



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. *ΔΟΜΕΝΙΚΟΥ Ραφαήλ-Γεωργίου*, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Θερμότητας . Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη Τετάρτη 25 Μαΐου και ώρα 14:00μ.μ. στην αίθουσα Τηλεκπαίδευσης της Βιβλιοθήκης ΕΜΠ, -Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Θερμοφυσική Μοντελοποίηση Κρυογονικού ^4He , ^3He και μίγματος αυτών.
Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς κρυοψυκτών κοντά στο απόλυτο μηδέν »



Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής Γεωργίου-Ραφαήλ Δομένικου

Θερμοφυσική μοντελοποίηση κρυογονικού ^4He , ^3He και μίγματος αυτών. Μοντελοποίηση κρυοψυκτών κοντά στο απόλυτο μηδέν.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη, μοντελοποίηση και περιγραφή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και συμπεριφορών του Ηλίου καθώς και η εφαρμογή του σε κρυοψύκτες ικανούς να φτάσουν σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν.

Αρχικά, ακολουθώντας την περιγραφή της υπερρευστότητας μέσω των quasiparticles, δημιουργήθηκαν εξισώσεις που να παράγουν το ενεργειακό τους φάσμα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τις υπάρχουσες. Μέσω των ενεργειών των quasiparticles βρέθηκαν εν συνεχεία και οι εξισώσεις για τα θερμοδυναμικά μεγέθη του υπερρευστού Ηλίου-4. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα πολύ καλό εφαλτήριο βήμα για την κατανόηση της σύγχρονης θεώρησης της υπερρευστότητας, ωστόσο η επίλυση συνθέτων διαφορικών εξισώσεων που απαιτεί οδηγεί σε αποτελέσματα που κρίνονται κατά την εργασία αυτή μη ικανοποιητικά σε ακρίβεια. Γι' αυτόν το λόγο, κατασκευάστηκε δυναμικός κώδικας με βάση τα δεδομένα του NIST για το Ήλιο, κατά τον οποίο η παραγόμενη καταστατική εξίσωση είχε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από όλες τις υπάρχουσες. Η αναφερθείσα εξίσωση αποτελεί την πρώτη συνεχή καταστατική εξίσωση του Ηλίου-4 ικανή να περιγράψει όλες τις περιοχές του κάτω από τη θερμοκρασία υγροποίησης του. Χρησιμοποιώντας την καταστατική αυτή εξίσωση δημιουργήθηκε και παρουσιάστηκε ο πρώτος θερμοδυναμικός χάρτης του Ηλίου-4 σε κρυογονικές θερμοκρασίες, στον οποίο απεικονίζονται τα θερμοδυναμικά μεγέθη καθώς και οι αλλαγές φάσεων που λαμβάνουν χώρα. Κατόπιν, πέραν της καταστατικής εξίσωσης του εκτενούς κώδικα δημιουργήθηκαν και πολυωνυμικές εξισώσεις που περιγράφουν με μικρότερη, αλλά και πάλι ικανή ακρίβεια, τα θερμοδυναμικά αυτά δεδομένα, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε εφαρμογές που απαιτούν λιγότερη ακρίβεια είτε σε προσομοιώσεις που καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών.

Παράλληλα, στην εργασία αυτή έγινε εκτενής μελέτη της φύσης της υπερρευστότητας στο Ήλιο-4, κατά την οποία δημιουργήθηκε καινούργια θεώρηση στην οποία μέσω της εντροπίας και της συνάρτησης επιμερισμού γίνεται σύνδεση της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής σκοπιάς της υπερρευστότητας. Κατά τη θεώρηση αυτή, η συνάρτηση κατανομής, και συνεπώς και η εντροπία, ξεκινώντας μικροσκοπικά χωρίζονται σε έναν ιδανικό και έναν μη-ιδανικό όρο. Ο μη ιδανικός αυτός όρος αποτελεί ουσιαστικά ένα θεωρητικό αέριο το οποίο έχει τα χαρακτηριστικά του Ηλίου-4, δηλαδή είναι μποζονικό, αλλά δεν έχει ατομικές αλληλεπιδράσεις. Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με το πλήρες Ήλιο, ικανοποιεί τις απαιτήσεις της συμπύκνωσης Bose-Einstein. Με τον τρόπο αυτό δείχθηκε ότι η θερμοκρασία που πραγματοποιείται η συμπύκνωση Bose-Einstein στο θεωρητικό αέριο του ιδανικού όρου ταυτίζεται με τη θερμοκρασία λάμδα του πλήρους Ηλίου κατά την οποία γίνεται η μετάβαση στην υπερρευστότητα. Υπολογίζοντας εν συνεχεία και τον μη ιδανικό όρο, πλέον δίνεται μια θεωρητική σύνδεση μεταξύ της συμπύκνωσης Bose-Einstein και της υπερρευστότητας, με βάση την οποία μπορεί να γεφυρωθεί η διαφοροποίηση μεταξύ της θεωρίας των δύο ρευστών και τη θεωρίας των quasiparticles περί της υπερρευστότητας.

Κατόπιν, το δεύτερο ισότοπο του Ηλίου μελετήθηκε, το Ήλιο-3. Κατά αρχάς, έγινε κατάστρωση των θερμοδυναμικών εξισώσεων και αυτού του ισότοπου κατά την οποία δημιουργήθηκαν εξισώσεις για όλες τις θερμοδυναμικές του μεταβλητές. Το Ήλιο-3, λόγω της ενδοατομικής σύστασής του, είναι φερμιονικό. Για το λόγω αυτό αντλώντας από το πεδίο της υπεραγωγιμότητας, έγινε εφαρμογή της θεωρίας BCS των ζευγών Cooper κατά την οποία δύο φερμιόνια δημιουργούν ένα ζευγάρι συζευγμένων φερμιονίων που τελικά έχει ακέραιο spin. Κατά την παρούσα εργασία έγινε εφαρμογή της θεώρησης αυτής στο Ήλιο-3 και εν συνεχεία πάνω στο αέριο των συζευγμένων φερμιονίων έγινε εφαρμογή της παραπάνω θεώρησης της υπερρευστότητας που δημιουργήθηκε για το Ήλιο-4. Μέσω αυτού υπολογίστηκε και στο Ήλιο-3 η

θερμοκρασία συμπίκνωσης του ιδανικού κομματιού που βρέθηκε πάλι να ταυτίζεται με τη θερμοκρασία λάμδα του πλήρους Ηλίου-3, καθώς και υπολογίστηκε η R2 σταθερά της υπεραγωγιμότητας που βρέθηκε να έχει τιμή πολύ κοντά στην αναμενόμενη δείχνοντας την σωστή εφαρμογή της θεωρίας των ζευγών Cooper στο Ήλιο-3.

Σε πολλές εφαρμογές γίνεται χρήση όχι καθαρών ισοτόπων αλλά του μίγματος του Ηλίου 3-4. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια της εργασίας καταστρώθηκαν οι καταστατικές εξισώσεις και του μίγματος αυτού. Κατά τη δημιουργία των καταστατικών αυτών εξισώσεων δημιουργήθηκε κώδικας με βάση όλα τα γνωστά θερμοδυναμικά δεδομένα για το μίγμα αξιοποιώντας παράλληλα τις καταστατικές εξισώσεις των καθαρών ισοτόπων όπως αυτές δημιουργήθηκαν από τα προηγούμενα κεφάλαια για μεγαλύτερα ακρίβεια. Το σύστημα των καταστατικών εξισώσεων που προέκυψε έχει εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια τόσο ως προς τις τιμές όσο και ως προς τις παραγώγους, ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει και περιγράφει και φαινόμενα όπως η ωσμωτική πίεση και το ποσοστό υπερρευστού, ιδιαίτερα σημαντικά για όποιες εφαρμογές χρησιμοποιούν μίγμα Ηλίου. Μέσω των εξισώσεων αυτών δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν και οι πρώτοι θερμοδυναμικοί χάρτες του μίγματος Ηλίου 3-4.

Τέλος όσον αφορά τη θεωρία περί του Ηλίου κατά την εργασία αυτή δημιουργήθηκε μία καινούργια θεώρηση για το φαινόμενο της υπερστερεότητας στο Ήλιο. Το φαινόμενο της υπερστερεότητας δεν είναι πλήρως αποδεδειγμένο στην παρούσα χρονική στιγμή, ωστόσο τα τρέχοντα επιστημονικά πειράματα υποστηρίζουν την ύπαρξη του. Η θεώρηση που παρουσιάζεται εξηγεί την υπερστερεότητα ως αποτέλεσμα ενός υπερρευστού που σχηματίζεται από τις ατέλειες (κενά) στο κρυσταλλικό πλέγμα του στερεού Ηλίου, και ενώ δεν είναι μια πλήρης θεώρησης της υπερστερεότητας σε αυτή τη φάση, δείχνει να επιβεβαιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τις πειραματικές παρατηρήσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της περιγραφής του κρυογονικού Ηλίου σε όλες του περιοχές και εκδοχές η εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση και προσομοίωση κρυοψυκτών εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών με χρήση Ηλίου. Αρχικά, γίνεται μονοδιάστατη μοντελοποίηση ισοθερμοκρασιακής μηχανής Stirling υπερρευστού κατά την οποία ακολουθήθηκαν οι θεωρήσεις της βιβλιογραφίας για το εργαζόμενο μέσο, δηλαδή θεώρηση του Ηλίου-3 ως ιδανικό αέριο και του υπερρευστού Ηλίου-4 ως πλήρως θερμοδυναμικά αδρανούς. Κατόπιν, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το αδιαβατικό μοντέλο όπου δείχθηκε ότι στις θερμοκρασίες αυτές τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων ταυτίζονται. Λόγω της έλλειψης δεδομένων για τις ιδιότητες των υλικών του αναγεννητή σχεδιάστηκε νέα μηχανή δύο ενωμένων Stirling, η οποία κάνει χρήση εναλλάκτη θερμότητας αντί για αναγεννητή. Βελτίωση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε στην συνέχεια, όταν πλέον για τη συμπεριφορά του εργαζόμενου μέσου έγινε χρήση των πλήρων καταστατικών εξισώσεων σε μονή αλλά και διπλή μηχανή Stirling. Μέσω των προσομοιώσεων αυτών βρέθηκε η βέλτιστη διαφορά φάση μεταξύ των δύο μηχανών καθώς και η ψυκτική ικανότητα και απόδοσή τους.

Τέλος, η διαδικασία των προσομοιώσεων των κρυογονικών μηχανών Stirling υπερρευστού έγινε και σε τρισδιάστατη μορφή, χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS Fluent. Αρχικά, έγινε κατάλληλος τρισδιάστατος σχεδιασμός της μηχανής και εισαγωγή των θερμοδυναμικών δεδομένων του κρυογονικού Ηλίου στο πρόγραμμα. Μέσω αριθμού προσομοιώσεων βρέθηκαν και στην τρισδιάστατη προσομοίωση οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής, σχετικά με την διαφορά φάσης και την ταχύτητα περιστροφής, οι οποίες βρέθηκαν να είναι πολύ κοντινές με τα αποτελέσματα των μονοδιάστατων προσομοιώσεων, με τις διαφοροποιήσεις να έγκειται κυρίως σε ρευστομηχανικά φαινόμενα που δεν μπορούσαν να περιγραφούν στα μονοδιάστατα μοντέλα. Η παραπάνω έρευνα αποτελεί την πρώτη εφαρμογή υπερρευστού σε υπολογιστικό περιβάλλον τέτοιου τύπου. Ολοκληρώνοντας τη μελέτη της μηχανής αυτής οι χαρακτηριστικές καμπύλες ψυκτικής ικανότητας-στροφών και απόδοσης-στροφών υπολογίστηκαν και παρουσιάστηκαν.