

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΠΥΡΑΥΛΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΣΠΥΡΑΤΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ (ΑΜ 5832)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2022



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην αρχή λειτουργία των πυραύλων, τη δομή και την προώθηση ενός πυραύλου με πυρηνικό αντιδραστήρα και σε εφαρμογές τους.

Η διπλωματική αυτή εργασία, αρχικά, ξεκινάει με μια ιστορική ανάδρομη στην εξερεύνηση του διαστήματος και στις μελλοντικές και τρέχουσες διαστημικές αποστολές. Στη συνέχεια, αναφέρεται στις συνθήκες και τη δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, τις βασικές γνώσεις και σχέσεις ώστε ένας πύραυλος να καταφέρει να μπει σε τροχιά. Επιπλέον, κάνει λόγο για τη σταδιοποίηση των πυραύλων και τις διάφορες μορφές στις οποίες συναντάμε τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Έστερα, εξηγεί τη χρήση και το σχεδιασμό των ακροφυσίων. Επικεντρώνεται στη θεωρία των ελλειπτικών τροχιών και τον τρόπο διαπλανητικών ταξιδιών. Τέλος, αναφέρεται σε όλους τους μηχανισμούς ελέγχου (ραντεβού, αισθητήρες, οχήματα εισόδου, ελεγκτές) και υποστήριξης ζωής.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Πολυζάκη Απόστολο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Σπυράτος Νικόλαος Χαράλαμπος

Φεβρουάριος 2022

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής



Σπυράτος Νικόλαος  
Χαράλαμπος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αναφέρεται στην μελέτη των πυρηνικών πυραυλικών συστημάτων. Αξιοποιώντας την πυρηνική σχάση, ένας πύραυλος αποκτά μια σημαντική ισχύ που θα τον βοηθήσει να συνεχίσει το ταξίδι του για περισσότερο χρόνο από έναν χημικό πύραυλο. Χρησιμοποιεί συνήθως υγρό υδρογόνο, το οποίο θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα και στη συνέχεια διαστέλλεται μέσω ενός ακροφυσίου για να δημιουργήσει ώθηση.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε εννέα Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές γνώσεις που πρέπει να γνωρίζουμε πριν ασχοληθούμε με την πυραυλική. Ποσά χιλιόμετρα πρέπει να διανύσει ο πύραυλος και ποιο είναι το σωστό σημείο που θα βρίσκεται σε χαμηλή τροχιά; Ποιες συνθήκες θα συναντήσει στη διαδρομή του; Επιπλέον αναφέρονται οι πιο σημαντικές ιστορικές ανακαλύψεις και η εξέλιξη των πυραύλων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Μια πρώτη ματιά στις αντιδράσεις σχάσης και σύντηξης που παίρνουν μέρος. Καθώς επίσης και στα κύρια μέρη που περιβάλλουν και προστατεύουν τον αντιδραστήρα αλλά και όλη την αποστολή.

Στο τρίτο κεφάλαιο υπάρχουν οι βασικοί ορισμοί που άνοιξαν το δρόμο για την επιστήμη των πυραύλων, όπως η ώθηση και ειδική ώθηση. Τη διάσημη πυραυλική εξίσωση του Κονσταντίν Τσιολκόφσκι, καθώς και το σημαντικό ρόλο που παίζει η σταδιοποίηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα βρούμε τις μορφές που έχουν οι πυρήνες των αντιδραστήρων. Τα θετικά και τα αρνητικά που τους συνοδεύουν. Επιπλέον θα συναντήσουμε τους θερμοδυναμικούς κύκλους ενός πυρηνικού πυραύλου, από την αρχή που το καύσιμο ξεκινάει τη ροή του μέχρι τη στιγμή που αυτό θα γίνει η αιτία που θα του δώσει την ώθηση που θα χρειαστεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στα ακροφύσια των πυραύλων. Ειδικότερα για τα ακροφύσια που δίνουν υπερηχητικές ταχύτητες και για τα κρουστικά κύματα. Τέλος για τις μορφές που συναντάμε τα ακροφύσια κατά την εφαρμογή τους.

Το έκτο κεφάλαιο ασχολείται με τις ελλειπτικές τροχιές. Ένα κεφάλαιο που είναι αρκετά σημαντικό για ένα πυρηνικό πύραυλο από την άποψη χρήσης του εκτός γήινης ατμοσφαιράς. Τα τροχιακά στοιχεία που πρέπει να γνωρίζουμε ώστε να αποκτήσουμε μια βάση για το τι παίρνει μέρος στην τροχιά. Αποτελέσματα και αιτίες που παρουσιάζουν τα σώματα που βρίσκονται σε τροχιά. Καθώς και για τη μεταφορά Hohmann και την ταχύτητα διαφυγής λόγω της βαρυτικής έλξης της γης.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις διαπλανητικές πτήσεις. Τους παράγοντες που παίρνουν μέρος ώστε να βρεθεί το διαστημόπλοιο από το ένα σημείο στο άλλο. Τις αλλαγές επιπέδου τροχιάς που γίνονται, καθώς και οι τρόποι που συμβαίνουν. Τέλος κάνει μια σύντομη αναφορά στις υπερβολικές τροχιές που μπορεί να συμβούν σε ένα διαπλανητικό ταξίδι.

Το όγδοο κεφάλαιο κάνει λόγο για τα συστήματα ελέγχου αντίδρασης, μια σειρά από λειτουργίες καθοριστικές για μια αποστολή. Διάφοροι αισθητήρες παίρνουν μέρος στον έλεγχο του οχήματος κατά την πτήση. Τα τροχιακά ραντεβού που πρέπει να γίνουν σωστά αλλά και τα οχήματα εισόδου που εμπλέκονται. Τέλος μια μικρή αναφορά σε όλους εκείνους τους μηχανισμούς, που παρέχουν υποστήριξη ζωής, απαραίτητα για ένα διαστημικό ταξίδι.

Το ένατο και τελευταίο κεφάλαιο απαντά στο ερώτημα αν η πυρηνική πρόωση είναι το μέλλον για μελλοντικά διαπλανητικά ταξίδια.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
A) Διάστημα .....	3
B) Ιστορικές ανακαλύψεις.....	6
<b>1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΥΡΑΥΛΩΝ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Ιστορική εξέλιξη πυραύλων .....	13
1.1.1 Βαλλιστικός πύραυλος .....	15
1.1.2 Τύποι βαλλιστικών πυραύλων .....	15
1.2 Συνθήκες για τη χρήση πυρηνικής ενέργειας για την εξερεύνηση του διαστήματος.....	16
<b>2. ΔΟΜΗ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....</b>	<b>17</b>
2.1 Πυρηνική Δομή.....	17
2.1.1 Πυρηνική Σχάση.....	17
2.1.2 Πυρηνική Σύντηξη.....	18
2.2 Οι αντιδραστήρες στο διάστημα.....	20
2.2.1 Τύμπανα ελέγχου.....	21
2.2.2 Θωράκιση.....	22
2.2.3 Ανακλαστήρας.....	23
2.2.4 Ράβδοι.....	24
2.3 Ασφάλεια αντιδραστήρα.....	25
<b>3. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....</b>	<b>25</b>
3.1 Ορισμοί.....	26
3.1.1 Ώθηση.....	26
3.1.2 Ορμή ώθησης .....	27
3.1.3 Ορμή πίεσης.....	27
3.1.4 Δραστική ταχύτητα εξόδου .....	27
3.1.5 Ειδική ώθηση.....	28
3.2 Μονοβάθμιοι Πύραυλοι.....	29
3.2.1 Η τελική μάζα.....	30
3.2.2 Η πυραυλική εξίσωση.....	30
3.2.3 Κλάσμα μάζας.....	31
3.2.4 Κλάσμα μάζας προωθητικού.....	32
3.2.5 Χαρακτηριστική ταχύτητα.....	32
3.3 Πύραυλος πολλαπλών σταδίων.....	32
3.3.1 Τύποι Σταδίων.....	34
3.3.2 Μειονέκτημα σταδίων.....	36
<b>4. ΤΥΠΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΠΥΡΑΥΛΩΝ.....</b>	<b>37</b>
4.1.1 Στερεός πυρήνας.....	37
4.1.2 Υγρός πυρήνας.....	38
4.1.3 Πυρήνας αερίου.....	38
4.1.4 Παλμικός πυρήνας.....	40
4.2 Κύκλοι μηχανών πυρηνικού πυραύλου.....	41

4.2.1 Θερμός ανοιχτός κύκλος.....	42
4.2.2 Ψυχρός ανοιχτός κύκλος.....	43
4.2.3 Κλειστός κύκλος Stirling.....	44
<b>5. ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΠΥΡΑΥΛΟΥ.....</b>	<b>45</b>
5.1 Κρουστικό κύμα.....	48
5.2 Ταχύτητα εξόδου Καυσαερίων.....	49
5.3 Μαζική παροχή ακροφυσίου.....	50
5.4 Επιλογή σχήματος ακροφυσίου.....	51
5.5 Τύποι ακροφυσίων.....	52
<b>6. ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ.....</b>	<b>54</b>
6.1 Οι τρεις νόμοι του Κέπλερ.....	55
6.2 Τροχιακά στοιχεία.....	55
6.3 Μεταφορά Hohmann.....	59
6.4 Τύποι τροχιών.....	62
6.5 Η σκοπιμότητα της τοποθεσίας εκτόξευσης.....	63
6.6 Τα αποτελέσματα της άντωσης και της ατμοσφαιρικής οπισθέλκουσας.....	64
6.7 Τα αποτελέσματα της βαρύτητας.....	66
6.7.1 Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης.....	67
6.8 Ταχύτητα διαφυγής.....	67
6.9 Αιτίες αποκλίσεων τροχιάς.....	68
<b>7. ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΕΣ ΠΤΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>69</b>
7.1 Αλλαγές επιπέδου τροχιάς.....	70
7.2 Υπερβολική τροχιά.....	71
<b>8. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ.....</b>	<b>73</b>
8.1 Έλεγχος στάσης.....	74
8.1.1 Αισθητήρες στάσης.....	75
8.2 Η διατήρηση τροχιάς.....	75
8.3 Τροχιακό ραντεβού.....	76
8.4 Όχημα εισόδου.....	78
8.5 Ελεγκτής PID.....	79
8.6 Manned Maneuvering Unit.....	81
8.7 ECLSS.....	82
<b>9. ΕΝΑΣ ΚΑΛΥΤΕΡΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΓΙΑ ΕΠΙΔΟΞΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΔΙΑΠΛΑΝΗΤΙΚΑ ΤΑΞΙΔΙΑ.....</b>	<b>84</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>85</b>



# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αεροδιαστημική μηχανική έχει δώσει στον άνθρωπο την ελευθερία να κινείται σε τρεις διαστάσεις. Ωστόσο, καθώς αφήνουμε την επιφάνεια της Γης για να πετάξουμε μέσα από την ατμόσφαιρα και έξω στο διάστημα, η προοπτική μας αλλάζει. Το μυαλό μας πρέπει να παλεύει με τεράστιες διαστάσεις και κλίμακες που σπάνια, αν όχι καθόλου, συναντώνται στη Γη.



Εικόνα 1: Έλεγχος και συντήρηση σταθμού, spacewalk (EDX)

Η **Αεροδιαστημική μηχανική** είναι ένας πολύπλευρος κλάδος της μηχανικής που αποτελείται από πολλούς επιμέρους κλάδους, όπως δυναμική ρευστού, υλικά και δομές, πρόωση, δυναμική, έλεγχοι, αυτοματισμοί, επικοινωνίες και λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα με την ανάπτυξη αεροπλάνων και διαστημόπλοιων. Περιλαμβάνει δύο αλληλοεπικαλιπτόμενους κλάδους αυτούς της Αεροναυπηγικής και της Αστροναυτικής.

Η **Αεροναυπηγική** είναι η επιστήμη και το επάγγελμα που ασχολείται με την ανάπτυξη, τον σχεδιασμό, την κατασκευή, τη δοκιμή και τη λειτουργία των ιπτάμενων οχημάτων

Η **Αστροναυτική** είναι η επιστήμη που ασχολείται με την κατασκευή μηχανών σχεδιασμένων να μπορούν να βγούν από την ατμόσφαιρα της Γης και να δουλέψουν πέρα από αυτό. Δηλαδή είναι η επιστήμη των διαστημικών πτήσεων.

Σε γενικές γραμμές, η μηχανική περιλαμβάνει την εφαρμογή της επιστήμης και των μαθηματικών για το σχεδιασμό και την κατασκευή δομών, προϊόντων, διαδικασιών ή συστημάτων που βελτιώνουν τη ζωή των ανθρώπων. Οι μηχανικοί εργάζονται σε μια ποικιλία

βιομηχανιών και είναι επιφορτισμένοι με την επίλυση ορισμένων από τα πιο δύσκολα προβλήματα που αντιμετωπίζει η κοινωνία.

## A) Διάστημα

Το διάστημα ή πιο επιστημονικά εξώτερο διάστημα (outer space), περιγράφεται ο αχανής χώρος όπου κινούνται όλα τα ουράνια σώματα και, ακριβέστερα, οι σχετικά κενές περιοχές μεταξύ των ουρανίων σωμάτων, πέρα από αυτά και τις ατμόσφαιρές τους.



Εικόνα 2: Ταξιδεύοντας στο άγνωστο (forbes.com)

Αρχικά η ακόρεστη περιέργεια του ανθρώπου και η ανάγκη να την ικανοποιήσει είναι ζωτικής σημασίας και χωρίς αυτή τη δίψα δε θα έφταναν πότε στο φεγγάρι. Η προσπάθεια για την απάντηση στο προαιώνιο ερώτημα αν είμαστε μόνοι στο σύμπαν ήταν ένας δύσκολος στόχος. Μέχρι στιγμής, το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler έχει αποκαλύψει αρκετούς εξωπλανήτες δυνητικά κατοικήσιμους και ικανούς να φιλοξενήσουν εξωγήινη ζωή.

Σε αντίθεση με τη συνήθη αντίληψη, το διάστημα δεν είναι εντελώς άδειο, δηλαδή ένα τέλειο κενό, αλλά εμφανίζει περιεκτικότητα (πολύ μικρής πυκνότητας) σε σωματίδια, κυρίως πλάσματος υδρογόνου, ενώ περιέχει ακόμα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια), καθώς και τα πολύ μικρής μάζας νετρίνα. Μακροσκοπικά, σε αυτό περιέχονται επίσης γαλαξίες και νεφελώματα. Σύμφωνα με νεότερες θεωρίες, οι γαλαξίες και τα νεφελώματα αποτελούν μόλις

το 5% της πραγματικής μάζας του σύμπαντος· το υπόλοιπο 95% αποτελείται, σύμφωνα με τις θεωρίες αυτές, από σκοτεινή ύλη και σκοτεινή ενέργεια, οι οποίες ωστόσο μέχρι σήμερα δεν έχουν παρατηρηθεί και η ύπαρξή τους δεν έχει επιβεβαιωθεί.

Από το 1990 μέχρι και σήμερα ακόμη, ένας πολύ σημαντικός λόγος για την εξερεύνηση του διαστήματος είναι η σκοτεινή ενέργεια. Ένα υποθετικό είδος ενέργειας που εκτείνεται παντού στο σύμπαν και τείνει να επιταχύνει τη διαστολή του.

## • Ατμόσφαιρα της Γης

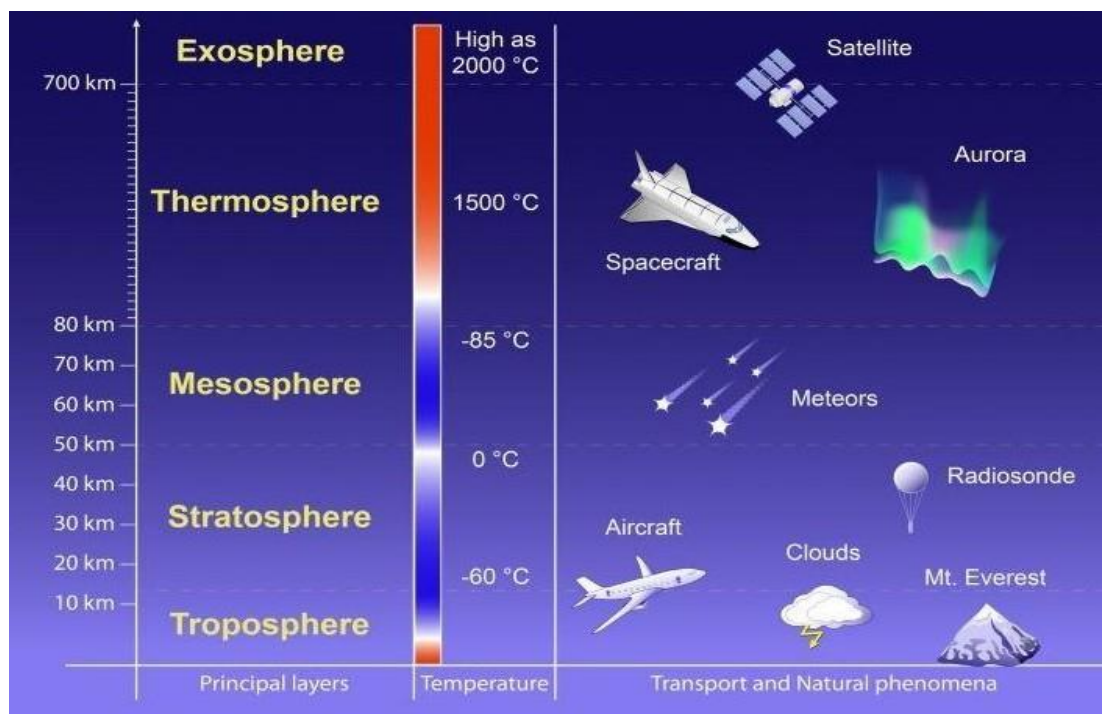
Με τον όρο ατμόσφαιρα της Γης εννοούμε το αέριο στρώμα που περιβάλλει τη Γη και συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς της, φτάνοντας πρακτικά σε ύψος 3.500 χιλιομέτρων. Το όριο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα δεν είναι αυστηρά καθορισμένο. Καθώς μεγαλώνει η απόσταση της από τη Γη η ατμόσφαιρα σταδιακά εξασθενεί και εξαφανίζεται σιγά σιγά στο διάστημα. Το υψόμετρο των 122 χλμ. ορίζει το σημείο που τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα γίνονται αισθητά κατά τη διάρκεια της επανεισόδου στην ατμόσφαιρα. Η γραμμή Κάρμαν στα 100 χλμ. λαμβάνεται επίσης συχνά σαν το σύνορο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα.

Σε όλη την ανθρώπινη ιστορία, έχουμε ζήσει βασικά σε δύο διαστάσεις. Οι άνθρωποι κοίταξαν προς τα πάνω και ονειρεύτηκαν να πετύχουν την ελευθερία να πετάξουν στον ουρανό σαν τα πουλιά. Έχουμε μύθους και θρύλους ανθρώπων που το επιτυγχάνουν, όπως ο Δαίδαλος και ο Ίκαρος. Φυσικά, μπορούμε να ανέβουμε βουνά και να ανεβούμε ανελκυστήρες στην κορυφή των ψηλών κτιρίων. Αλλά μέχρι πολύ πρόσφατα, τα ανθρώπινα όντα δεν μπορούσαν να αφήσουν την επιφάνεια της γης. Βασικά η αεροδιαστημική μηχανική είναι για το πώς μάθαμε να ταξιδεύουμε και να λειτουργούμε στην τρίτη διάσταση. Μερικοί άνθρωποι έχουν μια μικρή δυσκολία να καταλάβουν τις απίστευτες κλίμακες που συμμετέχουν καθώς φεύγουμε από τη γη και μετακινηθούμε στο σύμπαν.

Η αεροναυτική είναι το αεροπορικό μέρος της αεροδιαστημικής. Και όλα γίνονται μέσα στην ατμόσφαιρα που περιβάλλει τον πλανήτη μας. Αλλά η ατμόσφαιρα δεν συνεχίζεται για πάντα. Κρατείται στη Γη από τη βαρύτητα. Και η πίεση της σε οποιοδήποτε δεδομένο υψόμετρο εξαρτάται από το πόσο αέρας πιέζει κάτω από αυτό. Στην επιφάνεια, κοντά στο επίπεδο της θάλασσας και καθώς ανεβαίνεις πάνω από την επιφάνεια, υπάρχει όλο και λιγότερος αέρας πάνω σου πιέζοντας προς τα κάτω και έτσι η πίεση μειώνεται. Από τεχνική άποψη, η κατανομή πίεσης πέφτει εκθετικά με ύψος πάνω από την επιφάνεια της Γης. Στα 5,5 χιλιόμετρα, είστε ήδη πάνω από το ήμισυ της ατμόσφαιρας μας. Στην κορυφή του όρους Έβερεστ, στα 8,8 χιλιόμετρα, στην πραγματικότητα ανεβαίνετε ένα ύψος κλίμακας και έτσι η πίεση είναι περίπου το ένα τρίτο της πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο εκεί για να διατηρήσει τη ζωή, αλλά τα αεροπλάνα θέλουν να πετούν σε αυτά τα μεγάλα υψόμετρα επειδή ο λεπτός αέρας έχει λιγότερη αντίσταση, κάτι που σημαίνει ότι καίνε λιγότερα καύσιμα. Τα μεγαλύτερα εμπορικά αεροπλάνα πετούν περίπου στα 12 χιλιόμετρα, αυτό είναι 39.000 πόδια.

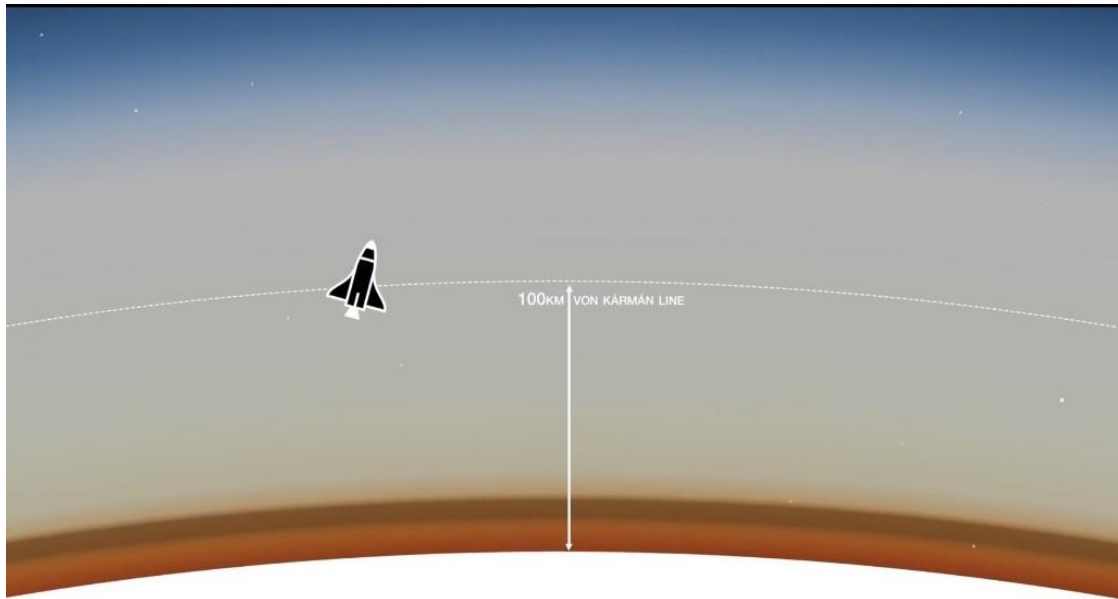
Η αέρια περιοχή που περιβάλλει τον πλανήτη χωρίζεται σε διάφορα ομόκεντρα σφαιρικά στρώματα εκ των οποίων η **τροπόσφαιρα** είναι η χαμηλότερη. Η **στρατόσφαιρα** είναι το δεύτερο σημαντικό στρώμα αέρα στην ατμόσφαιρά μας. Ανεβαίνει περίπου 50 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Περίπου το 90% του όζοντος στην ατμόσφαιρα

κατοικεί στη στρατόσφαιρα σε αυτό που ονομάζουμε όζον στρώμα, το οποίο βρίσκεται σε υψόμετρο μεταξύ περίπου 20 και 30 χιλιομέτρα. Η στιβάδα του όζοντος απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία από τον ήλιο, κάτι που θα ήταν επιβλαβές για τη ζωή. Μερικά εξειδικευμένα αεροπλάνα μπορούν να πετούν με λεπτό αέρα στην κάτω στρατόσφαιρα. Η **μεσόσφαιρα** εκτείνεται από περίπου 50 έως 80 χιλιομέτρα. Σε αυτήν την περιοχή, συγκεντρώσεις υδρατμών και όζοντος είναι σχεδόν αμελητέα. Μετά έχουμε τη **θερμόσφαιρα**. Η θερμοκρασία στη θερμόσφαιρα γενικά αυξάνεται με το υψόμετρο σε περίπου 1700 βαθμούς Κελσίου λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα υπόλοιπα μόρια αερίου. Η **εξώσφαιρα** είναι η πιο απόμακρη ατμοσφαιρική περιοχή από την επιφάνεια της Γης. Το ανώτερο όριο αυτού του επιπέδου εκτείνεται σε ύψη 1.000 χιλιομέτρων και είναι σχετικά απροσδιόριστο. Η εξώσφαιρα είναι μια μεταβατική περιοχή μεταξύ της γήινης ατμόσφαιρας και του διαπλανητικού χώρου. Εδώ, ο αέρας είναι αρκετά λεπτός ώστε οι δορυφόροι να μπορούν πραγματικά μείνουν σε τροχιά.



Εικόνα 3: Τα στρώματα της ατμόσφαιρας (123rf.com)

Στη γραμμή των 100 χιλιομέτρων Von Karman, ο εναπομείνας αέρας δημιουργεί ακόμα πολύ μεγάλη έλξη για να μας επιτρέψει να παραμείνουμε σε τροχιά. Το χαμηλότερο το διαστημικό λεωφορείο που περιστράφηκε ποτέ ήταν λίγο πάνω από 200 χιλιομέτρα. **Γεωστατική τροχιά** από την άλλη πλευρά, είναι 36.000 χιλιομέτρα μακριά. Εδώ στα 36.000 χιλιομέτρα, η περίοδος της τροχιάς είναι 24 ώρες, η ίδια με τη Γη. Έτσι, αυτοί οι δορυφόροι παραμένουν στο ίδιο σημείο στη Γη όλη την ώρα, όπου συνήθως βρίσκονται οι δορυφόροι τηλεπικοινωνιών.



Εικόνα 4: Γραμμή Von Karman (edx)

## Β) Ιστορικές ανακαλύψεις

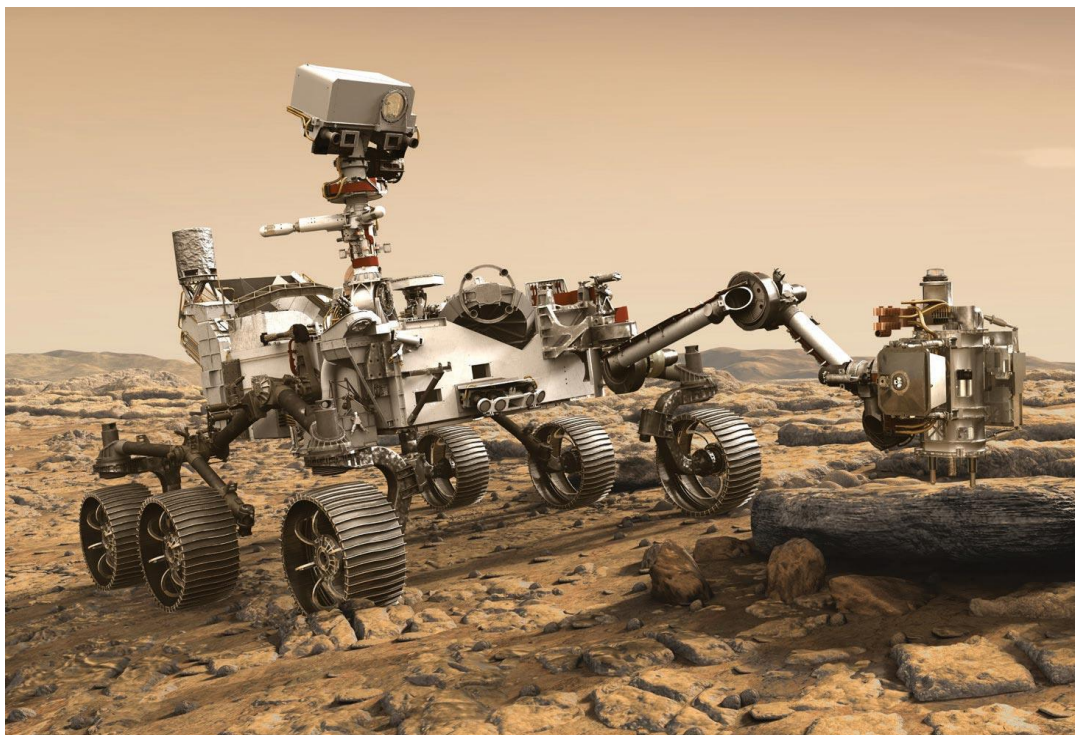
Το φεγγάρι είναι πολύ μακριά περίπου 400.000 χιλιόμετρα. Και η περιφέρεια της Γης είναι περίπου 25.000 μίλια ή περίπου 40.000 χιλιόμετρα. Έτσι, η απόσταση από το φεγγάρι είναι περίπου 10 φορές η περιφέρεια της Γης. Χρειάστηκαν σχεδόν τρεις μέρες οι αστροναύτες του Apollo. Μόνο 24 ανθρώπινα όντα έχουν φτάσει τόσο μακριά, εκ των οποίων 12 περπάτησαν στην επιφάνεια του φεγγαριού.



Εικόνα 5: Εικόνα της Γης από τη Σελήνη (quora.com)

Αυτές τις μέρες, πολλοί άνθρωποι μιλούν για τον Άρη ως ο επόμενος προορισμός για ανθρώπινη διαστημική πτήση. Λοιπόν, αν νομίζετε ότι η μετάβαση στο φεγγάρι ήταν δύσκολη, αυτό δεν ήταν τίποτα σε σύγκριση με τη μετάβαση στον Άρη. Ο Άρης είναι περίπου 40 εκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά από τη Γη, δηλαδή 100 φορές πιο μακριά από το φεγγάρι.

Η ανθρώπινη εξερεύνηση του Άρη μπορεί να πραγματοποιηθεί μια μέρα. Αλλά χρειάζονται οι οικονομικοί πόροι για να το πετύχουμε αυτό και πέρα από αυτό που έχουμε σήμερα διαθέσιμο. Αλλά η επιθυμία να εξερευνηθεί μπορεί τουλάχιστον εν μέρει να μας αφηνει ικανοποιημένους με ρομποτικούς εξερευνητές, όπως το 1997 με το **Pathfinder Rover**.



Εικόνα 6: Τα ρόβερ στον πλανήτη Άρη (scitechdaily.com)

Πήγαμε στον Δία για να τον δούμε για πρώτη φορά από κοντά, και τους δορυφόρους που ανακαλύφθηκαν από το **Galileo**. Το διαστημικό σκάφος **Cassini** μας έχει δώσει μια κοντινή θέα του Κρόνου, των δορυφόρων του, και τα εντυπωσιακά δαχτυλίδια του. Και μπορούμε να βγούμε πιο πέρα, πέρα από τους εξωτερικούς πλανήτες Ουρανό και Ποσειδώνα. Στην πραγματικότητα, το **Voyager 2** το έκανε αυτό που ονομαζούμε Grand Tour των εξωτερικών πλανητών. Το διαστημικό σκάφος **New Horizons** συναντά τον Πλούτωνα, τον Ιούλιο του 2015, σηματοδοτεί την πρώτη μας εξερεύνηση των νάνων πλανητών της ζώνης του Kuiper, εκ των οποίων ο Πλούτωνα είναι ο πλησιέστερος στον ήλιο. Ο πιο μακρινός ρομποτικός εξερευνητής των ανθρωπιστικών επιστημών είναι το **Voyager 1**, που κυκλοφόρησε το 1977, το οποίο πέταξε πέρα από τον Δία και τον Κρόνο και κράτησε πηγαίνοντας προς τις εξωτερικές περιοχές του ηλιακού συστήματος. Οι Voyagers εξακολουθούν να μιλούν μαζί μας. Ο χρόνος για επικοινωνία μαζί τους είναι περίπου 18 ώρες. Χάρη στα σύγχρονα αστρονομικά εργαλεία, όπως το **Space Hubble**, μπορούμε να δούμε πολύ πιο μακριά από ότι θα μπορούσαμε ποτέ να δούμε με γυμνά μάτια μας.



1) ο δορυφόρος Galileo σε τροχιά γύρω από το Δία. 2) ο δορυφόρος Cassini. 3),4) Voyager 1 και 2. 5) Το διαστημικό σκάφος New Horizons. 6) το τηλεσκόπιο Space Hubble (esa)

- **Τρέχουσες αποστολές**

- **Hubble**

Από τότε που εκτοξεύτηκε το 1990, το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble συνέβαλε τεράστια στην αστροβιολογία. Οι αστρονόμοι χρησιμοποίησαν το Hubble για να κάνουν τις πρώτες μετρήσεις της ατμοσφαιρικής σύνθεσης των εξωηλιακών πλανητών και ο Hubble χαρακτηρίζει τώρα έντονα τις ατμόσφαιρες εξωπλανητών με συστατικά όπως νάτριο, υδρογόνο και υδρατμούς. Οι παρατηρήσεις του Hubble παρέχουν επίσης ενδείξεις για το πώς σχηματίζονται οι πλανήτες, μέσω μελετών σκόνης και συντρίμια δίσκων γύρω από νεαρά αστέρια.

Δεν περιλαμβάνουν όλες οι συνεισφορές του Hubble μακρινούς στόχους. Το Hubble έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη σωμάτων εντός του ηλιακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων αστεροειδών, κομητών, πλανητών και φεγγαριών, όπως τα ενδιαφέροντα παγωμένα φεγγάρια που φέρουν ωκεανούς Ευρώπη και Γανυμήδης. Το Hubble παρέχει ανεκτίμητη εικόνα για τις δυνατότητες ζωής στο ηλιακό σύστημα και όχι μόνο.

- **MAVEN**

Η αποστολή της NASA για την ανακάλυψη της ατμόσφαιρας του Άρη, Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2013 και άρχισε να περιφέρεται σε τροχιά γύρω από τον Άρη περίπου ένα χρόνο αργότερα. Από τότε, η αποστολή συνέβαλε θεμελιωδώς στην κατανόηση της ιστορίας της ατμόσφαιρας και του κλίματος του Άρη.

Οι αστροβιολόγοι εργάζονται με αυτά τα ατμοσφαιρικά δεδομένα για να κατανοήσουν καλύτερα πώς και πότε ο Άρης έχασε το νερό του και εντοπίζουν περιόδους στην ιστορία του Άρη, όταν πιθανότατα υπήρχαν κατοικήσιμες συνθήκες στην επιφάνεια του πλανήτη.

### ➤ **Mars Odyssey**

Για δύο δεκαετίες, το Mars Odyssey της NASA-το μακροβιότερο διαστημόπλοιο στον Κόκκινο Πλανήτη-βοήθησε στον εντοπισμό πάγου, στην αξιολόγηση των θέσεων προσγείωσης και στη μελέτη των μυστηριωδών φεγγαριών του πλανήτη.

Το Mars Odyssey έχει προσφέρει παγκόσμιους χάρτες χημικών στοιχείων και ορυκτών που αποτελούν την επιφάνεια του Άρη. Αυτοί οι λεπτομερείς χάρτες χρησιμοποιούνται από τους αστροβιολόγους για να καθορίσουν την εξέλιξη του περιβάλλοντος του Άρη και τις δυνατότητές του για ζωή.

### ➤ **Mars Reconnaissance Orbiter**

Το Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) βρίσκεται σε αναζήτηση για αποδείξεις ότι το νερό επέμεινε στην επιφάνεια του Άρη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ενώ άλλες αποστολές του Άρη έδειξαν ότι το νερό έτρεχε στην επιφάνεια στην ιστορία του Άρη, παραμένει μυστήριο αν το νερό ήταν ποτέ αρκετά μεγάλο για να προσφέρει ένα βιότοπο για ζωή.

Τα δεδομένα από το MRO είναι απαραίτητα για τους αστροβιολόγους που μελετούν τις δυνατότητες για κατοικήσιμα περιβάλλοντα στον προηγούμενο και τον σημερινό Άρη. Επιπλέον, αυτές οι μελέτες είναι σημαντικές για τη δημιουργία κλιματικών μοντέλων για τον Άρη και για χρήση σε συγκριτικές μελέτες πλανητολογίας για την πιθανή κατοικήσιμότητα εξωπλανητών που περιφέρονται σε μακρινά αστέρια.

### ➤ **Curiosity Mars Rover**

Το Curiosity Mars περιπλανήθηκε μελετώντας αν ο Άρης είχε ποτέ συνθήκες ικανές να υποστηρίξουν μικροβιακή ζωή. Με άλλα λόγια, η αποστολή του είναι να καθορίσει εάν ο πλανήτης είχε όλα τα συστατικά που χρειάζεται η ζωή, όπως νερό, άνθρακας και πηγή ενέργειας, μελετώντας το κλίμα και τη γεωλογία του. Έχουν περάσει σχεδόν εννέα χρόνια από τότε που το Curiosity άγγιξε τον Άρη το 2012 και τα ρομπότ γεωλόγοι κάνουν νέες ανακαλύψεις. Η περιέργεια παρείχε στοιχεία ότι λίμνες γλυκού νερού γέμισαν τον Gale Crater πριν από δισεκατομμύρια χρόνια. Οι λίμνες και τα υπόγεια ύδατα παρέμειναν για εκατομμύρια χρόνια και περιείχαν όλα τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη ζωή, αποδεικνύοντας ότι ο Άρης ήταν κάποτε κατοικήσιμος.

### ➤ **Αποστολή TESS**

Το Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) είναι το επόμενο βήμα στην αναζήτηση πλανητών εκτός του ηλιακού μας συστήματος, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τη ζωή. Ξεκίνησε το 2018, το TESS έχει αποστολή να ερευνήσει ολόκληρο τον ουρανό και αναμένεται να ανακαλύψει και να καταγράψει χιλιάδες εξωπλανήτες γύρω από κοντινά φωτεινά αστέρια. Μέχρι σήμερα, το TESS έχει ανακαλύψει περισσότερους από 120 επιβεβαιωμένους εξωπλανήτες και περισσότερους από 2.600 υποψήφιους πλανήτες. Ο κυνηγός πλανητών θα συνεχίσει να βρίσκει στόχους εξωπλανητών που θα μελετήσει το επερχόμενο διαστημικό τηλεσκόπιο της Τζέιμς Γουέμπ της NASA με περισσότερες λεπτομέρειες.



### ➤ **Perseverance Mars Rover**

Το νεότερο ρομπότ αστροβιολόγος της NASA, το rover του Perseverance, άγγιξε με ασφάλεια στον Άρη στις 18 Φεβρουαρίου 2021 και ξεκινά μια νέα εποχή εξερεύνησης στον Κόκκινο Πλανήτη. Η επιμονή θα αναζητήσει σημάδια αρχαίας μικροβιακής ζωής, τα οποία θα προωθήσουν την αναζήτηση του οργανισμού να εξερευνήσει την προηγούμενη κατοικησιμότητα του Άρη. Αυτό που πραγματικά ξεχωρίζει αυτή την αποστολή είναι ότι το rover έχει ένα τρυπάνι για τη συλλογή βασικών δειγμάτων του πετρώματος και του εδάφους του Άρη και θα τα αποθηκεύσει σε σφραγισμένους σωλήνες για παραλαβή από το μέλλον.

### • **Επερχόμενες αποστολές**

#### ➤ **Διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb**

Το διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb (Webb), που αναμένεται να εκτοξευθεί το 2021, θα είναι το κορυφαίο διαστημικό παρατηρητήριο της επόμενης δεκαετίας. Webb είναι ένα μεγάλο υπέρυθρο τηλεσκόπιο με κύριο καθρέφτη 6,5 μέτρων. Οι παρατηρήσεις του Webb θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη κάθε φάσης της ιστορίας του σύμπαντος, συμπεριλαμβανομένων των πλανητών και των φεγγαριών στο ηλιακό μας σύστημα, και τον σχηματισμό μακρινών ηλιακών συστημάτων που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τη ζωή σε εξωπλανήτες σαν τη Γη. Το τηλεσκόπιο Webb θα είναι επίσης σε θέση να κάνει λεπτομερείς παρατηρήσεις για τις ατμόσφαιρες των πλανητών που περιφέρονται γύρω από άλλα αστέρια, για να αναζητήσει τα δομικά στοιχεία της ζωής σε πλανήτες που μοιάζουν με τη Γη πέρα από το ηλιακό μας σύστημα.

#### ➤ **Αποστολή Europa Clipper**

Η Ευρώπη του Δία μπορεί να έχει τη δυνατότητα να φιλοξενήσει ζωή. Το Europa Clipper θα πραγματοποιήσει λεπτομερή αναγνώριση της Ευρώπης και θα διερευνήσει εάν το παγωμένο φεγγάρι θα μπορούσε να φιλοξενήσει συνθήκες κατάλληλες για ζωή. Στοχεύοντας στην εκτόξευση του 2024, η αποστολή θα τοποθετήσει ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά γύρω από τον Δία, προκειμένου να πραγματοποιήσει μια λεπτομερή έρευνα της Ευρώπης - ενός κόσμου που δείχνει ισχυρά στοιχεία για έναν ωκεανό υγρού νερού κάτω από τον παγωμένο φλοιό του. Το Europa Clipper δεν είναι μια αποστολή ανίχνευσης ζωής, αν και θα ερευνήσει εάν το παγωμένο φεγγάρι, με τον υπόγειο ωκεανό του, έχει την ικανότητα να υποστηρίξει τη ζωή. Η κατανόηση της κατοικησιμότητας της Ευρώπης θα βοηθήσει τους επιστήμονες να κατανοήσουν καλύτερα πώς αναπτύχθηκε η ζωή στη Γη και τη δυνατότητα εύρεσης ζωής πέρα από τον πλανήτη μας.

#### ➤ **Artemis program**

Μέσω του τρέχοντος προγράμματος Artemis, η NASA οραματίζεται να στείλει αστροναύτες στον σεληνιακό νότιο πόλο έως το 2024 και τελικά να δημιουργήσει μόνιμη παρουσία στη Σελήνη. Με τις αποστολές Artemis, η NASA θα προσγειώσει την πρώτη γυναίκα και το πρώτο έγχρωμο άντρα στη Σελήνη, χρησιμοποιώντας καινοτόμες τεχνολογίες για να εξερευνήσει περισσότερο από ποτέ τη σεληνιακή επιφάνεια. Στόχος είναι να χτιστεί μια βάση στην

επιφάνεια και σε σεληνιακή τροχιά. Αυτά θα επιτρέψουν στα ρομπότ και τους αστροναύτες να εξερευνήσουν περισσότερο και να διεξάγουν περισσότερη επιστήμη από ποτέ.

- **Οργανισμοί**

Η **NASA** (National Aeronautics and Space Administration, δηλαδή Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος, συχνά γράφεται στα ελληνικά και ως ΝΑΣΑ) είναι κρατικός αμερικανικός οργανισμός που ασχολείται με την εξερεύνηση του διαστήματος, την αεροναυτική και τη μελέτη του περιβάλλοντος της Γης. Ιδρύθηκε στις 29 Ιουλίου του 1958 με την Πράξη Εθνικής Αεροναυτικής και Διαστήματος. Η έδρα της NASA βρίσκεται στην Ουάσινγκτον, ενώ όλες οι εκτοξεύσεις των επανδρωμένων και μη επανδρωμένων διαστημοπλοίων της πραγματοποιούνται στο διαστημικό κέντρο Κένεντι. Είναι διαστημοδρόμιο κοντά στο ακρωτήριο Κανάβεραλ, κάπου ανάμεσα στο Μαϊάμι και το Τζάκσονβιλ. Έχει μήκος 55 χλμ και πλάτος περίπου 10 χλμ, καλύπτοντας 567 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Περίπου 17.000 άνθρωποι εργάζονται στην περιοχή αυτή. Διαθέτει ένα κέντρο επισκεπτών και οργανωμένες περιηγήσεις, και είναι από τους σημαντικότερους τουριστικούς προορισμούς για τους επισκέπτες της Φλόριντα. Το γεωγραφικό πλάτος του Κέιπ Κανάβεραλ είναι περίπου 28,5 μοίρες βόρεια.



Εικόνα 7: Το αρχηγείο της NASA ([saturdayeveningpost.com](http://saturdayeveningpost.com))

**ESA** (European Space Agency) είναι ευρωπαϊκός οργανισμός με έδρα το Παρίσι. Ορισμένες φορές αποδίδεται λαθεμένα στην ελληνική ως Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ΕΥΔ). Δημιουργήθηκε στις 30 Μαΐου 1975 με σκοπό τον καλύτερο συντονισμό των ευρωπαϊκών διαστημικών δραστηριοτήτων, ως αποτέλεσμα της κατανόησης ότι ήταν ασύμφορο να έχει η κάθε χώρα μέλος ένα ξεχωριστό διαστημικό πρόγραμμα και με απώτερο σκοπό να ανταγωνιστεί την τεχνολογική υπεροχή της ΕΣΣΔ και των ΗΠΑ στον συγκεκριμένο τομέα.

Έχει 22 κράτη μέλη και 2.000 εργαζόμενους. Αυτά τα ιδιαίτερα εξειδικευμένα άτομα προέρχονται από όλα τα κράτη μέλη και περιλαμβάνουν επιστήμονες, μηχανικούς, ειδικούς πληροφορικής και διοικητικό προσωπικό. Το κέντρο εκτόξευσης είναι στο Κουρού της Γαλλικής Γουιάνας είναι μόνο 6 μίρες βόρεια του ισημερινού.



Εικόνα 8: Το κοσμοδρόμιο της ESA στην Γαλλική Γουιάνα ([aviationmuseum.eu](http://aviationmuseum.eu))

**Roscosmos State Space Corporation** έχει την έδρα της στη Μόσχα, με το κύριο Κέντρο Ελέγχου Αποστολών στην κοντινή πόλη Κοζολγον και το Εκπαιδευτικό Κέντρο Κοσμοναυτών Yuri Gagarin που βρίσκεται στο Σταρ Σίτι στην Περιφέρεια της Μόσχας. Οι εγκαταστάσεις εκτόξευσής του περιλαμβάνουν το Κοσμοδρόμιο του Μπαϊκονούρ στο Καζακστάν, το πρώτο και μεγαλύτερο διαστημικό αεροδρόμιο στον κόσμο, και το Κοσμοδρόμιο Βοστότσι, το οποίο κατασκευάζεται στη ρωσική Άπω Ανατολή στην Περιφέρεια Αμούρ.



Εικόνα 9: Το Κοσμοδρόμιο του Μπαϊκονούρ στο Καζακστάν ([britannica.com](http://britannica.com))

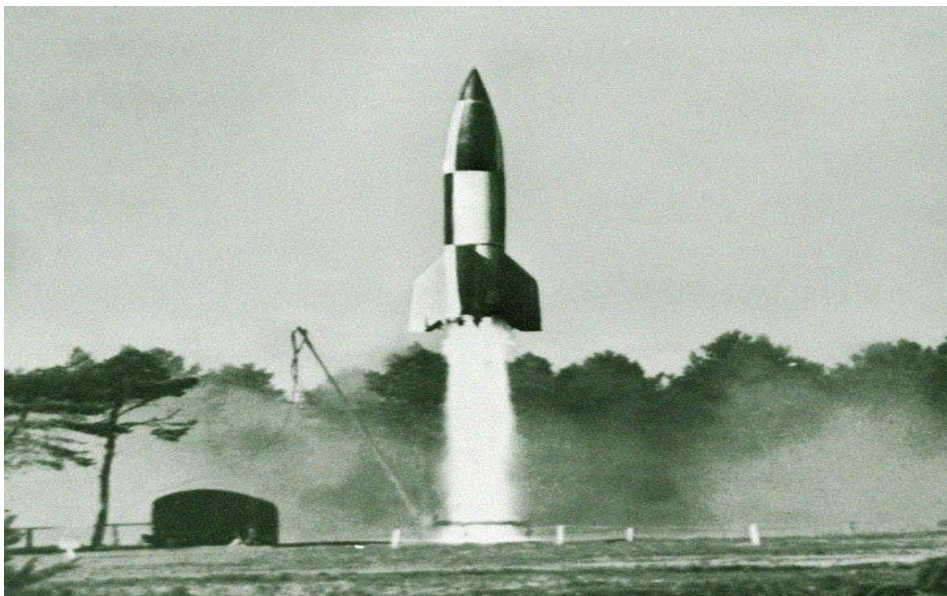
# 1. Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των πυραύλων

## 1.1 Ιστορική εξέλιξη πυραύλων

Ο **πυραυλοκινητήρας** ή **πύραυλος** ή ρουκέτα είναι βλήμα, που προωθείται εκτοξεύοντας αέρια που προέρχονται από καύση στερεών ή υγρών καυσίμων. Η λειτουργία του στηρίζεται στη θεωρία του Νεύτωνα περί δράσης και αντίδρασης, με βάση και την αρχή διατήρησης της ορμής. Η ταχύτητα του πυραύλου καθορίζεται από το μέγεθός του και την ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα αέρια. Η καύση γίνεται με τη βοήθεια του οξυγόνου, που εναποθηκεύεται σε υγρή μορφή μέσα στον πύραυλο, και άλλων ουσιών που δρουν σαν οξειδωτές. Το ελληνικό όνομά του πήρε ο πύραυλος από το πυρ (φωτιά) και το αυλός (φλογέρα) λόγω του σχήματός του και του τρόπου πρόωσης που συνοδεύεται από φλόγα.

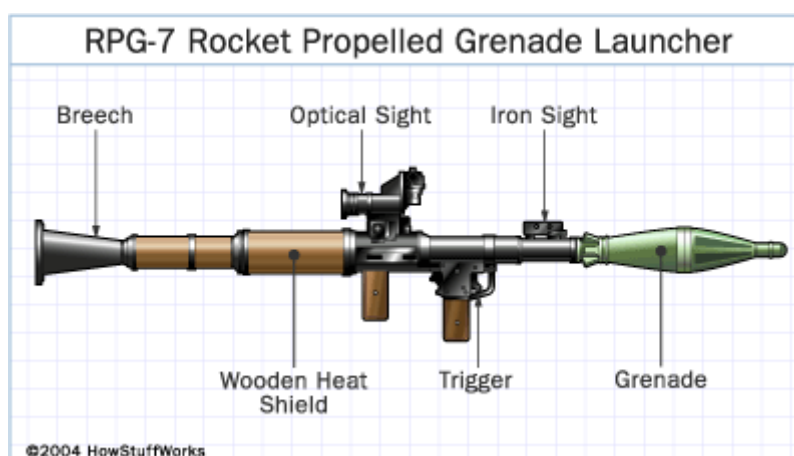
Ο πύραυλος ήταν γνωστός στους Κινέζους από το 13ο αιώνα μ.Χ., ίσως και νωρίτερα. Τον χρησιμοποίησαν το 1232 μ.Χ. σε μάχη που έδωσαν με το γιο του Τζένγκις Χαν. Οι πύραυλοι εκείνοι χρησιμοποιούσαν σαν καύσιμο την πυρίτιδα. Πιθανόν από τους Κινέζους να έμαθαν τον πύραυλο και οι Ινδοί, που τον χρησιμοποίησαν εναντίον των Άγγλων. Διαμέσου των Άγγλων, μεταφέρθηκε στην Ευρώπη η τεχνολογία της κατασκευής πυραύλων. Οι Άγγλοι χρησιμοποίησαν πυραύλους (ρουκέτες) στη μάχη της Βουλώνης, ενάντια στα γαλλικά στρατεύματα και επίσης όταν αντιμετώπιζαν τα αμερικανικά στρατεύματα το 1814, στην Ουάσιγκτον.

Οι πρώτες θεωρίες για τους πυραύλους που ταξιδεύουν αυτόνομα και οραματιστής των διαστημικών ταξιδιών υπήρξε ο Ρώσος **Κωνσταντίν Τσιολκόφσκι** (Konstantin Tsiolkovsky 1857-1935). Ο Τσιολκόφσκι, εμπνευσμένος από τα μυθιστορήματα επιστημονικής φαντασίας του Ιουλίου Βερν, ανακάλυψε μόνος του τα μαθηματικά, την φυσική και την μηχανική των πυραύλων.



Εικόνα 10: 3 Οκτωβρίου 1942: η πρώτη επιτυχής εκτόξευση του πυραύλου V-2 (Wikipedia)

Στη διάρκεια του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου, χρησιμοποιήθηκαν επίσης πύραυλοι και ρουκέτες. Οι Ρώσοι χρησιμοποίησαν τις ρουκέτες Κατιούσα, ενώ Γερμανοί ανέπτυξαν περισσότερο την πυραυλική τεχνολογία, χρησιμοποιώντας αρκετούς τύπους πυραύλων. Ο πιο γνωστός από αυτούς, που χρησιμοποιήθηκαν εναντίον του Λονδίνου και άλλων πόλεων, ήταν οι ρουκέτες V1 και οι βαλλιστικοί πύραυλοι V2, που έγιναν τα πρώτα αντικείμενα που πέταξαν έξω απ' την ατμόσφαιρα της γης και αποτέλεσαν τη βάση για τους πρώτους πυραύλους που αναπτύχθηκαν αργότερα. Μετά τον πόλεμο, το κέντρο μελέτης και έρευνας μεταφέρθηκε στην Αμερική και τη Σοβιετική Ένωση, με τη χρήση και αιχμάλωτων Γερμανών επιστημόνων που μεταφέρθηκαν στις χώρες αυτές.



Εικόνα 11: RPG (μπαζούκας) (science.howstuffworks)

Μικροί πύραυλοι είναι τα γνωστά όπλα **μπαζούκας**, δηλαδή οι ατομικοί πύραυλοι, που απαιτούν προσωπικό δυο ατόμων για να μεταφερθούν και να χρησιμοποιηθούν. Το 1932 ο γερμανικός στρατός προσέλαβε ένα επίλεκτο μέλος της VfR για να τον βοηθήσει στα δικά του στρατιωτικά πυραυλικά προγράμματα. Το μέλος αυτό ήταν ο Βέρνερ φον Μπράουν (Werner von Braun). Το 1937 δημιουργήθηκε στο Πενεμούντε (Peenemunde) το γερμανικό κέντρο πυραυλικών ερευνών με τον φον Μπράουν ως τεχνικό διευθυντή. Αξιοσημείωτο είναι δε το γεγονός ότι οι Γερμανοί αγνοούσαν πλήρως τις δοκιμές του Goddard και κινήθηκαν εντελώς ανεξάρτητα στα πειράματά τους. Κατά τη διάρκεια του πολέμου οι Γερμανοί κατασκεύασαν μεγάλο αριθμό πειραματικών μοντέλων αρκετά πιο εξελιγμένων από τα αντίστοιχα συμμαχικά. Το γνωστότερο από αυτά, που αποτέλεσε και τον εφιάλτη των κατοίκων της Βρετανίας, ήταν το A-4 που αργότερα μετονομάστηκε σε V-2. Αυτός ήταν και ο πρώτος πύραυλος μεγάλης κλίμακας ο οποίος χρησιμοποιούσε υγρά καύσιμα, με 56000 λίβρες ώση και ακτίνα δράσης που άγγιζε τα 300 χλμ. Μετά τη λήξη του πολέμου σχέδια και επιστήμονες παραδόθηκαν στους Συμμάχους, οι περισσότεροι δε από αυτούς μετακόμισαν είτε στην ΕΣΣΔ είτε στις ΗΠΑ. Ο φον Μπράουν και το τεχνικό επιτελείο του βρέθηκε στην άλλη μεριά του Ατλαντικού. Η έρευνα για τους πυραύλους άρχισε δειλά - δειλά να ξεφεύγει από τα στενά στρατοκρατούμενα πλαίσια. Παρόλ' αυτά ο ανταγωνισμός των υπερδυνάμεων κατά τη ψυχροπολεμική περίοδο ήταν αυτός που σηματοδότησε την αυγή της διαστημικής εποχής με την χρησιμοποίηση πυραύλων για την εκτόξευση διαστημικών συσκευών.

### 1.1.1 Βαλλιστικός πύραυλος

Ένας βαλλιστικός πύραυλος είναι πύραυλος ο οποίος ακολουθεί μια βαλλιστική, υποτροχιακή πορεία πτήσης με στόχο τον βομβαρδισμό ενός προκαθορισμένου στόχου με μία ή περισσότερες κεφαλές (συχνά πυρηνικές). Ο πύραυλος καθοδηγείται μόνο κατά τη σχετικά σύντομη αρχική φάση πτήσης του και, στη συνέχεια, η πορεία του διέπεται από τους νόμους της τροχιακής μηχανικής και της βαλλιστικής. Μέχρι σήμερα, οι βαλλιστικοί πύραυλοι προωθούνται κατά τη διάρκεια της πτήσης, με χημικές πυραυλικές μηχανές διαφόρων τύπων.



Εικόνα 12: Βαλλιστικός πύραυλος της Βόρειας Κορέας (κουτίραντορας)

Ο πρώτος βαλλιστικός πύραυλος ήταν ο A-4, κοινώς γνωστός ως πύραυλος V-2. Αναπτύχθηκε από τη ναζιστική Γερμανία κατά τη δεκαετία του 1930 και του 1940 υπό τη διεύθυνση του Βέρνερ φον Μπράουν. Η πρώτη επιτυχής εκτόξευση του «V-2 έγινε στις 3 Οκτωβρίου 1942 και μπήκε σε επιχειρησιακή λειτουργία στις 6 Σεπτεμβρίου 1944 εναντίον του Παρισιού. Δύο μέρες αργότερα ακολούθησε επίθεση στο Λονδίνο. Μέχρι το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, τον Μάιο του 1945, πάνω από 3.000 πύραυλοι V-2 είχαν εκτοξευθεί. Συνολικά 30 έθνη έχουν εγκαταστήσει λειτουργικά έτοιμους βαλλιστικούς πυραύλους. Περαιτέρω ανάπτυξη συνεχίζεται, με περίπου 100 δοκιμές (μη συμπεριλαμβανομένων εκείνων των ΗΠΑ) βαλλιστικών πυραύλων το 2007, ως επί το πλείστον από την Κίνα, το Ιράν και τη Ρωσική Ομοσπονδία. Το 2010, κυβερνήσεις των ΗΠΑ και της Ρωσίας υπέγραψαν συνθήκη για τη μείωση των διηπειρωτικών βαλλιστικών πυραύλων τους κατά την επόμενη επταετία (μέχρι το 2017) σε 1550 μονάδες ο καθένας.

### 1.1.2 Τύποι βαλλιστικών πυραύλων

Οι βαλλιστικοί πύραυλοι μπορεί να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ως προς το βεληνεκές και τη χρήση τους, και συνήθως διαιρούνται σε κατηγορίες με βάση το βεληνεκές.

- Τακτικός βαλλιστικός πύραυλος : Βεληνεκές μεταξύ 150 χλμ. και 300 χλμ. Περίπου
- Βαλλιστικός πύραυλος βεληνεκούς πεδίου μάχης (BRBM): Βεληνεκές λιγότερο από 200 χλμ.
- Βαλλιστικός πύραυλος θεάτρου επιχειρήσεων (TBM): Βεληνεκές μεταξύ 300 χλμ. και 3500 χλμ.
- Βαλλιστικός πύραυλος μικρού βεληνεκούς (SRBM): Βεληνεκές 1000 χλμ. ή λιγότερο.
- Βαλλιστικός πύραυλος μεσαίου βεληνεκούς (MRBM): Βεληνεκές μεταξύ 1000 χλμ. και 3500 χλμ.
- Βαλλιστικός πύραυλος ενδιάμεσου βεληνεκούς (IRBM) ή βαλλιστικός πύραυλος μεγάλου βεληνεκούς (LRBM): Βεληνεκές μεταξύ 3500 χλμ. και 5500 χλμ.
- Διηπειρωτικός βαλλιστικός πύραυλος (ICBM): Βεληνεκές άνω των 5500 χλμ.
- Βαλλιστικός πύραυλος εκτοξευόμενος από υποβρύχιο (SLBM): Εκτόξευση από υποβρύχια βαλλιστικών πυραύλων (SSBNs). Όλα τα σύγχρονα σχέδια έχουν διηπειρωτικό βεληνεκές.

## **1.2 Συνθήκες για τη χρήση πυρηνικής ενέργειας για την εξερεύνηση του διαστήματος**

Μια αποστολή εξερεύνησης του διαστήματος απαιτεί ισχύ σε πολλά στάδια. Απαιτεί ισχύ για την αρχική εκτόξευση του διαστημικού οχήματος και για τους επακόλουθους ελιγμούς, για τα συστήματα οργάνων και επικοινωνιών, για θέρμανση ή ψύξη ζωτικών συστημάτων, για το φωτισμό, για πειράματα και πολλές άλλες χρήσεις, ειδικά σε αποστολές επανδρωμένων.

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί χημικά προωθητικά για την εκτόξευση πυραύλων. Για μικρής διάρκειας αποστολής έως και μερικές ώρες, τα χημικά καύσιμα μπορούν να παρέχουν ενέργεια έως και 60 000 kW, αλλά για διάρκεια ενός μήνα η χρήση περιορίζεται σε ένα κιλοβάτ ή λιγότερο. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να παρέχουν σχεδόν απεριόριστη ισχύ για σχεδόν οποιαδήποτε διάρκεια. Ωστόσο, δεν είναι πρακτικά εφικτοί για εφαρμογές κάτω των 10 kW. Τα ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται καλύτερα για συνεχή παροχή χαμηλών επιπέδων ισχύος. Για το λόγο αυτό, ειδικά για μεγάλες διαπλανητικές αποστολές, προτιμάται η χρήση ραδιοϊσοτόπων.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί στο διάστημα. Ένας από τις ΗΠΑ το 1965 (SNAP-10A) με επιτυχία μπήκε σε τροχιά. Η πρώην Σοβιετική Ένωση πετούσε τακτικά διαστημόπλοια που κινούνταν με αντιδραστήρες. Μόλις 34 είχαν εκτοξευτεί πριν από το 1989. Το Σοβιετικό έγγραφο ανέφερε ότι η έρευνα του διαστήματος είναι «αδιανόητη χωρίς τη χρήση πηγών πυρηνικής ενέργειας για θερμική και ηλεκτρική ενέργεια».

Σε διαγράμματα δυνατοτήτων που περιλαμβάνουν χρόνο και ποικιλία ωφέλιμων φορτίων, η πυρηνική ενέργεια κερδίζει τις περισσότερες φορές. Οι προοπτικές χρήσης αντιδραστήρων στο διάστημα καθορίζονται από τα πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών ηλιακών φωτοβολταϊκών και άλλων πηγών ενέργειας. Πόσο μάλλον η δυνατότητα συνδυασμού

πυρηνικής ενέργειας με ηλεκτρικούς προωθητήρες για να δοθεί η υψηλότερη απόδοση συγκεκριμένης ώσης για ώθηση και η οικοδόμηση συστημάτων ισχύος / πρόωσης σε αυτή τη βάση, ώστε να επιτρέπεται η εκτόξευση μάζας ωφέλιμου φορτίου δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή που είναι δυνατή με τα συμβατικά χημικά προωθητικά. Αυτό μπορεί να επιτύχει παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τα όργανα επί του σκάφους για περιόδους 10 ετών ή περισσότερο.

## 2. Δομή πυρηνικού αντιδραστήρα

### 2.1 Πυρηνική Δομή

Ο πυρήνας του ατόμου είναι απλώς ένα σύνολο δεσμευμένων νουκλεονίων που αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια και νετρόνια. Κάτι τέτοιο ισχύει κατά μια έννοια. Ο πυρήνας περιέχει στην πραγματικότητα μια σημαντική ποσότητα πρόσθετης δομής, η λειτουργία της οποίας εξακολουθεί να είναι μόνο εν μέρει κατανοητή μέχρι σήμερα. Δεν είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε πλήρως τη λειτουργία του πυρήνα για να τον εκμεταλλευτούμε με σκοπό την απελευθέρωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της πυρηνικής σχάσης και της πυρηνική σύντηξη, η ενέργεια από τον πυρήνα μπορεί να εξαχθεί και να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικούς τομείς όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η πυραυλική πρόωση.

Η διάμετρος ενός ατόμου είναι της τάξης των  $10^{-8}$  cm, ενώ η διάμετρος του πυρήνα είναι σημαντικά μικρότερη στα περίπου  $10^{-12}$  cm. Τα πρωτόνια και νετρόνια είναι μιας κατηγορίας στοιχειωδών σωματιδίων που ονομάζονται αδρόνια. Τα αδρόνια αποτελούνται από ακόμη πιο στοιχειώδη σωματίδια που ονομάζονται κουάρκ. Τα κουάρκ έχουν έξι διαφορετικές ονομασίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (up, down, charm, strange, top, και bottom). Έχουν ηλεκτρικά φορτία και φορτίο χρώματος. Τα χρωματικά φορτία μπορεί να είναι είτε κόκκινα, πράσινα ή μπλε και σχετίζονται με την ισχυρή αλληλεπίδραση που συνδέει τα κουάρκ στα αδρόνια μεταξύ τους.

Μια άλλη υποκατηγορία είναι τα βαρυόνια. Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ που το καθένα έχει διαφορετικό φορτίο χρώματος. Είναι εξαιρετικά ασταθή και επιβιώνουν μόνο για λίγο σε εξαιρετικά υψηλές ενέργειες, που υπάρχουν μόνο σε μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων ή σε αστέρια που εκρήγνυνται. Η άλλη υποκατηγορία αδρονίων ονομάζεται μεσόνια. Αυτά τα στοιχειώδη σωματίδια είναι περαστικά από τον πυρήνα και αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Παρόμοια με τα βαρυόνια, τα μεσόνια συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρή αλληλεπίδραση. Τα μεσόνια λειτουργούν ως φορείς της πυρηνικής δύναμης, η οποία συνδέει τα βαρυόνια μεταξύ τους στον πυρήνα.

#### 2.1.1 Πυρηνική Σχάση

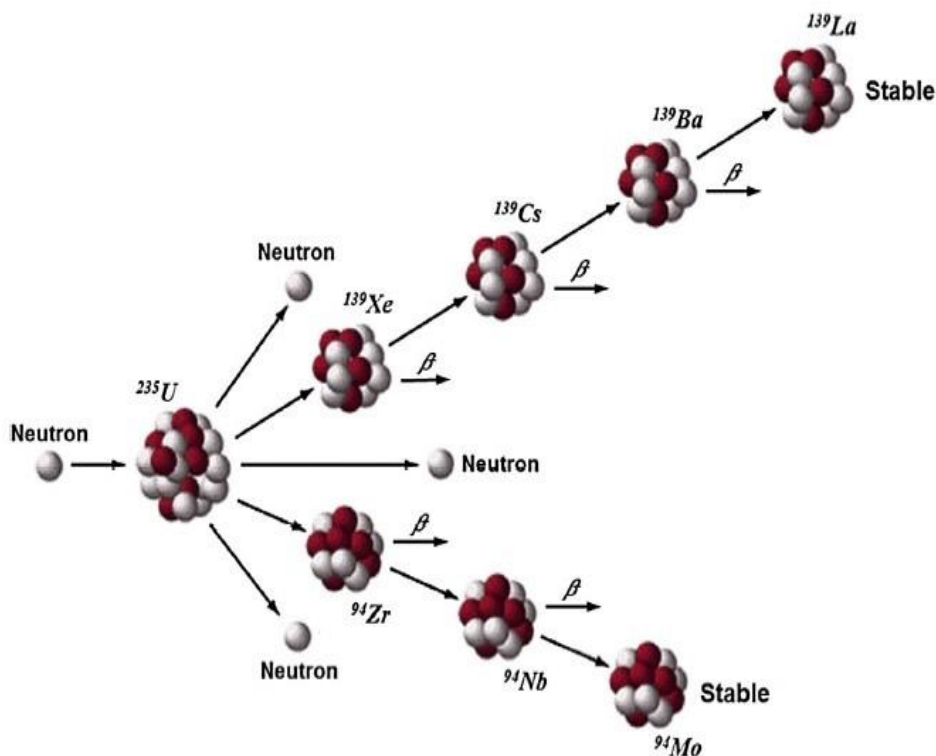
Η πυρηνική σχάση είναι μια αντίδραση κατά την οποία ο πυρήνας ενός ατόμου διασπάται σε δύο ή περισσότερους μικρότερους πυρήνες. Ο άνισος διαχωρισμός μάζας συμβαίνει ως



αποτέλεσμα ορισμένων παραγόντων σταθερότητας που σχετίζονται με τον αριθμό των σωματιδίων που υπάρχουν στον πυρήνα. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός συγκεκριμένου προϊόντος σχάσης ορίζεται γενικά με το σύμβολο  $\gamma$ .

Κατά τη διάρκεια της σχάσης, διαπιστώνεται ότι το άθροισμα των μαζών των προϊόντων σχάσης είναι πάντα μικρότερο από τη μάζα του αρχικού πυρήνα. Αυτή η διακύμανση μάζας ονομάζεται ελάττωμα μάζας και είναι ισοδύναμη μάζας-ενέργειας της διαφοράς μεταξύ των συνολικών ενεργειών σύνδεσης του πυρήνα στόχου και εκείνης των προϊόντων σχάσης. Η ενέργεια σύνδεσης ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για τη διάσπαση ενός πυρήνα. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της σχάσης είναι πραγματικά εκπληκτική.

Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας μπορεί να συλληφθεί με τη μορφή θερμότητας καθώς τα διάφορα σωματίδια επιβραδύνονται μέσω αλληλεπιδράσεων διασποράς με το περιβάλλον τους. Η εξαίρεση σε αυτό είναι η ενέργεια των νετρίνων που ουσιαστικά χάνεται. Αυτή η ατυχής κατάσταση οφείλεται στο γεγονός ότι δεδομένου ότι τα νετρίνα δεν έχουν φορτίο και μικρή ή καθόλου μάζα, η ικανότητά τους να αλληλεπιδρούν με την περιβάλλουσα ύλη είναι εξαιρετικά μικρή.



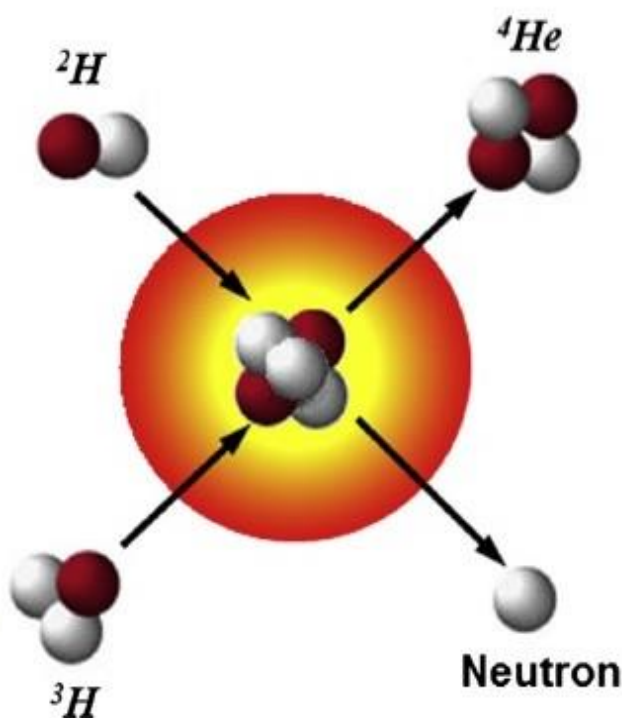
Εικόνα 13: Μια αντίδραση σχάσης από τις εκατοντάδες που είναι δυνατές. (IAEA)

### 2.1.2 Πυρηνική Σύντηξη

Εκτός από την πυρηνική σχάση, υπάρχει μια άλλη πυρηνική αντίδραση που δίνει ιδιαίτερη σημασία όσον αφορά την εφαρμογή πυρηνικών διεργασιών στη διαστημική πρόωση. Η

πυρηνική σύντηξη είναι μια αντίδραση στην οποία δύο ή περισσότεροι ατομικοί πυρήνες συνδυάζονται για να σχηματίσουν έναν ή περισσότερους διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες και υποατομικά σωματίδια (νετρόνια ή πρωτόνια). Η διαφορά μάζας μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων εκδηλώνεται είτε ως απελευθέρωση είτε ως απορρόφηση ενέργειας. Αυτή η διαφορά μάζας προκύπτει λόγω της διαφοράς στην ενέργεια ατομικής σύνδεσης μεταξύ των πυρήνων πριν και μετά την αντίδραση.

Ενώ είναι σχετικά εύκολο να ξεκινήσει η πυρηνική σχάση με την απορρόφηση νετρονίων σε μεγάλους, βαρείς ατομικούς πυρήνες, η πυρηνική σύντηξη είναι πολύ πιο δύσκολο να ξεκινήσει. Η δυσκολία στην έναρξη της πυρηνικής σύντηξης έγκειται στο γεγονός ότι οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες των ατόμων που πρόκειται να υποστούν σύντηξη πρέπει να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους ώστε η ισχυρή πυρηνική δύναμη μεταξύ των συστατικών νουκλεονίων τους να μπορεί να ξεπεράσει τη φυσική ηλεκτροστατική απωθητική δύναμη μεταξύ των πρωτονίων στους αντίστοιχους πυρήνες. Η ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται από τους πυρήνες για να ξεπεράσουν αυτή την ηλεκτροστατική δύναμη είναι σημαντική και απαιτεί οι πυρήνες να έχουν ενεργειακές ισοδύναμες θερμοκρασίες της τάξης των εκατοντάδων εκατομμυρίων βαθμών. Ενώ η ενέργεια που απαιτείται από τα άτομα σύντηξης για την έναρξη της αντίδρασης σύντηξης είναι σημαντική. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αντίδραση σύντηξης είναι σημαντικά μεγαλύτερη.



Εικόνα 14: Σύντηξη δευτερίου και τριτίου. (IAEA)

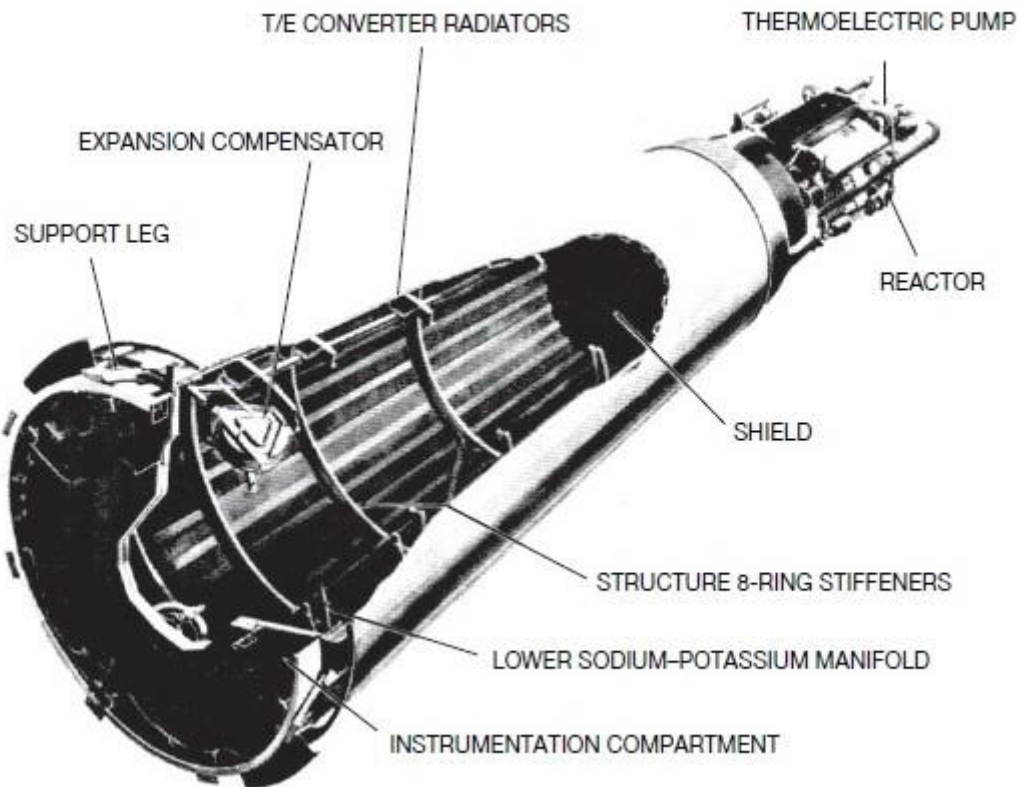
Η σύγκριση της ενέργειας που παράγεται από τις αντιδράσεις σύντηξης με τις αντιδράσεις σχάσης αποκαλύπτει ότι σε βάση μονάδας μάζας, οι αντιδράσεις σύντηξης είναι πολύ πιο ενεργητικές. Οι αντιδράσεις σύντηξης χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας σε

πυραυλοκινητήρα και αποτελείται από ισότοπα υδρογόνου και ηλίου, κυρίως δευτέρου, τριτίου και ηλίου-3. Οι ρυθμοί αντίδρασης των διαφόρων αντιδράσεων σύντηξης είναι σημαντικοί μόνο σε θερμοκρασίες εκατοντάδων εκατομμυρίων βαθμών λόγω των υψηλών ενεργειών ενεργοποίησης που απαιτούνται για την έναρξη των αντιδράσεων. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, όλα τα ηλεκτρόνια αφαιρούνται από τα άτομα αφήνοντας τα αντιδρώντα σε μια πλήρως ιονισμένη αέρια κατάσταση πλάσματος που αποτελείται από γυμνούς πυρήνες και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Κατά μια έννοια τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου παρέχουν στον πυρήνα ένα περίτεχνο αντικραδασμικό περιτύλιγμα το οποίο τον προστατεύει αποτελεσματικά από όλες τις κρούσεις εκτός από τις εξαιρετικά σφοδρές.

Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στο κέντρο τα άτομα στριφογυρίζουν ολοένα και πιο έντονα και η σφοδρότητα των συγκρούσεων τους αυξάνεται συνεχώς. Αφού έχουν απομείνει πλέον γυμνοί οι πυρήνες είναι και πάλι απίθανο να έρθουν σε επαφή διότι ως θετικά φορτισμένα σώματα απωθούνται μεταξύ τους ηλεκτροστατικά. Τελικά όμως οι συγκρούσεις γίνονται τόσο σφοδρές που κάποιοι συγκρουόμενοι πυρήνες αγγίζουν πραγματικά ο ένας τον άλλο. Σε αυτό το σημείο αρχίζουν να πραγματοποιούνται πυρηνικές αντιδράσεις. Η ενεργειακή κλίμακα των πυρηνικών αντιδράσεων είναι ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη από εκείνη των χημικών αντιδράσεων.

## **2.2 Οι αντιδραστήρες στο διάστημα**

Όπως αναφέραμε τα συστήματα με ραδιοϊσότοπο είναι ιδανικά για μακροπρόθεσμες λειτουργίες χαμηλής ισχύος, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες έχουν την ικανότητα να παράγουν σχεδόν απεριόριστη ισχύ πάνω από ένα κιλοβάτ για οποιαδήποτε διάρκεια αποστολής. Οι πρώτες προθέσεις ήταν να χρησιμοποιηθούν πυρηνικοί αντιδραστήρες τόσο για την τροφοδοσία των εκτοξεύσεων στο διάστημα όσο και για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας επί του σκάφους. Οι ΗΠΑ χρησιμοποίησαν ένα το 1965 στον ανιχνευτή SNAP-10A και το Σοβιετικό/Ρωσικό πρόγραμμα τα χρησιμοποιούσε τακτικά. Τριάντα τέσσερα πυρηνικά σοβιετικά διαστημόπλοια εκτοξεύτηκαν μεταξύ 1970 και 1989.



Εικόνα 15: Σχεδιασμός συστήματος SP-100 πυρηνικής ενέργειας. (IAEA)

Το σκληρό περιβάλλον είναι χαρακτηριστικό των πυρηνικών πυραυλοκινητήρων, παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις όσον αφορά την επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών από τα οποία θα κατασκευαστεί το σύστημα κινητήρα. Τα δομικά υλικά για πυρηνικούς πυραυλοκινητήρες δεν πρέπει μόνο να είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να έχουν υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος, αλλά πρέπει επίσης να είναι συμβατά με το περιβάλλον πυρηνικής ακτινοβολίας του αντιδραστήρα. Τέτοιες απαιτήσεις θα περιορίσουν προφανώς τον αριθμό των υλικών που μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για χρήση σε πυρηνικούς πυραύλους. Η θέση και η λειτουργία των επιμέρους εξαρτημάτων του αντιδραστήρα θα επηρεάσει επίσης την επιλογή του καταλληλότερου δομικού υλικού. Για παράδειγμα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του δοχείου συγκράτησης του αντιδραστήρα είναι πιθανό να είναι διαφορετικά από εκείνα τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των στοιχείων του πυρήνα του καυσίμου.

Υπάρχουν πολλά πιθανά σχέδια πυρηνικών αντιδραστήρων για χρήση στο διάστημα. Οι προηγμένες απαιτήσεις διαστημικής αποστολής για υψηλά επίπεδα ισχύος σε συνδυασμό με το συμπαγές μέγεθος και τη μεγάλη διάρκεια ζωής ευνοούν τη χρήση του φάσματος του γρήγορου αντιδραστήρα με ιδιαίτερα εμπλουτισμένο καύσιμο. Ο αντιδραστήρας πρέπει να είναι μικρός, συγκρατημένος και να μην εξαρτάται από τη βαρύτητα για τον έλεγχό του, κάτι που θα ήταν φυσιολογικό στη γη. Επομένως, ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί περιστρεφόμενα τύμπανα ελέγχου βηρυλλίου που έχουν τμήματα απορρόφησης καρβιδίου του βορίου.

### 2.2.1 Τύμπανα ελέγχου

Ο εμπλουτισμός του καυσίμου, η σύνθεση και η γεωμετρία έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε ο πυρήνας να βρίσκεται σε μια υποκρίσιμη κατάσταση. Τα τύμπανα ελέγχου κατανέμονται

ομοιόμορφα γύρω από τον πυρήνα και μπορούν να ενεργοποιηθούν είτε με αυτόματα είτε με μηχανικά μέσα. Περίπου στις 120 μοίρες της επιφάνειας κάθε τυμπάνου είναι επενδεδυμένες με απορροφητικό υλικό νετρονίων ενώ οι υπόλοιπες 240 μοίρες είναι ένα ανακλαστικό υλικό νετρονίων (βηρύλλιο). Τα τύμπανα περιστρέφονται έτσι ώστε το ανακλαστικό τμήμα κάθε τυμπάνου να είναι στραμμένο προς το κέντρο του πυρήνα. Αυτή η διαμόρφωση αυξάνει την αντιδραστικότητα του πυρήνα μειώνοντας τον παράγοντα διαρροής νετρονίων και αρχίζει να κάνει τον πυρήνα κρίσιμο. Τα τύμπανα έχουν σχεδιαστεί για να τοποθετούνται στους 90 βαθμούς σε πλήρη ισχύ και θερμοκρασία αντιδραστήρα.

### 2.2.2 Θωράκιση (Shield)

Ο σχεδιασμός της θωράκισης του αντιδραστήρα θα πρέπει, για οποιονδήποτε αντιδραστήρα, να είναι πρωταρχικός παράγοντας. Πέρα από την προστασία της υγείας, οι ασπίδες ακτινοβολίας διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο για την ελαχιστοποίηση της ανεπιθύμητης θέρμανσης από ακτινοβολία και τη μείωση της υποβάθμισης των ηλεκτρονικών και μηχανικών εξαρτημάτων. Οι ασπίδες θωράκισης πρέπει να είναι σε θέση να αποδίδουν αξιόπιστα έναντι της θερμικής καταπόνησης και των υψηλών επιπέδων έκθεσης στην ακτινοβολία.

Για την πυρηνική θερμική πρόωση ως προωθητικό χρησιμοποιούν υγρό υδρογόνο λόγω της χαμηλής ατομικής του μάζας που παρέχει την υψηλότερη δυνατή ειδική ώθηση. Το υγρό υδρογόνο χρησιμεύει επίσης ως μια αρκετά αποτελεσματική ασπίδα νετρονίων και πρέπει να διατηρείται ενεργά σε κρυογονικές θερμοκρασίες καθώς η θέρμανση λόγω του ηλιακού φωτός και της κοσμικής ακτινοβολίας οδηγεί σε βρασμό και απαιτεί εξαερισμό για να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση.

Το σύστημα θωράκισης ακτινοβολίας χρειάζεται να προστατεύει το μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς το όχημα και το πλήρωμα. Οι κινητήρες τοποθετούνται στο πίσω μέρος του διαστημικού σκάφους σε κατάσταση έλλειψης ατμόσφαιρας ή άλλου υλικού για τη διευκόλυνση της διασποράς. Η ασπίδα πρέπει να είναι ικανή να εξασθενεί τις ακτίνες γάμμα που εκπέμπονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Η ακτινοβολία γάμμα εξασθενεί καλύτερα από υλικά με υψηλή πυκνότητα φορτίου όπως ο μόλυβδος, το βολφράμιο ή το ουράνιο.

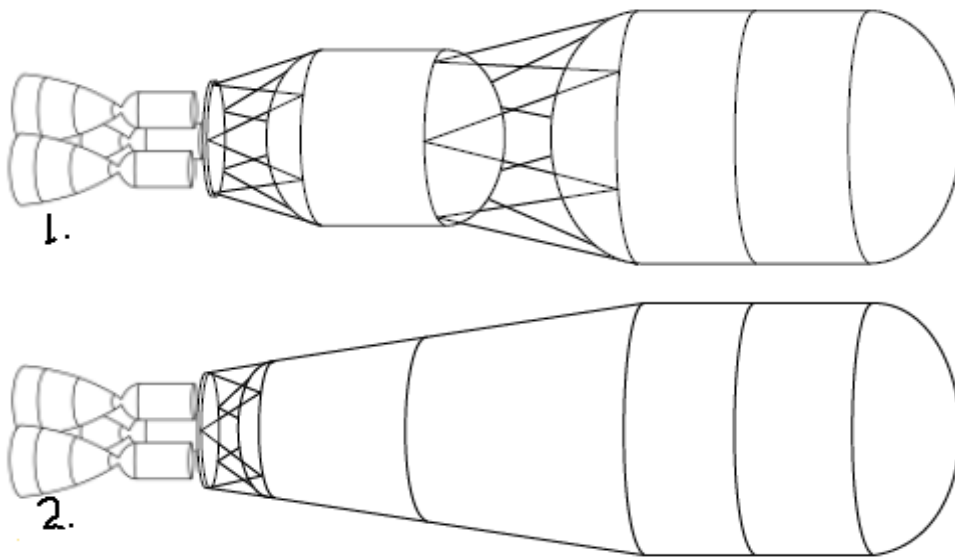
Δύο υλικά ξεχωρίζουν όσον αφορά την επιλογή των κατάλληλων υλικών και αυτά είναι το υδρίδιο του λιθίου και το καρβίδιο του βορίου.

Το **υδρίδιο του λιθίου (LiH)** ξεχωρίζει ως το πιο αποτελεσματικό υλικό θωράκισης νετρονίων ανά μονάδα μάζας, λόγω της ενσωμάτωσής του σε υδρογόνο ως παράγοντα ελέγχου και ως εξαιρετικός απορροφητής νετρονίων όταν εμπλουτίζεται σε Li-6. Ωστόσο, η απόδοσή του υποφέρει σε περιβάλλοντα υψηλής ροής, καθώς η κακή θερμική αγωγιμότητα και το στενό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας καθιστούν σχεδόν αδύνατες τις αποτελεσματικές στρατηγικές ψύξης. Η αντιδραστική φύση του επιβάλλει να σφραγίζεται εντός κάποιου περιορισμού, αλλά η μεγάλη διαστολή του όγκου σε λιωμένη υγρή φάση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χύτευση.

Το **καρβίδιο του βορίου (B4C)** ξεχωρίζει συχνά ως η πιο αποτελεσματική ασπίδα νετρονίων ανά μονάδα όγκου, αλλά η μάζα που έχει στην ασπίδα νετρονίων είναι περίπου 20% μεγαλύτερη από αυτή μιας πρακτικής ασπίδας υδριδίου λιθίου. Ως κεραμικό υλικό, το B4C έχει εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα, σκληρότητα και χημική σταθερότητα. . Με

σκληρότητα Vickers >30 GPa, είναι ένα από τα πιο σκληρά γνωστά υλικά, πίσω από το κυβικό νιτρίδιο του βορίου και το διαμάντι.

Είναι απαραίτητος ο προσεκτικός σχεδιασμός της θωράκισης από την ακτινοβολία όμως πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μάζα της θωράκισης. Είναι απαγορευτικός παράγοντας η αύξηση της μάζας για τις διαστημικές πτήσεις. Οπότε ένας τρόπος θα ήταν η κατάλληλη γεωμετρία των δεξαμενών καύσιμων. Εφάρμοζαν κωνικές δεξαμενές αποθήκευσης, όπως φαίνεται στο σχήμα πιο κάτω, βοηθούν στη μείωση των όρων της πηγής διασποράς και της θέρμανσης προωθητικού και η δεξαμενή θα άδειαζε με αποστράγγιση από μια στενότερη στήλη και αυξάνοντας έτσι το αποτελεσματικό πάχος ανά μονάδα μάζας προωθητικού που λειτουργεί ως ασπίδα. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερη δευτερεύουσας δεξαμενή που με την βοήθεια αντλιών το προωθητικό θα κατευθυνόταν στην κύρια.



Εικόνα 16: (1). Δεξαμενή θερμικής ρύθμισης (2) δεξαμενή σταδίων. (Shielding Development for Nuclear Thermal Propulsion)

### 2.2.3 Ανακλαστήρας (reflector)

Ο ανακλαστήρας είναι μια περιοχή υλικού χωρίς καύσιμα που περιβάλλει τον πυρήνα. Η λειτουργία του είναι να διασκορπίζει νετρόνια που διαρρέουν από τον πυρήνα, επιστρέφοντας έτσι μερικά από αυτά πίσω στον πυρήνα. Αυτό το χαρακτηριστικό σχεδιασμού επιτρέπει μικρότερο μέγεθος πυρήνα. Επιπλέον, οι ανακλαστήρες «εξομαλύνουν» την πυκνότητα ισχύος χρησιμοποιώντας νετρόνια που διαφορετικά θα διέρρεαν μέσω σχάσης εντός του υλικού καυσίμου που βρίσκεται κοντά στην εξωτερική περιοχή του πυρήνα. Οι περισσότεροι αντιδραστήρες που ψύχονται με νάτριο κατασκευάζονται σκόπιμα ώστε να επιτρέπουν στα νετρόνια που δεν χρειάζονται για τη διατήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης και σε αυτά που διαρρέονται στον πυρήνα. Αυτά τα νετρόνια είναι πολύτιμα επειδή μπορούν

να παράγουν νέο σχάσιμο υλικό στο αρχικό αν απορροφηθούν. Διότι είναι πλέον εμπλουτισμένα με ουράνιο ή διοξείδιο του και αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει μόνο με τους ανακλαστήρες.

#### 2.2.4 Ράβδοι (Rods)

Η λειτουργία των αντιδραστήρων θα πρέπει να είναι ελεγχόμενη. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με ράβδους ελέγχου. Συνήθως ένας αντιδραστήρας είναι εξοπλισμένος με τρεις τύπους ράβδων:

- Ράβδους ασφαλείας, για την εκκίνηση και απενεργοποίηση του αντιδραστήρα.
- Ράβδους ρύθμισης, για τη ρύθμιση του ρυθμού ισχύος του αντιδραστήρα.
- Ράβδους απορρόφησης, για αντιστάθμιση αλλαγών σε αντιδραστικότητα καθώς το καύσιμο εξαντλείται από τη σχάση και τη σύλληψη νετρονίων.

Η πιο σημαντική λειτουργία των ράβδων ασφαλείας είναι να κλείνουν τον αντιδραστήρα, είτε όταν έχει προγραμματιστεί μια τέτοια διακοπή λειτουργίας είτε σε περίπτωση πραγματικής ή πιθανολογούμενης έκτακτης ανάγκης. Αποσύρονται πριν από τη φόρτωση καυσίμου και παραμένουν διαθέσιμα σε περίπτωση που κάποιο σφάλμα φόρτωσης απαιτεί την ενέργειά τους. Μετά τη φόρτωση του καυσίμου, οι ράβδοι εισάγονται, για να αποσυρθούν ξανά όταν ο αντιδραστήρας είναι έτοιμος για λειτουργία. Ο μηχανισμός με τον οποίο κινούνται έχει σχεδιαστεί για να είναι ασφαλής έναντι αστοχίας με την έννοια ότι εάν υπάρξει μηχανική βλάβη, οι ράβδοι ασφαλείας θα πέσουν μέσω της βαρύτητας ή κάποιου άλλου ασφαλούς μέσου, στον πυρήνα.

Οι ράβδοι ρύθμισης έχουν σχεδιαστεί εσκεμμένα ώστε να επηρεάζουν την αντιδραστικότητα μόνο σε μικρό βαθμό. Υποτίθεται ότι κάποια στιγμή οι ράβδοι μπορεί να αποσυρθούν κατά λάθος, και η ιδέα είναι να διατηρηθεί η προστιθέμενη αντιδραστικότητα σε τέτοιες περιπτώσεις εντός λογικών ορίων. Μια καλά σχεδιασμένη ράβδος ρύθμισης θα προσθέσει τόσο λίγη αντιδραστικότητα όταν αφαιρεθεί ώστε τα νετρόνια να συνεχίσουν να ελέγχουν τον ρυθμό αύξησης της ισχύος.

Οι ράβδοι απορρόφησης έχουν σχεδιαστεί για να αντισταθμίζουν τις επιπτώσεις της καύσης, δηλαδή την παραγωγή ενέργειας. Επομένως, οι ράβδοι απορρόφησης μπορεί να ελέγχουν μια σημαντική ποσότητα αντιδραστικότητας, αλλά θα λειτουργούν βέλτιστα μόνο όταν επιβάλλονται περιορισμοί στην ταχύτητα κίνησής τους. Ένας συνηθισμένος τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι ράβδοι είναι η εισαγωγή ή η αφαίρεσή τους καθώς οι ράβδοι ρύθμισης φτάνουν στο τέλος του πιο χρήσιμου εύρους θέσης τους. Όταν συμβεί αυτό, οι ράβδοι απορρόφησης μετακινούνται έτσι ώστε οι ράβδοι ρύθμισης να μπορούν να μηδενιστούν. Οι λειτουργίες της ράβδου απορρόφησης και των ράβδων ασφαλείας συνδυάζονται μερικές φορές σε ράβδους που έχουν χαμηλά ποσοστά απόσυρσης αλλά που μπορούν να εισαχθούν γρήγορα. Αυτό γίνεται συνήθως όταν το αποτέλεσμα της καύσης μειώνει την αντιδραστικότητα. Ο απαιτούμενος όγκος ελέγχου μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ενός εύφλεκτου «δηλητηρίου». Αυτό είναι ένα υλικό που απορροφά νετρόνια, όπως το βόριο ή το γαδολίνιο, που καίγεται ταχύτερα από το σχάσιμο υλικό κατά τη διάρκεια ζωής του πυρήνα. Ένα καύσιμο δηλητήριο που ρυθμίζει την επιπλέον αντιδραστικότητα που έχει ενσωματωθεί στο καύσιμο για να αντισταθμίσει την ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται.

### 2.3 Ασφάλεια αντιδραστήρα

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες περιέχουν πολύ μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών ισοτόπων κυρίως προϊόντα σχάσης αλλά και βαριά στοιχεία όπως το πλουτώνιο. Εάν αυτή η ραδιενέργεια διέφευγε από τον αντιδραστήρα, η επίδρασή της στους ανθρώπους που βρίσκονται κοντά θα ήταν σοβαρή. Οι βλαβερές συνέπειες της έκθεσης σε υψηλά επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας περιλαμβάνουν αυξημένη πιθανότητα καρκίνου, κυτταρική βλάβη, αυξημένο αριθμό αναπτυξιακών ανωμαλιών σε παιδιά που εκτίθενται, ακόμη και θάνατο εντός περιόδου αρκετών ημερών έως μηνών, όταν η ακτινοβολία είναι ακραία. Ούτε όμως το διάστημα αποτελεί σκουπιδοτόπο. Επειδή ακόμα δεν είμαστε σίγουροι για πολλά πράγματα δεν έχουμε το δικαίωμα για λάθη. Για το λόγο αυτό, το πρωταρχικό μέλημα στο σχεδιασμό ενός αντιδραστήρα είναι η διασφάλιση ότι δεν θα συμβεί σημαντική έκλυση ραδιενέργειας ως αποτέλεσμα οποιουδήποτε εύλογου σεναρίου ατυχήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό προληπτικών μέτρων και μέτρων μετριασμού.

## 3. Αρχή λειτουργίας

Η επιστήμη πυραύλων βρίσκεται στην καρδιά της αεροδιαστημικής μηχανικής και ασχολείται με το σχεδιασμό, την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τη λειτουργία πυραύλων που εκτοξεύουν ανθρώπους και διαστημόπλοια σε τροχιές γύρω από τη Γη και πέρα.



Εικόνα 17: Πρότυπο πυραύλου με πυρηνικό αντιδραστήρα το οποίο θα μένει εκτός γήινης ατμόσφαιρας και θα εξυπηρετεί μόνο για τη μεταφορά πληρωμάτων σε άλλους πλανήτες χωρίς την προσεδάφισή του. Αυτό θα προσεγγίζουν τα οχήματα που θα εκτοξεύονται από τη Γη ή άλλον πλανήτη. (phys.org)



### 3.1 Ορισμοί

Οι πυραυλοκινητήρες λειτουργούν αποβάλλοντας ένα αέριο υψηλής θερμοκρασίας μέσω ενός ακροφυσίου για την παραγωγή ώθησης. Αυτή η ώθηση ενεργεί για την επιτάχυνση ενός διαστημικού σκάφους προς την αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη του αποβληθέντος αερίου, μέσω της εφαρμογής του τρίτου νόμου κίνησης του Isaac Newton: «Για κάθε ενέργεια, υπάρχει μια ίση και αντίθετη αντίδραση».

Στους χημικούς πυραυλοκινητήρες, το καυτό αέριο δημιουργείται σε θάλαμο καύσης όπου τα προωθητικά αναφλέγονται και καίγονται. Στους πυρηνικούς κινητήρες πυραύλων, από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούν πυρηνικούς αντιδραστήρες για να τροφοδοτήσουν τη θερμότητα που απαιτείται για τη θέρμανση του προωθητικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Το αέριο υψηλής θερμοκρασίας που εξέρχεται από τους πυραυλοκινητήρες εισάγεται σε συγκροτήματα ακροφυσίων όπου η θερμική ενέργεια του θερμού προωθητικού αερίου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια με τη μορφή κατευθυνόμενης ροής καυσαερίων υψηλής ταχύτητας.

#### 3.1.1 Ωθηση

Ο πρωταρχικός σκοπός των πυραυλικών κινητήρων, είτε είναι χημικοί είτε πυρηνικοί, είναι να ασκήσει μια **προωθητική δύναμη** ή **ώθηση** σε ένα διαστημικό σκάφος έτσι ώστε να επιταχύνει το όχημα σε υψηλές ταχύτητες. Σε πυρηνικούς πυραυλοκινητήρες, η ώθηση παράγεται ως αποτέλεσμα της εξόδου καυτού αερίου από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα μέσω ενός ακροφυσίου (nozzle). Ο σκοπός του ακροφυσίου είναι να μετατρέψει τη θερμική ενέργεια σε κινητική ενέργεια με τη μορφή κατευθυνόμενης ροής καυσαερίων υψηλής ταχύτητας παράλληλα με τη γραμμή πτήσης του, αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Εφαρμόζοντας την αρχή της διατήρησης της ορμής.

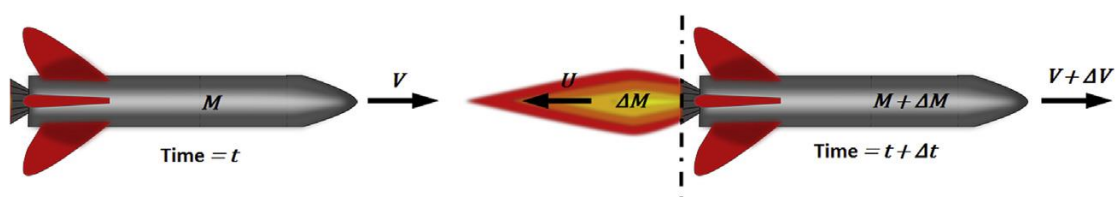


Figure 1: (William Emrich, Jr)

Συνδυάζοντας τη διατήρηση της ορμής και το άθροισμα των δυνάμεων που ενεργούν για σταθερή ροή, έχουμε

$$F = \dot{m} V_e + (P_e - P_a) A_e \quad (\text{N}) \quad (3.1)$$

όπου

F είναι η ώθηση

$V_x$  είναι η ταχύτητα στην κατεύθυνση  $x$

$V_e$  είναι η ταχύτητα στην έξοδο του ακροφυσίου

$\dot{m}$  είναι μαζική παροχή του προωθητικού

$P_e$  είναι η πίεση στο επίπεδο εξόδου του ακροφυσίου

Το  $P_a$  είναι η πίεση του περιβάλλοντος

$A_e$  το εμβαδόν της διατομής του ακροφυσίου στην έξοδο

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύουν τη συμβολή της ορμής και των στοιχείων πίεσης ώσης, αντίστοιχα.

### 3.1.2 Ορμή ώθησης (thrust momentum)

Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο είναι ίση με τη μάζα του πολλαπλασιασμένη με την επιτάχυνσή του. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης της ώθησης αποτελεί την ορμή

$$F_{momentum} = \frac{ma}{g_c} = \frac{\dot{m}u}{g_c} = \dot{m}V_e \quad (N) \quad (3.2)$$

$g_c$  είναι ένας συντελεστής μετατροπής μονάδας που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της μάζας σε δύναμη ή το αντίστροφο.  $g_c = 1 \text{ (kg}\cdot\text{m)/(N}\cdot\text{s}^2)$

### 3.1.3 Ορμή πίεσης (pressure thrust)

Εκτός από τη δύναμη που προκύπτει από τη μεταφορά της ορμής του προωθητικού, υπάρχει επίσης μια δύναμη η οποία προκύπτει από την πίεση των καυσαερίων στην έξοδο του ακροφυσίου.

$$F_{pres} = (P_e - P_a)A_e \quad (N) \quad (3.3)$$

### 3.1.4 Δραστική ταχύτητα εξόδου (effective exhaust velocity)

Η δραστική ταχύτητα εξόδου είναι η ταχύτητα ενός ρευστού στην έξοδο μετά από μείωση από φαινόμενα όπως τριβή, μη αξονικά κατευθυνόμενα ροή και διαφορές πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του πυραύλου και του περιβάλλοντός του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η δραστική ταχύτητα εξόδου ( $V_{eq}$ ) είναι κοντά στην ταχύτητα εξόδου ( $V_e$ ).

$$V_{eq} = \frac{F}{\dot{m}} \quad (m/s) \quad (3.4)$$

Η ώθηση ενός κινητήρα πυραύλων είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα πτήσης. Ωστόσο, η ώθηση ποικίλλει ανάλογα με το υψόμετρο. Όταν ο πύραυλος λειτουργεί εντός της γήινης

ατμόσφαιρας, θα υπάρξουν αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση του περιβάλλοντος όσο ανεβαίνει σε υψόμετρο. Έτσι όταν προωθείται, η ώθηση αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου επειδή η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται. Περίπου 10% - 30% των συνολικών αλλαγών της ώσης μπορεί να συμβούν λόγω αλλαγής υψομέτρου.

### 3.1.5 Ειδική ώθηση (Specific impulse)

Το κύριο μειονέκτημα των πυραύλων που πετούν μέσα στην ατμόσφαιρα της γης είναι ο υψηλός ρυθμός κατανάλωσης προωθητικού ανά μονάδα παραγόμενης ώσης σε σχέση με τους air breathing κινητήρων. Για να συγκρίνουμε τις επιδόσεις των κινητήρων εισάγουμε ένα σημαντικό μέγεθος, την ειδική ώθηση. Ειδική ώθηση είναι η αλλαγή της ορμής ανά μονάδα μάζας για καύσιμα πυραύλων, ή πόσο μάλλον η περισσότερη ώθηση συσσωρεύεται καθώς χρησιμοποιείτε αυτό το καύσιμο. Είναι η δύναμη ώθησης ανά ρυθμό παροχής βάρους του προωθητικού.

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} \quad (sec) \quad (3.5)$$

$$I_{sp} = \frac{I}{m_p g} \quad (sec) \quad (3.6)$$

Όπου

$I$  είναι η συνολική ώθηση

$I_{sp}$  είναι η ειδική ώθηση

$m_p$  είναι η συνολική μάζα του αποβληθέντος προωθητικού

$g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης

Μονάδα μέτρησης είναι τα δευτερόλεπτα (s)

Η ταχύτητα ενός πυραύλου εξαρτάται από την ώθηση (η οποία είναι περίπου η ποσότητα προωθητικού που πετάγεται από το πίσω μέρος του πυραύλου και η ταχύτητα με την οποία εκτοξεύεται αυτό το προωθητικό) σε σύγκριση με το βάρος του πυραύλου. Όσο πιο γρήγορη είναι η ταχύτητα με την οποία εκτοξεύεται προωθητικό στο πίσω μέρος του πυραύλου, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να ταξιδέψει ο πύραυλος ή περισσότερο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει. Η συγκεκριμένη ώθηση ενός προωθητικού πυραύλου είναι ένα πρόχειρο μέτρο για το πόσο γρήγορα το προωθητικό εκτοξεύεται από το πίσω μέρος του πυραύλου. Ένας πύραυλος με υψηλή συγκεκριμένη ώθηση δεν χρειάζεται τόσο καύσιμο όσο ένας πύραυλος με χαμηλή ειδική ώθηση. Όσο υψηλότερη είναι η συγκεκριμένη ώθηση, τόσο μεγαλύτερη ώθηση έχουμε για το καύσιμο που βγαίνει έξω. Η συγκεκριμένη ώθηση καθορίζει πόσα καύσιμα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για να πάρουμε ένα καλό μέγεθος.

Η ειδική ώθηση εξαρτάται από τον τύπο του προωθητικού και τη διαμόρφωση του κινητήρα του πυραύλου. Ως εκ τούτου, η χαμηλότερη συνολική μάζα του αποβληθέντος προωθητικού

συνεπάγεται υψηλότερη ειδική ώθηση άρα μεγάλο εύρος πτήσεων. Τυπικές τιμές ειδικής ώθησης για διάφορους τύπους πυραυλοκινητήρων δίνεται στον παρακάτω πίνακα

Rocket Engines	$I_{sp}$ (s)
Solid	200–310
Liquid	300–460
Hybrid	300–500
Solar	400–700
Nuclear	600–1000
Electrical (arc heating)	400–2000

Εικόνα 18: Η ειδική ώθηση σε σχέση με άλλους τύπους πυραύλων (D.P. Mishra)

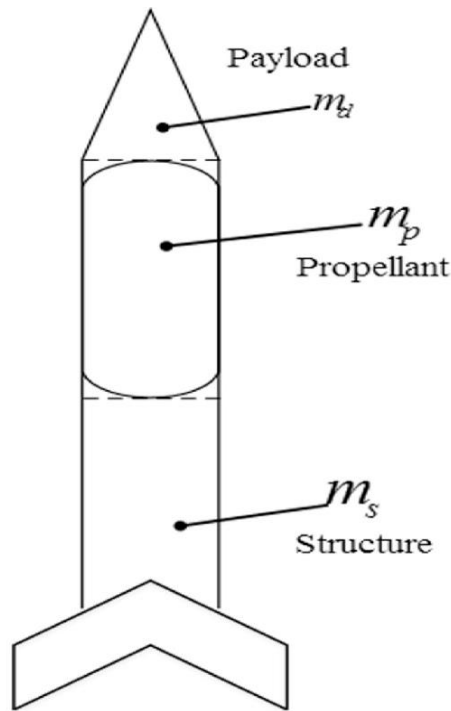
Η πραγματική τιμή της ειδικής ώθησης θα είναι χαμηλότερη από τη θεωρητική τιμή. Και αυτό λόγω των απωλειών, δηλαδή, της τριβής της ατελούς καύσης και ούτω καθεξής μπορεί να συμβεί κατά την πραγματική λειτουργία ενός πυραυλοκινητήρα. Για να βρούμε αυτή τη διαφορά μεταξύ πραγματικής και θεωρητικής τιμής παίρνουμε το λόγο:

$$\eta_{Isp} = \frac{I_{sp}}{I_{sp \text{ θεωρητικη}}} \quad (3.7)$$

Για έναν καλά σχεδιασμένο πυραυλικό κινητήρα ο λόγος κυμαίνεται από 0,95 έως 0,99.

### 3.2 Μονοβάθμιοι Πύραυλοι

Κάθε πύραυλος έχει μια συγκεκριμένη δομή και φυσικά, ο λόγος που εκτοξεύουμε έναν πύραυλο είναι για να βάλουμε ένα ωφέλιμο φορτίο σε τροχιά. Οπότε ένας πύραυλος αποτελείται από τη μάζα του ωφέλιμου φορτίου( $p_l$ ), τη μάζα του προωθητικού( $p_{prop}$ ) και από την υπόλοιπη κατασκευή (structural mass) του.



Εικόνα 19: Τμήματα πυραύλου (qsoora.com)

$$m_{\alpha\rho\chi} = m_{pl} + m_{st} + m_{prop} \quad (\text{kg}) \quad (3.8)$$

### 3.2.1 Η τελική μάζα (final mass)

Όταν καίει ολόκληρο το προωθητικό κατά τη λειτουργία του, η τελική μάζα θα είναι ίση με το άθροισμα των δομικών στοιχείων και του ωφέλιμου φορτίου

$$m_f = m_{pl} + m_{st} \quad (\text{kg}) \quad (3.9)$$

$$m_{propellant} = m_{\alpha\rho\chi} - m_f \quad (\text{kg}) \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Η πυραυλική εξίσωση

Η διάσημη πυραυλική εξίσωση του Κωνσταντίν Τσιολκόφσκι, δείχνει ότι η σχέση της μεταβολής της ταχύτητας ενός πυραύλου και των καυσίμων που απαιτούνται για αυτήν τη μεταβολή είναι εκθετική. Για να κινηθεί ο πύραυλος όλο και πιο γρήγορα και να αποδράσει από τη Γη, απαιτούνται τεράστιες ποσότητες καυσίμων. Χάρη σ' αυτή την εξίσωση ο Τσιολκόφσκι μπόρεσε για πρώτη φορά να εκτιμήσει πόσα καύσιμα απαιτούνταν για ένα ταξίδι στη Σελήνη, πολύ πριν γίνει πραγματικότητα το όραμά του.

$$\Delta V = V_e \ln\left(\frac{m}{m_0}\right) \quad (3.11)$$

ή

$$\frac{m_0}{m} = e^{\frac{\Delta V}{V_e}} \quad (3.12)$$

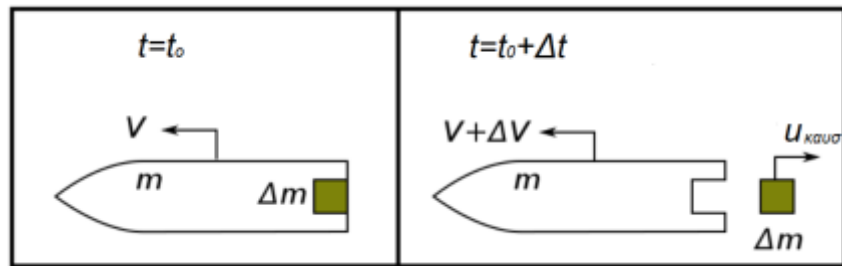
όπου

$\Delta V$  η μεταβολή της ταχύτητας του πυραύλου στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$

$m_0$  η μάζα του πυραύλου την χρονική στιγμή  $t=t_0$

$m$  η μάζα του πυραύλου την χρονική στιγμή  $t=t_0+\Delta t$

$V_e$  η ταχύτητα με την οποία εκτοξεύεται η μάζα  $\Delta m$  του καυσίμου ως προς τον πύραυλο



Εικόνα 20: Ο πύραυλος έχει στην αρχή μια μάζα  $m$  και ταχύτητα  $V$  και μετά από λίγο ο πύραυλος έχει εκτοξεύσει ένα ποσό καυσασαερίων  $\Delta m$  και πλέον έχει αποκτήσει μια ταχύτητα  $V+\Delta V$  και μάζα λιγότερη από την αρχική αφού έχει χάσει κάποιο ποσοστό καυσίμου. (physicsgg.me)

### 3.2.3 Κλάσμα μάζας (Mass Ratio)

Στην αεροδιαστημική μηχανική, ο λόγος μάζας είναι ένα μέτρο για την απόδοση ενός πυραύλου. Είναι η αναλογία της ξηρής μάζας (το ωφέλιμο φορτίο και την υπόλοιπη κατασκευή) προς την υγρή μάζα (το ωφέλιμο φορτίο το προωθητικό και την υπόλοιπη κατασκευή). Ένας καλά σχεδιασμένος πύραυλος απαιτεί λιγότερο προωθητικό για την επίτευξη ενός δεδομένου στόχου, και ως εκ τούτου θα είχε χαμηλότερο λόγο μάζας.

$$MR = \frac{m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \quad (3.13)$$

Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές για το κλάσμα μάζας είναι πάντα μικρότερες από 1.

Όπου

$m_{\tau\epsilon\lambda}$  είναι η τελική μάζα του πυραύλου

$m_{\alpha\rho\chi}$  είναι η αρχική μάζα του πυραύλου

### 3.2.4 Κλάσμα μάζας προωθητικού

Το κλάσμα μάζας προωθητικού είναι ο λόγος μεταξύ της μάζας του προωθητικού και της αρχικής μάζας του οχήματος. Ένα υψηλότερο κλάσμα μάζας αντιπροσωπεύει λιγότερο βάρος σε ένα σχέδιο.

$$\zeta = \frac{m_p}{m_p + m_{st}} \quad (3.14)$$

### 3.2.5 Χαρακτηριστική ταχύτητα

Μια άλλη παράμετρος πειραματικής απόδοσης που χρησιμοποιείται συνήθως για πυραυλικούς κινητήρες είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα, η οποία ορίζεται ως η αναλογία της ισοδύναμης ταχύτητας εξόδου και του συντελεστή ώθησης.

$$c = \frac{V_e}{C_F} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.15)$$

$C_F$  είναι ο συντελεστής ώθησης

## 3.3 Πύραυλος πολλαπλών σταδίων

Ένας πύραυλος πολλαπλών σταδίων είναι ένα όχημα εκτόξευσης που χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερες βαθμίδες πυραύλων, καθένα από τα οποία περιέχει τους δικούς του κινητήρες και προωθητικό. Συνδέονται είτε σειριακά είτε παράλληλα μαζί με το επόμενο στάδιο. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά ότι δύο ή περισσότεροι πύραυλοι συνδέονται ο ένας πάνω στο άλλον ή ο ένας δίπλα στον άλλο. Οι πύραυλοι δύο σταδίων είναι αρκετά συνηθισμένοι, αλλά έχουν εκτοξευθεί με επιτυχία πύραυλοι έως και πέντε σταδίων.

Οι πολυβάθμιοι πύραυλοι επιτρέπουν βελτιωμένη ικανότητα ωφέλιμου φορτίου για οχήματα με υψηλή απαίτηση  $\Delta V$ , όπως οχήματα εκτόξευσης ή διαπλανητικά διαστημόπλοια. Σε έναν πύραυλο πολλαπλών σταδίων, το προωθητικό αποθηκεύεται σε μικρότερες, ξεχωριστές δεξαμενές και όχι σε μια μεγαλύτερη δεξαμενή όπως σε έναν πύραυλο ενός σταδίου. Δεδομένου ότι κάθε δεξαμενή απορρίπτεται όταν είναι άδεια, δεν καταναλώνεται ενέργεια για να επιταχυνθούν οι άδειες δεξαμενές, οπότε λαμβάνεται υψηλότερη συνολική αύξηση της ταχύτητας  $\Delta V$ . Για ευκολία, οι ξεχωριστές δεξαμενές συνήθως συνδυάζονται με τους δικούς τους κινητήρες, με κάθε μονάδα που απορρίπτεται να ονομάζεται στάδιο.

Η απόδοση των πυραύλων πολλαπλών σταδίων περιγράφεται με την ίδια εξίσωση πυραύλων με τους πυραύλους ενός σταδίου, αλλά πρέπει να προσδιορίζεται σε σταδιακή βάση. Η αύξηση της ταχύτητας,  $\Delta V$ , για κάθε στάδιο υπολογίζεται όπως πριν

$$\Delta V = V_e \ln \left( \frac{m}{m_0} \right)$$

Ορίζουμε το κλάσμα ωφέλιμου φορτίου ως αναλογία μάζας ωφέλιμου φορτίου προς αρχική μάζα  $\frac{m_{pl}}{m_{αρχ}}$

1. Τα στάδια με υψηλότερη ειδική ώθηση  $I_{sp}$  πρέπει να είναι πάνω από αυτά με χαμηλότερη  $I_{sp}$ .
2. Περισσότερο  $\Delta V$  πρέπει να παρέχεται από τα στάδια με την υψηλότερη ειδική ώθηση.
3. Κάθε επόμενο στάδιο πρέπει να είναι μικρότερο από το προηγούμενο.
4. Παρόμοια στάδια θα πρέπει να παρέχουν την ίδια  $\Delta V$ .

Γενικά, το πρώτο στάδιο πρέπει να δώσει τη μεγαλύτερη ώθηση και συνολική ώθηση. Καθώς τότε έχουμε τη μεγαλύτερη μάζα του πυραύλου κατά τη λειτουργία της εκτόξευσης. Ως εκ τούτου, είναι επίσης γνωστό ως ενισχυτικό στάδιο. Τα επόμενα στάδια πρέπει να παρέχουν χαμηλότερες ωθήσεις. Το ωφέλιμο φορτίο για το πρώτο στάδιο θα είναι ίσο με τη συνολική μάζα όλων των ανώτερων σταδίων μαζί με το πραγματικό ωφέλιμο φορτίο που θα τοποθετηθεί στην τροχιά.

Το δεύτερο στάδιο ξεκινά όταν η ταχύτητά του είναι σχεδόν ίση με την αύξηση της ταχύτητας που παρέχεται από το πρώτο στάδιο και απελευθερώνει τη δομική μάζα του πρώτου σταδίου, ενισχύοντας έτσι τον λόγο μάζας για μεγαλύτερη αύξηση ταχύτητας. Εάν η αύξηση ταχύτητας  $\Delta V_1$  συνεισφέρει από το πρώτο στάδιο και η  $\Delta V_2$  συμβάλλεται από το δεύτερο στάδιο, τότε η συνολική αύξηση ταχύτητας στο τέλος του δεύτερου σταδίου της λειτουργίας θα είναι ίση με  $\Delta V_1 + \Delta V_2$ .

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι κάθε στάδιο μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικό τύπο πυραυλοκινητήρα, το καθένα προσαρμοσμένο για τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας του. Έτσι, οι κινητήρες χαμηλότερου σταδίου έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ τα ανώτερα στάδια μπορούν να χρησιμοποιούν κινητήρες κατάλληλους για συνθήκες σχεδόν κενού. Τα κατώτερα στάδια τείνουν να απαιτούν περισσότερη δομή από την ανώτερη καθώς πρέπει να φέρουν το δικό τους βάρος συν αυτό των σταδίων που βρίσκονται πάνω από αυτά. Η βελτιστοποίηση της δομής κάθε σταδίου μειώνει το βάρος του συνολικού οχήματος και παρέχει επιπλέον πλεονέκτημα.

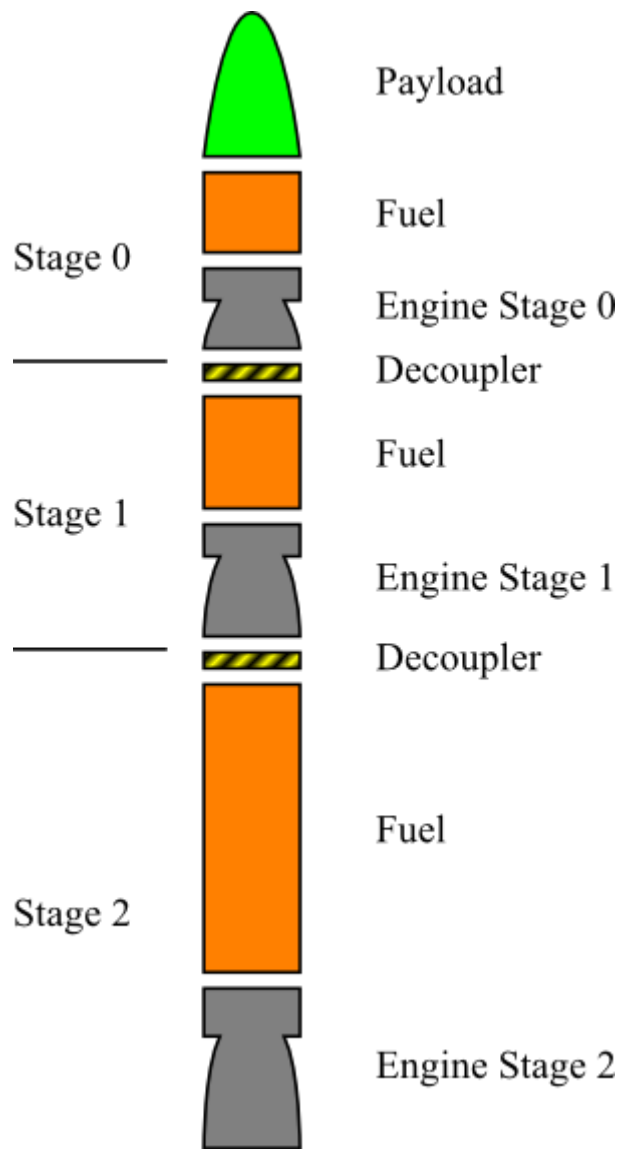


### 3.3.1 Τύποι Σταδίων

Καθώς τα καύσιμα καίγονται κατά τη διάρκεια της ανόδου, μια μεγάλη αναλογία του βάρους των δεξαμενών του οχήματος είναι σχεδόν άδεια. Με αποτέλεσμα η δομή που είχε αρχικά το όχημα όταν ήταν πλήρως φορτωμένο να περισσεύει. Προκειμένου να ελαφρυνθεί το βάρος του οχήματος για να επιτευχθεί τροχιακή ταχύτητα, οι περισσότεροι εκτοξευτές απορρίπτουν ένα μέρος του οχήματος σε μια διαδικασία που ονομάζεται σταδιοποίηση. Υπάρχουν δύο τύποι οργάνωσης πυραύλων, **σειριακός** και **παράλληλος**.

#### Σειριακά

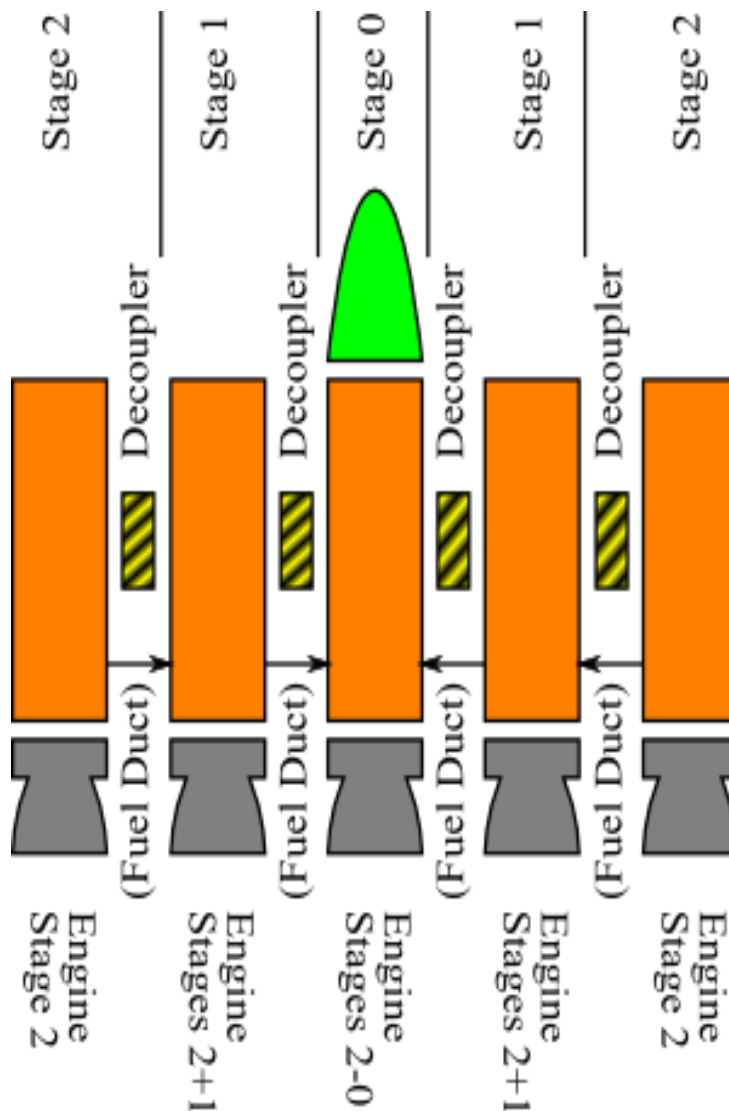
Στο σειριακό σχηματισμό, υπάρχει ένας μικρός πύραυλος δεύτερου σταδίου που τοποθετείται πάνω από έναν μεγαλύτερο πύραυλο πρώτου σταδίου. Το πρώτο στάδιο αναφλέγεται κατά την εκτόξευση και καίγεται μέσω της ανερχόμενης ισχύος μέχρι να εξαντληθούν τα προωθητικά του. Ο κινητήρας του πρώτου σταδίου σβήνει, το δεύτερο στάδιο διαχωρίζεται από το πρώτο στάδιο και ο κινητήρας του δεύτερου σταδίου αναφλέγεται. Το ωφέλιμο φορτίο μεταφέρεται στο δεύτερο στάδιο. Σειριακή σταδιοποίηση χρησιμοποιήθηκε στους πυραύλους Saturn V. Ο Saturn V ήταν ένας πύραυλος τριών σταδίων, ο οποίος πραγματοποίησε δύο διαχωρίσεις σταδίων στο δρόμο προς την τροχιά της γης.



Εικόνα 21: Σειριακός τύπος σταδίων, καθένας με τη δική του μηχανή. (kerbalspaceprogram.com)

### Παράλληλα

Σε παράλληλο σχηματισμό, αρκετά μικρά πρώτα στάδια συνδέονται με έναν κεντρικό πύραυλο στήριξης. Κατά την εκτόξευση, όλοι οι κινητήρες ανάβουν. Όταν τα καύσιμα τους τελειώσουν, οι προωθητές απορρίπτονται. Ο κινητήρας στήριξης συνεχίζει να καίγεται και το ωφέλιμο φορτίο μεταφέρεται πάνω από τον πύραυλο στήριξης σε τροχιά. Παράλληλος σχηματισμός χρησιμοποιήθηκε στα Space Shuttle.



Εικόνα 22: Παράλληλος τύπος σταδίων. (kerbalspaceprogram.com)

Ορισμένοι πύραυλοι, όπως οι Titan III και Delta II, χρησιμοποιούν σειριακό και παράλληλο σχηματισμό. Ο Titan III διαθέτει υγρό προωθητικό δύο σταδίων για στήριγμα και δύο παράλληλους προωθητές κατά την εκτόξευση.

### 3.3.2 Μειονέκτημα σταδίων

Στα αρνητικά, της σταδιοποίησης είναι ότι απαιτεί από το όχημα να σηκώσει κινητήρες που δε χρησιμοποιούνται μέχρι αργότερα. Καθώς και να κάνει όλο τον πύραυλο πιο πολύπλοκο και πιο δύσκολο να κατασκευαστεί. Επιπλέον, κάθε στάδιο είναι ένα σημαντικό σημείο αποτυχίας κατά την εκτόξευση, με πιθανότητα αστοχίας διαχωρισμού, αστοχίας ανάφλεξης και σύγκρουσης. Παρ'όλα αυτά, η εξοικονόμηση είναι τόσο μεγάλη που κάθε πύραυλος που χρησιμοποιήθηκε ποτέ για να μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο σε τροχιά είχε κάποια στάδια.

Πρόσφατα η χρησιμότητα της τεχνικής έχει τεθεί υπό αμφισβήτηση λόγω των εξελίξεων στην τεχνολογία. Στην περίπτωση του διαστημικού λεωφορείου, το κόστος των διαστημικών

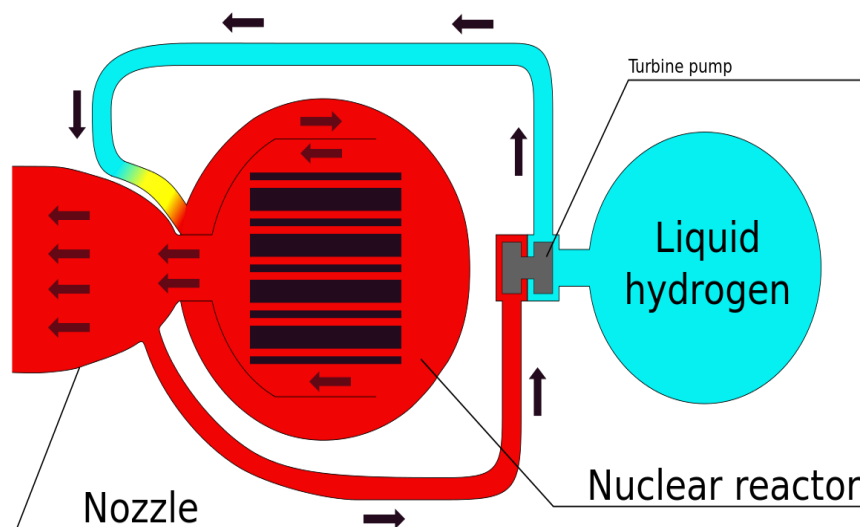
εκτοξεύσεων φαίνεται να συνίσταται ως επί το πλείστον στο λειτουργικό κόστος των εμπλεκόμενων ανθρώπων, σε αντίθεση με τα καύσιμα ή τον εξοπλισμό. Η μείωση αυτών των δαπανών φαίνεται να είναι ο καλύτερος τρόπος για να μειωθεί το συνολικό κόστος έναρξης. Η νέα τεχνολογία που βρίσκεται κυρίως στα θεωρητικά και αναπτυξιακά στάδια εξετάζεται για να μειώσει το κόστος των οχημάτων εκτόξευσης.

## 4. Τύποι πυρηνικών πυραύλων

Ένας πυρηνικός θερμικός πύραυλος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί από τον τύπο του αντιδραστήρα, που κυμαίνεται από έναν σχετικά απλό στερεό αντιδραστήρα έως τον πολύ πιο δύσκολο να κατασκευαστεί αλλά θεωρητικά πιο αποτελεσματικός αντιδραστήρας πυρήνα αερίου.

### 4.1.1 Στερεός πυρήνας

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες στερεού πυρήνα τροφοδοτούνται από ενώσεις ουρανίου που υπάρχουν σε στερεά φάση και υφίστανται πυρηνική σχάση για την απελευθέρωση ενέργειας. Ένας στερεός πυρήνας είναι ο απλούστερος σχεδιασμός για κατασκευή και χρησιμοποιείται σε όλους τους δοκιμασμένους πυρηνικούς θερμικούς πυραύλους (NTR).



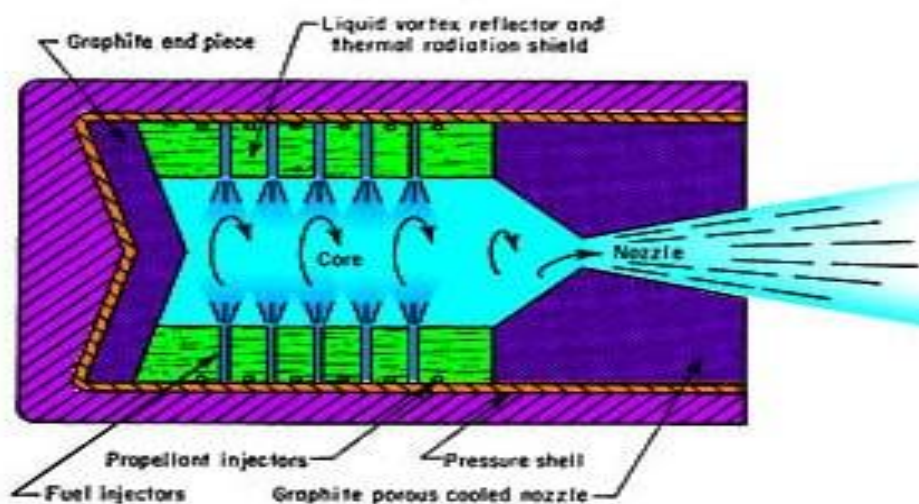
Εικόνα 23: Πυρηνικός θερμικός πύραυλος σχάσης στερεού πυρήνα. (Wikipedia)

Η απόδοση ενός αντιδραστήρα στερεού πυρήνα περιορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού, συμπεριλαμβανομένου του σημείου τήξεως, των υλικών που χρησιμοποιούνται στο πυρηνικό καύσιμο και στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως προωθητικό. Άλλα προωθητικά έχουν επίσης προταθεί, όπως αμμωνία, νερό ή LOX, αλλά αυτά τα προωθητικά θα παρέχουν μειωμένη ταχύτητα και απόδοση καυσαερίων με οριακά μειωμένο κόστος καυσίμου.

Οι πυρηνικοί πύραυλοι που σχεδιάζονται στις ΗΠΑ έφτασαν σε αναλογίες ώθησης προς βάρος περίπου 7: 1. Αυτή εξακολουθεί να είναι πολύ χαμηλότερη αναλογία ώσης προς βάρος από ό, τι μπορεί να επιτευχθεί με χημικούς πυραύλους, οι οποίοι έχουν αναλογίες ώσης προς βάρος της τάξης των 70: 1. Σε συνδυασμό με τις μεγάλες δεξαμενές που είναι απαραίτητες για την αποθήκευση υγρού υδρογόνου, αυτό σημαίνει ότι οι πυρηνικοί θερμικοί κινητήρες στερεού πυρήνα ταιριάζουν καλύτερα σε τροχιά εκτός της βαρύτητας της Γης. Καθώς και για την αποφυγή της ραδιενεργού μόλυνσης που θα προκύψει από την ατμοσφαιρική χρήση.

#### 4.1.2 Υγρός πυρήνας

Οι πυρηνικοί κινητήρες υγρού πυρήνα τροφοδοτούνται από ενώσεις σχάσιμων στοιχείων σε υγρή φάση. Ένας αντιδραστήρας υγρού πυρήνα είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστεί με την τρέχουσα τεχνολογία. Ο χρόνος αντίδρασης του πυρηνικού καυσίμου είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο θέρμανσης του λειτουργικού ρευστού. Το πυρηνικό καύσιμο και το λειτουργικό ρευστό δεν είναι φυσικά διαχωρισμένα, αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο πρέπει να παγιδευτεί μέσα στον κινητήρα ενώ το ρευστό επιτρέπεται να εξέρχεται εύκολα μέσω του ακροφυσίου. Μια πιθανή λύση θα ήταν να περιστραφεί



Εικόνα 24: Πυρηνικός πύραυλος υγρού πυρήνα. (aerospacenotes.com)

το μείγμα καυσίμου / ρευστού σε πολύ υψηλές ταχύτητες ώστε να πιεστεί το καύσιμο υψηλότερης πυκνότητας προς τα έξω. Αλλά αυτό θα εκθέσει το δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα στη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας προσθέτοντας μάζα, πολυπλοκότητα και κινούμενα μέρη. Ο πύραυλος θα εκλύσει τεράστιες ποσότητες εξαιρετικά ραδιενεργών αποβλήτων και θα μπορούσε να λειτουργήσει με ασφάλεια μόνο έξω από την ατμόσφαιρα της Γης και ίσως ακόμη και εντελώς έξω από τη μαγνητόσφαιρα της Γης.

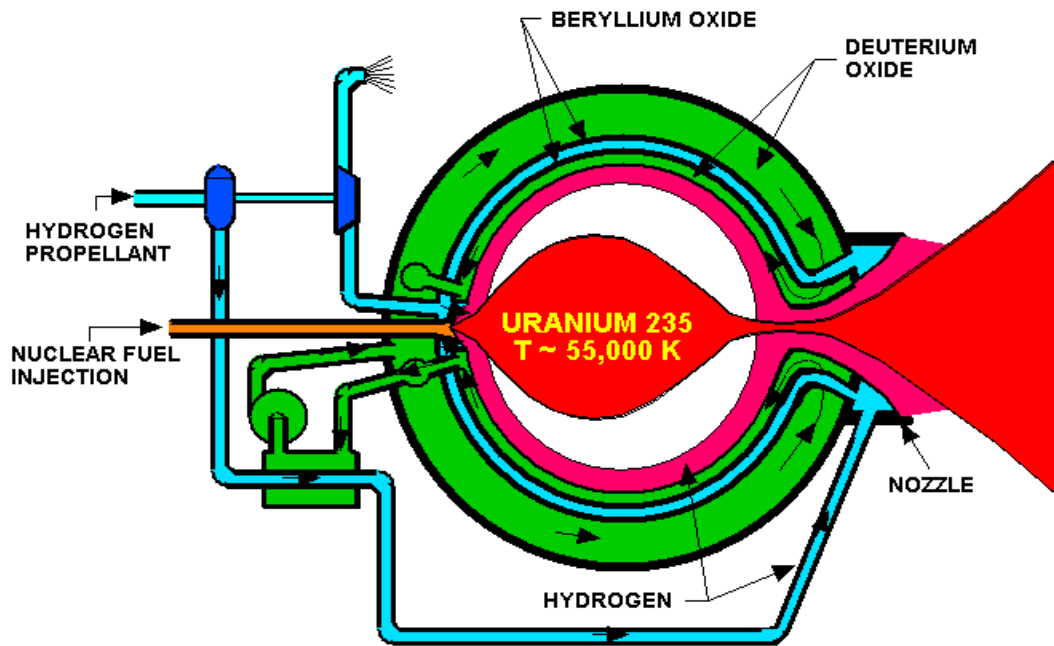
#### 4.1.3 Πυρήνας αερίου

Ο πυρήνας πύραυλου αερίου είναι ένας τύπος πυραύλου που προωθείται από το εξαντλημένο ψυκτικό μέσο ενός αντιδραστήρα αερίου σχάσης. Ο πυρήνας του αντιδραστήρα

πυρηνικής σχάσης μπορεί να είναι είτε αέριο είτε πλάσμα. Οι πύραυλοι πυρηνικού πυρήνα-αντιδραστήρα μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλότερη ειδική ώθηση από τους πυρηνικούς πυραύλους στερεού πυρήνα. Κατά συνέπεια, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες πυρηνικού αερίου μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες στο προωθητικό. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μείωση του χρόνου κάθε αποστολής για μελλοντικές εξερευνησεις.

Υπάρχουν δύο κύριες παραλλαγές του πυραύλου με πυρήνα αερίου:

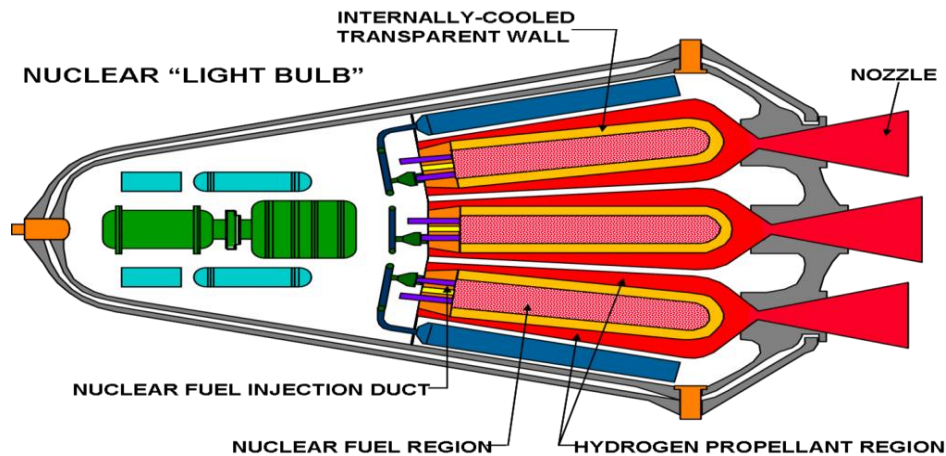
**Ανοιχτού κύκλου**, τα οποία δεν περιέχουν το καύσιμο τους μέσα σε ένα δοχείο. Το πλεονέκτημα του σχεδιασμού ανοικτού κύκλου είναι ότι μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας από ότι ο σχεδιασμός κλειστού κύκλου. Το μειονέκτημα του ανοικτού κύκλου είναι ότι το καύσιμο μπορεί να διαφύγει το ρευστό μέσω του ακροφυσίου, πριν φτάσει σε σημαντικά επίπεδα καύσης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι η ραδιενεργή εκροή



Εικόνα 25: Πυρήνας αερίου ανοικτού κύκλου. (Wikipedia)

από το ακροφύσιο καθιστά τον σχεδιασμό εντελώς ακατάλληλο για λειτουργία εντός της γήινης ατμόσφαιρας.

**Κλειστού κύκλου**, τα οποία περιέχουν τον πυρήνα αντίδρασης αερίου εντός μιας στερεάς δομής. Περιέχει αέριο σχάσης σε ένα περίβλημα χαλαζία που είναι ξεχωριστό από το προωθητικό. Το ψυκτικό υδρογόνο διατρέχει το ακροφύσιο και μέσα στα τοιχώματα του περιβλήματος χαλαζία ψύχεται. Στη συνέχεια, το ψυκτικό τρέχει κατά μήκος του εξωτερικού του περιβλήματος καυσίμου χαλαζία. Δεδομένου ότι το σχάσιμο αέριο θα έρθει σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα, η θερμοκρασία λειτουργίας δεν είναι τόσο μεγάλη όσο άλλα σχέδια, επειδή τα τοιχώματα τελικά θα αφαιρεθούν. Είναι επωφελής επειδή ο σχεδιασμός του ουσιαστικά εξαλείφει την απώλεια καυσίμου, αλλά η

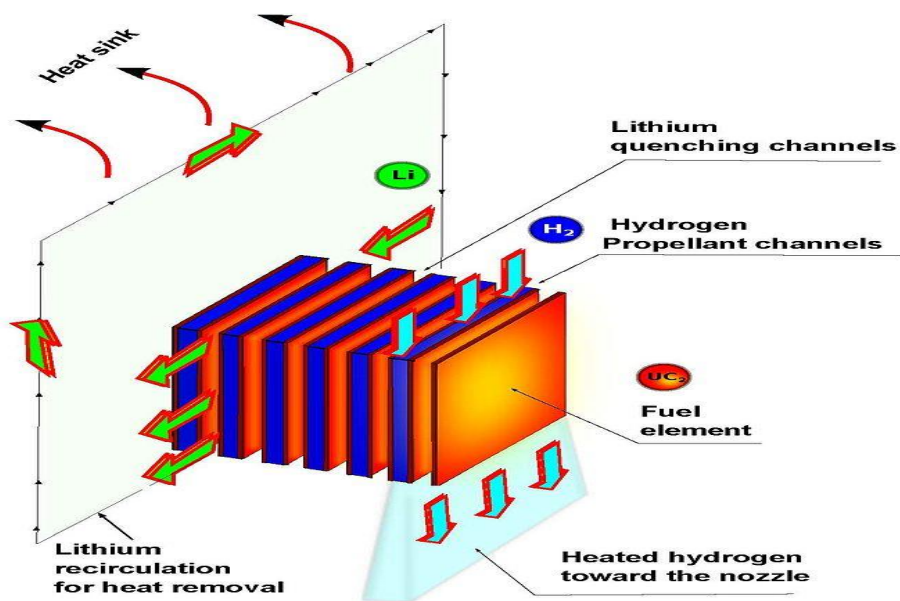


Εικόνα 26: Πυρήνας αερίου κλειστού κύκλου. (Wikipedia)

αναγκαιότητα ενός φυσικού τοιχώματος μεταξύ καυσίμου και προωθητικού ώστε να μην υπάρχει διάβρωση των τοιχωμάτων, οδηγεί στο εμπόδιο της εύρεσης ενός υλικού με εξαιρετικά βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά.

#### 4.1.4 Παλμικός πυρήνας

Είναι ένας τύπος πυρηνικού θερμικού πυραύλου (NTR) που αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνικό της Καταλονίας, για την ενίσχυση της ώθησης και ειδικής ώθησης σε συμβατικό πυρηνικό πύραυλο. Ο παλμικός πυρηνικός θερμικός πύραυλος είναι ένας διατοπικός πύραυλος ικανός να λειτουργεί με σταθερή ονομαστική ισχύ. Καθιστώντας δυνατή την παραγωγή υψηλής ισχύος και εντατική ροή νετρονίων σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Επειδή ο χρόνος παραμονής του προωθητικού στον θάλαμο είναι μικρός, με τη χρήση παλμών επιτυγχάνεται μια σημαντική ενίσχυση της ενέργειας. Με αποτέλεσμα η αύξηση της ροής μάζας του προωθητικού θα αυξήσει την ώθηση.



Εικόνα 27: Κυψέλες πυρηνικών θερμικών πυραυλικών μονάδων για ενίσχυση *Isp*. (Wikipedia)

## 4.2 Κύκλοι μηχανών πυρηνικού πυραύλου

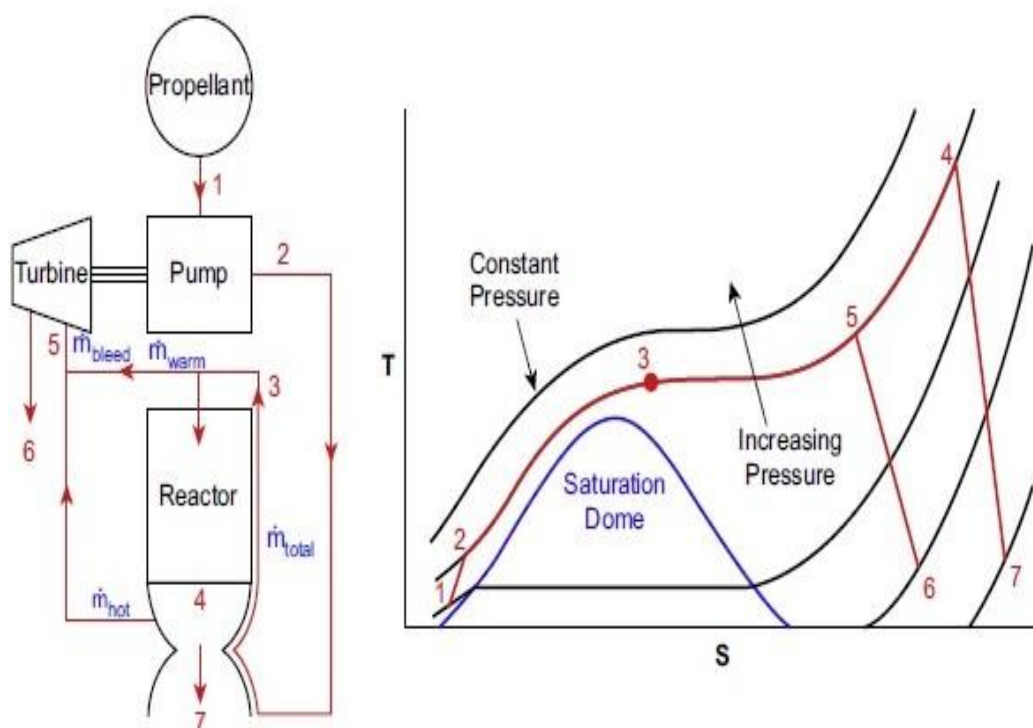
Οι πυρηνικοί πύραυλοι λειτουργούν χρησιμοποιώντας έναν από τους διάφορους τύπους θερμοδυναμικών κύκλων που ποικίλλουν σε πολυπλοκότητα και αποτελεσματικότητα. Για τους πυρηνικούς θερμικούς πυραύλους, αυτοί οι θερμοδυναμικοί κύκλοι είναι ανοιχτοί κατά τη λειτουργία τους. Κατά τη λειτουργία τους, το υγρό εργασίας περνά μόνο μια φορά μέσω του ακροφυσίου για να παράγει ώθηση κατά την κυκλοφορία του. Αυτοί οι κινητήρες συνήθως χρησιμοποιούν στροβιλοαντλίες για μεγάλη πίεση στο προωθητικό προτού εισαχθεί στον αντιδραστήρα όπου το προωθητικό θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες πριν αποφορτιστεί στο ακροφύσιο.

Πυρηνικά συστήματα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αποτελούν «κλειστούς» θερμοδυναμικούς κύκλους. Στους οποίους το υγρό εργασίας παραμένει πάντα μέσα στο σύστημα και κυκλοφορεί συνεχώς κατά τη λειτουργία. Τα πυρηνικά ηλεκτρικά συστήματα απαιτούν, εκτός από την εγκατάσταση στροβιλοατλίας, θερμαντικά σώματα ώστε να απορρίπτονται τις απώλειες θερμότητας που προκύπτουν από τη διαδικασία μετατροπής.



### 4.2.1 Θερμός ανοιχτός κύκλος (hot bleed cycle)

Είναι ο κύκλος που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) και αποδείχθηκε αρκετά επιτυχημένος κατά τη διάρκεια των διαφόρων δοκιμών του κινητήρα. Τα κύρια πλεονεκτήματα του κύκλου είναι οι υψηλές αποδόσεις που προκύπτουν από τη χαμηλή ροή κυκλοφορίας που απαιτείται για την κίνηση της στροβιλοαντλίας και τη σχετική απλότητα του κινητήρα. Το κύριο μειονέκτημα του κύκλου είναι ότι το τμήμα της ροής κυκλοφορίας το οποίο εκτρέπεται από το κεντρικό τμήμα εξόδου θα είναι αρκετά ζεστό και σκληρό σε τυχόν βαλβίδες και σωληνώσεις, από ότι ήταν πριν αναμειχθεί με την κυκλοφορία.



Εικόνα 28: Θερμός ανοιχτός κύκλος. (William Emrich)

**1-2** Το υγρό προωθητικό φεύγει από τη δεξαμενή και αυξάνει την πίεση λειτουργίας αφού περάσει από τη στροβιλοαντλία.

**2-3** Αφού περάσει από τη στροβιλοαντλία, το προωθητικό κυκλοφορεί μέσω του ακροφυσίου, στηρίζοντας τα τοιχώματα του αντιδραστήρα και ούτω καθεξής, αεριοποιώντας το προωθητικό.

**3-4** Η ροή του αερίου προωθητικού διασπάται, με την πλειοψηφία της ροής να κατευθύνεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπου θερμαίνεται σε αρκετούς χιλιάδες βαθμούς και εξάγεται από την εξάτμιση του αντιδραστήρα.

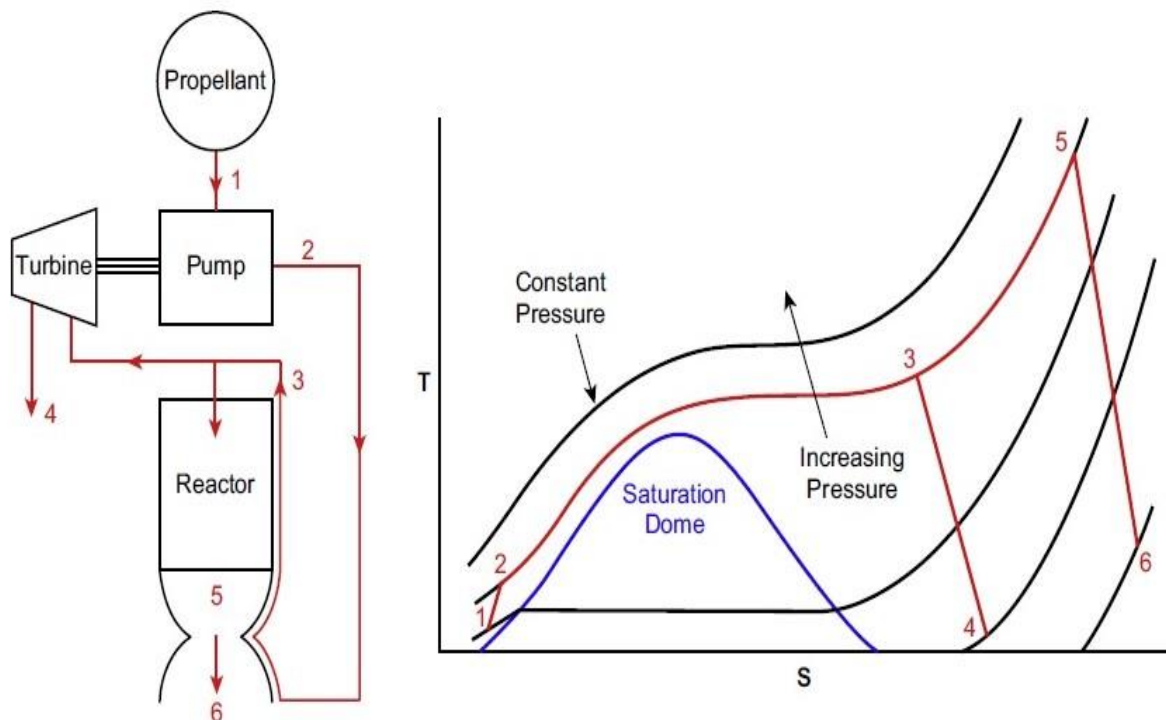
**3-5** Το υπόλοιπο προωθητικό αναμειγνύεται με το καυτό προωθητικό που εξάγεται από την εξάτμιση του αντιδραστήρα και εισέρχεται στο τμήμα της τουρμπίνας της αντλίας.

**5-6** Το μικτό προωθητικό είναι πλέον σε θερμοκρασία συμβατή με το μέγιστο αποδεκτό όριο των υλικών του στροβίλου. Μετά τη διέλευση του προωθητικού από την στροβιλοαντλία, η προωθητική ροή εκκενώνεται μέσω ενός μικρού ακροφυσίου.

**4-7** Το υπόλοιπο καυτό προωθητικό αέριο κατευθύνεται στο κύριο ακροφύσιο όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε κατευθυνόμενη κινητική ενέργεια που παράγει ώθηση.

#### 4.2.2 Ψυχρός ανοιχτός κύκλος (cold bleed cycle)

Ο ψυχρός κύκλος είναι ένας πιθανός κύκλος κινητήρα πυραύλων που θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως εναλλακτική λύση. Ωστόσο, δεν εφαρμόστηκε ποτέ σε οποιονδήποτε κινητήρα πυραύλων οποιουδήποτε είδους μέχρι σήμερα. Τα κύρια πλεονεκτήματα του κύκλου είναι η υψηλή αξιοπιστία στις στροβιλοαντλίες που προκύπτει από τις χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου στην τουρμπίνα και η σχετική απλότητα του κινητήρα. Τα κύρια μειονεκτήματα του κύκλου είναι ότι οι πιέσεις στο θάλαμο τείνουν να είναι χαμηλές λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων ποσοτήτων ισχύος στην στροβιλοαντλία από το ακροφύσιο και τον θάλαμο ροή ψύξης και τη σχετική αναποτελεσματικότητα του κύκλου λόγω της σπατάλης σημαντικών ποσοτήτων προωθητικού.



Εικόνα 29: Ψυχρός ανοιχτός κύκλος. (William Emrich)

**1-2** Το υγρό προωθητικό φεύγει από τη δεξαμενή και αυξάνει την πίεση λειτουργίας αφού περάσει από την στροβιλοαντλία.

**2-3** Αφού περάσει από την στροβιλοαντλία, το προωθητικό κυκλοφορεί μέσω του ακροφυσίου, στηρίζοντας τα τοιχώματα του αντιδραστήρα και ούτω καθεξής, αεριοποιώντας το προωθητικό.

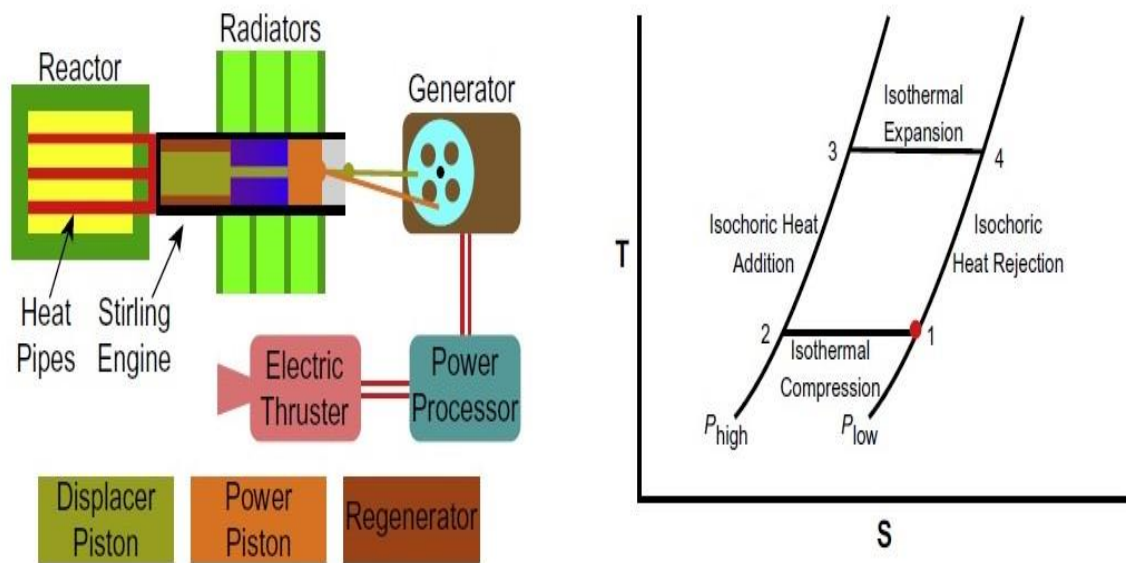
**3-4** Η ροή θερμού αέριου προωθητικού διαχωρίζεται και μέρος της ροής κατευθύνεται προς το τμήμα της τουρμπίνας της στροβιλοαντλίας, όπου η πίεση και η θερμοκρασία του προωθητικού πέφτει. Αφού περάσει από την στροβιλοαντλία, η ροή εκκενώνεται στο περιβάλλον μέσω ενός μικρού ακροφυσίου.

**4-5** Το υπόλοιπο προωθητικό κατευθύνεται στον πυρήνα του αντιδραστήρα όπου θερμαίνεται σε αρκετούς χιλιάδες βαθμούς και μετά κατευθύνεται προς το ακροφύσιο.

**5-6** Το θερμό προωθητικό αέριο κατευθύνεται μέσω του κύριου ακροφυσίου όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε κατευθυνόμενη κινητική ενέργεια που παράγει ώθηση

### **4.2.3 Κλειστός κύκλος Stirling**

Ο κινητήρας κύκλου Stirling είναι ένας κινητήρας κλειστού κύκλου που λειτουργεί με κυκλική συμπίεση και τη διαστολή ενός αέριου ρευστού εργασίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες, ώστε να υπάρχει καθαρή μετατροπή της θερμικής ενέργεια σε μηχανική. Αρχικά, ο κύκλος του Stirling σχεδιάστηκε ως εναλλακτικός κύκλος που χρησιμοποιούσαν οι ατμομηχανές λόγω της υψηλής απόδοσης και της ικανότητάς του να χρησιμοποιεί σχεδόν οποιαδήποτε πηγή θερμότητας. Σήμερα ο κύκλος Stirling έχει περιορισμένη χρήση και μόνο σε εξειδικευμένες εφαρμογές επειδή η υψηλή θερμοκρασία είναι απαραίτητη σε όλη τη συσκευή για να έχουμε αποτελεσματική λειτουργία. Αυτή η υψηλή θερμοκρασίας οδηγεί σε προβλήματα υλικού και κατασκευής. Για διαστημική εφαρμογή, όπου η χρήση εξειδικευμένων υλικών και το σχετικό κόστος τους είναι λιγότερο ζήτημα, ο κινητήρας κύκλου Stirling μπορεί να είναι ιδανική επιλογή.



Εικόνα 30: Κλειστός κύκλος Stirling. (William Emrich)

**1-2** Το έμβολο ισχύος (ισοθερμικά με σταθερή θερμοκρασία) συμπιέζει το υγρό εργασίας στην ψυχρή τελική του θερμοκρασία. Επειδή το υγρό εργασίας είναι κρύο, απαιτείται η συμπίεση του. Το έμβολο μετατόπισης κινείται έτσι ώστε να αρχίσει να μεταφέρει το υγρό εργασίας στο καυτό άκρο του κινητήρα.

**1-3** Το έμβολο μετατόπισης συνεχίζει να μετακινεί το υγρό εργασίας στο θερμό άκρο του κινητήρα όπου θερμαίνεται ισοchorικά (σταθερός όγκος).

**1-4** Το θερμαινόμενο ρευστό εργασίας αυξάνει την πίεση και διαστέλλεται ισοθερμικά (σταθερή θερμοκρασία) έτσι ώστε να κινεί το έμβολο ισχύος προς τα εμπρός στην πιο μακρινή διαδρομή του. Η ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω της κίνησης του εμβόλου ισχύος είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την επακόλουθη συμπίεση του ρευστού εργασίας.

**4-1** Το έμβολο μετατόπισης κινείται έτσι ώστε το υγρό εργασίας να μεταφέρεται ισοchorικά (σταθερός όγκος) πίσω στο κρύο άκρο του κινητήρα όπου η θερμότητα στο ρευστό εργασίας απορρίπτεται από τα θερμαντικά σώματα.

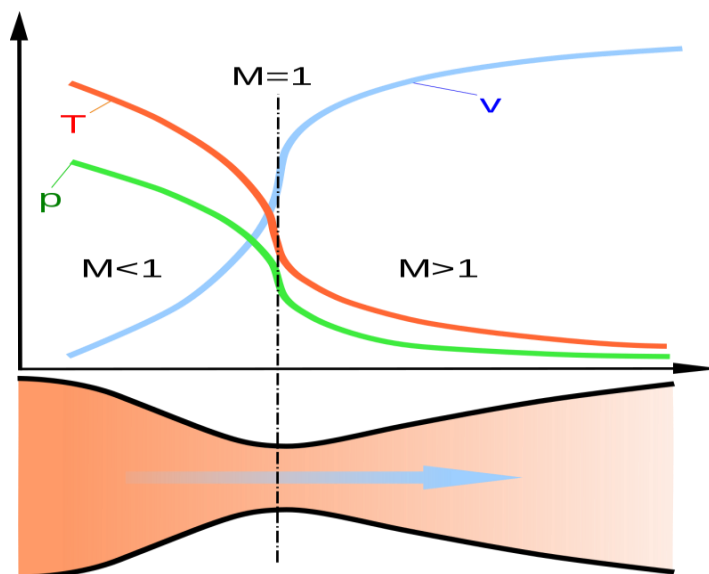
## 5. Ακροφύσιο Πυραύλου (Rocket Nozzle)

Ο κύριος σκοπός του ακροφυσίου σε έναν πυραυλικό κινητήρα είναι η επέκταση της υψηλής πίεσης με καυτά αέρια που παράγονται με την καύση του προωθητικού σε

υψηλότερο πίδακα ταχύτητα για την παραγωγή της απαιτούμενης ώσης. Για να έχει μια μεγάλη τιμή η ώθηση, η κινητική ενέργεια των καυσαερίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να παράγει υψηλότερη ταχύτητα στην έξοδο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα ακροφύσιο τύπου συγκλίνον-αποκλίνον (de Laval nozzle). Αυτό το ακροφύσιο επιτρέπει στον πυραυλικό κινητήρα να πετύχει ταχύτητες καυσαερίων στην έξοδο αρκετές φορές μεγαλύτερες από την ταχύτητα του ήχου.

Το ακροφύσιο κατασκευάζεται συνήθως αρκετά μεγάλο (ή η περιοχή εξόδου είναι αρκετά μεγάλη) έτσι ώστε η πίεση στον θάλαμο καύσης να μειώνεται κατά την έξοδο του ακροφυσίου στην πίεση που υπάρχει έξω από το ακροφύσιο. Υπό αυτήν την κατάσταση,  $P_e = P_a$  όπου το  $P_e$  είναι η πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου και το  $P_a$  είναι η εξωτερική πίεση περιβάλλοντος, η ώθηση είναι μέγιστη και το ακροφύσιο λέγεται ότι είναι προσαρμοσμένο, που ονομάζεται επίσης βέλτιστη ή σωστή διαστολή. Όταν το  $P_e$  είναι μεγαλύτερο από το  $P_a$ , το ακροφύσιο είναι εκτεταμένο. Όταν ισχύει το αντίθετο, είναι υπερβολικά εκτεταμένο.

Η ροή μέσω του ακροφυσίου διέπεται από το λόγο της ολικής πίεσης προς την πίεση επιστροφής. Το αέριο καύσης θεωρείται ιδανικό αέριο. Η ροή του αερίου είναι ιστροπική, δηλαδή, σε συνεχή εντροπία, ως αποτέλεσμα της παραδοχής του μη ιξώδους υγρού και της αδιαβατικής διαδικασίας. Ο ρυθμός ροής του αερίου είναι σταθερός κατά την περίοδο της καύσης του προωθητικού. Η ροή του αερίου δεν είναι τυρβώδης από την είσοδο αερίου έως την έξοδο καυσαερίων (δηλαδή, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του ακροφυσίου). Η ροή είναι συμπιεστή καθώς το ρευστό είναι αέριο. Καθώς το αέριο καύσης εισέρχεται στο ακροφύσιο πυραύλων, κινείται με υποηχητικές ταχύτητες. Καθώς το αέριο φτάνει στο λαιμό, συστέλλεται και αναγκάζεται να επιταχυνθεί, όπου η περιοχή διατομής είναι η μικρότερη, η γραμμική ταχύτητα γίνεται ηχητική. Μετά από το λαιμό η περιοχή διατομής αυξάνεται, το αέριο διαστέλλεται και η γραμμική ταχύτητα γίνεται σταδιακά πιο υπερηχητική.



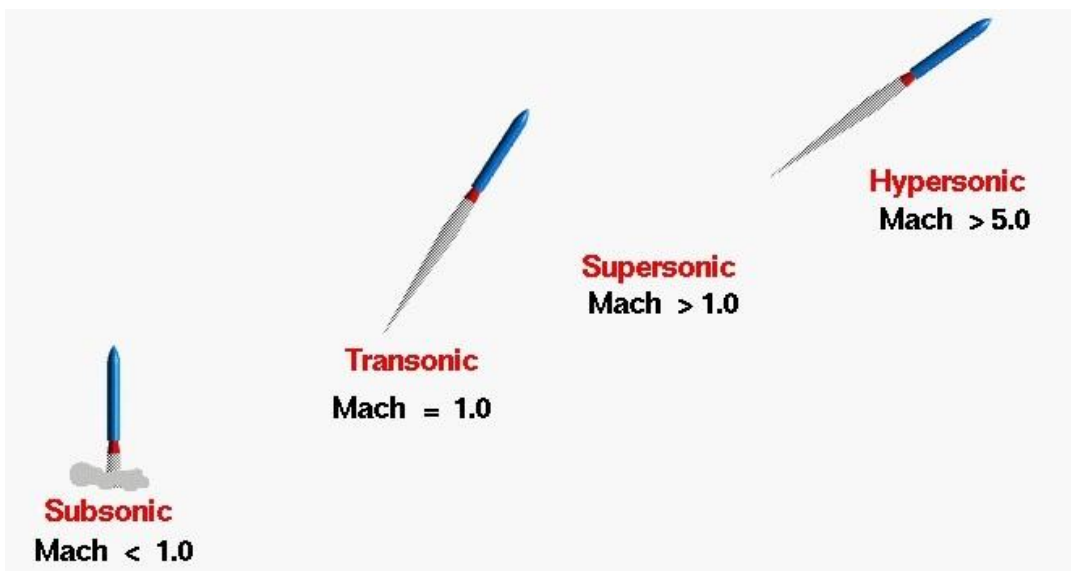
Εικόνα 31: Συγκλίνον/Αποκλίνον Ακροφύσιο (De Laval) (Wikipedia)

**Υποηχητικές συνθήκες (Subsonic)** εμφανίζονται για αριθμούς Mach μικρότερους από ένα,  $M < 1$ . Για τις χαμηλότερες υποηχητικές συνθήκες, η συμπίεστικότητα μπορεί να αγνοηθεί.

Καθώς η ταχύτητα του πυραύλου πλησιάζει την ταχύτητα του ήχου, ο αριθμός Mach πτήσης είναι σχεδόν ίσος με ένα,  $M = 1$ , και η ροή λέγεται ότι είναι **ηχητική (transonic)**. Σε ορισμένα σημεία του πυραύλου, η ταχύτητα υπερβαίνει την ταχύτητα του ήχου. Η πτήση πιο γρήγορα από τον ήχο θεωρήθηκε αδύνατη. Στην πραγματικότητα, το ηχητικό φράγμα ήταν μόνο μια αύξηση της οπισθέλκουσας κοντά σε ηχητικές συνθήκες λόγω των αποτελεσμάτων συμπίεστικότητας. Κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης, ένας πύραυλος αντιμετωπίζει συχνά την υψηλότερη δυναμική του πίεση.

**Υπερηχητικές συνθήκες (Supersonic)** εμφανίζονται για αριθμούς Mach μεγαλύτερους από ένα,  $1 < M < 5$ . Τα εφέ συμπίεσης είναι επίσης σημαντικά για τον εξωτερικό πύραυλο επειδή τα κύματα σοκ δημιουργούνται από την επιφάνεια του πυραύλου. Για υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες,  $3 < M < 5$ , η αεροδυναμική θέρμανση καθίσταται επίσης πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό πυραύλων.

Για ταχύτητες μεγαλύτερες από πέντε φορές την ταχύτητα του ήχου,  $M > 5$ , η ροή λέγεται ότι είναι **hypersonic**. Σε αυτές τις ταχύτητες, μέρος της ενέργειας του πυραύλου πηγαίνει τώρα στη διέγερση των χημικών δεσμών που συγκρατούν τα μόρια αζώτου και οξυγόνου του αέρα. Σε υπερηχητικές ταχύτητες, η χημεία του αέρα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό των δυνάμεων στο αντικείμενο. Το διαστημικό λεωφορείο επανέρχεται στην ατμόσφαιρα με υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες,  $M \sim 25$ . Υπό αυτές τις συνθήκες, ο θερμαινόμενος αέρας γίνεται ιονισμένο πλάσμα αερίου και το διαστημικό σκάφος πρέπει να είναι μονωμένο από τις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 32: Κατηγοριοποίηση του ήχου σε σχέση με την ταχύτητά του. (nasa)

## 5.1 Κρουστικό κύμα (shock wave)



Εικόνα 33: Φωτογραφία τη στιγμή που ο πύραυλος σπάει το φράγμα του ήχου και δημιουργείται το κρουστικό κύμα. (livescience.com)

Καθώς ένας πύραυλος κινείται μέσω ενός αερίου, τα μόρια του αερίου εκτρέπονται γύρω από τον πύραυλο. Εάν η ταχύτητα του πυραύλου είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου του αερίου, η πυκνότητα του αερίου παραμένει σταθερή και η ροή του αερίου μπορεί να περιγράψει διατηρώντας την ορμή και την ενέργεια. Καθώς η ταχύτητα του αντικείμενου πλησιάζει την ταχύτητα του ήχου, πρέπει να εξετάσουμε τα αποτελέσματα συμπίεστικότητας στο αέριο. Η πυκνότητα του αερίου ποικίλλει τοπικά καθώς το αέριο συμπιέζεται από τον πύραυλο.

Για συμπίεσιμες ροές με μικρή ή μικρή περιστροφή ροής, η διαδικασία ροής είναι αναστρέψιμη και η εντροπία είναι σταθερή. Η αλλαγή στις ιδιότητες ροής δίνεται στη συνέχεια από τις ισοτροπικές σχέσεις (ισεντροπικά μέσα "συνεχής εντροπία"). Αλλά όταν ένα αντικείμενο κινείται γρηγορότερα από την ταχύτητα του ήχου και υπάρχει απότομη μείωση στην περιοχή ροής, δημιουργούνται κύματα σοκ στη ροή. Τα **κρουστικά κύματα** είναι πολύ μικρές περιοχές στο αέριο όπου οι ιδιότητες του αερίου αλλάζουν κατά μεγάλο μέρος. Σε ένα κύμα σοκ, η στατική πίεση, η θερμοκρασία και η πυκνότητα αερίου αυξάνουν σχεδόν στιγμιαία. Οι αλλαγές στις ιδιότητες ροής είναι μη αναστρέψιμες και η εντροπία ολόκληρου του συστήματος αυξάνεται. Επειδή ένα κρουστικό κύμα δεν λειτουργεί και δεν υπάρχει προσθήκη θερμότητας, η συνολική ενθαλπία και η συνολική θερμοκρασία είναι σταθερές. Αλλά επειδή η ροή είναι μη ισεντροπική, η συνολική πίεση κατάντη του κύματος είναι πάντα

μικρότερη από τη συνολική πίεση ανάντη του κύματος. Υπάρχει απώλεια της συνολικής πίεσης που σχετίζεται με ένα κρουστικό κύμα. Επειδή η συνολική πίεση αλλάζει, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνήθη (ασυμπίεστη) μορφή της εξίσωσης του Bernoulli στο σοκ. Ο αριθμός Mach και η ταχύτητα της ροής μειώνονται επίσης σε ένα κρουστικό κύμα.

## 5.2 Ταχύτητα εξόδου Καυσαερίων (Exhaust Velocity)

Η ροή σε ένα ακροφύσιο συγκλίνον αποκλίνον έχει τρισδιάστατο χαρακτήρα, με τη θερμοκρασία, την πίεση και τη σύνθεση του αερίου να ποικίλλουν κατά μήκος του στομίου. Η ροή γίνεται πιο περίπλοκη λόγω της παρουσίας του κρουστικού κύματος. Ως εκ τούτου, το σχήμα του ακροφυσίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τη ροή και τη μεταφοράς θερμότητας, το οποίο επηρεάζει την ώθηση που παράγεται από τον πυραυλικό κινητήρα. Για να αναλύσουμε τη ροή στο ακροφύσιο, θεωρούμε ότι η ροή είναι ιδανική με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Η ροή είναι σταθερή μονοδιάστατη ιστροπική.
- Το ρευστό που χρησιμοποιούμε είναι ομοιογενές στη φύση. Το ποσό της μάζας λόγω συμπυκνωμένης φάσης (στερεό / υγρό) είναι αμελητέο.
- Μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος των ιδανικών αερίων με σταθερή ειδική θερμότητα.
- Ομοιόμορφη ροή, δηλαδή πίεση, θερμοκρασία και πυκνότητα, στην είσοδο του ακροφυσίου.
- Η ταχύτητα στην είσοδο του ακροφυσίου είναι αμελητέα σε σύγκριση με την τιμή της στην έξοδο.
- Το αέριο αφήνει την έξοδο του ακροφυσίου μόνο κατά την αξονική διεύθυνση.

Αν υποθέσουμε ότι η συνολική πίεση στον θάλαμο είναι η ίδια με τη συνολική πίεση εξόδου του ακροφυσίου τότε η ταχύτητα εξόδου μπορεί να ληφθεί ως εξής:

$$V_e = M_e \sqrt{\gamma R T_e} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (5.1)$$

Όπου

- $M_e$  είναι ο αριθμός Mach στην έξοδο

$$M_e = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_{t2}}{P_e} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (5.2)$$



- $\gamma$  είναι η ειδική αναλογία θερμότητας
- $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά αερίου
- $T_e$  είναι η θερμοκρασία στην έξοδο

### 5.3 Μαζική παροχή ακροφυσίου (Mass Flow Rate)

Η μαζική παροχή για ένα ακροφύσιο συγκλίνον αποκλίνον υπό σταθερή κατάσταση εξαρτάται από την πίεση, τη θερμοκρασία του θαλάμου καύσης και επιφάνεια εγκάρσιας διατομής. Δεδομένου ότι η ροή είναι ισεντροπική στη φύση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ισοτροπική σχέση για πυκνότητα ως προς την πίεση, την εξίσωση της συνέχειας και το νόμο των ιδανικών αερίων. Έτσι καταλήγουμε στη σχέση:

$$\dot{m} = \frac{A_t P_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{-\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (kg/s) \quad (5.3)$$

Όπου

$A_t$  είναι το εμβαδόν της διατομής στο λαιμό

$P_t$  είναι η συνολική πίεση

$$\frac{P_e}{P_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \quad (5.4)$$

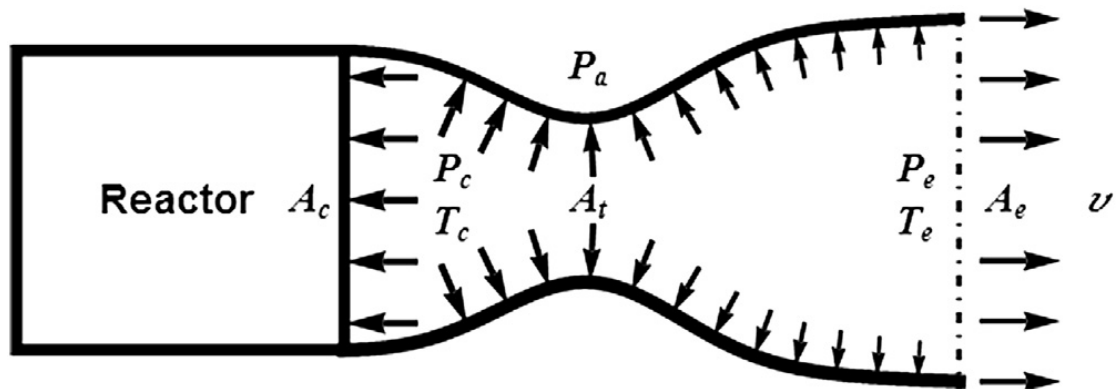
$T_t$  είναι η συνολική θερμοκρασία

$$\frac{T_e}{T_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)^{-1} \quad (5.5)$$

Η περιοχή του λαιμού του ακροφυσίου,  $A_t$ , μπορεί να βρεθεί εάν είναι γνωστή η συνολική μαζική παροχή του προωθητικού και έχουν επιλεγεί τα προωθητικά και οι συνθήκες λειτουργίας. Υποθέτοντας την τέλεια θεωρία περί φυσικού αερίου, έχουμε

$$A_t = \frac{\dot{m}}{P_t} \sqrt{\frac{RT_t}{M\gamma}} \quad (m^2) \quad (5.6)$$

$M$  είναι το μέσο μοριακό βάρος των καυσαερίων



Εικόνα 34: Οι φορές των πιέσεων και ταχυτήτων. (William Emrich, Jr)

Όπου  $P_c$  είναι η πίεση από τον αντιδραστήρα και το  $T_c$  είναι η θερμοκρασία του αντιδραστήρα. Η περιοχή εξόδου του ακροφυσίου,  $A_e$ , αντιστοιχεί στον αριθμό Mach εξόδου.

#### 5.4 Επιλογή σχήματος ακροφυσίου

Κατά τη διάρκεια εκτόξευσης ενός πυραύλου (ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια) όπου η πίεση περιβάλλοντος ποικίλλει κατά την περίοδο καύσης, εκτελούνται ρυθμίσεις τροχιάς για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πίεσης εξόδου. Ωστόσο, ένας επιπλέον περιορισμός είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος για ακροφυσίου, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις είναι περιοριστικό. Για διαστημικούς κινητήρες, όπου η πίεση περιβάλλοντος είναι μηδενική, η ώθηση αυξάνεται πάντα καθώς αυξάνεται ο λόγος επέκτασης του ακροφυσίου. Σε αυτούς τους κινητήρες, ο λόγος επέκτασης των ακροφυσίων γενικά αυξάνεται έως ότου το επιπλέον βάρος του μεγαλύτερου ακροφυσίου απαιτεί περισσότερη απόδοση από την επιπλέον ώθηση που παράγει.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα ροής των αερίων στο συγκλίνον τμήμα του ακροφυσίου πυραύλου είναι σχετικά χαμηλή, οποιοδήποτε λείο και στρογγυλεμένο τμήμα συγκλίνοντος ακροφυσίου θα έχει πολύ χαμηλές απώλειες ενέργειας. Αντίθετα, το περίγραμμα του τμήματος αποκλίνοντος ακροφυσίου είναι πολύ σημαντικό για την απόδοση, λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων ροής που εμπλέκονται.

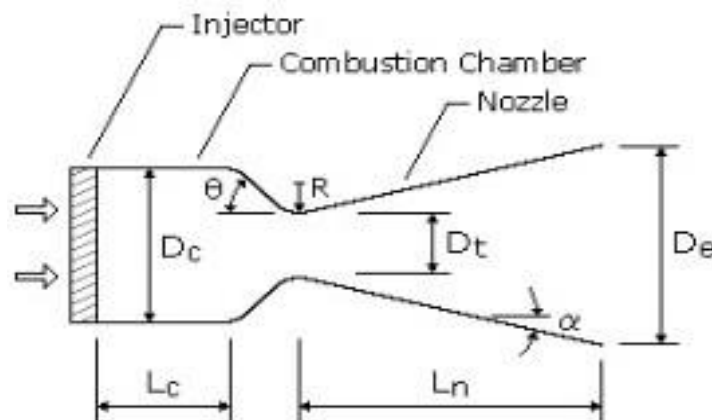
Η επιλογή ενός βέλτιστου σχήματος ακροφυσίου για μια δεδομένη αναλογία επέκτασης επηρεάζεται γενικά από τους ακόλουθους σχεδιαστικούς λόγους και στόχους:

- Από την ομοιόμορφη, παράλληλη και αξονική ροή αερίου στην έξοδο ακροφυσίου για μέγιστη ορμή.
- Από τις ελάχιστες απώλειες διαχωρισμού και στροβιλισμού εντός του ακροφυσίου.

- Από το συντομότερο δυνατό μήκος του ακροφυσίου για ελάχιστο χώρο, βάρος, απώλειες τριβής τοίχου και απαιτήσεις ψύξης.
- Από την ευκολία κατασκευής.

### 5.5 Τύποι ακροφυσίων

**Κωνικό ακροφύσιο:** Χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές πρώιμων πυραυλοκινητήρων. Το κωνικό ακροφύσιο, αποδείχθηκε ικανοποιητικό στις περισσότερες εφαρμογές. Ένα κωνικό ακροφύσιο επιτρέπει την ευκολία κατασκευής και την ευελιξία στη μετατροπή ενός υπάρχοντος σχεδίου σε υψηλότερο ή χαμηλότερο λόγο επέκτασης χωρίς μείζονα επανασχεδιασμό.



Εικόνα 35: Κωνικό ακροφύσιο. (braeunig.us)

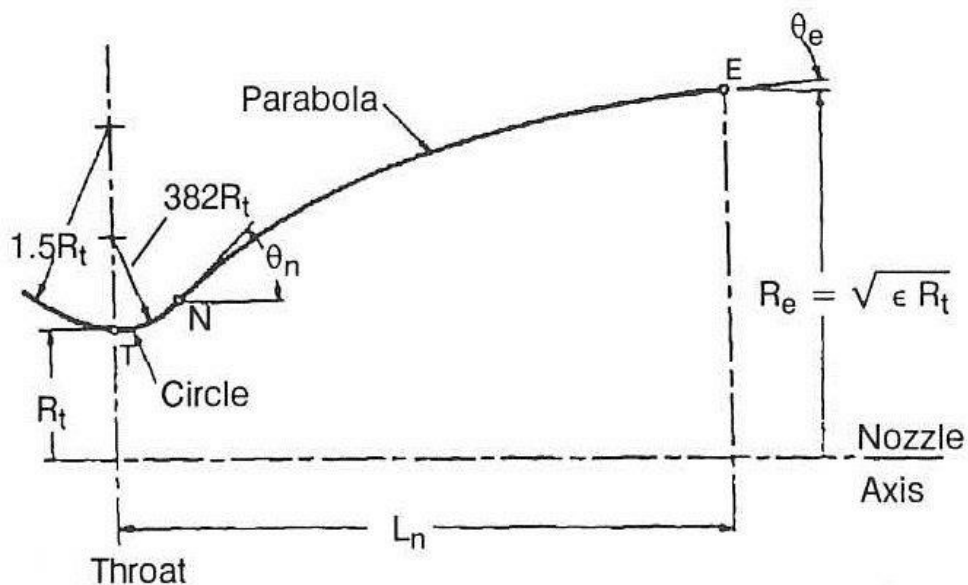
Στο σχήμα φαίνεται η διαμόρφωση ενός τυπικού κωνικού ακροφυσίου. Το τμήμα του ακροφυσίου έχει το περίγραμμα ενός κυκλικού τόξου με ακτίνα  $R$ , που κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 φορές τη διάμετρο του λαιμού,  $D_t$ . Η μισή γωνία του συγκλίνοντος κώνου ( $\theta$ ), μπορεί να κυμαίνεται από 20 έως 45 μοίρες. Η αποκλίνουσα κωνική μισή γωνία ( $\alpha$ ), κυμαίνεται από περίπου 12 έως 18 μοίρες. Το κωνικό ακροφύσιο με αποκλίνουσα μισή γωνία 15 μοιρών έχει γίνει σχεδόν ένα πρότυπο, διότι είναι ένας καλός συμβιβασμός με βάση το βάρος, το μήκος και την απόδοση.

Δεδομένου ότι υπάρχουν απώλειες απόδοσης σε ένα κωνικό ακροφύσιο και αυτό είναι αποτέλεσμα της μη αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας των καυσαερίων. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόζεται ένας διορθωτικός συντελεστής, για τον υπολογισμό της ορμής εξόδου-αερίου. Αυτός ο παράγοντας (απόδοση ώθησης) που συμβολίζεται με  $\lambda$  είναι η σχέση μεταξύ της ορμής εξόδου αερίου του κωνικού ακροφυσίου και ενός ιδανικού ακροφυσίου με ομοιόμορφη, παράλληλη, αξονική ροή αερίου.

$$\lambda = \frac{1 + \cos\alpha}{2} \quad (5.7)$$

**Ακροφύσιο καμπάνας:** Για να αποκτήσουν υψηλότερη απόδοση και μικρότερο μήκος, οι μηχανικοί ανέπτυξαν το ακροφύσιο σχήματος καμπάνας. Χρησιμοποιεί ένα τμήμα γρήγορης επέκτασης (ακτινική ροή) στην αρχική αποκλίνουσα περιοχή, το οποίο οδηγεί σε μια ομοιόμορφη, αξονικά κατευθυνόμενη ροή στην έξοδο του ακροφυσίου. Το περίγραμμα τοίχου αλλάζει σταδιακά για να αποτρέψει τις λοξές κρούσεις.

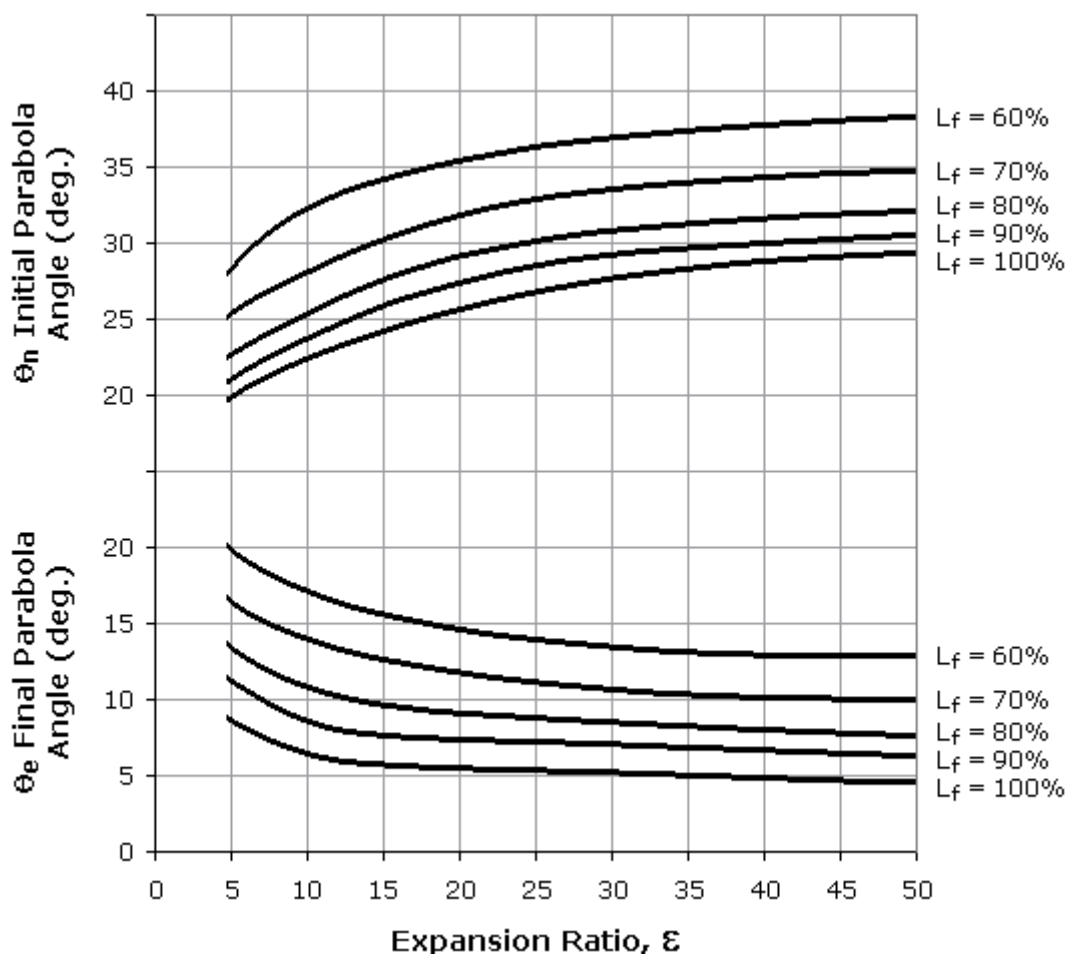
Το ιδανικό μήκος ενός ακροφυσίου καμπάνας είναι 80% (απόσταση μεταξύ του λαιμού και του επιπέδου εξόδου), ισοδυναμο με ενός κωνικού ακροφυσίου μισής γωνίας 15 μοιρών που έχει την ίδια περιοχή λαιμού, ακτίνα κάτω από το λαιμό και αναλογία επέκτασης περιοχής. Τα μήκη των ακροφυσίων άνω του 80% δεν συμβάλλουν σημαντικά στην απόδοση, ειδικά όταν λαμβάνονται υπόψη οι κυρώσεις βάρους. Ωστόσο, μήκη ακροφυσίου έως 100% μπορεί να είναι το βέλτιστο για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή απόδοση.



Εικόνα 36: Ακροφύσιο καμπάνας. (braeunig.us)

Η διαμόρφωση σχεδιασμού ενός ακροφυσίου καμπάνας φαίνεται στο σχήμα. Το περίγραμμα του ακροφυσίου αμέσως πριν από το λαιμό  $T$  είναι κυκλικό τόξο με ακτίνα  $1,5 R_t$ . Το περίγραμμα του ακροφυσίου αποκλίνουσας διατομής αποτελείται από ένα κυκλικό τμήμα εισόδου με ακτίνα  $0,382 R_t$  από το λαιμό  $T$  έως το σημείο  $N$  και παραβολή από εκεί μέχρι την έξοδο  $E$ .

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου ακροφυσίου απαιτεί κάποια κατάλληλα δεδομένα. Τη διάμετρο λαιμού  $D_t$ , το αξονικό μήκος του ακροφυσίου από το λαιμό έως το επίπεδο εξόδου  $L_n$  (ή το επιθυμητό κλασματικό μήκος,  $L_f$ , με βάση ένα κωνικό ακροφύσιο 15 μοιρών), την αναλογία επέκτασης, την αρχική γωνία τοιχώματος της παραβολής  $\theta_n$ , και γωνία τοίχου εξόδου ακροφυσίου  $\theta_e$ . Το βέλτιστο περίγραμμα ακροφυσίων μπορεί να προσεγγιστεί με ακρίβεια επιλέγοντας τις κατάλληλες εισόδους.



Εικόνα 37: Οι γωνίες  $\theta_n$  και  $\theta_e$  ως προς το επιθυμητό μήκος  $L_f$ . (braeunig.us)

## 6. Ελλειπτικές τροχιές

Πολλοί επιστήμονες παρακολούθησαν την κίνηση των πλανητών γύρω από τον ήλιο και διατύπωσαν τις θεωρίες τους. Ο Κοπέρνικος, ο Κέπλερ ο Γαλιλαίος και ο Νεύτωνας απέδειξαν ένα δικό τους μοντέλο για να περιγράψουν γιατί και πώς κινούνται οι πλανήτες μας.

Στο ηλιακό μας σύστημα, οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον Ήλιο σε τροχιές που δεν είναι κυκλικές, αλλά ελλειπτικές. Τα τροχιακά χαρακτηριστικά, όπως το σχήμα, η περίοδος

και η ταχύτητα, μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τρεις θεμελιώδεις νόμους της πλανητικής κίνησης, που δημοσιεύθηκαν από τον Γερμανό μαθηματικό και αστρονόμο Γιοχάνες Κέπλερ στις αρχές του 17ου αιώνα. Στην πραγματικότητα, είναι το έργο του Κέπλερ που βοήθησε στο άνοιγμα του δρόμου για τον νόμο της καθολικής βαρύτητας του Ισαάκ Νεύτωνα, που θεσπίστηκε στα τέλη του 17ου αιώνα. Οι νόμοι της πλανητικής κίνησης του Kepler είναι μερικές από τις πιο σημαντικές έννοιες στην τροχιακή μηχανική.

### 6.1 Οι τρεις νόμοι του Κέπλερ:

-Τα ουράνια σώματα κινούνται σε τροχιές που είναι κωνικά τμήματα. Οι κλειστές τροχιές, όπως αυτές των πλανητών που κινούνται γύρω από τον Ήλιο, είναι ελλείψεις, με τον Ήλιο σε μια από τις εστίες.

- Εάν δύο σώματα περιστρέφονται το ένα γύρω από το άλλο υπό την επίδραση μιας κεντρικής δύναμης, μια γραμμή που τους συνδέει σαρώνει ίσες περιοχές στο τροχιακό επίπεδο σε ίσα χρονικά διαστήματα.

- Εάν δύο σώματα περιστρέφονται αμοιβαία το ένα για το άλλο, το άθροισμα των μαζών τους επί το τετράγωνο της περιόδου είναι ανάλογο με τον κύβο του ημι-μεγάλου άξονα της σχετικής τροχιάς του ενός για το άλλο.

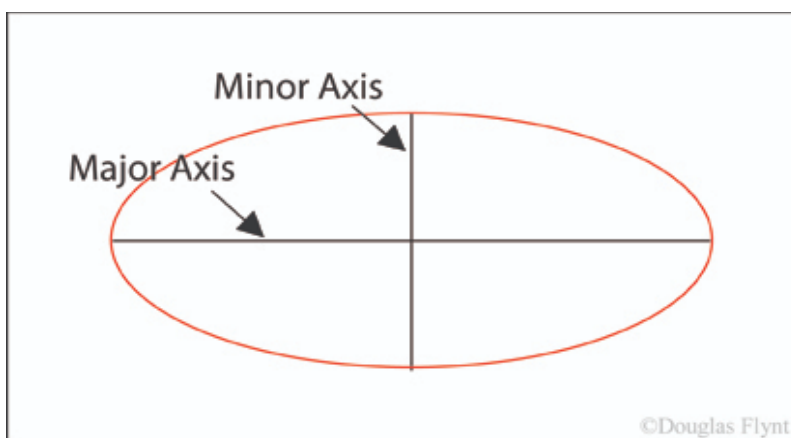
### 6.2 Τροχιακά στοιχεία

Για να περιγράψουμε μαθηματικά μια τροχιά πρέπει να ορίσουμε έξι ποσότητες, που ονομάζονται τροχιακά στοιχεία. Αυτά είναι:

- Semi-Major Axis,  $a$
- Εκκεντρότητα,  $e$
- Κλίση,  $i$
- Periapsis, apoapsis
- Περίοδος,  $T$
- Γεωγραφικό μήκος ανερχόμενου κόμβου,

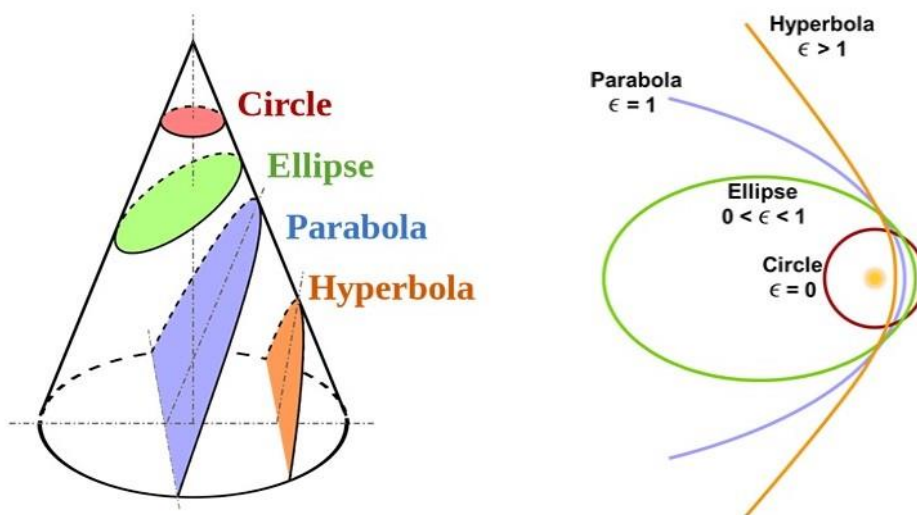
Ένας δορυφόρος σε τροχιά ακολουθεί ένα σχήμα γνωστό ως έλλειψη με το σώμα να βρίσκεται σε τροχιά, που ονομάζεται πρωτεύουσα, και βρίσκεται σε ένα από τα δύο σημεία που ονομάζονται εστίες. Οι μακρύτερες και βραχύτερες γραμμές που μπορούν να τραβηχτούν μέσω του κέντρου μιας έλλειψης ονομάζονται ο κύριος άξονας και ο δευτερεύων

άξονας, αντίστοιχα. Ο **semi-major άξονας** είναι το μισό του **major άξονα** και αντιπροσωπεύει τη μέση απόσταση ενός δορυφόρου από τον πρωτεύοντα.



Εικόνα 38: Οι δύο άξονες μιας έλλειψης. (Douglas Flynt)

Ένα κωνικό τμήμα είναι μια καμπύλη που λαμβάνεται με τομή ενός κώνου με ένα επίπεδο. Παραδείγματα κωνικών τομών περιλαμβάνουν κύκλους, ελλείψεις, παραβολές και υπερβολές. Σύμφωνα με τον Πρώτο Νόμο του Κέπλερ, οι πλανήτες στο ηλιακό μας σύστημα κινούνται γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτικές τροχιές. Το σχήμα μιας τροχιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την **εκκεντρότητά** του ( $e$ ). Για αναφορά, η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο έχει εκκεντρότητα 0,0167, πράγμα που σημαίνει ότι είναι σχεδόν κυκλική.



Εικόνα 39: Ο διαχωρισμός των τροχιών με κριτήριο την εκκεντρότητα. (edx)

Η **Periapsis** είναι το σημείο σε τροχιά πλησιέστερα στον πλανήτη- δορυφόρο (σώμα). Το αντίθετο της periapsis, το πιο απομακρυσμένο σημείο σε τροχιά, ονομάζεται apoapsis. Η

Periapsis και η apoapsis συνήθως τροποποιούνται για να εφαρμόζονται στο σώμα που βρίσκεται σε τροχιά, όπως το perihelion και το arhelion για τον Ήλιο, το perigee και το arogee για τη Γη, το perijove και το arojove για τον Δία, τον perilune και arolune για τη Σελήνη κ.λπ. Ο Δεύτερος Νόμος του Κέπλερ υπονοεί ότι οι πλανήτες στο ηλιακό σύστημα κινούνται με μεταβλητές ταχύτητες στις τροχιές τους, γρηγορότερα όταν πλησιάζουν στον Ήλιο και πιο αργά όταν βρίσκονται πιο μακριά.

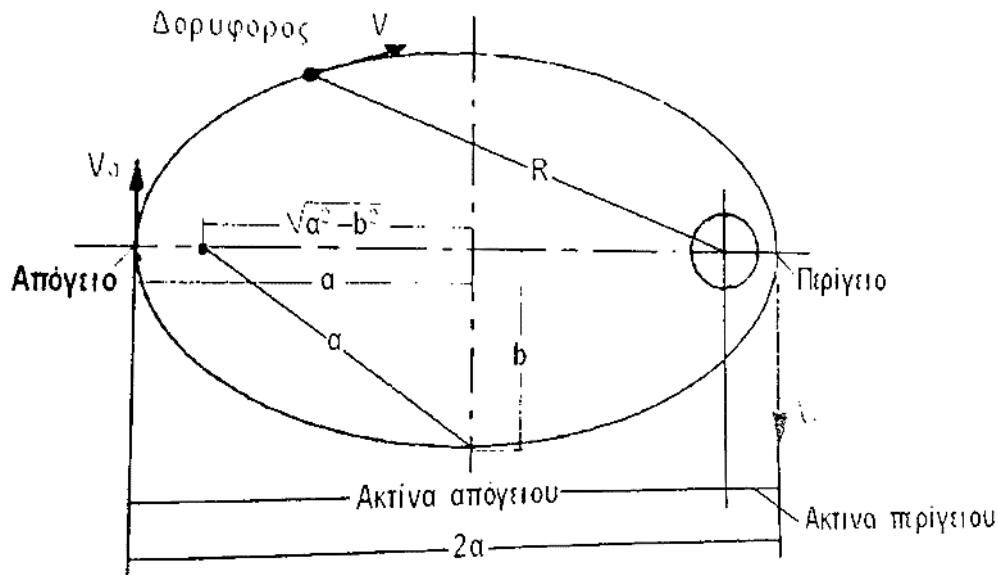


Figure 2: (Πολυζάκης)

$$V = \sqrt{\mu \frac{2}{r} - \frac{1}{a}} \quad (\text{m/s}) \quad (6.1)$$

Όπου:

V είναι η ταχύτητα του σώματος στην ελλειπτική τροχιά

a είναι ο κύριος άξονας της έλλειψης

r είναι η στιγμιαία ακτίνα από το κέντρο της Γης

μ είναι η σταθερά της βαρύτητας (GM)

Η εκκεντρότητα βρίσκεται

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}} \quad (6.2)$$

V<sub>b</sub> η ταχύτητα όταν το σώμα βρίσκεται πλησιέστερα στο periapsis



$$V_b = \sqrt{\frac{\mu(1+e)}{a(1-e)}} \quad (6.3)$$

$V_\alpha$  η ταχύτητα όταν το σώμα βρίσκεται πλησιέστερα στο apoapsis

$$V_\alpha = \sqrt{\frac{\mu(1-e)}{a(1+e)}} \quad (6.4)$$

Για να βρούμε την περίοδο της ελλειπτικής τροχιάς χρησιμοποιούμε το δεύτερο νόμο του Κέπλερ

$$T = \frac{2\pi}{\mu^2} \left( \frac{h}{\sqrt{1-e^2}} \right)^3 \quad (s) \quad (6.5)$$

Η παράμετρος  $h$  ισούται με  $h = \sqrt{\mu a(1-e^2)}$  σε  $m/s^2$  (6.6)

Η ακτίνα της periapsis ισούται με

$$r_p = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{1+e} \quad (6.7)$$

Η ακτίνα της apoapsis ισούται με

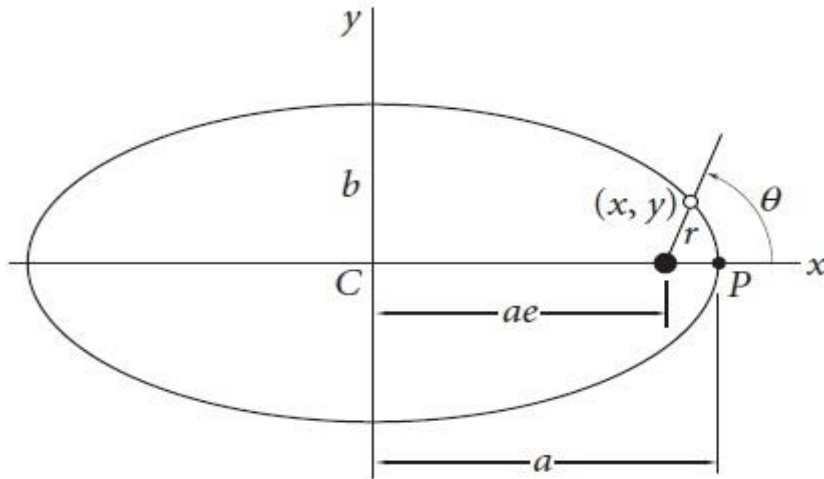
$$r_a = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{1-e} \quad (6.8)$$

Ο semi-major άξονας ισούται με

$$a = \frac{r_p + r_a}{2} \quad (6.9)$$

Η μέση ακτίνα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ισούται

$$r_\theta = \sqrt{r_p r_a} \quad (6.10)$$



Εικόνα 40: Καρτεσιανή συντεταγμένη που περιγράφει την τροχιά. (Howard D. Curtis)

$$r_{\theta} = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{1 + e \cos \theta} \quad (6.11)$$

Για να βρούμε την ταχύτητα του δορυφόρου θα πρέπει να υπολογίσουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας

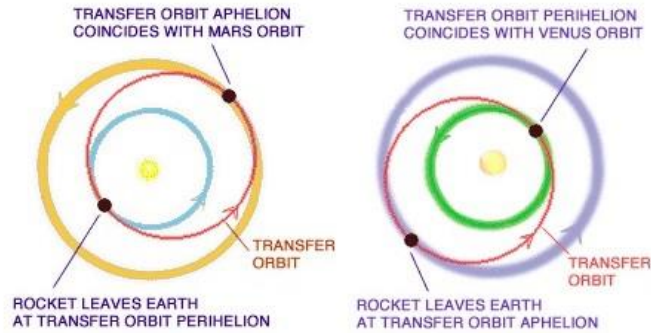
$$u_{\perp} = \frac{h}{r_{\theta}} \quad (6.12)$$

$$u_r = \frac{\mu}{h} e \sin \theta \quad (6.13)$$

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_{\perp}^2} \quad (6.14)$$

### 6.3 Μεταφορά Hohmann

Μια στιγμιαία αλλαγή στην ταχύτητα μπορεί να αλλάξει την τροχιά ενός διαστημικού σκάφους από μια κυκλική τροχιά σε ελλειπτική. Ωστόσο, αυτός ο ελιγμός από μόνος του δεν αρκεί για να αλλάξει το τροχιακό υψόμετρο, καθώς το διαστημικό σκάφος τελικά θα επιστρέψει στο αρχικό σημείο όπου συνέβη η αλλαγή στην ταχύτητα. Αυτό γίνεται εκτελώντας μια **μεταφορά Hohmann**. Η μεταφορά Hohmann χρησιμοποιεί δύο αλλαγές ταχύτητας σε διαφορετικές τοποθεσίες για να μετακινήσει ένα διαστημικό σκάφος μεταξύ δύο κυκλικών τροχιών διαφορετικών μεγεθών.



Εικόνα 41: Μεταφορά Hohmann. (edx)

Οι τροχιές μεταφοράς Hohmann είναι διαπλανητικές τροχιές των οποίων το πλεονέκτημα είναι ότι καταναλώνουν τη μικρότερη δυνατή ποσότητα προωθητικού. Μια τροχιά μεταφοράς Hohmann σε έναν εξωτερικό πλανήτη, όπως ο Άρης, επιτυγχάνεται με την εκτόξευση ενός διαστημικού σκάφους και την επιτάχυνσή του προς την κατεύθυνση της περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο έως ότου απελευθερωθεί από τη γήινη βαρύτητα και φτάσει σε μια ταχύτητα που το τοποθετεί σε μια ηλιακή τροχιά με αφήλιο ίσο με την τροχιά του εξωτερικού πλανήτη. Μόλις φτάσει στον προορισμό του, το διαστημόπλοιο πρέπει να επιβραδυνθεί, έτσι ώστε η βαρύτητα του πλανήτη να μπορέσει να το βάλει σε μια πλανητική τροχιά.

Για να στείλουμε ένα διαστημόπλοιο σε έναν εσωτερικό πλανήτη, όπως η Αφροδίτη, το διαστημόπλοιο εκτοξεύεται και επιταχύνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση της περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο μέχρι να επιτύχει μια ηλιακή τροχιά με περιήλιο ίσο με την τροχιά του εσωτερικού πλανήτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι το διαστημόπλοιο συνεχίζει να κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τη Γη, μόνο πιο αργά.

Το  $\Delta V$  που απαιτείται για τη μεταφορά Hohmann μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left( \sqrt{\frac{2r_2}{r_1 + r_2}} - 1 \right) \quad (6.15)$$

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} \left( 1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1 + r_2}} \right) \quad (6.16)$$

$$\Delta V_{total} = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad (6.17)$$

Είτε μετακινείστε σε μια υψηλότερη ή χαμηλότερη τροχιά, από τον τρίτο νόμο του Κέπλερ, ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταφορά μεταξύ των τροχιών είναι:

$$t_H = \pi \sqrt{\frac{(r_1 + r_2)^3}{8\mu}} \quad (6.18)$$

Κατά την εφαρμογή του ταξιδιού από ένα ουράνιο σώμα σε άλλο, είναι σημαντικό να ξεκινήσουν ελιγμοί τη στιγμή που τα δύο σώματα είναι σωστά ευθυγραμμισμένα. Λαμβάνοντας υπόψη την γωνιακή ταχύτητα στόχου:

$$\omega = \sqrt{\frac{\mu}{r_2^3}} \quad (6.19)$$

Η εκτόξευση ενός δορυφορικού ή διαστημικού οχήματος αποτελείται από μια περίοδο πτήσης με κινητήρα κατά τη διάρκεια της οποίας το όχημα ανυψώνεται πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης και επιταχύνεται σε τροχιακή ταχύτητα από έναν πύραυλο, ή εκτοξεύει όχημα. Η πτήση ολοκληρώνεται κατά την εξάντληση του τελευταίου σταδίου του πυραύλου κατά το οποίο το όχημα ξεκινά την ελεύθερη πτήση του (**burnout**). Κατά τη διάρκεια της ελεύθερης πτήσης, το διαστημικό όχημα θεωρείται ότι υπόκειται μόνο στη βαρυτική έλξη της Γης. Εάν το όχημα κινείται μακριά από τη Γη, η τροχιά του μπορεί να επηρεαστεί από τη βαρυτική επίδραση του ήλιου, του φεγγαριού ή άλλου πλανήτη.

Η θέση και η ταχύτητα ενός οχήματος μπορούν να περιγράφουν από τις μεταβλητές  $r$ ,  $v$  και, όπου  $r$  είναι η απόσταση του οχήματος από το κέντρο της Γης, το  $v$  είναι η ταχύτητά του και  $\gamma$  είναι η γωνία μεταξύ της θέσης και των διανυσμάτων ταχύτητας, που ονομάζεται zenith γωνία.

$$V_1 r_1 \sin\gamma_1 = V_2 r_2 \sin\gamma_2 \quad (6.20)$$

Στην periapsis η ταχύτητα θα είναι:

$$V_p = \frac{r_1 V_1 \sin\gamma_1}{r_p} \quad (6.21)$$

$$K = \frac{2GM}{r_1 V_1^2} \quad (6.22)$$

Το  $K$  είναι μια μη διαστατική παράμετρος της τροχιάς

Για να βρούμε τις ακτίνες  $r_p$  και  $r_a$

$$\frac{r_p}{r_a} = \frac{-K \pm \sqrt{K^2 - 4(1-K)(-\sin^2\gamma_1)}}{2(1-K)} \quad (6.23)$$

Βρίσκουμε δυο τιμές. Η μικρότερη τιμή είναι periapsis και η μεγαλύτερη η apoapsis.

## 6.4 Τύποι τροχιών

Οι **γεωσύγχρονες τροχιές (GEO)** είναι κυκλικές τροχιές γύρω από τη Γη με περίοδο 24 ωρών. Μια γεωσύγχρονη τροχιά με κλίση μηδέν μοιρών ονομάζεται γεωστατική τροχιά. Ένα διαστημόπλοιο σε μια γεωστατική τροχιά φαίνεται να κρέμεται ακίνητο πάνω από μια θέση στον ισημερινό της Γης. Για το λόγο αυτό, είναι ιδανικοί για ορισμένους τύπους επικοινωνιακών και μετεωρολογικών δορυφόρων. Για να επιτευχθεί γεωσύγχρονη τροχιά, ένα διαστημικό σκάφος εκτοξεύεται αρχικά σε μια ελλειπτική τροχιά με απόγειο 35.786 km που ονομάζεται τροχιά γεωσύγχρονης μεταφοράς (GTO).

Οι **πολικές τροχιές (PO)** είναι τροχιές με κλίση 90 μοιρών. Οι πολικές τροχιές είναι χρήσιμες για δορυφόρους που εκτελούν εργασίες χαρτογράφησης και/ή επιτήρησης, επειδή καθώς ο πλανήτης περιστρέφεται, το διαστημόπλοιο έχει πρόσβαση σχεδόν σε κάθε σημείο στην επιφάνεια του πλανήτη.

**Περιπατητικές τροχιές:** Ένας δορυφόρος σε τροχιά υπόκειται σε πολλές βαρυτικές επιρροές. Πρώτον, οι πλανήτες δεν είναι τέλεια σφαιρικοί και έχουν ελαφρώς ανομοιόμορφη κατανομή μάζας. Αυτές οι διακυμάνσεις έχουν επίδραση στην τροχιά ενός διαστημικού σκάφους. Επίσης, ο ήλιος, η σελήνη και οι πλανήτες συμβάλλουν σε μια βαρυτική επίδραση σε έναν δορυφόρο που βρίσκεται σε τροχιά. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό είναι δυνατό να σχεδιαστεί μια τροχιά που εκμεταλλεύεται αυτές τις επιρροές για να προκαλέσει μια μετάπτωση στο τροχιακό επίπεδο του δορυφόρου.

Οι **σύγχρονες τροχιές του ήλιου (SSO)** είναι περιπατητικές τροχιές των οποίων το τροχιακό επίπεδο προχωρά με την ίδια περίοδο με την περίοδο ηλιακής τροχιάς του πλανήτη. Σε μια τέτοια τροχιά, ένας δορυφόρος διασχίζει την periapsis περίπου την ίδια τοπική ώρα κάθε τροχιά. Αυτό είναι χρήσιμο εάν ένας δορυφόρος μεταφέρει όργανα που εξαρτώνται από μια συγκεκριμένη γωνία ηλιακού φωτισμού στην επιφάνεια του πλανήτη. Προκειμένου να διατηρηθεί ένας ακριβής σύγχρονος χρονισμός, μπορεί να είναι απαραίτητο να διεξάγονται περιστασιακά προωθητικοί ελιγμοί για τη ρύθμιση της τροχιάς. Σε μια τέτοια τροχιά θα βρεθεί το διαστημικό τηλεσκόπιο James Webb.

Οι **τροχιές Molniya** είναι άκρως έκκεντρες γήινες τροχιές με περιόδους περίπου 12 ωρών (2 περιστροφές την ημέρα). Η τροχιακή κλίση επιλέγεται έτσι ώστε ο ρυθμός μεταβολής του περιγείου να είναι μηδέν, επομένως τόσο το απόγειο όσο και το περίγειο μπορούν να διατηρηθούν σε σταθερά γεωγραφικά πλάτη. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται σε κλίσεις 63,4 μοιρών και 116,6 μοιρών. Για αυτές τις τροχιές το όριο του περιγείου τοποθετείται συνήθως στο νότιο ημισφαίριο, έτσι ο δορυφόρος παραμένει πάνω από το βόρειο ημισφαίριο κοντά στο απόγειο για περίπου 11 ώρες ανά τροχιά. Αυτός ο προσανατολισμός μπορεί να παρέχει καλή κάλυψη εδάφους σε μεγάλα βόρεια γεωγραφικά πλάτη.

## 6.5 Η σκοπιμότητα της τοποθεσίας εκτόξευσης

Κάθε δύναμη που δεν κατευθύνεται κατά μήκος της κατεύθυνσης κίνησης, ή τουλάχιστον παράλληλα σε αυτό, μπορεί να είναι είτε προς την ίδια κατεύθυνση είτε αντίθετα, μεταγενέστερη ή οπισθοδρομική, αλλά οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση, θα κάνει κάτι στην τροχιά. Θα αλλάξει την τροχιά, αλλά δεν θα αλλάξει την ενέργειά της. Και ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα που μπορούμε να κάνουμε είναι να αλλάξουμε την κλίση της ταχύτητας τροχιάς, ιδανικά σε 90 μοίρες.

Για τη Γη, χρησιμοποιούμε τον ισημερινό ως σημείο αναφοράς. Αν μια τροχιά είναι ακριβώς πάνω από τον ισημερινό τότε η κλίση της είναι μηδέν. Στο βόρειο και νότιο σημείο έχουμε κλίση 45 μοιρών. Και αν πηγαίνει ακριβώς πάνω από τους πόλους, τότε έχουμε κλίση 90 μοιρών.

Για να μπορέσουμε να βάλουμε ένα διαστημόπλοιο σε τροχιά με τη Γη, πρέπει να εκτοξευτεί σε υψόμετρο πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης και να επιταχυνθεί μέχρι την τροχιακή ταχύτητα. Η πιο ενεργειακά αποδοτική τροχιά, δηλαδή αυτή που απαιτεί τη λιγότερη ποσότητα προωθητικού, είναι μια άμεση τροχιά χαμηλής κλίσης. Για να επιτευχθεί μια τέτοια τροχιά, ένα διαστημόπλοιο εκτοξεύεται με κατεύθυνση προς τα ανατολικά από μια τοποθεσία κοντά στον ισημερινό της Γης. Το πλεονέκτημα είναι ότι η ταχύτητα περιστροφής της Γης συμβάλλει στην τελική τροχιακή ταχύτητα του διαστημικού σκάφους. Η εκτόξευση ενός διαστημικού σκάφους σε κατεύθυνση διαφορετική από την ανατολή, ή από τοποθεσία μακριά από τον ισημερινό, οδηγεί σε τροχιά υψηλότερης κλίσης. Οι τροχιές υψηλής κλίσης είναι λιγότερο ικανές να επωφεληθούν από την αρχική ταχύτητα που παρέχεται από την περιστροφή της Γης, επομένως το όχημα εκτόξευσης πρέπει να παρέχει μεγαλύτερο μέρος ή όλη την ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη της τροχιακής ταχύτητας. Αν και οι τροχιές υψηλής κλίσης είναι λιγότερο ενεργειακά αποδοτικές, έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τροχιές του Ισημερινού για ορισμένες εφαρμογές.

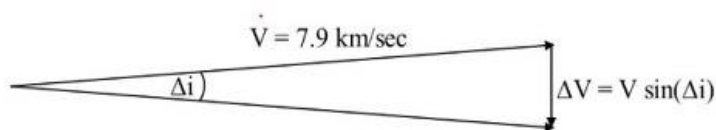
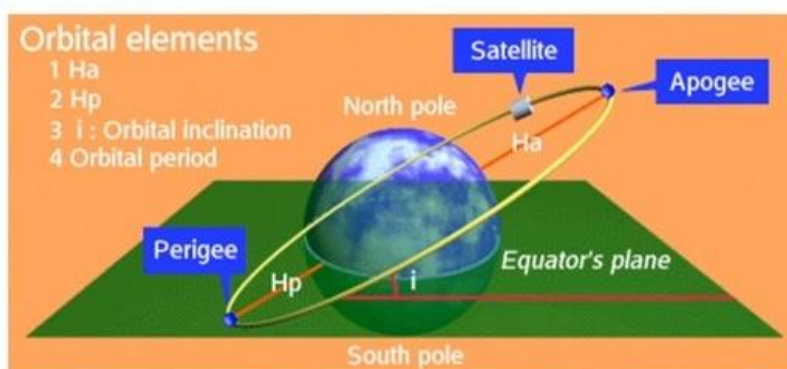


Figure 3: (edx)

$$\Delta i = 1^\circ$$
$$\Delta V = 135 \text{ m/sec}$$

Shuttle Orbital Maneuvering System  
Total Propellant ~ 10,000 kg  
Total  $\Delta V$  ~ 300 m/sec

$$\Delta i = 30^\circ$$
$$\Delta V = 3.7 \text{ km/sec}$$

44

Η τροχιακή ταχύτητα κοντά στη Γη είναι περίπου 7,9 km/s. Αν θέλουμε να αλλάξουμε με μια συγκεκριμένη γωνία  $\Delta i$  τότε από την τριγωνομετρία υπολογίζουμε το  $\Delta V$ . Αυτό πρακτικά δεν είναι δυνατό γιατί αν υποθέταμε ότι έστω αλλάζαμε την κλίση κατά 1 μοίρα έχοντας περίπου 10 τόνους προωθητικό το οποίο θα μπορούσαμε χρησιμοποιήσουμε μόλις μπαίναμε σε τροχιά τότε θα είχαμε μια τιμή για το  $\Delta V$  300 m/s. Έτσι, ακόμη και αυτή η μικρή αλλαγή της κλίσης κατά ένα βαθμό χρειάστηκε σχεδόν το μισό του συνολικού προωθητικού. Δεν μπορούμε να κάνουμε μια τέτοια αλλαγή χωρίς τη χρήση τεράστιας ποσότητας προωθητικού πόσο μάλλον για μια κλίση 30 μοιρών.

Καθώς η Γη περιστρέφεται και οι δορυφόροι πηγαίνουν με τον ίδιο ρυθμό περιστροφής με τη Γη, φαίνονται να είναι ακίνητοι πάνω από ένα σημείο στη Γη. Αλλά ξεκινάμε από διάφορα μέρη σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, πολλές πτήσεις βγαίνουν από το Cape Canaveral. Στη Ρωσία, βγαίνουν από το Καζακστάν, Μπαϊκονούρ, οι Ευρωπαίοι από το Κουρού της Γαλλικής Γουιάνας.

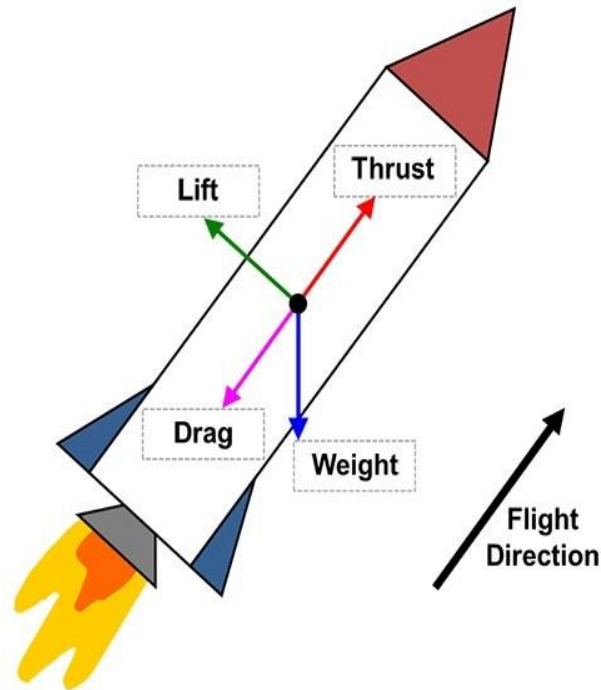
Γεδομένου ότι το Cape Canaveral βρίσκεται περίπου 28,5 μοίρες πάνω από τον ισημερινό, η ώθηση που έχει ένας πύραυλος είναι λίγο μικρότερη από την ταχύτητα περιστροφής της Γης ακριβώς στον ισημερινό. Αυτή η ώθηση καταλήγει να είναι περίπου 1.471 km / h, σύμφωνα με τη NASA. Το διαστημικό σκάφος SpaceX Crew Dragon, που εκτοξεύτηκε από έναν πύραυλο Falcon 9, πρέπει να φτάσει περίπου τα 27.000 km / h όταν εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης.

## 6.6 Τα αποτελέσματα της άντωσης και της ατμοσφαιρικής οπισθέλκουσας

Μέχρι στιγμής, εξετάσαμε την περίπτωση της προώθησης πυραύλων στον ελεύθερο χώρο. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, τα αποτελέσματα της βαρύτητας και της ατμοσφαιρικής οπισθέλκουσας παίζουν σημαντικό ρόλο και καθιστούν πιο δύσκολη την εκτόξευσή τους στο διάστημα. Όταν εκτοξεύουμε πυραύλους από τη Γη δεν πετάμε σε ελεύθερο χώρο, τουλάχιστον όχι στην αρχή. Πρέπει να διανύσουν την ατμόσφαιρα της Γης και φυσικά πρέπει να πετάξουν μέσα από το πεδίο βαρύτητας της Γης. Κατά την απογείωση από μια πλανητική επιφάνεια, η ισορροπία μεταξύ ώσης και βάρους είναι εξαιρετικά σημαντική.

Ως **οπισθέλκουσα (drag), D**, ορίζεται η συνισταμένη των δυνάμεων πίεσης και ιξώδους, η οποία επενεργεί παράλληλα προς τη διεύθυνση της κύριας ροής. Η οπισθέλκουσα δύναμη ενεργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση προς την πτήση του οχήματος λόγω της αντίσταση του οχήματος στην κίνηση πτήσης μέσω ενός υγρού (αέρα) μέσου

Η συνισταμένη των δυνάμεων πίεσης και ιξώδους, που επενεργεί κάθετα προς τη διεύθυνση της κύριας ροής, ορίζεται ως **άντωση, (lift) L**.



Εικόνα 42: Η κατεύθυνση των δυνάμεων κατά την πτήση. (edx)

Η άντωση  $L$  και η οπισθέλκουσα  $D$  μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της ταχύτητας πτήσης  $V$ , πυκνότητας υγρού και τυπικής επιφάνειας που μπορεί να είναι εκφράζεται ως εξής:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (6.24)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (6.25)$$

όπου

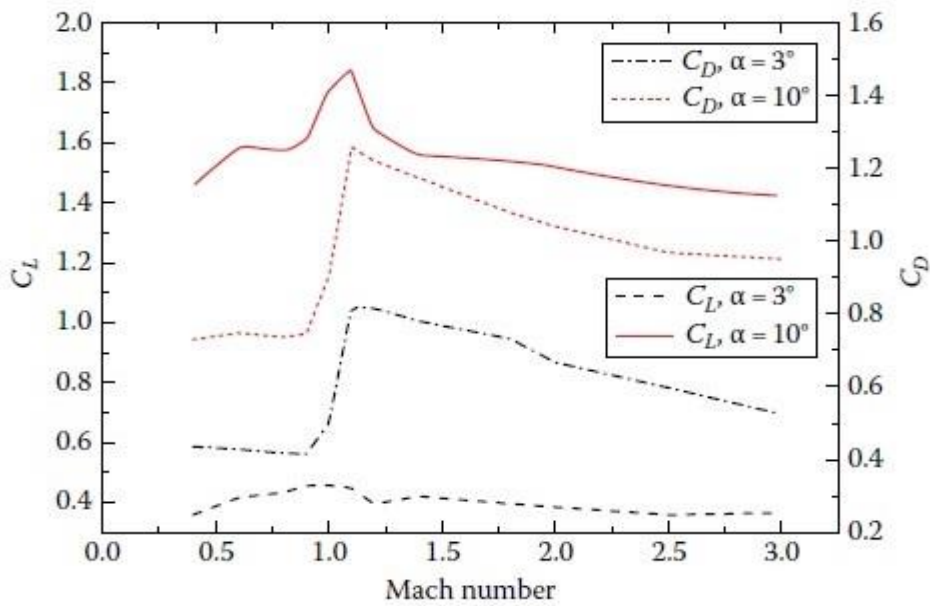
Το  $C_D$  είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας

$C_L$  είναι ο συντελεστής άντωση

Το  $A$  είναι το εμβαδόν διατομής

Οι συντελεστές οπισθέλκουσας και άντωση είναι κυρίως συναρτήσεις πτήσης μετρούμενες σε αριθμό και γωνία Mach





Εικόνα 43:  $C_D$  και  $C_L$  ως προς τον αριθμό Mach για δύο γωνίες προσβολής  $\alpha = 3^\circ$  και  $10^\circ$ . (D.P. Mishra)

Μια ιπτάμενη συσκευή πετάει με σταθερή οριζόντια ταχύτητα και κατεύθυνση εφόσον η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό είναι μηδέν. Για το λόγο αυτό προκειμένου να συντηρείται το ύψος του θα πρέπει η άντωση να είναι ίση με το βάρος του, και η δύναμη που το ωθεί να εξισορροπεί την οπισθέλκουσα. Ο κινητήρας εξισορροπεί την οπισθέλκουσα ενώ η ταχύτητα είναι τέτοια ώστε η άντωση που παράγεται να είναι ίση με το βάρος.

## 6.7 Τα αποτελέσματα της βαρύτητας

Η βαρύτητα στη Γη έλκει τα υλικά σώματα και προκαλεί την πτώση τους στην επιφάνειά της όταν αφεθούν ελεύθερα. Επιπροσθέτως, η βαρύτητα είναι η αιτία της ύπαρξης της γης, του ήλιου και των άλλων αστρικών σωμάτων. Χωρίς αυτή δεν θα υπήρχε ζωή, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Η βαρύτητα είναι επίσης υπεύθυνη για την τροχιά της γης και των υπόλοιπων πλανητών γύρω από τον Ήλιο, την τροχιά της σελήνης γύρω από τη Γη, τον σχηματισμό παλιρροιών και άλλα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούμε.

Γνωρίζουμε ότι η βαρυτική έλξη δρα σε ένα διαστημικό όχημα. Όλα τα επίγεια σώματα τραβούν το όχημα προς το κέντρο μάζας τους. Όταν το όχημα βρίσκεται σε πτήση πολύ κοντά με τη γη, η βαρυτική έλξη των άλλων πλανητών και σωμάτων είναι αμελητέα, μικρή σε σύγκριση με τη βαρυτική δύναμη της γης.

### 6.7.1 Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης

Ο νόμος του Νεύτωνα για τη βαρύτητα διατυπώνεται ως εξής:

«Κάθε σώμα στο σύμπαν έλκει κάθε άλλο σώμα με δύναμη ανάλογη του γινομένου των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης του κέντρου μάζας τους».

Και εκφράζεται ως εξής:

$$F = G \frac{Mm}{R^2} \quad (6.26)$$

Όπου

F είναι το μέτρο της βαρυτικής δύναμης.

G είναι η παγκόσμια βαρυτική σταθερά  $G= 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}$

M είναι η μάζα της Γης  $M= 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

m είναι οποιοδήποτε άλλο σώμα βρίσκεται σε απόσταση από τη Γη

R είναι η μέση ενεργός ακτίνα της Γης  $R=6.400 \text{ km}$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης

$$g_0 = G \frac{M}{R^2} \quad (6.27)$$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας επηρεάζεται από το υψόμετρο που βρίσκεται το σώμα από την επιφάνεια της Γης.

$$g = g_0 \left( \frac{R}{R + h} \right)^2 \quad (6.28)$$

### 6.8 Ταχύτητα διαφυγής (escape velocity)

Η ταχύτητα διαφυγής είναι η ελάχιστη αρχική ταχύτητα που θα πρέπει να αναπτύξει ένας ένας πύραυλος προκειμένου να υπερνικήσει τη βαρυτική έλξη που υφίσταται αυτό στην επιφάνεια ενός ουρανίου σώματος. Για να διαφύγει από τη βαρύτητα ενός ουρανίου σώματος ένας πύραυλος πρέπει να έχει κινητική ενέργεια που να ξεπερνά την δυναμική του ενέργεια στο βαρυτικό πεδίο του ουρανίου σώματος.

Σε κάθε ουράνιο σώμα παρατηρείται διαφορετική ένταση βαρύτητας, συνεπώς διαφορετική είναι και η ταχύτητα διαφυγής η οποία μειώνεται υψομετρικά από την επιφάνειά του. Όσο πιο μακριά βρίσκονται τα κέντρα των μαζών δύο σωμάτων, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα διαφυγής του ενός ως προς το άλλο. Δίνεται από τη σχέση:

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (6.29)$$

Η ταχύτητα αυτή είναι ανεξάρτητη της μάζας του σώματος που χρειάζεται να αποκτήσει την παραπάνω ταχύτητα ώστε να διαφύγει από τη βαρυτική έλξη ενός σφαιρικού σώματος, γεγονός το οποίο οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην ιδιαίτερη φύση της βαρύτητας. Η ταχύτητα διαφυγής στην επιφάνεια της Γης, μη λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση της ατμοσφαιράς, είναι  $\approx 11.2$  km/s και στη Σελήνη  $\approx 2.4$  km/s. Οι αριθμοί αυτοί ισχύουν υποθέτοντας ότι τα ουράνια σώματα είναι τέλειες σφαίρες.

Η ταχύτητα διαφυγής ελαττώνεται όσο απομακρύνεται το ένα σώμα από το άλλο. Αν το μικρότερο σώμα αναπτύξει ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας διαφυγής, τότε αυτό δεν πρόκειται να εγκαταλείψει το μεγαλύτερο. Συνεπώς, ένα αντικείμενο που εκτοξεύεται από την επιφάνεια της Γης με αρχική ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας διαφυγής δεν θα εγκαταλείψει ποτέ την βαρυτική έλξη της Γης. Στην πραγματικότητα η απαιτούμενη ταχύτητα είναι ακόμα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαφυγής, καθώς στο αντικείμενο θα ασκηθούν και δυνάμεις τριβής λόγω της ατμόσφαιρας της Γης.

Οι πύραυλοι και τα διαστημόπλοια δεν εκτοξεύονται στο διάστημα, αλλά καίνε συνεχώς καύσιμα μέχρις ότου να διαφύγουν από την έλξη της Γης. Ένας πύραυλος μπορεί κάλλιστα να διαφύγει από την έλξη της Γης με ταχύτητες πολύ μικρότερες από την ταχύτητα διαφυγής της Γης, δεδομένου ότι η καύση γίνεται με επαρκώς ταχύ ρυθμό ώστε ο πύραυλος ή το διαστημόπλοιο να υπερνικά συνεχώς την βαρυτική έλξη της Γης.

## 6.9 Αιτίες αποκλίσεων τροχιάς

Η επιστήμη πυραύλων είναι κάτι περισσότερο από απλή πρόωση. Η επιτυχής εκτόξευση ενός πυραύλου από την επιφάνεια της Γης περιλαμβάνει επίσης πολλούς άλλους κλάδους της αεροδιαστημικής μηχανικής. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύστημα για τον εντοπισμό της θέσης ή της πιθανής απόκλισης του αεροδιαστημικού οχήματος από την καθορισμένη τροχιά, ώστε να εφαρμοστεί ο κατάλληλος ελιγμός διόρθωσης. Οι διορθώσεις εκτελούνται από ένα σύνολο μικρών προωθητικών ελέγχου. Αυτές οι διορθώσεις είναι απαραίτητες καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αεροδιαστημικού ατυχήματος για να ξεπεραστούν οι επιπτώσεις διαταραχών.

Σε μεγάλα υψόμετρα ( $> 36,000$ km) κάθε δορυφόρος βιώνει δυνάμεις διαταραχής και σε ακραίες περιπτώσεις να έρθει πολύ κοντά σε τρίτο σώμα όπως τη Σελήνη. Αυτές οι διαταραχές είναι:

- Παλινδρόμηση των κόμβων
- Μετατόπιση του μείζονα άξονα

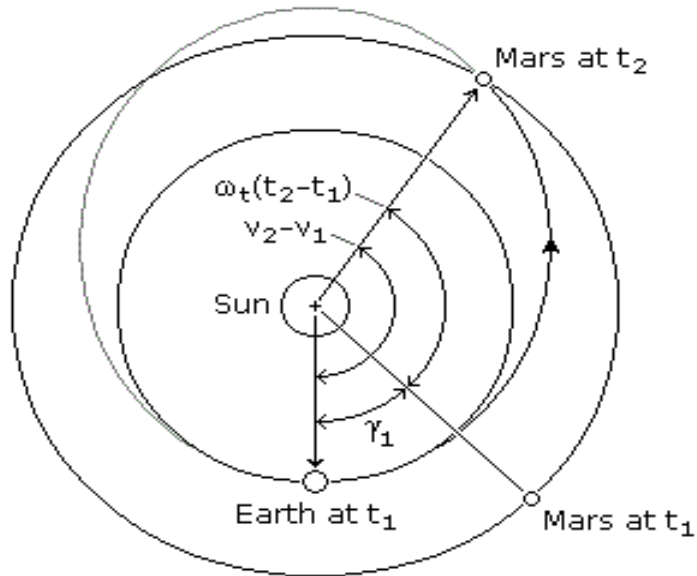
Οι δορυφόροι νέας τεχνολογίας υπόκεινται σε ροπές που τείνουν να διαταράξουν τη θέση και τη τροχιά τους. Αυτές είναι:

- Αεροδυναμική οπισθέλκουσα
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Κλίσεις βαρύτητας
- Μαγνητικό πεδίο
- Εσωτερικές επιταχύνσεις

## 7. Διαπλανητικές πτήσεις

Ένα διαστημόπλοιο ξοδεύει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου πτήσης του κινούμενος υπό τη βαρυτική επίδραση ενός μόνο σώματος, του Ήλιου. Μόνο για σύντομες περιόδους, σε σύγκριση με τη συνολική διάρκεια της αποστολής, η διαδρομή του διαμορφώνεται από το βαρυτικό πεδίο του πλανήτη αναχώρησης ή άφιξης. Οι διαταραχές που προκαλούνται από τους άλλους πλανήτες ενώ το διαστημόπλοιο ακολουθεί την ηλιοκεντρική του πορεία είναι αμελητέες.

Εάν το διαστημόπλοιο πρόκειται να συναντήσει τον πλανήτη στόχο τη στιγμή που διασχίζει την τροχιά του πλανήτη, τότε προφανώς η Γη και ο πλανήτης στόχος πρέπει να έχουν τη σωστή γωνιακή σχέση κατά την αναχώρηση. Η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων ακτίνας προς τους πλανήτες αναχώρησης και άφιξης ονομάζεται , **γωνία φάσης** κατά την αναχώρηση. Η επιθυμητή τροχιά μεταφοράς είναι εφαπτομενική στην τροχιά της Γης κατά την αναχώρηση ώστε να φτάσει στον πλανήτη στόχο. Η μεταφορά Hohmann, εάν συνεχιζόταν πέρα από τον πλανήτη προορισμού, δεν θα παρείχε κατάλληλη τροχιά επιστροφής. Η σωστή γωνία φάσης κατά την αναχώρηση περιορίζει σοβαρά τους χρόνους που μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτόξευση.



Εικόνα 44: Η γωνία φάσης για τον Άρη. (braeunig.us)

Η σωστή γωνία φάσης κατά την αναχώρηση είναι:

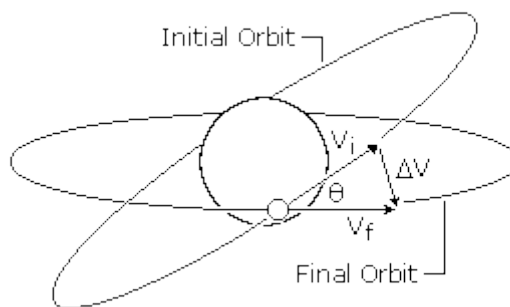
$$\gamma_1 = (V_2 - V_1) - \omega_t(t_2 - t_1) \quad (7.1)$$

### 7.1 Αλλαγές επιπέδου τροχιάς

Για να αλλάξουμε τον προσανατολισμό του τροχιακού επιπέδου ενός δορυφόρου, συνήθως την κλίση, πρέπει να αλλάξουμε την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας. Αυτός ο ελιγμός απαιτεί μια συνιστώσα της ταχύτητας να είναι κάθετη στο τροχιακό επίπεδο και, επομένως, κάθετη στο διάνυσμα της αρχικής ταχύτητας. Μπορούμε να βρούμε την απαιτούμενη αλλαγή στην ταχύτητα χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\Delta V = 2V_i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (7.2)$$

Όπου  $V_i$  είναι η ταχύτητα πριν και μετά το κάψιμο και  $\theta$  είναι η αλλαγή γωνίας που απαιτείται. Βλέπουμε ότι αν η γωνιακή μεταβολή είναι ίση με 60 μοίρες, η απαιτούμενη μεταβολή της ταχύτητας είναι ίση με την τρέχουσα ταχύτητα.



Εικόνα 45: Η αλλαγή επιπέδου τροχιάς όταν  $V_i = V_f$ . (braeunig.us)

Για διαφορετικές γωνιακές μεταβολές χρησιμοποιούμε το νόμο των συνημίτονων καθώς πρέπει να αλλάξουμε τόσο το μέγεθος όσο και την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας.

$$\Delta V = \sqrt{-2V_i V_f \cos\theta + V_i^2 + V_f^2} \quad (7.3)$$

Όπου  $V_i$  είναι η αρχική ταχύτητα,  $V_f$  είναι η τελική ταχύτητα και  $\theta$  είναι η αλλαγή γωνίας που απαιτείται.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση, μια μικρή αλλαγή επιπέδου μπορεί να συνδυαστεί με μια αλλαγή υψομέτρου χωρίς σχεδόν κανένα κόστος σε προωθητικό. Κατά συνέπεια, στην πράξη, η γεωσύγχρονη μεταφορά γίνεται με μια μικρή αλλαγή επιπέδου στο περίγειο και το μεγαλύτερο μέρος της αλλαγής επιπέδου στο απόγειο.

Μια άλλη επιλογή για αλλαγή επιπέδου τροχιάς είναι να εφαρμόσουμε τρία εγκαύματα (burn).

- Το πρώτο έγκαυμα είναι ένας ομοεπίπεδος ελιγμός που τοποθετεί τον δορυφόρο σε τροχιά μεταφοράς με απόγειο πολύ υψηλότερο από την τελική τροχιά.
- Αυτή η διαδικασία τοποθετεί τον δορυφόρο σε μια δεύτερη τροχιά μεταφοράς που είναι ομοεπίπεδη με την τελική τροχιά και έχει ύψος περιγείου ίσο με το ύψος της τελικής τροχιάς.
- Τέλος, όταν ο δορυφόρος φτάσει στο περίγειο της δεύτερης τροχιάς μεταφοράς, ένας άλλος ομοεπίπεδος ελιγμός τοποθετεί τον δορυφόρο στην τελική τροχιά.

Αυτός ο ελιγμός τριών εγκαυμάτων μπορεί να εξοικονομήσει προωθητικό, αλλά η εξοικονόμηση προωθητικού έρχεται σε βάρος του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση του ελιγμού.

## 7.2 Υπερβολική τροχιά

Εάν δώσουμε σε ένα διαστημικό όχημα ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διαφυγής του, σε ένα σημείο κοντά στη Γη, τότε το όχημα αποκτά ταχύτητα διαφυγής από το βαρυτικό πεδίο της Γης, δηλαδή δραπετεύει.

Αυτή η **υπερβολική ταχύτητα** υπολογίζεται από την εξίσωση

$$u_{\infty}^2 = u^2 - u_{esc}^2 \quad (7.4)$$

Η ταχύτητα  $u$  είναι η ταχύτητα που δώσαμε στο όχημα όταν κάναμε το έγκαυμα

Το μέτρο της **μέγιστης ενέργειας** που μπορεί να μεταδώσει ένα όχημα εκτόξευσης σε ένα διαστημόπλοιο δεδομένης μάζας καθώς και την ενέργεια που απαιτείται για μια διαπλανητική αποστολή ισούται

$$C_3 = u_{\infty}^2 \quad (7.5)$$

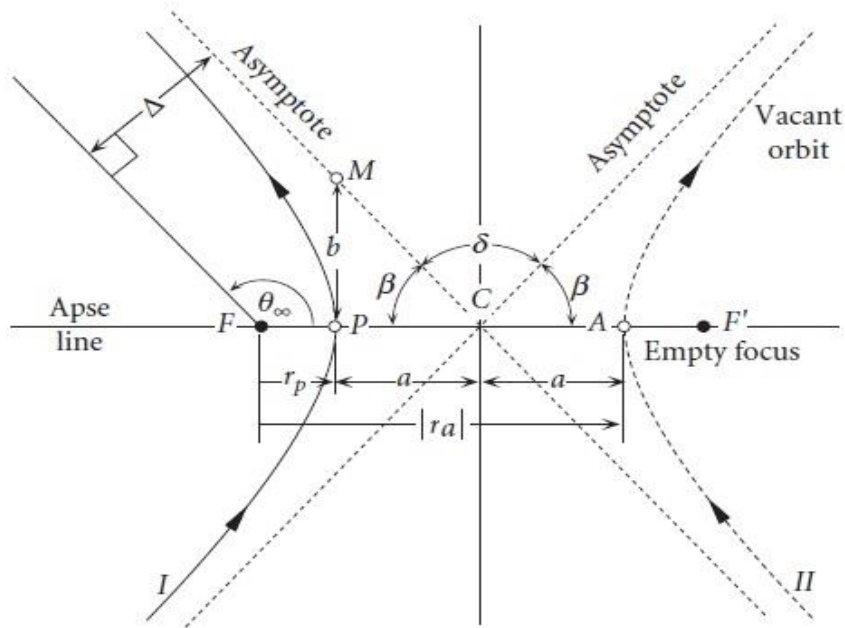
Οι συνιστώσες της ταχύτητας  $u_r$  και  $u_{\perp}$  υπολογίζονται

$$u_r = u \sin \gamma \quad (7.6)$$

$$u_{\perp} = u \cos \gamma \quad (7.7)$$

Όπου

$$\tan \gamma = \frac{e \sin \theta}{1 + e \cos \theta} \quad (7.8)$$



Εικόνα 46: Υπερβολική τροχιά. (Howard D. Curtis)

Η ειδική **στροφορμή** θα δίνεται από τον τύπο

$$h = r u_{\perp} \quad (7.9)$$

Η **ακτίνα r** που διαγράφει το διαστημόπλοιο σε υπερβολική τροχιά υπολογίζεται:

$$r = \frac{h^2}{\mu(1 + e \cos \theta)} \quad (7.10)$$

Έτσι προκύπτει από τις σχέσεις των ελλειπτικών τροχιών συνδυάζοντας και την παραπάνω σχέση, οι τιμές  $r_p$  και  $r_a$

$$\alpha = \frac{h^2}{\mu} \frac{1}{e^2 - 1} \quad (7.11)$$

$$r_p = a(e - 1) \quad (7.12)$$

$$r_a = -a(e + 1) \quad (7.13)$$

Οι ασύμπτωτες της υπερβολής είναι οι ευθείες γραμμές προς τις οποίες τείνουν οι καμπύλες καθώς πλησιάζουν στο άπειρο. Οι ασύμπτωτες τέμνονται στο C, σχηματίζοντας οξεία γωνία  $\beta$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{1}{e} \quad (7.14)$$

Η γωνία  $\delta$  μεταξύ των ασύμπτωτων ευθειών ονομάζεται **γωνία στροφής**.

$$\delta = 2\sin^{-1}\frac{1}{e} \quad (7.15)$$

Η απόσταση  $\Delta$  μεταξύ της ασύμπτωτης και μιας παράλληλης γραμμής ονομάζεται **ακτίνα στόχευσης**

$$\Delta = \alpha\sqrt{e^2 - 1} \quad (7.16)$$

Η γωνία  $\theta_\infty$  είναι η **αληθινή ανωμαλία**. Μια γωνιακή παράμετρος που καθορίζει τη θέση ενός σώματος που κινείται κατά μήκος μιας τροχιάς του Κέπλερ. Είναι δηλαδή η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της περιάψης και της τρέχουσας θέσης του σώματος.

$$\theta_\infty = \cos^{-1}\frac{-1}{e} \quad (7.17)$$

Πλανήτης	Ελάχιστη ταχύτητα εκτόξευσης (m/s)	Χρόνος
Ερμής	13.41	110 μέρες
Αφροδίτη	11.58	150 μέρες
Άρης	11.58	260 μέρες
Δίας	14.02	2.7 χρόνια
Κρόνος	14.94	6 χρόνια
Ουρανός	15.54	16 χρόνια
Ποσειδώνας	15.85	31 χρόνια
Πλούτωνας	16.15	40 χρόνια

Figure 3: Ελάχιστες ταχύτητες εκτόξευσης, με χρόνους διέλευσης, για να φτάσουμε σε όλους τους πλανήτες.

## 8. Συστήματα ελέγχου αντίδρασης (RCS)

Ένα σύστημα ελέγχου αντίδρασης (RCS) είναι ένα σύστημα διαστημικού σκάφους που χρησιμοποιεί προωθητές και τροχούς ελέγχου αντίδρασης για να παρέχει έλεγχο στάσης και μερικές φορές πρόωση. Είναι ικανό να παρέχει μικρές ποσότητες ώσης προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση ή συνδυασμό κατευθύνσεων. Ένα RCS είναι επίσης ικανό να παρέχει ροπή για να επιτρέπει τον έλεγχο της περιστροφής. Συχνά χρησιμοποιούν συνδυασμούς μεγάλων και μικρών προωθητών, για να επιτρέψουν διαφορετικά επίπεδα απόκρισης.





Εικόνα 47: Σύστημα ελέγχου αντίδρασης. (stevenbrower.com)

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για:

### 8.1 Έλεγχος στάσης

Ο έλεγχος στάσης είναι η διαδικασία ελέγχου του προσανατολισμού ενός αεροδιαστημικού οχήματος σε σχέση με ένα αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς ή άλλη οντότητα όπως ουράνια σώματα, ορισμένα πεδία και κοντινά αντικείμενα κ.λπ. Ο έλεγχος της στάσης του οχήματος απαιτεί αισθητήρες για τη μέτρηση του προσανατολισμού του οχήματος, ενεργοποιητές για να εφαρμόσουν τις ροπές που απαιτούνται για να προσανατολίσουν το όχημα σε μια επιθυμητή στάση και αλγόριθμους για τους ενεργοποιητές με βάση μετρήσεις αισθητήρα της τρέχουσας στάσης και της προδιαγραφές μιας επιθυμητής συμπεριφοράς.

Ο έλεγχος της κλίσης (pitch) αυξάνει ή μειώνει τη μύτη του οχήματος. Οι ροπές στρέψης (yaw) προκαλούν κίνηση από την αριστερά ή την δεξιά πλευρά και οι ροπές περιστροφής (roll) περιστρέφουν το όχημα γύρω από τον άξονά του είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα.

### 8.1.1 Αισθητήρες στάσης

**Γυροσκόπια:** Τα γυροσκόπια είναι συσκευές που αντιλαμβάνονται την περιστροφή σε τρισδιάστατο χώρο χωρίς να βασίζονται στην παρατήρηση εξωτερικών αντικειμένων.

**Γυροσκοπική πυξίδα:** Όπως μια επίγεια γυροσκοπική πυξίδα χρησιμοποιεί ένα εκκρεμές για να ανιχνεύσει την τοπική βαρύτητα και να αναγκάσει το γυροσκόπιό της να ευθυγραμμιστεί με το διάνυσμα περιστροφής της Γης, και επομένως να δείχνει βόρεια, μια τροχιακή γυροσκοπική πυξίδα χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα ορίζοντα για να ανιχνεύσει την κατεύθυνση προς το κέντρο της Γης και ένα γυροσκόπιο για να την αίσθηση περιστροφής γύρω από άξονα κάθετο προς το επίπεδο τροχιάς.

**Αισθητήρας ήλιου:** Ο αισθητήρας ηλίου είναι μια συσκευή που ανιχνεύει την κατεύθυνση προς τον Ήλιο.

**Αισθητήρας γείωσης:** Ο αισθητήρας γης είναι μια συσκευή που ανιχνεύει την κατεύθυνση προς τη Γη. Είναι συνήθως μια υπέρυθη κάμερα.

**Μαγνητόμετρο:** Το μαγνητόμετρο είναι μια συσκευή που ανιχνεύει την ένταση του μαγνητικού πεδίου και, όταν χρησιμοποιείται σε μια τριάδα τριών αξόνων, την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Ως βοήθημα πλοήγησης διαστημικών σκαφών, η ένταση και η κατεύθυνση του αισθητού πεδίου συγκρίνονται με έναν χάρτη του μαγνητικού πεδίου της Γης που είναι αποθηκευμένος στη μνήμη ενός υπολογιστή καθοδήγησης επί του σκάφους ή του εδάφους. Εάν η θέση του διαστημικού σκάφους είναι γνωστή, τότε μπορεί να συναχθεί η στάση.

## 8.2 Η διατήρηση τροχιάς

Η διατήρηση τροχιάς απαιτεί μια σειρά τροχιακών ελιγμών που γίνονται με εκκινήσεις του προωθητή για να διατηρηθεί το ενεργό σκάφος στην ίδια τροχιά με τον στόχο του. Για πολλούς δορυφόρους σε χαμηλή τροχιά της Γης, οι επιδράσεις της βαρυτικής δύναμης της Γης, οι βαρυτικές δυνάμεις από τον Ήλιο και τη Σελήνη, η πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας και η έλξη του αέρα, πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Για ένα διαστημόπλοιο σε πολύ χαμηλή τροχιά, η ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα είναι αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλέσει επανείσοδο πριν από το προβλεπόμενο τέλος της αποστολής, εάν δεν εκτελούνται κατά διαστήματα ελιγμοί ανύψωσης τροχιάς. ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS), ο οποίος έχει επιχειρησιακό υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της Γης μεταξύ 330 και 410 km. Λόγω της ατμοσφαιρικής έλξης ο διαστημικός σταθμός χάνει συνεχώς τροχιακή ενέργεια. Προκειμένου να αντισταθμιστεί αυτή η απώλεια, η οποία θα οδηγούσε τελικά σε επανείσοδο του σταθμού, κατά καιρούς έχει επανεκκινηθεί σε υψηλότερη τροχιά. Το επιλεγμένο τροχιακό υψόμετρο είναι μια αντιστάθμιση μεταξύ της μέσης ώσης που απαιτείται για την αντιστάθμιση της έλξης του αέρα και του δέλτα-ν που απαιτείται για την αποστολή ωφέλιμων φορτίων και ανθρώπων στον σταθμό.

Για διαστημόπλοια που βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά πρέπει να εκτελούνται εκκινήσεις προς το τροχιακό επίπεδο για να αντισταθμιστεί η επίδραση της σεληνιακής/ηλιακής βαρύτητας που διαταράσσει τον πόλο της τροχιάς. Το δέλτα-ν που απαιτείται για την αντιστάθμιση αυτής της διαταραχής διατηρώντας την κλίση προς το ισημερινό επίπεδο

ανέρχεται της τάξης των 45 m/s ανά έτος. Αυτό το τμήμα του σταθμού GEO ονομάζεται έλεγχος Βορρά-Νότου.

Ο έλεγχος Ανατολής-Δύσης είναι ο έλεγχος της τροχιακής περιόδου και του διανύσματος εκκεντρότητας που εκτελείται κάνοντας τα εκκινήσεις του προωθητή εφαπτομενικά στην τροχιά. Αυτά γίνονται για να διατηρούν την τροχιακή περίοδο τέλεια συγχρονισμένη με την περιστροφή της Γης και να διατηρούν την εκκεντρότητα αρκετά μικρή. Τα καύσιμα που χρειάζονται για αυτόν τον έλεγχο Ανατολής-Δύσης είναι πολύ λιγότερα από αυτά που χρειάζονται για τον έλεγχο Βορρά-Νότου. Για να παραταθεί η διάρκεια ζωής ενός γερασμένου γεωστατικού διαστημικού σκάφους με λίγα καύσιμα, μερικές φορές διακόπτεται ο έλεγχος Βορρά-Νότου συνεχίζοντας μόνο με τον έλεγχο Ανατολής-Δύσης.

### 8.3 Τροχιακό ραντεβού

Το τροχιακό ραντεβού είναι ένα σύνολο τροχιακών ελιγμών κατά τη διάρκεια των οποίων δύο διαστημικά σκάφη, ένα εκ των οποίων είναι συχνά ο διαστημικός σταθμός, φτάνουν στην ίδια τροχιά και πλησιάζουν σε πολύ κοντινή απόσταση. Το ραντεβού απαιτεί μια ακριβή αντιστοίχιση των τροχιακών ταχυτήτων και των διανυσμάτων θέσης των δύο διαστημικών σκαφών, επιτρέποντάς τους να παραμείνουν σε σταθερή απόσταση μέσω του τροχιακού σταθμού.

Το τροχιακό ραντεβού είναι ένα σημαντικό μέρος της αστροναυτικής και της ανθρώπινης διαστημικής πτήσης. Εξάλλου, είναι αυτό που μας επιτρέπει να στείλουμε αστροναύτες στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό ή να συντηρούμε δορυφόρους όπως το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble.

Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα κλίσης χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$\Delta V = V \sin(\Delta i) \quad (8.1)$$

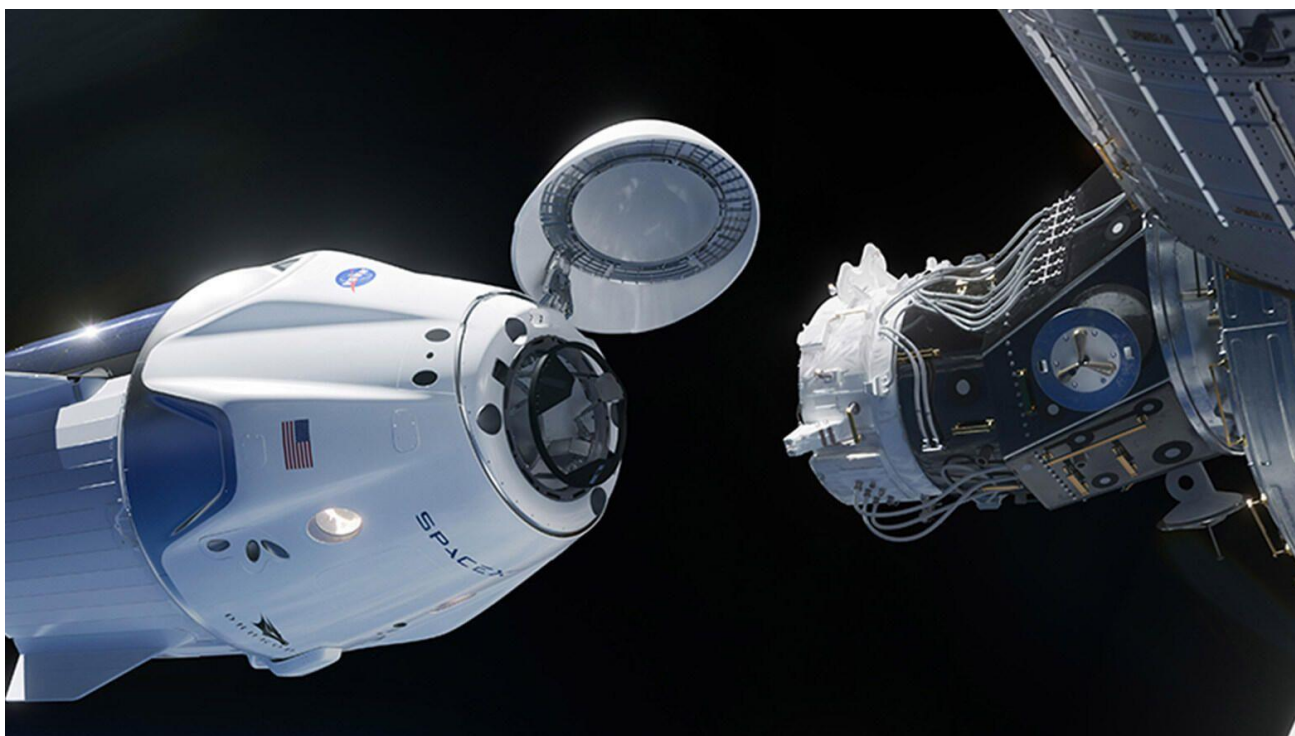
Αν θέλαμε να ξεκινήσουμε από το βόρειο ημισφαίριο με τροχιακή κλίση των 51 μοιρών για παράδειγμα τότε θα βάζαμε  $\cos$  αντί  $\sin$  στη εξίσωση.

Για την τροχιακή ταχύτητα:

$$V_c = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad (8.2)$$

Για την περίοδο:

$$T = \frac{2\pi R}{V_c} \quad (8.3)$$



Εικόνα 48: Η στιγμή της προσέγγισης. (FR24 News English)

Οι δύο πιο συνηθισμένες μέθοδοι προσέγγισης είναι

**Προσέγγιση V-bar:** Η προσέγγιση V-bar είναι μια προσέγγιση του «κυνηγού» οριζόντια κατά μήκος του διανύσματος ταχύτητας του παθητικού διαστημικού σκάφους. Η κίνηση είναι παράλληλη με την τροχιακή ταχύτητα του στόχου.

**Προσέγγιση R-bar:** Η προσέγγιση R-bar αποτελείται από τον κυνηγό που κινείται κάτω ή πάνω από το διαστημόπλοιο στόχο, κατά μήκος του ακτινικού του διανύσματος. Η κίνηση είναι ορθογώνια ως προς την τροχιακή ταχύτητα του παθητικού διαστημικού σκάφους.

Για να κατανοήσουμε σωστά το τροχιακό ραντεβού του διαστημικού σκάφους είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του διαστημικού σκάφους και της τροχιάς. Ένα διαστημόπλοιο σε μια συγκεκριμένη τροχιά δεν μπορεί να αλλάξει αυθαίρετα την ταχύτητά του. Κάθε τροχιά συσχετίζεται με μια ορισμένη τροχιακή ταχύτητα. Εάν το διαστημόπλοιο εκκινήσει τους προωθητές για να αυξήσει (ή μειώσει) την ταχύτητά του, θα αποκτήσει διαφορετική τροχιά, αυτή που σχετίζεται με την υψηλότερη (ή χαμηλότερη) ταχύτητα. Για κυκλικές τροχιές, οι υψηλότερες τροχιές έχουν μικρότερη τροχιακή ταχύτητα. Οι χαμηλότερες τροχιές έχουν μεγαλύτερη τροχιακή ταχύτητα.

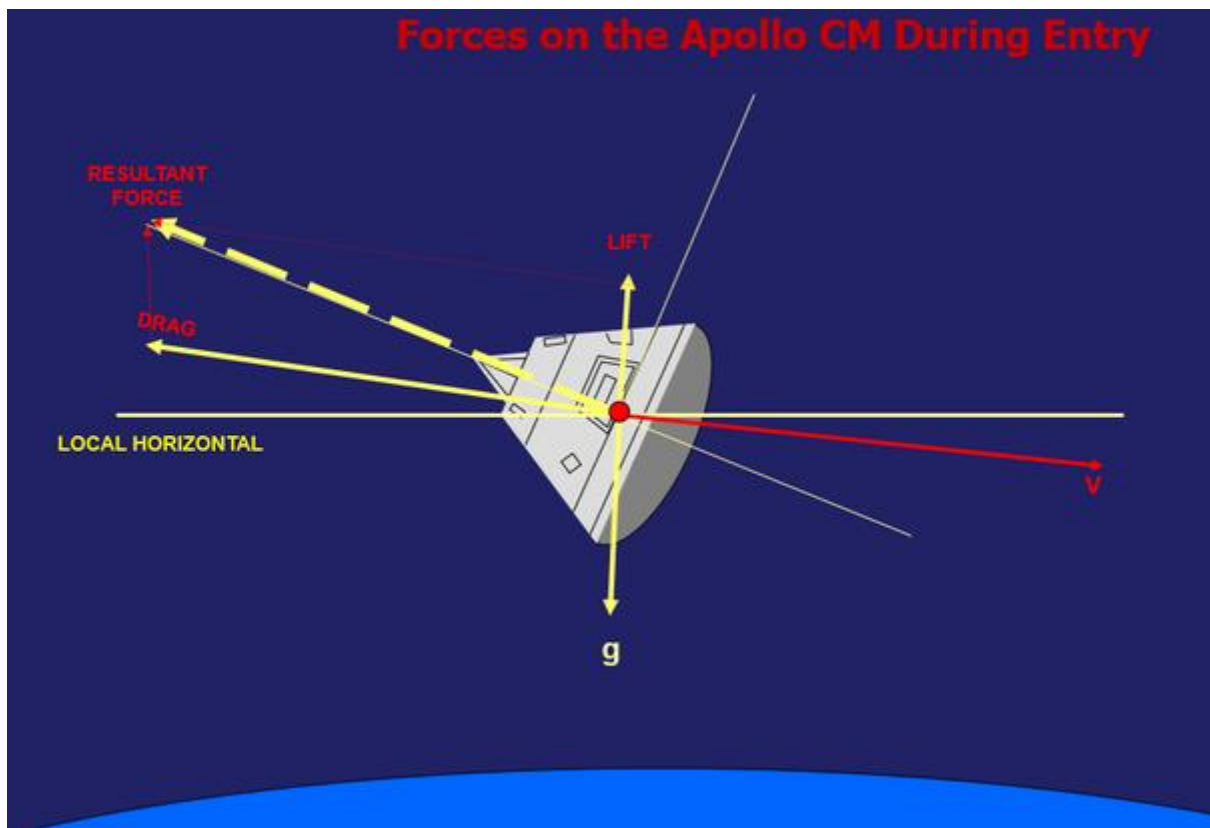
Για να συμβεί το τροχιακό ραντεβού, και τα δύο διαστημόπλοια πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο και η φάση της τροχιάς (η θέση του διαστημικού σκάφους στην τροχιά) πρέπει να ταιριάζουν. Για τη σύνδεση, η ταχύτητα των δύο οχημάτων πρέπει επίσης να αντιστοιχιστεί. Ο κυνηγός τοποθετείται σε τροχιά λίγο χαμηλότερη από τον στόχο. Όσο χαμηλότερη είναι η τροχιά, τόσο μεγαλύτερη είναι η τροχιακή ταχύτητα. Η διαφορά στις τροχιακές ταχύτητες κυνηγού και στόχου είναι επομένως τέτοια που ο κυνηγός είναι ταχύτερος από τον στόχο και τον προλαβαίνει. Μόλις τα δύο διαστημόπλοια είναι αρκετά

κοντά, η τροχιά του κυνηγού συγχρονίζεται με την τροχιά του στόχου. Δηλαδή ο κυνηγός θα επιταχυνθεί. Αυτή η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί τον κυνηγό σε υψηλότερη τροχιά. Η αύξηση της ταχύτητας επιλέγεται έτσι ώστε ο κυνηγός να έχει περίπου την τροχιά του στόχου. Σταδιακά, ο κυνηγός κλείνει μέσα στον στόχο, μέχρι να ξεκινήσουν οι λειτουργίες εγγύτητας. Η σύνδεση πραγματοποιείται συνήθως με ρυθμό 0,030 m/s μέχρι 0,061 m/s.

#### 8.4 Όχημα εισόδου

Για να μπορέσουν οι επανδρωμένες αποστολές να έχουν επιτυχία θα πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος, ένα όχημα δηλαδή που θα επιστρέψει με ασφάλεια πίσω στη Γη. Αυτό γίνεται με ελεγχόμενη είσοδο (ή επανείσοδος) ενός διαστημόπλοιου ικανού να πλοηγηθεί ή να ακολουθήσει μια προκαθορισμένη πορεία. Οι τεχνολογίες και οι διαδικασίες που επιτρέπουν την ελεγχόμενη ατμοσφαιρική είσοδο, κάθοδο και προσγείωση διαστημικών σκαφών ονομάζονται ως **EDL (entry, descent and landing)**.

Τα αντικείμενα που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα αντιμετωπίζουν ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα. Η οποία ασκεί μηχανική πίεση στο αντικείμενο, και αεροδυναμική θέρμανση που προκαλείται κυρίως από τη συμπίεση του αέρα μπροστά από το αντικείμενο, αλλά και από την έλξη. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να προκαλέσουν απώλεια μάζας ή ακόμα και πλήρη αποσύνθεση μικρότερων αντικειμένων και αντικείμενα με χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη μπορεί να εκραγούν. Τα επανδρωμένα διαστημικά οχήματα πρέπει να επιβραδυνθούν σε υποηχητικές ταχύτητες προτού ενεργοποιηθούν αλεξίπτωτα. Η κινητική ενέργεια τους είναι συνήθως μεταξύ 50 και 1.800 megajoules ανά χιλιόγραμμο και η ατμοσφαιρική διάχυση είναι ο μόνος τρόπος για να δαπανηθεί η κινητική ενέργεια. Η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την επιβράδυνση του οχήματος θα ήταν σχεδόν ίση με την ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτόξευση του αρχικά. Η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται στην επιφάνεια της θερμικής ασπίδας οφείλεται σε αδιαβατική συμπίεση, η κινητική ενέργεια του οχήματος χάνεται τελικά λόγω τριβής αερίου (ιξώδες) αφού το όχημα περάσει.



Εικόνα 49: Οι δυνάμεις που παρουσιάζονται κατά την είσοδο στην ατμόσφαιρα. (qsoza.com)

Τα οχήματα αυτά δεν απαιτούν ιδιαίτερη επιβράδυνση κατά την επανείσοδο γιατί οι επιστροφές αργής ταχύτητας στη Γη από το κοντινό διάστημα δεν απαιτούν θωράκιση από τη θερμότητα. Η βαρυτική επιτάχυνση ενός αντικειμένου που ξεκινά σε σχετική ηρεμία μέσα από την ίδια την ατμόσφαιρα δεν μπορεί να δημιουργήσει αρκετή ταχύτητα για να προκαλέσει σημαντική ατμοσφαιρική θέρμανση. Για τη Γη, η ατμοσφαιρική είσοδος γίνεται κατά σύμβαση στη γραμμή Κάρμάν σε υψόμετρο 100 km πάνω από την επιφάνεια, ενώ στην Αφροδίτη η είσοδος της ατμόσφαιρας συμβαίνει στα 250 km και στον Άρη σε περίπου 80 km.

### 8.5 Ελεγκτής PID (PID controller)

Αποτελούν συστήματα ελέγχου που είναι απολύτως κρίσιμα για τη λειτουργία των αεροδιαστημικών οχημάτων. Σε έναν πυραυλο, υπάρχει ένας αριθμός επιφανειών ελέγχου. Αυτές οι επιφάνειες είναι ενεργοποιητές που επιτρέπουν στο πλήρωμα να αλλάξει τον προσανατολισμό του οχήματος γύρω από τους άξονες βήματος, κύλισης και εκτροπής επιτρέποντας έτσι στο όχημα να αναρριχηθεί, να κατέβει, να στρίψει και να εκτελέσει άλλους ελιγμούς.

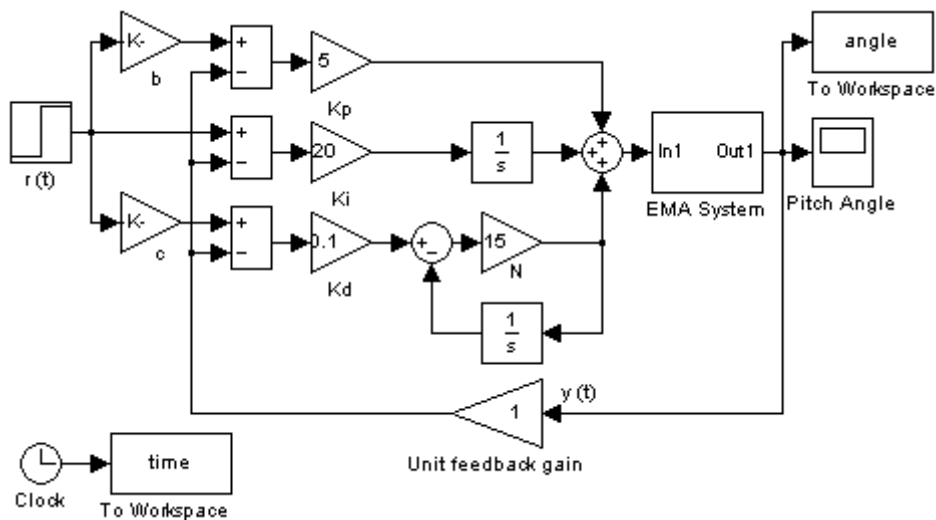
Ο ελεγκτής PID είναι ο πιο εξελιγμένος καθώς παρακολουθεί την κατάσταση της διαδικασίας με την πάροδο του χρόνου και προσπαθεί να λογοδοτήσει για τα θέματα

αδράνειας που συζητήθηκαν. Αυτό το κάνει προσαρμόζοντας την απόκριση μέσω αναλογικού, ολοκληρωτικού και παραγωγού ελέγχου.

Ο **αναλογικός έλεγχος** κλιμακώνει την ώθηση του πυραύλου με βάση το μέγεθος του σφάλματος. Εάν το σφάλμα είναι μεγάλο και αρνητικό (δηλαδή ο πύραυλος είναι πολύ κάτω από τον στόχο) θέλουμε να δώσουμε την ώθηση όσο το δυνατόν πιο δυνατά. Από την άλλη πλευρά, εάν είμαστε κοντά στον στόχο, θέλουμε να εφαρμόσουμε αρκετή ώθηση για να φτάσουμε στον στόχο, αλλά να μην τον υπερβούμε.

Ο **ολοκληρωμένος έλεγχος** είναι ίσως το λιγότερο διαισθητικό στοιχείο που πρέπει να σκεφτούμε. Προσαρμόζει την ώθηση του πυραύλου με βάση το συσσωρευμένο σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να οδηγεί το σφάλμα σταθερής κατάστασης προς το μηδέν. Για παράδειγμα, εάν το σφάλμα συνεχίσει να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, θα εφαρμοστεί περισσότερη ώθηση για να αντιμετωπιστεί αυτό.

Τέλος, ο **έλεγχος παραγώγων** αντιπροσωπεύει το ποσοστό μεταβολής του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Αυτός είναι πραγματικά ο όρος που κάνει ολόκληρο το σύστημα να λειτουργεί καθώς είναι υπεύθυνο για την ανόπτηση της επιτάχυνσης προς το μηδέν καθώς πλησιάζουμε στον στόχο. Εάν το σφάλμα αλλάζει γρήγορα, η ώθηση πρέπει επίσης να αλλάξει γρήγορα.



Εικόνα 50: PID controller που μας επιτρέπει να προβλέψουμε μελλοντικά σφάλματα. (researchgate.net)

Ενώ ο πύραυλος βρίσκεται σε πτήση, οι παράμετροι ελέγχου του μοντέλου αλλάζουν ανάλογα με τις διαφορετικές καταστάσεις πτήσης και επίσης οι τρεις παράμετροι του ελεγκτή PID μεταβάλλονται λόγω των παραμέτρων στάθμισης σημείου ρύθμισης. Οι παράμετροι  $k_p$ ,  $k_i$  και  $k_d$  είναι σταθερές στάθμισης που εφαρμόζονται σε καθεμία από τις 3 συνιστώσες. Επειδή οι όροι αναλογικοί, ολοκληρωτικοί και παράγωγοι αλληλεπιδρούν με μη διαισθητικούς τρόπους, η κατάλληλη ρύθμισή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εργασία και απαιτεί λίγο χειροκίνητο συντονισμό.

## 8.6 Manned Maneuvering Unit (MMU)

Ένα πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί από τους μηχανικούς ήταν το ζήτημα της συντήρησης των διαστημικών οχημάτων που βρίσκονταν στο διάστημα. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι δορυφόροι ήταν εξαιρετικά ακριβοί εκείνη τη στιγμή, θεωρήθηκε ότι η επισκευή ενός θα ήταν πιο οικονομική από την εκτόξευση ενός νέου. Προκειμένου να βοηθήσει τους αστροναύτες στο νέο τους ρόλο της επισκευής και σέρβις, η NASA ανέπτυξε ένα νέο σύστημα πρόωσης που θα φορούσε ο αστροναύτης πάνω από το σακίδιο της διαστημικής στολής του. Αυτή η νέα συσκευή ονομάστηκε **Manned Maneuvering Unit**, δηλαδή **Επανδρωμένη Μονάδα Ελιγμών** ή **MMU** για συντομία.



Εικόνα 51: Επανδρωμένη Μονάδα Ελιγμών (MMU). (lockheedmartin.com)

Η Manned Maneuvering Unit σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την Martin Marietta Corporation. Ζύγιζε πάνω από 300 λίβρες στη Γη και τροφοδοτούνταν από δύο μπαταρίες με



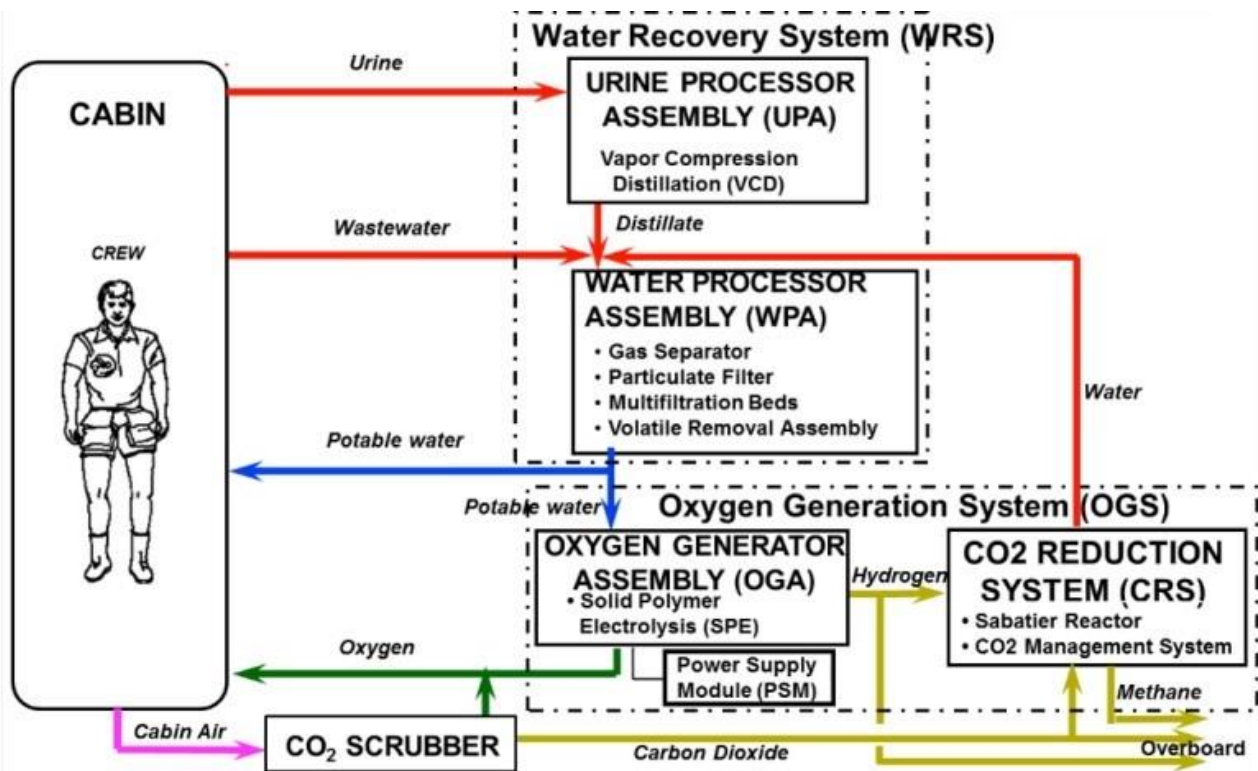
852 Watt σε πλήρη φόρτιση. Σχεδιάστηκε για το πολύ 6 ώρες λειτουργίας. Ο αστροναύτης έλεγχε το MMU με δύο χειριστήρια που ήταν τοποθετημένα στα πλαϊνά υποβραχίονια. Το MMU διαθέτει επίσης μια λειτουργία διατήρησης στάσης, στην οποία δεδομένα από γυροσκόπια με ανίχνευση κίνησης κατευθύνουν την εκτόξευση προωθητών για να διατηρήσουν τον επιθυμητό προσανατολισμό στο διάστημα.

Ως προωθητικό για το MMU χρησιμοποιήθηκε αέριο άζωτο. Δύο αλουμινένιες δεξαμενές με περιτυλίγματα Kevlar περιείχαν 5,9 κιλά άζωτο η καθεμία. Υπήρχαν 24 προωθητές ακροφυσίων τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις στο MMU. Ο σωστός ελεγκτής παρήγαγε περιστροφική επιτάχυνση για κύλιση, βήμα και εκτροπή. Το αριστερό χειριστήριο παρήγαγε μεταφορική επιτάχυνση για κίνηση εμπρός-πίσω, πάνω-κάτω και αριστερά-δεξιά. Ο συντονισμός των δύο ελεγκτών παρήγαγε περίπλοκες κινήσεις στη μονάδα. Μόλις επιτευχθεί ο επιθυμητός προσανατολισμός, ο αστροναύτης μπορούσε να ενεργοποιήσει μια αυτόματη λειτουργία διατήρησης στάσης που διατηρούσε την αδρανειακή στάση της μονάδας κατά την πτήση. Αυτό ελευθέρωσε και τα δύο χέρια για δουλειά. Τελικά, η Επανδρωμένη Μονάδα Ελιγμών χρησιμοποιήθηκε μόνο σε τρεις πτήσεις προτού αποσυρθεί, όλες το έτος 1984, αλλά παραμένει ένα υπέροχο και ιστορικό κομμάτι της μηχανικής διαστημικών πτήσεων.

## 8.7 ECLSS

Το Σύστημα Περιβαλλοντικού Ελέγχου και Υποστήριξης Ζωής (ECLSS) είναι ένα σύστημα αναγεννητικού υλικού υποστήριξης ζωής που παρέχει καθαρό αέρα και νερό στο πλήρωμα του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (ISS) και στα ζώα εργαστηρίου μέσω τεχνητών μέσων. Η δημιουργία του ECLSS επιτρέπει τη διαμονή περισσότερων πληρωμάτων στον Διαστημικό Σταθμό, παρατείνει τον χρόνο παραμονής του πληρώματος στο διάστημα και μειώνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας του Διαστημικού Σταθμού.

Το ECLSS αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία, το Σύστημα Ανάκτησης Νερού (WRS) και το Σύστημα Παραγωγής Οξυγόνου (OGS). Το WRS παρέχει καθαρό νερό ανακυκλώνοντας τα ούρα του πληρώματος, το συμπύκνωμα υγρασίας καμπίνας και τα απόβλητα Extra Vehicular Activity (EVA). Το ανακτημένο νερό πρέπει να πληροί αυστηρά πρότυπα καθαρότητας προτού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη του πληρώματος, των πειραματόζων, του EVA και των δραστηριοτήτων ωφέλιμου φορτίου. Το WRS αποτελείται από μια διάταξη επεξεργασίας ούρων (UPA) και μια διάταξη επεξεργασίας νερού (WPA). Το σύστημα παραδόθηκε στο ISS στο STS-126 στις 14 Νοεμβρίου 2008, με το UPA να ενεργοποιήθηκε στις 20 Νοεμβρίου 2008 και το WPA να ενεργοποιήθηκε στις 22 Νοεμβρίου 2008.



Εικόνα 52: Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του Συστήματος Περιβαλλοντικού Ελέγχου και Υποστήριξης Ζωής. (edx)

Το OGS παράγει οξυγόνο για τον αέρα που αναπνέει, καθώς και αντικαθιστά το οξυγόνο που χάνεται ως αποτέλεσμα της χρήσης πειράματος, της αποσυμπίεσης του αεραγωγού, της διαρροής της μονάδας και της εξαέρωσης διοξειδίου του άνθρακα. Το OGS αποτελείται κυρίως από τη διάταξη παραγωγής οξυγόνου (OGA) και μια μονάδα τροφοδοσίας. Το οξυγόνο παράγεται με επιλέξιμο ρυθμό και είναι ικανό να λειτουργεί συνεχώς και κυκλικά. Το σύστημα παραδόθηκε στον ISS στην αποστολή Space Shuttle Discovery STS-121 τον Ιούλιο του 2006 και δοκιμάστηκε στον ISS τον Ιούλιο του 2007.

Πριν από τον ISS, τα συστήματα υποστήριξης ζωής στο διαστημόπλοιο Mercury, Gemini και Apollo στη δεκαετία του 1960 σχεδιάστηκαν για να χρησιμοποιούνται μία φορά και να απορρίπτονται. Οι ΗΠΑ είχαν περιορισμένη εμπειρία με πτήσεις με πλήρωμα μεγάλης διάρκειας, με εξαίρεση τον Skylab, έναν διαστημικό σταθμό προσαρμοσμένο από το τρίτο στάδιο ενός πυραύλου Saturn V. Το Skylab αποτελούνταν από τρεις αποστολές το 1973 και το 1974 που διήρκησαν είκοσι οκτώ, πενήντα εννέα και ογδόντα τέσσερις ημέρες, αντίστοιχα. Το ECLSS στο Skylab διέθετε αποθηκευμένο νερό και οξυγόνο, ένα ανανεώσιμο μοριακό κόσκινο για την αφαίρεση διοξειδίου του άνθρακα και υγρασίας και ανιχνευτές πυρκαγιών που χρησιμοποιούν ανίχνευση υπεριώδους φωτός. Σε αντίθεση με προηγούμενα διαστημόπλοια, το Διαστημικό Λεωφορείο ήταν ένα επαναχρησιμοποιήσιμο όχημα. Αν και ενσωμάτωσε κάποιες προόδους στο σύστημα υποστήριξης της ζωής του, εξακολουθούσε να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση αναλώσιμων. Συστήματα που βασίζονταν σε μεγάλο βαθμό σε αναλώσιμα περιόριζαν τον χρόνο παραμονής του πληρώματος στο διάστημα και απαιτούσαν συνεχείς, δαπανηρές εκτοξεύσεις φρέσκων αποθεμάτων νερού, οξυγόνου και αναλώσιμου εξοπλισμού υποστήριξης ζωής.

## 9. Ένας καλύτερος τρόπος για επίδοξα μελλοντικά διαπλανητικά ταξίδια

Οι πυρηνικοί πύραυλοι είναι επομένως μια αποδεδειγμένη τεχνολογία που θα μπορούσε να επιτρέψει ένα συναρπαστικό εύρος πιθανών μελλοντικών πολιτικών και στρατιωτικών αποστολών στο διάστημα. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να μειώσουν τον χρόνο πτήσης στον Άρη σε σύγκριση με άλλες αποδεδειγμένες ιδέες πρόωσης. Αυτό με τη σειρά του θα μείωνε τις απαιτήσεις για υποστήριξη ζωής.

Οι πυρηνικοί θερμικοί πύραυλοι θα μπορούσαν επίσης να επιτρέψουν ευρύτερα παράθυρα εκτόξευσης προς νέους στόχους και μεγαλύτερες ευκαιρίες για επιστροφές πίσω στη γη. Αυτό σημαίνει ότι η πυρηνική πρόωση θα μπορούσε πραγματικά να μειώσει τον συνολικό κίνδυνο ακτινοβολίας για ένα ανθρώπινο πλήρωμα και τελικά να κάνει ασφαλέστερες αποστολές σε σύγκριση με χημικούς ή ηλεκτρικούς κινητήρες.

Οι αντιδραστήρες σχάσης μπορούν να σχεδιαστούν για να επιβιώνουν σε περίπτωση αποτυχημένης εκτόξευσης χωρίς να απειλούνται τυχαίες διαρροές ακτινοβολίας. Έχουν τη δυνατότητα για πιο ευέλικτα διαστημόπλοια, ικανά να αποφεύγουν απειλές ή να αλλάζουν τροχιές για πιο ευέλικτες αποστολές στο ολόενα και πιο αμφισβητούμενο διαστημικό περιβάλλον.

Όπως και στα επίγεια πυρηνικά συστήματα, η χρήση των διαστημικών πυρηνικών συστημάτων έχει περιοριστεί περισσότερο από θέματα πολιτικά, αλλά κυρίως από την αντίληψη που μας έχει περάσει στο μυαλό, παρά από την τεχνολογική ετοιμότητα. Εάν θέλουμε πραγματικά ένα μέλλον που περιλαμβάνει ανθρώπους στον Άρη και τακτικές επιχειρήσεις στο σεληνιακό διάστημα, η πυρηνική ενέργεια, και ειδικά η εφαρμογή της στην πρόωση πυρηνικών πυραύλων, πρέπει να είναι μια επιλογή.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Ελληνική

1. Πολυζάκης Λ. Απόστολος, Αεροδιαστημικά Προωθητικά Συστήματα, 2η έκδοση, εκδόσεις Power Heat Cool, Πτολεμαΐδα, 2019.

## Ξενόγλωσση

1. D.P. Mishra, Fundamentals of Rocket Propulsion, by Taylor & Francis Group, LLC, 2017
2. William Emrich, Jr., Principles of Nuclear Rocket Propulsion, Elsevier Inc, Cambridge United Kingdom, 2016
3. Howard D. Curtis, Orbital Mechanics for Engineering Students, Embry-Riddle Aeronautical University Daytona Beach, Florida, 2005
4. International Atomic Energy Agency, The Role of Nuclear Power and Nuclear Propulsion in the Peaceful Exploration of Space, Vienna, 2005
5. L.E. George & L.D. Kos, Interplanetary Mission Design Handbook: Earth-to-Mars Mission Opportunities and Mars-to-Earth Return Opportunities 2009-2024, NASA & MSFC, 1998
6. Jarvis A. Caffrey, Carlos F. Gomez, Luke L. Scharber, Shielding Development for Nuclear Thermal Propulsion, NASA

## Ηλεκτρονικές Πηγές

<https://en.wikipedia.org>

<https://www.nasa.gov/centers/glenn/home/index.html>

<http://www.braeunig.us/space/propuls.htm>

<https://www.britannica.com/>

<https://www.ccssc.org/>

<https://pritamashutosh.wordpress.com/>

<https://learning.edx.org/course/course-v1:MITx+16.00x+3T2021/home>

<https://www.udemy.com/course/fundamentals-of-rocket-propulsion/learn/lecture/20473321?start=1320#overview>

