά ζητήματα. Η κλασσική μηχανική παρέχει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα εφόσον το πεδίο της μελέτης περιορίζεται σε μεγάλα αντικείμενα και σε ταχύτητες που δε πλησιάζουν αυτήν του φωτός. Όταν έχουμε να κάνουμε με αντικείμενα αρκετά μικρά, είναι απαραίτητο να εισάγουμε τον άλλο κύριο κλάδο της μηχανικής την, κβαντομηχανική. Σε περιπτώσεις που η ταχύτητα των αντικειμένων πλησιάζει αυτήν του φωτός, η κλασσική μηχανική επεκτείνεται από την Ειδική Σχετικότητα. Η Γενική Σχετικότητα ενώνει την Ειδική Σχετικότητα με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα, επιτρέποντας στους φυσικούς να χειριστούν την βαρυτική έλξη σε βαθύτερο επίπεδο.

Ο όρος *κλασσική μηχανική* επινοήθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα για να περιγράψει το σύστημα της φυσικής που ξεκίνησε ο Νεύτων και οι άλλοι φυσικοί φιλόσοφοι του 17ου αιώνα, χτίζοντας πάνω στις προηγούμενες αστρονομικές θεωρίες του Γιόχαν Κέπλερ, οι οποίες με την σειρά τους ήταν βασισμένες στις ακριβείς παρατηρήσεις του Τύχο Μπράχε και στις μελέτες του Γαλιλαίου για την κίνηση γήινων βλημάτων. Εφόσον αυτές οι πτυχές της Φυσικής αναπτύχθηκαν πολύ πριν την ανακάλυψη της κβαντικής μηχανικής και της σχετικότητας, μερικές πηγές εξαιρούν την θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν από αυτήν την κατηγορία. Παρ' όλα αυτά ένας μεγάλος αριθμός σύγχρονων πηγών περιλαμβάνουν την σχετικιστική μηχανική, η οποία από την δική τους οπτική αντιπροσωπεύει την *κλασσική μηχανική* στην πιο ανεπτυγμένη και ακριβή μορφή της.

Το αρχικό στάδιο ανάπτυξης της κλασσικής μηχανικής συχνά αναφέρεται και ως Νευτώνεια μηχανική, και σχετίζεται με τις φυσικές έννοιες που προαναφέραμε και τις μαθηματικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν από τον Νεύτωνα, και παράλληλα από τον Λάιμπνιτς, και άλλους. Αυτό αναλύεται διεξοδικότερα παρακάτω. Αργότερα, πιο αφηρημένες και γενικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν, οδηγώντας σε ανασχηματισμούς της κλασσικής μηχανικής γνωστές και ως Λαγκρανζιανή μηχανική και Χαμιλτονιανή μηχανική. Αυτή η ραγδαία πρόοδος έγινε στον 18ο και 19ο αιώνα, και επέκτεινε την μηχανική πέρα από το έργο του Νεύτωνα, κυρίως με την χρήση αναλυτικής μηχανικής. Τελικά, τα μαθηματικά που αναπτύχθηκαν για αυτές τις νέες θεωρίες ήταν η βάση για την δημιουργία της κβαντικής μηχανικής.

3.2 Θεμελιώδη Μεγέθη

3.2.1 Δύναμη

Στην Κλασική Μηχανική, δύναμη είναι η αιτία που προκαλεί κάθε μεταβολή της κίνησης ή της γεωμετρίας των σωμάτων. Ένα σώμα μπορεί να δεχθεί ταυτόχρονα πολλές δυνάμεις το άθροισμα των οποίων θα είναι σε κάθε σημείο μία συνισταμένη δύναμη και μία συνισταμένη ροπή. Όταν οι δυνάμεις αυτές εξουδετερώνονται μεταξύ τους τότε λέγεται ότι το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Σε ότι αφορά τα ελεύθερα σώματα, η δύναμη είναι γενικά η αιτία μεταβολής της κινητικής τους κατάστασης, δηλαδή αυτή που τα επιταχύνει ή τα επιβραδύνει. Αυτό ισχύει και για την περιστροφή τους, που μπορεί να επιταχυνθεί ή να επιβραδυνθεί. Για σώματα που δεν είναι ελεύθερα να κινηθούν με όλους τους τρόπους, αυτά δηλαδή που είτε είναι αναρτημένα κάπου και μπορούν να κινηθούν μόνο γύρω από σημείο ή άξονα ή σε προκαθορισμένη τροχιά, καθώς και σε όσα εφαρμόζονται δυνάμεις τριβής ή γενικά αντιδράσεις στήριξης, ανάγουμε τις δυνάμεις σε χαρακτηριστικά σημεία. Στην περίπτωση των μη ελεύθερων σωμάτων δύναμη είναι η αιτία που προκαλεί την κίνησή τους ή την κινητικότητά τους σε σχέση με τα σημεία στήριξης ή σύνδεσής τους, ή αυτή που προκαλεί την εντατική τους κατάσταση, την πίεση ή την παραμόρφωσή τους. Η αδράνεια ενός ελεύθερου σώματος επιτρέπει επίσης να προκαλείται στο σώμα εντατική κατάσταση, πίεση ή παραμόρφωση, όταν του εφαρμόζονται αντίστοιχες δυνάμεις.

Τη Δύναμη την ορίζουμε από τον Δεύτερο νόμο κίνησης του Νεύτωνα και μετριέται σε «newton» (N). Από τον Νόμο Κίνησης με βάση το Διεθνές Σύστημα SI (1961) ορίζεται $N = Kg \cdot m/sec^2$. Το Πεδίο βαρύτητας της Γης δίνει Επιτάχυνση βαρύτητας $g(0^\circ) = 9,780 \text{ m/sec}^2$ στα σώματα που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 0° (στον Ισημερινό), και Επιτάχυνση βαρύτητας $g(90^\circ) = 9,832 \text{ m/sec}^2$ στα σώματα που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 90° (στους Πόλους). $1 \text{ newton} = 1 \text{ Kg} \cdot 1 \text{ m/sec}^2 = 1 \text{ Kg} / 9,780 \cdot 9,780 \text{ m/sec}^2 = 0,102 \text{ Kg} \cdot g(0^\circ)$ και άρα μπορούμε να το εξισώσουμε με Δύναμη βαρύτητας σε σώμα 100gr περίπου όσο και το βάρος ενός μήλου.

Η δύναμη δεν είναι άμεσα αντιληπτό ή άμεσα μετρήσιμο μέγεθος, είναι όμως τα αποτελέσματά της (επιτάχυνση, παραμόρφωση). Χρησιμοποιήθηκε από τον Αρχιμήδη σε Μηχανές (Μηχανισμούς που μεταβιβάζουν ή μετατρέπουν Φορτία Εισόδου σε Φορτία Εξόδου), όμως η θεωρητική της θεμελίωση και η μαθηματική της περιγραφή έγινε με τους νόμους της κίνησης του Νεύτωνα τον 17ο αιώνα (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Ουράνια μηχανική) που χρησιμοποιούσε τα απειροστά (Εύδοξος/Αρχιμήδης) και κατέρριψε τη θεωρία Δύναμης του Αριστοτέλη (θεωρούσε ότι έπρεπε να υπάρχει δύναμη γι' αυτό που ο Νεύτωνας ονόμασε αδράνεια, και ότι ο ουρανός αποτελούνταν από το 5ο στοιχείο τον αιθέρα).

3.2.2 Ενέργεια

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παραγάγει έργο. Η ενέργεια χαρακτηρίζεται, τόσο στη θεωρία όσο και στη πράξη, περισσότερο ως μια λογιστική έννοια, που δίνει τη δυνατότητα

πρόβλεψης της εξέλιξης ή της κίνησης ενός συστήματος. Ορίζεται σαν το ποσό του έργου που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να πάει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική. Ακριβώς πόση ενέργεια περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων (όπως οι εξισώσεις Λαγκράνζ ή οι εξισώσεις Χάμιλτον), καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο. Γενικά, η παρουσία της ενέργειας ανιχνεύεται από έναν παρατηρητή κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή στις ιδιότητες ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος.

Βασική μονάδα μέτρησης της Ενέργειας, Θερμότητας και Έργου στο SI είναι το τζάουλ (J) και ισχύει: $J = Nm$, δηλαδή $1 \text{ τζάουλ} = 1 \text{ Νιούτον} \cdot 1 \text{ μέτρο}$.

Η κυριότερη ιδιότητά της είναι ότι η συνολική ενέργεια ενός απομονωμένου (κλειστού) συστήματος είναι σταθερή, πρόταση που έχει αποδειχθεί από πλήθος πειραμάτων και χαρακτηρίζεται ως μία από τις πλέον θεμελιώδεις αρχές διατήρησης της φυσικής. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας:

3.2.2.1 Μηχανική Ενέργεια

Μηχανική ενέργεια ονομάζεται το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας ενός σώματος. Σε ένα σώμα ή σύστημα όπου επιδρούν μόνο συντηρητικές δυνάμεις (π.χ. βαρυτικές, ηλεκτρικές, δυνάμεις ελαστικής παραμόρφωσης) η μηχανική ενέργεια παραμένει σταθερή. Η σταθερότητα της μηχανικής ενέργειας γίνεται αντιληπτή από διαφορετικούς παρατηρητές αν και μετρούν διαφορετική τιμή.

3.2.2.1.1 Δυναμική Ενέργεια

Ως δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα, ή σύστημα, λόγω της θέσεως σε σχέση με κάποια άλλη, ή της κατάστασής του. Μονάδα μέτρησης της δυναμικής ενέργειας είναι το Τζάουλ. Είναι δηλαδή η δυνατότητα ενός σώματος, ή συστήματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε "ενέργεια θέσεως" (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) π.χ. ποταμός, και "ενέργεια μορφής", που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το συσπειρωμένο ελατήριο ή τεντωμένο λάστιχο). Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.

Η Κινητική και η Δυναμική ενέργεια θεωρούνται ως οι δύο μορφές της Μηχανικής ενέργειας. Κατά την κίνηση ενός σώματος ή φορτίου σε συντηρητικό πεδίο δυνάμεων, και εφόσον δεν υπάρχουν τριβές, η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και το αντίστροφο, το άθροισμά τους όμως είναι πάντα σταθερό και ίσο με τη μηχανική ενέργεια που αρχικά είχε το σώμα.

3.2.2.1.2 Κινητική Ενέργεια

Κινητική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο. Ως κινητική ενέργεια ενός σώματος ορίζεται η συνολική ενέργεια που χρειάζεται να απορροφήσει ένα σώμα προκειμένου

να αποκτήσει ορισμένη μεταφορική ταχύτητα ή/και γωνιακή ταχύτητα ξεκινώντας από την ακινησία. Υπάρχουν δύο ανεξάρτητα είδη κινήσεων για ένα μηχανικό σώμα, η μεταφορική κίνηση και η περιστροφή, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα και τη γωνιακή ταχύτητα αντίστοιχα. Έτσι, ορίζονται δύο ειδών κινητικές ενέργειες, η μεταφορική κινητική ενέργεια και η περιστροφική κινητική ενέργεια, οι οποίες συμβολίζονται με K_{μ} και K_{π} αντίστοιχα. Για ταχύτητες μικρές σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό, η μεταφορική κινητική ενέργεια ισούται κατά προσέγγιση με το ήμισυ του γινομένου της μάζας του σώματος επί το τετράγωνο της ταχύτητάς του, ενώ η περιστροφική κινητική ενέργεια ισούται με το ήμισυ του γινομένου της ροπής αδράνειας επί το τετράγωνο της γωνιακής ταχύτητας όπως.

$$K = K_{\mu} + K_{\pi} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3.1)$$

Όπου m η μάζα σώματος, v η ταχύτητά, I η ροπή αδράνειας και ω η γωνιακή ταχύτητα του. Συνεπώς κινητική ενέργεια έχουν τα σώματα που εκτελούν κίνηση ή περιστροφή ή ταλάντωση. Για παράδειγμα το βλήμα ή ο πύραυλος που εκτοξεύεται έχει κινητική ενέργεια λόγω της ταχύτητάς του. Όταν ένα όχημα επιβραδύνεται χάνει σταδιακά την κινητική του ενέργεια.

3.2.2.2 Ηλεκτρομαγνητική Ενέργεια

Η Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι η ενέργεια εκείνη που συνδυάζει την ηλεκτρική και τη φωτεινή ή ενέργεια ακτινοβολίας.

3.2.2.2.1 Ηλεκτρική Ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα, που αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού. Όταν γίνεται χρήση του ηλεκτρισμού η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας π.χ. σε κινητική ενέργεια όταν λειτουργεί ένας κινητήρας ή σε φως όταν ανάβει ένας λαμπτήρας. Ο σύγχρονος κόσμος εξαρτά την επιβίωση και την ευημερία του από αυτό το είδος ενέργειας. Η πλειονότητα των συσκευών λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότεροι είναι η καύση διαφόρων ουσιών (λιγνίτης, πετρέλαιο, κάρβουνο), τα πυρηνικά εργοστάσια, τα ηλιακά πάρκα, τα υδροηλεκτρικά φράγματα και τα αιολικά πάρκα. Τα τελευταία 20 χρόνια γίνονται έντονες προσπάθειες αύξησης του ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.).

Το μεγάλο μειονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δύσκολη, σχεδόν αδύνατη, μακροχρόνια αποθήκευσή της. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να καταναλώνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της ή να αποθηκεύεται αφού πρώτα μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας (π.χ. χημική, δυναμική κ.λ.π.). Η ανάγκη άμεσης κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην κατασκευή ενός παγκόσμιου πλέγματος ηλεκτρικών δικτύων, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρεται εύκολα, από το σημείο παραγωγής της, στο σημείο κατανάλωσης.

3.2.2.2 Ενέργεια Ακτινοβολίας

Ενέργεια ακτινοβολίας ονομάζεται η ενέργεια που περιέχεται στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ή φωτόνια, αναλόγως του τρόπου που μετράμε την ακτινοβολία αυτή) που εκπέμπονται από μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τα οποία διαδίδονται στον κενό χώρο με την ταχύτητα του φωτός.

Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται κυρίως στο κενό καθώς και μέσα από διάφορα υλικά, αν η ύλη επιτρέπει στη συγκεκριμένη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος να την διαπεράσει, όπως π.χ. το φως μπορεί και περνά από το διαφανές γυαλί. Όταν προσπαθεί να διέλθει μέσα από ύλη, η ακτινοβολία είτε σκεδάζεται, είτε απορροφάται και μετατρέπεται σε άλλης μορφής ενέργεια όπως η θερμότητα ή η ηλεκτρική ενέργεια, είτε απορροφάται και επανεκπέμπεται (φθορισμός) ή απλά διέρχεται μέσα από την ύλη χωρίς φαινομενικά να αλληλεπιδρά με αυτήν, αν και η ταχύτητα διάχυσης αλλάζει σε σχέση με την ταχύτητα στο κενό. Στην περίπτωση του φθορισμού έχουμε απώλεια ενέργειας καθώς το υλικό κατακρατεί ενέργεια και η ακτινοβολία που επανεκπέμπεται είναι μικρότερης συχνότητας από την προσπίπτουσα.

Πηγή ακτινοβολίας μπορεί να είναι μια φωτιά, ο Ήλιος, ένα αναμμένο ηλεκτρικό σίδερο, μια κεραία εκπομπής ενός ραδιοφωνικού ή τηλεοπτικού σταθμού, ένα ραδιενεργό υλικό που εκπέμπει ακτίνες γ, ένας αστέρας νετρονίων που εκπέμπει ακτίνες X, ένα ρήγμα στη Γη την ώρα ενός σεισμού κλπ.

3.2.2.3 Πυρηνική Ενέργεια

Πυρηνική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται και διασπώνται οι ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

3.2.2.4 Θερμική Ενέργεια

Η θερμότητα είναι μορφή ενέργειας που αφορά μακροσκοπικά αντικείμενα, επί της ουσίας όμως πρόκειται για την κινητική ενέργεια (μεταφοράς και περιστροφής) και την ενέργεια ταλάντωσης των μορίων, ατόμων ή ιόντων ενός σώματος η οποία αποθηκεύεται και μεταφέρεται με φορείς στη μικροκοσμική κλίμακα. Η κινητική ενέργεια αφορά κυρίως τα ρευστά. Επίσης η θερμότητα αποθηκεύεται με τη διέγερση των δεσμευμένων ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Έτσι έχουμε τη μεταφορά της θερμότητας και με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται καθώς τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στη μη διεγερμένη τους κατάσταση.

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, η θερμότητα τείνει να ρέει αυθόρμητα από θερμότερα σώματα προς ψυχρότερα, ενώ οι ροές της μπορούν να μετατραπούν μερικώς σε ωφέλιμο έργο μέσω μιας θερμικής μηχανής. Όταν ένα σώμα, ή θερμοδυναμικό σύστημα, βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, η θερμική ενέργεια αυτού δεν μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμο έργο με την ίδια ευκολία που μπορεί να μετατραπούν άλλες μορφές ενέργειας του ίδιου σώματος. Για παράδειγμα η ενέργεια του νερού ενός ποταμού, είτε εκ του ύψους, είτε εκ της ταχύτητάς του,

μπορεί να μετατραπεί σε άλλη μορφή ενέργειας, (παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, υδρόμυλοι κ.λπ). Για να παραχθεί μηχανικό έργο από την υφιστάμενη θερμική ενέργεια θα πρέπει να συνδυαστεί με άλλο σύστημα που να βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία. Τέτοιες εφαρμογές είναι η ατμομηχανή, ο ατμοστρόβιλος κ.λπ..

3.2.2.5 Χημική Ενέργεια

Ως χημική ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε από διάφορα άτομα για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ή που αποθηκεύεται σε χημικές ενώσεις. Επίσης ως χημική ενέργεια υπάρχει μία ηλεκτρομαγνητική δύναμη που αποθηκεύεται.

Η χημική ενέργεια αποδίδεται συνήθως ως θερμική ενέργεια ή ηλεκτρική ενέργεια, όταν τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική ενέργεια, με βιολογικούς μηχανισμούς, και ονομάζεται έτσι ζωική ενέργεια. Η χημική ενέργεια οφείλεται στις δυνάμεις του δεσμού (που συγκρατούν τα άτομα στο μόριο), στις έλξεις των μορίων και των υποατομικών σωματιδίων, στην κίνηση των ατόμων, μορίων και ηλεκτρονίων κλπ. Είναι, δηλαδή, συνδυασμός κινητικής και δυναμικής ενέργειας. Η χημική ενέργεια είναι μια «κρυμμένη» μορφή ενέργειας και μέρος αυτής μπορεί να αποδοθεί άλλοτε εύκολα (π.χ. στη βενζίνη με ένα σπινθήρα) και άλλοτε δύσκολα (π.χ. στα πυρηνικά καύσιμα) στο περιβάλλον.

Κατά τις χημικές αντιδράσεις, κατά τις μετατροπές δηλαδή χημικών ουσιών σε άλλες, μεταβάλλεται η χημική ενέργεια του συστήματος. Αποτέλεσμα είναι να ελευθερώνεται (στο περιβάλλον) ή να απορροφάται (από το περιβάλλον), ενέργεια ίση με τη διαφορά των χημικών ενεργειών των αρχικών και τελικών ουσιών. Αυτό ισχύει, γιατί στις χημικές αντιδράσεις δε διατηρείται μόνο η μάζα (νόμος Lavoisier), αλλά και η ενέργεια (νόμος διατηρήσεως της ενέργειας). Η ενέργεια που εκλύεται ή απορροφάται σε μια χημική αντίδραση μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, όπως π.χ. θερμική ενέργεια (θερμότητα), ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρισμός), φωτεινή ενέργεια (φως).

3.2.3 Έργο

Στη φυσική, έργο είναι η ενέργεια που μεταφέρεται από ή προς ένα αντικείμενο μέσω της εφαρμογής δύναμης κατά μήκος μιας μετατόπισης. Στην απλούστερη μορφή του, για μια σταθερή δύναμη ευθυγραμμισμένη με την κατεύθυνση της κίνησης, το έργο ισούται με το γινόμενο της ισχύος της δύναμης επί της διανυθείσας απόστασης. Μια δύναμη λέγεται ότι κάνει θετικό έργο εάν όταν έχει μια συνιστώσα προς την κατεύθυνση της μετατόπισης του σημείου εφαρμογής. Μια δύναμη κάνει αρνητικό έργο αν έχει συνιστώσα αντίθετη από την κατεύθυνση της μετατόπισης στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Για παράδειγμα, όταν μια μπάλα κρατιέται πάνω από το έδαφος και στη συνέχεια πέφτει, το έργο που γίνεται από τη βαρυτική δύναμη στην μπάλα καθώς πέφτει είναι θετικό και ισούται με το βάρος της μπάλας (μια δύναμη) πολλαπλασιαζόμενο με την απόσταση από το έδαφος (μια μετατόπιση). Εάν η μπάλα πεταχτεί προς τα πάνω, το έργο που γίνεται από το βάρος της είναι αρνητικό και ισούται με το βάρος (δύναμη) πολλαπλασιασμένο με τη μετατόπιση προς την κατεύθυνση προς τα πάνω (μετατόπιση). Το έργο είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, επομένως έχει μόνο μέγεθος χωρίς κατεύθυνση. Το έργο μεταφέρει ενέργεια από το

ένα μέρος στο άλλο ή από τη μια μορφή στην άλλη. Η μονάδα εργασίας SI είναι το τζάουλ (J), η ίδια μονάδα με την ενέργεια και το συμβολίζουμε το με γράμμα W (Work). Όταν η δύναμη F είναι σταθερή και η γωνία μεταξύ της δύναμης και της μετατόπισης s είναι θ , τότε το έργο είναι το γινόμενο της δύναμης επί τη μετατόπιση επί το συνημίτονο της γωνίας θ , $W = F \cdot s \cos\theta$.

Στη θερμοδυναμική το έργο ορίζεται κάπως διαφορετικά από ότι στην κινηματική, και έχει να κάνει με μεταβολές όγκου του αερίου που μελετάμε. Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι η ενέργεια που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον λόγω της μεταβολής του όγκου του. Δίνεται από τον τύπο: $\delta W = p dV$, όπου p είναι η πίεση που ασκεί το αέριο και ΔV η μεταβολή του όγκου του. Από την παραπάνω σχέση είναι φανερό ότι το έργο είναι θετικό όταν το αέριο εκτονώνεται (αυξάνεται ο όγκος του) και αρνητικό όταν συμπιέζεται (μειώνεται ο όγκος του). Επίσης το έργο σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας μεταξύ της γραφικής παράστασης της μεταβολής και του άξονα V , στο διάγραμμα P - V . Στην ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή, όπου δεν έχουμε μεταβολή όγκου, το έργο είναι μηδέν.

3.2.4 Ισχύς

Ως ισχύ ορίζουμε τη ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται ή μετατρέπεται ανά μονάδα χρόνου. Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων, η μονάδα ισχύος είναι τα Watt (W), ίση με ένα Joule (J) ανά δευτερόλεπτο (s). Σε παλαιότερα συγγράμματα, η ισχύς μερικές φορές ονομάζεται δραστηριότητα.

Η ισχύς σχετίζεται με άλλες ποσότητες. Για παράδειγμα, η ισχύς που απαιτείται για την κίνηση ενός οχήματος εδάφους είναι το γινόμενο της αεροδυναμικής έλξης συν τη δύναμη έλξης στους τροχούς και της ταχύτητας του οχήματος. Η ισχύς εξόδου ενός κινητήρα είναι το γινόμενο της ροπής που παράγει ο κινητήρας και της γωνιακής ταχύτητας του άξονα εξόδου του. Ομοίως, η ισχύς που καταναλώνεται σε ένα ηλεκτρικό στοιχείο ενός κυκλώματος είναι το γινόμενο του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο και της τάσης κατά μήκος του στοιχείου.

3.2.5 Ορμή

Στη Νευτώνεια μηχανική, η ορμή (πιο συγκεκριμένα η γραμμική ορμή ή η μεταφορική ορμή) είναι το γινόμενο της μάζας και της ταχύτητας ενός αντικειμένου. Είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, που έχει μέγεθος και κατεύθυνση. Αν m είναι η μάζα ενός αντικειμένου και v η ταχύτητά του (επίσης διανυσματική ποσότητα), τότε η ορμή του αντικειμένου p είναι: $p = mv$. Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI), η μονάδα μέτρησης της ορμής είναι το χιλιόγραμμα επί μέτρο ανά δευτερόλεπτο ($\text{kg}\cdot\text{m/s}$), το οποίο είναι ισοδύναμο με το newton επί second (Ns).

Ο δεύτερος νόμος κίνησης του Νεύτωνα δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός σώματος είναι ίσος με την καθαρή δύναμη που ασκείται σε αυτό. Η ορμή εξαρτάται από το πλαίσιο αναφοράς, αλλά σε οποιοδήποτε αδρανειακό πλαίσιο είναι μια ποσότητα που διατηρείται, που σημαίνει ότι εάν ένα κλειστό σύστημα δεν επηρεάζεται από εξωτερικές δυνάμεις, η συνολική γραμμική του ορμή δεν αλλάζει. Η ορμή διατηρείται επίσης στην ειδική σχετικότητα (με τροποποιημένο τύπο) και, σε τροποποιημένη μορφή, στην ηλεκτροδυναμική, την κβαντομηχανική, τη θεωρία κβαντικού πεδίου και τη γενική σχετικότητα. Σε συνεχή συστήματα όπως

ηλεκτρομαγνητικά πεδία, δυναμική ρευστών και παραμορφώσιμα σώματα, μπορεί να οριστεί η πυκνότητα ορμής και μια συνεχής έκδοση της διατήρησης της ορμής οδηγεί σε εξισώσεις όπως οι εξισώσεις Navier-Stokes για ρευστά ή η εξίσωση ορμής Cauchy για παραμορφώσιμα στερεά ή υγρά.

3.2.6 Ωθηση

Στην κλασική μηχανική, η ώθηση (συμβολίζεται με J ή Imp) είναι το φυσικό μέγεθος που ισοδυναμεί με την μεταβολή της ορμής ενός σώματος στο οποίο εφαρμόζεται μια δύναμη για κάποιο χρονικό διάστημα. Ισούται με το γινόμενο της δύναμης που ασκείται στο σώμα επί τον συνολικό χρόνο εφαρμογής της. Εφόσον η δύναμη είναι διανυσματική ποσότητα, η ώθηση είναι επίσης διανυσματική ποσότητα. Η ώθηση που εφαρμόζεται σε ένα αντικείμενο παράγει μια ισοδύναμη διανυσματική αλλαγή στη γραμμική ορμή του, επίσης στην προκύπτουσα διεύθυνση. Η μονάδα της ώθησης στο SI είναι το Newton επί δευτερόλεπτο (Ns) και η ισοδύναμη μονάδα ορμής είναι το χιλιόγραμμα επί μέτρο ανά δευτερόλεπτο ($kg \cdot m/s$).

3.2.7 Κρούση

Η κρούση είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αναφέρεται στην στιγμιαία προσέγγιση δύο σωμάτων. Γενικά κρούση ονομάζεται η διεργασία κατά την οποία αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ σωμάτων για πολύ μικρό συγκριτικά με τον συνολικό χρόνο κίνησης αυτών χρονικό διάστημα. Κατά την κρούση, στην περίπτωση που η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων είναι μηδενική ή αμελητέα σε σχέση με τις εσωτερικές, αν δηλαδή το σύστημα των σωμάτων είναι πρακτικά απομονωμένο, ισχύει η αρχή διατήρησης της ορμής, η ορμή δηλαδή του συστήματος ακριβώς πριν και αμέσως μετά την κρούση παραμένει αμετάβλητη.

Οι κρούσεις διακρίνονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τις ενεργειακές μεταβολές που υφίστανται τα σώματα εξαιτίας αυτών. Αν η κινητική ενέργεια παραμένει σταθερή τότε έχουμε την περίπτωση της ελαστικής κρούσης, ενώ αν η κινητική ενέργεια μετά την κρούση ελαττώνεται, λαμβάνουμε την περίπτωση της ανελαστικής κρούσης. Μία υποπερίπτωση της ανελαστικής κρούσης είναι η πλαστική κρούση, κατά την οποία τα δύο σώματα μετά την κρούση ενώνονται σε ένα συσσωμάτωμα.

3.3 Περιστροφική Κίνηση

3.3.1 Γωνιακή Ταχύτητα

Η γωνιακή ταχύτητα ή ταχύτητα περιστροφής, επίσης γνωστή ως διάνυσμα γωνιακής συχνότητας, είναι μια ψευδοδιανυσματική αναπαράσταση του πόσο γρήγορα αλλάζει η γωνιακή θέση ή ο προσανατολισμός ενός αντικείμενου με το χρόνο, δηλαδή πόσο γρήγορα περιστρέφεται ένα αντικείμενο ή περιφέρεται γύρω από ένα σημείο ή άξονα. Το μέγεθος του διανύσματος αντιπροσωπεύει τη γωνιακή ταχύτητα, τον ρυθμό με τον οποίο το αντικείμενο περιστρέφεται και η κατεύθυνσή του είναι κανονική στο στιγμιαίο επίπεδο περιστροφής ή γωνιακής μετατόπισης. Ο προσανατολισμός της γωνιακής ταχύτητας καθορίζεται συμβατικά από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Υπάρχουν δύο τύποι γωνιακής ταχύτητας.

- Η τροχιακή γωνιακή ταχύτητα αναφέρεται στο πόσο γρήγορα ένα σημειακό αντικείμενο περιστρέφεται γύρω από μια σταθερή αρχή, δηλαδή το χρονικό ρυθμό αλλαγής της γωνιακής του θέσης σε σχέση με την αρχή.
- Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αναφέρεται στο πόσο γρήγορα περιστρέφεται ένα άκαμπτο σώμα σε σχέση με το κέντρο περιστροφής του και είναι ανεξάρτητη από την επιλογή σταθερής αρχής, σε αντίθεση με την τροχιακή γωνιακή ταχύτητα.

Γενικά, η γωνιακή ταχύτητα έχει διάσταση γωνίας ανά μονάδα χρόνου (γωνία που αντικαθιστά την απόσταση από τη γραμμική ταχύτητα με τον κοινό χρόνο). Η μονάδα γωνιακής ταχύτητας SI είναι ακτίνια ανά δευτερόλεπτο, rad/s με το ακτίνιο να είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, επομένως οι μονάδες γωνιακής ταχύτητας SI μπορούν να αναφέρονται ως s^{-1} . Η γωνιακή ταχύτητα συμβολίζεται διεθνώς από το σύμβολο ω , (μερικές φορές και Ω) και μαθηματικώς εκφράζεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

Κατά κανόνα, η θετική γωνιακή ταχύτητα έχει αριστερόστροφη περιστροφή, ενώ η αρνητική είναι δεξιόστροφη.

3.3.2 Γωνιακή επιτάχυνση

Η γωνιακή επιτάχυνση αναφέρεται στο χρόνο μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας. Καθώς υπάρχουν δύο τύποι γωνιακής ταχύτητας, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και η τροχιακή γωνιακή ταχύτητα, υπάρχουν φυσικά και δύο τύποι γωνιακής επιτάχυνσης, που ονομάζονται γωνιακή επιτάχυνση περιστροφής και τροχιακή γωνιακή επιτάχυνση αντίστοιχα. Η γωνιακή επιτάχυνση περιστροφής αναφέρεται στη γωνιακή επιτάχυνση ενός άκαμπτου σώματος γύρω από το κέντρο περιστροφής του και η τροχιακή γωνιακή επιτάχυνση αναφέρεται στη γωνιακή επιτάχυνση ενός σημειακού σωματιδίου γύρω από μια σταθερή αρχή.

Η γωνιακή επιτάχυνση μετριέται στο SI σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο στο τετράγωνο rad/s^2 και συνήθως συμβολίζεται με α . Ο γενικός μαθηματικός τύπος της γωνιακής επιτάχυνσης ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.3)$$

όπου $d\theta$ η μεταβολή της γωνίας που αντιστοιχεί στο διαγραφόμενο τόξο και $d\omega$ η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας. Η γωνιακή επιτάχυνση έχει λοιπόν τη φυσική σημασία του ρυθμού μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας. Σε δύο διαστάσεις, η γωνιακή επιτάχυνση είναι ένα ψευδοβαθμωτό μέγεθος του οποίου το πρόσημο θεωρείται θετικό εάν η γωνιακή ταχύτητα αυξάνεται αριστερόστροφα ή μειώνεται δεξιόστροφα και θεωρείται αρνητική εάν η γωνιακή ταχύτητα αυξάνεται δεξιόστροφα ή μειώνεται αριστερόστροφα. Σε τρεις διαστάσεις, η γωνιακή επιτάχυνση είναι ψευδοδιάνυσμα.

Για άκαμπτα σώματα, η γωνιακή επιτάχυνση πρέπει να προκαλείται από μια καθαρή εξωτερική ροπή. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για τα μη άκαμπτα σώματα: Για παράδειγμα, ένας αθλητής του καλλιτεχνικού πατινάζ μπορεί να επιταχύνει την περιστροφή του, αποκτώντας έτσι μια γωνιακή επιτάχυνση, απλώς συσπώνοντας τα χέρια και τα πόδια του προς τα μέσα, κάτι που γίνεται χωρίς την επίδραση εξωτερικής ροπής.

3.3.3 Ροπή

Ροπή δυνάμεως ως προς σημείο είναι το διανυσματικό φυσικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο προς το γινόμενο της δύναμης επί την (κάθετη) απόσταση της δύναμης από το σημείο. Κατά όμοιο τρόπο ροπή δυνάμεως ως προς άξονα είναι το διανυσματικό μέγεθος που έχει ως μέτρο το γινόμενο της δύναμης επί την (κάθετη) απόσταση της δύναμης από τον άξονα, και φορέα τον άξονα. Στην ουσία πρόκειται για ένα ψευδοδιάνυσμα που περιγράφει την ύπαρξη ή δημιουργία ζεύγους δυνάμεων. Η ροπή εκφράζεται σε Newton επί μέτρα (Nm). Τα συνήθη σύμβολα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της ροπής είναι το ελληνικό πεζό τ στη Φυσική (torque – ροπή περιστροφής), το M στη Μηχανική (moment – ροπή σημείων), και το λατινικό G .

Για παράδειγμα όταν σπρώχνεται μια τεράστια καγκελόπορτα ασκείται σ' αυτή μια δύναμη σε κάποια απόσταση από τον άξονα περιστροφής της (ζεύγος δυνάμεων με το σημείο αντίδρασης/στήριξης, τον μεντεσέ). Έτσι η ασκούμενη δύναμη περιστρέφει την καγκελόπορτα και την κλείνει ή την ανοίγει. Η επίδραση είναι περισσότερο έντονη όσο πιο μακριά από τον άξονα περιστροφής βρίσκεται το σημείο εφαρμογής της δύναμης, και όσο πιο κάθετη είναι η δύναμη στην καγκελόπορτα.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά της ροπής:

- Χαρακτηρίζεται ανάλογα με το είδος της δύναμης που ασκείται, ή εκ του αντικειμένου στο οποίο ασκείται αυτή όπως: ηλεκτρική, μαγνητική, αδράνειας, μαγνητική ροπή ατόμου, ηλεκτρικού κυκλώματος κλπ.
- Είναι ανάλογη της ασκούμενης δύναμης και της απόστασης της από το σημείο αντίδρασης (ή το εξεταζόμενο σημείο). Γραφικά, ανεξάρτητα δηλαδή από τα επιλεγμένα Μοναδιαία Μεγέθη, πάντα είναι πολλαπλάσια της δύναμης και είναι ίση με το εμβαδό που σχηματίζουν τα 2 διανύσματα. Δύναται επίσης να είναι πολλές κλίμακες μεγαλύτερη από την κλίμακα της ασκούμενης δύναμης όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στη περίφημη φράση του Αρχιμήδη: «δός μοι πᾶ στῶ καὶ τὰν γᾶν κινήσω», δηλαδή: «δώσε μου τόπο να σταθώ και τη Γη θα μετακινήσω».

- Όταν υπάρχει σταθερός άξονας περιστροφής, οι προβολές των δυνάμεων που είναι παράλληλες στον άξονα, όπως και οι προβολές που περνάνε από τον άξονα δεν δίνουν περιστροφή. Δηλαδή αν αναλύσουμε τις δυνάμεις σε σύστημα συντεταγμένων όπου $\sum_{i=1}^n \vec{F}_z$ οι προβολές που έχουν την κατεύθυνση του άξονα, $\sum_{i=1}^n \vec{F}_x$ οι προβολές που τέμνουν τον άξονα και $\sum_{i=1}^n \vec{F}_y$ οι προβολές που είναι κάθετες στην απόσταση r , μόνο οι δυνάμεις στον y δίνουν περιστροφή. Γενικότερα, όταν δεν υπάρχει σταθερός άξονας αντίδρασης, τον άξονα περιστροφής περιγράφει το εξωτερικό γινόμενο και λέμε ότι η ροπή είναι ανάλογη του $\sin \theta$ που έχει το διάνυσμα της δύναμης με το διάνυσμα της απόστασης.

Η ροπή ορίζεται από τη (διανυσματική) σχέση:

$$M = r \times F \quad (3.4)$$

όπου r η απόσταση από το εξεταζόμενο σημείο του σημείου εφαρμογής της δύναμης, και F η ασκούμενη δύναμη. Η φυσική σημασία της σχέσης $r \times F$ είναι ότι ως ψευδοδιεύθυνση της ασκούμενης ροπής θεωρούμε εκείνη που είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα r και F , όπως ορίζει ο κανόνας του δεξιού χεριού. Σε σταθερό άξονα η περιστροφή (το ορατό αποτέλεσμα/torque) είναι η προβολή του διανύσματος της ροπής (moment) στον άξονα περιστροφής.

Ανάλογα με τον τρόπο που ορίζεται η δύναμη από τον 2ο Νόμο του Νεύτωνα, ορίζεται και η ροπή:

$$\tau = I\alpha \quad (3.5)$$

όπου I η ροπή αδράνειας του περιστρεφόμενου σώματος και α το διάνυσμα της γωνιακής επιτάχυνσης.

3.3.4 Στροφορμή

Η στροφορμή (στροφή + ορμή) είναι φυσικό μέγεθος, αλλά και ιδιότητα που χαρακτηρίζει γενικά τα περιστρεφόμενα σώματα.

Συγκεκριμένα ως ιδιότητα χαρακτηρίζει την αδράνεια ως προς την κίνηση ενός σώματος ή συστήματος σωμάτων γύρω από ένα άξονα, που μπορεί να διέρχεται ή όχι, από το σώμα ή το σύστημα αντίστοιχα. Για παράδειγμα η Γη που περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο χαρακτηρίζεται από την στροφορμή περιφοράς, ενώ κατά την ημερήσια περιστροφή της γύρω από τον άξονά της χαρακτηρίζεται από στροφορμή περιστροφής ή αυτοπεριστροφής.

Ως φυσικό μέγεθος που εμφανίζεται στην περιστροφική κίνηση, η στροφορμή είναι διανυσματικό μέγεθος που απαιτεί τη γνώση τόσο του μέτρου της όσο και της διεύθυνσης και φοράς της, προκειμένου να γίνει περιγραφή της. Έτσι το μέτρο της στροφορμής L λόγω της περιφοράς ενός σώματος είναι το γινόμενο της ορμής του p , (που είναι το γινόμενο της μάζας του m , επί τη ταχύτητά του v), επί την απόσταση r του κέντρου περιστροφής από την ευθεία που διέρχεται από το κέντρο βάρους του σώματος, αλλά και που ταυτίζεται με την διεύθυνση της στιγμιαίας ταχύτητάς του. Έξ αυτών συνάγεται η σχέση:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad (3.6)$$

και επειδή: $\vec{p} = m\vec{v}$, η σχέση τελικά γίνεται:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad (3.7)$$

Η στροφορμή συνήθως συμβολίζεται με τα γράμματα L ή Ω , η δε μονάδα μέτρησης της στο SI εκφράζεται σε kgm^2/s .

Χρησιμοποιώντας τη ροπή αδράνειας, η σχέση στροφορμής και γωνιακής ταχύτητας περιστροφής είναι:

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \quad (3.8)$$

Σε αντιστοιχία με την μεταφορική κίνηση, όπου ο ρυθμός μεταβολής είναι ίσος με την συνισταμένη εξωτερική δύναμη, ο ρυθμός μεταβολής της στροφορμής στερεού σώματος είναι ίσος με τη ροπή στρέψης που ασκείται από εξωτερικούς παράγοντες:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau} \quad (3.9)$$

η οποία με χρήση της ροπής αδράνειας γίνεται:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(I\vec{\omega}) = \frac{dI}{dt}\vec{\omega} + I\frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (3.10)$$

Όταν η εξωτερική ροπή είναι μηδέν, η στροφορμή είναι διατηρήσιμη ποσότητα της κίνησης:

$$\frac{dI}{dt}\vec{\omega} + I\frac{d\vec{\omega}}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

Όταν το στερεό περιστρέφεται περί κάποιον άξονα προς τον οποίο παρουσιάζει συμμετρία κατανομής μάζας, τότε η ροπή αδράνειας ως προς αυτόν τον άξονα παραμένει σταθερή. Τότε ισχύει:

$$\vec{\tau} = I\frac{d\omega}{dt} \quad (3.12)$$

και τα τρία μεγέθη, ροπή, στροφορμή και γωνιακή ταχύτητα, είναι παράλληλα διανύσματα.

Στη γενική περίπτωση, το διάνυσμα της στροφορμής δεν είναι παράλληλο με το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας. Όταν η ίδια η περιστροφή μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στερεού και επομένως τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας, τότε η ροπή αδράνειας δεν μπορεί να είναι σταθερή.

Για ένα συγκεκριμένο περιστρεφόμενο σώμα ή σύστημα σωμάτων στο οποίο δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις η συνολική στροφορμή παραμένει αμετάβλητη. Αυτό χαρακτηρίζεται ως *Αρχή Διατήρησης της Στροφορμής*. Για παράδειγμα, ένα στερεό σώμα που εκτελεί περιστροφή στον άξονά του θα συνεχίσει να περιστρέφεται στον άξονά του με σταθερή ταχύτητα και καθορισμένη φορά εφόσον δεν ασκηθεί σε αυτό κάποια εξωτερική ροπή. Σε τέτοια περίπτωση ο ρυθμός μεταβολής της στροφορμής του είναι ίσος με την εφαρμοζόμενη ροπή.

Χαρακτηριστική περίπτωση των παραπάνω αποτελεί η εικόνα της θεαματικής περιστροφής ενός παγοδρόμου αθλητή του καλλιτεχνικού πατινάζ, που περιστρέφεται

ταχύτερα, δηλαδή με μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα, όταν μετακινεί τα χέρια του προς τα μέσα ή τα ενώνει σε ανάταση μειώνοντας έτσι τη ροπή αδράνειάς του, ενώ η στροφορμή του παραμένει σταθερή. Επίσης επειδή ακριβώς η στροφορμή διατηρείται σταθερή και ως προς τη διεύθυνσή της οι γυροσκοπικές πυξίδες των πλοίων και των αεροσκαφών διατηρούν τον προσανατολισμό τους ανεξαρτήτως των διαφόρων κινήσεων των μέσων που φέρονται. Τέλος και τα στοιχειώδη σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια των ατόμων χαρακτηρίζονται από στροφορμή λόγω της τροχιάς τους αλλά και λόγω της ιδιοπεριστροφής τους που είναι περισσότερο γνωστή ως *σπιν*.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για την κλασική μηχανική. Η στροφορμή είναι όμως και κβαντομηχανικό μέγεθος και παίζει σημαντικό ρόλο στην κβαντική μηχανική κάτι στο οποίο δε θα επεκταθούμε στη παρούσα εργασία.

3.3.5 Ροπή Αδράνειας

Η ροπή αδράνειας (ή γωνιακή μάζα) είναι μέγεθος της μηχανικής και εκφράζει την κατανομή των υλικών σημείων ενός σώματος ως προς έναν άξονα περιστροφής. Συμβολίζεται συνήθως ως I και έχει διαστάσεις μάζας επί μήκος στο τετράγωνο σε μονάδες διεθνούς συστήματος kgm^2 . Υπολογίζεται ως άθροισμα γινομένων στοιχειωδών μαζών επί το τετράγωνο της απόστασής τους από έναν άξονα. Η γενική σχέση που δίνει την ροπή αδράνειας ενός συστήματος n σωματιδίων είναι η:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (3.13)$$

όπου m_i η μάζα και r_i η απόσταση από τον άξονα περιστροφής του i -οστού σωματιδίου.

Στη περίπτωση μίας συνεχούς κατανομής μάζας, η ροπή αδράνειας ενός στερεού γνωστής πυκνότητας μάζας ρ ορίζεται με βάση το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$I = \int \rho r^2 d^3r \quad (3.14)$$

Η ροπή αδράνειας έχει στην περιστροφική κίνηση έναν ρόλο αντίστοιχο με αυτόν της μάζας στην μεταφορική. Συγκεκριμένα, η φυσική σημασία της ροπής αδράνειας σχετίζεται με την ικανότητα που έχουν τα σώματα να αντιστέκονται σε μεταβολές της περιστροφικής τους κατάστασης. Όσο μεγαλύτερη ροπή αδράνειας έχει ένα σώμα, τόσο δυσκολότερα περιστρέφεται.

Η ροπή αδράνειας ορίζεται πάντοτε ως προς κάποιον άξονα περιστροφής. Για τα σώματα που είναι περιορισμένα να περιστρέφονται σε ένα επίπεδο, σημασία έχει μόνο η ροπή αδράνειας τους γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο, μια βαθμωτή τιμή. Για σώματα που είναι ελεύθερα να περιστρέφονται σε τρεις διαστάσεις, οι ροπές τους μπορούν να περιγραφούν με έναν συμμετρικό πίνακα 3×3 (τανυστής ροπών αδράνειας), με ένα σύνολο αμοιβαία κάθετων κύριων αξόνων, για τους οποίους αυτός ο πίνακας είναι διαγώνιος και οι ροπές γύρω από τους άξονες δρουν ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

3.4 Μηχανική των Στερεών

3.4.1 Κέντρο Βάρους

Γενικά θεωρείται ότι η βαρύτητα εφαρμόζεται σε κάθε σημείο ενός σώματος έλκοντας αυτό προς το κέντρο της Γης. Έτσι όλες οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα λόγω της σμίκρυνσης αυτού σε σχέση με την ακτίνα της Γης θεωρούνται παράλληλες. Η συνισταμένη όλων αυτών ονομάζεται *βάρος του σώματος*. Το σημείο εφαρμογής αυτής της συνισταμένης πάνω στο σώμα ονομάζεται *κέντρο βάρους του σώματος*. Σε περίπτωση που το πεδίο βαρύτητας είναι ομοιογενές σε όλο τον χώρο που καταλαμβάνει το σώμα και η πυκνότητα του σώματος έχει ομοιόμορφη κατανομή, το κέντρο βάρους είναι το ίδιο σημείο με το κέντρο μάζας του σώματος.

Το κέντρο βάρους αποτελεί το σημείο εκείνο του σώματος που επιδέχεται υποστήριξη προκειμένου να ισορροπήσει υπό την ενέργεια της βαρύτητας. Αναλυτικά βρίσκονται οι συντεταγμένες X , Y , και Z του κέντρου βάρους σε σχέση προς το σύστημα αξόνων συντεταγμένων δια των εξισώσεων:

$$\begin{aligned}G_x &= \sum B_x \\G_y &= \sum B_y \\G_z &= \sum B_z\end{aligned}\tag{3.15}$$

όπου G το βάρος του σώματος, x , y και z οι συντεταγμένες στοιχείου του σώματος βάρους B .

Το κέντρο βάρους σώματος μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με τη μέθοδο της διπλής εξάρτησης ή με τη μέθοδο της διπλής στήριξης. Προκειμένου περί ομογενών σωμάτων με γεωμετρικό σχήμα, π.χ. σφαίρας, το κέντρο βάρους είναι το γεωμετρικό κέντρο της, σε κυκλικό σώμα το κέντρο του, σε τριγωνικό το σημείο τομής των τριών διαμέσων του και σε παραλληλόγραμμο το σημείο τομής των διαγωνίων του.

Τέλος, η θέση του κέντρου βάρους ενός ομογενούς σώματος με σταθερή μάζα και σταθερό σχήμα είναι αμετάθετη όπως και να μετακινηθεί αυτό. Στα ομοιογενή σώματα το κέντρο βάρους εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα τους, ενώ στα ανομοιογενή από τη διάθεση της ύλης.

3.4.2 Κέντρο Μάζας

Το κέντρο μάζας ενός σώματος ή ενός συστήματος σωμάτων είναι το σημείο το οποίο συμπεριφέρεται ως η μάζα όλου του σώματος ή του συστήματος, να είναι συγκεντρωμένη σ' αυτό. Το κέντρο μάζας είναι συνάρτηση μόνο της θέσης και της μάζας κάθε σώματος που περιλαμβάνεται στο σύστημα. Στην περίπτωση ενός μηχανικού στερεού, η θέση του κέντρου μάζας του είναι σταθερή σε σχέση με το σώμα, αλλά όχι αναγκαία πάνω σε αυτό. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς βαρυτικού πεδίου, το κέντρο μάζας συμπίπτει με το κέντρο βάρους, το σημείο στο οποίο λέγεται ότι ενεργεί η βαρύτητα.

Το κέντρο μάζας ενός σώματος δεν συμπίπτει πάντα με το γεωμετρικό του κέντρο, πράγμα που πολλές φορές αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο. Οι μηχανικοί προσπαθούν να

κάνουν τα σπορ αυτοκίνητα όσο το δυνατόν ελαφρύτερα, ενώ προσπαθούν να συγκεντρώνουν το βάρος στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου.

Το κέντρο μάζας R ενός συστήματος σωμάτων ορίζεται ως το άθροισμα των γινομένων της μάζας κάθε σώματος επί την αντίστοιχη απόσταση, προς τη συνολική μάζα του συστήματος:

$$R = \frac{1}{M} \sum m_i r_i \quad (3.16)$$

όπου M είναι η συνολική μάζα του συστήματος.

Για μια συνεχή κατανομή με πυκνότητα μάζας $\rho(r)$, το άθροισμα γίνεται ολοκλήρωμα:

$$R = \frac{1}{M} \int r dm = \frac{1}{M} \int \rho(r) r dV = \frac{\int \rho(r) r dV}{\int \rho(r) dV} \quad (3.17)$$

Αν ένα αντικείμενο έχει ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας (ομογενές) τότε το κέντρο μάζας του συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του σώματος.

3.4.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα συνιστά φυσικό μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η μάζα ενός υλικού ανά μονάδα όγκου. Συνήθως, συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ρ ή με το λατινικό γράμμα d . Η μονάδα μέτρησης της στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων είναι το χιλιόγραμμο ανά κυβικό μέτρο, kg/m^3 . Ο βασικός μαθηματικός τύπος της πυκνότητας είναι ο λόγος της μάζας ενός υλικού m , προς τον όγκο V , που την περιέχει:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.18)$$

Η πυκνότητα συνιστά ένα εντατικό μέγεθος, καθώς εκφράζεται ως πηλίκο μεγεθών που εξαρτώνται από την ποσότητα του υλικού το οποίο αφορούν (εκτατικά μεγέθη). Συνεπώς, η πυκνότητα είναι χαρακτηριστικό μέγεθος του εκάστοτε υλικού και δεν εξαρτάται από την ποσότητα του. Για παράδειγμα, η πυκνότητα ενός σιδερένιου συνδετήρα είναι ίδια με την πυκνότητα μιας σιδερένιας ράβδου, δηλαδή ίση με $7880 kg/m^3$ περίπου, καθώς το υλικό κατασκευής των δύο αντικειμένων είναι το ίδιο.

Προς απλοποίηση των συγκρίσεων πυκνότητας σε διαφορετικά συστήματα μονάδων, η πυκνότητα συχνά αντικαθίσταται από την αδιάστατη ποσότητα που είναι γνωστή ως «ειδικό βάρος». Πρόκειται για τον λόγο της πυκνότητας ενός υλικού προς την πυκνότητα ενός άλλου, πρότυπου υλικού, συνήθως του νερού. Έτσι, ένα υλικό με ειδικό βάρος μικρότερο του νερού, δηλαδή < 1 , επιπλέει εντός αυτού, ενώ ένα υλικό με ειδικό βάρος μεγαλύτερο του νερού, δηλαδή > 1 , βυθίζεται εντός του.

3.4.4 Ελαστικότητα

Ελαστικότητα είναι η ιδιότητα υλικών σωμάτων να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά από άσκηση εξωτερικής τάσης. Ελαστικά είναι τα σώματα στα οποία αποκαθίσταται το αρχικό τους σχήμα όταν μηδενίζεται η τάση που εφαρμόζεται σε αυτά ενώ πλαστικά είναι τα σώματα που η παραμόρφωση που έχουν δεχτεί παραμένει

μόνιμα. Η ελαστικότητα των σωμάτων χαρακτηρίζεται από ένα φυσικό μέγεθος, γνωστό ως μέτρο ελαστικότητας.

Κάθε υλικό σώμα με την άσκηση τάσης, δηλαδή δύναμης ανά μονάδα διατομής, παραμορφώνεται. Για μικρές τάσεις η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται. Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση σε κάθε σώμα είναι σταθερός και ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται και την φύση της παραμόρφωσης.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες παραμόρφωσης που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Η γραμμική παραμόρφωση που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας Young, η παραμόρφωση σχήματος που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας σχήματος και η παραμόρφωση όγκου που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας όγκου.

3.4.4.1 Μέτρο Ελαστικότητας Young

Το μέτρο ελαστικότητας Young εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος, πρακτικά ενός σώματος με μεγάλο μήκος και μικρή διατομή, όπως μία μακριά ράβδος. Το μέτρο ελαστικότητας Young ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του, δηλαδή:

$$Y = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} \quad (3.19)$$

3.4.4.2 Μέτρο Διάτμησης

Το μέτρο διάτμησης χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση. Περιγράφεται από την μαθηματική σχέση:

$$S = \frac{F/A_0}{\Delta x/h} \quad (3.20)$$

3.4.4.3 Μέτρο Ελαστικότητας Όγκου

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που κατά την παραμόρφωσή τους μεταβάλλεται ο όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την μεταβολή του όγκου του σώματος. Δίνεται από την σχέση:

$$B = \frac{F/A_0}{\Delta V/V_0} \quad (3.21)$$

3.4.5 Τάση

Στη μηχανική του συνεχούς, η τάση είναι ένα φυσικό μέγεθος που περιγράφει το μέγεθος των δυνάμεων που προκαλούν παραμόρφωση. Η τάση ορίζεται ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Όταν ένα αντικείμενο τραβιέται μακριά από μια δύναμη θα προκαλέσει επιμήκυνση που είναι επίσης γνωστή ως παραμόρφωση, όπως το τέντωμα μιας ελαστικής ταινίας, που ονομάζεται τάση εφελκυσμού. Όταν δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα τη συμπίεση ενός αντικειμένου, ονομάζεται θλιπτική τάση. Προκύπτει όταν δυνάμεις όπως η τάση ή η συμπίεση δρουν σε ένα σώμα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η δύναμη και όσο μικρότερη είναι η περιοχή διατομής του σώματος στο οποίο δρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση. Επομένως, η τάση μετριέται σε Newton ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m^2) ή σε Πασκάλ (Pa), συμβολίζεται με το πεζό ελληνικό γράμμα σ και ο γενικός μαθηματικός της τύπος είναι:

$$\sigma_{avg} = \frac{F_n}{A} \quad (3.22)$$

Η τάση εκφράζει τις εσωτερικές δυνάμεις που ασκούν μεταξύ τους τα γειτονικά σωματίδια ενός συνεχούς υλικού, ενώ η μηχανική παραμόρφωση είναι το μέτρο της παραμόρφωσης του υλικού. Για παράδειγμα, όταν μια συμπαγής κατακόρυφη ράβδος υποστηρίζει ένα βάρος από πάνω της, κάθε σωματίδιο στη ράβδο πιέζει τα σωματίδια ακριβώς κάτω από αυτήν. Όταν ένα υγρό βρίσκεται σε ένα κλειστό δοχείο υπό πίεση, κάθε σωματίδιο «σπρώχνεται» από όλα τα γύρω σωματίδια. Αυτές οι μακροσκοπικές δυνάμεις είναι στην πραγματικότητα το καθαρό αποτέλεσμα ενός πολύ μεγάλου αριθμού διαμοριακών δυνάμεων και συγκρούσεων μεταξύ των σωματιδίων σε αυτά τα μόρια.

Η παραμόρφωση ενός υλικού μπορεί να προκύψει από διάφορους μηχανισμούς, όπως η πίεση που ασκείται από εξωτερικές δυνάμεις στο κύριο όγκο του υλικού (όπως η βαρύτητα) ή στην επιφάνειά του (όπως δυνάμεις επαφής, εξωτερική πίεση ή τριβή). Οποιαδήποτε παραμόρφωση ενός στερεού υλικού δημιουργεί μια εσωτερική ελαστική τάση, ανάλογη με τη δύναμη αντίδρασης ενός ελατηρίου, που τείνει να επαναφέρει το υλικό στην αρχική του μη παραμορφωμένη κατάσταση. Στα υγρά και τα αέρια, μόνο οι παραμορφώσεις που αλλάζουν τον όγκο δημιουργούν ελαστική παραμόρφωση αν και τα υγρά θεωρούνται θεωρητικά ασυμπίεστα.

Σημαντική τάση μπορεί να υπάρχει ακόμη και όταν η παραμόρφωση είναι αμελητέα ή ανύπαρκτη (μια κοινή υπόθεση κατά τη μοντελοποίηση της ροής του νερού). Τάση μπορεί να υπάρχει απουσία εξωτερικών δυνάμεων. Αυτή η ενσωματωμένη τάση είναι σημαντική, για παράδειγμα, στο προεντεταμένο σκυρόδεμα και στο σκληρυμένο γυαλί. Η πίεση μπορεί επίσης να επιβληθεί σε ένα υλικό χωρίς την εφαρμογή καθαρών δυνάμεων, για παράδειγμα από αλλαγές στη θερμοκρασία ή τη χημική σύνθεση ή από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία (όπως στα πιεζοηλεκτρικά και μαγνητοσυστολικά υλικά).

Η σχέση μεταξύ της μηχανικής τάσης, της παραμόρφωσης και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκη, αν και μια γραμμική προσέγγιση μπορεί να είναι επαρκής στην πράξη εάν οι ποσότητες είναι αρκετά μικρές. Η πίεση που υπερβαίνει ορισμένα όρια αντοχής του υλικού θα οδηγήσει σε μόνιμη παραμόρφωση (όπως ροή πλαστικού, θραύση, σπηλαιώση) ή ακόμη και αλλαγή της κρυσταλλικής δομής και της χημικής του σύστασης.

3.5 Μηχανική των Ρευστών

Η μηχανική των ρευστών αποτελεί ιδιαίτερο κλάδο της κλασικής μηχανικής με κύριο αντικείμενο έρευνας και μελέτης τη συμπεριφορά των ρευστών επί ασκούμενων δυνάμεων ή προσφοράς ενέργειας σε αυτά. Γενικά η κλασική μηχανική ασχολείται με την κίνηση των σωμάτων, ενώ η μηχανική των ρευστών με την αντίστοιχη, τη ροή των ρευστών, δηλαδή των υγρών και αερίων. Η κατανόηση της μηχανικής των ρευστών έχει ιδιαίτερα σπουδαία σημασία σε πολλούς τομείς επιστημών π.χ. στην Ιατρική, επί της ροής και κυκλοφορίας του αίματος, στη μετεωρολογία, επί των αερίων στρωμάτων, στην αεροναυπηγική, επί των δυνάμεων που ασκούνται στα αεροσκάφη, στη μηχανολογία, καθώς και στη χημική μηχανική ειδικότερα σε θέματα αντιδραστήρων, αποτελούν ενδεικτικά τομείς που απαιτούν άριστη γνώση των ιδιοτήτων των ρευστών. Σημαντικότεροι επιμέρους κλάδοι της επιστήμης αυτής είναι η Υδροστατική, η Υδροδυναμική, η Αεροδυναμική και η τεχνική Υδραυλική.

Τα σημαντικότερα θεωρήματα της μηχανικής των ρευστών είναι ο θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής, η αρχή του Πασκάλ, η αρχή του Αρχιμήδη, η εξίσωση της συνέχειας και η εξίσωση του Μπερνούλλι. Οι τρεις πρώτοι νόμοι είναι και οι βασικοί νόμοι της υδροστατικής και οι δύο τελευταίοι της υδροδυναμικής.

- *Ο Θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής:* Ο νόμος αυτός αφορά υγρό που ισορροπεί μέσα σε ένα βαρυτικό πεδίο. Ο θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής αναφέρει ότι η πίεση που ασκείται από το υγρό σε ένα σημείο του που βρίσκεται σε βάθος h , ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας του υγρού ρ , της επιτάχυνσης της βαρύτητας g και του βάθους από την επιφάνεια του υγρού h , δηλαδή ισχύει:

$$P = \rho gh \quad (3.23)$$

- *Αρχή του Πασκάλ:* Η αρχή του Πασκάλ διατυπώθηκε από τον Μπλεζ Πασκάλ και αναφέρει ότι η πίεση που δημιουργεί ένα εξωτερικό αίτιο σε κάποιο σημείο του υγρού μεταφέρεται αναλλοίωτη σε όλα τα σημεία του υγρού.
- *Αρχή του Αρχιμήδη:* Η αρχή του Αρχιμήδη που διατυπώθηκε από τον αρχαίο Έλληνα μαθηματικό Αρχιμήδη, αναφέρει ότι κάθε σώμα που είναι πλήρως βυθισμένο σε ένα ρευστό δέχεται δύναμη άνωσης, ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει. Ισχύει δηλαδή:

$$A = B_{υγρ} \quad (3.24)$$

- *Εξίσωση της συνέχειας:* Η εξίσωση της συνέχειας αναφέρει ότι η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος μίας ενός αγωγού που διαρρέεται από υγρό. Η εξίσωση αυτή είναι άμεση συνέπεια της αρχής διατήρησης της ύλης.
- *Η εξίσωση του Bernoulli:* Η εξίσωση αυτή διατυπώθηκε από τον Ελβετό φυσικό Daniel Bernoulli και είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας σε κινούμενο υγρό. Σύμφωνα με αυτή σε μία ρευματική γραμμή το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου, της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου και της πίεσης παραμένουν σταθερά, σε οποιοδήποτε σημείο της ρευματικής γραμμής. Δηλαδή ισχύει:

$$P + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho gh = \text{σταθερό} \quad (3.25)$$

Με σύγχρονους όρους, η παραπάνω εξίσωση εκφράζει το γεγονός πως η συνολική πίεση κατά την διεύθυνση της ροής παραμένει σταθερή. Έτσι, η πίεση P στην παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στην θερμοδυναμική πίεση, ο

κινητικός όρος αναφέρεται σε πυκνότητα κινητικής ενέργειας κατά τη διεύθυνση της ροής και ο όρος βαρύτητας, ή οποιουδήποτε άλλου εξωτερικού πεδίου επιδρά στα σωματίδια της ροής, αποτελεί ενεργειακό όρο ο οποίος προστίθεται ή αφαιρείται ανάλογα με το αν ενισχύει ή εμποδίζει τη ροή.

Εννοώντας την πίεση ως πυκνότητα ενέργειας, είναι σαφές πως σε διευθύνσεις κάθετες στη ροή ο κινητικός όρος της συνολικής πίεσης δεν ασκεί δύναμη. Επίσης, η εξίσωση μπορεί να δεχτεί και μηχανικό εξωτερικό έργο, θετικό για αντλίες ή αρνητικό για υδροστροβίλους:

$$P + P_w + \frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gh = P_t \quad (3.26)$$

όπου P_w η πίεση που οφείλεται στο εξωτερικό μηχανικό έργο.

Σε υδραυλικά έργα η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται με όρους υψομετρικού:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{1}{2g}u^2 + h = \frac{P_t}{\rho g} \quad (3.27)$$

στην οποία μπορεί να προστεθεί κι ένας όρος γραμμικής απώλειας ύψους λόγω τριβών. Έτσι, αν και η εξίσωση του Μπερνούλι αναφέρεται σε ιδανικά ρευστά, είναι εύκολη η προσαρμογή της σε πραγματικά υδραυλικά έργα, για τα οποία δίνει πολύ καλές προσεγγίσεις.

Στο παρελθόν εξετάζονταν διαφορετικά οι μηχανικές ιδιότητες των υγρών από τις μηχανικές ιδιότητες των αερίων. Σταδιακά διαπιστώθηκε πως οι νόμοι που διέπουν τα υγρά βρίσκουν εφαρμογή και στα αέρια και το αντίστροφο και έτσι οι δύο κλάδοι ενοποιήθηκαν στην μηχανική των ρευστών. Ο κλάδος που εξετάζει τις ιδιότητες των υγρών ονομαζόταν Υδρομηχανική. Υδρομηχανική είναι ο κλάδος της μηχανικής των ρευστών που εξετάζει τις μηχανικές ιδιότητες των υγρών. Ασχολείται με την ηρεμία και με την κίνησή τους, καθώς και με τις δυνάμεις που το προκαλούν. Ο κλάδος αυτός διακρίνεται σε δύο επιμέρους κλάδους:

1. Την Υδροστατική που εξετάζει τη συμπεριφορά των υγρών σε ηρεμία και
2. Την Υδροδυναμική που εξετάζει τη συμπεριφορά των υγρών «εν κινήσει».

Η βάση της επιστήμης αυτής τέθηκε το 1757, όταν ο Ελβετός επιστήμονας Leonhard Euler διατύπωσε τους βασικούς νόμους της κίνησης των υγρών.

3.5.1 Πίεση

Με τον όρο πίεση p ή P αποκαλούμε το χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος ενός συστήματος, το οποίο ισοδυναμεί με την πυκνότητα ενέργειας την οποία διαθέτει αυτό το σύστημα. Οποσδήποτε, η πίεση δεν προϋποθέτει επιφάνεια για να είναι καλά ορισμένη, αλλά η διαδικασία μέτρησής της ανάγεται στη μέτρηση μιας δύναμης η οποία ασκείται κάθετα σε συγκεκριμένη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, συχνά ορίζουμε ως πίεση σε επιφάνεια A το πηλίκο της δύναμης F που ασκείται κάθετα στην επιφάνεια, προς το εμβαδό αυτής της επιφάνειας:

$$p = \frac{F \cdot \hat{n}}{A} \quad (3.28)$$

όπου \hat{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα, κάθετα στην επιφάνεια A . Έτσι, αν η δύναμη ασκείται υπό γωνία, το αποτέλεσμα του διανυσματικού γινομένου επιβάλλει να υπολογίζεται μόνο η κάθετη στην επιφάνεια συνιστώσα της δύναμης $F \cos\theta$.

Διάφορες μονάδες μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν για να εκφράσουν την πίεση. Κάποιες από αυτές παράγονται από τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης δύναμης και επιφάνειας. Η μονάδα μέτρησης πίεσης για το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι το πασκάλ (Pa), που αντιστοιχεί σε δύναμη 1 νιούτον (N) που εφαρμόζεται ανά τετραγωνικό μέτρο (m^2) $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$, μονάδα η οποία έχει τις ίδιες διαστάσεις με J/m^3 . Η τελευταία προέρχεται από τον εναλλακτικό ορισμό της πίεσης ως πυκνότητας ενέργειας, αλλά δεν χρησιμοποιείται ως μονάδα επειδή δεν είναι πρακτικά εφικτή η μέτρηση της πίεσης με έναν τέτοιο τρόπο. Η πρακτική μονάδα πίεσης είναι το bar, που ισοδυναμεί με 100.000 Pa. Άλλη παραδοσιακή μονάδα μέτρησης πίεσης αποτελεί το psi, που αντιστοιχεί σε δύναμη 1 λίβρας (lb_f) που εφαρμόζεται ανά τετραγωνική ίντσα (in^2). Η πίεση εκφράζεται επίσης σε σύγκριση με την κανονική ατμοσφαιρική πίεση (atm) η οποία ορίζεται ως 101.325 Pa. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης και άλλες μονάδες μανομετρικής πίεσης, όπως τα εκατοστόμετρα νερού (cmH_2O), τα χιλιοστόμετρα στήλης υδραργύρου (mmHg ή Torr) και ίντσες στήλης υδραργύρου (inHg), που εκφράζουν την πίεση σε σύγκριση με αυτήν που ασκούν αντίστοιχες στήλες των αναφερόμενων ρευστών (υπό κανονική βαρύτητα). Γενικά η πίεση μετριέται με ειδικά όργανα τα μανόμετρα και ειδικά για την ατμοσφαιρική πίεση, τα βαρόμετρα.

Τα ρευστά, αέρια και υγρά, δεν έχουν καθορισμένο σχήμα και προσαρμόζονται στο σχήμα των στερεών επιφανειών με τις οποίες εφάπτονται. Έτσι, η δύναμη λόγω πίεσης που ασκεί ένα ρευστό σε μία επιφάνεια είναι πάντα κάθετη σε αυτήν. Όταν ένα ρευστό βρίσκεται μέσα σε πεδίο βαρύτητας, τότε η βαρυτική δύναμη του υπερκείμενου ρευστού είναι ο ουσιαστικός μηχανισμός ο οποίος καθορίζει την τιμή της πίεσης σε κάθε σημείο του ρευστού. Έτσι, ορίζουμε τη *στατική* ή *υδροστατική πίεση* η οποία αντιστοιχεί στο βάρος στήλης συγκεκριμένου ύψους και συγκεκριμένης διατομής στήλης, η οποία περιέχει το ρευστό που μας ενδιαφέρει. Έτσι προκύπτει ο νόμος της υδροστατικής πίεσης για τα ασυμπίεστα υγρά ως:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{mgh}{Ah} = \frac{m}{V} gh = \rho gh \quad (3.29)$$

όπου ρ είναι η (σταθερή) πυκνότητα του υγρού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και h είναι το ύψος από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Η υδροστατική πίεση μετριέται από την ελεύθερη επιφάνεια, στην οποία η πραγματική πίεση δεν είναι μηδέν αλλά 1 atm.

Για την πίεση της ατμόσφαιρας χρησιμοποιούμε την ίδια διαδικασία αλλά εδώ η πυκνότητα δεν είναι σταθερή, υπακούει σε μια καταστατική εξίσωση: $p = \rho RT$, οπότε θα είναι:

$$\begin{aligned} \rho RT &= \int \rho(h) g dh \Rightarrow \int \frac{d\rho}{\rho(h)} = \int_h^\infty \frac{GM}{RTh^2} dh \Rightarrow -\ln(\rho h) = -\frac{2GM}{RTh} + c \Rightarrow \\ &\Rightarrow \rho(h) = \rho(0) e^{2GM/hRT} \Rightarrow \rho(h) = \rho(0) e^{-\frac{RT}{2GM}h} \end{aligned} \quad (3.30)$$

αποτέλεσμα το οποίο εκφράζει την εκθετική πτώση της ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος, υπολογιζόμενη ως υδροστατικής πίεσης συμπιεστού ρευστού. Χρησιμοποιώντας την εκθετική μείωση της πυκνότητας του αέρα με το ύψος στην

ατμόσφαιρα, μπορούμε να υπολογίσουμε την υδροστατική πίεση της ατμόσφαιρας με τρόπο ανάλογο με αυτόν των υγρών.

Όταν ένα ρευστό κινείται και μεταβάλλεται η κινητική του ενέργεια ή/και η ορμή του, τότε η μεταβολή αυτή εμφανίζεται ως πίεση, την οποία αποκαλούμε *δυναμική πίεση*. Για πρακτικούς λόγους μπορούμε να χρησιμοποιούμε κατά περίπτωση και λιγότερο δόκιμους όρους όπως η «πίεση ακτινοβολίας», αλλά όλες ανάγονται στους δύο παραπάνω αρχικούς ορισμούς, αν και τα όργανα μέτρησης λειτουργούν αντιμετωπίζοντας την πίεση ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας.

Τέλος, ως *απόλυτη πίεση* ορίζεται εκείνη που ως αρχή μέτρησης έχει το απόλυτο κενό, ενώ *πραγματική πίεση* χαρακτηρίζεται εκείνη που ως αρχή μέτρησης λαμβάνεται η βαρομετρική πίεση.

3.5.2 Άνωση

Άνωση ονομάζεται η συνισταμένη δύναμη που δέχεται ένα σώμα από το ρευστό μέσα στο οποίο βρίσκεται. Η άνωση έχει κοινή διεύθυνση με το βάρος του σώματος, και αντίθετη φορά. Η άνωση αναφέρεται σε συστήματα που βρίσκονται σε ηρεμία και δεν πρέπει να συγχέεται με την άντωση. Η μελέτη του φαινομένου της άνωσης εμπίπτει στον κλάδο της φυσικής που ονομάζεται «στατική των ρευστών».

Η άνωση εκδηλώνεται σε κάθε σώμα που βρίσκεται εντός ρευστού, παρουσία βαρυτικού πεδίου και γίνεται αντιληπτή ως δύναμη που δρα αντίθετα στο βάρος. Το μέγεθος της άνωσης προκύπτει από την Αρχή του Αρχιμήδη κατά την οποία: «Κάθε σώμα βυθισμένο σε ρευστό δέχεται δύναμη ίση και αντίθετη με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει». Η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση είναι:

$$A = \rho g V \quad (3.31)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και V ο όγκος του βυθισμένου σώματος.

Το σημείο εφαρμογής της άνωσης λέγεται κέντρο άνωσης και συμπίπτει με το κέντρο βάρους του εκτοπιζόμενου υγρού. Ως εκ τούτου, η θέση εφαρμογής της άνωσης ενός σώματος διαφέρει κατά κανόνα από την θέση εφαρμογής του βάρους του.

- Όταν το βάρος του σώματος είναι μεγαλύτερο του βάρους του εκτοπίσματος του, τότε η συνισταμένη βάρους – άνωσης έχει φορά προς τα κάτω και το σώμα βυθίζεται.
- Όταν το βάρος σώματος είναι μικρότερο του βάρους του εκτοπίσματος του, τότε η συνισταμένη βάρους – άνωσης έχει φορά προς τα πάνω και το σώμα ανέρχεται.
- Όταν το βάρος και η άνωση είναι απολύτως ίσα, το σώμα βρίσκεται σε αδιάφορη ισορροπία, σε οποιαδήποτε στάθμη μέσα στον όγκο του ρευστού.

Αν το υγρό παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια τότε, στην περίπτωση που το βάρος του σώματος είναι μικρότερο του βάρους του εκτοπίσματος του, αυτό ανέρχεται στην επιφάνεια και μένει βυθισμένο κατά το μέρος που απαιτείται για να εξισωθεί το βάρος του εκτοπίσματος με το βάρος του σώματος. Σε αυτή τη περίπτωση λέγεται ότι το σώμα «επιπολάζει» (επιπλέει). Για τα σώματα που ανυψώνονται λόγω της άνωσης που ασκεί σε αυτά η ατμόσφαιρα (μπαλόνια, αερόστατα), η ισορροπία επέρχεται λόγω της μείωσης του ειδικού βάρους της ατμόσφαιρας ανάλογα με το ύψος. Το

σώμα ανέρχεται μέχρι του ύψους όπου η άνοση εξισώνεται με το βάρος, και εκεί ηρεμεί. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το σώμα «αιωρείται». Όσον αφορά τη θάλασσα, η στατική άνοση του ύδατος επί των σωμάτων είναι αυτή που επιτρέπει τη ναυπήγηση πλοίων.

3.5.3 Παροχή

Στη μηχανική των ρευστών με το όρο «παροχή» ενός αγωγού, στον οποίο ρέει κάποιο ρευστό, εννοείται είτε η παροχή μάζας είτε η παροχή όγκου. Συνηθέστερα εννοείται η παροχή όγκου, που είναι ο όγκος ρευστού που διέρχεται από τον αγωγό στη μονάδα του χρόνου. Συνεπώς εξ ορισμού η παροχή δίνεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad (3.32)$$

όπου \dot{V} η παροχή όγκου σε m^3/sec , V ο όγκος του ρευστού σε m^3 και t ο χρόνος διάρκειας της ροής σε sec .

Αν θεωρηθεί ότι παρατηρείται ισοπαχής αγωγός σταθερής διατομής A στον οποίο ρέει ρευστό με ταχύτητα u και a το σημείο διατομής της έναρξης του χρόνου της παρατήρησης, θα διαπιστωθεί ότι τα μόρια του ρευστού που πέρασαν από το σημείο a μετά από κάποιο χρόνο t θα βρίσκονται σε άλλο σημείο του αγωγού, έστω σημείο διατομής b , που θα απέχει από το σημείο a μια απόσταση s . Κατά τα γνωστά από τη Φυσική, η απόσταση αυτή θα είναι το γινόμενο της ταχύτητας u επί το χρόνο της παρατήρησης t , δηλαδή:

$$s = u \cdot t \quad (3.33)$$

Επίσης η ίδια παρατήρηση υπαγορεύει ότι ο όγκος V του ρευστού που πέρασε από το σημείο της διατομής A είναι το γινόμενο της διατομής επί της παραπάνω απόστασης, δηλαδή:

$$V = A \cdot s \quad (3.34)$$

ή αντικαθιστώντας το s ο μαθηματικός τύπος γίνεται:

$$V = A \cdot u \cdot t \quad (3.35)$$

Έτσι σύμφωνα με τα προηγούμενα η παροχή \dot{V} του παρατηρούμενου αγωγού θα είναι:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot u \cdot t}{t} = A \cdot u \quad (3.36)$$

Από αυτόν τον τελευταίο τύπο βλέπουμε ότι «η παροχή ενός αγωγού είναι ίση με το γινόμενο της διατομής του επί τη ταχύτητα ροής».

3.5.4 Ιξώδες

Το ιξώδες (αγγλ. viscosity) ενός ρευστού είναι το μέτρο της αντίστασης που αυτό προβάλλει στη σταδιακή παραμόρφωσή του μετά από διατμητική ή εντατική τάση, που εκφράζεται επίσης και με την αντίσταση που προβάλλει κατά τη ροή του. Για υγρά, ειδικότερα, αντιστοιχεί στην ιδιότητα της «πηκτότητας». Για παράδειγμα, το μέλι έχει πολύ υψηλότερο ιξώδες από το νερό.

Το ιξώδες είναι μια ιδιότητα ενός ρευστού που προκύπτει από τις συγκρούσεις μεταξύ γειτονικών σωματιδίων (δηλαδή μορίων, με την ευρεία έννοια), καθώς τμήματα του ρευστού αυτού κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες, αλλά και από την εφαρμογή των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των μορίων αυτών. Όταν ένα ρευστό υποχρεώνεται να ρεύσει μέσα από ένα σωλήνα, τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται το ρευστό κινούνται ταχύτερα κατά μήκος του άξονα του σωλήνα στο εσωτερικό του και βραδύτερα κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα. Γι' αυτό χρειάζεται να ασκηθεί κάποια τάση, όπως μια διαφορά πίεσης ανάμεσα στα δυο άκρα του σωλήνα, για να υπερπηδηθεί η τριβή ανάμεσα στα στρώματα του ρευστού που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες και να συνεχιστεί η ροή του ρευστού. Η τάση που απαιτείται για ένα δεδομένο μοτίβο κίνησης αντιστοιχεί στο ιξώδες του ρευστού αυτού.

Ένα ρευστό που δεν αντιστέκεται καθόλου στην τάση διάτμησης του ονομάζεται «ιδανικό» ή «ιδεατό» υγρό. Το μηδενικό ιξώδες όμως, παρατηρείται μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στα υπερρευστά. Διαφορετικά, τεχνικά όλα τα ρευστά έχουν θετικό ιξώδες. Στην καθομιλουμένη, η έννοια του «ιξώδους», δηλαδή της πηκτότητας, αναφέρεται ειδικότερα σε υγρά και συνήθως σε σύγκριση με την αντίστοιχη ιδιότητα του νερού. Ένα ρευστό με σχετικά υψηλό ιξώδες, όπως η πίσσα, μπορεί να παρουσιάζεται σαν στερεό, και τότε συχνά χαρακτηρίζεται ως «ημίρευστο». Η ιδιότητα του ιξώδους για τα υγρά εξετάζεται ιδιαίτερα από την Υδροδυναμική. Το μέτρο του ιξώδους είναι ο συντελεστής συνεκτικότητας ή συντελεστής εσωτερικής τριβής ή συντελεστής ιξώδους του υγρού. Όσο πιο παχύρρευστο είναι ένα υγρό, τόσο μεγαλύτερο ιξώδες λέμε ότι έχει, π.χ. το μέλι έχει μεγαλύτερο ιξώδες από το λάδι.

Το ιξώδες μετριέται με ειδικό όργανο που λέγεται ιξωδόμετρο. Η μέτρηση γίνεται σε βαθμούς, που σήμερα σε χρήση είναι οι «βαθμοί Engler», ή «βαθμοί Redwood», ή «βαθμοί Saybolt», κ.λπ, που παρέχονται από το εγχειρίδιο του, κατά περίπτωση χρήσης τύπου, ομώνυμου οργάνου.

Κεφάλαιο 4 – Κίνηση στο Διάστημα

4.1 Βασικές Έννοιες Ουράνιας Μηχανικής

4.1.1 Βαρυτικό Πεδίο

Το βαρυτικό πεδίο είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται στη φυσική για να εξηγήσει πώς λειτουργεί η βαρύτητα στο σύμπαν. Στην αρχική της σύλληψη, η βαρύτητα ήταν μια δύναμη μεταξύ σημειακών μαζών. Μετά τον Νεύτωνα, ο Λαπλάς προσπάθησε να μοντελοποιήσει την βαρύτητα ως ένα είδος δυναμικού πεδίου ή ρευστού, και από τον 19ο αιώνα οι ερμηνείες για την βαρύτητα αντιλαμβάνονταν στο πλαίσιο πεδίων, παρά μιας σημειακής έλξης.

Στο μοντέλο πεδίου, σε αντίθεση με την αμοιβαία έλξη μεταξύ των σωματιδίων, τα σωματίδια παραμορφώνουν τον χωροχρόνο εξ αιτίας της μάζας τους, και αυτή η παραμόρφωση είναι αυτή που αντιλαμβανόμαστε εμείς ως «δύναμη». Στην πραγματικότητα η δύναμη σε αυτό το μοντέλο δεν υφίσταται, απλώς η ύλη αντιδρά στην καμπύλωση του χωροχρόνου.

Στην κλασική μηχανική, το πεδίο δεν είναι μια πραγματική οντότητα, αλλά μόνο ένα επιστημονικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα αποτελέσματα της βαρύτητας. Το πεδίο μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα. Καθορίζοντάς το με αυτόν τον τρόπο, το βαρυτικό πεδίο γύρω από ένα απλό σωματίδιο είναι ένα διανυσματικό πεδίο, σε κάθε σημείο του οποίου αντιστοιχεί ένα διάνυσμα με κατεύθυνση προς το σωματίδιο. Η ένταση του πεδίου σε κάθε σημείο υπολογίζεται με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης και εκφράζει τη δύναμη ανά μονάδα μάζας ενός οποιουδήποτε αντικείμενου σε αυτό το σημείο στον χώρο. Το πεδίο γύρω από περισσότερα του ενός σωματίδια είναι απλώς το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων κάθε σωματιδίου ξεχωριστά. Ένα σημειακό αντικείμενο σε ένα τέτοιο πεδίο δέχεται, βάσει της αρχής της επαλληλίας, μια δύναμη που είναι ίση με τη συνισταμένη όλων των δυνάμεων που δέχεται από κάθε πεδίο ξεχωριστά.

Στη γενική σχετικότητα, το βαρυτικό πεδίο υφίσταται ως το αποτέλεσμα των πεδιακών εξισώσεων του Αϊνστάιν. Αυτές οι εξισώσεις εξαρτώνται από την κατανομή ύλης και ενέργειας σε μια περιοχή του χώρου, αντίθετα με την Νευτώνεια βαρύτητα, που εξαρτάται μόνο από την κατανομή ύλης. Τα πεδία αυτά καθαυτά στη γενική σχετικότητα αντιπροσωπεύουν την καμπύλωση του χωροχρόνου. Σύμφωνα με τη γενική σχετικότητα, το να βρίσκεται ένα αντικείμενο σε μια καμπυλωμένη περιοχή του χώρου είναι ισοδύναμο με το να επιταχύνει σύμφωνα με την κλίση του πεδίου. Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δρα πάνω στο αντικείμενο μια δύναμη αδράνειας αν θεωρηθεί ακίνητο ως προς το πεδίο. Αυτός είναι και ο λόγος που ένα άτομο αισθάνεται να έλκεται από τη Γη εξ αιτίας της δύναμης της βαρύτητας ενώ στέκεται ακίνητος στην επιφάνεια της Γης. Γενικά τα βαρυτικά πεδία που προβλέπει η γενική σχετικότητα ταυτίζονται απόλυτα στο όριο των ασθενών βαρυτικών πεδίων με αυτά που προβλέπει η κλασική μηχανική, αλλά υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές που τα διακρίνουν όταν τα βαρυτικά πεδία γίνονται ισχυρά, όπως είναι η καμπύλωση του φωτός και τα βαρυτικά κύματα.

4.1.1.1 Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης

Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα δηλώνεται συνήθως ως ότι κάθε σωματίδιο έλκει κάθε άλλο σωματίδιο στο σύμπαν με μια δύναμη που είναι ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των κέντρων μάζας τους. Η δημοσίευση του νόμου έχει γίνει γνωστή ως η «πρώτη μεγάλη ενοποίηση», καθώς σηματοδότησε την ενοποίηση των φαινομένων βαρύτητας που περιγράφηκαν προηγουμένως στη Γη με γνωστές αστρονομικές συμπεριφορές.

Αυτός είναι ένας γενικός φυσικός νόμος που προέρχεται από εμπειρικές παρατηρήσεις από αυτό που ο Ισαάκ Νεύτων ονόμασε *επαγωγικό λογισμό*. Είναι μέρος της κλασικής μηχανικής και διατυπώθηκε στο έργο του Νεύτωνα *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ("the Principia"), που δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά στις 5 Ιουλίου 1687. Όταν ο Newton παρουσίασε το πρώτο βιβλίο του αδημοσίευτου κειμένου τον Απρίλιο του 1686 στη Βασιλική Εταιρεία, ο Robert Hooke ισχυρίστηκε ότι ο Νεύτωνας είχε λάβει τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου από αυτόν.

Στη σημερινή γλώσσα, ο νόμος δηλώνει ότι κάθε σημειακή μάζα έλκετε από κάθε άλλη σημειακή μάζα από μια δύναμη που ενεργεί κατά μήκος της ευθείας που τέμνει τα δύο σημεία. Η δύναμη είναι ανάλογη με το γινόμενο των δύο μαζών και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους.

Έτσι, η εξίσωση της παγκόσμιας έλξης παίρνει τη μορφή:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4.1)$$

όπου F είναι η βαρυτική δύναμη που ενεργεί μεταξύ δύο αντικειμένων, m_1 και m_2 είναι οι μάζες των αντικειμένων, r είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των μαζών τους και G είναι η σταθερά της παγκόσμιας έλξης. Η σταθερά της παγκόσμιας έλξης έχει συνιστώμενη τιμή βάσει της επιστημονικής επιτροπής CODATA ίση με (σε μονάδες SI): $G = 6,67428 (67) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$, με σχετικό σφάλμα 1 προς 10^4 .

Η πρώτη δοκιμή του νόμου της βαρύτητας του Νεύτωνα μεταξύ των μαζών στο εργαστήριο ήταν το πείραμα Cavendish που διεξήχθη από τον Βρετανό επιστήμονα Henry Cavendish το 1798. Έγινε 111 χρόνια μετά τη δημοσίευση του έργου του Νιούτον και περίπου 71 χρόνια μετά τον θάνατό του.

Ο νόμος της βαρύτητας του Νεύτωνα μοιάζει με τον νόμο του Coulomb για τις ηλεκτρικές δυνάμεις, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μεγέθους της ηλεκτρικής δύναμης που προκύπτει μεταξύ δύο φορτισμένων σωμάτων. Και οι δύο είναι νόμοι αντίστροφου τετραγώνου, όπου η δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των σωμάτων. Ο νόμος του Κουλόμπ έχει το γινόμενο δύο φορτίων στη θέση του γινομένου των μαζών και τη σταθερά του Κουλόμπ στη θέση της σταθεράς της βαρύτητας.

Ο νόμος του Νεύτωνα αντικαταστάθηκε αργότερα από τη θεωρία της γενικής σχετικότητας του Άλμπερτ Αϊνστάιν, αλλά η καθολικότητα της βαρυτικής σταθεράς είναι άθικτη και ο νόμος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ως εξαιρετική προσέγγιση των επιπτώσεων της βαρύτητας στις περισσότερες εφαρμογές. Η σχετικότητα απαιτείται μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για εξαιρετική ακρίβεια ή όταν έχουμε να κάνουμε με πολύ ισχυρά βαρυτικά πεδία, όπως αυτά που βρίσκονται κοντά σε

εξαιρετικά ογκώδη και πυκνά αντικείμενα, ή σε μικρές αποστάσεις (όπως η τροχιά του Ερμή γύρω από τον Ήλιο).

4.1.1.2 Ένταση Βαρυτικού Πεδίου

Ένταση g σε ένα σημείο βαρυτικού πεδίου, ονομάζουμε το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο της δύναμης που ασκείται σε ένα σώμα μάζας m που βρίσκεται σε απόσταση r από το κέντρο της πηγής βαρύτητας προς τη μάζα m του σώματος στο οποίο ασκείται η δύναμη του βαρυτικού πεδίου, και φορά αντίθετη προς το μοναδιαίο διάνυσμα \hat{r} που έχει φορά από το δεύτερο σώμα στο πρώτο. Μαθηματικά:

$$g = -\frac{GM}{r^2} \hat{r} \quad (4.2)$$

όπου G η σταθερά της βαρύτητας σε μονάδες διεθνούς συστήματος. Βάσει του ορισμού, το μέτρο της έντασης του βαρυτικού πεδίου έχει μονάδες επιτάχυνσης (δύναμη ανά μονάδα μάζας) και εξαρτάται τόσο από τη μάζα M του σώματος που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο, όσο και από την απόσταση r από τη θέση αυτού. Η συνολική δύναμη F που ασκείται σε σώμα μάζας m όταν αυτό τοποθετηθεί σε απόσταση r από την «πηγή» του βαρυτικού πεδίου ισούται με το γινόμενο της έντασης του βαρυτικού πεδίου επί τη μάζα m του σώματος. Δηλαδή:

$$F = mg = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \quad (4.3)$$

που ταυτίζεται με τη γνωστή δύναμη της βαρύτητας κατά Νεύτωνα (νόμος της παγκόσμιας έλξης).

4.1.1.3 Δυναμικό Βαρυτικού Πεδίου

Το δυναμικό Φ του βαρυτικού πεδίου (επίσης γνωστό και ως Νευτώνειο Δυναμικό) είναι ένα μονόμετρο μέγεθος που ορίζεται ως μείον το έργο ανά μονάδα μάζας που εκτελεί η δύναμη της βαρύτητας από μία θέση αναφοράς r_0 σε μία απόσταση r από την πηγή του βαρυτικού πεδίου. Μαθηματικά, ο ορισμός του βαρυτικού δυναμικού ταυτίζεται με το εξής επικαμπύλιο ολοκλήρωμα:

$$\Phi(r) = -\int_{r_0}^r g \cdot dr \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση της σημειακής πηγής, ο παραπάνω τύπος δίνει:

$$\Phi(r) = GM \int_{r_0}^r \frac{\hat{r}' \cdot dr'}{r'^2} = GM \int_{r_0}^r \frac{dr'}{r'^2} = -GM \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (4.5)$$

Το βαρυτικό δυναμικό ορίζεται με απροσδιοριστία μίας σταθεράς, που σχετίζεται με το γεγονός ότι το δυναμικό ορίζεται ως προς κάποιο αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο αναφοράς r_0 . Το πώς επιλέγεται το σημείο αυτό δεν έχει σημασία, καθώς φυσική σημασία έχει μόνο η διαφορά βαρυτικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων στο χώρο.

Συνηθίζεται ως σημείο αναφοράς να επιλέγεται το άπειρο ($r_0 \rightarrow \infty$), διότι $\Phi(\infty)=0$. Εν γένει, στα διάφορα είδη δυναμικών τα σημεία αναφοράς εΐθισται να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε η μαθηματική τους μορφή να είναι όσο τον δυνατόν

απλούστερη. Με την εκλογή του απείρου ως σημείο αναφοράς, το δυναμικό μίας σημειακής πηγής απλοποιείται σημαντικά:

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{r} \quad (4.6)$$

Η εκλογή του απείρου ως σημείο αναφοράς οδηγεί επίσης στο αποτέλεσμα ότι το βαρυτικό δυναμικό είναι παντού αρνητικό.

Το επόμενο βήμα μετά την περιγραφή των σημειακών βαρυτικών πηγών είναι η κατασκευή ενός μαθηματικού εργαλείου που είναι σε θέση να υπολογίσει το βαρυτικό πεδίο που δημιουργεί ένα αντικείμενο συγκεκριμένων διαστάσεων. Στην περίπτωση που οι διαστάσεις ενός σώματος είναι σημαντικές, το βαρυτικό πεδίο εν γένει αποκλίνει από την σφαιρικά συμμετρική λύση που ισχύει για σημειακές πηγές.

Από μαθηματικής σκοπιάς, ένα αντικείμενο μπορεί να περιγραφεί πλήρως αν γνωρίζουμε τη συνολική του μάζα M , καθώς επίσης και την πυκνότητά ρ του σε κάθε σημείο του χώρου. Επιλέγοντας ένα σύστημα συντεταγμένων στο οποίο οι θέσεις της πηγής του δυναμικού περιγράφονται από ένα διάνυσμα θέσης r' και το σημείο στο οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε το δυναμικό από ένα διάνυσμα θέσης r , το δυναμικό δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$\Phi(r) = -G \int \frac{\rho(r')}{|r-r'|} d^3 r' \quad (4.7)$$

Ο παραπάνω τύπος προκύπτει από την κατάτμηση της κατανομής μάζας σε μικρές, στοιχειώδης μάζες τις οποίες θεωρούμε σημειακές. Το δυναμικό υπολογίζεται στη συνέχεια για κάθε τέτοια στοιχειώδη μάζα και το συνολικό δυναμικό σε δεδομένο σημείο του χώρου προκύπτει αθροίζοντας (ολοκληρώνοντας) όλες τις στοιχειώδεις συνεισφορές δυναμικού.

Η χρησιμότητα του βαρυτικού δυναμικού έχει να κάνει με το γεγονός ότι είναι βαθμωτή ποσότητα. Οι διανυσματικές ποσότητες όπως είναι η ένταση του βαρυτικού πεδίου είναι πιο πολύπλοκες, καθώς οι πράξεις μεταξύ διανυσματικών ποσοτήτων απαιτεί προσεκτική μεταχείριση των συνιστωσών τους.

Επίσης, σε ένα πρόβλημα το οποίο δεν εμφανίζει ικανοποιητική συμμετρία ώστε να επιχειρηθεί να επιλυθεί αναλυτικά με διανυσματικές μεθόδους. Από υπολογιστικής σκοπιάς, ο χειρισμός του βαρυτικού δυναμικού είναι σε πολλές περιπτώσεις προσηφιλέστερος.

4.1.1.4 Δυναμική Ενέργεια Βαρυτικού Πεδίου

Η βαρυτική δυναμική ενέργεια δεν ταυτίζεται με το βαρυτικό δυναμικό. Το βαρυτικό δυναμικό ορίζεται ως μείον το έργο ανά μονάδα μάζας που εκτελεί η βαρυτική δύναμη από ένα σημείο αναφοράς σε μια απόσταση r από την αρχή των αξόνων. Αντίθετα, η βαρυτική δυναμική ενέργεια V ορίζεται ως:

$$V(r) = -\int_{r_0}^r F \cdot dr \quad (4.8)$$

Επειδή όμως ισχύει ότι $F = mg$, η σχέση που συνδέει το βαρυτικό δυναμικό με τη βαρυτική δυναμική ενέργεια είναι:

$$V(r) = m\Phi(r) \quad (4.9)$$

Γνωρίζοντας το βαρυτικό δυναμικό που δημιουργεί μία συγκεκριμένη κατανομή μάζας στο χώρο, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε και την αντίστοιχη δυναμική ενέργεια ενός σώματος μάζας m που τοποθετείται σε κάποιο σημείο του χώρου μέσω της προηγούμενης σχέσης.

Από νωρίς η ιδέα της δράσης μίας αόρατης δύναμης εξ αποστάσεως προβλημάτιζε τους φυσικούς, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί η παραπάνω εικόνα των πεδίων - όπως ακριβώς και στον ηλεκτρομαγνητισμό. Εν γένει, η εικόνα των πεδίων θεωρείται γενικότερη και στην περίπτωση της βαρύτητας αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη της Γενικής Σχετικότητας από τον Αϊνστάιν. Η βασική εικόνα των πεδίων στην περίπτωση της κλασικής βαρύτητας, μπορεί να συνοψισθεί στις εξής δύο προτάσεις:

- Μια οποιαδήποτε κατανομή μάζας παράγει βαρυτικό δυναμικό σύμφωνα με την εξίσωση:
- Το βαρυτικό πεδίο προκαλεί επιτάχυνση a βάσει του 2^{ου} νόμου του Νεύτωνα

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως ανάλογα με τον ηλεκτρομαγνητισμό, μπορεί κανείς να εφαρμόσει τον νόμο του Γκάους για το βαρυτικό πεδίο που δημιουργεί μία δεδομένη κατανομή μάζας. Η εξίσωση στην οποία καταλήγει κανείς είναι η παρακάτω:

$$\oint_S \mathbf{g} \cdot d\mathbf{S} = -4\pi G M_{enc} \quad (4.10)$$

Το σύμβολο M_{enc} αναπαριστά τη συνολική μάζα που περικλείει η επιφάνεια Γκάους S που επιλέγεται κάθε φορά. Η χρήση της παραπάνω εξίσωσης για τον υπολογισμό της έντασης του βαρυτικού πεδίου ενδείκνυται μόνο όταν ένα πρόβλημα έχει επαρκή συμμετρία (π.χ. σφαιρική, κυλινδρική ή επίπεδη). Ειδικά, η χρήση εργαλείων όπως το βαρυτικό δυναμικό είναι προτιμότερη.

4.1.1.5 Παλιρροϊκές Δυνάμεις

Οι παλιρροϊκές δυνάμεις είναι δυνάμεις βαρυτικής φύσης που αναπτύσσονται πάνω σε ένα σώμα το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα ανομοιογενές βαρυτικό πεδίο και επομένως πάνω στο σώμα ασκούνται μη σταθερές δυνάμεις κατά μήκος του, αφού προφανώς, όπως γνωρίζουμε από τον κλασικό νόμο της παγκόσμιας έλξης του Newton το σημείο αυτού του σώματος που βρίσκεται πιο κοντά στο σώμα που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο, δέχεται μεγαλύτερη δύναμη από ό,τι το σημείο που βρίσκεται πιο μακριά.

Βάσει των παλιρροϊκών δυνάμεων ερμηνεύεται το φαινόμενο της πλημμυρίδας και της άμπωτης, η δημιουργία των δακτυλίων του Κρόνου, προβλέπεται η απομάκρυνση της Σελήνης από τη Γη και άλλα.

Προσεγγίζοντας τις παλιρροϊκές δυνάμεις με μαθηματικό τρόπο θεωρούμε έστω ένα σφαιρικό σώμα μάζας m και ακτίνας r το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα σφαιρικό σώμα μάζας M και η απόσταση των κέντρων τους είναι D (υποθετικά σταθερή, δηλαδή υποθέτουμε κυκλική κίνηση με καλή προσέγγιση). Τότε στο κοντινότερο σημείο A του m από το M δέχεται μία δύναμη ανά μονάδα μάζας ίση με:

$$\vec{F}_A = -G \frac{M}{(D-r)^2} \hat{D} \quad (4.11)$$

όπου G η σταθερά της παγκόσμιας έλξης, που οφείλεται στο σώμα M . Η δύναμη ανά μονάδα μάζας στο κέντρο O_m του m που οφείλεται στο σώμα M είναι ίση με:

$$\vec{F}_{O_m} = -G \frac{M}{D^2} \hat{D} \quad (4.12)$$

Δεδομένου ότι το σώμα m μένει σταθερά σε απόσταση D από το σώμα M αυτό σημαίνει ότι το m λόγω της διαφοράς των δυνάμεων όπως αυτές περιγράφηκαν, προκαλούν την παραμόρφωση του σώματος m . Η διαφορά αυτή των δυνάμεων που ονομάζεται παλιρροϊκή δύναμη και προκαλεί την παραμόρφωση ισούται με:

$$\begin{aligned} \vec{F}_\pi &= \vec{F}_{O_m} - \vec{F}_A = - \left(-G \frac{M}{D^2} + G \frac{M}{(D-r)^2} \right) \hat{D} = - \left(G \frac{M}{D^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{D}\right)^2} - G \frac{M}{D^2} \right) \hat{D} = \\ &= - \left[G \frac{M}{D^2} \left(1 + 2 \frac{r}{D}\right) - G \frac{M}{D^2} \right] \hat{D} = - \frac{2GMr}{D^3} \hat{D} \end{aligned} \quad (4.13)$$

άρα στο A: $\vec{F}_{\pi_A} = -\frac{2GMr}{D^3} \hat{D}$ ενώ στο αντιδιαμετρικό σημείο A' η δύναμη αυτή έχει

το ίδιο μέτρο αλλά αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή: $\vec{F}_{\pi_{A'}} = \frac{2GMr}{D^3} \hat{D}$. Για την εύρεση αυτών των εκφράσεων θεωρήθηκε ότι $r \ll D$, για να ισχύει με καλή προσέγγιση η ανάπτυξη σε πρώτη τάξη κατά Taylor του όρου $\frac{1}{\left(1 - \frac{r}{D}\right)^2}$, αφού όταν $|a| \ll 1$ τότε:

$(1 + a)^{\pm n} \approx 1 + na$. Γενικότερα θα μπορούσε να εξαχθεί μία σχέση που θα περιγράφει την παλιρροϊκή δύναμη όχι μόνο για το σημείο της Γης που βρίσκεται στην ελάχιστη και στη μέγιστη απόσταση από τη Σελήνη, αλλά για οποιοδήποτε σημείο της.

Η Γη φυσικά δέχεται τη βαρυντική δύναμη και επομένως την παλιρροϊκή δύναμη όλων των σωμάτων που υπάρχουν στο σύμπαν, αφού η δύναμη της βαρύτητας, μιας από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις, έχει άπειρη εμβέλεια. Παρόλα αυτά η δύναμεις των σωμάτων πλην του Ήλιου και της Σελήνης θα μπορούσαν να αγνοηθούν λόγω του ότι η βαρυντική δύναμη μειώνεται με γρήγορο ρυθμό με την απόσταση (x) κατά $F_G \propto \frac{1}{x^2}$.

Ο λόγος των παλιρροϊκών δυνάμεων της Σελήνης επάνω στη Γη προς των δυνάμεων του Ήλιου είναι:

$$\frac{F_{\pi_\Sigma}}{F_{\pi_H}} = \frac{\frac{2GM_\Sigma M_\Gamma R_\Gamma}{R_{\Gamma-\Sigma}^3}}{\frac{2GM_H M_\Gamma R_\Gamma}{R_{\Gamma-H}^3}} = \frac{M_\Sigma}{M_H} \left(\frac{R_{\Gamma-H}}{R_{\Gamma-\Sigma}} \right)^3 \quad (4.14)$$

όπου $R_{\Gamma-\Sigma}$ η απόσταση Γης – Σελήνης, $R_{\Gamma-H}$ η απόσταση Γης – Ηλίου, $R_{\Gamma-\Gamma}$ η μέση ακτίνα της Γης, M_{Σ} η μάζα της Σελήνης, M_{Γ} η μάζα της Γης και M_H η μάζα του Ηλίου. Αντικαθιστώντας λοιπόν τις τιμές αυτών των μεγεθών στον τελικό τύπο βρίσκουμε

ότι ο λόγος που ψάχνουμε ισούται με: $\frac{F_{\pi_{\Sigma}}}{F_{\pi_H}} \cong 2,2$. Δηλαδή οι παλιρροϊκές δυνάμεις

που ασκεί η Σελήνη είναι περίπου 2,2 φορές μεγαλύτερες από αυτές που ασκεί η Ήλιος πάνω στη Γη. Αυτό το προς στιγμή παράδοξο εξηγείται απλά μιας που παρότι η βαρυτική δύναμη του Ήλιου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη,

$$\frac{F_H}{F_{\Sigma}} = \frac{\frac{GM_{\Gamma}M_H}{R_{\Gamma-H}^2}}{\frac{GM_{\Gamma}M_{\Sigma}}{R_{\Gamma-\Sigma}^2}} = \frac{M_H}{M_{\Sigma}} \left(\frac{R_{\Gamma-\Sigma}}{R_{\Gamma-H}} \right)^2 \cong 175, \text{ η απόσταση Γης – Σελήνης είναι σχεδόν } 390$$

φορές μικρότερη από την απόσταση Γης – Ηλίου και ο όρος αυτός συνεισφέρει στην τρίτη δύναμη στον παραπάνω υπολογισμό του $\frac{F_{\pi_{\Sigma}}}{F_{\pi_H}}$.

Λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων, ολόκληρη η Γη αλλάζει σχήμα. Και μιλώντας για ολόκληρη τη Γη εννοούμε την ατμόσφαιρά της, τους ωκεανούς, το έδαφος (αφού είναι ένα παραμορφώσιμο στερεό), το υπέδαφος κ.λ.π. Η αλλαγή αυτή του σχήματος της Γης συμβαίνει διότι το νερό που βρίσκεται κοντά στη Σελήνη έλκεται περισσότερο, οπότε και το νερό ανυψώνεται ενώ στο αντιδιαμετρικό σημείο η ελκτική δύναμη είναι ασθενέστερη, οπότε και το νερό ανυψώνεται επίσης. Λόγω δε και της περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο και της περιστροφής της Σελήνης γύρω από τη Γη αυτή η αλλαγή του σχήματος είναι περιοδική. Εύκολα παρατηρήσιμη είναι η αλλαγή του σχήματος των ωκεανών της Γης που παρατηρείται ως αύξηση και μείωση της στάθμης της θάλασσας σε μερικά σημεία της Γης κατά πολλά μέτρα και κατά περιοδικό τρόπο. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως *Πλημμυρίδα – Άμπωτις* και υποδηλώνει την αύξηση και αντίστοιχα τη μείωση της στάθμης της θάλασσας. Ο χρόνος που κάνει η Σελήνη να ξαναβρεθεί πάνω από το ίδιο σημείο της Γης είναι περίπου 24h 50min. Οι 24h οφείλονται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της και τα 50min στην περιστροφή της Σελήνης γύρω από τη Γη. Επειδή είτε η Σελήνη βρίσκεται πάνω από έναν τόπο είτε πάνω από τον τόπο που είναι αντιδιαμετρικά της Γης αυτός ο τόπος δέχεται την ίδια δύναμη, η περίοδος της αλλαγής του σχήματος της Γης και συνεπώς η περίοδος της Πλημμυρίδας ή της Άμπωτις είναι η μισή της προαναφερθείσας περιόδου και είναι δηλαδή περίπου 12h 25min. Φυσικά σε αυτές έχει επίδραση και ο Ήλιος, αλλά όπως είπαμε με κατά περίπου 2,2 φορές μικρότερες δυνάμεις και περίοδο σχεδόν 24h 4min όσο χρόνο δηλαδή χρειάζεται ο Ήλιος μέχρι να ξαναβρεθεί πάνω από το ίδιο σημείο της Γης τα 4min οφείλονται όπως και πριν στην περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Η τριβή από την κίνηση των θαλασσών με τον βυθό λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων καταναλώνει ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας το οποίο υπολογίζεται να έχει ισχύ περίπου 5.000 GW (Giga Watt). Πάνω σε αυτό μπορούμε να κάνουμε δύο παρατηρήσεις:

- Η ενέργεια των παλιρροϊκών δυνάμεων είναι εκμεταλλεύσιμη δεδομένου ότι ένας τυπικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγει ισχύ της τάξεως του 1 GW

- Η ενέργεια από τη τριβή μετατρέπεται σε θερμότητα και μετά διαφεύγει στο διάστημα, πράγμα που σημαίνει ότι μειώνεται η ενέργεια του συστήματος Γης – Σελήνης. Αυτό προκαλεί τη μείωση της διάρκειας της ημέρας της Γης και απομάκρυνση της Σελήνης από τη Γη. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και για σύστημα Γη – Ήλιος.

Τέλος, ακόμη ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο που οφείλεται στις παλιρροϊκές δυνάμεις είναι και οι δακτύλιοι των πλανητών. Οι δακτύλιοι των πλανητών, όπως οι δακτύλιοι του Κρόνου, του Δία, του Ποσειδώνα και του Ουρανού αποτελούνται από θραύσματα σωμάτων ή από σκόνη που ποτέ δεν θα μπορέσει να σχηματίσει κάποιον πλανήτη ή φυσικό δορυφόρο λόγω των παλιρροϊκών δυνάμεων. Οι παλιρροϊκές δυνάμεις που δρουν πάνω σε ένα σώμα που βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από την απόσταση που είναι γνωστή ως *όριο του Roche* είναι καταστρεπτικές για ένα σώμα που υπάρχει μόνο λόγω της δικής του βαρύτητας και φυσικά δεν επιτρέπουν τη σκόνη να συμπυκνωθεί λόγω βαρύτητας σε κάποιο σώμα. Αυτό διαφέρει για κάποιο σώμα που η δομή του στηρίζεται και σε δυνάμεις μεταξύ των στοιχείων της ύλης του. Για παράδειγμα ένας τεχνητός δορυφόρος δε θα διαλυθεί ξεπερνώντας το όριο του Roche γιατί η δομή του δε στηρίζεται στην βαρύτητά του, αλλά στις δυνάμεις μεταξύ των ιόντων του μετάλλου από το οποίο είναι φτιαγμένος.

4.1.1.6 Το Όριο Roche

Στην Ουράνια Μηχανική, το *όριο του Ρος* (Roche Limit) αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση που μπορεί να πλησιάσει ένα σώμα που διατηρείται αποκλειστικά από την δική του βαρύτητα σε ένα άλλο σώμα πριν διαλυθεί εξαιτίας των παλιρροϊκών δυνάμεων που αναπτύσσονται επάνω του. Το όριο Ρος ονομάστηκε έτσι προς τιμή του Γάλλου μαθηματικού και αστρονόμου Εντουάρ Ρος (Édouard Roche) (1820-1883), ο οποίος και υπολόγισε την θεωρητική αυτή απόσταση για πρώτη φορά. Το όριο του Ρος, αναφέρεται πάντα σε ένα σύστημα δύο ουράνιων σωμάτων. Τα σώματα αυτά πρέπει να έχουν αρκετή διαφορά μάζας. Δεν μπορεί να οριστεί μοναδικά για ένα σώμα και δεν πρέπει να συγχέεται με τη σφαίρα του Ρος (ή σφαίρα Χιλ). Εάν το μικρότερο σώμα διατηρείται όχι μόνο λόγω της βαρύτητάς του αλλά μέσω άλλων, επιπρόσθετων μηχανισμών (π.χ. χημικούς δεσμούς μεταξύ των στοιχείων που το αποτελούν), τότε τα πράγματα διαφέρουν και το σώμα δε θα διαλυθεί όταν ξεπεράσει το όριο του Ρος. Όποιο όμως σώμα ή υλικό βρίσκεται στο τμήμα της επιφάνειας (του μικρότερου σώματος) που βλέπει προς το μεγαλύτερο σώμα (ή στο ακριβώς αντίθετο σημείο) και δεν συγκρατείται με επιπρόσθετους μηχανισμούς, θα απομακρυνθεί. Οι δακτύλιοι που υπάρχουν γύρω από κάποιους πλανήτες (Κρόνος, Δίας, Ποσειδώνας, Ουρανός) οφείλονται κατά πάσα πιθανότητα στο ότι κάποια σώματα που συντηρούνταν από την αυτοβαρύτητα τους ξεπέρασαν το όριο του Ρος και διαλύθηκαν ή στο ότι σκόνη που υπήρχε εκεί από την εποχή του σχηματισμού του Ηλιακού Συστήματος ποτέ δεν κατάφερε να συμπυκνωθεί λόγω ασθενικών βαρυτικών δυνάμεων.

4.1.2 Εισαγωγή στην Ουράνια Μηχανική

Πριν από τη θεμελίωση της Νευτώνειας Μηχανικής, ο Kepler, με βάση παρατηρήσεις, διατύπωσε τους περίφημους τρεις νόμους της κίνησης των πλανητών. Πρόκειται για νόμους της κινηματικής, οι οποίοι ερμηνεύουν την γεωμετρία της τροχιάς και την φαινόμενη κίνηση των πλανητών, χωρίς να αποκαλύπτουν το φυσικό

αίτιο της κίνησης (τη δύναμη της βαρύτητας), κάτι που είναι αντικείμενο της δυναμικής. Οι νόμοι του Kepler ορίζουν ότι:

- Οι τροχιές των πλανητών είναι επίπεδες ελλείψεις, με τον Ήλιο να καταλαμβάνει τη μία εστία
- Η κίνηση γύρω από τον Ήλιο γίνεται με σταθερή εμβαδική ταχύτητα
- Τα τετράγωνα των περιόδων περιφοράς των πλανητών είναι ανάλογα των κύβων των μεγάλων ημιαξόνων της τροχιάς τους

Ο Νεύτωνας διατύπωσε το νόμο της παγκόσμιας έλξεως, δείχνοντας ότι η κεντρική, ελκτική, δύναμη της μορφής $1/r^2$ είναι η μόνη που ερμηνεύει ταυτόχρονα και τους τρεις νόμους της κινηματικής. Η επίπεδη κίνηση αποδεικνύεται εύκολα από την ύπαρξη του ολοκληρώματος της στροφορμής, που συνεπάγεται ότι η κίνηση γίνεται σε ένα επίπεδο κάθετο στο διάνυσμα της στροφορμής. Σε ένα σύστημα πολικών συντεταγμένων (r, θ) στο επίπεδο της κίνησης, το μέτρο της στροφορμής ανά μονάδα μάζας είναι $h = r^2 d\theta/dt$. Κατά το χρονικό διάστημα $(t, t+\delta t)$ το στοιχειώδες εμβαδό δA που ορίζεται από τις επιβατικές ακτίνες r και $r+\delta r$ του πλανήτη είναι:

$$\delta A = \frac{1}{2} |r \times r + \delta r| = \frac{1}{2} r(r + \delta r) \sin \delta \theta \quad (4.15)$$

Διαιρώντας με δt και παίρνοντας το όριο για $\delta t \rightarrow 0$ βρίσκουμε:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \frac{d\theta}{dt} = \frac{r^2 \theta}{2} = \frac{h}{2} \quad (4.16)$$

Άρα, η εμβαδική ταχύτητα είναι σταθερή και ίση με το μισό της στροφορμής h . Για ελλειπτική κίνηση αποδεικνύεται ότι:

$$h^2 = G(M + m)a(1 - e^2) = \mu a(1 - e^2) \quad (4.17)$$

όπου G η σταθερά της παγκόσμιας έλξης, M και m οι μάζες του Ήλιου και του πλανήτη αντίστοιχα, a ο μεγάλος ημιάξονας και e η εκκεντρότητα της έλλειψης. Η παράμετρος $\mu = G(M + m)$ ονομάζεται *παράμετρος μάζας* του συστήματος των δύο σωμάτων. Σημειώνουμε ότι, όπως απέδειξε ο Νεύτωνας, η συγκεκριμένη μορφή του νόμου της παγκόσμιας έλξης είναι η μόνη που τοποθετεί το ελκτικό κέντρο στην εστία της κωνικής τομής (αντί του κέντρου της) και ταυτόχρονα ερμηνεύει τον 3^ο (αρμονικό) νόμο του Kepler. Αντίθετα, όλες οι κεντρικές δυνάμεις οδηγούν σε διατήρηση της στροφορμής και, άρα, σε σταθερή εμβαδική ταχύτητα για τις περατωμένες τροχιές.

Ο τρίτος νόμος του Kepler προβλέπει μια ρητή σχέση μεταξύ της περιόδου περιφοράς ενός πλανήτη γύρω από τον Ήλιο και του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς του, $T \sim a^{3/2}$. Η σχέση αυτή αποδεικνύεται εύκολα, με βάση τη διατήρηση της εμβαδικής ταχύτητας και τη γεωμετρία της έλλειψης. Σε μία περίοδο T το σώμα διαγράφει μια πλήρη έλλειψη, καλύπτοντας εμβαδό ίσο προς:

$$A = \pi ab \quad (4.18)$$

όπου $b = a(1 - e^2)$ ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης. Σύμφωνα με τον ορισμό της εμβαδικής ταχύτητας, το εμβαδό αυτό ισούται με $A = h(T/2)$ κι επομένως:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu^2} a^3 \quad (4.19)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του τρίτου νόμου του Kepler. Ορίζοντας τη μέση συχνότητα περιφοράς του σώματος ή αλλιώς τη μέση κίνηση, $n = 2\pi/T$ ο παραπάνω τύπος παίρνει τη μορφή:

$$n^2 a^3 = \mu \quad (4.20)$$

Θεωρώντας δύο πλανήτες του Ηλιακού μας Συστήματος με μάζες m και m' αντίστοιχα και εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, παίρνουμε:

$$\frac{M+m}{M+m'} = \left(\frac{a}{a'}\right)^3 \left(\frac{T'}{T}\right)^2 \quad (4.21)$$

Βέβαια, στο Ηλιακό Σύστημα ισχύει $m \ll M$ κι επομένως $(a/a')^3 = (T/T')^2$. Σημειώνουμε ότι η Αστρονομική Μονάδα (AU, η «μέση τιμή» του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς της Γης) ορίζεται από την παραπάνω σχέση, θέτοντας ως μονάδα του χρόνου το ένα γήινο έτος και ως μονάδα μάζας τη μάζα του Ήλιου. Επίσης, η ίδια σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για φυσικούς δορυφόρους ενός πλανήτη, ώστε καταγράφοντας την περίοδο περιφοράς του δορυφόρου να είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τη μάζα του πλανήτη.

4.1.2.1 Φαινόμενη Κίνηση των Πλανητών

Για έναν παρατηρητή στη Γη, η φαινόμενη κίνηση ενός πλανήτη στον ουρανό καθορίζεται από τη σχετική κίνησή του ως προς τη Γη και είναι διαφορετική για τους κατώτερους (ανάμεσα στη Γη και τον Ήλιο) και τους ανώτερους (εξωτερικά της τροχιάς της Γης) πλανήτες.

Δύο πλανήτες είναι σε *σύνοδο* (conjunction) όταν βρίσκονται στην ίδια ευθεία με τον Ήλιο. Για έναν κατώτερο πλανήτη (Αφροδίτη, Ερμής), έχουμε *ανώτερη σύνοδο* όταν βρίσκεται αντιδιαμετρικά της Γης, σε σχέση με τον Ήλιο και *κατώτερη σύνοδο* όταν βρίσκεται ανάμεσα στη Γη και στον Ήλιο. Για τους ανώτερους πλανήτες, μόνο μία σύνοδος είναι δυνατή. Στην περίπτωση που ο Ήλιος, η Γη και ένας ανώτερος πλανήτης είναι στην ίδια ευθεία, με τη Γη να βρίσκεται ανάμεσα στους άλλους δύο, τότε λέμε ότι ο ανώτερος πλανήτης βρίσκεται σε *αντίθεση* (opposition) με τη Γη.

Η γωνία που σχηματίζει η θέση ενός πλανήτη με την ευθεία Γη – Ήλιος ονομάζεται *αποχή*. Για κάθε κατώτερο πλανήτη υπάρχουν δύο θέσεις *μέγιστης αποχής* (ανατολική και δυτική). Για τον Ερμή και την Αφροδίτη, οι τιμές της μέγιστης αποχής ως προς τη Γη είναι 28° και 47° αντίστοιχα. Έτσι, οι δύο αυτοί πλανήτες παρατηρούνται είτε λίγο πριν την ανατολή είτε λίγο μετά την δύση του Ήλιου. Για ανώτερους πλανήτες είναι δυνατό να έχουμε *τετραγωνισμό* με τη Γη, όταν η ευθείες Γη – Ήλιος και Γη – πλανήτη σχηματίζουν ορθή γωνία.

Η *αστρική περίοδος* (sidereal period) ενός πλανήτη ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να βρεθεί στην ίδια θέση στην ουράνια σφαίρα, ως προς τους απλανείς αστέρες. Η περίοδος της σχετικής κίνησης ενός πλανήτη ως προς τη Γη ονομάζεται *συνοδική περίοδος* (synodic period) και ισούται με το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε τα δύο σώματα να επανέλθουν στην ίδια σχετική θέση ως προς τον Ήλιο (π.χ. από σύνοδο σε σύνοδο). Αν T_E το αστρικό έτος της Γης και T_P το αστρικό έτος ενός πλανήτη, η συνοδική περίοδος T_S δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{T_E} = \frac{1}{T_P} \pm \frac{1}{T_S} \quad (4.22)$$

όπου το (+) αντιστοιχεί στους ανώτερους πλανήτες και το (-) στους κατώτερους.

4.1.2.2 Εξίσωση της Σχετικής Κίνησης

Στο πρόβλημα των δύο σωμάτων (ή πρόβλημα του Kepler), η εξίσωση της σχετικής κίνησης του ενός σώματος μάζας m (π.χ. Γη) ως προς σώμα μάζας M (π.χ. Ήλιος)

$$\ddot{r} + \mu \frac{r}{r^3} = 0 \quad (4.23)$$

όπου $\mu = G(M + m) \sim GM$ η παράμετρος μάζας του συστήματος. Σε αυτήν την προσέγγιση, το ηλιοκεντρικό (γεωκεντρικό, κ.ο.κ.) σύστημα αναφοράς θεωρείται ως αδρανειακό, και η σχετική τροχιά του m γύρω από το M ταυτίζεται με την βαρυκεντρική τροχιά, κάτι που δεν ισχύει επακριβώς. Τέλος, ανεξάρτητα του αν αγνοήσουμε τη μάζα m ή όχι, η εξίσωση σχετικής κίνησης ταυτίζεται με την εξίσωση κίνησης ενός σώματος μοναδιαίας μάζας σε πεδίο κεντρικών δυνάμεων της μορφής k/r^2 , με το ελκτικό κέντρο να βρίσκεται στη θέση του M .

Τα ολοκληρώματα της σχετικής κίνησης ορίζονται συνήθως με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, από ότι συνήθως στη Μηχανική. Έτσι, το ολοκλήρωμα της ειδικής μηχανικής ενέργειας, ή ενέργειας ανά μονάδα μάζας, ορίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{1}{2}u^2 - \frac{\mu}{r} \quad (4.24)$$

όπου u το μέτρο της σχετικής ταχύτητας του μικρού σώματος ως προς το μεγάλο (που ονομάζεται πρωτεύον). Το C είναι επομένως μια ποσότητας με διαστάσεις ενέργειας που υπολογίζεται στο μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς, ταυτίζεται όμως με το ολοκλήρωμα της ενέργειας της υποθετικής μοναδιαίας μάζας, που κινείται στο κεντρικό πεδίο ελκτικών δυνάμεων k/r^2 . Αναλόγως, ορίζουμε την ειδική στροφορμή (στροφορμή ανά μονάδα μάζας) του συστήματος ως το διάνυσμα:

$$h = r \times \dot{r} = r \times u \quad (4.25)$$

το οποίο επίσης ταυτίζεται με το διάνυσμα της στροφορμής της μοναδιαίας μάζας, γύρω από άξονα που διέρχεται από το ελκτικό κέντρο και είναι κάθετος στο επίπεδο της κίνησης.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η γενική λύση της εξίσωσης κίνησης είναι η εξίσωση μιας κωνικής τομής σε πολική μορφή,

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta - \varpi)} = \frac{h^2}{\mu(1 + e \cos v)} \quad (4.26)$$

όπου $p = h^2/\mu$ η ημιπαράμετρος της τομής (semi-latus rectum), e η εκκεντρότητα της τροχιάς, και ϖ η γωνία που σχηματίζει η γραμμή των απίδων (η ευθεία που ενώνει τις δύο εστίες) με τον άξονα $\theta = 0$. Η γωνία $v = \theta - \varpi$ δίνει τη θέση του σώματος πάνω στη τροχιά και ονομάζεται αληθής ανωμαλία. Η v μετράται από την

ελκτική εστία της κωνικής τομής, με αρχή τη γραμμή των ασπίδων και αυξάνει κατά τη φορά της κίνησης του σώματος.

Οι τέσσερις δυνατές κωνικές τομές χαρακτηρίζονται από τις τιμές του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς a και των e και p :

$$\begin{aligned} a > 0, e = 0, p = a \\ a > 0, 0 < e < 1, p = a(1 - e^2) \\ a \rightarrow \infty, e = 1, p = 2q \\ a < 0, e > 1, p = a(e^2 - 1) \end{aligned} \quad (4.27)$$

που αντιστοιχούν σε εξίσωση κύκλου, έλλειψης, παραβολής και υπερβολής. Όπως δείχνουν οι παραπάνω σχέσεις, η παραβολή είναι μια οριακή περίπτωση, της οποίας η ημιπαράμετρος καθορίζεται από την ελάχιστη απόσταση q της τροχιάς από την εστία. Είναι χρήσιμο να κατατάξουμε τις τροχιές με βάση τις τιμές των C και h , που είναι και τα βασικά, διατηρήσιμα, φυσικά μεγέθη. Αποδεικνύεται εύκολα ότι:

$$a = -\frac{\mu}{2C}, e = \sqrt{1 + \frac{2Ch^2}{\mu^2}} \quad (4.28)$$

απ' όπου προκύπτει ότι οι κλειστές τροχιές (κύκλος και έλλειψη) αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές ενέργειας ($C < 0$), ενώ οι μη περατωμένες τροχιές είτε σε μηδενική τιμή της ενέργειας (παραβολή) είτε σε θετικές τιμές ($C > 0$, υπερβολή). Ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς εξαρτάται μόνον από την ενέργεια, ενώ η εκκεντρότητα εξαρτάται τόσο από την ενέργεια, όσο και από τη στροφορμή. Επομένως, σε δεδομένη τιμή ενέργειας (και ημιάξονα, a), αντιστοιχούν άπειρες τροχιές διαφορετικής στροφορμής (εκκεντρότητας).

4.1.2.3 Παραβολική Κίνηση – Ταχύτητα Διαφυγής

Η ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να έχει ένα σώμα σε απόσταση r από το ελκτικό κέντρο ώστε να τεθεί σε παραβολική τροχιά, «διαφεύγοντας» έτσι από τη βαρύτητα του ελκτικού κέντρου, ονομάζεται *ταχύτητα διαφυγής* ή *παραβολική ταχύτητα* και δίνεται από τη σχέση:

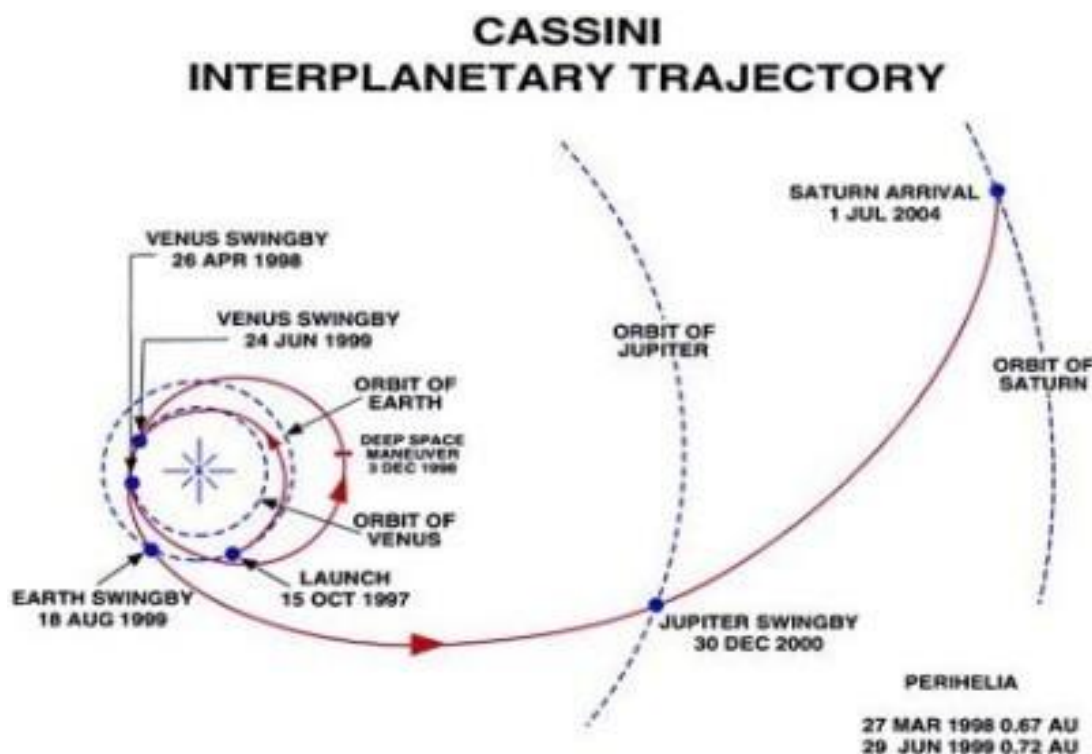
$$u_{\infty} = \sqrt{\frac{2\mu}{r}} \quad (4.29)$$

Ο ίδιος τύπος ισχύει και για σώμα μάζας m που εκτοξεύεται από την επιφάνεια της Γης, αν θέσουμε $r = R_{Γης}$ και την αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου μάζας. Σημειώνουμε ότι η ταχύτητα διαφυγής είναι $\sim 1,414 (\sqrt{2})$ φορές μεγαλύτερη από την κυκλική ταχύτητα, στην ίδια απόσταση r . Η ιδιότητα αυτή χρησιμεύει στο σχεδιασμό τροχιών για διαπλανητικές αποστολές, όπου συνήθως πρακτική είναι η τοποθέτηση του σκάφους, αρχικά, σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη, μέχρι την κατάλληλη χρονική στιγμή, όταν και θα πυροδοτήσει τις μηχανές του για να ξεκινήσει την ανοικτή, παραβολική, τροχιά του.

Θεωρώντας τον Ήλιο ως το ελκτικό κέντρο (και αγνοώντας τις μεταξύ τους βαρυτικές αλληλεπιδράσεις), συμπεραίνουμε ότι όλα τα σώματα που ανήκουν στο Ηλιακό Σύστημα ακολουθούν τροχιές αρνητικής ενέργειας, αλλιώς θα είχαν διαφύγει

στο άπειρο. Το ίδιο ισχύει και για τις τροχιές των τεχνητών δορυφόρων της Γης (αν ως κεντρικό σώμα θεωρήσουμε, σε αυτήν την περίπτωση, τη Γη). Παρά ταύτα, υπάρχουν αρκετοί κομήτες σε ημιπαροβολική τροχιά ($e \sim 1$). Επομένως, με μια μικρή μεταβολή της ενέργειας $\delta C > 0$, θα μπορούσαν να διαφύγουν από το ηλιακό σύστημα. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί, αν ο κομήτης περάσει αρκετά κοντά από έναν πλανήτη, ώστε η βαρυτική τους αλληλεπίδραση να γίνει σημαντική. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ενίοτε ως *φαινόμενο της σφενδόνας ή βαρυτική υποβοήθηση* (Slingshot Effect).

Το φαινόμενο της σφενδόνας βρίσκει εφαρμογή στο σχεδιασμό διαπλανητικών διαστημικών αποστολών, για τα οποία αλλιώς το ενεργειακό κόστος θα ήταν απαγορευτικό (π.χ. Voyager, Cassini). Η *βαρυτική υποβοήθηση* (Gravity Assist) που προσφέρεται στο διαστημόπλοιο κατά την προσέγγιση ενός πλανήτη, του παρέχει (δωρεάν) ενέργεια, ώστε να ξεκινήσει ένα μακρύ διαπλανητικό ταξίδι. Πολλές φορές απαιτείται ο σχεδιασμός διαδοχικών προσεγγίσεων με τους πλανήτες Αφροδίτη και Γη, πάντα με κατάλληλη γεωμετρία, ώστε αθροιστικά, να κερδηθεί το απαραίτητο ποσό ενέργειας. Ενδεικτική είναι η τροχιά του διαστημοπλοίου Cassini, που το 2004 έφτασε επιτυχώς στον Κρόνο.



Εικόνα 60: Η πολύπλοκη τροχιά του σκάφους Cassini κατά τη πορεία του προς τον Κρόνο. Διακρίνονται διαδοχικά επεισόδια βαρυτικής υποβοήθησης από τη Γη και την Αφροδίτη

4.1.2.4 Κυκλική και Ελλειπτική Κίνηση

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε τις περατωμένες τροχιές τύπου Kepler, δηλαδή, τις κυκλικές και ελλειπτικές τροχιές. Οι βασικές σχέσεις που δίνουν τη θέση και την ταχύτητα ενός δορυφόρου, ως συναρτήσεις της αληθούς ανωμαλίας, ν , προκύπτουν από τη διατήρηση των C και h και τις γεωμετρικές ιδιότητες των κωνικών τομών.

4.1.2.4.1 Κυκλική κίνηση

Ο δορυφόρος εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση με ακτίνα $r = a = p$ όταν $e = 0$, δηλαδή:

$$C = -\frac{\mu}{2a}, \quad h = nr^2 = \sqrt{\mu a} \quad (4.30)$$

Η περίοδος και η γραμμική ταχύτητα της κίνησης δίνονται από τις σχέσεις:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}, \quad u = \sqrt{\frac{\mu}{a}} \quad (4.31)$$

Στην κυκλική κίνηση, τόσο η εμβαδική όσο και η γραμμική ταχύτητα είναι σταθερές. Η θέση του δορυφόρου κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τη γραμμική σχέση:

$$v(t) = v_0 + \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} t \quad (4.32)$$

4.1.2.4.2 Ελλειπτική κίνηση

Παραγωγίζοντας την εξίσωση της τροχιάς ως προς t , παίρνουμε:

$$\dot{r} = \frac{r\dot{v} \sin v}{1 + e \cos v} \quad (4.33)$$

Το μέτρο της ταχύτητας δίνεται από τις σχέσεις:

$$u^2 = r^2 + r^2 \dot{v}^2 \quad (4.34)$$

και:

$$\dot{r}^2 \dot{v} = h = na^2 \sqrt{1 - e^2} \quad (4.35)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, βρίσκουμε ότι οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας, ακτινική και επιτροχια, είναι:

$$u_r = \dot{r} = \frac{na}{\sqrt{1 - e^2}} e \sin v \quad (4.36)$$
$$u_v = r\dot{v} = \frac{na}{\sqrt{1 - e^2}} (1 + e \cos v)$$

ενώ από το ολοκλήρωμα της ενέργειας, παίρνουμε τη σχέση:

$$u^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (4.37)$$

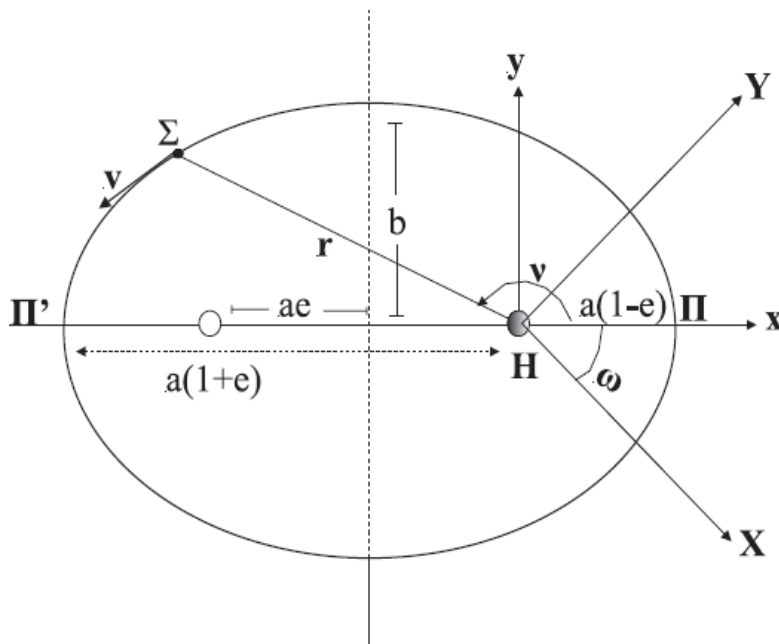
Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται αντιληπτό ότι η ταχύτητα της κίνησης είναι μέγιστη για $v = 0$, δηλαδή στο περίκεντρο (περιήλιο, περίγειο κ.λ.π.) της τροχιάς, $r_p = a(1 - e) = q$, και ελάχιστη στο απόκεντρο (αφήλιο, απόγειο κ.λ.π.) της τροχιάς ($v = \pi$), όπου $r_a = a(1 + e) = Q$. Έτσι, στα όρια της γραμμής των αψίδων, το διάνυσμα της ταχύτητας είναι κάθετο στην τροχιά, δηλαδή η ταχύτητα έχει μόνο εφαπτομενική συνιστώσα, με μέτρο:

$$u_p = na\sqrt{\frac{1+e}{1-e}}, \quad u_a = na\sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \quad (4.38)$$

αντίστοιχα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στο πρόβλημα των δύο σωμάτων υπάρχει ένα επιπλέον ολοκλήρωμα της κίνησης, το διάνυσμα *Laplace – Runge – Lenz* (LRL) ή *διάνυσμα εκκεντρότητας*, που δίνεται από τη σχέση:

$$e = -\frac{h \times u}{\mu} - \frac{r}{r} \quad (4.39)$$

και έχει μέτρο ίσο με e . Το διάνυσμα LRL σχηματίζει σταθερή γωνία με τον άξονα Ox , η οποία ταυτίζεται με το σταθερό μήκος του περιηλίου ϖ . Άρα, η διατήρηση του e συνεπάγεται σταθερό προσανατολισμό της έλλειψης στον αδρανειακό χώρο.



Εικόνα 61: Επίπεδη ελλειπτική κίνηση ενός σώματος σε βαρυτικό πεδίο δυνάμεων, σε αδρανειακό και περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων

Είναι φανερό ότι, απ' όλες τις εξισώσεις που δόθηκαν σε αυτή την παράγραφο, απουσιάζει ο χρόνος, t . Ο λόγος είναι ότι η διαφορική εξίσωση της κίνησης δεν μπορεί να λυθεί ως προς t σε κλειστή μορφή. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε από τον Kepler, ο οποίος εισήγαγε το χρόνο κατευθείαν στη λύση της εξίσωσης (την ελλειπτική τροχιά), χρησιμοποιώντας γεωμετρικές έννοιες. Στην επόμενη παράγραφο θα μελετήσουμε αυτήν την περίφημη εξίσωση του Kepler, που επιτρέπει το υπολογισμό του χρόνου πτήσης μεταξύ δύο σημείων της έλλειψης.

4.1.2.5 Η Εξίσωση του Kepler

Από τον δεύτερο νόμο του Kepler γνωρίζουμε ότι ο λόγος των εμβαδών που διαγράφει ένας πλανήτης (ή δορυφόρος) είναι ίσος προς το λόγο των αντίστοιχων χρόνων της κίνησης. Έτσι, αν T το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να διαγραφεί το εμβαδό ολόκληρης της έλλειψης, $A = \pi a^2(1-e^2)^{1/2}$, και $t-t_0$ ο χρόνος κίνησης που αντιστοιχεί σε εμβαδό A_1 , τότε ισχύει:

$$\frac{t-t_0}{A_1} = \frac{T}{\pi a^2 \sqrt{1-e^2}} \quad (4.40)$$

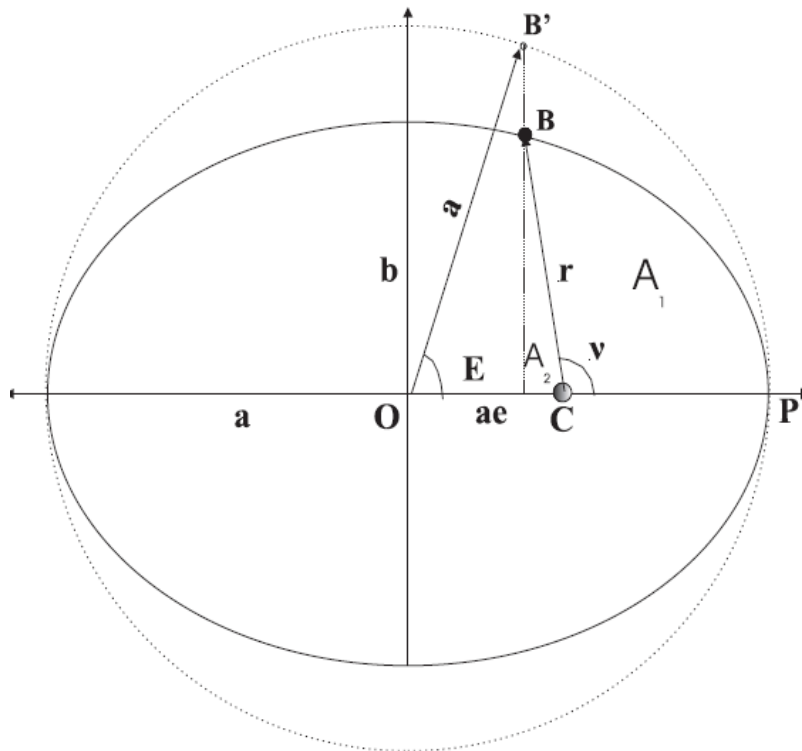
όπου η αρχή μέτρησης του χρόνου ταυτίζεται με τη χρονική στιγμή κατά την οποία το κινητό διέρχεται από το περίκεντρο της τροχιάς, $t_0 = t_p$, που ονομάζεται *χρόνος ή εποχή διάβασης του περίκεντρου*. Το πρόβλημα πλέον έγκειται στην εύρεση του εμβαδού A_1 , ως συνάρτησης της αληθούς ανωμαλίας ν και των σταθερών στοιχείων της έλλειψης.

Ο Kepler έδωσε τη λύση του προβλήματος σε δύο βήματα, χρησιμοποιώντας έναν βοηθητικό κύκλο, περιγεγραμμένο της έλλειψης, και ορίζοντας την *έκκεντρη ανωμαλία* E , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες του κινητού, ως συναρτήσεις της έκκεντρης ανωμαλίας, δίνονται από τις σχέσεις:

$$r = a(\cos E - e), \quad y = a\sqrt{1-e^2} \sin E \quad (4.41)$$

και το μέτρο του διανύσματος θέσης ισούται με:

$$r = a(1 - e \cos E) \quad (4.42)$$



Εικόνα 62: Ορισμός της έκκεντρης ανωμαλίας E και γεωμετρική κατασκευή της εξίσωσης Kepler

Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτουν επίσης οι σχέσεις που συνδέουν τις γωνίες E και ν . Αυτές είναι:

$$\cos E = \frac{e + \cos \nu}{1 + e \cos \nu}, \quad \sin E = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin \nu}{1 + e \cos \nu} \quad (4.43)$$

Ο Kepler χρησιμοποίησε ένα βασικό αποτέλεσμα της αναλυτικής γεωμετρίας, σύμφωνα με το οποίο ο λόγος των μηκών κάθε κοινής χορδής της έλλειψης και του περιγεγραμμένου κύκλου, κάθετης στη γραμμή των ασίδων, είναι ίσος με b/a . Το εμβαδό A_1 δίνεται από τη διαφορά $A(PCB) - A_2$. Το A_2 βρίσκεται με απλούς τριγωνομετρικούς συλλογισμούς, ενώ το εμβαδό $A(PCB)$ βρίσκεται αν αφαιρέσουμε το εμβαδό του τριγώνου OCB' από το εμβαδό του κυκλικού τομέα $OB'P$ και πολλαπλασιάσουμε το αποτέλεσμα με το λόγο $b/a = (1 - e^2)^{1/2}$, που είναι ο λόγος των ευθύγραμμων τμημάτων CB/CB' . Το τελικό αποτέλεσμα δίνεται από τον τύπο:

$$A_1 = \frac{a^2 \sqrt{1 - e^2}}{2} (E - e \sin E) \quad (4.44)$$

και αντικαθιστώντας στην αρχική σχέση παίρνουμε την περίφημη εξίσωση του Kepler:

$$n(t - t_p) = E - e \sin E \quad (4.45)$$

η οποία συνδέει το χρόνο κίνησης με την τιμή της έκκεντρης ανωμαλίας E (αντί της ν). Η ποσότητα $n(t - t_p) = M$ ονομάζεται *μέση ανωμαλία*. Έχει διαστάσεις γωνίας και αντιστοιχεί στη θέση ενός ιδεατού κινητού που ακολουθεί ομαλή κυκλική κίνηση σε κύκλο ακτίνας a , με συχνότητα ίση προς τη μέση κίνηση της πραγματικής ελλειπτικής τροχιάς. Επομένως η M , η οποία σε πολλά συγγράμματα συμβολίζεται επίσης με l , είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου (σε αντίθεση με τις E και ν). Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι ο χρόνος πτήσης μεταξύ δύο γνωστών θέσεων του κινητού, ν_1 και ν_2 , μπορεί να βρεθεί εύκολα από την εξίσωση του Kepler, αφού προηγουμένως υπολογίσουμε τις αντίστοιχες τιμές της έκκεντρης ανωμαλίας.

Το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η εύρεση της θέσης του σώματος επί της έλλειψης για δεδομένη χρονική στιγμή, δεν έχει τόσο απλή λύση. Ο λόγος είναι ότι η εξίσωση $t(E) = 0$ δεν μπορεί να λυθεί σε κλειστή μορφή, καθώς είναι υπερβατική ως προς E . Η λύση της μπορεί να βρεθεί με τη χρήση αριθμητικών είτε αναλυτικών μεθόδων, δηλαδή (στη δεύτερη περίπτωση) σε μορφή σειράς. Ας σημειωθεί ότι, για μεγάλες τιμές εκκεντρότητας, η σύγκλιση του ελλειπτικού αναπτύγματος είναι συνήθως προβληματική.

Τέλος, πολλές φορές «ορίζουμε» την Αστρονομική Μονάδα (AU) ως τη μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο. Αν υπολογίσουμε τη χρονική μέση τιμή της απόστασης r ενός πλανήτη που ακολουθεί ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, θα βρούμε: $\langle r \rangle = a(1 + e^2/2)$. Είναι προφανές ότι ο παραπάνω «ορισμός» είναι λανθασμένος, καθώς καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η μέση απόσταση ενός πλανήτη (άρα και της Γης) από τον Ήλιο εξαρτάται και από την εκκεντρότητα της τροχιάς του. Ο ορθός ορισμός της AU είναι ο εξής: «Ως Αστρονομική Μονάδα (AU) ορίζεται η τιμή του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς της Γης, όπως προκύπτει από τον 3^ο νόμο του Kepler, για περίοδο ίση με ένα Γήινο έτος ή 365,25 Γήινες ημέρες». Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει πρόβλημα αν χρησιμοποιήσουμε τη μέση τιμή όχι ως προς τον χρόνο αλλά είτε ως προς την έκκεντρη ανωμαλία E , είτε ως προς το μήκος τόξου κατά μήκος της έλλειψης.

4.1.3 Διαταραχές της Κίνησης

Οι τροχιές των πλανητών είναι μόνο κατά προσέγγιση ελλειπτικές καθώς, εκτός της βαρυτικής δύναμης του Ήλιου (που είναι το πρωτεύον σώμα), ασκούνται σε αυτούς επιπλέον δυνάμεις από δευτερεύοντα σώματα. Το ίδιο φυσικά ισχύει και για τους ελάσσονες πλανήτες ή τους κομήτες αλλά και για τους φυσικούς δορυφόρους των πλανητών. Στην τελευταία περίπτωση, η κατάσταση αντιστρέφεται: κεντρικό-πρωτεύον σώμα είναι ο εκάστοτε πλανήτης, ενώ ο Ήλιος είναι το δευτερεύον σώμα και η βαρύτητά του δρα ως «διαταραχή». Επειδή το μέτρο των δυνάμεων που εξασκούν τα δευτερεύοντα σώματα είναι κατά κανόνα πολύ μικρότερο από αυτό του κεντρικού-πρωτεύοντος, συνήθως οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται *διαταραχές* (perturbations) – αν και πιο ορθό είναι να ονομάζουμε *παρέλξεις* τις μικρές δυνάμεις και να κρατήσουμε ως *διαταραχές* τις αντίστοιχες μικρές μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς του ουράνιου σώματος που οι παρέλξεις προκαλούν.

Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες διαταραχών: (α) συντηρητικές, βαρυτικής φύσης και (β) μη συντηρητικές, κυρίως τριβές. Θεωρώντας ότι οι μεταβολές που προκαλούν οι διαταραχές στα στοιχεία μιας ελλειπτικής τροχιάς είναι μικρές, τότε μπορούμε να τις υπολογίσουμε μέσω των *γενικών εξισώσεων διαταραχών* του Gauss, θεωρώντας βέβαια ως μεταβλητές και όχι ως σταθερές τις τιμές των ελλειπτικών στοιχείων (π.χ. *a, e*).

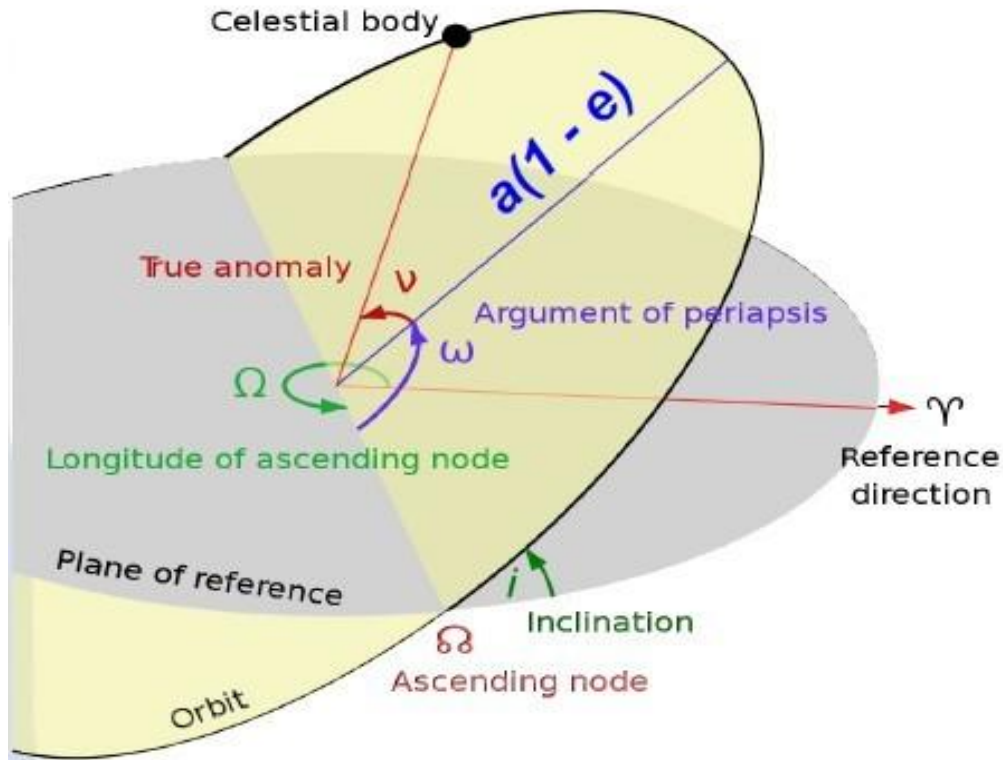
4.1.3.1 Στοιχεία της Τροχιάς

Προκειμένου να μελετήσουμε την τροχιά ενός πλανήτη σε σχέση με την ουράνια σφαίρα, πρέπει να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό της έλλειψης στο κατάλληλο (αδρανειακό) σύστημα συντεταγμένων. Στο Ηλιακό Σύστημα, το σύνηθες σύστημα αναφοράς είναι το *ηλιοκεντρικό*, στο οποίο ο Ήλιος καταλαμβάνει την αρχή των συντεταγμένων. Το επίπεδο *xy* ορίζεται ως το επίπεδο της εκλειπτικής (της τροχιάς της Γης), για κάποια δεδομένη χρονική στιγμή και ο άξονας *Oz* είναι κάθετος σε αυτό. Τέλος, το σύστημα προσανατολίζεται ως προς την αρχή των μετρήσεων του αστρικού χρόνου, θέτοντας τον άξονα *Ox* να συμπίπτει με τη διεύθυνση του μέσου εαρινού ισημερινού σημείου, *γ*.

Για να ορίσουμε πλήρως τον προσανατολισμό της έλλειψης, ως προς το θεωρούμενο σύστημα αναφοράς, απαιτούνται τρεις γωνίες προσανατολισμού, αντίστοιχες με τις γωνίες του Euler στην Κλασική Μηχανική στερεού σώματος. Η *κλίση* του επιπέδου της τροχιάς ενός πλανήτη (inclination) ως προς το επίπεδο της εκλειπτικής συμβολίζεται με *i* και παίρνει τιμές στο διάστημα 0° - 180° . Το σημείο απ' όπου το σώμα διέρχεται από το επίπεδο *xy* με φορά από $z < 0$ σε $z > 0$, ονομάζεται *αναβιβάζων σύνδεσμος* (ascending node) της τροχιάς και το αντιδιαμετρικό του ονομάζεται *καταβιβάζων σύνδεσμος*. Η γραμμή που τα συνδέει ονομάζεται *γραμμή των συνδέσμων* (line of nodes) και η γωνία που σχηματίζει με τον άξονα *Ox* ορίζει το *μήκος του αναβιβάζοντος συνδέσμου* (longitude of the ascending node), Ω . Η τρίτη γωνία που μας χρειάζεται είναι το *όρισμα του περιηλίου* (argument of perihelion), ω , που ορίζει τη θέση του περιηλίου πάνω στο επίπεδο της τροχιάς, ως προς τη γραμμή των συνδέσμων.

Η θέση του πλανήτη επί της έλλειψης δίνεται κάθε χρονική στιγμή από την τιμή της ανωμαλίας. Η σταθερά της εξίσωσης του Kepler, t_P , ορίζει την αστρονομική «εποχή», δηλαδή τη χρονική στιγμή, που το σώμα διέβη από το περιήλιο της τροχιάς

του, δηλαδή η στιγμή κατά την οποία η αληθής, v , (όπως και η έκκεντρος, E , αλλά και η μέση, l) ανωμαλία είχαν μηδενικές τιμές.



Εικόνα 63: Τα στοιχεία της ελλειπτικής τροχιάς ενός σώματος σε βαρυτικό πεδίο δυνάμεων

Στην Ουράνια Μηχανική συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε γωνίες που έχουν ως αρχή μέτρησης έναν σταθερό άξονα σε ένα αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων – οι γωνίες αυτές ονομάζονται *μήκη* (longitudes), π.χ. το μήκος του αναβιβάζοντος συνδέσμου Ω , που μετράται από τη διεύθυνση Ox του εαρινού ισημερινού σημείου, γ . Έτσι, ως *μήκος του περιηλίου*, ϖ , ορίζεται η «σπαστή» γωνία (σε δύο επίπεδα):

$$\varpi = \omega + \Omega \quad (4.46)$$

και ως αληθές μήκος θ , και μέσο μήκος λ , ορίζονται αντίστοιχα οι γωνίες:

$$\theta = \varpi + v = \Omega + \omega + v, \quad \lambda = \varpi + l = \Omega + \omega + l \quad (4.47)$$

Είναι προφανές ότι πρέπει να υπάρχει μία προς μία αντιστοιχία μεταξύ των έξι παραμέτρων που χρησιμοποιούμε συνήθως στη Μηχανική για να καθορίσουμε πλήρως τις αρχικές συνθήκες της κίνησης, δηλαδή τις συνιστώσες των διανυσμάτων θέσης και ταχύτητας, $(r, v = dr/dt)$, και των έξι στοιχείων της τροχιάς $(a, e, i, \Omega, \omega, M=l)$. Ο μετασχηματισμός που εκφράζει αυτήν την αντιστοιχία μπορεί να βρεθεί αν εκφράσουμε τις συνιστώσες των (r, v) στο σύστημα Oxy του επιπέδου της τροχιάς, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που συνδέουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες με την έκκεντρη ανωμαλία:

$$\begin{aligned} [x, y, 0] &= [a(\cos E - e), a\sqrt{1-e^2} \sin E, 0] \\ [\dot{x}, \dot{y}, 0] &= \left[-\frac{na \sin E}{1-e \cos E}, \frac{na\sqrt{1-e^2}}{1-e \cos E}, 0 \right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

Έτσι, οι συνιστώσες των (r_h, v_h) στο τρι-διάστατο ηλιοκεντρικό σύστημα αναφοράς βρίσκονται αν στρέψουμε τα διανύσματα ως προς τις γωνίες του Euler,

$$r_h = R_x r, \quad v_h = R_x v \quad (4.49)$$

με τον πίνακα στροφής να έχει τη μορφή:

$$\begin{pmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \cos i \sin \omega & -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos i \cos \omega & \sin \Omega \sin i \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \cos i \sin \omega & -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos i \cos \omega & -\cos \Omega \sin i \\ & \sin i \sin \omega & \sin i \cos \omega & \cos i \end{pmatrix}$$

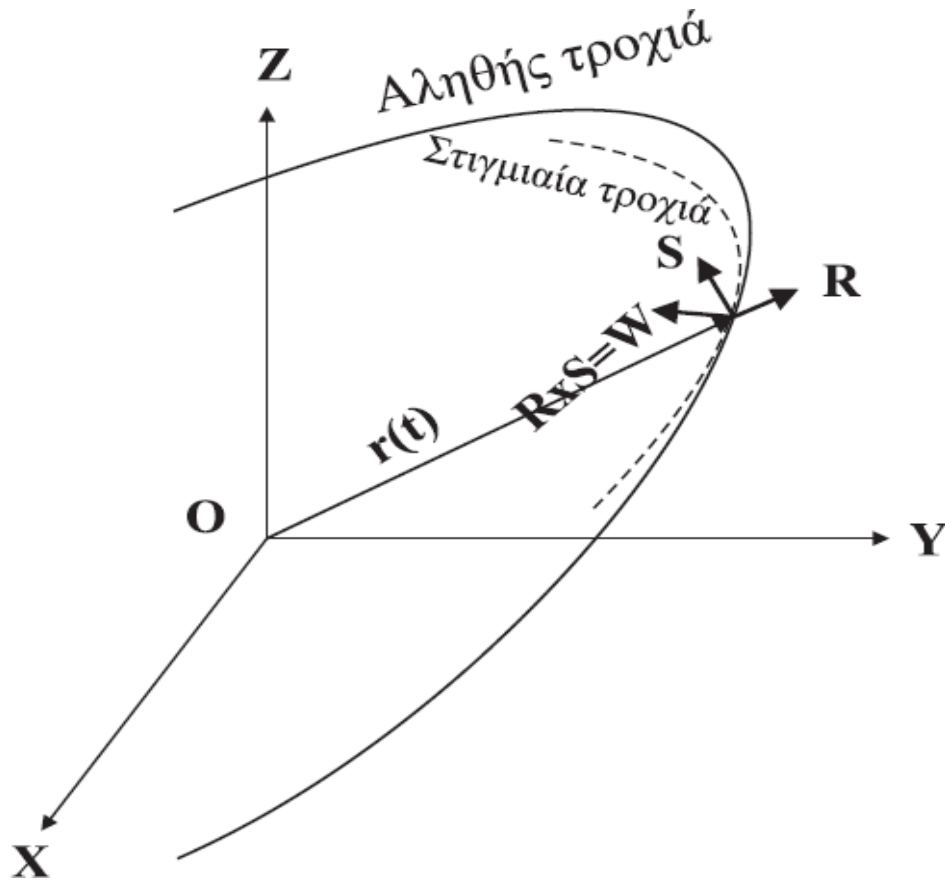
που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τριών πινάκων στροφής που πρέπει να επιδράσουν διαδοχικά (ένας για κάθε στροφή ως προς την αντίστοιχη γωνία) πάνω στα διανύσματα (r, v) .

4.1.3.2 Παρεφαπτόμενη Τροχιά

Ας υποθέσουμε ότι, εκτός της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ο πλανήτης δέχεται επιτάχυνση, γ_p , λόγω κάποιας παρελκτικής δύναμης. Η διαταραχή μπορεί να είναι συντηρητική ή μη. Αν το μέτρο της είναι μικρό σε σχέση με την επιτάχυνση της βαρύτητας που ασκεί ο Ήλιος, τότε μπορούμε να γενικεύσουμε τον ορισμό των στοιχείων της τροχιάς, παρά το γεγονός ότι η αληθής τροχιά του πλανήτη δεν είναι πια κλειστή. Το ίδιο, φυσικά, ισχύει και για την περίπτωση ενός δορυφόρου (φυσικού ή τεχνητού) που κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας ενός πλανήτη και δέχεται παρέλξεις π.χ. από τους υπόλοιπους πλανήτες.

Συγκεκριμένα, για κάθε χρονική στιγμή t , κατά την οποία το σώμα βρίσκεται στη θέση Σ , ορίζουμε την *παρεφαπτόμενη τροχιά* O' (osculating orbit), ως την ελλειπτική τροχιά τύπου Kepler που εφάπτεται με την αληθή τροχιά στο Σ , και την οποία θα ακολουθούσε ο δορυφόρος, αν ξαφνικά εξαφανίζονταν οι παρέλξεις (βλ. Εικόνα 61). Τα στοιχεία της στιγμιαίας αυτής ελλειπτικής τροχιάς ονομάζονται *παρεφαπτόμενα στοιχεία της τροχιάς* (osculating elements) και δεν αποτελούν σταθερές της κίνησης. Για συντηρητικές διαταραχές μικρού πλάτους, τα στοιχεία της τροχιάς μεταβάλλονται αργά, εκτελώντας μικρές ταλαντώσεις γύρω από κάποια μέση τιμή. Αυτές οι μέσες τιμές συνήθως ονομάζονται *ίδια στοιχεία* της τροχιάς (proper elements).

Οι μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς μπορούν να υπολογιστούν συνήθως μόνο προσεγγιστικά, αν και οι βασικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να οριστούν επακριβώς. Μία από τις μεθόδους εύρεσης των *εξισώσεων διαταραχών* (perturbation equations) βασίζεται στο φορμαλισμό του προβλήματος των δύο σωμάτων και τον υπολογισμό των μεταβολών των ολοκληρωμάτων της κίνησης. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης, τις *εξισώσεις διαταραχών του Gauss*.



Εικόνα 64: Ορισμός της παρεφαπτόμενης τροχιάς

Ορίζουμε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς με μοναδιαία διανύσματα R , S και W , όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Εικόνα 64) ($W = R \times S$), το οποίο κινείται μαζί με τον πλανήτη (ή δορυφόρο). Σε αυτό το σύστημα αναφοράς, το διάνυσμα της επιτάχυνσης γράφεται:

$$\gamma_P = \gamma_R R + \gamma_S S + \gamma_W W \quad (4.50)$$

Ξεκινώντας από το θεώρημα μεταβολής της κινητικής ενέργειας, μπορεί κανείς να αποδείξει ότι ο ρυθμός μεταβολής της ειδικής μηχανικής ενέργειας C , ισούται με την ισχύ της διαταρακτικής επιτάχυνσης:

$$\frac{dC}{dt} = u \gamma_P \quad (4.51)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που συνδέει την ενέργεια με την τιμή του μεγάλου ημιάξονα, παίρνουμε τον ρυθμό μεταβολής του a :

$$\frac{da}{dt} = \frac{2a^2}{\mu} u \gamma_P \quad (4.52)$$

Το διάνυσμα της ταχύτητας αναλύεται στο σύστημα των τριών συνιστωσών του, δίνοντας:

$$u = u \sin \beta R + u \cos \beta S \quad (4.53)$$

όπου β η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων R και S (γωνία πτήσης). Οι συνιστώσες της ταχύτητας u_R και u_S , ταυτίζονται με τις u_r και u_θ (ακτινική και επιτροχια) της ελλειπτικής κίνησης, αντίστοιχα:

$$u \sin \beta = u_r, \quad u \cos \beta = u_\theta \quad (4.54)$$

όπου $\theta = \nu$. Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των ταχυτήτων που βρήκαμε σε προηγούμενη παράγραφο, προκύπτει η τελική σχέση για τον ρυθμό μεταβολής του μεγάλου ημιάξονα:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}} [e \sin \nu \gamma_R + (1+e \cos \nu) \gamma_S] \quad (4.55)$$

όπου τα στοιχεία της τροχιάς στο δεξιό μέλος της εξίσωσης θεωρούνται σταθερά. Χρησιμοποιώντας το βασικό θεώρημα της Κλασικής Μηχανικής που συνδέει το ρυθμό μεταβολής της στροφορμής ενός συστήματος με την ροπή που ασκείται σε αυτό:

$$\frac{dh}{dt} = r \times \gamma_P \quad (4.56)$$

καθώς και την εξίσωση της έλλειψης και την εξίσωση του Kepler, καταλήγουμε στις εξισώσεις του Gauss και για τα υπόλοιπα στοιχεία της τροχιάς. Για τα e και i οι αντίστοιχες εξισώσεις είναι:

$$\frac{de}{dt} \frac{\sqrt{1-e^2}}{na} [\sin \nu \gamma_R + (\cos E + \cos \nu) \gamma_S] \quad (4.57)$$

και

$$\frac{di}{dt} \frac{1}{na\sqrt{1-e^2}} \frac{r}{a} \cos(\nu + \omega) \gamma_w \quad (4.58)$$

4.1.4 Εξισώσεις Διαταραχών του Lagrange

Όταν οι διαταραχές της κίνησης είναι συντηρητικές (π.χ. βαρυτική επίδραση τρίτου σώματος), οι εξισώσεις κίνησης μπορούν να πάρουν τη μορφή:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\nabla(U + R) \quad (4.59)$$

όπου $U(r) = -GM/r$ το δυναμικό του κεντρικού-πρωτεύοντος σώματος, το οποίο «οδηγεί» το σώμα που μελετάμε σε κίνηση Kepler, και R η λεγόμενη *παρελκτική συνάρτηση*, το δυναμικό των δευτερευόντων σωμάτων, που είναι και το δυναμικό των διαταραχών. Παρόμοια μορφή παίρνουν οι εξισώσεις και στην περίπτωση που το κεντρικό σώμα δεν μπορεί να θεωρηθεί σημειακό ή δεν έχει τέλεια σφαιρική συμμετρία.

Ο Lagrange μετέτρεψε το παραπάνω διαφορικό σύστημα σε ένα σύστημα έξι διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης, που δίνει τις μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς. Σημειώνουμε ότι ο Lagrange ήταν αυτός που πρώτος εισήγαγε την έννοια της παρεφαπτόμενης τροχιάς και προσπάθησε να λύσει το πρόβλημα θεωρώντας ότι, υπό την επίδραση μικρών διαταραχών, οι (αρχικά) σταθερές της κίνησης (στοιχεία της τροχιάς) του προβλήματος των δύο σωμάτων συνεχίζουν να ορίζονται σαφώς και άρα οι σχέσεις που τις συνδέουν με τις καρτεσιανές συντεταγμένες δεν αλλάζουν,

αλλά μετατρέπονται σε συναρτήσεις του χρόνου που μένει να προσδιοριστούν από τις νέες, μη ομογενείς, διαφορικές εξισώσεις της κίνησης. Η μέθοδος αυτή δεν είναι παρά η γνωστή μέθοδος μεταβολής των σταθερών (variation of constants) που βρίσκει γενική εφαρμογή σε συστήματα διαφορικών εξισώσεων.

Ακολουθώντας τη μέθοδο του Lagrange, ξεκινούμε θυμίζοντας ότι η εξίσωση της σχετικής κίνησης γράφεται στη μορφή:

$$\ddot{r} + \frac{\mu}{r^2} \frac{r}{r} = 0 \quad (4.60)$$

και η λύση της είναι το διάνυσμα $r = f(C_1, \dots, C_6, t)$ που μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση του χρόνου t και των έξι σταθερών (C_1, \dots, C_6) στοιχείων. Η ταχύτητα προκύπτει αν παραγωγίσουμε το r ως προς t και είναι επίσης ένα διάνυσμα που εξαρτάται από τις ίδιες παραμέτρους $v = g(C_1, \dots, C_6, t)$. Αν στο σώμα ασκείται μια «ασθενής» παρελκτική δύναμη ΔF , τότε η εξίσωση κίνησης είναι:

$$\ddot{r} + \frac{\mu}{r^2} \frac{r}{r} = \Delta F \quad (4.61)$$

και θεωρώντας ότι τα στοιχεία της τροχιάς μετατρέπονται σε συναρτήσεις του χρόνου (αλλά το r συνεχίζει να έχει την ίδια έκφραση ως προς αυτά), το διάνυσμα της ταχύτητας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial f}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} = g + \sum_i \frac{\partial f}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} \quad (4.62)$$

Έχοντας απαιτήσει η νέα τροχιά να είναι παρεφαπτόμενη της λύσης του προβλήματος των δύο σωμάτων, έχουμε ουσιαστικά επιλέξει τη συνθήκη (βαθμίδα):

$$\sum_i \frac{\partial f}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} = 0 \quad (4.63)$$

που απλοποιεί την παραπάνω σχέση. Έτσι, η επιτάχυνση βρίσκεται αν παραγωγίσουμε ακόμη μια φορά ως προς t :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{\partial g}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial g}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} = \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + \sum_i \frac{\partial g}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} \quad (4.64)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην πλήρη εξίσωση της κίνησης και απαλείφοντας τους όρους που δίνουν την ομογενή εξίσωση του προβλήματος των δύο σωμάτων, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\sum_i \frac{\partial g}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} = \Delta F \quad (4.65)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε την σχέση 4.63 με τον παράγοντα $\frac{-\partial g}{\partial C_n}$ και τη σχέση 4.65 με τον παράγοντα $\frac{\partial f}{\partial C_n}$ και τις αθροίσουμε κατά μέλη, προκύπτουν οι γενικές εξισώσεις διαταραχών του Lagrange:

$$\sum_i [C_n, C_i] \frac{dC_i}{dt} = \frac{\partial f}{\partial C_n} \Delta F \quad (4.66)$$

που εκφράζουν το ρυθμό μεταβολής κάθε στοιχείου της παρεφαπτόμενης τροχιάς, σε σχέση με την παρελκτική δύναμη. Προφανώς, οι συνιστώσες του ΔF θα πρέπει επίσης να δοθούν ως συναρτήσεις των C_i . Στις εξισώσεις εμφανίζονται οι λεγόμενες *αγκύλες του Lagrange*, που ορίζονται από τη σχέση:

$$[C_n, C_i] = \frac{\partial f}{\partial C_n} \frac{\partial g}{\partial C_i} - \frac{\partial f}{\partial C_i} \frac{\partial g}{\partial C_n} \quad (4.67)$$

και δίνουν ένα συνδυασμό των παραγώγων των διανυσμάτων r και v (ή, των συναρτήσεων f, g) ως προς τα στοιχεία της τροχιάς. Σημειώνουμε ότι οι παραπάνω σχέσεις είναι γενικές και δεν εξαρτώνται από τον ορισμό των συγκεκριμένων κεπλεριανών στοιχείων της τροχιάς που χρησιμοποιήσαμε σε όλα τα παραπάνω. Μπορούμε δηλαδή να επιλέξουμε οποιοσδήποτε έξι, ανεξάρτητες μεταξύ τους, σταθερές (που προφανώς δεν θα είναι παρά συναρτήσεις των ολοκληρωμάτων της κίνησης) και να υπολογίσουμε το ρυθμό μεταβολής τους. Επίσης, οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για όλες τις δυνάμεις, συντηρητικές ή μη.

Αν θεωρήσουμε συντηρητικές δυνάμεις, όπου $\Delta F = -QR$ και χρησιμοποιήσουμε τα «κλασικά» έξι στοιχεία της τροχιάς και τις σχέσεις που τα συνδέουν με τις καρτεσιανές συντεταγμένες, οι εξισώσεις του Lagrange παίρνουν την παρακάτω, «κλασική» μορφή:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= -\frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M}, \\ \frac{dM}{dt} &= n + \frac{(1-e^2)}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e} + \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a}, \\ \frac{de}{dt} &= -\frac{(1-e^2)}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial M} + \frac{(1-e^2)^{1/2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial \omega}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\cos i}{na^2 (1-e^2)^{1/2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i} - \frac{(1-e^2)^{1/2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e}, \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{\cos i}{na^2 (1-e^2)^{1/2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial \omega} + \frac{1}{na^2 (1-e^2)^{1/2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial \Omega}, \\ \frac{d\Omega}{dt} &= -\frac{1}{na^2 (1-e^2)^{1/2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i} \end{aligned} \quad (4.68)$$

Προφανώς, η εύρεση και λύση των παραπάνω εξισώσεων είναι αρκετά περίπλοκη, κυρίως λόγω των περίπλοκων σχέσεων που προκύπτουν από τις αγκύλες του Lagrange. Για το λόγο αυτό είναι συνήθης πρακτική να προσπαθούμε να ορίσουμε νέα στοιχεία της τροχιάς (αλλαγή μεταβλητών), έτσι ώστε να απλοποιήσουμε τις πράξεις. Ο Delaunay απέδειξε ότι, αν κρατήσουμε ως στοιχεία τις γωνίες ($l = M, \omega, \Omega$) και ορίσουμε αντί των (a, e, i) τις συναρτήσεις:

$$L = (\mu a)^{1/2}, \quad G = (\mu a)^{1/2} \sqrt{1-e^2}, \quad H = (\mu a)^{1/2} \sqrt{1-e^2} \cos i \quad (4.69)$$

τότε όλες οι αγκύλες Lagrange δίνουν αποτέλεσμα μηδέν, εκτός από αυτές που περιλαμβάνουν συζυγή στοιχεία, οι οποίες και δίνουν $[l, L] = [\omega, G] = [\Omega, H] = 1$. Είναι φανερό ότι οι συζυγείς μεταβλητές είναι κανονικές μεταβλητές και οι εξαιρετικά απλουστευμένες πλέον εξισώσεις Lagrange:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} &= \frac{\partial R}{\partial L}, \quad \frac{dL}{dt} = -\frac{\partial R}{\partial l} \\ \frac{dg}{dt} &= \frac{\partial R}{\partial G}, \quad \frac{dG}{dt} = -\frac{\partial R}{\partial g} \\ \frac{dh}{dt} &= \frac{\partial R}{\partial H}, \quad \frac{dH}{dt} = -\frac{\partial R}{\partial h} \end{aligned} \quad (4.70)$$

ορίζουν ένα κανονικό (Χαμιλτονιανό) σύστημα εξισώσεων πρώτης τάξης. Επίσης, με βάση και τις προηγούμενες παραγράφους, μπορούμε να αντιληφθούμε τη φυσική σημασία των στοιχείων του Delaunay. Οι συναρτήσεις (L, G, H) έχουν διαστάσεις στροφορμής, με τη G να είναι ίση με το μέτρο της στροφορμής και την H να είναι ίση με το μέτρο της προβολής του διανύσματος της στροφορμής στον ηλιοκεντρικό άξονα Oz . Τέλος, η L παριστάνει το μέτρο της στροφορμής που θα είχε η τροχιά αν ήταν κυκλική και βρισκόταν πάνω στο επίπεδο της εκλειπτικής.

Η δυνατότητα επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων Lagrange εξαρτάται πολύ από το πρόβλημα, δηλαδή τη συναρτησιακή μορφή της παρελκτικής συνάρτησης. Μόνο για κάποιες ειδικές περιπτώσεις η επίλυση είναι σχετικά εύκολη. Στη γενική περίπτωση αναγκαζόμαστε να κάνουμε σημαντικές παραδοχές, που οδηγούν σε απλουστευτικές προσεγγίσεις της R , οι οποίες επιτρέπουν την επίλυση του συστήματος. Καλό είναι όμως να έχουμε υπόψη μας ότι μια προσεγγιστική λύση, παρότι μας επιτρέπει να κατανοήσουμε έστω και λίγο πιο βαθιά το πρόβλημα, δεν μπορεί να έχει καθολική ισχύ.

4.1.4.1 Επίδραση του Ισημερινού Εξογκώματος της Γης στην Κίνηση Δορυφόρου

Εφαρμόζοντας τώρα τις εξισώσεις του Lagrange μπορούμε να υπολογίσουμε την εξέλιξη των στοιχείων της τροχιάς ενός σώματος (π.χ. δορυφόρου) που κινείται γύρω από ένα κεντρικό-πρωτεύον σώμα που παρουσιάζει *ισημερινό εξόγκωμα* (δηλ. αξονικά συμμετρική πλάτυνση).

Στη γενική περίπτωση, το δυναμικό ενός σώματος (π.χ. της Γης) που έχει πεπερασμένες διαστάσεις και δεν έχει τέλεια σφαιρική συμμετρία, μπορεί να δοθεί με τη μορφή αναπτύγματος σε σειρά σφαιρικών αρμονικών:

$$U(r, \varphi, \lambda) = -\frac{\mu}{r} + B(r, \varphi, \lambda) \quad (4.71)$$

όπου (φ, λ) οι σφαιρικές γεωγραφικές συντεταγμένες του τόπου της Γης από τον οποίο διέρχεται το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου (μέτρου r) και η σειρά $B(r, \varphi, \lambda)$ έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} B(r, \varphi, \lambda) &= \\ &= \frac{\mu}{r} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r} \right)^n J_n P_n(\sin \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R_e}{r} \right)^n P_{n,m}(\sin \varphi) [c_{n,m} \cos(m\lambda) + s_{n,m} \sin(m\lambda)] \right\} \end{aligned} \quad (4.72)$$

όπου R_e η μέση ακτίνα της Γης στον ισημερινό, $(J_e, c_{n,m}, s_{n,m})$ σταθεροί, αδιάστατοι συντελεστές που περιγράφουν τη σχετική συνεισφορά κάθε όρου και $P_{n,m}$ τα γνωστά πολυώνυμα Legendre τάξης n και βαθμού m . Ο πρώτος όρος του αθροίσματος περιγράφει τις αρμονικές των ισημερινών ζωνών, που εξαρτώνται μόνο από το γεωγραφικό πλάτος φ . Ο δεύτερος όρος περιγράφει αρμονικές μεταβολές κατά τη διεύθυνση των μεσημβρινών ατράκτων, που εξαρτώνται και από το γεωγραφικό μήκος λ . Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι οι συντελεστές $(J_e, c_{n,m}, s_{n,m})$ δεν μειώνονται σημαντικά καθώς αυξάνονται τα (n,m) , αλλά το πλάτος κάθε τριγωνομετρικού όρου μειώνεται σημαντικά, λόγω του παράγοντα $(R_e/r)^n$. Έτσι μπορούμε να γράψουμε προσεγγιστικά το δυναμικό με τη μορφή:

$$U(r, \varphi, \lambda) \approx -\frac{\mu}{r}(U_0 + U_2 + \dots) \quad (4.73)$$

όπου $U_0 = -1$ και

$$U_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 J_2 (3 \sin^2 \varphi - 1) \quad (4.74)$$

Ο όρος U_2 περιγράφει το ισημερινό εξόγκωμα (equatorial bulge) της Γης και είναι με μεγάλη διαφορά ο πλέον σημαντικός όρος της σειράς των αρμονικών. Η τιμή του συντελεστή J_2 (όπως και των υπολοίπων) έχει μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω του αντιστρόφου προβλήματος: αναλύουμε το πλάτος και τη συχνότητα των ταλαντώσεων (διαταραχές) που μετρούμε στις τροχιές των τεχνητών δορυφόρων της Γης και ταυτοποιούμε κάθε όρο της σειράς $B(r, \varphi, \lambda)$, γνωρίζοντας (από την προσεγγιστική επίλυση των εξισώσεων του Lagrange) ποιά πρέπει είναι η ιεραρχία των συχνοτήτων που εμφανίζονται. Για τη Γη, οι πρώτοι όροι της σειράς έχουν συντελεστές με τιμές:

$$J_2 = 1082,6 \times 10^{-6}, J_3 = -2,53 \times 10^{-6}, J_4 = -1,61 \times 10^{-6} \quad (4.75)$$

$$c_{2,1} = s_{2,1} = 0, c_{2,2} = 1,57 \times 10^{-6}, s_{2,2} = -0,9 \times 10^{-6}$$

απ' όπου είναι προφανές ότι ο όρος J_2 είναι μακράν ο πιο σημαντικός.

Υπολογίζοντας τώρα την επίδραση του ισημερινού εξογκώματος της Γης στην κίνηση ενός τεχνητού δορυφόρου, το παρελκτικό δυναμικό (η συνάρτηση R) είναι ουσιαστικά ο όρος U_2 και μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$R = \frac{GMJ_2R_p^2}{2a^3} \left(\frac{a}{r} \right)^3 (3 \sin^2 \varphi - 1) \quad (4.76)$$

όπου έχουμε πολλαπλασιάσει και διαιρέσει με τον παράγοντα a^3 . Από τους τύπους της σφαιρικής τριγωνομετρίας μπορεί να βρεθεί ότι το γεωγραφικό πλάτος δίνεται συναρτήσει των στοιχείων της τροχιάς από τη σχέση:

$$\sin \varphi = \sin i \sin(\omega + \nu) \quad (4.77)$$

(νόμος των ημιτόνων). Θέλουμε να υπολογίσουμε τη «μέση» μεταβολή των στοιχείων της ελλειπτικής τροχιάς για μια πλήρη περιφορά του δορυφόρου. Αναζητούμε δηλαδή τη μέση τιμή της συνάρτησης R :

$$\langle R \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T R dt = C \int_0^T \frac{1}{r^3} [3 \sin^2 i \sin^2(\omega + \nu) - 1] dt \quad (4.78)$$

η οποία μπορεί να βρεθεί αν κάνουμε αλλαγή μεταβλητής, χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ειδικής στροφορμής:

$$r^2 \frac{dv}{dt} = h \Rightarrow dt = \frac{1}{h} r^2 dv \quad (4.79)$$

Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι:

$$\langle R \rangle = \frac{GMJ_2 R_p^2}{2a^3} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i\right) (1 - e^2)^{-3/2} \quad (4.80)$$

δηλαδή η μέση τιμή της R δεν εξαρτάται από τις γωνίες Ω , ω και l και επομένως όλες οι παράγωγοι της ως προς αυτές τις μεταβλητές είναι μηδέν. Έτσι, το σύστημα των εξισώσεων Lagrange απλοποιείται σημαντικά και δίνει:

$$\frac{da}{dt} = \frac{de}{dt} = \frac{di}{dt} = 0 \quad (4.81)$$

δηλαδή, «κατά μέσον όρο», ο ημιάξονας, η εκκεντρότητα και η κλίση της τροχιάς του δορυφόρου παραμένουν σταθερές κατά την κίνηση του, παρά τις βραχυχρόνιες μεταβολές που υφίστανται από την πλάτυνση της Γης. Επίσης, ο ρυθμός μεταβολής του περιηλίου είναι:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3J_2 R_e^2 n}{2a^2 (1 - e^2)} \left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i\right) \quad (4.82)$$

Η συνάρτηση στο δεξιό μέλος της εξίσωσης έχει ρίζα ($d\omega/dt = 0$) για $i = 63^\circ.4$, οπότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τροχιές με αυτήν την κλίση διατηρούν σταθερό τον προσανατολισμό της γραμμής των αψίδων. Αν επιλέξουμε περίοδο $T = 2\pi / n = 12$ ή 24 ωρών και τιμές της εκκεντρότητας μεγαλύτερες από 0.7 , τότε παίρνουμε τις γνωστές τροχιές Molniya και Tundra των τεχνητών δορυφόρων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο ρυθμός μετάπτωσης του αναβιβάζοντος συνδέσμου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{3nJ_2 R_e^2 \cos i}{2a^2 (1 - e^2)^2} \quad (4.83)$$

Για μια τυπική, σχεδόν πολική τροχιά, με ύψος απογείου 1.000 km και ύψους περιγείου 500 km, η εκκεντρότητα είναι $e = 0,031$. Αν θέλουμε το επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου να διατηρεί σταθερό προσανατολισμό ως προς τη διεύθυνση Γη – Ήλιος, τότε εξισώνοντας το ρυθμό μετάπτωσης του Ω με τη γωνιακή ταχύτητα της Γης ($360^\circ / \text{έτος}$), η παραπάνω σχέση δίνει:

$$i_{ss} = 98^\circ.37 \quad (4.84)$$

Η τροχιά αυτή ονομάζεται *ηλιοσύγχρονη* (Sun-synchronous) και είναι ανάδρομη (retrograde), αφού $i > 90^\circ$.

4.1.5 Το Πρόβλημα των Δύο Σωμάτων

Στην κλασική μηχανική, το πρόβλημα των δύο σωμάτων είναι η πρόβλεψη της κίνησης δύο μαζικών αντικειμένων που θεωρούνται αφηρημένα ως σημειακά σωματίδια. Το πρόβλημα προϋποθέτει ότι τα δύο αντικείμενα αλληλεπιδρούν μόνο

μεταξύ τους. Η μόνη δύναμη που επηρεάζει κάθε αντικείμενο προκύπτει από το άλλο και όλα τα άλλα αντικείμενα αγνοούνται.

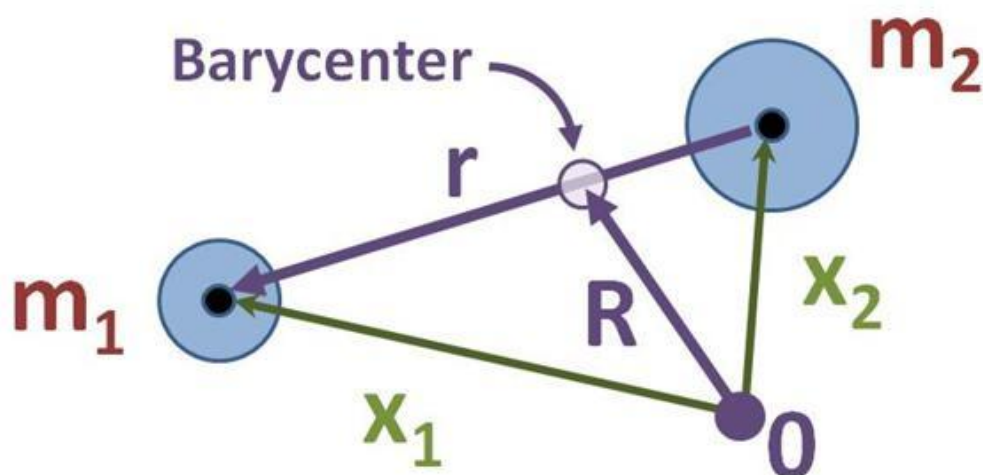
Η πιο σημαντική περίπτωση του κλασικού προβλήματος των δύο σωμάτων είναι η βαρυτική περίπτωση, που προκύπτει στην αστρονομία για την πρόβλεψη των τροχιών (ή των διαφυγών από την τροχιά) αντικειμένων όπως οι δορυφόροι, οι πλανήτες και τα αστέρια. Ένα μοντέλο σωματιδίων δύο σημείων ενός τέτοιου συστήματος σχεδόν πάντα περιγράφει τη συμπεριφορά του αρκετά καλά ώστε να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και προβλέψεις. Ένα απλούστερο μοντέλο «ενός σώματος», το «πρόβλημα κεντρικής δύναμης», αντιμετωπίζει το ένα αντικείμενο ως την ακίνητη πηγή μιας δύναμης που δρα στο άλλο. Στη συνέχεια, επιδιώκουμε την πρόβλεψη της κίνησης του μοναδικού εναπομείναντος κινητού αντικειμένου. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα όταν ένα αντικείμενο είναι πολύ πιο μεγάλο από το άλλο (όπως με έναν πλανήτη που περιστρέφεται γύρω από ένα αστέρι, όπου το αστέρι μπορεί να θεωρηθεί ουσιαστικά ακίνητο). Ωστόσο, η προσέγγιση του ενός σώματος είναι συνήθως περιττή αφού για πολλά είδη δυνάμεων, συμπεριλαμβανομένων των βαρυτικών, η γενική εκδοχή του προβλήματος των δύο σωμάτων μπορεί να περιοριστεί σε ένα ζεύγος προβλημάτων ενός σώματος, επιτρέποντάς του να επιλυθεί πλήρως και να δώσει μια λύση αρκετά απλή για να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Αντίθετα, το πρόβλημα των τριών σωμάτων, που θα δούμε μετέπειτα (και γενικότερα το πρόβλημα n -σώματος για $n \geq 3$), δεν μπορεί να λυθεί ως προς τα πρώτα ολοκληρώματα, εκτός από ειδικές περιπτώσεις.

Το πρόβλημα των δύο σωμάτων είναι ενδιαφέρον στην αστρονομία επειδή ζεύγη αστρονομικών αντικειμένων συχνά κινούνται γρήγορα σε αυθαίρετες κατευθύνσεις (έτσι οι κινήσεις τους γίνονται ενδιαφέρουσες), διαχωρίζονται ευρέως το ένα από το άλλο (έτσι δεν θα συγκρουστούν) και ακόμη ευρύτερα διαχωρίζονται από άλλα αντικείμενα (έτσι οι εξωτερικές επιρροές θα είναι αρκετά μικρές ώστε να αγνοούνται με ασφάλεια). Υπό τη δύναμη της βαρύτητας, κάθε μέλος ενός ζεύγους τέτοιων αντικειμένων θα περιστρέφεται γύρω από το αμοιβαίο κέντρο μάζας τους με ελλειπτικό μοτίβο, εκτός εάν κινούνται αρκετά γρήγορα ώστε να ξεφύγουν εντελώς το ένα από το άλλο, οπότε οι διαδρομές τους θα αποκλίνουν κατά μήκος άλλων επίπεδων κωνικών τμημάτων. Εάν ένα αντικείμενο είναι πολύ βαρύτερο από το άλλο, θα κινηθεί πολύ λιγότερο από το άλλο σε σχέση με το κοινό κέντρο μάζας. Το αμοιβαίο κέντρο μάζας μπορεί ακόμη και να βρίσκεται μέσα στο μεγαλύτερο αντικείμενο.

Στη θεωρία, οι ίδιες λύσεις του προβλήματος των δύο σωμάτων που ισχύουν για το βαρυτικό πεδίο, ισχύουν και για μακροσκοπικά προβλήματα που περιλαμβάνουν αντικείμενα που αλληλεπιδρούν όχι μόνο μέσω της βαρύτητας, αλλά μέσω οποιουδήποτε άλλου ελκτικού βαθμωτού δυναμικού πεδίου που υπακούει στο νόμο του αντίστροφου τετραγώνου, με την ηλεκτροστατική έλξη να είναι το προφανές φυσικό παράδειγμα. Στην πράξη, τέτοια προβλήματα σπάνια προκύπτουν. Εκτός ίσως από πειραματικές συσκευές ή άλλο εξειδικευμένο εξοπλισμό, σπάνια συναντάμε ηλεκτροστατικά αλληλεπιδρώντα αντικείμενα που κινούνται αρκετά γρήγορα και σε τέτοια κατεύθυνση, ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση ή που να είναι αρκετά απομονωμένα από το περιβάλλον τους.

Το πλήρες πρόβλημα δύο σωμάτων μπορεί να λυθεί επαναδιατυπώνοντάς το ως δύο προβλήματα ενός σώματος: ένα ασήμαντο και ένα που περιλαμβάνει την επίλυση για την κίνηση ενός σωματιδίου σε ένα εξωτερικό δυναμικό. Δεδομένου ότι πολλά

προβλήματα ενός σώματος μπορούν να λυθούν επακριβώς, το αντίστοιχο πρόβλημα δύο σωμάτων μπορεί επίσης να λυθεί.



Εικόνα 65: Το πρόβλημα των δύο σωμάτων

Έστω x_1 και x_2 οι διανυσματικές θέσεις των δύο σωμάτων και m_1 και m_2 οι μάζες τους. Ο στόχος είναι να προσδιοριστούν οι τροχιές $x_1(t)$ και $x_2(t)$ για όλες τις φορές t , λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές θέσεις $x_1(t=0)$ και $x_2(t=0)$ και τις αρχικές ταχύτητες $v_1(t=0)$ και $v_2(t=0)$.

Εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα στις δύο μάζες έχουμε:

$$\begin{aligned} F_{12}(x_1, x_2) &= m_1 \ddot{x}_1 \\ F_{21}(x_1, x_2) &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \quad (4.85)$$

όπου F_{12} είναι η δύναμη στη μάζα m_1 λόγω των αλληλεπιδράσεων της με τη μάζα m_2 , και F_{21} είναι η δύναμη στη μάζα m_2 λόγω των αλληλεπιδράσεων της με τη μάζα m_1 . Οι δύο κουκκίδες πάνω από τα διανύσματα θέσης x , δηλώνουν τη δεύτερη παράγωγο τους ως προς το χρόνο, ή τα διανύσματα επιτάχυνσης τους.

Η πρόσθεση και η αφαίρεση αυτών των δύο εξισώσεων τις διαχωρίζει σε δύο προβλήματα ενός σώματος, τα οποία μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα. Η πρόσθεση τους οδηγεί σε μια εξίσωση που περιγράφει το κέντρο μάζας (βαρύκεντρο) της κίνησης. Αντίθετα, η αφαίρεση τους οδηγεί σε μια εξίσωση που περιγράφει πώς το διάνυσμα $r = x_1 - x_2$ μεταξύ των μαζών αλλάζει με το χρόνο. Οι λύσεις αυτών των ανεξάρτητων προβλημάτων ενός σώματος μπορούν να συνδυαστούν για να ληφθούν οι λύσεις για τις τροχιές $x_1(t)$ και $x_2(t)$.

Έστω R η θέση του κέντρου μάζας (βαρύκεντρο) του συστήματος. Προσθέτοντας τις δύο εξισώσεις 4.85 θα έχουμε:

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = (m_1 + m_2) \ddot{R} = F_{12} + F_{21} = 0 \quad (4.86)$$

όπου χρησιμοποιήσαμε τον τρίτο νόμο του Newton $F_{12} = -F_{21}$ και όπου $\ddot{R} \equiv \frac{m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2}{m_1 + m_2}$. Η τελική εξίσωση $\ddot{R} = 0$ δείχνει ότι η ταχύτητα $v = \frac{dR}{dt}$ του κέντρου μάζας είναι σταθερή, από το οποίο προκύπτει πως και η συνολική ορμή

$m_1 v_1 + m_2 v_2$ είναι επίσης σταθερή (διατήρηση της ορμής). Ως εκ τούτου η θέση $R(t)$ του κέντρου μάζας μπορεί να προσδιοριστεί ανά πάσα στιγμή από τις αρχικές θέσεις και ταχύτητες.

Διαιρώντας και τις δύο εξισώσεις 4.85 με τις αντίστοιχες μάζες, αφαιρώντας τη δεύτερη εξίσωση από τη πρώτη και αναδιατάσσοντας παίρνουμε την εξίσωση:

$$\ddot{r} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 = \left(\frac{F_{12}}{m_1} - \frac{F_{21}}{m_2} \right) = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) F_{12} \quad (4.87)$$

όπου και πάλι χρησιμοποιήσαμε τον τρίτο νόμο του Newton $F_{12} = -F_{21}$ και όπου r είναι το διάνυσμα μετατόπισης από τη μάζα m_2 στη μάζα m_1 , όπως ορίστηκε παραπάνω. Η δύναμη μεταξύ των δύο αντικειμένων, η οποία προέρχεται από τα δύο αντικείμενα, θα πρέπει να είναι μόνο συνάρτηση της μετατόπισης τους r και όχι των απόλυτων θέσεων τους x_1 και x_2 . Διαφορετικά, δεν θα υπήρχε συμμετρία και οι νόμοι της φυσικής θα έπρεπε να αλλάζουν από σημείο σε σημείο. Επομένως, η αφαιρούμενη εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$\mu \ddot{r} = F_{12}(x_1, x_2) = F(r) \quad (4.88)$$

όπου μ είναι η παράμετρος μάζας $\mu = \frac{1}{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$.

Η επίλυση της εξίσωσης για το $r(t)$ είναι το κλειδί στο πρόβλημα των δύο σωμάτων. Η λύση εξαρτάται από την ειδική δύναμη μεταξύ των σωμάτων, η οποία ορίζεται ως $F(r)$. Αφού προσδιοριστούν τα $R(t)$ και $r(t)$, μπορούν να ληφθούν οι αρχικές τροχιές:

$$x_1(t) = R(t) + \frac{m_2}{m_1 + m_2} r(t) \quad (4.89)$$

$$x_2(t) = R(t) - \frac{m_1}{m_1 + m_2} r(t)$$

όπως μπορεί να επαληθευτεί αντικαθιστώντας τους ορισμούς των R και r στο δεξιό μέλος αυτών των δύο εξισώσεων.

Τέλος, η κίνηση δύο σωμάτων μεταξύ τους γίνεται πάντα σε ένα επίπεδο, στο κέντρο του πλαισίου μάζας. Ορίζουμε την γραμμική ορμή p και την γωνιακή ορμή L του συστήματος ως προς το κέντρο μάζας ως:

$$L = r \times p = r \times \mu \frac{dr}{dt} \quad (4.90)$$

όπου μ είναι η παράμετρος μάζας και r η σχετική θέση $r_2 - r_1$ (παίρνοντας το κέντρο μάζας ως αρχή και άρα οι r_1 και r_2 παράλληλες με την r).

Ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ορμής L ισούται με την καθαρή ροπή N :

$$N = \frac{dL}{dt} = \dot{r} \times \mu \dot{r} + r \times \mu \ddot{r} \quad (4.91)$$

και χρησιμοποιώντας την ιδιότητα του διανυσματικού γινομένου $v \times w = 0$ για οποιαδήποτε διανύσματα v και w που δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση παίρνουμε:

$$N = \frac{dL}{dt} = r \times F \quad (4.92)$$

με $F = \mu d^2 r / dt^2$.

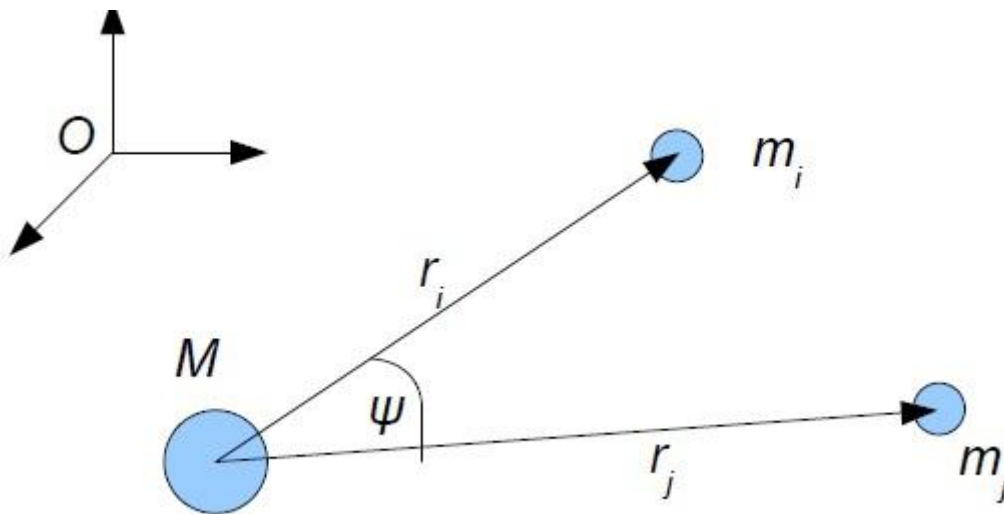
Εισάγοντας την υπόθεση (η οποία είναι αληθείς για τις περισσότερες φυσικές δυνάμεις, καθώς υπακούουν στον τρίτο νόμο κίνησης του Νεύτωνα) ότι η δύναμη μεταξύ δύο σωματιδίων δρα κατά μήκος της γραμμής μεταξύ των θέσεων τους, προκύπτει ότι $r \times F = 0$ και το διάνυσμα γωνιακής ορμής L είναι σταθερό. Επομένως, το διάνυσμα μετατόπισης r και η ταχύτητά του v βρίσκονται πάντα στο επίπεδο που είναι κάθετο στο σταθερό διάνυσμα L .

4.1.6 Βαρυτική Επίδραση 3^{ου} Σώματος

Το βαρυτικό πρόβλημα των τριών σωμάτων είναι ίσως το διασημότερο πρόβλημα της Ουράνιας Μηχανικής. Είναι πλέον γνωστό ότι, παρά την «πίστη» πολλών μεγάλων ερευνητών του 18ου και 19ου αιώνα για το αντίθετο, το πρόβλημα δεν έχει γενική λύση σε κλειστή μορφή, όπως αποδείχθηκε από τον Poincaré. Έτσι, μπορούν να βρεθούν με αναλυτικό τρόπο μόνο ειδικές λύσεις ισορροπίας ή προσεγγιστικές λύσεις (με τη μορφή σειρών, οι οποίες όμως δε συγκλίνουν και, άρα, δεν ισχύουν για κάθε t).

Παρά ταύτα, με τη χρήση της θεωρίας διαταραχών και κάνοντας διάφορες «λογικές» παραδοχές, μπορούμε να πάρουμε χρήσιμες προσεγγιστικές λύσεις που μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος τριών ή περισσότερων σωμάτων (π.χ. Ήλιος και δύο πλανήτες) για αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σημειώνουμε ότι, ως μη γραμμικό δυναμικό σύστημα, το πρόβλημα των τριών σωμάτων χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη περιοχών αρχικών συνθηκών που οδηγούν σε χαοτικές κινήσεις. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στη δυναμική εξέλιξη και στη μακροχρόνια ευστάθεια των πλανητικών συστημάτων.

Έστω λοιπόν τρία σώματα με μάζες M , m_i και m_j (θεωρούμε ότι M («Ήλιος») $\gg m_i, m_j$ («πλανήτες»)) που κινούνται στον τριδιάστατο χώρο και R, R_i και R_j τα αντίστοιχα διανύσματα θέσης, ως προς αδρανειακό σύστημα αναφοράς $Oxyz$.



Εικόνα 66: Το πρόβλημα των τριών σωμάτων

Ορίζουμε ως $r_{i,j} = R_{i,j} - R$ τα σχετικά διανύσματα θέσης των «πλανητών» ως προς τον «Ηλιο». Οι εξισώσεις κίνησης δίνονται τότε από τους νόμους του Newton:

$$\begin{aligned} M\ddot{R} &= GMm_i \frac{r_i}{r_i^3} + GMm_j \frac{r_j}{r_j^3} \\ m_i \ddot{R}_i &= -GMm_i \frac{r_i}{r_i^3} + Gm_i m_j \frac{(r_j - r_i)}{r_{ij}^3} \\ m_j \ddot{R}_j &= -GMm_j \frac{r_j}{r_j^3} + Gm_i m_j \frac{(r_i - r_j)}{r_{ij}^3} \end{aligned} \quad (4.93)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη, βρίσκουμε τις εξισώσεις για τα σχετικά διανύσματα θέσης. Το σύστημα εξισώσεων μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\ddot{r}_i = -\nabla(U_i + R_i) \quad (4.94)$$

όπου U_i το δυναμικό Kepler ($\sim 1/r$) για κάθε πλανήτη και R_i η αντίστοιχη παρελκτική συνάρτηση (λόγω της επίδρασης του «άλλου» πλανήτη)

$$R_i = -\frac{Gm_j}{|r_j - r_i|} + Gm_j \frac{r_i r_j}{r_j^3} \quad (4.95)$$

Η παρελκτική συνάρτηση έχει περιοδικό χαρακτήρα αφού, σε πρώτη προσέγγιση, οι πλανήτες θεωρούμε ότι εκτελούν σχεδόν ελλειπτικές (κλειστές) τροχιές. Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις γεωμετρικές σχέσεις μετασχηματισμού που συνδέουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες των πλανητών με τα στοιχεία της τροχιάς τους και να μετασχηματίσουμε αντίστοιχα τις $R_{i,j}$. Όσο για τα e και i μπορούν να θεωρηθούν μικρές ποσότητες, η παρελκτική συνάρτηση μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Fourier, οι συντελεστές της οποίας S , είναι σειρές δυνάμεων των e και i :

$$R_i = -Gm_j \sum_{k_i}^{\infty} S(a, a', e, e', I, I') \cos \varphi_{k_i} \quad (4.96)$$

όπου οι γωνίες φ είναι γραμμικοί συνδυασμοί των γωνιακών στοιχείων της τροχιάς. Αν χρησιμοποιήσουμε μήκη (και όχι ανωμαλίες) τότε, λόγω των συμμετριών του πεδίου βαρύτητας, τα φ έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\varphi = k_1 \lambda + k_2 \lambda' + k_3 \varpi + k_4 \varpi' + k_5 \Omega + k_6 \Omega' \quad (4.97)$$

με τους ακεραίους συντελεστές k_l να ικανοποιούν τους κανόνες του d' *Alembert*, οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι:

$$\sum_{l=1}^6 k_l = 0, \quad k_5 + k_6 = 2\rho \quad (4.98)$$

δηλαδή, οι συνδυασμοί ακεραίων που εμφανίζονται στη σειρά πρέπει να έχουν άθροισμα μηδέν και οι συντελεστές των Ω και Ω' να έχουν άρτιο άθροισμα.

Η σειρά R έχει άπειρους όρους και επομένως οι εξισώσεις Lagrange δεν μπορούν να επιλυθούν, εκτός κι αν οι σειρές που αντιστοιχούν στις παραγώγους της R συγκλίνουν (οπότε παίρνουμε τη λύση σε μορφή συγκλίνουσας σειράς). Αυτό όμως δεν ισχύει στη γενική περίπτωση. Έτσι, αυτό που συνήθως κάνουμε είναι, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες, να επιλέγουμε τους πιο σημαντικούς όρους της R και να θεωρούμε τους υπόλοιπους αμελητέους. Καταλήγουμε λοιπόν σε μια απλή μορφή της

R , η οποία μπορεί να επιλυθεί, δίνοντάς μας τη βασική συμπεριφορά του συστήματος των τριών σωμάτων γι' αυτές τις αρχικές συνθήκες.

Σημειώνουμε ότι, επειδή η R είναι ανάλογη της μάζας του πλανήτη, οι μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς θα είναι επίσης ανάλογες του $m/M \ll 1$. Επομένως, οι *συχνότητες μετάπτωσης* των γωνιών προσανατολισμού Ω και ω θα είναι *πολύ μικρότερες* από τη συχνότητα περιφοράς του πλανήτη γύρω από τον Ήλιο n , που καθορίζεται, πλην μικρών μεταβολών, από το δυναμικό Kepler. Οντως, οι περίοδοι περιφοράς των πλανητών είναι μερικά (ή μερικές δεκάδες) έτη, ενώ οι περίοδοι των μεταπτωτικών κινήσεων είναι από μερικές χιλιάδες μέχρι δεκάδες χιλιάδων ετών.

Η επιλογή κάποιων όρων της R και η απαλοιφή των υπολοίπων ονομάζεται *διαδικασία του μέσου όρου* (averaging). Η βασική αιτιολόγηση έχει ως εξής: κάθε τριγωνομετρικός όρος της R παριστάνει, σε πρώτη προσέγγιση, μια *ταλάντωση* με σταθερή συχνότητα

$$\dot{\varphi} = k_1 \dot{\lambda}_i + k_2 \dot{\lambda}_j + k_3 \dot{\omega}_i + k_4 \dot{\omega}_j + k_5 \dot{\Omega}_i + k_6 \dot{\Omega}_j \approx k_1 n_i + k_2 n_j \quad (4.99)$$

αφού οι συχνότητες μεταβολής των γωνιών προσανατολισμού είναι πολύ μικρότερες από τις συχνότητες περιφοράς των δύο πλανητών. Επομένως, ο αντίστοιχος τριγωνομετρικός όρος περιφοράς μεταβάλλεται «γρήγορα», με ρυθμό ανάλογο της μέσης κίνησης των σωμάτων εκτός και αν οι δύο πλανήτες βρίσκονται σε *συντονισμό*, δηλαδή:

$$k_1 n_1 + k_2 n_2 \approx 0 \quad (4.100)$$

το οποίο, σύμφωνα με τον 3^ο νόμο του Kepler, θα συμβαίνει όταν οι ημιάξονες των τροχιών τους ικανοποιούν τη σχέση:

$$a_1 \approx \left(\frac{|k_1|}{|k_2|} \right)^{2/3} a_2 \quad (4.101)$$

για $a_1 < a_2$. Τότε, η συχνότητα της ταλάντωσης που προκαλεί ο συγκεκριμένος όρος του δυναμικού είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να προκαλεί ημιτονοειδείς μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς με αργό ρυθμό. Όλοι οι υπόλοιποι όροι της R προκαλούν διαταραχές υψηλής συχνότητας που έχουν μέσο όρο μηδέν μέσα στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να εκτελέσουν οι πλανήτες μία περιφορά γύρω από τον Ήλιο, αφού η γωνία φ προλαβαίνει να διαγράψει όλο το διάστημα $[0, 2\pi]$ και επομένως η μέση τιμή του $\cos\varphi$ είναι μηδέν. Αντίθετα, ο όρος του συντονισμού που έχει σχεδόν μηδενική συχνότητα, συνεπάγεται μια μικρή μόνο μεταβολή του αντίστοιχου φ (μέσα σε μια περίοδο) και άρα έχει μέση τιμή διάφορη του μηδενός.

4.1.6.1 Γραμμική Θεωρία Μακροπρόθεσμης (Αένας) Κίνησης

Είναι φανερό ότι, αν οι ημιάξονες των πλανητών δεν ικανοποιούν καμία σχέση συντονισμού (ο λόγος συχνοτήτων είναι άρρητος) τότε μπορούμε να απαλείψουμε από την R όλους τους γραμμικούς συνδυασμούς των φ που περιέχουν τα λ_1 και λ_2 . Έτσι, οι μόνοι τριγωνομετρικοί όροι που διατηρούνται στην $\langle R \rangle$ είναι οι λεγόμενοι *αιώνιοι όροι* (secular terms) που περιέχουν γραμμικούς συνδυασμούς των γωνιών προσανατολισμού. Αν κρατήσουμε μόνο τους όρους μέχρι 2ης τάξης ως προς τα e και i , η παρελκτική συνάρτηση παίρνει τη μορφή:

$$\langle R_i \rangle = G \frac{m_j}{M} n a_i^2 \left[A_{i1} e_i^2 + A_{i2} e_1 e_2 \cos(\varpi_1 - \varpi_2) + B_{i1} I_i^2 + B_{i2} I_1 I_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \right] \quad (4.102)$$

όπου οι συντελεστές A και B εξαρτώνται από το λόγο των ημιαξόνων των δύο σωμάτων. Επειδή η $\langle R \rangle$ δεν περιέχει τα λ , η πρώτη από τις εξισώσεις του Lagrange δίνει:

$$\frac{da}{dt} = 0 \Rightarrow a_i = \text{σταθερό} \quad (4.103)$$

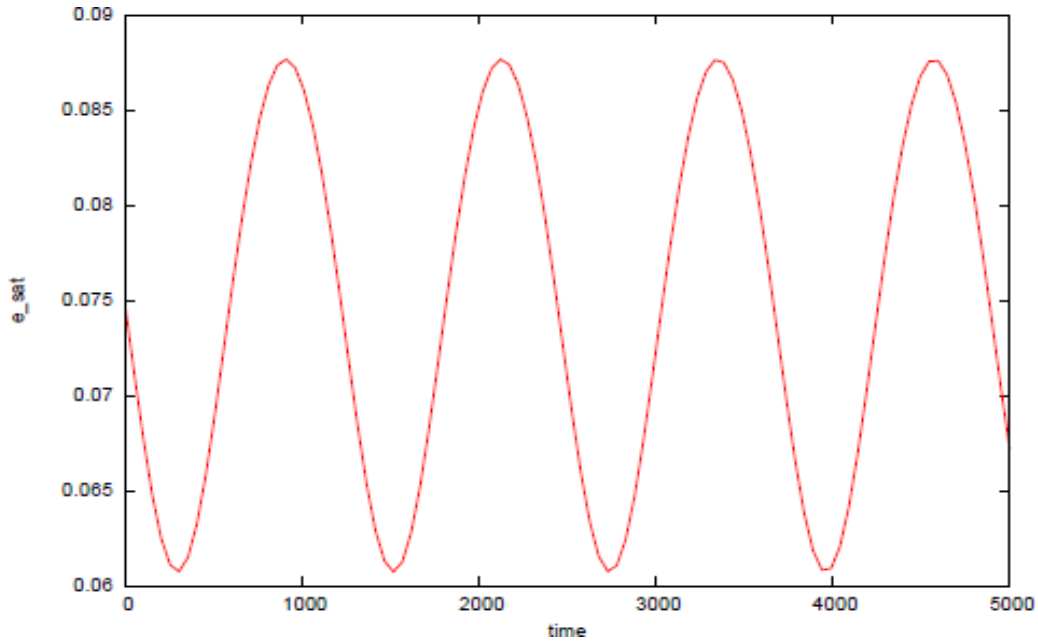
Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του θεωρήματος των Laplace – Lagrange, σύμφωνα με το οποίο *οι μεγάλοι ημιάξονες των πλανητικών τροχιών είναι σταθεροί*. Στη γλώσσα της Αναλυτικής Μηχανικής, οι γενικευμένες συντεταγμένες λ_1 και λ_2 είναι αγνοήσιμες, οπότε οι συζυγείς τους ορμές (που έχουν μέτρο ανάλογο του $a^{1/2}$) είναι ολοκληρώματα της κίνησης.

Φυσικά, αυτό το θεώρημα ισχύει μόνο αν υποθέσουμε ότι η παραπάνω προσεγγιστική μορφή της $\langle R \rangle$ είναι αρκετή για να περιγράψει τη «σωστή» κίνηση, δηλαδή ότι η σειρά στην οποία έχουμε αναπτύξει τη συνολική R συγκλίνει για κάθε t , κάτι που ξέρουμε ότι δεν είναι ακριβές.

Για τα (e_i, ω_i) και (i_i, Ω_i) οι εξισώσεις Lagrange μπορούν να επιλυθούν εύκολα σε αυτήν την προσέγγιση. Αν ορίσουμε τις ποσότητες

$$\begin{aligned} h &= e \cos \varpi, & p &= i \cos \Omega \\ k &= e \sin \varpi, & q &= i \sin \Omega \end{aligned} \quad (4.104)$$

τότε οι εξισώσεις Lagrange μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων ως προς αυτές, η λύση του οποίου δίνει γραμμικές ταλαντώσεις με ιδιοσυχνότητες g_i (για το ζεύγος e, ω) και s_i (για το ζεύγος i, Ω) αντίστοιχα (βλέπε παρακάτω το αντίστοιχο διάγραμμα για την εκκεντρότητα του Κρόνου). Σημειώνουμε ότι η θεωρία είναι άμεσα επεκτάσιμη για συστήματα με περισσότερους πλανήτες. Έτσι τελικά, η *γραμμική θεωρία αέναης κίνησης* των Laplace – Lagrange προβλέπει (α) σταθερούς ημιάξονες και (β) μικρού πλάτους και χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις των (e, ω) και (i, Ω) , δηλαδή απόλυτη ευστάθεια του πλανητικού συστήματος. Οι τροχιές των πλανητών μοιάζουν με ελαφρά διαταραγμένες ελλείψεις, των οποίων ο προσανατολισμός στο διάστημα και η ελλειπτικότητα αλλάζει με περιοδικό τρόπο και πολύ αργό ρυθμό.



Εικόνα 67: Η εκκεντρότητα του Κρόνου, σαν συνάρτηση του χρόνου

4.1.6.2 Κίνηση σε Συντονισμό

Αν δύο πλανήτες (ή ένας πλανήτης κι ένας αστεροειδής) ικανοποιούν μια συνθήκη συντονισμού, τότε ο «ισχυρότερος» όρος της R είναι αυτός που αντιστοιχεί στο αντίστοιχο φ . Για παράδειγμα, για έναν αστεροειδή που βρίσκεται σε συντονισμό 2:1 με τον πλανήτη Δία ($a \sim 3.3$ AU), ο κύριος όρος του παρελκτικού δυναμικού είναι:

$$\langle R \rangle = C(a) e \cos(\lambda - 2\lambda_{\Delta} + \varpi) \quad (4.105)$$

όπου, για λόγους απλότητας, θεωρούμε συνεπίπεδες τροχιές και το Δία να ακολουθεί κυκλική τροχιά. Αγνοώντας του υπόλοιπους όρους της R , βρίσκουμε ότι οι εξισώσεις Lagrange δίνουν:

$$\frac{da}{dt} \sim 2na^2 e \sin \varphi \quad (4.106)$$

$$\frac{de}{dt} \sim -an \sin \varphi$$

απ' όπου προκύπτει:

$$\frac{da}{de} = -2ae \Rightarrow e^2 = e_0^2 - \ln(a/a_0) \quad (4.107)$$

δηλαδή, οι μεταβολές των a και e είναι συζευγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε η ποσότητα

$$J = e^2 + \ln(a) \quad (4.108)$$

να αποτελεί ολοκλήρωμα της κίνησης. Επομένως, μια αύξηση του a συνεπάγεται μείωση του e και αντίθετα. Σε αντίθεση με τη γραμμική θεωρία αέναης κίνησης, ο ημιάξονας υφίσταται μεταβολές, αλλά αυτές είναι περιοδικές σε πρώτη προσέγγιση.

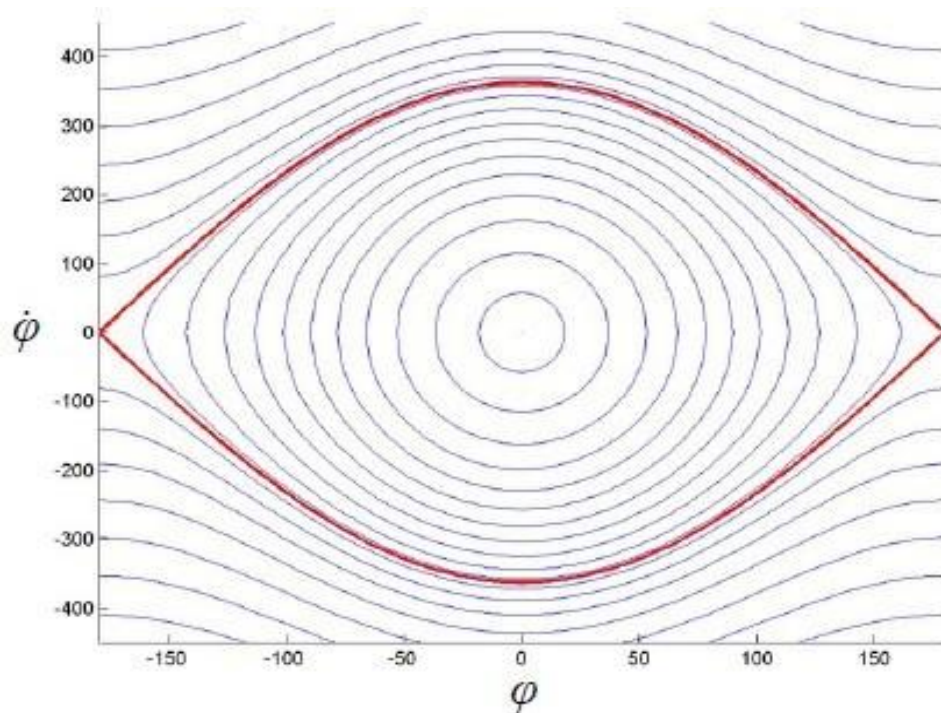
Αν χρησιμοποιήσουμε τον 3ο νόμο του Kepler για να γράψουμε την 1η εξίσωση του Lagrange ως προς το dn/dt (αντί για το da/dt) παίρνουμε:

$$\frac{dn}{dt} = -3n^2 a \frac{\partial R}{\partial \lambda} \quad (4.109)$$

και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\dot{\phi} = n \rightarrow \ddot{\phi} = \dot{n}$, παίρνουμε τη διαφορική εξίσωση:

$$\ddot{\phi} + \beta^2(e) \sin \phi = 0 \quad (4.110)$$

η οποία είναι η εξίσωση κίνησης ενός εκκρεμούς, με μεταβλητό πλάτος που εξαρτάται από το e . Επειδή η ταλάντωση δεν αλλάζει τη μέση τιμή του a (άρα και του e), η παραπάνω εξίσωση δίνει ένα διάγραμμα φάσης παρόμοιο με αυτό του απλού εκκρεμούς όπου οι τροχιές διαχωρίζονται σε *λικνίσεις* (κλειστές τροχιές, δηλ. τοπολογικοί κύκλοι, γύρω από το ευσταθές σημείο ισορροπίας του συντονισμού, $\phi_0 = 0$) με μικρό πλάτος μεταβολής της ϕ και *περιστροφές*, όπου η ϕ διατρέχει όλο το διάστημα $[0, 2\pi]$. Η διαχωριστική καμπύλη (separatrix) διέρχεται από το ασταθές σημείο ισορροπίας του εκκρεμούς ($\phi_0 = \pi$).



Εικόνα 68: Διάγραμμα φάσης του απλού εκκρεμούς

Επομένως, σε πρώτη προσέγγιση, η κίνηση σε συντονισμό προκαλεί περιοδικές, συζευγμένες ταλαντώσεις των a και e , με σταθερές μέσες τιμές και ομαλές λικνίσεις / περιστροφές της ϕ . Η βασική διαφορά με την γραμμική αέναη κίνηση – εκτός από το γεγονός ότι η τιμή του μεγάλου ημιάξονα ταλαντώνεται – είναι ότι οι μεταβολές αυτές συμβαίνουν σε χρονικά διαστήματα ανάλογα του $2\pi/\dot{\phi}$, που αντιστοιχούν σε περιόδους μερικών εκατοντάδων ετών (και όχι δεκάδες χιλιάδων ετών).

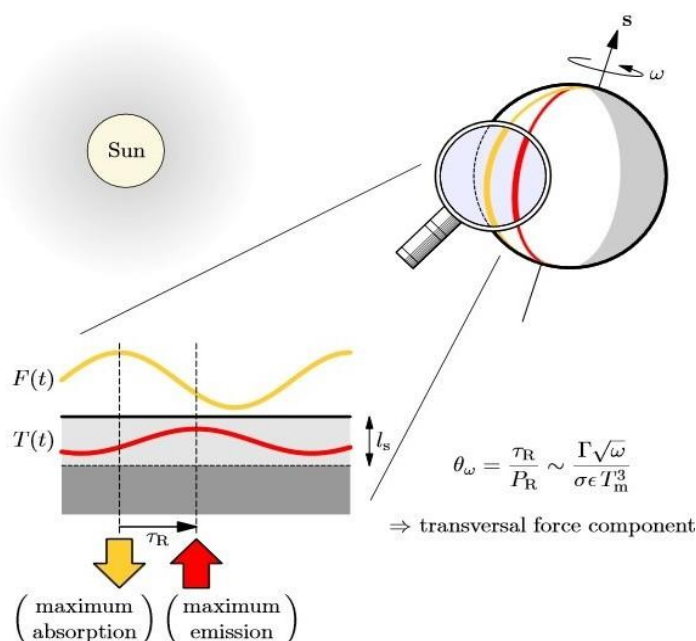
4.1.7 Μη Συντηρητικές Διαταραχές

Οι μεγάλοι πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος, όπως και αυτοί στα εξωηλιακά συστήματα, κινούνται ουσιαστικά μόνο υπό την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων. Οι μόνες παρατηρούμενες μεταβολές της κινητικής κατάστασής τους έχουν να κάνουν

με τη μεταβολή της ιδιοπεριστροφής τους, που προκαλείται από το φαινόμενο των παλιρροιών, στην περίπτωση βέβαια που έχουν αρκετά μεγάλους δορυφόρους.

Αντίθετα, τα μικρά αντικείμενα του ηλιακού συστήματος (αστεροειδείς και κομήτες), δέχονται σημαντικές μη συντηρητικές διαταραχές που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ακτινοβολία του Ήλιου. Η κίνηση των κομητών επηρεάζεται σημαντικά από τους πίδακες αερίου και σκόνης που εκτοξεύουν στο διάστημα, καθώς αυτοί αναπτύσσουν κομητική δραστηριότητα, περνώντας από το περιήλιο της τροχιάς τους. Οι κομήτες όμως, είναι βραχύβιοι από δυναμικής και φυσικής άποψης, δεδομένου ότι (α) οι τροχιές τους είναι εξαιρετικά ασταθείς και (β) μετά από αρκετές διαβάσεις από το περιήλιο της τροχιάς τους η δραστηριότητά τους φθίνει σημαντικά, καθώς χάνουν τα επιφανειακά στρώματα πτητικών υλικών και η ηλιακή ενέργεια που απορροφούν δεν είναι ικανή να εξαχνώσει τα βαθύτερα στρώματα. Έτσι, μετατρέπονται σε ανενεργούς (ή αδρανείς) κομήτες (dormant comets). Η επίδραση λοιπόν, των μη συντηρητικών δυνάμεων δεν είναι καθοριστική για τη δυναμική εξέλιξή τους και δεν έχει ευρύτερο αντίκτυπο στη γενικότερη δυναμική εξέλιξη του ηλιακού συστήματος.

Η κύρια μη συντηρητική διαταραχή που ασκείται στους αστεροειδείς είναι η δύναμη που οφείλεται στο λεγόμενο φαινόμενο *Yarkovsky*. Η δύναμη αυτή οφείλεται στη διαφορά κατεύθυνσης μεταξύ της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας, λόγω της ιδιοπεριστροφής του αστεροειδούς και της πεπερασμένης θερμικής αγωγιμότητας κάθε φυσικού αντικειμένου. Επειδή η ακτινοβολία, σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Μάξγουελ αλλά και την κβαντική θεωρία των Planck – Einstein, έχει ορμή και η μεταβολή της ορμής ισοδυναμεί με δύναμη (σύμφωνα με το δεύτερο αξίωμα του Νεύτωνα), ο αστεροειδής δέχεται μία δύναμη από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και μία άλλη δύναμη από την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 69: Ερμηνεία του φαινομένου Yarkovsky

Συγκεκριμένα, κάθε αστεροειδής δέχεται τη μέγιστη ακτινοβολία από τον Ήλιο κατά τη *μεσημβρινή* διεύθυνση, δηλαδή την ευθεία Ήλιος – αστεροειδής. Τα φωτόνια που προσπίπτουν στην επιφάνεια του αστεροειδούς μεταφέρουν την ορμή τους σε

αυτόν, ασκώντας έτσι μια δύναμη κατά τη διεύθυνση της μέγιστης απορρόφησης. Η θερμότητα που ο αστεροειδής απορροφά, διαδίδεται στο σώμα του και στη συνέχεια επανεκπέμπεται στο διάστημα. Όμως, αυτό δε συμβαίνει ακαριαία, αφού κάθε σώμα έχει πεπερασμένη θερμική αγωγιμότητα, κι έτσι η διάχυση της θερμότητας (που προσπαθεί να αποκαταστήσει τη θερμοδυναμική ισορροπία) παίρνει κάποιο χρόνο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο αστεροειδής, που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, «στρίβει», με αποτέλεσμα η ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του σώματος και το «θερμό σημείο» της επιφάνειας (hot spot) να σχηματίζει γωνία διάφορη του μηδενός ως προς τη (νέα) μεσημβρινή διεύθυνση. Η απορροφούμενη ακτινοβολία επανεκπέμπεται προς τη νέα κατεύθυνση. Επομένως, η συνισταμένη της μεταβολής της ορμής (ώθηση) που δέχεται ο αστεροειδής έχει και εφαπτομενική (και όχι μόνο ακτινική) συνιστώσα. Αυτή η εφαπτομενική συνιστώσα της ώθησης μεταβάλλει την ενέργεια του κομήτη και συνακόλουθα, τον μεγάλο ημιάξονα της τροχιάς του.

Είναι προφανές ότι η μεταβολή σχετίζεται με την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής. Το a αυξάνει όταν ο αστεροειδής περιστρέφεται κατά την ορθή φορά (spin “up”), ενώ μειώνεται όταν περιστρέφεται ανάδρομα (spin “down”). Σημειώνουμε ότι, αν ο αστεροειδής έχει ακανόνιστο σχήμα, τότε η ώθηση προκαλεί ροπή, η οποία μεταβάλλει την περιστροφική του κίνηση (φαινόμενο YORP). Η θεωρητική ανάλυση του φαινομένου Yarkovsky δείχνει ότι η ώθηση είναι ασθενής αλλά υπολογίσιμη για σώματα με διάμετρο $D < 10$ km. Η τιμή της μεταβολής \dot{a}_y που προκαλείται εξαρτάται και από τις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και της περιόδου περιστροφής του αστεροειδούς. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι, κατά μέσον όρο, ο ρυθμός μεταβολής είναι ίσος προς:

$$\dot{a}_y = \frac{2,7 \times 10^{-4}}{D} \text{ (AU/My)} \quad (4.111)$$

με το D να μετριέται σε km. Μπορεί η τιμή του \dot{a}_y να φαίνεται μικρή, δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε ότι η ηλικία του Ηλιακού Συστήματος είναι περίπου 4.6 Gy. Ένας αστεροειδής με $D = 1$ km θα μπορούσε να διανύσει απόσταση ~ 1.2 AU, δηλαδή πάνω από το μισό της κύριας ζώνης, κατά τη διάρκεια της ζωής του συστήματος. Επομένως, το φαινόμενο είναι σημαντικό και μας επιτρέπει να κατανοήσουμε πώς είναι δυνατό να υπάρχουν ακόμη και σήμερα παραγίνοι αστεροειδείς, τη στιγμή που οι βασικές πηγές (οι κύριοι συντονισμοί με τον Δία) είναι σχεδόν άδειοι (διάκενα Kirkwood, Kirkwood gaps).

4.1.8 Επίδραση Παλιρροιών

Η παλιρροιογόνος δύναμη οφείλεται στη διαφορά της βαρυτικής δύναμης που ασκεί ένα σώμα (π.χ. ένας δορυφόρος μάζας m) σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας ενός άλλου (πλανήτη, μάζας M), λόγω του ότι τα σώματα δεν είναι σημειακά. Αν ο πλανήτης έχει φυσική ακτίνα R και ο δορυφόρος κινείται σε κυκλική τροχιά με ακτίνα a , η διαφορά αυτή (ανά μονάδα μάζας) είναι:

$$\Delta F = \frac{Gm}{(a-R)^2} - \frac{Gm}{a^2} \cong \frac{2GmR}{a^3} \quad (4.112)$$

Το *σχήμα ισορροπίας* του πλανήτη είναι η λύση της αλγεβρικής εξίσωσης $f(x, y, z) = 0$ που προκύπτει από την απαίτηση η συνολική δύναμη στην επιφάνεια

του πλανήτη (στο μη αδρανειακό σύστημα του κέντρου του πλανήτη) να είναι ίση με μηδέν.

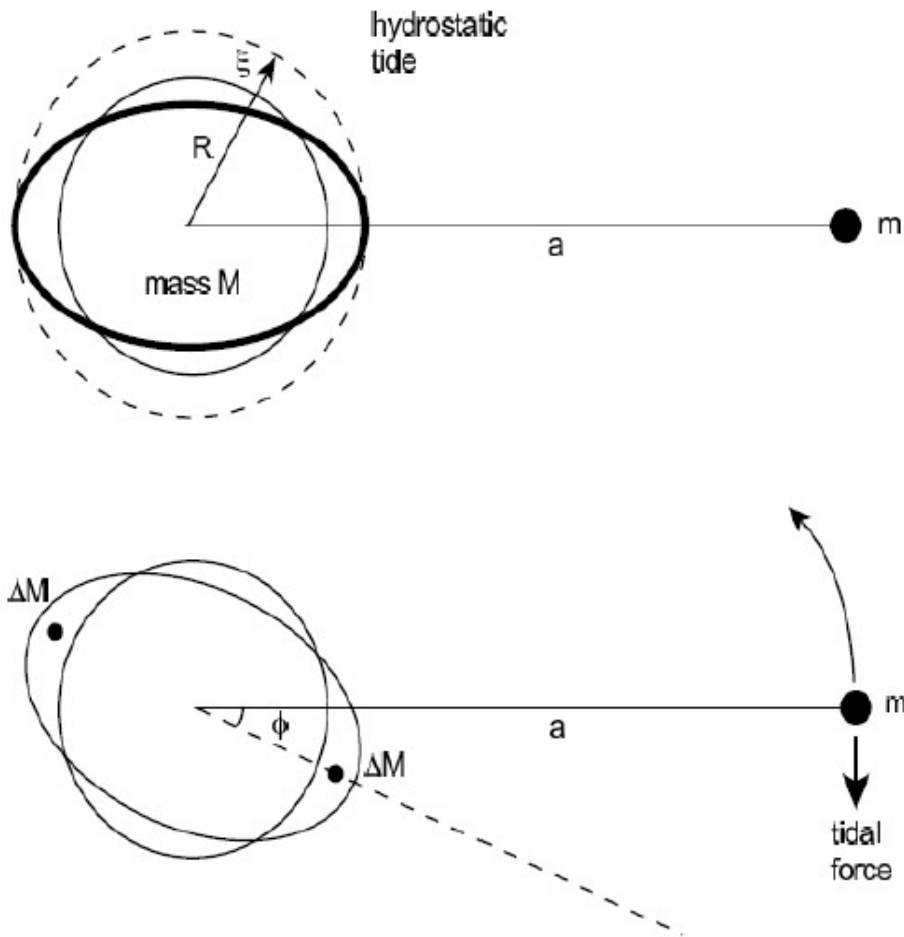
Το σχήμα ισορροπίας του πλανήτη είναι ελλειψοειδές, με το μέγιστο ύψος ξ , της υδροστατικής παλίρροιας να δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\xi}{R} \sim \left(\frac{m}{M}\right)\left(\frac{R}{a}\right)^3 \quad (4.113)$$

η οποία προκύπτει αν υπολογίσουμε το έργο που εκτελεί η δύναμη της παλίρροιας προκειμένου να ανυψώσει τη μάζα ΔM , ενεργώντας σε διεύθυνση αντίθετη προς τη βαρύτητα του πλανήτη. Η μάζα του εξογκώματος είναι της τάξης του:

$$\Delta M = 4\pi\rho R^2\xi \sim \left(\frac{R}{a}\right)^3 m \quad (4.114)$$

Το βασικό σημείο που χρήζει προσοχής είναι ότι, αν λάβουμε υπόψη μας την περιφορά του δορυφόρου γύρω από τον πλανήτη, τότε η παλίρροια είναι ουσιαστικά μια περιοδική διαταραχή και το σχήμα ισορροπίας του πλανήτη (και άρα η διεύθυνση του εξογκώματος) θα είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης του πλανήτη σε αυτήν τη διαταραχή. Αν η συχνότητα περιφοράς του δορυφόρου n , δεν είναι ίση με τη συχνότητα περιστροφής του πλανήτη Ω , τότε η διεύθυνση του εξογκώματος θα καθορίζεται από τη διαφορά συχνοτήτων και από το μέγεθος της τριβής που ασκείται ανάμεσα σε γειτονικά στρώματα ύλης με διαφορετική πυκνότητα (π.χ. ωκεανός και στερεός πυθμένας). Οι τριβές αναγκάζουν τον πλανήτη να αντιδρά με υστέρηση φάσης ως προς την εξαναγκασμένη ταλάντωση, έτσι ώστε το μέγιστο του εξογκώματος να *προπορεύεται* της επιβατικής ακτίνας του δορυφόρου (για $n > \Omega$), όπως στην περίπτωση του συστήματος Γη – Σελήνη, ή να *έπεται* (για $n < \Omega$) κατά γωνία φ .



Εικόνα 70: Επιβράδυνση της περιστροφής ενός πλανήτη λόγω του φαινομένου των παλιρροιών

Επομένως, επειδή ο άξονας συμμετρίας του πλανήτη σχηματίζει γωνία ϕ με τη διεύθυνση πλανήτη – δορυφόρου, η μάζα του εξογκώματος (που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συγκεντρώνεται σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία επάνω στον άξονα συμμετρίας) ασκεί ροπή στο δορυφόρο. Αυτό συνεπάγεται τη μεταβολή του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς του δορυφόρου που μπορεί να αποδειχθεί ότι δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} \sim M^{-1/2} \frac{mR^5}{Q} a^{-13/2} \quad (4.115)$$

όπου $Q \sim 1/\phi$ είναι ο παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας (ή παράγοντας ποιότητας) λόγω τριβών στο εσωτερικό του πλανήτη. Η τιμή του Q χαρακτηρίζει την εσωτερική δομή του πλανήτη. Έτσι, αν καταφέρουμε να παρατηρήσουμε με ακρίβεια τις μικρομεταβολές που υφίστανται οι τροχιές των δορυφόρων των πλανητών (ή ένα σκάφος που εκτελεί διαστημική αποστολή γύρω από κάποιον πλανήτη) μπορούμε να υπολογίσουμε το Q και να πάρουμε πληροφορίες για την εσωτερική δομή του.

Σημειώνουμε ότι, όπως ο δορυφόρος εξασκεί παλιρροιογόνες δυνάμεις στον πλανήτη, αντίστοιχα και ο πλανήτης ασκεί παλιρροιογόνο δύναμη στον δορυφόρο. Αυτή η δύναμη εξαναγκάζει τα εσωτερικά στρώματα του δορυφόρου να «τρίβονται» μεταξύ τους και να θερμαίνονται, και μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ηφαιστειακής δραστηριότητας, όπως στην περίπτωση της Ιούς ή του Εγκέλαδου. Επίσης, οι παλιρροιογόνος ροπή μεταβάλλει τη συχνότητα περιστροφής του πλανήτη, τείνοντας να εξισώσουν τις δύο βασικές συχνότητες της κίνησης του συστήματος των

δύο σωμάτων, n και Ω . Η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του πλανήτη μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$\dot{L} = |r \times F| = I\dot{\Omega} + \frac{Mm}{M+m} \frac{d(na^2)}{dt} \quad (4.116)$$

που δίνει το ρυθμό μεταβολής της στροφορμής του, όπου L η στροφορμή, I η ροπή αδρανείας του πλανήτη και (M,m) οι μάζες του πλανήτη και του δορυφόρου. Χρησιμοποιώντας την έκφραση του da/dt που είδαμε προηγουμένως, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\dot{\Omega} \sim \frac{m}{MQ} \left(\frac{R}{a}\right)^3 n^2 \quad (4.117)$$

4.2 Εφαρμογές Ουράνιας Μηχανικής – Τεχνητοί Δορυφόροι

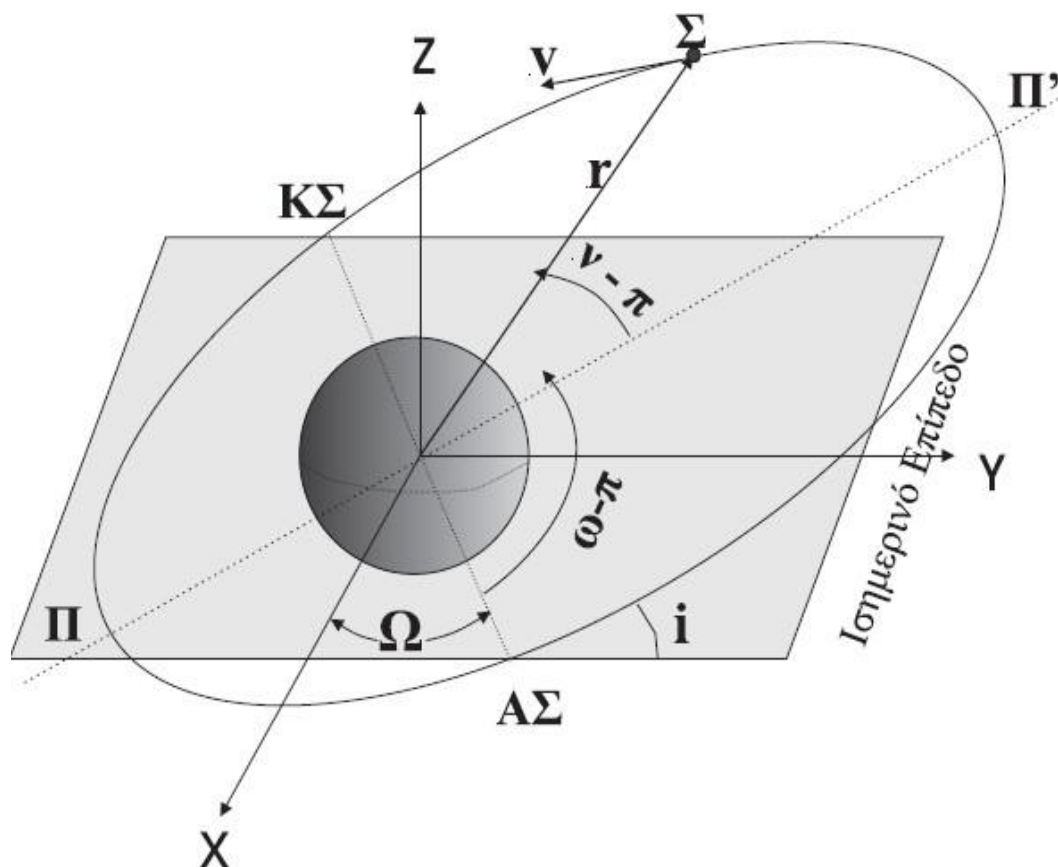
Οι τροχιές των τεχνητών δορυφόρων της Γης δεν είναι τυχαίες. Η επιλογή της τροχιάς κάθε δορυφόρου καθορίζεται με βάση τις ιδιαιτερότητες της αποστολής του. Για παράδειγμα, ανάλογα με τις ανάγκες μας, οι δορυφόροι μπορεί να τεθούν σε ισημερινές, πολικές, ή ενδιάμεσης κλίσης τροχιές. Η τοποθέτηση του δορυφόρου στην τελική του τροχιά γίνεται σε διάφορα στάδια. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της ελλειπτικής κίνησης, μπορούμε να σχεδιάσουμε τα διαδοχικά βήματα *μετάθεσης* της τροχιάς, πάντα με στόχο την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας. Βέβαια, ακόμη και μετά την τοποθέτηση του δορυφόρου στην τελική του τροχιά, θα πρέπει να έχει απομείνει ικανή ποσότητα καυσίμου, ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν μικρές διορθώσεις στην τροχιά, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της αποστολής (συνήθως ~5 – 10 χρόνια). Οι διορθώσεις αυτές είναι απαραίτητες καθώς (α) ασθενείς δυνάμεις που ασκούνται στον δορυφόρο οδηγούν στην αργή απομάκρυνσή του από την επιθυμητή τροχιά και (β) πιθανές συγκρούσεις με «διαστημικά σκουπίδια» (space debris) ή μετεωροειδή, οι οποίες δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν, μπορεί να καταστρέψουν κάποια από τα όργανα του δορυφόρου.

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε το γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων, βάσει του οποίου κατηγοριοποιούμε τις διάφορες οικογένειες τεχνητών δορυφόρων, περιγράφοντας επίσης συνοπτικά τη διαδικασία παρακολούθησης της τροχιάς ενός δορυφόρου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της αποστολής του. Στη συνέχεια, με βάση την ανάλυση της ελλειπτικής κίνησης που προηγήθηκε, θα δείξουμε πώς είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την ώθηση Δu που πρέπει να ασκήσουμε στο δορυφόρο, ώστε να επιφέρουμε συγκεκριμένη διόρθωση ή μετάθεση της τροχιάς του, παρουσιάζοντας τις βασικότερες των περιπτώσεων. Ταυτόχρονα, θα αποδείξουμε τη βασική εξίσωση με την οποία υπολογίζουμε την κατανάλωσης ενέργειας/καυσίμου (*εξίσωση πυραύλου*) και θα δώσουμε παραδείγματα υπολογισμού του ενεργειακού κόστους μιας αποστολής, κάνοντας ιδιαίτερη αναφορά στην τοποθέτηση δορυφόρου σε γεωστατική τροχιά.

4.2.1 Η Τροχιά στο Διάστημα

Σε προηγούμενες παραγράφους μελετήσαμε τις ιδιότητες της ελλειπτικής κίνησης στο επίπεδο της τροχιάς. Όμως, το επίπεδο της τροχιάς δύο διαφορετικών δορυφόρων δεν είναι συνήθως το ίδιο, όπως συμβαίνει και για τους πλανήτες και τα χιλιάδες μικρά σώματα του Ηλιακού Συστήματος. Αν θέλουμε να γνωρίζουμε τον ακριβή

προσανατολισμό της ελλειπτικής τροχιάς του δορυφόρου στο διάστημα, θα πρέπει να ορίσουμε (σε πλήρη αναλογία με τους πλανήτες, αστεροειδείς κλπ) ένα τριδιάστατο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς (κατά προσέγγιση αδρανειακό), ως προς το οποίο ορίζουμε τα αντίστοιχα στοιχεία της τροχιάς.



Εικόνα 71: Γεωμετρία της τροχιάς ενός τεχνητού δορυφόρου της Γης

Για κίνηση γύρω από τη Γη, το σύστημα αναφοράς είναι προφανώς γεωκεντρικό, με το επίπεδο xy να ταυτίζεται με τον ισημερινό της Γης και τον άξονα Oz να ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της Γης. Σε αυτό το σύστημα αναφοράς, ο προσανατολισμός της ελλειπτικής τροχιάς του δορυφόρου στο χώρο καθορίζεται από τις γωνίες i , Ω και ω , όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα, οι οποίες έχουν την ίδια φυσική σημασία με τις αντίστοιχες γωνίες προσανατολισμού για τους πλανήτες. Το σημείο τομής της έλλειψης με το επίπεδο του Ισημερινού είναι ο αναβιβάζων σύνδεσμος (ΑΣ) της τροχιάς και η γωνία που σχηματίζει η γραμμή των συνδέσμων με τον άξονα Ox ονομάζεται *μήκος του αναβιβάζοντος συνδέσμου* Ω . Στο επίπεδο της τροχιάς, η γωνία που σχηματίζει η γραμμή των απιδών με τη γραμμή των συνδέσμων ορίζει τη γωνία (όρισμα) *του περιγείου*, ω . Η γωνία που σχηματίζει η επιβατική ακτίνα του κινητού με τη γραμμή των απιδών είναι η *αληθής ανωμαλία*, ν . Έτσι, η θέση του δορυφόρου ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς καθορίζεται πλήρως από το σύνολο των έξι στοιχείων της τροχιάς, $(a, e, i, \Omega, \omega, \nu)$. Αντί της ν χρησιμοποιούμε συνήθως τη μέση ανωμαλία, M (ή l). Προφανώς όλα τα στοιχεία της τροχιάς είναι σταθερά, αν αγνοήσουμε τις πιθανές διαταραχές, εκτός από την ανωμαλία του δορυφόρου.

Σημειώνουμε ότι, εκτός του προαναφερθέντος αδρανειακού συστήματος αναφοράς, χρησιμοποιείται επίσης το γεωκεντρικό περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, το οποίο περιστρέφεται γύρω από το αδρανειακό σύστημα με γωνιακή

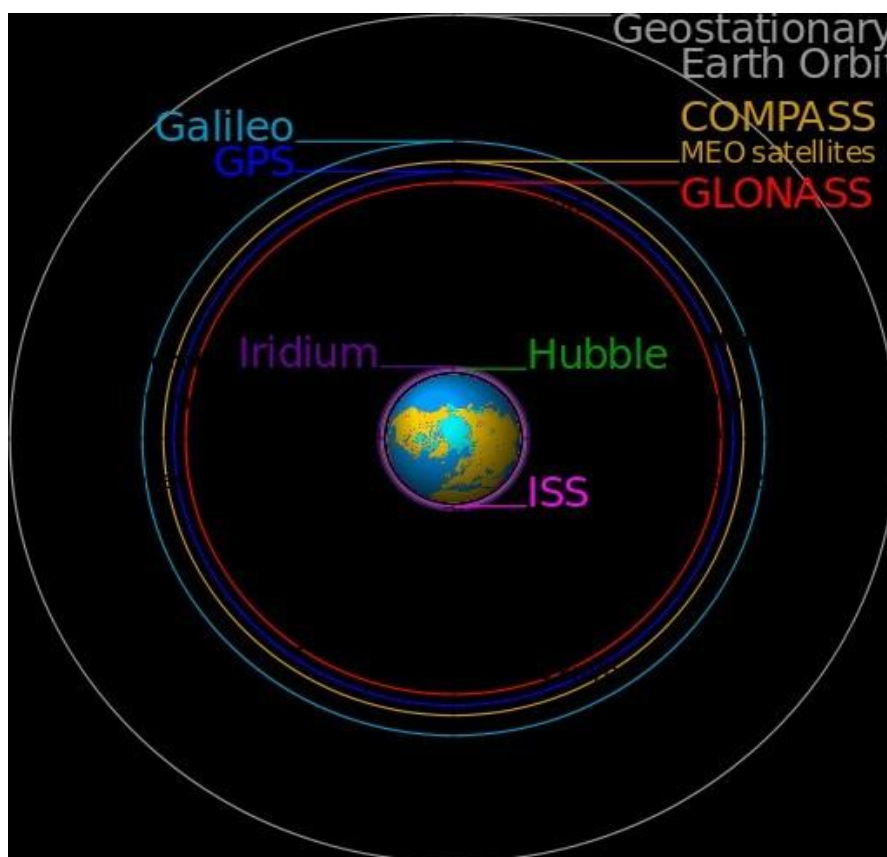
ταχύτητα σταθερή και ίση με αυτήν της Γης. Στο περιστρεφόμενο σύστημα, ο αναβιβάζων σύνδεσμος της τροχιάς έχει μήκος $\Omega' = \Omega - \omega_{Γ_{ης}} t$, όπου $\omega_{Γ_{ης}}$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης και t ο αστρικός χρόνος.

4.2.2 Τροχιακή Κατανομή των Δορυφόρων

Η πλειοψηφία των τεχνητών δορυφόρων της Γης ακολουθεί τροχιές χαμηλού ύψους,

$$H_i = r_i - R_{Γ_{ης}} \quad (4.118)$$

όπου $R_{Γ_{ης}}$ η ακτίνα της Γης και το σύμβολο i αντικαθίσταται από τα p ή a αντίστοιχα για το περίγειο και το απόγειο της τροχιάς. Οι τροχιές χαμηλού ύψους ονομάζονται τροχιές LEO (Low Earth Orbits) και χαρακτηρίζονται από τον μεγάλο αριθμό περιφορών περί την Γη που εκτελεί ο δορυφόρος κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (10 – 16 περιφορές). Σημειώνουμε ότι οι δορυφόροι σε τροχιές LEO δέχονται την επίδραση της αεροδυναμικής τριβής, λόγω του ότι βρίσκονται κοντά στην ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης. Εκτός από τους «απλούς» δορυφόρους, τροχιές τύπου LEO ακολουθούν (α) ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station, ISS), με $H = 360$ km και (β) το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble (HST), με $H = 500$ km.



Εικόνα 72: Θέση ορισμένων χαρακτηριστικών τεχνητών δορυφόρων της Γης. Το «σμήνος» των δορυφόρων Iridium αποτελείται από 66 δορυφόρους και εξυπηρετεί τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς

Ο ISS αποτελεί ένα από τα κορυφαία δείγματα τεχνολογικής ανάπτυξης του ανθρώπου, καθώς είναι το μεγαλύτερο (υπό κατασκευή) διεθνές εργαστήριο στο

διάστημα. Αντίστοιχα, το HST είναι ίσως το πιο επιτυχημένο οπτικό τηλεσκόπιο στην ιστορία της Αστρονομίας, έχοντας οδηγήσει σε πολύ σημαντικά ερευνητικά αποτελέσματα την τελευταία δεκαετία.

Περίπου το 15% των δορυφόρων ακολουθούν τροχιές μεγάλου ύψους, έτσι ώστε να εκτελούν μία ή δύο περιφορές της Γης ανά ημέρα. Οι τροχιές αυτές ονομάζονται επομένως *γεωσύγχρονες* (GEO) και *ημισύγχρονες*, αντίστοιχα. Οι τροχιές τύπου GEO των οποίων το επίπεδο κίνησης σχεδόν ταυτίζεται με τον ισημερινό της Γης ονομάζονται *γεωστατικές* (geostationary), με τον δορυφόρο να βρίσκεται διαρκώς πάνω από έναν συγκεκριμένο τόπο του ισημερινού της Γης. Οι τροχιές ενδιάμεσου (medium) ύψους (MEO) είναι λίγες, αλλά εξαιρετικά σημαντικές για την ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς πρόκειται κυρίως για τους *αστερισμούς δορυφόρων* των συστημάτων προσδιορισμού θέσης GPS (των Η.Π.Α.), Galileo (της Ε.Ε.) και GLONASS (της Ρωσίας).

Η μεγάλη πλειοψηφία των δορυφορικών τροχιών είναι σχεδόν κυκλικές. Αξιοσημείωτη εξαίρεση αποτελούν οι τροχιές τύπου Molniya και Tundra, των οποίων οι εκκεντρότητες φτάνουν μέχρι και την τιμή $e = 0,8$. Οι τροχιές αυτού του τύπου (περίπου 15% του συνόλου) ανακαλύφθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 στην τέως Σοβιετική Ένωση. Πρόκειται για ειδική κατηγορία ημισύγχρονων και γεωσύγχρονων αντίστοιχα τροχιών που ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από σταθερή κλίση $i = 63^\circ.4$. Οι τροχιές αυτές έχουν την ιδιότητα να διατηρούν το απόγειό τους σταθερά πάνω από συγκεκριμένο τόπο, έχοντας αντισταθμίσει τις διαταραχές που προκαλεί το ισημερινό εξόγκωμα της Γης. Η ιδιότητά τους αυτή τις καθιστά ιδανικές για τηλεπικοινωνιακή χρήση από τόπους μεγάλου γεωγραφικού πλάτους, όπως η τέως Σοβιετική Ένωση. Περίπου οι μισές γεωσύγχρονες και ημισύγχρονες τροχιές είναι τύπου Molniya και Tundra, ενώ οι υπόλοιπες είναι ισημερινές ή πολικές ($i \sim 90^\circ$).

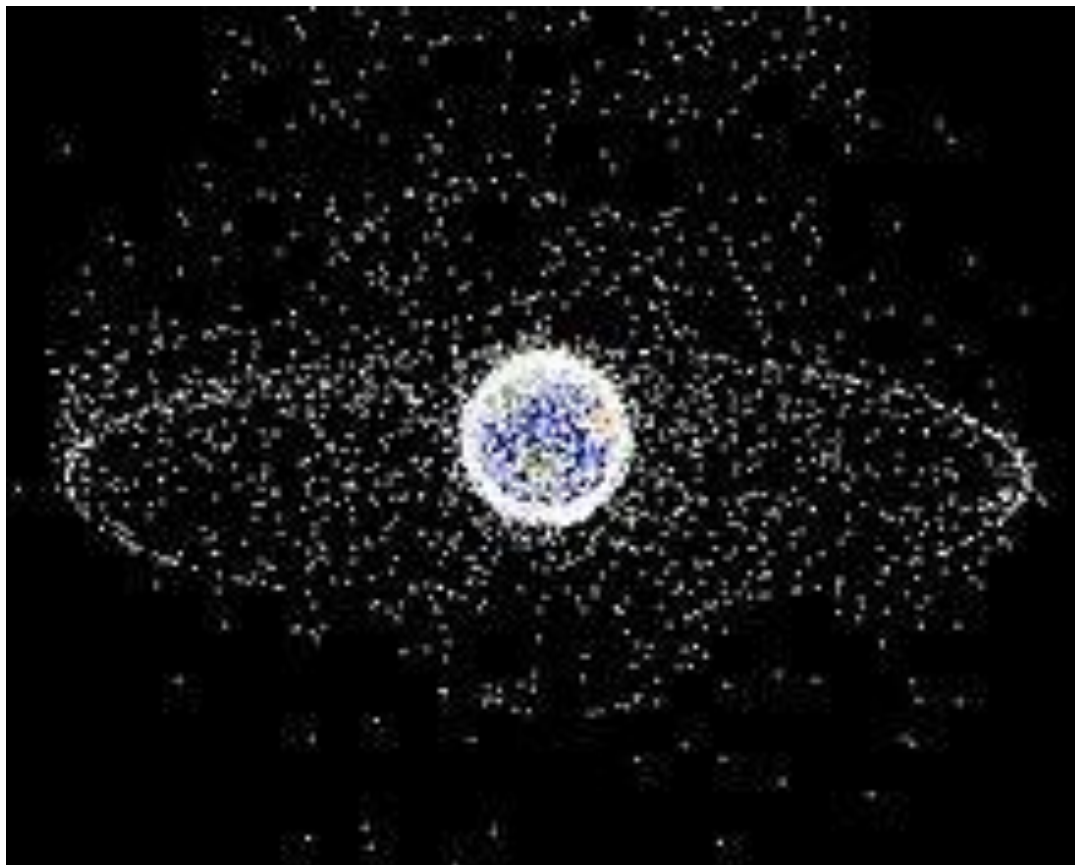
Μόλις το 10% των δορυφόρων ακολουθούν σχεδόν ισημερινές τροχιές ($i < 15^\circ$), στην πλειοψηφία τους κυκλικές τροχιές τύπου LEO. Οι τροχιές με κλίση $i > 60^\circ$ αποτελούν περίπου το 75% του καταλόγου. Εκτός των τροχιών τύπου Molniya και Tundra, μεγάλο ποσοστό των δορυφόρων ακολουθεί *πολικές* και *ηλιοσύγχρονες* ($i \sim 90^\circ - 110^\circ$) τροχιές. Αυτές οι τροχιές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και καταγραφή γεωλογικών, βαρυτημετρικών και μετεωρολογικών δεδομένων της Γης, την οποία καλύπτουν εξ ολοκλήρου. Οι ηλιοσύγχρονες τροχιές έχουν την επιπλέον ιδιότητα να διατηρούν σταθερό τον προσανατολισμό του αναβιβάζοντος συνδέσμου ως προς τον Ήλιο. Αυτό επιτρέπει σταθερό φωτισμό των κατόπτρων του δορυφόρου (και του στόχου) όπως και την διαρκή παρακολούθηση του Ήλιου για επιστημονικούς σκοπούς (π.χ. το ηλιακό παρατηρητήριο SOHO).

4.2.2.1 Διαστημικά «Σκουπίδια» (Space Debris)

Τόσο ο ISS όσο και οι υπόλοιποι τεχνητοί δορυφόροι διατρέχουν κίνδυνο από πιθανή σύγκρουση με τα *διαστημικά σκουπίδια*. Πρόκειται για μικροαντικείμενα φυσικής ή, κυρίως, ανθρωπογενούς προέλευσης, τα οποία συγκεντρώνονται στις περιοχές κίνησης των δορυφόρων (κυρίως LEO και GEO). Η κατανομή τους ακολουθεί την κατανομή των τροχιών των δορυφόρων κι επομένως είναι σχεδόν ισοτροπική στην περιοχή των LEO και δακτυλιοειδής στην περιοχή των GEO.

Ως φυσικής προέλευσης σκουπίδια χαρακτηρίζονται μικροί μετεωρίτες ή σωματίδια σκόνης που παράγονται είτε από συγκρούσεις αστεροειδών (κυρίως) ή από

την αποσάρθρωση των κομητών κατά τις διαδοχικές διελεύσεις τους από το περιήλιο της τροχιάς τους. Σημειώνουμε ότι η πυκνότητα αυτών των εξωγενών αντικειμένων στο εσωτερικό Ηλιακό Σύστημα είναι σχεδόν σταθερή με το χρόνο, αλλά όχι ομογενής ή ισότροπη, καθώς κατά κύριο λόγο τα σωματίδια αυτά συγκεντρώνονται σε μια στενή ζώνη κοντά στο επίπεδο της εκλειπτικής (όπως και οι αστεροειδείς) ή στα σημεία τομής της τροχιάς της Γης με συγκεκριμένους κομήτες. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σωματίδια σκόνης σε αυτή τη ζώνη αποτελεί το λεγόμενο *ζωδιακό φως* (zodiacal light).

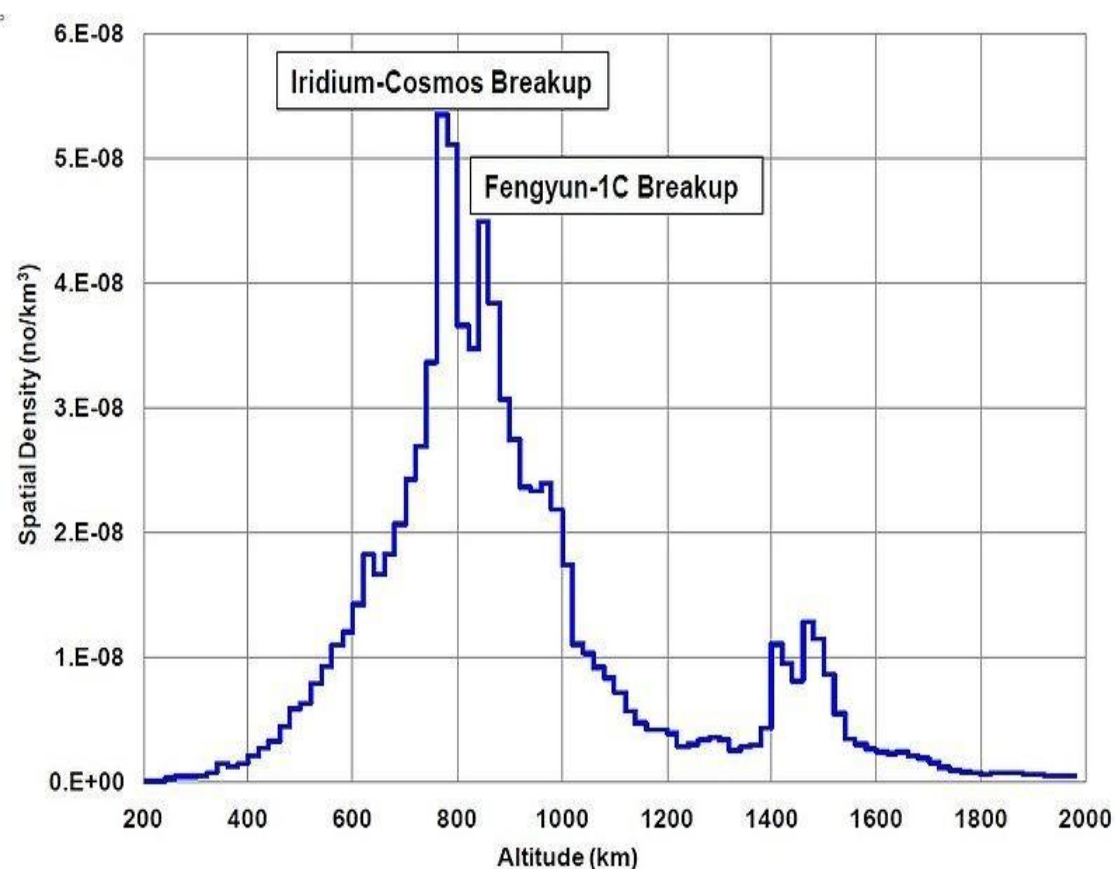


Εικόνα 73: Κατανομή των διαστημικών σκουπιδιών περί την Γη

Ο σημαντικότερος κίνδυνος όμως για τους δορυφόρους προέρχεται από τα ανθρωπογενούς προέλευσης διαστημικά σκουπίδια. Συνήθως στον ασαφή αυτό ορισμό συμπεριλαμβάνονται αντικείμενα με πολύ διαφορετικές μάζες και διαστάσεις, από ανενεργούς δορυφόρους και δεξαμενές καυσίμων (πιθανώς ραδιενεργές) μέχρι φλούδες εξωτερικής βαφής ή μικρο-θραύσματα των ηλιακών κατόπτρων των δορυφόρων (πιθανόν από προηγούμενη σύγκρουση με κάποιο άλλο σκουπίδι) ακόμη και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν από αστροναύτες για επιδιόρθωση ή αναβάθμιση του HST ή του ISS.

Το πρόβλημα των διαστημικών σκουπιδιών δυστυχώς οξύνεται με την πάροδο των ετών, καθώς το πλήθος των διαστημικών αποστολών από τα τέλη του 1950 και μέχρι σήμερα αυξάνει διαρκώς. Μόνο η NASA έχει εκτελέσει πάνω από 200 διαστημικές αποστολές, ενώ παρόμοιους αριθμούς αποστολών έχουν εκτελέσει τόσο η ESA όσο και η Ρωσική (τέως Σοβιετική) Υπηρεσία. Τα τελευταία χρόνια έχουν μπει στον κατάλογο των διαστημικών υπερδυνάμεων η Ιαπωνία, η Κίνα και η Ινδία. Ο διαρκώς αυξανόμενος πληθυσμός των σκουπιδιών που παράγονται από τις αποστολές και ο μικρός ρυθμός με τον οποίο εισέρχονται και καίγονται στην ατμόσφαιρα της Γης έχει

ήδη από τη δεκαετία του 1980 ανησυχίσει τους επιστήμονες, αναφορικά με το ενδεχόμενο να οδηγηθούμε σε πολύ μεγάλες τιμές της πυκνότητάς τους (ιδιαίτερα στις περιοχές των GEO και LEO), με αποτέλεσμα τον αυξημένο κίνδυνο καταστροφικών συγκρούσεων για κάθε εν ενεργεία αποστολή.



Εικόνα 74: Η σύγκρουση ενός δορυφόρου του αστερισμού Iridium με ένα δορυφόρο του αστερισμού Cosmos και η καταστροφή του δορυφόρου Fengyun-1C από στρατιωτικό πύραυλο αύξησε δραματικά την πυκνότητα των διαστημικών σκουπιδιών σε ορισμένα ύψη

Η πιθανή σύγκρουση μεταξύ δορυφόρων των αστερισμών Iridium και Cosmos είχε προβλεφθεί, ως ακραίο ενδεχόμενο, στις αρχές τις δεκαετίας του 1990. Όταν συνέβη τελικά (το 2009), οι διαστημικές υπηρεσίες συνειδητοποίησαν ότι θα έπρεπε να ενταθούν τα μέτρα προφύλαξης των επόμενων αποστολών. Έτσι τόσο η NASA όσο και η ESA, με την υποστήριξη των Η.Π.Α., του Ο.Η.Ε. και της Ε.Ε, διερευνούν τις δυνατότητες μετριασμού ή εξάλειψης του προβλήματος, με τη χρήση τόσο *παθητικών* (καλύτερος σχεδιασμός, χρήση νέων υλικών και μεθόδων κλπ) όσο και *ενεργητικών* μεθόδων (μέθοδοι σταδιακού «καθαρισμού» της περιοχής). Οι παθητικές μέθοδοι στοχεύουν στην αποδοχή συγκεκριμένων κανόνων από όλες τις διαστημικές υπηρεσίες, ώστε να αποφεύγονται στο μέλλον φαινόμενα όπως η σύγκρουση Iridium – Cosmos, πόσο μάλλον η εσκεμμένη διάλυση ενός δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς, όπως η πρόσφατη διάλυση του Fengyun-1C με στόχο τη δοκιμή οπλικού συστήματος από την Κίνα. Στην εικόνα 74 φαίνεται πόσο αυξήθηκε η πυκνότητα των σκουπιδιών μόνο από τα δύο αυτά συμβάντα, ενώ στην εικόνα 75 φαίνεται μια προσομοίωση της τροχιακής εξέλιξης των θραυσμάτων μιας τέτοιας σύγκρουσης. Είναι φανερό ότι η περιοχή που επηρεάζεται μπορεί να έχει αρκετά μεγάλο εύρος κι έτσι, μία σύγκρουση είναι πιθανό να οδηγήσει σε αλυσιδωτές συγκρούσεις. Οι ενεργητικές μέθοδοι έχουν ως στόχο τον καθαρισμό κυρίως της περιοχής LEO, π.χ.

με τη χρήση δέσμης laser η οποία θα στοχεύει σε κάποιο αντικείμενο και θα το θερμαίνει ώστε να το εξαναγκάσει να χάσει ύψος και να πέσει στην ατμόσφαιρα της Γης.



Εικόνα 75: Προσομοίωση της τροχιακής εξέλιξης των θραυσμάτων σύγκρουσης μεταξύ δορυφόρων

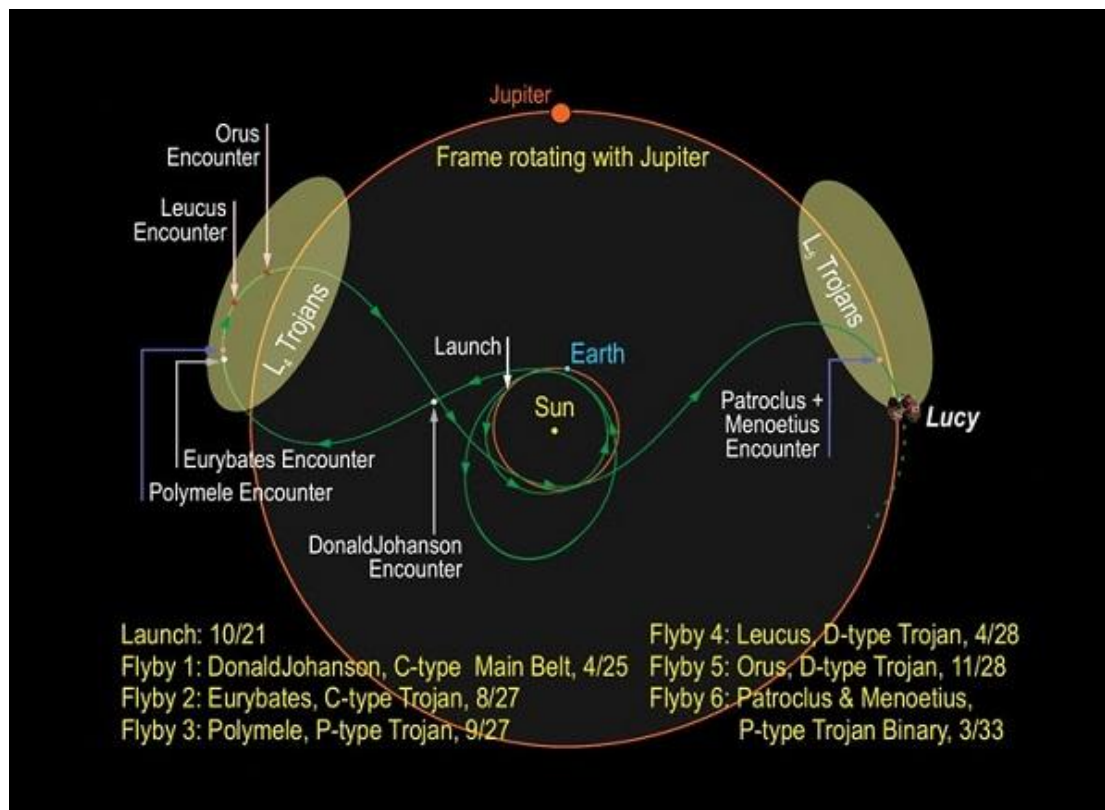
4.2.2.2 Διαπλανητικές Αποστολές και Ελιγμοί Υποβοήθησης

Ο λεπτομερής σχεδιασμός μιας διαπλανητικής αποστολής είναι μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία. Η επιλογή της κατάλληλης τροχιάς είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια του σχεδιασμού, καθώς καθορίζει την επίτευξη των επιστημονικών στόχων, σε συνάρτηση με το προβλεπόμενο κόστος της αποστολής. Για αποστολές που στοχεύουν προς τους ανώτερους πλανήτες, ιδιαίτερα πέρα από τη ζώνη των αστεροειδών, απαιτείται η χρήση της βαρυτικής υποβοήθησης, όπως στο παράδειγμα του διαστημοπλοίου Cassini που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνήθως η τροχιά του σκάφους διαιρείται σε τμήματα κατά τα οποία κινείται με τη βοήθεια των συστημάτων προώθησης (propulsion arcs), σε τμήματα βαρυτικής υποβοήθησης (encounter arcs) και σε τμήματα ελεύθερης πορείας (coasting arcs).

Επιλέγοντας το ποσό της ενέργειας που θέλουμε να κερδίσουμε συνολικά, δοκιμάζουμε αρχικά διάφορους συνδυασμούς (συνήθως μερικές χιλιάδες) από πλέον του ενός τμήματος από κάθε κατηγορία, και στη συνέχεια επιλέγεται ο πλέον κατάλληλος συνδυασμός, με βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμων ή / και του χρόνου πτήσης. Η διαδικασία εύρεσης του κατάλληλου συνδυασμού καταλήγει σε ένα μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (optimization), το οποίο επιλύεται με

τη χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού.

Ένα παράδειγμα τέτοιας τροχιάς δίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου φαίνεται η επιλεγμένη λύση για την αποστολή *LUCY* της NASA που έχει στόχο τη μελέτη των Τρωικών αστεροειδών.



Εικόνα 76: Η επιλεγμένη λύση για την αποστολή *Lucy* της NASA που έχει ως στόχο τη μελέτη των Τρωικών αστεροειδών

4.2.2.2.1 Ο Ελιγμός της Βαρυτικής Υποβοήθησης (*Slingshot Effect*)

Ο ελιγμός της βαρυτικής υποβοήθησης (gravity assist maneuver), ή swing-by ή όπως είναι ευρύτερα γνωστός ως βαρυτική σφεντόνα (gravitational slingshot) στην τροχιακή μηχανική, είναι ένας τύπος προσεγγιστικής διαστημικής πτήσης που χρησιμοποιεί τη σχετική κίνηση (π.χ. τροχιά γύρω από τον Ήλιο) και τη βαρύτητα ενός πλανήτη ή άλλου αστρονομικού αντικείμενου προκειμένου να αλλάξει τη διαδρομή και την ταχύτητα ενός διαστημικού σκάφους, συνήθως για την εξοικονόμηση προωθητικής ενέργειας και συνεπώς μείωση των εξόδων μιας αποστολής.

Η βαρύτητα ενός πλανήτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση ενός διαστημικού σκάφους, για να αυξήσει ή να μειώσει την ταχύτητά του ή να ανακατευθύνει την πορεία του. Η «βοήθεια» παρέχεται από την κίνηση του βαρυτικού σώματος καθώς έλκει το διαστημόπλοιο. Οποιοδήποτε κέρδος ή απώλεια κινητικής ενέργειας και γραμμικής ορμής από ένα διερχόμενο διαστημόπλοιο χάνεται ή κερδίζεται αντίστοιχα από το βαρυτικό σώμα, σύμφωνα με τον Τρίτο Νόμο του Νεύτωνα. Ο ελιγμός της βαρυτικής υποβοήθησης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1959 όταν ο σοβιετικός ανιχνευτής *Luna 3* φωτογράφησε την μακρινή πλευρά της

Σελήνης και χρησιμοποιήθηκε και από άλλους διαπλανητικούς ανιχνευτές από το Mariner 10 και έπειτα, συμπεριλαμβανομένων των αξιοσημείωτων πτήσεων των δύο ανιχνευτών Voyager στον Δία και τον Κρόνο.

Η χρήση του ελιγμού της βαρυτικής υποβοήθησης γύρω από έναν πλανήτη αλλάζει την ταχύτητα ενός διαστημικού σκάφους (σε σχέση με τον Ήλιο) καθώς αυτό εισέρχεται και εξέρχεται από τη βαρυτική σφαίρα επιρροής του πλανήτη. Η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους αυξάνεται καθώς πλησιάζει τον πλανήτη και μειώνεται καθώς απομακρύνεται από αυτόν. Για να αυξήσει την ταχύτητα, το διαστημόπλοιο πλησιάζει τον πλανήτη στην ίδια κατεύθυνση που ο πλανήτης περιφέρεται γύρω από τον Ήλιο και αναχωρεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Για να μειώσει την ταχύτητα, το διαστημόπλοιο πλησιάζει τον πλανήτη ταξιδεύοντας σε αντίθετη κατεύθυνση από την τροχιακή ταχύτητα του πλανήτη. Και στους δύο τύπους ελιγμών η μεταφορά ενέργειας από τον πλανήτη στο διαστημικό σκάφος (ή το αντίθετο) θεωρείται αμελητέα εν σύγκριση με τη συνολική τροχιακή ενέργεια του πλανήτη. Το άθροισμα των κινητικών ενεργειών και των δύο σωμάτων παραμένει σταθερό (βλέπε ελαστική κρούση).

Για να γίνει περισσότερο αντιληπτό το πώς αυτό συμβαίνει μπορούμε να πάρουμε σαν παράδειγμα μια μπάλα του τένις που αναπηδά από το μπροστινό μέρος ενός κινούμενου τρένου. Φανταστείτε πως στέκεστε σε μια πλατφόρμα και πετάτε μια μπάλα με 30 km/h προς ένα τρένο που πλησιάζει με 50 km/h. Ο οδηγός του τρένου βλέπει την μπάλα να πλησιάζει με 80 km/h και στη συνέχεια αφού η μπάλα αναπηδήσει ελαστικά από το μπροστινό μέρος του τρένου, να αναχωρεί με 80 km/h. Λόγω της κίνησης του τρένου, ωστόσο, αυτή η αναχώρηση της μπάλας θα είναι στα 130 km/h σε σχέση με την θέση σας στην πλατφόρμα. Η μπάλα θα έχει προσθέσει τη διπλάσια ταχύτητα του τρένου στη δική της.

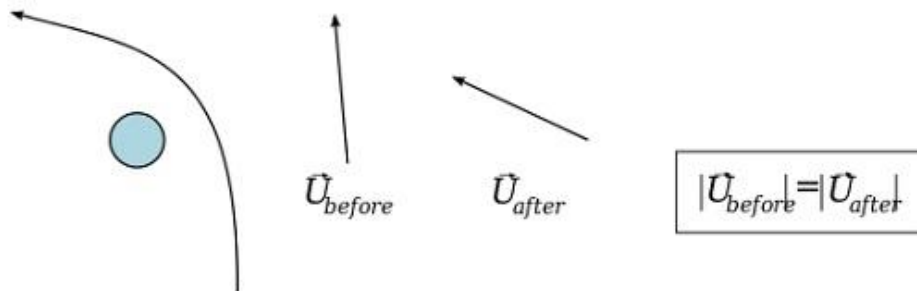
Μεταφράζοντας την αναλογία του παραπάνω παραδείγματος στο διάστημα υποθέτοντας πως στο πλαίσιο αναφοράς ενός πλανήτη, το διαστημόπλοιο έχει κατακόρυφη ταχύτητα v σε σχέση με τον πλανήτη. Αφού ολοκληρωθεί ο ελιγμός της βαρυτικής σφεντόνας, το διαστημόπλοιο θα φύγει από τον πλανήτη σε μια πορεία 90 μοιρών από αυτή στην οποία έφτασε. Θα εξακολουθεί να έχει ταχύτητα v , αλλά στην οριζόντια κατεύθυνση. Η ταχύτητα θα παραμείνει η ίδια καθώς όση κινητική ενέργεια το διαστημόπλοιο «κερδίζει» εισερχόμενο στη βαρυτική σφαίρα του πλανήτη, στη συνέχεια τη χάνει καθώς εξέρχεται από αυτόν. Εντούτοις, στο πλαίσιο αναφοράς του Ήλιου, ο πλανήτης έχει οριζόντια ταχύτητα v , και χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο Θεώρημα, το διαστημόπλοιο έχει αρχικά συνολική ταχύτητα $\sqrt{2}v$. Αφού το διαστημόπλοιο φύγει από τον πλανήτη, θα έχει ταχύτητα $v + v = 2v$, κερδίζοντας περίπου 0,6v.

Αυτή η εξήγηση μπορεί να φαίνεται ότι παραβιάζει τη διατήρηση της ενέργειας και της ορμής, προσθέτοντας προφανώς ταχύτητα στο διαστημόπλοιο εκ του μηδενός, αλλά οι «επιπτώσεις» του διαστημικού σκάφους στον πλανήτη πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της μηχανικής που εμπλέκεται. Η γραμμική ορμή που αποκτά το διαστημόπλοιο είναι ίση σε μέγεθος με αυτή που χάνεται από τον πλανήτη, έτσι το διαστημόπλοιο αποκτά ταχύτητα και ο πλανήτης χάνει ταχύτητα. Ωστόσο, η τεράστια μάζα του πλανήτη σε σύγκριση με το διαστημόπλοιο κάνει την προκύπτουσα αλλαγή στην ταχύτητά του αμελητέα ακόμη και σε σύγκριση με τις τροχιακές διαταραχές που υφίστανται οι πλανήτες λόγω αλληλεπιδράσεων με άλλα ουράνια σώματα σε αστρονομικά σύντομες χρονικές κλίμακες. Για παράδειγμα, ο Δίας έχει μάζα σχεδόν 2×10^{24} τόνους. Επομένως, ένα

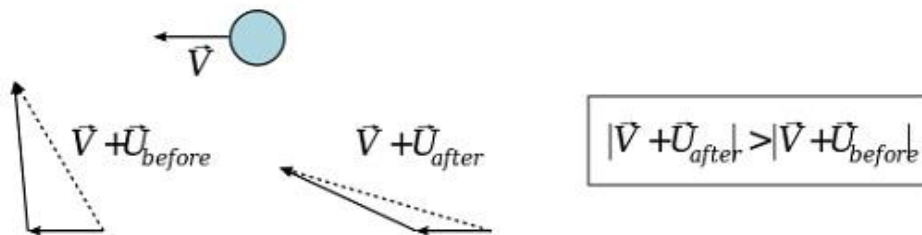
διαστημικό σκάφος μάζας ενός τόνου που περνάει από τον Δία θα προκαλέσει θεωρητικά τον πλανήτη να χάσει περίπου 5×10^{-25} km/s τροχιακής ταχύτητας για κάθε km/s ταχύτητας σε σχέση με τον Ήλιο που αποκτά το διαστημόπλοιο. Για όλους τους πρακτικούς σκοπούς, οι επιπτώσεις στον πλανήτη μπορούν να αγνοηθούν στον υπολογισμό.

Οι ρεαλιστικές απεικονίσεις των συναντήσεων στο χώρο απαιτούν την εξέταση τριών διαστάσεων. Ισχύουν οι ίδιες αρχές όπως παραπάνω, εκτός από το ότι η προσθήκη της ταχύτητας του πλανήτη σε αυτή του διαστημικού σκάφους απαιτεί προσθήκη διανύσματος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Frame of Reference: Moving with Planet



Frame of Reference: Planet Moving Left



Εικόνα 77: Δισδιάστατη σχηματική απεικόνιση του ελιγμού της βαρυτικής σφεντόνας. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση προς την οποία ταξιδεύει το διαστημόπλοιο πριν και μετά την αλληλεπίδραση του με τον πλανήτη. Το μήκος των βελών δείχνει την ταχύτητα του διαστημόπλοιου

Λόγω της αναστρεψιμότητας των τροχιών, ο ελιγμός της βαρυτικής σφεντόνας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της ταχύτητας ενός διαστημικού σκάφους. Τόσο το Mariner 10 όσο και το MESSENGER πραγματοποίησαν αυτόν τον ελιγμό για να φτάσουν στον Ερμή.

Εάν το διαστημόπλοιο χρειάζεται περισσότερη ταχύτητα από αυτή που είναι διαθέσιμη από την βαρυτική υποβοήθηση, η χρήση των προωθητικών πυραύλων κοντά στην περιάψη (πλησιέστερη πλανητική προσέγγιση) χρησιμοποιεί το λιγότερο καύσιμο, επιτυγχάνοντας έτσι τη μέγιστη αποδοτικότητα. Μια δεδομένη χρήση των προωθητήρων του σκάφους παρέχει πάντα την ίδια αλλαγή στην ταχύτητα (Δv), αλλά η μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι ανάλογη με την ταχύτητα του οχήματος τη στιγμή της καύσης. Επομένως, η μέγιστη κινητική ενέργεια επιτυγχάνεται όταν αυτοί χρησιμοποιηθούν στη μέγιστη ταχύτητα του διαστημόπλοιου. Το φαινόμενο Oberth, που θα δούμε παρακάτω, περιγράφει αυτή την τεχνική με περισσότερες λεπτομέρειες.

Ο Yuri Kondratyuk στην εργασία του «Σε αυτούς που θα διαβάζουν για να χτίσουν» (“To those who will be reading in order to build”), που δημοσιεύτηκε το 1938 αλλά χρονολογείται από το 1918 – 1919, πρότεινε ότι ένα διαστημόπλοιο το οποίο ταξίδευε μεταξύ δύο πλανητών θα μπορούσε να επιταχυνθεί στην αρχή και στο τέλος της τροχιάς του χρησιμοποιώντας τη βαρύτητα των φεγγαριών των δύο πλανητών. Το τμήμα του χειρογράφου του που λαμβάνει υπόψη τη βαρυτική υποβοήθηση δεν αναπτύχθηκε αργότερα και δεν δημοσιεύτηκε μέχρι τη δεκαετία του 1960. Επίσης, ο Friedrich Zander στην εργασία του το 1925 “Problems of flight by jet propulsion: interplanetary flights” έδειξε μια βαθιά κατανόηση της φυσικής πίσω από την έννοια της βαρύτητας και των δυνατοτήτων της για τη διαπλανητική εξερεύνηση του ηλιακού συστήματος. Ακόμη, ο Ιταλός μηχανικός Gaetano Crocco ήταν ο πρώτος που υπολόγισε ένα διαπλανητικό ταξίδι λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές υποβοηθήσεις βαρύτητας.

Όπως αναφέρθηκε, ο ελιγμός βαρυτικής υποβοήθησης επιχειρήθηκε για πρώτη φορά το 1959 όταν ο σοβιετικός ανιχνευτής Luna 3 φωτογράφησε την μακρινή πλευρά της Σελήνης. Ο ελιγμός βασίστηκε στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε υπό τη διεύθυνση του Mstislav Keldysh στο Ινστιτούτο Εφαρμοσμένων Μαθηματικών Keldysh. Το 1961, ο Michael Minovitch, μεταπτυχιακός φοιτητής του UCLA που εργάστηκε στο Jet Propulsion Laboratory (JPL) της NASA, ανέπτυξε μια τεχνική βαρυτικής υποβοήθησης, η οποία αργότερα θα χρησιμοποιούταν για την ιδέα της «Μεγάλης Πλανητικής Περιήγησης» (“Planetary Grand Tour) του Gary Flandro. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 1964 στο JPL της NASA, ανατέθηκε στον Gary Flandro η μελέτη τεχνικών για την εξερεύνηση των εξωτερικών πλανητών του ηλιακού συστήματος. Σε αυτή τη μελέτη ανακάλυψε τη σπάνια ευθυγράμμιση των εξωτερικών πλανητών (Δία, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας) και συνέλαβε την αποστολή πολλαπλών πλανητών “Planetary Grand Tour” χρησιμοποιώντας τη βοήθεια της βαρύτητας για να μειώσει τη διάρκεια της αποστολής από σαράντα χρόνια σε λιγότερο από δέκα.

Ένα διαστημόπλοιο που ταξιδεύει από τη Γη σε έναν εσωτερικό πλανήτη θα αυξήσει τη σχετική ταχύτητά του επειδή «πέφτει» προς τον Ήλιο και ένα διαστημόπλοιο που ταξιδεύει από τη Γη σε έναν εξωτερικό πλανήτη θα μειώσει την ταχύτητά του επειδή φεύγει από την περιοχή του Ήλιου. Αν και η τροχιακή ταχύτητα ενός εσωτερικού πλανήτη είναι μεγαλύτερη από αυτή της Γης, ένα διαστημόπλοιο που ταξιδεύει σε έναν εσωτερικό πλανήτη, ακόμη και με την ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για να τον φτάσει, εξακολουθεί να επιταχύνεται από τη βαρύτητα του Ήλιου σε ταχύτητα σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα της τροχιάς του πλανήτη προορισμού. Εάν ο σκοπός του διαστημικού σκάφους είναι μόνο να προσεγγίσει τον εσωτερικό πλανήτη, τότε συνήθως δεν χρειάζεται να επιβραδύνει το διαστημόπλοιο. Ωστόσο, εάν το διαστημόπλοιο πρόκειται να εισαχθεί σε τροχιά γύρω από αυτόν, τότε πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος να επιβραδυνθεί.

Παρομοίως, ενώ η τροχιακή ταχύτητα ενός εξωτερικού πλανήτη είναι μικρότερη από αυτή της Γης, ένα διαστημόπλοιο που αφήνει τη Γη με την ελάχιστη ταχύτητα που χρειάζεται για να ταξιδέψει σε κάποιον εξωτερικό πλανήτη επιβραδύνεται από τη βαρύτητα του Ήλιου σε ταχύτητα πολύ μικρότερη από την τροχιακή ταχύτητα εκείνου του εξωτερικού πλανήτη. Επομένως, πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος για να επιταχυνθεί το διαστημόπλοιο όταν φτάσει σε αυτόν τον εξωτερικό πλανήτη, εάν πρόκειται να μπει σε τροχιά γύρω του.

Οι πυραυλοκινητήρες μπορούν σίγουρα να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση και τη μείωση της ταχύτητας του διαστημικού σκάφους. Ωστόσο, η χρήση τους απαιτεί καύσιμο, το καύσιμο έχει μάζα και ακόμη και μια μικρή αλλαγή στην ταχύτητα μεταφράζεται σε πολύ μεγαλύτερη απαίτηση καυσίμων που χρειάζονται για να απογειωθεί το διαστημόπλοιο και να ξεφύγει από τη βαρύτητα της Γης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όχι μόνο οι κινητήρες του πρωτοβάθμιου σταδίου πρέπει να ανυψώσουν τη μάζα του επιπλέον προωθητικού, αλλά πρέπει επίσης να ανυψώσουν το επιπλέον προωθητικό πέρα από αυτό που απαιτείται για την ανύψωση του πρόσθετου προωθητικού. Δηλαδή, οι απαιτήσεις προωθητικού καυσίμου για την ανύψωση του διαστημόπλοιου αυξάνονται εκθετικά σε σχέση με το καύσιμο που χρησιμοποιούν οι οποιεσδήποτε μανούβρες για την αλλαγή της ταχύτητας του σκάφους στο διάστημα. Επειδή ακριβώς απαιτούνται πρόσθετα καύσιμα για την ανύψωση των καυσίμων στο διάστημα, οι διαστημικές αποστολές σχεδιάζονται με έναν σφιχτό προϋπολογισμό προωθητικού, γνωστό ως «προϋπολογισμός Δέλτα-ν» “delta-n budget” (από το γνωστό Δν που εκφράζει την αλλαγή στην ταχύτητα). Ο προϋπολογισμός Δέλτα-ν είναι στην πραγματικότητα το συνολικό προωθητικό που θα είναι διαθέσιμο μετά την έξοδο από τη γη, για επιτάχυνση, επιβράδυνση, σταθεροποίηση έναντι εξωτερικών προσκρούσεων (από σωματίδια ή άλλες εξωτερικές επιδράσεις) ή αλλαγές κατεύθυνσης καθώς, όπως είναι προφανές, μετά την απογείωση δεν είναι εφικτός ο ανεφοδιασμός του σκάφους. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι αλλαγής ταχύτητας και κατεύθυνσης που δεν απαιτούν χρήση καυσίμου είναι θεμιτές, επειδή επιτρέπουν επιπλέον ικανότητα ελιγμών και βελτίωση πορείας, χωρίς να δαπανάται καύσιμο από την περιορισμένη ποσότητα που έχει μεταφερθεί στο διάστημα.

Το κύριο πρακτικό όριο στη χρήση ενός ελιγμού βαρυτικής υποβοήθησης είναι ότι οι πλανήτες και άλλες μεγάλες μάζες σπάνια βρίσκονται στα σωστά μέρη για να επιτρέψουν ένα ταξίδι σε έναν συγκεκριμένο προορισμό. Για παράδειγμα, οι αποστολές Voyager που ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 έγιναν εφικτές εξαιτίας της ευθυγράμμισης “Grand Tour” του Δία, του Κρόνου, του Ουρανού και του Ποσειδώνα. Μια παρόμοια ευθυγράμμιση δεν θα συμβεί ξανά παρά μόνο στα μέσα του 22ου αιώνα. Αυτή είναι μια ακραία περίπτωση, αλλά ακόμη και για λιγότερο φιλόδοξες αποστολές υπάρχουν χρόνια που οι πλανήτες είναι διασκορπισμένοι σε ακατάλληλα για χρήση μέρη των τροχιών τους.

Ένας άλλος περιορισμός είναι η ατμόσφαιρα, εάν υπάρχει, του διαθέσιμου πλανήτη. Όσο πιο κοντά μπορεί να πλησιάσει το διαστημικό σκάφος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητά του στην περίαψη καθώς η βαρύτητα επιταχύνει το διαστημόπλοιο, επιτρέποντας την απόκτηση περισσότερης κινητικής ενέργειας από την χρήση των προωθητήρων του. Ωστόσο, εάν ένα διαστημικό σκάφος μπει πολύ βαθιά στην ατμόσφαιρα, η ενέργεια που χάνεται από την οπισθέλκουσα μπορεί να υπερβεί αυτή που αποκτάται από τη βαρύτητα του πλανήτη. Από την άλλη πλευρά, η ατμόσφαιρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη αεροπέδησης. Υπήρξαν επίσης θεωρητικές προτάσεις για τη χρήση αεροδυναμικής ανύψωσης καθώς το διαστημόπλοιο πετά μέσα από την ατμόσφαιρα. Αυτός ο ελιγμός, που ονομάζεται *υποβοήθηση αεροβαρύτητας*, θα μπορούσε να κάμψει την τροχιά σε μεγαλύτερη κλίση από ότι η βαρύτητα μόνη της, και ως εκ τούτου να αυξήσει το κέρδος σε ενέργεια. Ακόμη και στην περίπτωση ενός σώματος χωρίς αέρα, υπάρχει ένα όριο στο πόσο κοντά μπορεί να πλησιάσει ένα διαστημόπλοιο. Το μέγεθος της επιτεύξιμης αλλαγής στην ταχύτητα εξαρτάται από την ταχύτητα προσέγγισης του διαστημικού

σκάφους και την ταχύτητα διαφυγής του πλανήτη στο σημείο της πλησιέστερης προσέγγισης, περιορισμένη από την επιφάνεια ή την ατμόσφαιρα του.

Οι διαπλανητικές «σφεντόνες» χρησιμοποιώντας τον Ήλιο καθεαυτού δεν είναι δυνατές επειδή ο Ήλιος βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με το Ηλιακό Σύστημα στο σύνολό του. Ωστόσο, δίνοντας ώθηση όταν το διαστημόπλοιο βρίσκεται κοντά στον Ήλιο, έχει το ανάλογο αποτέλεσμα με αυτό της *δυναμικής βαρυτικής σφεντόνας* που περιγράφεται ως φαινόμενο Oberth. Αυτό έχει τη δυνατότητα να μεγεθύνει εξαιρετικά την ωστική δύναμη ενός διαστημόπλοιου, αλλά περιορίζεται από την ικανότητα του σκάφους να αντισταθεί στη θερμότητα.

Μια περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα μπορεί επίσης να προσφέρει πρόσθετη βοήθεια, εάν ο άξονας περιστροφής της είναι ευθυγραμμισμένος με τον σωστό τρόπο. Η Γενική Σχετικότητα προβλέπει ότι μια μεγάλη περιστρεφόμενη μάζα προκαλεί *βαρυτομαγνητισμό* (frame-dragging) κοντά στο αντικείμενο, όπου ο ίδιος ο χώρος παραμορφώνεται και συστρέφεται προς την κατεύθυνση της περιστροφής. Οποιοδήποτε συνηθισμένο περιστρεφόμενο αντικείμενο παράγει αυτό το αποτέλεσμα. Αν και οι προσπάθειες μέτρησης της έλξης πλαισίου γύρω από τον Ήλιο δεν έχουν αποφέρει σαφείς αποδείξεις, πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από το Gravity Probe B έχουν ανιχνεύσει φαινόμενα διαστρέβλωσης πλαισίου που προκαλούνται από τη Γη. Η γενική σχετικότητα προβλέπει ότι μια περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα περιβάλλεται από μια περιοχή του διαστήματος, που ονομάζεται *εργόσφαιρα*, εντός της οποίας είναι αδύνατη η στάση, σε σχέση με την περιστροφή της μαύρης τρύπας, επειδή το ίδιο το διάστημα συστρέφεται με την ταχύτητα του φωτός προς την ίδια κατεύθυνση με αυτήν της περιστροφής της μαύρης τρύπας. Η μέθοδος Penrose (Penrose process) μπορεί να προσφέρει έναν τρόπο απόκτησης ενέργειας από την εργόσφαιρα, αν και θα απαιτούσε από το διαστημόπλοιο να κάνει αφερματισμό στη μαύρη τρύπα και το διαστημόπλοιο θα έπρεπε να ξοδέψει ενέργεια για να μεταφέρει το «έρμα» μέχρι εκεί.

Ακόμη, μια άλλη (θεωρητική και αναμφίβολα επικίνδυνη) πιθανή εφαρμογή της βαρυτικής υποβοήθησης είναι η αλλαγή της τροχιακής απόστασης της Γης από τον Ήλιο με σκοπό τη μείωση των αυξανόμενων παγκόσμιων θερμοκρασιών.

Η χρήση της βαρυτικής υποβοήθησης περιορίζεται από μια διατηρημένη ποσότητα που ονομάζεται *παράμετρος (ή σταθερά) Tisserand* (Tisserand parameter). Αυτή είναι μια προσέγγιση της σταθεράς Jacobi του περιορισμένου προβλήματος των τριών σωμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη την περίπτωση ενός κομήτη που περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο και τα αποτελέσματα που θα είχε μια συνάντηση του Δία, ο Félix Tisserand έδειξε ότι:

$$T_p = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_J}(1-e^2)} \cos i = \sigma \alpha \theta \quad (4.119)$$

θα παραμείνει σταθερή, όπου a είναι ο μεγάλος ημιάξονας του κομήτη, e η εκκεντρότητα του, i κλίση του και a_J ο μεγάλος ημιάξονας του Δία.

Αυτό ισχύει όταν ο κομήτης είναι επαρκώς μακριά από τον Δία ώστε να έχει καλά καθορισμένα τροχιακά στοιχεία και στο βαθμό που ο Δίας είναι πολύ μικρότερος από τον Ήλιο και βρίσκεται σε κυκλική τροχιά.

Αυτή η ποσότητα διατηρείται για οποιοδήποτε σύστημα τριών αντικειμένων, ένα εκ των οποίων έχει αμελητέα μάζα και ένα άλλο είναι ενδιάμεσης μάζας και βρίσκεται σε κυκλική τροχιά. Παραδείγματα είναι ο Ήλιος, η Γη και ένα

διαστημόπλοιο ή ο Κρόνος, ο Τιτάνας και το διαστημόπλοιο Cassini. Αυτό επιβάλλει έναν περιορισμό στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βαρυτική υποβοήθηση για την αλλαγή της τροχιάς ενός διαστημικού σκάφους.

Η παράμετρος Tisserand θα αλλάξει εάν το διαστημικό σκάφος κάνει έναν προωθητικό ελιγμό ή έναν ελιγμό βαρυτικής υποβοήθησης κάποιου τέταρτου αντικειμένου, λόγος για τον οποίο πολλά διαστημόπλοια συνδυάζουν συχνά τις υποβοηθήσεις βαρύτητας της Γης και της Αφροδίτης (ή του Άρη) ή ακόμη εκτελούν μεγάλους ελιγμούς στο βαθύ διάστημα.

4.2.2.2 Ο Ελιγμός Oberth (Oberth Effect)

Ο ελιγμός Oberth (Oberth effect) ή “powered flyby”, είναι ένας ελιγμός κατά τον οποίο ένα διαστημόπλοιο πέφτει σε ένα βαρυτικό «πηγάδι» και στη συνέχεια χρησιμοποιεί τις μηχανές του για να επιταχύνει περαιτέρω καθώς πέφτει, αποκτώντας έτσι πρόσθετη ταχύτητα. Ο ελιγμός που προκύπτει είναι ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος απόκτησης κινητικής ενέργειας από την εφαρμογή της ίδιας ώθησης εκτός βαρυτικού πεδίου. Το κέρδος στην απόδοση εξηγείται από το φαινόμενο Oberth, όπου η χρήση μιας μηχανής αντίδρασης σε υψηλότερες ταχύτητες προκαλεί μεγαλύτερη αλλαγή στη μηχανική ενέργεια από τη χρήση της σε χαμηλότερες ταχύτητες. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η πιο ενεργειακά αποδοτική μέθοδος για ένα διαστημόπλοιο για να χρησιμοποιήσει το καύσιμο του είναι στη χαμηλότερη δυνατή τροχιακή περίαψη, όταν η τροχιακή του ταχύτητα (και επομένως η κινητική του ενέργεια) είναι μεγαλύτερη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αξίζει ακόμη και η κατανάλωση καυσίμων για την επιβράδυνση του διαστημικού σκάφους σε ένα βαρυτικό πηγάδι για την εκμετάλλευση της αποτελεσματικότητας του φαινομένου Oberth. Ο ελιγμός και το αποτέλεσμα ονομάστηκαν από το πρόσωπο που τους περιέγραψε για πρώτη φορά το 1927, τον Hermann Oberth, έναν αυστροουγγρικής καταγωγής Γερμανό φυσικό και ιδρυτή της σύγχρονης επιστήμης πυραύλων.

Επειδή το όχημα παραμένει κοντά στην περίαψη μόνο για μικρό χρονικό διάστημα, για να είναι πιο αποτελεσματικός ο ελιγμός Oberth, το όχημα πρέπει να μπορεί να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ώθηση στο συντομότερο δυνατό χρόνο. Ως αποτέλεσμα, ο ελιγμός Oberth είναι πολύ πιο χρήσιμος για κινητήρες πυραύλων υψηλής ώσης, όπως πύραυλοι υγρού προωθητικού, και λιγότερο χρήσιμος για κινητήρες αντίδρασης χαμηλής ώσης, όπως μηχανές κίνησης ιόντων, οι οποίες χρειάζονται πολύ χρόνο για να αποκτήσουν ταχύτητα. Το φαινόμενο Oberth μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση της συμπεριφοράς των πυραύλων πολλαπλών σταδίων: το ανώτερο στάδιο μπορεί να παράγει πολύ περισσότερη χρησιμοποιήσιμη κινητική ενέργεια από τη συνολική χημική ενέργεια των προωθητικών καυσίμων που μεταφέρει.

Όσον αφορά τις ενέργειες που εμπλέκονται, το φαινόμενο Oberth είναι πιο αποτελεσματικό σε υψηλότερες ταχύτητες, επειδή σε υψηλή ταχύτητα το προωθητικό έχει σημαντική κινητική ενέργεια εκτός από τη χημική δυναμική του ενέργεια. Σε υψηλότερη ταχύτητα το όχημα είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει τη μεγαλύτερη αλλαγή (μείωση) της κινητικής ενέργειας του προωθητικού (καθώς εξαντλείται προς τα πίσω και επομένως με μειωμένη ταχύτητα και επομένως μειωμένη κινητική ενέργεια) για να δημιουργήσει μεγαλύτερη αύξηση της κινητικής ενέργειας του οχήματος.

Από την οπτική της ορμής και της κινητικής ενέργειας, ένας πύραυλος λειτουργεί μεταφέροντας ορμή στο προωθητικό καύσιμο του. Σε μια σταθερή ταχύτητα εξάτμισης, αυτή θα είναι μια σταθερή ποσότητα ορμής ανά μονάδα προωθητικού. Για μια δεδομένη μάζα πυραύλων (συμπεριλαμβανομένου του υπολειπόμενου προωθητικού), αυτό συνεπάγεται μια σταθερή αλλαγή στην ταχύτητα ανά μονάδα προωθητικού. Επειδή η κινητική ενέργεια ισούται με $mv^2/2$, αυτή η αλλαγή στην ταχύτητα προσδίδει μεγαλύτερη αύξηση της κινητικής ενέργειας σε υψηλή ταχύτητα από ότι σε χαμηλή ταχύτητα. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη έναν πύραυλο 2 κιλών:

- Με 1 m/s, ο πύραυλος ξεκινά με $1^2 = 1$ J κινητικής ενέργειας. Η προσθήκη 1 m/s αυξάνει την κινητική ενέργεια σε $2^2 = 4$ J κερδίζοντας έτσι 3 J.
- Στα 10 m/s, ο πύραυλος ξεκινά με $10^2 = 100$ J κινητικής ενέργειας. Η προσθήκη 1 m/s αυξάνει την κινητική ενέργεια σε $11^2 = 121$ J κερδίζοντας έτσι 21 J.

Αυτή η μεγαλύτερη αλλαγή στην κινητική ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να μεταφέρει τον πύραυλο υψηλότερα στο βαρυτικό πηγάδι από ότι αν το προωθητικό «καίγονταν» σε χαμηλότερη ταχύτητα.

Εξετάζοντας το ωφέλιμο έργο, οι πυραυλοκινητήρες παράγουν την ίδια δύναμη ανεξάρτητα από την ταχύτητά τους. Ένας πύραυλος που δρα σε ένα σταθερό αντικείμενο, όπως σε μια στατική πυροδότηση, δεν παράγει καθόλου ωφέλιμο έργο καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια του πυραύλου δαπανάται εξ' ολοκλήρου στην επιτάχυνση του προωθητικού του με τη μορφή καυσαερίων. Όταν όμως ο πύραυλος κινείται, η ώθησή του δρα μέσω της απόστασης που κινείται. Η δύναμη πολλαπλασιαζόμενη με την απόσταση είναι ο ορισμός της *μηχανικής ενέργειας* ή *έργου*. Έτσι, όσο πιο μακριά κινούνται ο πύραυλος και το ωφέλιμο φορτίο κατά τη διάρκεια της καύσης (δηλαδή όσο πιο γρήγορα κινούνται), τόσο μεγαλύτερη είναι η κινητική ενέργεια που προσδίδεται στον πύραυλο και το ωφέλιμο φορτίο του και τόσο λιγότερη στα καυσαέρια του.

Αυτό φαίνεται ως εξής. Το μηχανικό έργο που έγινε στον πύραυλο W , ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο της δύναμης της ώσης του κινητήρα \vec{F} και της μετατόπισης που ταξιδεύει κατά τη διάρκεια της καύσης \vec{s} :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} \quad (4.120)$$

Εάν η καύση γίνει στην αντίθετη κατεύθυνση, $\vec{F} \cdot \vec{s} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{s}\| = F \cdot s$. Το αποτέλεσμα του έργου είναι η αλλαγή στη κινητική ενέργεια.

$$\Delta E_k = F \cdot s \quad (4.121)$$

Παραγωγίζοντας ως προς τον χρόνο παίρνουμε:

$$\frac{dE_k}{dt} = F \frac{ds}{dt} \quad (4.122)$$

ή

$$\frac{dE_k}{dt} = F \cdot v \quad (4.123)$$

όπου v είναι η ταχύτητα. Διαιρώντας με τη στιγμιαία μάζα m , για να το εκφράσουμε σε όρους ειδικής ενέργειας e_k , παίρνουμε:

$$\frac{de_k}{dt} = \frac{F}{m} v = a \cdot v \quad (4.124)$$

όπου a είναι το διάνυσμα της επιτάχυνσης.

Έτσι μπορεί εύκολα να φανεί ότι ο ρυθμός κέρδους ειδικής ενέργειας κάθε τμήματος του πυραύλου είναι ανάλογος της ταχύτητας και, δεδομένου αυτού, η εξίσωση μπορεί να ενσωματωθεί (αριθμητικά ή διαφορετικά) για τον υπολογισμό της συνολικής αύξησης της ειδικής ενέργειας του πυραύλου .

Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης ενέργειας είναι συχνά περιττή εάν η διάρκεια καύσης είναι μικρή. Οι σύντομες καύσεις κινητήρων χημικών πυραύλων κοντά στην περίαψη ή αλλού συνήθως μοντελοποιούνται μαθηματικά ως *παλμικές καύσεις* (impulsive burns), όπου η δύναμη του κινητήρα κυριαρχεί έναντι οποιονδήποτε άλλων δυνάμεων θα μπορούσαν να αλλάξουν την ενέργεια του οχήματος κατά την καύση.

Για παράδειγμα, καθώς ένα όχημα «πέφτει» προς την περίαψη σε οποιαδήποτε τροχιά (κλειστές ή τροχιές διαφυγής), η ταχύτητα σε σχέση με το κεντρικό σώμα αυξάνεται. Η σύντομη καύση του κινητήρα (μία παλμική καύση) στην περίαψη αυξάνει την ταχύτητα κατά την ίδια αύξηση όπως σε οποιαδήποτε άλλη στιγμή (Δv). Ωστόσο, δεδομένου ότι η κινητική ενέργεια του οχήματος σχετίζεται με το τετράγωνο της ταχύτητάς του, αυτή η αύξηση της ταχύτητας έχει μη γραμμική επίδραση στην κινητική ενέργεια του οχήματος, αφήνοντάς το με υψηλότερη ενέργεια από ότι αν η καύση είχε πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη στιγμή.

Εάν μία παλμική καύση Δv εκτελείται στην περίαψη σε μια παραβολική τροχιά, τότε η ταχύτητα στην περίαψη πριν από τη καύση είναι ίση με την ταχύτητα διαφυγής V_{esc} και η ειδική κινητική ενέργεια μετά την καύση είναι:

$$e_k = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} (V_{esc} + \Delta v)^2 = \frac{1}{2} V_{esc}^2 + \Delta v V_{esc} + \frac{1}{2} \Delta v^2 \quad (4.125)$$

όπου $V = V_{esc} + \Delta v$. Όταν το όχημα φεύγει από το πεδίο βαρύτητας, η απώλεια ειδικής κινητικής ενέργειας είναι $\frac{1}{2} V_{esc}^2$, έτσι διατηρεί την ενέργεια $\Delta v V_{esc} + \frac{1}{2} \Delta v^2$, που είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια από μία καύση έξω από το βαρυτικό πεδίο $\left(\frac{1}{2} \Delta v^2\right)$ κατά $\Delta v V_{esc}$.

Όταν το όχημα βγει εντελώς από το πεδίο βαρύτητας κινείται με ταχύτητα:

$$V = \Delta v \sqrt{1 + \frac{2V_{esc}}{\Delta v}} \quad (4.126)$$

Για την περίπτωση όπου η προστιθέμενη ώθηση Δv είναι μικρή σε σύγκριση με την ταχύτητα διαφυγής, το 1 μπορεί να αγνοηθεί και η πραγματική Δv της παλμικής καύσης μπορεί να γραφεί ότι πολλαπλασιάζεται απλά με τον παράγοντα $\sqrt{\frac{2V_{esc}}{\Delta v}}$ και τελικά παίρνουμε:

$$V \approx \sqrt{2V_{esc} \Delta v} \quad (4.127)$$

Παρόμοια είναι και τα φαινόμενα σε κλειστές και υπερβολικές τροχιές.

Ας δούμε ένα παράδειγμα παραβολικής τροχιάς. Έστω ότι το όχημα κινείται με ταχύτητα v κατά την έναρξη μιας καύσης που αλλάζει την ταχύτητα κατά Δv , τότε η μεταβολή της ειδικής τροχιακής ενέργειας (Special Orbital Energy, SOE) λόγω της νέας τροχιάς θα είναι:

$$v\Delta v + \frac{1}{2}(\Delta v)^2 \quad (4.128)$$

Μόλις το διαστημόπλοιο είναι ξανά μακριά από τον πλανήτη, η ειδική τροχιακή ενέργεια είναι εντελώς κινητική, αφού η βαρυτική δυναμική ενέργεια πλησιάζει το μηδέν. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το v τη στιγμή της καύσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η τελική κινητική ενέργεια και τόσο μεγαλύτερη η τελική ταχύτητα.

Το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όσο πιο κοντά στο κεντρικό σώμα, ή γενικότερα, όσο πιο βαθιά στο δυναμικό του βαρυτικού πεδίου συμβαίνει η καύση, καθώς η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη εκεί.

Έτσι, εάν ένα διαστημικό σκάφος βρίσκεται σε παραβολική πτήση του Δία με ταχύτητα περιάφησης 50 km/s και εκτελεί καύση 5 km/s, αποδεικνύεται ότι η τελική αλλαγή ταχύτητας σε μεγάλη απόσταση είναι 22,9 km/s, πολλαπλασιάζοντας την καύση κατά 4,58 φορές.

Μπορεί να φαίνεται ότι ο πύραυλος κερδίζει δωρεάν ενέργεια, κάτι που θα παραβίαζε την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Ωστόσο, οποιοδήποτε κέρδος στην κινητική ενέργεια του πυραύλου εξισορροπείται από μια σχετική μείωση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων (η κινητική ενέργεια των καυσαερίων μπορεί να εξακολουθεί να αυξάνεται, αλλά όχι τόσο πολύ), σε αντίθεση με την περίπτωση στατικής πυροδότησης, όπου η ταχύτητα του κινητήρα είναι σταθερή στο μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η κινητική του ενέργεια δεν αυξάνεται καθόλου και όλη η χημική ενέργεια που απελευθερώνεται από το καύσιμο μετατρέπεται στην κινητική ενέργεια (και θερμότητα) των καυσαερίων.

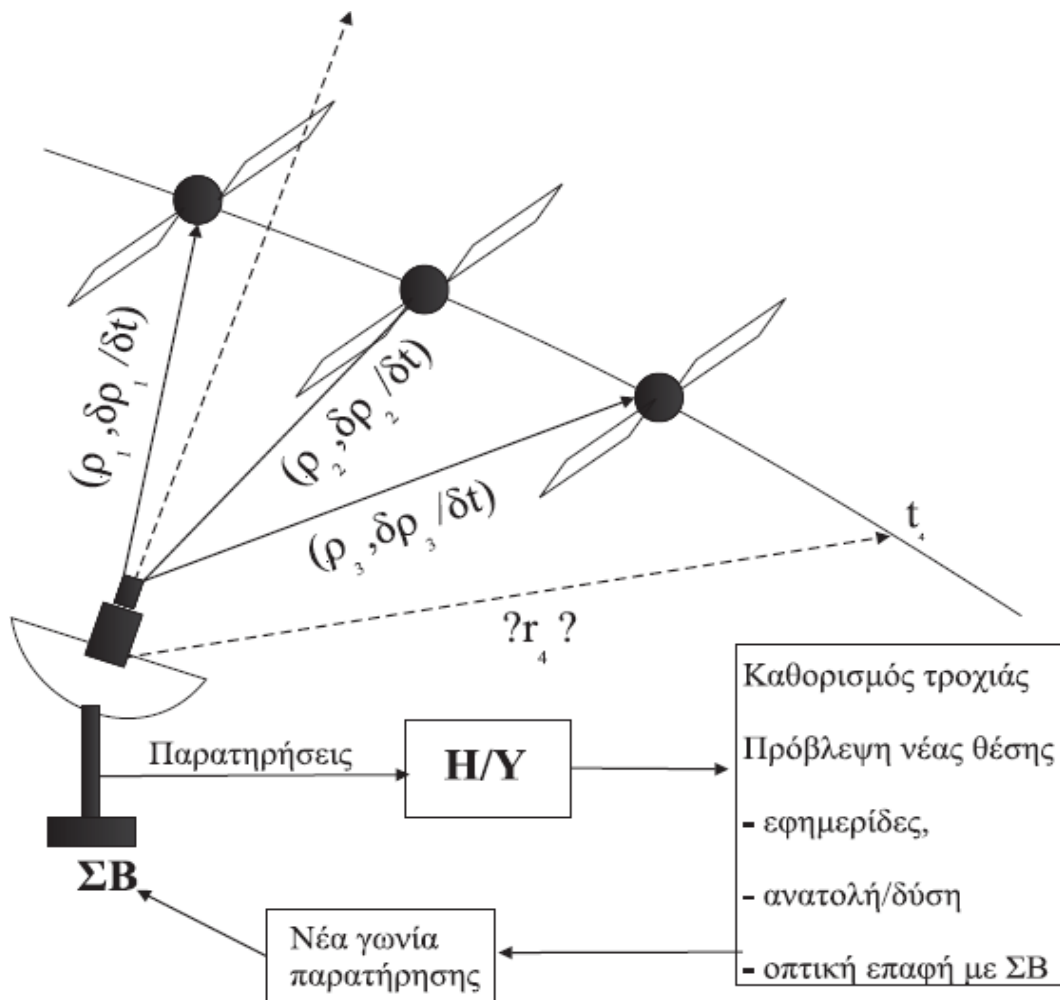
Σε πολύ υψηλές ταχύτητες η μηχανική ισχύς που προσδίδεται στον πύραυλο μπορεί να υπερβεί τη συνολική ισχύ που απελευθερώνεται κατά την καύση του προωθητικού. Αυτό μπορεί επίσης να φαίνεται ότι παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Αλλά τα προωθητικά σε έναν ταχέως κινούμενο πύραυλο μεταφέρουν ενέργεια όχι μόνο χημικά, αλλά και με τη δική τους κινητική ενέργεια, η οποία σε ταχύτητες πάνω από μερικά χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο υπερβαίνει τη χημική συνιστώσα. Όταν καίγονται αυτά τα προωθητικά, μέρος αυτής της κινητικής ενέργειας μεταφέρεται στον πύραυλο μαζί με τη χημική ενέργεια που απελευθερώνεται από την καύση.

Το φαινόμενο Oberth μπορεί επομένως να αναπληρώσει εν μέρει την εξαιρετικά χαμηλή απόδοση στην αρχή της πτήσης του πυραύλου όταν αυτός κινείται αργά. Το μεγαλύτερο μέρος της δουλειάς που γίνεται από έναν πύραυλο κατά την αρχική πτήση «επενδύεται» στην κινητική ενέργεια του καυσίμου που δεν έχει ακόμα καεί, μέρος της οποίας θα απελευθερώσουν αργότερα όταν καούν.

4.2.3 Προσδιορισμός και Παρακολούθηση Τροχιάς

Κάθε δορυφόρος βρίσκεται σε διαρκή επικοινωνία με έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης (ΣΒ), με τους οποίους ανταλλάσσει δεδομένα. Εκτός της καταγραφής

των παρατηρήσεων, σύμφωνα με τους στόχους κάθε αποστολής, ο σταθμός βάσης είναι επιφορτισμένος με τη διαρκή παρακολούθηση, τον ακριβή προσδιορισμό και την διατήρηση της επιθυμητής τροχιάς του δορυφόρου. Η διατήρηση της τροχιάς είναι επιβεβλημένη, καθώς διάφορες διαταραχές προκαλούν την αργή απομάκρυνση του δορυφόρου από την επιθυμητή τροχιά, και επιτυγχάνεται με την αποστολή κατάλληλων εντολών από το υπολογιστικό κέντρο του σταθμού βάσης προς τον δορυφόρο. Η διαδικασία παρακολούθησης και προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου από τον σταθμό βάσης φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 78: Η διαδικασία παρακολούθησης και προσδιορισμού της τροχιάς του δορυφόρου από τον Σταθμό Βάσης

Αποδεικνύεται ότι τρεις διαδοχικές παρατηρήσεις του δορυφόρου είναι ικανές για τον καθορισμό των στοιχείων της τροχιάς. Βέβαια, η χρήση περισσότερων παρατηρήσεων (όταν είναι διαθέσιμες) οδηγεί σε πιο ακριβή προσδιορισμό της τροχιάς, μέσω μιας διαδικασίας πολύπλοκων υπολογισμών που ονομάζεται *διαφορική διόρθωση*. Συνήθως ο προσδιορισμός της τροχιάς γίνεται με μέτρηση της στιγμιαίας απόστασης (range) ρ , του δορυφόρου από τον σταθμό βάσης και του ρυθμού μεταβολής της (range rate). Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του χρόνου διαδρομής που απαιτείται ώστε το σήμα (φωτεινός παλμός laser ή δέσμη radar) να φύγει από την κεραία του σταθμού βάσης, να ανακλαστεί από τον δορυφόρο και να επιστρέψει στην κεραία του σταθμού. Το σήμα καλύπτει διαδρομή ίση με 2ρ σε χρόνο Δt , ταξιδεύοντας με ταχύτητα c , δηλαδή:

$$\rho = \frac{c\Delta t}{2} \quad (4.129)$$

Ταυτόχρονα, λόγω της σχετικής κίνησης του δορυφόρου ως προς τον σταθμό βάσης, η συχνότητα λήψης του σήματος θα είναι λίγο διαφορετική από τη συχνότητα εκπομπής, λόγω μετάθεσης Doppler, έτσι ώστε:

$$\dot{\rho} = \frac{\lambda\Delta f}{2} \quad (4.130)$$

όπου λ το εκπεμπόμενο μήκος κύματος και Δf η μετάθεση Doppler της συχνότητας f , την οποία υφίσταται το σήμα, καθώς διανύει της απόσταση ρ . Η παραπάνω σχέση προκύπτει από τη βασική εξίσωση του φαινομένου Doppler:

$$\frac{u}{c} = \frac{\Delta f}{f} \quad (4.131)$$

με αντικατάσταση της ακτινικής ταχύτητας του δορυφόρου u , από τη σχέση: $u = \Delta\rho/(\Delta t/2) \cong 2\rho$ και $c = \lambda \cdot f$.

Έχοντας τα στοιχεία της τροχιάς για κάποια χρονική στιγμή, μπορούμε να κατασκευάσουμε εφημερίδες της μελλοντικής θέσης του δορυφόρου, να υπολογίσουμε τις χρονικές στιγμές ανατολής και δύσης του και συνακόλουθα, την ορατότητα του δορυφόρου από τον σταθμό βάσης κλπ. Έτσι, για οποιαδήποτε χρονική στιγμή (π.χ. t_4 , βλ. Εικόνα 78), μπορούμε να γνωρίζουμε τη γωνία κατά την οποία πρέπει να στρέψουμε την κεραία του σταθμού βάσης, ώστε να παρατηρήσουμε εκ νέου τον δορυφόρο και να πάρουμε τα δεδομένα που στο μεταξύ έχει συλλέξει. Αν η νέα θέση του δορυφόρου είναι σημαντικά διαφορετική από την προβλεπόμενη, τότε υπολογίζουμε αν και κατά πόσο απαιτείται διόρθωση της τροχιάς.

4.2.4 Διόρθωση και Μετάθεση Τροχιάς

Η διαδικασία τοποθέτησης του δορυφόρου σε δεδομένη τροχιά απαιτεί μεγάλο ενεργειακό κόστος. Η απαιτούμενη ώθηση του δορυφόρου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την αρχή του πυραύλου. Η ώθηση προκαλείται από την εκτόξευση του προωθητικού μέσου μέσω ενός στενού ανοίγματος που βρίσκεται στην άκρη της δεξαμενής καυσίμου. Οι περισσότεροι δορυφόροι χρησιμοποιούν χημική ή ιοντική προώθηση, εκτοξεύοντας, αντίστοιχα, αέρια καύσης ή ιόντα. Η αποστολή του διαστημικού σκάφους SMART στη Σελήνη αποτέλεσε την πρώτη αποστολή σκάφους της ESA προωθούμενου αποκλειστικά με κινητήρα ιόντων. Η αποστολή τελείωσε επιτυχώς το φθινόπωρο του 2006, όταν το SMART συνετρίβη στην επιφάνεια της Σελήνης.

Η συνολική μάζα καυσίμου που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός δορυφόρου σε ισημερινή γεωσύγχρονη τροχιά είναι κατά κανόνα ίση με αυτήν του σκάφους. Για τη διατήρηση ενός δορυφόρου στην επιθυμητή τροχιά (π.χ. τύπου GEO), απαιτείται μάζα καυσίμου περίπου ίση με το 2% της μάζας του σκάφους για κάθε έτος, ώστε να μπορούν να εκτελεστούν οι απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις. Έτσι, τυχόν λάθος υπολογισμός κατά την διαδικασία τοποθέτησης του δορυφόρου στην τροχιά του, που θα οδηγούσε σε αυξημένη δαπάνη καυσίμου μόλις κατά 2%, θα στερούσε ένα ολόκληρο έτος ωφέλιμης αποστολής.

4.2.4.1 Η Εξίσωση Πυραύλου

Η ωστική δύναμη \hat{F} που δέχεται ο δορυφόρος κατά τη διάρκεια της φάσης προώθησης δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{F} = V_e \frac{dm}{dt} + A_e \Delta P = V_{eff} \frac{dm}{dt} \quad (4.132)$$

όπου V_e η σχετική ταχύτητα του προωθητικού μέσου ως προς το σκάφος, m η συνολική μάζα δορυφόρου και καυσίμου, A_e η επιφάνεια του ανοίγματος της δεξαμενής και ΔP η διαφορά πίεσης μεταξύ της δεξαμενής και του περιβάλλοντος. Το δεξιό μέλος της εξίσωσης μπορεί να απλοποιηθεί, ορίζοντας την ενεργό (effective) σχετική ταχύτητα του προωθητικού μέσου ως προς το σκάφος V_{eff} .

Κάθε σύστημα προώθησης χαρακτηρίζεται από την τιμή της σταθεράς ειδικής ώθησης I_{SP} , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$I_{SP} = \frac{\hat{F}}{g \frac{dm}{dt}} \quad (4.133)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η I_{SP} έχει διαστάσεις χρόνου και εκφράζει την ικανότητα αύξησης της ταχύτητας του δορυφόρου, ή αλλιώς την αποδοτικότητα κάθε συστήματος προώθησης, ως προς την μετατροπή της εσωτερικής ενέργειας του καυσίμου σε κινητική ενέργεια του σκάφους. Η μεταβολή της ταχύτητας του δορυφόρου λόγω προώθησης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\hat{F}}{m} dt \quad (4.134)$$

όπου $\Delta t = t_2 - t_1$ η διάρκεια της φάσης προώθησης. Αντικαθιστώντας στον παραπάνω τύπο την \hat{F} από τον ορισμό της I_{SP} , παίρνουμε την εξίσωση:

$$\Delta V = g I_{SP} \int_{m_i}^{m_f} \frac{dm}{m} \quad (4.135)$$

της οποίας η λύση ονομάζεται *εξίσωση πυραύλου*:

$$m_f = m_i \exp\left(-\frac{\Delta V}{g I_{SP}}\right) \quad (4.136)$$

και συνδέει τη μεταβολή της ταχύτητας του σκάφους με την αρχική m_i και τελική τιμή m_f της μάζας του, για δεδομένη τιμή της ειδικής ώθησης. Η κατανάλωση καυσίμου $\Delta m = m_f - m_i$, δίνεται από την έκφραση:

$$\Delta m = m_i \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta V}{g I_{SP}}\right) \right] \quad (4.137)$$

Για κάθε τύπο διόρθωσης ή μετάθεσης τροχιάς, η πρώτη μας κίνηση είναι ο ακριβής υπολογισμός της απαιτούμενης μεταβολής ΔV . Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος προώθησης, προκύπτει η κατανάλωση καυσίμου, Δm , και η διάρκεια της φάσης προώθησης, Δt . Είναι φανερό ότι, αν απαιτούνται διαδοχικές μεταθέσεις τροχιάς, όπως π.χ. για την εκτέλεση διαπλανητικών

αποστολών ή την τοποθέτηση δορυφόρου σε τροχιά τύπου GEO, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου. Σημειώνουμε τέλος, ότι η διάρκεια της φάσης προώθησης είναι μικρή, σε σχέση με την περίοδο περιφοράς του δορυφόρου. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μεταβολή της ταχύτητας του δορυφόρου γίνεται στιγμιαία, σε κάποιο δεδομένο σημείο της τροχιάς του. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τους βασικούς τύπους που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση και τη μετάθεση μιας τροχιάς.

4.2.4.2 Αλλαγή Ύψους Περιγείου / Απογείου

Η αλλαγή του ύψους του περιγείου (ή του απογείου) επιτυγχάνεται, προκαλώντας τη μεταβολή της ταχύτητας του δορυφόρου κατά τη διάβασή του από το απόγειο (αντίστοιχα, από το περίγειο) της αρχικής τροχιάς, O1. Όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 79, οι δύο ελλειπτικές τροχιές (O1=(a,e) και O2=(a',e')) θα εφάπτονται στο απόγειο (αντίστοιχα, στο περίγειο) της O1. Ο υπολογισμός του ΔV γίνεται με χρήση του τύπου που συνδέει την ενέργεια C, με τον ημιάξονα της τροχιάς:

$$-\frac{\mu}{2a} = C = \frac{u^2}{2} - \frac{\mu}{r} \quad (4.138)$$

Στο απόγειο της τροχιάς O1 η ταχύτητα του δορυφόρου θα δίνεται από τη σχέση:

$$u_1 = \sqrt{2 \left(\frac{\mu}{r_a} - \frac{\mu}{r_{p1} + r_a} \right)} \quad (4.139)$$

όπου (r_a, r_p) συμβολίζουν την απόσταση του απογείου και του περιγείου αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες 1 ή 2 αναφέρονται στις τροχιές O1 και O2 αντίστοιχα. Στην παραπάνω σχέση κάναμε χρήση του ότι, για την O1, $2a = r_{p1} + r_a$. Εφόσον θέλουμε να αυξήσουμε το ύψος του περιγείου, θα πρέπει να αυξήσουμε την ταχύτητα του δορυφόρου στο απόγειο της τροχιάς του κατά $\Delta V = u_2 - u_1 > 0$, όπου:

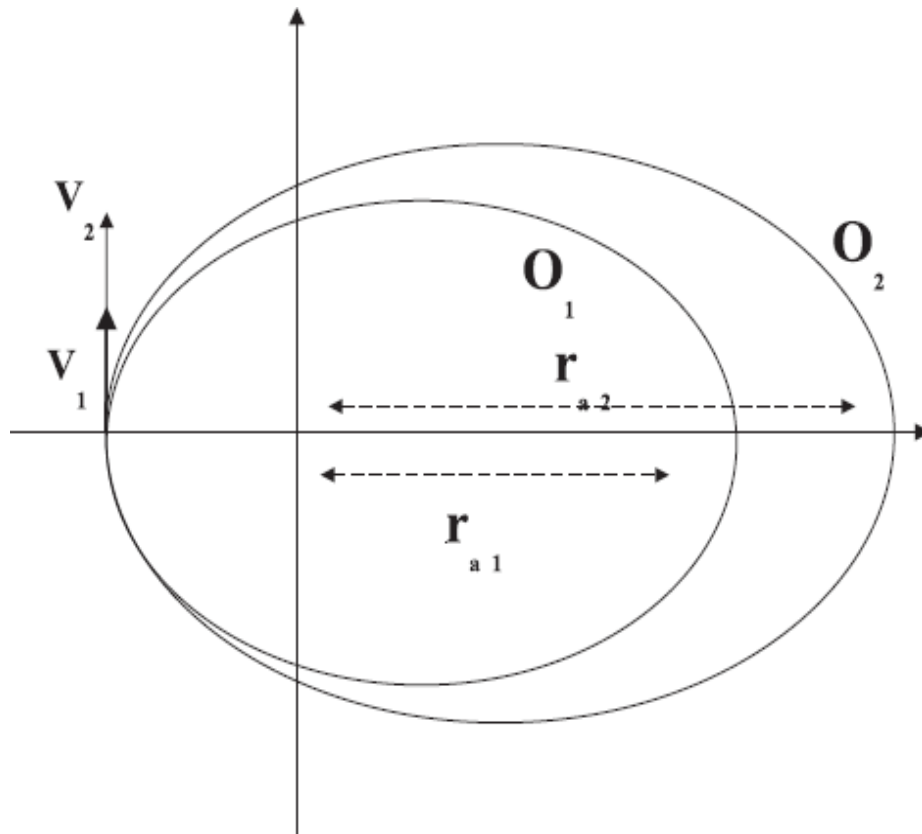
$$u_2 = \sqrt{2 \left(\frac{\mu}{r_a} - \frac{\mu}{r_{p2} + r_a} \right)} \quad (4.140)$$

αφού για την O2 ισχύει $2a' = r_a + r_{p2}$.

Παρομοίως, αν θέλουμε να αυξήσουμε το ύψος του απογείου της τροχιάς του δορυφόρου, θα πρέπει να αυξήσουμε την ταχύτητα του κατά τη διάβαση του από το περίγειο της τροχιάς O1. Οι αντίστοιχοι τύποι για τις ταχύτητες u_1 και u_2 είναι:

$$u_1 = \sqrt{2 \left(\frac{\mu}{r_p} - \frac{\mu}{r_p + r_{a1}} \right)}, \quad u_2 = \sqrt{2 \left(\frac{\mu}{r_p} - \frac{\mu}{r_p + r_{a2}} \right)} \quad (4.141)$$

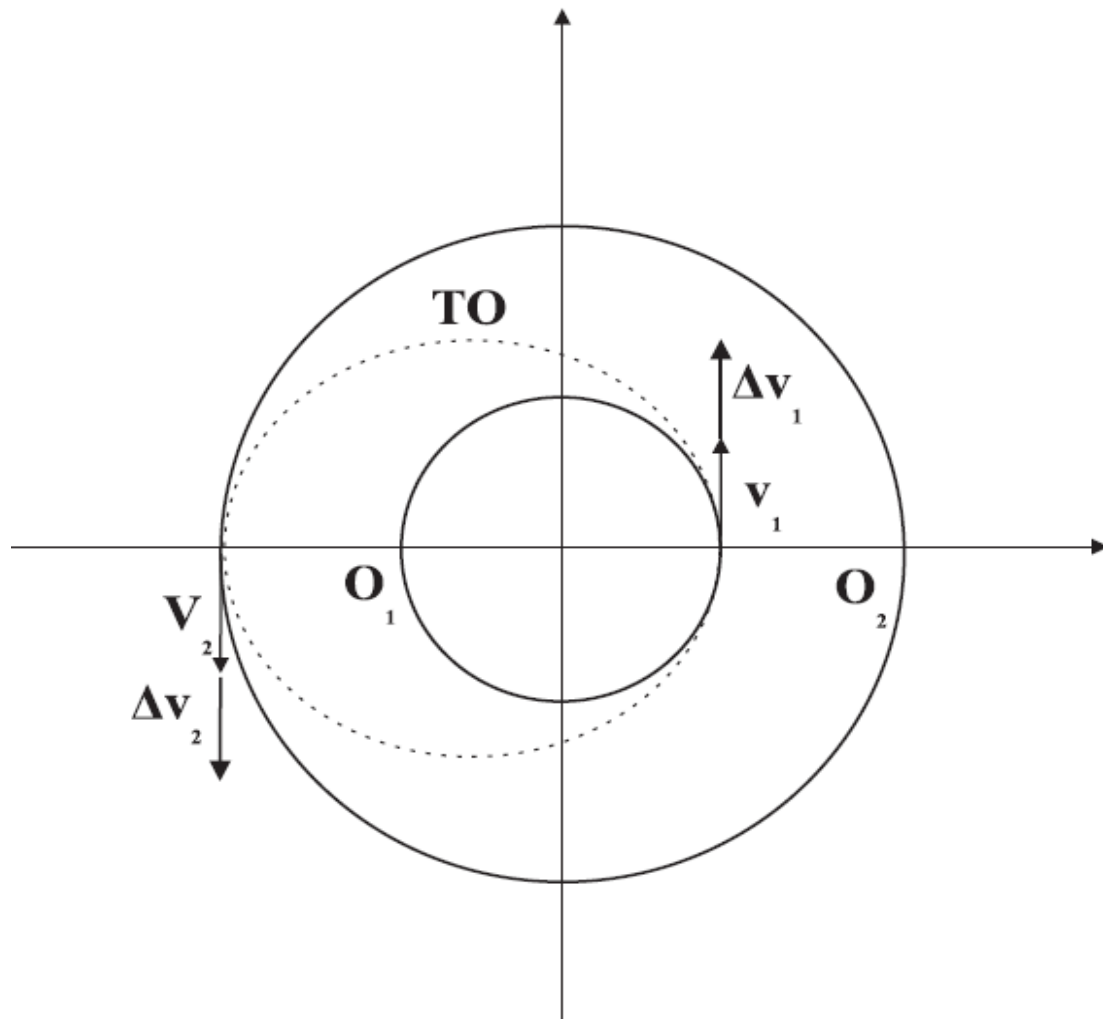
όπου και πάλι ισχύει $\Delta V > 0$. Οι διορθώσεις αυτού του τύπου είναι συχνές για τις τροχιές LEO, καθώς η αεροδυναμική τριβή με την ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης μειώνει διαρκώς το ύψος του περιγείου.



Εικόνα 79: Αλλαγή του ύψους περιγείου / απογείου

4.2.4.3 Μετάθεση Τύπου Hohmann

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, απλές διορθώσεις της τροχιάς του δορυφόρου μπορούν να επιτευχθούν με μία μόνο πυροδότηση των προωθητικών πυραύλων. Αντίθετα, η μετάθεση του δορυφόρου σε νέα τροχιά, που δεν έχει κανένα κοινό σημείο με την αρχική, δεν είναι δυνατό να γίνει σε λιγότερα από δύο στάδια. Έτσι, ο δορυφόρος αναγκάζεται να ακολουθήσει προσωρινά μια *τροχιά μεταφοράς* (Transfer Orbit, TO), η οποία εφάπτεται τόσο στην αρχική όσο και στην τελική τροχιά του. Για μεταφορά από κυκλική τροχιά ακτίνας r_1 σε ομόκεντρη κυκλική τροχιά ακτίνας r_2 , η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου επιτυγχάνεται ακολουθώντας τη διαδικασία μετάθεσης του Hohmann.



Εικόνα 80: Μετάθεση Hohmann

Η μετάθεση Hohmann από την κυκλική τροχιά O1 (ακτίνας $r_1 = a_1$) στην κυκλική τροχιά O2 (ακτίνας a_2) γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο αυξάνουμε την ταχύτητα του δορυφόρου κατά ΔV_1 ενόσω κινείται επί της O1, έτσι ώστε να ακολουθήσει την ελλειπτική τροχιά μετάθεσης TO, με απόσταση περιγείου ίση προς a_1 και απόσταση απογείου ίση προς a_2 . Στο δεύτερο αυξάνουμε την ταχύτητα του δορυφόρου κατά ΔV_2 κατά τη χρονική στιγμή που ο δορυφόρος βρίσκεται στο απόγειο της TO, έτσι ώστε η ταχύτητά του να γίνει ίση με την κυκλική ταχύτητα σε απόσταση $r = a_2$ και να ακολουθήσει την τελική τροχιά O2. Εφόσον και οι δύο μεταβολές γίνονται στις αψίδες της TO, τα διανύσματα μεταβολής ΔV_i είναι κάθετα στη γραμμή των αψίδων της TO και κατά τη φορά της κίνησης του δορυφόρου.

Κατά την πρώτη φάση προώθησης, η ταχύτητα του δορυφόρου αυξάνεται από $v_1 = \sqrt{\mu/a_1}$ σε:

$$u_p = \sqrt{2\mu \left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_1 + a_2} \right)} = \left(\frac{2\mu a_2}{a_1(a_1 + a_2)} \right)^{1/2} \quad (4.142)$$

Επομένως, η μεταβολή της ταχύτητας είναι ίση προς:

$$\Delta u_1 = u_p - u_1 = \sqrt{\frac{\mu}{a_1}} \left(\sqrt{\frac{2a_2}{a+1+a_2}} - 1 \right) \quad (4.143)$$

Ομοίως, κατά τη δεύτερη φάση προώθησης του δορυφόρου, η ταχύτητα του μεταβάλλεται από:

$$u_{pa} = \sqrt{2\mu \left(\frac{r_p}{r_a(r_a + r_p)} \right)} = \left(\frac{2\mu a_1}{a_2(a_1 + a_2)} \right)^{1/2} \quad (4.144)$$

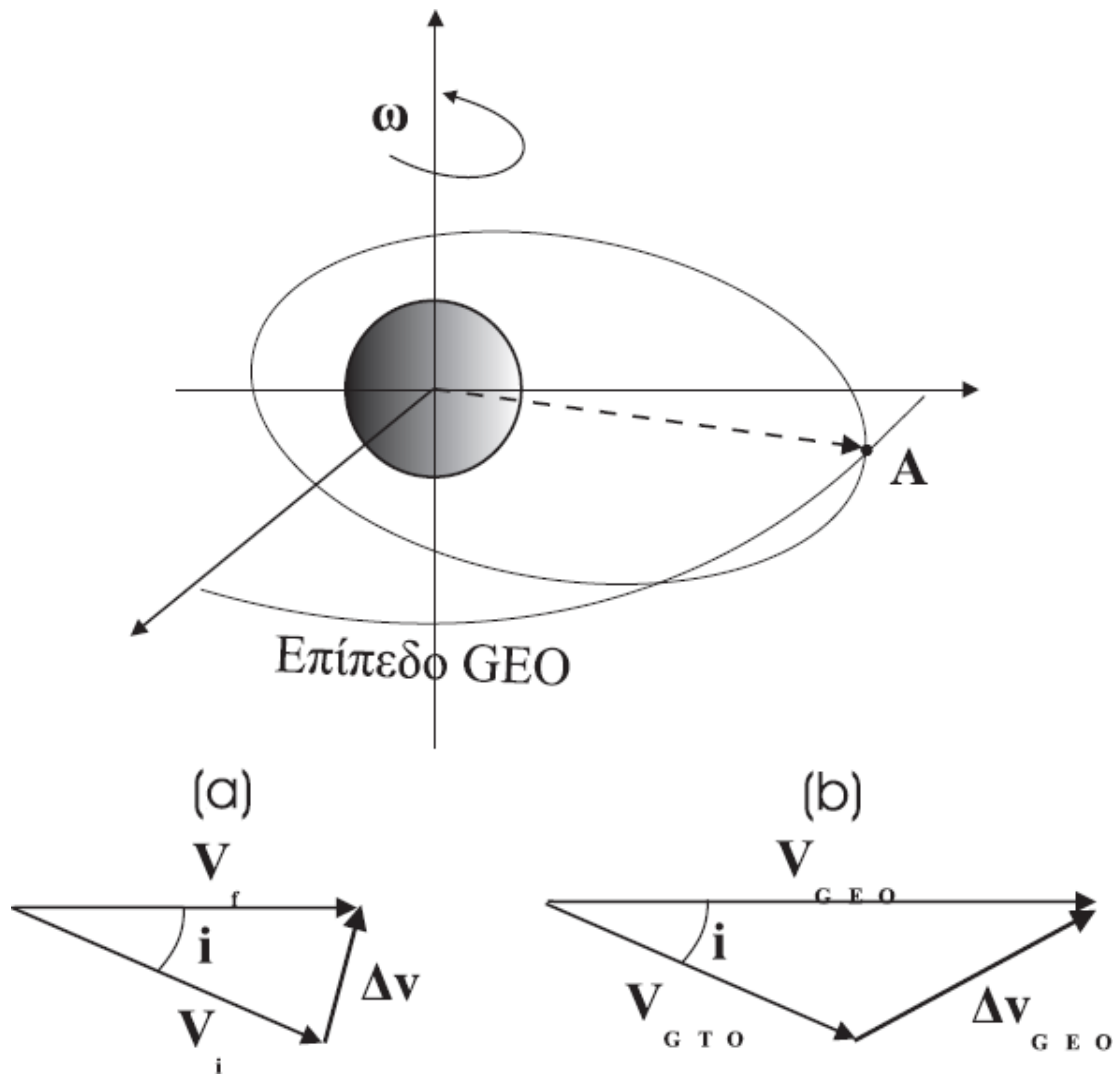
σε $v_2 = \sqrt{\mu/a_2}$, ώστε η μεταβολή Δv_2 να δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta u_2 = u_2 - u_a = \sqrt{\frac{\mu}{a_2}} \left(1 - \sqrt{\frac{2a_1}{a+1+a_2}} \right) \quad (4.145)$$

Η ολική μεταβολή της ταχύτητας του δορυφόρου, βάσει της οποίας υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμου, είναι $\Delta u_1 + \Delta u_2$, αφού και οι δύο επιμέρους μεταβολές προκαλούν αύξηση της ταχύτητας του σκάφους.

4.2.4.4 Τοποθέτηση Δορυφόρου σε Τροχιά GEO

Μέχρι στιγμής μελετήσαμε διορθώσεις και μεταθέσεις μεταξύ συνεπίπεδων τροχιών. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όμως, απαιτείται μετάθεση μεταξύ τροχιών με διαφορετική τιμή κλίσης ως προς το ισημερινό επίπεδο της Γης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η τοποθέτηση δορυφόρου σε ισημερινή, κυκλική, γεωσύγχρονη τροχιά (GEO), την οποία θα μελετήσουμε σε αυτήν την παράγραφο.



Εικόνα 81: Τοποθέτηση δορυφόρου σε ισημερινή, κυκλική, γεωσύγχρονη τροχιά (GEO)

Η εκτόξευση του δορυφόρου γίνεται από κάποιο σημείο της Γης με γεωγραφικό πλάτος φ . Κατά συνέπεια, η ελάχιστη δυνατή τιμή της κλίσης του επιπέδου της τροχιάς του ως προς τον ισημερινό θα είναι $i = \varphi$. Οι ΗΠΑ συνήθως εκτοξεύουν τεχνητούς δορυφόρους από το ακρωτήριο Canaveral στη Florida, που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 28^\circ.5$. Αντίθετα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (European Space Agency, ESA) χρησιμοποιεί τη βάση εκτόξευσης στο Kourou της Γαλλικής Guyana, με $\varphi = 5^\circ.2$. Αν θέλουμε ο δορυφόρος να μεταπέσει σε ισημερινή τροχιά, θα πρέπει να προκαλέσουμε στροφή του διανύσματος της στροφορμής του, ώστε να γίνει κάθετο προς το επίπεδο του ισημερινού. Αυτό επιτυγχάνεται αν στρέψουμε το διάνυσμα της ταχύτητας του δορυφόρου κατά γωνία i , τη στιγμή που αυτός διέρχεται από το ισημερινό επίπεδο. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη μετάθεση τροχιάς είναι λιγότερο δαπανηρή για δορυφόρους της ESA παρά για δορυφόρους των ΗΠΑ. Εκτός από τη στροφή του διανύσματος της ταχύτητας, το μέτρο της θα πρέπει επίσης να μεταβληθεί, ώστε η τελική τροχιά του δορυφόρου να είναι κυκλική. Σημειώνουμε ότι μια τυπική τροχιά εκτόξευσης είναι πολύ έκκεντρη, με απόσταση περιγείου ~ 200 km.

Η τοποθέτηση δορυφόρου σε ισημερινή τροχιά GEO απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό της τροχιάς μεταφοράς (GTO). Συγκεκριμένα, η GTO σχεδιάζεται έτσι ώστε το απόγειό της να βρίσκεται πάνω στο ισημερινό επίπεδο (εν γένει, στο

επιθυμητό επίπεδο της GEO) και σε απόσταση ίση με $r_a = 42.164,2$ km – το ύψος της κυκλικής, γεωστατικής, τροχιάς (περίοδος ίση με 24 ώρες). Η στροφή του διανύσματος της ταχύτητας συνεπάγεται μεταβολή:

$$\Delta v_1 = 2V_a \sin(i/2) \quad (4.146)$$

όπου $V_a = V_i = V_f$ το μέτρο της ταχύτητας του δορυφόρου, στο απόγειο της GTO. Ακόμη και μετά από την παραπάνω διόρθωση, η εκκεντρότητα της ισημερινής τροχιάς είναι μεγάλη, καθώς η απόσταση του απογείου της έχει τιμή ~ 42.000 km, ενώ του περιγείου έχει τιμή ~ 200 km. Η τροχιά του δορυφόρου γίνεται κυκλική (μετάθεση από GTO σε GEO), με αύξηση της ταχύτητάς του κατά τη διέλευσή του από το απόγειο της τροχιάς. Η απαιτούμενη μεταβολή της ταχύτητας δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{R}} \left(1 - \sqrt{\frac{2r_p}{R+r_p}} \right) \quad (4.147)$$

και η ολική μεταβολή της ταχύτητας είναι το άθροισμα των επιμέρους μεταβολών. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί *συνδυασμένη μετάθεση* (μηδενισμός της κλίσης με ταυτόχρονη αύξηση του περιγείου) με μία μόνο πυροδότηση του συστήματος προώθησης, διαδικασία που οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου. Αν V_{GTO} είναι η ταχύτητα του δορυφόρου στο απόγειο της GTO (όπου τέμνει το ισημερινό επίπεδο) και V_{GEO} είναι η ταχύτητα της κυκλικής κίνησης σε ισημερινή γεωστατική τροχιά, η ολική μεταβολή της ταχύτητας του δορυφόρου σε ένα βήμα δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta V^2 = V_{GTO}^2 + V_{GEO}^2 - 2V_{GTO}V_{GEO} \cos i \quad (4.148)$$

όπως προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου του συνημιτόνου για το τρίγωνο που σχηματίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας (βλ. Εικόνα 81).

4.3 Δυναμική Συμπεριφορά του Ηλιακού Συστήματος

Με βάση τα φαινόμενα που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είμαστε πλέον σε θέση να περιγράψουμε τη δυναμική συμπεριφορά του Ηλιακού Συστήματος, το οποίο αποτελεί για εμάς ένα πρότυπο πλανητικό σύστημα. Συγκεκριμένα, θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε στο ερώτημα κατά πόσο οι τροχιές των πλανητών, των δορυφόρων τους και των μικρών σωμάτων μεταβάλλονται με την πάροδο εκατομμυρίων ετών και κατά πόσο το σύστημα είναι και θα παραμείνει στο μέλλον ευσταθές. Επιπλέον, θα συζητήσουμε τη σύνδεση μεταξύ μακροχρόνιων μεταβολών στην τροχιακή και περιστροφική κίνηση των πλανητών, από τη μία, και πιθανών μεταβολών στις κλιματολογικές συνθήκες, από την άλλη.

4.3.1 Οι Τροχιές των Πλανητών

Από τα προαναφερθέντα είναι φανερό ότι οι τροχιές των πλανητών, αλλά και των υπόλοιπων μικρών σωμάτων (αστεροειδείς, κομήτες) του Ηλιακού Συστήματός μας, είναι «ελλείψεις» μόνο σε πρώτη προσέγγιση. Στην πραγματικότητα, οι τροχιές των πλανητών δεν είναι κλειστές ελλείψεις, ούτε έχουν σταθερό σχήμα και προσανατολισμό στο διάστημα. Η βραδεία και μικρού πλάτους μετάπτωση των πλανητικών τροχιών προκαλείται κυρίως από την βαρυτική αλληλεπίδρασή τους και δευτερευόντως από την βαρύτητα του Ήλιου (όταν λαμβάνεται υπόψη και η

σχετικιστική «διόρθωση» στο νόμο του Νεύτωνα). Παρά ταύτα, οι θέσεις και οι ταχύτητες των πλανητών μπορούν να προβλεφθούν με μεγάλη ακρίβεια για χρονικά διαστήματα της τάξης των 10-100 εκατομμυρίων ετών, με τη χρήση της θεωρίας διαταραχών. Αυτό φαίνεται να είναι και το χρονικό όριο προβλεψιμότητας των πλανητικών τροχιών καθώς, όπως δείχνουν πρόσφατες ερευνητικές μελέτες, οι τροχιές τους είναι ασθενώς χαοτικές. Οι *πλανητικές εφημερίδες*, στις οποίες καταγράφονται οι θέσεις και οι ταχύτητες των πλανητών για δεδομένη χρονική στιγμή, συντάσσονται είτε με χρήση της θεωρίας διαταραχών ή με την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης των εξισώσεων κίνησης με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Εκτός από την οργάνωση σχεδίου παρατηρήσεων των πλανητών, οι εφημερίδες χρησιμοποιούνται για τη μελέτη πιθανών συσχετίσεων, μεταξύ των μεταπτώσεων της τροχιάς της Γης και άλλων γεωλογικών / γεωφυσικών δεδομένων, στα οποία έχουν καταγραφεί οι παλαιοκλιματικές συνθήκες της Γης.

4.3.1.1 Μεταπτώσεις της Τροχιάς και Επίδραση στο Κλίμα της Γης

Οι μεταπτώσεις όχι μόνο της τροχιάς αλλά και κυρίως, του άξονα περιστροφής της Γης έχουν άμεση συσχέτιση με την περιοδική εμφάνιση μεγάλης κλίμακας παγετώνων, κάτι που πρώτος παρατήρησε ο Milankovic, τη δεκαετία του 1920. Συγκεκριμένα, η μετάπτωση του άξονα περιστροφής, η μετάθεση του περιηλίου της Γης και οι μεταβολές της εκκεντρότητας της τροχιάς της είναι, σε πρώτη προσέγγιση, περιοδικά φαινόμενα ο γραμμικός συνδυασμός των οποίων δίνει *διακροτήματα*. Έτσι, το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσλαμβάνει η Γη ανά έτος παρουσιάζει μέγιστο και ελάχιστο με περίοδο της τάξης των 100,000 ετών. Αξίζει επίσης να σημειωθεί η επίδραση της Σελήνης στην περιστροφική κίνηση της Γης. Όπως πρότεινε πρόσφατα ο Laskar, η μάζα και η απόσταση της Σελήνης από τη Γη είναι τέτοιες, ώστε η μετάπτωση του άξονα περιστροφής της Γης να είναι ομαλή, με τη λόξωση της εκλειπτικής να εκτελεί ταλαντώσεις πολύ μικρού πλάτους γύρω από μια μέση τιμή, φαινόμενο γνωστό ως *κλόνηση του άξονα*. Αν οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων ήταν αρκετά διαφορετικές, ο άξονας περιστροφής της Γης θα εκτελούσε *χαοτικές μεταπτώσεις* και η λόξωση της εκλειπτικής θα άλλαζε διαρκώς τιμές στο διάστημα $0^\circ - 90^\circ$ κατά τυχαίο τρόπο, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η ανάπτυξη σταθερού κλίματος, κάτι που θα είχε δραματικές επιπτώσεις στην εξέλιξη της βιόσφαιρας της Γης.

Σήμερα πιστεύουμε ότι οι μέσες αποστάσεις των πλανητών από τον Ήλιο δεν ήταν πάντοτε οι ίδιες με αυτές που παρατηρούμε σήμερα. Ο λόγος είναι ότι, κατά τα πρώιμα στάδια της εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος, όταν η συνολική μάζα των μικρών σωμάτων του ηλιακού συστήματος ήταν τουλάχιστον χίλιες φορές μεγαλύτερη από ότι σήμερα, η αλληλεπίδραση των πλανητών με αυτά τα υπολείμματα της δημιουργίας τους οδήγησε σε εκτεταμένη *μετανάστευση* των πλανητών. Παρότι το φαινόμενο αυτό δεν έχει ακόμη κατανοηθεί πλήρως, οι ερευνητές συμφωνούν ότι η συνολική διαδικασία σχηματισμού και μετανάστευσης των πλανητών είχε διάρκεια μικρότερη από 100 εκατομμύρια χρόνια. Επομένως, εδώ και 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια το Ηλιακό Σύστημα έχει ουσιαστικά την ίδια «αρχιτεκτονική» με αυτήν που παρατηρούμε σήμερα.

4.3.1.2 Ευστάθεια του Πλανητικού Συστήματος

Σε πρώτη προσέγγιση, οι τροχιές των πλανητών είναι παντοτινά ευσταθείς. Αυτή τη λύση εξασφαλίζει το θεώρημα των Laplace – Lagrange, που βασίζεται στη γραμμική προσέγγιση του προβλήματος των τριών (ή περισσότερων) πλανητών, υπό την προϋπόθεση όμως ότι: (α) οι πλανήτες δεν βρίσκονται σε συντονισμούς και (β) οι τιμές των e και i είναι «αρκούντως» μικρές, ώστε να ισχύει η θεώρηση του μέσου όρου των παρέλξεων και η γραμμική προσέγγιση. Αυτό όμως δεν είναι ακριβές. Ξέρουμε ότι οι πλανήτες, ακόμη κι αν δεν βρίσκονται ακριβώς σε κάποιον συντονισμό, βρίσκονται κοντά σε κάποιους συντονισμούς που προκαλούν μη αμελητέες διαταραχές. Έτσι, ο Δίας και ο Κρόνος βρίσκονται κοντά στο συντονισμό 5:2 (η λεγόμενη *μεγάλη ανισότητα*) και ο Ουρανός βρίσκεται κοντά στο συντονισμό 2:1 με τον Ποσειδώνα. Επίσης, η συχνότητα μετάπτωσης του περιηλίου του Ερμή είναι σχεδόν ίδια με τη συχνότητα μετάπτωσης του περιηλίου του Δία (έχουμε λοιπόν τον *αιώνιο συντονισμό* $g_E : g_\Delta = 1:1$).

Ο συνδυασμός αυτών των συντονισμών προκαλεί την εμφάνιση ακανόνιστων, *χαοτικών* μεταβολών των στοιχείων της τροχιάς των πλανητών, οι οποίες με την πάροδο δεκαετημεριών ετών μπορεί να προκαλέσουν την αστάθεια του Ηλιακού Συστήματος. Για να κατανοήσουμε αυτό το φαινόμενο θα κάνουμε μια όσο το δυνατόν πιο απλοϊκή ανάλυση.

Η ύπαρξη ασταθών σημείων ισορροπίας σε κάθε συντονισμό, οδηγεί αναπόφευκτα στην εμφάνιση *χαοτικών* κινήσεων που «χαλάνε» την απλοϊκή εικόνα του «απλού εκκρεμούς» που περιγράψαμε. Το κύριο αίτιο εμφάνισης χάους είναι το γεγονός ότι *κανένας συντονισμός δεν είναι απομονωμένος*, άρα δεν μπορούμε να απομονώσουμε έναν μόνο όρο της παρελκτικής συνάρτησης R , και να επιλύσουμε τις εξισώσεις κίνησης. Εάν π.χ. στο παράδειγμα του κεφαλαίου 4.1.6.2 (συντονισμός 2:1 μεταξύ ενός αστεροειδούς και του πλανήτη Δία) θεωρούσαμε ότι ο Δίας ακολουθεί ελλειπτική και όχι κυκλική τροχιά (άρα $e_\Delta > 0$), τότε θα έπρεπε να λάβουμε υπόψη μας ότι, για τον ίδιο λόγο συντονισμού n/n_Δ , υπάρχει ακόμη ένας όρος της R , με έκφραση:

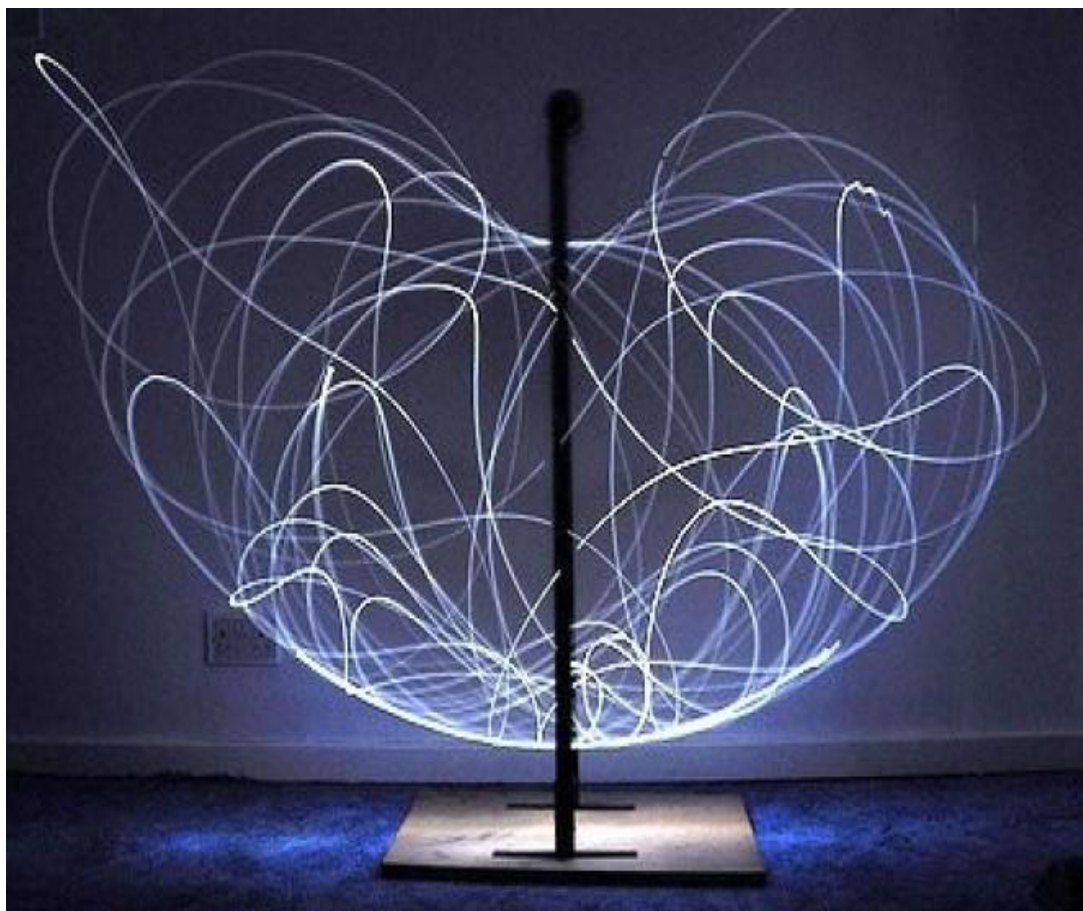
$$\langle R \rangle = C'(a)e_\Delta \cos(\lambda - 2\lambda_\Delta + \varpi_\Delta) \quad (4.149)$$

(δηλαδή περιέχει το ϖ_Δ αντί του ϖ), ο οποίος επίσης ικανοποιεί τους κανόνες του d'Alembert και η συχνότητά του διαφέρει από αυτήν της γωνίας φ που είχαμε χρησιμοποιήσει προηγουμένως μόνο κατά:

$$\delta\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 = \dot{\varpi} - \dot{\varpi}_\Delta \sim O(m_\Delta/M_{sun}) \quad (4.150)$$

Η διαφορά είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις n και n_Δ . Επομένως, στην πραγματικότητα ο συντονισμός 2:1 (και κάθε συντονισμός) αποτελείται από *δύο (ή περισσότερους) γειτονικούς υπο-συντονισμούς*, με την περιοχή «επιρροής» του καθενός να δίνεται από το εύρος της αντίστοιχης διαχωριστικής καμπύλης στο φασικό διάγραμμα. Αν οι *θέσεις ισορροπίας* των υπο-συντονισμών είναι αρκετά κοντά (που είναι, αφού η διαφορά συχνότητων είναι πολύ μικρή) και το εύρος του καθενός είναι αρκετά μεγάλο, τότε λέμε ότι έχουμε *επικάλυψη συντονισμών* (resonance overlap). Η τροχιά του αστεροειδούς τότε, εξαναγκάζεται να μεταπηδά *με απρόβλεπτο τρόπο* από την περιοχή επιρροής του ενός στην περιοχή επιρροής του άλλου υπο-συντονισμού, όπως συμβαίνει και σε ένα *διπλό εκκρεμές*, όταν οι δύο γωνιακές συντεταγμένες των δύο μαζών έχουν παραπλήσιες συχνότητες και δεν

μπορούμε να προβλέψουμε πότε η κάθε μάζα θα «στρίψει» προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά.



Εικόνα 82: Εργαστηριακό πείραμα κίνησης διπλού εκκρεμούς, με κατάλληλες αρχικές συνθήκες ώστε οι δύο συχνότητες να είναι παραπλήσιες. Ένα LED προσαρτημένο στο άκρο της μιας μάζας μας δίνει το ίχνος της χαοτικής τροχιάς

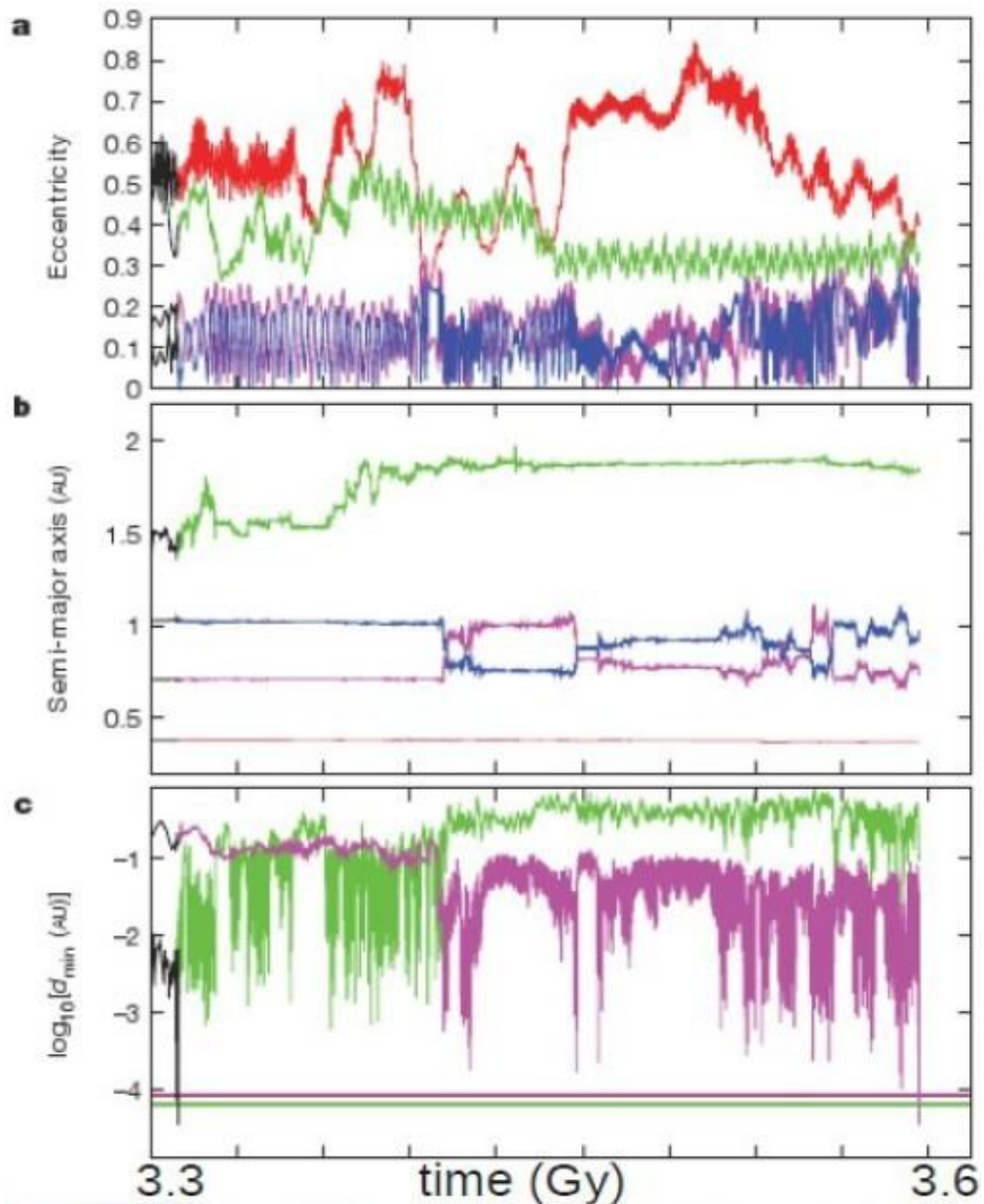
Σε μια τέτοια περίπτωση, η ποσότητα $J = e^2 + \ln(a)$ δεν είναι πια ολοκλήρωμα της κίνησης, αφού τα a και e επηρεάζονται και από μια δεύτερη ταλάντωση με παραπλήσια συχνότητα, η οποία προκαλεί μικρές, αλλά ακανόνιστες μεταβολές. Έτσι, σιγά-σιγά οι οριακές τιμές που μπορούν να πάρουν τα a και e κατά την ταλάντωσή τους αλλάζουν, με αποτέλεσμα να έχουμε μια *αργή αύξηση* της μέγιστης τιμής που μπορεί να φτάσει η εκκεντρότητα της τροχιάς. Αν αυτή η μέγιστη τιμή πλησιάσει την τιμή που απαιτείται ώστε η απόσταση του περιηλίου της τροχιάς του αστεροειδούς να γίνει π.χ. $q = a(1 - e) < 1,5 \text{ AU}$ και να τμήσει την τροχιά του Άρη (για $a = 3,3 \text{ AU}$ απαιτείται $e_{\max} = 0,54$), τότε αργά ή γρήγορα ο αστεροειδής είτε θα σκεδαστεί βαρυντικά από τον πλανήτη και θα εκτραπεί οριστικά από τη ζώνη των αστεροειδών, μετατρέπόμενος σε *παραγίνο αστεροειδή*, είτε ακόμη και θα συγκρουστεί με τον πλανήτη.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι συντονισμοί μπορούν να επηρεάσουν δραματικά την ευστάθεια του πλανητικού συστήματος. Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι τροχιές των μεγάλων πλανητών δεν είναι απολύτως ευσταθείς, αλλά είναι ελαφρώς χαοτικές. Αν κάνουμε μια σειρά από προσομοιώσεις στον υπολογιστή, επιλύοντας τις πλήρεις εξισώσεις κίνησης και προσπαθώντας να υπολογίσουμε τις ακριβείς θέσεις και ταχύτητες των πλανητών μετά από μερικά δισεκατομμύρια χρόνια, θα δούμε ότι

το αποτέλεσμα εξαρτάται δραματικά από την ακρίβεια με την οποία γνωρίζουμε τις αρχικές συνθήκες (η εξέλιξη είναι πολύ διαφορετική ακόμη κι αν αλλάξουμε τις αρχικές συνθήκες π.χ. στο 12ο δεκαδικό ψηφίο).

Αυτή η *ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες* είναι το κύριο γνώρισμα του χάους και ο λόγος για τον οποίο δεν μπορούμε να προβλέψουμε με ακρίβεια το μέλλον ενός συστήματος που αλληλεπιδρά με μη γραμμικό τρόπο, αφού ποτέ δεν μπορούμε να έχουμε άπειρη ακρίβεια στις αρχικές συνθήκες. Έτσι, κάθε μη γραμμικό σύστημα έχει περιορισμένο χρονικό ορίζοντα προβλεψιμότητας, που ονομάζεται *χρόνος Lyapunov*. Το σύστημα των πλανητών έχει χρόνο Lyapunov της τάξης των ~100 My.

Ο Γάλλος ερευνητής και Ακαδημαϊκός Jacques Laskar έχει ασχοληθεί διεξοδικά με την ευστάθεια των πλανητικών τροχιών. Έχει δείξει ότι, σε σύνολο ~2.500 προσομοιώσεων, στις οποίες οι αρχικές θέσεις και ταχύτητες των πλανητών επέλεξε να διαφέρουν κατά ασήμαντα μικρές ποσότητες (μικρότερες από τα σφάλματα των πραγματικών παρατηρήσεων) το Ηλιακό Σύστημα «διαλύεται» στο ~1% των περιπτώσεων. Ο λόγος της διάλυσης είναι ότι οι χαοτικές μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς των μικρών πλανητών (κυρίως του Ερμή και του Άρη) οδηγούν σε αύξηση της εκκεντρότητας και τροχιές που τέμνονται, με επακόλουθο τη σύγκρουση δύο πλανητών ή την εκτροπή ενός πλανήτη σε υπερβολική τροχιά. Ένα παράδειγμα δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, όπου η Γη και η Αφροδίτη στο τέλος συγκρούονται (η απόστασή τους γίνεται μικρότερη από το άθροισμα των φυσικών ακτινών τους). Έτσι, ακόμη κι αν το χάος είναι μια αδιαμφισβήτητη πραγματικότητα, η πιθανότητα διάλυσης του ηλιακού συστήματος λόγω αυτού είναι πολύ μικρή.



Εικόνα 83: Μία από τις προσομοιώσεις του Γάλλου αστρονόμου Jacques Laskar, για την εξέλιξη της τροχιάς των γήινων πλανητών. (Επάνω) Εκκεντρότητα, (Μέση) μεγάλος ημιάξονας, ως συναρτήσεις του χρόνου. Με κόκκινο χρώμα ο Ερμής, με ιώδες χρώμα η Αφροδίτη, με μπλε η Γη και με πράσινο ο Άρης. (Κάτω) Οι αποστάσεις των κέντρων των πλανητών, ως συναρτήσεις του χρόνου

4.3.2 Οι Τροχιές των Φυσικών Δορυφόρων των Πλανητών

Η μεγάλη πλειοψηφία των κανονικών δορυφόρων των πλανητών ακολουθούν ευσταθείς τροχιές. Κυρίαρχο ρόλο σε αυτό πιστεύουμε ότι παίζει η σταθεροποιητική επίδραση των παλιρροιογόνων δυνάμεων.

Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις, όπως π.χ. οι δορυφόροι *Προμηθέας* και *Πανδώρα* του Κρόνου, οι οποίοι βρίσκονται σε συντονισμό πολύ υψηλής τάξης, 121:116. Επειδή όμως η περίοδος της κίνησης είναι μόλις μερικές ημέρες, το αποτέλεσμα των χαοτικών παρέλξεων είναι παρατηρήσιμο, καθώς ο χρόνος Lyapunov είναι μόλις ~3 έτη. Εκτελώντας διαδοχικές παρατηρήσεις των θέσεών τους κάθε μερικά χρόνια, μπορούμε να ελέγξουμε κατά πόσο οι δορυφόροι όντως βρίσκονται στις θέσεις που προέβλεπαν οι υπολογισμοί μας. Έτσι, για το συγκεκριμένο σύστημα, πιστοποιείται ότι οι προβλέψεις μας πέφτουν έξω συστηματικά, καθώς η χαοτική του κίνηση δε μας επιτρέπει να υπολογίσουμε με την απαιτούμενη ακρίβεια τη σωστή τιμή της στιγμιαίας συχνότητας περιφοράς κάθε σώματος και οι δορυφόροι βρίσκονται πάντοτε λίγο «πιο μπροστά» ή λίγο «πιο πίσω» από τις προβλεπόμενες τιμές μέσου μήκους λ.

Όπως προαναφέραμε, οι παλίρροιες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη δυναμική εξέλιξη των δορυφόρων. Στην περίπτωση του συστήματος Γη – Σελήνη, όπου υπάρχει μόνο ένας δορυφόρος, η κίνηση είναι σχετικά απλή. Επειδή η περίοδος περιφοράς της Σελήνης είναι ~29 ημέρες, ενώ η συχνότητα περιστροφής της Γης μόλις 24 ώρες, η Σελήνη *απομακρύνεται* από τη Γη με ρυθμό ~3.8 cm/y ενώ η περίοδος περιστροφής της Γης (το μήκος της ημέρας, Length of Day = LOD) *αυξάνει* κατά ~2.3 msec/αιώνα, καθώς η ροπή της παλίρροιας τείνει να εξισώσει τις δύο βασικές συχνότητες.

Στην περίπτωση ενός συστήματος δορυφόρων, όπως του Δία, η κίνηση είναι πιο πολύπλοκη, καθώς η παλίρροια μεταβάλλει τους μεγάλους ημιάξονες των τροχιών των δορυφόρων, ενώ οι ίδιοι αλληλεπιδρούν μέσω βαρυτικών δυνάμεων. Επειδή η μεταβολή του a γίνεται με διαφορετικό ρυθμό για κάθε σώμα, ο λόγος των περιόδων περιφοράς αλλάζει με συνεχή τρόπο. Έτσι, αν δύο δορυφόροι ήταν αρχικά μακριά από κάποιο συντονισμό, θα μπορούσαν με την πάροδο του χρόνου, να βρεθούν σε συντονισμό, λόγω της *μετανάστευσης* (orbital migration) που προκαλεί η παλίρροια. Πιστεύουμε ότι αυτός είναι ο λόγος που τα συστήματα κανονικών δορυφόρων, τόσο του Δία όσο και του Κρόνου εμφανίζουν πολλαπλούς συντονισμούς περιόδου.

Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι πώς, τελικά το σύστημα «κλειδώνεται» σε συντονισμό και η όποια μετανάστευση των τροχιών λόγω παλίρροιας γίνεται πια με τέτοιο τρόπο ώστε ο λόγος των περιόδων να διατηρείται σταθερός και η εκκεντρότητα της τροχιάς σχεδόν απολύτως μηδενική, όπως συμβαίνει με τους δορυφόρους του Δία. Αυτό είναι το πρόβλημα της *αδιαβατικής διάβασης του συντονισμού* που η επίλυση του είναι αρκετά περίπλοκη και προβλέπει ότι: ανάλογα με τις τιμές του λόγου των μαζών, της ταχύτητας μετανάστευσης και τις αρχικές εκκεντρότητας κάθε τροχιάς τα δύο σώματα μπορούν είτε (α) να κλειδωθούν στο συντονισμό και η παλίρροια να αποσβέσει σιγά-σιγά (δρώντας ως τριβή) τις ταλαντώσεις των a και e , ή (β) να διασχίσουν το συντονισμό και να συνεχίσουν τη μετανάστευση με διαφορετικό ρυθμό (μέχρι τον επόμενο συντονισμό), αλλά και διαφορετικές πλέον εκκεντρότητες.

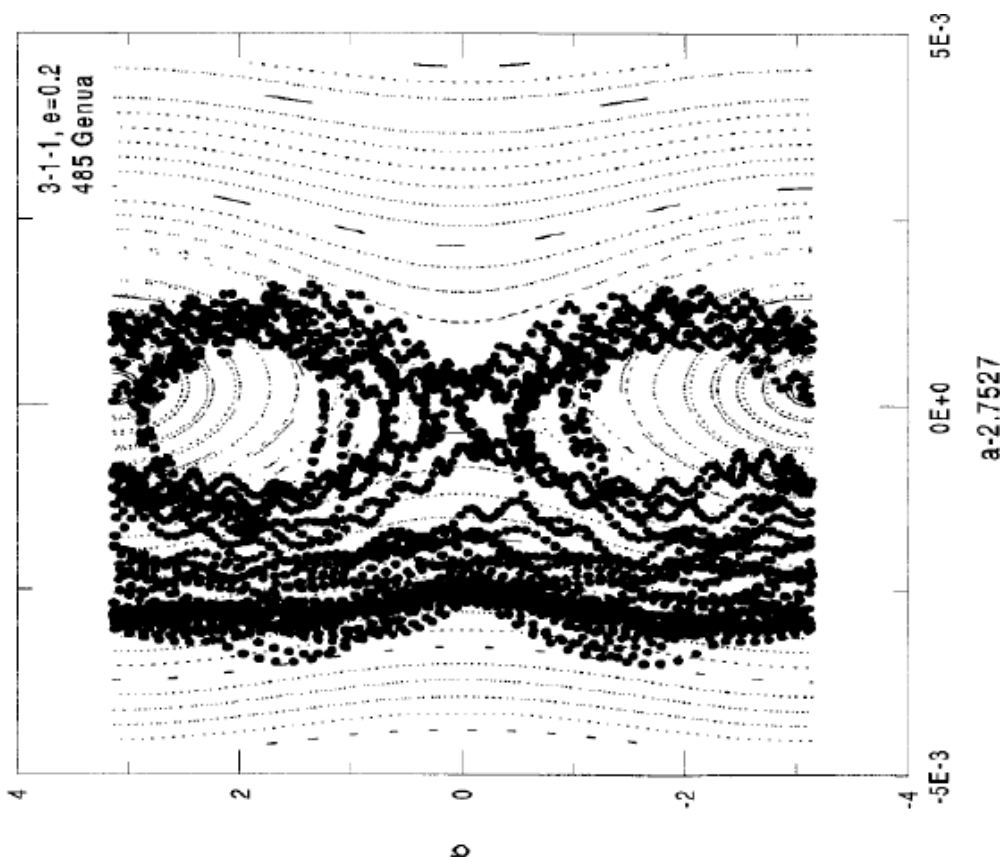
Με παρόμοιο τρόπο πιστεύουμε ότι σχηματίστηκαν τα εξωηλιακά συστήματα που απαρτίζονται από δύο πλανήτες σε συντονισμό. Η ακτινική μετανάστευση που οδήγησε στο «κλειδώμα» των πλανητών σε συντονισμό, δεν οφείλεται βέβαια στην παλίρροια του αστέρα, αλλά στην παλίρροια του πρωτοπλανητικού δίσκου, μέσα στον οποίο σχηματίστηκαν.

4.3.3 Οι Τροχιές των Αστεροειδών

Όπως ήδη αναλύσαμε, οι αστεροειδείς έχουν ευσταθείς τροχιές, αν κινούνται μακριά από τους βασικούς συντονισμούς με το Δία, τον Άρη ή τους άλλους πλανήτες. Αντίθετα, στις περιοχές των ισχυρών συντονισμών, οι τροχιές είναι χαοτικές και γι' αυτό το λόγο η αριθμητική πυκνότητα των αστεροειδών στις εν λόγω περιοχές είναι σχεδόν μηδενική. Σημειώνουμε ότι οι αστεροειδείς δέχονται παρέλξεις από όλους τους πλανήτες ταυτόχρονα, με συνέπεια να υπάρχουν ακόμη και *συντονισμοί μεταξύ τριών σωμάτων*, όπως π.χ. μεταξύ των περιόδων περιφοράς του αστεροειδή, του Δία και του Κρόνου, οι οποίοι προκαλούν επίσης την αστάθεια των τροχιών των αστεροειδών. Ένα παράδειγμα κίνησης αστεροειδούς σε τριπλό συντονισμό δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου φαίνονται οι χαοτικές μεταβολές του a .

Οι αστεροειδείς που υφίστανται τις χαοτικές μεταβολές λόγω των συντονισμών, αργά ή γρήγορα εγκαταλείπουν την κύρια ζώνη και μετατρέπονται σε NEAs. Αν όμως οι συντονισμοί αδειάζουν με την πάροδο του χρόνου (γι' αυτό και υπάρχουν τα διάκενα Kirkwood) τότε πώς είναι δυνατό να υπάρχουν ακόμη τόσοι πολλοί NEAs;

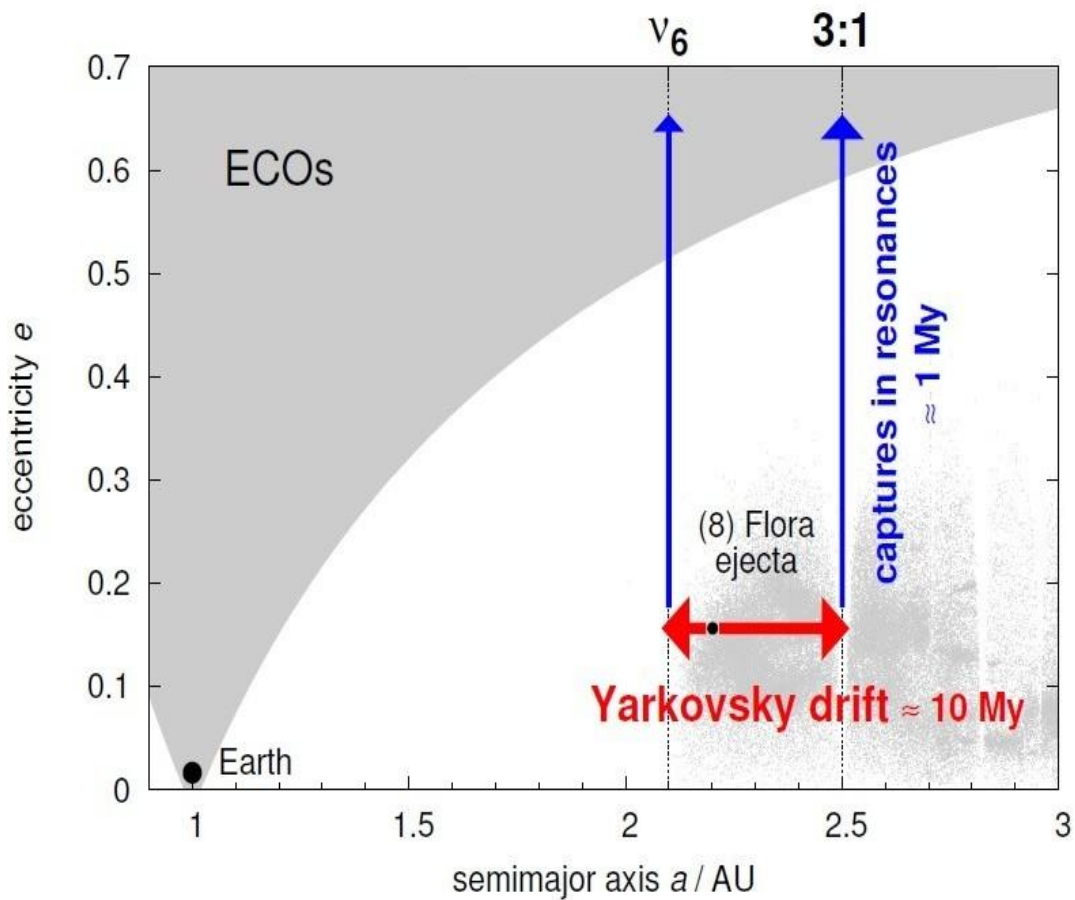
Σήμερα πιστεύουμε ότι το φαινόμενο Yarkovsky είναι ο κύριος μηχανισμός αναπλήρωσης του πληθυσμού των NEAs που επιτρέπει σε αστεροειδείς που αρχικά, κινούνται μακριά από τους βασικούς συντονισμούς να «πέσουν» μέσα στην περιοχή επιρροής τους. Τότε, μέσω του φαινομένου της χαοτικής διάχυσης που περιγράψαμε προηγουμένως, οι αστεροειδείς αυτοί θα μετατραπούν σε NEAs.



Εικόνα 84: Χρονική εξέλιξη της τροχιάς αστεροειδούς 485 Genua, ο οποίος βρίσκεται στον τριπλό συντονισμό 3:1:1

Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι οι κύριες πηγές NEAs είναι ο συντονισμός 3:1 με το Δία ($a = 2.5$ AU) και ο αιώνιος συντονισμός $g = g_6$ ($a = 2.1$ AU, συμβολίζεται με ν_6) όπου η συχνότητα μετάπτωσης του περιηλίου της τροχιάς ενός αστεροειδή είναι ίση

με αυτή της μετάπτωσης του περιηλίου του Κρόνου (όλοι οι υπόλοιποι συντονισμοί έχουν μικρή συνεισφορά). Ο χρόνος διαφυγής από αυτές τις περιοχές (λόγω της χαοτικής αύξησης της εκκεντρότητας πάνω από το όριο σύγκρουσης με τη Γη) είναι μόλις ~ 1 My. Ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένας αστεροειδής που κινείται ανάμεσα σε αυτούς τους συντονισμούς να μετακινηθεί κατά τη διεύθυνση του a (λόγω Yarkovsky) και να «πέσει» σε κάποιον από τους δύο είναι ~ 10 My. Έτσι, συνολικά ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να παραχθεί ένας νέος NEA είναι της τάξης των ~ 10 My. Επειδή ο μέσος χρόνος ζωής των NEAs στην περιοχή της Γης είναι επίσης της τάξης των ~ 10 My, συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός «παραγωγής» ισούται περίπου με το ρυθμό «καταστροφής» των NEAs και έτσι ο πληθυσμός τους είναι περίπου σταθερός, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του ηλιακού συστήματος.



Εικόνα 85: Σχηματική αναπαράσταση (εκκεντρότητα ως προς τον μεγάλο ημιάξονα) για την μεταφορά μετεωριτών από την Κύρια Ζώνη των αστεροειδών μέσω του φαινομένου Yarkovsky.

Στο πρώτο στάδιο διάρκειας ~ 10 My, το φαινόμενο Yarkovsky μεταβάλλει τους μεγάλους ημιάξονες των μετεωροειδών προς τις θέσεις κύριων συντονισμών (π.χ. ο αιώνιος συντονισμός ν_6 με τον Κρόνο και ο συντονισμός μέσης κίνησης 3:1 με τον Δία). Στο δεύτερο βήμα ο συντονισμός αυξάνει γρήγορα την εκκεντρότητα και έτσι σε ~ 1 My η τροχιά εισέρχεται στην διαγραμμισμένη περιοχή, όπου τέμνει την τροχιά της Γης

Κεφάλαιο 5 – Διαστημικά Ταξίδια

Διαστημική πτήση. Πτήση πέρα από την ατμόσφαιρα της Γης. Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με την εκτόξευση και την επιστροφή επανδρωμένων και μη διαστημικών σκαφών, το ταξίδι, την πλοήγηση, τη συνάντηση και τον ελλιμενισμό τους στο διάστημα.

5.1 Το Διαστημικό Περιβάλλον

Το διάστημα, όπως εξετάζεται εδώ, ορίζεται ως όλα τα σημεία πρόσβασης του σύμπαντος πέρα από την ατμόσφαιρα της Γης. Δεν υπάρχει οριστικό όριο πάνω από τη Γη στο οποίο ξεκινά το διάστημα, αλλά, όσον αφορά το περιοριστικό ύψος για οχήματα που έχουν σχεδιαστεί για ατμοσφαιρική πτήση, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι τα 45 km (28 μίλια) από την επιφάνεια του πλανήτη. Η χαμηλότερη πρακτική τροχιά για έναν τεχνητό δορυφόρο γύρω από τη Γη είναι περίπου 160 km (100 μίλια). Συγκριτικά, ο φυσικός δορυφόρος της Γης, η Σελήνη, περιφέρεται γύρω από τον πλανήτη σε μέση απόσταση περίπου 2.400 φορές μεγαλύτερη, στα 384.400 km (239.000 μίλια). Ακόμη και αυτή η απόσταση ωστόσο, είναι μικρή σε σύγκριση με το μέγεθος του ηλιακού συστήματος, όπου τα διαστημόπλοια πρέπει να διασχίσουν διαπλανητικές αποστάσεις που μετρώνται σε εκατοντάδες εκατομμύρια έως δισεκατομμύρια χιλιόμετρα, και είναι απειροελάχιστη σε σύγκριση με το μέγεθος του σύμπαντος. Τα πλησιέστερα γειτονικά αστέρια της Γης βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 40 τρισεκατομμύρια χιλιόμετρα (25 τρισεκατομμύρια μίλια). Εντούτοις, ο χώρος που χωρίζει τα κοσμικά αντικείμενα δεν είναι εντελώς κενός. Σε όλο αυτό το κενό, η ύλη (κυρίως υδρογόνο) είναι διασκορπισμένη σε εξαιρετικά χαμηλές πυκνότητες. Επιπλέον, το διάστημα διαπερνάται από βαρυτικά και μαγνητικά πεδία, ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας. Μέχρι το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, όλα τα συμπεράσματα για το διάστημα είχαν γίνει από παρατηρήσεις μέσω της παραμορφωτικής ατμόσφαιρας της Γης. Με την εμφάνιση των πυραύλων στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και στη συνέχεια των οργανωμένων δορυφόρων, των διαστημικών παρατηρητηρίων, των ανιχνευτών και των επανδρωμένων διαστημικών σκαφών, κατέστη δυνατή η άμεση εξερεύνηση της πολυπλοκότητας των διαστημικών φαινομένων.

Ένα άλλο σημαντικό περιβαλλοντικό χαρακτηριστικό του διαστήματος είναι η μικροβαρύτητα, μια συνθήκη που επιτυγχάνεται με την ισορροπία μεταξύ της φυγόκεντρης επιτάχυνσης ενός διαστημικού σκάφους σε τροχιά γύρω από τη Γη και της βαρύτητας της Γης. Αυτή η κατάσταση, στην οποία δεν υπάρχει καμία καθαρή δύναμη που ενεργεί σε ένα σώμα, μπορεί να προσομοιωθεί στη Γη μόνο με ελεύθερη πτώση σε έναν εκκενωμένο «πύργο πτώσης».

5.2 Είδη Διαστημικών Σκαφών

Το διαστημικό σκάφος είναι ένας γενικός όρος για αντικείμενα που εκτοξεύονται στο διάστημα π.χ. δορυφόροι και διαστημικοί ανιχνευτές σε τροχιά γύρω από τη Γη, πειραματικές κάψουλες, μονάδες τροχιάς ορισμένων οχημάτων εκτόξευσης (π.χ. το διαστημικό λεωφορείο των ΗΠΑ ή το ρωσικό Soyuz) και διαστημικοί σταθμοί. Τα διαστημικά σκάφη θεωρούνται χωριστά από τα πυραυλοκίνητα οχήματα που τα εκτοξεύουν κάθετα στο διάστημα ή σε τροχιά ή τα απομακρύνουν από τη περιοχή της

Γης. Ένας *διαστημικός ανιχνευτής* είναι ένα μη επανδρωμένο διαστημικό σκάφος που του δίνεται μια ταχύτητα αρκετά μεγάλη ώστε να του επιτρέψει να διαφύγει από τη βαρυτική έλξη της Γης. Ένας *ανιχνευτής στο βαθύ διάστημα* είναι ένας ανιχνευτής που αποστέλλεται πέρα από το σύστημα Γης – Σελήνης, αν σταλεί για να εξερευνήσει άλλους πλανήτες, ονομάζεται επίσης *πλανητικός ανιχνευτής*. Μια *κάψουλα πειράματος* είναι ένα μικρό μη επανδρωμένο εργαστήριο που συχνά ανακτάται μετά την πτήση του. Ένας *διαστημικός σταθμός* είναι μια τεχνητή κατασκευή που τοποθετείται σε τροχιά και είναι εξοπλισμένη για να υποστηρίξει την ανθρώπινη κατοίκηση για εκτεταμένες περιόδους.

Τα διαστημόπλοια διαφέρουν πολύ σε μέγεθος, σχήμα, πολυπλοκότητα και σκοπό. Αυτά που μοιράζονται ομοιότητες στο σχεδιασμό, τη λειτουργία ή και τα δύο συχνά ομαδοποιούνται σε οικογένειες προγραμμάτων π.χ. Gorizont, Meteor, Molniya, Resurs, Soyuz και Uragan στη Ρωσία. Explorer, Galaxy, Iridium, Milstar, Navstar, Nimbus, Orbview, Telstar και Voyager στις Ηνωμένες Πολιτείες. Astra, Europestar, Envisat, Hotbird, Meteosat και SPOT στην Ευρώπη. Anik και Radarsat στον Καναδά. Dong Fang Hong, Fengyun και Shenzhou στην Κίνα. Insat στην Ινδία και Ofeq στο Ισραήλ.

Το ελαφρύ βάρος και η λειτουργική αξιοπιστία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του διαστημικού σκάφους. Ανάλογα με την αποστολή τους, τα διαστημόπλοια μπορεί να περάσουν λεπτά, ημέρες, μήνες ή χρόνια στο περιβάλλον του διαστήματος. Οι λειτουργίες αποστολής πρέπει να εκτελούνται ενώ εκτίθενται σε υψηλό κενό, μικροβαρύτητα, ακραίες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και ισχυρή ακτινοβολία. Μια γενική διαφοροποίηση των διαστημικών σκαφών είναι ανά λειτουργία – επιστημονική ή εφαρμογή. Ένας επιστημονικός δορυφόρος ή ανιχνευτής μεταφέρει όργανα για τη λήψη δεδομένων για μαγνητικά πεδία, διαστημική ακτινοβολία, τη Γη και την ατμόσφαιρά της, τον Ήλιο ή άλλα αστέρια, τους πλανήτες και τα φεγγάρια τους και άλλα αστρονομικά αντικείμενα και φαινόμενα. Τα διαστημόπλοια εφαρμογών έχουν πρακτικά καθήκοντα, όπως τηλεπικοινωνίες, παρατήρηση της γης, στρατιωτική αναγνώριση, πλοήγηση και εντοπισμό θέσης, μετάδοση ισχύος και διαστημικών κατασκευών.

Αν και τα σχέδια των διαφόρων οικογενειών διαστημικών σκαφών και σκαφών ειδικού σκοπού ποικίλλουν ευρέως, υπάρχουν εννέα γενικές κατηγορίες υποσυστημάτων που βρίσκονται στα περισσότερα διαστημόπλοια. Αυτά είναι: α) το τροφοδοτικό, β) η ενσωματωμένη πρόωση, γ) οι επικοινωνίες, δ) ο έλεγχος στάσης (δηλαδή, η διατήρηση του προσανατολισμού ενός διαστημικού σκάφους προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και η κατεύθυνση των οργάνων του με ακρίβεια σε επιλεγμένους στόχους), ε) ο περιβαλλοντικός έλεγχος (κυρίως ρύθμιση των θερμοκρασιών των εξαρτημάτων του διαστημικού σκάφους), ζ) καθοδήγηση, πλοήγηση και έλεγχος πτήσης, η) επεξεργασία υπολογιστή και δεδομένων, θ) δομή (το πλαίσιο του σκελετού του διαστημικού σκάφους που υποστηρίζει φυσικά όλα τα άλλα υποσυστήματα), και ι) ένα σύστημα «παρακολούθησης της υγείας» που παρακολουθεί την κατάσταση του διαστημικού σκάφους και του ωφέλιμου φορτίου του.

5.3 Εκτόξευση στο Διάστημα

5.3.1 Βαρύτητα

Η βαρυτική έλξη της Γης ήταν ανέκαθεν ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στις διαστημικές πτήσεις. Λόγω των παρατηρήσεων και των υπολογισμών παλαιότερων επιστημόνων, οι πρωτοπόροι πυραύλων κατανοούσαν τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα και άλλες αρχές της διαστημικής πτήσης, αλλά η εφαρμογή αυτών των αρχών έπρεπε να περιμένει την ανάπτυξη της πυραυλικής ισχύος για να εκτοξεύσει ένα διαστημόπλοιο στο ύψος και την ταχύτητα που απαιτούνται για την αποστολή του.

Ένα διαστημόπλοιο και το όχημα εκτόξευσής του προβάλλονται προς τα πάνω από την μη ισορροπημένη πίεση μέσα στον κινητήρα του πυραύλου. Υπάρχει υψηλή πίεση στο κλειστό μπροστινό άκρο του θαλάμου ώθησης του πυραύλου, αλλά πολύ χαμηλότερη πίεση στο ανοιχτό πίσω άκρο, όπου τα καυσαέρια ρέουν έξω από το ακροφύσιο του θαλάμου. Αυτή η μη ισορροπημένη δύναμη ονομάζεται *ώθηση του πυραύλου*. Εάν η συνολική ώθηση των κινητήρων ήταν ακριβώς ίση με το βάρος ολόκληρου του συγκροτήματος διαστημικού σκάφους – εκτοξευτή κατά την απογείωση, το συγκρότημα δεν θα κινούνταν. Αλλά αν, για παράδειγμα, η ώθηση ήταν διπλάσια από αυτό το βάρος, το συγκρότημα θα ανέβαινε με αρχική επιτάχυνση ίση με την τυπική βαρυτική επιτάχυνση των 9,8 (32,2 πόδια) m/s^2 . Καθώς η μάζα του προωθητικού μέσου καταναλώνεται και εκτοξεύεται από τους πυραυλοκινητήρες, το όχημα συνεχώς ελαφραίνει. Επομένως, εάν η ώθηση διατηρείται σταθερή, η επιτάχυνση του οχήματος αυξάνεται καθώς ανεβαίνει.

Η βαρυτική έλξη της Γης στο ανερχόμενο διαστημόπλοιο υποχωρεί σταδιακά. Σε υψόμετρο 160 km (100 μίλια) εξακολουθεί να είναι στο 95% από τα 9,8 m/s^2 που είναι στην επιφάνεια της Γης και στα 2.700 km (1.680 μίλια) στο 50% (4,9 m/s^2). Για τους σκοπούς της διαστημικής πτήσης, η βαρυτική έλξη της Γης γίνεται αμελητέα μόνο σε αποστάσεις αρκετών εκατομμυρίων χιλιομέτρων, εκτός εάν ένα διαστημόπλοιο πλησιάζει τη Σελήνη και η σεληνιακή βαρύτητα (που αντιστοιχεί στο ένα έκτο της Γης) γίνεται κυρίαρχη.

Τα περισσότερα διαστημόπλοια εκτοξεύονται κάθετα. Αλλά αν η ταχύτητα του οχήματος παραμένει κάθετη στην επιφάνεια της Γης, δεν θα μπει σε τροχιά αλλά τελικά θα πέσει πίσω στη Γη (εκτός αν μπορεί να φτάσει σε μια ταχύτητα αρκετά υψηλή ώστε να ξεφύγει από τη βαρυτική επιρροή της Γης). Για να επιτευχθεί η τροχιά της Γης, το όχημα εκτόξευσης πρέπει να στραφεί έτσι ώστε το διάνυσμα της ταχύτητάς του να είναι παράλληλο με την επιφάνεια της Γης. Όταν φτάσει σε ταχύτητα αρκετά υψηλή, ώστε η φυγόκεντρη επιτάχυνση της καμπύλης διαδρομής του γύρω από τη Γη να εξισορροπεί ακριβώς τη βαρυτική έλξη της Γης σε αυτό το ύψος, το διαστημόπλοιο θα βρίσκεται σε τροχιά.

5.3.2 Σταδιοποίηση Πυραύλου

Επειδή είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η υψηλή ταχύτητα που απαιτείται για την επίτευξη τροχιάς, τα οχήματα εκτόξευσης χρειάζονται πολλά στάδια για να φτάσουν αυτή την ταχύτητα. Η τεχνική της *σταδιοποίησης* (staging) χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα συστήματα πυραύλων τοποθετημένα σε γραμμική ακολουθία. Αρχικά, η πρώτη (η πιο πίσω), βαθμίδα αναφλέγεται και (μερικές φορές με τη βοήθεια συνδεδεμένων πυραύλων ενίσχυσης) ανυψώνει το όχημα με αυξανόμενη ταχύτητα μέχρι να εξαντληθούν τα προωθητικά καύσιμα του. Σε εκείνο το σημείο το *στάδιο* (επίπεδο) πέφτει, ελαφρύνοντας το όχημα, και η δεύτερη βαθμίδα αναφλέγεται. Αυτό

το στάδιο, το οποίο είναι μικρότερο και χαμηλότερης ώθησης από το πρώτο, επιταχύνει το εναπομείναν όχημα μακρύτερα. Η χρήση πρόσθετων σταδίων ακολουθεί γενικά το ίδιο μοτίβο, έως ότου το ωφέλιμο φορτίο (το διαστημόπλοιο) φτάσει σε ταχύτητα επαρκή για να παρέχει τη φυγόκεντρη επιτάχυνση που απαιτείται για να εξισορροπηθεί η βαρύτητα της Γης και να μπει σε τροχιά.

Για ορισμένες αποστολές το τελικό στάδιο δεν χρησιμοποιείται κατά την αρχική ανάβαση στο διάστημα, αλλά προορίζεται για ένα μεταγενέστερο βήμα της πτήσης. Για παράδειγμα, ένα διαστημόπλοιο που μεταφέρεται σε όχημα τριών σταδίων μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δύο πρώτα στάδια για να επιτύχει μια χαμηλή «τροχιά στάθμευσης» γύρω από τη Γη. Στη συνέχεια προωθείται σε υψηλότερη τροχιά ή μακριά από τη Γη από το τρίτο στάδιο.

Ο αριθμός των σταδίων που απαιτούνται για να αυξηθεί η ταχύτητα του ωφέλιμου φορτίου στην τροχιακή ταχύτητα εξαρτάται όχι μόνο από τις παραμέτρους της αποστολής (π.χ. το τροχιακό υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εκτόξευσης και το είδος της τροχιάς που πρέπει να επιτευχθεί) αλλά και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων σταδίων του εκτοξευτήρα. Η μέγιστη αύξηση της ταχύτητας που επιτυγχάνεται σε οποιοδήποτε στάδιο του οχήματος εκτόξευσης καθορίζεται από την απόδοση του κινητήρα πυραύλων του (η οποία μετριέται από την ποσότητα ώσης που μπορεί να αναπτύξει από την καύση 1 kg προωθητικού ανά δευτερόλεπτο) και από το ποσοστό προωθητικού που αντιστοιχεί στην αρχική συνολική μάζα του εκάστοτε σταδίου. Ορισμένα οχήματα πρώιμης εκτόξευσης χρειάστηκαν πέντε στάδια για να φτάσουν σε τροχιά. Τα περισσότερα τρέχοντα οχήματα εκτόξευσης χρειάζονται μόνο δύο. Παρόλο που έχει διεξαχθεί έρευνα για πολλά χρόνια για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών για την επίτευξη τροχιάς με ένα μόνο στάδιο (συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ατμοσφαιρικών κινητήρων – που χρησιμοποιούν αέρα – για τη μείωση της ποσότητας προωθητικού που πρέπει να μεταφέρει το όχημα εκτόξευσης), ένα τέτοιο όχημα δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί.

5.3.3 Ρυθμοί Επιτάχυνσης

Γενικά, όσο περισσότερο χρειάζεται ένα διαστημικό όχημα για να φύγει από την ατμόσφαιρα της Γης και να επιτύχει την απαιτούμενη ταχύτητα, τόσο λιγότερο οικονομική γίνεται η διαδικασία. Σε χαμηλές επιταχύνσεις, το όχημα εκτόξευσης σπαταλά μεγάλο μέρος του προωθητικού του επειδή, στην πραγματικότητα, επενδύει σχεδόν 10 μέτρα ανά δευτερόλεπτο ταχύτητας κάθε δευτερόλεπτο ταξιδιού μόνο για να αντιμετωπίσει τη βαρυτική επιτάχυνση της Γης, συν την απώλεια πρόσθετης ταχύτητας που υπερνικά την αντίσταση της ατμόσφαιρας. Η μέγιστη επιτάχυνση εμφανίζεται στο τέλος της καύσης του πυραυλοκινητήρα του τελευταίου σταδίου, όταν έχει καταναλωθεί όλο το προωθητικό και η μάζα του οχήματος είναι χαμηλότερη. Αυτό το μέγιστο περιορίζεται από την επιτάχυνση που μπορεί να αντέξει η δομή ή το ωφέλιμο φορτίο του οχήματος. Στις επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις, μια επιτάχυνση περίπου εξαπλάσια από αυτή της βαρύτητας θεωρείται η μέγιστη ανεκτή όταν το ανθρώπινο σώμα είναι τοποθετημένο κάθετα στη δύναμη επιτάχυνσης – δηλαδή με το κεφάλι και την καρδιά στο ίδιο επίπεδο.

5.3.4 Τροχιές Πτήσης

Υπάρχουν τέσσερις γενικοί τύποι τροχιών: α) ηχητικοί πύραυλοι, β) η Γήινη τροχιά, γ) η διαφυγή της Γης και δ) η πλανητική.

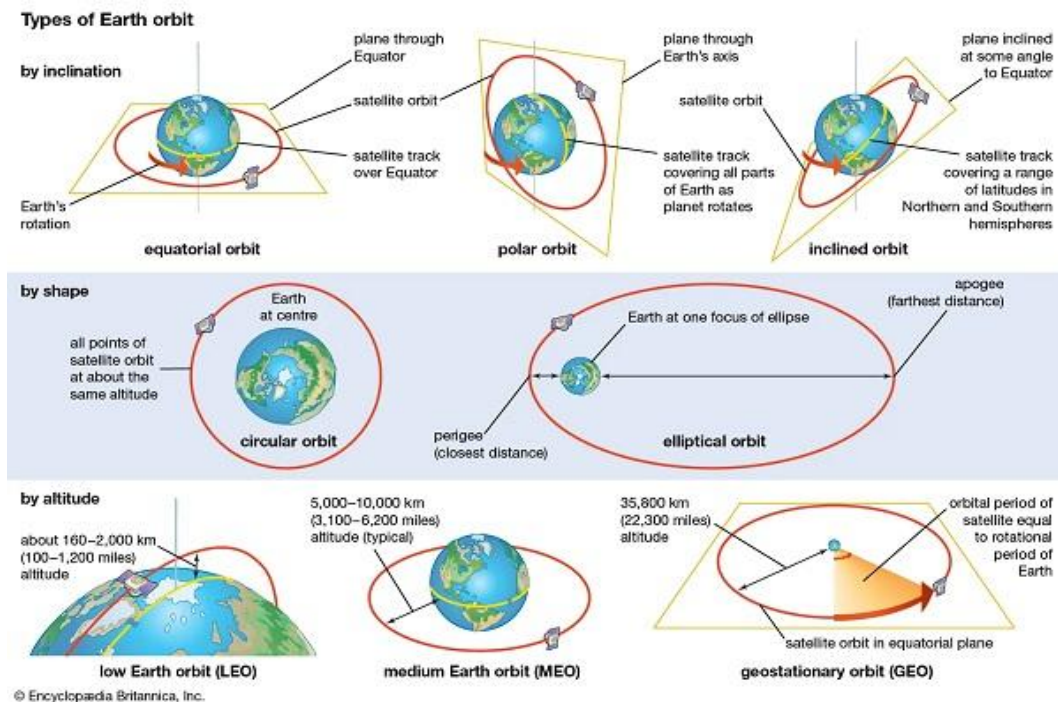
5.3.4.1 Ηχητικοί Πύραυλοι

Οι ηχητικοί πύραυλοι παρέχουν το μόνο μέσο για την πραγματοποίηση επιστημονικών μετρήσεων σε υψόμετρα 45 – 160 km (28 – 100 μίλια), μεταξύ του μέγιστου ύψους των ιπτάμενων μπαλονιών και του ελάχιστου ύψους των δορυφόρων σε τροχιά. Μπορούν να είναι μονοβάθμια ή πολυβάθμια οχήματα και εκτοξεύονται σχεδόν κάθετα. Αφού όλα τα στάδια πυραύλων έχουν εξαντλήσει τα καύσιμα τους και έχουν πέσει μακριά, το τμήμα ωφέλιμου φορτίου συνεχίζει να κινείται προς τα πάνω, χάνοντας αργά ταχύτητα λόγω της βαρύτητας. Η ανοδική ταχύτητα πέφτει στο μηδέν στο υψόμετρο κορυφής και το ωφέλιμο φορτίο αρχίζει στη συνέχεια να πέφτει. Συνήθως, το ωφέλιμο φορτίο ανακτάται με αλεξίπτωτο και πετά ξανά. Πριν από το άνοιγμα του αλεξίπτωτου, η διαδρομή πτήσης ακολουθεί μια παραβολική τροχιά και ο χρόνος πτήσης είναι μικρότερος από 30 λεπτά.

5.3.4.2 Γήινη Τροχιά

Η πτήση στη γήινη τροχιά συνήθως επιτυγχάνεται με την εκτόξευση ενός πυραύλου κάθετα από την επιφάνεια της Γης και στη συνέχεια δίνοντας κλίση στην τροχιά του έτσι ώστε η πτήση του να είναι παράλληλη με την επιφάνεια της τη στιγμή που το όχημα φτάνει σε τροχιακή ταχύτητα στο επιθυμητό ύψος. Η τροχιακή ταχύτητα είναι η ταχύτητα που παρέχει τη φυγόκεντρη επιτάχυνση που απαιτείται για να εξισορροπηθεί ακριβώς η έλξη της βαρύτητας της Γης στο όχημα σε αυτό το ύψος. Σε αυτό το σημείο ο πυραυλοκινητήρας σβήνει. Σε υψόμετρο 200 km (125 μίλια), η ταχύτητα που απαιτείται για την περιφορά της Γης είναι περίπου 29,000 km (18,000 μίλια) την ώρα. Επειδή αυτό το υψόμετρο είναι πάνω από το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας, η αεροδυναμική αντίσταση δεν είναι μεγάλη και το διαστημόπλοιο θα συνεχίσει να περιφέρεται σε τροχιά για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ο χρόνος που απαιτείται για ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά να κάνει μια πλήρη περιστροφή ονομάζεται *περίοδος τροχιάς*. Στα 200 km αυτό είναι περίπου 90 λεπτά. Η τροχιακή περίοδος αυξάνεται με το υψόμετρο για δύο λόγους. Πρώτον, καθώς αυξάνεται το υψόμετρο, η βαρύτητα της Γης μειώνεται, επομένως μειώνεται η τροχιακή ταχύτητα που απαιτείται για την εξισορρόπησή της. Δεύτερον, το διαστημόπλοιο πρέπει να ταξιδέψει μακρύτερα για να κυκλώσει τη Γη. Για παράδειγμα, σε υψόμετρο 1.730 km (1.075 μίλια), η τροχιακή ταχύτητα είναι 25,400 km (15,780 μίλια) την ώρα και η περίοδος είναι δύο ώρες. Σε περίπου 35.800 km (22.250 μίλια), η ταχύτητα ενός διαστημικού σκάφους είναι 11,100 km (6,900 μίλια) την ώρα και η περίοδος τροχιάς του έχει ιδιαίτερη αξία. Είναι ίση με μια αστρική ημέρα, η περίοδος περιστροφής της Γης που μετράται σε σχέση με τα σταθερά αστέρια (περίπου τέσσερα λεπτά μικρότερη από τη συμβατική 24ωρη ηλιακή ημέρα). Ένα διαστημόπλοιο σε αυτή την τροχιά έχει ιδιότητες επιθυμητές για ορισμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, εάν η τροχιά βρίσκεται στο επίπεδο του Ισημερινού της Γης, το διαστημόπλοιο φαίνεται σε έναν παρατηρητή στη Γη να είναι ακίνητο στον ουρανό. Η συγκεκριμένη τροχιά, που ονομάζεται γεωστατική τροχιά, χρησιμοποιείται για επικοινωνίες και μετεωρολογικούς δορυφόρους.



Εικόνα 86: Δορυφορικές τροχιές. Βασικά χαρακτηριστικά των τροχιών στις οποίες μπορεί να τοποθετηθεί ένας δορυφόρος γύρω από τη Γη, κατηγοριοποιημένα κατά κλίση, σχήμα και υψόμετρο. Μια δεδομένη τροχιά μπορεί να περιγραφεί με όρους συνδυασμών αυτών των χαρακτηριστικών.

Όλα τα παραπάνω σχήματα υποθέτουν μια κυκλική τροχιά, η οποία για ένα διαστημόπλοιο είναι συχνά ιδανική αλλά δύσκολο να επιτευχθεί. Συνήθως η τροχιά ενός διαστημικού σκάφους είναι μια έλλειψη με ύψος περιγείου (πλησιέστερη απόσταση από τη Γη) και ύψος απόγειου (μεγαλύτερη απόσταση από τη Γη). Εάν υπάρχει διαθέσιμη ώθηση, η τροχιά ενός διαστημικού σκάφους μπορεί να γίνει πιο σχεδόν κυκλική μειώνοντας την ταχύτητα στο περίγειο (που μειώνει το απόγειο) ή αυξάνοντας την ταχύτητα στο απόγειο (που ανεβάζει το περίγειο). Η ώθηση σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται κατά ή προς την κατεύθυνση της πτήσης, αντίστοιχα.

Κατά την εκτόξευση ενός διαστημικού σκάφους στην τροχιά της Γης, το όχημα εκτόξευσης συνήθως γέρνει μετά την απογείωση σε ανατολική κατεύθυνση. Η εκτόξευση προς τα ανατολικά γίνεται για να εκμεταλλευτεί την ταχύτητα που μεταδίδεται στο όχημα από την περιστροφή της Γης προς τα ανατολικά. Αυτή η ταχύτητα περιστροφής της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη στον Ισημερινό, περίπου 1.670 km (1.037 μίλια) την ώρα, και είναι 1.470 km (913 μίλια) την ώρα στο γεωγραφικό πλάτος του ακρωτηρίου Canaveral, Φλόριντα. Στο ακόμη υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος της θέσης εκτόξευσης Baikonur της Ρωσίας στο Καζακστάν, η επιφανειακή ταχύτητα είναι 1.170 km (727 μίλια) την ώρα. Είναι δυνατή η εκτόξευση ενός διαστημικού σκάφους σε μια δυτική τροχιά, αλλά απαιτείται πρόσθετη ταχύτητα, και επομένως πρόσθετη δαπάνη προωθητικού, για να επιτευχθεί μια τροχιά του ίδιου υψομέτρου σε σύγκριση με μια ανατολική τροχιά.

Εάν το διαστημόπλοιο πρόκειται να τεθεί σε μια πολική τροχιά – μια τροχιά που διασχίζει τους πόλους της Γης – εκτοξεύεται προς βόρεια ή νότια κατεύθυνση. Αν και το όφελος από μια ανατολική εκτόξευση χάνεται, ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά κάθετη στον Ισημερινό προσφέρει άλλα πλεονεκτήματα. Καθώς η Γη στρέφεται γύρω από τον άξονά της, το διαστημόπλοιο ταξιδεύει σε όλα τα μέρη του πλανήτη κάθε

λίγες περιστροφές. Οι δορυφόροι που παρακολουθούν το περιβάλλον της Γης, όπως οι δορυφόροι τηλεπισκόπησης και ορισμένοι μετεωρολογικοί δορυφόροι, χρησιμοποιούν πολικές τροχιές, όπως και ορισμένοι στρατιωτικοί δορυφόροι επιτήρησης.

Για κάθε εκτόξευση, ο κύριος περιορισμός είναι η ανάγκη για μια τροχιά που επιτρέπει την απόρριψη του πρώτου (και συχνά του δεύτερου) σταδίου του οχήματος εκτόξευσης, έτσι ώστε να μην επηρεάσει μια κατοικημένη περιοχή, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει τραυματισμούς και ζημιές. Για να αποκτήσουν τα οφέλη μιας ανατολικής εκτόξευσης, επομένως, τα οχήματα των ΗΠΑ εκτοξεύονται πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό (π.χ. από το ακρωτήριο Canaveral), τα οχήματα της Ευρώπης πάνω από τον Ατλαντικό από το Κουρου στη Γαλλική Γουιάνα και τα οχήματα της Ρωσίας από το Baikonur ή το Plesetsk σε αραιοκατοικημένες περιοχές του Καζακστάν και Ρωσία, αντίστοιχα. Ο περιορισμός της αποφυγής επιπτώσεων σε πρώιμο στάδιο σε κατοικημένες περιοχές αναγκάζει τις Ηνωμένες Πολιτείες να πραγματοποιήσουν τις πολικές εκτοξεύσεις τους από την αεροπορική βάση Vandenberg, Καλιφόρνια, νότια πάνω από τον Ειρηνικό Ωκεανό και απαιτεί από το Ισραήλ να εκτοξεύει δυτικά πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα, παρά το επιπλέον προωθητικό που απαιτείται και τη συνακόλουθη μείωση του ωφέλιμου φορτίου που μπορεί να τεθεί σε τροχιά.

Ξεκινώντας τη δεκαετία του 1990, οι τροχιακές πτήσεις πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας οχήματα εκτόξευσης που απελευθερώνονταν από αεροσκάφη υψηλής πτήσης. Τυπικά, το όχημα, ένας πύραυλος με μικρά φτερά, πολλαπλών σταδίων, μεταφέρεται ψηλά κάτω από την άτρακτο ενός τροποποιημένου εμπορικού αεροσκάφους σε υψόμετρο περίπου 12 km (40.000 πόδια) πάνω από ανοιχτό ωκεανό, όπου απελευθερώνεται. Αφού το όχημα πέσει για λίγο σε οριζόντια θέση, ο κινητήρας πυραύλων του πρώτου σταδίου του αναφλέγεται και απομακρύνεται από το αεροσκάφος και αρχίζει να ανεβαίνει. Η πτέρυγα, η οποία παρέχει αεροδυναμική ανύψωση για το πρώτο μέρος της πτήσης, απορρίπτεται με το εξαντλημένο πρώτο στάδιο. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ικανό να μεταφέρει ελαφρούς δορυφόρους, βάρους έως 500 κιλά (1.100 λίβρες) σε μια χαμηλή τροχιά της Γης.

Το 1999 η πρώτη τροχιακή εκτόξευση από θαλάσσια πλατφόρμα πραγματοποιήθηκε από μια τοποθεσία στον Ειρηνικό Ωκεανό, στον Ισημερινό στις 154° Δ. Το όχημα εκτόξευσης και το ωφέλιμο φορτίο συναρμολογήθηκαν οριζόντια σε ένα θαλάσσιο λιμάνι (Long Beach, Καλιφόρνια) και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν από μια τροποποιημένη πλατφόρμα γεώτρησης πετρελαίου στη θέση εκτόξευσης, όπου ανεγέρθηκε και εκτοξεύτηκε ο εκτοξευτής. Η χρήση της ιδέας εκτόξευσης από τη θάλασσα επιτρέπει πολύ μεγάλα οχήματα εκτόξευσης που μπορούν να στείλουν ωφέλιμα φορτία σε γεωστατική τροχιά άνω των 5.000 kg (11.000 λίβρες).

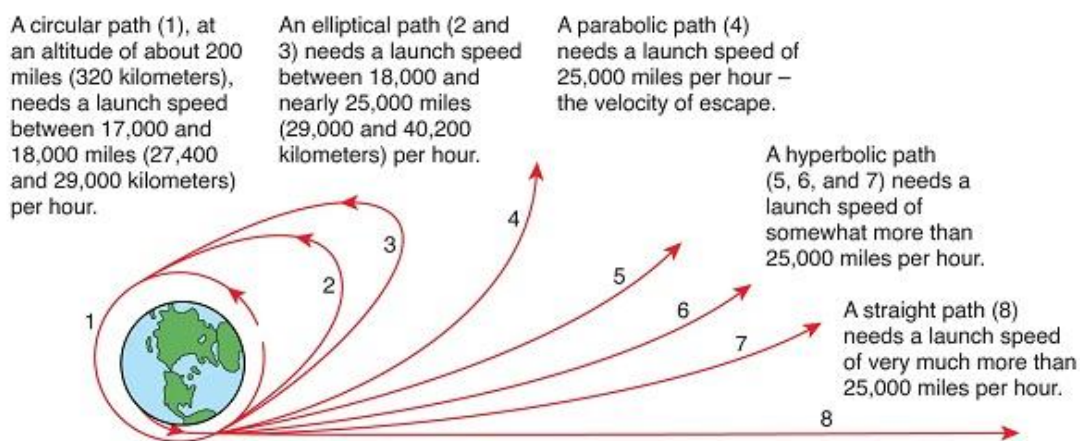
Το όφελος από τη χρήση μιας κινητής πλατφόρμας εκτόξευσης, είτε αερομεταφερόμενη είτε θαλάσσια, είναι η δυνατότητα εκτόξευσης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση – το πιο σημαντικό, προς τα ανατολικά από τον Ισημερινό για να αξιοποιηθεί στον έπακρον η περιστροφή της Γης – αποφεύγοντας κάθε επίδραση των πρώιμων σταδίων του οχήματος σε κατοικημένες περιοχές .

5.3.4.3 Διαφυγή της Γης

Για να ξεφύγει εντελώς από τη βαρύτητα της Γης ένα διαστημόπλοιο, χρειάζεται ταχύτητα εκτόξευσης περίπου 40.000 km (25.000 μίλια) την ώρα. Εάν στη συνέχεια

δεν έλθει κάτω από τη βαρυτική επίδραση ενός άλλου ουράνιου σώματος, θα πάει σε μια τροχιά γύρω από τον Ήλιο σαν ένα μικροσκοπικό πλανητοειδή. Με ακριβή χρονισμό, ένα διαστημόπλοιο μπορεί να σταλεί σε μια τροχιά που θα το μεταφέρει κοντά στη Σελήνη. Στην περίπτωση των πτήσεων σεληνιακής προσγείωσης του Απόλλωνα, το διαστημικό σκάφος τοποθετήθηκε σε μια τροχιά που υπολογίζεται να περνά μπροστά από τη Σελήνη και, υπό την επίδραση της σεληνιακής βαρύτητας, να αιωρείται γύρω από την μακρινή πλευρά. Εάν δεν είχε γίνει ελιγμός αλλαγής ταχύτητας, το διαστημικό σκάφος θα είχε περιστραφεί γύρω από τη Σελήνη και θα επέστρεφε σε μια τροχιά προς τη Γη. Μειώνοντας την ταχύτητα πτήσης στην μακρινή πλευρά της Σελήνης, οι αστροναύτες του Απόλλων τοποθέτησαν το σκάφος τους σε μια σεληνιακή τροχιά που συγκρατείται από τη σεληνιακή βαρύτητα. Παρόμοιοι ελιγμοί χρησιμοποιήθηκαν για την τροχιά πολλών διαστημοπλοίων γύρω από τον Άρη, το διαστημόπλοιο Magellan γύρω από την Αφροδίτη, το διαστημόπλοιο Galileo γύρω από τον Δία, το διαστημόπλοιο Near Earth Asteroid Rendezvous Shoemaker (NEAR Shoemaker) γύρω από τον αστεροειδή Έρος και το διαστημόπλοιο Cassini γύρω από τον Κρόνο.

Gravity versus launch speed



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 87: Η ταχύτητα εκτόξευσης που απαιτείται για ένα διαστημόπλοιο για να ξεφύγει από τη βαρυτική έλξη της Γης διαφέρει ανάλογα με την τροχιά του.

Το λεγόμενο πρόβλημα των τριών σωμάτων της ουράνιας μηχανικής (στην περίπτωση των αποστολών Απόλλων, των σχετικών κινήσεων της Γης, του διαστημικού σκάφους και της Σελήνης υπό την αμοιβαία βαρυτική τους επίδραση) είναι εξαιρετικά περίπλοκο και δεν έχει γενική λύση. Αν και οι εξισώσεις που εκφράζουν τις σχετικές κινήσεις μπορούν να γραφτούν για συγκεκριμένες περιπτώσεις, καμία μέθοδος προσεγγιστικής λύσης δεν ήταν εφικτή πριν από την ανάπτυξη ψηφιακών υπολογιστών υψηλής ταχύτητας για τον υπολογισμό τροχιών πυραύλων μεγάλου βεληνεκούς. Οι υπολογιστές ενσωματώνουν αριθμητικά τις περίπλοκες εξισώσεις κίνησης, δείχνουν την πλήρη τροχιά του διαστημικού σκάφους σε διαδοχικές θέσεις μέσα στο διάστημα και συγκρίνουν την πραγματική διαδρομή πτήσης με την προγραμματισμένη διαδρομή σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

5.3.4.4 Πλανητική τροχιά

Λόγω της ελλειπτικής φύσης των πλανητικών τροχιών, οι αποστάσεις ποικίλλουν μεταξύ της Γης και των άλλων πλανητών. Στην περίπτωση των πλησιέστερων

γειτόνων της Γης, της Αφροδίτης και του Άρη, μια λεγόμενη *ενοϊκή ευκαιρία εκτόξευσης* εμφανίζεται περίπου κάθε δύο χρόνια. Οι πτήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και άλλες φορές, αλλά η απαιτούμενη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη και το χρονικό διάστημα μεγαλύτερο ή (για ένα δεδομένο όχημα εκτόξευσης) το ωφέλιμο φορτίο πρέπει να είναι μικρότερο σε βάρος.

Η τροχιά από τη Γη στην Αφροδίτη ή τον Άρη μπορεί να σχεδιαστεί για να εκμεταλλευτεί τις μεταβαλλόμενες τροχιακές σχέσεις των πλανητών για την πιο οικονομική πτήση από άποψη καυσίμου και ενέργειας. Τέτοιες πλεονεκτικές διαδρομές, που ονομάζονται *τροχιές Hohmann* ή *τροχιές μεταφοράς*, περιγράφηκαν τη δεκαετία του 1920. Αν και αυτές οι τροχιές απαιτούν τη μικρότερη ταχύτητα, είναι μεγάλης διάρκειας (για παράδειγμα 260 ημέρες μέχρι τον Άρη). Έτσι, χρησιμοποιείται συχνά μια συμβιβαστική τροχιά, όπως στην περίπτωση των *Mariners 6 και 7* το 1969. Εκτοξεύτηκε στις 24 Φεβρουαρίου 1969, το *Mariner 6* πέρασε σε απόσταση 3.430 km (2.130 μίλια) από τον Άρη 157 ημέρες αργότερα, όταν ο πλανήτης ήταν 92,8 εκατομμύρια χιλιόμετρα (57,7 εκατομμύρια μίλια) από τη Γη.



Εικόνα 88: Η Γη όπως φωτογραφήθηκε από το διαστημικό ανιχνευτή *Galileo* κατά τη διάρκεια της πτήσης του τον Δεκέμβριο του 1990 με τη βοήθεια της βαρύτητας του πλανήτη. Νωρίτερα, τον Φεβρουάριο, είχε παρακάμψει την Αφροδίτη και πέρασε ξανά κοντά στη Γη τον Δεκέμβριο του 1992 πριν βγει από το εσωτερικό ηλιακό σύστημα για να συναντήσει τον Δία τον Δεκέμβριο του 1995

Ορισμένες τροχιές χρησιμοποιούν την πτώση στο βαρυτικό πεδίο ενός πλανήτη για να μεταφέρουν ορμή από τον πλανήτη στο διαστημόπλοιο, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητά του και αλλάζοντας την κατεύθυνσή του. Αυτή η τεχνική της βαρυτικής υποβοήθησης ή σφεντόνας, έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για την αποστολή πλανητικών ανιχνευτών στους προορισμούς τους. Για παράδειγμα, ο ανιχνευτής *Galileo* κατά τη διάρκεια του εξαετούς ταξιδιού του στον Δία πέρασε από την Αφροδίτη μία φορά και τη Γη δύο φορές για να φτάσει στον τελικό στόχο του το 1995.

Οι ίδιες σκέψεις ισχύουν για τις πλανητικές τροχιές των διαστημόπλοιων που προορίζονται για άλλα αντικείμενα στο βαθύ διάστημα, όπως αστεροειδείς και

κομήτες. Για παράδειγμα, το σχέδιο πτήσης του NEAR Shoemaker ενσωμάτωσε ένα πέρασμα από τη Γη που αναμόρφωσε την τροχιά.

Η τοποθέτηση ενός διαστημικού σκάφους σε τροχιά γύρω από έναν πλανήτη (ή κομήτη ή αστεροειδή) απαιτεί επαρκή μείωση της ταχύτητας του διαστημικού σκάφους για να επιτρέψει στη βαρύτητα του πλανήτη να τον συλλάβει. Μέχρι το 1997, τέτοιοι ελιγμοί πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο σύστημα πρόωσης του διαστημικού σκάφους για τη μετάδοση της απαραίτητης ώθησης, όπως έγινε για τον Απόλλωνα. Μια νέα διαδικασία που ονομάζεται *αεροπέδηση*, που δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στο διαστημόπλοιο χαρτογράφησης ραντάρ Magellan στην Αφροδίτη το 1993, χρησιμοποιήθηκε το 1997-98 για να μειώσει την ταχύτητα του Mars Global Surveyor, εξοικονομώντας σημαντική ποσότητα προωθητικού μέσου και επιτρέποντας έτσι τη πτήση μεγαλύτερου ωφέλιμου φορτίου. Σε αυτή τη διαδικασία, το διαστημόπλοιο χρησιμοποιεί μια σύντομη καύση του ενσωματωμένου συστήματος πρόωσής του για να τοποθετήσει το διαστημόπλοιο σε μια εξαιρετικά έκκεντρη ελλειπτική τροχιά με το περίγειο να βυθίζεται ακριβώς κάτω από τις εξωτερικές παρυφές της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Κατά τη διάρκεια κάθε διέλευσης από αυτό το τμήμα, η έλξη της ατμόσφαιρας επιβραδύνει ελαφρώς το διαστημόπλοιο, μειώνοντας το απόγειο της τροχιάς. Μετά από πολλά περάσματα η τροχιά γίνεται κυκλική και η τροχιακή αποστολή μπορεί να διεξαχθεί. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ξανά με επιτυχία στην Οδύσσεια του Άρη (Mars Odyssey) το 2001-02 και έκτοτε έχει γίνει συνήθης πρακτική για την περιφορά διαστημικών σκαφών γύρω από πλανήτες με ατμόσφαιρες.

5.3.5 Πλοήγηση

Το ταξίδι από το σημείο Α στο σημείο Β στο διάστημα δεν είναι σχεδόν ποτέ σε ευθεία γραμμή ή με σταθερή ταχύτητα λόγω των πολλών επιρροών στο σώμα που κινείται. Η βάση για τη διαστημική πλοήγηση είναι η αδρανειακή καθοδήγηση, δηλαδή η καθοδήγηση που βασίζεται στην αδράνεια ενός περιστρεφόμενου γυροσκοπίου, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές δυνάμεις και χωρίς αναφορά στον Ήλιο ή τα αστέρια. Με τη χρήση τριών γυροσκοπίων και επιταχυνσιόμετρων, το σύστημα πλοήγησης ενός διαστημικού σκάφους μπορεί να κάνει ακριβείς μετρήσεις οποιασδήποτε αλλαγής στην ταχύτητα, είτε θετική είτε αρνητική, κατά μήκος οποιουδήποτε ή και των τριών κύριων αξόνων. Αλλάζοντας προσέγγιση (διεξαγωγή περιστροφής γύρω από έναν ή περισσότερους άξονες) και πυροδοτώντας έναν ή περισσότερους κινητήρες ώσης, ένα διαστημόπλοιο μπορεί να κάνει διορθώσεις στην τροχιά του.

Τα συστήματα αδρανειακής καθοδήγησης, ανεξάρτητα από το πόσο ακριβή είναι, υπόκεινται σε μικροσκοπικά σφάλματα που μπορούν να συσσωρευτούν σε μεγάλα ταξίδια σε σημαντικές αποκλίσεις από την απαιτούμενη τροχιά. Ως εκ τούτου, πολλά διαστημόπλοια πλανητικής εξερεύνησης χρησιμοποιούν έναν *ιχνηλάτη αστεριών*, του οποίου το μικρό τηλεσκόπιο παρακολουθεί αρκετά προ-προγραμματισμένα αστέρια, παρέχοντας έτσι μια ακριβή συνεχή ουράνια «διόρθωση» στη θέση του διαστημικού σκάφους και κατευθύνοντας τον υπολογιστή του διαστημικού σκάφους στη διόρθωση του συστήματος αδρανειακής καθοδήγησης. Όταν υπάρχει επαρκής χρηματοδότηση, ορισμένοι ανιχνευτές στο βαθύ διάστημα παρακολουθούνται στη Γη από ανθρώπινους ελεγκτές πτήσης, οι οποίοι στέλνουν εντολές στον υπολογιστή του διαστημικού σκάφους από καιρό σε καιρό για να διορθώσουν την πορεία του διαστημικού σκάφους.

Κατά τη φάση εκτόξευσης, οι διορθώσεις στις αποκλίσεις στην προγραμματισμένη διαδρομή πτήσης γίνονται συνήθως αμέσως με μικρούς κινητήρες ώθησης στο όχημα εκτόξευσης, με εκτροπή του ακροφυσίου εξάτμισης του πυραύλου ή με την ταλάντωση ενός ή περισσότερων από τους κινητήρες του πυραύλου σε μια βάση στήριξης. Σε περίπτωση συνάντησης και πρόσδεσης μεταξύ δύο διαστημικών σκαφών, τα δεδομένα ραντάρ ενημερώνουν το πλήρωμα, ή στην περίπτωση αυτοματοποιημένων ελιγμών έναν υπολογιστή, για τις διορθώσεις που απαιτούνται κατά μήκος κάθε άξονα. Με την εφαρμογή του βασισμένου σε δορυφόρο Navstar Global Positioning System (GPS) τη δεκαετία του 1980, κατέστη δυνατό για τα διαστημόπλοια σε τροχιά γύρω από τη Γη να επαληθεύουν τη θέση τους μέσα σε λίγα εκατοστά και τις ταχύτητες τους μέσα σε λίγα εκατοστά το δευτερόλεπτο.

5.3.6 Συνάντηση και Πρόσδεση

Η συνάντηση (rendezvous) είναι η διαδικασία σύναξης δύο διαστημικών σκαφών, ενώ η πρόσδεση (docking) είναι η επακόλουθη συνάντηση και φυσική τους σύνδεση. Τα βασικά στοιχεία μιας συνάντησης είναι η αντιστοίχιση τροχιακών πορειών και η κίνηση του ενός διαστημόπλοιου σε κοντινή απόσταση από το άλλο, συνήθως εντός 100 μέτρων (330 πόδια). Στην ιδανική περίπτωση, τα δύο διαστημόπλοια θα πρέπει επίσης να βρίσκονται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο.

Συνήθως για μια αποστολή συνάντησης, ένα διαστημόπλοιο βρίσκεται ήδη σε τροχιά και το δεύτερο διαστημόπλοιο εκτοξεύεται για να το συναντήσει. Για να επιτευχθεί το «ραντεβού», η εκτόξευση του δεύτερου σκάφους χρονομετρείται με ακρίβεια κλάσματος του δευτερολέπτου. Επειδή το διαστημόπλοιο σε τροχιά έχει ήδη υψηλή ταχύτητα σε σχέση με το δεύτερο διαστημόπλοιο στο έδαφος, το δεύτερο σκάφος εκτοξεύεται πολύ πριν το πρώτο περάσει από πάνω. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί μια ομοεπίπεδη τροχιά ακριβώς κάτω από το πρώτο διαστημόπλοιο. Σε αυτή τη διαμόρφωση το δεύτερο σκάφος, που βρίσκεται σε χαμηλότερη τροχιά, ταξιδεύει με μεγαλύτερη ταχύτητα και θα προσπεράσει το πρώτο. Όταν είναι ελαφρώς μπροστά από το πρώτο διαστημόπλοιο, πυροδοτεί τους προωθητήρες του με τέτοιο τρόπο που το αναγκάζει να ανέβει σε τροχιά και έτσι να επιβραδύνει έως ότου ταυτιστεί με το τροχιακό ύψος και την ταχύτητα του πρώτου σκάφους. Τα συστήματα ραντάρ και οι ενσωματωμένοι υπολογιστές είναι απαραίτητα για τέτοιες διαδικασίες.

Το Gemini 6 και 7 το 1965 ήταν τα πρώτα διαστημόπλοια που πραγματοποίησαν συνάντηση το ένα με το άλλο. Στις αποστολές σεληνιακής προσγείωσης του Απόλλωνα, το στάδιο ανόδου της Σεληνιακής Μονάδας ανέβηκε από την επιφάνεια της Σελήνης για να συναντήσει και να προσδεθεί με την περιφερόμενη Μονάδα Διοίκησης. Το ρωσικό διαστημόπλοιο Soyuz και τα αεροσκάφη των διαστημικών λεωφορείων των ΗΠΑ έχουν συναντήσει και ελλιμενίζονται τακτικά με διαστημικούς σταθμούς σε τροχιά γύρω από τη Γη. Ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν βασιστεί σε ανθρώπινα πληρώματα για αποστολές συνάντησης και πρόσδεσης, τα ρωσικά διαστημόπλοια μπορούν να εκτελέσουν αυτούς τους ελιγμούς αυτόματα χρησιμοποιώντας τεχνολογία που αναπτύχθηκε και τελειοποιήθηκε στο σοβιετικό διαστημικό πρόγραμμα.

Λόγω των περιορισμών ωφέλιμου φορτίου, τα διαστημόπλοια πέρα από ένα συγκεκριμένο μέγεθος και πολυπλοκότητα δεν μπορούν να εκτοξευθούν σε τροχιά της Γης ταυτόχρονα. Η κατασκευή μιας μεγάλης δομής όπως ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός, ή παρομοίως ένα μελλοντικό διαστημικό σκάφος για ένα ανθρώπινο ταξίδι

στον Άρη ή για έναν μεγάλο διαστημικό σταθμό ηλιακής ενέργειας, απαιτεί αξιόπιστες τεχνικές συνάντησης και πρόσδεσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων που μεταφέρονται σε τροχιά με ξεχωριστές εκτοξεύσεις. Επιπλέον, η εναλλαγή των διαστημικών πληρωμάτων και οι αποστολές έκτακτης ανάγκης διάσωσης απαιτούν δυνατότητα συνάντησης και πρόσδεσης.

5.3.7 Επανείσοδος και Ανάκτηση

Η επανείσοδος αναφέρεται στην επιστροφή ενός διαστημικού σκάφους στην ατμόσφαιρα της Γης. Η «κουβέρτα» του σχετικά πυκνού αερίου που περιβάλλει τη Γη είναι χρήσιμη ως δύναμη πέδησης ή επιβράδυνσης που προκύπτει από την αεροδυναμική οπισθέλκουσα. Μια παράλληλη επίδραση, ωστόσο, είναι η έντονη θέρμανση που προκαλείται από τη συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα μπροστά από το ταχέως κινούμενο διαστημόπλοιο. Αρχικά, οι ασπίδες θερμότητας κατασκευάζονταν από αφαιρετικά υλικά που παρέσυραν τη θερμότητα της επανεισόδου καθώς απορρίπτονταν, αλλά το διαστημικό λεωφορείο εισήγαγε πυρίμαχα υλικά, πλακίδια πυριτίου και ένα ενισχυμένο υλικό άνθρακα-άνθρακα, που άντεξαν τη θερμότητα άμεσα. Τα νεότερα σχέδια οχημάτων χρησιμοποιούν ενεργή ψύξη και πυρίμαχα μεταλλικά κράματα.

Εγγενής στην ασφαλή επανείσοδο ενός διαστημικού σκάφους είναι ο ακριβής έλεγχος της γωνίας επανεισόδου. Για τον Απόλλωνα, αυτή η γωνία ως προς τον ορίζοντα της Γης ήταν $-6,2^\circ$. Εάν η γωνία επανεισόδου είναι πολύ ρηχή, το διαστημόπλοιο θα παρακάμψει ή θα αναπηδήσει από την ατμόσφαιρα και θα επιστρέψει στο διάστημα. Εάν η γωνία είναι πολύ μεγάλη, η θερμική ασπίδα δεν θα επιβιώσει από τους ακραίους ρυθμούς θέρμανσης ούτε το διαστημόπλοιο στις υψηλές δυνάμεις επιβράδυνσης. Οι επιστρεφόμενες Μονάδες Διοίκησης Apollo πλησίασαν τη Γη με σχεδόν 40.000 km (25.000 μίλια) την ώρα. Ακόμη και με μια ικανοποιητική γωνία επανεισόδου, οι θερμικές ασπίδες των καψουλών υποβλήθηκαν σε θερμοκρασίες που πλησίαζαν τους 3.000°C (5.400°F).

Κατά τη διάρκεια των τελικών φάσεων της καθόδου, ορισμένα διαστημόπλοια, ειδικότερα επανδρωμένα σκάφη τύπου κάψουλας, αναπτύσσουν αλεξίπτωτα τα οποία χαμηλώνουν το όχημα σε μια ήπια προσγείωση. Οι μονάδες εντολών του Apollo χρησιμοποίησαν αυτή την τεχνική για την προσθαλάσσωση τους. Το ρωσικό διαστημόπλοιο Soyuz παραδοσιακά προσγειώνεται ομαλά στο έδαφος. Μικρά μη επανδρωμένα διαστημόπλοια ή αντικείμενα (όπως κάψουλες φωτογραφικών φιλμ) που εκτινάσσονται από δορυφόρους, έχουν ανακτηθεί στον αέρα με αεροσκάφη ενώ εξακολουθούν να κατεβαίνουν στη Γη με αλεξίπτωτο. Η διαδικασία επανεισόδου του φτερωτού διαστημικού λεωφορείου σε τροχιά διαφέρει σημαντικά, καθώς κατεβαίνει γλιστρώντας και προσγειώνεται σε ένα διάδρομο σαν ένα συνηθισμένο αεροπλάνο.



Εικόνα 89: Το διαστημικό λεωφορείο Discovery προσγειώνεται στο Διαστημικό Κέντρο John F. Kennedy στο Cape Canaveral της Φλόριντα, 27 Ιανουαρίου 1985.

5.4 Μετάβαση από τη Γη στη Σελήνη και επίτευξη τροχιάς

Η Σελήνη είναι ο μόνος γνωστός φυσικός δορυφόρος της Γης. Σύμφωνα με την πιο δημοφιλή θεωρία, υπάρχει ως αποτέλεσμα μιας βίαιης συνάντησης ανάμεσα σε ένα βαρύ ουράνιο σώμα και τη Γη πριν από περίπου 4 δισεκατομμύρια χρόνια, η οποία προκάλεσε την εκτόξευση της γήινης ύλης. Είναι βαρυντικά συνδεδεμένο με τη Γη και μέρος του άμεσου περιβάλλοντος της. Η μετάβαση στη Σελήνη είναι λοιπόν μια φυσική συνέχεια της εξερεύνησης του πλανήτη Γη. Αυτό έγινε καλά κατανοητό στο Πρώτο Διεθνές Σεληνιακό Εργαστήριο στο Beatenberg της Ελβετίας, το 1994, όπου η ESA πρότεινε ένα σεληνιακό πρόγραμμα τεσσάρων φάσεων:

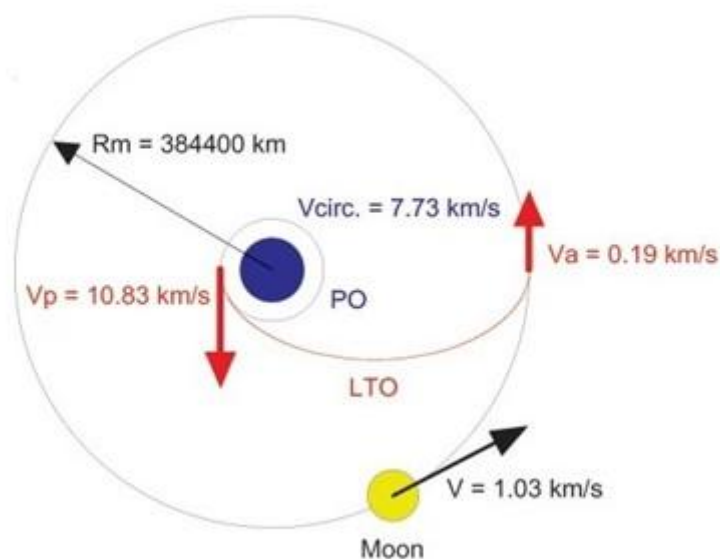
- Φάση – 1: Σεληνιακός ρομποτικός εξερευνητής
- Φάση – 2: Μόνιμη ρομποτική παρουσία
- Φάση – 3: Πρώτη χρήση σεληνιακών πόρων
- Φάση – 4: Σεληνιακό ανθρώπινο φυλάκιο.

Είναι η επιδίωξη της Φάσης 1 αυτού του προγράμματος που οδήγησε στη διερεύνηση περισσότερων καινοτόμων και λιγότερο δαπανηρών τρόπων για να φτάσουμε στη Σελήνη. Αυτά συζητούνται παρακάτω, αφού πρώτα αναλύσουμε την κλασική απευθείας διαδρομή.

5.4.1 Ο Άμεσος Τρόπος: Γρήγορος αλλά Ακριβός

Η «κλασική» σεληνιακή αποστολή ξεκινά από τη λεγόμενη «τροχιά στάθμευσης» γύρω από τη Γη. Το απόγειο της τροχιάς (το πιο απομακρυσμένο σημείο από τη Γη) ανυψώνεται στη συνέχεια στην απόσταση της Σελήνης ή υψηλότερα με μια *διασεληνιακή έγχυση* (προωθητικός ελιγμός ο οποίος θέτει ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά η οποία θα το οδηγήσει στη Σελήνη)(Translunar Injection), χρησιμοποιώντας είτε την κύρια μηχανή του ίδιου του διαστημικού σκάφους είτε την ανώτερη βαθμίδα του εκτοξευτή. Κατά την εκκίνηση, για παράδειγμα, από μια κυκλική τροχιά σε υψόμετρο 300 km, η τροχιακή ταχύτητα είναι 7,7 km/s. Μια *διασεληνιακή τροχιά* (Translunar Orbit) με περίγειο στα 300 km και απόγειο στα 384.400 km έχει ταχύτητα

περιγείου 10,8 km/s. Επομένως, το Δv για την έγχυση διασεληνιακής τροχιάς είναι: $10,8 - 7,7 = 3,1$ km/s (Εικόνα 90). Αυτή η μεμονωμένη «καύση περιγείου» μπορεί επίσης να χωριστεί σε πολλές μικρότερες καύσεις.



Εικόνα 90: Μέθοδος άμεσης μεταφοράς στη Σελήνη

Δεδομένου ότι η τροχιακή στροφορμή είναι σταθερή, η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους μειώνεται καθώς απομακρύνεται περισσότερο από τη Γη. Φτάνοντας στη Σελήνη, η ταχύτητά του θα έχει μειωθεί στα μόλις 0,2 km/s και καθώς η Σελήνη ταξιδεύει με ταχύτητα 1 km/s, το διαστημόπλοιο θα βρίσκεται σε τροχιά σε σχέση με τη Σελήνη με ταχύτητα περίπου 0,8 km/s. Επομένως, ένα άλλο Δv πρέπει να εφαρμοστεί στο διαστημόπλοιο ώστε η ταχύτητα του να συμπίπτει με την ταχύτητα της Σελήνης, για να μπορεί να «συλληφθεί» από τη Σελήνη, και στη συνέχεια να περιφερθεί γύρω της. Αυτό γίνεται συνήθως όταν διέρχεται το περισελήνιο (πλησιέστερο σημείο της τροχιάς σε σχέση με τη Σελήνη). Αυτή η έναυση μπορεί επίσης να χωριστεί σε πολλές μικρότερες για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες λόγω βαρύτητας. Η θέση του περισεληνίου δεν μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα, αλλά εξαρτάται από τη γεωμετρία άφιξης.

Το χαμηλότερο Δv απαιτείται όταν χρησιμοποιείται μια μεταφορά τύπου Hohmann, όταν το απόγειο της διασεληνιακής Τροχιάς είναι ίσο με την απόσταση Γης – Σελήνης. Για να μειωθεί ο χρόνος μεταφοράς, το απόγειο της διασεληνιακής τροχιάς θα μπορούσε να επιλεγεί υψηλότερα, εις βάρος ενός ελάχιστα μεγαλύτερου Δv . Μια άμεση μεταφορά διαρκεί συνήθως 2 – 5 ημέρες. Το διαστημόπλοιο πρέπει να εκτοξεύεται όταν η κλίση της Σελήνης είναι μικρότερη από την κλίση της τροχιάς στάθμευσης (συνήθως ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εκτόξευσης). Δεδομένου ότι η μέγιστη απόκλιση της Σελήνης στον ισημερινό της Γης είναι 29 μοίρες, προτιμώνται εκτοξεύσεις από μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη (όπως το ακρωτήριο Canaveral και το Baikonur), όπου υπάρχουν δύο ευκαιρίες εκτόξευσης την ημέρα.

Αυτή η «κλασική» άμεση μεταφορά χρησιμοποιήθηκε για όλες τις σεληνιακές αποστολές από τη δεκαετία του 1960 έως τη δεκαετία του 1980, συμπεριλαμβανομένων των αποστολών Luna και Apollo.

5.4.2 Έμμεσοι Τρόποι: Αργοί αλλά Οικονομικά Αποδοτικοί

Η εκτόξευση αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους οποιασδήποτε διαστημικής αποστολής. Όσο μικρότερος είναι ο εκτοξευτής, τόσο λιγότερο δαπανηρή θα είναι η αποστολή. Η επιλογή του εκτοξευτήρα εξαρτάται από την απόδοσή του και τη μάζα του διαστημικού σκάφους που πρόκειται να εκτοξευτεί. Για να μειωθεί το κόστος, η μάζα του διαστημικού σκάφους πρέπει να μειωθεί. Ένα μεγάλο μέρος αυτής της μάζας είναι αφιερωμένο στο προωθητικό μέσο που απαιτείται για τις διάφορες εγχύσεις και αυξήσεις της Δν. Η μείωση των απαιτήσεων Δν θα μειώσει επομένως το κόστος της αποστολής και υπάρχουν δύο διαθέσιμες επιλογές:

- Εκτοξεύσεις αερομεταφοράς (Piggyback Launches)
- «Κλέψιμο» ενέργειας από άλλα ουράνια σώματα

Όσο αφορά το «κλέψιμο» ενέργειας από άλλα ουράνια σώματα, με αυτό ασχοληθήκαμε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο και έχει κατά κόρον να κάνει με τον ελιγμό της βαρυτικής υποβοήθησης τον οποίο και αναλύσαμε.

5.4.2.1 Εκτοξεύσεις αερομεταφοράς (Piggyback Launches)

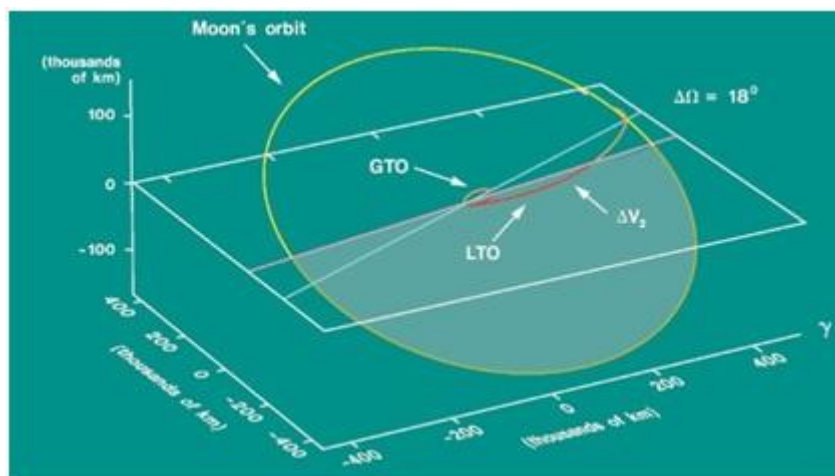
Ο εκτοξευτής Ariane προσφέρει δυνατότητα διπλής εκτόξευσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του κόστους έγχυσης δορυφόρων σε τροχιά. Το Ariane-5 προσφέρει μια ειδικά σχεδιασμένη δομή, την Ariane Structure for Auxiliary Payloads (ASAP), για την εκτόξευση μικρο και μίνι δορυφόρων.

Ωστόσο, οι συνοδευτικοί δορυφόροι χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο για εκτοξεύσεις GTO (Γεωστατική Τροχιά Μετάβασης) (Geostationary Transfer Orbit), καθιστώντας έτσι την GTO την πιο πιθανή τροχιά στάθμευσης για διπλή εκτόξευση. Ωστόσο, αυτό είναι αρκετά ενδιαφέρον για τους σκοπούς μας, επειδή η ενέργεια μιας τροχιάς GTO είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή μιας χαμηλής τροχιάς στάθμευσης της Γης, επιτρέποντας εξοικονόμηση πόρων στην επίτευξη διασεληνιακής τροχιάς. Δυστυχώς, οι αποστολές GTO και διασεληνιακής τροχιάς συνήθως δεν είναι συμβατές, επειδή η *αψιδιακή γραμμή* της GTO (γραμμή μέσω περιγείου και απόγειου) βρίσκεται στο ισημερινό επίπεδο, ενώ η τροχιά της Σελήνης είναι σε επίπεδο με κλίση μεταξύ 18 και 29 μοιρών.

5.4.2.2 Σύντομες Μεταφορές από Γεωστατική Τροχιά

Η Σελήνη μπορεί να προσεγγιστεί μόνο με απευθείας Διασεληνιακή Τροχιά από γεωστατική τροχιά χωρίς αλλαγή επιπέδου όταν βρίσκεται στους συνδέσμους της (όπου το τροχιακό επίπεδο της Σελήνης διασχίζει το ισημερινό επίπεδο της Γης). Η αψιδιακή γραμμή της GTO εξαρτάται από την κατεύθυνση του Ήλιου και είναι σχεδόν εφαπτομενική στην προβολή της γραμμής Γης – Ήλιου στο ισημερινό επίπεδο. Επομένως, μια Διασεληνιακή Τροχιά απευθείας μεταφοράς μπορεί να φτάσει στη Σελήνη μόνο όταν ο Ήλιος βρίσκεται κατά μήκος της γραμμής των συνδέσμων της τροχιάς της Σελήνης, η οποία συμβαίνει μόλις δύο φορές το χρόνο, διαφορετικά απαιτείται ανάλογος κατευθυντήριος ελιγμός. Εάν ο σύνδεσμος της GTO βρίσκεται κοντά στον σύνδεσμο τροχιάς της Σελήνης, ο ελιγμός αλλαγής πορείας που απαιτείται είναι μικρός και μπορεί να επιτευχθεί ως διόρθωση στο μέσο της πορείας του στο

δρόμο προς τη Σελήνη. Αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα, όπου η διαφορά κόμβου είναι 18 μοίρες. Ο χρόνος αναμονής για να φτάσει η Σελήνη στον σύνδεσμο της είναι έως και έναν σεληνιακό μήνα.



Εικόνα 91: Η GTO και η γραμμή τροχιάς του συνδέσμου της Σελήνης είναι κοντά (εντός 18 μοιρών). Εκτελείται ένας ενδιάμεσος διορθωτικός ελιγμός (Δv_2), πριν από το απόγειο

5.4.2.3 Μακροχρόνιες Μεταφορές από Γεωστατική Τροχιά

Εάν ο σύνδεσμος της γεωστατικής τροχιάς μεταφοράς απέχει από τον τροχιακό σύνδεσμο της Σελήνης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετική στρατηγική επειδή απαιτείται μεγάλη αλλαγή επιπέδου. Οι διορθωτικοί ελιγμοί μπορεί να είναι πολύ δαπανηροί, αλλά το κόστος μπορεί να μειωθεί εάν η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους είναι χαμηλή. Αυτό συμβαίνει στο απόγειο, και τα υψηλότερα απόγεια οδηγούν σε χαμηλότερες ταχύτητες στο απόγειο. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται η ακόλουθη στρατηγική: α) Ανυψώνουμε το απόγειο σε περίπου 1 εκατομμύριο km, οπότε η ταχύτητα του απόγειου να είναι πολύ μικρή. Αυτό προσθέτει μόνο περίπου 72 m/s στο Δv σε σύγκριση με μια ανύψωση στο απόγειο στην απόσταση της Σελήνης. β) Εκτελούμε μια αλλαγή επιπέδου στο απόγειο ($\Delta v = 300$ m/s περίπου), έτσι ώστε το σκέλος επιστροφής της τροχιάς να συναντά την τροχιά της Σελήνης.

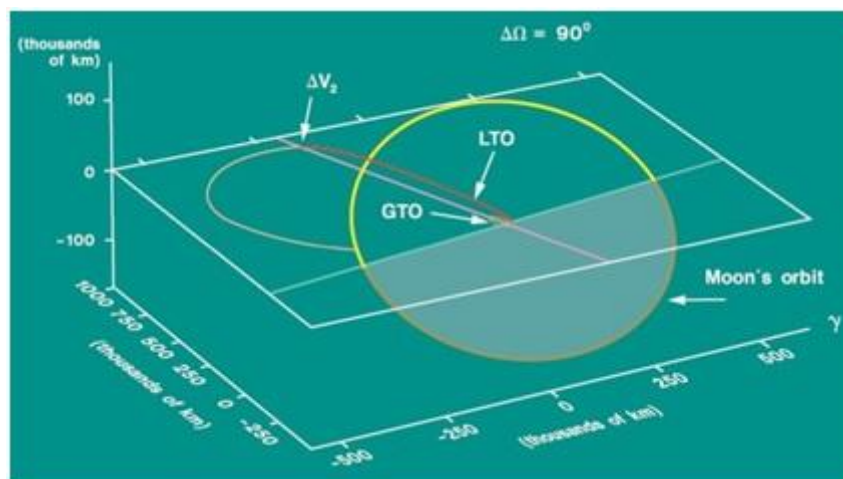
Η μακροχρόνια μεταφορά, που ονομάζεται επίσης *δι-ελλειπτική μεταφορά*, μειώνει σημαντικά το κόστος των διορθωτικών ελιγμών. Ωστόσο, η διάρκεια της μεταφοράς εκτείνεται σε 50 ημέρες και απαιτείται έως και ένας σεληνιακός μήνας περιμένοντας τη Σελήνη να είναι παρούσα κατά την άφιξη του διαστημικού σκάφους. Η Εικόνα 92 είναι ένα παράδειγμα δι-ελλειπτικής μεταφοράς όταν η διαφορά συνδέσμου είναι 90 μοίρες.

Μπορεί να αποδειχθεί ωστόσο, ότι όταν ξεκινάμε από μια κυκλική τροχιά με ακτίνα R_1 και πηγαίνουμε σε μια υψηλότερη κυκλική τροχιά με ακτίνα R_2 , μια δι-ελλειπτική μεταφορά είναι πιο αποτελεσματική από μια άμεση μεταφορά, εάν !. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, όταν ξεκινάμε από μια κυκλική τροχιά στάθμευσης της Γης 300 km και φθάνουμε στην τροχιά της Σελήνης σε ακτίνα 384.400 km.

Οι συνθήκες άφιξης στη Σελήνη είναι συγκρίσιμες με αυτές μιας άμεσης μεταφοράς, αλλά το διαστημόπλοιο φτάνει τώρα γύρω από το περίγειο της Διασεληνιακής Τροχιάς. Δεδομένου ότι η ταχύτητά του είναι τώρα μεγαλύτερη, η σχετική ταχύτητα σε σχέση με τη Σελήνη είναι χαμηλότερη και επομένως το Δv που απαιτείται για την εισαγωγή σε τροχιά της Σελήνης είναι επίσης χαμηλότερο. Η θέση

του περισεληνίου δεν μπορεί να επιλεγεί, αλλά εξαρτάται από τη γεωμετρία άφιξης. Απαιτούνται πρόσθετες εναύσεις των προωθητήρων για να τοποθετηθεί το περισελήνιο, για παράδειγμα, πάνω από τον σεληνιακό Νότιο Πόλο.

Οι μεγάλες μεταφορές από τη γεωστατική τροχιά, αν και πιο περίπλοκες, καθιστούν τις αποστολές στη Σελήνη λιγότερο εξαρτημένες από τα κατάλληλα «παράθυρα» εκτόξευσης.



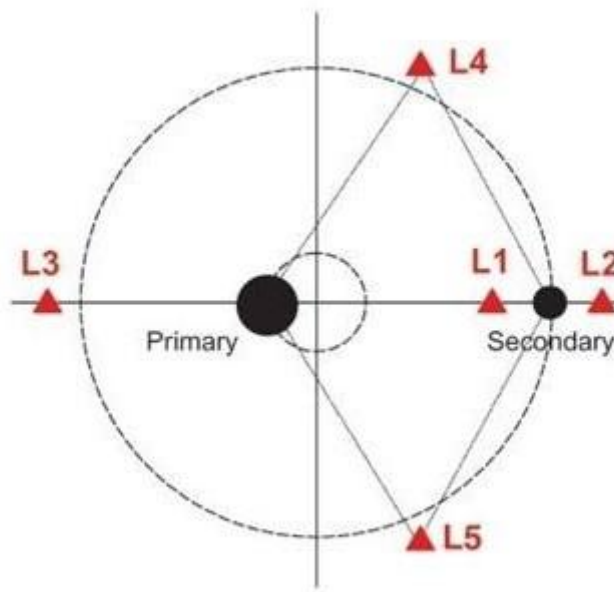
Εικόνα 92: Δι-ελλειπτική μεταφορά από Γεωστατική Τροχιά. Η GTO και η γραμμή συνδέσμου της Σελήνης απέχουν πολύ (90 μοίρες). Εκτελείται ενδιάμεσος διορθωτικός ελιγμός (Δv_2) στο απόγειο της LTO (Lunar Transfer Orbit) περίπου 1 εκατομμύριο km από τη Γη

5.4.2.4 Μεταφορές Ορίων Ασθενούς Σταθερότητας

Πώς μπορούν να μειωθούν περαιτέρω οι απαιτήσεις Δv ; Η μείωση της ταχύτητας διασεληνιακής έγχυσης θα σήμαινε ότι δεν θα μπορούσαμε να φτάσουμε στη Σελήνη και επομένως αυτό δεν αποτελεί επιλογή. Η μόνη άλλη επιλογή είναι να προσπαθήσουμε να μειώσουμε τις απαιτήσεις για την σεληνιακή έγχυση. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί φτάνοντας στην περιοχή της Σελήνης με χαμηλή σχετική ταχύτητα, η οποία συνεπάγεται αύξηση του ενεργειακού επιπέδου της Διασεληνιακής τροχιάς μέχρι το ενεργειακό επίπεδο τροχιάς της Σελήνης.

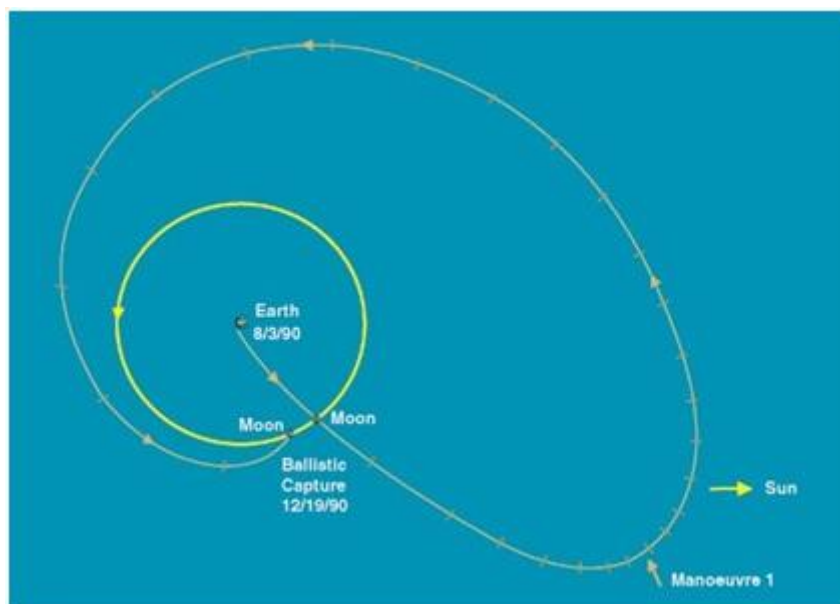
Θα πρέπει να βρούμε έναν τρόπο ωστόσο να αυξήσουμε την τροχιακή ενέργεια «δωρεάν». Ένας τέτοιος πρακτικός τρόπος είναι να «κλέψουμε» την τροχιακή ενέργεια από άλλα ουράνια σώματα, όπως ο Ήλιος και η Σελήνη. Μια δι-ελλειπτική τροχιά παρέχει ήδη βελτιωμένες συνθήκες άφιξης και παρέχει εξοικονόμηση Δv σε σύγκριση με την άμεση μεταφορά εάν ο σύνδεσμος της γεωστατικής τροχιάς απέχει μακριά από τον τροχιακό σύνδεσμο της Σελήνης. Η συνολική απαίτηση Δv θα μπορούσε να μειωθεί περαιτέρω εάν ο ελιγμός στο απόγειο δεν παρεχόταν από μία καύση του κύριου κινητήρα, αλλά από μια διαταραχή από τη βαρύτητα του Ήλιου, για παράδειγμα.

Αυτό συνεπάγεται τη μεταφορά του διαστημικού σκάφους σε μια περιοχή ασθενούς ορίου σταθερότητας (Weak Stability Boundary, WSB), όπου η έλξη της βαρύτητας του Ήλιου ή της Σελήνης είναι της ίδιας τάξης με αυτή της Γης. Ένας μικρός ελιγμός μέσα σε μια τέτοια περιοχή WSB μπορεί να οδηγήσει σε δραστική αλλαγή στις συνθήκες σεληνιακής άφιξης. Αυτές οι περιοχές WSB βρίσκονται γύρω από τα σημεία Λαγκράνζ (Lagrangian Points) βλ. παρακάτω Εικόνα 93.



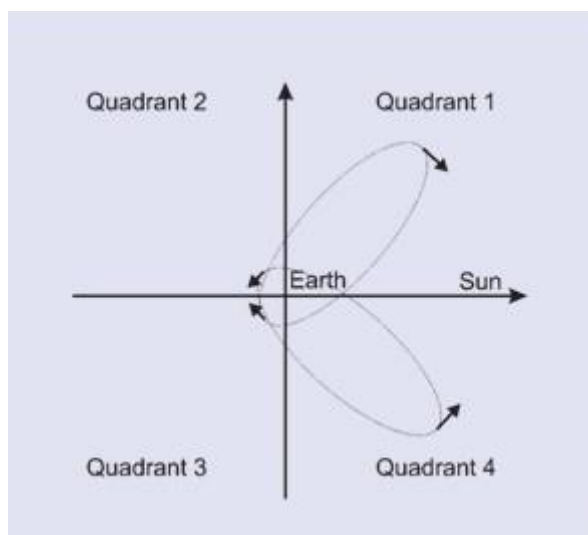
Εικόνα 93: Τα σημεία Lagrange. Όταν εξετάζουμε ένα ουράνιο σώμα σε κυκλική περιστροφή γύρω από ένα άλλο, όπως η Σελήνη γύρω από τη Γη ή η Γη γύρω από τον Ήλιο, υπάρχουν συγκεκριμένα σημεία στο διάστημα σταθερά σε σχέση με τα ουράνια σώματα όπου η δύναμη που ασκείται σε ένα διαστημόπλοιο εξαφανίζεται. Αυτό ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο μαθηματικό Κόμη Λουί ντε Λαγκράνζ (1736-1813) και τα σημεία αυτά ονομάζονται επομένως Λαγκρανζικά ή libration points. Υπάρχουν πέντε από αυτά: τρία (L1, L2 και L3) βρίσκονται κατά μήκος του άξονα που διέρχεται από τα δύο ουράνια σώματα και δύο άλλα (L4 και L5) βρίσκονται στο άκρο ενός ισόπλευρου τριγώνου με τα δύο σώματα. Είναι ακόμη δυνατό να οριστούν τροχιές γύρω από αυτά τα σημεία. Είναι ασταθείς, αλλά οι διορθωτικοί ελιγμοί που απαιτούνται για τη διατήρηση ενός διαστημικού σκάφους σε μια τέτοια τροχιά είναι σχετικά μέτριοι. Το ηλιακό παρατηρητήριο SOHO της ESA βρίσκεται σε μια τέτοια τροχιά Halo γύρω από το σημείο L1 του συστήματος Γης – Ήλιου, που βρίσκεται 1,5 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τη Γη προς τον Ήλιο.

Η ιδέα δεν είναι νέα. Στο βιβλίο του Ιουλίου Βερν «Ταξίδι στη Σελήνη» (1872), το διαστημόπλοιο “Columbiad” παρουσιάζεται να περιφέρεται γύρω από τη Σελήνη με το αποσελήνιο (απόαψη της διασεληνιακής τροχιάς) κοντά στο σημείο L1. Ένα μικρό Δν που δόθηκε κοντά στο σημείο L1, που επιτεύχθηκε με πυροτεχνήματα, ήταν ακριβώς αρκετό για να στείλει το Columbiad πίσω στη Γη! Περισσότερο από έναν αιώνα αργότερα, το ιαπωνικό διαστημόπλοιο Hiten ήταν η πρώτη μη φανταστική αποστολή που εκμεταλλεύτηκε τη δύναμη της «διαδικασίας του Ιουλίου Βερν». Μετά την αποτυχία του διαστημικού σκάφους Muses-B να φτάσει ονομαστικά στη Σελήνη, έγινε προσπάθεια να σταλεί το συνοδευτικό του διαστημόπλοιο Muses-A, που μετονομάστηκε Hiten, στο δρόμο προς τη Σελήνη. Δεν υπήρχε αρκετό προωθητικό διαθέσιμο για μια κλασική μεταφορά, και έτσι πραγματοποιήθηκε μεταφορά WSB για να διασωθεί η αποστολή (Εικόνα 94).



Εικόνα 94: Το προφίλ της αποστολής Hiten. Η κατεύθυνση του Ήλιου φαίνεται κατά την αναχώρηση της από τη Γη. Τα σημάδια είναι σε διαστήματα 5 ημερών

Μια μεταφορά WSB όπως χρησιμοποιείται από το διαστημικό σκάφος Hiten περιλαμβάνει τη διέλευση του ορίου σταθερότητας του Ήλιου – Γης σε απόσταση περίπου 1,4 εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τη Γη, όπου η ηλιακή διαταραχή μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ενέργεια διασεληνιακής τροχιάς, δηλαδή να αυξήσει το περίγειο για να μικρύνει την απόσταση Γης – Σελήνης. Το σχήμα 8 δείχνει τις κατευθύνσεις της γραμμής πεδίου της βαρύτητας του Ήλιου σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων (ο άξονας x δείχνει πάντα προς τον Ήλιο) με τη Γη στην αρχή. Η κλίση γίνεται ισχυρότερη καθώς απομακρύνεται κανείς από τη Γη και το μεγαλύτερο αποτέλεσμα είναι επομένως στο απόγειο. Η Εικόνα 95 δείχνει επίσης δύο άκρως ελλειπτικές τροχιές με το διαστημόπλοιο να κινείται αριστερόστροφα. Μπορεί να φανεί ότι η κλίση της βαρύτητας κατευθύνεται παράλληλα με το διάνυσμα της ταχύτητας στο απόγειο στο δεύτερο και τέταρτο τεταρτημόριο του συστήματος συντεταγμένων. Στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο, κατευθύνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από το διάνυσμα της ταχύτητας στο απόγειο. Επομένως, εάν το απόγειο βρίσκεται μέσα στο δεύτερο ή τέταρτο τεταρτημόριο, ο Ήλιος αυξάνει την τροχιακή ενέργεια η οποία, ενσωματωμένη στη μεγάλη περίοδο που περνά το διαστημόπλοιο στην περιοχή του απόγειου, ανυψώνει το περίγειο προς την απόσταση της Σελήνης.



Εικόνα 95: Κατευθύνσεις του πεδίου βαρύτητας του Ήλιου. Εμφανίζονται δύο τροχιές όπου η βαρύτητα του Ήλιου θα μειώνει (τεταρτημόριο 1) ή θα αύξανε (τεταρτημόριο 4) την τροχιακή ενέργεια

Κατά την άφιξη στη Σελήνη, το όριο ασθενούς σταθερότητας Γης – Σελήνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω μείωση της απαίτησης Δv . Εάν η ενέργεια της Διασεληνιακής τροχιάς είναι κοντά στην τροχιακή ενέργεια της Σελήνης, το διαστημόπλοιο μπορεί να συλληφθεί από τη Σελήνη. Όταν φτάσει στη Σελήνη, η βαρύτητα της Γης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει την τροχιακή ενέργεια σε σχέση με τη Σελήνη, έτσι ώστε το διαστημόπλοιο να μην μπορεί πλέον να ξεφύγει από αυτήν. Μια βαλλιστική σύλληψη συμβαίνει επειδή η Γη έχει δώσει στο διαστημόπλοιο ακριβώς τη σωστή ποσότητα ενέργειας για να συλληφθεί από τη Σελήνη.

Για μια τέτοια βαλλιστική σύλληψη, η προκύπτουσα τροχιά γύρω από τη Σελήνη έχει ένα αποσελήνιο (απόαψη) κοντά στην απόσταση του σημείου Lagrange. Στη συνέχεια απαιτείται ένα μικρό Δv για να χαμηλώσει το αποσελήνιο, καθώς περαιτέρω διαταραχές της Γης θα μπορούσαν να στείλουν ξανά το διαστημικό σκάφος σε μια τροχιά διαφυγής υψηλότερης ενέργειας.

5.5 Διαπλανητικά Ταξίδια

Ο πλούτος πληροφοριών από διαπλανητικές αποστολές όπως το Pioneer, το Voyager και το Magellan μας έχει δώσει μια εικόνα για την ιστορία του ηλιακού συστήματος και μια καλύτερη κατανόηση των βασικών μηχανισμών που λειτουργούν στην ατμόσφαιρα και τη γεωλογία της Γης. Η αναζήτησή μας για γνώση σε όλο το ηλιακό μας σύστημα συνεχίζεται. Ίσως στο όχι και πολύ μακρινό μέλλον, θα αναλάβουμε ανθρώπινες αποστολές πίσω στη Σελήνη, στον Άρη και παραπέρα.

Πώς φτάνουμε όμως από τη Γη σε αυτούς τους συναρπαστικούς νέους κόσμους; Αυτό είναι το πρόβλημα της διαπλανητικής μεταφοράς. Στο Κεφάλαιο 4 τέθηκαν τα θεμέλια για την κατανόηση των τροχιών και αναλύθηκε η μεταφορά τύπου Hohmann. Χρησιμοποιώντας αυτό ως εργαλείο, διερευνήθηκε η διαδικασία μεταφοράς μεταξύ δύο τροχιών γύρω από το ίδιο σώμα, όπως η Γη. Η διαπλανητική μεταφορά απλώς επεκτείνει τη μεταφορά Hohmann. Μόνο που τώρα, το κεντρικό σώμα είναι ο Ήλιος. Επίσης, θα εξεταστούν οι τροχιές γύρω από τους πλανήτες αναχώρησης και προορισμού μας.

Αρχικά γίνεται μια επισκόπηση της βασικής εξίσωσης της κίνησης για τη διαπλανητική μεταφορά και στη συνέχεια γίνεται λόγος για το πώς μπορεί να απλοποιηθεί πολύ το πρόβλημα χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται *προσαρμοσμένη κωνική προσέγγιση* (patched-conic approximation). Τέλος, θα δοθεί ένα παράδειγμα για το πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την απλή μέθοδο για να σχεδιάσουμε μια πορεία από τη Γη προς τον Άρη.

5.5.1 Σχεδιασμός Διαπλανητικού Ταξιδιού

Για να γίνει κατανοητή η διαπλανητική μεταφορά, πρέπει να υπάρχει κάποια βασική αντίληψη του προβλήματος. Για τον σχεδιασμό ενός ταξιδιού στην πόλη, χρειάζεται ένας χάρτης της πόλης. Για τον σχεδιασμό ενός ταξιδιού σε όλη τη χώρα, χρειάζεται ένας άτλαντας της εθνικής οδού. Για τον σχεδιασμό μιας διαστημικής αποστολής γύρω από τη Γη, είναι απαραίτητα τα Κλασικά Τροχιακά Στοιχεία που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 μαζί με τη Μεταφορά Hohmann που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.4.3.

Για τον σχεδιασμό όμως ενός ταξιδιού από τη Γη στον Άρη, θα πρέπει να επεκταθεί η αντίληψη μας ακόμα περισσότερο περιβάλλοντας ολόκληρο το ηλιακό σύστημα. Θα εξεταστούν λοιπόν τα συστήματα συντεταγμένων που εμπλέκονται στον καθορισμό του προβλήματος των διαπλανητικών ταξιδιών. Στη συνέχεια, θα γίνει λόγος για το πώς μπορούμε να σπάσουμε αυτό το φαινομενικά πολύπλοκο πρόβλημα σε μικρότερα κομμάτια.

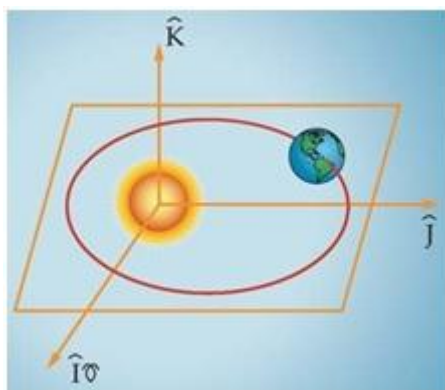
5.5.1.1 Διαπλανητικά Συστήματα Συντεταγμένων

Νωρίτερα, όταν για πρώτη φορά έγινε προσπάθεια να κατανοηθεί η τροχιακή κίνηση, έγιναν αρκετές υποθέσεις για να απλοποιηθεί το πρόβλημα. Δύο από αυτές τις υποθέσεις ήταν ότι: α) υπάρχουν μόνο δύο σώματα – το διαστημόπλοιο και η Γη, β) η βαρυτική έλξη της Γης είναι η μόνη δύναμη που ασκείται στο διαστημόπλοιο.

Ορίστηκε ένα σύστημα συντεταγμένων, που ονομάζεται *γεωκεντρικό – ισημερινό πλαίσιο*, το οποίο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τροχιές γύρω από τη Γη. Αυτό μας εξυπηρετεί όσο θέλουμε να είμαστε σε τροχιά γύρω από τη Γη. Αλλά τελικά, θα θέλαμε να φύγουμε από το «σπίτι» μας και να ταξιδέψουμε σε άλλους πλανήτες του ηλιακού συστήματος όπως ο Άρης, η Αφροδίτη ή ο Δίας.

Μόλις το διαστημόπλοιο μας διασχίσει ένα όριο στο διαπλανητικό διάστημα ωστόσο, η βαρυτική έλξη της Γης γίνεται λιγότερο σημαντική και η έλξη του Ήλιου γίνεται η κυρίαρχη δύναμη. Επομένως, επειδή το κέντρο κατά την διαπλανητική μεταφορά είναι ο Ήλιος, πρέπει να ανεπτυχθεί ένα ηλιοκεντρικό σύστημα συντεταγμένων. Κατά την επιλογή ενός θεμελιώδους επιπέδου, χρησιμοποιείται επίσης το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο γνωστό ως *εκλειπτικό επίπεδο*. Στη συνέχεια, χρειάζεται μια κύρια κατεύθυνση \hat{I} , σταθερή σε σχέση με το σύμπαν και μπορεί να επιλεγεί η κατεύθυνση της εαρινής ισημερίας. Με το θεμελιώδες επιλεγμένο επίπεδο και την κύρια κατεύθυνση, ορίζεται ο άξονας \hat{J} στο εκλειπτικό επίπεδο, 90° από τον άξονα \hat{I} προς την κατεύθυνση της κίνησης της Γης. Τέλος, ο άξονας \hat{K} είναι κάθετος στο εκλειπτικό επίπεδο και ολοκληρώνει το σύστημα μας. Τώρα μπορεί να συσχετιστεί οποιαδήποτε τροχιά από τη Γη σε έναν

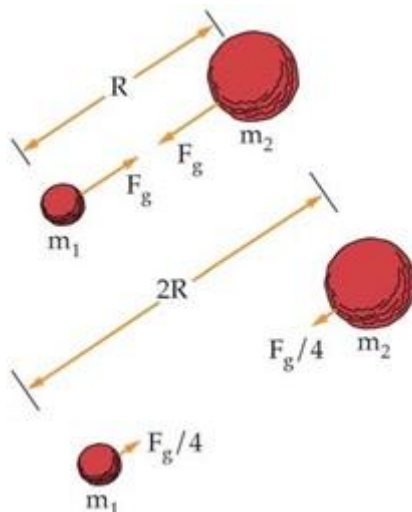
άλλο πλανήτη, ή ακόμα και στην άκρη του ηλιακού συστήματος, με αυτό το ηλιοκεντρικό – εκλειπτικό σύστημα συντεταγμένων (βλ. Εικόνα 96).



Εικόνα 96: Ηλιοκεντρικό – εκλειπτικό σύστημα συντεταγμένων για διαπλανητική μεταφορά. Η αρχή είναι το κέντρο του Ήλιου. Το θεμελιώδες επίπεδο είναι το εκλειπτικό επίπεδο (το τροχιακό επίπεδο της Γης γύρω από τον Ήλιο) και η κύρια κατεύθυνση αυτή της εαρινής ισημερίας

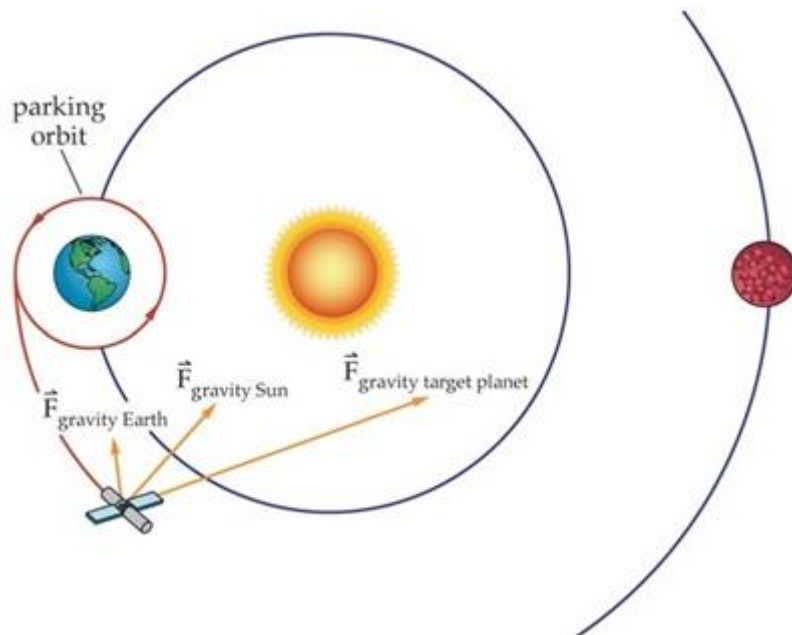
Τώρα που έχουμε ένα χρήσιμο πλαίσιο συντεταγμένων για την περιγραφή και την κίνηση ενός πλανήτη ή ενός διαστημικού σκάφους γύρω από τον Ήλιο, το επόμενο βήμα είναι να γίνουν κατανοητές ποιες δυνάμεις επηρεάζουν αυτή την κίνηση. Οποιοδήποτε διαστημόπλοιο ξεκινά την αποστολή του υπό την επίδραση της βαρύτητας της Γης, επομένως αυτή είναι μια δύναμη την οποία πρέπει να αντιμετωπίσουμε. Αλλά όταν απομακρυνθεί αρκετά από τη Γη, η βαρυτική έλξη του Ήλιου αρχίζει να κυριαρχεί. Η βαρύτητα του Ήλιου συγκρατεί το διαστημόπλοιο μέχρι να φτάσει στον πλανήτη προορισμού, επομένως πρέπει να αντιμετωπίσουμε και αυτή τη δύναμη. Τέλος, όταν το διαστημόπλοιο φτάσει στον πλανήτη στον οποίο κατευθύνεται, πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη βαρύτητα εκείνου του πλανήτη. Αυτή η βαρυτική δύναμη θα μπορούσε να κυμαίνεται από το ελαφρύ «τράβηγμα» του Ερμή μέχρι την τεράστια έλξη του Δία.

Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα ορίζει ότι: *Η δύναμη της βαρύτητας μεταξύ δύο σωμάτων είναι ευθέως ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους.* Η παρακάτω Εικόνα 97 απεικονίζει αυτήν την έννοια, αλλά σε ένα ταξίδι από τη Γη στον Άρη, έχουμε να αντιμετωπίσουμε διαφορετικά σώματα, όπως ο Ήλιος, η Γη και ο Άρης, καθώς και τις βαρυτικές τους συνέπειες.



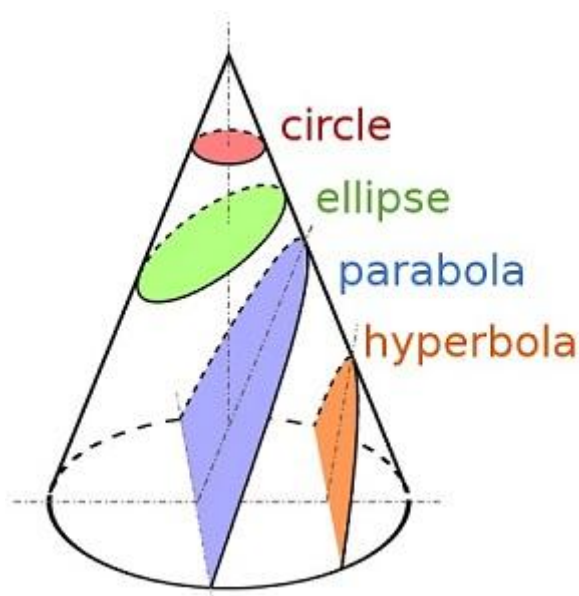
Εικόνα 97: Ο Νόμος της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα. Η δύναμη έλξης μεταξύ οποιωνδήποτε δύο μαζών είναι ευθέως ανάλογη με το γινόμενο των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους. Έτσι, αν διπλασιάσουμε την απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων, η βαρυτική δύναμη μειώνεται στο 1/4 της αρχικής ποσότητας

Πρακτικά είναι αδύνατον να υπολογιστούν τα αποτελέσματα από όλες αυτές τις βαρυτικές δυνάμεις που δρουν ταυτόχρονα στο μικροσκοπικό μας διαστημόπλοιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 98. Στην πραγματικότητα, όπως δείχθηκε και στην ενότητα 4.1.6, ακόμη και το πρόβλημα των τριών σωμάτων που δρουν ταυτόχρονα είναι αδύνατον να επιλυθεί ως έχει, πόσο μάλλον τεσσάρων και πλέον σωμάτων. Έτσι θα χρησιμοποιηθεί η ίδια τακτική που χρησιμοποιήθηκε και για την επίλυση των τριών σωμάτων, δηλαδή θα χωριστούν. Εφόσον το πρόβλημα περιορίζεται σε δύο σώματα ταυτόχρονα, αυτό είναι επαρκές – τα τυπικά σώματα θα ήταν το διαστημόπλοιο συν τη Γη ή το διαστημόπλοιο συν τον Ήλιο. Για τις διαπλανητικές μεταφορές ονομάζουμε αυτή την προσέγγιση *προσαρμοσμένη κωνική προσέγγιση* (patched-conic approximation). Η προσαρμοσμένη κωνική προσέγγιση χωρίζει τη διαπλανητική τροχιά (διαδρομή) σε τρεις ξεχωριστές περιοχές και λαμβάνει υπόψη μόνο τη βαρυτική έλξη στο διαστημόπλοιο από ένα σώμα σε κάθε περιοχή.



Εικόνα 98: Βαρυτικές δυνάμεις σε διαπλανητικό διαστημόπλοιο. Εξετάζοντας τις δυνάμεις που ενεργούν σε ένα διαπλανητικό διαστημόπλοιο στο δρόμο του από τη Γη στον πλανήτη-στόχο, έχουμε τις βαρυτικές δυνάμεις που οφείλονται στη Γη, τον Ήλιο και τον πλανήτη-στόχο που το καθιστούν ως πρόβλημα τεσσάρων σωμάτων. Γη, Ήλιος, πλανήτης-στόχος και το διαστημόπλοιο

Εξετάζοντας το πρόβλημα σε σχέση μόνο με ένα σώμα βαρυτικής επίδρασης κάθε φορά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα που καταλήξαμε νωρίτερα. Σύμφωνα με τον Νεύτωνα, όλα τα σώματα που κινούνται υπό την επίδραση της βαρύτητας πρέπει να ακολουθήσουν μια διαδρομή που είναι ένα από τα τέσσερα κωνικά τμήματα (κύκλος, έλλειψη, παραβολή ή υπερβολή, βλ. Εικόνα 99).

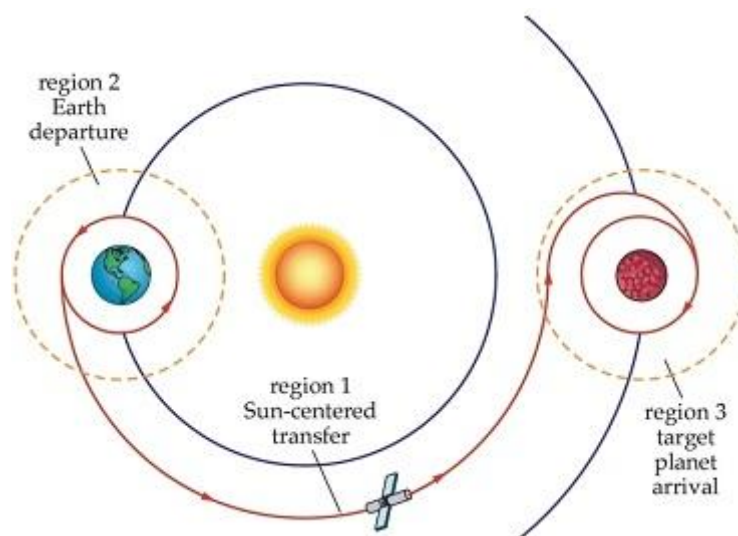


Εικόνα 99: Από πάνω προς τα κάτω: κύκλος, έλλειψη, παραβολή, υπερβολή. Τα μαύρα όρια των έγχρωμων περιοχών είναι κωνικές τομές. Δεν φαίνεται το άλλο μισό της υπερβολής, το οποίο βρίσκεται στο τμήμα του διπλού κώνου που δεν φαίνεται.

Έτσι, τα μεμονωμένα κομμάτια της τροχιάς του διαστημικού σκάφους είναι κωνικές τομές. Επιλύοντας ένα πρόβλημα δύο σωμάτων κάθε φορά, ενώνεται η μια κωνική τροχιά σε μια άλλη, φτάνοντας σε αυτό που ονομάζεται προσαρμοσμένη κωνική προσέγγιση.

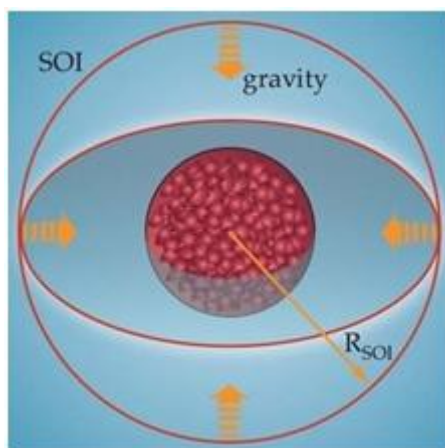
Η προσαρμοσμένη κωνική προσέγγιση είναι ένας τρόπος να «σπάσει» η διαπλανητική τροχιά σε κομμάτια (περιοχές) που μπορούν να αναλυθούν, χρησιμοποιώντας μεθόδους που ήδη γνωρίζουμε. Δουλεύοντας σε μία μόνο περιοχή κάθε φορά, πρέπει να αντιμετωπιστεί η βαρύτητα από ένα μόνο σώμα τη φορά. Η Εικόνα 100, δείχνει τις τρεις περιοχές της διαπλανητικής μεταφοράς:

- Περιοχή 1 (επιλύεται πρώτη) – Μεταφορά με κέντρο τον ήλιο από τη Γη στον πλανήτη στόχο. Σε αυτή την περιοχή, κυριαρχεί η βαρυτική έλξη του Ήλιου.
- Περιοχή 2 (επιλύεται δεύτερη) – Αναχώρηση από τη Γη. Σε αυτή την περιοχή, κυριαρχεί η βαρυτική έλξη της Γης.
- Περιοχή 3 (επιλύεται τρίτη) – Άφιξη στον πλανήτη-στόχο. Σε αυτήν την περιοχή, κυριαρχεί η βαρυτική έλξη του πλανήτη-στόχου.



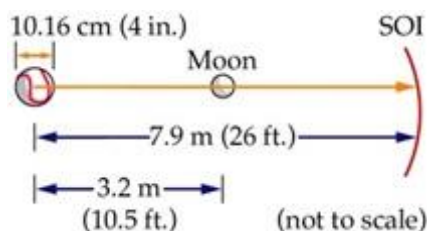
Εικόνα 100: Τρεις περιοχές της προσαρμοσμένης κωνικής προσέγγισης. Χωρίζουμε την τροχιά της διαπλανητικής μεταφοράς σε τρεις διακριτές περιοχές στις οποίες η βαρυτική επίδραση μόνο ενός σώματος κυριαρχεί στην κίνηση του διαστημικού σκάφους

Για να αντιμετωπιστεί η βαρύτητα από ένα μόνο σώμα τη φορά, πρέπει να είναι γνωστές οι συνέπειες της στο διάστημα. Οποιαδήποτε μάζα στο διάστημα ασκεί βαρυτική έλξη σε άλλα σώματα. Ο Νόμος της Παγκόσμιας Βαρύτητας του Νεύτωνα περιγράφει αυτή τη δύναμη ως μεταβαλλόμενη αντίστροφα με το τετράγωνο της απόστασης από το κεντρικό σώμα. Θεωρητικά, η βαρυτική έλξη ενός σώματος φτάνει στο άπειρο, αλλά πρακτικά, είναι αποτελεσματική μόνο εντός ενός συγκεκριμένου όγκου χώρου που ονομάζεται *σφαίρα επιρροής του σώματος* (Sphere Of Influence, SOI), όπως φαίνεται στην Εικόνα 101. Για παράδειγμα, μέσα στη σφαίρα επιρροής της Γης, η βαρύτητα της Γης κυριαρχεί στην κίνηση ενός διαστημικού σκάφους. Αλλά σε κάποιο σημείο η βαρυτική έλξη της Γης γίνεται ασήμαντη και η έλξη άλλων σωμάτων, όπως η Σελήνη και ο Ήλιος, αρχίζει να κυριαρχεί.



Εικόνα 101: Sphere Of Influence (SOI). Η σφαίρα επιρροής ενός πλανήτη είναι ο όγκος του διαστήματος εντός του οποίου κυριαρχεί η βαρυτική δύναμη του πλανήτη.

Το μέγεθος της σφαίρας επιρροής εξαρτάται από τη μάζα του πλανήτη (ένας μεγαλύτερος πλανήτης έχει μεγαλύτερη «βαρυτική εμβέλεια») και από το πόσο κοντά είναι ο πλανήτης στον Ήλιο (η βαρύτητα του Ήλιου υπερισχύει της βαρύτητας των πλησιέστερων πλανητών). Η σφαίρα επιρροής της Γης είναι περίπου 1.000.000 km σε ακτίνα, πολύ πιο πέρα από την τροχιά της Σελήνης αλλά μόνο ένα μικρό κλάσμα της απόστασης της Γης από τον Ήλιο (149,6 εκατομμύρια km). Για να τεθεί αυτό σε αναλογία, θα μπορούσε να οριστεί το μέγεθος της Γης να έχει το μέγεθος μιας μπάλας του μπέιζμπολ, όπως στην Εικόνα 4.1.6-7. Η σφαίρα επιρροής της θα εκτεινόταν 78 φορές την ακτίνα της ή 7,9 m (26 πόδια).



Εικόνα 102: Η Σφαίρα Επιρροής της Γης (SOI) εκτείνεται πολύ πιο πέρα από την τροχιά της Σελήνης. Για να το θέσουμε σε αναλογία, θα μπορούσαμε να φανταστούμε τη Γη να έχει το μέγεθος μιας μπάλας του μπέιζμπολ. Τότε η Σελήνη θα ήταν 3,2 μέτρα (10,5 πόδια) μακριά από τη Γη και η σφαίρα επιρροής της Γης θα είχε ακτίνα 7,9 μέτρα (26 πόδια)

Όπως προαναφέρθηκε, για να απλοποιηθούν οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός διαστημικού σκάφους και των σφαιρών επιρροής της Γης, του Ήλιου και του πλανήτη-στόχου, χρησιμοποιείται η μέθοδος της προσαρμοσμένης κωνικής προσέγγισης. Εξετάζοντας χωριστά τις περιοχές, ορίζονται τρία διαφορετικά προβλήματα δύο σωμάτων, λύνεται το καθένα και στη συνέχεια τα ενώνονται μεταξύ τους δίνοντας την τελική λύση. Ο απώτερος στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τη συνολική μεταβολή της ταχύτητας ΔV_{total} , που χρειάζεται ένα διαστημόπλοιο για να αφήσει την τροχιά της Γης και να μπει σε τροχιά γύρω από κάποιον άλλον πλανήτη.

Για να γίνει αυτό καλύτερα αντιληπτό θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό παράδειγμα. Ας υποθέσουμε πως κινούμαστε σε ένα δρόμο με το αυτοκίνητο μας με ταχύτητα 45 χλμ. Από πίσω μας ακολουθεί ένα άλλο αυτοκίνητο το οποίο κινείται στην ίδια κατεύθυνση με το δικό μας αλλά με 55 χλμ. Ένας σταθερός παρατηρητής στην άκρη του δρόμου βλέπει τα δύο οχήματα να κινούνται με 45 και 55 χλμ αντίστοιχα. Ωστόσο, η ταχύτητα του αυτοκινήτου που μας ακολουθεί σε σχέση με τη δική μας είναι μόλις 10 χλμ. (έρχεται καταπάνω μας με 10 χλμ.). Τώρα ας υποθέσουμε πως ο

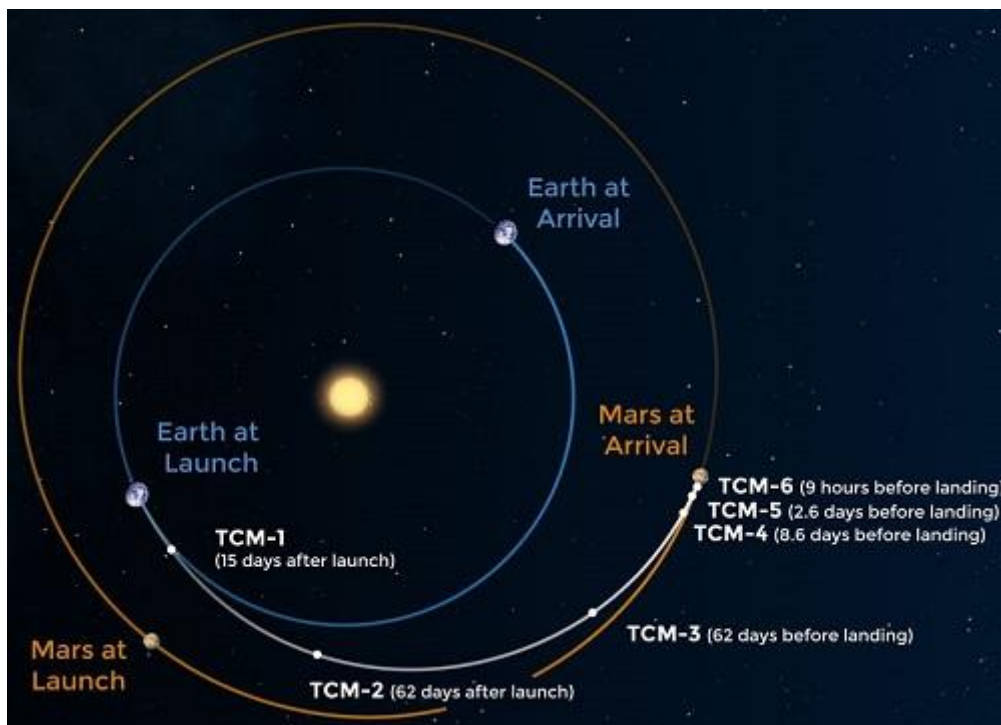
οδηγός του οχήματος που μας ακολουθεί, πετάει μια μπάλα προς το αυτοκίνητο μας με 20 χλμ. Αγνοώντας την αντίσταση του αέρα για λόγους απλοποίησης, το ποια θα είναι η ταχύτητα της μπάλας εξαρτάται από την εκάστοτε οπτική γωνία. Από την οπτική του οδηγού που πετάει την μπάλα, αυτή φαίνεται να κινείται με 20 χλμ., από την οπτική του σταθερού παρατηρητή, φαίνεται να κινείται με 75 χλμ. και ως προς εμάς η μπάλα κινείται με 30 χλμ.. Αναλύοντας την κίνηση της μπάλας βλέπουμε τα τρία προβλήματα που χρησιμοποιούμε και στη μέθοδο προσαρμοσμένης κωνικής προσέγγισης:

- Πρόβλημα 1 – Ένας σταθερός παρατηρητής βλέπει τον οδηγό του αυτοκίνητου που ακολουθεί το δικό μας να πετάει μια μπάλα προς τη κατεύθυνση μας. Ο παρατηρητής βλέπει το αυτοκίνητο του να «τρέχει» με 55 χλμ., το δικό μας με 45 χλμ. και τη μπάλα να ταξιδεύει από το ένα αυτοκίνητο στο άλλο με 75 χλμ.. Το πλαίσιο αναφοράς είναι ένα ακίνητο πλαίσιο στην άκρη του δρόμου. Αυτό το πρόβλημα είναι ανάλογο αυτού που είδαμε νωρίτερα (βλ. Εικόνα 100), και αναλογεί στην πρώτη περιοχή όπου ο Ήλιος είναι ο σταθερός παρατηρητής και η μπάλα το διαστημόπλοιο μας.
- Πρόβλημα 2 – Η μπάλα αναχωρεί από το αυτοκίνητο που μας ακολουθεί με μια σχετική ταχύτητα 20 χλμ.. Το πλαίσιο αναφοράς σε αυτή την περίπτωση είναι το αυτοκίνητο που μας ακολουθεί. Αυτό το πρόβλημα αναλογεί στην δεύτερη περιοχή του προβλήματος που είδαμε νωρίτερα όπου η Γη αντιστοιχεί στο αυτοκίνητο που μας ακολουθεί και η μπάλα είναι και πάλι το διαστημόπλοιο μας.
- Πρόβλημα 3 – Η μπάλα προσγειώνεται στο αυτοκίνητο μας. Προλαβαίνει το αυτοκίνητο μας με σχετική ταχύτητα 30 χλμ.. Το πλαίσιο αναφοράς είναι τώρα το αυτοκίνητο μας. Αυτό το πρόβλημα αντιστοιχεί στη τρίτη περιοχή του προηγούμενου προβλήματος και ο πλανήτης-στόχος είναι το αυτοκίνητο μας, ενώ η μπάλα εξακολουθεί να παραμένει το διαστημόπλοιο.

Η διαίρεση των διαπλανητικών ταξιδιών σε τρία προβλήματα απαιτεί να παρακολουθούμε τις ταχύτητες σε σχέση με ένα πλαίσιο αναφοράς, το οποίο αλλάζει από το ένα πρόβλημα στο άλλο. Έτσι, η ταχύτητα του διαστημικού σκάφους σε σχέση με τη Γη δεν είναι ίδια με την ταχύτητά του σε σχέση με τον Ήλιο. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική διάκριση που πρέπει να κατανοήσουμε. Βρίσκουμε μόνο μία ταχύτητα κοινή στα προβλήματα 1 και 2 και μόνο μία κοινή στα προβλήματα 1 και 3. Ωστόσο, αυτές οι ταχύτητες μας επιτρέπουν να ενώσουμε μαζί τις τροχιές από τις τρεις περιοχές.

Θα εξεταστεί λοιπόν πώς λειτουργούν όλα αυτά επιχειρησιακά. Ας θεωρηθεί πως σχεδιάζεται μια αποστολή στον πλανήτη Άρη η οποία εκτοξεύεται για πρώτη φορά σε μια κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη. Ενδέχεται να περάσουν μερικές ημέρες σε τροχιά γύρω από τη Γη, ενώ οι ελεγκτές εδάφους ελέγχουν τα ενσωματωμένα συστήματα του διαστημόπλοιου. Όταν όλα ελεγχθούν και ο συγχρονισμός είναι σωστός, δίνεται η εντολή να πυροδοτηθούν οι κινητήρες του διαστημικού σκάφους. Αυτό δημιουργεί ένα μεγάλο Δv , βάζοντας το διαστημόπλοιο σε μια εντελώς νέα τροχιά σε σχέση με τη σφαίρα επιρροής της Γης σε μια υπερβολική τροχιά διαφυγής. Έτσι το διαστημόπλοιο μας αναχωρεί από τη Γη με την ταχύτητα των 11 km/s. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού οι μηχανικοί έχουν πολλές ευκαιρίες για να προσαρμόσουν την πορεία του διαστημικού σκάφους, για να βεβαιώσουν ότι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του είναι οι βέλτιστες κατά την άφιξη του στον Άρη.

Αλλάζοντας την προοπτική μας σε αυτή ενός σταθερού παρατηρητή στον Ήλιο, εκείνος θα βλέπει το διαστημόπλοιο να φεύγει από την περιοχή της Γης σε μια ελλειπτική τροχιά μεταφοράς (την ίδια που χρησιμοποιούμε για τη μεταφορά Hohmann), βλ. Εικόνα 103. Καθώς ο παρατηρητής παρακολουθεί, βλέπει το διαστημόπλοιο να ακολουθεί κατά μήκος αυτήν την ελλειπτική τροχιά μεταφοράς μέχρι να φτάσει στην σφαίρα επιρροής του Άρη.



Εικόνα 103: Μια απεικόνιση της διαδρομής που ακολούθησε το διαστημόπλοιο Perseverance στον δρόμο για τον πλανήτη Άρη.

Τώρα αλλάζοντας το πλαίσιο αναφοράς σε αυτό ενός παρατηρητή επάνω στον πλανήτη Άρη. Αυτός θα βλέπει το διαστημόπλοιο μας να μεγαθύνεται από τον διαπλανητικό χώρο σε μια υπερβολική τροχιά σε σχέση με τον Άρη. Όταν πλέον φτάσει στο επιθυμητό ύψος πάνω από τον πλανήτη, το διαστημόπλοιο ενεργοποιεί τους πυράλλους του, παρέχοντας το Δv ώστε να επιβραδύνει σε μια κυκλική τροχιά γύρω από τον Άρη.

Για τον σχεδιασμό της αποστολής, πρέπει να είναι γνωστά τα μεγέθη των δύο Δv που χρειάζονται για να μεταβούν από την τροχιά της Γης στην τροχιά του Άρη. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τρεις διαφορετικές προοπτικές της προσαρμοσμένης κωνικής προσέγγισης, αυτό μπορεί να καταστεί εφικτό. Όταν πλέον είναι γνωστό το Δv μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μαθηματικοί τύποι που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (εξίσωση πυράλλου) ώστε να καθοριστεί η ποσότητα προωθητικού μέσου που θα χρειαστεί για ένα διαστημικό ταξίδι στον Άρη.

Κεφάλαιο 6 – Σχόλια - Συμπεράσματα

Ο άνθρωπος από πάντα είχε έμφυτη την περιέργεια της εξερεύνησης του κόσμου. Από τα αρχαία ακόμη χρόνια υπήρχαν επιστήμονες που ασχολήθηκαν με την ανακάλυψη και κατανόηση των φυσικών νόμων της Γης και του ουρανού. Βέβαια το βάρος δόθηκε στους επίγειους φυσικούς νόμους όπου ήταν περισσότερο προσιτοί και αντιληπτοί και λιγότερο στους ουράνιους καθώς δεν υπήρχαν τα μέσα για την εξερεύνηση του ουρανού. Το κλειδί για αυτό βρισκόταν ανέκαθεν στην Γη και για να εξερευνήσουμε τον ουρανό θα έπρεπε πρώτα να εξερευνήσουμε τη Γη.

Σήμερα, η ανθρωπότητα έχει προχωρήσει πάρα πολύ σε αυτήν την εξερεύνηση του κόσμου σε όλα τα επίπεδα. Από τον ουρανό, μέχρι την εμβάθυνση σε μοριακό επίπεδο έχουν γίνει καταπληκτικές ανακαλύψεις που μας έχουν κάνει να αναθεωρήσουμε την αντίληψη μας για το σύμπαν. Οι ανακαλύψεις συνεχίζονται με αυξανόμενο ρυθμό τα τελευταία χρόνια, σε εκθετικό μάλιστα βαθμό. Συνεχώς ανακαλύπτονται νέα ουράνια σώματα, νέα πλανητικά συστήματα, νέοι γαλαξίες και όλοι αυτοί οι νέοι ορίζοντες ανοίγονται μπροστά μας προς εξερεύνηση, προσκαλώντας μας να γνωρίσουμε νέους φυσικούς νόμους, νέα φαινόμενα νέα μυστικά και να αποκτήσουμε έτσι μια νέα αντίληψη και θεώρηση του κόσμου. Φυσικά, όλα αυτά διαδραματίζονται στο εξωγήινο αχανές περιβάλλον του διαστημικού χώρου, όπου ο άνθρωπος θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τα ανάλογα μέσα για την επίτευξη των στόχων του, τα διαστημικά πλοία. Όπως και στα αρχαία χρόνια οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν πλοία για την εξερεύνηση των ωκεανών του πλανήτη μας, έτσι και τώρα πάλι ο άνθρωπος χρησιμοποιεί πλοία για να φτάσει έως τις άκρες του ηλιακού μας συστήματος, και πέρα από αυτό, για την εξερεύνηση του διαστημικού πελάγους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια περιγραφής των φυσικών νόμων που διέπουν το σύμπαν όπως το αντιλαμβανόμαστε έως τώρα, καθώς και το πώς αυτοί αξιοποιούνται για την επίτευξη ενός διαπλανητικού ταξιδιού. Έγινε μια παρουσίαση των σημαντικότερων διαστημικών αποστολών, από την πρώτη μέχρι και τις νεότερες, στα πλαίσια της ιστορικής αναδρομής και της μέχρι τώρα εξερεύνησης του σύμπαντος. Πραγματοποιήθηκε μια περιγραφή του ηλιακού μας συστήματος και των ουράνιων σωμάτων που συναντούμε σε αυτό. Από το κεντρικό σώμα χάρη στο οποίο υφίσταται ζωή στον πλανήτη μας, τον Ήλιο, τους διάφορους πλανήτες, μαζί με τους φυσικούς δορυφόρους τους, που περιστρέφονται γύρω από αυτόν, έως και τους αναρίθμητους μικρούς «βράχους» που περιφέρονται, τους γνωστούς αστεροειδείς. Κατόπιν έγινε μετάβαση στις βασικές έννοιες της Μηχανικής των στερεών και των ρευστών σωμάτων οι οποίες υποστηρίζουν και πλαισιώνουν τις περαιτέρω, πιο πολύπλοκες έννοιες που χαρακτηρίζουν την κίνηση στο διάστημα. Έννοιες όπως, Δύναμη, Ενέργεια, Γωνιακή Ταχύτητα και Στροφορμή είναι μόνο κάποιες από τις οποίες θα πρέπει να είμαστε σε θέση να αντιληφθούμε για να μπορέσουν να γίνουν κατανοητές οι πολύπλοκες τροχιές των πλανητών και κατ' επέκταση η κίνηση ενός διαστημόπλοιου ανάμεσα σε αυτές. Στο τέταρτο και βασικότερο κεφάλαιο μελετήθηκε και αναλύθηκε η κίνηση στον διαστημικό χώρο. Αρχικά, οι βασικοί φυσικοί νόμοι επί των οποίων βασίζονται οι κινήσεις των ουράνιων σωμάτων και οι τροχιές τους, όπως η βαρύτητα και η Τροχιακή Μηχανική, και εν συνεχεία οι πρακτικές εφαρμογές όλων αυτών των φυσικών νόμων και φαινομένων. Μελετήθηκαν τροχιές τεχνητών δορυφόρων, τεχνικές μετάθεσης αυτών καθώς και περίφημοι και ευρέως χρησιμοποιούμενοι ελιγμοί υποβοήθησης που εφαρμόζονται στα διαστημικά σκάφη. Το τέταρτο κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με τη δυναμική συμπεριφορά του Ηλιακού μας συστήματος, όπου περιγράφηκαν οι τροχιές

των πλανητών, των φυσικών δορυφόρων τους, αλλά και των αστεροειδών. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αξιοποιήθηκαν όλα αυτά που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και επιτεύχθηκε ο σχεδιασμός ενός διαπλανητικού ταξιδιού.

Τα διαπλανητικά ταξίδια αποτελούν το μέσο για την εξέλιξη της ανθρώπινης φυλής. Από την εξερεύνηση του διαστήματος και των μυστικών του, μέχρι την αποίκηση κάποιου άλλου πλανήτη, τα διαπλανητικά ταξίδια είναι εξαιρετικής σημασίας. Ως εκ τούτου, η μελέτη, η κατανόηση και η βελτιστοποίηση τους κρίνεται αναγκαία. Άλλωστε δεν είναι τυχαίο το γεγονός πως τα τελευταία χρόνια πολλές χώρες έχουν στρέψει το, όχι πάντα επιστημονικό, ενδιαφέρον τους στο διάστημα. Το μέλλον του ανθρώπου είναι ανάμεσα στα άστρα, ας ανοίξουμε τους ορίζοντες μας και ας θέσουμε τα θεμέλια μιας νέας, διαστρικής εποχής.

Βιβλιογραφία

[Basics of Space Flight - Solar System Exploration: NASA Science](#) (προσβάσιμο στις 29 Μαρτίου 2023)

Danby, J.M.A. (1988). *Fundamentals of Celestial Mechanics*. 2nd ed. Willmann-Bell.

[Gravity assist - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 13 Φεβρουαρίου 2023)

[How Do You Get to the Moon? | National Air and Space Museum \(si.edu\)](#) (προσβάσιμο στις 18 Απριλίου 2023)

Howard, C. (2005). *Orbital Mechanics for Engineering Students*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

[Interplanetary spaceflight - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 22 Απριλίου 2023)

Interplanetary Travel. (χ.χ.). Ανακτήθηκε από [Ch4.1.6\(7\).fm \(faa.gov\)](#)

Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M. & Donner, K.J. (2007). *Fundamental Astronomy*. 4th ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Knight, R. (2010). *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς Β τόμος*. Αθήνα: Μακεδονικές Εκδόσεις.

[Lunar orbit - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 12 Απριλίου 2023)

[Oberth effect - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 8 Μαρτίου 2023)

[Orbital spaceflight - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 5 Απριλίου 2023)

[Roche limit | astronomy | Britannica](#) (προσβάσιμο στις 18 Μαρτίου 2023)

[Roche limit - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 18 Μαρτίου 2023)

Serway, R. & Jewett, J. (2012). *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς Α τόμος*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.

[Solar system planets, order and formation: A guide | Space](#) (προσβάσιμο στις 27 Δεκεμβρίου 2022)

[Spaceflight | Britannica](#) (προσβάσιμο στις 17 Απριλίου 2023)

[Tidal force - Wikipedia](#) (προσβάσιμο στις 18 Μαρτίου 2023)

Ways to the Moon?. (2000, August). Ανακτήθηκε από [ESA Bulletin 103 - Moon](#)

[Βαρυτικό πεδίο - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#) (προσβάσιμο στις 16 Μαρτίου 2023)

Δανιήλας, Σ. (2019). *Η προοπτική εύρεσης εξωγήινης ζωής μετά τα αποτελέσματα της αποστολής Kepler* (Μεταπτυχιακή Εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Δεληκαράογλου, Δ. (2007). *Εισαγωγή στο γήινο πεδίο βαρύτητας*. Αθήνα.

[Ηλιακό σύστημα - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#) (προσβάσιμο στις 21 Δεκεμβρίου 2022)

Ιόλης, Ν. (2013). *Μελέτη μαγνητικών διαταραχών στο βόρειο ημισφαίριο του πλανήτη Άρη* (Διπλωματική Εργασία). Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Καράβολος, Μ. (2017). *Μελέτη και προσομοίωση των τεχνικών μεταπομπής σε δορυφορικά δίκτυα* (Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

[Κλασική μηχανική - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](https://el.wikipedia.org) (προσβάσιμο στις 12 Ιανουαρίου 2023)

Λάμπας, Β. (χ.χ.). *Εισαγωγή στην Αεροδιαστημική*. Αθήνα

Μηχανική των τροχιών και εκτοξευτές. (χ.χ.). Ανακτήθηκε από [02satellite.indd \(eudoxus.gr\)](https://02satellite.indd.eudoxus.gr)

Νόμος παγκόσμιας έλξης της βαρύτητας. (χ.χ.). Ανακτήθηκε από [Microsoft Word - Chap12.doc \(upatras.gr\)](https://Microsoft Word - Chap12.doc (upatras.gr))

Τσιγάνης, Κ. & Βάρβογλης, Χ. (2015). *Πλανητικά Συστήματα*. Θεσσαλονίκη.